



**HAL**  
open science

## Laboratoire de glaciologie et géophysique de l'environnement : rapport d'activité 1991-1995

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 1991-1995. 1996. hal-01573095

**HAL Id: hal-01573095**

**<https://hal-lara.archives-ouvertes.fr/hal-01573095>**

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.



**Laboratoire de Glaciologie et Géophysique  
de l'Environnement**

*Unité Propre de Recherche du CNRS n° 5151*

**RAPPORT D'ACTIVITE**

**1991-1995**

(A)



Domaine Universitaire de Grenoble St Martin d'Hères  
B.P. 96, 38401 St Martin d'Hères Cedex

Téléphone : 33/76824200 - Télécopie : 33/76824201

ST - CNRS  
ARRIVÉE  
22 NOV 1995  
GDP

MC  
95

Vasirek

G 141105



Centre National de la Recherche Scientifique

TOAE  
MTO

# Laboratoire de Glaciologie et Géophysique de l'Environnement

*Unité Propre de Recherche du CNRS n° 5151*

## RAPPORT D'ACTIVITE

**1991-1995**

Domaine Universitaire de Grenoble St Martin d'Hères  
B.P. 96, 38402 St Martin d'Hères Cedex

Téléphone : 33/76824200 - Télécopie : 33/76824201

# SOMMAIRE

LGGE 1991-1995 : UN BILAN	1
PRÉSENTATION GÉNÉRALE DU LABORATOIRE	5
- Organigramme	
- Conseil du laboratoire	
- Comité scientifique	

## CHAPITRE 1 ÉVOLUTION DU CLIMAT

### 1. ARCHIVES GLACIAIRES

I	OBJECTIFS GÉNÉRAUX	21
II	RÉSULTATS MAJEURS OBTENUS AU COURS DES QUATRE DERNIÈRES ANNÉES	21
II.1	Fonctions de transfert - Enregistrement des signaux	21
II.1.1	<i>Fractionnement isotopique de la glace et enregistrement du signal</i>	21
II.1.2	<i>Air piégé dans la glace</i>	22
II.2	Archives glaciaires : l'enregistrement climatique	24
II.2.1	<i>Le forage GRIP</i>	24
II.2.2	<i>Archives antarctiques</i>	25
II.3	Archives glaciaires : traces gazeuses et climat	28
II.3.1	<i>Méthane</i>	28
II.3.2	<i>CO<sub>2</sub></i>	31
II.3.3	<i>Autres traces gazeuses</i>	33
II.4	Glaces polaires et sensibilité du climat	34
II.5	Problème des glaces basales	35
III	COLLABORATIONS ET CONTRATS	35
III.1	Collaborations	
III.2	Contrats	
IV	ACTIVITÉS DE FORMATION	36
V	PUBLICATIONS	37
V.1	Revue à comité de lecture	
V.2	Autres publications	

## **2. MODÉLISATION**

<b>I</b>	<b>OBJECTIFS GÉNÉRAUX</b>	<b>43</b>
<b>II</b>	<b>RÉSULTATS MAJEURS OBTENUS AU COURS DES QUATRE DERNIÈRES ANNÉES</b>	<b>43</b>
II.1	Modélisation globale de distributions de traceurs atmosphériques	43
II.1.1	<i>Poussières désertiques et sel marin dans le modèle de circulation générale d'atmosphère du Goddard Institute for Space Studies (GISS, NASA)</i>	45
II.1.2	<i>Autres traceurs atmosphériques : Radon 222, Plomb 210, Béryllium 7 et Béryllium 10</i>	45
II.2	Modélisation du climat des régions polaires	46
II.2.1	<i>Climat antarctique du MCG de GISS</i>	47
II.2.2	<i>Climats polaires dans le MCG Arpège de Météo-France</i>	47
II.2.3	<i>Climats polaires analysés et prédits par le Centre Européen de Prévisions Météorologiques à Moyen Terme (CEPMMT)</i>	47
II.2.4	<i>Climat antarctique du nouveau MCG du LMD avec zoom polaire</i>	49
II.3	Modélisation physique du manteau neigeux polaire	49
<b>III</b>	<b>COLLABORATIONS ET CONTRATS</b>	<b>50</b>
III.1	Collaborations internationales	
III.2	Collaborations nationales	
III.3	Contrats	
<b>IV</b>	<b>ACTIVITÉS DE FORMATION</b>	<b>50</b>
<b>V</b>	<b>PUBLICATIONS</b>	<b>51</b>
V.1	Revue à comité de lecture	
V.2	Autres publications	

## **3. TÉLÉDÉTECTION**

<b>I</b>	<b>OBJECTIFS GÉNÉRAUX</b>	<b>55</b>
<b>II</b>	<b>RÉSULTATS MAJEURS OBTENUS AU COURS DES QUATRE DERNIÈRES ANNÉES</b>	<b>55</b>
II.1	Études sur la neige et l'Antarctique	55
II.1.1	<i>Structure de la neige et rayonnement microonde</i>	55
II.1.2	<i>Structure de la neige et rayonnement dans le spectre solaire</i>	58
II.2	Études sur la glace de mer	60
II.2.1	<i>Programme Arctemiz</i>	60
<b>III</b>	<b>COLLABORATIONS ET CONTRATS</b>	<b>60</b>
III.1	Collaborations internationales	
III.2	Collaborations nationales	
III.3	Contrats	
III.4	Comités scientifiques	
<b>IV</b>	<b>ACTIVITÉS DE FORMATION</b>	<b>61</b>
<b>V</b>	<b>PUBLICATIONS</b>	<b>62</b>
V.1	Revue à comité de lecture	
V.2	Autres publications	

## CHAPITRE 2 GLACIOCHIMIE

<b>I</b>	<b>OBJECTIFS GÉNÉRAUX</b>	<b>69</b>
<b>II</b>	<b>RÉSULTATS MAJEURS OBTENUS AU COURS DES QUATRE DERNIÈRES ANNÉES</b>	<b>70</b>
	II.1 <b>Archivage</b>	<b>70</b>
	II.1.1 <i>Aérosols marins et terrigènes</i>	<b>70</b>
	II.1.2 <i>Cycle du Soufre (sulfate et méthanesulfonate)</i>	<b>71</b>
	II.1.3 <i>Cycle de l'azote (nitrate et ammonium)</i>	<b>72</b>
	II.1.4 <i>Cycle des acides organiques (formique et acétique) et autres composés carbonés</i>	<b>75</b>
	II.1.5 <i>Cycle des halogènes (chlore et fluor)</i>	<b>75</b>
	II.1.6 <i>Modélisation de la capacité oxydante des atmosphères préindustrielle et glaciaire</i>	<b>76</b>
	II.1.7 <i>Cycle des métaux</i>	<b>77</b>
	II.2 <b>Relation "Air-Neige" au Groenland</b>	<b>82</b>
	II.3 <b>Cycle du soufre en Antarctique</b>	<b>87</b>
	II.4 <b>Interactions gaz traces atmosphériques - glace</b>	<b>89</b>
	II.4.1 <i>Diffusion et solubilité de gaz traces dans la glace</i>	<b>89</b>
	II.4.2 <i>Adsorption de gaz traces sur la glace</i>	<b>91</b>
	II.4.3 <i>Réactions chimiques hétérogènes sur et dans la glace</i>	<b>92</b>
	II.4.4 <i>Applications à la fonction de transfert "air-neige"</i>	<b>93</b>
	II.4.5 <i>Application à la stratosphère polaire</i>	<b>93</b>
	II.4.6 <i>Application à la prédiction de la composition de l'eau de fonte des neiges</i>	<b>94</b>
	II.4.7 <i>Propriétés optiques des aérosols stratosphériques polaires</i>	<b>94</b>
<b>III</b>	<b>COLLABORATIONS ET CONTRATS</b>	<b>95</b>
	III.1 <b>Collaborations internationales</b>	
	III.2 <b>Collaborations nationales</b>	
	III.3 <b>Contrats</b>	
<b>IV</b>	<b>ACTIVITÉS DE FORMATION</b>	<b>96</b>
<b>V</b>	<b>PUBLICATIONS</b>	<b>97</b>
	V.1 <b>Revue à comité de lecture</b>	
	V.2 <b>Autres publications</b>	

## CHAPITRE 3 RHÉOLOGIE DES GLACES ET MODÉLISATION DES CALOTTES POLAIRES

<b>I</b>	<b>OBJECTIFS GÉNÉRAUX</b>	<b>107</b>
<b>II</b>	<b>RÉSULTATS MAJEURS OBTENUS AU COURS DES QUATRE DERNIÈRES ANNÉES</b>	<b>107</b>
	II.1 <b>Rhéologie des glaces polaires</b>	<b>107</b>
	II.1.1 <i>Modélisation du comportement mécanique du polycristal de glace par une approche auto-cohérente</i>	<b>107</b>
	II.1.2 <i>Densification du névé polaire</i>	<b>108</b>
	II.1.3 <i>Les cristaux d'hydrates d'air dans les glaces polaires</i>	<b>109</b>
	II.1.4 <i>Rôle des joints liquides dans le comportement mécanique en fluage de la glace</i>	<b>109</b>
	II.2 <b>Comportement de la glace aux vitesses de déformation élevées</b>	<b>110</b>
	II.2.1 <i>Fluage transitoire de la glace</i>	<b>110</b>
	II.2.2 <i>Endommagement de la glace colonnaire</i>	<b>111</b>

II.2.3	<i>Étude du frottement Glace-Béton par essai de cisaillement direct</i>	114
II.3	Modélisation des calottes polaires	115
II.3.1	<i>Évolution des calottes glaciaires sous l'action du climat</i>	115
II.3.2	<i>Études destinées à améliorer la prise en compte de certains mécanismes</i>	117
III	COLLABORATIONS ET CONTRATS	118
III.1	Collaborations internationales	
III.2	Collaborations nationales	
III.3	Contrats	
IV	ACTIVITÉS DE FORMATION	119
V	PUBLICATIONS	120
V.1	Revue à comité de lecture	
V.2	Autres publications	

## CHAPITRE 4 PLANÉTOLOGIE ET ASTROPHYSIQUE EXPÉRIMENTALE

I	OBJECTIFS GÉNÉRAUX	127
II	RÉSULTATS MAJEURS OBTENUS AU COURS DES QUATRE DERNIÈRES ANNÉES	127
II.1	Étude de l'évolution des comètes	127
II.2	Les surfaces glacées des corps du système solaire	128
II.2.1	<i>Données acquises en laboratoire</i>	129
II.2.2	<i>Modélisations numériques</i>	132
II.2.3	<i>Analyse des spectres de surfaces</i>	134
II.3	Les grains interstellaires	135
II.3.1	<i>Mesure des propriétés optiques dans l'infrarouge (2 - 200 <math>\mu\text{m}</math>) de glaces</i>	136
II.3.2	<i>Calcul des constantes optiques Programme Kramers-Kronig Itératif</i>	137
III	COLLABORATIONS ET CONTRATS	137
III.1	Collaborations internationales	
III.2	Collaborations nationales	
III.3	Contrats	
IV	ACTIVITÉS DE FORMATION	138
V	PUBLICATIONS	139
V.1	Revue à comité de lecture	
V.2	Autres publications	

## CHAPITRE 5 GLACIERS TEMPÉRÉS

I	OBJECTIFS GÉNÉRAUX	145
I.1	Glaciers Alpains	
I.1.1	<i>Fluctuations glaciaires</i>	
I.1.2	<i>Évolution climatique</i>	
I.2	Radioactivité	
II	RÉSULTATS MAJEURS OBTENUS AU COURS DES QUATRE DERNIÈRES ANNÉES	145
II.1	Glaciers Alpains	145
II.1.1	<i>Les fluctuations des bilans de masse comme indicateur climatique</i>	145

II.1.2	<i>Les fluctuations des fronts et leur signification</i>	146
II.1.3	<i>Glissement du glacier d'Argentière</i>	148
II.1.4	<i>Étude d'un glacier couvert : Arsine</i>	148
II.1.5	<i>Étude de la déformation de la glace dans un moulin</i>	148
II.1.6	<i>Étude de la dynamique d'un glacier froid à haute altitude : le Dôme du Goûter</i>	148
II.1.7	<i>Simulation numérique de l'écoulement du Dôme du Goûter</i>	149
II.1.8	<i>Mesures d'un champ de vitesses en surface à Dôme C (Antarctique)</i>	149
II.2	<b>Groupe radioactivité</b>	149
II.2.1	<i>Svalbard : détermination des bilans de masse des glaciers et des retombées de radioéléments</i>	150
II.2.2	<i>Dôme du Goûter 1993-94</i>	151
II.2.3	<i>Sédimentation lacustre</i>	153
II.2.4	<i>Flux des radioéléments</i>	154
II.2.5	<i>Datation des couches de cendre volcanique du glacier Hurd (péninsule Antarctique)</i>	154
II.2.6	<i>Autres études</i>	155
III	<b>COLLABORATIONS - CONTRATS ET EXPERTISES</b>	155
III.1	Collaborations	
III.2	Contrats	
III.3	Expertises	
IV	<b>ACTIVITÉS DE FORMATION</b>	156
V	<b>PUBLICATIONS</b>	157
V.1	Revue à comité de lecture	
V.2	Autres publications	

## CHAPITRE 6 SERVICES COMMUNS

I	<b>SERVICES TECHNIQUES</b>	163
I.1	<b>Activité des ateliers</b>	163
I.1.1	<i>Laboratoire d'électronique</i>	
I.1.2	<i>Bureau d'étude</i>	
I.1.3	<i>L'atelier de mécanique</i>	
I.2	<b>Zoom sur quelques réalisations</b>	164
II.2.1	<i>GRIP 1989-1993</i>	
II.2.2	<i>Casey</i>	
II.2.3	<i>Opération portos-neige</i>	
II.2.4	<i>Forage Mt blanc</i>	
II.2.5	<i>Vostok</i>	
II.2.6	<i>Autres études</i>	
II	<b>SERVICE INFORMATIQUE</b>	171

## CHAPITRE 7 ACTIVITÉ ENSEIGNEMENT

I	<b>PERSONNEL IMPLIQUÉ</b>	177
II	<b>PANORAMA GÉNÉRAL DES ENSEIGNEMENTS EFFECTUÉS</b>	177
III	<b>EUROPEAN RESEARCH COURSE ON ATMOSPHERES</b>	179
IV	<b>FORMATIONS DOCTORALES</b>	180
	<b>SEMINAIRES LGGE</b>	183



## **LGGE 1991-1995 : UN BILAN**

Le 12 juillet 1992 le carottier ISTUK touche le fond, à 3029 mètres de profondeur, au centre de la calotte glaciaire du Groenland. Une équipe du LGGE a participé au forage aux côtés de ses collègues européens du GRIP (GReenland Ice core Project). Nos chercheurs ont ainsi eu accès aux glaces les plus anciennes de l'hémisphère nord !

Juin 1995, le carottage de Vostok atteint les 300.000 ans en Antarctique ... avec le soutien technique du LGGE.

Ces deux exemples montrent combien le LGGE sait rester à la pointe des recherches en paléoclimatologie et participer aux carottages qui créent l'événement. Mais ces opérations phare ne doivent pas occulter le travail de fond réalisé par les différentes équipes du Laboratoire dans le domaine de la glaciologie, qu'il s'agisse de glaces terrestres ou extra-terrestres, alpines ou polaires, «froides» ou «tempérées», carottées, échantillonnées, étudiées, analysées, modélisées par les techniciens et chercheurs du LGGE.

### **DES MUTATIONS**

L'effectif des thésitifs du Laboratoire a quadruplé entre 1991 et 1995. A lui seul, ce chiffre donne une idée du profond bouleversement qui a marqué ces 4 dernières années.

Cet afflux de jeunes étudiants a exigé plusieurs transformations de nos locaux (par exemple le transfert de notre salle de

réunion) et la location d'un bâtiment préfabriqué pour pouvoir loger tout le monde. Mais les mutations ont concerné aussi nos activités scientifiques elles-même.

La fin des années 80 avait été marquée par notre entrée dans la modélisation, notamment atmosphérique. Ces activités sont désormais bien ancrées et intégrées dans chacune des équipes scientifiques. Plusieurs thèses sont en cours et le bilan dans ce domaine est largement positif. C'est ainsi que l'effort en modélisation d'écoulement des calottes a conduit au développement d'un modèle d'écoulement 3D.

En astrophysique, l'achèvement de l'appareillage complexe permettant l'étude spectrale des interactions entre les gaz traces et les surfaces de glaces dans les conditions extra-terrestres a permis d'engager plusieurs thèses de front. Par ailleurs, une coopération s'amorce avec le groupe de télédétection.

Le thème télédétection a atteint sa maturité et trois thèses ont été soutenues sans toutefois qu'un chercheur permanent réussisse à être recruté dans un domaine pourtant en pleine croissance au niveau national.

Il est aussi intéressant de noter que les activités du type «recherche de laboratoire» se sont fortement renforcées au cours des 4 dernières années, suite à la mise en route du nouveau thème «interactions gaz-glace» portant sur les phénomènes d'interface des PSC (Polar Stratospheric Clouds). Ces approches se sont progressivement élargies

au domaine des neiges polaires et nous possédons désormais un fort potentiel de recherche expérimentale sur les phénomènes mécaniques, physiques et physico-chimiques relatifs à la neige et la glace. Cela permet d'aborder, sous un angle fondamental, certains phénomènes observés sur le terrain ou sur les carottes, et de mieux les comprendre .

Toutes ces mutations touchent en profondeur la nature même des activités du LGGE, sans toutefois modifier les objectifs généraux de chacun des thèmes de recherche majeurs du laboratoire dont un aperçu est donné dans le paragraphe suivant consacré à la présentation des cinq équipes scientifiques.

Au chapitre des mutations, il ne faut pas oublier celle, drastique, de nos services techniques qui sont en voie d'être complètement réorganisés et d'adopter, pour ce qui est du développement de nouveaux carottiers, un mode de fonctionnement résolument européen. C'est en tout cas l'option qui a dû être prise pour le projet de carottage profond EPICA qui vient d'être lancé avec l'aide de la CCE.

Enfin le LGGE a opéré un virage décisif dans ses rapports avec l'Université. Autrefois modeste, l'investissement des différentes équipes tant vis-à-vis des enseignements universitaires que de l'accueil des étudiants a considérablement augmenté. Un nouveau DEA vient même d'être créé, qui correspond bien à nos grands thèmes de recherche.

## DES EQUIPES

Historiquement et traditionnellement, l'équipe **Climat** est celle qui porte l'image du Laboratoire, avec la responsabilité des recherches paléoclimatiques sur les carottes profondes. Une collaboration étroite entre cette équipe et le LMCE Saclay s'est maintenue pour ce qui se rattache aux isotopes stables de l'eau. L'analyse des bulles d'air de la glace est aussi bien connue de tous, notamment en ce qui concerne les gaz à effet de serre. Mais cette équipe englobe également les mesures de microparticules insolubles, la modélisation atmosphérique globale et le développement de la télédétection dont un des principaux objectifs est de déterminer la variabilité spatiale des taux d'accumulation de neige sur l'Antarctique. Toutes ces activités s'inscrivent dans le programme PAsT Global changES du PIGB.

Numériquement parlant, la seconde équipe est celle de **Chimie** qui, en 4 ans, a fortement élargi son champ d'activité puisqu'elle travaille désormais non plus uniquement sur l'analyse des archives glaciaires mais aussi sur la chimie des atmosphères polaires, les fonctions de transfert air-neige et, comme mentionné plus haut, sur les mécanismes de piégeage de certains gaz-traces sur les glaces polaires et stratosphériques. Par sa participation à l'analyse des grands carottages, cette équipe est parfaitement complémentaire de l'équipe «Climat». Son choix de développer de nouvelles activités à tendance plus fondamentale marque sa volonté de s'attaquer à la compréhension même des observations tirées des carottes de glace. Cette option est bien dans la ligne des recommandations du programme IGAC (International Global Atmospheric Chemistry) du PIGB, auquel cette équipe se réfère, tout au moins pour ses activités polaires.

L'équipe **Rhéologie des glaces et modélisation des calottes polaires** a aussi participé très activement à l'analyse des carottes profondes, qu'elle étudie sur le terrain et en laboratoire sous l'angle de la physique et de la mécanique des glaces. Cette équipe a depuis peu pris en charge le groupe de modélisation des calottes, avec l'objectif de mieux prendre en compte les propriétés physiques bien particulières des glaces polaires dans les modèles d'écoulement. Enfin, elle étudie aussi les lois de comportement de la glace aux grandes vitesses de déformation en vue de modéliser les interactions glace-structures. Cette équipe, qui relève partiellement du SPI, a en l'espace de 4 ans recruté un chercheur CNRS et un enseignant-chercheur.

Comme souligné plus haut, l'équipe de **Planétologie et Astrophysique expérimentale** est désormais pleinement opérationnelle grâce à l'appareillage de laboratoire original qu'elle a développé. Elle a trouvé dans la modélisation des comètes et dans l'étude des planètes et satellites englacés du système solaire et des grains intersellaires, un créneau d'un grand intérêt pour les missions spatiales en cours ou projetées. Un petit groupe de physico-chimistes s'est ainsi constitué sur un thème original dont les pré-occupations peuvent paraître, a priori, fort éloignées de l'étude des carottes. Pourtant des points de contact réels existent avec les autres composantes du LGGE : pour preuve

mesure de la réflectance bidirectionnelle en commun avec le groupe de télédétection. En outre, elle participe très activement à l'école ERCA, où elle assure la promotion des cours sur les atmosphères extra-terrestres.

Enfin l'équipe **Glaciers Alps** assure le suivi de l'évolution de plusieurs glaciers des Alpes françaises grâce à des relevés de terrain réguliers. Ces fonctions d'observation visent à modéliser les phénomènes et à les mettre en relation avec les fluctuations climatiques. Cette équipe possède une connaissance approfondie des glaciers alpins et joue un rôle important de conseil et de vulgarisation au niveau régional. Enfin, le groupe assurant les mesures de radioactivité de la neige a décidé d'être rattaché à cette équipe. Ce groupe travaille notamment au Spitzberg où, dans le cadre de plusieurs contrats européens successifs, il mène chaque année des campagnes de suivi des glaciers tempérés de l'archipel.

Ce survol des activités du LGGE ne serait pas complet sans mentionner nos **services techniques** qui sont bien sûr au service des chercheurs mais qui ont aussi pour mission d'innover en matière de carottage. Ils ont su prendre une part très active au carottage européen GRIP et réaliser plusieurs autres carottages à moyenne profondeur au Groenland, dans les Alpes et en Antarctique.

Le LGGE apparaît donc comme un ensemble d'équipes aux méthodes et objectifs certes différents mais aux interactions fréquentes et souvent fructueuses, comme par exemple pour les études des phénomènes d'interface dans le névé. Certaines expériences de terrain sont aussi l'occasion d'approfondir les coopérations inter-équipes.

## DES REUSSITES

Le succès du carottage GRIP, bien qu'acquis dans un cadre largement collectif et européen, rejaillit sans conteste sur l'ensemble des personnels du LGGE qui ont investi 4 ou 5 années durant dans cette opération. Et puis, il ne faut pas l'oublier, GRIP n'a pu voir le jour que grâce au travail de base accompli par les «chimistes» du projet Eurocore auquel le LGGE a fortement contribué entre 1987 et 1992. La réussite de ces opérations européennes lourdes au Groenland a précipité le développement d'EPICA, projet de

carottage profond européen au Dôme C (Antarctique de l'est), où la France, donc aussi le LGGE, est fortement impliquée jusqu'au début du siècle prochain.

Les résultats du GRIP, et notamment la découverte de variations climatiques rapides pendant l'Eémien (le dernier interglaciaire), ont fait le tour du monde. Prière de vous rapporter à votre quotidien habituel pour plus de détails...

La progression du carottage russe de Vostok doit aussi être -en partie- à porter au crédit du LGGE qui assure depuis quelques années un soutien financier et technique à cette opération de longue haleine. Une équipe française se rend chaque été à Vostok pour échantillonner et épauler les techniciens russes qui maintiennent leurs efforts dans des conditions très précaires. Les nouvelles carottes récupérées ont permis de découvrir l'intégralité de la pénultième glaciation.

Enfin n'oublions pas les deux carottages (126 et 140 mètres) de juin 1994 au Col du Dôme, dans le Massif du Mont Blanc. Pour la première fois, le socle a été atteint en ce site que le LGGE étudie depuis plusieurs années dans le cadre de ses recherches sur l'évolution de la pollution à l'échelle du continent européen.

Une autre réussite du Laboratoire à mentionner est de nature différente : il s'agit de l'école internationale ERCA (European Research Courses on Atmospheres) qui chaque année, en janvier, attire plus de 40 thésitifs ou post-doc pour 4 semaines à Grenoble, avec des enseignants venus d'Europe et des Etats-Unis. Pour sa troisième édition, 17 nationalités étaient représentées.

Enfin le LGGE a su jouer un rôle d'animateur aux niveaux national et international puisque ses chercheurs coordonnent des contrats européens, sont membres des comités de programme d'IGBP (PAGES et IGAC), d'IPCC ou du Comité National et, pour la première fois, de l'Académie des Sciences...

## DES ESPOIRS ET PREOCCUPATIONS

Fort de son bilan de ces dernières années, le LGGE devrait pouvoir aborder avec optimisme une nouvelle phase de son histoire qui sera dominée à n'en pas douter par les

développements du projet EPICA. Parallèlement, les thèmes «modélisation», «télé-détection» et «expériences de laboratoire» devraient émerger encore plus fortement grâce aux investissements consentis récemment. Mais les incertitudes et points noirs ne doivent pas être passés sous silence :

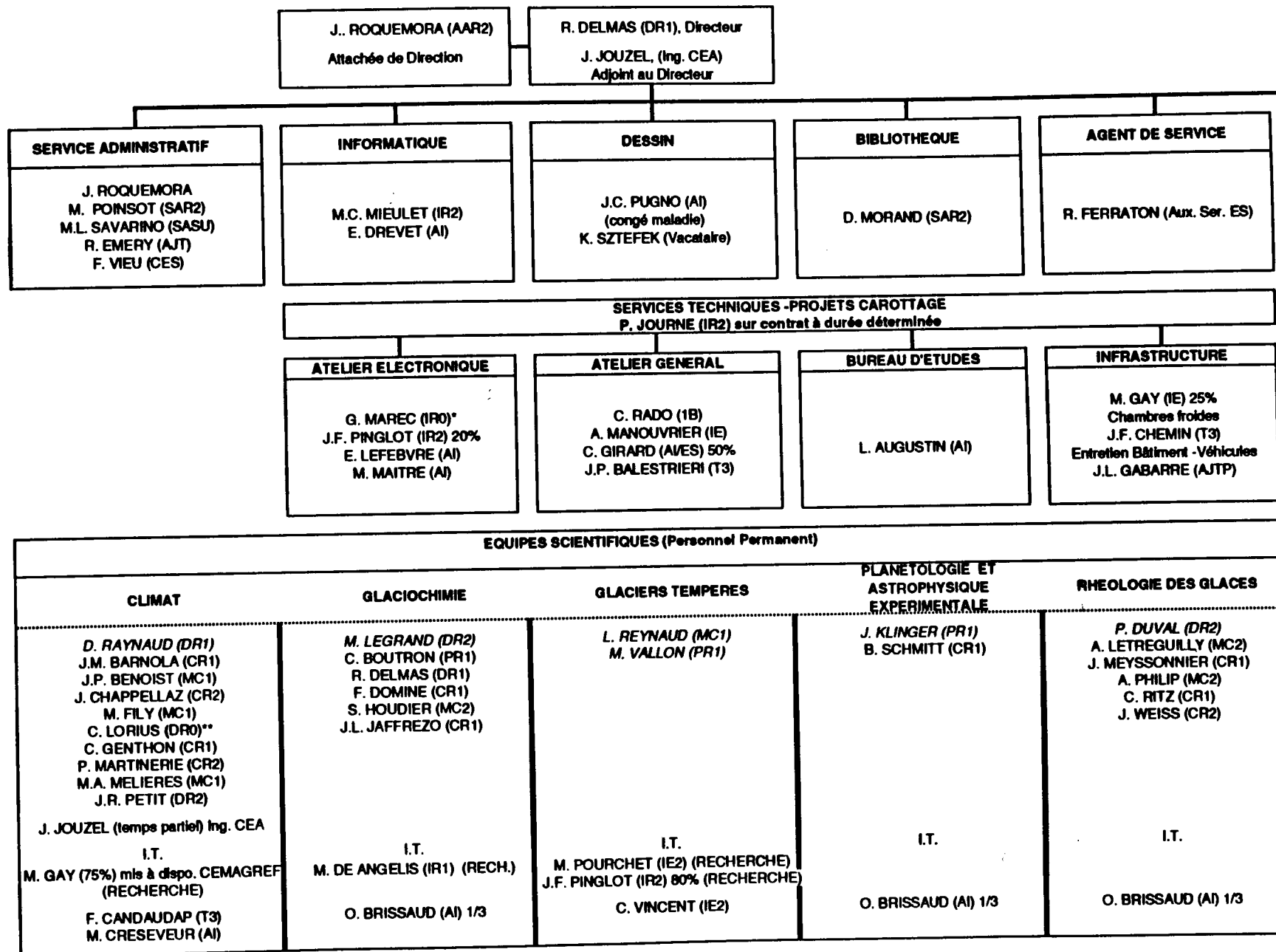
- . les prévisions budgétaires ne prêtent pas à l'optimisme que ce soit pour les activités même du Laboratoire ou pour les missions antarctiques,
- . la rénovation des chambres froides et celle des pièces blanches métaux sont des investissements urgents dont la réalisation n'est pas totalement acquise,

- . la croissance du LGGE est désormais bridée et tributaire de l'extension de ses locaux actuels,
- . le potentiel ITA doit être renforcé et suivre nos efforts d'encadrement et de formation de jeunes.

Mention particulière doit être faite de nos relations avec l'Université Joseph Fourier : le fort couplage Recherche-Enseignement récemment établi au LGGE doit être pérennisé. Les récents développements observés dans les relations CNRS-Université ne laissent rien augurer d'encourageant dans ce domaine ...

R. DELMAS  
J. JOUZEL

## **PRÉSENTATION GÉNÉRALE DU LABORATOIRE**



\* en instance de mutation

\*\* Président de l'Institut Français pour la Recherche et la Technologie Polaires  
 Secrétariat assuré par LGGE en échange vacances

Equipe	CLIMAT	CHIMIE	RHEOLOGIE	GLACIERS	PLANETOLOGIE
Chercheurs CNRS	RAYNAUD (DR1) BARNOLA (CR1) CHAPPELLAZ (CR1) MARTINERIE (CR2) LORIOUS (DR0) PETIT (DR2) GENTHON (CR1)	LEGRAND (DR2) DELMAS (DR1) DOMINE (CR1) JAFFREZO (CR1)	DUVAL (DR2) MEYSSONNIER (CR1) RITZ (CR1)		SCHMITT (CR1)
Enseignants Chercheurs	BENOIST (MC1) FILY (MC1) MELIERES (MC1)	BOUSTRON (P) HOUDIER (MC2)	LE TREGUILLY (MC2) PHILIP-DUBAN (MC2)	REYNAUD (MC1) VALLON (P)	KLINGER (P)
Ingénieurs chercheurs	GAY (IE2) (75 %)	DE ANGELIS (IR1)		POURCHET (IE2) PINGLOT (IR2) 80 %	
Doctorants	BASILE (2) DENUX (2) LEROUX (2) SHERJAL (3) ARMENGAUD (2) DANG (1) KRINNER (1) HAAN (BDI - 2)	UCROZ (2) SAVARINO (2) CHAIX (2) THIBERT (BDI-2) HONG (2)	ARNAUD (2) CASTELNAU (3) PLE (2) FIORIO (1) LE MEUR (2) FAVRE (2) MANGENEY (2) ROMMELAERE (1)	PREISS (2)	BOUZIANI (3) CABOT (3) ENZIAN (2) MAJOLET (1) BENCHKOURA (3) DOUTE (2) QUIRICO (3) TROTТА (3)
DEA	JEANJEAN KINTS	VOISIN CHATAGNON ESPI REY KOOSHMANIAN XUEREF	MANSUY	GAGLIARDINI	
Autres chercheurs	JOUZEL MAGGI SURDYK	LIU PREUNKERT BARRIE	MILSCH	LE FAUCONNIER	
ITA	CANDAUDAP (T3) CRESEVEUR (AI)	BRISSAUD (AI) (1/3)	BRISSAUD (1/3)	VINCENT (IE2)	BRISSAUD (1/3)

EQUIPES DE RECHERCHE - JUIN 1995

## CONSEIL DE LABORATOIRE

### *Membres de droit*

Robert DELMAS  
Jean JOUZEL

Directeur  
Adjoint au Directeur

### *Membres élus*

Jean Marc BARNOLA  
Michel LEGRAND  
Bernard SCHMITT  
Olivier CASTELNAU

Chargé de recherche  
Directeur de recherche  
Chargé de Recherche  
Thésitif

Danièle CORDIER-MORAND  
Laurent AUGUSTIN  
Guy MAREC  
Christian VINCENT

Secrétaire d'Administration de la Recherche  
Assistant Ingénieur  
Ingénieur de Recherche  
Ingénieur d'Etudes

### *Membres nommés*

Claude BOUTRON

Professeur

Marie Christine MIEULET  
Jocelyne ROQUEMORA

Ingénieur de Recherche  
Attaché d'Administration de la Recherche



## COMITE SCIENTIFIQUE DU LGGE

Juin 1995

M. Robert DELMAS                      Directeur  
M. Daniel BLOCH                        Président de l'Université Joseph Fourier

### *Membres nommés par décision du Directeur Général du CNRS du 12 juin 1995*

M. Gérard MEGIE                        Professeur à l'Université de Paris 6  
M. Gérard TOUPANCE                    Professeur à l'Université de Paris 12  
M. Claude FROIDEVAUX                 Directeur de recherche au CNRS  
Mme Sylvie JOUSSAUME                 Chargé de recherche au CNRS  
M. Didier TANRE                         Directeur de recherche au CNRS  
M. Bernhard STAUFFER                 Professeur à l'Université de Berne

### *Représentants des sections du Comité National*

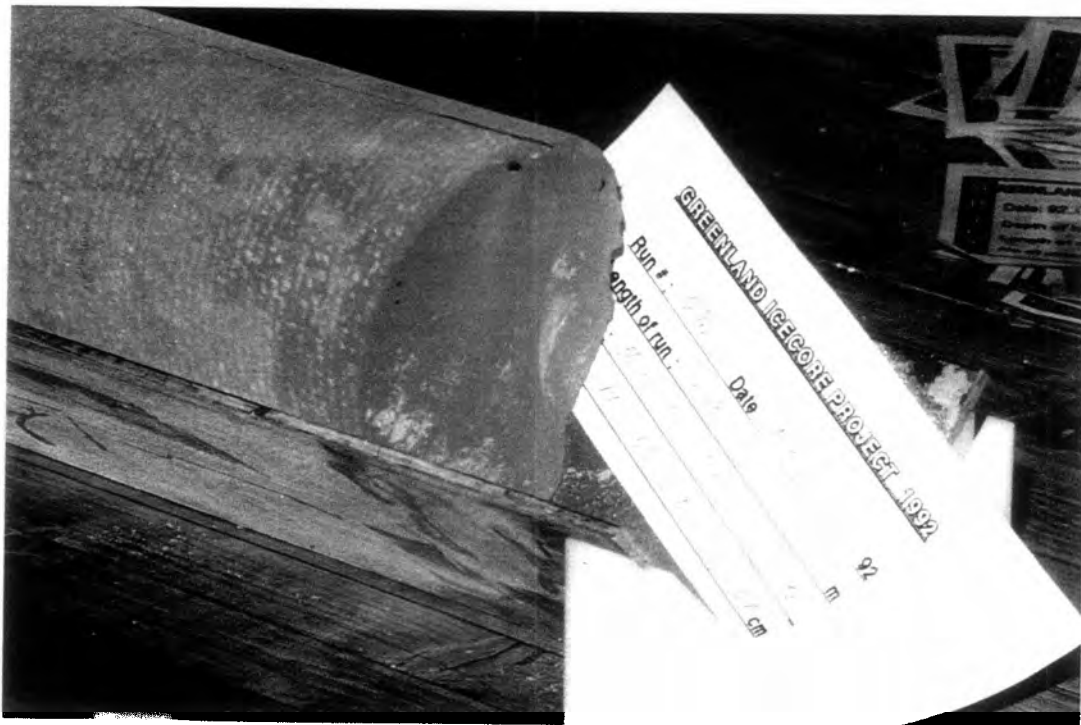
M. Thierry BRETHEAU	Directeur de recherche CNRS	Section 9
M. Gérard MEGIE	Professeur à l'Université de Paris 6	Section 12
M Olivier TALAGRAND	Directeur de recherche CNRS	Section 13
M. Alain CASTETS	Chargé de recherche CNRS	Section 14

### *Représentants du Conseil de Laboratoire*

M. Jean Marc BARNOLA	Chargé de recherche
M. Christian VINCENT	Ingénieur d'études
M. Michel AUBRY	Directeur du Département SDU ou son représentant
M. Michel RETOURNA	Délégué Régional Adjoint de la Région Rhône-Alpes secteur Alpes ou son représentant
M. Gérard VIVIER	Chargé de Mission aux Relations Industrielles auprès du Délégué Régional

### *Invité*

M. Roger GENDRIN                      Directeur de l'IFRTP



## Chapitre 1

# EVOLUTION DU CLIMAT

## EQUIPE EVOLUTION DU CLIMAT

Responsable : Dominique RAYNAUD

### COMPOSITION DE L'EQUIPE :

	ARCHIVES GLACIAIRES (1)	MODELISATION (2)	TELEDETECTION (3)
Chercheurs CNRS	D. RAYNAUD (DR1) J.M. BARNOLA (CR1) J. CHAPPELLAZ (CR1) P. MARTINERIE (CR2) 50 % C. LORIS (DR0) J. R. PETIT (DR2)	C. GENTHON (CR1)	
Enseignants Chercheurs	J.P. BENOIST (MC1) M.A. MELIERES (MC1)		M. FILY (MC1)
Ingénieurs chercheurs			M. GAY (IE2) (75 %)
Doctorants	I. BASILE F. DENUX D. HAAN (BDI)	A. ARMENGAUD H. DANG G. KRINNER	C. LEROUX I. SHERJAL
DEA	E. JEANJEAN S. KINTS		
Autres chercheurs	J. JOUZEL (CEA) W. MAGGI (Italie)		S. SURDYK (CNES)
ITA	F. CANDAUDAP (T3) M. CRESEVEUR (AI)		

### PRINCIPAUX AXES DE RECHERCHE :

Archives glaciaires	Modélisation	Téledétection
Etude de la variabilité du climat aux hautes latitudes Compréhension de forçages climatiques (variations des concentrations des gaz à effet de serre, présence des calottes polaires, aérosols atmosphériques) Relation entre climat et cycles biogéochimiques	Modélisation globale de distributions de traceurs atmosphériques Modélisation du climat des régions polaires Modélisation physique du manteau neigeux polaire	Etudes sur la neige de l'Antarctique : structure et rayonnement microonde ou dans le spectre solaire Etudes sur la glace de mer

### PRINCIPAUX CONTRATS :

Commission des Communautés Européennes (1, 2, 3)  
Programmes nationaux : PNEDC (1,2), PNCA (1), PNTS.(3)..  
Institut Français pour la Recherche et la Technologie Polaires (1,3)  
Fondation de France (1, 3)  
CNES (3)

### PUBLICATIONS :

Types de publication	1991	1992	1993	1994	1995 partiel
Revue à Comités de lecture	6	13	23	13	15
Symposiums	7	8	8	4	3
Thèses		1	1	1	1
Autres	8	3	4	5	1

Les archives glaciaires permettent de reconstruire les conditions climatiques ayant régné au-dessus de l'Antarctique et du Groenland, l'évolution des retombées d'aérosols solubles ou insolubles, et la composition des bulles d'air emprisonnées dans la glace. On a ainsi accès à toute une gamme d'informations climatiques à caractère soit régional (température et précipitation au-dessus des régions polaires), hémisphérique (transport de certains aérosols à longue distance), ou global (traces gazeuses à longs temps de résidence troposphérique participant à l'effet de serre).

Les implications et objectifs de ces recherches traitant du passé sont de différents ordres. Ils concernent en particulier:

- L'étude de la variabilité du climat aux hautes latitudes, régions qui jouent un rôle important dans le fonctionnement de la machine climatique à l'échelle globale.
- La compréhension de forçages climatiques tels que ceux liés aux variations des concentrations des gaz à effet de serre, à la présence de grandes calottes glaciaires, ou, à un titre moindre, aux aérosols atmosphériques.
- La relation entre climat et cycles biogéochimiques (constituants atmosphériques participant au forçage climatique).
- La mise en perspective des modifications anthropiques pouvant conduire à des changements climatiques à l'échelle globale.

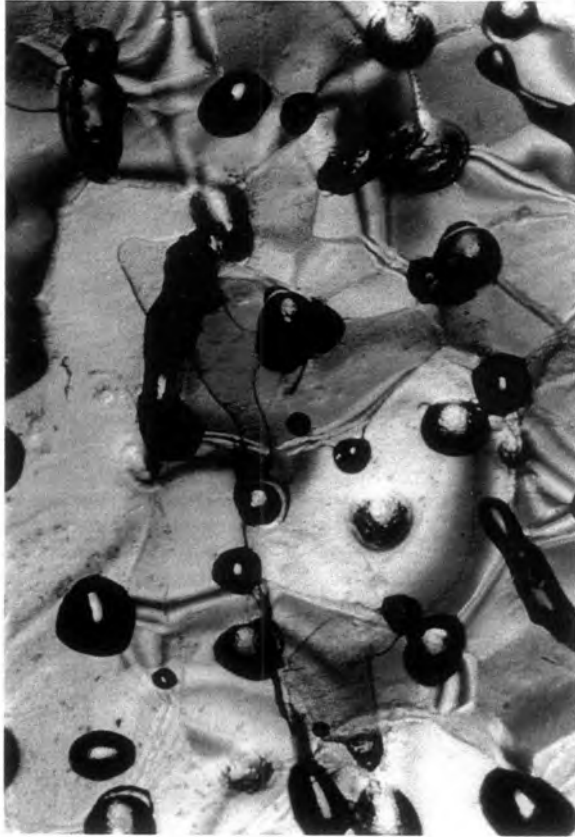
L'équipe Climat du LGGE a construit sa notoriété internationale à partir de travaux basés sur l'étude des archives glaciaires (en particulier la carotte de Vostok). Les recherches menées au cours des 4 dernières années se situent dans le cadre des objectifs généraux précités et ce volet «Archives glaciaires» demeure un axe prioritaire. Il est illustré par les résultats récents obtenus à partir des forages de Vostok (Antarctique) et de GRIP (Groenland).

Notre équipe joue, par ailleurs, un rôle important dans la mise sur pied des grands programmes de carottages profonds tel que le projet européen EPICA qui doit être réalisé à Dôme Concordia (Antarctique).

Une interprétation la plus quantitative possible des paléodonnées est désormais requise pour que celles-ci soient utiles pour les expériences de modélisation climatique. Ceci nous a conduits à intensifier l'effort de compréhension des processus d'incorporation du message climatique ou atmosphérique dans la glace (relation entre composition isotopique de la glace et température, processus de piégeage de l'air atmosphérique,...).

Les difficultés d'accès aux régions polaires et le coût des opérations sur le terrain ne permettent pas d'envisager une couverture spatiale adéquate pour rendre compte des processus mis en jeu à l'échelle du continent Antarctique ou à la connaissance du bilan de masse actuel des grandes calottes glaciaires. Seule, la télédétection permet d'aborder ces échelles spatiales. Le jeune groupe télédétection développe, à la fois, des comparaisons entre mesures satellitaires et données de terrain et des modèles permettant de remonter aux paramètres climatiques ou de surface.

Enfin, les données ainsi fournies ne peuvent être valorisées pour la compréhension des changements à l'échelle globale qu'à travers un effort de modélisation. La communauté internationale et nationale est bien sûr particulièrement active dans ce domaine et, là aussi, un groupe se développe. En parfaite symbiose avec différents laboratoires français et étrangers, il concentre ses efforts sur des modélisations spécifiques aux thématiques de notre laboratoire tels que modélisation globale de traceurs atmosphériques ou «zooms» de modèles de circulation générale (MCG) sur les régions polaires.



## 1. ARCHIVES GLACIAIRES

## I OBJECTIFS GENERAUX

Les archives glaciaires possèdent une place de choix, aux côtés des enregistrements des sédiments marins profonds, dans les études paléoclimatologiques du Quaternaire récent. Ceci a été récemment brillamment illustré par la remise du prix Crafoord (équivalent du prix Nobel pour les Sciences de la Terre) 1995 partagé entre un glaciologue, W. Dansgaard, et un géochimiste marin, N. Shackelton. L'équipe Climat du LGGE a déchiffré, dans le passé, un certain nombre d'enregistrements clés, dont celui de Vostok, qui ont fait sa réputation internationale dans le domaine. Au cours des 4 dernières années les efforts ont majoritairement porté sur

l'amélioration des fonctions de transfert afin d'interpréter quantitativement les variations observées, sur l'extension du profil de Vostok, au fur et à mesure de l'obtention de nouvelles carottes toujours plus profondes et sur l'analyse, en collaboration européenne, de la carotte groenlandaise de GRIP. Un effort croissant est entrepris pour confronter l'information des données-proxy ainsi obtenues, d'une part avec d'autres enregistrements d'environnements passés marins ou continentaux, et d'autre part avec les résultats de la modélisation du système atmosphérique pour des conditions climatiques caractéristiques du passé.

## II RESULTATS MAJEURS OBTENUS AU COURS DES QUATRE DERNIERES ANNEES



### II.1 FONCTIONS DE TRANSFERT - ENREGISTREMENT DES SIGNAUX

#### II.1.1 Fractionnement isotopique de la glace et enregistrement du signal

(F. Denux, J.P. Benoit, J. Jouzel, J.R. Petit)

La reconstruction des paléoclimats dans les régions polaires s'appuie, de façon privilégiée, sur l'analyse des teneurs en deutérium et en oxygène 18 de la glace. L'existence de fractionnements isotopiques provoque un appauvrissement progressif des teneurs isotopiques des précipitations à mesure que les masses d'air se refroidissent. Dans les régions polaires, ceci se traduit par une relation linéaire entre température moyenne annuelle du site et teneurs isotopiques,  $\delta D$  et  $\delta^{18}O$ . Celle-ci est appliquée pour estimer la variation de température en un site donné à partir des profils de teneur en deutérium ou en oxygène enregistrés le long des carottes de glace. Les gradients ont cependant un caractère régional et doivent donc être documentés sur l'ensemble des calottes. Des prélèvements de surface effectués tout le long de l'expédition Transantarctica (6000km à pied à travers l'Antarctique) nous ont fourni l'opportunité d'étendre considérablement la couverture géographique de ce type de données. La

valeur des gradients déterminés sur des régions plus restreintes est remarquablement confirmée (Qin-Dahe et al., 1993).

En ce qui concerne l'enregistrement du signal isotopique par la glace polaire, une étude du lissage naturel de ce signal est en cours (F. Denux et J.P. Benoit). Un signal isotopique saisonnier (valeurs plus élevées l'été que l'hiver) très prononcé caractérise les neiges de surface. Il constitue un outil intéressant au niveau de la datation mais peut être modifié à la suite de phénomènes de transport qui, dans la glace, peuvent se produire par simple diffusion en phase solide ou par migration en phase gazeuse par l'intermédiaire de la porosité interconnectée. Ces deux phénomènes jouent un rôle dans le lissage des enregistrements isotopiques préservés dans les carottes polaires. Nous avons entrepris (thèse de F. Denux) de préciser de quelle façon s'opère ce processus de lissage, dans le névé puis la glace, en développant et validant un modèle qui puisse s'appliquer quelles que soient les caractéristiques (température et accumulation) du site.

Au-delà d'une approche expérimentale basée sur la distribution des isotopes dans les précipitations modernes, la modélisation des cycles isotopiques est nécessaire pour valider la démarche suivie en paléoclimatologie. Cette modélisation repose à la fois sur l'utilisation de

modèles simples (masse d'air isolée) et sur l'incorporation des cycles isotopiques dans des modèles de circulation générale de l'atmosphère.

Les caractéristiques essentielles de la distribution du deutérium et de l'oxygène 18 dans les précipitations (relation teneur isotopique/température, relation linéaire entre  $\delta D$  et  $\delta^{18}O$ ) sont expliquées de façon satisfaisante à partir de modèles dit de Rayleigh dans lesquels sont pris en compte les fractionnements isotopiques intervenant dans une masse d'air isolée depuis son origine océanique jusqu'aux régions polaires. Seuls des modèles à deux phases (liquide/vapeur ou solide/vapeur) étaient considérés jusqu'à maintenant. Cette approche a été étendue au cas des nuages mixtes dans lesquels liquide et vapeur coexistent (Ciais et Jouzel, 1994). Ce modèle a été appliqué à la simulation des cycles saisonniers (deutérium et excès en deutérium) en Antarctique, avec l'objectif de déduire des informations sur l'origine des précipitations (Ciais et al., sous-presse). Deux stations, situées l'une en région côtière (D47), la seconde au centre de l'Antarctique (Pôle Sud), aux cycles saisonniers différents, ont été prises comme cibles. Ces caractéristiques saisonnières impliquent que les précipitations du Pôle Sud ont pour origine principale la bande de latitude 30-50°S tandis que celles des régions côtières proviennent, en partie, de régions océaniques plus proches de l'Antarctique (50-60°S).

Les modèles isotopiques simples ne peuvent pas rendre compte de la complexité de l'atmosphère. Ils ne sont pas, non plus, adaptés pour analyser l'influence de changements drastiques des conditions aux limites comme celles qui sont intervenues entre climat moderne et glaciaire. La seule façon de traiter ces aspects est d'incorporer les cycles isotopiques dans un modèle de circulation générale de l'atmosphère qui prend déjà en compte la complexité du cycle atmosphérique de l'eau. C'est l'approche qui, au début des années quatre-vingts, a été mise en oeuvre avec le modèle du LMD puis avec celui de la NASA (GISS New-York). Dans l'un et l'autre cas, la paramétrisation des fractionnements isotopiques s'est appuyée sur l'expérience acquise à partir de l'utilisation de modèles simples. Une première série de travaux a permis de démontrer la capacité de ces GCM isotopiques à simuler correctement les caractéristiques majeures de la distribution du deutérium et de l'oxygène 18 dans les précipitations modernes. Des simulations du même type ont été ensuite entreprises pour les conditions du dernier maximum glaciaire, il y a 20 000 ans, période pour laquelle les conditions

aux limites sont relativement bien connues et les paléodonnées isotopiques assez nombreuses. L'objectif est d'examiner la validité de l'hypothèse utilisée pour reconstituer les variations des températures, c'est à dire l'égalité entre les variations spatiales de la relation température-teneur isotopique observée dans les précipitations récentes et les variations temporelles de cette même relation, pour des climats différents et en un site donné. Les simulations réalisées aussi bien avec le modèle du LMD pour les mois d'août et février (Joussaume et Jouzel, 1993) qu'avec celui du GISS à l'échelle annuelle (Jouzel et al., 1994), justifient cette hypothèse tout au moins pour les régions polaires et celles où les variations de température sont importantes (la durée relativement courte des simulations ne permet pas de conclure dans les autres régions). Ainsi, les deux modèles suggèrent qu'au Groenland et en Antarctique les changements de température estimés à partir des gradients spatiaux ne sont pas entachés d'une erreur supérieure à 30% justifiant, par là même, l'utilisation de ce gradient spatial pour l'interprétation des paléodonnées.

Un des avantages de ces modèles est qu'ils permettent d'étudier l'influence de paramètres autres que la température locale sur les distributions isotopiques, comme l'origine de la vapeur d'eau, les types de nuages (convectifs ou non), le régime et la répartition saisonnière des précipitations. Nous avons, avec le modèle du GISS, confirmé cette influence de la température de la source à travers une étude de la teneur en deutérium des précipitations en Antarctique (Koster et al., 1992). Une étude similaire a été réalisée pour le Groenland (Charles et al., 1994) en s'intéressant, cette fois, à l'origine géographique des précipitations. Une masse d'air y apporte des précipitations isotopiquement plus riches si elle provient de l'Atlantique plutôt que du Pacifique. Ceci ne remet cependant pas en cause le rôle premier de la température locale.

### **II.1.2 Air piégé dans la glace**

(J. M. Barnola, L. Arnaud, D. Raynaud, P. Martinerie, J. Chappellaz)

Avant d'être piégé dans la glace sous forme de bulles, l'air est filtré par le névé, couche d'environ 80 m d'épaisseur marquant la transformation de la neige en glace. Cette couche a, près de la surface, une porosité d'environ 60% ouverte, qui diminue progressivement pour aboutir à une porosité d'environ 10% isolée de l'atmosphère à la transition névé-glace. Cette transformation étant lente, elle peut prendre jusqu'à 2 500 ans actuellement à Vostok. L'air piégé est plus jeune

que la glace qui l'entoure. L'interprétation fine des signaux «gaz» requiert la détermination précise de la relation temporelle entre l'air occlus et la glace. Cela passe par l'étude non seulement de la densification du névé et des processus de fermeture des pores, mais aussi des échanges gazeux entre l'air interstitiel et l'atmosphère. Ces deux aspects sont abordés tant expérimentalement que théoriquement en collaboration avec d'autres équipes du laboratoire et extérieures.

#### **II.1.2.1 Densification et fermeture des pores : Détermination de la profondeur du close-off et de l'âge de la glace à cette profondeur**

Les mesures du volume d'air piégé dans la glace ont montré que, dans les conditions climatiques actuelles, la densité moyenne du close-off (transition névé-glace) dépendait principalement de la température du site, celle-ci augmentant lorsque la température décroît (*Martinerie et al, 1992*). Il s'agit là d'une information importante pour interpréter les variations observées le long des carottages profonds de la teneur globale en air, paramètre qui dépend à la fois de la porosité à la transition névé-glace, de la température et de la pression atmosphérique du site. Si cette technique présente l'avantage d'être rapide et de pouvoir remonter dans le passé, elle ne permet pas de détailler la dynamique de la fermeture. Pour pallier cet inconvénient, nous avons étendu les mesures détaillées de la porosité fermée du névé initiées sur la carotte de Summit (*Schwander et al, 1993*) à d'autres sites ayant des conditions climatiques différentes, Vostok ( $T = -55^{\circ}\text{C}$ ) et DE08 ( $T = -19^{\circ}\text{C}$ ). Nous montrons que :

- les pores se ferment entre les densités 0.817 et 0.855 à Vostok, et 0.787 et 0.837 à DE08, en bon accord avec les densités moyennes au close-off déduites des mesures de teneur en air qui sont respectivement de 0.841 et 0.818 ;
- la relation entre la densité au close-off et la température est similaire à celle déduite précédemment à partir des mesures de teneur en air. Cela nous permet d'utiliser cette dernière technique pour estimer les densités au close-off au cours du passé (I.G.S. Cambridge, septembre 1993).

Cependant, la relation entre la densité au close-off et la température est une relation empirique, basée sur la variabilité actuelle du climat. Des questions se posent pour l'utiliser au cours du passé et notamment en période glaciaire, lorsque les températures et les vitesses de vent étaient très différentes. Il faut donc étudier les

processus physiques qui gouvernent la densification du névé et la fermeture des pores. Cet aspect est développé dans le rapport de l'équipe rhéologie.

#### **II.1.2.2 Echanges gazeux au sein du névé : Détermination de l'âge du gaz à la profondeur du close-off**

Les échanges gazeux entre l'atmosphère et la profondeur de piégeage sont limités par la diffusion des gaz dans les canaux interstitiels. Ainsi les prélèvements d'air du névé réalisés à Summit avec nos collègues de Berne (*Schwander et al, 1993*) avaient montré que l'air avait 12 ans environ au close-off, en bon accord avec les résultats d'un modèle de diffusion utilisant les coefficients de diffusion mesurés sur la carotte de Siple (*Schwander et al., 1988*). Cette approche a été poursuivie par des prélèvements d'air effectués en Antarctique, à Vostok (*Bender et al, 1994*) et DE08 (*Etheridge et al, soumis*). En utilisant le  $\text{CO}_2$  comme traceur, l'air aurait, au fond du névé, 35 ans environ à Vostok et 10 ans à DE08.

En collaboration avec I. Enting et ses collègues (C.S.I.R.O., Melbourne), nous développons un modèle de diffusion dérivé de celui de J. Schwander, pour simuler la diffusion des gaz dans différentes conditions. Ce modèle devrait notamment permettre de prendre en compte les fluctuations saisonnières des paramètres du névé. Appliqué aux conditions de Summit, il permet de retrouver les profils observés. Par contre, dans les conditions de Vostok et DE08, ces coefficients sont variables d'un site à l'autre. Nous avons donc entrepris de mesurer, sur des échantillons de névé provenant de différents sites, les coefficients de diffusion de plusieurs gaz ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$  et  $\text{SF}_6$ ) ainsi que différents paramètres structuraux (taille et forme des grains et des vides) pouvant influencer ces coefficients.

En dehors de l'aspect datation, l'intérêt de ces prélèvements d'air réside en la possibilité d'obtenir de grandes quantités d'air pouvant avoir plusieurs dizaines d'années afin d'étudier l'évolution récente de l'atmosphère. Le potentiel de cette technique a été confirmé par les mesures du rapport  $\text{O}_2/\text{N}_2$  dans le névé de Vostok (*Bender et al, 1994*) ou par l'étude pilote de plusieurs fluorocarbures dans le névé du Col du Dôme (*Sturges et al, sous presse*).

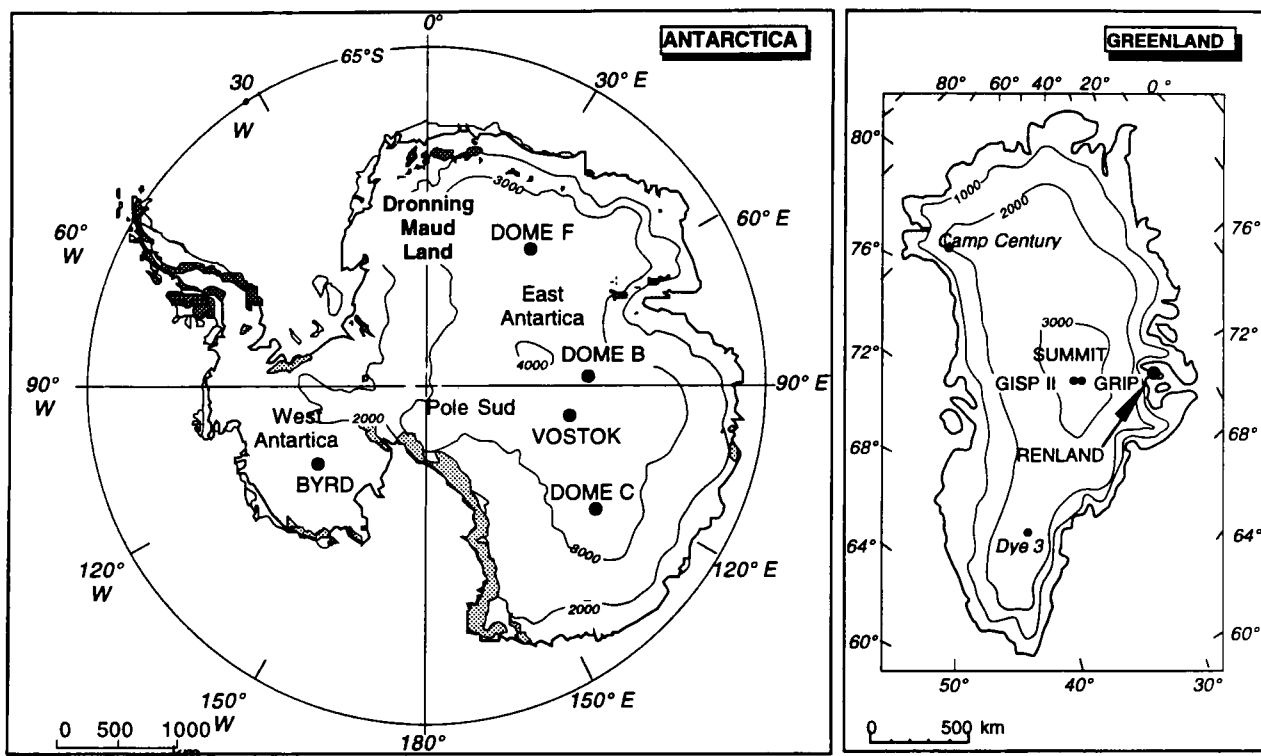
#### **II.1.2.3 Distribution des isotopes de l'hélium dans les glaces polaires**

A la différence de la plupart des gaz occlus dans la glace des calottes polaires, l'hélium possède une très forte diffusivité. A la fermeture de la porosité, suivie de sa mise en pression progres-



sive, cet hélium va donc diffuser significativement vers l'extérieur de la calotte. Cette diffusion s'accompagne de fractionnements isotopiques. La motivation principale de ce travail est d'améliorer la connaissance du phénomène de fermeture des pores à la transformation du névé/glace et du comportement des gaz occlus, à partir de l'analyse des concentrations en hélium et des fractionnements isotopiques dans les glaces

paléoclimat à partir des archives glaciaires. Les travaux conduits en étroite collaboration entre le LMCE et le LGGE s'articulent autour de deux grands projets internationaux : les recherches liées à l'étude des forages profonds de Vostok (Antarctique) et de GRIP (Groenland) sont conduites respectivement dans le cadre d'une collaboration entre la France, la Russie et les Etats-Unis et d'un projet Européen (Fig. 1.1).



**Figure 1.1:**  
Cartes indiquant les principaux sites de forage au Groenland et en Antarctique

polaires. Une expérience préliminaire menée au site de Vostok indique que l'hélium initialement contenu dans la porosité a en partie diffusé à l'extérieur de la calotte lors de la densification progressive du matériau (Jean-Baptiste et al., 1993). Ce processus a été modélisé et l'allure générale de la distribution d'hélium calculée est en accord avec ces premiers résultats expérimentaux.

## II.2 Archives glaciaires : l'enregistrement climatique

(J. Jouzel, J.R. Petit, C. Lorius, P. Martinerie, D. Raynaud, M.A. Mélières)

La relation entre température et teneurs isotopiques des précipitations polaires, que nous venons d'analyser du point de vue des modèles, constitue un élément clé de la reconstitution du

### II.2.1 Le forage GRIP

Les forages européens GRIP et américain GISP2, longs de plus de 3 km, ont été réalisés dans des sites distants d'une trentaine de kilomètres au centre du Groenland.

Le LGGE, en collaboration étroite avec le LMCE, participe aux études isotopiques de la glace de GRIP (deutérium) aux côtés des équipes danoises et islandaises (oxygène 18) et à l'interprétation des séries climatiques dont l'essentiel est présenté dans une série de publications parues dans la revue «Nature».

L'analyse des 2200 premiers mètres de la carotte (profondeur atteinte en 1991) a confirmé l'existence de variations climatiques rapides et importantes en période glaciaire et durant la

déglaciation (Johnsen et al., 1992). Ces variations, qui interviennent à l'échelle de la décennie, affectent l'ensemble des paramètres climatiques (température, accumulation, circulation atmosphérique...). Vingt deux interstades ont ainsi été mis en évidence au cours de la dernière période glaciaire (Dansgaard et al., 1993) mais c'est l'existence éventuelle d'instabilités au cours de la période chaude précédente (-140 000/-110 000 ans) qui a jusqu'ici retenu le plus l'attention. Cette période chaude aurait été interrompue par des excursions, dont une très rapide (~ 70 ans), vers des conditions intermédiaires entre le climat actuel et une période glaciaire (GRIP Project Members, 1993). Les résultats du forage GISP2 soulèvent des questions sur la validité de l'interprétation climatique de cette partie de l'enregistrement. Les deux séries, en excellent accord jusque vers -95 000 ans, commencent à diverger au-delà, indiquant que la stratigraphie des forages (ou au moins de l'un d'entre eux) a été perturbée du fait de distorsions liées à la proximité du socle rocheux (Grootes et al., 1993). En l'absence d'une identification claire d'événements similaires dans d'autres enregistrements, l'existence de ces variations rapides en période chaude (dont on mesure l'importance si elles étaient confirmées), suscite de réelles interrogations.

## II.2.2 Archives antarctiques

### II.2.2.1 Holocène et dernière déglaciation

Le climat a-t-il, ou non, varié de façon parallèle dans chacun des hémisphères au cours de l'Holocène (les 10 000 dernières années) ? Le Dryas récent (Younger Dryas) a-t-il un caractère global ? L'étude des glaces de l'Antarctique a permis d'apporter des

éléments de réponse à chacune de ces questions. Le début de l'Holocène, aux hautes latitudes Sud, est en fait marqué par un optimum climatique qui n'apparaît pas en général dans l'hémisphère Nord (Ciais et al., 1992). L'étude du nouveau forage de Dôme B (Jouzel et al., soumis) a confirmé celles réalisées à Vostok et au Dôme C (Jouzel et al., 1992) : en Antarctique, la déglaciation s'opère bien en deux étapes mais le retour vers les conditions froides y est beaucoup moins marqué qu'il ne l'est dans l'hémisphère Nord (d'un facteur trois environ). Par ailleurs, nos résultats indiquent, comme ceux obtenus sur les sédiments marins, que la phase majeure de déglaciation s'amorce d'abord dans l'hémisphère Sud.

### II.2.2.2 Derniers cycles climatiques

Depuis 1991, les études ont porté essentiellement sur le quatrième forage de Vostok interrompu, en 1993, à une profondeur de 2546 m. Les différentes analyses de paramètres susceptibles de fournir des informations à caractère climatique (teneur en deutérium, poussières, gaz à effet de serre, composition isotopique de l'oxygène de l'air et concentrations en béryllium 10) ont confirmé que la partie inférieure de cette carotte couvre une partie significative du second cycle climatique (âge estimé ~ 220 000 ans). Ces résultats ont été présentés dans un article commun à l'ensemble des équipes impliquées dans le projet Vostok (Jouzel et al., 1993). Ils mettent en évidence la complémentarité de ces différents indicateurs (Fig. 1.2) au niveau aussi bien de l'obtention d'une chronologie que de l'information climatique elle-même.

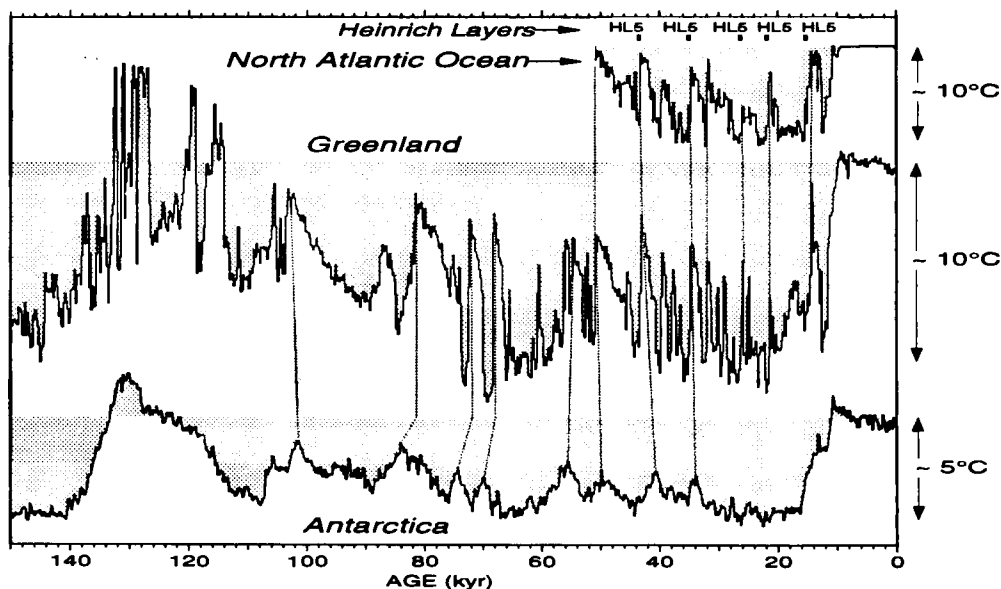
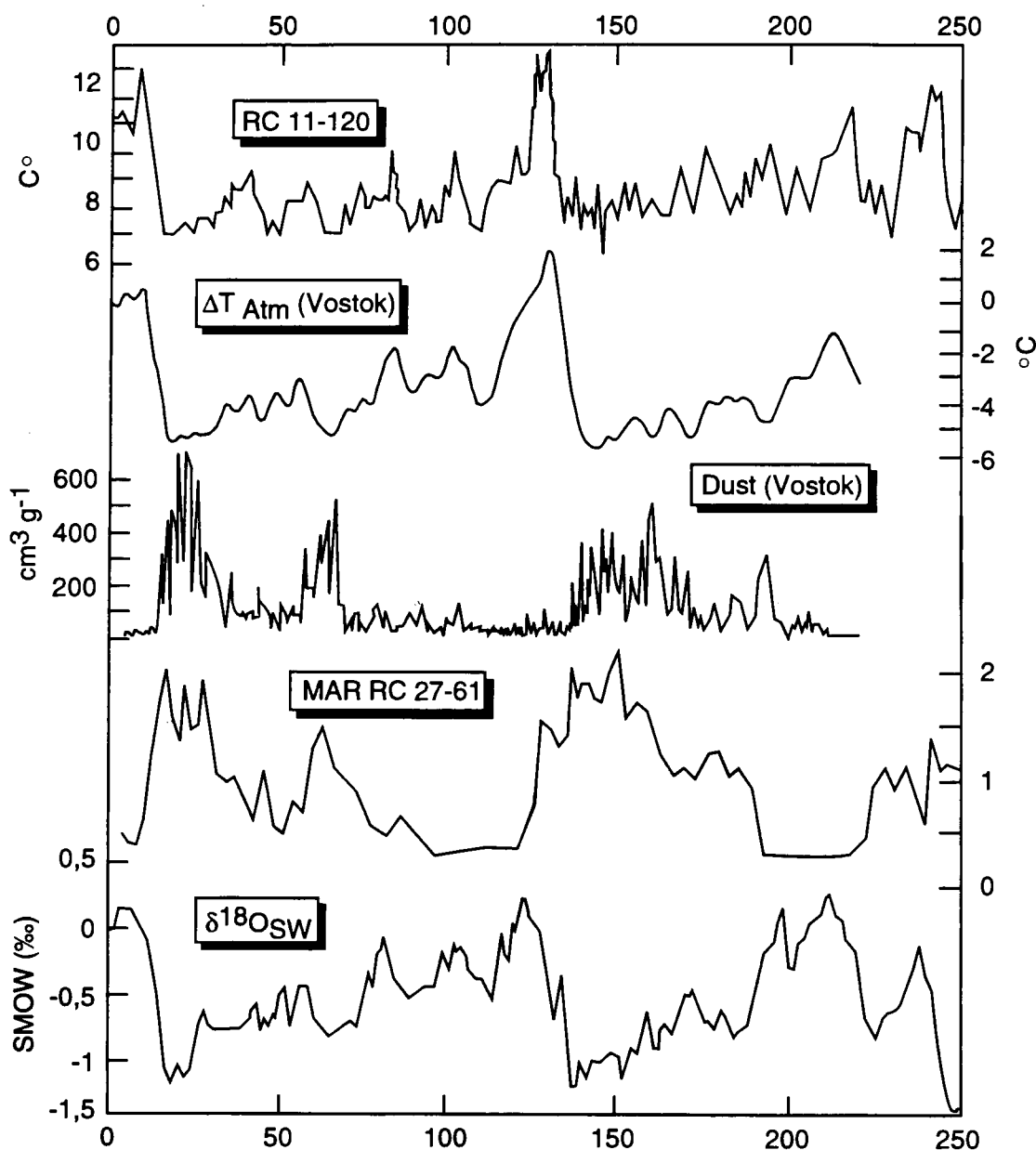


Figure 1.2 :

Comparaison des enregistrements de l'Atlantique Nord, de GRIP et de Vostok. Les événements enregistrés au Groenland et en Atlantique Nord peuvent être identifiés en Antarctique où ils sont nettement amortis et beaucoup moins rapides.

Le cinquième forage a atteint, fin 1993, la profondeur de 2755 m donnant ainsi accès à 200 m de glace supplémentaires. Les données préliminaires, teneur en deutérium et conductivité électrique, n'apportent pas encore de contraintes chronologiques suffisantes mais elles apparaissent extrêmement prometteuses du point de vue de l'interprétation paléoclimatique (*Vostok Project Members, 1995*). De façon surprenante (Fig. 1.3), elle révèle, en-dessous de 2700 m, l'existence d'une période aussi chaude que le dernier interglaciaire.

Enfin les longues séries de mesures de la teneur en air sur la carotte de Vostok conduisent à un profil unique à haute résolution (*Lipenkov et al., 1993; Martinerie et al., 1994*) qui indique que le signal teneur en air à Vostok ne peut être directement interprété en termes de variations de l'altitude du site de formation de la glace mais qu'il doit aussi enregistrer les variations temporelles des champs de pression atmosphérique à long terme au dessus de la région de Vostok ainsi que des variations de la porosité au close-off autres que celles liées aux changements de température du site. Ces dernières pourraient, par exemple, être en relation avec un effet possible du vent sur la porosité du névé en surface.



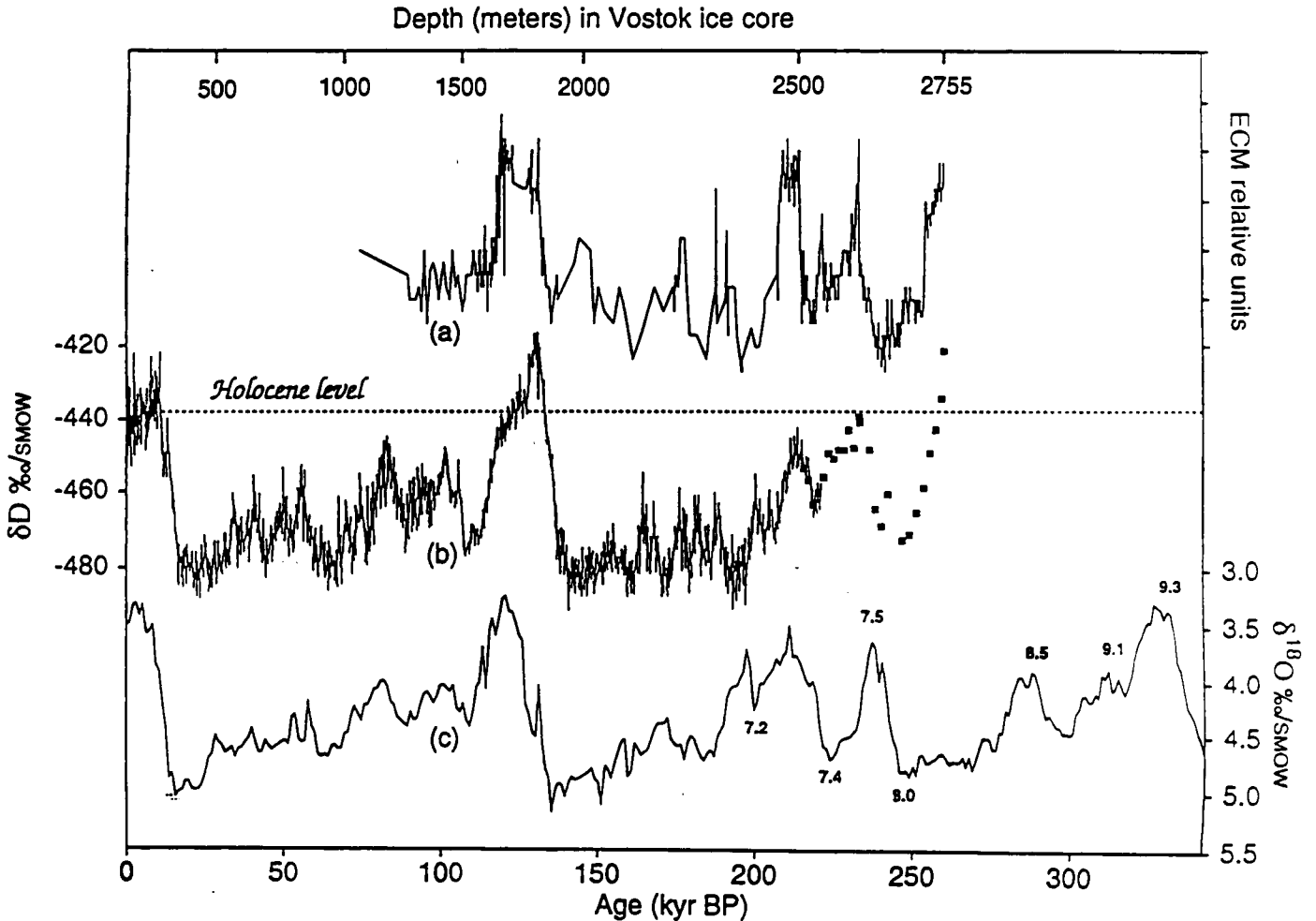
**Figure 1.3 :**

Séries de paramètres mesurés le long du forage Vostok illustrant différents moyens de corréler séries glaciaires et marines (températures, teneur en oxygène 18 de l'air et contenu en poussières). Cette figure illustre également le lien entre l'insolation et la teneur en oxygène 18 de l'air (adapté de Jouzel et al., 1993).

### II.2.2.3 Comparaisons avec d'autres enregistrements / Autres aspects

La démarche naturelle, pour inscrire les données climatiques des régions polaires dans un contexte global, est de les comparer à d'autres enregistrements, ceux obtenus à partir de l'étude des sédiments marins, en particulier. Cette comparaison permet en outre d'obtenir des informations et d'accéder aux mécanismes mis en jeu au cours des changements climatiques. L'article consacré aux 220 000 dernières années (Jouzel et al., 1993) illustre certains des moyens qui s'offrent pour corréler sédiments glaciaires marins. Des travaux plus spécifiques y ont été consacrés avec, pour l'Antarctique, des études de la

comparaison, l'une des températures (Pichon et al., 1992) et l'autre de la composition de l'oxygène 18, des bulles d'air et de celles de l'océan (Sowers et al., 1993). La comparaison Groenland/Atlantique Nord a, elle, permis de mettre en évidence la similarité des événements rapides enregistrés dans les sédiments marins et dans les glaces (Bond et al., 1993) et la correspondance entre couches de Heinrich et interstades de la période glaciaire (Fig. 1.4). Enfin la comparaison entre glaces du Groenland et de l'Antarctique montre que les événements rapides du Groenland ont, pour les plus importants d'entre eux, une contre-partie en Antarctique (Jouzel et al., 1994 ; Jouzel, 1994).



**Figure 1.4 :**

Variations de la teneur en deutérium à Vostok jusqu'à la profondeur de 2755 m (adapté de Vostok project members, 1995) suggérant que la partie basse du forage (carottage 5G) correspondrait à une période aussi chaude que le dernier interglaciaire. Les deux autres courbes représentent la conductivité électrique le long du carottage (mesurée sur le terrain) et l'enregistrement isotopique marin au cours des 350 000 dernières années.

## II.3 ARCHIVES GLACIAIRES : TRACES GAZEUSES ET CLIMAT

(J.M. Barnola, J. Chappellaz, D. Raynaud, D. Haan, P. Martinerie, C. Polle)

### II.3.1 Méthane

Les objectifs des 4 dernières années liés à l'étude du méthane dans le passé comportaient deux grands axes :

- (1) entamer la modélisation du bilan passé du méthane, et, en particulier, de l'évolution des zones inondées,
- (2) prolonger et détailler les analyses du méthane dans la glace portant sur différentes échelles de temps, avec l'extension au deuxième cycle climatique grâce au forage de Vostok, l'étude détaillée de l'Holocène, et le dépouillement du nouveau forage de GRIP au Groenland.

#### II.3.1.1 Modélisation du bilan du méthane dans le passé

Dans le cadre d'un séjour post-doctoral de J. Chappellaz au Goddard Institute for Space Studies (NASA/GISS, New York, USA), et en collaboration avec le Dr. Inez Fung, spécialiste en modélisation des cycles biogéochimiques, nous avons élaboré des bilans du méthane atmosphérique au cours de l'Holocène Pré-Industriel (HPI) et du Dernier Maximum Glaciaire (DMG), à partir d'informations historiques et de l'utilisation de corrélatifs des sources principales de méthane. Cette étude nous a conduit à conclure que les zones inondées avaient dominé les sources naturelles pré-industrielles de méthane (75 % du total pendant le HPI) et qu'elles étaient responsables de la majeure partie du changement d'intensité des sources entre le HPI et le DMG.

Ce travail post-doctoral a également porté sur l'évolution du puits atmosphérique du méthane entre le DMG, le HPI et la période actuelle, en collaboration avec le Dr. Anne Thompson (NASA / Goddard Space Flight Center, Greenbelt, USA). L'utilisation d'un modèle photochimique unidimensionnel a permis de tester l'impact des changements du climat et des flux de  $\text{CH}_4$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{NO}_x$  et  $\text{O}_3$  stratosphérique sur la concentration en radical hydroxyle (OH) et en méthane à l'équilibre. Les résultats de ce modèle suggèrent un rôle prépondérant des sources de  $\text{CH}_4$  - en particulier des zones inondées - dans le doublement de sa teneur atmosphérique au cours de la déglaciation. De plus, ils indiquent que la concentration de OH dans la troposphère était probablement plus élevée pendant le DMG. Le

rôle joué par les autres composés est apparu significatif seulement au cours de l'évolution du méthane entre le HPI et la période actuelle.

Ce travail a fait l'objet de deux publications dans la revue *Tellus* (Chappellaz et al., 1993 ; Thompson et al., 1993) et de nombreuses présentations orales et de posters dans des symposiums internationaux.

#### II.3.1.2 Analyse du méthane dans la glace

Le volet analytique de l'étude du méthane passait par deux étapes : perfectionner la technique analytique développée au cours de la thèse de J. Chappellaz, et effectuer de nouvelles séries de mesure de la teneur en méthane sur certaines périodes clés.

Concernant la technique analytique, des progrès ont été obtenus pour réduire la contamination en méthane engendrée par l'extraction du gaz, et le développement d'une technique de broyage de la glace non contaminante a été entrepris (construction de broyeurs en céramique).

Les analyses même ont porté sur un large spectre temporel à partir des diverses carottes de glace disponibles au LGGE : en remontant dans le temps, ont été considérées (1) la période pré-industrielle, (2) la période Holocène, (3) la dernière déglaciation avec, en particulier, l'événement du Dryas récent, (4) les fluctuations climatiques rapides de la fin de la dernière glaciation, (5) l'avant-dernière glaciation, et (6) la glace basale du centre du Groenland. L'ensemble de ces mesures ont permis d'apporter de nouvelles informations importantes pour la connaissance des mécanismes d'interaction entre le climat et le cycle naturel du méthane.

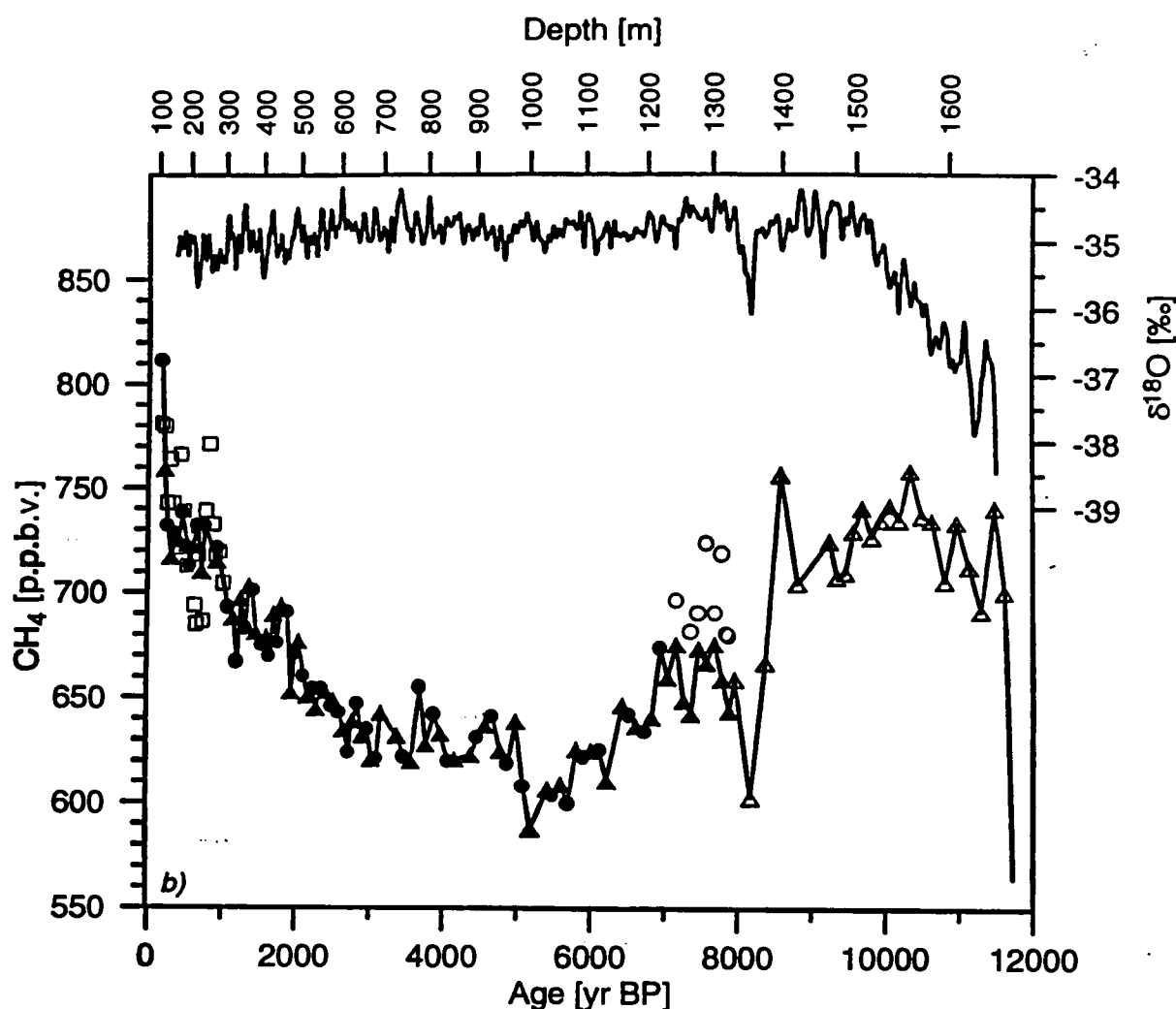
#### II.3.1.3 La période pré-industrielle

De nouvelles mesures ont été réalisées sur la carotte groenlandaise d'Eurocore, en collaboration avec nos collègues suisses de Berne, et sur la carotte antarctique de D47. Ces mesures ont mis en évidence l'existence de fluctuations naturelles de l'ordre de 70 ppbv autour d'une valeur moyenne de 700 ppbv (Blunier et al., 1993), ainsi que d'un gradient inter-hémisphérique naturel du méthane, avec des concentrations antarctiques environ 40 à 50 ppbv inférieures aux valeurs groenlandaises. Ce gradient permet d'estimer un rapport entre les sources de méthane de l'hémisphère Nord et de l'hémisphère Sud de l'ordre de 3 à 4, c'est-à-dire un rapport comparable ou légèrement supérieur à celui d'aujourd'hui.

### II.3.1.4 L'Holocène

Avec nos collègues de Berne, nous avons entrepris l'analyse à haute résolution du méthane au cours des derniers 10 000 ans, avec pour support la nouvelle carotte de GRIP. L'actuelle période interglaciaire était en effet très mal documentée sous l'angle des gaz à effet de serre (Fig. 1.5). Le profil obtenu possède une résolution moyenne de 85 ans et met en évidence une variation marquée

chrone avec l'événement isotopique unique observé au Groenland durant l'Holocène. Mis en regard des paléodonnées continentales sur la même échelle de temps, ce profil de méthane suggère que les zones inondées des basses latitudes ont été le principal élément de contrôle de la teneur en méthane entre 10 000 et 5 000 ans BP, et que l'augmentation lente ultérieure, jusqu'au niveau pré-industriel, refléterait la mise en place des tourbières de haute latitude depuis 5 000 ans.

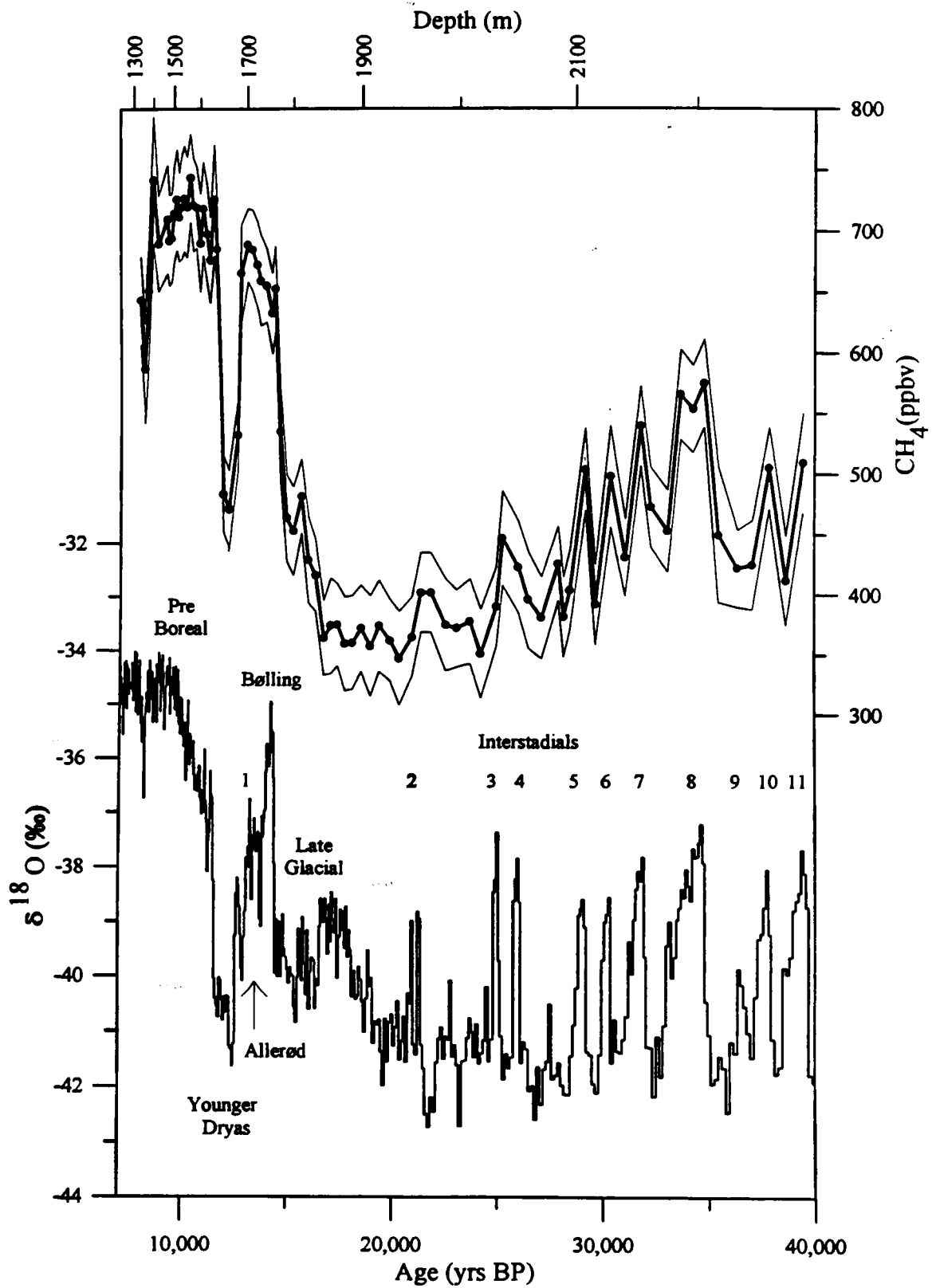


**Figure 1.5 :**

Evolution comparée du  $\text{CO}_2$ , du  $\text{CH}_4$  et de la température aux hautes latitudes Sud (déduite du profil isotopique de la glace) à partir de l'analyse de la carotte de Vostok (adapté de Jouzel et al., 1993). On notera que l'extension du profil à une partie importante du second cycle climatique confirme la remarquable corrélation générale entre gaz à effet de serre et climat.

(15 %) et lente du méthane, avec des niveaux maximaux durant le début de l'Holocène et la période pré-industrielle, et un minimum de concentration vers 5200 ans BP (Blunier et al., 1995). Surimposée à cette tendance lente, une oscillation abrupte est enregistrée vers 8200 ans BP, syn-

Nous finissons en ce moment d'acquérir un profil conjoint depuis les carottes antarctiques de D47 et Vostok, qui permettra, grâce aux variations du gradient inter-hémisphérique, de confirmer ou d'infirmer ces hypothèses.



**Figure 1.6 :**

Variations de la teneur en  $CH_4$  et de la composition isotopique de la glace le long de la carotte de GRIP pour la période 10 000 - 40 000 ans (d'après Chappellaz et al., 1993). On notera les variations marquées correspondant au Younger Dryas et aux événements Dansgaard/Oeschger (Interstades).

### II.3.1.5 La dernière déglaciation

L'analyse de la carotte de GRIP nous a également permis d'obtenir un enregistrement très détaillé et particulièrement bien daté des variations du méthane au cours de la déglaciation (*Chappellaz et al., 1993*) (Fig. 1.6). Celui-ci révèle un synchronisme impressionnant (à  $\pm 200$  ans) entre les grands changements climatiques au Groenland, caractérisant cette période, et ceux du méthane. En particulier, l'oscillation en méthane observée initialement sur le profil Vostok, interrompant la transition vers les niveaux Holocène, apparaît en phase avec l'événement du Dryas récent. Ces observations nous permettent, comme pour l'Holocène, de suggérer que les zones inondées situées aux basses latitudes ont dominé le bilan naturel du méthane à ces échelles de temps.

### II.3.1.6 Les événements rapides de la dernière glaciation

Cette même étude de la carotte de GRIP a mis en évidence l'existence de nombreuses fluctuations de la teneur en méthane, synchrones avec les événements Dansgaard/Oeschger qui caractérisent les profils isotopiques des carottes groenlandaises (Fig. 1.6). Cela démontre la réalité de ces événements et met en avant le caractère beaucoup plus global de ces changements climatiques documentés initialement aux hautes latitudes de la région atlantique Nord. Nous proposons un mécanisme selon lequel la variabilité du cycle hydrologique aux basses latitudes serait à la fois responsable des changements du méthane et des oscillations climatiques enregistrées aux hautes latitudes nord-atlantiques (*Chappellaz et al., 1993*).

### II.3.1.7 L'avant-dernière glaciation

La prolongation en 1990 du forage Vostok jusqu'à 2546 m de profondeur nous a donné la possibilité d'étendre le profil méthane jusqu'à la fin de l'avant-dernier stade interglaciaire (il y a 220 000 ans). L'excellente corrélation entre l'enregistrement climatique antarctique et le méthane est confirmée et les concentrations observées à la base du forage appuient la chronologie obtenue par le modèle glaciologique de datation. Cette extension du profil Vostok a été publiée dans *Nature* (Jouzel et al., 1993) (Fig 1.7), avec les autres paramètres mesurés sur cet intervalle.

## II.3.2 CO<sub>2</sub>

### II.3.2.1 Représentativité du CO<sub>2</sub> mesuré sur la carotte de GRIP

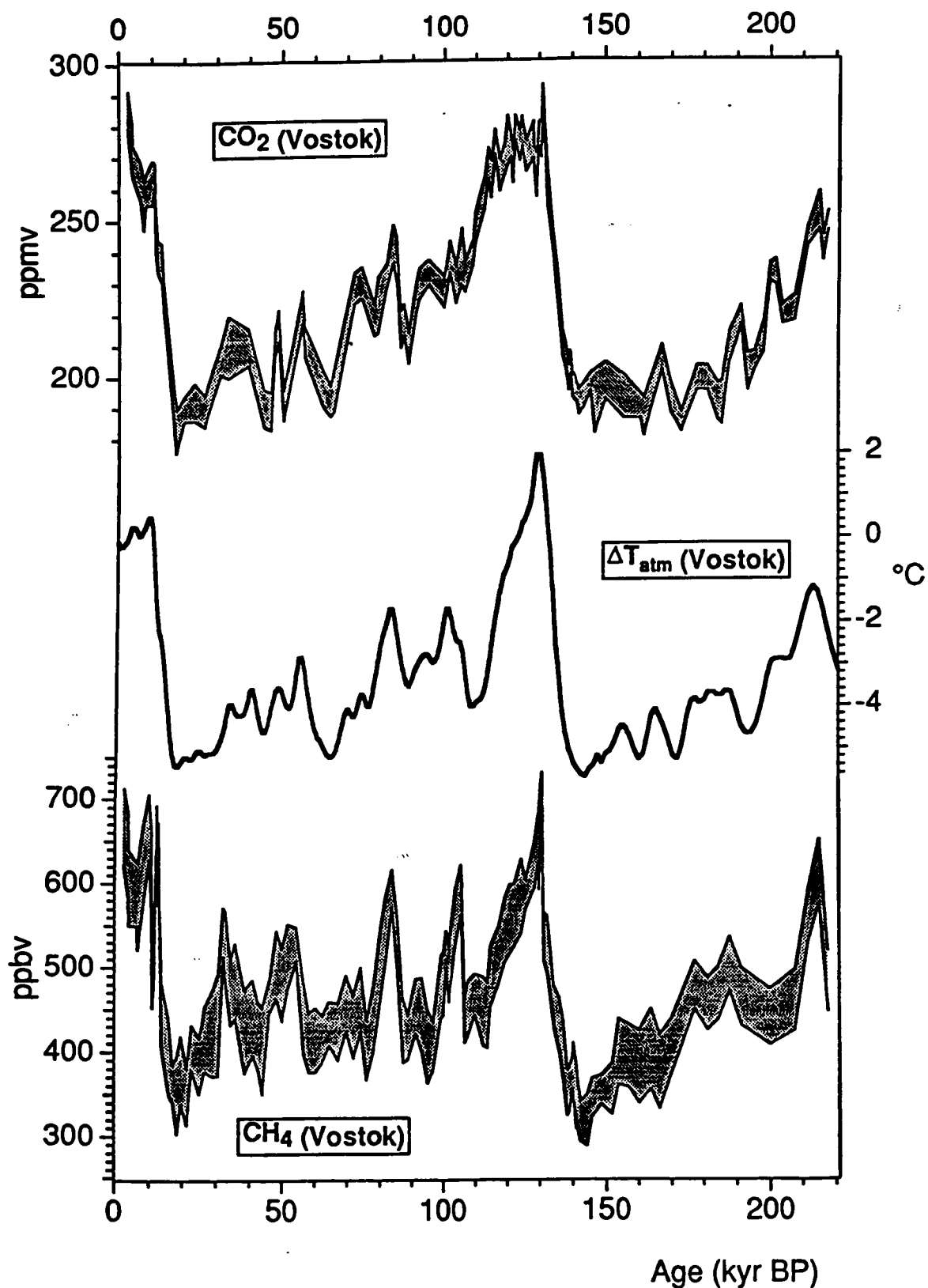
L'étude des carottes obtenues à Dôme Summit, EUROCORE et GRIP, a été faite en collaboration avec nos collègues de l'Institut

de Physique de Berne. Concernant la période récente (le dernier millénaire), deux profils ont été réalisés, l'un à Berne l'autre à Grenoble. Les deux séries sont concordantes et, en dehors de l'augmentation anthropique débutant à la fin du 19<sup>e</sup> siècle, révèlent une décroissance des teneurs en CO<sub>2</sub>, entre le 12<sup>e</sup> et le 18<sup>e</sup> siècle, de 295 à 280 ppmv. On peut noter que ces résultats sont en bon accord avec ceux qui permettent de remonter au début du 16<sup>e</sup> siècle, obtenus par les américains à partir de la carotte de GISP II forée à 30Km de Dôme Summit (*Wahlen et al., 1991*).

La comparaison des enregistrements antarctiques et groenlandais (cf. fig. 1.7) fait apparaître une différence Nord-Sud de 20 ppmv au début de ce millénaire, ce qui, interprété en terme de gradient de CO<sub>2</sub> atmosphérique, est irréaliste compte tenu des connaissances actuelles du cycle du carbone. Un profil au moins est donc très probablement contaminé dans sa partie la plus vieille. Une estimation des autres espèces carbonées contenues dans la glace (essentiellement carbonates et matière organique) peut être faite à partir des teneurs en aérosols continentaux. On constate alors que la glace du Groenland en contient environ 10 fois plus que celle de l'Antarctique. Cela suggère que l'enregistrement de Dôme Summit soit moins représentatif des teneurs en CO<sub>2</sub> de l'atmosphère que ceux de l'Antarctique. Ainsi que l'a proposé Delmas (1993), il est possible que l'enrichissement en CO<sub>2</sub> des glaces du Groenland soit dû, au moins en partie, à une réaction in situ entre les particules carbonatées et l'acidité de la glace. L'oxydation de matière organique constitue une autre source potentielle de CO<sub>2</sub> non-atmosphérique au sein de la glace groenlandaise.

Les mesures réalisées sur la carotte de GRIP, correspondant au début de l'holocène, montrent un écart identique à celui trouvé au début de ce millénaire, d'environ 20-30 ppmv avec ceux obtenus sur le forage antarctique de Byrd. Par contre, entre 40 et 17 Kyr B.P., c'est-à-dire durant la dernière glaciation, il y a un accord apparent entre les valeurs de GRIP et de Byrd lorsque la glace est alcaline, tandis que lorsque la glace est acide, (phases chaudes des événements Dansgaard-Oeschger), l'écart entre GRIP et Byrd peut être de l'ordre de 40 ppmv. Ce comportement en fonction de l'acidité de la glace va dans le sens du mécanisme proposé par Delmas (1993). Néanmoins, des études complémentaires sont à entreprendre afin de vérifier cette hypothèse.





**Figure 1.7:**

Evolution comparée du  $\text{CO}_2$ , du  $\text{CH}_4$  et de la température à hautes latitudes sud (déduite du profil isotopique de la glace) à partir de l'analyse de la carotte de Vostok (adapté de Jouzel et al., 1993). On notera que l'extension du profil à une partie importante du second cycle climatique confirme la remarquable corrélation générale entre gaz à effet de serre et climat.

### II.3.2.2 Evolution du CO<sub>2</sub> au cours du dernier millénaire

Afin d'étudier l'impact de modifications climatiques de faible amplitude, comme le petit âge glaciaire ou l'optimum médiéval, sur le niveau pré-industriel de CO<sub>2</sub>, nous avons analysé des échantillons provenant de deux carottes antarctiques, D47 et D57.

Les résultats obtenus (Fig. 1.8) sur ces deux carottes antarctiques sont identiques, la principale caractéristique des profils «pré-industriels» étant une augmentation de 275 à 285 ppmv des teneurs en CO<sub>2</sub> à la fin du 13<sup>e</sup> siècle, suivie d'une lente décroissance du CO<sub>2</sub>, qui atteignent 280 ppmv à la fin du 18<sup>e</sup> siècle. Cette fluctuation avait déjà été obtenue, de manière moins détaillée, sur une carotte prélevée à Pôle Sud par l'Institut de Physique de Berne (*Siegenthaler et al, 1988*). Le fait d'obtenir des résultats identiques en des sites extrêmement différents comme D47-D57 et Pôle Sud, accroît notre confiance quant à la représentativité atmosphérique des enregistrements antarctiques. Les fluctuations observées représentent un léger déséquilibre

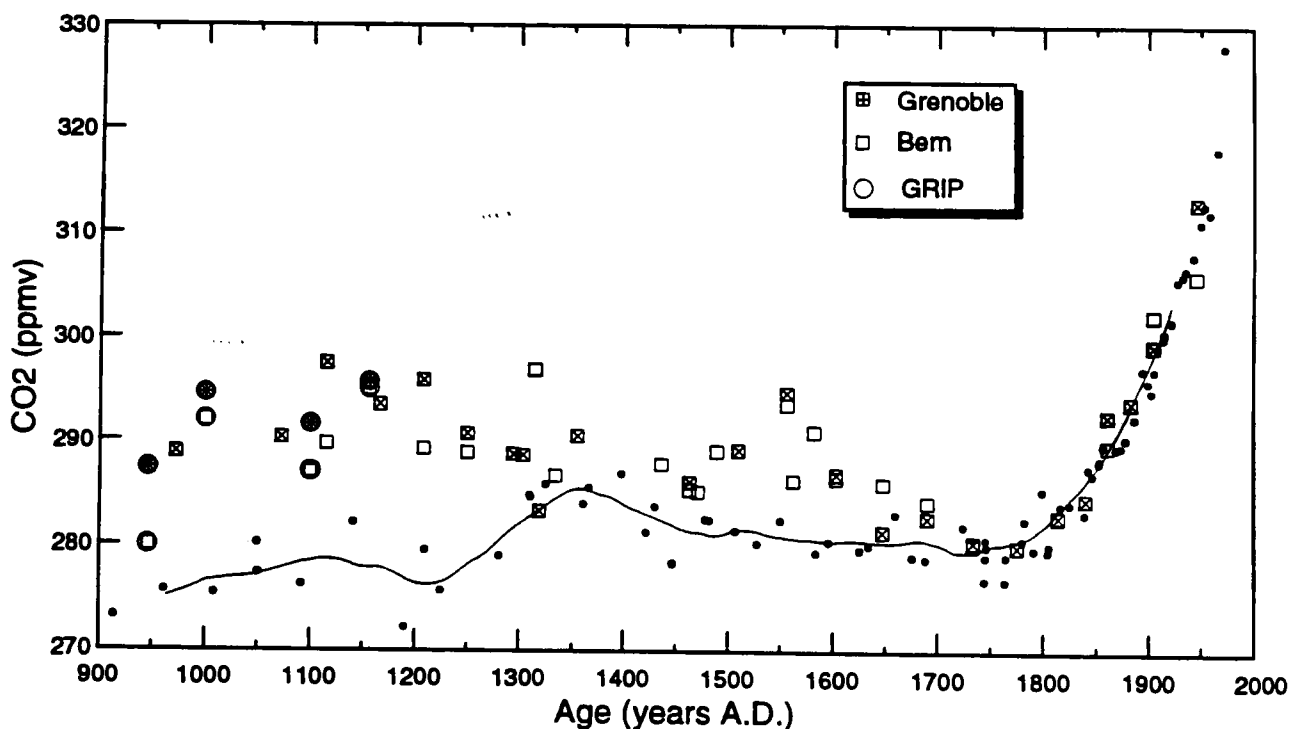
du cycle du carbone (environ .3 GT de carbone par an à comparer aux 175 GT échangées saisonnièrement entre l'atmosphère, la biosphère et l'océan) ; seule la durée du déséquilibre est importante (100 ans environ).

### II.3.2.3 Extension du profil de Vostok sur le deuxième cycle climatique

Comme pour le méthane, le profil CO<sub>2</sub> de Vostok a été complété jusqu'à 2546 m de profondeur, c'est-à-dire jusqu'à environ 220 k. ans BP (*Jouzel et al., 1993*). Le signal CO<sub>2</sub> lui aussi confirme l'extension de la corrélation marquée entre traces gazeuses à effet de serre et climat déjà observée sur l'ensemble du premier cycle climatique.

### II.3.3 Autres traces gazeuses

L'un des objectifs du groupe gaz est d'étendre la description de l'évolution au cours du passé à d'autres traces gazeuses, soit directement actives au niveau radiatif (N<sub>2</sub>O), soit importantes pour la compréhension des interactions entre cycles biogochimiques et climat (CO, CH<sub>3</sub>Cl, COS). Ces travaux entrent dans le



**Figure 1.8**

Variations du CO<sub>2</sub> contenu dans la glace du Groenland (Carrés avec distinction des mesures faites à Berne ou Grenoble pour le forage EUROCORE et cercles pour le forage GRIP) et dans celle de l'Antarctique (points noirs et courbe lissée, au cours du dernier millénaire. La courbe lissée (Antarctique) fournit une description de la variabilité du CO<sub>2</sub> atmosphérique à cette échelle de temps.

cadre du programme PNCA. Nous avons mis au point une méthode de mesure des concentrations en  $N_2O$  dans l'air piégé dans la glace. Les résultats obtenus sur de l'air pré-industriel indiquent, en accord avec d'autres laboratoires étrangers, une teneur moyenne entre 275 et 280 ppbv. Cependant les résultats peuvent être très dispersés et nous n'avons pas encore compris les causes d'une telle dispersion. Pour des raisons de charge de travail nous ne pouvons actuellement donner à ce programme de mesure la priorité qu'elle nécessiterait.

Le CO fait actuellement l'objet du travail de thèse de Denis Haan. Celui-ci a mis au point une méthode originale qui permet d'obtenir dans ce domaine particulièrement vierge (mesure du CO de l'air piégé dans la glace) de résultats reproductibles avec un niveau «zéro» de contamination. L'effort porte actuellement sur une inter-calibration nécessaire des standards avec nos collègues australiens du CSIRO (Aspendale) et sur la mesure de profils groenlandais et antarctiques couvrant le dernier millénaire.

Enfin très récemment, la mise au point de la mesure de  $CH_3Cl$  et COS dans les carottes de glace a été abordée. Dans le cas du COS cette mise au point se fait en collaboration avec l'équipe de R.Gammon (Seattle).

## II.4 GLACES POLAIRES ET SENSIBILITÉ DU CLIMAT

(D. Raynaud, P. Martinerie, J.M. Barnola, J. Chappellaz, J.R. Petit, J. Jouzel)

La mise en évidence d'une relation étroite entre climat et gaz à effet de serre (gaz carbonique et méthane analysés au LGGE) sur l'ensemble du dernier cycle climatique a été l'un des résultats majeurs des études réalisées sur la carotte de Vostok. Les résultats disponibles sur 220 000 ans (Jouzel et al., 1993) confirment cette corrélation qui est le point de départ d'une méthode empirique d'estimation de la sensibilité du climat (paramètre clé pour la prédiction de l'évolution du climat au cours des prochaines décennies). Nous avons participé à la poursuite de cette approche, initiée en 1990, et collaboré à différents articles dont un de synthèse dans la revue Science (Raynaud et al., 1993).

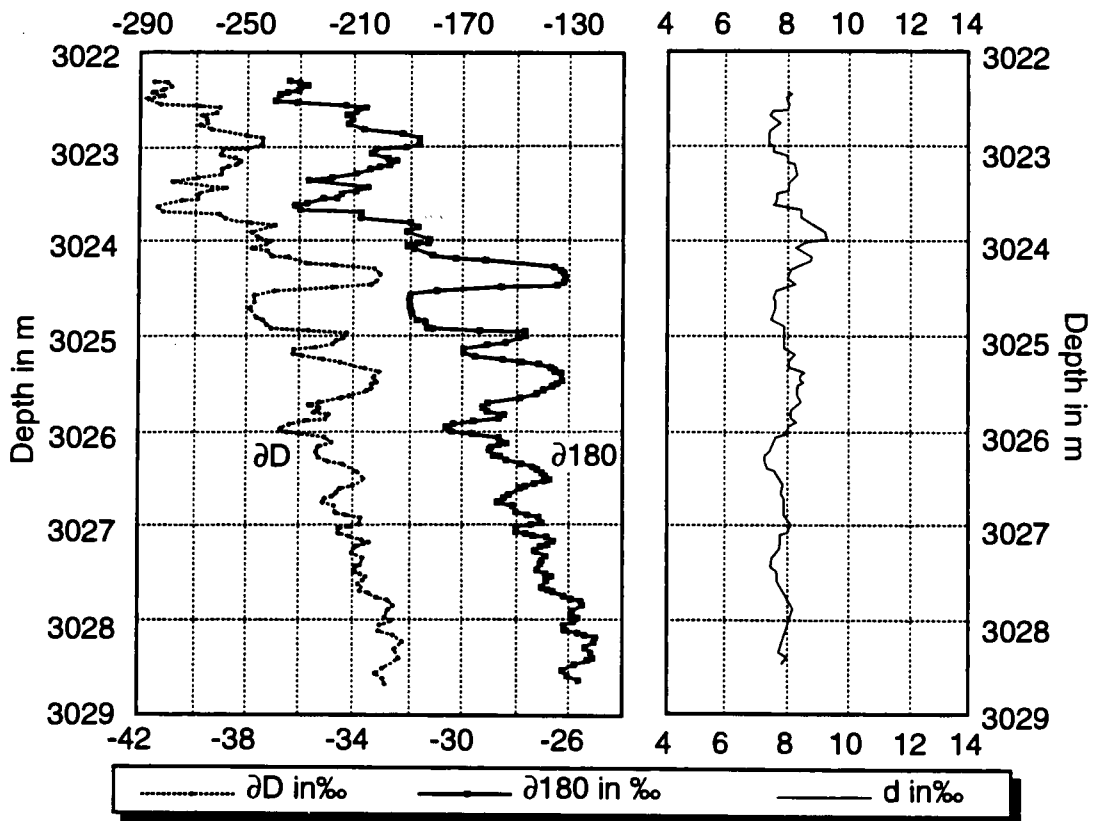


Figure 1.9 :

Variations des teneurs en deutérium et oxygène 18 dans les glaces basales du forage GRIP (les 6 derniers mètres). Ces teneurs sont beaucoup plus riches que celles mesurées le long du carottage. Ces valeurs élevées suggèrent que ces glaces basales se sont formées en l'absence de calotte (Adapté de Souchez et al., 1994).

## II.5 PROBLÈME DES GLACES BASALES

(J. Jouzel, J. Chappellaz)

Le processus de gel s'accompagne de fractionnements isotopiques dont la fusion de la glace efface, au moins en partie, la mémoire. Cette propriété a des conséquences intéressantes pour la mise en évidence du phénomène de fusion/regel qui, sous certaines conditions, prend place à la base des glaciers. Le domaine privilégié de ces applications que nous développons en collaboration avec une équipe de l'Université Libre de Bruxelles est l'étude des mécanismes de formation des glaces basales. Les travaux les plus récents ont porté sur un glacier canadien dans lequel s'est produit une avancée de type catastrophique (*Sharp et al., 1994*), sur les six derniers mètres du forage GRIP dont nous avons démontré qu'ils se sont formés à un moment où la calotte était extrêmement réduite (*Souchez et al., 1994*), sur les mécanismes de formation d'un ice-shelf en région côtière de l'Antarctique (*Souchez et al., 1995 Fig. 1.9*) et, enfin, sur la caractérisation de glace formée en

période glaciaire à la base d'un glacier Arctique (*Stievenard et al., soumis*).

En ce qui concerne la glace basale du centre du Groenland, une contribution originale du LGGE, en collaboration avec le Pr. Roland Souchez (Université de Bruxelles), a été l'analyse des échantillons du fond du forage de GRIP, à la fois en méthane, en gaz carbonique et en teneur en gaz. Cette glace probablement très ancienne mais non datée à ce jour, présente des teneurs en CH<sub>4</sub> et CO<sub>2</sub> encore jamais vues : nous observons dans la glace chargée en particules une augmentation assez régulière avec la profondeur, partant en CH<sub>4</sub> et CO<sub>2</sub> respectivement de 6 000 ppbv et 3 000 ppmv, et atteignant 6 000 ppmv et 150 000 ppmv. La teneur en gaz de cette glace basale diminue environ d'un facteur deux entre le sommet et la base. A ce jour, l'explication probable pour ces observations serait que le CH<sub>4</sub> et le CO<sub>2</sub> proviennent du sol sous-jacent la glace et qu'il y ait eu diffusion du gaz et mélange ultérieurs des couches de glace. Ces résultats ont été publiés dans *Geophysical Research Letters* (*Souchez et al., 1995*).

## III COLLABORATIONS ET CONTRATS

### III.1 COLLABORATIONS

L'exploitation des archives glaciaires du climat est réalisée en collaboration étroite avec différentes équipes françaises participant aux programmes du PNEDC sur la Paléoclimatologie aux hautes latitudes (Antarctique) et sur le cycle du carbone (jusque fin 1993) :

- Laboratoire de Modélisation du Climat et de l'Environnement (Saclay)
- Laboratoire René Bernas d'Orsay (F. Yiou, G. Raisbeck)
- Centre des Faibles Radioactivités et Tandatron (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 l'Institut Français pour la Recherche et la Technologie Polaires. 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 Saint-Pétersbourg) et de la NSF (Division of Polar Programs).

Les collaborations internationales engagées incluent :

l'Institut de Recherches Arctiques et Antarctiques de Saint-Pétersbourg,  
l'Institut de Géographie de l'Académie des Sciences de Moscou,  
l'Université Libre de Bruxelles et l'Université d'Anvers,  
l'Institut de Physique de Berne,  
le Fraunhofer Institut de Garmisch,  
les Universités de Rhode Island, de Washington, le GISS/NASA (New-York) aux USA  
le CSIRO (Aspendale, Australie)  
l'Université d'Utrecht,  
l'Université de Copenhague

Plusieurs chercheurs de ces universités ont donné des conférences ou séjourné de quelques semaines à quelques mois au L.G.G.E.

### III.2 CONTRATS

L'équipe bénéficie de contrats de la Commission des Communautés Européennes :

The global carbon cycle and last perturbation by man and climate : 1991/1993

Global changes over the last 30 000 years : 1990/1993.

Greenland Ice core project : 1991/1994

Global ice sheets during the 2 climatic cycles, with a special emphasis on entering into glaciation : 1993/1995

The global carbone cycle and its perturbation by man and climate II atmosphere ; 1993/1995

du soutien de programmes nationaux tels que : Programme National de Chimie

Atmosphérique, Programme National d'Etude de la Dynamique du Climat, de la Collaboration France - Australie (Environnement) et du Ministère de l'Environnement.

Parmi les autres contrats, on peut citer :

Fondation de France : « Glace de l'Antarctique et effet de serre » (Méthane et variations climatiques - Accumulation de la neige et niveau des mers) : 1991/1995

CEA : Mise au point de la méthode d'équilibration CO<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>O en vue de l'analyse de la teneur en oxygène 18 dans les glaces polaires : 1992/1993

Elle a aussi bénéficié de Crédits d'équipement INSU dans le cadre de la CSOA.

## IV - ACTIVITES DE FORMATION

L'équipe encadre de nombreux stagiaires d'écoles d'ingénieurs, de maîtrise ou de licence. Elle encadre aussi des étudiants de DEA :

1991/92 Martin T., Porcheron J., Vandevae-  
re J.P (DEA MMGE)

1992/93 Basile I. (DEA Géosciences Nancy)  
Chabert d'Hières B. et Denux F.  
(MMGE)

1993/94 Dulac E. (Paris VII)

1994/95 Jeanjean E. (MMGE) et Kints S.  
(Paris VII)

et des thésitifs.

Plusieurs thèses ont été soutenues :

C. Polle : Contribution à l'étude des sources naturelles de monoxyde de carbone et d'hydrocarbures légers non méthaniques (avril 1993) (Direction : D. Raynaud)

et en co-direction avec d'autres équipes :

Bourdelle-Lestringant Barbara (Fév. 94) -  
Sherjal Isabelle (Juin 95) - Surdyk Sylviane  
(1993) : co-direction M. Fily, équipe  
Télé-détection

Lestringant Renaud (Fév. 94) : co-direction C.  
Ritz (équipe Rhéologie)

Ciais Philippe : en collaboration avec le LMCE

ou sont en cours :

Arnaud Laurent : Co-direction P. Duval équipe  
Rhéologie

Delmotte Marc : (direction D. Raynaud) en  
collaboration avec le LMCE : Etude isotopique  
de la teneur en air du forage DSS du Law  
Dome ; implications climatiques

Malaize Bruno (direction D. Raynaud) en col-  
laboration avec le LMCE : Analyse isotopique  
de l'air inclus dans les glaces polaires :  
implications pour l'étude du pléoclimat des  
250.000 dernières années.

Basile Isabelle : Caractérisation des parti-  
cules dans les carottes de glace antarctique  
(direction J.R. Petit)

Denux Francis : Etude de la modification par  
diffusion des signaux climatiques : implica-  
tion pour l'échantillonnage (direction J.P.  
Benoist)

Haan Denis : Etude de l'évolution du monoxyde  
de carbone dans la glace polaire. Cette évolution  
est-elle un indicateur de l'évolution atmosphé-  
rique au cours du passé ? (direction D. Raynaud)

## V PUBLICATIONS

## V.1 REVUES À COMITÉ DE LECTURE

1991

Barnola J.M., Genthon, C., Jouzel, J., Raynaud, D., Barkov, N.I., Korotkevich, Y.S., Kotlyakov, V.M., and Lorius, C., : Reconstitution des variations du CO<sub>2</sub> atmosphérique en relation avec le climat au cours des derniers 160 000 ans à partir de la carotte de Vostok (Antarctique). In : *Klimageschichtliche Probleme der letzten 130 000 Jahre*, B.Frenzel (ed.), 225-230. 1991.

Barnola J.M., Pimienta, P., Raynaud, D. and Korotkevich, Y.S., : CO<sub>2</sub>-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, n° 2, 83-90. 1991.

Lorius C., Polar ice cores: a record of climatic and environmental changes. *Global Changes of the Past*, (Raymond S. Bradley Eds.), OIES, Boulder, 261-294. 1991.

Souchez R., Meneghel, M., Tison, J.L., Lorrain, R., Ronceaux, D., Baroni, C., Lozej, A., Tabacco, I. and Jouzel, J., : Ice composition evidence of marine ice transfer along the bottom of a small Antarctic ice shelf. *Geophys. Res. Lett.*, 18, n° 5, 849-852. 1991.

Yiou P., Genthon, C., Jouzel, J., Le Treut, H., Barnola, J.M., Lorius, C. Korotkevich, Y.N., : High-frequency paleovariability in climate and CO<sub>2</sub> levels from Vostok ice core records. *J. Geophys. Res.*, 96, B12, n° 10, 20365-20378. 1991.

1992

Ciais P., Petit, J.R., Jouzel, J., Lorius, C., Barkov, N.I., Lipenkov, V., Nicolaiev, V., : Evidence for an early Holocene climatic optimum in the Antarctic deep ice-core record. *Climate Dynamics*, 6, 169-177. 1992.

Gaudichet A., De Angelis, M., Joussaume, S., Petit, J.R., Korotkevich, Y.S. and Petrov, V.M., : Comments on the origin of dust in East Antarctica for present and ice age conditions. *J. Atmosph. Physics*, 14, 129-142. 1992.

Grousset F.E., Biscaye, P.E., Revel, M., Petit, J.R., Pye, K., Joussaume, S., and Jouzel, J., : Antarctic (Dome C) ice core dust at 18 ky BP : Isotopic constraints on origins. *Earth Planet. Science Letters*, 111, 175-182. 1992.

Jouzel J., Petit, J.R., Barkov, N.I., Barnola, J.M., Chappellaz, J., Ciais, P., Kotlyakov, V.M., Lorius, C., Petrov, V.N., Raynaud, D., Ritz, C., : The last deglaciation in Antarctica: Further evidence of a «Younger Dryas» type climatic event. *NATO ASI Ser.*, 12, 229-266. 1992.

Lorius C., Jouzel, J., and Raynaud, D., : The ice core record: past archive of the climate and signpost to the future. *Phil. Trans. R. Soc. Lond.*, B338, 227-234. 1992.

Lorius C., Jouzel, J., Raynaud, D., : Greenhouse warming, climate sensitivity and Vostok data. In: «*Glaciers Ocean Atmosphere Interaction*», *AIHS publ.*, 208, 29-47. 1992.

Martinerie P., Raynaud, D., Etheridge, D. M., Barnola, J.M., and Mazaudier, D., : Physical and climatic parameters which influence the air content in polar ice. *Earth and Planetary Sciences Letters*, 112, 1-13. 1992.

Raisbeck G.M., Yiou, F., Jouzel, J., Petit, J.R., Barkov, N.I., and Bard, E., : <sup>10</sup>Be deposition at Vostok, Antarctica, during the last 50,000 years and its relationship to possible cosmogenic production variations during this period. *NATO ASI Series*, 12, 127-139. 1992.

Raynaud D., Barnola, J.M., Chappellaz, J., Zardini, D., Jouzel, J., Lorius, C., : Glacial-interglacial evolution of Greenhouse gases as inferred from ice core analysis: a review of recent results. *Quat. Sci. Rev.*, 11, 381-386. 1992.

Sowers T., Bender, M., Raynaud, D., and Korotkevich, Y.S., :  $\delta^{15}\text{N}$  of N<sub>2</sub> in air trapped in polar ice : a tracer of gas transport in the firn and a possible constraint of gas age-ice age differences. *J. Geophys. Res.*, 97, D14, 15683-15697. 1992.

1993

Blunier T., Chappellaz, J.A., Schwander, J., Barnola, J.M., Despert, T., Stauffer, B., and Raynaud, D., : Atmospheric methane record from a Greenland ice core over the last 1000 years. *Geophys. Res. Lett.*, 20, n° 20, 2219-2222. 1993.

Chappellaz J., Blunier, T., Raynaud, D., Barnola, J.M., Schwander, J. Stauffer, B., : Synchronous changes in atmospheric CH<sub>4</sub> and Greenland climate between 40 and 8 kyr BP. *Nature*, 366, 443-445. 1993.

- Chappellaz J.A., Fung, I.Y. et Thompson, A.M., : The atmospheric CH<sub>4</sub> increase since the Last Glacial Maximum. 1. Source estimates. *Tellus*, **45B**, 228-241. 1993.
- Craig H., Raynaud, D., Barnola, J.M., Chappellaz, J., Delmas, R.J., and Lorius, C., : Gravitational separation in polar firm. *Science*, **262**, 763-764, (correspondance). 1993.
- (Dansgaard W., Johnsen, S.J., Clausen, H.B., Dahl-Jensen, D., Gundestrup, N.S., Hammer, C.U., Hvidberg, C.S., Steffensen, J.P., Sveinbjörnsdottir, A.E., Jouzel, J., Bond, G., : Evidence for general instability of past climate from a 250-kyr ice-core record. *Nature*, **364**, 218-220. 1993.
- GRIP Project Members, : Climate instability during the last interglacial period recorded in the GRIP ice core. *Nature*, **364**, 203-207. 1993.
- Jean-Baptiste P., Raynaud, D., Mantsi, F., Sowers, T., Barkov, N., : Analyse des isotopes de l'hélium dans la calotte polaire Antarctique : résultats préliminaires au site Vostok. *C.R. Acad. Sci. Paris*, **316**, Série II, 491-497. 1993.
- Jouzel et al. (16 auteurs), : Extending the Vostok ice core record of paleoclimate to the penultimate glacial period. *Nature*, **364**, 407-412. 1993.
- Lorius C., Jouzel, J., Raynaud, D., : Glacial-interglacials in Vostok : climate and greenhouse gases. *Global and Planetary Change*, **7**, 131-143. 1993.
- Martinerie P., Raynaud D., Lipenkov V., Chappellaz J., Mazaudier D., Lorius C., and Barkov N.I. : The air content record in the Vostok ice core. *EOS*, **73** (14), 107. 1992.
- Raynaud D. : The ice record of the atmospheric composition: A summary, chiefly of CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, and CO<sub>2</sub>, in trace gases and biosphere, B. Moore III and D. Schimel (eds.), UCAR/OIES, Boulder, Colorado, *Global Change Institute*, **1**, pp 165-176. 1992.
- Raynaud D., and Siegenthaler, U., : Role of trace gases : the problem of lead and lag. In: *Global Changes in the Perspective of the Past*, (Dahlem Workshop Report), 173-188. 1993.
- Raynaud D., Jouzel, J., Barnola, J.M., Chappellaz, J., Delmas, R.J. and Lorius, C., : The ice record of Greenhouse gases. *Science*, **259**, 926-934. 1993.
- Raynaud D., Chappellaz, J., : The record of Atmospheric Methane. *NATO ASI Series*, **113**, 39-61. 1993.
- Raynaud D., : Ice core records as a key to understanding the history of atmospheric trace gases. In: *Biogeochemistry of Global Change*, (R.S. Oremland ed.), Chapman et Hall, New York, London, 29-45. 1993.
- Schwander J., Barnola, J.-M., Andrié, C., Leuenberger, M., Ludin, A., Raynaud, D., and Stauffer, B., : The age of the air in the firm and the ice at Summit, Greenland. *J. Geophys. Res.*, **98**, D2, 2831-2838. 1993.
- Sowers T., Bender M., Labeyrie L., Martinson D., Jouzel J., Raynaud D., Pichon J.J., and Korotkevich Y.S. : 135,000 year Vostok-SPECMAP common temporal framework, *Paleoceanography*, **8**, 737-766. 1993.
- Struck U., Sarnthein, M., Westerhausen, L., Barnola, J.-M., and Raynaud, D., : Ocean-atmosphere carbon exchange: impact of the «biological pump» in the Atlantic equatorial upwelling belt over the last 330,000 years. *Paleogeogr., Paleoclimatol., Paleoecol.*, **103**, 41-56. 1993.
- Struck U., Sarnthein M., Westerhausen L., Barnola J.M., and Raynaud D.: Ocean-atmosphere carbon exchange: impact of the «biological pump» in the Atlantic equatorial upwelling belt over the last 330,000 years, *Paleogeogr., Paleoclimat., Paleoecol.*, **103**, 41-56. 1993.
- Thompson A.M., Chappellaz, J.A., Fung, I.Y., and Kucsera, T.L., : The atmospheric CH<sub>4</sub> increase since the Last Glacial Maximum. 2. Interactions with oxidants. *Tellus*, **45B**, 242-257. 1993.
- Tison J.L., Petit, J.R., Barnola, J.M., Mahaney, W.C., : Debris entrainment at the ice-bedrock interface in sub-freezing temperature conditions (Terre Adélie, Antarctica). *J. Glaciol.*, **39**, n° 132, 303-315. 1993.

1994

Delmas R.J., Petit J.R. : Present antarctic aerosol composition, a memory of ice age atmospheric dust ? *Geophys. Res. Lett.*, **21** (10), 879-882 , 1994.

Jouzel J., Lorius, C., Johnsen, S., and Grootes, P., : Climate instabilities: Greenland and Antarctic records. *C.R.Acad.Sci. Paris*, **319**, n° 11, 65-67. 1994.

Jouzel J., et Lorius, C., : Utilisation des isotopes stables de l'eau en climatologie et paléoclimatologie : l'exemple des glaces polaires. *Mém. Soc. Géol. France*, **162**, 189-198. 1994.

Jull A.J.T, Devendra, Lal, Donadue, D.J., Mayewski, P., Lorius, C., Raynaud, D., and Petit, J.R., :

Measurements of cosmic-ray-produced  $^{14}\text{C}$  in firn and ice from Antarctica. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*, **B92**, 326-330. 1994.

Legrand M., Raynaud D., Barnola J.-M. and Chappellaz J. : Trends in global distribution of trace gases inferred from polar ice cores, in: Low-temperature chemistry of the atmosphere, G.K. Moortgat et al. eds., *NATO ASI Series* **121**, pp 447-464 1994.

Lorius C., Oeschger, H., : Paleo-perspectives : Reducing Uncertainties in Global Change ?. *Ambio*, **23**, n° 1, 30-36. 1994.

Martinerie P., Lipenkov, V.Y., Raynaud, D., Chappellaz, J., Barkov, N.I. and Lorius, C., : Air content paleo record in the Vostok ice core (Antarctica) : A mixed record of climatic and glaciological parameters. *J. Geophys. Res.*, **99**, D5, 10565-10576. 1994.

Qin Dahe, Petit, J.R., Jouzel, J., Stievenard, M., : Distribution of stable isotopes in surface snow along the route of the 1990 International Trans-Antarctica Expedition. *J. Glaciol.*, **40**, n° 134, 107-118. 1994.

Van de Wal R.S.W., Van Roijen J.J., Raynaud D., Van der Borg K., de Jong A.F.M., Oerlemans J., Lipenkov V., and Huybrechts P. : From  $^{14}\text{C}/^{13}\text{C}$  measurements towards radiocarbon dating of ice, *Tellus* **46B**, 94-102. 1994.

## 1995

Abysov S.S., De Angelis, M., Barkov, N.I., Barnola, J.M., Bender, M., Chappellaz, J., Chistiakov, V.K., Duval, P., Genthon, C., Jouzel, J., Kotlyakov, V.M., Korotkevich, Ye.S., Kudriashov, B.B., Lipenkov, V.Y., Legrand, M., Lorius, C., Malaize, B., Martinerie, P., Nikolayev, V.I., Petit, J.R., Raynaud, D., Raisbeck, G., Ritz, C., Salamatin, A.N., Saltzman, E., Sowers, T., Stievenard, M., Vostretsov, R.N., Wahlen, M., Walbroeck, C., Yiou, F., and Yiou, P. International effort helps decipher mysteries of paleoclimate from antarctic ice cores, *EOS*, **76** (17), 169, 179, 1995.

Barnola, J.M., Ankin M., Porcheron J., Raynaud D., Schwander J. and Stauffer B. :  $\text{CO}_2$  evolution during the last millenium as recorder by Antarctic and Greenland ice, *Tellus*, **47b**, 264-272, 1995.

Blunier T., Chappellaz J., Schwander J., Stauffer B., and Raynaud D. : Variations in atmospheric methane concentration during the holocene epoch, *Nature*, **374**, 46-49, 1995.

Jouzel J., Vaikmae R., Petit J.R., Martin M., Duclos Y., Stievenard M., Lorius C., : The two-step shape and timing of the last deglaciation in Antarctica, *Climate dynamics*, **11**, 151-161, 1995.

Lipenkov V., Candaudap F., Ravoire J., Dulac E., Raynaud D. (in press): A new device for air content measurements in polar ice, *J. of Glaciology*

Lorius C., Jouzel J., and Raynaud D. (in press) : The ice core record of climate and greenhouse gases; Lessons from the past, key for the future, *Paläoklimaforschung*

Martinerie P., Brasseur, G.P., and Granier, C., : The chemical composition of ancient atmospheres: a model study using ice core data. *J. Geophys. Res.*, (in press). 1995.

Schimmel D., Enting I., Heimann M., Wigley T., Raynaud D., Alves D., Siegenthaler U. (in press): : The carbon cycle, in *Climate Change 1994*, J.T. Houghton et al., editors, Published for the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) by Cambridge University press, 35-71.

Souchez R., Lemmens, M., and Chappellaz J., : Flow-induced mixing in the GRIP basal ice deduced from the  $\text{CO}_2$  and  $\text{CH}_4$  records. *Geophys. Res. Lett.*, **22**, 1, 41-44. 1995.

## V.2 AUTRES PUBLICATIONS

### 1991

Jouzel J., Lorius, C., et Raynaud, D., : Chauds et froids d'autrefois. *Sciences et Vie*, **174**, 32-39. 1991.

Lorius C., : Climat et gaz à effet de serre : les données des archives glaciaires. *La Vie des Sciences, série générale*, **8**, n 2, 107-124. 1991.

Lorius C., Huet, S., Piro, P., et Delaleu, I., : Antarctique, laboratoire de la planète. *Sciences et Avenir*, **530**, 49-65. 1991.

Lorius C., : Polar ice cores: a record of climatic and environmental records. *J. glaciol. and geocryol.*, **13**, n° 4, 283-289, in Chinese with English summary. 1991.

Lorius, C., : Glaces de l'Antarctique : une mémoire, des passions. *Editions Odile Jacob*, 301 p. 1991.

Tanoubi I., Martinerie, P., Bourseau, P., Muratet, G., and Toulhoat, H., : Simulation de la désactivation d'un catalyseur d'hydrodémétalisation à géométrie ouverte. *Revue de l'Institut Français du Pétrole*, **46**, 3, 389-406. 1991.

### 1992

Barnola J.M., et Duval, P., : La transformation de la neige en glace à la surface des calottes polaires. *Images de la physique*. CNRS, pp. 52-57. 1992.



Lipenkov V. Ya., Barkov, N.I., Martinerie, P., and Raynaud, D., : Air content of ice deposited in the Vostok station area. *Antarctica* (in russian), **31**, 85-98. 1993.

Polle Cl., : Contribution à l'étude des sources naturelles de monoxyde de carbone et d'hydrocarbures légers non méthaniques. *Thèse de doctorat de l'Université Paris VI*, 325 p. 1992.

### 1993

Raynaud D., Le Treut, H., : L'augmentation des gaz à effet de serre. Incertitudes et complexité. Dans : *L'état de l'environnement dans le monde*, (M. et C. Beaud et M. L. Bouguerra, Eds), Editions La Découverte, Paris, pp. 85-92. 1993.

Raynaud D., Ice core records as a key to understanding the history of atmospheric trace gases. In : *Biogeochemistry of Global Change*, pp. 29-45. 1993.

### 1994

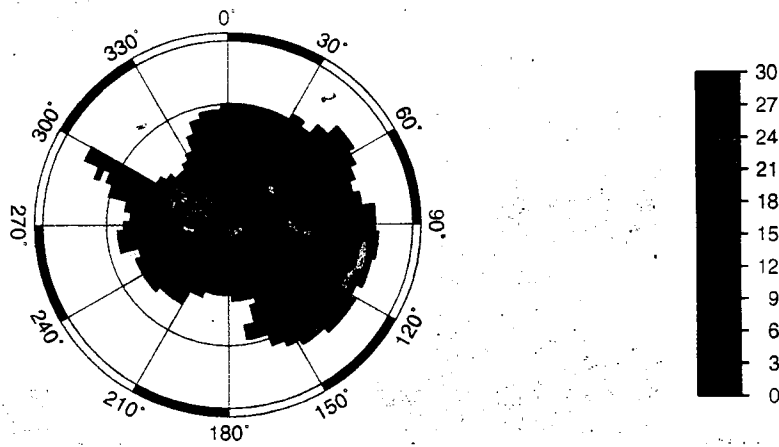
Chappellaz J., : Polar ice bubbles as recorders of past greenhouse gas concentrations. *Analisis Magazine*, **22**, n° 7, 25-28. 1994.

Jouzel J., Lorius, C., Stievenard, M., : Les archives glaciaires du Groenland. *La Recherche*, **261**, n° 25, 38-46 .1994.

Tchistiakov V.K., Kracilev, A., Lipenkov, V.Ya, Balestrieri, J.Ph., Rado, C., and Petit, J.R., : Behavior of a deep hole drilled in ice at Vostok Station. *Mem. Natl Inst. Polar Res., Spec. Issue*, **49**, 247-255. 1994.

Stiévenard M., Delmotte, M., Jouzel, J., Fléhoc, C., : Mass spectrometry analysis of water stable isotopes: reconstruction of past climates from polar ice cores. *Analisis Magazine*, **22**, n° 7, 21-24. 1994.

***LMDz July surface wind intensity (m/s)***



**2. MODELISATION**

## I OBJECTIFS GENERAUX

Le fil conducteur de l'activité de ce groupe est la modélisation physique et numérique de la composante atmosphérique du système climatique. Cette activité est poursuivie en relation avec divers aspects de glaciologie et de l'étude de l'environnement atmosphérique global, et surtout polaire, traités au LGGE. Elle repose principalement sur l'utilisation de modèles de circulation générale (MCG) atmosphériques, en particulier ceux développés en

France par le CNRS et par Météo-France. Ces modèles sont analysés, adaptés et complétés pour nos applications : l'étude des processus physiques qui déterminent les distributions de certains traceurs notamment les aérosols, dans l'atmosphère ; et la simulation des caractéristiques des climats à hautes latitudes, notamment celles du manteau neigeux et de la circulation atmosphérique au-dessus des calottes de glace.

## II RESULTATS MAJEURS OBTENUS AU COURS DES QUATRE DERNIERES ANNEES

### II.1 MODÉLISATION GLOBALE DE DISTRIBUTIONS DE TRACEURS ATMOSPHÉRIQUES

L'analyse des carottes de glace polaires montre que les flux de dépôt, à la surface des calottes Antarctique et Groenlandaise, d'un grand nombre de constituants mineurs de l'atmosphère, et en particulier d'aérosols, varient en corrélation avec les changements climatiques du passé. C'est le cas notamment des poussières d'origine désertique et du sel marin, pour lesquels on observe des concentrations dans la glace du dernier maximum glaciaire 3 à 100 fois plus élevées que dans la glace actuelle. Ces variations peuvent s'interpréter en termes de changements des sources (extension, position, disponibilité de l'aérosol), des processus de soulèvement (turbulence de couche limite, vent de surface), et/ou de la capacité de transport de l'atmosphère (vents, turbulence de grande échelle, lessivage).

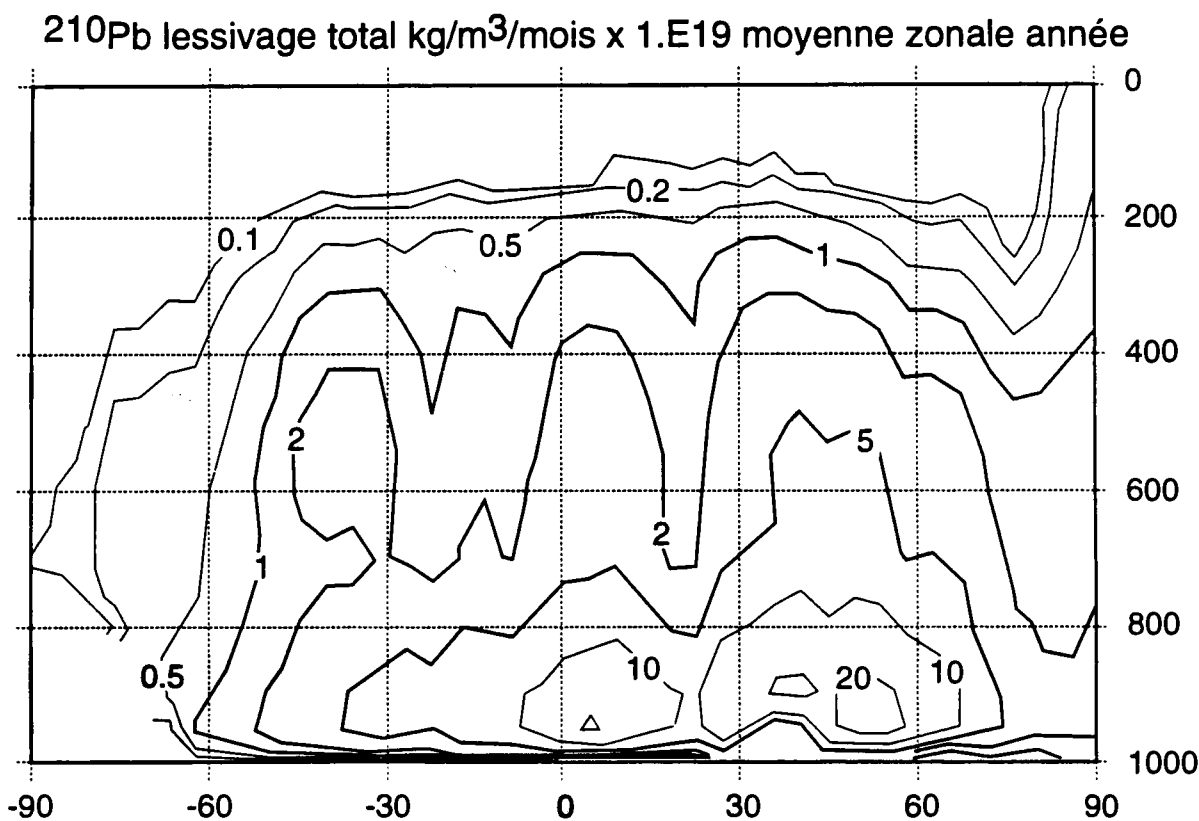
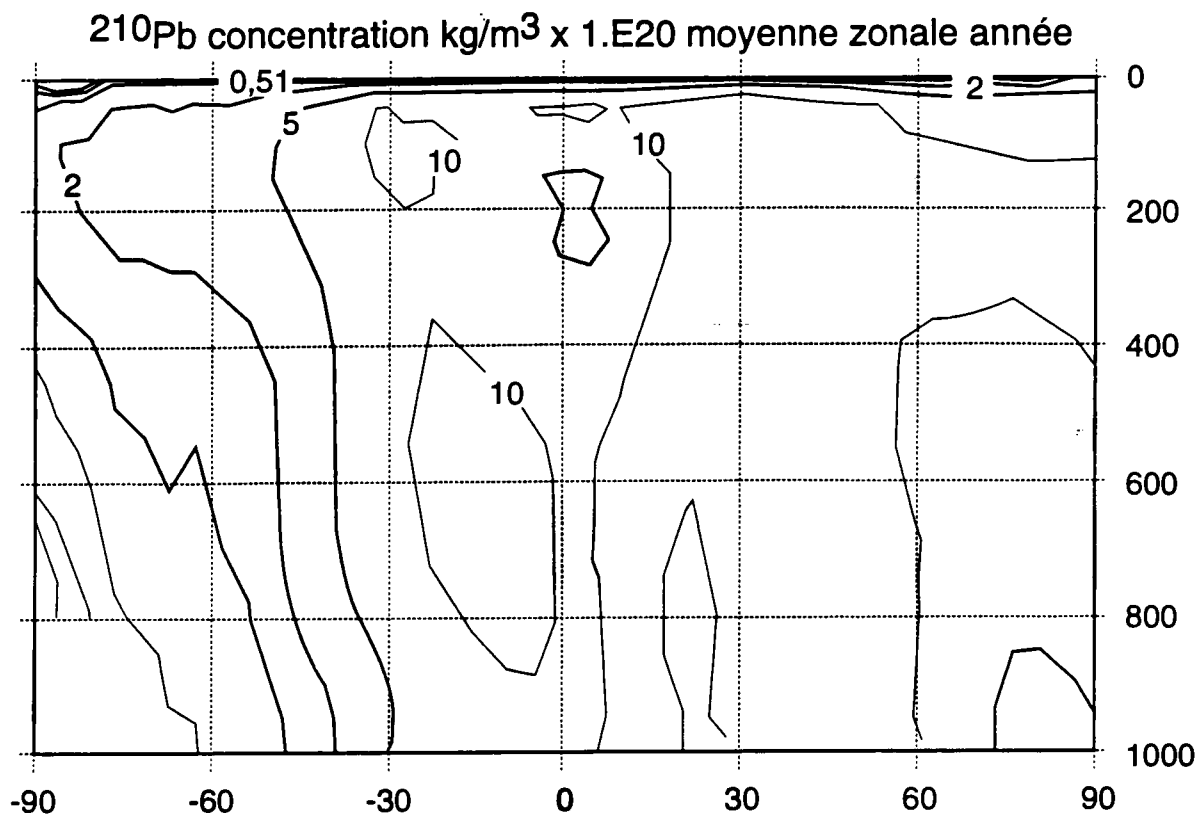
Les modèles de circulation générale (MCGs) d'atmosphère simulent les variables atmosphériques et de surface qui influencent ces termes (variabilité et intensité des vents, stabilité de l'atmosphère, convection et turbulence, précipitations, aridité des sols...), pour le climat actuel ainsi que pour des climats différents de l'actuel. Modéliser les processus physiques qui régissent les distributions et flux d'aérosols à l'intérieur d'un MCG devrait donc permettre d'interpréter quantitativement certaines données paléoclimatiques, en particulier celles issues des carottes de glace.

Au-delà de l'étude des paléoclimats et paléoenvironnements atmosphériques en liaison avec les activités de glaciologie et glacio-chimie du

laboratoire, la modélisation de la composante aérosol du système climatique à l'échelle globale est intéressante à plus d'un titre. Les aérosols sont susceptibles d'interagir plus ou moins directement avec le climat, via le rayonnement ou le cycle hydrologique. Ils sont aussi impliqués dans les cycles bio-géochimiques globaux. Enfin, et les données glaciologiques en sont un exemple, les aérosols et autres constituants mineurs de l'atmosphère sont des traceurs de la circulation atmosphérique, du climat, et de l'environnement à toutes les échelles de temps.

Cependant, la modélisation de ces traceurs n'est pas un problème facile, en particulier parce qu'ils sont soumis à des processus physiques de très petite échelle (micro-physiques) dont il faut paramétriser les conséquences aux échelles résolues par un modèle global. L'information nécessaire pour mettre en oeuvre ces paramétrisations est généralement assez directement disponible dans les MCGs, ce qui n'est pas le cas de la modélisation dite «off-line». Par exemple, les MCGs procurent une information détaillée sur la fréquence et la distribution verticale des précipitations, information qui n'existe dans aucune base globale de données d'observations. Il est vrai que la crédibilité d'une donnée climatique modélisée n'est pas assurée. En fait, dans un modèle de traceurs, une difficulté à reproduire les distributions observées peut être la signature, et donc fournir le diagnostic, d'un défaut du MCG de base.

L'activité du groupe de modélisation climatique dans le domaine de l'étude des traceurs atmosphériques était initialement motivée par l'inter-



**Figure 1.10:** Moyenne zonale de la concentration (en haut) et du taux de lessivage par les précipitations (en bas) du plomb 210 dans le modèle de circulation générale d'atmosphère du LMD. Le lessivage est un processus microphysique paramétrisé en fonction des précipitations simulées. Abscisse : Latitude (degrés). Ordonnée : Pression (hPa)

prétation des résultats d'analyse de carottes de glace. Il est assez rapidement apparu que les traceurs les plus intéressants du point de vue du paléoclimat ne sont pas les plus appropriés pour la mise au point, dans des modèles globaux, de paramétrisations de processus microphysiques d'aérosols. Nous nous sommes donc aussi orienté vers d'autres espèces, dont la sensibilité à ces processus est néanmoins similaire à celle des poussières ou du sel marin. Enfin, la capacité de diagnostic de certains traceurs vis à vis du fonctionnement des MCGs a aussi motivé quelques uns de nos travaux.

### **II.1.1 Poussières désertiques et sel marin dans le modèle de circulation générale d'atmosphère du Goddard Institute for Space Studies (GISS, NASA)**

Les travaux de développement d'un modèle du cycle global des poussières désertiques et du sel marin dans le MCG du GISS, entrepris au cours du séjour post-doctoral de Christophe Genthon au GISS en 1990 (et déjà largement décrits dans le précédent rapport quadriennal), ont été concrétisés par un ensemble d'articles et de présentations à des conférences au cours des années 1991 et 1992 (par exemple, *Genthon (1992a) et Genthon (1992 b)*). Ces travaux ont été plus récemment (1993-94) repris dans le cadre du stage de Master danois de Katrine Krogh Andersen, encadré par Christophe Genthon au LGGE (*Krogh Andersen 1994, Krogh Andersen et Genthon 1994*). Au cours de ce stage, Katrine Krogh Andersen s'est heurté pour le Groenland à la même difficulté que celle rencontrée précédemment pour l'Antarctique : Le modèle reproduit très mal les changements observés dans la glace à l'échelle des cycles glaciaire-interglaciaire, alors que la variabilité saisonnière contemporaine est assez bien simulée.

La version utilisée du MCG du GISS, dont la résolution spatiale est assez grossière, n'est plus à l'heure actuelle à un niveau technique satisfaisant. Comparativement, il apparaît beaucoup moins intéressant de poursuivre le développement de ce modèle que d'investir dans la mise au point de nouveaux modèles. L'étude et la simulation des poussières désertiques et du sel marin, provisoirement interrompues, seront poursuivies dans un autre MCG (voir document de prospective).

### **II.1.2 Autres traceurs atmosphériques : Radon 222, Plomb 210, Béryllium 7 et Béryllium 10.**

#### **II.1.2.1 Dans le MCG Cycle 5 du LMD**

Le développement d'un modèle de traceurs sur la base du MCG du Laboratoire de Météorologie Dynamique du CNRS (LMD, Paris), à l'époque

dans sa version la plus récente dite Cycle 5, a été entrepris dès l'arrivée au LGGE de Christophe Genthon en 1991. Ce développement a été initié dans le cadre du stage de fin d'études d'un binôme d'élèves de l'Ecole Nationale de la Météorologie (*Moulin et Garro, 1992*). L'expérience acquise lors de la mise au point du modèle de poussières et de sel marin du GISS a été largement mise à profit pour ce nouveau modèle. Pourtant, ce sont des traceurs différents qui ont été choisis et jusqu'à présent étudiés dans le modèle LMD (Cycle 5).

Ces traceurs, le  $^{222}\text{Rn}$  et le  $^{210}\text{Pb}$ , n'ont pas un intérêt direct pour l'étude des paléoclimats. Par contre, ils présentent moins d'incertitudes au niveau des sources et permettent de mieux analyser, contraindre et améliorer les formulations mises en oeuvre pour les traceurs, et en particulier pour la microphysique des aérosols (Fig. 1.10). Il faut aussi noter que ces espèces plus simples permettent, dans une certaine mesure, d'évaluer le fonctionnement du MCG servant de support au modèle de traceur. Nous avons ainsi analysé et caractérisé, à la lumière des résultats de  $^{222}\text{Rn}$ , l'action sur les masses d'air du mélange convectif, du mélange turbulent et du transport dans le MCG (*Genthon et Armengaud, 1995a*). Cette étude a aussi permis de comparer ces différents processus atmosphériques dans les MCGs du LMD et du GISS (voir II.1.2.2).

Les MCGs sont des modèles globaux, et les traceurs simulés à l'intérieur de MCGs le sont à l'échelle globale. Les résultats de simulations sont analysés et exploités sur l'ensemble du globe mais nous gardons naturellement un intérêt spécial pour les régions polaires et les calottes de glace, et en particulier pour les processus de dépôt des aérosols sur les surfaces enneigées (*Genthon et Armengaud, 1995b*) ; *Genthon et al. (1995)*.

#### **II.1.2.2 Dans le MCG du GISS**

A l'exception des travaux de Katrine Krogh Andersen sur les sources de poussières affectant le Groenland, les derniers développements concernant le modèle de traceurs GISS ont été réalisés par Alexandre Armengaud au cours de son stage de DEA en 1992-93. Il s'agissait d'une approche parallèle (et simultanée) au développement du modèle de traceurs LMD, puisque à cette occasion ont été introduit, à la place des poussières et du sel marin, le  $^{222}\text{Rn}$ , le  $^{210}\text{Pb}$ , et aussi le  $^7\text{Be}$  et le  $^{10}\text{Be}$  (*Armengaud et Genthon, 1993*). La stratosphère du MCG GISS étant assez symbolique, nous n'avons pas pu exploiter les deux Bérylliums à la mesure de leur

potentiel. Les résultats de  $^{222}\text{Rn}$  et de  $^{210}\text{Pb}$  du modèle GISS ont été systématiquement comparés à ceux du modèle LMD Cycle 5 (Genthon et Armengaud, 1995a et b).

### II.1.2.3 Dans le nouveau MCG du LMD

En 1994, le LMD a mis à notre disposition son nouveau MCG, appelé (peut être provisoirement) LMDz. Bien que ce modèle soit encore à l'état de prototype, nous avons décidé de l'utiliser aussitôt comme base de développement d'un nouveau modèle de traceurs. Plusieurs aspects ont motivé cette décision précoce, la plus importante étant la possibilité avec LMDz de choisir très librement la résolution horizontale. Pour l'étude des régions polaires, ne serait-ce que pouvoir accéder à une grille régulière en latitude, alors que celle du Cycle 5 est obligatoirement régulière en sinus de latitude (avec, en conséquence, une dégradation maximale de la résolution aux pôles), est déjà un énorme progrès. Il est même possible de choisir de raffiner la grille du MCG LMDz («zoomer») sur les pôles, ou d'ailleurs en n'importe quelle région d'intérêt particulier. De plus, LMDz est actuellement assez proche dans ses principes physiques du Cycle 5, ce qui permet de tirer partie de notre expérience avec ce dernier. Enfin, nous avons aussi engagé une contribution au développement du MCG de base, notamment pour l'étude du climat des régions polaires et la mise en oeuvre de la fonction zoom (voir II 2).

Nous avons donc entrepris d'introduire dans ce nouveau modèle des formulations de traceurs inspirées, autant que possible, de ce qui avait été fait pour Cycle 5. La grille est pour le moment régulière et la résolution globale modérée, mais la résolution polaire est déjà plus fine que celle atteinte avec les modèles GISS ou LMD Cycle 5. Pour le  $^{222}\text{Rn}$ , le nouveau modèle produit des résultats assez comparables à ceux du Cycle 5, sauf dans l'Arctique où un phénomène saisonnier de type «Arctic haze» (avec des concentrations très élevées en hiver) est simulé de façon purement dynamique, c'est à dire sans faire intervenir un cycle de la production ou du lessivage, ce qui n'était le cas ni du Cycle 5, ni du GISS.

Le développement du nouveau modèle constitue l'essentiel de l'effort actuel du groupe de modélisation climatique dans le domaine de la simulation des traceurs. C'est d'ailleurs l'un des objectifs majeurs de la thèse en cours d'Alexandre Armengaud.

## II.2 MODÉLISATION DU CLIMAT DES RÉGIONS POLAIRES

Il apparaît qu'une des grandes incertitudes de la modélisation de l'évolution des calottes de glace polaires réside dans l'imposition de la condition à la limite atmosphérique. En effet, pour le Groenland comme pour l'Antarctique, le gain de masse se fait essentiellement au niveau de cette interface via les précipitations. La glace se perd principalement par fonte dans les régions côtières (Groenland) et le vèlage d'icebergs, mais il n'est pas certain que d'autres processus mettant en jeu l'atmosphère (sublimation, soulèvement et transport de la neige de surface) soient négligeables. De grandes quantités d'énergie sont aussi échangées avec l'atmosphère de surface, qui régissent la distribution de température dans la glace et certaines de ses propriétés mécaniques.

Une bonne modélisation des calottes de glace (une des activités importantes du LGGE) requiert donc une bonne modélisation de l'atmosphère au dessus des calottes. Les MCGs produisent directement la plupart des informations atmosphériques nécessaires (précipitations, évaporation/sublimation, températures, flux d'énergie...) et indirectement les autres, mais pas forcément avec une qualité acceptable. Jusqu'à récemment, les régions polaires étaient un peu les parents pauvres de la modélisation atmosphérique globale. Non seulement les formulations et paramétrisations développées pour les basses et moyennes latitudes ne sont pas vérifiées et ajustées pour les hautes latitudes, mais certaines de ces paramétrisations peuvent être essentiellement inadaptées aux caractéristiques particulières de l'atmosphère au dessus des calottes de glace.

Ces caractéristiques ne peuvent être découplées de celles des régions polaires dans leur ensemble. De plus, au delà du simple cadre des calottes de glace, les régions polaires constituent un aspect important du climat global. Si la source principale du cycle global de l'énergie se trouve dans les tropiques, le puits essentiel se trouve dans l'Arctique et dans l'Antarctique. De l'échange de chaleur et d'eau douce avec l'atmosphère à hautes latitudes résulte la circulation profonde de l'océan. Les simulations les plus crédibles de l'impact climatique des changements anthropogéniques de la composition de l'atmosphère prévoient une sensibilité maximale à hautes latitudes. Tout ceci justifie que nos investigations tendent à s'étendre progressivement à l'ensemble des régions polaires Arctique et Antarctique.

### II.2.1 Climat antarctique du MCG du GISS

Par son travail sur la modélisation des traceurs atmosphériques dans le MCG du GISS (voir II.1.1), Christophe Genthon a acquis une assez bonne expérience du contenu algorithmique de ce modèle. Il était donc assez naturel que ce soit le premier modèle que nous utilisions pour des études de climat au dessus des calottes de glace. Etant donnée la résolution spatiale limitée du MCG GISS, nous nous sommes cantonnés à la calotte la plus volumineuse, l'Antarctique. Certaines défaillances du modèle ont pu être associées à des défauts dans la paramétrisation de l'albédo de la neige de surface (bien calibrée pour des neiges tempérées, mais pas pour de la neige polaire) et la prescription de la couverture de la glace de mer (*Genthon, 1994a*), défauts qui l'on risque fort de retrouver dans d'autres MCGs.

### II.2.2 Climats polaires dans le MCG Arpège de Météo-France

Alors que les MCGs du GISS et du LMD (Cycle 5) sont relativement insatisfaisants du point de vu de la résolution spatiale en régions polaires, une série de simulations de type AMIP (Atmospheric Model Intercomparison Project, c-a-d avec les conditions aux limites des années 1979-1988) a été réalisée par Météo-France avec le MCG Arpège sous différentes résolutions dont certaines extrêmement fines pour un modèle global. Nous avons analysé les résultats de ces simulations au dessus des calottes Antarctique et Groenlandaise, pour remarquer tout d'abord un défaut commun avec le MCG du GISS : Les températures de surface sont trop froides en zone côtière, probablement à cause d'une absence de prise en compte des chenaux dans la glace de mer et des flux de surface associés (*Genthon, 1994 a*).

Les simulations d'Arpège ont aussi montré une très grande sensibilité des précipitations à la résolution horizontale (*Genthon et al., 1994*). Ceci s'explique par une réponse assez marquée des précipitations à la topographie des calottes de glace, qui est évidemment d'autant mieux représentée que la résolution est plus fine. Il apparaît clairement qu'un pas de grille supérieur à 5° est insuffisant pour capturer même les structures les plus grossières de cette distribution. Une résolution d'au moins 1° est souhaitable pour espérer reproduire toutes les caractéristiques importantes pour, par exemple, simuler de façon détaillée l'évo-

lution des calottes de glace. Avec les moyens informatiques actuels, ce n'est qu'exceptionnellement qu'un MCG peut être utilisé avec une telle résolution sur l'ensemble du globe. L'avènement des MCGs à grille variable devrait permettre des simulations locales suffisamment fines à coût de calcul acceptable (voir le paragraphe II.2.4).

Nous avons commencé à étendre ces analyses à l'ensemble du bassin Arctique. Le bilan d'eau douce de l'océan Arctique est une caractéristique importante de l'océanographie dans cette région. Les précipitations comptent pour une fraction importante de ce bilan (l'autre composante étant l'apport des grands fleuves Canadiens et Sibériens). Nous avons vérifié que les distributions de pluie simulées par Arpège sont assez raisonnables, sauf en ce qui concerne une zone de minimum de précipitation dans le cadran sibérien de l'océan polaire (*Genthon, 1994b*). Un problème d'advection de l'humidité, identifié également au dessus des calottes de glace et lié au schéma de transport spectral du modèle, pourrait être responsable de ce défaut.

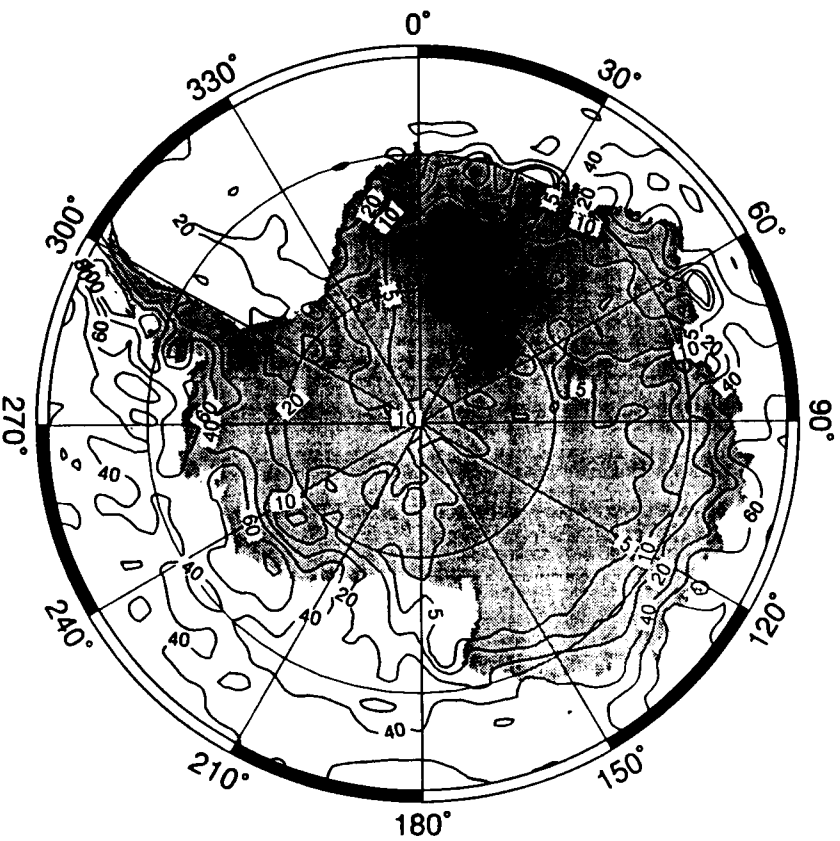
### II.2.3 Climats polaires analysés et prédits par le Centre Européen de Prévisions Météorologiques à Moyen Terme (CEPMMT)

Le CEPMMT (comme d'autres centres de prévision météorologique, mais souvent avec une qualité supérieure) produit toutes les 6 heures des analyses de l'état de l'atmosphère, ainsi que des prévisions à quelques jours. Les analyses peuvent être décrites comme étant des interpolations physiques (car basées sur l'utilisation d'un MCG) des données observées et transmises régulièrement par le réseau météorologique mondial et les satellites. Les prédictions sont de courtes simulations de MCG initialisées par ces analyses. Les champs analysés et prédits sont donc contraints par des observations (à la différence d'un MCG utilisé en mode «climat», uniquement contraint par les conditions aux limites). Ils sont globaux et échantillonnés régulièrement, même si les observations de base ne le sont ni en temps ni en espace.

Au dessus des calottes de glace polaires, et dans les régions polaires en général, les données d'observation sont trop rares pour permettre le développement d'une climatologie complète et fiable de la circulation atmosphérique. Les analyses et prévisions, en tirant un parti maximum des données dispo-

## ECMWF T106 Annual (85-91) Accumulation (cm/yr)

### Antarctica



### Greenland

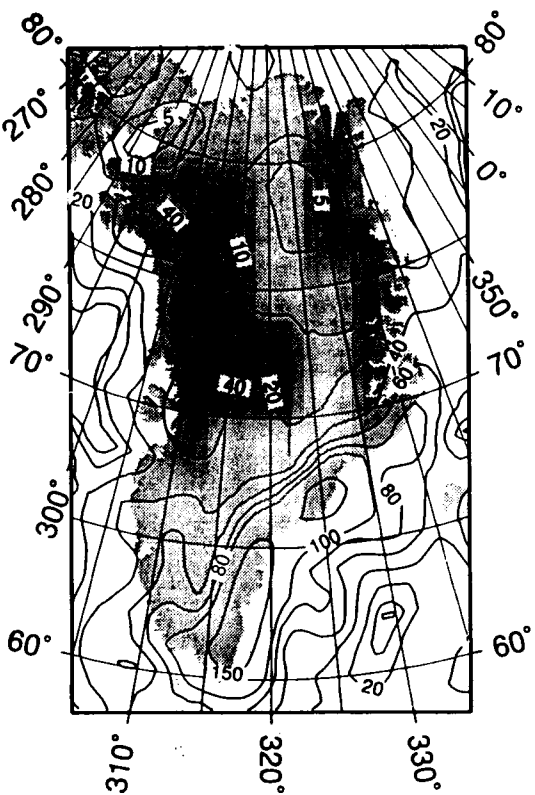


Figure 1.11:

Bilan net d'accumulation (précipitation moins évaporation) à la surface des calottes Antarctique et Groenlandaise, issu des prévisions à court terme des années 1985 à 1991 du Centre Européen de Prévisions Météorologiques à Moyen Terme. Unité : cm/an.



nibles et en remplaçant les données manquantes par des résultats de MCG, sont probablement les produits disponibles se rapprochant le plus d'une telle climatologie. Effectivement, les températures analysées et précipitations prédites du CEPMMT se comparent assez favorablement aux éléments d'information dont on dispose par ailleurs, que ce soit pour les valeurs moyennes ou pour les variances saisonnières (*Genthon 1994b ; Genthon et al. 1995*) (Fig. 1.11). Nous concluons que l'on peut, au moins en première approche, utiliser ces produits pour vérifier de façon très complète les résultats de MCGs en mode climat.

#### **II.2.4 Climat antarctique du nouveau MCG du LMD avec zoom polaire**

Le stage de DEA de Gerhard Krinner (1993-94) et sa thèse en cours au LGGE sont, au moins en partie, consacrées au développement de la fonction zoom du nouveau MCG du LMD (LMDz, voir II.1.2.3) pour l'étude du climat au dessus des calottes de glace. Le zoom a été installé sur la région Antarctique et atteint actuellement une résolution méridienne de  $1^{\circ}$ , pour une résolution moyenne globale du modèle d'environ  $4^{\circ}$ . Après des débuts assez difficiles pour assurer la stabilité du modèle, les résultats sont maintenant plus qu'encourageants [Krinner et Genthon, 1995]. Le coût de calcul du modèle est environ 4 fois moins élevé que celui d'un modèle uniformément fin, pour une qualité de simulation équivalente dans la région zoom. Nous visons une résolution méridienne d'environ  $0.5^{\circ}$  sur la calotte, ce qui nous mettrait au niveau des modèles méso-échelle à couverture limitée actuellement utilisés sur des régions de la taille de l'Antarctique. L'avantage de notre approche est que le modèle reste global, avec un échange à double sens et un changement d'échelle progressif entre la région d'intérêt (en l'occurrence, l'Antarctique) et le reste du monde. On évite ainsi un forçage brutal aux frontières de cette région, et on peut plus facilement envisager l'étude de changements climatiques globaux.

### **II.3 MODÉLISATION PHYSIQUE DU MANTEAU NEIGEUX POLAIRE**

Voici un thème de recherche nouveau, motivé sous des aspects différents et complémentaires par l'un et l'autre des deux domaines d'activité décrits ci-dessus (traceurs et climat

polaire). En effet, la neige est l'interface des échanges d'énergie et de matière (eau ou constituants mineurs de l'atmosphère) entre la glace des calottes et l'atmosphère.

La neige est bien sûr une composante importante du climat à haute latitude. Au dessus des calottes de glace, les caractéristiques physiques de la neige (température, densité, taille des grains, état de surface...) influent sur l'atmosphère via l'albédo, la capacité d'échange d'énergie sensible et latente, et la friction. En retour, c'est l'atmosphère (précipitation, température, rayonnement, vent de surface...) qui détermine ces caractéristiques de la neige, à tel point que l'on peut envisager d'utiliser les données satellitaires relatives à la neige polaire pour évaluer certaines variables climatiques à l'échelle d'une calotte entière. En effet, outre l'estimation des températures de surface par télédétection infra-rouge (et même micro-onde), les capteurs visibles et micro-onde permettent de remonter à la structure de la surface et des premières couches du manteau neigeux (c'est l'une des activités principales de l'équipe de télédétection du LGGE). L'inversion de cette information en terme de climat peut s'envisager en utilisant un modèle de l'évolution des caractéristiques physiques du manteau neigeux en réponse aux variables climatiques recherchées.

Enfin, toutes les impuretés que la glace stocke et grâce auxquelles on peut remonter aux paléo-environnements par analyse de carottes correspondent à des constituants mineurs de l'atmosphère capturés par la neige de surface. La structure de la neige est susceptible d'influer sur sa capacité de capture et de conservation de ces espèces dans le temps.

Le groupe de modélisation climatique a donc proposé un sujet de thèse sur la modélisation physique détaillée du manteau neigeux, incluant la thermodynamique et l'hydrologie de la neige, mais aussi le métamorphisme des grains, les changements de structure et de densité, la formation de croûtes de vent... Il s'agit d'un travail très pluridisciplinaire, ce que l'on peut souligner en notant qu'Hervé Dang, l'étudiant de thèse qui en a la charge depuis Décembre 1994, est aussi co-encadré par l'équipe de télédétection du LGGE (dont le responsable, Michel Fily, est directeur principal de cette thèse), et par le Centre d'Etude de la Neige (CEN, Météo-France à Grenoble). CROCUS, le modèle de neige tempérée du CEN, sera adapté aux conditions polaires

### III COLLABORATIONS ET CONTRATS

#### II.1 COLLABORATIONS INTERNATIONALES

- School of Earth Sciences de l'Université de Melbourne : Modélisation climatique Antarctique (programme de Coopération Franco-Australienne de l'INSU).
- British Antarctic Survey du NERC britannique: Modélisation climatique Arctique. Modélisation du manteau neigeux polaire (programme européen Polar Snow).

#### III.2 COLLABORATIONS NATIONALES

- Laboratoire de Météorologie Dynamique du CNRS: Utilisation des MCGs du LMD. Développement de formulations de traceurs dans ces modèles. Validation climatique des modèles. Développement de la fonction zoom du nouveau modèle.
- Centre National de Recherches Météorologiques de Météo-France: Utilisation du MCG Arpège. Validation à haute résolution (programme européen HIRTYCS). Adaptation du modèle CROCUS à la neige polaire (programme européen Polar Snow).
- Laboratoire de Modélisation du Climat et de l'Environnement du CEA: Paléoclimat (programme international Paleoclimate Model Intercomparison Project). Utilisation de certains MCGs du LMD.

#### III.3 CONTRATS

Crédits et heures de calcul sur super-ordinateurs :

- Programme National d'Etude de la Dynamique du

Climat (modélisation des traceurs pour le paléoclimat)

- Programme Environnement (terminé) (modélisation des poussières désertiques)
- Programmes DG XII de la Commission de l'Union Européenne

.Climate and sea level changes, and associated impact in Europe (deux contrats successifs terminés, projet re-soumis Avril 1995) (modélisation climatique au dessus des calottes de glace)

.North-South climatic connexion and carbon cycle over the last 250 kyr (soumis Avril 1995) (Modélisation de traceurs pour le paléoclimat)

.Investigation and modeling of the physical characteristics of snow at the surface of polar ice sheets (soumis Avril 1995, et dont Christophe Genthon serait le coordinateur) (Modélisation physique du manteau neigeux polaire)

.High resolution ten year climate simulation (soumis Avril 1995, et dont Christophe Genthon serait co-contracteur) (Modélisation du climat des régions Arctique et Antarctique)

- Dotation heures de calcul Cray C98 IDRIS (Développement zoom LMDz, modélisation des traceurs)

- Cray C94 CEA (Modélisation des traceurs)

- Cray 2 Météo-France (Modélisation du climat des régions polaires, modélisation du manteau neigeux polaire)

### IV ACTIVITES DE FORMATION

Encadrement de stagiaires et de DEA :

Septembre 1991 - juin 1992 : 2 stagiaires de DEA (dont Alexandre Armengeaud, actuellement en thèse au laboratoire)

Décembre 1991 - juin 1992 : 3 stagiaires de l'école Nationale de la Météorologie (dont 1 en co-encadrement avec le CEA)

Septembre 1993 - juin 1994 : 1 stagiaire de DEA (Gerhard Krinner, actuellement en thèse au laboratoire) + 1 master Université de Copenhague.

Mars - juin 1994 : 3 stagiaires de maîtrise physique

Plusieurs stages d'été en informatique appliquée, dont :

Moulin V., et S. Garro, 1992. Introduction des aérosols dans un modèle de circulation générale, Ecole Nationale de la Météorologie, Météo-France..

Encadrement de thèse :

Krogh Andersen Katerine., 1994. Atmospheric dust in relation to climate and modelling, thèse de Master Danois, Université de Copenhague.

Armengaud Alexandre : thèse de doctorat commencée en 1994.

Krinner Gerhard : thèse de doctorat commencée en 1994.

Dang Hervé : thèse de doctorat commencée en 1994.

## V PUBLICATIONS

### V.1 REVUES A COMITE DE LECTURE

Genthon C., Simulations of the long range transport of desert dust and sea-salt in a general circulation model, dans *Precipitation Scavenging and Atmosphere-Surface Exchange*, édité par S. E. Schwartz et W. G. N. Slinn, Hemisphere Publ. Corp., Washington, pp 1783-1794. 1992.

Genthon C., Simulations of desert dust and sea-salt aerosols in Antarctica with a general circulation model, *Tellus 44B*, 371-389. 1992b.

Genthon C., Antarctic climate modelling with general circulation models of the atmosphere, *J. Geophys. Res.* **99**, 12953-12961. 1994a.

Genthon C., J. Jouzel, et M. Déqué, Accumulation at the surface of polar ice sheets: Observation and modelling for global climate change, dans *Global Precipitations and Climate Change*, édité par M. Desbois et F. Desalmand, NATO ASI Series I, Vol. **26**, pp 53-76. 1994.

Genthon C., et A. Armengaud, GCMs simulations of atmospheric tracers in the polar latitudes: South Pole (Antarctica) and Summit (Greenland) cases. *Sci. Total Env.* **160/161**, 101-116. 1995a.

Genthon C., et A. Armengaud, Radon 222 as a com-

parative tracer of transport and mixing in two general circulation models of the atmosphere, *J. Geophys. Res.* **100**, 2849-2866. 1995b.

Genthon C., et A. Braun, ECMWF analyses and predictions of the surface climate of Greenland and Antarctica, *J. Clim.*, sous presse. 1995.

Genthon C., A. Armengaud, et G. Krinner, Climate and atmospheric tracers modeling with GCM: Polar applications, dans *Processes of Chemical Exchange Between the Atmosphere and Polar Snow*, édité par E. W. Wolff, NATO ASI Series I, sous presse. 1995.

### V.2 AUTRES PUBLICATIONS

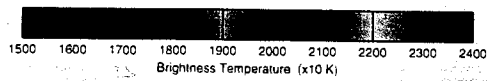
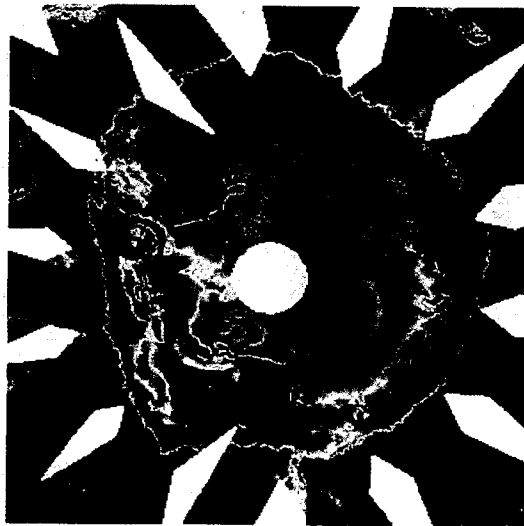
Armengaud A. et C. Genthon, Modelling global distributions of  $^{222}\text{Rn}$ ,  $^{210}\text{Pb}$  and  $^7\text{Be}$  in the atmosphere with general circulation models, dans *Isotope Techniques in the Study of Past and Current Environment Changes in the Hydrosphere and the Atmosphere*, IAEA, Vienna, SM-329/6, pp 15-24. 1993.

Genthon C., 1994b. ECMWF and Météo-France GCM simulations of precipitation and surface mass balance of the Greenland ice sheet, dans *Proceedings of the Conference on the Dynamics of the Arctic Climate System*, Goeteborg, Suède, pp 11-14 Novembre 1994.

ANTARCTICA

July 15, 1985  
SMMR (37 V)

1000 km



**3. TELEDETECTION**

## I OBJECTIFS GENERAUX

L'étendue et l'accès difficile des régions englacées limitent leur observation. Celle-ci est souvent réduite à des mesures ponctuelles insuffisantes. Ces zones sont propices à l'utilisation de la télédétection qui seule en permet une couverture globale.

Les activités du LGGE étant principalement axées sur les calottes polaires, l'étude des caractéristiques de surface du continent Antarctique est actuellement le principal objectif scientifique de l'équipe Télédétection. Dans ce cadre l'un de nos buts est de mieux comprendre les interactions entre la neige qui recouvre ce continent et le rayonnement électromagnétique

afin de pouvoir interpréter les mesures de télédétection en terme de paramètres climatiques tels que la température ou le taux d'accumulation de neige. A cette fin plusieurs approches complémentaires ont été utilisées, et ce dans deux domaines spectraux très différents (spectre solaire et micro-onde) :

- comparaison directe entre mesures satellitaires et données de terrain
- élaboration de modèles physiques permettant de retrouver l'énergie émise ou réfléchiée par la neige en fonction de ses caractéristiques
- expérimentations de terrain dans les Alpes, d'un accès plus facile que les calottes polaires, pour valider les modèles et méthodes utilisés.

## II RESULTATS MAJEURS OBTENUS AU COURS DES QUATRE DERNIERES ANNEES

### II.1 ETUDES SUR LA NEIGE ET L'ANTARCTIQUE

#### II.1.1 Structure de la neige et rayonnement microonde

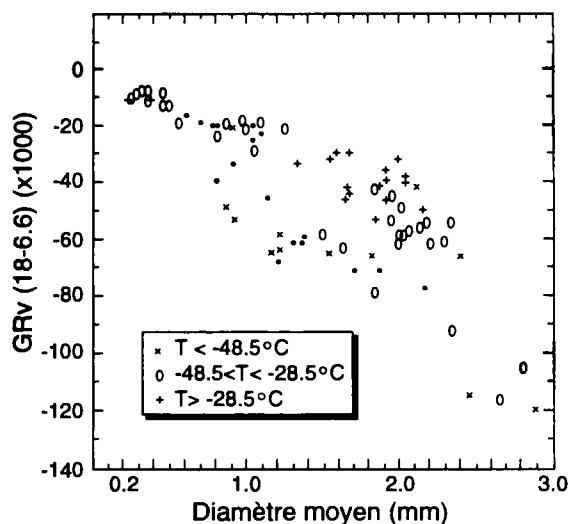
(M. Fily, S. Surdyk, I. Sherjal, M. Gay)

Collaborations : CNES, CERT, CEN, IAP (Berne), U. d'Hokkaido

Les données microondes offrent le double avantage d'être relativement indépendantes des conditions atmosphériques et de donner une information sur une épaisseur de neige allant du mètre à quelques mètres. Elles permettent, par ailleurs, d'avoir une approche globale du continent Antarctique car les instruments ont une faible résolution spatiale mais, par contre, un très grand champ d'observation.

#### II.1.1.1 Comparaison entre données de terrain et données de télédétection sur l'Antarctique

Nous avons utilisé les données du radiomètre SMMR (Scanning Multichannel Microwave Radiometer) du satellite Nimbus 7 (1978-86) qui mesurait l'énergie provenant de la surface à 5 fréquences (6.6, 10.7, 18, 21 et 37 GHz) à deux polarisations Horizontale et Verticale. Ces mesures ont été comparées à des données de



**Figure 1.12:**

$GRv(18-6.6)^*$  en fonction de la taille moyenne des grains de neige sur 0-2 m. Influence de la température ( $T$ ) indiquée par des symboles différents.

$^*GRv(18-6.6) = [TBv(18) - TBv(6.6)] / [TBv(18) + TBv(6.6)]$   $TBv$  température de brillance en polarisation verticale.

terrain collectées lors d'expéditions en Antarctique (thèse S. Surdyk). Ces mesures permettent d'évaluer la variation des caractéristiques de surface sur de longues distances. Deux conclusions ressortent de cette étude comparative (Surdyk et Fily, 1993). D'une part, à une forte stratification correspond une grande différence

entre les polarisations verticale et horizontale, surtout pour les fréquences 6.6 et 10.7 GHz. D'autre part, on a trouvé une forte corrélation entre la valeur moyenne de la taille des grains sur 0-2 mètres et la différence de comportement entre les fréquences 18 et 6.6 GHz (gradient en fréquence), avec néanmoins une dispersion des points liée à la température du milieu (Fig. 1.7).

### II.1.1.2 Modélisation de l'émissivité microonde de la neige

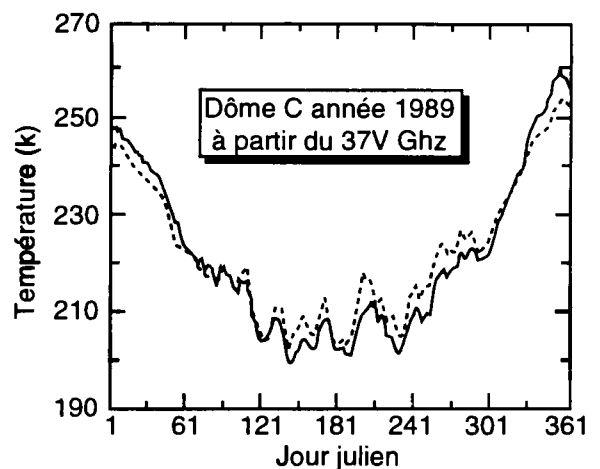
Les phénomènes physiques mis en jeu dans l'interaction neige-microonde sont encore mal connus. La première étape consiste donc à comprendre ces interactions avant d'aborder le problème inverse c'est-à-dire la restitution des caractéristiques de la neige à partir des données de télédétection. Pour cela un modèle d'émissivité microonde a été développé (*thèse S. Surdyk*). Ce modèle est basé sur la résolution des équations de Maxwell au travers de la théorie des fortes fluctuations. En effet la neige sèche est un milieu diffusant, constitué d'air et de glace qui sont des éléments présentant des caractéristiques diélectriques très différentes, d'où fortes fluctuations dans le milieu.

Dans une première étape, une solution analytique est développée pour le cas d'un milieu uniforme en profondeur. Ce modèle simplifié a permis d'étudier l'influence des trois paramètres: température, taille des grains de neige et densité. Cependant ce modèle ne permet pas de prendre en compte la nature stratifiée du manteau neigeux en Antarctique. Lorsque les caractéristiques de la neige changent en fonction de la profondeur, la solution fait appel à une résolution numérique. La neige est alors considérée comme isotherme, stratifiée de façon horizontale avec des interfaces planes, et isotrope à l'intérieur de chaque strate. La variabilité naturelle du manteau neigeux à l'intérieur d'un pixel de plusieurs dizaines de kilomètres de côté est prise en compte par la réalisation d'un grand nombre de calculs autour d'une stratigraphie moyenne ; cette approche permet par ailleurs de résoudre les problèmes d'interférence liés aux interfaces.

Les résultats du modèle ont été comparés favorablement aux mesures de terrain correspondant à 3 sites très différents en Antarctique (*Surdyk et Fily, 1995*). Cependant des désaccords apparaissent encore qui justifient la continuité du travail sur ce thème: introduction de la forme des grains et de la rugosité dans le modèle, et mesures de terrain ou en laboratoire pour améliorer nos connaissances sur les interactions neige-rayonnement.

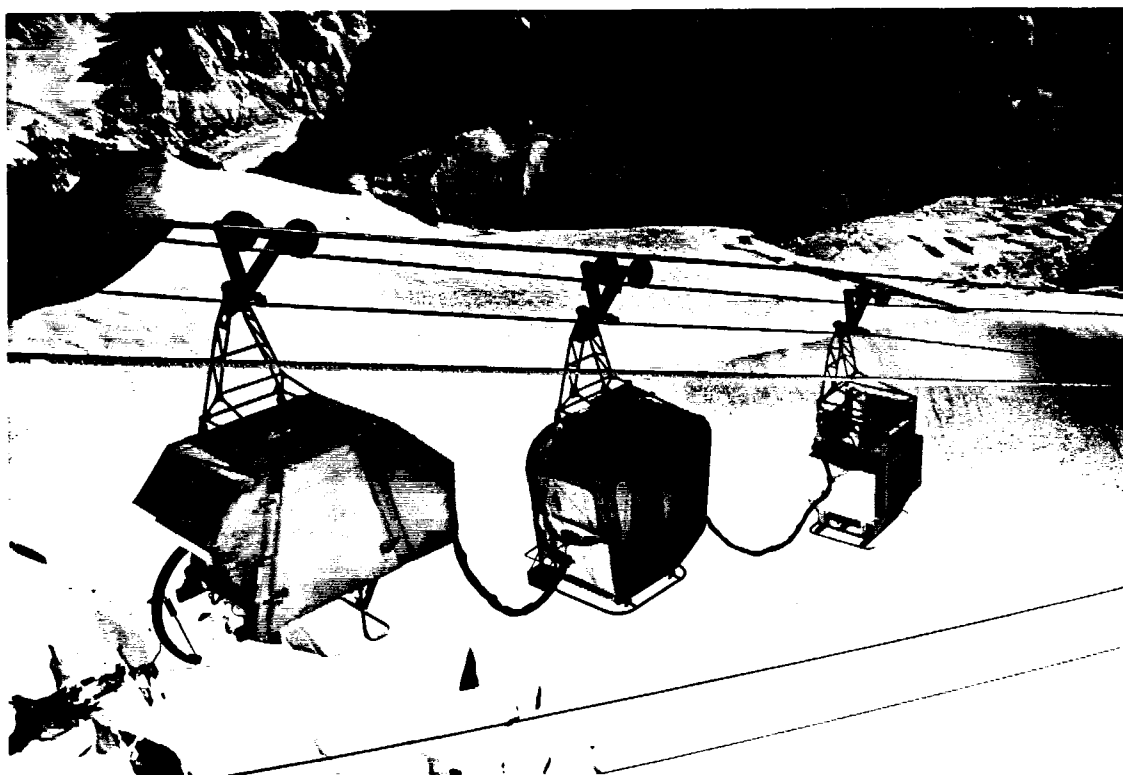
### II.1.1.3 Température de la neige en Antarctique

La température de brillance mesurée par un radiomètre microonde dépend de l'émissivité et de la température du milieu. Lors des études sur les variations spatiales nous nous sommes intéressés à la signature spectrale moyenne annuelle, ce qui permet de considérer le milieu comme isotherme. Nous pouvons à l'inverse considérer que l'émissivité d'un site change peu au cours du temps, ce qui est vrai pour de grandes zones en Antarctique, et étudier alors les variations temporelles qui dépendent directement du profil de température dans la neige.



**Figure 1.13:** Température AWS (point) et températures de surface de la neige (ligne) calculées à partir des températures de brillance à 37 GHz, à Dôme C, en 1989; une moyenne glissante sur 10 jours est appliquée aux mesures SSM/I avant les calculs.

Pour cela nous disposons de longues séries de données de radiométrie microonde (moyennes journalières sur plusieurs années sur tout l'Antarctique) ainsi que des températures de l'air mesurées par des stations météorologiques automatiques. La première étape de notre étude a consisté à reconstruire les températures de brillance à l'aide d'un modèle semi-empirique basé sur le transfert radiatif et d'un modèle de calcul de profil de température dans le manteau neigeux à partir des températures de l'air mesurées (*thèse I. Sherjal ; Sherjal et Fily, 1995*). Cette méthode a été testée sur deux sites présentant des caractéristiques de neige différentes; elle a permis de déterminer les profondeurs de pénétration de l'onde à plusieurs fréquences sur ces deux sites. Il a été possible ensuite d'établir un modèle inverse de calcul des températures de surface de la neige à partir des mesures satellite. Ce modèle fait l'hypothèse d'une émissivité annuelle constante, il nécessite



**Figure 1.14:**

*De gauche à droite, la cabine instrument, la cabine opérateur et la cabine énergie avec le radiomètre PORTOS.*

la connaissance du coefficient d'extinction du milieu et d'un profil de température initial. Il donne cependant des résultats très prometteurs (Fig. 1.13). Par la suite l'information spectrale sera mieux utilisée pour déterminer les différents coefficients d'extinction.

#### II.1.1.4 Programmes alpins

Radiométrie microonde à partir du télécabine de la Vallée Blanche: opération PORTOS

Avec le CNES et la société des téléphériques de Chamonix, nous avons mis au point une expérimentation de radiométrie microonde à partir du télécabine de la Vallée Blanche afin de valider les modèles décrits précédemment. Ce site d'altitude (3840m) a été choisi car il permet de faire des mesures sur un manteau neigeux épais et froid comparable à l'Antarctique. Pour mettre en oeuvre le radiomètre PORTOS, un ensemble de 3 cabines (instrument + opérateurs + énergie) a été réalisé au LGGE (Fig. 1.14). La principale opération a eu lieu en Janvier 1994. Nous disposons maintenant d'un ensemble de mesures très complet et unique sur un site de ce type:

- températures de brillance de la neige à 5

fréquences, 2 polarisations et plusieurs angles d'incidence de 0° à 65°

- température de brillance du ciel (participation du Centre d'Etudes et de Recherche de Toulouse) et mesures sur charges chaudes et froides pour étalonnage
- mesures simultanées de terrain sur un puits de 5m pour avoir la stratigraphie et les profils de température, de taille des grains et de densité (avec la participation du Centre d'Etude de la Neige de Grenoble)
- échantillons de neige pour l'analyse en laboratoire de la taille des grains et de sa structure par traitement d'images (travail effectué en partie à Davos, Suisse).
- topographie du site dont la taille est de l'ordre de la centaine de mètres.

Le travail sur la structure de la neige a été mené principalement par M. Gay dans le cadre de sa thèse au LGGE. Ce travail sur traitement d'images a permis de caractériser la taille et la forme des grains et, surtout, de calculer les fonctions d'autocorrélation caractéristiques du milieu. La connaissance de ces fonctions est indispensable car une des données importantes du modèle d'émissivité est la longueur de corrélation du milieu.

Le traitement des données radiométriques est actuellement presque terminé (thèse de I. Sherjal). La première étape a été d'étalonner les données et de les corriger des effets d'antenne ou d'environnement. Elles ont ensuite été comparées aux résultats de deux modèles: celui développé par S. Surdyk et un autre modèle basé sur la théorie du transfert radiatif et mis en oeuvre par J. Cotton, étudiant australien, lors de son séjour au LGGE.

#### *Radiométrie micro-onde sur le site de Davos (Suisse)*

Dans le cadre d'une collaboration tripartite entre l'Institute of Applied Physics de Berne (C. Mätzler) pour les mesures hyperfréquences, le Snow and Avalanche Research Institute de Davos (W. Good) pour les mesures sur la neige et le LGGE (S. Surdyk) pour la modélisation, nous avons réalisés, sur le site de Davos, deux campagnes de mesures radiométriques (hiver 93-94 et 94-95). Situé à une altitude de 2600m, on trouve sur le site de Davos depuis le mois de décembre jusqu'au mois de juin plusieurs types de neige. Le dispositif passif est composé de 5 radiomètres (11, 21, 35, 48 et 94 GHz) et permet de faire des mesures pour des angles d'incidences variant de 10 à 70° par rapport au nadir. Afin d'étudier plus spécifiquement l'influence de la structure de la neige et de la forme des grains, nous avons extrait du manteau neigeux des couches de neige, supposées homogènes, et en avons mesuré la température de brillance. Les échantillons de neige ont été figés puis analysés par un dispositif numérique permettant de définir la structure en 2 ou 3 dimensions selon des paramètres qui sont introduits dans le modèle. Les mesures radiométriques effectuées l'hiver 93-94 ont été étalonnées courant août-sept. 94 et l'analyse des échantillons de neige prélevés sur le site s'est achevée courant octobre 94. Les premiers résultats de la comparaison avec les données de terrain sont attendus courant mai 95. Une autre campagne de mesure s'est déroulée cet hiver (94-95).

#### *Mesures de constantes diélectriques de la neige (Japon)*

Outre les caractéristiques propres au milieu stratifié considéré, la constante diélectrique de la glace constitue un élément clé du modèle d'émissivité. En effet c'est à partir des caractéristiques diélectriques de la glace que sont calculées les constantes diélectriques de la neige. Plusieurs points importants, comme l'influence de la taille des cristaux, ont été dégagés d'une étude en sensibilité du modè-

le. Peu de mesures des caractéristiques diélectriques de la neige ont été faites jusqu'à présent et seule l'influence de la densité a été observée. Il est donc important de s'assurer de la cohérence des caractéristiques diélectriques de la neige calculées avec des valeurs mesurées. Un projet de mesures a donc été établi en collaboration avec S. Fujita et S. Mae de l'université d'Hokkaido, Japon. Les premières mesures effectuées en laboratoire (juillet-août 94) ont montré que, dans la gamme 30 - 40 GHz, les pertes diélectriques augmentent avec la fréquence et avec la taille des cristaux. Cette observation confirme l'importance des phénomènes de diffusion aux hautes fréquences, les effets dus à l'absorption ne dépendant pas de la taille des cristaux. La confrontation des mesures avec les résultats du modèle est très concluante (Surdyk and Fujita, 1995). Néanmoins deux problèmes ont été soulevés au cours de cette étude, le problème de l'influence de la forme des cristaux et le problème de la distribution des tailles de cristaux.

#### *Radar aéroporté sur site alpin*

Par ailleurs, dans le cadre du groupe GATT (Groupe Accès Tout Temps) constitué par le CNES en vue d'étudier les possibilités d'un radar à synthèse d'ouverture, nous avons bénéficié d'expérimentations sur la neige. Deux vols ont eu lieu en décembre 89 et avril 90 sur le site de la station des Arcs, l'avion était équipé d'un radar SAR en bande X (9.6 GHz). Des mesures de terrain ont été effectuées au même moment en collaboration avec le LAMA. L'objectif était d'étudier la réponse de la neige en fonction de son épaisseur et surtout de son contenu en eau liquide. Les études ont également montré l'importance de la topographie et du sol sous-jacent (Fily et al., 1994).

#### **II.1.2 Structure de la neige et rayonnement dans le spectre solaire**

*(M. Fily, B. Bourdelles, C. Leroux)*

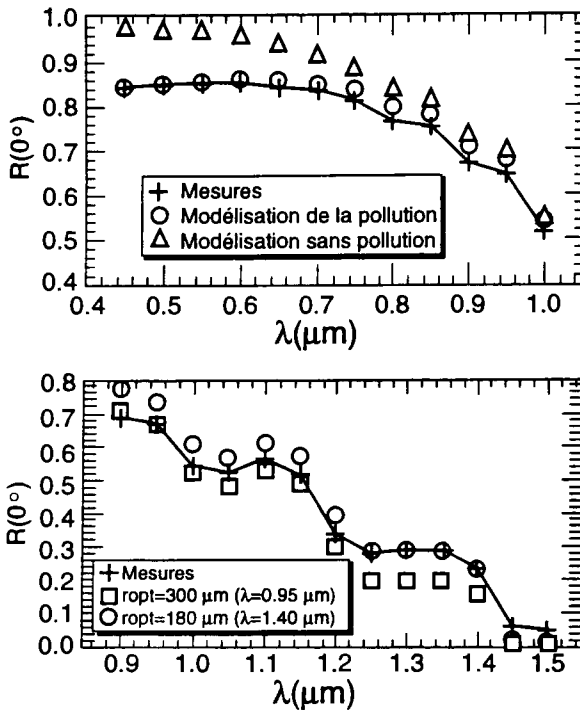
*Collaborations: CEN, LOA, LAMA*

Dans la partie visible du spectre solaire la réflectance de la neige dépend principalement de sa pollution; dans le proche infrarouge elle dépend de la géométrie des grains: forme et taille. C'est surtout cette dernière caractéristique qui nous intéresse pour l'étude de l'Antarctique sachant que seuls les premiers centimètres de neige sont concernés dans ce domaine spectral. Notre objectif est de mieux comprendre les relations entre réflectance et structure de la neige pour deux raisons. Tout d'abord pour les études climatiques il est nécessaire de savoir paramétriser



l'albedo de la neige en fonction de ses caractéristiques afin de calculer le bilan radiatif à la surface, d'autre part nous voulons savoir s'il est possible de déterminer les caractéristiques de la neige à partir de mesures de télédétection dans cette gamme spectrale.

### II.1.2.1 Modélisation de la réflectance de la neige



**Figure 1.15:**

Modélisation de la réflectance directionnelle de la neige (éclairage diffus, visée au nadir). Effet de la pollution sur le spectre visible ( $r_{opt}=0.1 \mu\text{m}$ ,  $r_{opt}=1315 \text{ kg/m}^3$ ,  $N=2.44 \cdot 10^{13} \text{ m}^{-3}$ ). Effet de la taille des grains sur le proche IR, ajustement de part et d'autre du spectre.

Les modèles de réflectance de la neige sont basés sur la théorie du transfert radiatif, les paramètres de diffusion étant déduits de la théorie de Mie. La première étape a été d'utiliser un modèle directionnel-hémisphérique qui ne tenait compte que de la direction d'éclairage du soleil mais pas de celle de la mesure (Thèse B. Bourdelles). Ce modèle est adapté aux mesures effectuées en laboratoire au Centre d'Etudes de la Neige car l'éclairage est diffus. Par contre les expérimentations sur les Alpes nous ont montré que l'hypothèse d'une surface lambertienne n'est pas tout adaptée à la neige. Nous avons donc utilisé un modèle plus récent calculant la réflectance bidirectionnelle pour les applications dans les Alpes ou en Antarctique. Un autre modèle est en cours de développement (thèse de C. Leroux en collaboration avec le

LOA, J. Lenoble, et le CEN) qui tient compte en plus de la polarisation dans le cadre de l'utilisation des données du radiomètre POLDER qui sera lancé l'année prochaine sur un satellite japonais. POLDER effectuera des mesures de l'énergie émise par la neige dans plusieurs canaux du spectre solaire, dans plusieurs directions de mesure et à plusieurs polarisations.

Les principaux résultats (Fig. 1.15) sont actuellement que:

- concernant la pollution le principal problème est de connaître ses caractéristiques (indice de réfraction, taille), la modélisation est suffisamment développée
- concernant la taille des grains, les modélisations sont plutôt correctes concernant la réflectance directionnelle-hémisphérique mais sont déficientes quant à l'estimation correcte de la BRDF (Bidirectional Reflectance Distribution Function).

### II.1.2.2 Applications en Antarctique

Pour tenter de retrouver la taille des grains de neige en surface (thèse de B. Bourdelles), un modèle de réflectance a été mis en oeuvre couplé à un modèle de transfert radiatif dans l'atmosphère développé par le Laboratoire d'Optique Atmosphérique de Lille. Des données des satellites Landsat et SPOT ont été utilisées dans un premier temps sur une zone proche de la station Dumont d'Urville en Terre-Adélie. Les résultats sont satisfaisants d'un point de vue relatif mais les problèmes liés notamment à l'étalonnage des capteurs rendent difficile toute quantification en absolu (Bourdelles et Fily, 1993). Les futurs instruments seront beaucoup plus fiables de ce point de vue.

### II.1.2.3 Programmes de validation en laboratoire et dans les Alpes

Trois expériences ont eu lieu en Avril 92, Décembre 1992 et Avril 1993 dans les Alpes. Simultanément à l'acquisition de données de télédétection par satellite (SPOT, Landsat) et par avion (ARAT), des échantillons de neige ont été prélevés en plusieurs sites afin de caractériser finement le type de neige. L'interprétation de ces données est en partie effectuée (thèse B. Bourdelles), elle va se poursuivre avec, entre autres, la thèse de C. Leroux.. Le caractère non lambertien de la neige s'est révélé primordial car les pentes sont importantes en zone montagneuse. Par ailleurs la difficulté d'accéder à des données topographiques suffisamment précises nous ont amené à rechercher des combinaisons de canaux qui permettent de pallier cet inconvé-

nient. Les méthodes de détermination de la taille des grains ont été testées favorablement sur quelques sites, elles vont être étendues à toute les images Landsat pour comparaison avec les résultats du modèle CROCUS de métamorphisme de la neige.

Des mesures sont également effectuées en laboratoire au CEN (Thèse C. Leroux). Notre objectif dans ce cadre est de valider les modèles et de savoir quelles sont les caractéristiques de la neige optiquement efficace (Pollution ou taille des grains : Fig. 1.15). Par exemple il nous faut savoir quel est le paramètre de taille de grain à considérer dans les modèles (Sergent et al., 1992).

## II.2 ETUDES SUR LA GLACE DE MER

Les études sur la glace de mer sont motivées par l'impact de celle-ci sur l'albedo terrestre et 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 justifient l'utilisation de l'imagerie radar qui offre une bonne résolution spatiale (30 m) et est indépendante vis-à-vis des conditions atmosphériques et d'éclairement.

### II.2.1 Programme Arctemiz

80% des échanges entre l'océan Arctique et le reste des océans ont lieu dans le secteur du détroit de Fram, entre le Spitzberg et le Groënland. L'objectif du programme Arctemiz (en collaboration avec le Laboratoire d'Optique Atmosphérique de Lille et le Laboratoire d'Océanographie Dynamique et Climatologie de Paris) est l'étude des interactions atmosphère-glace-océan dans ce détroit à partir de données de bouées, de télédétection et de sections hydrographiques.

Le travail effectué au LGGE (DEA de C. Lefort) a consisté à adapter à notre étude et à mettre en oeuvre un algorithme, développé auparavant, de détermination de déplacement de la glace à partir des données du SAR de ERS1 acquises en Octobre 1991 et Février 1992. En particulier le choix a été d'obtenir un champ de vitesses très détaillé: 1 vecteur tous les kilomètres soit environ 10 000 vecteurs par image (Kergomard et al., 1994). Il a été mis en évidence l'influence des courants de marée sur la déformation de la banquise au Nord du Yermack Plateau (Nord du Spitzberg). Cette étude se poursuit dans la même direction par le traitement d'une série temporelle plus longue sur un cycle entier de marée.

## III COLLABORATIONS ET CONTRATS

### III.1 COLLABORATIONS INTERNATIONALES

IAP: Institute of Applied Physics (C. Mätzler), Berne, Suisse

ENEA: Ente per le Nuove tecnologie, l'Energia e l'Ambiente, Rome, Italie (M. Frezzotti)

Australian Antarctic Division (N. Young), Hobart, Australie

Université d'Hokkaido, Japon (S. Fujita)

LAMA: Laboratoire de la Montagne Alpine (J.P. Dedieu), Grenoble.

LOA: Laboratoire d'Optique Atmosphérique (C. Kergomard, J. Lenoble), Lille.

LODYC: Laboratoire d'Océanographie Dynamique et de Climatologie (J.C. Gascard), Paris.

CNES: Centre National d'Etudes Spatiales (T. Phulpin, P. Raizonville, O. Grosjean), Toulouse

CERT: Centre d'Etudes et de Recherches de Toulouse (J. Lemorton)

### III.2 COLLABORATIONS NATIONALES

Nous collaborons actuellement avec les équipes suivantes:

CEN: Centre d'Etude de la Neige (E. Brun, C. Sergent, Y. Durand), Grenoble.

GRGS: Groupe de Recherche en Géodésie Spatiale (F. Rémy), Toulouse.

### III.3 CONTRATS

Ces collaborations se sont concrétisées par des contrats ou projets où des membres de l'équipe Télédétection apparaissent en tant que responsable ou collaborateur. Pour chaque contrat sont donnés l'organisme financeur, l'année d'obtention et les laboratoires participant ainsi que le thème principal d'étude.

1) en tant que responsable:

PNTS 1992, *LGGE + LOA + LODYC* : Utilisation des données de ERS1 au dessus des zones polaires.

Contrat CNES 1991, *LGGE* : Etude des zones polaires à l'aide des données de ERS1

Institut Français de Recherche et Technologie Polaire, 1993 et 1994 : Expérimentations de terrain en Antarctique. Projet incluant plusieurs équipes du *LGGE* : chimie, climat, télédétection.

Contrat CNES 1993 et PNTS 1994: Expérimentation PORTOS de radiométrie microonde sur la Vallée Blanche à partir de téléphérique avec participation du *LGGE* (15 personnes impliquées) + *CNES + CEN + CERT + Société téléphérique*.

PNTS 1994, *LGGE (S. Surdyk) + IAP*, Modélisation de l'émissivité microonde de la neige et expérimentations de terrain en Suisse à Davos.

Proposant principal d'un projet (1994) accepté d'utilisation des données POLDER de ADEOS sur l'Antarctique avec *LOA, CEN, ENEA et équipe astrophysique du LGGE*

2) en tant que collaborateur:

PNTS 1990, *LAMA + LGGE + CEN* : Télédétection multispectrale de la neige (satellite + avion) et validation de terrain sur sites alpins.

Contrat européen 1990 et 1992, *nombreux*

*laboratoires européens*, Contribution des calottes polaires à l'évolution du niveau des mers.

Fondation de France 1992, *LGGE (C. Lorius)*, Glaces de l'Antarctique et effet de serre. Méthane et variations climatiques. Accumulation de la neige et niveau des mers.

**III. 4 COMITÉS SCIENTIFIQUES**

L'intérêt porté par la communauté télédétection aux régions polaires s'étant accru au cours des dernières années, M. Fily fait partie de plusieurs comités scientifiques coordonnés par le CNES concernant l'utilisation d'instruments de télédétection:

- . Groupe Accès Tout Temps (GATT) depuis 1988 pour la définition d'un radar spatial à l'horizon 2000
- . Groupe SPOT 4/MIR pour l'étude de l'adjonction d'un canal 1.6µm sur SPOT4: sélection et suivi de projets de recherche
- . Comité scientifique de l'instrument PORTOS (radiomètre hyperfréquence): suivi des opérations de développement et des campagnes de mesure
- . Comité scientifique (ARAT) des avions français de recherche atmosphérique et de télédétection depuis 1994: sélection des demandes, étude sur futurs avions
- . Comité: Recherches méthodologiques sur les radars d'observation (1994) pour définir les grandes orientations du CNES pour les prochaines années sur ce thème.
- . Comité scientifique du Programme National de Télédétection Spatiale (depuis 1995)
- . Comité international d'utilisation des données POLDER.

**IV - ACTIVITES DE FORMATION****STAGIAIRES**Thèses, post-doc:

Surdyk S.. Thèse de Doctorat de l'INPG soutenue le 7 mai 1993. Etude des signatures spectrales microondes obtenues par télédétection sur la calotte polaire Antarctique. Comparaison avec des données de terrain et modélisation de l'émissivité de la neige. Post-doc financé par le CNES: Oct. 93 - Oct. 95.

Bourdelle B., Thèse de Doctorat de l'UJF soutenue le 8 Février 1994. Etude des caractéristiques de surface de la neige par télédétection visible et infrarouge.

Leroux Catherine, thèse en cours depuis Octobre 1993 (codirigée avec J. Lenoble du LOA et C. Sergent du CEN), Modélisation de la réflectance de la neige dans le spectre solaire.

Gay Michel, thèse en cours depuis Octobre 1994

(codirection avec J.M. Chassery de Infodis, Grenoble), Etude de la structure de la neige, du névé, de la glace par traitement d'images. Ce projet nouveau est fédérateur de plusieurs équipes du LGGE: télédétection, mécanique, climat, chimie.

Cotton Jeremy, du CRC, Hobart, Australie: Oct 94 à Avril 95 pendant son Ph D, Comparaison des données de PORTOS avec les résultats d'un modèle de transfert radiatif.

#### Divers:

Allemand Régis, Mars-Juin 1991, Ecole Nationale Supérieure de Physique de Marseille (3<sup>me</sup> année), Analyse des données d'un SAR aéroporté au dessus des Alpes.

Chasson Vincent, Juin 1992, Licence Physique et Applications, UJF, Mesure de la taille de grains de neige prélevés en Antarctique

Tanguy Yann, Juin 1993 puis Janvier-Avril 1994, Licence puis Maîtrise Physique et Applications, UJF, Prétude des données d'un spectromètre

infrarouge sur les Alpes. Analyse de données aéroportées du radiomètre Push-Broom sur les Alpes

Peyredieu du Charlat Philippe, Aout-Sept. 93, Ecole Nationale Supérieure de Physique de Strasbourg, 2<sup>me</sup> année, Localisation des données d'un spectromètre infrarouge sur les Alpes.

Lefort Christophe, Mars-Sept. 1993, DEA Informatique, Ecole des Mines de Saint-Etienne, Traitement des données SAR de ERS1 sur le détroit de Fram.

Darr David, Février-Juillet 1993, Boursier Pôle Environnement de Grenoble, Traitement des données SAR de ERS1 sur le détroit de Fram.

Petitcolin François, Février-Juin 1994, Ecole Nationale Supérieure de Physique de Strasbourg, 3<sup>me</sup> année, + DEA Photonique et Image, Etude de la topographie d'un site antarctique à partir de 3 images SPOT.

Hernandez Bruno, Janvier-Mars 1995, Maîtrise Physique et Applications, UJF, Comparaison entre données de Landsat et résultats de CROCUS sur les Alpes

## V - PUBLICATIONS

### V.1 REVUES À COMITÉ DE LECTURE

Bourdelle B., and M. Fily, Snow grain size determination from Landsat imagery over Terre-Adélie, Antarctica, *Annals of Glaciology*, **17**, 86-92. 1993.

Fily M., Benoist, J.P., : Large-scale statistical study of scanning multichannel microwave radiometer (SMMR) data over Antarctica. *J. of Glaciology*, **37**, 125, 129-139. 1991.

Fily M., J.P. Dedieu and S. Surdyk, A SAR image study on a snow-covered area in the French Alps, *Remote Sensing of Environment*, **51**, 253-262. 1994.

Sergent C., Pougatch E., Sudul M. and Bourdelle B. : «Experimental investigations of optical snow properties.» *Annals of Glaciology*, **17**, 281-287. 1992.

Sherjal I., and M. Fily, Temporal variations of microwave brightness temperatures over Antarctica, *Annals of Glaciology*, **20**, 19-25. 1994.

Surdyk S., and M. Fily., Comparison of microwave

spectral signature of the Antarctic Ice Sheet with traverse ground data, *Annals of Glaciology*, **17**, 161-166. 1993.

Surdyk S. and M. Fily, Results of a stratified snow emissivity model based on the wave approach: application to the Antarctic Ice Sheet, *J. Geophys. Res.*, **100** (C5), 8837-8848, 1995.

Surdyk S., and S. Fujita, Microwave dielectric properties of snow: modeling and measurements, *Geophysical Research Letters*, **22** (8), 965-968, 1995.

### V.2 AUTRES PUBLICATIONS

Bourdelle B. et M. Fily, Evaluation de la taille des grains de la neige en Antarctique par télédétection visible et infrarouge, *Société Hydrotechnique de France, Section de Glaciologie*, Réunion des 12 et 13 Mars 1992 à Grenoble. 1992.

Bourdelle B., and M. Fily, Snow grain size determination from Landsat imagery over Terre-Adélie, Antarctica, *Symposium on Remote Sensing of Snow and Ice, International Glaciological Society*, Boulder (CO), USA, 17-22 May 1992.

- Bourdelle B. et M. Fily, «Evaluation de la taille des grains de la neige par télédétection visible et infrarouge.» *XXIIème Conférence Internationale de Météorologie Alpine*, Toulouse, 7-11 Septembre 1992.
- Bourdelle B., Fily, M., : Utilisation des données landsat-5 TM: signature spectrale de la glace bleue et taille des grains de la neige en Antarctique. *Photo-interpretation*, 2, 83-87. 1992.
- Bourdelle B., and M. Fily, Use of SPOT and Landsat TM spectral signatures of blue ice and snow in Antarctica, *Antarctica: in search of a continent. SPOT-ERS1 workshop*, 14-17 April 1993, Punta Arenas, Chile. 1993.
- Bourdelle B., Etude des caractéristiques de surface de la neige par télédétection visible et infrarouge. Thèse de Doctorat de l'Université Joseph Fourier, Grenoble, soutenue le 8 Février 1994.
- Fily M., and J.P. Benoist, 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. **ESA SP-319**, May 1991, 351-354. 1991.
- Fily M., B. Lestringant, S. Surdyk, J.P. Dedieu, Groupe Ad-Hoc Radar Spatial, CNES, *Rapport du sous groupe Neige et Glace*. 1991.
- Fily M., (Conférence invitée), L'étude des zones englacées à partir de l'espace: perspectives, *Colloque PNTS, Changements globaux et télédétection spatiale*, Toulouse, 15-17 octobre 1991.
- Fily M., Détermination des caractéristiques de surface de l'Antarctique: accumulation, température, taille des grains de neige, *Colloque PNTS, Changements globaux et télédétection spatiale*, Toulouse, 15-17 octobre 1991.
- Fily M., and J.P. Dedieu, Airborne radar imagery of a snow-covered terrain, *Specialty meeting on airborne radars and lidars*, July 7-10, Toulouse, France. 1992.
- Fily M. et J.P. Dedieu, Utilisation en nivologie de l'imagerie radar aéroportée en zone de montagne (Les Arcs, Alpes Françaises), *Colloque Télédétection-Montagne de la SFPT*, 18 Décembre 1992, Grenoble. 1992.
- Fily M., B. Lestringant, S. Surdyk, Utilisation des données de télédétection dans le domaine des hyperfréquences sur la calotte polaire antarctique. *Dossiers de la Revue de Géographie Alpine*, 8, 57-69. 1992.
- Fily M. et J.P. Dedieu, Interprétation en nivologie de l'imagerie radar aéroportée en zone de montagne (Les Arcs, Alpes Françaises), *Bulletin de la Société Française de photogrammétrie et de Télédétection*, 129, 4-8. 1993.
- Fily M., C. Kergomard, D. Tanré, J.C. Gascard, Use of SPOT and ERS1 over sea ice, *Antarctica: in search of a continent. SPOT-ERS1 workshop*, 14-17 April, Punta Arenas, Chile. 1993.
- Fily M., C. Kergomard, D. Tanré, J.C. Gascard, Use of SPOT and ERS1 over sea ice, *Antarctica: in search of a continent. SPOT-ERS1 workshop*, 14-17 April, Punta Arenas, Chile. 1993.
- Fily M. (Invité), Recherches méthodologiques sur les radars d'observation, Thème neige et Glace, Séminaire de prospective, Toulouse, 2-4 Novembre 1994.
- Fily M., Opération PORTOS: Simulation de mesures satellitaires sur l'Antarctique, Festival des Sciences, de la Terre et de Hommes, 23-25 Juin 1994, Chamonix, France. 1994.
- Fily M., J.P. Dedieu et C. Sergent, Télédétection de la neige dans les Alpes par moyens aéroportés et satellitaires avec mesures de terrain simultanées, *Neige et Avalanches*, 69, 16-22. 1995.
- Fily M. (Invité), C. Leroux, J. Lenoble et C. Sergent, Terrestrial snow and ice studies from remote sensing in the solar spectrum and the thermal infrared, *Solar System Ices*, 27-30 March 1995, Toulouse, France. 1995.
- Kergomard C., J.C. Gascard, M. Fily, Ch. Delacourt, Ch. Lefort and D. Darr, The transpolar ice drift North of Fram Strait studied from ERS-1 SAR Imagery, *Second ERS-1 Symposium*, Hambourg, 11-14 October 1993, **ESA SP-361**, 263-267. 1993.
- Kergomard C., J.C. Gascard, M. Fily, Ch. Delacourt, Ch. Lefort and D. Darr, The transpolar ice drift North of Fram Strait studied from ERS-1 SAR Imagery, *Second ERS-1 Symposium*, Hambourg, 11-14 October 1993, **ESA SP-361**, 263-267. 1994.
- Sherjal I., and M. Fily, (Poster) Temporal variations of microwave brightness temperatures over Antarctica, *European Association of Remote Sensing Laboratories Workshop on Microwave remote Sensing of Ice*, Lingby, Denmark, 7-9 June. 1993.
- Sherjal I., and M. Fily, (Poster) Temporal variations of microwave brightness temperatures over Antarctica, *Fifth International Symposium on Antarctic Glaciology*, Cambridge (UK), 5-11 September 1993.

Sherjal I., and M. Fily, (Poster), Snow surface temperatures from microwave brightness temperatures. European Committee on Ocean and Polar Science, Research Conference on Ice-Sheet-Climate interactions, Aghia Pelaghia, Crete, Greece, 17-22 September. 1993.

Sherjal I., et M. Fily, Expérience de radiométrie microonde sur la Vallée Blanche, Massif du Mont-Blanc, *Neige et Avalanches*, **68**, 23-25. 1994.

Sherjal I., et M. Fily, Expérience de radiométrie microonde (PORTOS) sur la Vallée Blanche, Massif du Mont-Blanc, Société Hydrotechnique de France, Section de Glaciologie, 10-11 Mars. 1994.

Sherjal I., M. Fily, O. Grosjean, J. Lemorton, B. Lesaffre, Y. Pages, Microwave remote sensing of snow from a cable car at Chamonix in the French Alps, IGARSS'95, July 10-14 1995, Firenze, Italy. 1995.

Sherjal I., thèse soutenue le 23 juin 1995, Analyse des données de radiométrie hyperfréquence sur la neige: applications en Antarctique et dans les Alpes (expérimentation PORTOS).

Surdyk S. et M. Fily, 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. **ESA SP-391**, May 1991, 347-350. 1991.

Surdyk S. et M. Fily, 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. **ESA SP-391**, May 1991, 347-350. 1991.

Surdyk S., et M. Fily, 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. 1991.

Surdyk S. et M. Fily, Comparaison des signatures spectrales microondes avec les données caractéristiques du terrain: étude globale sur l'Antarctique, *Société Hydrotechnique de France, Section de Glaciologie*, Réunion des 12 et 13 Mars 1992 à Grenoble. 1992.

Surdyk S., and M. Fily, Comparison of microwave spectral signature of the Antarctic Ice Sheet with traverse ground data (Poster), *Symposium on Remote Sensing of Snow and Ice, International Glaciological Society*, Boulder (CO), USA, 17-22 May 1992.

Surdyk S., M. Fily, B. Bourdelles, and I. Sherjal, Télédétection de la neige sur les calottes polaires, *Atelier de modélisation de l'atmosphère*, 1-2 Décembre 1993, Toulouse, France. 1993.

Surdyk S., Etude des signatures spectrales microondes obtenues par télédétection sur la calotte polaire Antarctique. Comparaison avec des données de terrain et modélisation de l'émissivité de la neige. Thèse de Doctorat de l'INPG soutenue le 7 mai 1993.



## Chapitre 2

# GLACIOCHIMIE

**EQUIPE GLACIOCHIMIE**  
Responsable : Michel LEGRAND

Glaciochimie

**COMPOSITION DE L'EQUIPE :**

	ARCHIVAGE (1)	RELATION AIR- NEIGE AU GROENLAND (2)	CYCLE DU SOUFRE (3)	INTERACTIONS GAZ TRACES ATMOSPHERIQUES /GLACE (4)
Chercheurs	R. DELMAS (DR1) M. LEGRAND (DR2) P. MARTINERIE (CR2) 50 %	J.L. JAFFREZO (CR1) M. LEGRAND	M. LEGRAND	F. DOMINE (CR1) M. LEGRAND J.L. JAFFREZO
Enseignants- chercheurs	C. BOUTRON (PR1)	C. BOUTRON		S. HOUDIER (MC2)
Ingénieurs chercheurs	M. DE ANGELIS (IR1)	M. DE ANGELIS		
Doctorants	J. SAVARINO S. HONG		F. DUCROZ	E. THIBERT L. CHAIX
DEA	D. VOISIN E. ESPI	N. CHATAGNON		D. KOOSHMANIAN I. XUEREF L. REY
Autres chercheurs	L. BARRIE S. PREUNKERT			
ITA				O. BRISSAUD (1/3)

**PRINCIPAUX AXES DE RECHERCHE :**

**Archivage** Aérosols marins et terrigènes  
Cycles du soufre, de l'azote, des acides organiques et autres composés carbonés, des halogènes,  
Modélisation de la capacité oxydante des atmosphères préindustrielle et glaciaire  
Cycle des métaux

**Relation "air-neige" au Groenland**

**Cycle du soufre en Antarctique**

**Interactions gaz traces atmosphériques - glace :**

Diffusion et solubilité, adsorption de gaz traces dans la glace  
Réactions chimiques hétérogènes sur et dans la glace  
Applications à la fonction de transfert air/neige, à la stratosphère polaire, à la prédiction de la composition de l'eau de fonte des neiges  
Propriétés optiques des aérosols stratosphériques polaires

**PRINCIPAUX CONTRATS :**

Commission des Communautés Européennes (1, 2, 3, 4)  
PNCA (1) (2)- PNEDC (1)- PAMOY (4)  
Région Rhône Alpes (1, 4)  
Université Joseph Fourier (BQR) (4)  
Crédits d'équipement INSU (4)  
Institut Français pour la Recherche et la Technologie Polaires (1, 2, 3)

**PUBLICATIONS :**

Types de publication	fin 1991	1992	1993	1994	1995 partiel
Revue à Comités de lecture	8	15	25	25	19
Thèses		2	1	1	1
Autres		1		5	2



## I OBJECTIFS GENERAUX

On retrouve dans les atmosphères polaires des espèces chimiques dont certaines sont produites par des sources locales, notamment océaniques, d'autres transportées depuis les plus basses latitudes. Celles générées localement prédominent en zones côtières. Plus on va vers l'intérieur de l'Antarctique ou du Groenland, plus cette composante s'affaiblit. Les régions centrales, dont les altitudes sont supérieures à 3.000 m, possèdent des atmosphères extrêmement pures, alimentées via la moyenne troposphère par des transports à longue distance depuis des sources marines ou continentales situées à des latitudes tempérées. Les échanges stratosphère-troposphère peuvent aussi contribuer significativement aux apports de certaines espèces vers les régions polaires centrales. C'est ainsi que les régions côtières se prêtent bien à l'étude des émissions en provenance de l'océan polaire (notamment les émissions biogéniques marines de composés soufrés) alors que les régions centrales seront plus appropriées pour des recherches sur l'atmosphère, dite «de bruit de fond», à l'échelle d'un hémisphère.

Ces régions constituent un terrain privilégié des études sur le changement global. Couplées à des modèles de transport, les données obtenues permettent de documenter la réponse de notre atmosphère à des phénomènes naturels globaux telles que les grandes éruptions volcaniques ou les variations climatiques et à évaluer l'impact des émissions anthropiques sur l'atmosphère. Les régions polaires possèdent en effet un avantage unique : les précipitations qui s'y accumulent de façon régulière emmagasinent nombre d'informations sur l'atmosphère de la Terre à l'échelle de plusieurs centaines de milliers d'années. Le décryptage des informations enregistrées dans les glaces polaires est du ressort du «glaciochimiste».

On s'est vite aperçu que la transcription de ces précieux enregistrements en terme d'information atmosphérique n'est pas forcément simple et qu'une bonne connais-

sance préalable de la relation liant la composition chimique de la neige à celle de l'atmosphère est indispensable. C'est ainsi que, parallèlement à nos travaux sur les archives glaciochimiques, nous avons développé, ces dernières années, des recherches sur les fonctions de transfert des différentes espèces mesurées dans la glace.

Nos activités sont restées en partie couplées aux grands carottages (Vostok en Antarctique, GRIP à Summit au Groenland) dont les objectifs sont essentiellement paléoclimatiques. Nous avons aussi développé des travaux plus spécifiques à la glaciochimie comme l'opération Eurocore à Summit et les carottages du Col du Dôme (Massif du Mt Blanc). La mesure des ultratrace métalliques a fait l'objet de développements spécifiques dans le cadre d'un réseau de coopérations internationales. Tous ces travaux relatifs aux archives glaciaires ont été faits dans l'optique d'améliorer notre compréhension des cycles atmosphériques des différents éléments étudiés. Un important effort a porté sur le développement de mesures atmosphériques tant pour étudier les fonctions de transfert air-neige aux sites même de carottage (notamment à Summit) que pour documenter certains cycles biogéochimiques en régions polaires (prélèvements atmosphériques à Dumont d'Urville).

Ces quatre dernières années ont vu la naissance d'études expérimentales de laboratoire sur les interactions gaz-glace dans les conditions stratosphériques (processus de destruction de l'ozone) ou polaires (contribution à la fonction de transfert de certains gaz-traces). Enfin l'approche modélisation atmosphérique globale s'est poursuivie avec l'objectif de mieux utiliser les données extraites des carottes de glace (rôle des changements passés de circulation atmosphérique et de capacité oxydante de l'atmosphère).

La structure du rapport de l'équipe reflète cette palette d'activités portant sur la composition chimique des neiges, glaces et atmosphères polaires.

## II RESULTATS MAJEURS OBTENUS AU COURS DES QUATRE DERNIERES ANNEES

### II.1 ARCHIVAGE

Ces dernières années, nos études glacio-chimiques se sont placées sur deux grands axes de recherche : **le rôle des émissions anthropiques sur les cycles biogéochimiques** d'une part, la relation «**cycles biogéochimiques, atmosphère et le climat**» d'autre part. L'essentiel de nos efforts a porté sur l'analyse in situ des carottes du Groenland (Eurocore et GRIP), ce qui a mobilisé plusieurs scientifiques du LGGE au Groenland entre 1989 et 1993 ; la moisson de résultats est importante et l'exploitation des données n'est pas totalement achevée. Dans un même ordre d'idée, notre effort a aussi porté sur la glaciochimie alpine avec, cette fois, l'objectif de retracer l'impact des émissions anthropiques sur l'atmosphère de bruit de fond à l'échelle du continent européen.

#### II.1.1 Aérosols marins et terrigènes

(R. Delmas, M. De Angelis, M. Legrand, F. Maupetit)

Les études antérieures sur la carotte de Vostok avaient montré que les teneurs en sodium marin et en 18O varient en sens inverse au cours des 160.000 dernières années. Ces augmentations de teneurs en sodium marin observées durant les stades froids correspondent à des changements globaux (intensité des émissions d'aérosol marin en fonction du vent à la surface de l'océan et/ou efficacité du transport entre les zones sources et le continent Antarctique) et locaux (changements des taux d'accumulation de neige). La simulation entreprise à l'aide du modèle de circulation générale 3D du GISS (*Genthon, 1992*) ne reproduit pas l'augmentation des dépôts d'aérosol marin observée dans la glace au cours du stade froid d'il y a 18.000 ans. Le lecteur trouvera dans le rapport de l'équipe «Climat» un résumé des efforts entrepris dans ce domaine.

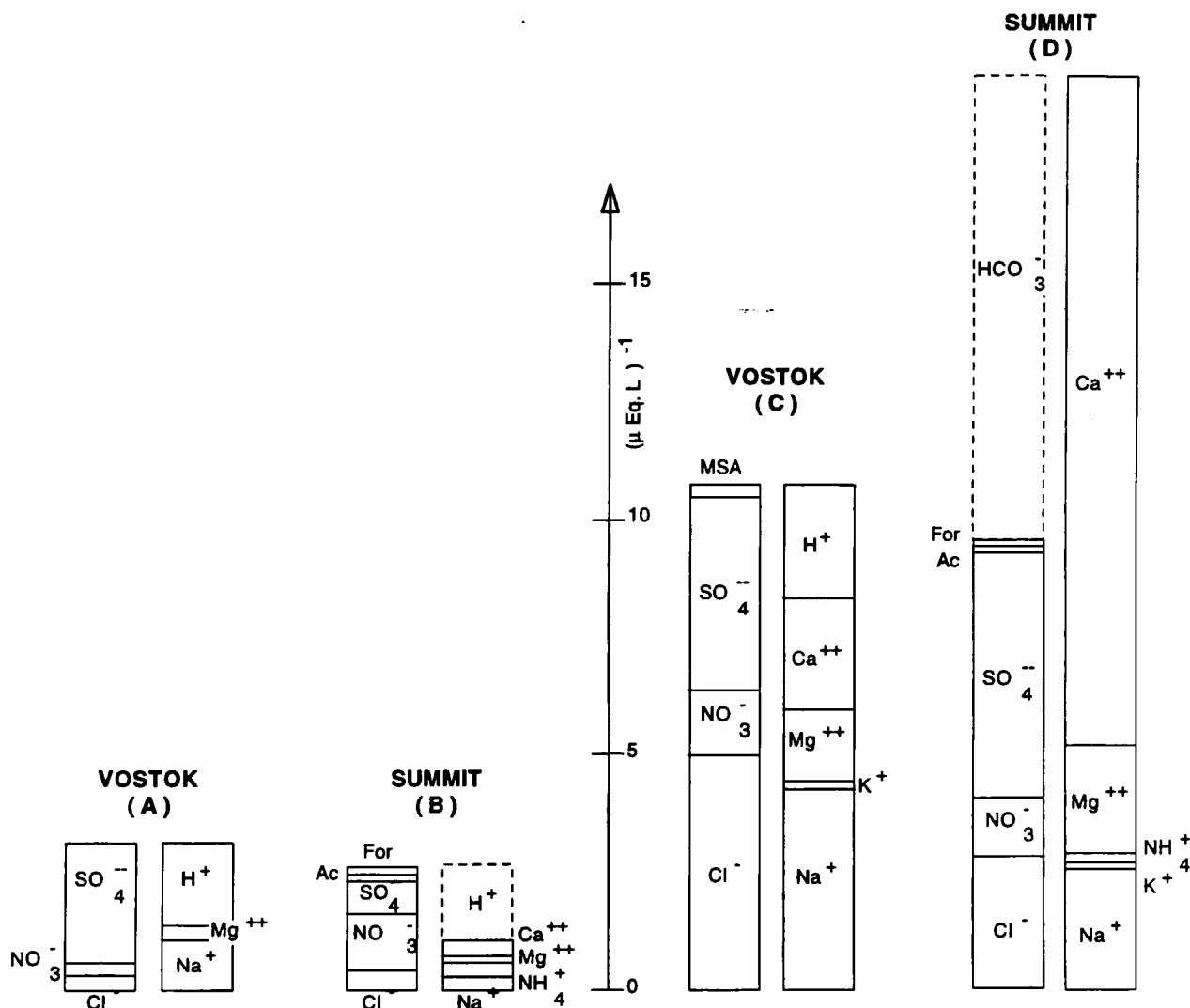
Les résultats d'Al et Ca de la carotte de Vostok (*De Angelis et al., 1992*) ont montré que la teneur en poussières d'origine terrigène avait aussi augmenté durant les périodes de froid extrême. Nos travaux ont porté sur la recherche des causes possibles

de ces changements (aridité continentale accrue, extension des marges continentales, ...). L'étude minéralogique de la matière insoluble extraite permet de discuter l'origine géographique de ces poussières (*Gaudichet et al., 1992*). Le rôle important qu'aurait pu jouer les marges continentales au large de la Patagonie a été souligné (*Delmas and Petit, 1994*). Cette dernière étude a également montré que la composition de l'aérosol terrigène actuellement présent dans l'atmosphère antarctique est similaire à celle de l'aérosol du dernier maximum glaciaire, ce qui suggère une origine glaciaire pour les poussières actuelles dans cette région du globe.

Enfin, la coexistence, dans la glace du Groenland, de dépôts carbonatés et de dépôts acides peut causer la production, suite à une migration des ions H<sup>+</sup>, de gaz carbonique en «excès» venant «contaminer» celui extrait des bulles représentatif de l'atmosphère (*Delmas, 1993*).

Nous faisons actuellement porter notre effort sur l'intercomparaison des dépôts d'aérosols marins et terrigènes au Groenland (GRIP) et en Antarctique (Vostok). Tandis que les augmentations d'aérosols marins apparaissent linéairement anticorrélées au climat en Antarctique comme au Groenland, celles des aérosols continentaux (GRIP, 1993) ne sont survenues qu'au cours des périodes les plus froides et sont plus marquées au Groenland qu'en Antarctique (*Legrand, 1994*). La comparaison des deux enregistrements fait apparaître d'autres différences comme le caractère beaucoup plus alcalin des aérosols terrigènes au Groenland qu'en Antarctique (Fig. 2.1), en liaison probablement avec des différences de temps de transport depuis les régions-sources.

Enfin, l'étude des carottes alpines montre l'existence d'apports sporadiques massifs de poussières alcalines en provenance du Sahara («les vents de sable») (*De Angelis and Gaudichet, 1991*). A l'échelle de l'année, ces événements tamponnent largement l'acidité d'origine anthropique de l'atmosphère (*Maupetit and Delmas, 1994*).



**Figure 2.1 :**

Budget ionique moyen de la glace de Vostok et de GRIP pour la période Holocène (A et B, respectivement) et le dernier extremum glaciaire (C et D) (Legrand, 1994).

**II.1.2 Cycle du Soufre (sulfate et méthanesulfonate)**

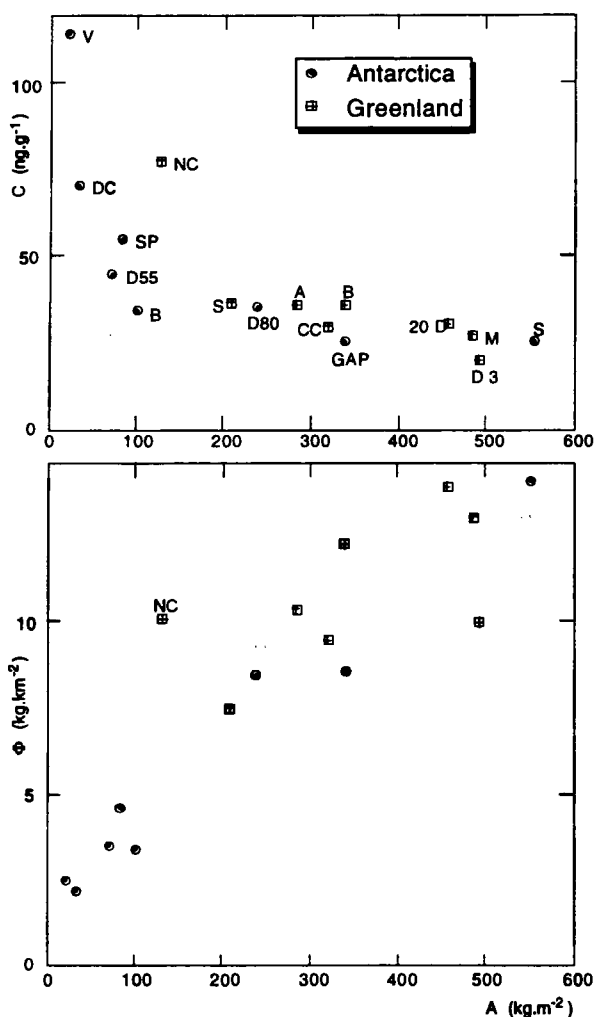
(M. Legrand, R. Delmas, J. Savarino, M. De Angelis)

Les injections sporadiques de SO<sub>2</sub> volcanique dans la stratosphère viennent perturber de manière importante mais brève (~ 2 ans), les teneurs en sulfate en excès mesurées dans la neige polaire. Les profils de sulfate en excès obtenus dans la précipitation déposée au cours des 200 dernières années en Antarctique nous avaient permis de proposer un indice volcanologique d'impact des éruptions volcaniques sur l'atmosphère basé sur l'estimation du flux de retombée d'acide sulfurique dans les neige et glace polaires. Nous avons étendu notre étude du paléovolcanisme explosif aux mille dernières années (Delmas et al., 1992). Nous focalisons désormais nos efforts sur la recherche de l'éruption

du Toba (Indonésie, 75.000 ans BP) à partir d'un enregistrement continu de la conductivité électrique couvrant la période 65.000 à 85.000 ans BP dans la carotte de Vostok. Trois éruptions très puissantes (cinq à dix fois plus importantes en terme de retombées de sulfate que l'éruption du Tambora) ont déjà été repérées. Un travail complémentaire d'analyse minéralogique des verres volcaniques est en cours en coopération avec le CFR.

En période non volcanique le sulfate «en excès» mesuré en Antarctique provient de l'oxydation atmosphérique du sulfure de diméthyle (DMS) émis depuis la surface de l'océan. La mesure de l'acide méthanesulfonique (MSA), un composé qui n'a d'autre source atmosphérique que l'oxydation du DMS, ouvre la possibilité de départager, dans nos profils de sulfate, les contributions biogénique et volcanique. Nos premières études

du sulfate en excès et du MSA dans la neige antarctique ont tout d'abord montré la prédominance relative du MSA sur le  $\text{SO}_2$  comme produit d'oxydation du DMS dans l'atmosphère des hautes latitudes (Legrand *et al.*, 1992a). Cette caractéristique des régions de haute latitude pourrait être liée au rôle de la température sur le branchement de la réaction d'oxydation du DMS. Les études sur les carottes antarctiques ont suggéré que les émissions de DMS ont pu varier dans le passé, mais la variabilité du rapport  $\text{MSA}/\text{SO}_2$  avec la latitude rend cependant plus complexe que prévu l'interprétation de ces archives glaciaires. En particulier la contribution relative de la source locale que représente l'océan circumpolaire par rapport à la source océanique de moyenne latitude reste difficile à estimer.



**Figure 2.2 :**

Comparaison des concentrations (c) et des flux de retombées ( $\Phi$ ) de sulfate pour la période pré-industrielle en différents sites de l'Antarctique et du Groenland caractérisés par des taux d'accumulation de neige (A) différents (Legrand, 1995).

L'étude du cycle du soufre aux hautes latitudes Nord a été entreprise sur les forages Eurocore et GRIP. Nous avons effectué une étude détaillée de la montée récente des concentrations en sulfate (10 échantillons par an sur les deux cents dernières années) sur la carotte d'Eurocore qui montre que l'augmentation de l'acidité associée aux émissions de  $\text{SO}_2$  anthropique présente un caractère très saisonnier (pic de printemps) (Delmas *et al.*, en préparation). En période pré-industrielle, les retombées de sulfate au Groenland et en Antarctique sont du même ordre de grandeur (Fig. 2.2) mais le cycle naturel du soufre aux hautes latitudes Nord semble être fortement influencé par des sources non biogéniques, comme le dégazage quasi permanent de  $\text{SO}_2$  volcanique dans la bande de haute latitude Nord (Legrand, 1995). Les profils de MSA et de  $\text{SO}_4$  couvrant la dernière période glaciaire au Groenland montrent des changements très différents de ceux de Vostok (Legrand *et al.*, en préparation).

### II.1.3 Cycle de l'azote (nitrate et ammonium)

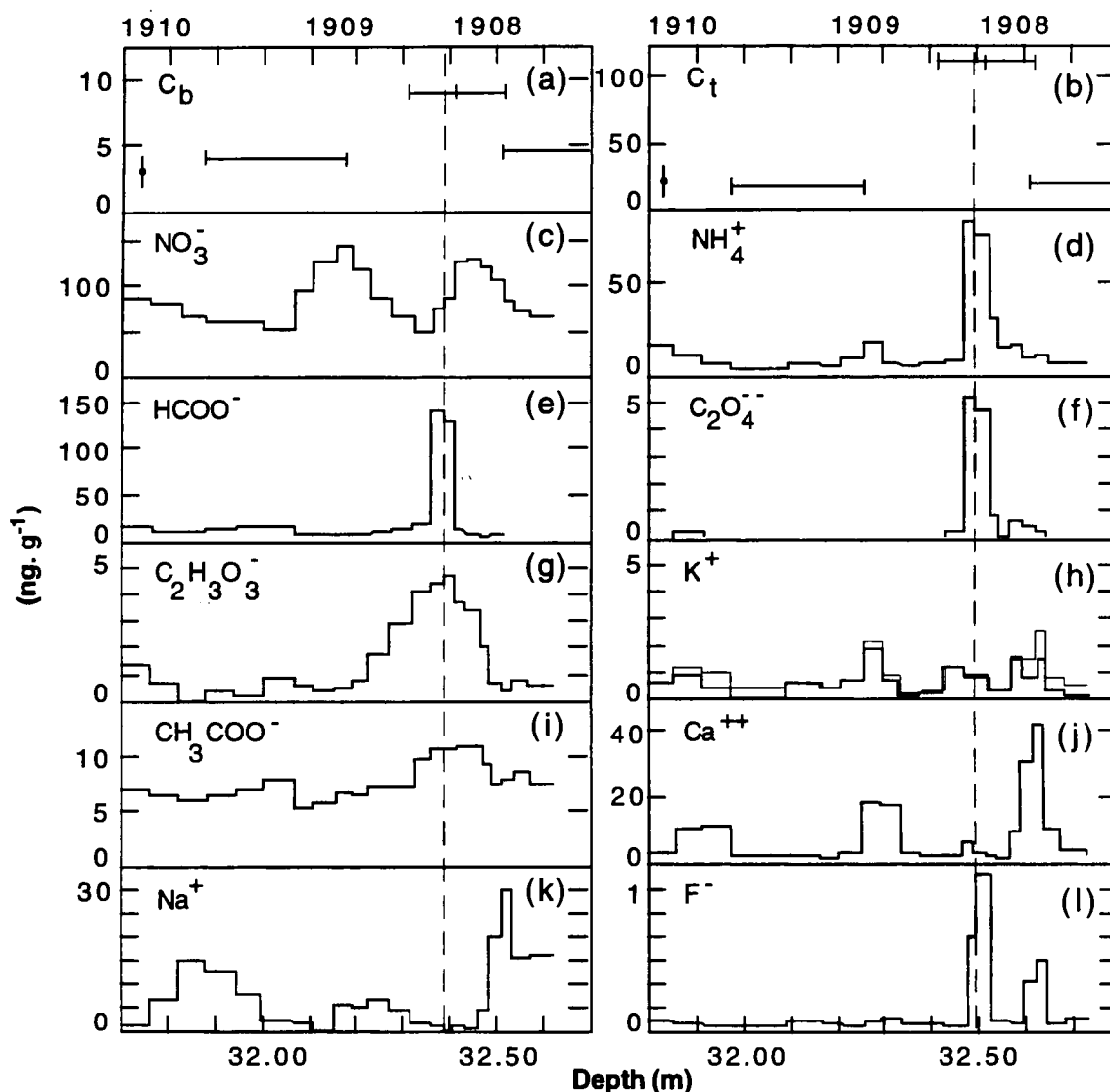
(M. Legrand, M. De Angelis, J. Savarino, R. Delmas)

Le budget ionique de la glace montre que, dans les conditions climatiques actuelles, le nitrate représente le composé azoté le plus abondant de la précipitation polaire et qu'il est essentiellement présent sous forme d'acide nitrique (voir Fig. 2.1). La mesure de l'acide nitrique (produit ultime de l'oxydation atmosphérique des oxydes d'azote  $\text{NO}_x$ ) devrait fournir des informations importantes sur le cycle de l'azote aux hautes latitudes. De nombreux profils de nitrate obtenus sur des forages réalisés tant en Antarctique qu'au Groenland sont disponibles. Cependant, pour cette espèce chimique, la transcription des enregistrements glaciaires en termes de variations atmosphériques est encore problématique. Nos travaux ont en effet montré que des modifications pouvaient intervenir après dépôt (De Angelis and Legrand, 1995, voir le paragraphe sur la relation «air-neige»). Un travail préliminaire portant sur la composition isotopique du nitrate présent dans la neige du Groenland et de l'Antarctique (Freyer *et al.*, accepté) confirme que des phénomènes importants se produisent dans le manteau neigeux, en particulier aux sites à très faibles taux d'accumulation. Ces nouveaux éléments nous ont amenés à réexaminer la validité de certaines de nos conclusions antérieures, par exemple, le rôle joué par les nuages stratosphériques polaires (PSC) dans la dénitrification de la basse stratosphère et la contribution de ce mécanisme au budget du nitrate présent dans la basse troposphère polaire. Cette hypothèse se

trouve confortée à la fois par des études glacio-chimiques menées en Péninsule Antarctique par nos collègues du British Antarctic Survey, et par les mesures atmosphériques de nos collègues allemands à G. V. Neumayer (région côtière Antarctique). Ces derniers suggèrent une descente de nitrate depuis la stratosphère à la fin de l'hiver, en liaison avec les PSC (résultats non publiés, rapport final STEP, octobre 1993, M. Legrand). Par ailleurs, nos études au Groenland nous ont permis d'étudier l'influence de la source nitrate liée aux émissions croissantes de NO<sub>x</sub> anthropique (Mayewski et al., 1993).

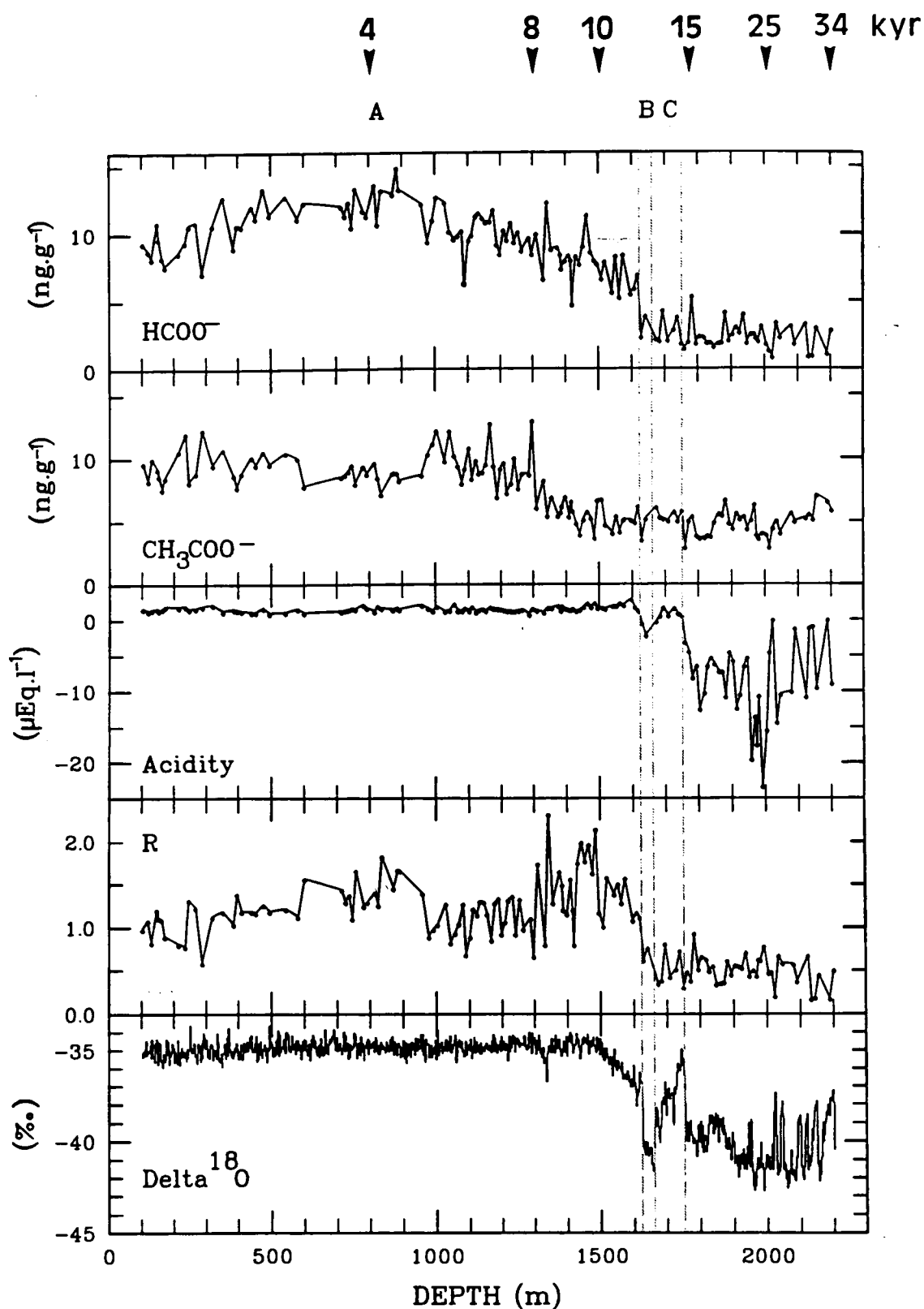
Notre travail sur le cycle de l'azote a aussi porté sur l'interprétation de variations brutales des teneurs en ammonium mises en évidence dans les carottes de GRIP et EUROCORE (Fig. 2.3)

au cours de certains étés. Associés à des augmentations de formiate (voir paragraphe 2.1.4 sur les acides organiques) et de matière organique (Legrand et al., 1992b ; 1995) ces événements correspondent à des épisodes de feux de forêts survenus dans la zone boréale. Nous avons de plus participé à l'étude des variations des concentrations de bruit de fond d'ammonium au cours du dernier siècle et du dernier cycle climatique au Groenland (étude menée par les chercheurs de Berne). Elle fournit des informations nouvelles sur la variabilité des émissions d'ammoniac en provenance de la biosphère continentale des hautes latitudes Nord (émissions par les sols) en réponse aux conditions climatiques passées et sur l'impact des émissions anthropiques sur le budget d'ammonium aux hautes latitudes Nord (Fuhrer et al., sous presse).



**Figure 2.3 :**

Signature chimique d'un événement d'ammonium détecté dans une couche de neige déposée au Groenland au début du siècle (Legrand et al., 1995).



**Figure 2.4 :**

Formiate ( $\text{HCOO}^-$ ), acétate ( $\text{CH}_3\text{COO}^-$ ), acidité, rapport formiate sur acétate observés le long des 2200 premiers mètres de la carotte de GRIP. Les profils ont été nettoyés de la composante feux de forêts. L'augmentation des concentrations de formiate entre 34 et 15.000 ans (maximum glaciaire) et l'Holocène (stade A) s'est effectuée parallèlement au retrait des Laurentides : retrait de la partie Ouest à 11.500 ans suivi d'un retrait progressif de la partie Est entre 10 et 6.000 ans (Legrand et De Angelis, 1995).

### II.1.4 Cycle des acides organiques (formique et acétique) et autres composés carbonés.

(M. Legrand, M. De Angelis, J. Savarino, F. Maupetit, R. Delmas)

La mesure des ions formiate et acétate présents à l'état de traces dans les précipitations polaires, bien que très difficile, avait pu être mise au point au LGGE il y a quelques années, même aux niveaux de concentration antarctiques. Nous avons alors simplement montré que cette composante organique de l'acidité restait extrêmement faible dans les neiges antarctiques (moins de 3%). Les études glaciochimiques au Groenland nous ont incités à reprendre la mesure de ces deux acides et à l'élargir à d'autres acides organiques à chaîne courte, comme les acides glycolique et oxalique. En effet, aux hautes latitudes nord, les acides organiques contribuent de manière significative (10 à 30%) à l'acidité naturelle de la précipitation (voir Fig. 2.1).

Ces études montrent que les teneurs en formiate ont subi de brusques variations de concentration (un à deux ordres de grandeur) dans le passé. Ces accidents très sporadiques couvrent environ un dixième d'année. Ils se produisent toujours en été et sont caractérisés par une augmentation simultanée des teneurs en ammonium et en ions glycolate et oxalate. Cette association chimique ( $\text{NH}_4$  et anions organiques) et la présence d'un traceur de combustion comme l'ion oxalate pour une atmosphère naturelle nous amènent à penser que ces accidents correspondent à des feux de forêts aux hautes latitudes (Legrand et al., 1992b). Une étude plus exhaustive portant sur un de ces événements du début du siècle, menée en collaboration avec le CFR et Paris XII, montre une augmentation marquée des concentrations de ces anions organiques et des teneurs en carbone total et en carbone suie (voir Fig. 2.3), ce qui confirme l'existence d'événements liés aux feux de forêts (Legrand et al., 1995).

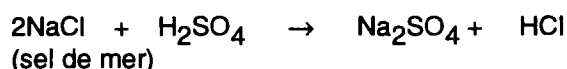
Les variations temporelles des concentrations de ces deux acides carboxyliques montrent que les concentrations de bruit de fond suivent parfaitement le retrait progressif de la calotte Laurentide installée sur le continent Nord Américain (Legrand and De Angelis, 1995) au cours de la dernière grande déglaciation (18.000 - 6.000 BP) (Fig. 2.4). Cette observation suggère une origine biogénique continentale pour ces deux acides organiques (émissions directes et production secondaire à partir de précurseurs émis par la végétation).

Au cours de la même étude sur la carotte EURO-CORE, un premier profil du contenu en carbone total et en carbone suie couvrant les deux cents dernières années a été obtenu (thèse de J. Ducret avec H. Cachier, CFR) permettant de suivre l'évolution la contribution relative des combustions naturelles et anthropiques. Cette investigation de la matière organique s'est poursuivie avec une étude en continu du carbone suie et du carbone total (Pertuisot et al. en préparation) faisant apparaître une augmentation très récente des teneurs due probablement à l'utilisation croissante du diesel. Une étude des HAP portant sur la même période de temps prouve l'importance de tels composés comme traceurs de sources.

### II.1.5 Cycle des halogènes (chlore et fluor)

(M. De Angelis, M. Legrand)

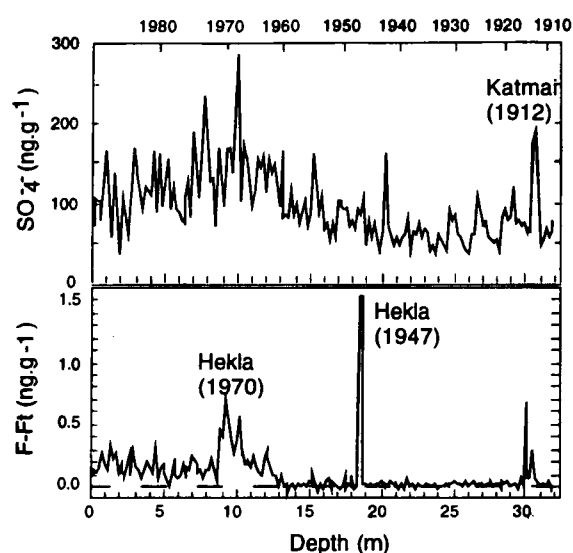
Lorsque les valeurs du rapport Cl/Na dans la neige polaire sont supérieures à la valeur de référence dans l'eau de mer, il est possible, sur la base du bilan ionique, de démontrer la présence de HCl. Les variations spatiales et temporelles de ce rapport suggèrent que l'acide chlorhydrique a pour origine l'altération du sel de mer suivant la réaction bien connue :



Mais les volcans émettent parfois d'importantes quantités de HCl et nos études au Groenland ont permis de déceler de tels apports venant d'Islande (De Angelis et Legrand, 1994). Enfin, l'augmentation des teneurs en HCl des couches de neige récentes au Groenland (Mayewski et al., 1993) suggère l'existence d'une composante anthropique significative dans l'hémisphère Nord.

Nous avons étendu les recherches au fluor, autre halogène «géochimiquement intéressant», présent sous forme de fluorure à de très bas niveaux dans les glaces polaires (quelques dizaines à quelques centaines de ppt). Les premières données fiables de la teneur en fluorure de la précipitation polaire ont ainsi été obtenues, ce qui nous a permis de mieux évaluer le budget (encore très mal connu) de cette espèce aux hautes latitudes Nord et Sud (De Angelis and Legrand, 1994). Parmi les résultats les plus marquants, citons la mise en évidence d'une augmentation récente des teneurs en fluorure de la précipitation au Groenland (Fig. 2.5) en liaison avec

les émissions anthropiques (combustion du charbon) alors qu'aucune tendance similaire n'est décelable en Antarctique. Contrairement à une idée répandue dans la littérature, le budget atmosphérique de cet élément semble peu dépendre de l'activité volcanique de type explosif (avec injection dans la stratosphère). Par contre, les éruptions d'Islande, souvent riches en fluor, sont bien repérées dans les glaces du Groenland. Les cendres volcaniques pourraient jouer un rôle majeur dans l'élimination du fluor volcanique de l'atmosphère. Enfin les résultats obtenus sur les forages profonds du Groenland (GRIP) et de l'Antarctique (VOSTOK) montrent que le fluorure est enrichi par rapport à la source marine. Ce phénomène serait dû à l'existence d'une source de fluorure terrigène.



**Figure 2.5 :**

Variations temporelles des concentrations de sulfate et de fluorure non terrigène (noté F-F) depuis le début du siècle au Groenland (carotte EUROCORE) (De Angelis and Legrand, 1994).

### II.1.6 Modélisation de la capacité oxydante des atmosphères préindustrielle et glaciaire (P. Martinerie)

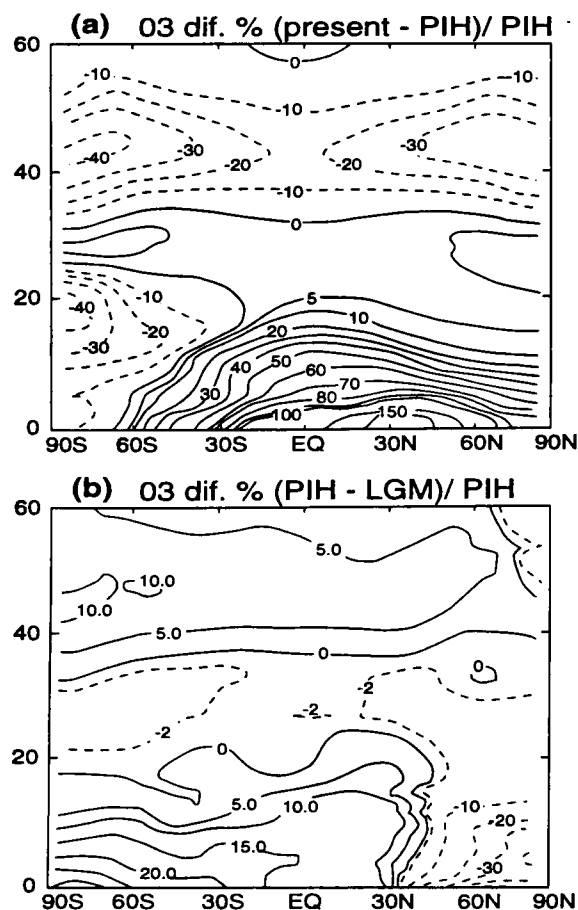
Après deux années de formation passées au NCAR dans l'équipe de G. Brasseur à Boulder, P. Martinerie a implanté en France un modèle 2-D (latitude - altitude) global de la basse et moyenne atmosphère (Brasseur et al., 1990). Le travail visait pour l'essentiel à améliorer la troposphère de ce modèle afin de l'adapter à la simulation des atmosphères passées (préindustriel, dernier maximum glaciaire) et de leur capacité oxydante. Les résultats de perturbation radiative à la tropo-

pause obtenus avec ce modèle sont décrits dans le rapport de l'équipe climat (P. Martinerie travaille à cheval sur les deux équipes «Chimie» et «Climat»).

Comme dans la troposphère, l'impact direct des changements de paramètres orbitaux entre le dernier maximum glaciaire et la période préindustrielle est très faible. Cependant, l'augmentation de la concentration stratosphérique en gaz carbonique, a refroidi la stratosphère par relaxation vibrationnelle (jusqu'à 4 °C vers 40-45 km). Un refroidissement beaucoup plus important (jusqu'à 11 °C vers 45-50 km) est obtenu depuis la période préindustrielle suite à la destruction de l'ozone par les chlorofluorocarbures et l'augmentation de la concentration en CO<sub>2</sub>. Des variations importantes de la production de vapeur d'eau stratosphérique par la destruction du méthane sont observées dans le passé, mais les niveaux de vapeur d'eau dans l'atmosphère moyenne se sont avérés trop faibles pour avoir un impact radiatif important. La température et l'ozone stratosphériques étant fortement couplées, de faibles variations de l'ozone stratosphérique (Fig. 2.6) ont également été obtenues entre dernier maximum glaciaire et préindustriel. Plusieurs effets tendent à se compenser, en particulier celui de CO<sub>2</sub> via la dépendance en température des taux de perte chimique de l'ozone, et celui de N<sub>2</sub>O (qui est à l'origine du cycle catalytique de destruction de l'ozone dominant vers 35-40 km). Un effet beaucoup plus important est obtenu entre préindustriel et période actuelle (diminution atteignant localement 40%) en raison de l'impact des chlorofluorocarbures.

Le modèle produit une augmentation importante de l'ozone troposphérique depuis la période préindustrielle (Fig. 2.6) liée aux émissions anthropiques de CH<sub>4</sub>, CO et NO. Les concentrations d'ozone au niveau du sol à l'époque préindustrielle sont cohérentes avec les données historiques. Bien que l'amplitude des variations soit beaucoup plus faible, une légère augmentation de l'ozone est obtenue dans la plus grande partie de la troposphère entre le dernier maximum glaciaire et le préindustriel suite au doublement de la concentration en méthane. En ce qui concerne le radical hydroxyle, qui est l'oxydant principal de la troposphère, une légère augmentation (6%) est obtenue depuis l'ère préindustrielle, alors que le modèle produit une décroissance de 17% entre dernier maximum glaciaire et préindustriel. A partir des concentrations en méthane issues des carottes de glace et des champs de OH calculés, on peut estimer des flux d'émission du méthane vers l'atmosphère. Les valeurs obtenues sont compatibles avec l'estimation de Chappellaz et





**Figure 2.6 :**

Variations (en %) des concentrations en ozone entre 0 et 60 kilomètres en fonction de la latitude entre l'atmosphère actuelle et pré-industrielle (2.6.a), entre l'atmosphère pré-industrielle et le dernier maximum glaciaire (2.6.b) (Martinerie et al., sous presse).

al. (1993). Ceci tend à valider les champs de radical hydroxyle que nous avons obtenus.

L'ensemble de ces travaux entre dans le cadre du PNCA et a fait l'objet d'une publication J.G.R. (Martinerie et al., sous presse). P. Martinerie reste en contact avec la communauté française de modélisation de la chimie atmosphérique grâce à sa participation aux activités modélisation du PNCA .

**II.1.7 Cycle des métaux**

(C. Boutron, J.P. Candelone, S.M. Hong)

Les recherches sur les métaux traces dans les neige et glace ont progressé très significativement au cours des quatre dernières années grâce à deux facteurs favorables :

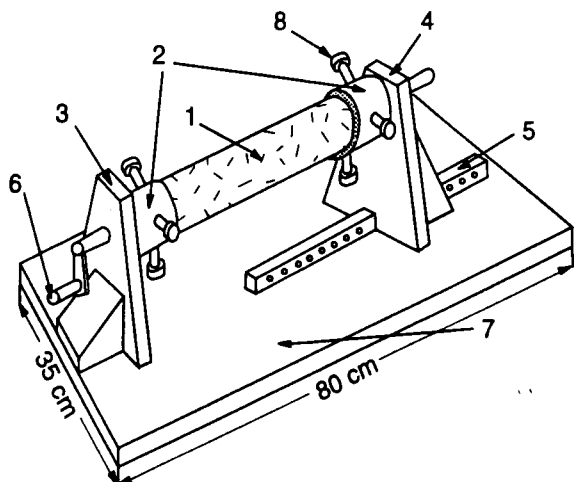
- 1 - la mise en place d'un réseau de collaborations internationales très efficace qui nous ont permis de développer des méthodes et des outils encore plus performants pour valoriser nos études.
- 2 - notre participation à des grands programmes glaciologiques notamment au Groenland (GRIP, EUROCORE, ATM) nous a donné accès à des échantillons de taille et de qualité bien adaptées à nos besoins.

**II.1.7.1 Méthodes analytiques**

Au cours de ces quatre dernières années, notre laboratoire a réalisé d'importantes percées dans le domaine de l'analyse des ultratracés de métaux lourds dans les neige et glace de l'Antarctique et du Groenland, notamment grâce à la mise en place de multiples collaborations internationales dont nous assurons le pilotage (Voir Tableau).

COMPOSÉ OU ÉLÉMENT	COOPÉRATION	MÉTHODE ANALYTIQUE	RÉSULTAT
Isotopie du Plomb masse 204. 206 . 207 . 208)	K. Rosman Curtin University Perth (Australie)	Spectrométrie de masse à ionisation thermique	Détermination isotopique sans extraction chimique sur 1000 pg de plomb
Methyl et ethyl pb	Pr F. Adams Dr R. Lobinski, Université d'Anvers (Département de chimie)	Couplage chromatogr. gazeuse/spectrométrie d'absorption atomique 5CGC/MIP/AES)	Spéciation au niveau de 10 fem/ g, limites de détection abaissées de plusieurs ordres de grandeur.
Hg	Pr W. K Fitzgerald Dpt of Marine Sciences University of Connecticut	Spetrométrie de fluorescence atomique avec amalgamation sur or	. Contrôle des contaminations . Abaissement des seuils de sensibilité.
Plusieurs métaux lourds dont Cd et Bi	RM. Bolshov, Institut de Spectroscopie de Fluorescence Atomique Laser	Spectroscopie de fluorescence atomique laser	Mesures directes (sans préconcentration) de 10 fg de Bi et CD sur 50 µl d'échantillon

Au niveau de la préparation des échantillons, l'innovation la plus marquante a été la conception et la mise en oeuvre d'un tour de décontamination entièrement réalisé en polyéthylène (Fig. 2.7) permettant de décontaminer mécaniquement la plupart des types de carottes (carottes de neige de faible et moyenne profondeur, carottes de glace de grande profondeur obtenues dans des trous avec ou sans fluide). Ce tour, qui représente une importante avancée par rapport aux méthodes utilisées précédemment par C. Patterson et C. Boutron, convient aussi bien lorsque l'on dispose de la totalité de la section de la carotte que lorsqu'une partie seulement est disponible comme dans le cas de GRIP. Les blancs ont été estimés à partir de carottes de glace artificielle. Plus de 70 sections de la carotte de 70 m d'EUROCORE et de celle de 3028 m de GRIP ont été préparées sur ce tour.



**Figure 2.7 :**

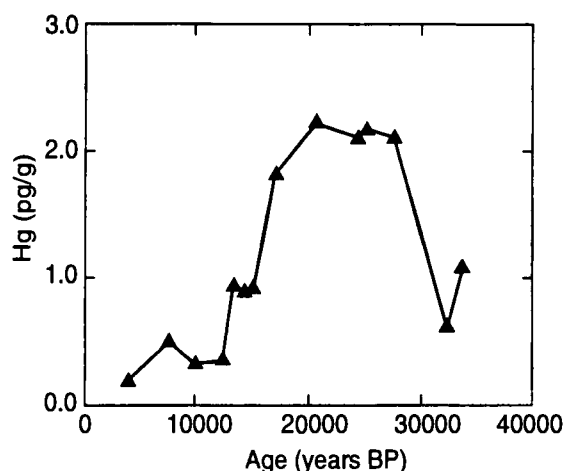
Tour en polyéthylène pour la décontamination de carottes de neige ou de glace (Candelone et al., 1994).

### II.1.7.3 Cycles naturels passés et leurs variations au cours du dernier cycle climatique

En complément aux travaux antérieurs portant sur Pb, Zn et Cu, nous avons obtenu les premières données sur les variations de Cd et Hg dans les glaces anciennes de l'Antarctique, grâce à l'analyse d'une vingtaine de sections de la carotte de 905 m du Dôme C (Cd et Hg) et de celle de 2083 m de Vostok (Cd seulement).

Nos données montrent que les concentrations de Cd ont varié de près de deux ordres de grandeur au cours des derniers 155.000 ans (Boutron et al., 1993) : les

concentrations les plus élevées atteignent 3 pg/g pendant le Dernier Maximum Glaciaire, alors que les plus basses sont inférieures à la limite de détection de la Spectrométrie de Fluorescence Atomique Laser. La contribution volcanique explique une large fraction des concentrations observées pour une partie des échantillons ; les apports crustaux sont souvent significatifs, en particulier pendant les périodes les plus froides. D'autres contributions naturelles pourraient cependant être importantes pour certains échantillons.



**Figure 2.8 :**

Variation des concentrations de Hg dans les glaces de l'Antarctique central au cours des derniers 34.000 ans (Vandal et al., 1993).

Comme le montre la Fig. 2.8, les concentrations de Hg ont varié d'un facteur 6 environ dans les glaces de l'Antarctique au cours des derniers 34.000 ans (Vandal et al., 1993) : les plus élevées, environ 2 pg/g, sont observées pendant le Dernier Maximum Glaciaire, et les plus faibles, environ 0,35 pg/g, pendant l'Holocène. Ces variations ne peuvent pas être expliquées par des modifications des apports de poussières de roches et de sols, de sel de mer, et des volcans dont le total des apports ne dépasse en effet pas 10% des concentrations mesurées. Elles sont par contre très bien expliquées en terme de changement des émissions de mercure gazeux par les régions océaniques productives, émissions qui semblent avoir été la principale source de mercure naturel dans l'atmosphère des régions Antarctique au cours des 34.000 dernières années. Nos données contribuent ainsi, à côté d'autres traceurs biogéniques comme le MSA (voir paragraphe 2.1.2), à l'étude de la paléo-productivité des océans.

Nous poursuivons actuellement ces études grâce à l'analyse de nombreuses sections de la carotte profonde de GRIP (200.000 dernières années). Nous venons par ailleurs d'obtenir des données très complètes sur les isotopes du plomb (204, 206, 207 et 208) aussi bien pour les glaces anciennes de l'Antarctique (derniers 155.000 ans) que pour celles du Groenland (derniers 200.000 ans). L'interprétation des variations observées est actuellement en cours.

### II.1.7.3 Perturbation des cycles des métaux par l'activité humaine dans chacun des deux hémisphères

Ce thème a été au centre de nos activités pendant ces quatre années. Nous disposons notamment pour cela d'un ensemble très complet d'échantillons du Groenland : 1) une carotte de 10,7 m couvrant les années 1967-1989, la période pendant laquelle on a assisté à une très forte diminution de l'utilisation des additifs au plomb dans l'essence ; 2) une carotte de 70 m couvrant les années 1770-1989, c'est-à-dire l'ensemble de la période post révolution industrielle ; 3) de nombreuses sections de la carotte profonde de GRIP correspondant à la période gréco-romaine, à l'âge médiéval et à la renaissance.

#### II.1.7.3.1 Pollution à grande échelle de l'atmosphère de l'hémisphère Nord en Pb par la civilisation gréco-romaine

La Figure 2.9 montre les variations de concentrations de Pb dans les glaces du Groenland central au cours de la période 3.000-500 BP (*Hong et al., 1994*) ainsi que les variations du facteur d'enrichissement crustal de Pb et la courbe de production du plomb au cours des 5.000 dernières années.

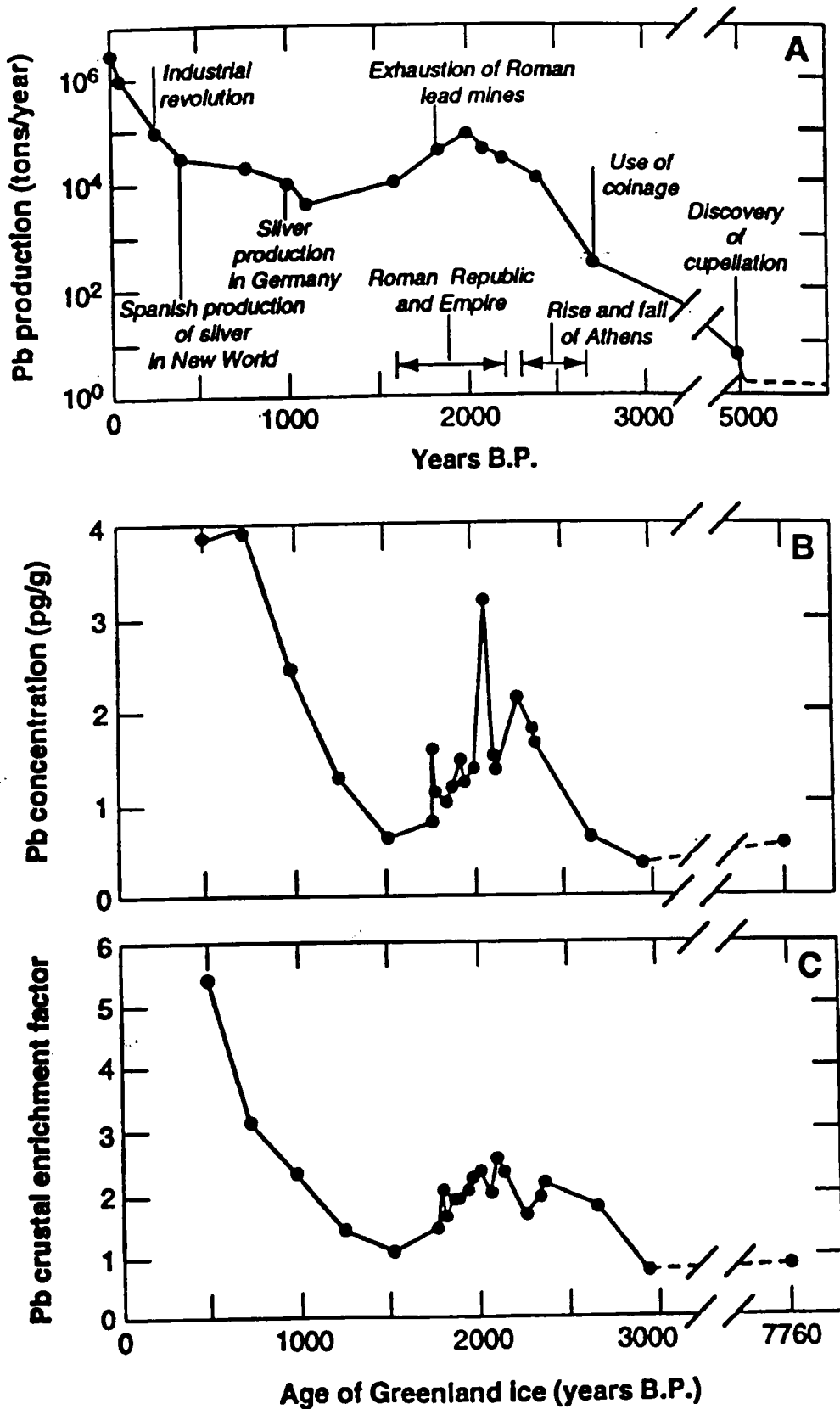
Il y a 8.000 ans, les concentrations de Pb étaient de l'ordre de 0,5 pg/g ; ceci représente le niveau de concentration naturel pré-activités humaines en conditions interglaciaires, valeur qui reste inchangée jusqu'à 3.000 BP (Fig. 2.9 b). Le facteur d'enrichissement est alors proche de l'unité (Fig. 2.9 c), ce qui montre que l'essentiel de ce Pb naturel provenait des poussières de roches et de sols. Les concentrations se mettent ensuite à augmenter au cours des siècles suivants,

pour atteindre des valeurs de l'ordre de 1,5 à 3 pg/g entre 500 ans avant) et 250 ans après JC environ, c'est-à-dire pendant l'apogée de la Grèce Antique, de la République et de l'Empire Romain (Fig. 2.9 b). Elles redescendent ensuite jusqu'à des valeurs proches du niveau naturel de 0,5 pg/g vers 500 après JC. Enfin, elles réaugmentent progressivement pendant les âges médiévaux et la Renaissance, pour atteindre des valeurs de l'ordre de 4 pg/g à la Renaissance.

Ces changements ne peuvent pas être expliqués par des variations de flux naturels de Pb, comme l'indique le fait que les concentrations d'Al et de Na restent essentiellement constantes pendant la période de temps considérée. Ils sont d'origine anthropique, comme le confirment, de manière indubitable, les données sur les isotopes de Pb que nous venons d'obtenir récemment. Ils sont liés aux émissions de Pb vers l'atmosphère provoquées par les activités d'extraction minière et de traitement des minerais de Pb et d'Ag par les civilisations gréco-romaines. Ces activités n'ont en effet pas cessé de se développer jusqu'à l'apogée de l'Empire Romain sous le règne d'Auguste (27 avant - 14 après JC), stimulées par la découverte de la coupellation puis de la frappe de la monnaie. Le maximum de production de Pb, 80.000 tonnes/an, est atteint à l'époque de JC (Fig. 2.9 a). Les émissions de Pb vers l'atmosphère sont estimées alors à 5% des quantités de métal produites, soit environ 4.000 tonnes/an.

Nos données montrent qu'elles étaient suffisamment puissantes pour atteindre l'Arctique. Il s'agit là, et de loin, de la plus ancienne pollution atmosphérique hémisphérique jamais observée, plus de deux mille ans avant la Révolution Industrielle.

L'analyse de ces mêmes échantillons montrent qu'un effet est également observé pour Cu, métal très largement utilisé par les Grecs et les Romains mais aussi par d'autres civilisations, notamment en Chine. Ils viennent aussi d'être analysés en isotopes de Pb de façon à déterminer l'origine géographique de la pollution observée au Groenland par comparaison avec les signatures isotopiques des mines antiques d'Ibérie (Espagne), des Balkans et d'Asie Mineure.



**Figure 2.9 :**

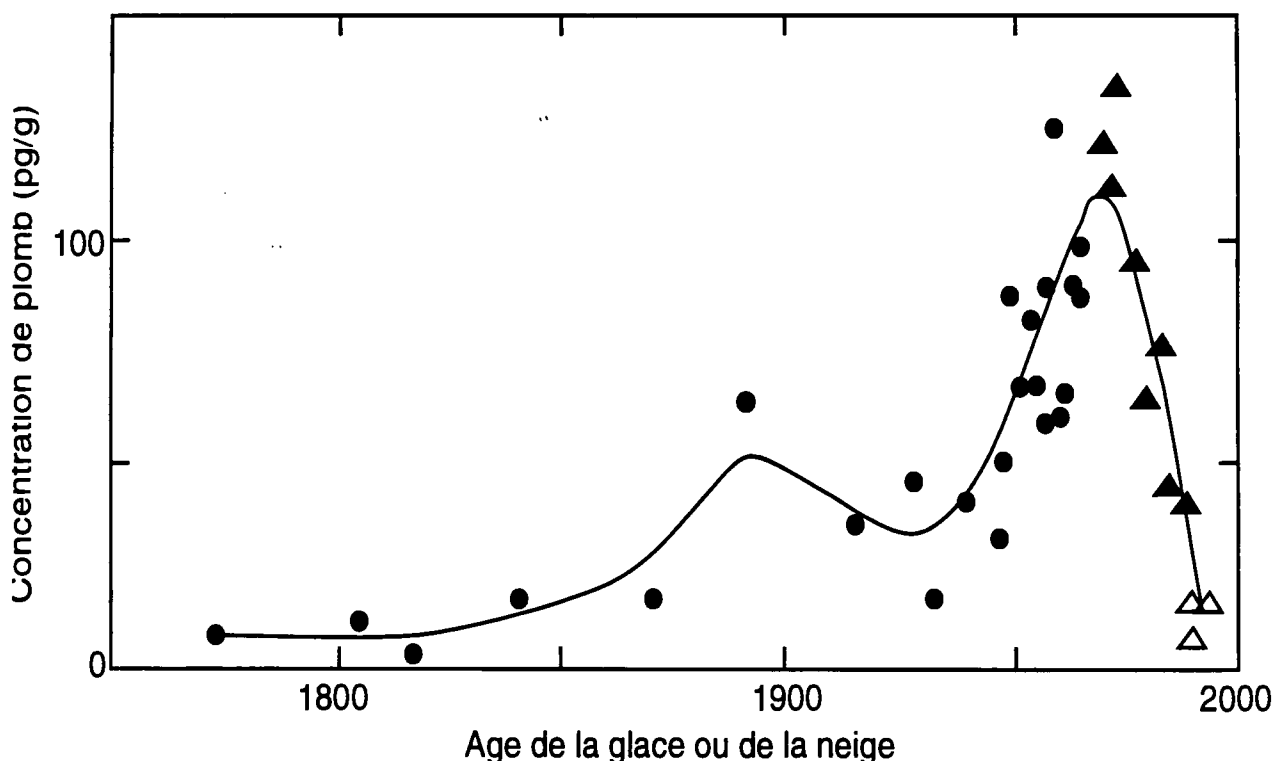
Variations des concentrations (b) et des facteurs d'enrichissement (c) de Pb dans les glaces du Groenland central pendant l'époque gréco-romaine, les temps médiévaux et la Renaissance. La production estimée de Pb de l'Antiquité à nos jours est également montrée (Hong et al., 1994).

### II.1.7.3.2. Pollution à grande échelle de l'atmosphère en Pb, Cd, Cu et Zn depuis la Révolution Industrielle

La Figure 2.10 montre les variations des concentrations de Pb dans les neiges et glaces du Groenland central (Summit) au cours des 220 dernières années, reconstituées grâce à l'analyse des carottes EUROCORE de 10,7 m et 70 m (Candelone et al., sous presse). A la fin du 18<sup>e</sup> siècle, les concentrations mesurées sont de l'ordre de 10 pg/g, c'est-à-dire 2,5 fois celles de la Renaissance. Elles croissent progressivement jusqu'aux années 1900, pour redescendre légèrement pendant la grande dépression économique des années 1920-1930. On assiste alors à une montée rapide des concentrations jusqu'à la fin des années 60, en parallèle avec l'augmentation massive de l'utilisation des additifs au plomb dans l'essence à partir des années 30. Le maximum atteint est proche de 100 pg/g, c'est-à-dire 200 fois le niveau naturel de l'holocène. Les concentrations redescendent ensuite d'un facteur 10 environ, suite à l'importante réduction de l'utilisation des additifs au plomb, aux Etats-Unis d'abord, puis en Europe.

L'implication directe des additifs au plomb a été démontrée pour la première fois grâce à la mesure directe des éthyl et méthyl Pb dans les échantillons postérieurs à l'année 1923 (date de l'introduction commerciale de ces additifs) (Lobinski et al., 1994 a et b). Les éthyl Pb sont détectés dans tous les échantillons post-1923, avec une montée des concentrations jusqu'aux années 1960, suivie d'une décroissance.

L'origine géographique de ce plomb anthropique trouvé au Groenland a pu être déterminée grâce à la mesure des isotopes du plomb dans l'ensemble de ces échantillons (Rosman et al., 1993 et 1994). Les données actuellement interprétées concernent les années 1960-1989. Par comparaison avec la signature isotopique des émissions américaines et européennes, elles montrent qu'à la fin des années 1960, les Etats-Unis étaient, à eux seuls, responsables des 2/3 du plomb trouvé au Groenland central, l'Europe étant à l'origine du 1/3 restant. Vingt ans plus tard, en 1989, la contribution américaine ne représentait plus que 1/4 du total (qui avait entre temps considérablement diminué). Les données pour les années 1773-1960 sont actuellement en cours d'interprétation.

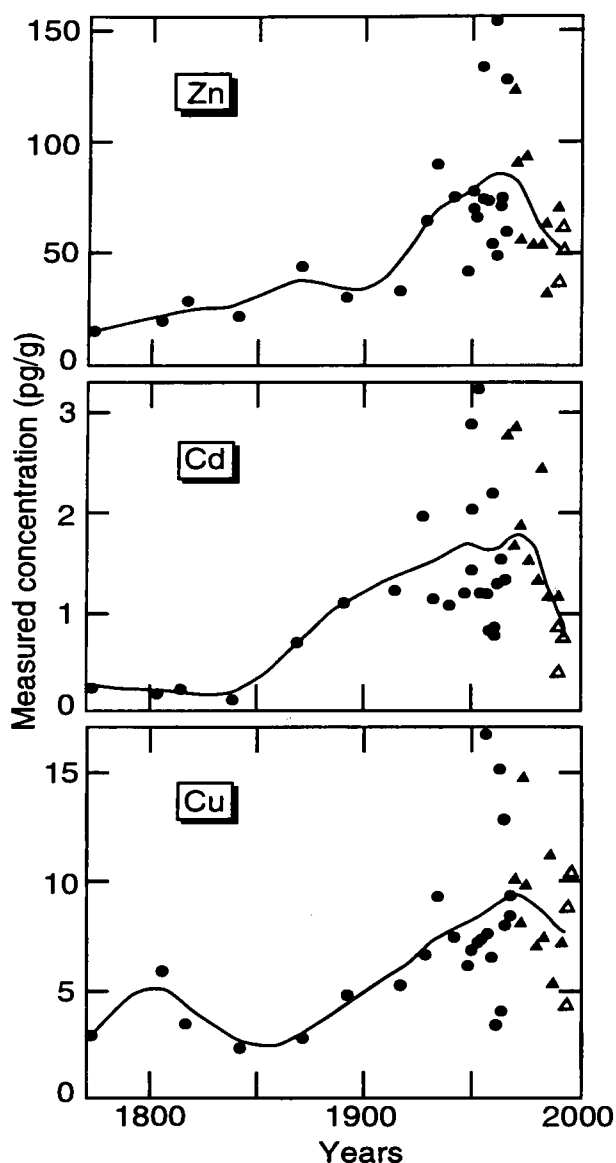


**Figure 2.10 :**

Variations des concentrations de Pb dans les neiges et glaces du Groenland central depuis la Révolution Industrielle (Candelone et al., sous presse).

La Figure 2.11 montre l'évolution des concentrations de Zn, Cd et Cu au cours de ces années 1773-1989 (Candelone et al., sous presse). Pour les trois métaux, on observe une augmentation des concentrations jusqu'aux années 1960-1970, suivie d'une décroissance au cours des deux dernières décennies qui traduit les importants efforts qui ont été réalisés dans de nombreux pays pour réduire les émissions de l'industrie des non ferreux, des incinérateurs, etc...

A côté de ces études portant sur les neiges et glaces du Groenland, nous mentionnerons notre participation à une étude très originale de la pollution en plomb à une échelle plus locale en France au cours des 40 dernières années. Cette étude, qui repose sur l'utilisa-



**Figure 2.11 :**

Variations des concentrations de Zn, Cd et Cu dans les neiges et glaces du Groenland central depuis la Révolution Industrielle (Candelone et al., sous presse).

tion de vins millésimés comme archives de la pollution atmosphérique, a consisté en l'analyse des ethyl et methyl Pb dans une vingtaine de bouteilles de «Chateaufort du Pape» allant de 1950 à 1991 (Lobinski et al., 1994). Les concentrations de triethyl Pb ont triplé de 1950 à 1962, avant de décroître par suite de l'augmentation rapide du pourcentage de methyl Pb dans les additifs puis de la diminution de la consommation d'additifs. Pour le trimethyl Pb, on assiste par contre à une montée progressive jusqu'à la fin des années 1970 (montée en puissance de l'utilisation des methyl Pb en remplacement des ethyl Pb) suivie d'une décroissance rapide.

Les études que nous venons de passer en revue portent sur l'Hémisphère Nord. Nous avons également poursuivi un certain nombre d'études centrées sur l'Hémisphère Sud. Parmi les résultats les plus significatifs obtenus, il faut mentionner les premières mesures des isotopes de Pb dans les neiges récentes de l'Antarctique (Rosman et al., 1994). Ces données confirment que le plomb trouvé dans les neiges Antarctique récentes est pour l'essentiel anthropique : la pollution par le plomb a atteint même les régions les plus éloignées de l'Hémisphère Sud et a donc un caractère global contrairement à beaucoup d'autres pollutions. Elles montrent par ailleurs que cette pollution provient sans doute pour l'essentiel d'Amérique du Sud mais indiquent également qu'en certains sites une partie de la pollution observée est due aux émissions des stations scientifiques elles-mêmes.

## II.2 RELATION «AIR-NEIGE» AU GROENLAND

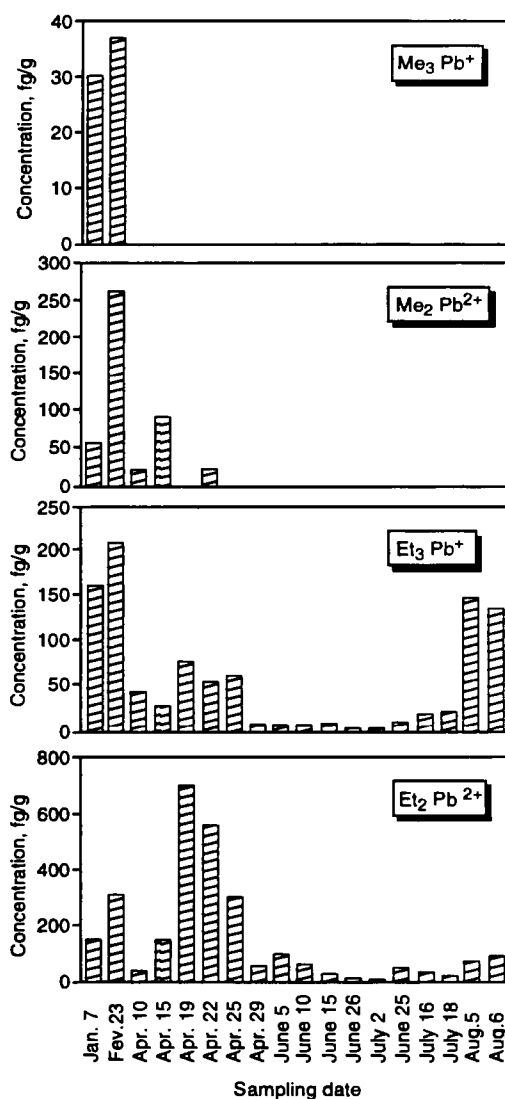
(J.L. Jaffrezo, M. Legrand, M. De Angelis, C. Boutron, E. Silvente, A. Léopold)

Cet axe de recherche est un maillon indispensable pour effectuer une transcription correcte des données physico-chimiques archivées dans la glace en terme de chimie et de processus de transport intervenant dans l'atmosphère polaire. Il vise à quantifier les relations existant entre les concentrations observées dans la glace et les conditions atmosphériques présidant à cet enregistrement dans les neiges de surface. Ces relations sont extrêmement complexes ; elles font intervenir de nombreuses étapes, depuis l'émission dans les zones sources jusqu'au puits constitué par la neige profonde. Ces différents maillons sont encore mal connus (Davidson et al., 1991) et, jusqu'à présent, le travail effectué a plutôt été centré sur l'évaluation des problèmes posés en fonction des différents types d'impuretés. Ainsi, si l'on reste encore loin d'une modélisation globale des processus, les études effectuées ces dernières années ont permis d'identifier un certain nombre de facteurs prioritaires dans l'étude de cette fonction de transfert (Jaffrezo et al., 1995).

Ce type d'études des processus a pour l'instant été beaucoup plus développé au Groenland qu'en Antarctique, au travers de 3 programmes récents : DGASP (Dye 3 Gas and Aerosol Sampling Program) (Jaffrezo and Davidson, 1993), ATM (Jaffrezo et al., 1991), et maintenant TAGGSI. Ces programmes multidisciplinaires et internationaux ont donné lieu au développement d'une étroite collaboration entre différents chercheurs français intervenants du programme national «Atmosphère Polaire» (PNCA, CNRS, coordinateur M. Legrand) avec de nombreux partenaires américains et européens comme en témoignent les publications communes. Les axes de recherche abordés englobent la majorité des phénomènes impliqués dans la chaîne de transfert, avec entre autres, des études climatologiques et météorologiques, des études sur les échanges troposphère libre/couche limite, sur les flux associés aux différents modes de dépôts (dépôt sec, dépôt avec la neige, dépôt avec le givre ou encore avec le brouillard,...), sur les relations avec le cycle de l'eau, ou encore des études plus spécifiques sur l'impact des processus post-dépôt. Le programme DGASP a donné lieu en 1988-1989 au premier (et unique jusqu'à ce jour) hivernage sur la calotte Groenlandaise pour des études de chimie de l'atmosphère. Le programme ATM, lié aux programmes saisonniers de forages profonds Américain (GISP 2) et Européen (GRIP), a été en place chaque année depuis 1989. Depuis 1994, ce programme est devenu autonome, avec une continuation assurée du côté européen au travers d'un programme CCE (Transfer of Aerosols and gases to the Summit of the Greenland Ice Sheet : Implications for Interpretation of Icecore Paleo-data. JL Jaffrezo, coordinateur).

Un premier type d'étude a concerné la caractérisation des zones sources influençant le Groenland du Sud, avec la mise en oeuvre d'une double approche, météorologique (climatologie du site et étude systématique des trajectoires de masse d'air, Davidson et al., 1993a) et géochimique (confrontation avec l'utilisation de traceurs chimiques, Davidson et al., 1993b ; Mosher et al., 1993 ; Savarino et al., 1994). Ces études ont clairement montré que les variations saisonnières des concentrations atmosphériques étaient bien expliquées par les variations des zones sources, des voies de transport et par la rapidité de ce transport, toutes caractéristiques liées au mouvement du front polaire arctique. Ces études ont concerné aussi bien des espèces minérales non réactives (Mosher et al., 1993 ; Boutron et al., 1993 ; Colin et al., en préparation) que des espèces issues d'une production saisonnière et biogénique, comme le MSA (Jaffrezo and Davidson, 1992 ; Jaffrezo et al., 1994b). Les développements en cours concernent l'utilisation de caractéristiques complémentaires (telle la minéralogie des particules, DEA et Thèse d'E. Drab) ou de traceurs très spécifiques comme les

métaux lourds (Fig. 2.12). Des études plus spécifiques concernant des épisodes particuliers ont permis de montrer la validité de l'utilisation des trajectoires de masses d'air dans le cas de la calotte Groenlandaise (Davidson et al., 1993c ; Jaffrezo et al., 1993a ; Jaffrezo et al., 1994b). On a pu ensuite montrer, entre autre grâce aux mesures simultanées du  $^{210}\text{Pb}$  et du  $^7\text{Be}$ , que, si les concentrations observées au sol étaient principalement dépendantes du transport longue distance dans la troposphère libre, elles étaient aussi largement influencées par les transports verticaux vers la couche limite et que, dans ce cadre, il existait un impact important des couches d'inversion (Dibb et al., 1992a ; Dibb and Jaffrezo, 1993). On a pu commencer à préciser le lien existant avec le cycle de l'eau (Borys et al., 1991 ; Borys et al., 1993), et quantifier et modéliser les flux associés aux gouttelettes de brouillard (Bergin et al., 1995a,b).



**Figure 2.12 :**

Variations des concentrations de diethyl, triethyl, dimethyl et trimethyl Pb dans la neige fraîche au Groenland du Sud (Dye 3) de Janvier à Août 1989 (Lobinski et al., 1994).

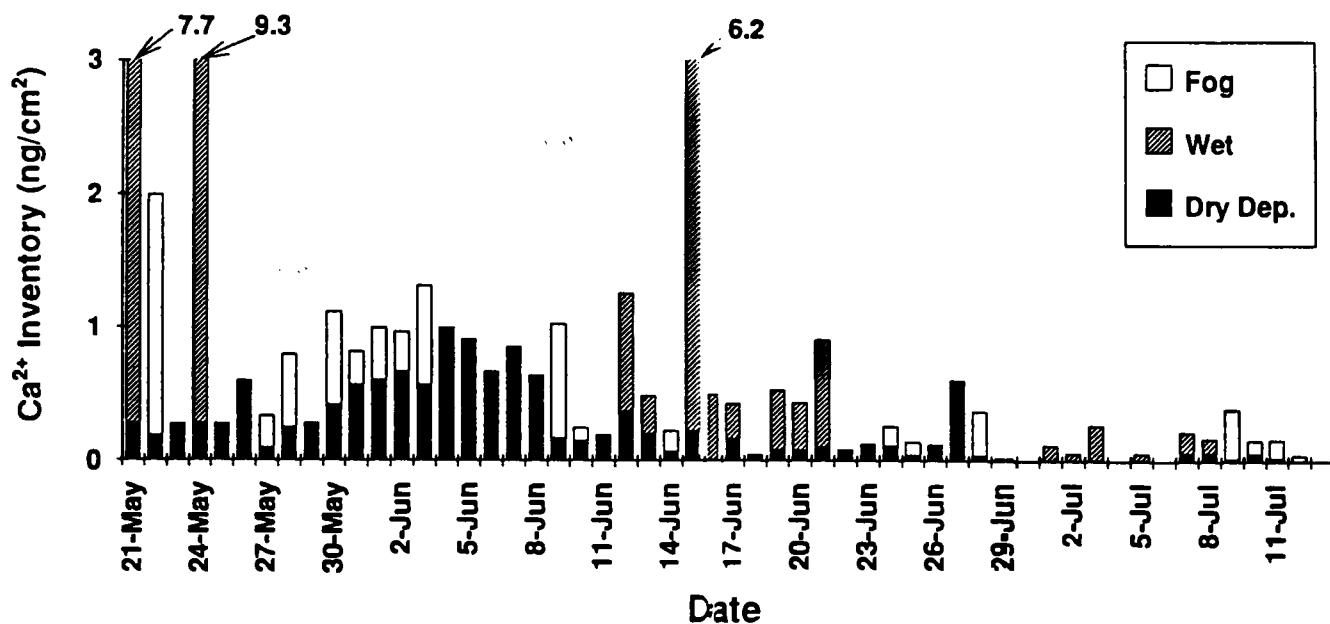
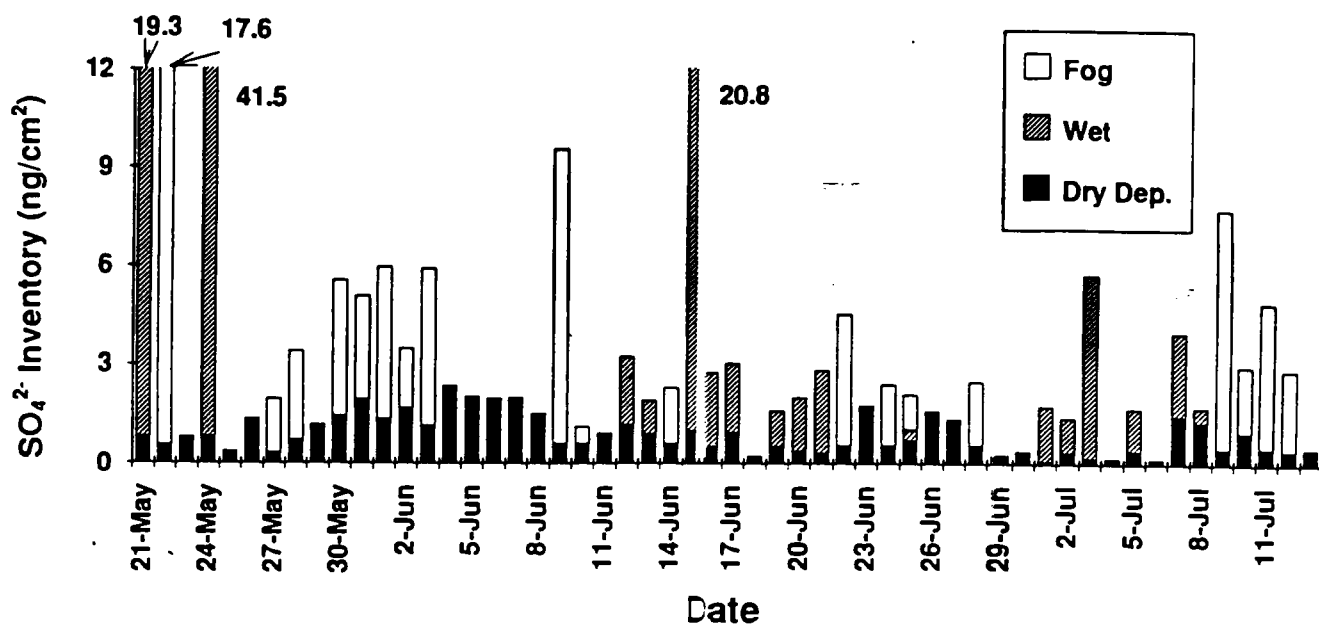


Figure 2.13 :

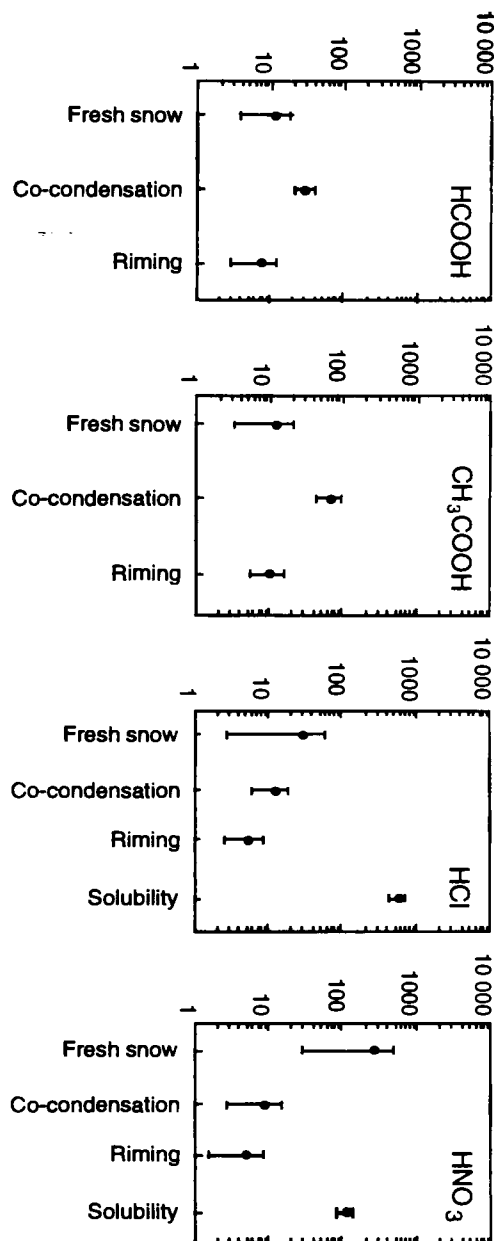
Bilan des apports de sulfate et de calcium par le dépôt sec, le dépôt humide et les brouillards à Summit en été (Bergin et al., 1995).



Ce travail sur les flux et les processus de dépôt a aussi été entrepris pour certains autres mécanismes. Ainsi, l'observation des cristaux de neige a permis de mieux cerner les processus d'incorporation des espèces chimiques dans les précipitations ; on montre que le «riming» (givrage de gouttelettes surfondues à la surface des flocons de neige) n'est pas très développé, même pour les précipitations d'été (Borys *et al.*, 1993), ce qui présente des implications importantes pour le dépôt et la chimie des espèces solubilisables. De même, un modèle simplifié a été utilisé pour calculer l'importance du dépôt sec au Groenland du Sud (Hillamo *et al.*, 1993), qui a montré la variabilité de cette composante selon les espèces chimiques considérées et les saisons (Davidson *et al.*, 1993b) et sa forte dépendance envers la granulométrie de l'aérosol (Jaffrezo *et al.*, 1993b). Les résultats de ce modèle montrent un bon accord avec des mesures de terrain et leur confrontation permet des développements prometteurs (Fig. 2.13).

La caractérisation de la phase gazeuse a, quant à elle, été entreprise au LGGE depuis maintenant 3 ans. L'intérêt de ce type de travail réside dans le fait que la fonction de transfert d'une espèce chimique répartie entre les phases gazeuses et particulaires est profondément différente de celle d'une espèce essentiellement particulaire. Un premier travail a été entrepris avec la thèse d'E. Silvente concernant l'acide nitrique, qui montre que moins de 10% des concentrations atmosphériques se trouvent en phase aérosol (Silvente *et Legrand*, 1995). Parallèlement, l'étude d'un autre composé azoté, l'ammonium, a montré que les grandes différences observées entre la neige et l'aérosol pour le rapport ammonium / sulfate, que mettaient en évidence certaines études antérieures réalisées aux hautes latitudes, ne sont pas dus à une mauvaise transcription par la neige du signal atmosphérique mais à des artefacts expérimentaux sur la mesure de l'ammonium dans l'aérosol (Silvente *and Legrand*, 1993). Ces études sur la phase gazeuse concernent maintenant certains acides organiques. La mise au point au laboratoire des méthodes de prélèvement (chambre à brouillard) est actuellement terminée (thèse de A. Léopold). La première étude de ces acides organiques réalisée dans l'atmosphère au Groenland durant l'été 1993 a permis de discuter l'importance de deux

principaux modes d'incorporation (le givrage et la co-condensation) dans la précipitation solide (Fig. 2.14).



**Figure 2.14 :**

Comparaison des teneurs moyennes en formiate, acétate, nitrate et chlorure observées dans les neiges fraîches de Summit, avec les teneurs calculées en supposant tour à tour un mode d'incorporation des gaz par co-condensation avec l'eau à partir de la phase gazeuse, puis par givrage des cristaux et enfin pour HCl et HNO<sub>3</sub> l'équilibre thermodynamique (Thèse de A. Léopold, 1995).

Ce travail a ensuite été orienté, avec le DEA de T. Merle d'Aubigné, vers la mesure du SO<sub>2</sub> après collecte dans une chambre à brouillard. Parallèlement, un travail de grande envergure a été entrepris au LESAM (Chambéry), avec la caractérisa-

tion de la fraction organique de l'aérosol collecté dans différents sites, dont celui de Summit en été. Ce travail (Thèse de M.P. Clain, 1995 ; Clain et al., 1995), en analysant de façon semi quantitative plus de 3.000 composés organiques de l'aérosol, montre que l'aérosol arctique est un aérosol âgé comportant beaucoup d'esters (stade ultime d'oxydation de la matière organique) (Fig. 2.15).

Le lien entre les concentrations atmosphériques et celles observées dans les neiges de surface a été considéré, pour l'instant d'une façon qualitative seulement. On a pu montrer qu'il existait bien un synchronisme des variations saisonnières entre les deux milieux, pour de nombreuses espèces chimiques (Jaffrezo and Davidson,

1991 ; Dibb and Jaffrezo, 1993 ; Jaffrezo et al., 1995). Ces mêmes études ont indiqué que ce cycle saisonnier correspond bien, d'une façon générale, à celui retrouvé dans les puits, à l'échelle de la dizaine d'années.

Cependant, les études de vieillissement des couches de neige de surface montrent l'importance des effets post-dépôt pour certaines classes de composés. Ainsi, contrairement aux espèces incorporées sous forme d'aérosols dans le névé (qui ne semblent pas subir de modifications importantes au cours du vieillissement), celles présentes à l'état gazeux dans l'atmosphère (les acides nitrique, chlorhydrique et surtout les acides organiques) montrent un appauvrissement dans les couches de surface après dépôt (De Angelis and Legrand, 1995).

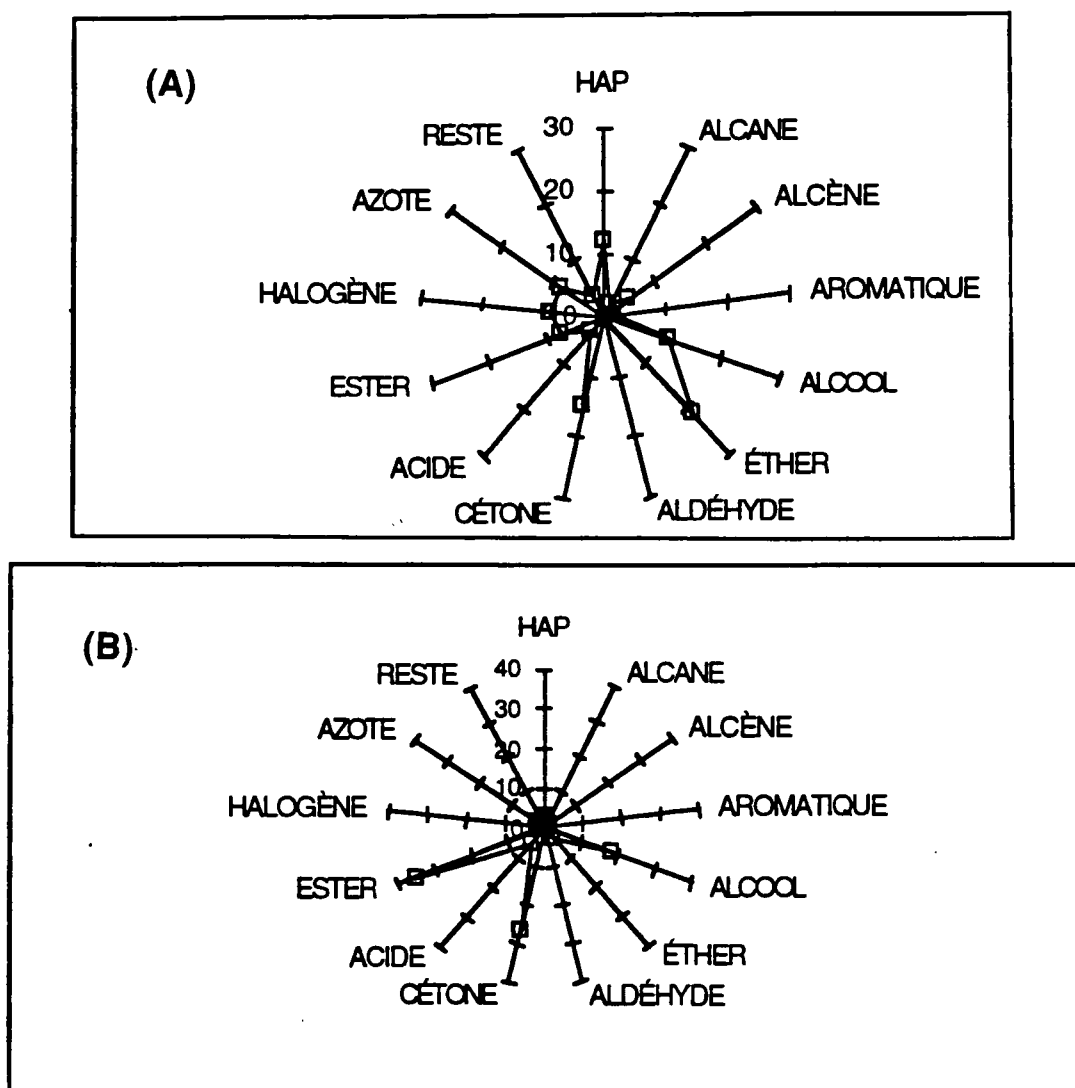


Figure 2.15 :

Groupements fonctionnels organiques identifiés dans un aérosol de feux de savane (A) et dans l'aérosol collecté à Summit en été (B) (Thèse de M.P. Clain, 1995).

Ce type d'étude est entrepris de façon plus systématique avec le DEA de N. Chatagnon (identification de l'action du métamorphisme sur les variations observées des concentrations de certaines espèces). De même, l'observation directe ou encore une première approche de bilan de flux de matière montre qu'il existe une redistribution des masses déposées sous les actions conjuguées des vents et de l'ensoleillement ; des études sont en cours pour appréhender et quantifier ces processus (collaboration avec C.I. Davidson). A l'échelle de quelques années, on observe aussi une décroissance significative de certains HAP pour lesquels des réactions prenant place au sein du névé doivent être recherchées (Jaffrezo *et al.*, 1995).

En Antarctique, les travaux sur ce thème sont plus restreints et ont concerné essentiellement une estimation empirique de l'importance du dépôt sec pour le flux total de retombées pour des espèces présentes à l'état d'aérosols. L'approche a été d'examiner les flux de retombées intégrés par la neige sur un intervalle de temps fixe pour des sites présentant des taux de précipitation annuels très différents (2 g d'eau à Vostok jusqu'à 20 g à 200 km de Dumont d'Urville). Ce type d'étude a ainsi montré que les retombées sèches peuvent représenter près de 70% du flux total pour les aérosols marins (Legrand and Delmas, 1988) et les aérosols secondaires soufrés (Legrand, 1995) dans les régions les plus centrales de l'Antarctique de l'Est, pour lesquelles l'accumulation neigeuse est très faible. C'est en utilisant les relations empiriques ainsi obtenues que nous avons jusqu'ici corrigé nos données «neige» de la «cause locale» que représente une variation du taux d'accumulation. Par ailleurs, comme au Groenland, certaines paléodonnées suggèrent un phénomène de réémission d'espèces comme  $\text{HNO}_3$  et  $\text{HCl}$  dans les régions antarctique à faible accumulation.

Le travail effectué récemment sur l'incorporation des gaz dans la précipitation solide ainsi que les phénomènes post-dépôts (Legrand and De Angelis, 1995 ; Dominé *et al.*, 1995 ; Léopold, 1995) ont bien montré la nécessité d'associer ces études terrain avec des études en laboratoire portant sur la thermodynamique et la cinétique des systèmes gaz-solide (voir paragraphe 2.4.4.)

### II.3 CYCLE DU SOUFRE EN ANTARCTIQUE

(M. Legrand, F. Ducroz)

L'activité planctonique dans la couche euphotique de l'océan (0 à 100 m) constitue une source importante de composés soufrés, en particulier de sulfure de diméthyle (DMS), qui contribue très largement au budget total du soufre d'origine naturelle. Le temps de vie atmosphérique du DMS, bien qu'encore mal connu, est de l'ordre de quelques heures aux moyennes latitudes. Ce composé s'oxyde rapidement dans la troposphère pour donner de l'acide méthanesulfonique (MSA) et du dioxyde de soufre ( $\text{SO}_2$ ) dans un rapport  $\text{MSA}/\text{SO}_4$  variant entre 1 et 10% aux basses latitudes. Plus au sud, durant la saison où la mer est libre, l'océan antarctique est très fortement sursaturé en DMS et il devient une zone fortement productrice de DMS. Les quelques études atmosphériques portant sur les concentrations de sulfate et d'acide méthanesulfonique présents dans la basse atmosphère marine des hautes latitudes sud suggèrent un branchement très inhabituel (par rapport à ce qui est observé aux latitudes plus tempérées) en faveur du MSA. Nous avons exposé dans le paragraphe 2.1.2 les résultats relatifs aux carottes de glace et montré les points restant à élucider. Une interprétation approfondie des données de sulfate et de MSA extraites des carottes de glace de l'Antarctique passe par une bonne caractérisation des émissions de DMS en provenance de la source locale que représente l'océan antarctique ainsi qu'une bonne connaissance de leur devenir atmosphérique.

Depuis 1991 un programme de monitoring atmosphérique a donc été développé en zone côtière Antarctique. L'objectif premier de cette étude menée à la station permanente de Dumont D'Urville est de mieux connaître le budget des dérivés soufrés aux hautes latitudes et sa modulation par les modifications climatiques à court (développement ENSO) et long terme que suggèrent les études antérieures portant sur l'archivage des précipitations de ces régions (voir paragraphe II.1.2). A plus long terme, cette étude sera également utile pour comprendre les mécanismes d'oxydation du DMS dans ces atmosphères de hautes latitudes. En effet, pour le DMS émis depuis la surface de l'océan proche, l'Antarctique représente un véritable laboratoire naturel permettant de tester nos connaissances sur la cinétique de conversion du DMS et sur la capacité oxydante de ces atmosphères soumises à un cycle saisonnier très particulier. Les mécanismes d'oxydation du DMS dans l'atmosphère restant mal connus, ce type d'étude réa-

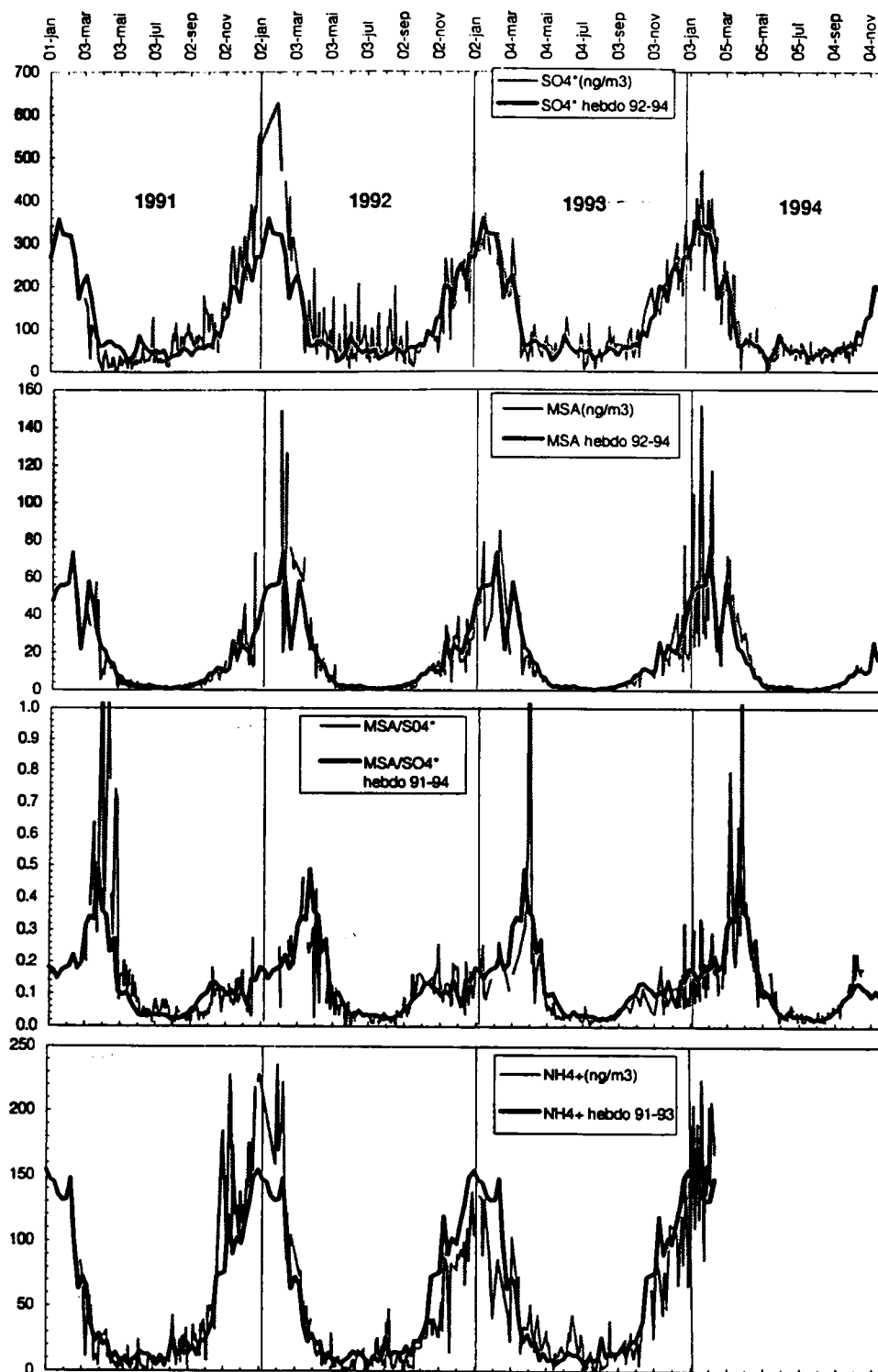


Figure 2.16 :

Concentrations atmosphériques de sulfate, MSA et ammonium observées à Dumont D'Urville de 1991 à 1995 (Résultats non publiés, thèse de F. Ducroz).

lisé dans ces conditions photochimiques exceptionnelles (faibles vitesses de réaction liées aux faibles taux d'humidité, basses températures et absence temporaire de rayonnement) fournira probablement des informations importantes pour approfondir notre connaissance de ce maillon atmosphérique clef du cycle du soufre.

Ce programme a été soutenu par la CCE (programme STEP, 1991 et 1992, M. Legrand coordinateur), l'IFRTP et le PACB. Depuis 1991, des collectes systématiques d'aérosols ont été effectuées par des volontaires à l'aide technique (F. Ducroz en 1991, R. Schoen et F. Denux en 1992, C. Verspieren en 1993, L. Hulot en 1994 et T. Merle d'Aubigné en 1995) sur une base quasi-journalière, été comme hiver. Un chromatographe ionique (financé en 1992 par l'IFRTP) permet maintenant l'exploitation sur le site des collectes d'aérosols. Le bilan des suivis atmosphériques réalisés tout au long des années 1991 à 1995 à Dumont D'Urville montre tout d'abord que la mesure des dérivés soufrés (MSA et  $\text{SO}_4$ ) ne souffre pas de contaminations dues aux activités de la base (nos résultats sont identiques à ceux obtenus par nos collègues anglais et allemands dans le «secteur propre» de leur bases respectives). Nos résultats font apparaître un cycle saisonnier très marqué (deux ordres de grandeur entre été et hiver), avec des rapports MSA/ $\text{SO}_4$  très élevés (100%) en été (Fig. 2.16). Ce rapport s'effondre durant l'été 1991/1992 en liaison avec l'arrivée de sulfate non biogénique lié à l'éruption du Pinatubo. D'autres résultats concernant le fractionnement du sel de mer en hiver, ainsi que les variations saisonnières des nitrates et de l'ammonium sont en cours d'évaluation (*thèse de F. Ducroz fin 1995*). La mesure du  $\text{SO}_2$  avec une chambre à nébulisation récemment mise au point à Grenoble (limite de détection 10 pptv pour 4 heures de prélèvements) a débuté cet hiver sur le site de Dumont D'Urville.

## II.4 INTERACTIONS GAZ TRACES ATMOSPHERIQUES - GLACE

En 1991, F. Dominé a été chargé de développer au LGGE un programme de chimie hétérogène destiné à mieux comprendre les mécanismes de disparition de l'ozone dans la stratosphère polaire. Certaines grandes lignes de ce mécanisme sont maintenant connues, tout au moins qualitativement : le froid intense ( $T < 195 \text{ K}$ ) régnant l'hiver et au printemps permet la formation de nuages stratosphériques polaires (PSC) formés de particules de glace et/ou d'hydrates d'acide

nitrique. HCl, molécule chimiquement inerte en phase gazeuse, s'adsorbe sur la surface de ces particules. De nombreuses réactions peuvent alors avoir lieu. Une des plus importantes est celle de  $\text{ClONO}_2$ , qui réagit avec HCl et  $\text{H}_2\text{O}$ , pour former  $\text{Cl}_2$  et HOCl. Ces molécules, et d'autres, sont photolysées très rapidement au printemps et donnent des radicaux Cl et ClO qui détruisent catalytiquement l'ozone. Bien qu'ayant fait l'objet de nombreuses études, les mécanismes et la cinétique des réactions hétérogènes impliqués dans la formation du trou d'ozone restent mal connus. Afin d'approfondir nos connaissances en ce domaine, il nous est vite apparu qu'il était indispensable d'élargir l'étude à des processus hétérogènes autres que les réactions chimiques de surface. En effet, avant de réagir à la surface des aérosols stratosphériques, les gaz traces doivent s'y adsorber. Il peuvent également diffuser dans le volume des aérosols et, si leur solubilité est importante, modifier significativement leur concentration gazeuse. Des réactions dans le volume des aérosols sont également possibles. Nous avons donc entrepris d'étudier l'adsorption, la diffusion, la solubilité et la réactivité de gaz traces à la surface et dans le volume des constituants des aérosols stratosphériques. Pour l'instant, les gaz traces étudiés ont été essentiellement HCl et  $\text{HNO}_3$ , et le solide considéré a été la glace. Les domaines d'application des résultats obtenus ont été diversifiés pour inclure, outre la destruction de l'ozone, la fonction de transfert «air-neige», l'impact du trafic aérien sur la chimie atmosphérique, et la prédiction de la composition des eaux issues de la fonte des neiges. Par souci de clarté, nous décrivons d'abord les systèmes expérimentaux et une sélection des résultats obtenus, puis quelques-unes des applications de ces résultats à l'atmosphère et à l'hydrosphère.

### II.4.1 Diffusion et solubilité de gaz traces dans la glace

(F. Dominé, E. Thibert)

La glace mise en contact d'un gaz peut soit fondre, soit former une nouvelle phase cristalline, en général un hydrate de ce gaz, soit subir la diffusion de ce gaz dans son réseau cristallin. Les conditions atmosphériques sont telles que c'est en général cette dernière possibilité qui se produit. Dans un premier temps, nous avons procédé à l'étude de la diffusion et de la solubilité de HCl et  $\text{HNO}_3$  dans la glace. Cette étude a nécessité la construction de 2 appareillages expérimentaux : un appareil de croissance cristalline destiné à obtenir de grands cylindres (30 cm de haut par 8 cm de diamètre) de glace monocristalline et un système permettant de maintenir au

dessus d'un échantillon monocristallin une pression partielle de gaz connue et constante. Ce dernier système est décrit en Fig. 2.17. Après plusieurs semaines de diffusion, la glace est sectionnée en tranches de 25  $\mu\text{m}$  d'épaisseur à l'aide d'un tour de précision situé en chambre froide à  $-15\text{ }^\circ\text{C}$ .

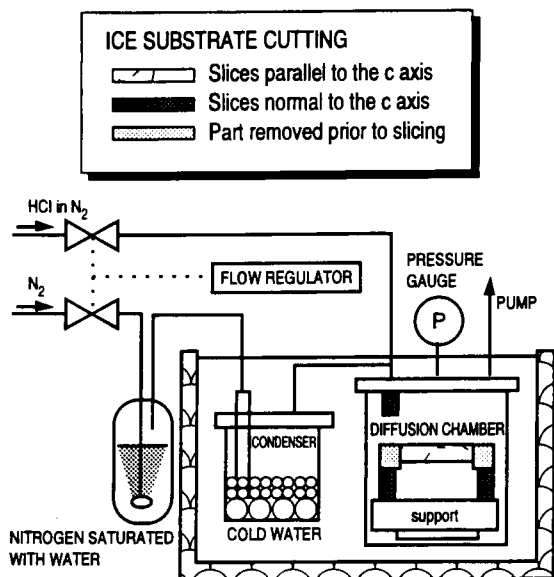


Figure 2.17 :

Appareillage utilisé pour étudier la diffusion et la solubilité de gaz dans la glace.

Les tranches de glace sont ensuite fondues et analysées en chromatographie ionique. Un profil de diffusion est ainsi obtenu, dont on déduit la solubilité et le coefficient de diffusion du gaz trace par fittage à l'équation de diffusion appropriée. Des profils de diffusion typiques sont représentés en Figure 2.18.

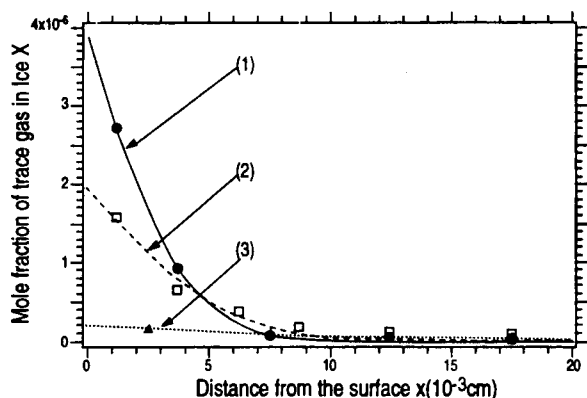


Figure 2.18 :

Profils de diffusion de gaz traces dans la glace.

- (1) HCl,  $T = -15\text{ }^\circ\text{C}$ ,  $P_{\text{HCl}} = 4 \times 10^{-3}\text{ Pa}$ ,  $t = 21\text{ jours}$
- (2) HCl,  $T = -15\text{ }^\circ\text{C}$ ,  $P_{\text{HCl}} = 5.6 \times 10^{-4}\text{ Pa}$ ,  $t = 12\text{ jours}$
- (3)  $\text{HNO}_3$ ,  $T = -15\text{ }^\circ\text{C}$ ,  $P_{\text{HNO}_3} = 5.4 \times 10^{-3}\text{ Pa}$ ,  $t = 7\text{ jours}$

Il est à noter que l'étude de la diffusion et de la solubilité de gaz traces dans la glace représente une idée et une technique relativement simples dans leur principe. De nombreuses études sur ce sujet ont été tenté depuis plusieurs années par d'autres chercheurs, mais sans succès, les résultats obtenus étant soit inexploitable, soit difficiles à interpréter de manière univoque. L'obtention de résultats à différentes températures et pressions partielles de gaz trace permet d'obtenir les paramètres thermodynamiques du système «gaz-glace», dont certains renseignements structuraux peuvent être déduits. Par exemple, les résultats obtenus démontrent que HCl est au moins partiellement dissocié en  $\text{H}^+$  et  $\text{Cl}^-$  dans le réseau cristallin de la glace.

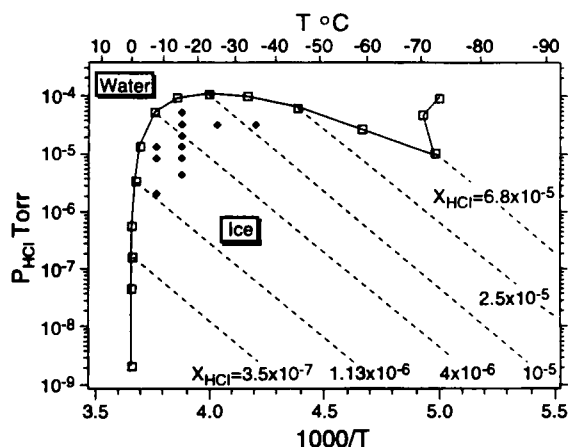


Figure 2.19 :

Lignes d'isosolubilité de HCl dans la glace (les chiffres représentent la fraction molaire de HCl dans la glace), dans un diagramme « $P_{\text{HCl}}$  - Température». Les losanges sombres représentent les conditions ( $P_{\text{HCl}}$ ,  $T$ ) de nos expériences. La courbe en trait plein est la frontière glace-solution liquide de HCl.

Pour l'instant, de nombreux résultats ont été obtenus pour HCl (Dominé et al., 1994 et 1995a) alors que les résultats sur  $\text{HNO}_3$  sont préliminaires (Dominé et al., 1995b ; Dominé et Thibert, 1995). Comme nous le décrivons plus loin, les applications de ces résultats sont très nombreuses et ce travail doit impérativement être poursuivi. Malheureusement, la diffusion des gaz dans la glace est si lente qu'il n'est possible, en moyenne, d'obtenir qu'un seul résultat de solubilité et de diffusion par mois avec la méthode utilisée. La vitesse de diffusion décroissant à basse température, cette étude devient impossible en dessous de  $-40\text{ }^\circ\text{C}$ . Un modèle thermodynamique a été élaboré pour extrapoler les résultats obtenus pour HCl dans tout le domaine de température et de pression partielle d'intérêt atmosphérique. Les résultats de ce modèle sont représentés en Fig. 2.19. Afin de valider nos

extrapolations, une collaboration a été entreprise avec J.C. Petit, du LCSR d'Orléans. Ce chercheur utilise des méthodes calorimétriques qui permettent d'étudier la solubilité de gaz dans la glace à des températures de  $-70\text{ }^{\circ}\text{C}$ , mais seulement à la pression partielle de gaz correspondant au solidus du système «gaz-glace». Malgré cette limitation, les résultats obtenus par J.C. Petit permettront de contraindre de manière très utile le modèle thermodynamique utilisé pour obtenir la Fig. 2.19.

#### II.4.2 Adsorption de gaz traces sur la glace (F. Dominé, L. Chaix)

HCl étant une molécule gazeuse clé dans la destruction de l'ozone stratosphérique, plusieurs groupes de recherche, essentiellement aux USA, ont entrepris d'étudier l'adsorption de ce gaz sur la glace. Les paramètres quantitatifs importants sont : le coefficient de collage,  $\gamma$ , c'est à dire la probabilité qu'une molécule gazeuse percutant la surface de la glace s'y adsorbe ; le recouvrement,  $\theta$ , c'est à dire la fraction de la surface de la glace recouverte par HCl pour une pression partielle de HCl ( $P_{\text{HCl}}$ ) et une température données ; et l'énergie d'adsorption,  $q^{\text{st}}$ , c'est à dire la chaleur dégagée lorsqu'une molécule s'adsorbe. Si les résultats obtenus par divers groupes s'accordent sur la valeur élevée de  $g$ , les valeurs de  $q$  varient d'un facteur 30 pour les conditions stratosphériques. Quant aux valeurs de  $q^{\text{st}}$ , elles n'ont pour l'instant pas été obtenues.

Les techniques utilisées étaient pour la plupart basées sur le principe du réacteur à écoulement qui nous semblait mal adapté pour étudier ce genre de problème. De plus, il est clair que l'adsorption de gaz sur un solide va dépendre de l'état de la surface (énergie de surface, porosité, etc...) qui n'a pas été étudiée. Nous nous sommes donc fixé pour buts de (1) concevoir un système expérimental ne présentant pas les inconvénients du réacteur à écoulement pour étudier l'adsorption de gaz traces sur la glace ; (2) utiliser ce système pour caractériser précisément la surface de la glace et mesurer  $\theta$  et  $q^{\text{st}}$  pour des gaz traces d'intérêt atmosphérique, et notamment HCl.

Le système conçu, schématisé en Fig. 2.20, est de type volumétrique avec détection par spectrométrie de masse. Brièvement, le gaz trace étudié est introduit dans les volumes équivalents  $V_1$  et  $V'_1$ . La pression de gaz  $P'_1$  dans  $V'_1$  est mesurée avec le spectromètre de masse.  $V_1$  et  $V_2$  sont ensuite mis

en contact, exposant la glace contenue dans  $V_2$  au gaz. L'adsorption qui en résulte se traduit par une chute de pression. La pression partielle  $P_1$  contenue dans  $V_1$  est alors mesurée. De  $P_1$  et  $P'_1$  on établit alors un bilan molaire donnant directement la quantité de gaz adsorbé, et le recouvrement  $q$ . Après plusieurs telles opérations, on obtient une isotherme d'adsorption, c'est à dire la relation entre  $\theta$  et  $P_{\text{gaz}}$  à une température donnée. Un détecteur de pression partielle est bien nécessaire pour ce travail, car la pression de vapeur de la glace est toujours très supérieure à  $P_{\text{gaz}}$ . L'obtention d'isothermes à plusieurs températures permet de calculer  $q^{\text{st}}$  en fonction de  $\theta$ . Cette dernière donnée fournit des renseignements non seulement sur les interactions «gaz-glace», mais aussi sur l'énergie de surface de la glace, et la distribution en énergie des différents sites d'adsorption.

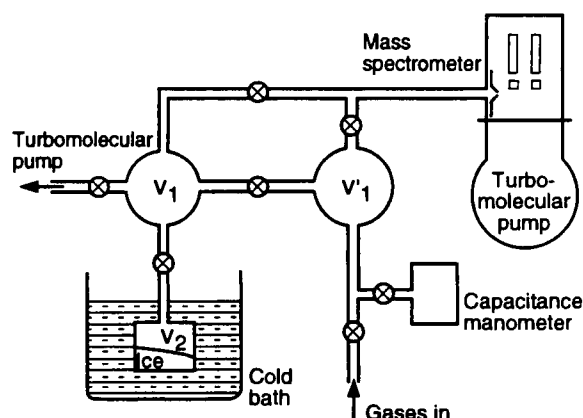
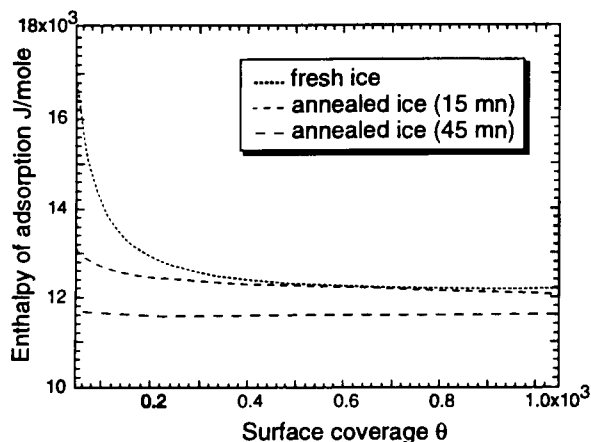


Figure 2.20 :

Appareillage utilisé pour étudier l'adsorption de gaz traces sur la glace

Dans un premier temps, les propriétés de surface de la glace ont été étudiées. Plusieurs méthodes sont possibles pour fabriquer de la glace de forte surface spécifique : broyage, condensation depuis la phase vapeur, gelage de micro gouttelettes... Après fabrication, cette glace évolue par sublimation des endroits convexes à faible rayon de courbure et recondensation sur les endroits convexes à fort rayon de courbure ou concaves : on parle du métamorphisme de la glace. Ce phénomène est responsable de la diminution de la surface spécifique de la glace avec le temps. Il a donc été nécessaire d'étudier l'évolution de la surface spécifique et de l'énergie de surface de la glace en fonction du temps, de la température, et de la méthode de prépara-

tion. Cette étude est de plus nécessaire pour justifier de l'application à l'atmosphère de résultats obtenus avec de la glace préparée au laboratoire. L'adsorption du méthane à 77 et 87 K (-196 et -186 °C) a été utilisée pour sonder ces propriétés des surface. A titre d'illustration, la Fig. 2.21 montre l'énergie d'adsorption du méthane sur la glace préparée par broyage à 77 K, puis recuite à -80 °C, en fonction du temps de recuit à -80 °C.

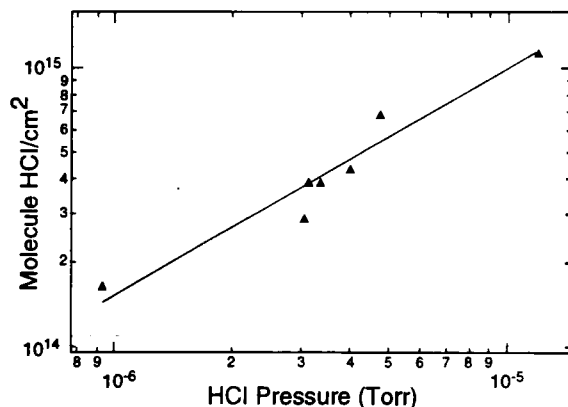


**Figure 2.21 :**

Energie d'adsorption du méthane sur la glace, en fonction du degré de recouvrement  $\theta$ , pour divers temps de séjour de la glace à -80 °C.

A faible recouvrement, on observe la présence de sites présentant une forte énergie d'adsorption. Ces sites disparaissent avec le temps, et la distribution des sites énergétiques, ainsi que la surface spécifique de la glace broyée se stabilisent après environ 2 heures à -80 °C. L'étude de la surface de la glace est donc un préalable indispensable aux mesures d'adsorption de gaz tels que HCl et HNO<sub>3</sub>, car une glace à la surface non stabilisée donnera une adsorption plus forte qu'une glace à la surface stabilisée.

L'adsorption de HCl aux températures d'intérêt stratosphérique a été étudiée sur la obtenue par gelage d'eau (Dominé et al., 1995b). Les résultats préliminaires sont représentés en Fig. 2.22. Leur extrapolation aux plus faibles  $P_{\text{HCl}}$  d'intérêt stratosphériques ( $10^{-7}$  Torr) indiquent un recouvrement de la glace par HCl de l'ordre de 0,1 monocouche. Cette valeur est plus faible que celle obtenue par certains des groupes qui utilisent un réacteur à écoulement. Une explication probable de cet écart réside dans le fait que les autres groupes ne mesuraient pas la surface spécifique de leur glace, et la sous estimaient probablement, car ils utilisaient une glace condensée à partir de la phase vapeur, et ne tenaient pas compte de sa microporosité.



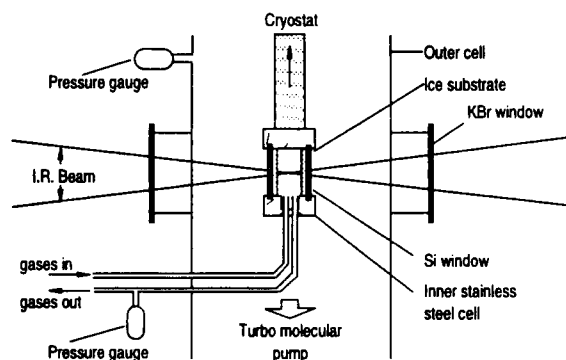
**Figure 2.22 :**

Isotherme d'adsorption de HCl sur la glace à 195 K (78 °C).

#### II.4.3 Réactions chimiques hétérogènes sur et dans la glace

(F. Dominé, C.-J. Liu, S. Houdier)

Afin d'étudier certaines réactions hétérogènes impliquant la glace, un système permettant de contrôler la composition de gaz au dessus de la glace et de détecter l'apparition ou la disparition d'espèces chimiques par spectrométrie infra rouge à transformée de Fourier (IRTF) a été conçu (Fig. 2.23).



**Figure 2.23 :**

Schéma du système expérimental utilisé pour étudier les réactions hétérogènes sur et dans la glace.

La première étude a eu pour objet HCl. A très basse température ( $T < 40$  K) l'observation de bandes d'absorption caractéristiques de HCl moléculaire montre que HCl est physisorbé sur la glace. A plus haute température, l'apparition de bandes caractéristiques de H<sub>3</sub>O<sup>+</sup> montre que l'on a dissociation ionique de HCl et donc chimisorption.

Actuellement, notre travail porte sur l'oxydation hétérogène de molécules organiques. En particulier, la réaction :



(1) Formaldéhyde + oxydant → Acide Formique

ou l'oxydant est  $\text{H}_2\text{O}_2$  ou  $\text{HNO}_3$ , nous intéresse tout particulièrement pour son impact sur la chimie atmosphérique et l'interprétation des données extraites des carottes de glace. D'après des résultats préliminaires, ces réactions semblent se produire dans le volume de la glace, et il est possible que des réactions similaires, comme

(2) Acide Glycolique + oxydant → Acide Oxalique

aient également lieu dans le volume de la glace, ce qui pourraient ainsi modifier le signal atmosphérique après enfouissement de la glace dans les calottes polaires.

#### II.4.4 Applications à la fonction de transfert «air-neige»

(F. Dominé, E. Thibert, E. Silvente, M. Legrand, J.L. Jaffrezo)

A l'exception de gaz comme le méthane qui interagissent peu avec la glace, la connaissance détaillée de la fonction de transfert de la plupart des gaz traces atmosphériques doit être considérée comme un objectif à long terme qui nécessitera de nombreuses études de laboratoire couplée à des mesures fines de terrain qui enregistreront de nombreux paramètres physico-chimiques de la neige et de l'air, et à des mesures de l'évolution des concentrations des composés dans les carottes de glace. Au sein du LGGE, notre contribution à l'étude des fonctions de transfert se situe évidemment au niveau des expériences de laboratoire, et s'effectue en étroite collaboration avec J.L. Jaffrezo (expériences de terrain, voir paragraphe II.2) et M. Legrand (analyses des carottes, voir paragraphe II.3) (Dominé et al., 1995).

Pour l'instant, les résultats obtenus pour HCl au laboratoire et lors de campagnes de terrain au Groenland indiquent que (Dominé et al., 1994 et 1995 ; Dominé et Thibert, 1995) : (a) HCl dans la neige fraîche du Groenland formée à  $-15^\circ\text{C}$  n'est pas en équilibre thermodynamique avec l'atmosphère. Ceci est illustré Fig. 2.24. Le contenu en HCl de la neige peut être expliqué par des facteurs cinétiques : le rapport  $\text{HCl}/\text{H}_2\text{O}$  dans la neige est égal au rapport du nombre de collisions suivies d'adsorption de HCl et  $\text{H}_2\text{O}$  sur le cristal de neige en formation. L'équilibre thermodynamique doit ensuite être atteint par diffusion en phase solide, ce qui n'est pas possible à cause de la faible vitesse de diffusion de HCl

dans la glace. (b) Après dépôt, la composition de la neige évolue. Notre compréhension actuelle suggère que l'évaporation de la glace suivie de sa recristallisation à d'autres endroits dans des conditions de température différentes de celles de sa formation est un élément d'explication des phénomènes observés

En ce qui concerne  $\text{HNO}_3$  dans la neige fraîche du Groenland, ce composé semble être en équilibre avec l'atmosphère. Les résultats sont insuffisants pour que cette conclusion soit définitive, mais elle est supportée par des arguments thermodynamiques et par le fait que  $\text{HNO}_3$  diffuse dans la glace 100 fois plus vite que HCl, ce qui lui permet de s'équilibrer beaucoup plus rapidement que HCl.

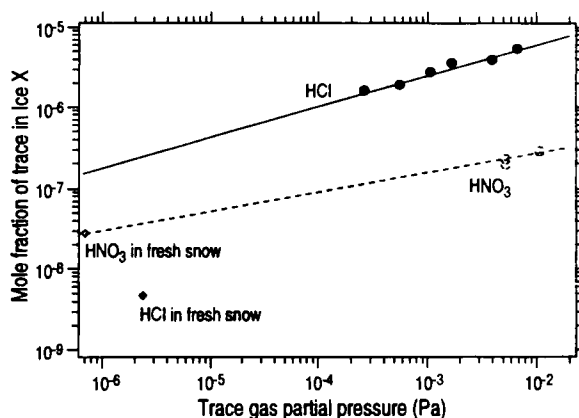


Figure 2.24 :

Comparaison de l'extrapolation de la solubilité de HCl et  $\text{HNO}_3$  dans la glace à  $-15^\circ\text{C}$  mesurée au laboratoire avec les mesures effectuées au Groenland sur de la neige fraîche formée à  $-15^\circ\text{C}$ . Dans la neige fraîche du Groenland, HCl n'est pas en équilibre thermodynamique, alors que  $\text{HNO}_3$  semble l'être.

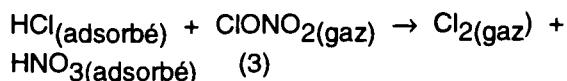
Il est clair que les mesures de solubilité et de diffusion, bien qu'indispensables, sont insuffisantes pour comprendre les fonctions de transfert de HCl et  $\text{HNO}_3$ . Un programme précis d'expériences de laboratoire et de terrain a été proposé pour compléter ce travail (Dominé et al., 1995).

#### II.4.5 Application à la stratosphère polaire (F. Dominé, E. Thibert, L. Chaix)

La compréhension détaillée de la chimie stratosphérique polaire nécessite de connaître la composition de volume et de surface des aérosols. Ces données ne sont pas accessibles avec les technologies actuelles. Si la mesure de la composition de volume des aérosols stratosphériques est envisageable à moyen terme (ce travail est entrepris par

le groupe de F. Arnold à Heidelberg, dans le cadre du programme européen que F. Dominé coordonne) la mesure de leur composition de surface reste un problème insurmontable aujourd'hui.

Cette composition de surface intervient par exemple dans la connaissance de la vitesse de la réaction (3) ou entre en compte la concentration de surface de HCl.



La mesure de  $\text{HCl}_{(\text{gaz})}$  dans la stratosphère est par contre possible. Cette mesure, associée à la connaissance des isothermes d'adsorption que nous mesurons, permet de prédire la composition de surface des aérosols de glace stratosphériques.

Nos résultats, qui indiquent que la concentration de surface de HCl est inférieure aux valeurs retenues actuellement, suggèrent que la réaction (3) sera plus lente qu'envisagée jusqu'ici. L'impact de ce résultat sur notre compréhension du mécanisme de la réaction (3) devra être évalué précisément. En particulier, il faudra déterminer si l'adsorption de HCl est une étape limitante, et si le mécanisme réactionnel, tel qu'il est suggéré par (3), est bien correct.

L'extrapolation à basse température des résultats obtenus sur la solubilité de HCl dans la glace permet de prédire (voir Fig. 2.19) qu'à l'équilibre, l'incorporation de HCl dans le volume de la glace sera insuffisante pour appauvrir la phase gazeuse en HCl, qui restera donc disponible pour s'adsorber sur la glace et réagir selon la réaction (3). Dans le cas contraire, la sédimentation des cristaux de glace aurait pu appauvrir considérablement la stratosphère en HCl. Si, comme le suggèrent les résultats résumés dans la Fig. 2.22, l'incorporation de HCl dans la glace est déterminée par des facteurs cinétiques, il apparaît également que son incorporation dans la glace sera peu importante.

#### **II.4.6 Application à la prédiction de la composition de l'eau de fonte des neiges** (F. Dominé, E. Thibert)

Il est bien connu que l'eau issue de la phase initiale de fonte des neiges peut être très concentrée en acide, ce qui a, comme il a par exemple été observé en Scandinavie, des effets très néfastes sur la biosphère. Les principaux acides concernés sont  $\text{H}_2\text{SO}_4$ ,  $\text{HNO}_3$ , et HCl. Si l'on expose de la glace à de très faibles quantités de  $\text{H}_2\text{SO}_4$ , cet acide induira une fusion partielle de la glace, ce qui formera une petite quantité de solution concentrée en  $\text{H}_2\text{SO}_4$  localisée aux joints de grains, et plus particulièrement aux jonctions entre 3 ou 4 cristaux de glace. La

première fraction de fonte contiendra évidemment une grande partie de la solution concentrée en  $\text{H}_2\text{SO}_4$  située aux joints de grains, expliquant la présence systématique de fortes concentrations de cet acide dans les premières eaux de fonte.

Les résultats présentés en Fig. 2.24 montrent que  $\text{HNO}_3$  est moins soluble que HCl. Si, dès une  $P_{\text{HNO}_3}$  suffisamment élevée, la quantité de  $\text{HNO}_3$  incorporée dans le manteau neigeux est supérieure à sa solubilité, l'excès de  $\text{HNO}_3$  sera incorporé dans le liquide concentré en acide sulfurique.  $\text{HNO}_3$  sera donc, dans ce cas, très présent dans les premières eaux de fonte. Dans le cas contraire,  $\text{HNO}_3$  y sera présent à une concentration moins importante, mais toujours supérieure à sa concentration dans la neige, car une faible quantité de  $\text{HNO}_3$  sera tout de même solubilisé dans la solution de  $\text{H}_2\text{SO}_4$ . Le même raisonnement s'applique à HCl, mais sa solubilité étant plus forte dans la glace, les premières eaux de fonte n'ont que très peu de chance d'être très concentrées en HCl. Par contre, des neiges synthétiques dopées par des quantités de HCl supérieures à sa solubilité auront des fractions initiales d'eaux de fonte très enrichies en HCl. Ces explications sont cohérentes avec les observations de terrain et les expériences du groupe de Tranter.

Bien que la glace représente une fraction importante des aérosols atmosphériques et de la surface de la terre, notre connaissance des interactions physico-chimiques «gaz-glace» demeure à l'état embryonnaire. Le programme que nous avons développé contribue à combler cette lacune. Les résultats obtenus ont des applications pour la stratosphère, la troposphère, l'hydrosphère et la reconstitution de la composition des atmosphères passées à partir de l'analyse des carottes de glace. Cette dernière application nous semble d'une importance toute particulière, étant donnée l'importance des budgets nécessaires à l'obtention des carottes de glace, qui implique que soit optimisée leur interprétation. Cette interprétation est indispensable pour connaître les variations passées de la composition atmosphérique, ce qui contribuera à prévoir les variations futures de l'environnement global.

#### **II.4.7 Propriétés optiques des aérosols stratosphériques polaires** (F. dominé et deux DEA : F. Lafont, D. Kooshmanian)

La connaissance de la nature physique et de la composition chimique des aérosols stratosphériques polaires est bien évidemment indispensable à la compréhension de la chimie de la destruction de la couche d'ozone et à la prévision de son évolution. Actuellement, les principales méthodes d'obtention de renseignements sur les aérosols strato-

sphériques sont de nature optique : aéroportées ou basées au sol (Lidar). Ces méthodes peuvent permettre d'obtenir, entre autres informations, la phase (solide ou liquide) et l'indice de réfraction des aérosols. Si les indices de réfraction des constituants potentiels des aérosols stratosphériques (glace, solution d'acide sulfurique, hydrates d'acide nitrique ou sulfurique, mélanges solides d'eau et d'acide nitrique à l'état amorphe) sont connus, les méthodes optiques peuvent donc permettre de déterminer précisément leur nature.

Nous avons entrepris, en collaboration avec Patrice Baldeck du Laboratoire de Spectrométrie Physique de Grenoble, de mesurer les indices de réfraction d'hydrates d'acides, en commençant par le trihydrate d'acide nitrique (NAT), supposé former la majorité des nuages stratosphériques polaires. La méthode consiste à mesurer la déviation d'un faisceau laser par un prisme de NAT. Les étapes de ce travail sont : fabrication d'un monocristal de NAT, détermination de ces axes cristallographiques, taille d'un prisme, et enfin mesures optiques. Ce travail s'est révélé très délicat, à cause du point de fusion du NAT (- 18.5 °C) qui impose de travailler en chambre froide vers - 35 °C, et de la difficulté d'obtenir des faces de prisme de bonne qualité optique dans ces conditions de travail, et sur un solide tendre et à forte tension de vapeur. Des résultats préliminaires ont montré que le NAT était fortement biréfringent. Son sys-

tème de cristallisation étant orthorhombique, il faut donc mesurer 3 indices principaux selon les 3 axes cristallographiques. Ces 3 indices ont donc été mesurés. Les valeurs sont :

$$n_1 = 1,38 \pm 0,01$$

$$n_2 = 1,48 \pm 0,01$$

$$n_3 = 1,59 \pm 0,01$$

Pour l'instant, il n'a pas été établi de correspondance entre les directions de  $n_1$ ,  $n_2$  et  $n_3$  et les axes cristallographiques, ce qui nécessitera l'utilisation de techniques de cristallographie par rayons X. Pour évaluer l'impact de ces résultats pour les études atmosphériques, il serait de plus nécessaire de connaître la forme des cristaux de NAT dans la stratosphère. Une collaboration avec W. Kuhs, à Göttingen, est en cours afin de mesurer les vitesses de croissance du NAT dans les conditions stratosphériques selon les diverses orientations cristallographiques.

Ces données permettront une interprétation plus précise des mesures optiques des PSC. Il est cependant déjà très probable que l'analyse actuelle de ces mesures, qui suppose des particules sphériques et optiquement isotropes, mène à des erreurs significatives sur la détermination des distributions de taille des particules.

### III COLLABORATIONS ET CONTRATS

#### III.1 COLLABORATIONS INTERNATIONALES

Isotopic Geophysics Laboratory, Copenhague  
 Instituto Antartico Argentino, Mendoza  
 California Institute of Technology, Division of Geological and Planetary Sciences  
 Institute of Spectroscopy, Academie des Sciences, Moscou (coopération officielle dans le cadre de sous-groupe sectoriel Franco-soviétique en Instrumentation Scientifique)  
 British Antarctic Survey, Cambridge, Grande-Bretagne  
 Paul Scherrer Institut, Villigen, Suisse  
 ENEL/CRTN, Milan, Italie  
 Université de Heidelberg, Allemagne  
 Institut für Bioklimatologie, Göttingen  
 Université du New Hampshire, USA  
 KFA Jülich Institut Für Atmospharische Chemie II  
 Carnegie Mellon University, Pittsburgh  
 University of Anvers, Belgique  
 University of Connecticut, USA  
 Curtin University of Technology, Australie

University of Cambridge, Department of Chemistry,  
 Max-Planck-Gesellschaft zur Förderung der Wissenschaften e. V., Institut für Kernphysik,  
 Rijksuniversiteit Gent, Faculteit Wetenschappen,  
 Vakgroep Analytische chemie,  
 Ruprecht-Karls-Universität Heidelberg, Institut für Umweltphysik  
 Environment Canada

Plusieurs chercheurs étrangers ont fait des conférences au laboratoire ou y ont séjourné quelques mois : J. Bottenheim 12 mois 1993-94 - Barrie L. (Environment Canada) - 4 mois en 1995 - A. Aristarain (chercheur argentin) : 6 mois en 1992 - P. Wilson, (Université de Denver) 6 mois en 1993.

#### III.2 COLLABORATIONS NATIONALES

Laboratoire de Microscopie Analytique appliquée aux Sciences de la Terre, Université Paris Val de Marne à Créteil  
 Centre des Faibles Radioactivités, Gif

LESA Chambéry Université de Savoie,  
UPR 4211 - Laboratoire de Combustion et  
Systèmes Réactifs - LCRS, «CNRS.LCRS»

### III.3 CONTRATS

#### *Commission des Communautés Européennes*

Composition of polar Atmospheric aerosols (1990-94)  
(F. Dominé Coord.).

Transfer of aerosols and gases to the summit of the  
Greenland ice Sheet. Implications for interpretation of  
ice cores paleo-data (1994-96) (J.M. Jaffrezo Coord.).  
Polar Atmospheric chemistry (1994-93) (M.  
Legrand Coord.).

EUROCORE Follow-up (R. Delmas Coord.)  
Greenland Ice core Project.

Heterogeneous activation of chlorine in relation to  
ozone depletion (1992-93) (F. Dominé Coord.).

#### *CNRS - INSU*

PAMOY : Composition chimique et propriétés

des aerosols atmosphériques polaires: études  
expérimentales.

AVION OZONE : Interaction NOY/glace dans les trai-  
nées de condensation.

PACB Atmosphere Polaire  
PNEDC

#### *Ministère de l'environnement*

PACB Alptrac

Détermination du cycle atmosphérique des  
métaux lourds en Europe par analyse des  
archives glaciaires.

#### *Région Rhône-Alpes*

Interaction gaz traces aerosols dans la destruc-  
tion de l'ozone polaire  
Forage Mont-Blanc

#### *Institut français pour la recherche et la technologie polaires*

Programme atmosphere polaire

## IV ACTIVITES DE FORMATION

L'équipe a encadré plusieurs stagiaires de maîtrise.  
M. Legrand a eu la responsabilité de l'encadrement  
des VAT pour hivernage en Terre Adélie.

#### **DEA**

1990-91 A. Léopold (Paris VI)

1991-92 L. Chaix (Génie des Procédés) - J.  
Savarino (MMGE)

1992-93 P. Wagnon - E. Thibert (MMGE)

1993-94 C. Maréchal - T. Merle d'Aubigné  
(MMGE)

1994-95 D. Voisin - E. Espi - N. Chatagnon - D.  
Kooshmanian (MMGE) - L. Rey (Paris VII)  
I. Xueref (DES Sciences des Matériaux  
et des surfaces)

#### **Encadrement de thèses :**

Candelone J.P., Evolution de la pollution en métaux  
lourds de l'atmosphère de l'hémisphère nord au cours  
des deux derniers siècles retracée dans les neiges du  
Groenland central. Thèse de doctorat de l'Université  
Joseph Fourier. 1994 (direction C. Boutron)

Laj P., Chimie de la neige au site A, Greenland  
Thèse de doctorat Université Joseph Fourier 1992

Leopold A., Contribution à l'Etude de la fonction de  
transfert air-neige pour les gaz acides. (Acides orga-  
niques HNO<sub>3</sub>, HCl) thèse de doctorat et d'Université  
de Paris VI. 1995 (Direction : M. Legrand)

Maupetit F., Chimie de la neige de très haute alti-  
tude dans les Alpes Françaises, Thèse de doct-  
orat Université de Paris VII, 1992 (direction : R.  
Delmas)

Silvente E., Contribution à l'étude de la fonction  
de transfert air-neige en regions polaires, Thèse  
de doctorat de l'Université Joseph Fourier, 1993  
(direction : M. Legrand)

#### **Thèses en cours :**

Ducroz F. : Etude de la chimie de la basse at-  
mosphère à Dumont d'Urville (Antarctique) (direction  
M. Legrand)

Savarino J. : Etude glaciochimique de la neige dépo-  
sée au Groenlad de 1450 à 1780 (direction M.  
Legrand)

Chaix L. : Interaction gaz traces aérosol stratosphé-  
rique - Application à la destruction de l'ozone polai-  
re (direction F. Dominé)

Sungming H. : Etude de la pollution du plomb dans  
l'atmosphère pendant l'empire romain (direction C.  
Boutron)

Thibert E. : Solubilité et diffusion des gaz traces  
dans la glace (direction C. Boutron)

## V PUBLICATIONS

## V.1 REVUES A COMITE DE LECTURE

De Angelis M., and Gaudichet A., Saharan dust deposition over Mont-Blanc (French Alps) during the last 30 years, *Tellus*, **43B**, 61-75, 1991.

De Angelis M., Barkov N.I., and Petrov V.N., Sources of continental dust over Antarctica during the last glacial cycle, *J. Atmos. Chem.*, **14**, 233-244, 1992.

De Angelis M., and Legrand M., Origins and variations of fluoride in Greenland precipitation. *J. Geophys. Res.*, **99**, 1157-1172, 1994.

De Angelis M., and Legrand M., Preliminary investigations of post depositional effects on HCl, HNO<sub>3</sub> and organic acids in polar firn layers, In NATO ASI Series on 'Ice Core Studies of Biogeochemical Cycles', (R. Delmas ed.), 369-390, 1995.

Aristarain A., and Delmas R., Firn core study from the Southern Patagonia Ice cap, South America, *J. of Glaciol.*, **39**, 249-254, 1993.

Boaretto, E., Berkovits, D., Delmas, R.J., Johnson, R.R., Kaufman, A., Magaritz, M., Paul, M., and Pourchet, M., : Measurements of anthropogenic radionuclides in environmental samples. *Nucl. Instr. and Meth. in Physics Res.*, **B92**, 350-356, 1994

Bergin M., Jaffrezo J.L., Davidson C.I., Caldow R., and Dibb J.E., Fluxes of chemical species to the Greenland Ice Sheet at Summit by fog and dry deposition, *Grochim. Cosmochim. Acta*, **58**, 3207-3215, 1994.

Bergin M., Davidson C.I., Jaffrezo J.L., Dibb J.E., Hillamo R., and Kuhns H.D., The contribution of wet, fog, and dry deposition to the summer SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> flux at Summit, Greenland, In NATO ASI Series on 'Ice Core Studies of Biogeochemical Cycles', (R. Delmas ed.), pp 129-146, 1995.

Bergin M., Jaffrezo J.L., Davidson C., Dibb J., Pandis S., Hillamo R., Maenhaut W., Kuhns H., and Makela T., The contributions of snow, fog, and dry deposition to the summer flux of anions and cations at Summit, Greenland, *J. Geophys. Res.*, sous presse.

Bolshov, M.A., Boutron, C.F., Ducroz, F.M., Görlach, U., Kompanetz, O.N., Rudniev, S.N. and Hutch, B., Direct ultratrace determination of cadmium in Antarctic and Greenland snow and ice by laser atomic fluorescence spectrometry. *Anal. Chim. Acta*, **251**, 169-175, 1991.

Bolshov, M.A., Koloshnikov, V.G., Rudniev, S.N., Boutron, C.F., Görlach, U. and Patterson, C.C., Detection of trace amounts of toxic metals in environmental samples by laser-excited atomic fluorescence spectrometry. *J. of Analyt. Atom. Spectros.*, **7**, 99-104, 1992.

Bolshov, M.A., Rudniev, S.N., Candelone, J.P., Boutron, C.F. and Hong, S., Ultratrace determination of Bi in Greenland snow by laser atomic fluorescence spectrometry. *Spectrochimica Acta B*, **49B**, 1994.

Borys R.D., Del Vecchio D., Jaffrezo J.L., Davidson C., and Mitchell D.L., Assessment of ice particle growth processes at Dye 3, Greenland, *Atmos. Environ.*, **27**, 2815-2823, 1993.

Boutron, C.F., Bolshov, M.A., Rudniev, S.N., Hartmann, F.P., Hutch, B. and Barkov, N.I., Direct determination of lead and cadmium down to sub pg/g level in Antarctic and Greenland snow and ice by laser atomic fluorescence spectrometry. *Journal de Physique*, **IV**, vol. 1, C7, 695-698, 1991.

Boutron C.F., U. Görlach, J.P. Candelone, M.A. Bolshov and R.J. Delmas, Decrease in anthropogenic lead, cadmium and zinc in Greenland snows since the late 1960s, *Nature*, **353**, 153-156, 1992.

Boutron C.F., F.M. Ducroz, U. Görlach, J.L. Jaffrezo, C.I. Davidson and M.A. Bolshov, Variations in heavy metals concentrations in fresh Greenland snow from January to July 1989, *Atmos. Environ.*, **27**, 2773-2780, 1993.

Boutron, C.F., Rudniev, S.N., Bolshov, M.A., Koloshnikov, V.G., Patterson, C.C. and Barkov, N.I., Changes in cadmium concentrations in Antarctic ice and snow during the past 155,000 years. *Earth and Plan. Sci. Lett.*, **117**, 431-441, 1993.

Boutron, C.F., Candelone, J.P. and Hong, S., The changing occurrence of natural and man-derived heavy metals in Antarctic and Greenland ancient ice and recent snow, *Intern. J. of Envir. Analyt. Chem.*, **55**, 203-209, 1994.

Boutron, C.F., Candelone, J.P. and Hong S., Past and recent changes in the large scale tropospheric cycles of Pb and other heavy metals as documented in Antarctic and Greenland snow and ice : a review. *Geochim. et Cosmochim. Acta*, **58**, 3217-3225, 1994.

Boutron, C.F., Candelone, J.P. and Hong, S.,

- Greenland snow and ice cores : unique archives of the large scale pollution of the troposphere of the Northern Hemisphere for lead and other heavy metals. *The Science of the Total Environment*, **160**, 233-241, 1995.
- Boutron, C.F., Historical reconstruction of the earth's past atmospheric environment from Greenland and Antarctic snow and ice cores. *Environmental Reviews*, sous presse.
- Candelone, J.P., Bolshov, M.A., Rudniev, S.N., Hong, S. and Boutron, C.F., Determination of Bismuth down to sub pg/g level in Greenland snow by laser excited atomic fluorescence spectrometry. *J. de Physique*, III, vol. 4, C4, 661-664, 1994.
- Candelone, J.P., Hong, S. and Boutron, C.F., An improved method for decontaminating polar snow and ice cores for heavy metals analysis. *Anal. Chim. Acta*, **299**, 9-16, 1994.
- Candelone, J.P., Hong, S., Pellone C. and Boutron, C.F., Post industrial revolution changes in large scale atmospheric pollution of the Northern Hemisphere for heavy metals as documented in central Greenland snow and ice. *J. of Geophys. Res.*, sous presse.
- Candelone, J.P., Bolshov, M.A., Rudniev, S.N., Hong, S. and Boutron C.F., Bismuth in recent snow from central Greenland : preliminary results. *Atmos. Environ.*, sous presse.
- Davidson C.I., J.L. Jaffrezo and P.A. Mayewski, Arctic air pollution as reflected in snowpits and ice cores. In : «*Pollution of the Arctic Atmosphere.*» W Sturges (ed.), Elsevier (pub.), pp 43-95, 1991.
- Davidson C.I., J.L. Jaffrezo, M.J. Small, P.W. Summer, P.M. Olson and R.D. Borys, Trajectory analysis of sources regions influencing the South Greenland Ice Sheet during DGASP, *Atmos. Environ.*, **27**, 2739-2750, 1993.
- Davidson C.I., J.L. Jaffrezo, B. Mosher, J. Dibb, R.D. Borys, B. Bodhaine, C. Boutron, U. Gortlach H. Cachier, J. Ducret, J.L. Colin, N. Z. Heidam, K. Kemp and R. Hillamo, Chemical constituents in the air and snow at Dye 3, Greenland. I : Seasonal variations, *Atmos. Environ.*, **27**, 2709-2722, 1993.
- Davidson C.I., J.L. Jaffrezo, B. Mosher, J. Dibb, R.D. Borys, B. Bodhaine, C. Boutron, U. Gortlach H. Cachier, J. Ducret, J.L. Colin, N.Z. Heidam, K. Kemp and R. Hillamo, Chemical constituents in the air and snow at Dye 3, Greenland. II : Analysis of episodes in April 1989, *Atmos. Environ.*, **27**, 2723-2738, 1993.
- Delmas, R.J., : Polar precipitation chemistry In Proceedings of the Richland Conference « Precipitation Scavenging and Atmosphere-Surface Exchange». (*Hemisphere Publishing Corporation*), pp 1669-1691, 1992
- Delmas R.J., Environmental information from ice cores, *Rev. Geophys.*, **30**, 1-21, 1992a.
- Delmas R.J., Free tropospheric reservoir of natural sulfate, *J. Atmos. Chem.*, **14**, 261-271, 1992b.
- Delmas R.J., S. Kirchner, J. Palais and J.R. Petit, 1000 years of explosive volcanism recorded at the South Pole, *Tellus*, **44**, 335-350, 1992.
- Delmas R.J., A natural artefact in Greenland ice-core CO<sub>2</sub> measurements, *Tellus*, **45B**, 391-396, 1993.
- Delmas R.J., and J.R. Petit, Present Antarctic aerosol composition : A memory of ice age atmospheric dust ?, *Geophys. Res. Lett.*, **21**, 879-882, 1994.
- Delmas R.J., : Ice records of the past environment. *Science of the Total Environ.*, **143**, 17-30, 1994
- Dibb J.E., J.L. Jaffrezo and M. Legrand, Initial findings of recent investigations of air-snow relationships in the Summit region of the Greenland Ice Sheet, *J. Atmos. Chem*, **14**, p 167-180, 1992.
- Dibb J.E. and J.L. Jaffrezo, <sup>7</sup>Be and <sup>210</sup>Pb in aerosol and snow during DGASP, *Atmos. Environ.*, **27**, 2751-2760, 1993.
- Dominé F., E. Thibert, F. Van Landeghem, E. Silvente, and P. Wagnon, Diffusion and solubility of HCl in ice : preliminary results, *Geophys. Res. Lett.*, **21**, 601-604, 1994.
- Dominé F., E. Thibert, E. Silvente, M. Legrand, and J.L. Jaffrezo, Determining past atmospheric HCl mixing ratios from ice core analyses, *J. Atmos. Chem.*, sous presse, 1995.
- Dominé F., and E. Thibert, Relationship between atmospheric composition and snow composition for HCl and HNO<sub>3</sub>, Proceedings of IAHS Symposium : «*Biogeochemistry of seasonally snow-covered catchments*», K. Tonnessen, M. Williams, and M. Tranter, eds., sous presse, 1995.
- Dominé F., E. Thibert et L. Chaix Interactions of gas phase atmospheric acids with ice. In NATO ARW «*Processes of chemical exchange between the atmosphere and polar snow*» E. Wolff, ed., Springer, Berlin (sous presse). 1995
- Freyer H.D., Kobel K., Delmas R.J., Kley D. and Legrand M. First results of <sup>15</sup>N/<sup>14</sup>N ratios in nitrate

from alpine and polar ice cores, *Tellus*, accepté.

Fuhrer K., A. Neftel, M. Anliin, T. Staffelbach, and M. Legrand, A high resolution ammonium ice core record : a complete glacial-interglacial cycle, *J. Geophys. Res.*, sous presse.

Gaudichet A., M. De Angelis, S. Joussaume, J.R. Petit, Y.S. Korotkevich and V.N. Petrov, Comments on the origin of dust in East Antarctica for present and ice age conditions, *J. Atmos. Chem.*, **14**, 129-142, 1992.

Görlach, U. and Boutron, C.F., Changes in heavy metals concentrations in Antarctic snows from 1940 to 1980. *J. of Atmos. Chem.*, **14**, 205-222, 1992.

Greenland Ice Core Project members, dont De Angelis M., Delmas R., Legrand M., Climate instability during the last interglacial period recorded in the GRIP ice core, *Nature*, **364**, 203-207, 1993.

Hillamo R.E., W. Maenhaut, J.L. Jaffrezo, S. Balachandran, C. Davidson and V.M. Kerminen, Size distributions of atmospheric trace elements at Dye 3, Greenland. I : distribution characteristics and dry deposition velocities, *Atmos Environ.*, **27**, 2787-2802, 1993.

Hong, S., Candelone, J.P., Patterson, C.C. and Boutron, C.F., Greenland ice evidence of hemispheric pollution for lead two millennia ago by Greek and Roman civilizations, *Science*, **265**, 1841-1843, 1994.

Jaffrezo J.L., J.E. Dibb and C.I. Davidson, GISP 2 studies of the atmosphere and surface snow at Summit, Greenland, *EOS, Transactions of the AGU*, **72**, 250-251, 1991.

Jaffrezo J.L. and C.I. Davidson, Sulfate in the air, surface snow and snowpits at Dye 3, Greenland. In : *Precipitation Scavenging and Atmosphere-Surface Exchanges*, Schwartz and Slinn (eds), Hemisphere Pub (Wash. DC), pp 1693-1704, 1992.

Jaffrezo J.L. and C.I. Davidson, The Dye 3 Gas and Aerosol sampling Program : an overview, *Atmos. Environ.*, **27**, 2703-2708, 1993.

Jaffrezo J.L., R.E. Hillamo, C.I. Davidson and W. Maenhaut, Size distributions of atmospheric trace elements at Dye 3, Greenland. II : Sources and transport. *Atmos. Environ.*, **27**, 2803-2814, 1993.

Jaffrezo J.L., P. Masclet, S. Beyne, G. Mouvier, H. Wortham and H. Cachier, Transfer function of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons from the atmosphere to the polar ice. I : determination of atmospheric concentrations at Dye 3, Greenland, *Atmos. Environ.*, **27**, 2781-2786, 1993.

Jaffrezo J.L., P.M. Clain and P. Masclet P., Polycyclic aromatic hydrocarbons in surface snow of Central Greenland, *Atmos. Environ.*, **28**, 1139-1145, 1994.

Jaffrezo J.L., J.E. Dibb and R.C. Bales, and A. Neftel, Current status of atmospheric studies at Summit (Greenland) and implications for future research, NATO ARW on 'Ice Core Studies of Biogeochemical Cycles', R. Delmas ed., 435- , 1995.

Jaffrezo J.L., C.I. Davidson, M. Legrand, and J. Dibb, Sulfate and MSA in air and snow on the Greenland Ice Sheet, *J. Geophys. Res.*, **99**, 1241-1253, 1994.

Legrand M., C. Feniet-Saigne, E.S. Saltzman, C. Germain, N.I. Barkov and V.N. Petrov, An ice core record of oceanic emissions of dimethylsulfide during the last climatic cycle, *Nature*, **350**, 144-146, 1991.

Legrand M. and C. Feniet-Saigne, Methanesulfonic acid in south polar snow layers : a record of strong El Nino, *Geophys. Res. Lett.*, **18**, 187-190, 1991.

Legrand M., C. Feniet-Saigne, E.S. Saltzman and C. Germain, Spatial and temporal variations of methane-sulfonic acid and non sea salt sulfate in antarctic ice, *J. Atmos. Chem.*, **14**, 245-260, 1992a.

Legrand M., M. De Angelis, T. Staffelbach, A. Neftel and B. Stauffer, Large perturbations of ammonium and organic acids content in the Summit-Greenland ice core : fingerprint from forest fires ?, *Geophys. Res. Lett.*, **19**, 473-475, 1992b.

Legrand M., C. Feniet-Saigne, E.S. Saltzman and C. Germain, Spatial and temporal variations of methane-sulfonic acid and non sea salt sulfate in Antarctic ice, *J. Atmos. Chem.*, **14**, 245-260, 1992c.

Legrand M., M. De Angelis and F. Maupetit, Field investigation of major and minor ions along Summit (Central Greenland) ice cores by ion chromatography, *J. Chromatogr.*, **640**, 251-258, 1993.

Legrand M., Ice core analysis in arctic and antarctic regions, *NATO ASI series on Tropospheric Chemistry of Ozone in the Polar Regions*, **17**, pp 205-217, 1993.

Legrand M., Ice core chemistry : implications for our past atmosphere, NATO ASI series on Low temperature chemistry of the atmosphere, (G. Moorgat, A. Barnes and G. Lebras eds), **21**, pp 422-445, 1994.

Legrand M., D. Raynaud, J.M. Barnola, and J. Chaellaz, Trends in global distribution of trace gases inferred from polar ice cores, *NATO ASI series on Low temperature chemistry of the atmosphere*, (G. Moorgat, A. Barnes and G. Lebras eds.), **21**, 447-464, 1994.

- Legrand M. and M. De Angelis, Origins and variations of light carboxylic acids in polar precipitations, *J. Geophys. Res.*, **100**, 1445-1462, 1995.
- Legrand M., Sulphur-derived species in polar ice : a review, In NATO ASI on 'Ice Core Studies of Biogeochemical Cycles', (R. Delmas ed.), pp 99-128, 1995.
- Legrand M. , Atmospheric chemistry changes versus past climate inferred from polar ice cores, In *Dahlem Konferenzen on Aerosol forcing of climate*, (R. Charlson and J. Heintzenberg eds.), pp 123-151, 1995.
- Legrand M. , M. De Angelis, H. Cachier, and A. Gaudichet, Boreal biomass burning over the last 80 years recorded in a Summit-Greenland ice core, In NATO ASI Series on 'Ice Core Studies of Biogeochemical Cycles', (R. Delmas ed.) Vol 30, pp 355-368, 1995.
- Li S.M, R.W. Talbot, L.A. Barrie, R.C. Harris, C.I. Davidson and J.L. Jaffrezo, Seasonal and geographic variations of methanesulfonic acid in the Arctic troposphere, *Atmos. Environ.*, **27**, 3011-3024, 1993.
- Lobinski, R., Boutron, C.F., Candelone, J.P., Hong S. , Szpunar-Lobinska, J. and Adams, F., Speciation analysis of organolead compounds in Greenland snow at the femtogram-per-gram level by capillary gas chromatography /atomic emission spectrometry. *Analyt. Chem.*, **65**, 2510-2515, 1993.
- Lobinski, R., Boutron, C.F., Candelone, J.P., Hong, S., Szpunar-Lobinska, J. and Adams, F. C., Present century snow core record of organolead pollution in Greenland. *Environmental Science and Technology*, **28**, 1467-1471, 1994.
- Lokinski, R., Witte C., Adams F.C., Teissédre, P.L., Cabanis, J.C. and Boutron, C.F., Organolead in wine. *Nature*, **370**, 24, 1994.
- Lobinski, R., Boutron, C.F., Candelone, J.P., Hong, S., Szpunar-Lobinska, J. and Adams, F. C., Northern Hemispheric organic lead emissions in fresh Greenland snow. *Environmental Science and Technology*, **28**, 1459-1466, 1994.
- Martinerie P. , G. Brasseur and C. Granier, The chemical composition of ancient atmospheres : a model study using ice core data, *J. Geophys. Res.*, sous presse.
- Maupetit F. , and R. Delmas, Chemical composition of falling snow at Dumont D'Urville, Antarctica, *J. Atmos. Chem.*, **14**, 31-42, 1992.
- Maupetit F. , and R. Delmas, Carboxylic acids in high elevation alpine glacier snow, *J. Geophys. Res.*, **99**, 16491-16500, 1994.
- Maupetit F. , and R. Delmas, Snow chemistry of high altitude glaciers in the French Alps, *Tellus*, **46**, 304-324, 1994.
- Maupetit F. , D. Wagenbach, P. Weddeling, and R. Delmas, Seasonal fluxes of major ions to a high altitude cold alpine glacier, *Atmos. Environ.*, **29**, 1-9, 1995.
- Mayewski P., L.D. Meeker, M.C. Morrison, M.S. Twickler, S.I. Whitlow, K.K. Ferland, D.A. Meese, M. Legrand, and J.P. Steffensen. Greenland ice core «signal» characteristics : An expanded view of climate change, *J. Geophys. Res.*, **98**, 12,839-12,847, 1993.
- Moore J., E. Wolff, H. Clausen, C. Hammer, M. Legrand, and K. Fuhrer, Electrical response of the Summit Greenland ice core to ammonium, sulphuric acid, and hydrochloric acid, *Geophys. Res. Lett.*, **21**, 565-568, 1994.
- Mosher B.W. , P. Winkler and J.L. Jaffrezo, Seasonal trends in aerosol chemistry at Dye 3, Greenland, *Atmos. Environ.*, **27**, 2761-2772, 1993.
- Palais J. , S. Kirchner, and R. Delmas, Identification of some global volcanic horizons by major element analysis of fine ash in Antarctic ice, *Ann. of Glaciol.*, **14**, 216-220, 1991.
- Raynaud D. , J. Jouzel, J-M. Barnola, J. Chaellaz, R.J. Delmas, and C. Lorius, The ice record of greenhouse gases, *Science*, **259**, 926-934, 1993.
- Raynaud D., Jouzel J., Barnola J.M., Chaellaz J., Delmas R.J., Lorius C. and Schwander J. : Gravitational separation in polar firn, *Science*, correspondence, **262**, 764. 1993
- Rosman K.J.R., Chisholm, W., Boutron, C.F., Candelone, J.P. and Görlach, U., Isotopic evidence for the source of lead in Greenland snows since the late 1960's. *Nature*, **362**, 333-335, 1993.
- Rosman K.J.R., Chisholm, W., Boutron, C.F., Candelone, J.P. and Hong, S., Isotopic evidence to account for changes in the concentrations of lead in Greenland snow between 1960 and 1988. *Geochim. et Cosmochim. Acta*, **58**, 3265-3269, 1994.
- Rosman K.J.R., Chisholm, W., Boutron, C.F., Candelone, J.P. and Patterson, C.C., Isotopic evidence for anthropogenic lead in Antarctica. *Geophys. Res. Lett.*, **21**, 2669-2672, 1994.
- Savarino, J., Boutron, C.F. and Jaffrezo, J.L., Short-term variations of Pb, Cd, Zn and Cu in recent



Greenland snow. *Atmos. Environ.*, **28A**, 1731-1737, 1994.

Silvente E. and M. Legrand, Ammonium-to-sulphate ratio in aerosol and snow of Greenland and Antarctica regions, *Geophys. Res. Lett.*, **20**, 687-690, 1993.

Silvente E. and M. Legrand, Preliminary investigations of air - snow relationship of HNO<sub>3</sub> in polar regions. In NATO ASI Series on 'Ice Core Studies of Biogeochemical Cycles', R. Delmas ed., pp 233-248, 1995.

Vandal G.M., Fitzgerald, W.F., Boutron, C.F. and Candelone, J.P., Variations in mercury deposition to Antarctica over the past 34,000 years. *Nature*, **362**, pp 621-623, 1993.

## V.2 AUTRES PUBLICATIONS

Barrie L. and Delmas R.J. : Polar atmosphere and snow chemistry, in: *Global Atmospheric-Biospheric Chemistry, Environmental Science Research*, **48**, 149-164. 1994

Bolshov M.A., Boutron C.F. Determination of heavy metals in polar snow and ice by laser-excited atomic fluorescence spectrometry. *Analisis Magazine*, **22**, (7), 44-46. 1994.

Boutron C.F. Antarctic- Arctic. *Analisis Magazine*, **22**(7). 20. 1994

Candelone J.P., Evolution de la pollution en métaux lourds de l'atmosphère de l'hémisphère nord au cours des deux derniers siècles retracée dans les neiges du Groenland central. *Thèse de doctorat de l'Université Joseph Fourier*. 193 p.1994

Hong S., Candelone J.P. Boutron C.F.. Greenland Ice history of the pollution of the atmosphere of the northern hemisphere for lead during the last three millenia. *Analisis Magazine* **22** (7) pp 38-40. 1994

Laj P., *Chimie de la neige au site A, Greenland*

*Thèse de doctorat Université Joseph Fourier*, **227** p. 1992

Legrand M. and Delmas R.J., : Ice core chemistry: implications for the past atmosphere in: *Topics in Atmospheric and Interstellar Physics and Chemistry*, (C F. Boutron Ed.), Les Editions de Physique, Les Ulis, 387-410 p. 1994

Leopold A., Contribution à l'Etude de la fonction de transfert air-neige pour les gaz acides. (Acides organiques HNO<sub>3</sub>, HCl) thèse de doctorat et d'Université de Paris VI. 170 p. 1995

Maupetit F., Chimie de la neige de très haute altitude dans les Alpes Françaises, Thèse de doctorat Université de Paris VII, pp 246. 1992

Silvente E., Contribution à l'étude de la fonction de transfert air-neige en régions polaires, *Thèse de doctorat de l'Université Joseph Fourier*, **157** p. 1993

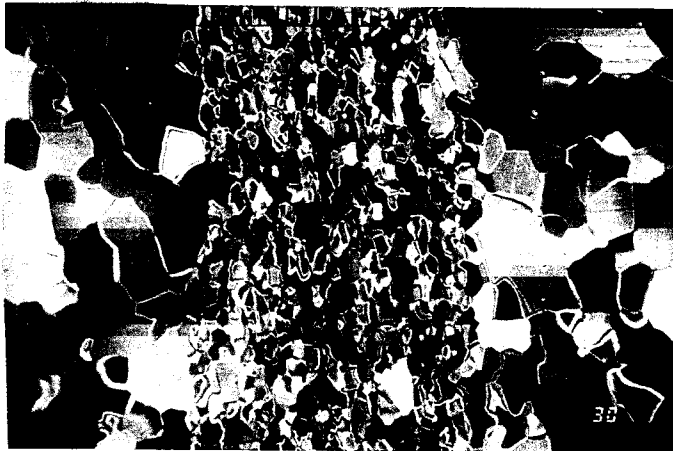
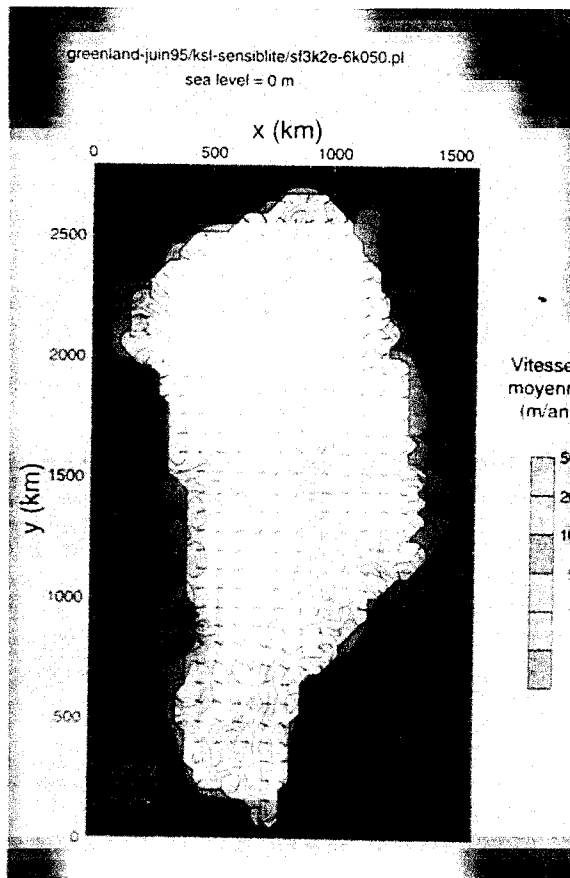
Weddeling, P., Geis, K., Wagenbach, D., Maupetit, F., Delmas, R.J., : Recent chemical and isotopic properties of high altitude Alpine glaciers. In : *Proc. EUROTRAC Symposium 92*, SPB Academic Publishing bv, The Hague, (P. Borrell, T. Cvitas, W. Seiler eds). pp 674. 1992

Whelpdale D.M., Summers P.W., Sanhueza E. et 11 auteurs, dont Delmas R.J., A Global overview of acid deposition, chapitre 13 du livre «*Acid Deposition Assessment*», (WMO, J.Galloway Ed.) sous presse.

## V.3 LIVRES

Delmas R.J., : J. of Atmospheric Chemistry, *The Chemistry of the Global atmosphere*, volume 14 Nos 1-6 pp 534 1992

Delmas R.J. Ed, , : Ice core studies of Global Biogeochemical Cycles, NATO ASI Series., *Springer Verlag*, pp 475 1995



### Chapitre 3

## RHEOLOGIE DES GLACES ET MODELISATION DES CALOTTES POLAIRES

**EQUIPE RHEOLOGIE DES GLACES**

Responsable : Paul DUVAL

**COMPOSITION DE L'EQUIPE :**

	RHEOLOGIE DES GLACES POLAIRES (1)	MODELISATION DES CALOTTES POLAIRES (2)
Chercheurs	P. DUVAL (DR2) J. MEYSSONNIER (CR1)	C. RITZ (CR1)
Enseignants chercheurs	A. PHILIP-DUBAN (MC2)	A. LETREGUILLY (MC2)
Ingénieurs chercheurs		
Doctorants	O. CASTELNAU O. PLE L. ARNAUD B. FIORIO	A. FABRE E. LE MEUR A. MANGENEY V. ROMMELAERE
DEA	P. MANSUY	
Autres chercheurs	A. SALAMATIN H. MILSCH	
ITA	O. BRISSAUD (1/3)	

**PRINCIPAUX AXES DE RECHERCHE :**

- . Rhéologie des glaces polaires
- . Densification du névé polaire et modélisation de la transformation névé/glace
- . Comportement de la glace aux vitesses de déformation élevées
- . Modélisation des calottes polaires

**PRINCIPAUX CONTRATS :**

CNRS - Département SPI (1)  
 Commission des Communautés Européennes (1, 2)  
 EISMINT (ESF) (2)  
 PNEDC (1, 2)  
 Université Joseph Fourier (BQR) (1)

**PUBLICATIONS :**

Types de publication	fin 1991	1992	1993	1994	1995 partiel
Revue à Comités de lecture	2	2	3	5	6
Symposiums		1	1	5	3
Thèses		1	1	1	
Autres		3			

## I - OBJECTIFS GENERAUX

Les recherches menées dans le cadre européen sur la modélisation des calottes polaires s'intègrent dans les programmes d'étude du système climatique. La mise en oeuvre de l'European Ice Sheet Modelling Initiative (EIS-MINT), programme de l'ESF depuis 1993 a permis de définir les études prioritaires à développer pour valider les modèles d'écoulement. L'équipe «Rhéologie des glaces et modélisation des calottes polaires» a contribué efficacement à l'amélioration des modèles 3-D de calottes polaires et a réussi à convaincre cette communauté de la nécessité d'une meilleure prise en compte de la rhéologie des glaces polaires.

En étroite collaboration avec le groupe «Traces gazeuses», l'équipe développe actuellement des études pour préciser la fonction de trans-

fert des gaz du névé à la glace. Ces recherches s'appuient sur les résultats de la modélisation de la densification des céramiques et sur les techniques actuellement utilisées pour caractériser la structure des milieux poreux.

Les recherches menées sur l'étude du comportement de la glace aux vitesses de déformation élevées visent la modélisation des interactions glaces-structures. Les calculs d'ouvrages sont le plus souvent réalisés en considérant la glace comme un matériau fragile. Le groupe «Rhéologie des glaces» s'est fixé comme première priorité la modélisation de l'endommagement de la glace dans une gamme de vitesses centrée sur la transition ductile-fragile. Les résultats les plus remarquables concernent la microfissuration en deça du pic de contrainte de glaces granulaires et colonnaires.

## II - RESULTATS MAJEURS OBTENUS AU COURS DES QUATRE DERNIERES ANNEES

### II.1 RHEOLOGIE DES GLACES POLAIRES

#### *II.1.1 Modélisation du comportement mécanique du polycristal de glace par une approche auto-cohérente* (O.Castelnaud, H. Milsch, P. Duval)

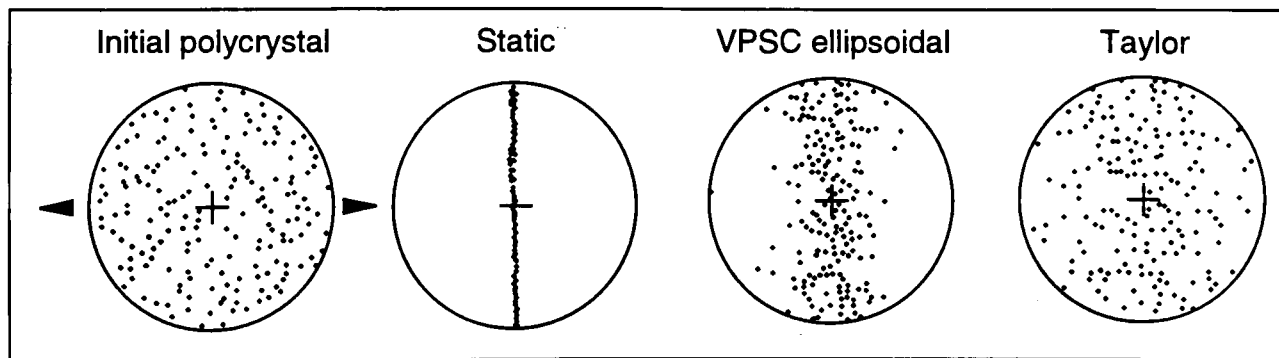
Les observations faites sur les carottes profondes de l'Antarctique et du Groenland ont montré que les glaces présentent une forte anisotropie reliée directement à l'orientation préférentielle des cristaux. De telles variations directionnelles dans la réponse visqueuse de ces glaces concernent la plus grande partie des calottes polaires. Pour caractériser cette anisotropie, des essais mécaniques ont été réalisés en compression uniaxiale et en torsion sur des glaces de la carotte de GRIP, de Vostok, D 47, et Law Dome. L'écoulement d'une calotte polaire prédit par les modèles conventionnels basés sur une loi visqueuse non-linéaire d'une glace isotrope peut être très loin de la réalité.

L'effort placé sur la modélisation du polycristal de glace a largement bénéficié de notre bonne connaissance des modes de déformation du

monocristal et du polycristal, des processus de recristallisation dynamique et des mécanismes d'évolution des fabriques dans les glaces polaires. Nous disposons actuellement d'un modèle de polycristal basé sur une méthode d'homogénéisation de type auto-cohérente viscoplastique anisotrope. Le modèle développé par Lebensohn et Tomé prend en compte explicitement l'anisotropie viscoplastique du monocristal ainsi que celle de la matrice. La résistance de chaque système de glissement est déterminée à partir des données de fluage de monocristaux et polycristaux isotropes. Ce travail a donc pu se réaliser grâce à la collaboration avec G. Canova (GPM2, INPG) et R. Lebensohn (Un. de Rosario, Argentine).

#### **II.1.1.1 Simulation de l'évolution des textures des glaces polaires et comportement mécanique des glaces anisotropes**

Les résultats du modèle auto-cohérent sur la rhéologie et l'évolution des fabriques avec la déformation ont été comparés à ceux obtenus à partir d'hypothèses extrêmes (contraintes ou déformations homogènes dans le polycristal). Les textures simulées sont qualitativement simi-



**Figure 3.1 :**

Diagrammes montrant l'orientation des cristaux d'une glace déformée en traction. La simulation a été faite avec les modèles : statique (contraintes uniformes), Taylor (déformation homogène) et auto-cohérent (VPSC) pour une déformation équivalente de 0,4. Cette orientation préférentielle se développe par rotation des cristaux sous l'effet du glissement intracristallin. Seul le modèle autocohérent peut reproduire à la fois les textures et le comportement mécanique des glaces polaires ( cf article soumis au journal of Geophysical Research).

lares pour tous les modèles. Mais, de grandes différences sont trouvées dans la vitesse de développement de ces textures. A l'opposé des modèles extrêmes (contraintes ou déformations uniformes dans le polycrystal), le modèle auto-cohérent prédit le comportement de la glace isotrope à l'échelle macroscopique et microscopique. Il simule bien le comportement (et l'évolution de celui-ci avec la déformation) en compression et en cisaillement simple des glaces polaires anisotropes. Ce travail constitue une première étape décisive sur le comportement rhéologique et l'évolution des textures des glaces polaires (Castelnaud *et al.*, soumis à *J. of Geophysical Res.*). L'étape suivante consistera à prendre en compte la recristallisation dans la modélisation du polycrystal. L'introduction dans l'équation d'interaction grain/matrice d'un paramètre permet de passer de façon continue d'une approximation de type borne inférieure (contraintes homogènes) à une approximation de type borne supérieure (déformations homogènes). Il sera ainsi possible de prendre en compte l'accommodation du glissement basal par la migration des joints de grains.

### II.1.1.2 Recristallisation dynamique des glaces polaires

Cette étude des processus de recristallisation s'est développée avec l'objectif de préciser le rôle de la migration des joints de grains dans le comportement mécanique et l'évolution des fabriques des glaces polaires. Deux régimes de recristallisation, auxquels sont associées des vitesses de migration des joints de grains très différentes, sont observés; la température étant le paramètre prépondérant pour leur initiation. Pour les températures les plus basses, la migra-

tion des joints de grains accomode le glissement intracristallin; mais les fabriques résultent de la rotation des cristaux par le glissement intracristallin. Dans la couche basale des calottes polaires, pour des températures supérieures à  $-10^{\circ}\text{C}$ , la recristallisation est à l'origine de fabriques dites de recristallisation; celles-ci étant alors contrôlées par l'état de contrainte et non par la déformation.

### II.1.2 Densification du névé polaire (L. Arnaud, J.M. Barnola, P. Duval)

Les approches empiriques ont permis de simuler la densification du névé polaire. Mais, elles ne peuvent être utilisées pour décrire le passage d'un milieu à pores ouverts à un milieu à pores fermés et sont donc inappropriées à la détermination de l'âge de la glace au moment de la fermeture des pores. En outre, les données sur le névé polaire ont permis de mettre en évidence d'importantes variations de la densité à la fermeture des pores. La température du site semble le paramètre le plus significatif. L'utilisation de la teneur en air des glaces polaires comme indicateur des variations de la pression atmosphérique au moment de la fermeture des pores i.e. comme paleo-altimètre est directement liée à la qualité de la modélisation des mécanismes de densification et du passage porosité ouverte/porosité fermée.

Un modèle développé pour simuler la densification des céramiques a été adapté au névé. Il prend en compte les caractéristiques topologiques du névé et le grossissement des grains. L'étude fait apparaître l'importance de la nature de l'arrangement des grains au moment où se met en place la densification par déformation

plastique des grains. Grâce à la qualité des données obtenues depuis quelques années au Groenland et en Antarctique, cette étude a abouti à la validation la plus convaincante du modèle de densification des céramiques proposé par Arzt et al. (1985).

S'agissant de la fermeture des pores, les données obtenues par J. M. Barnola sur l'évolution de la porosité fermée sur les sites de Vostok, Summit et DE08 peuvent être reproduites par une modélisation basée sur un modèle géométrique du névé. La variation de la densité à la fermeture des pores avec la température du site serait directement liée à la structure des pores ; celle-ci étant imposée par les processus de frittage à la surface des calottes polaires. La compréhension de ces mécanismes est une clé incontournable pour simuler les processus de fermeture des pores pour des conditions climatiques glaciaires et interglaciaires. La caractérisation morphologique du névé par traitement d'images est devenue une priorité pour valider cette modélisation de la fermeture des pores.

### **II.1.3 Les cristaux d'hydrates d'air dans les glaces polaires**

(L. Arnaud, P. Duval)

Les bulles d'air qui se forment lorsque le névé se transforme en glace disparaissent progressivement entre 500 et 1200m. de profondeur à la station Vostok pour former des cristaux d'hydrates d'air. Il s'agit de cristaux de structure cubique composés de deux types de cages (hexadécaèdres et dodécaèdres). Les cages sont constituées de molécules d'eau et enferment les molécules d'air.

L'étude de la croissance de ces clathrates, de la dynamique moléculaire des cages et de la stabilité de ces hydrates d'air durant le stockage des carottes s'est développée dans le cadre d'une collaboration entre l'Institut de Recherche Arctique et Antarctique de St. Petersburg, le département de Physique de l'Université d'Hokkaido et le LGGE (accord de coopération CNRS/JSPS depuis 1992). Ce programme de recherche s'intègre clairement dans le cadre des recherches menées sur la compréhension des interactions gaz/climat.

L'évolution du nombre de clathrates le long de la carotte de Vostok montre des variations parfaitement en phase avec les transitions climatiques et une croissance de ces cristaux par coalescence après leur formation. Les études se sont d'abord centrées sur les mécanismes de nucléation de ces cristaux pour expliquer l'exceptionnelle largeur de la zone de transition, délimitée par la profondeur à laquelle les premiers clathrates se forment et la

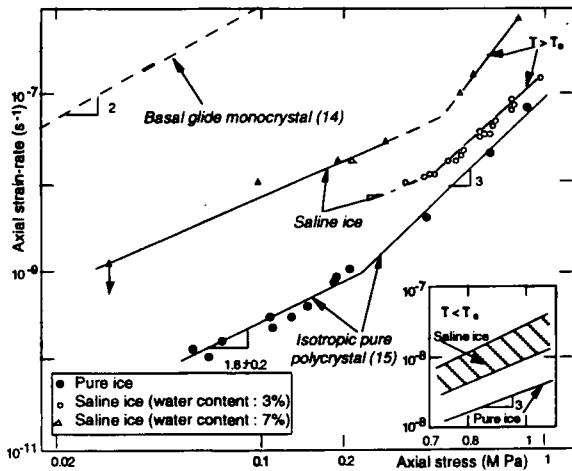
profondeur à laquelle les dernières bulles sont observées (700 m. à Vostok). Le rôle de l'énergie de surface air/glace est prépondérant par rapport aux paramètres «pression/température» qui contrôlent la stabilité des hydrates; les petites bulles sont les premières à se transformer en clathrates. En outre, il est important de déterminer la composition des gaz dans ces clathrates. Les premières analyses par spectroscopie RAMAN dans chaque cristal montrent des rapports  $N_2/O_2$  très différents de ceux de l'atmosphère, même si la composition atmosphérique est retrouvée statistiquement (cette technique est utilisée en France par le Laboratoire de physico-chimie des matériaux luminescents de l'Université Claude Bernard de Lyon, avec lequel nous collaborons depuis 1994). Cette étude sur la formation des clathrates a déjà permis de démontrer que les molécules d'air diffusent dans le réseau de la glace. L'implication de la diffusion dans la reconstitution des variations rapides des gaz dans l'atmosphère doit être analysée.

### **II.1.4 Rôle des joints liquides dans le comportement mécanique en fluage de la glace**

(S. de La Chapelle, P. Duval)

L'étude du comportement mécanique des matériaux cristallins à joints liquides est d'un grand intérêt pour le frittage et la mise en forme des métaux, la déformation du manteau supérieur et le fluage des glaciers tempérés. La glace se prête bien à cette analyse du rôle des joints liquides dans le comportement mécanique. La teneur en eau des glaces des glaciers tempérés est typiquement de l'ordre de 1%. L'eau ne recouvre que partiellement les joints de grains; elle est localisée aux jonctions de trois ou quatre grains. Pour déterminer plus quantitativement le rôle de la phase liquide dans le comportement en fluage de la glace, des glaces polycristallines, dont les joints de grains ont été dopés avec du sel (NaCl), ont été fabriquées. Des essais mécaniques ont pu être réalisés sur ces glaces avec une teneur en eau proche de 7%.

La phase liquide exerce une influence importante sur le comportement mécanique de la glace (Fig. 3.2). La vitesse de déformation pour les glaces contenant 7% d'eau est de plus d'un ordre de grandeur supérieure à celle d'une glace pure testée sous la même contrainte. Mais ce large effet ne peut être lié aux mouillages des joints de grains; l'eau est toujours localisée aux jonctions de plus de trois grains. D'autre part, le comportement non-linéaire est incompatible avec le glissement aux joints de grains. La phase liquide doit plutôt atténuer le champ de contraintes internes qui résulte de l'incompatibilité de déformation des grains différemment orientés pour le glissement basal. Le



**Figure 3.2 :**  
Influence de la teneur en eau sur le fluage de la glace

Vitesse du fluage minimum en fonction de la contrainte pour des glaces pures et salées à  $-13^{\circ}\text{C}$ . Les données sur le fluage des monocristaux sont données pour comparaison.

L'encadré montre le rôle des sels en dessous de la température eutectique ; l'hydrate  $\text{NaCl} \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ , solide à  $-24^{\circ}\text{C}$  et localisé aux joints de grains, relaxe les contraintes internes qui se développent au cours du fluage transitoire du fait de la forte anisotropie plastique du monocristal. (Cf *Scripta Met. et Materialia*, 1995)

comportement du polycristal se rapproche, (comme pour les glaces polaires dont les fabriques sont favorables au glissement basal), de celui du monocristal orienté pour le glissement basal. Cette étude s'est développée avec la collaboration de B. Baudelet du Laboratoire GPM2 (INPG).

## II.2 COMPORTEMENT DE LA GLACE AUX VITESSES DE DEFORMATION ELEVEES

L'étude du comportement fragile et ductile/fragile (vitesses supérieures à  $10^{-4}\text{s}^{-1}$ ) vise à comprendre et modéliser les processus de microfissuration conduisant à la formation de glace broyée au contact d'une structure puis à son extrusion, en vue de l'application au problème de l'interaction glace-structure (cas des glaces dérivantes en interaction avec des structures à la mer).

### II.2.1 Fluage transitoire de la glace (A. Goubert, J. Meyssonier)

L'étude de l'endommagement de la glace nécessite d'améliorer la modélisation du comportement transitoire entre le comportement purement élastique observé à la mise en charge ou dans le domaine fragile (vitesses de l'ordre de  $10^{-1}\text{s}^{-1}$ ),

et le fluage «permanent» observé sous charge constante, et décrit par la loi de Norton-Hoff (parfaitement adaptée pour la modélisation des écoulements lents de glaciers). En effet, dans la zone de transition ductile-fragile, aux vitesses de déformation de l'ordre de  $10^{-4}\text{s}^{-1}$ , le fluage de la glace joue un rôle non négligeable. Ainsi la déformation purement élastique compte pour moins de 50% de la déformation mesurée à l'apparition de la première micro-fissure en compression uniaxiale. Pour des contraintes supérieures à 0.04 MPa, le fluage du polycristal de glace résulte du mouvement des dislocations dans chaque grain. L'énorme anisotropie plastique du monocristal est la cause d'incompatibilités de déformation entre les grains qui ont pour conséquence la création d'un champ de contraintes internes qui se développe au cours du chargement du matériau. Sous l'action de ces très fortes contraintes locales (à l'échelle du grain) d'autres mécanismes que le glissement basal peuvent être activés et permettre 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.

Le manque de données utilisables pour tester les modèles de comportement transitoire existants, nous a conduits à entreprendre un travail expérimental limité à des essais de compression uniaxiale sur de la glace équiaxe (glace à grains arrondis, telle la glace de glacier), macroscopiquement isotrope. Ce travail a permis de mettre en évidence les difficultés à surmonter pour réduire la dispersion des mesures de déformation et obtenir des données expérimentales fiables. Les principaux résultats sont les suivants :

- la déformation recouvrée après décharge est nettement supérieure à la déformation purement élastique correspondante (facteur 7 à 9).
- cette partie recouvrable ne constitue que 30 à 50 % de la déformation transitoire.
- au cours de cycles de chargement-déchargement, la partie irréversible de la déformation transitoire est acquise essentiellement au cours de la première mise en charge, puis augmente légèrement au cours des cycles suivants; la déformation recouvrée reste constante.
- les essais de charge-décharge et de décharge partielle, indiquent que la déformation recouvrée est fonction quadratique du décrement de contrainte appliqué.

Le fait que les modèles existants sont mal adaptés pour représenter les résultats expérimentaux a été confirmé. Différents modèles à

variables internes décrivant l'écroissage du matériau ont été construits et testés. Un modèle simple, séparant la déformation viscoplastique en deux composantes qui rendent compte séparément des écroissages cinématique et isotrope, a été proposé (Meyssonier et Goubert, 1993).

### II.2.2 Endommagement

Le comportement de la glace en compression dépend de sa vitesse de déformation, de sa structure cristallographique et de la température. Aux faibles vitesses de déformation (de l'ordre de  $10^{-6} \text{ s}^{-1}$  à  $-10^\circ\text{C}$ ) le comportement est ductile. Pour des vitesses de déformation plus élevées, une micro-fissuration (à l'échelle du grain) apparaît. A des vitesses de l'ordre de  $10^{-5}$  à  $10^{-4} \text{ s}^{-1}$ , à  $-10^\circ\text{C}$ , la courbe contrainte-déformation présente un pic marqué, puis la contrainte se stabilise, le matériau gardant sa cohésion. Pour des vitesses plus élevées, les micro-fissures interagissent et conduisent à la rupture fragile. La compréhension des processus de micro-fissuration dans la glace, faisant intervenir les anisotropies élastique et plastique des grains, est nécessaire à l'établissement de modèles de comportement réalistes. Les thèmes abordés sont les suivants:

- (i) détermination des mécanismes de germination des microfissures en compression
- (ii) évolution de l'endommagement en cours de fluage, à partir d'une étude statistique de la population de fissures (nombre, croissance, interactions réciproques, coalescence,...)
- (iii) couplage comportement/endommagement ; et plus spécifiquement, comportement du matériau endommagé.

Pour l'essentiel, le domaine de vitesses de déformation étudié est celui des vitesses intermédiaires, correspondant à la transition ductile/fragile ( $10^{-7} \text{ s}^{-1}$  -  $10^{-4} \text{ s}^{-1}$ ). Toutefois, une collaboration est poursuivie avec l'équipe du Pr. Schulson de l'Ice Research Laboratory (Darmouth College, USA) sur le thème de l'endommagement et la rupture fragile de la glace aux fortes vitesses de déformation ( $10^{-3} \text{ s}^{-1}$ ).

#### II.2.2.1 Endommagement de la glace colonnaire

(O. Plé, Ph. Mansuy, J. Meyssonier)

Jusqu'à maintenant, les études entreprises au LGGE sur ce thème ont concerné le comportement macroscopique de la glace équiaxe isotrope. Les observations possibles étaient restreintes à celle de l'apparition des premières fissures sous compression, et du champ de fissures obtenu en fin d'essai à partir de lames découpées dans l'éprouvette. Plus récemment, nous avons entrepris une étude plus «microscopique», basée sur

une observation, en cours d'essai, de la microfissuration de chaque grain d'un polycristal de glace colonnaire. Cette glace est obtenue en faisant croître un semis de grains (d'orientation aléatoire au départ) dans un gradient de température vertical. Au cours de la croissance, seuls les grains dont les plans de base sont parallèles au gradient thermique ont tendance à subsister. Il en résulte un polycristal dont les grains sont des colonnes alignées selon la verticale, qui peuvent atteindre plusieurs dizaines de cm de longueur et présentent une orientation de leurs axes optiques aléatoire dans le plan horizontal (Photo a).

L'intérêt de ce type de glace est double :

- du point de vue expérimental, un échantillon comprimé perpendiculairement à l'axe des colonnes présente des fissures, intra et/ou inter-granulaires qui le traversent de part en part, et sont donc facilement repérables (moyennant un éclairage approprié).
- du point de vue théorique, la modélisation du comportement en compression dans le plan perpendiculaire à l'axe des colonnes, est facilitée par l'orthotropie de révolution du matériau (avant et pendant son endommagement).

Le but de cette étude est de visualiser des essais de compression uniaxiale afin de suivre l'évolution de la population de micro-fissures au cours du temps, et de relier, si possible, l'occurrence d'une microfissure à l'orientation cristallographique du grain (fissure intra-granulaire) ou du joint de grain (fissure inter-granulaire) et aux orientations cristallographiques des grains avoisinants. De tels résultats devraient être très utiles pour le contrôle de modèles de nucléation de fissures, et d'évolution de l'endommagement.

Pour la période concernée par ce rapport, nous avons mis au point un dispositif et un processus de fabrication de glace colonnaire artificielle qui approche au mieux la condition d'orthotropie de révolution (i.e: obtention de colonnes quasi cylindriques sur une hauteur de 5 à 10 cm correspondant à l'épaisseur des échantillons à tester, photo b). Un dispositif simple d'application de charge constante s'adaptant dans le bâti de notre presse de 50 T (asservie seulement en vitesse de déplacement actuellement) a été monté et testé. Des essais préliminaires de fluage en compression uniaxiale ont été effectués afin de mettre au point la méthode de visualisation des essais.

Les résultats obtenus montrent que la vitesse de déformation croît avec le temps (contrairement au comportement d'une glace non endomma-



gée) pour se stabiliser à un niveau de l'ordre de 100 fois supérieur à la vitesse de déformation minimum attendue pour la glace isotrope non fissurée, ce, sous un chargement de 1 MPa à 10°C après 1 heure de mise en charge et pour une déformation supérieure à  $10^{-2}$ . Le temps nécessaire à la formation des premières fissures (dans le tiers central de l'éprouvette) varie entre 10 et 100 minutes (Fig. 3.3.c). Ces microfissures ont une orientation très variable (pas forcément dans la direction de compression), une taille comparable à celle des grains (10mm) et apparaissent à la jonction de 3 grains. La vitesse de déformation maximale correspond à une densité de fissures maximale. La densité de fissures intra-granulaires augmente avec la vitesse de déformation.

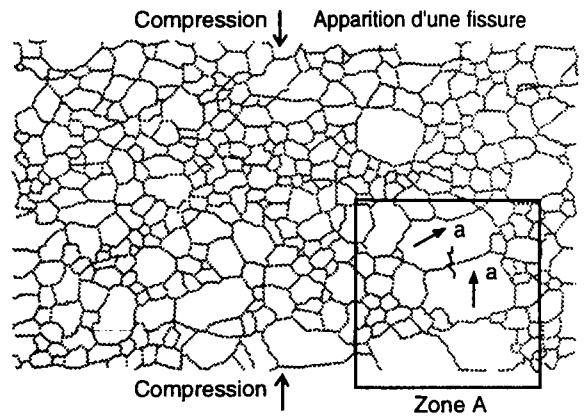
Une étude numérique (éléments finis 2D) a été entreprise, dans le cadre d'un stage de DEA (Ph. Mansuy), pour simuler des chargements dans un plan perpendiculaire aux colonnes et en supposant un comportement purement élastique.



Photo a



Photo b



**Figure 3.3 :**  
**Glace Columnaire**

Lames minces taillées parallèlement à l'axe des colonnes.

a) glace fabriquée selon le procédé usuel à partir d'un germe constitué de grains de neige. La sélection naturelle des grains bien orientés pour la croissance conduit à des colonnes très irrégulières.

b) glace modèle fabriquée à partir d'un germe confectionné en accolant des fragments de monocristaux d'orientation cristallographique contrôlée (axes c perpendiculaires au gradient thermique).

c) l'analyse des images du film vidéo d'un essai de fluage en compression uniaxiale (perpendiculaire à l'axe des colonnes) permet d'observer la micro-fissuration. (zone A)

### II..2.2.2 Endommagement en fluage de la glace granulaire équiaxe

(J. Weiss,)

A la différence de la glace columnaire, La glace granulaire, assemblage de grains équiaxes et d'orientation cristallographique aléatoire, présente, un comportement mécanique macroscopique isotrope. L'étude de ce type de glace est très complémentaire de celui de la glace columnaire : si la visualisation en temps réel de l'endommagement est impossible, rendant plus difficile à déterminer les relations microstructure /endommagement, le nombre élevé de grains permet une approche statistique des mécanismes d'endommagement. Ce matériau est également un excellent modèle pour de nombreux matériaux comme les roches ou les céramiques.

Cette étude se situe dans la continuité des travaux réalisés au cours de la thèse de P. Kalifa (cf. rapport d'activité du LGGE 1987/1991), mais les essais réalisés sont des essais de fluage avec des vitesses de déformation correspondantes un peu plus faibles. La détection des signaux acoustiques liés à la formation des microfissures (sans possibilité actuellement de localiser les sources) permet de suivre l'évolution de l'endommage-

ment au cours du fluage. L'analyse statistique de l'endommagement, ainsi que l'évolution de la micro-structure (recristallisation) est réalisée à partir de lames minces par analyse d'images.

Des premières séries d'essais interrompus, il ressort principalement que sous faible contrainte, de nombreuses microfissures apparaissent au cours du fluage primaire, puis le taux de microfissuration décroît pour s'annuler presque complètement lors du fluage secondaire et tertiaire. Le mécanisme de relaxation des contraintes internes prédominant au cours du fluage tertiaire est la recristallisation dynamique.

L'analyse quantitative des populations de microfissures, sur lames minces d'essais interrompus, montre que les microfissures, une fois germées, ne se propagent pas, contrairement à ce qui est observé dans le domaine fragile. Bien au contraire, les plus petites d'entre-elles cicatrisent au cours du fluage secondaire et tertiaire.

A ce niveau de contrainte, l'endommagement apparaît donc comme un phénomène marginal, en aucun cas relié à la grande ductilité du matériau au cours du fluage tertiaire.

A plus forte contrainte, une situation bien différente est observée. Un fluage tertiaire exponentiel succède immédiatement au fluage primaire, alors que la phase de fluage secondaire est pratiquement inexistante. Le taux de microfissuration ne diminue pas au cours du temps, bien au contraire. Dans un premier temps apparaît un réseau dense et homogène de microfissures intergranulaires parallèles à l'axe de compression. Puis les autres joints, même ceux défavorablement orientés, se fissurent également pour former un réseau totalement interconnecté de microfissures, alors que la microfissuration transgranulaire reste marginale. On assiste donc à une «granulation» du matériau, sans propagation de macrofissures, et sans phénomène de recristallisation. L'étude des relations entre cette évolution de l'endommagement et l'accélération du fluage (écoulement cataclastique) est en cours.

### II.2.2.3 Endommagement et rupture fragile de la glace granulaire aux fortes vitesses de déformation

(J. Weiss)

Une collaboration avec le Pr. E.M.Schulson de l'Ice Research Laboratory de Dartmouth College (USA) sur la rupture fragile de la glace granulaire sous compression multiaxiale a

démarré à l'occasion d'un stage post-doctoral de J. Weiss, et s'est poursuivie depuis, en particulier sur l'aspect modélisation.

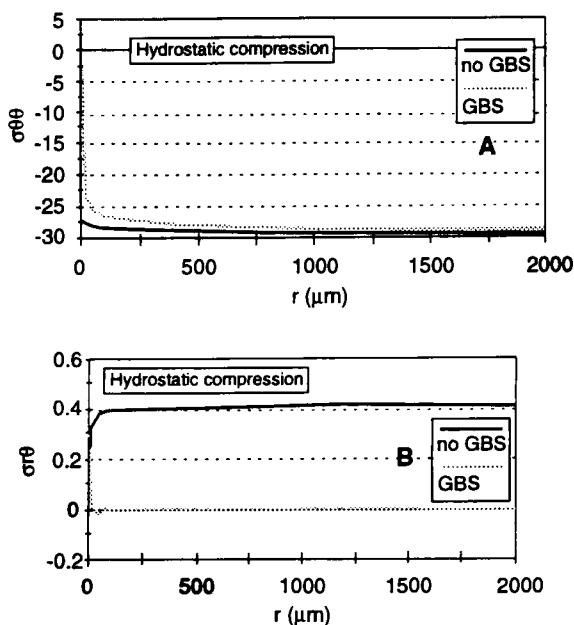
Des essais à vitesse de déformation imposée élevée ( $\dot{\epsilon} = 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ ), en compression triaxiale, ont montré :

- (i) qu'en dessous d'un confinement seuil  $R_0$ , la contrainte à rupture augmente fortement avec le confinement. Ce régime est contrôlé par la germination, la propagation et l'interaction de «fissures en ailes» (wing-cracks) parallèles à l'axe de compression maximale. Une modélisation tenant compte de l'effet du confinement sur l'extension de ces fissures en ailes a permis d'expliquer l'augmentation de la contrainte à rupture avec le confinement, ainsi que les changements de modes de rupture :
  - sous faible confinement : rupture axiale par propagation à travers tout l'échantillon d'un nombre réduit de fissures,
  - sous confinement plus élevé : rupture par bande de cisaillement résultant de l'interaction de nombreuses fissures à extension réduite.
- (ii) au-dessus de  $R_0$ , une saturation de la contrainte à rupture est observée, mais ceci résulte des conditions aux limites imposées à l'échantillon par le système triaxial de chargement, qui entraînent un broyage très localisé de la glace aux interfaces.

Par contre, on observe également la germination de microfissures de façon uniforme dans le matériau, sans relation avec les conditions aux limites. La germination de ces microdéfauts, qui ne se propagent pas et n'ont pas d'incidence sur la rupture finale, est observée aux forts confinements, et même sous compression hydrostatique.

Théoriquement, aucune fissure ne peut apparaître dans un matériau isotrope sous compression hydrostatique. Pour expliquer un tel phénomène dans le cas de glace granulaire (macroscopiquement isotrope), une modélisation par éléments-finis du polycristal de glace en élasticité linéaire a été développée. On a ainsi pu montrer l'existence de singularités de contrainte due à l'anisotropie élastique de cristaux de glace jointifs ayant des orientations cristallographiques différentes. Cependant, sous compression hydrostatique, les contraintes normales aux joints de grains sont toujours en compression. Par contre, des contraintes de cisaillement agissent également sur ces joints : ceci suggère que le glissement des joints puisse jouer un rôle. Si l'on introduit la possibilité de glissement aux joints dans le modèle (avec accomo-

dation élastique), l'intensité des concentrations de contrainte augmente fortement et des singularités en traction apparaissent au voisinage de certains points triples (Fig. 3.4), qui pourraient être à l'origine de la germination de microfissures.



**Figure 3.4 :**  
**Compression hydrostatique**

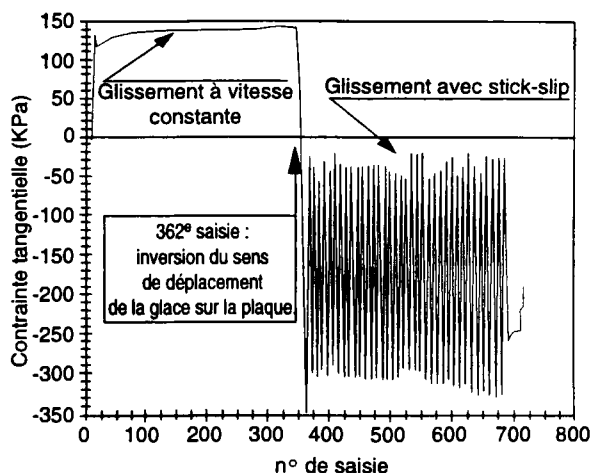
Évolution des contraintes le long d'un joint de grain à proximité d'un point-triple, sans (no GBS) ou avec (GBS) possibilité de glissement au niveau du joint de grain.

A) contrainte normale au joint  
B) contrainte de cisaillement

Outre son intérêt conceptuel, cette étude nous a permis de nous pencher sur les mécanismes de germination des microfissures sous compression, pour des matériaux polycristallins dans le régime fragile.

### II.2.3 Etude du frottement Glace-Béton par essai de cisaillement direct (B. Fiorio, J. Meyssonier)

Une collaboration avec le Pr. M. Boulon (Laboratoire 3S, Grenoble), sur l'étude du contact glace/structure, a été engagée. Des essais de frottement de différents types de glace (équiaxe, colonnaire) sur des plaquettes de béton ont été réalisés en utilisant une boîte de cisaillement, prêtée par le laboratoire 3S, qui présente la particularité de pouvoir être asservie en contrainte normale. Ces essais ont permis de cerner les problèmes liés à l'utilisation de cette machine avec la glace à  $-10^\circ\text{C}$  (stick-slip, abrasion des matériaux en contact, échantillonnage des mesures, gamme de vitesse, course, ...).



**Figure 3.5 :**  
**Frottement glace-béton**

Contrainte tangentielle au cours d'un essai de frottement glace colonnaire - plaque lisse (contrainte normale : 500 K Pa, vitesse d'entraînement : 0,1 mm/mn). cet essai montre les deux comportements typiques du frottement glace-béton : frottement à vitesse de glissement constante et stick-slip. A vitesse constante la contrainte tangentielle est quasi-constante, sauf au début de l'essai où il y a création d'une surface de contact sable. Le stick-slip se produit parce que l'inversion du sens de déplacement de la glace lui laisse le temps de se «coller» sur la plaque. Il faut alors augmenter considérablement la contrainte tangentielle pour rompre le lien ainsi créé. La glace se déplace brutalement puis s'immobilise et se recolle. Ce mécanisme est responsable des pics de contrainte tangentielle que l'on observe dans la deuxième partie de l'essai.

Les résultats préliminaires (essais à contrainte normale constante) obtenus indiquent :

- une diminution du frottement lorsque la vitesse augmente, quels que soient les types de glace ou de plaque (lisse/rugueuse),
- une augmentation du coefficient de frottement avec la contrainte normale,
- une influence du type de glace variable selon le type de plaque.

Le phénomène de stick-slip, observé dans la gamme de vitesses 0,1-10 mm/mn, peut être attribué à deux mécanismes :

- indentation de la glace, puis rupture, dans le cas de plaques rugueuses,
- soudure glace-plaque (par frittage des particules de glace érodées) observée avec les plaques lisses.  
(dans les deux cas, l'énergie est emmagasinée dans le capteur de force tangentielle).

## II.3 MODELISATION DES CALOTTES POLAIRES

L'intérêt de la modélisation des calottes polaires est double. D'une part, on cherche à étudier l'évolution des calottes sous l'action du climat, c'est-à-dire à quel point leur géométrie est affectée par les variations climatiques et avec quel temps de réaction. L'objectif est ici de comprendre le rôle des calottes dans le système climatique. D'autre part, les carottages profonds fournissent des enregistrements climatiques que la modélisation peut aider à interpréter. Il s'agit essentiellement de déterminer l'âge et l'origine géographique des carottes de glace en tenant compte de leur transport et de leur déformation par l'écoulement.

Ces deux grands axes ne sont pas indépendants car les variations de géométrie affectent les trajectoires des particules de glace et par conséquent la datation. A l'inverse, le forçage climatique que nous imposons pour simuler l'évolution de la calotte est en général tiré de ces mêmes forages glaciaires (pour des raisons de proximité et de résolution).

Au cours des quatre années écoulées, notre effort a surtout porté sur la modélisation de l'évolution des calottes avec le développement de modèles 2D puis 3D s'appliquant à diverses calottes glaciaires. Pour mieux prendre en compte certains mécanismes auxquels les modèles sont très sensibles et qui sont pour l'instant traités de façon rudimentaire, nous avons également développé des modèles spécifiques (isostasie, ice shelves, ...). Par ailleurs, le modèle développé précédemment pour la datation de Vostok a été utilisé à nouveau (avec quelques améliorations) pour dater les couches profondes obtenues récemment (Jouzel et al. 1993).

### II.3.1 EVOLUTION DES CALOTTES GLACIAIRES SOUS L'ACTION DU CLIMAT

Pour simuler l'évolution d'une calotte glaciaire, il faut calculer les champs couplés de température et de vitesse dans la glace, puis en déduire les variations de géométrie au cours du temps en fonction du bilan de masse à la surface de la calotte (précipitation, fonte) et de l'évacuation de la glace depuis le centre vers les bords (écoulement). Il faut tenir compte des spécificités géographiques de chaque calotte glaciaire ; mais du point de vue de la dynamique de la glace, celles-ci peuvent se répartir en seulement deux classes :

Indlandsis (reposant entièrement sur le socle rocheux) et calottes marines (dont une partie, l'ice shelf, flotte sur la mer). Dans ce dernier cas, il est nécessaire de coupler le modèle d'Indlandsis avec un modèle d'ice shelf.

Les modèles que nous avons développés sont (ainsi que les autres modèles de ce type) basés sur la même approximation, appelée «shallow ice approximation». La déformation par cisaillement sous l'action du poids de la glace est supposée être le mécanisme prédominant dans l'écoulement, ce qui simplifie considérablement le traitement. Cette hypothèse tire parti du facteur d'échelle entre la dimension verticale (quelques km) et la dimension horizontale (plusieurs centaines de km). Nos modèles diffèrent entre eux par le nombre de dimensions, le couplage éventuel avec un ice shelf et la calotte concernée.

#### II.3.1.1 Modèle 2D («flow line»), appliqué à la ligne de courant passant par Vostok (C. Ritz)

Ce modèle 2D ne considère la calotte que le long d'une ligne d'écoulement, du Dôme à la côte. La «shallow ice approximation» suppose en effet que la direction de l'écoulement ne dépend pas de la profondeur ce qui permet ce type d'approche. Le modèle contient les mécanismes liés au couplage température-écoulement et au couplage «calotte-ice shelf». Il a servi d'étape dans la construction du modèle 3D et a permis d'affiner l'interprétation du forage de Vostok en montrant que les variations d'épaisseur au cours des derniers cycles climatiques ont été de l'ordre de 100 m (C. Ritz, 1992). Cela signifie que le signal climatique tiré de ce forage est très peu perturbé par les variations d'épaisseur dues au climat.

#### II.3.1.2 Modèle 2D (horizontal), appliqué à l'évolution de la Fennoscandie (A. Letréguilly et C. Ritz)

Ce modèle tire parti du fait que pour de la glace isotherme et toujours dans le cadre de la «shallow ice approximation», la vitesse d'écoulement peut se calculer analytiquement à toute profondeur. Ce type de modèle, appelé «intégré verticalement», est utile pour étudier l'interaction entre la topographie du socle et de la calotte glaciaire avec le bilan de masse (précipitation-ablation) qui dépend fortement de l'altitude.

Notre objectif était d'étudier la croissance de la Fennoscandie (calotte qui a recouvert le Nord de L'Europe lors des périodes glaciaires)

en fonction de la température (au-dessus des continents et de l'océan et selon les saisons). Pour bien rendre les variations du bilan de masse avec la température nous avons utilisé un modèle de précipitation basé sur la conservation de vapeur d'eau dans l'atmosphère (proposé par J. Oerlemans) et un modèle d'ablation basé sur le nombre de degrés jours positifs au cours de l'année (proposé par N. Reeh).

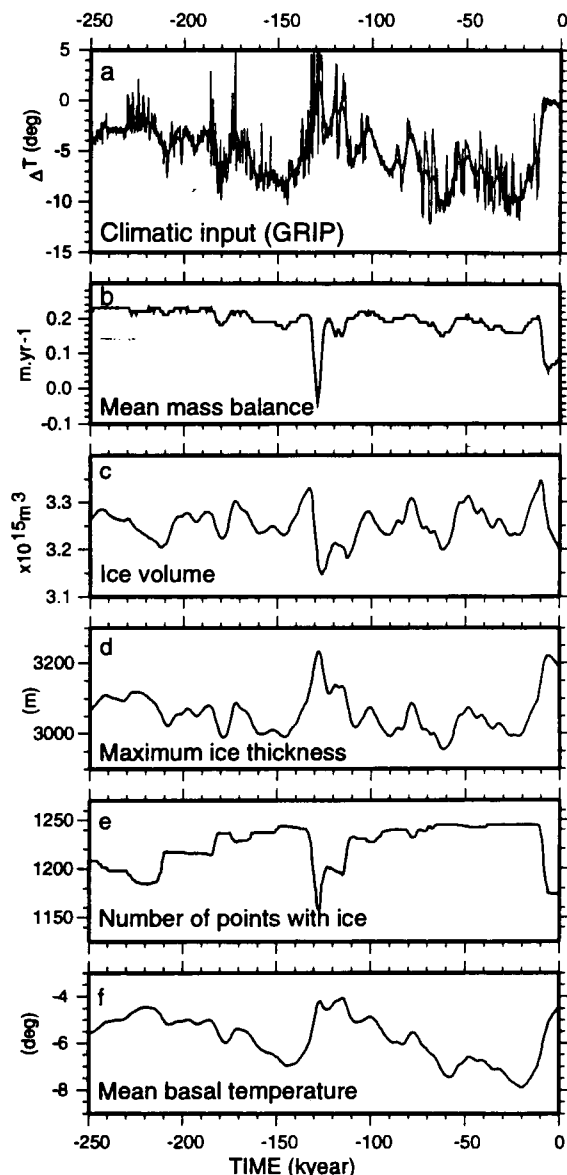
Nos résultats montrent une très grande sensibilité du modèle aux températures. De plus, pour «faire pousser» une calotte Fennoscandienne comparable à celle dont nous connaissons les contours par les moraines, il faut supposer un climat plus froid d'environ  $10^\circ$  en moyenne annuelle mais avec une amplitude saisonnière plus faible (étés froids) qu'au présent. Il faut aussi supposer un océan légèrement plus chaud que l'actuel afin de disposer de suffisamment de vapeur d'eau pour produire une précipitation suffisante (A. Letréguilly et C. Ritz, 1993). Ces résultats sont en assez bon accord avec les enregistrements climatiques.

### II.3.1.3 Modèle 3D avec couplage thermo-mécanique. Application à une calotte schématique puis au cas du Groenland

(C. Ritz, A. Fabre, A. Letréguilly, A. Mangeney)

Ce modèle 3D traite le cas d'un Inlandsis (sans ice shelves). Il prend en compte les phénomènes de couplage thermo-mécanique (comme dans le modèle «flow line») et l'influence de la topographie réelle (comme pour le modèle précédent). Le champ de température dans la glace est obtenu en résolvant l'équation de la chaleur dépendant du temps. L'évolution de la géométrie se traduit par une équation de diffusion fortement non-linéaire. Le couplage est fait en résolvant de façon successive les différentes équations. Ce modèle a été développé au cours de l'année 1994 (thèse d'Adeline Fabre) et a été utilisé dans deux types d'expérience.

Nous l'avons d'abord appliqué au cas d'une calotte sur un socle plat avec un bilan de masse ayant une symétrie circulaire. Cette géométrie a l'avantage d'avoir une solution analytique pour certains cas simplifiés. La calotte résultante devant avoir elle aussi une symétrie circulaire, c'est un excellent moyen de détecter certaines erreurs. Nous avons présenté nos résultats lors d'un workshop sur l'in-



**Figure 3.6:**  
**Évolution de Groenland au cours des derniers 250 000 ans**

Cette évolution a été simulée à l'aide du modèle 3D d'Inlandsis. La température à la surface de la calotte est déduite de l'enregistrement isotopique du forage de GRIP (a). Le bilan de masse moyen (accumulation-ablation) (b) varie peu au cours du temps car les effets de la température sur l'accumulation et sur l'ablation se compensent excepté durant la période très chaudes. La conséquence est que le volume total de glace (c) ne varie que de  $\pm 5\%$ . Par contre, les courbes d'altitude maximum (d) (sensible à l'accumulation dans le centre) et de nombre de points englacés (e) (sensible à l'ablation) montrent que la forme de la calotte change : fine et étendue pendant les périodes froides, épaisse et moins étendue pendant les périodes chaudes. Cela indique l'influence prédominante du bilan de masse sur la réaction de la calotte glaciaire. Enfin la courbe (f) montre la température basale moyenne. Celle-ci suit le forage de température en surface avec un léger déphasage et une nette atténuation. (D'après Fabre et al. sous presse).

tercomparaison de modèles en juin 94 dans le cadre d'EISMINT (programme de l'European Science Foundation) ; notre modèle donnait des résultats comparables à ceux des autres modèles. Une nouvelle série d'expériences d'intercomparaison a été effectuée en janvier 95 et une publication commune doit être faite sur ce sujet (congrès à Chamonix en Septembre 95 et publication dans *Annals of Glaciology*).

Le modèle a ensuite été utilisé pour simuler l'évolution du Groenland soit sous l'action d'un réchauffement, soit tout au long du dernier cycle climatique avec un forçage climatique tiré de l'enregistrement glaciaire de GRIP. Lors des périodes froides, le Groenland était plus épais sur les bords de la calotte (moins de fusion) et plus fin au centre (en raison d'une précipitation moindre), mais il semble que le volume soit resté assez stable (cf. Fig. 3.6). Il apparaît que les paramètres les plus sensibles sont la loi de déformation de la glace et surtout la paramétrisation de la précipitation en fonction du climat (Fabre et al. sous presse). Nous finissons un autre article avec la description de ce modèle (soumis à *Climate Dynamics*).

Que ce soit pour le Groenland ou la Fennoscandie et même à un degré moindre l'Antarctique, nos résultats indiquent que les modèles sont très sensibles au bilan de masse (accumulation neigeuse - ablation par fonte). Pour améliorer ce point, il nous faut sortir du cadre strict de la glaciologie et nous avons initié des collaborations avec la communauté des modèles atmosphériques (Christophe Genthon au LGGE et Gilles Ramstein au LMCE).

### **II.3.2 ETUDES DESTINEES A AMELIORER LA PRISE EN COMPTE DE CERTAINS MECANISMES.**

Tous les modèles précédents sont basés sur la «shallow ice approximation». Celle-ci s'avère insuffisante pour les cas suivants : écoulement à un Dôme, ice shelves et leur zone de transition avec la calotte, fort relief du socle, prise en compte de l'anisotropie de la glace. Cela nous a conduit à traiter le problème mécanique de façon complète.

#### **II.3.2.1 Modélisation de la zone de transition calotte-ice shelves** (*R. Lestringant, C. Ritz*)

La répartition des vitesses dans cette zone joue un rôle important dans la stabilité de la ligne d'échouage (limite à partir de laquelle la

nappe de glace se met à flotter sur la mer). Cela conditionne l'évolution de l'ensemble de la calotte et jusqu'à présent très peu d'études avaient été faites. Renaud Lestringant a développé un modèle (aux éléments finis) traitant ce problème particulier. Il apparaît que la transition se fait sur une distance de quelques kilomètres, inférieure aux mailles habituelles des modèles (*R. Lestringant, 1994, 1995*). Ce résultat sera introduit dans le couplage «ice shelves - Indlandsis».

#### **II.3.2.2 Traitement numérique de l'écoulement d'un matériau viscoplastique non linéaire et anisotrope : application aux calottes polaires** (*A. Mangeney, C. Ritz*)

Nous voulons prendre en compte les résultats obtenus au LGGE par le groupe de Paul Duval sur la loi de déformation de la glace. Le lien entre la mécanique de la glace et la modélisation constitue une force du LGGE. Le travail de thèse d'A. Mangeney consiste à étudier l'influence de la loi de comportement sur l'écoulement de la glace. Un premier travail a été effectué sur le modèle «flow line» du LGGE, consistant à introduire une viscosité isotrope fonction de l'âge de la glace (influence du contenu en impuretés). Ce modèle, basé sur l'approximation de la couche mince, s'est avéré inadapté à l'introduction d'une loi de comportement anisotrope. A. Mangeney développe donc actuellement un modèle 2D d'écoulement aux différences finies. Les équations de la mécanique sont résolues de façon rigoureuse et la forte anisotropie viscoplastique de la glace est prise en compte. Les coefficients de la loi de comportement seront calés sur les résultats d'essais mécaniques sur les glaces polaires.

#### **II.3.2.3 Modélisation des ice shelves.** (*V. Rommelaere, C. Ritz*)

Les ice shelves forment la deuxième composante des calottes marines. Pour calculer leur champ de vitesse, il faut résoudre les équations d'équilibre quasi statique mais on peut faire l'approximation que les vitesses sont indépendantes de la profondeur. Un modèle 3D thermo-mécanique d'ice shelf a été développé au LGGE (DEA, puis thèse en cours de Vincent Rommelaere). Ce modèle a également été présenté lors des expériences d'intercomparaison d'EISMINT. Cependant, à l'inverse de ce qui s'est passé pour les Indlandsis où l'accord était bon, les quatre modèles d'ice-shelves donnaient tous

des résultats différents ce qui illustre l'état actuel des connaissances sur ce domaine ! Pour essayer de comprendre l'origine de ces désaccords une autre série d'expériences a été proposée. Il s'agit tout d'abord de comparaisons avec des solutions analytiques dans des cas très simples. Notre modèle apparait alors très performant. Le dernier volet comprend la comparaison des modèles sur le cas du Ross Ice shelf (Antarctique) et Vincent Rommelaere a effectué un séjour de 3 mois chez D. Mac Ayeal (USA) pour initier ce test : protocole d'utilisation de la base de données et première comparaison entre un modèle aux éléments finis (D. Mac Ayeal) et notre modèle aux différences finies. Enfin, les premières expériences de couplage Indlandsis-ice shelves sont en cours. Ce travail fera l'objet de plusieurs communications en Septembre 95 (Chamonix).

#### **II.3.2.4 Modélisation de l'isostasie sous-glaciaire** (E. Le Meur, C. Ritz)

L'isostasie sous-glaciaire est l'enfoncement du socle terrestre sous le poids de la glace. Ce phénomène est très important car il modifie l'altitude de la surface de la calotte

ce qui, en retour, joue sur le bilan de masse en surface. De plus cet enfoncement est déphasé, ce qui introduit une non-linéarité dans l'évolution de la calotte. Pour l'instant, dans le modèle 3D, nous suivons le modèle proposé par H. Oerlemans et également utilisé par P. Huybrechts en simulant ce phénomène d'une façon assez simple par une équation de diffusion qui régit la conservation de la masse dans l'Asthénosphère. Parallèlement, depuis le début de sa thèse, Emmanuel Le Meur a développé un modèle beaucoup plus réaliste, qui prend en compte l'ensemble de la Terre (modèle «gravitationnellement auto-cohérent» du même type que celui de W.R. Peltier). Ce type de modèle sera indispensable en particulier si nous voulons traiter l'ensemble des calottes de l'Hémisphère Nord lors des précédentes glaciations. Ce modèle d'isostasie est au point et nous allons le coupler avec le modèle de glace à cours terme. Emmanuel Le Meur qui a effectué son service National à l'Alfred Wegener Institut en Allemagne, collabore également avec P. Huybrechts. Ce modèle a fait l'objet d'une communication à la conférence de Géoprospective de l'UNESCO à Paris en Avril 94 et deux articles sont en préparation.

### **III - COLLABORATIONS ET CONTRATS**

#### **III.1 COLLABORATIONS INTERNATIONALES**

Sur le plan international, l'équipe collabore avec :

Dr. V. Lipenkov, Pr. A. Salamatin (Institut de Recherches Arctiques et Antarctiques de St.-Petersbourg et Université de Kazan) pour l'étude de la densification du névé et de la glace et l'étude des clathrates ;

Pr. A. Salamatin (Université de Kazan) : Comparaisons entre son modèle et notre modèle flow line pour évaluer les variations de géométrie à Vostok. (Résultats présentés à Chamonix Septembre 95, séjours d'Andrei Salamatin au LGGE) ;

L. De Dosso (Ph. D. student, Un. de Milan) Application de notre modèle d'ice shelf à un petit ice shelf sur lequel des mesures de

déplacement ont été effectuées (séjour de L. De Dosso au LGGE) ;

Dr. T. Uchida, Pr. T. Hondoh, Pr. S. Mae Département de Physique de l'Université d'Hokkaido pour l'étude des clathrates dans le cadre de l'accord CNRS/JSPS ;

Pr. R. Lebensohn (Université de Rosario, Argentine) pour la modélisation du polycristal ;

Pr. W. Kuhs (Laboratoire de Cristallographie de l'Université de Göttingen) pour l'étude de la cristallographie de la glace et des clathrates dans la cadre de PROCOP ;

Pr. E. Schulson (Thayer School of Engineering, Dartmouth College (USA) pour l'étude de la microfissuration de la glace ;

Dr. D. Mac Ayeal (USA) Comparaison de

modèles d'ice shelves. (séjour de V. Rommelaere à Chicago, articles en cours) ;

Dr. P. Huybrechts (Allemagne) Couplage du modèle d'isostasie d'E. Le Meur avec le modèle de calotte glaciaire de P. Huybrechts. (séjours de E. Le Meur à Bremerhaven, articles en cours) ;

Dr. F. Van Tattenhove (Pays-Bas) Comparaison modèle - données géologiques sur le Groenland (article en cours) ;

### III.2 COLLABORATIONS NATIONALES

Sur le plan national, l'équipe collabore avec :

Dr. G. Canova (Laboratoire «Génie Physique et Mécanique des Matériaux» GPM2 de l'INPG) sur les approches micro-macro pour la modélisation du polycristal et Pr. B. Baudalet (GPM2) sur le rôle des joints liquides dans le comportement mécanique des matériaux cristallins ;

Pr. B. Champagnon et G. Panczer (Laboratoire de Physico-chimie des matériaux luminescents, UCB, Lyon) pour la spectroscopie RAMAN des clathrates ;

Pr. M. Boulon (Laboratoire 3S de l'UJF, Grenoble) pour l'étude du frottement glace-béton ;

G. Ramstein (LMCE, Saclay) Amélioration du bilan de masse dans les modèles de calottes polaires par utilisation des GCM. ;

Dr. F. Califano (Observatoire de Meudon) pour la modélisation numérique de l'écoulement des calottes polaires ;

### III.3 CONTRATS

- L'équipe bénéficie du soutien du PNEDC (1992-95) et de de la CCE (contrat sea level et paleoclimat, 1993-95) pour la rhéologie des glaces polaires et la modélisation des calottes polaires ;

- L'étude des clathrates est financée partiellement par l'UJF (BQR, 1994-95) et bénéficie du soutien de la MDRI (CNRS) pour les échanges France-Japon ;

- L'étude de l'endommagement de la glace est soutenue par le Département SPI (CNRS) ; elle a été financée partiellement par l'UJF (BQR 1993) ;

- EISMINT est un programme sur la modélisation des calottes polaires soutenu par l'ESF (European Science Foundation). Les activités d'EISMINT sont les suivantes :

\* Organisation de workshops sur des points clés de la modélisation des calottes polaires. Les membres de notre groupe ont largement participé à ces Workshops. A. Letréguy a été co-organisateur d'un de ces workshops (sur les bases de données du Groenland) et C. Ritz en a organisé un autre sur la rhéologie des glaces polaires (Aussois, Janvier 1994) ;

\* Bourses d'échanges pour des séjours de courte durée. Pour notre groupe, cela a permis plusieurs séjours dans des laboratoires étrangers (E. Le Meur, R. Lestringant, V. Rommelaere) et la venue de chercheurs étrangers (A. Salamatin, L. De Dosso, W. Comoley travaillant avec C. Genthon) ;

\* Organisation d'une école d'été en Septembre 95. A. Fabre et G. Krinner y participeront ;

\* Conférence internationale sur la modélisation des calottes polaires qui aura lieu à Chamonix en Septembre 1995. Cette conférence est organisée en collaboration avec l'IGS (International Glaciological Society) et donnera lieu à la publication d'articles dans *Annals of Glaciology* (avec comité de lecture). Les thèmes de cette conférence recouvrant exactement nos recherches, notre groupe a proposé de nombreuses communications. C. Ritz est co-convenor.

## 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.

A. Goubert, 1991-1993 : thèse (soutenue) (encadrement J. Meyssonier)

E. Le Meur, DEA (1991) puis thèse à partir de 1993 (encadrement C. Ritz)

O. Plé, 1992 : stage de DEA-MMGE et thèse en cours (encadrement J. Meyssonier)



- O. Castelnau, 1992 : stage de DEA MMGE et thèse en cours (encadrement P. Duval)  
 A. Mangeney, thèse, début en 1992. (encadrement C. Ritz)  
 B. Fiorio, 1993 : stage de DEA-MMGE et thèse en cours (encadrement J. Meyssonier)  
 L. Serrurier, 1993 : stage de Maîtrise du Magistère des Sciences de la Terre de Paris VI (encadrement J. Meyssonier)  
 Y. Malécot, 1993 : stage de 2ème année Ecole Nationale des Ponts et Chaussées et Stage de DEA Mécanique des Solides et des Structures (ENPC) (encadrement J. Meyssonier)  
 G. Krinner, 1993 : stage de Maîtrise (encadrement P. Duval)  
 S. de La Chapelle, 1993 : stage de 3ème année Ecole des mines et DEA Science et Génie des Matériaux (encadrement P. Duval)  
 A. Fabre, DEA MMGE (1993) puis thèse (encadrement A. Letréguilly)  
 E. Perrin, 1994 : stage de DEA-MMGE (encadrement J. Meyssonier)  
 L. Arnaud, 1994-1995 : thèse en cours (encadrement P. Duval)  
 R. Lestringant. thèse de 1991 à 1994 (encadrement C. Ritz)  
 E. Ruiz, 1994 : stage de 2ème année Ecole Centrale de Lyon (encadrement P. Duval)  
 H. Milsch, 1994 : stage de Diplomerbeit de l'Un. de Göttingen (encadrement P. Duval)  
 V. Rommelaere, DEA (1994) puis thèse (encadrement C. Ritz)  
 D. Voisin, stage de l'Ecole Polytechnique 1994 (encadrement C. Ritz)  
 A. Molié, stage de Maitrise 1994 (encadrement C. Ritz)  
 O. Gagliardini, 1995 : stage de DEA-MMGE (encadrement L. Reynaud et J. Meyssonier)  
 Ph. Mansuy, 1995 : stage de DEA-MMGE (encadrement A. Philip et J. Meyssonier)  
 Y. Marcon, 1995 : stage 3ème année Ecole Nationale Sup. de Physique (INPG) (encadrement A. Philip et J. Meyssonier)

## V - PUBLICATIONS

### V.1 - REVUES À COMITÉ DE LECTURE

Castelnau O. and Duval P., 1994. Simulations of anisotropy and fabric development in polar ices. *Annals of Glaciology*, **20**, 277-282.

Castelnau O., Duval P., Lebensohn R.A. and Canova G.R. (soumis) Viscoplastic modeling of texture development in polycrystalline ice with a self-consistent approach; comparison with bound estimates. *J. of Geophysical Res.*

De La Chapelle S., Duval P. and Baudalet B. (sous presse) Compressive creep of polycrystalline ice containing a liquid phase. *Scripta Met. et Materialia*

Duval P. and Castelnau O., 1995. Dynamic recrystallization of ice in polar ice sheets. *J. de Physique*, **5**, C3-197-206.

Lestringant R., 1994. A two-dimensional finite-element study of flow in the transition zone between an ice sheet and an ice shelf. *Annals of glaciology*, **20**, 67-72.

Fabre A., Letréguilly A., Ritz C. and Mangeney A. (sous presse). Greenland under changing climate : sensitivity experiments with a new 3D ice sheet model. *Annals of Glaciology*, **21**.

Greenland Ice-core Project (GRIP) Members dont Duval P., 1993. Climate instability during the last interglacial period recorded in the GRIP ice core. *Nature*, **364**, 203-207.

Jouzel J., Barkov N.I., Barnola J.M., Bender M., Chappellaz J., Genthon C., Kotlyakov V.M., Lipenkov V., Lorius C., Petit J.R., Raynaud D., Raisbeck G., Ritz C., Sowers T., Stievenard M., Yiou F. and Yiou P., 1993. Extending the Vostok ice-core record of paleoclimate to the penultimate glacial period. *Nature*, **364**, 407-412.

Kalifa P., Ouillon G. and Duval P., 1992. Microcracking and the failure of polycrystalline ice under triaxial compression. *J. of Glaciology*, **38**, 128 ; 65-76.

Letréguilly A. and Ritz C., 1993. Modelling of the Fennoscandian ice sheet. *NATO ASI Series*, **I12**, pp 21-46 *Ice in the Climate System*. Edited by W. Richard Peltier. Springer Verlag, Berlin Heidelberg.

Meyssonier J. and Goubert A., 1994. Transient creep of polycrystalline ice under uniaxial compression : an assessment of internal state variable models. *Annals of Glaciology*, **19**, 55-62.

Uchida T., Hondoh T., Mae S., Duval P. and Lipenkov V., 1992. In situ observations of growth

process of clathrate air-hydrates under hydrostatic pressure. *Proc. of the Int. Symp. on the Physics and Chemistry of Ice*, pp 121-125.

Uchida T., Hondoh T., Mae S., Lipenkov V. and Duval P., 1994. Air-hydrate crystals in deep ice core samples from Vostok Station, Antarctica. *J. of Glaciology*, **40**, 134, 79-86.

Uchida T., Hondoh T., Mae S., Duval P. and Lipenkov V., 1994. Effects of temperature and pressure on the transformation rate from air bubbles in air-hydrate crystals in ice sheets. *Annals of Glaciology*, **20**, 143-147.

Weiss J. and Schulson E.M., 1995. The Failure of Fresh-Water Granular Ice under Multiaxial Compressive Loading, *Acta Met. Mater.*, **43**, 6, 2303-2315.

Weiss J., Schulson E.M. and Frost H.J. (soumis) Microcrack Nucleation in Fresh-Water Granular Ice under Hydrostatic Compression, *Philosophical Magazine*.

## V.2 - AUTRES PUBLICATIONS

Barnola J.M. et Duval P., 1992. La transformation de la neige en glace à la surface des calottes polaires ; *Images de la Physique* ; CNRS.

Castelnau O. et Duval P., 1995. Comportement mécanique des glaces de glaciers ; *Actes du Colloque d'Hydrotechnique «Glaciologie et Nivologie»* ; Grenoble 15-16 février 1995 ; 229-235.

Duval P., 1992. Etude des interactions glace / structure ; synthèse finale des résultats ; Contrat LGGE / Chantiers de l'Atlantique; *Publ. du Bureau Veritas*, 2219/CRD.

Fabre A., Letréguilly A., Ritz C. et Mangeney A., 1994. Modélisation de la calotte du Groenland : Tests de sensibilité et expériences d'évolution avec un nouveau modèle 3D. *Atelier de modélisation de l'atmosphère, Météo-France*, Toulouse, Novembre 1994.

Fabre A., Letréguilly A., Ritz C. et Mangeney A., 1995. Modélisation de la calotte du Groenland ; *Actes du colloque d'hydrotechnique «Glaciologie et Nivologie»* ; Grenoble 15-16 février 1995 ; 257-264.

Goubert A., 1993. Fluage de la glace polycristalline en compression uniaxiale; *Thèse de Doctorat* de l'Université Joseph Fourier ; Grenoble I.

Hondoh T., Uchida T., Mae S., Duval P. and Lipenkov V., 1992. Crystallographic analyses of

clathrates hydrates included in Vostok ice cores. *Antarctic Record*, **36**, 2, 268-278.

Le Meur E., 1994. Isostatic Response to ice sheet loading with a self gravitating spherical earth model. *Proceeding de la Conférence «géo-prospective» à l'UNESCO*, Paris, France, Avril 1994.

Lestringant R., 1994. Etude numérique et mathématique des transitions abruptes «fort frottement - faible frottement» : application aux transitions «calottes polaires - ice shelf». *Thèse de Doctorat* de l'Université Joseph Fourier ; Grenoble I.

Mangeney A. et Ritz C., 1994. Changement de la viscosité de la glace - Influence sur la datation. Atelier de modélisation de l'atmosphère, Météo-France, Toulouse, Novembre 1994.

Plé O., Meyssonier J., Weiss J. et Fiorio B., 1995. Glaciologie et Génie Civil. in Glaciologie et Nivologie, Etat des recherches et des connaissances à la fin du XXe siècle, *Actes du Colloque d'Hydrotechnique «Glaciologie et Nivologie»* Grenoble, 15-16 février 1995, pp 265-274.

Uchida T., Mae S., Hondoh T., Duval P. and Lipenkov V., 1993. Effects of air-hydrate crystals in ice growth. *Proc. of the NIPR Symposium*, **7**, pp 7-13.

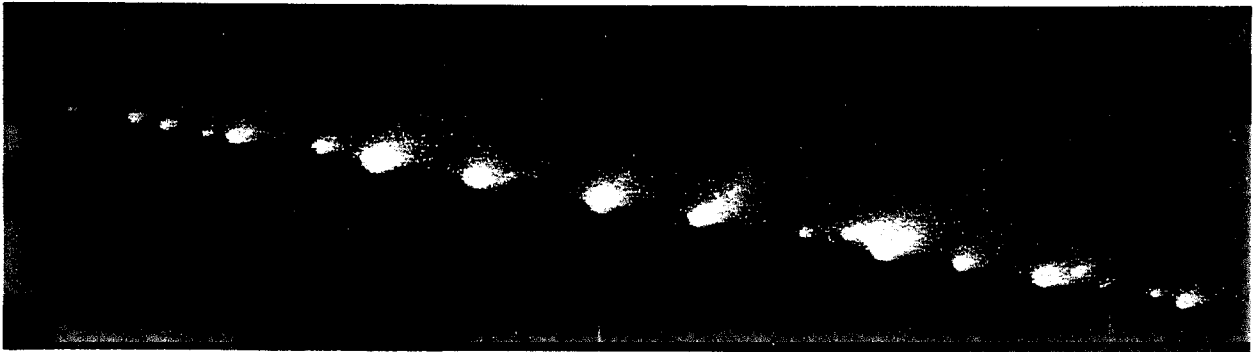
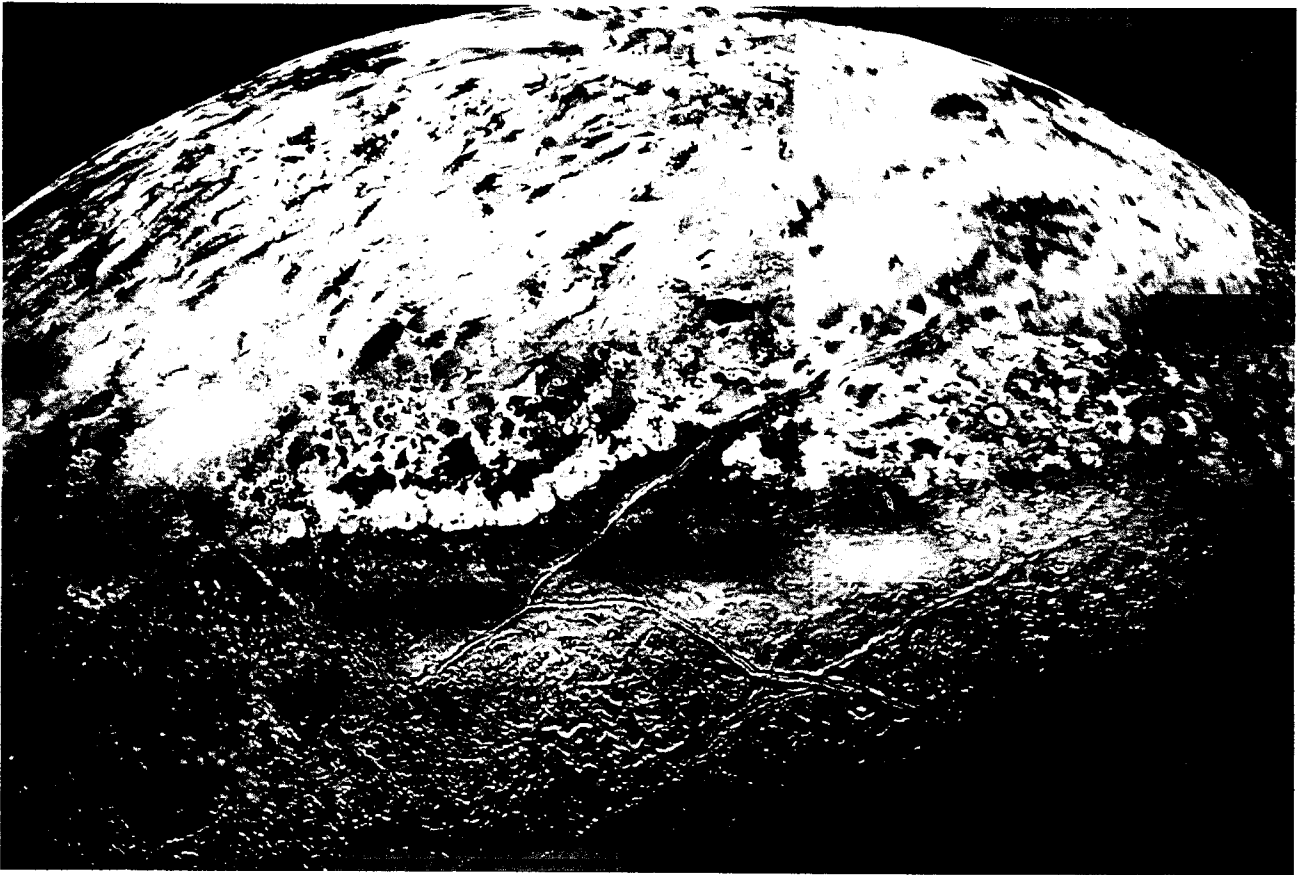
Ritz C., 1992. Un modèle thermo-mécanique dévolution pour le bassin glaciaire Antarctique Vostok-Glacier Byrd : sensibilité aux valeurs des paramètres mal connus. *Thèse de Doctorat d'état*, Université Joseph Fourier - Grenoble I.

Ritz C., Morland L., Doake C., Duval P., Paterson S. and Hindmarsh R., 1994. Report on the EISMINT workshop «Mechanical properties of polar ices and ice sheet modelling» . *Aussois, January 1994. European Science Foundation*.

Uchida T., Mae S., Hondoh T., Duval P. and Lipenkov V., 1993. Measurements of surface energy of air-hydrate crystals in Vostok ice core, Antarctica. *Proc. of the NIPR Symposium*, **7**, pp 1-6.

Uchida T., Duval P., Lipenkov V., Hondoh T., Mae S. and Shoji H., 1994. Brittle zone and air-hydrate formation in polar ice sheets. *Mem. of National Inst. of Polar Research*, Tokyo ; **49**, pp 298-305.

Uchida T., Mae S., Hondoh T., Lipenkov V., Duval P. and Kawabata J., 1994. Growth process of air-hydrate and diffusion of air molecules in deep ice sheet. *Proc. of the NIPR Symposium*, **8**, 140-148.



**Chapitre 4**

**PLANETOLOGIE  
ET  
ASTROPHYSIQUE EXPERIMENTALE**

**EQUIPE PLANETOLOGIE ET ASTROPHYSIQUE EXPERIMENTALES**

Responsable : Jürgen KLINGER

**COMPOSITION DE L'EQUIPE :**

Chercheurs CNRS	B. SCHMITT (CR1)
Enseignants chercheurs	J. KLINGER (P1)
Ingénieurs chercheurs	
Doctorants	N. BOUZIANI H. CABOT A. ENZIAN F. TROTTA S. MAJOLET A. BENCHKOURA S. DOUTE E. QUIRICO
ITA	O. BRISSAUD (1/3)

**PRINCIPAUX AXES DE RECHERCHE :**

Etude de l'évolution des comètes

Spectroscopie et physico-chimie des surfaces englacées du système solaire

Spectroscopie des grains inter et circumstellaires

**PRINCIPAUX CONTRATS :**

Programme National de Planétologie

Programme National de Télédétection

GdR Physico-chimie des Molécules et Grains Interstellaires

CNES

**PUBLICATIONS :**

Types de publication	fin 1991	1992	1993	1994	1995 partiel
Revue à Comités de lecture	1	2	3	1	8
Symposiums		4	1	4	1
Autres			1	1	

## I - OBJECTIFS GENERAUX

L'équipe de Planétologie et Astrophysique Expérimentale a depuis le début des années 1980, développé une stratégie qui associe des travaux de modélisation et des simulations en laboratoire de processus physiques intéressant la planétologie et l'étude des grains interstellaires. Cette démarche originale a permis à l'équipe de trouver naturellement sa place au sein de la communauté planétologique française et internationale. Dans le détail, notre activité s'articule autour des thèmes suivants :

- 1) Elaboration de modèles d'évolution de certains objets du système solaire (comètes, planètes et satellites glacés) et de grains interstellaires.
- 2) Modélisation des transferts optiques et radiatifs à la surface d'objets du Système Solaire et entre les grains interstellaires.

3) Détermination en laboratoire des propriétés spectrales et des constantes optiques de solides permettant d'interpréter des observations spectroscopiques de certains objets du Système Solaire (Triton, Pluton, Titan, Io, ...) et du milieu interstellaire (grains).

4) Etude des interactions entre un milieu solide et une phase gazeuse raréfiée dans le but de contraindre les modèles d'évolution de certains objets du Système Solaire (comètes, planètes et satellites glacés) et des grains interstellaires.

Un des buts de ces études est la préparation et l'exploitation scientifique des missions spatiales d'observation infrarouge du milieu interstellaire et du système solaire (satellite ISO) et d'étude détaillée des corps du système solaire (missions Mars 96, Cassini-Huygens, Rosetta).

## II - RESULTATS MAJEURS OBTENUS AU COURS DES QUATRE DERNIERES ANNEES

### II.1 ETUDE DE L'EVOLUTION DES COMETES

L'équipe a développé, au cours des années 1980, des modèles numériques de l'évolution thermique et de la différenciation chimique des noyaux de comètes. Les principaux résultats obtenus concernent :

- 1) L'évolution thermique et la composition chimique de l'intérieur du noyau ;
- 2) La phase vapeur qui circule dans les pores du noyau ;
- 3) Les rapports des taux de production entre CO (ou CO<sub>2</sub>)/H<sub>2</sub>O ;
- 4) Le fait que dans un milieu poreux les substances volatiles peuvent se sublimer à la surface et sous la surface explique d'une façon naturelle le dégazage simultané de substances de tensions de vapeur très différentes. Nous avons d'ailleurs démontré quelques années auparavant que la présence de

clathrates-hydrates ne permet pas d'expliquer ce phénomène (*Klinger et al. 1986*).

A partir de ces travaux, nous avons démontré que la cristallisation de glace amorphe était une des causes possibles pour la variation spontanée de l'éclat optique (outburst) de la comète de Halley à 14 U. A. du Soleil (*Schmitt et al. 1992*).

Dans le but de contraindre davantage les modèles de variations spontanées de l'activité des comètes, nous avons entrepris une étude statistique des magnitudes visuelles disponibles de la comète P/Schwassmann - Wachmann 1. Les fichiers de données dont nous disposons couvrent 67 ans (depuis la découverte de la comète en 1927 jusqu'en 1994) Nos résultats montrent qu'il existe une corrélation entre la magnitude et la distance héliocentrique de cette comète. Par contre aucune corrélation entre les irrégularités dans la magnitude et des phénomènes parasites à caractère périodique tels que

la présence de la lune pendant les observations n'a été mise en évidence et nous n'avons trouvé aucune trace d'une modulation de l'activité par la période de rotation de la comète. Une évaluation de la probabilité de collision de cette comète avec des objets interplanétaires indique que de telles collisions ne peuvent pas expliquer l'activité erratique de cette comète. La cause des variations de la magnitude de la comète Schwassmann-Wachmann 1 est probablement due à des processus internes au noyau de la comète (Cabot et al., 1994, 1995).

La transition entre le régime visqueux (pressions élevées) et le régime de Knudsen (pressions très faibles) n'est pas correctement prise en compte dans les modèles existants. Il est de même pour la prise en compte de la diffusion simultanée de plusieurs gaz (Bouziani et Klingler, 1994, 1995).

Une reformulation rigoureuse du problème du transport simultané de plusieurs gaz à travers un milieu poreux est en cours d'achèvement. Ce travail constitue la thèse de Naceur Bouziani, qui doit être soutenue avant le 31/10/95.

Le modèle de comète publié par Espinasse et al. (1991) a servi de base au développement d'un modèle quasi-tridimensionnel. Nous avons ajouté une composante de poussière et nous étudions l'influence de la rotation du noyau (Enzian et al., 1994). Pour contraindre les modèles d'évolution des noyaux poreux par des données observationnelles et pouvoir contribuer à l'élaboration de scénarios réalistes pour la phase d'approche et de mesure de la mission Rosetta, nous avons commencé le développement d'un modèle de diffusion de la lumière par la coma. Les premiers résultats ont été présentés au colloque «Solar Système Ices» à Toulouse (27-30/3/95).

Pour des raisons de bilan énergétique, 10 % de la surface de la comète de Halley sont capables de produire la quantité de gaz mesurée pendant la mission GIOTTO si et seulement si ces 10 % sont situés au point sub-solaire. Il est vrai que la quantité de gaz produite par la comète de Halley par unité de temps nécessite seulement 35 à 40% du rayonnement solaire intercepté par la surface projetée de la comète. Par contre, cette surface projetée ne peut être convertie en surface du noyau que dans le cas d'une incidence normale du rayonnement solaire. Ceci nous a conduit à entreprendre une étude de l'influence de la topographie sur l'apparition de «jets» à la surface. Il s'est avéré possible de faire apparaître des «jets» même dans des cas où toute la surfa-

ce est potentiellement active (Majolet et al., 1994). Il convient donc de nuancer la vue «canonique» d'après laquelle la quasi-totalité de la matière perdue par la comète de Halley proviendrait de 10% de sa surface.

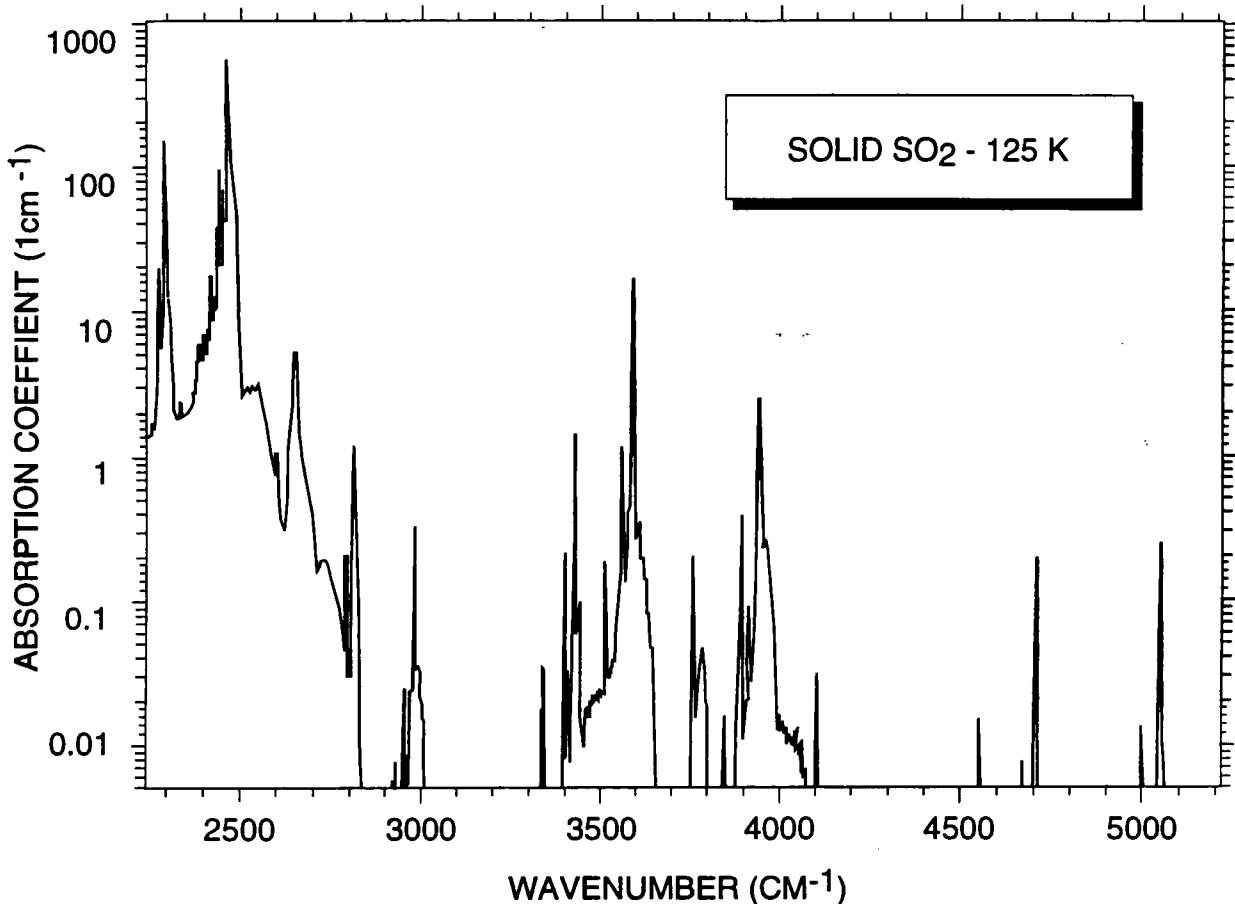
Nous considérons que notre modèle numérique est à un stade de développement où il permet de décrire l'évolution d'un noyau de comète d'une façon réaliste.

## II.2 LES SURFACES GLACEES DES CORPS DU SYSTEME SOLAIRE

L'étude expérimentale et la modélisation de problèmes astrophysiques faisant intervenir les molécules à l'état condensé, à la surface ou dans les atmosphères des satellites et planètes du système solaire, définit cet axe de recherche.

Une particularité commune à Titan, Triton, Pluton, Io et Mars tient au fait que leur surface (ou sa partie glacée) n'est pas dominée par la glace H<sub>2</sub>O, comme la majeure partie des satellites des planètes géantes et pour la Terre, mais est couverte par des solides moléculaires (glaces de N<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, CO, CO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>, ...) plus ou moins volatils. Il en découle que les caractéristiques des atmosphères (pression, composition, ...) de ces corps sont étroitement liées à celles de leurs surfaces (température, composition, ...) par le biais d'équilibres thermodynamiques entre phase gazeuse et phase solide ou liquide. Nous avons donc développé des mesures en laboratoire sur ces équilibres et échanges entre molécules condensées et gaz (cf. II.2.1.3) ainsi qu'une modélisation des échanges et transports de volatils à la surface des corps glacés (cf. II.2.2.2).

Les spectres en réflexion des surfaces planétaires recèlent de grandes quantités d'informations sur la nature et la composition des différents composants de la surface (minéraux, molécules condensées: «glaces», composés organiques, ...), sur leur texture (taille des grains, rugosité, ...), leur température et leur répartition géographique et éventuellement stratigraphique. L'analyse d'observations télescopiques ou satellitaires peut permettre de déterminer tout ou partie de ces caractéristiques. Pour cela nous avons développé un programme de mesures des propriétés optiques des solides moléculaires volatils (glaces) (cf. II.2.1.1), des modélisations de la réflectance de surfaces (cf. II.2.2.1) et leur utilisation à l'analyse des observations astronomiques des objets glacés (cf. II.2.3). Nous démarrons aussi un programme de mesure de la réflectance spectrale des surfaces (cf. II.2.1.1) pour approfondir la compréhension du transfert radiatif dans les surfaces



**Figure 4-1 :**

Spectre des coefficients d'absorption du  $\text{SO}_2$  solide à 125 K obtenu à partir d'un cristal de 1 cm et d'un film mince de 13 microns (Schmitt et al. 1994).

### II.2.1 Données acquises en laboratoire

Notre activité expérimentale est actuellement centrée sur la spectroscopie et les propriétés thermodynamiques des surfaces et aérosols de **Titan, Triton, Pluton, Io** et un peu de **Mars**. Nous débutons aussi une étude fondamentale des propriétés de diffusion de la lumière par les surfaces granulaires à partir de mesures de neiges artificielles et naturelles (glace  $\text{H}_2\text{O}$ ) sur **Terre**.

#### II.2.1.1 Données spectroscopiques

(E. Quirico, B. Schmitt, W. Grundy du LPL, Tucson, USA, avec R. Bini et P.R. Salvi du LSM, Florence, Italie ; A. Barbe du GSMA, Reims)

Depuis fin 1990, nous poursuivons un programme de mesures dans l'infrarouge proche et le visible pour la constitution d'une **banque de données (0,3 - 5,5  $\mu\text{m}$ )** 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 diffé-

rentes molécules à l'état solide dont des études sur les **spectres proche IR** (en fonction de la température) ont été entreprises sont:

- $\text{N}_2$ ,  $\text{O}_2$  et  $\text{H}_2$ ;  $\text{CO}$  et  $\text{CO}_2$ ;
- $\text{CH}_4$ ,  $\text{C}_2\text{H}_6$ ,  $\text{C}_2\text{H}_4$ ,  $\text{C}_2\text{H}_2$  et  $\text{C}_3\text{H}_8$ ;
- $\text{SO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{S}$  et  $\text{H}_2\text{SO}_4$ ;
- $\text{H}_2\text{O}$  cristallin et amorphe,  $\text{NH}_3$ .
- $\text{N}_2$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{C}_3\text{H}_8$ ,  $\text{CO}$  et  $\text{SO}_2$  ont aussi été mesurés à l'état liquide.

Des spectres dans le **visible** (0,6 - 1  $\mu\text{m}$ ) ont été obtenus sur  $\text{CH}_4$  et  $\text{O}_2$  solide et liquide.

Ces mesures ont fait l'objet de plusieurs publications (Schmitt et al. 1992, 1994, 1995; Grundy et al. 1993, 1995; Quirico et Schmitt 1995 ; Quirico et al. 1995).

Ces mesures ont été effectuées, soit en films minces (< 200  $\mu\text{m}$ ), soit avec une des cellules optiques fermées (cristaux de 50  $\mu\text{m}$  à 1 cm d'épaisseur) développées par l'équipe et permettant ainsi d'étudier les bandes d'absorption d'intensités très différentes (~7 ordres de grandeurs du visible à l'IR moyen) sur une large gamme de températures, correspondant aux surfaces planétaires étudiées. Les mesures en transmission obtenues à

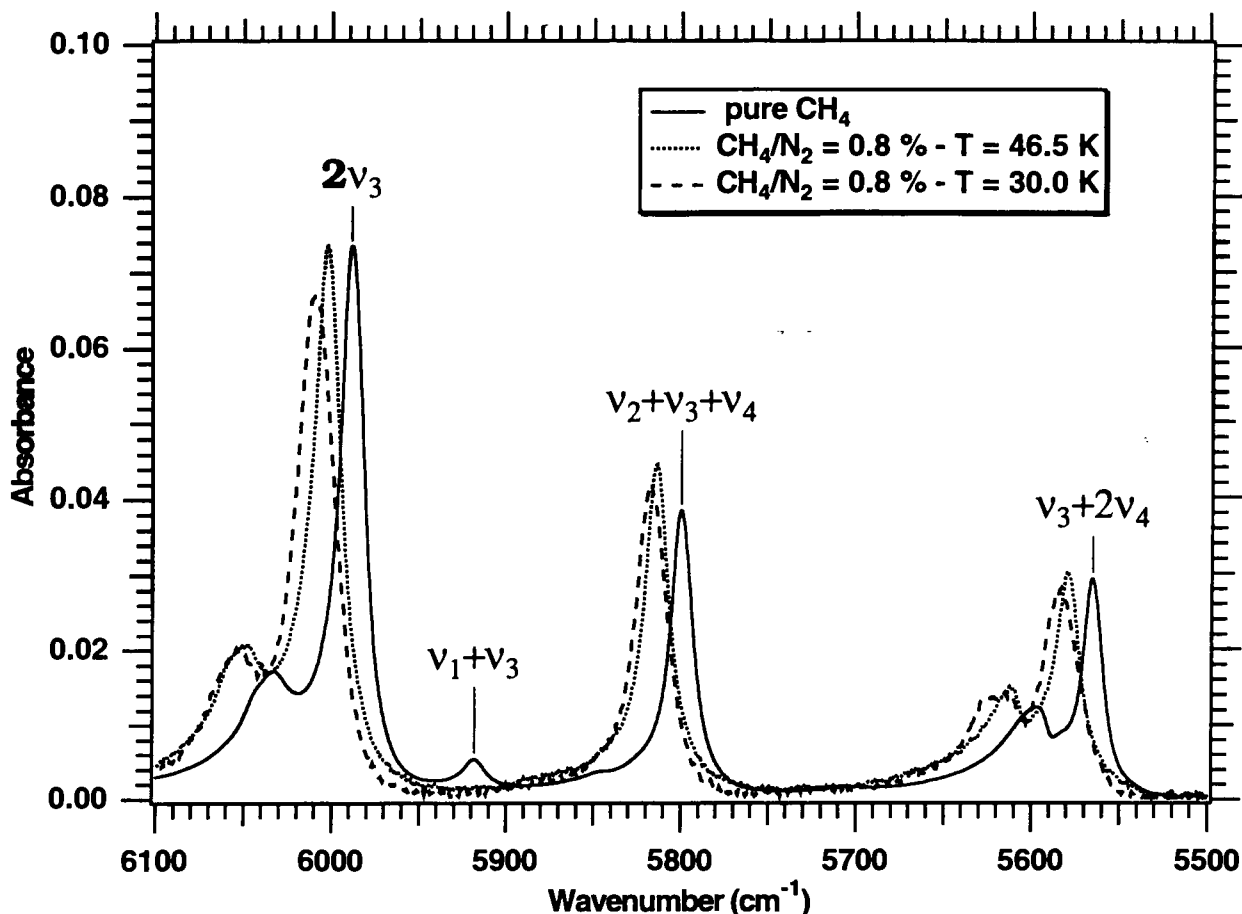


Figure 4-2 :

Comparaison des spectres de  $\text{CH}_4$  dilué à 0,8% dans  $\text{N}_2$  solide (phase  $\alpha$  à 30 K et phase  $\beta$  à 46.5 K) avec le spectre de  $\text{CH}_4$  pur à 21 K. La bande  $\nu_1+\nu_3$  disparaît à l'état dilué (Quirico et Schmitt 1995).

travers les cristaux (parfois monocristallins) de glace d'excellente qualité optique, obtenus par croissance cristalline dans les cellules fermées, permettent la détermination précise de leurs constantes optiques (Fig. 4.1) (cf. II.3.2).

En outre, des **expériences spécifiques** visant à l'interprétation des observations astronomiques de Triton, Pluton, Titan et Io ont été effectuées. Nous avons étudié, en particulier, les spectres d'absorption des deux phases cristallines de l'azote solide ( $\alpha$  et  $\beta$ ) et l'influence de la température sur ces spectres (Grundy et al. 1993). Pour la phase  $\alpha$ , nous avons observé de nouvelles bandes d'absorption et poursuivons un travail théorique pour leur identification spectroscopique (Quirico et al. 1995).

Nous avons aussi effectué une étude approfondie de l'influence de la température, de la phase cristalline de  $\text{N}_2$ , de la concentration de  $\text{CH}_4$  et du mode de formation de mélanges  $\text{N}_2:\text{CH}_4$  sur leurs

spectres infrarouges. Les résultats illustrent le rôle du diagramme de phase (phase cristalline, solution solide, ...) sur la forme et la position des bandes du méthane (Fig. 4.2 et 4.3) et leur importance pour l'interprétation des spectres de Triton et Pluton (Quirico et Schmitt 1995, Quirico et al. 1995). Enfin, nous avons mis en évidence la grande importance du mode de préparation des échantillons (condensation, cristallisation) et des paramètres (température, vitesses de croissance...) qui les contrôlent sur l'état thermodynamique et les spectres infrarouges des glaces étudiées.

Pour l'étude de la surface de Io nous avons entrepris un programme d'étude des spectres infrarouges des solides moléculaires soufrés,  $\text{SO}_2$  (fig. 4.1) et  $\text{H}_2\text{S}$ , et de leurs mélanges avec  $\text{CO}_2$  et  $\text{H}_2\text{O}$ , en fonction de la température. Un travail théorique a permis l'attribution de l'ensemble des bandes du  $\text{SO}_2$  solide observées à des modes de combinaisons et d'harmoniques de la molécule et de ses isotopes (Schmitt et al. 1994 ; Quirico et al. 1995).



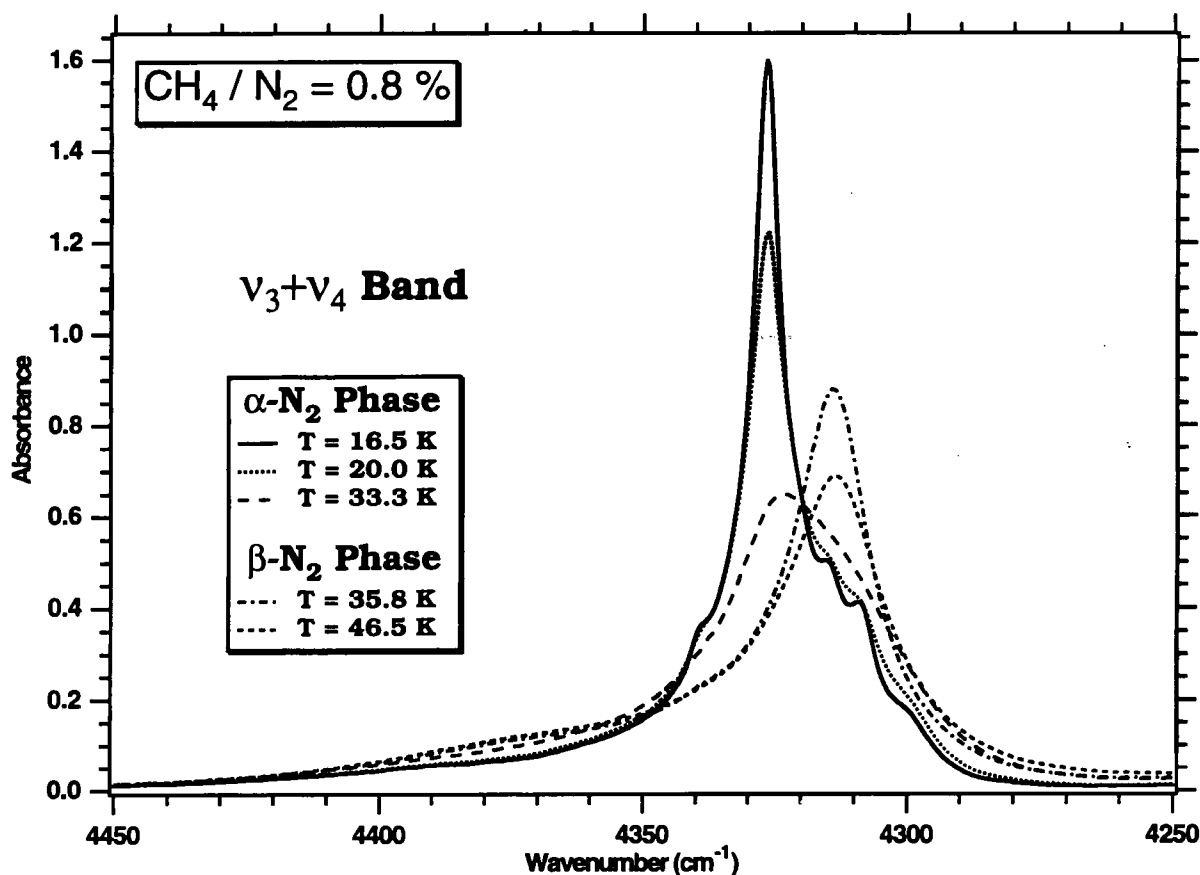


Figure 4-3 :

Effet de la température et de la phase cristalline de  $N_2$  sur la forme et la position de la bande  $v_3+v_4$  du  $CH_4$  dilué dans une matrice d'azote solide (Quirico et Schmitt 1995)

### II.2.1.2 Mesure de la réflectance spectrale des surfaces

(B. Schmitt, O. Brissaud, S. Douté, M. Fily, avec C. Sergent du CEN)

Nous concevons actuellement un **système expérimental** qui devrait permettre de mesurer directement les **spectres en réflexion bidirectionnelle**, de l'UV à l'infrarouge proche (0,3 - 5  $\mu\text{m}$ ), de surfaces de glaces ou d'autres matériaux. Le système optique envisagé devrait permettre de simuler l'éclairement de la surface sous différents angles d'incidence (de  $\sim 0$  à  $80^\circ$ ) et l'observation sous les divers angles de réflexion ( $0 - 80^\circ$ ) et d'azimut ( $0 - 180^\circ$ ).

Nous venons de terminer une série de tests optiques pour étudier les contraintes des propriétés géométriques et optiques des neiges sur les caractéristiques géométriques du système (taille échantillon, taille des spots d'illumination et d'observation aux différentes incidences, ...) et les précisions photométriques qui en découlent (mesure absolue de l'albédo). Une première étude théorique des performances du système complet de mesure a été réalisée. Une étude détaillée et une optimisation des différents éléments du système est en cours.

### II.2.1.3 Données thermodynamiques

a) vitesses d'évaporation et coefficients de collage  
(E. Quirico, B. Schmitt)

Les **vitesse d'évaporation et de condensation** et les **coefficients de collage** sont des propriétés indispensables à la modélisation des échanges entre surface et atmosphère. Nous avons développé une méthode spectroscopique et une méthode par interférence laser sur des couches minces pour la mesure des vitesses d'évaporation de corps purs en fonction de la température. Nous avons effectué des mesures sur  $N_2$  (34 K),  $CH_4$  (38 et 41 K) et  $H_2O$  (175 et 182 K) et déterminé une valeur préliminaire de  $\alpha = 0.04 \pm 0.015$  pour le coefficient de condensation  $\alpha$  de  $N_2$  solide,  $\alpha = 0.4 \pm 0.1$  pour  $CH_4$  solide et  $\alpha = 1.0 \pm 0.2$  pour la glace  $H_2O$ . Les résultats montrent que le coefficient de condensation dépend fortement de la molécule.

b) Différenciation chimique des mélanges  $CH_4/N_2$   
(B. Schmitt, A. Benchkoura, avec J. Stansberry de NASA/Ames, USA)

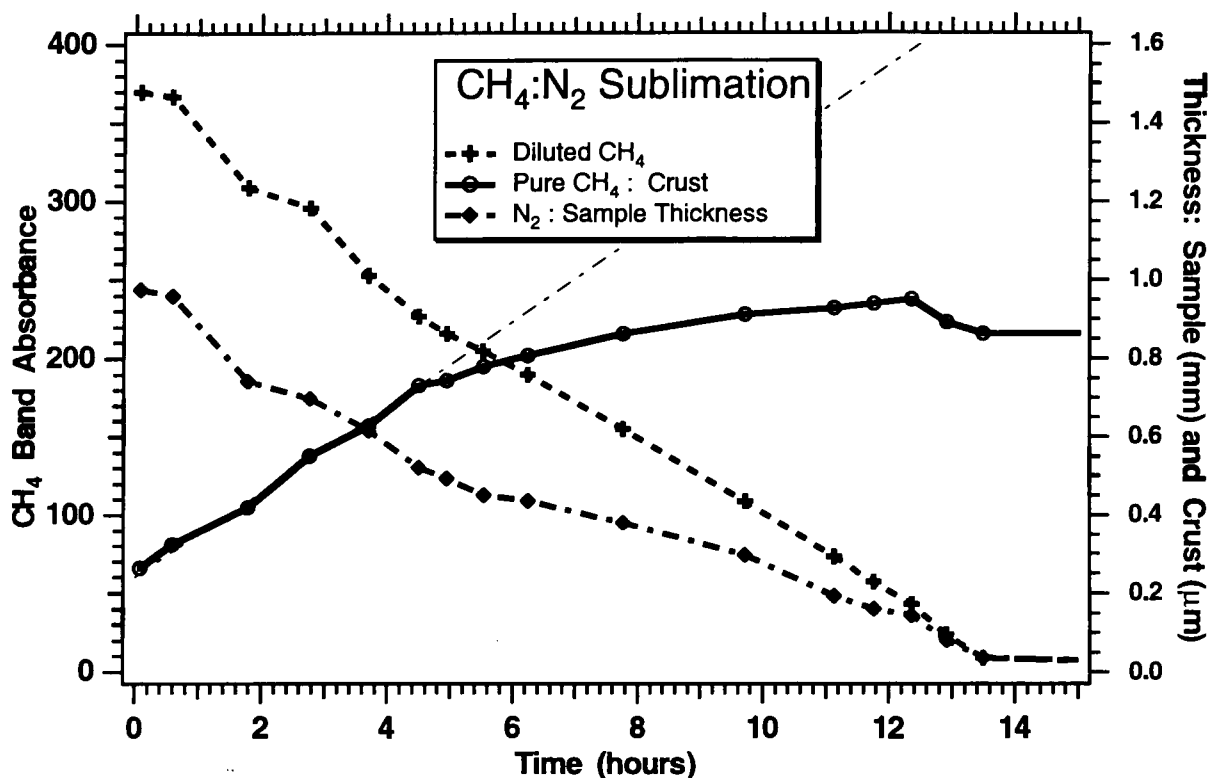
Nous étudions la **différenciation chimique de mélanges  $CH_4/N_2$**  en fonction de la température et du temps et le rôle de ce proces-

sus lors des transports saisonniers de volatils à la surface de Triton et Pluton. A l'aide d'expériences de laboratoire, nous avons mis en évidence l'apparition d'une solution solide riche en méthane à la surface de l'échantillon lors de l'évaporation préférentielle de l'azote, sous certaines conditions (fig. 4.4). Ces résultats renforcent notre idée d'une ségrégation et d'une stratification du méthane à la surface de Pluton suggérée par l'analyse des spectres infrarouges (cf. II.2.3). Ces données seront intégrées dans notre modèle de transports de volatils et de différenciation chimique à la surface de Triton et Pluton (cf. II.2.2.2)

de méthane solide montrent qu'à 77 °K le rapport  $\text{CO}/\text{CH}_4$  dans le solide est égal à 0,31 fois la pression réduite de CO ( $P/P_S$ ). Ces données, intégrées dans un modèle de microphysique des précipitations sur Titan (par D. Toublanc), montrent que les nuages de méthane ne peuvent expliquer qu'une partie de la forte différence de rapport de mélange de CO dans la troposphère et la stratosphère. Le piégeage de CO par  $\text{C}_2\text{H}_6$  solide est à l'étude.

### II.2.2 Modélisations numériques

La modélisation numérique des transferts optiques et des processus thermodynamiques



**Figure 4-4 :**

Evolution de la composition d'un mélange  $\text{CH}_4\text{N}_2$  au cours de sa sublimation à 34 K. La ligne mixte montre la décroissance de l'épaisseur de l'échantillon ( $\sim 1\text{mm}$ ). La ligne pointillée (+) correspond à la disparition du  $\text{CH}_4$  en solution solide dans  $\text{N}_2$  (bande à  $4216\text{ cm}^{-1}$ ) tandis que le trait plein (o) montre l'apparition d'une croûte de  $\text{CH}_4$  presque pur (bande à  $4203\text{ cm}^{-1}$ ) (Stansberry et al. 1995)

#### c) Piégeage de CO par les nuages de méthane de Titan.

(B. Schmitt, avec D. Gautier du DESPA, D. Toublanc du LPCE, Créteil)

Nous étudions les diagrammes de phase des composants des nuages de Titan ( $\text{CH}_4$ ,  $\text{N}_2$ ) et leurs interactions avec les composants de l'atmosphère (CO en particulier). Ces mesures ont aussi un intérêt pour l'étude des échanges entre la surface et l'atmosphère de Triton et Pluton. Des mesures sur le piégeage de CO par des nuages

impliquant des glaces est le maillon indispensable pour lier les informations tirées des expériences de laboratoire (II.2.1) aux observations des surfaces des corps glacés du système solaire (II.2.3).

#### II.2.2.1 Modélisation de la réflectance spectrale de surfaces de glaces.

(S. Douté, B. Schmitt; avec C. Sergent du CEN et M. Fily)

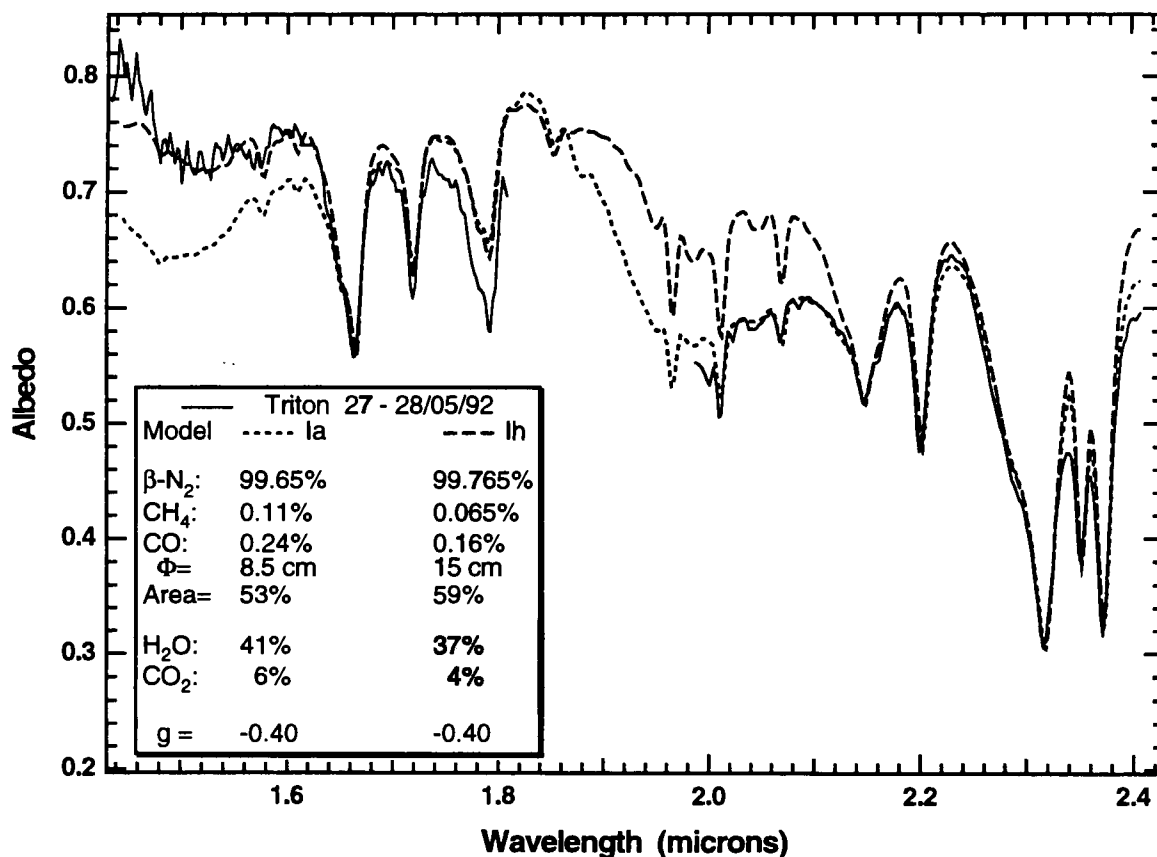
Des modèles numériques de transfert optique dans une surface composée de grains

ont été développés pour permettre le calcul de la **réflectance spectrale bidirectionnelle de surfaces solides** en fonction, d'une part des angles d'éclairement et d'observation, et d'autre part, des paramètres physiques de la surface (propriétés optiques des matériaux, taille des grains, rugosité de la surface, ...).

Dans un premier temps, nous avons amélioré le modèle de Hapke en calculant rigoureusement les fonctions de Chandrasekhar relatives au transfert radiatif dans une couche d'épaisseur optique infinie. Nous prenons en compte une éventuelle anisotropie de diffusion du milieu, pour la diffusion multiple (le milieu est considéré isotrope pour cette diffusion dans le modèle de Hapke). Dans le cas des glaces où la diffusion multiple est prépondérante, ces améliorations conduisent à des changements très importants sur les spectres simulés. Dans un deuxième temps, nous avons mis au point un modèle calculant la réflectance bidirectionnelle d'un milieu constitué de deux couches de caractéristiques optiques différentes : une couche d'épaisseur optique finie reposant sur une couche infinie. Comme le précédent modèle, il tient compte d'une anisotropie éventuelle de la diffusion mul-

tiplé. Ces modèles utilisent directement les constantes optiques des matériaux mesurés en laboratoire. Une répartition géographique (latitude et longitude) de composition et de texture peut être prise en compte dans le calcul des albédos hémisphériques.

Une première méthode semi-empirique d'**inversion des spectres** a été mise au point (sur CRAY- IDRIS) afin de permettre le calcul rapide des proportions relatives du mélange moléculaire ( $N_2$ ,  $CH_4$ ,  $CO$ ) qui recouvre une partie de la surface de Triton. Ce modèle est actuellement appliqué à l'analyse quantitative des spectres de Triton (Fig. 4.5), Pluton et Io (cf. II.2.3) en utilisant les constantes optiques des différentes glaces ( $N_2$ ,  $CH_4$ ,  $CO_2$ ,  $CO$ ,  $SO_2$ , mélanges) mesurées au laboratoire (cf. II.2.1.1). Une seconde méthode d'inversion de spectres a été mise au point pour les surfaces de glace  $H_2O$  et appliquée à des mesures de laboratoire de la réflectance spectrale hémisphérique-directionnelle de diverses neiges de caractéristiques géométriques bien connues (mesures du CEN). Une étude est en cours sur les relations entre le rayon des grains et les paramètres de diffusion déduits du modèle et le rayon convexe moyen mesuré directement sur les grains.



**Figure 4.5 :**

Modélisation du spectre infrarouge de Triton à l'aide d'un mélange moléculaire de  $N_2$ ,  $CH_4$  et  $CO$  solide à 38 K, et de surfaces distinctes de glaces de  $CO_2$  et de  $H_2O$ . Un problème d'intensité de la bande à 1,5 microns de  $H_2O$  reste non résolu et une large absorption autour de 1,8  $\mu m$  reste non-identifiée. (Douté et al., en préparation)

### II.2.2 Modélisation des transports de volatils à la surface de corps glacés.

(A. Benchkoura, B. Schmitt, J. Klinger)

Ce modèle numérique permet d'étudier le transport de volatils et leur répartition géographique à la surface de corps glacés (Triton et Pluton en particulier), en fonction du temps, des cycles saisonniers et de la latitude. Le but de ce modèle est de comprendre la distribution actuelle des volatils (Images de Voyager 2 pour Triton), son évolution à court terme (suivi annuel par observations spectroscopiques) et à long terme. Il devrait aider, entre autre, à une meilleure interprétation des spectres hémisphériques de Triton et Pluton en terme de répartition géographique des volatils. Nous y avons introduit le traitement de l'évaporation et de la condensation de mélanges de glaces ( $N_2$ ,  $CH_4$  et  $CO$ ) afin d'étudier les processus de différenciation chimiques à la surface de Triton et Pluton. Pour Triton, quatre zones principales sont mises en évidence : les calottes polaires, les zones avec couverture saisonnière, la zone équatoriale constamment dégarnie et une zone particulière au pied des calottes, fortement concentrée en méthane (Fig. 4.6) (Benchkoura et al., en préparation). Nous avons ensuite introduit dans le

modèle la transition de phase  $\alpha - \beta$  de l'azote solide, un flux géothermique et la conduction thermique dans le substrat et la couche de glace. Nous travaillons actuellement à trouver un moyen numérique pour traiter de façon réaliste la différenciation chimique en phase solide de  $N_2$ ,  $CH_4$  et  $CO$  au cours de l'évaporation (cf II.2.1.3).

### II.2.3 Analyse des spectres de surfaces

(B. Schmitt, E. Quirico, S. Douté)

Une analyse spectroscopique, par comparaison des fréquences et des intensités des absorptions mesurées dans les spectres astronomiques avec celles mesurées en laboratoire, est d'abord effectuée pour identifier les molécules à l'origine des bandes d'absorption, déterminer la nature des solides présents (corps purs, mélanges, phase, ...) et extraire des informations sur l'état physico-chimique (composition, température, ...). L'analyse fine se fait grâce à la modélisation du spectre à l'aide des constantes optiques des différentes glaces mesurées au laboratoire dans les conditions physiques adéquates. Elle permet de déterminer la composition des mélanges (fraction molaire) et la répartition des différents solides (horizontale ou verticale) et d'affiner les informations physico-chimiques tirées de l'analyse spectroscopique.

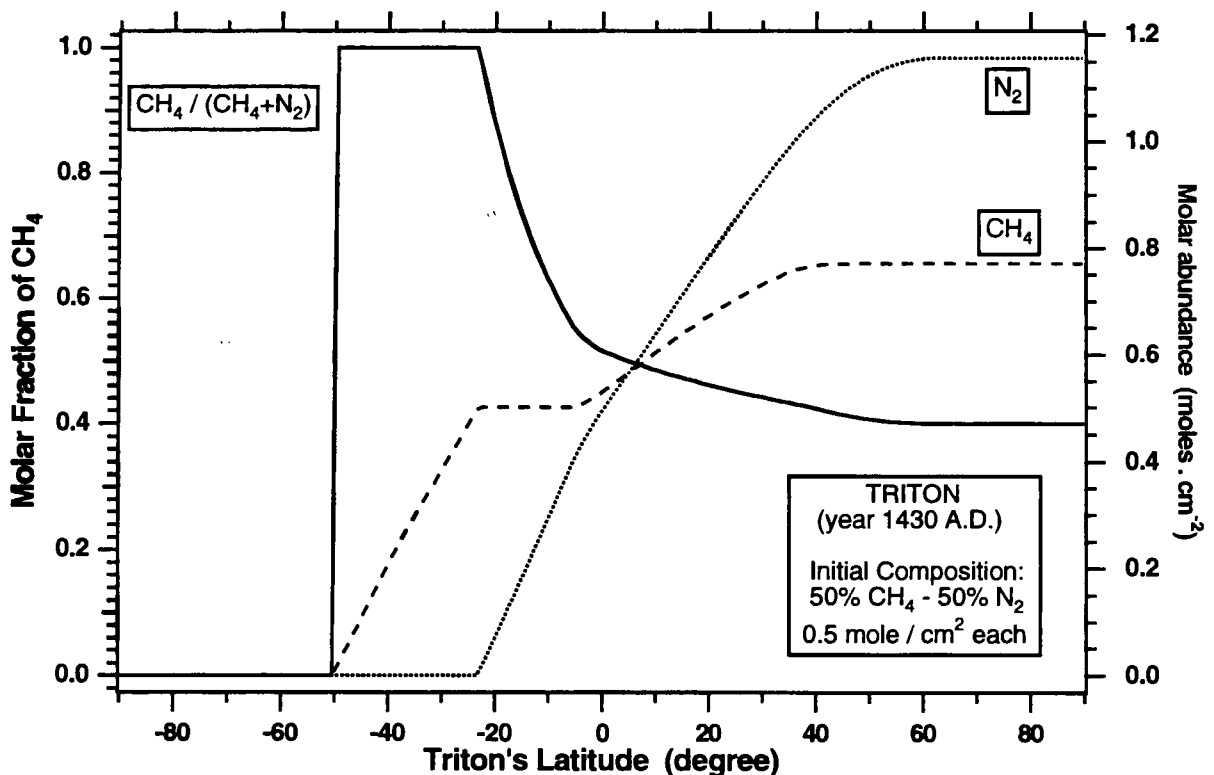


Figure 4-6 :

Différenciation du méthane et de l'azote sur Triton (en fonction de la latitude) au cours des transports saisonniers de volatils (modèle). Les traits fins donnent les quantités de  $CH_4$  et  $N_2$  (moles/cm<sup>2</sup>). Le trait plein donne la fraction molaire de  $CH_4$  dans le mélange. On observe nettement une zone de  $CH_4$  pur au pied de la calotte (entre -50° et -20° de latitude) (Benchkoura et al. 1995, en préparation).

### II.2.3.1 Triton

(avec C. de Bergh du DESPA ; D.P. Cruikshank de NASA Ames, USA)

Nous travaillons sur plusieurs spectres infrarouges de Triton à moyenne et haute résolution (UKIRT 1991 à 1995). Nous avons identifié le CO et le CO<sub>2</sub> solide à la surface de Triton. Une première analyse détaillée des spectres de 1992 a permis de préciser l'état et l'abondance de l'azote, du méthane, du CO et de CO<sub>2</sub>, la phase cristalline de N<sub>2</sub>, et la température de la surface (Cruikshank et al. 1993, Grundy et al. 1993, Quirico et Schmitt 1995). Nous modélisons actuellement ce spectre pour rechercher la trace d'autres molécules potentielles et résoudre certaines contradictions apparentes sur la phase cristalline de l'azote et la température de la surface de Triton. Cette modélisation couplée aux mesures de laboratoire vient de nous permettre d'identifier H<sub>2</sub>O à l'état amorphe sur Triton. (Fig. 4.5).

### II.2.3.2 Pluton

(avec C. de Bergh du DESPA ; T.C. Owen de l'IFA, Hawaii, USA)

Nous travaillons sur des spectres similaires à ceux de Triton (UKIRT 1992 à 1995). Nous avons identifié le CO et N<sub>2</sub> solide à la surface de Pluton. De la même manière, l'analyse des spectres a permis de préciser l'état, la phase, l'abondance et la température de l'azote, du méthane et du CO (Owen et al. 1993, Quirico et Schmitt 1995). Nous avons aussi mis en évidence la présence d'une ségrégation du méthane en surface (fine couche riche en méthane recouvrant du méthane dilué dans l'azote). Une modélisation est en cours pour tenter de quantifier ce phénomène et ses variations spatiales (avec la longitude).

### II.2.3.3 Titan

(avec A. Coustenis du DESPA, R. Samuelson de la NASA, R. Khanna, U. Virginia)

Nous avons cherché à identifier des corps condensés (aérosols, nuages) dans l'atmosphère de Titan en réanalysant les spectres mesurés par le spectromètre IRIS (Voyager 2) à l'aide de mesures en laboratoire des spectres infrarouge moyen et lointain (4000-50 cm<sup>-1</sup>) de plusieurs hydrocarbures à l'état solide et liquide (CH<sub>4</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>, C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>). D'autres solides comme la glace H<sub>2</sub>O amorphe et cristalline ont aussi été étudiés. Raj Khanna a effectué les mesures sur plusieurs nitriles. Cette étude permet de suggérer la présence de C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>, HCN et H<sub>2</sub>O à l'état solide dans l'atmosphère de Titan et de confirmer celle de HC<sub>3</sub>N (Coustenis et al. 1995, en préparation).

Nous participons aussi avec le DESPA à un programme d'observation de Titan dans les fenêtres de son atmosphère pouvant révéler des informations spectroscopiques sur sa surface. Nous travaillons également avec le DESPA à la préparation des spectromètres de l'instrument DISR de la sonde Huygens (mission Cassini) qui sondera l'atmosphère et la surface de Titan (Co-I: B. Schmitt).

### II.2.3.4 Io

(avec E. Lellouch et C. de Bergh du DESPA, Obs de Meudon, J.P. Maillard de l'IAP)

Nous avons attribué les trois absorptions observées vers 2 µm dans les spectres à haute résolution de la surface du satellite Io (CFH 1991, 1992) à différents modes de combinaison de la molécule SO<sub>2</sub> à l'état solide, démontant ainsi l'identification de CO<sub>2</sub> et H<sub>2</sub>S sur Io. L'analyse détaillée des positions et largeurs des bandes suggère l'existence d'un gradient de température sous la surface.

Trois modèles différents de la surface de Io ont été proposés pour expliquer le désaccord apparent entre les variabilités avec la longitude des bandes à 4.07 µm, à 2.125 µm et dans l'UV. Ces modèles proposent une variation avec la longitude, soit de la taille des grains, soit du flux thermique infrarouge de Io, soit d'une stratification de la taille des grains (Schmitt et al. 1994).

### II.2.3.5 Mars

Nous avons débuté une étude expérimentale des propriétés spectroscopiques du CO<sub>2</sub> et de H<sub>2</sub>O solide pour préparer l'analyse des données que fournira le spectro-imageur OMEGA (Co-I: B. Schmitt) qui sera embarqué sur la sonde russe MARS 96 (lancement fin 1996).

## II.3 LES GRAINS INTERSTELLAIRES

De nombreuses questions sont actuellement posées sur la composition et l'évolution des manteaux de glaces des grains inter- et circumstellaires. Les spectres infrarouge des grains recèlent de grandes quantités d'informations sur leur nature et leur composition, ainsi que sur leur température, leur taille et leur structure. L'analyse d'observations télescopiques ou satellitaires peut permettre de déterminer tout ou partie de ces caractéristiques.

Avec pour but principal la préparation de l'analyse des observations de l'observatoire spatial infrarouge ISO (2 propositions acceptées), nous avons concentré nos efforts depuis 1991

sur une étude détaillée des propriétés optiques des glaces dans l'IR moyen et lointain (II.3.1) et sur la détermination précise de leurs constantes optiques (II.3.2). Un petit programme sur l'évaporation des glaces a aussi été mené en parallèle (voir II.2.1.3.a).

### II.3.1 Mesure des propriétés optiques dans l'infrarouge (2 - 200 $\mu\text{m}$ ) de glaces.

(F. Trotta, B. Schmitt avec L. d'Hendecourt de l'IAS)

Les constantes optiques des molécules à l'état solide constituent une donnée 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.

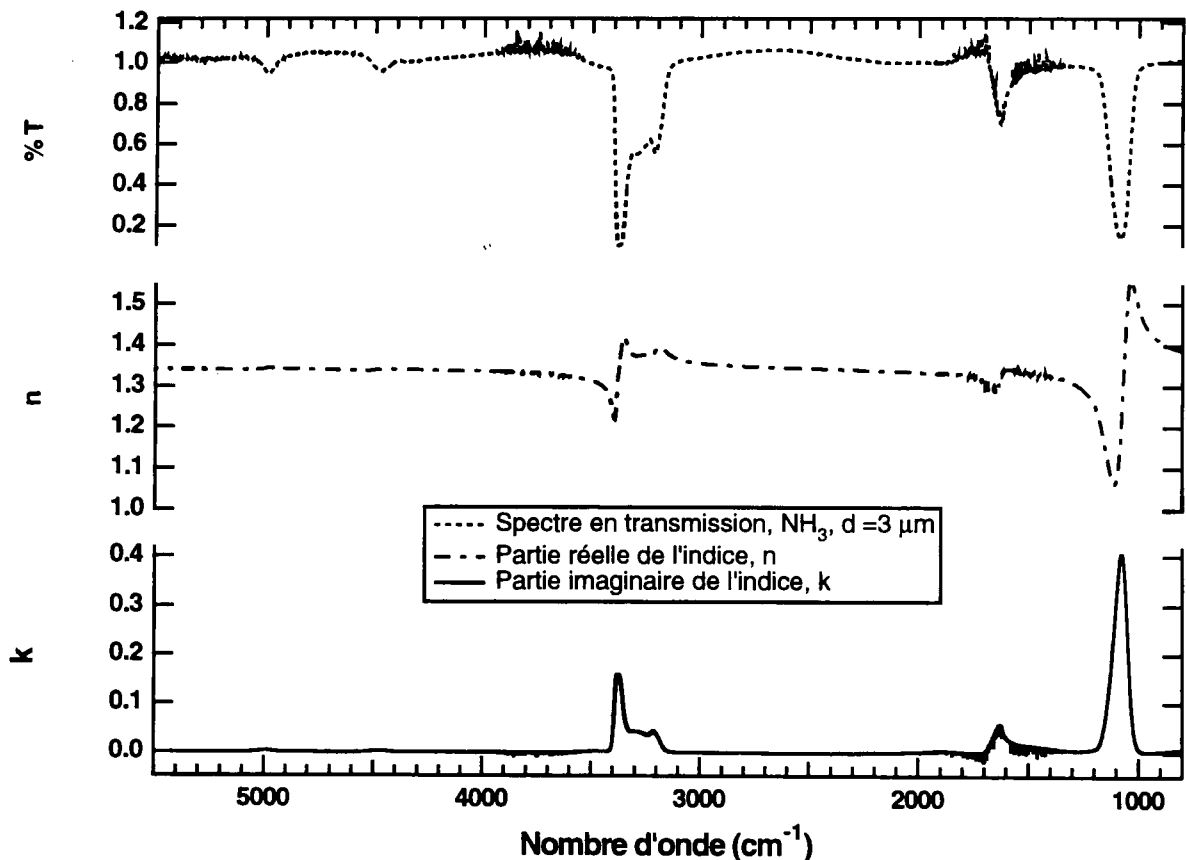
Nous avons débuté en 1991 un programme

**d'étude des propriétés spectroscopiques des glaces dans l'infrarouge moyen et lointain (2-200  $\mu\text{m}$ )** en vue de la détermination précise de leurs constantes optiques à partir d'une analyse du type Kramers-Kronig (cf. II.3.2). Les différentes molécules à l'état solide, dont l'étude des spectres moyen IR (2 - 25  $\mu\text{m}$ ) en fonction de la température a été entreprise (Fig. 4.7), sont :

- $\text{N}_2$  et  $\text{H}_2$ ;  $\text{CO}$  et  $\text{CO}_2$ ;  $\text{SO}_2$  et  $\text{H}_2\text{S}$  ;
- $\text{CH}_4$ ,  $\text{C}_2\text{H}_6$ ,  $\text{C}_2\text{H}_4$  et  $\text{C}_3\text{H}_8$  ;
- $\text{H}_2\text{O}$  cristallin et amorphe,  $\text{NH}_3$ .

Des mesures ont aussi été effectuées dans l'**infrarouge lointain** (15 - 200  $\mu\text{m}$ ) sur  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{NH}_3$ , et  $\text{SO}_2$  solides et sur les mélanges  $\text{H}_2\text{O}:\text{NH}_3$  (hydrates).

Pour l'analyse des spectres-d'émission de grains circumstellaires, une étude spécifique a été conduite sur les effets de la température et de l'histoire thermique sur les spectres IR lointain de la glace  $\text{H}_2\text{O}$  pure. Cette étude met en évidence plusieurs



**Figure 4-7 :**

Spectre de  $\text{NH}_3$  (15 K) en transmission dans le moyen infrarouge et constantes optiques ( $n,k$ ) calculées par le modèle numérique (Trotta et Schmitt 1995, en préparation).

effets irréversibles sur la position, la forme et l'intensité des bandes vers 45 et 66  $\mu\text{m}$  lors du recuit de glace amorphe condensée à 30 K. Des variations réversibles avec la température sont aussi observées. Ces effets ont été quantifiés en fonction de la température maximale subie et de la température effective de la glace.

Nous avons aussi entrepris une **étude spécifique** des bandes d'absorption de  $\text{H}_2$  et HD solide à l'état pur et piégés dans la glace  $\text{H}_2\text{O}$ . Cette étude a montré que l'intensité des bandes de  $\text{H}_2$  solide est suffisante pour permettre l'observation et l'identification de cette molécule. Quelques mois après le début de cette étude, une autre équipe (NASA-Ames) faisait la première observation de  $\text{H}_2$  apparemment piégé dans un manteau de glace  $\text{H}_2\text{O}$ . Des programmes d'observation sont en cours pour l'observer dans d'autres objets plus froids.

### 11.3.2 Calcul des constantes optiques Programme Kramers-Kronig itératif (F. Trotta, B. Schmitt)

Nous avons développé une version évoluée d'un **programme d'analyse spectrale** de type Kramers-Kronig pour la

**détermination des constantes optiques** à partir d'une série de spectres en transmission d'échantillons de glaces d'épaisseurs croissantes. Ce programme prend en compte le transfert optique complet du système échantillon-support, calcule les interférences spectrales et les utilise pour affiner de façon itérative la détermination de l'épaisseur et des indices spectraux réels et imaginaires ( $n, k$ ) de l'échantillon. Nous avons aussi pris en compte dans le modèle deux artefacts expérimentaux (dépôt arrière et inhomogénéité d'épaisseur de l'échantillon), dont nous avons mis en évidence la forte influence sur les spectres (ils induisent 10 à 40 % d'erreur sur le calcul de  $n$  et  $k$ ). Une cohérence à mieux que 2 % près sur les valeurs de  $n$  et  $k$  obtenues à partir d'échantillons d'épaisseurs variables est ainsi obtenue. La cohérence sur les épaisseurs, déduites des interférences laser et spectrales, est aussi ramenée à moins de 2 % (Trotta et Schmitt, en préparation).

Cet algorithme est actuellement appliqué à l'analyse des mesures en transmission de solides purs. Des résultats précis ont déjà été obtenus avec  $\text{NH}_3$  (Fig. 4.7),  $\text{CH}_4$  et  $\text{SO}_2$ .

## III COLLABORATIONS ET CONTRATS

### III.1 COLLABORATIONS INTERNATIONALES

- NASA Ames Research Center, Moffet Field, USA (D.P. Cruikshank, J. Stansberry, T. Roush)
- Institute for Astronomy, Univ. of Hawaii, USA (T.C. Owen)
- Lunar and Planetary Laboratory, University of Arizona, Tucson, USA (W. Grundy, M.G. Tomasko, R. Yelle)
- NASA Goddard, Washington, USA (R. Samuelson)
- University of Virginia, Washington, USA (R. Khanna)
- Laboratorio di Spettroscopia Molecolare, Florence, Italie (R. Bini, P.R. Salvi),
- D.L.R., Institute for Planetary Exploration, Berlin, RFA (A. Oehler, G. Arnold)
- Istituto di Astrofisica Spaziale, Rome, Italie (A. Coradini)
- Laboratory Astrophysics, Leiden, Pays-Bas (W. Schutte, J.M. Greenberg)

-Max Planck Institute, Lindau-Katlenburg, RFA (U. Keller)

Un étudiant américain, Will Grundy du LPL (Tucson, Arizona) est venu 2 mois en 1992 dans l'équipe sur un programme de mesures spectroscopiques pour l'étude de Triton et Pluton.

Plusieurs scientifiques étrangers sont venus présenter un séminaire lors de courts séjours de collaboration (T. Owen, R. Samuelson, R. Bini)

E. Quirico a fait un séjour de 2 mois en 1995 au Laboratorio di Spettroscopia Molecolare, pour le développement d'une collaboration avec R. Bini sur l'interprétation de données spectroscopiques.

#### Participation à des missions spatiales :

- + Mission «Cassini/Huygens» vers le système de Saturne (ESA/NASA) : Spectromètres visible-infrarouge de l'instru-

ment DISR sur la sonde Huygens (lancement 1997 ; avec le LPL, Univ. Arizona, USA ; le DESPA, Obs. de Meudon ; le MPI, Lindau, RFA).

+ Mission «Mars 96» (CNES/IKI):  
Spectro - imageur visible - infrarouge OMEGA sur l'orbiteur (lancement fin 1996 ; avec le DESPA, Obs. de Meudon ; l'IAS, Orsay ; l'IAS Rome, Italie)

+ Mission «Rosetta» vers la comète P/Wirtanen (ESA avec NASA/CNES):

. Orbiteur : Spectro-imageur Vis-IR et spectromètre IR haute résolution, Expérience de transmission d'ondes radar, expérience de cartographie thermique «THEMA».

. Atterrisseur Champollion: sonde thermique, spectromètre infrarouge, spectromètre gamma. (avec divers laboratoires français, allemand, italiens, anglais, américains,...)

### III.2 COLLABORATIONS NATIONALES

-Département de Recherches Spatiales (DESPA), Observatoire de Meudon (C. de Bergh, E. Lellouch, A. Coustenis, B. Bézard, J. Rosenqvist, D. Gautier)

-Département de Radioastronomie Décimétrique, Obs. de Meudon (J.

Crovisier)

-Service d'Aéronomie du CNRS, Verrières (A-C. Levasseur-Regourd),

-Laboratoire Physico-chimie de l'Environnement, Univ. Créteil (F. Raulin, D. Toublanc)

-Observatoire de Grenoble (T. Forveille),

-Bureau des Longitudes, Paris (P. Descamps),

-Laboratoire de Modélisation Dynamique, Paris (F. Forget, F. Hourdin)

-Institut d'Astrophysique de Paris (J.P. Maillard, A. Omont),

-Groupe de Spectrométrie Moléculaire et Atmosphérique, Université de Reims (A. Barbe),

-Institut d'Astrophysique Spatiale, Orsay (L. d'Hendecourt, J-P. Bibring, O. Forni)

-Centre d'Etude de la Neige, Saint Martin d'Hères (C. Sergent)

### III.3 CONTRATS

-Programme National de Planétologie de l'INSU (1991-1995)

-GdR «Physico-chimie des Molécules et Grains Interstellaires» (1991-1995)

-Programme National de Télédétection Spatiale de l'INSU (1995)

-CNES «Recherche spatiale» DISR/Cassini (1992-1995)

-CNES «Recherche spatiale» VIRTIS/Rosetta (1994-1995)

-Thomson-CSF, département MIR (contrat

## IV ACTIVITES DE FORMATION

Benchkoura A., Stage de DEA Astrophysique et Milieux Dilués (UJF Grenoble) et Thèse en cours: Modélisation numérique du transport de volatils et de la différenciation chimique à la surface de Triton et Pluton (encadrement : Schmitt B. et Klinger J.) 1992/1995.

Bouziani N., Thèse en cours (encadrement : Klinger J.), 1991/1995.

Cabot H., Thèse en cours (encadrement : Klinger J.), 1993/1995.

de la Chapelle S., Stage de Maîtrise de Chimie-Physique de l'UJF Grenoble, et Stage de 2ème année de l'école des Mines de St Etienne (encadrement : Schmitt B.) 1991/1992.

Delevaux E., Stage de Licence de Chimie de

l'UJF Grenoble (encadrement : Schmitt B.) 1991.

Douté S., Stage de DEA Méthodes Physiques en Télédétection (Paris VII) et Thèse en cours: Modélisation numérique de la réflectance spectrale des surfaces glacées du système solaire (encadrement : Schmitt B.) 1993/1995.

Enzian A., Stage de DEA MMGE (Modèles des noyaux de comètes: Analyses de sensibilité et modèle Monte-Carlo de la diffusion moléculaire dans un milieu poreux, non-isotherme) et Thèse en cours (encadrement : Klinger J.) 1992/1995.

Furlan B., Projet de fin d'études ENS d'Hydraulique et de Mécanique de Grenoble (encadrement : Klinger J.) 1994.

Gontier C., Stage de Licence de Chimie-Physique



de l'UJF Grenoble (encadrement : Schmitt B.) 1992.  
Izier C., Stage de Licence de Chimie-Physique de l'UJF Grenoble (encadrement : Schmitt B.) 1992.

Maître L., Stage de Magistère de Physique de l'UJF Grenoble, (encadrement : Schmitt B.) 1992.

Majolet S., Stage de DEA Astrophysique et Milieux Dilués (Ortho/para de la molécule d'eau dans la comète de Halley) et Thèse en cours (encadrement : Klingner J.) 1992/1995.

Quirico E., DEA Sciences et Structure des Matériaux (UJF Grenoble) 1991. Thèse en cours: Spectroscopie proche infrarouge de solides

moléculaires pour l'interprétation des spectres de Triton et Pluton (encadrement : Schmitt B.) 1993/1995.

Randon B., Stage de 3ème année d'école E.N.S.P.M. (Marseille), (encadrement : Schmitt B.) 1992.

Trotta F., Thèse Astrophysique et Milieux Dilués (UJF Grenoble) en cours: Détermination des constantes optiques de glaces dans l'infrarouge moyen et lointain - Application aux grains interstellaires (encadrement : Schmitt B.), 1993/1995.

Zanolin A., Stage de Maîtrise de Physique et Applications (Orsay - Paris XI), (encadrement : Schmitt B.), 1994.

## V. PUBLICATIONS

### V.1 REVUES A COMITE DE LECTURE

Cabot H., A. Enzian, J. Klingner, and S. Majolet. Complementary studies on the unexpected activity of comet Schwassmann-Wachmann 1. *Planetary and Space Science*, Soumis, 1995.

Cruikshank D.P., T.L. Roush, T.C. Owen, T.R. Geballe, C. de Bergh, B. Schmitt, R.H. Brown, and M.J. Bartholomew. Ices on the surface of Triton. *Science*, **261**, 742-745, 1993.

Cruikshank D.P., T.L. Roush, T.C. Owen, E. Quirico, and C. de Bergh. The surface compositions of Triton, Pluto and Charon. In *Solar System Ices*, (B. Schmitt, C. de Bergh, and M. Festou eds.) Kluwer Academic Publ., Dordrecht, *Astrophys. Space Sci. Lib.*, Soumis, 1995.

Espinasse S., J. Klingner, C. Ritz, and B. Schmitt. Modeling of the thermal behavior and of the chemical differentiation of cometary nuclei. *Icarus*, **92**, 350-365, 1991.

Grundy W., B. Schmitt, and E. Quirico. The temperature dependent spectra of and nitrogen ice with application to Triton. *Icarus*, **105**, 254-258, 1993.

Owen T.C., T.L. Roush, D.P. Cruikshank, J.L. Elliot, L.A. Young, C. de Bergh, B. Schmitt, T.R. Geballe, R.H. Brown, and M.J. Bartholomew. Pluto: Surface ices and atmospheric composition. *Science*, **261**, 745-74, 1993.

Quirico E., and B. Schmitt. Near infrared spectroscopy of simple hydrocarbons and carbon oxides: implication for Triton and Pluto. *Icarus*. Soumis, 1995.

Quirico E., B. Schmitt, R. Bini, and P.R. Salvi. The spectroscopy of pure ices: Physical aspects and astrophysical implications. *Planetary and Space Science*. Soumis, 1995.

Roessler K., G. Eich, J. Klingner, and P. Trimborn. Changes of natural isotopic abundances in the KOSI comet simulation experiments. *Ann. Geophysicae* **10**, 232-234, 1992.

Schmitt B., Thermal and physico-chemical processes in cometary nuclei. In *Interrelations between Physics and Dynamics for Minor Bodies in the Solar System*, (D. Benest and C. Froeschlé eds.), Editions Frontières, pp. 265-307, 1992.

Schmitt B., C. de Bergh, E. Lellouch, J.P. Maillard, A. Barbe, and S. Douté. Identification of three absorption bands in the two micron spectrum of Io. *Icarus*, **111**, 79-105, 1994.

Schmitt B., E. Quirico, F. Trotta, W. Grundy and R. Khanna. The optical properties of ices from the UV to the infrared. In *Solar System Ices*, (B. Schmitt, C. de Bergh, and M. Festou eds.) Kluwer Academic Publ., Dordrecht, *Astrophys. Space Sci. Lib.*, Soumis, 1995.

Stansberry J.A., J.R. Spencer, B. Schmitt, A. Benchkoura, R.V. Yelle and J.I. Lunine. A model

for the overabundance of methane in Pluto's atmosphere. *Planetary and Space Science*, Soumis, 1995.

## V.2 AUTRES PUBLICATIONS

De Bergh C., and B. Schmitt. Pluton, ses glaces, son atmosphère. *La Recherche*, 264, 442-443, 1994.

Enzian A., H. Cabot, J. Klinger et S. Majolet. Modelling of the gas activity of a dust covered rotating comet nucleus. in «*The cosmic dust connection*», ed. J.M. Greenberg, Kluwer Academic Publishers. Sous presse, 1994.

Klinger J., S. Majolet and A. Enzian. Active zones on comets - a heretical view. *Proceedings of the 8. Kometenwerkstatt*, Rüdesheim, Germany, June 1 to 3, 1993, p. 176, 1993.

Lellouch E., A. Coustenis, J.P. Maillard, K. Strong, N. Deme, C. Griffith, and B. Schmitt. The Spectrum of Titan in the 1.06 and 1.28 micron windows. In *Proceeding of the Symposium on Titan, ESA Spec. Publ., SP-338*, 353-358, 1992.

Majolet S., Enzian A., Cabot H, Klinger J. 3D. Modelling of the surface activity of a comet nucleus. In «*The cosmic dust connection*», ed. J.M. Greenberg, Kluwer Academic Publishers. Sous presse, 1994.

Schmitt B., E. Quirico and E. Lellouch. Near infrared spectra of potential solids at the surface of Titan. In *Proceeding of the Symposium on Titan, ESA Spec. Publ., SP-338*, 383-388, 1992.

Schmitt B., R.J.A. Grim, J.M. Greenberg, and J. Klinger. Crystallization of water rich amorphous mixtures. In *Physics and Chemistry of Ice*, (N. Maeno and T. Hondoh eds.) Hokkaido Univ. Press, Sapporo, pp. 344-348, 1992.

Schmitt B., S. Espinasse, and J. Klinger. A possible explanation of the outburst of comet P/Halley at 14 astronomical units from the Sun. in *Proceeding of the workshop on the Activity of Distant Comets*, Lengries, 124-132, 1992.

Schmitt B., E. Quirico and C. de Bergh. Les surfaces de Triton et de Pluton. in *Images de la Physique 1993*, Presses du CNRS, p. 126-133, 1993.

Schmitt B., Physical and chemical processes in icy grain mantles. In: *Molecules and Grains in Space*, (E. Nenner Ed.). American Institute of Physics Ed., AIP Conf. Proceedings, 312, 735-757, 1994.

Trotta F., and Schmitt. B. Determination of the optical constants of solids in the mid and far infrared. In: *Molecules and Grains in Space*, (E. Nenner Ed.). American Institute of Physics Ed., AIP Conference Proceedings, 312, 759-765, 1994.

Trotta F. et Schmitt B. Determination of the optical constants of solids in the mid infrared. In «*The cosmic dust connection*», ed J.M. Greenberg, Kluwer Academic Publishers. Sous presse, 1994.



## Chapitre 5

### GLACIERS TEMPERES

**EQUIPE GLACIERS TEMPERES**

Responsable : Louis REYNAUD

**COMPOSITION DE L'EQUIPE :**

	GLACIERS ALPINS (1)	RADIOACTIVITE (2)
Chercheurs CNRS		
Enseignants Chercheurs	L. REYNAUD (MC1) M. VALLON (P)	
Ingénieurs Chercheurs		J.F. PINGLOT (IR2) M. POURCHET (IE2)
Doctorants		N. PREISS
DEA	O. GAGLIARDINI	
Autres chercheurs		B. LE FAUCONNIER (CDD)
Techniciens	C. VINCENT (IE2)	

**PRINCIPAUX AXES DE RECHERCHE :**

GLACIERS ALPINS	RADIOACTIVITE
Suivi de l'évolution climatique Analyse des fluctuations glaciaires Surveillance du risque naturel lié aux glaciers	Détermination des bilans de masse des glaciers et des retombées de radioéléments au Svalbard Radioactivité dans les Alpes Sédimentation lacustre Flux des radioéléments Datation des couches de cendre volcanique au Glacier Hurd (Péninsule Antarctique)

**PRINCIPAUX CONTRATS :**

Commission des Communautés Européennes (1, 2)  
 Institut Français pour la Recherche et la Technologie Polaires (2)  
 Région Rhône Alpes (2)  
 Contrats d'expertise pour les Alpes Françaises (1)

**PUBLICATIONS :**

Types de publication	fin1991	1992	1993	1994	1995 partiel
Revue à Comités de lecture	3	1	1	6	1
Symposiums		3	3	8	
Autres	2	1	1	1	1

## I OBJECTIFS GENERAUX

Depuis 1993, l'activité de l'équipe recouvre les travaux conduits dans les Alpes (étude des fluctuations glaciaires et de l'évolution climatique) et ceux s'appuyant sur l'analyse de la radioactivité dans les neiges récentes et dans les sédiments lacustres.

### I.1 GLACIERS ALPINS

#### I.1.1 Fluctuations glaciaires

Les fluctuations glaciaires sont généralement la conséquence des variations du métabolisme des glaciers, c'est-à-dire de leur bilan de masse, au cours des années ou des décennies antérieures (si l'on omet le cas d'un assez faible pourcentage de glaciers originaux montrant des oscillations de grande amplitude, qu'il s'agisse de «surges» ou d'instabilités liées à l'existence d'un front marin ou lacustre). Comme il n'existe pas encore de théorie vraiment fiable permettant de relier fluctuations des bilans de masse et fluctuations glaciaires, que ce soit pour prévoir l'avenir ou pour reconstituer le passé, de longues séries d'observations sont nécessaires pour tester les théories et, à défaut, établir des relations empiriques.

#### I.1.2 Evolution climatique

Les fluctuations des bilans de masse sont un indicateur des variations des échanges de masse et d'énergie à la surface de la planète dans des régions (hautes altitudes) qui ne sont que de manière très marginale affectées par l'activité humaine. Ces régions sont aussi celles où le réseau d'observation est le moins dense. Mais pour qui désire

suivre l'évolution des flux d'énergie à la surface du globe, la caractéristique la plus intéressante des glaciers tempérés est que leur température est, dans une très large plage de conditions climatiques allant de celle du Svartisen à celle du Mont Carstenz, la température de fusion de la glace. Toute modification du bilan énergétique ne peut donc se traduire ni par une variation de température de la surface, ni par une variation de la température de la masse du glacier. Elle se manifesterait par un changement de phase. L'ordre de grandeur de la réponse des glaciers tempérés aux perturbations du bilan énergétique à leur surface (fusion d'une couche de glace d'environ 10 cm d'épaisseur pour une augmentation des apports de  $1 \text{ watt/m}^2$ ) rend la détection de ces perturbations probablement beaucoup plus facile que les modestes variations de température éventuellement observables sur des éléments du système climatique dont la réponse peut être plus complexe.

L'équipe a, en outre, vocation à la surveillance de l'évolution du risque naturel lié aux glaciers (formation et ruptures de poches d'eau, écroulements de langues terminales...). Le risque neige et avalanches qui relève d'une problématique totalement différente est du ressort d'autres organismes.

### I.2 RADIOACTIVITÉ

Le groupe d'analyse des faibles activités a pour vocation l'établissement des chronologies indispensables à toute analyse des taux de sédimentation glaciaires et lacustres ainsi que l'étude des flux de retombée des éléments radioactifs naturels et artificiels.

## II RÉSULTATS MAJEURS OBTENUS AU COURS DES QUATRE DERNIÈRES ANNÉES

### II.1 GLACIERS ALPINS

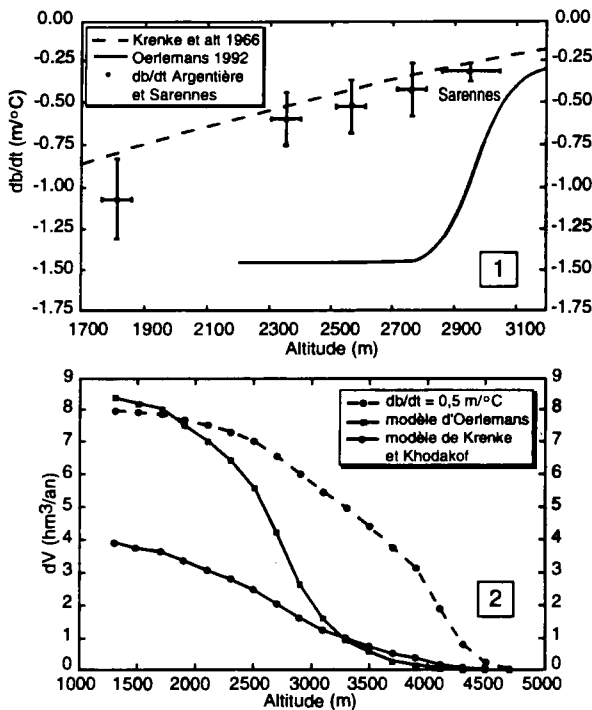
#### II.1.1 Les fluctuations des bilans de masse comme indicateur climatique (M. Vallon, L. Reynaud, C. Vincent)

La comparaison des bilans de masse de deux glaciers d'un même massif (St-Sorlin et Sarennes, distants de 5 kms) montre que, si les volumes des glaciers évoluent de manière très

différente (le glacier de Sarennes perd en moyenne  $600 \text{ kg de glace.m}^{-2}.\text{an}^{-1}$  et le glacier de St-Sorlin  $30 \text{ kg de glace.m}^{-2}.\text{an}^{-1}$  durant les 4 dernières décennies), leurs bilans centrés, calculés suivant la méthode proposée par Lliboutry (1974) présentent une évolution très similaire. Par ailleurs, L. Reynaud et A. Letreguilly avaient déjà montré (1989) que deux glaciers proches (Blue Cascade et South Cascade) pouvaient connaître des variations de volumes de signe

opposé pour des bilans centrés similaires. Néanmoins, les bilans centrés ainsi calculés ne sont représentatifs des variations climatiques dans le massif montagneux concerné, que pour une tranche d'altitude et un domaine restreint.

Nos travaux récents (article en préparation) ont montré, par une approche statistique, que la sensibilité du bilan de masse aux variations de température diminuait sensiblement avec l'altitude (Fig. 5.1). Les conséquences sur les variations de volume global d'un glacier en fonction de la température sont importantes. Pour le glacier des Bossons par exemple, un modèle linéaire de variation du bilan de masse donne une variation de volume deux fois plus élevée que celle d'un modèle compatible avec nos observations (Fig. 5.2). Ainsi, le rôle des glaciers tempérés sur l'élévation du niveau marin devra probablement continuer à être révisé à la baisse (Contrat européen Sea Level - 1993-1994).



Figures 5.1 et 2

- 1) Relation bilan de masse-température observée sur le glacier d'Argentière en fonction de l'altitude.
- 2) Variation de volume cumulée sur le glacier de Bossons pour une variation de température de  $1^{\circ}C$  et pour trois modèles différents.

En outre, on a montré que la connaissance de l'état de surface du glacier (albedo) était indispensable pour établir les relations entre variations de bilans et fluctuations climatiques. C'est ainsi que la forte corrélation entre variations de températures estivales et ablation peut disparaître pendant certaines décennies si l'on ignore

le terme d'albedo. Toute reconstitution de bilans de masse pour le siècle passé nécessite donc l'estimation de cette donnée.

Enfin, pour préciser la relation entre climat et bilan de masse, il apparaît nécessaire de distinguer les deux termes, ablation et accumulation. Depuis 1994, nous avons entrepris leur mesure sur trois glaciers pour lesquels nous disposons de longues séries d'observations : Argentière, St-Sorlin et Gébroulaz. Toutes ces données alimentent évidemment la base de données du W.G.M.S. (World Glaciers Monitoring Service).

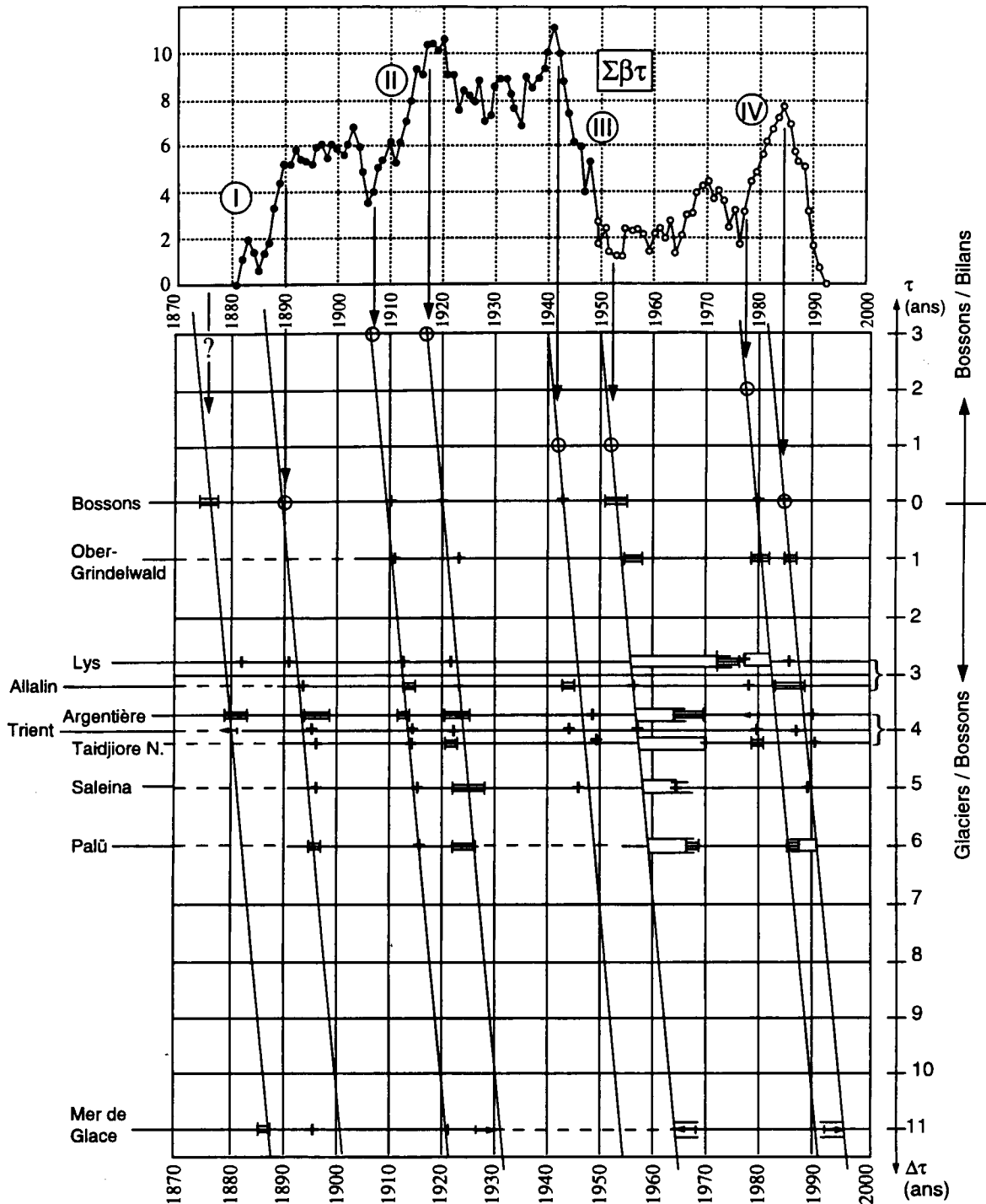
### II.1.2 Les fluctuations des fronts et leur signification

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

La réunion de 120 longues séries de relevés des fronts glaciaires portant sur une centaine d'années constitue une base de données où les glaciers ont été sélectionnés principalement en raison de leur continuité (relevés quasi annuels) et de la représentativité des différentes morphologies (glacier de cirque, vallées, avec ou sans chutes de séracs).

On a recherché l'explication des variations de longueur par les variations du bilan de masse glaciaire (la marque du climat sur le glacier constituant le signal d'entrée du système de fluctuation glaciaire) (Fig 5.3). L'existence d'une relation linéaire entre les variations de longueur d'une année et celles des bilans antérieurs n'est pas suffisante pour prédire l'évolution d'un glacier lorsqu'il se modifie trop fortement, comme par exemple sur ce dernier siècle, à la suite de la décennie 1940/1950 où les conditions de bilans de masse étaient très défavorables. Car, on peut mettre en évidence deux mécanismes linéaires, l'un caractéristique des avancées et l'autre des reculs. Néanmoins, les bons scores d'implication obtenus sur les périodes où le glacier fluctue modérément autour d'une position moyenne permettent de passer à l'application pratique de la prévision des changements de longueur sur quelques années (5 à 10). Ceci permet de répondre aux questions des aménageurs en leur apportant une aide à la décision.

Cette étude préliminaire, en dégagant une base de données solide, a exploré l'efficacité de relations linéaires pour traduire le mécanisme climat-glacier. On peut maintenant envisager de passer à des relations non linéaires susceptibles de mieux traduire la réalité.



**Figure 5.3 :**

**Temps de réponse des fronts de 10 glaciers.**

Les temps de réponse des fronts sont mesurés en pointant le début et la fin de quatre épisodes marqués du siècle.

**Bas de la figure :** les temps de réponse de 9 glaciers sont mesurés en référence à celui du glacier des Bossons à l'aide du début de la crue de 1910-1920. On vérifie ensuite si ce calage est justifié pour les autres événements. Alors que la grande majorité des glaciers ont une différence de temps de réponse par rapport au glacier des Bossons de 3 à 6 ans, le glacier de la Mer de Glace se marginalise très clairement en réagissant aux sollicitations climatiques 11 années après lui. Cela confirme la particularités de ce très grand glacier.

**Haut de la figure :** mesure du temps de réponse du front glaciers des Bossons par rapport aux bilans de Sarnes. Alors que le glacier des Bossons est le plus rapide à réagir aux sollicitations climatiques, son temps de réponse par rapport aux bilans de Sarnes varie entre 0 et 3 ans. Non seulement la mesure est précise à +/- 1 an mais il faut aussi imaginer que la fonction de transfert entre bilans et variations de front est large.

### **II.1.3 Glissement du glacier d'Argentière**

(L. Reynaud, C. Vincent)

Les captures d'eau sous glaciaire d' E.D.F. permettent d'accéder au lit rocheux. L'un de ces sites a été équipé d'un système de mesure de vitesse de glissement du glacier sur son lit. Nous disposons désormais de deux années et demi de mesures de déplacement horaire entre juin et décembre 1992. Si les dérapages importants observés au mois de juin étaient attendus, les accélérations mesurées à la fin du mois d'août et en novembre/décembre (plus originales) restent à analyser et à interpréter. L'instrumentation a malheureusement dû être stoppée en raison du risque de plus en plus marqué de chutes de blocs de glace sur ce site.

### **II.1.4 Etude d'un glacier couvert : Arsine**

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

L'étude du glacier d'Arsine depuis une décennie a permis de montrer :

- a) que l'ablation des langues de glace recouvertes, quasi invariable d'une année l'autre, dépendait fort peu des fluctuations interannuelles du climat, en particulier des conditions estivales. Les fluctuations des glaciers noirs sont essentiellement le résultat des conditions régnant en zone d'accumulation, cependant une fois clairement établie la fonction de transfert climat-bilan de masse pour ce type de glacier (notre série d'observations est actuellement encore trop courte pour le faire), l'analyse simultanée des fluctuations des glaciers blancs et noirs devrait permettre de remonter des fluctuations glaciaires aux fluctuations climatiques et non plus seulement aux fluctuations des bilans de masse ;
- b) que la dynamique des glaciers reposant sur une épaisse couche de moraine était sensiblement plus complexe que celle des glaciers s'écoulant sur un lit propre. Sur le glacier d'Arsine, les vitesses ont été divisées par 2 ou 3 suivant les points entre 1988 et 1991. Par ailleurs, des mesures préliminaires de déplacement en septembre 1994 semblent indiquer que la variabilité saisonnière de la vitesse peut être considérable.

### **II.1.5 Etude de la déformation de la glace dans un moulin**

(L. Reynaud, O. Steve)

L'opportunité de préciser ainsi facilement la loi de déformation directement par une expérimentation dans le corps du glacier, qu'il soit tempéré

(0°C) dans les Alpes ou bien légèrement froid (-2 à -5°C) sur les marges de l'Inlandsis groenlandais, semble séduisante. Peut-on utiliser les mesures réalisables dans les puits de moulins glaciaires qui eux s'étendent de la surface à quelques 100 à 180 m de profondeur (mais avec des sections droites de 5 à 30 m de diamètre) pour étudier la déformation de la glace ?.

En fait, la géométrie de ces puits s'écarte notablement d'une forme cylindrique avec laquelle l'expression canonique des contraintes et des déformations s'établit facilement dans tout le massif. C'est pourquoi il a été recherché dans quelle mesure les résultats avec une forme elliptique de section droite s'écartaient de ceux obtenus avec une approximation circulaire.

Il s'avère que si l'on peut obtenir les contraintes de déformations avec un matériau élastique, le calcul des expressions analytiques avec une loi de comportement de la glace plus réaliste, n'a pu aboutir et actuellement relève du calcul numérique.

Finalement, la géométrie de la cavité joue un grand rôle dans la distribution des contraintes et des déformations. Cette étude a montré qu'en entreprenant des mesures sur le terrain il convient de relever en détail la forme ainsi que le champ de déformation.

### **II.1.6 Etude de la dynamique d'un glacier froid à haute altitude : Le dôme du Goûter**

(L. Reynaud, C. Vincent)

L'étude de cette petite calotte glaciaire à haute altitude (4300 m) a été entreprise parallèlement à la réalisation de deux carottages profonds (126 et 140 m) jusqu'au lit rocheux (ces carottages devraient permettre de déterminer l'évolution de la chimie de l'atmosphère au cours des dernières décennies : Programme Alptrac, cf. chapitre glaciologie). Nous avons installé, durant ces deux dernières années, un réseau d'une quinzaine de balises (renouvelées environ tous les 4 ou 6 mois à cause de la très forte accumulation de neige observée à cette altitude) ; nous disposons ainsi de deux années de mesures d'accumulation et de vitesses en surface. L'analyse de ces résultats fait l'objet du stage de D.E.A. de O. Gagliardini en cours (juin 1995). Le principal résultat préliminaire est que, pour ces deux années, l'accumulation de neige estivale est très importante et dépasse même l'accumulation hivernale. Ce résultat inattendu, s'il ne peut être généralisé, ne devrait pas être sans incidence sur l'interprétation des profils obtenus le long de la carotte.



Du point de vue de la relation bilan de masse/climat, (§ II.1.1) il serait également très utile de poursuivre ces mesures ; malheureusement, l'accès du site, difficile et dangereux pour le piéton (chutes de pierres ou de séracs) est exclusivement possible à l'aide de moyens hélicoptérés onéreux.

### **II.1.7 Simulation numérique de l'écoulement du Dôme du Goûter (Mont-Blanc)**

(L.Reynaud, C.Vincent, O.Gagliardini, J.Meyssonnier...)

Consécutivement au carottage effectué sur le Dome du Goûter (4300 m), destiné à l'étude des aérosols atmosphériques, une simulation numérique de l'écoulement a été entreprise. Dans une première approche, la géométrie du modèle a été considérée comme axisymétrique. Compte tenu de la forte épaisseur de la couche de neige par rapport à celle du glacier, il n'a pas été jugé réaliste d'utiliser l'approximation classique qui consiste à remplacer une couche de névé de surface par une couche équivalente de glace. En l'absence de données sur la loi de comportement du névé, nous avons adopté un modèle utilisé en métallurgie des poudres. La viscosité apparente et le module de compressibilité sont fonction non linéaire des deux premiers invariants de la vitesse de déformation et de la densité du milieu. Lorsque cette dernière atteint la valeur correspondant à la glace, le milieu devient incompressible et sa loi de comportement est celle classiquement utilisée en Glaciologie (Norton-Hoff dite «loi de Glen»). Sur le plan numérique, le traitement a été réalisé par la méthode des éléments finis, en adoptant une formulation vitesse-pression qui permet de passer de façon continue du cas compressible au cas incompressible standard. En première analyse, on a abordé l'étude du régime stationnaire, qui nécessite de traiter le problème couple suivant :

- calcul du champ de vitesses pour un champ de densité donné,
- à champ de vitesse donné, calcul du champ de densité vérifiant la conservation de la masse en tout point (méthode des moindres carrés sur la base et le support d'interpolation utilisé pour le calcul des vitesses par éléments-finis).

Il serait souhaitable que ce travail, qui a fait l'objet du stage de DEA d'Olivier Gagliardini, soit poursuivi plus avant pour :

- valider le modèle de loi de fluage de matériau poreux utilisé
- fournir un outil utilisable par les équipes concernées par l'opération «Mont-Blanc».

### **II.1.8 Mesures d'un champ de vitesses en surface à Dôme C (Antarctique)**

(C. Vincent) (Raid à Dôme C - Campagne 1993/1994)

Ces travaux qui ne concernent pas les glaciers tempérés, ont été réalisés par C. Vincent qui a mis sa compétence en matière de géodésie au service de l'équipe de mécanique de la glace (cf. chapitre Rhéologie de la glace).

L'objectif est la détermination du champ de déformation en surface à proximité du futur forage profond du dôme Concordia. Nous avons, en premier lieu, installé une balise Doris (système de positionnement satellitaire, développé par le C.N.E.S. et CLS/Argos à Toulouse) en vue de déterminer la position d'un point dans un système de référence international (IERS). Dans un deuxième temps, nous avons implanté un réseau de balises métalliques dans un rayon de 3 kms environ, réseau qui devrait être étendu à plusieurs dizaines de kilomètres dans les prochaines années. La position précise de ces points est désormais connue ; une deuxième campagne permettra de déterminer leurs déplacements et la déformation du réseau.

## **II.2 GROUPE RADIOACTIVITE**

Notre activité est centrée sur différents aspects liés à la radioactivité naturelle (Plomb 210) ou artificielle (essais thermonucléaires). Elle s'appuie sur un ensemble de techniques de comptage bas niveau dont la spectrométrie gamma avec anti-cosmiques actifs que nous avons récemment développée (J.F.Pinglot et M. Pourchet, 1994 et 1995).

Le détecteur Germanium (Haute Pureté, type N, 20%, bas niveau) a été monté en anticoincidence avec un scintillateur Na I (TI) 9" x 8" muni de 7 photomultiplicateurs, également spécificiés à bas niveau.

Tout en conservant les efficacités de détection, pour une large gamme d'énergie (10 keV-1,6 MeV) la ligne de base du bruit de fond a été diminuée d'un facteur 10, ce qui apporte un gain moyen de sensibilité d'un facteur 3. Les activités minimales détectables atteignent 1 m Bq pour les deux radioéléments  $^{137}\text{Cs}$  et  $^{210}\text{Pb}$  (mesures de 24H, géométrie «Béta», incertitude 2). Des tests interlaboratoires ont permis de vérifier les caractéristiques de détection du  $^{210}\text{Pb}$  et du  $^{137}\text{Cs}$  (J.A. Sanchez-Cabeza et al, 1994). L'analyse du  $^{210}\text{Pb}$ , directement par spectrométrie gamma, a été comparée à la spectrométrie alpha du  $^{210}\text{Po}$  (dispositif à 5 voies indépendantes, géré par multiplexeur et P.C.).

### II.2.1 Svalbard : Détermination des bilans de masse des glaciers et des retombées de radioéléments

(M. Pourchet, J.F. Pinglot, B. Lefauconnier)

Le repérage des horizons repères radioactifs (essais thermonucléaires atmosphériques : 1954 et 1961-62 principalement Tchernobyl 1986) dans les carottages, permet la détermination des bilans nets annuels moyens en zone d'accumulation des glaciers du Svalbard. Ces résultats, associés aux mesures d'ablation et de vèlage, et de topographie, permettent de déterminer le bilan de masse des glaciers, pour les échelles de temps considérées.

Différentes campagnes de prélèvements ont été réalisées depuis 1991 (cf. tableau 1). Nous avons effectué plusieurs campagnes de 1991 à 93, à l'ouest du Spitzberg.

selon les glaciers et les périodes considérées : de 0,39 à 0,67 (Pourchet et al. 1995). Grâce à une collaboration avec le Japon (JAGE 92 et 93), nous avons également déterminé les niveaux radioactifs à Snofjella et Asgardfonna, ainsi que leurs bilans nets annuels moyens.

En 1994, le programme environnement (EV) n° EV 5V-CT-93-0299, intitulé «Investigations of Glacier Surges : Measurements and Modelling of Ice Dynamics in Svalbard, European Arctic», s'est déroulé au Finsterwalderbreen, et une seconde campagne a eu lieu en avril -mai 1995. Nous avons réalisé 14 carottages entre la ligne d'équilibre et la zone d'accumulation - le bilan net annuel moyen (1963 à 93) varie de 0 (ligne d'équilibre, à 500 m environ), à 0,2 m eau eq./ an (à 667 m). Il n'y a pas de relation évidente entre bilan net et altitude. Le rapport (AAR) des surfaces d'accumulation et d'abla-

**Tableau 1 :**  
Campagnes de prélèvements au Svalbard depuis 1991

Années	Contrats	Sites	Pays
1991	EPOC 0035	Amundsenissen-Barlaupfonna	CEE
"	"	Gruvfonna	"
1992	"	Isachsenfonna-Monacobreen-Snofjella	"
"	JAGE 92	Snofjella	Japon
1993	EPOC 0035	Gruvfonna	CEE
"	Jage 93	Asgardfonna	Japon
1994-95	EV5V-CT-93-0299	Finsterwalderbreen	UE

Les retombées des essais thermonucléaires sont présents dans une dizaine de carottages, et l'horizon repère de Tchernobyl se retrouve sur 30 carottages (Pinglot et al, 1994).

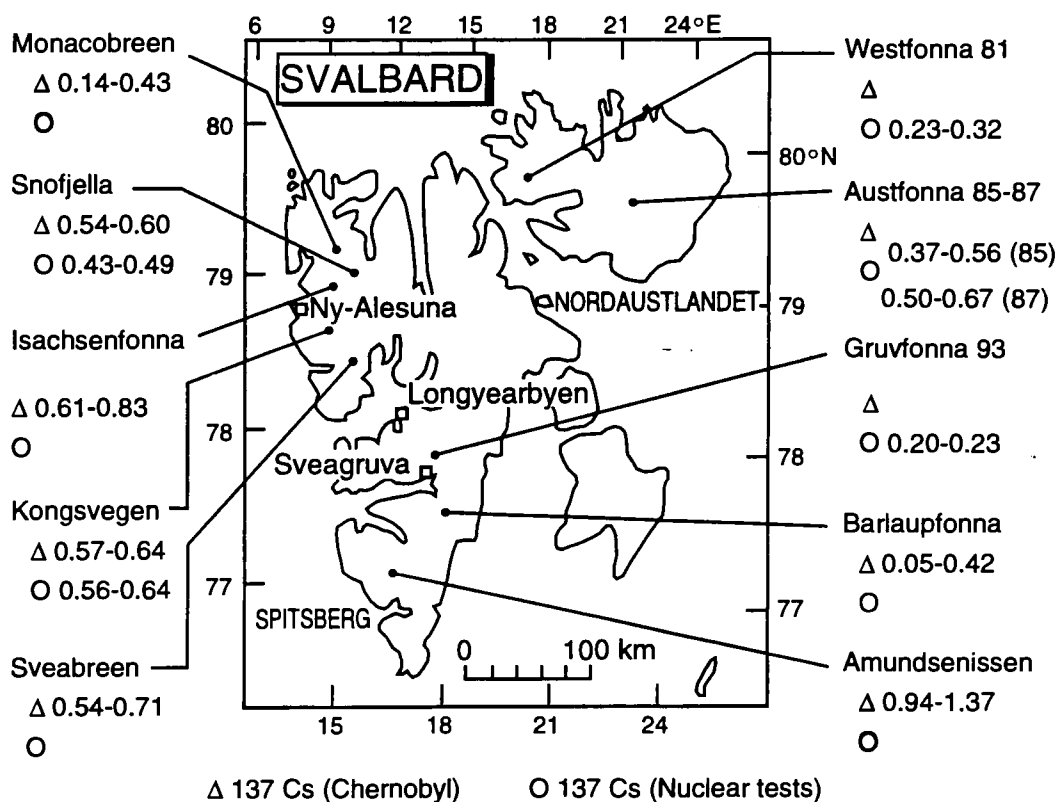
Le bilan net annuel moyen, sur les périodes depuis 1962, ou 1986, varie selon chaque glacier, d'environ 0  $\neq$  plus de 1m eau eq. par an (altitudes variant de 538  $\neq$  1170 m) ; il varie également pour une altitude constante (700 m).

Parmi les 4 carottages où les deux repères radioactifs sont présents, l'un indique un accroissement significatif de 20% du bilan net annuel ; entre les périodes 1963-1992 et 1986-1992 ; les trois autres sites ne présentent pas d'évolution notable (Fig 5.4). L'altitude de la ligne d'équilibre des glaciers (ELA) s'établit entre 340 m (Amundsenissen) et 750 m (Gruvfonna). Le rapport des surfaces d'accumulation et d'ablation (AAR) varie fortement

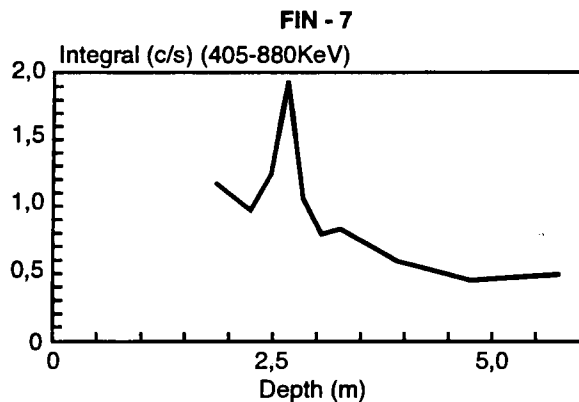
tion atteint seulement 30%, montrant clairement le bilan de masse très négatif du Finsterwalderbreen.

Dans plusieurs carottages, près de la ligne d'équilibre et en zone d'ablation, la sonde de spectrométrie gamma in situ a détecté une concentration importante de <sup>137</sup>Cs (10 Bq/kg), directement en-dessous de la couche de neige hivernale. Il s'agit de la concentration, en surface du glacier, des diverses impuretés présentes (retombées atmosphériques, apports éolien et hydrique, etc...) L'analyse au laboratoire confirme les mesures de terrain (Fig. 5.5).

Une équipe de journalistes japonais (NHK) nous a accompagnés en 1995 pour la réalisation d'un film documentaire, à l'occasion du 50<sup>e</sup> anniversaire de la tragédie d'Hiroshima, (6 août 1945). Leur intervention a principalement porté sur la détection in situ des retombées thermonucléaires.



**Figure 5.4 :**  
Distribution du bilan annuel moyen. Glaciers du Svalbard (m eau éq./ an)



Le bilan moyen de Cs-137 de Tchernobyl (pour 27 carottages) s'élève à environ  $10 \text{ Bq.m}^{-2}$  et montre une grande variabilité (de 0 à un maximum de  $26 \text{ Bq.m}^{-2}$ ). Ce bilan est semblable aux mesures réalisées au Groënland. Le bilan en Cs-137, dû aux essais thermonucléaires, pour sept carottages, atteint une moyenne de  $360 \text{ Bq.m}^{-2}$  (à la date du dépôt). La radioactivité naturelle ( $^{210}\text{Pb}$ ) est fortement influencée par les phénomènes de fusion-percolation. Il existe des strates très concentrées en  $^{210}\text{Pb}$ . Les bilans annuels moyens en  $^{210}\text{Pb}$  varient de 10 à  $50 \text{ Bq.m}^{-2}$ . (Fig. 5.6)

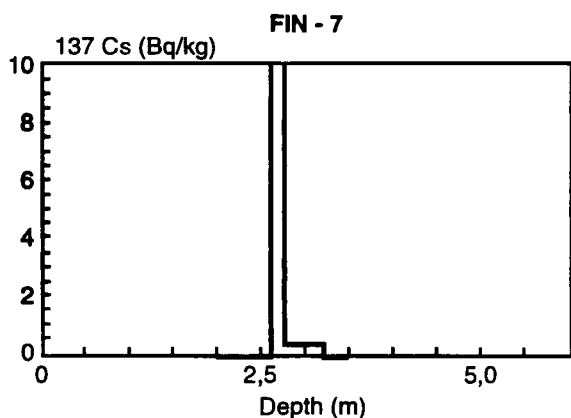
## II.2.2 Dôme du Goûter 1993-94

(J.F. Pinglot, M. Pourchet, L. Reynaud)

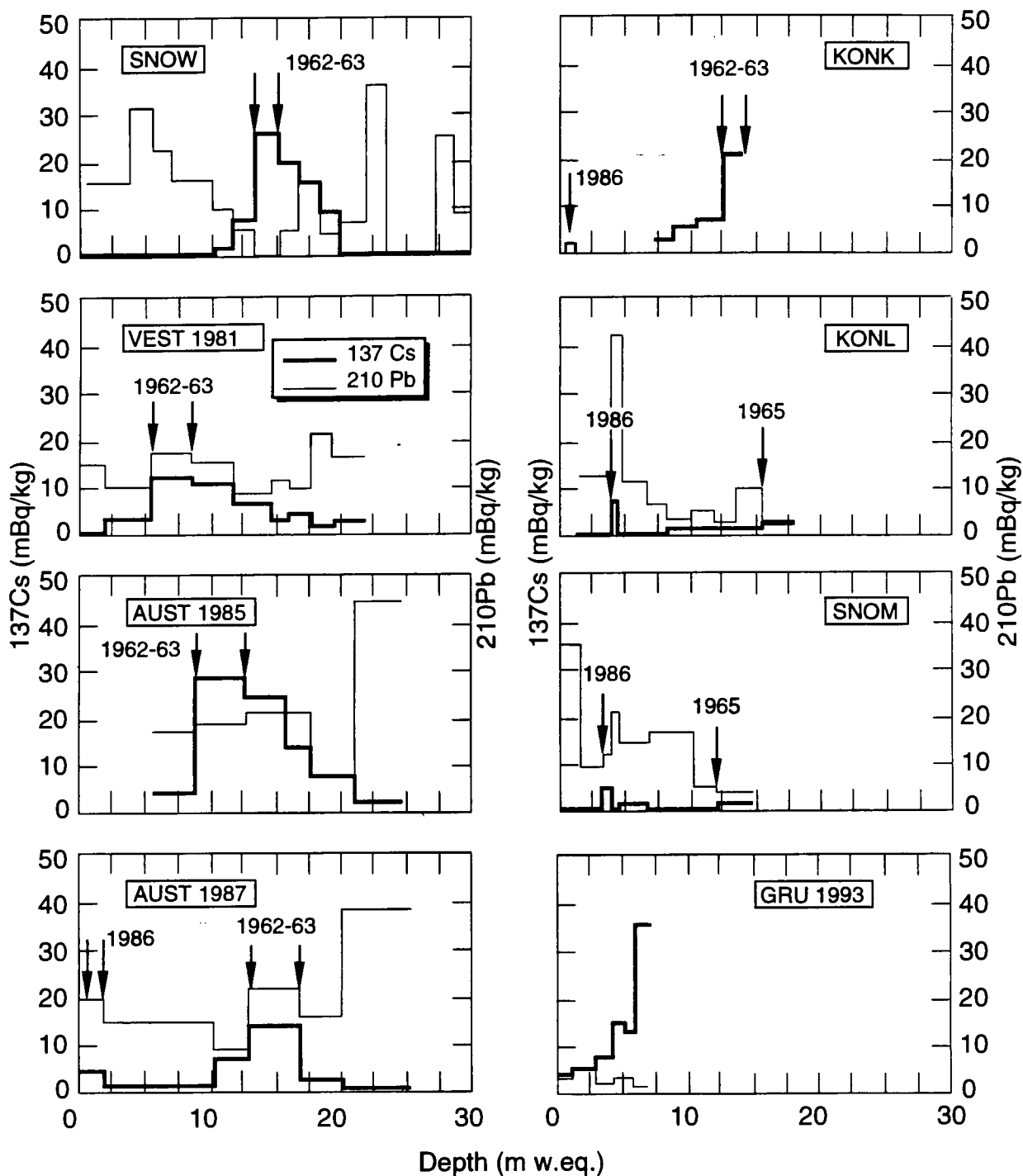
### II.2.2.1 Accumulation Moyenne Annuelle

Les mesures de radioactivité artificielle conduites sur les échantillons des carottages de 1980 (P11) et 1986 (P14) au col du Dôme du Goûter, les accumulations moyennes annuelles respectives ont permis de déterminer les accumulations annuelles. Deux autres carottages ont été réalisés en 1993 au sommet du Dôme afin de détecter l'horizon de Tchernobyl (tableau 2).

Le niveau Tchernobyl se situe entre 8,56 et 8,75 m à P20. Par contre, cet horizon-repère est vraisemblablement en-dessous de 20,7m à P21, ce qui indiquerait une accumulation supérieure à  $1,62 \text{ m eau eq./an}$ .



**Figure 5.5 :**  
Césium 137 (IN SITU - échantillons) (ligne d'équilibre Finsterwalderbreen).

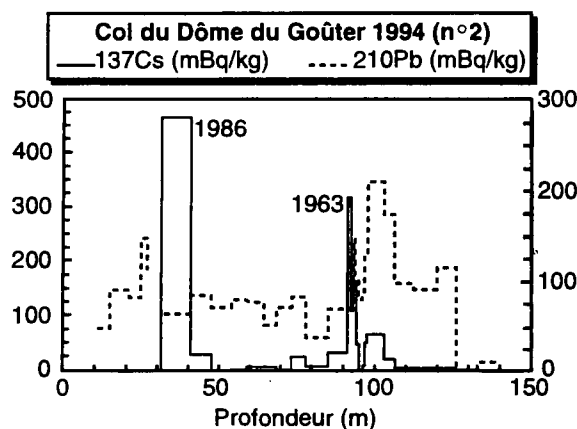


**Figure 5.6:**  
Césium 137 (Therobyl) et essais thermo-nucléaires) et plomb 210 (carottages : ouest du Spitzberg).

**Tableau 2 :**  
Mesures de l'accumulation moyenne annuelle au col du Dôme du Goûter

Carottages	Tchernobyl (1986)		Essais(1963)	
	m neige	accu. m eau eq./an	m neige	accu. m eau eq./an
P 11 (1980)	-	-	20 (1970)	1,09
P 14 (1986)	-	-	56,00	1,56
P 20 (Dôme) (1993)	8.66	0.61	-	-
P21 (Dôme)(1993)	20.70	1.62	-	-
N)2 (1994)	#35	#2.47	91,59	2,12

En 1995, les copeaux du carottage n°2 (7-10 juin 1994) au col du Dôme ont été analysés en  $^{137}\text{Cs}$  (172 échantillons). Les 2 repères constitués par les essais thermonucléaires (maximum en 1963) et Tchernobyl (1986), ont été identifiés sur ce carottage (Fig. 5.7).



**Figure 5.7 :**

Césium 137 et Plomb 210. Col du Dôme du Goûter 1994 n°2

Les mesures préliminaires indiquent une accumulation moyenne annuelle (AMA) d'environ 2,47 m eau eq/an (1986 à 1994), et 2,12 m eau eq/an (1963 à 1994). Ces valeurs sont supérieures aux précédentes déterminations (1,09 et 1,56 m eau eq/an) (Tableau 2).

Il y a une redistribution de la neige par le vent, comme l'indiquent les valeurs décroissantes de l'accumulation (depuis 1986) depuis le dôme (P20 : 0,61 m), le carottage intermédiaire (P 21 : 1,62 m) et enfin le col (1994 n°2 : 2,47 m). Cette redistribution est

confirmée par la mesure du taux de retombée en  $^{137}\text{Cs}$ , ainsi que par l'élargissement du signal de Tchernobyl (initialement 0,10 m de neige).

#### II.2.2.2 Bilan en $^{137}\text{Cesium}$ des Essais Thermonucléaires et Tchernobyl

Les bilans de  $^{137}\text{Cs}$  pour les deux horizons-repères sont égaux à 3000 Bq/m<sup>2</sup>. Un puits (P 15 réalisé en décembre 1986) donne pour Tchernobyl une valeur six fois moindre. Ce résultat illustre le rôle de la redistribution, comparée à la retombée atmosphérique. Pour le carottage au dôme (P 20), le bilan n'est en effet que de 10 Bq/m<sup>2</sup>. Concernant Tchernobyl, rappelons que les concentrations rencontrées en  $^{137}\text{Cs}$  s'élèvent à 10 Bq/kg (P15), valeur environ 100 fois supérieure au bruit de fond des radioéléments naturels.

#### II.2.2.3 Mesure du Plomb 210

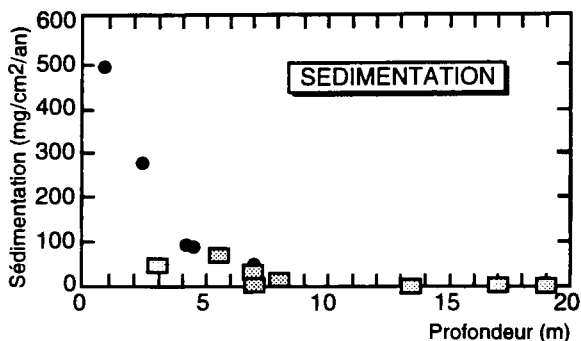
Le profil de  $^{210}\text{Pb}$  présente des concentrations pratiquement constantes ou en légère baisse entre la surface et 90 m. Par contre, entre 90 et 125 m, les valeurs sont anormalement élevées ; elles précèdent des valeurs quasi-nulles entre 125 et 140 m. Ces 15 derniers mètres peuvent correspondre à de la glace bien plus ancienne que les couches supérieures.

#### II.2.3 SEDIMENTATION LACUSTRE

(M. Pourchet, J.F. Pinglot, N. Preiss)

Dans le cadre du programme ECOFIT (Changements globaux, Ecosystèmes, Paléosystèmes des Forêts Intertropicales), nous

avons étudié, à l'aide du  $^{210}\text{Pb}$  la sédimentation récente de plusieurs lacs de l'altiplano Bolivien. Pour l'ensemble du lac Titicaca, nous avons estimé la sédimentation annuelle à environ 3.9 Mt. Plus de 90% de la sédimentation se fait entre 0 et 5 m d'eau (Fig. 5.8), mais cette zone subit des hiatus importants en période de basses eaux. Nous avons pu recommander une zone de prospection pour des paléo-reconstructions plus longues.



**Figure 5.8 :**

*Sédimentation récente dans le lac Titicaca (Bolivie)  
Variations des taux de sédimentation en fonction de la  
profondeur d'eau.  
Sédimentation rate versus water depth.  
M. Pourchet et al.*

Dans d'autres petits lacs d'altitude de cette région, nous avons obtenu, sur plus d'un siècle, des enregistrements très peu perturbés, avec des flux de radioéléments similaires aux flux atmosphériques relevés dans cette région. L'éloignement de ces sites de toute industrie pourrait en faire des sites privilégiés pour l'étude de la circulation à grande distance des contaminants atmosphériques, comme par exemple le  $^{137}\text{Cs}$  issu des essais thermonucléaires atmosphériques, ou plus généralement des polluants anthropogéniques.

#### II.2.4 FLUX DES RADIOELEMENTS

*(M. Pourchet, J.F. Pinglot, N. Preiss, M.A. Mélières, C. Genthon)*

Les radioéléments contribuent dans plusieurs domaines à l'étude du climat car ils agissent non seulement comme des traceurs de la circulation atmosphérique mais ils permettent aussi d'étudier les mécanismes de déposition des aérosols sur la surface terrestre.

Le travail de thèse de Nicolas Preiss consiste à rassembler le maximum de données existantes sur les concentrations dans l'air et les flux de  $^{210}\text{Pb}$ , et sur les inventaires des retombées de  $^{137}\text{Cs}$ , afin de créer une base de don-

nées complète sur ces radioéléments. Ces données, provenant de prélèvements dans des collecteurs artificiels et dans différents milieux naturels (sols, neiges et glaces, tourbières et marais, sédiments lacustres et marins), sont complétées par des mesures faites au laboratoire dans des glaciers et calottes aux hautes latitudes (Antarctique, Svalbard,...) et dans des sédiments lacustres et des sols aux basses latitudes (Cameroun, Bolivie, ...).

Actuellement, l'équipe modélisation du LGGE, travaille sur un nouveau modèle de circulation générale LMDZ du LMD. La comparaison des données de  $^{210}\text{Pb}$  simulées par ce modèle avec les données mesurées issues de la base de données sera effectuée. De plus, le  $^{137}\text{Cs}$ , jusqu'alors absent de la modélisation, va être introduit.

Nous avons par ailleurs établi un bilan détaillé des radionuclides en Antarctique. Pour l'ensemble du continent, la quantité déposée de  $^{137}\text{Cs}$  est de 760 TBq, et représente 0.08% du  $^{137}\text{Cs}$  déposé sur l'ensemble du globe.

Malgré la dispersion des mesures (60 sites) liée à la représentativité des échantillons obtenus par carottage, une analyse statistique fine actuellement en cours en collaboration avec le service de statistique spatiale de l'Université de Lausanne, semble déjà indiquer une structure dans la distribution des bilans.

#### II.2.5 DATATION DES COUCHES DE CENDRE VOLCANIQUE DU GLACIER HURD (PENINSULE ANTARCTIQUE)

*(M. Pourchet, J.F. Pinglot)*

Les variations temporelles des fronts de ce glacier situé sur l'île de Livingston, en Péninsule Antarctique, sont intensivement étudiées par le Département de Géologie Dynamique de l'Université de Barcelone, par photogrammétrie aérienne et satellitaire. De nombreuses couches volcaniques sont incluses dans ce glacier et proviennent, du moins pour les plus récentes, de l'île volcanique de Déception, située à environ 30 km. La dernière explosion violente de ce volcan date de 1970. Grâce aux radio-isotopes, principalement le  $^{137}\text{Cs}$ , nous essayons d'identifier cette couche et d'en mesurer la profondeur sur une dizaine de sites. La fusion et la percolation qui est importante pour toute la zone étudiée, induit une hétérogénéité des dépôts de cendre et des bilans de  $^{137}\text{Cs}$  qui compliquent l'interprétation. D'un site à

l'autre, des variations importantes de l'altitude de la ligne d'équilibre sont mises en évidence.

### II.2.6 AUTRES ETUDES

J.O. Hagen (Institut Polaire Norvégien, puis Université d'Oslo) nous a confié 500 échantillons bêta-globaux, correspondants à 7 carottages de l'Antarctique (Fimbulisen Ice Shelf et Jutulstraumen) réalisés lors du projet NARE. L'accumulation moyenne annuelle, selon les sites d'altitude croissante (niveau de la mer à 2000 m), varie de 0,48 à 0,25 m eau eq. pour la période 1965 à 1993-94. Ces

sites présentent une radioactivité spécifique de la neige très faible, en accord avec les mesures de sites côtiers.

En collaboration avec l'Institutul de Spéléologie Roumain et le Laboratoire Souterrain du CNRS nous avons réalisé un carottage de 20 m de profondeur dans le glacier souterrain de la grotte de Scarisoara (Roumanie). Ce site paraît présenter un intérêt scientifique certain par les archives paléoclimatiques et paléo-environnementales qui concernent les deux ou trois derniers millénaires. Un profil isotopique fin est en cours d'analyse au LMCE.

## III COLLABORATIONS - CONTRATS ET EXPERTISES

### III.1 COLLABORATIONS

Pour la partie Glaciers Alpains :

- Ministère des Travaux Publics espagnol.(R. Martinez). Ces travaux concernent l'hydrologie des bassins glaciaires des Pyrénées espagnoles. Nous avons mis en place un réseau d'observation du bilan de masse du glacier de la Maladetta afin d'évaluer l'influence des bilans glaciaires sur les bilans hydrologiques.
- Comité glaciologique italien (Luca Mercalli) et la société d'électricité de Turin. Mise en place d'un réseau d'observations des bilans de masse sur le glacier de Ciardonney (Massif du Grand Paradis).
- ORSTOM - La Paz (Bolivie) (B. Francou) et la COBE (Compagnie Bolivienne d'Electricité) : étude hydrologique et glaciologique du glacier du Zongo ; bilans de masse des glaciers équatoriaux, risques naturels, évaluation des débits d'origine glaciaire (hydroélectricité et eaux potables).

Pour la partie Radioactivité :

- Norsk Polarinstitut (J.O. Hagen) (glaciers du Svalbard),
- University of Wales (J. Dowdeswell) (glaciers du Svalbard),
- ORSTOM (L. Martin ; M. Servant) (lacs boliviens et camerounais),

- Université de Lausanne (M. Maignan) (analyse statistique),
- Université de Barcelone (J. Calvet) (péninsule antarctique),
- Académie des sciences de Roumanie (E. Silvestru) (glacières)

### III.2 CONTRATS

- EV5V - CT91 - 0051 : climate and sea level change and the implications for Europe
- EPOCH 0035 : Global balance of Spitsbergen ice masses and prediction of its change due to climatic change.
- EV 0299 : Investigations of glaciers surges : measurements and modelling of ice dynamics in Svalbard, European Arctic.
- IFRTP n° 265 et 294 : Glaciologie au Svalbard.

### III.3 EXPERTISES

- Société Emosson SA (aménagement hydro-électrique) : Etude du glacier d'Argentière,
- Station de La Plagne : Etude du glacier de la Chiaupe, (ski sur glacier)
- Parc National de la Vanoise : Etude du glacier de Gébroulaz,
- Parc National des Ecrins : Etude des glaciers Blanc et Noir,
- Station des Grands Montets : variations d'épaisseurs du glacier de Lognan (ski sur glacier).

## IV ACTIVITÉ DE FORMATION

### a) Encadrement de stages

Carreau J. : Utilisation de la photogrammétrie pour l'étude de la dynamique d'un glacier et de ses réponses aux fluctuations climatiques. (Mémoire présenté en vue d'obtenir le diplôme d'Ingénieur ESGT. 1991).

Cointepas D. : Accumulation en Antarctique de l'est (DEA 1992)

De La Chapelle S. : Etude du taux de compression vertical en profondeur de la Mer de Glace et du glacier d'Argentière. (Stage de 2<sup>e</sup> année de l'Ecole des Mines de St-Etienne. 1992).

Menessier X. : Etude des variations spatio-temporelles de l'accumulation en Terre Adélie (DEA 1992)

Germain J.C. : Estimation des variations du bilan de masse pour différents glaciers à différentes époques (Actuelle - Petit Age de Glace). (Stage de Licence de Physique et Application, 1993).

Hulot L. : Signification climatique des variations de longueurs des glaciers alpins. (Stage de D.E.A., 1993).

Preiss N. : Etude de la sédimentation récente du lac Titicaca (D.E.A., 1993).

Cotte N. : Etude sur le Petit Age de Glace, essai d'estimation des bilans de masse glaciaire dans le Massif des Ecrins. (Stage de 1<sup>re</sup> année du Magistère RAA des Sciences de la Terre, 1994).

Porca L. : Relation entre les flux de Pb 210 dans les sédiments et dans l'air (D.E.A., 1994).

Steve O. : Contribution à l'étude du comportement mécanique de la glace avec la fermeture des moulins glaciaires. (D.E.A., 1994).

Bonnaffé F. et Janson X. : Détermination gravimétrique du surcreusement glaciaire de la cuvette grenobloise. (Stage de Maîtrise de Géologie, 1995).

Richard L. : Sismique, réflexion sur le glacier de Sarenne. (Stage de Maîtrise de Géologie, 1995).

### Thèses :

Preiss N. : Etude de la circulation atmosphérique et des bilans glaciaires à partir de l'analyse des radioéléments (Pb210 et Cs137). (1993-1995).

### Travail Post-doctoral :

Bartarya S.K. : Distribution et flux des radionucléides en Antarctique. (1994)

### b) Autres formations

Pierre A. (IFRTP) : Formation aux méthodes traditionnelles de navigation (astro-géodésie) en vue d'une éventuelle panne des systèmes de navigation GPS au cours du raid Dumont-Durville - Dôme C. 1994.

Communication : Conférences grand public, émissions de radio, télévision ; Réalisation de plaquettes pédagogiques sur les glaciers avec l'Ecole Moderne :  
- glacier blanc et glacier noir 1993 (+ Parc national des Ecrins),  
- mer de glace, 1994.

E.D.F. - Production transport : Stages risques naturels. Le risque glaciaire (depuis 1991).

Ecole Nationale de Ski et d'Alpinisme (Chamonix) : Leçons de glaciologie aux élèves-guides (depuis 1985).

Institut des Sciences et Techniques de Grenoble (ISTG) : Utilisation des méthodes de géodésie en glaciologie (depuis 1992).

Parcs naturels (Vanoise, Ecrins) : Stages de formation au domaine glaciaire -(1992/1993).

Projet d'établissement interdisciplinaire :  
- sur deux ans avec les mêmes enfants (1994-1995) : datation et concentration des métaux dans les sédiments du lac Saint-André(Savoie) et de l'étang de Haute-Jarrie (Isère),  
- chaque année, stage d'une semaine d'élèves (3<sup>e</sup>) : initiation à la glaciologie notamment datations nucléaires.

Réalisation d'une exposition sur la glaciologie et d'un livret de l'exposition avec la ville de Chamonix - (1991 et 1992.)

Stages d'initiation aux techniques de datation par le Pb210 :

- trois stages de 1 semaine pour : O. Radakovitch (Univ. Perpignan), S. Ngos (Univ. Yaoudé), N. Miskane (ORSTOM).



## V PUBLICATIONS

### V.1 REVUES A COMITE DE LECTURE

Boaretto E., D. Berlpvots, R. Delmas, R.R. Johnson, A. Kaufman, M. Magarits, M. Paul and M. Pourchet. Measurements of anthropogenic radioisotopes in environmental samples. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*, **B. 92**. 1994.

Giresse P., S. Ngos et M. Pourchet. Processus sédimentaires séculaires et géochronologie au  $^{210}\text{pb}$  des principaux lacs de la dorsale comorounaise. *Bull. Soc. géol. France*, **165**, n° 4, 363-380. 1994.

Lefauconnier B., J.O. Hagen, J.F. Pinglot and M. Pourchet. Mass-balance estimates on the glacier complex Kongsvegen and Sveabreen, Spitsbergen, Svalbard, using radioactive layers. *J. of Glaciology*, **40**, N° 135, 368-376. 1994.

Maurette M., J. Immel, M. Perreau, M. Pourchet, C. Vincent and G. Kurat, 1992. The Euromet collection of micrometeorites at Cap Prud'homme, Antarctica : Discussion of possible collection bias. *Lunar Plan. Sci.*, **23**, 859. 1991.

Maurette M., C. Olinger, M.C. Michel-Levy, G. Kurat, M. Pourchet, F. Branstatter and M. Bourot-Denise. A collection of diverse micrometeorites recovered from 100 tonnes of antarctic blue ice. *Nature*, **351**, n° 6321, 44-47. 1991.

Maurette M., M. Pourchet and M. Perreau. The EUROMET micrometeorite collection at Cap-Prudhomme, Antarctica. *Meteoritics*, **27**, 473-475. 1991/1992.

Mélières M.A., M. Pourchet and J.F. Pinglot. Comment on deconvolution profiles in sediment cores, *Water, Air, and Soil Pollution*, **60**, 35-42. 1991.

Pinglot J.F. and M. Pourchet. Radioactivity measurements applied to glaciers and lake sediments. 7th Int. Symp. on Environmental Radiochem. Analysis, 21-23 September, Bournemouth U.K. Accepté : *The Science of Total Environment*. 1994.

Pinglot J.F., M. Pourchet, B. Lefauconnier, J.O. Hagen, R. Valkmaë, J.M. Punning, O. Watanabe, S. Takashi, T. Kameda. Natural and Artificial

Radioactivity in the Svalbard Glaciers. *J. Environ. Radioactivity*, **25**, 161-176. 1994.

Pourchet M., P. Mourguiart, J.F. Pinglot, N. Preiss, J. Aagollo et D. Wirrmann. Sédimentation récente dans le lac Titicaca (Bolivie). *C.R. Acad. Sciences*, **319**, série II, 535-541. 1994.

Pourchet M., P. Mourguiart, J.F. Pinglot, N. Preiss, J. Argollo et D. Wirrmann. Evaluation des vitesses de sédimentation récente dans les hautes vallées des Andes boliviennes. Son intérêt dans l'estimation des paléo-pollutions atmosphériques. *C.R. Acad. Sciences*, **320**, série II a, 477-482. 1995.

Reynaud L.. The French Alps. «Satellite image Atlas of Glaciers of the World» EUROPE. *Glaciers of the Alps*. United States Geological Survey. professional Paper 1386-E. E23-E36. 1993.

### V.2 AUTRES PUBLICATIONS

Argollo J., P. Mourguiart, J.F. Pinglot, M. Pourchet, N. Preiss y D. Wirrmann. Sedimentation Reciente en le lago Titicaca (Bolivia). Universidad de Concepcion, 7° Congreso Geologico Chileno, actas Volumen I, 225-229. 1994.

Francou B. and L. Reynaud. 10 years surficial velocities on a rock glacier (Laurichard, French Alps). *Permafrost and periglacial processes*, **3**, 209-213. 1992.

Hulot L. et L. Reynaud. Signification climatique des variations de front des glaciers alpins. Colloque SHF, 10-11 mars. 1994.

Lefauconnier B., M. Vallon, J. Dowdeswell, J.O. Hagen, J.F. Pinglot and M. Pourchet. Global balance of Spitsbergen ice mass and prediction of its change due to climatic change. *Symposium on climatic change : climate change and climate change impacts focusing of european research*. Copenhagen, Sept. 6-10. 1993.

Lefauconnier B., J.F. Pinglot and M. Pourchet. Mean net accumulation of ten glaciers in Svalbard estimated from detection of radioactive layers in shallow ice cores. *Symposium glacier mass balances* Innsbruck, Sept. 1994.

Maupetit F., L. Reynaud, M. Pourchet, J.F. Pinglot and R.J. Delmas. Glaciological and

Glaciochemical Activities of L.G.G.E. in the Mont Blanc area (French Alps), in *Isotopes and Trace Elements in Glaciers as Climate Evidence for Holocene*, 27-28 October 1992, Zurich, Switzerland. 1994.

Mélières M.A., M. Pourchet and J.F. Pinglot. Some advantages of the simplified diffusional mixing approach in lake sediment profiles analysis, *XXV SIL International Congress*, Barcelona, August 21-27. 1992.

Mosley-Thompson E., L.G. Thompson, J.F. Paskievitch, M. Pourchet, A.J. Gow, M.E. Davis and J. Kleinman,. South Pole snow accumulation has increased 30% since. melting, IGS, Columbus, August. 1960. 1994

Pichot C. and C. Vincent. Another Field of Application of GPS. *Geodetical info Magazine*, Case Study 1. 19-24. 1991.

Pinglot J.F., M. Pourchet, B. Lefauconnier and J.O. Hagen. Chernobyl Fallout in Svalbard : Glaciological Applications. Arctic Research Seminar, Paris, October 15-16. Fondation Franco-Norvégienne pour la Recherche Scientifique et Technique et le Développement Industriel, 1-10. 1992.

Pinglot J.F., M. Pourchet, B. Lefauconnier, J.O. Hagen, J.M. Punning, R. Vailkmaë, S. Takahashi and T. Kameda. Natural and artificial radioactivities in the Svalbard glaciers. *International Conference on Environmental Radioactivity in the Arctic and Antarctic*, 23-27 August 1993, Kirkenes, Norway, p. 273-278. 1993.

Pinglot J.F. Canberra in the Arctic. NPG,News (publication of the Canberra Nuclear Products Group), **34/1**, 2/93, 1-3. 1993.

Pinglot J.F. et M. Pourchet. Spectrométrie Gamma à très bas niveau avec anti-Compton NaI (TI) pour l'étude des glaciers et des sédiments. BNM, journées de Spectrométrie Gamma et X93, 12-14 octobre . *Note CEA-N-2756-ISSN*

0429-3460., Paris, CEA-DAMRI, 291-296. 1993/1994.

Pourchet M. et J.F. Pinglot. Utilisation des sédiments pour l'étude des paléopollutions industrielles. *Annales de l'Institut technique du bâtiment et des travaux publics*, **493**, 125-126. 1991.

Pourchet M., J.F. Pinglot and M.A. Mélières. Radionuclides profiles in Cameroun crater lakes, *XXV SIL International Congress*, Barcelona, August 21-27. 1992.

Pourchet M. and J.F. Pinglot. Radioactivity of arctic and antarctic snow. *Analisis Magazine*, **22**, n° 7, 29-30. 1994.

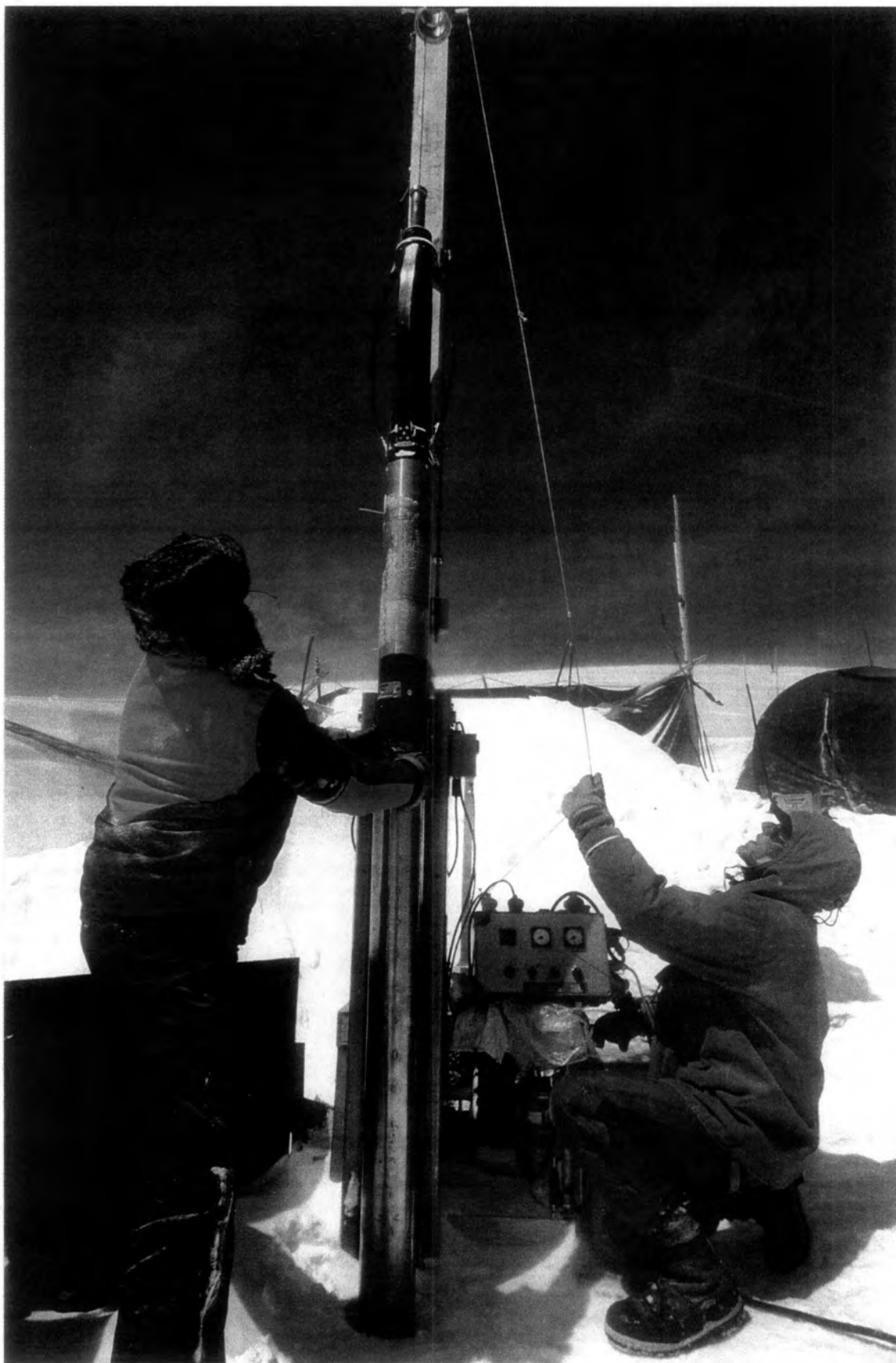
Pourchet M., B. Lefauconnier, J.F. Pinglot, and J.O. Hagen. Mean net accumulation of ten glacier basins in Svalbard estimated from detection of radioactive layers in shallow ice cores. *Symposium on glacier mass balance : Measurements and reconstruction*, Innsbruck, Austria, Sept. 14-16. 1994.

Preiss N., P. Mourguiart, J.F. Pinglot et M. Pourchet. Sédimentation de quelques lacs de l'altiplano bolivien. *SHF, section de Glaciologie*, Grenoble 11-12, mars 1993.

Sanchez-Cabeza J.A., P. Masque, O. Radakovitch, S. Heussner, T. Brand, F. Lindsay, N.B. Price, M. Frignani, M. Pourchet, P. Bouisset and M. Canals. Data quality assurance in EUROMARGE-NB : <sup>210</sup>Pb intercomparison exercices. *First workshop of the Mediterranean targeted project*, Barcelona, Nov. 21-23. 1994.

Vallon M., C. Vincent et L. Reynaud. Sensibilité des bilans de masse des glaciers des Alpes aux fluctuations climatiques. *La Houille Blanche*, 5-6 (sous presse). 1995.

Vincent C. et L. Reynaud, Variation de quelques glaciers français en Colloque SHF, (1991/1992./1993)



## Chapitre 6

### SERVICES COMMUNS

JOURNE P. IR2 Responsable  
CDD Forage profond EPICA

**Bureau d'études**

AUGUSTIN L. AI Etudes  
Carottage profond  
Participation missions polaires

**Atelier Général**

BALESTRIERI J.P. T3 Electrotechnicien  
Carottage profond  
Participation missions polaires

GIRARD C.\* AI Mécanicien  
50 % (CPA) Carottage profond  
Participation missions polaires

MANOUVRIER A. IE Mécanicien  
Carottage profond  
Participation aux missions polaires

RADO C. 1B Thermicien - Mesures  
Carottage profond  
Participation aux missions polaires

\* Personnel UJF

**Atelier Electronique**

LEFEBVRE E. AI Réalisation de montages électroniques  
(Electronique digitale  
et programmation)  
Participation aux missions polaires

MAITRE M. AI Réalisation de montages électroniques  
(Electronique analogique)  
Participation aux missions polaires

PINGLOT F. IR2 Comptages de radioactivité.  
pour 20 % => Electronique appliquée aux carottiers.  
Participation aux missions polaires

MAREC G. IR0 En instance de mutation

**Infrastructure**

GAY M. IE2 Responsable bâtiment (25 %)  
détaché Cemagref Traitement d'images

CHEMIN J.F. T3 Entretien, réparation et gestion  
chambres froides.  
Régulation de températures.

GABARRE J.L. AJTP Entretien et aménagements bâtiments  
Gestion des véhicules du Laboratoire.  
Travaux de menuiserie.

## I SERVICES TECHNIQUES

### I.1 ACTIVITE DES ATELIERS

#### I.1.1 Laboratoire d'électronique.

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.
- d'instruments de mesure complets destinés à l'étude des caractéristiques physiques de la glace et de la chimie de l'atmosphère.

La mise en oeuvre de ces appareils se fait en laboratoire réfrigéré ou lors des campagnes sur le terrain.

Ces réalisations font appel à la conception de circuits analogiques ou digitaux complexes et à l'utilisation de capteurs. L'emploi dans un environnement sévère (température de fonctionnement -55°C, chocs, vibrations etc...), implique des études d'appareils très spécifiques, non commercialisés dans l'industrie.

Pour mener à bien ces travaux, le Laboratoire a développé un logiciel de base de données destiné à informatiser la documentation technique. Cette base de données facilite la recherche de composants, et permet un gain de temps compte tenu de la diversité croissante des produits et des études très spécifiques qui lui sont demandés.

Les derniers travaux réalisés par l'équipe sont :

- Etude et réalisation d'un tableau de commande avec système de comptage (codeur optique) pour un carottier électromécanique de moyenne profondeur.
- Modifications et extensions de la station autonome de prélèvement d'air en secteur propre (Programme Chimie de l'Atmosphère). Pré-étude d'une télécommande, pour la gestion à distance de la station.
- Mise en place de l'appareillage électronique de la presse 2000daN (Programme mécanique de la glace) :
  - \* Installation, mise en fonctionnement puis tests et étalonnages d'un capteur force-couple et mini capteurs LVDT (Linear Variable Differential Transformer).

- \* Choix et mise en place de la chaîne d'acquisition.

- Etude et réalisation d'un ensemble d'alimentation et d'amplification à fort gain pour photodiode (équipe chimie).
- Etude et spécification d'éléments pour le forage profond à Dôme C (programme EPICA) :
  - \* Commande du treuil de forage.
  - \* Système de comptage de la profondeur et de la vitesse du carottier.
  - \* Pré-étude des circuits électroniques de commande d'un moteur à courant continu sans balais. La fonction de ce moteur est d'entraîner en rotation la tête de forage.

La partie électronique étant attribuée à l'équipe Italienne, le choix final du système de comptage et du moteur leur est imparti.

De plus le laboratoire participe à différents programmes de recherche nécessitant un appui technique du LGGE :

- Forage profond européen : programme G.R.I.P (Eté 92).
- Forage profond Australien en Antarctique (campagne 91/92).
- Mise en oeuvre d'une station autonome dans un site dit «propre» en Terre Adélie (Ile du Gouverneur) pour les programmes de chimie de l'atmosphère (Campagnes 92/93 et 93/94).
- Traitement des carottes et mesure de la conductivité solide en laboratoire réfrigéré et sur le terrain.

#### I.1.2 Bureau d'étude

Les principales réalisations sont :

- Conception et réalisation du carottier test d'EPICA,
- Cellule ultravide Rayons X et Ultraviolets,
- Formation sur station de travail Unix et logiciel de CAO EUCLID,
- Constitution d'un dossier complet sur les fluides de forages, base du document, de l'étude finale d'impact pour un forage glaciaire à la station de Dôme C, édité par l'IFRTP et ENEA,
- Préétude et recherche de faisabilité pour la conception d'un nouvel outil de forage profond avec la technique électromécanique,

Le financement de l'INSU obtenu en 1992 a per-

mis d'équiper le Bureau d'Etudes d'une station de travail Unix et du logiciel de CAO Euclid. Formé depuis sur ce matériel, le personnel du Bureau d'Etudes est maintenant opérationnel. Ce nouvel outil de travail a déjà permis plusieurs réalisations :

- Cellules ultravide,
- Sous-ensemble de carottiers dont carottier EPICA.

Dans le cadre du programme de forage profond européen EPICA, cet outil de conception a prouvé être de grande importance pour le LGGE qui a reçu la responsabilité et la charge de la conception et de la réalisation du nouveau carottier. Grâce à cette station de travail, il a été possible de réaliser la tête et les outils coupants du carottier en CFAO (usinage commande numérique) directement par transmission de fichiers par le réseau INTERNET.

### 1.1.3 L'atelier de mécanique

L'Atelier de Mécanique a été maître d'oeuvre des développements technologiques et des préparatifs techniques liés à des projets de terrain en Arctique, en Antarctique et dans les Alpes. Ces projets ont pour nom GRIP, PORTOS, Forage au Col du Dôme, CASEY et VOSTOK et sont relatés plus loin.

L'Atelier de Mécanique a aussi été maître d'oeuvre de nombreuses réalisations d'instruments et d'appareils de mesure, tels que décrits ci-dessous :

\* Pour l'Equipe «Evolution du climat» :

- Réalisation d'un second banc multitaches d'analyse des carottes de glace,
- Carottage DE08 243 mètres franco-australien et mesures de porosité de la neige de surface (campagne Antarctique 1992-1993),
- Réalisation d'une machine à filer le lindium et d'un creuset pour le fusionner,

\* Pour l'Equipe «Glaciochimie» :

-Réfection des 3 tours à décontaminer :

- . Système de vérin mécanique sur 1 appareil,
- . Remplacement de vis mères par des vis à billes,
- . Mise au point générale,

\* Pour l'Equipe «Rhéologie des glaces»

- Etude réalisation mise au point d'une presse (0-500 kg) d'essais en torsion et compression de la glace (1991-1992),
- Presse 50 T :

- . platines de positionnement échantillon,
- . supports de capteurs,
- . bras articulés pour support de caméra,
- . support d'extensiomètre,
- Fraise gros diamètre (130) pour usinage des échantillons de glace collumnaire

\* Pour l'Equipe «Glaciers Tempérés» :

- Scintillateur :

- Système de guidage en cuivre rouge pour porte échantillons,
- Usinage du porte échantillons,
- Système de potence pour mise en place des échantillons,

\* Pour l'Equipe «Planétologie» :

- Réalisation de 2 cellules pour monocristaux (1993-1994),
- Système pour étudier la réflectance de la neige

## 1.2 ZOOM SUR QUELQUES REALISATIONS

### 1.2.1 Grip 1989-1993 (Greenland Ice core Project)

Ont participé à cette opération, pour les services techniques : L. Augustin, C. Rado, A. Manouvrier, M. Maitre)

Ce projet européen avait pour but de reconstituer l'évolution du climat et de l'environnement sur plus de 200000 ans grâce à l'analyse d'une carotte prélevée au point haut de la calotte glaciaire du Groenland. Lors de la quatrième année, le socle rocheux a été atteint à plus de 3000 mètres de profondeur.

Dès le début de l'opération, le LGGE s'est impliqué dans ce projet, non seulement sur le plan scientifique, mais également au niveau de la logistique et de la réalisation du forage proprement dit.

Le laboratoire a conçu et installé le système d'alimentation et de production d'eau du camp, obtenue par fusion de la neige. Les techniciens du laboratoire ont participé au montage des bâtiments. Ils ont également pris part aux opérations de carottage, c'est-à-dire pris les commandes et procédé à toutes les opérations nécessaires au bon fonctionnement du carottier.

### 1.2.2 Casey (DE08) (décembre 1992-mars 1993)

DE08 (66°40'S, 113°10'E) est un site particuliè-

rement intéressant pour l'étude de l'évolution récente de l'atmosphère car la température moyenne annuelle de  $-19^{\circ}\text{C}$  permet la quasi-absence de fusion estivale (source de contamination dans l'étude des gaz) et grâce à l'accumulation neigeuse élevée, 115 g.cm<sup>-2</sup>.an<sup>-1</sup>, on peut obtenir des profils particulièrement détaillés.

La mission franco-australienne avait deux buts principaux :

- 1) Etude du transfert de l'air atmosphérique dans la glace par un suivi, entre la surface et la transition névé-glace, de la composition de l'air et de la quantité d'air piégé sous forme de bulles.
- 2) Récupération d'échantillons de glace en vue d'obtenir un profil «haute résolution» de l'évolution de l'atmosphère depuis le début du XIXe siècle.

Les services techniques du LGGE ont réalisé au préalable les appareils nécessaires à la réalisation du programme:

- . un carottier électromécanique, dit «carottier 200 mètres», capable en fait de forer à sec jusqu'à 300 m environ,
- un ensemble composé d'un manchon gonflable au diamètre du trou, du dispositif de gonflage, d'un treuil, et de l'appareillage de prélèvement d'air entre le fonds du trou et le manchon,

L'équipe sur le terrain incluait deux Français : un scientifique (J.M. Barnola) de l'équipe Climat et un mécanicien-foreur (A. Manouvrier) des Services Techniques. Deux Australiens complétaient l'équipe, assurant en particulier une part importante de la logistique.

### ***1.2.3 Operation Portos-neige (Décembre 1993)***

Participants pour les services techniques : C. Rado, J.L. Remané (CDD), C. Girard

Objectifs : Valider les modèles actuels de calcul d'émissivité ou de température de brillance de la neige. Ces modèles sont indispensables à l'interprétation des données satellitaires sur les calottes polaires.

Le but était d'obtenir simultanément un ensemble de mesures radiométriques et de terrain sur un site recouvert d'une grande épaisseur de neige froide et sèche, ce qui est

le cas pour le site retenu, c'est-à-dire la zone qui s'étend entre l'Aiguille du Midi et le Gros Rognon, à l'aplomb du télécabine de la Vallée Blanche, dans le massif du Mt Blanc.

L'équipe technique a été chargée de la conception et de la réalisation de deux cabines pouvant être accrochées à la place des cabines passagers.

La cabine «instrument» a été conçue de manière à intégrer le radiomètre PORTOS (CNES) et à respecter les gabarits imposés par le télécabine. Elle comporte les antennes et les coffrets d'électronique. Grâce au dispositif ainsi réalisé, le bloc antenne a un débattement angulaire d'environ  $130^{\circ}$ , permettant des visées de la neige et du ciel à plusieurs angles d'incidence. La cabine «énergie» a été fabriquée pour contenir le groupe électrogène de 5 KVA alimentant l'ensemble des instruments utilisés.

La réalisation des cabines, l'adaptation de la cabine opérateur, l'intégration de PORTOS, de l'électronique et du groupe électrogène ont été menées au laboratoire d'Août à Octobre 1993. Du 6 au 12 Octobre, ce matériel a été transporté à Chamonix puis acheminé à l'Aiguille du Midi. Les cabines ont été accrochées, les étalonnages réalisés mais les conditions météorologiques durant cette période ne permettront qu'une sortie des cabines. Cette opération sera reconduite en Janvier 94, où deux journées complètes pourront être consacrées aux mesures (radiométrie + terrain).

### ***1.2.4 Forage Mt-Blanc (Juin 1994)***

Dans le cadre du projet ALPTRAC, des opérations de carottage ont été menées simultanément par les Suisses au Colle Gnifetti, les Italiens au Mt Rose et les Français dans le massif du Mt Blanc, afin de retracer l'évolution de la pollution européenne au cours du dernier siècle. Ont participé à cette opération pour les services techniques : C. Rado, A. Manouvrier, P. Journé (CDD).

Le Col du Dôme (4250 m) a été choisi comme un des meilleurs sites pour une telle opération.

Le carottier mis en oeuvre, du type électromécanique, a été utilisé lors de précédentes missions en Antarctique et au Groenland. L'énergie était fournie par un groupe électrogène de 5 KVA. Ce matériel (800 Kg) a été acheminé sur le site par hélicoptère, ainsi que les participants. Ceux-ci

ont bénéficié d'une acclimatation de plusieurs jours à l'Aiguille du Midi. Pendant la mission, ils ont été logés à l'Observatoire Vallot.

Quatre forages étaient programmés mais les conditions météorologiques ont été particulièrement défavorables : vents très violents, blizzard, chutes de neige et brouillard ont souvent gêné, voire stoppé les opérations de carottage.

Sur les 23 jours de présence sur le terrain, onze seulement ont pu être consacrés au forage, les matinées étant souvent réservées au déneigement du camp.

Néanmoins, deux carottages ont pu être menés à bien. Le premier a permis d'atteindre le fond rocheux à 120 mètres de profondeur. Le second a été arrêté à 140 mètres, après coincement momentané du carottier.

### 1.2.5 Vostok

Le forage à la station Vostok (Antarctique) a été mené sous la direction des foreurs russes de l'institut des mines de St Petersburg. Ont participé à cette opération : J.Ph. Balestrieri, C. Rado, C. Girard, A. Manouvrier, J.R. Petit, J.L. Remané (CDD)

En décembre 91 pendant la campagne d'été, le forage 5G de Vostok atteignait 2503 m. Cependant lors d'une opération de remontée, le carottier fut coincé à 2280 m et détaché du câble sous les efforts de traction visant à l'extraire du trou. Cet accident n'était pas moins le 7ème survenant au cours des dix dernières années et le 4ème au delà de la profondeur de 2000 m. En l'absence d'avarie évidente, cet accident nécessitait une explication. L'extension de la campagne d'été d'une quinzaine de jours a permis une expertise et de mettre en évidence qu'à partir de 2000 m le trou devait se refermer car la pression de la glace n'était pas, et de loin, compensée par une pression de fluide suffisante. En effet, avec un niveau de fluide maintenu à 200 m de profondeur et une densité de fluide proche de 0,87, le déficit de pression est de l'ordre de 20 bars permettant la fermeture du trou d'autant plus rapide que la température de la glace est plus élevée de 14 °C par rapport à la surface (-57 °C). Cette interprétation devait expliquer la plupart des accidents antérieurs mais fallait-il encore mettre en évidence la fermeture du trou, proposer des solutions et convaincre les foreurs russes. Le contexte politique de l'époque (désintégration de l'URSS) et les difficultés économiques de la Russie qui suivi-

rent ont affecté les différents instituts. La fermeture de la station de Vostok de février à novembre 94, suite aux problèmes de ravitaillement en fuel, ajouta des contraintes supplémentaires à la poursuite du projet.

Compte tenu de l'intérêt scientifique des carottes de glace du site de Vostok, le LGGE, au travers de ses services techniques déjà sollicités par d'autres programmes (GRIP, Portos, Mt Blanc), s'est impliqué dans le soutien aux opérations du forage russe. De plus, le LGGE a invité des foreurs russes pour la préparation des campagnes menées annuellement sur le terrain. L'efficacité de l'aide apportée depuis 92 semble porter ses fruits puisque le forage, repris en 92 à 2240 m, a atteint la profondeur de 2940 m aux dernières nouvelles en juin 95, profondeur jamais atteinte en Antarctique.

### Réalisations

#### Installation d'un treuil pour les mesures géophysiques

Antérieurement les appareils de mesures pour la surveillance du trou (diamètre, température) étaient installés à la place du carottier au bout du câble principal. Cette opération était lente et délicate aussi les mesures géophysiques étaient négligées pour le trou en cours de forage. Pour faciliter les opérations, le LGGE a fourni un treuil (climatopique) et a installé l'ensemble dans un abri préfabriqué monté sur un traineau (campagne 92-93) (Fig.6.1).

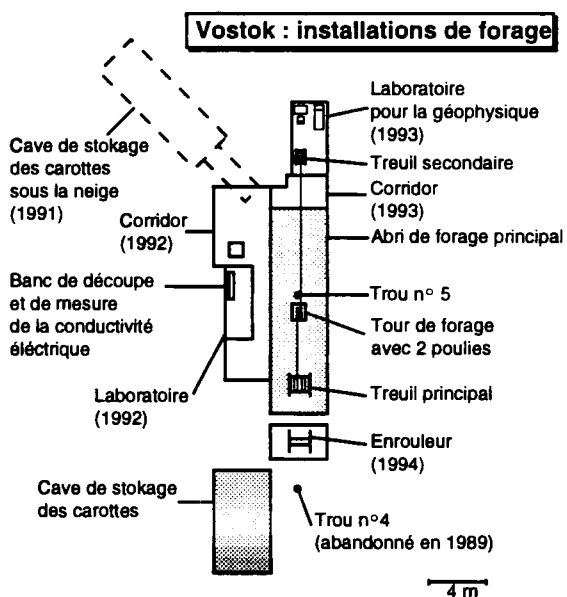


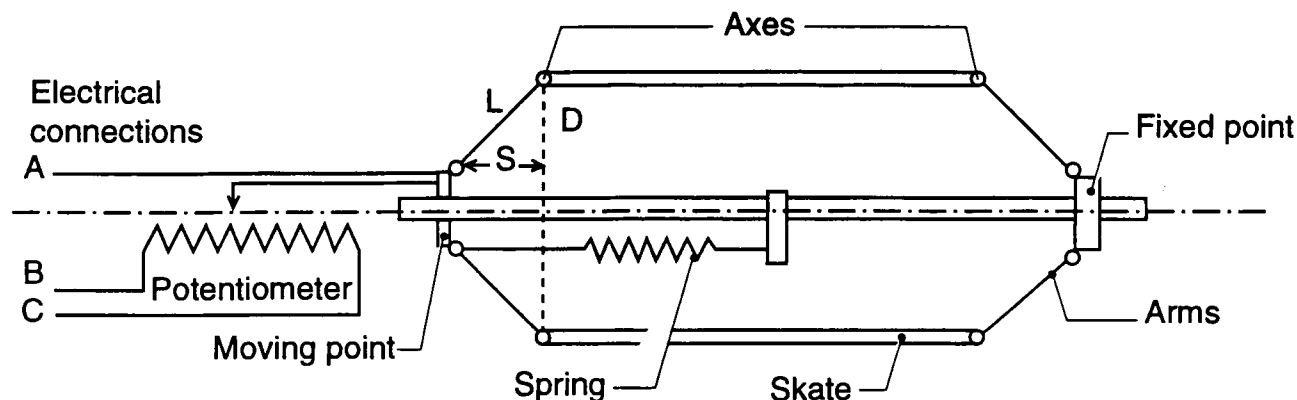
Figure 6.1 :

Plan d'installation autour du forage de Vostok et les diverses réalisations du LGGE.

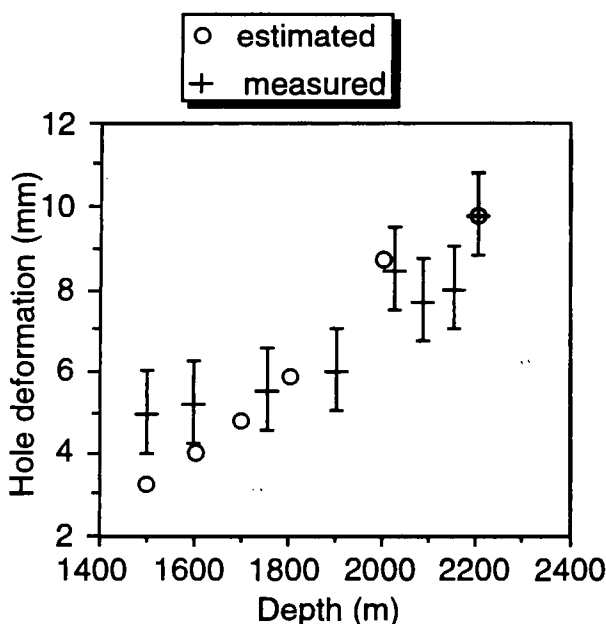


Des mesures précises du diamètre du trou (Fig. 6.2a) confirmèrent rapidement l'hypothèse du coincement du carottier par la fermeture du trou ainsi que la loi de fermeture du trou suivant la loi de Glen proposée par des études antérieures et donc applicable aux conditions de Vostok (Fig.

La glace n'étant imperméable qu'à partir de 100 m de profondeur, il fut nécessaire de tuber le trou de la surface jusqu'à 120 m et d'assurer une bonne étanchéité entre le tube (casing) et la glace par scellement. Pour cela, le LGGE a réalisé un aléreur permettant d'agrandir le trou existant (diamètre 180 mm) et le pas-



**Figure 6.2a :**  
Schéma du mesureur de diamètre.



**Figure 6.2b :**  
Réduction du diamètre du trou 5G mesuré et calculé d'après la loi de Glen (Tchistiakov et al., 1994).

6.2b) (Tchistiakov et al., 1994).

#### Réalisation d'un aléreur et installation d'un tubage

Pour contrebalancer la pression de la glace, la colonne de fluide doit avoir une hauteur et une densité appropriée. Ainsi, le niveau du fluide doit être maintenu vers 80 m de profondeur (au lieu de 200 m antérieurement) et la densité voisine de 0,93 (au lieu de 0,87). Ceci souleva de nouveaux problèmes.

sage du tubage (diamètre 220 mm). L'aléreur comportait un réservoir pour la récupération des copeaux afin d'éviter le bouchage du trou. L'appareil installé sur le treuil secondaire a été testé pendant la campagne 92-93 et utilisé avec succès en 93-94.

Le tubage en fibre de verre, acheté en Australie, était composé de tubes de 5,5 m de long assemblés entre eux. Des tests d'étanchéité ont été réalisés sur le terrain dans les conditions de température proches de celle du trou. Le premier tube a été aménagé pour permettre le scellement du tube à la glace. Un sabot chauffant et un réservoir concentrique au tube et contenant de l'eau regelée noyant une résistance chauffante ont été installés.

L'alésage du trou et la mise en place du tubage ont été réalisés avec succès pendant la campagne 93-94. Le niveau du fluide a été rehaussé à la profondeur de 40 m.

Ajustement de la densité du fluide et effort pour la préservation de l'environnement

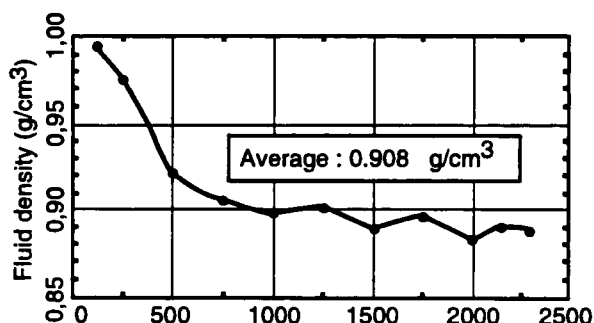
Le fluide de forage était un mélange de kérosène et d'un fluide densificateur (CFC-11). Une étude approfondie des caractéristiques du mélange (densité, température) a été faite. Cependant, l'utilisation du CFC-11 ne pouvait être poursuivie en Antarctique pour un programme soutenu par la France et les Etats-Unis après la signature par ces deux pays du protocole de Montréal. Une recherche a été nécessaire pour sélectionner un nouveau fluide s'intégrant à la technologie existante et le HCFC-141b, substitut des CFC a été retenu pour ses propriétés similaires à celles du CFC-11.

Sa réactivité vis-à-vis de la dissociation de l'ozone (ODP) et vis-à-vis de l'effet de serre (GWP) est 9 fois inférieure à celle du CFC-11. Ce fluide, fourni par le LGGE, a été intégré aux opérations de forage à partir de 1994. Sur la figure 6.3 sont représentés les résultats des mesures de densités réalisées par prélèvements dans le trou.

#### Autres Réalisations et Services

- Enrouleur : cet appareil permet le changement du câble principal en cas d'avarie ainsi que d'enrouler le câble sur son treuil avec une traction (mis en place en 94-95). Par ailleurs, le LGGE a fourni un câble de remplacement de 4000 m de longueur.
- Appareil électrique permettant le démarrage sans délestage, du moteur de la génératrice alimentant le treuil principal.
- Régulateur de vitesse pour le moteur carottier.
- Fourniture de poulie de sommet du mât ayant un diamètre adapté au diamètre du câble : ceci pour réduire les contraintes et les endommagements du câble.
- Fourniture de trois transformateurs 220 V/800 V, 10 kVA, de deux abris en préfabriqué.
- Réservoir permettant l'injection de fluide à la profondeur désirée.
- Appareil permettant la mesure et le suivi du niveau du fluide.
- Appareil pour la mesure du diamètre du trou.
- Filtre servant à nettoyer le fluide des particules en suspension.
- Aléseur fonctionnant dans le fluide. Un prototype a été testé en 93-94 et doit être perfectionné.
- Avec l'accueil au LGGE d'un foreur russe pendant une période de 3 mois, de nombreuses pièces de rechange pour le carottier ont été réalisées.

A côté des actions spécifiques liées aux opérations de forage, il a été réalisé un banc de découpe et de mesure servant à l'échantillonnage des carottes et à la mesure de la conductivité électrique de la glace. Cet appareil



**Figure 6.3 :**

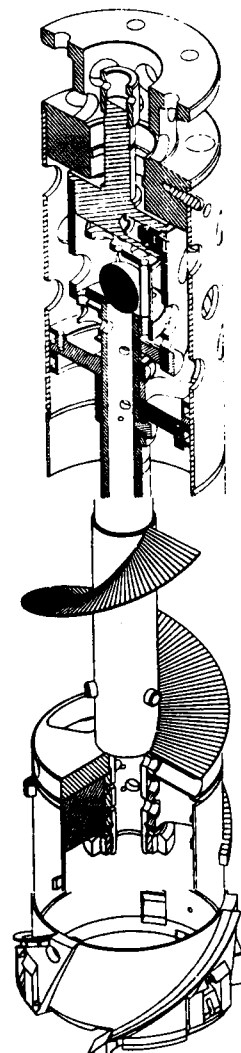
Profil typique de densité du fluide de forage obtenu par prélèvement

a été installé dans le laboratoire à Vostok (Fig. 6.1).

#### Publication

Tchistiakov V.K., Kracilev A., Lipenkov V.Ya, Balestrieri J.Ph., Rado C., and Petit J.R. (1994) : Behaviour of a deep hole drilled in ice at Vostok station. *Mem Natl Inst. Polar Res. Spec. Issue, 49, 247-255.*

#### 1.2.6 EPICA (1994-95)



**Figure 6.4 :**

Vue perspective de l'intérieur du carottier EPICA (réalisée par le logiciel CAO Euclide).

Dans le cadre de l'European Project for Ice Coring in Antarctica (EPICA), le LGGE s'est vu confier depuis mi 94 la responsabilité de la réalisation de la partie inférieure (mécanique) du

carottier profond. Notons que ce travail s'est fait en étroite collaboration avec les équipes danoise et suisse. En parallèle, une équipe italienne effectue la conception et la réalisation de la partie électronique du carottier profond. Ce carottier sera donc le fruit d'une réelle collaboration européenne. L. Augustin et P. Journée

Cette partie inférieure du carottier a été conçue, dessinée, réalisée et assemblée en 6 mois seulement, pour permettre d'effectuer un test au Groenland (à Hans Tausen) en Juin 95.

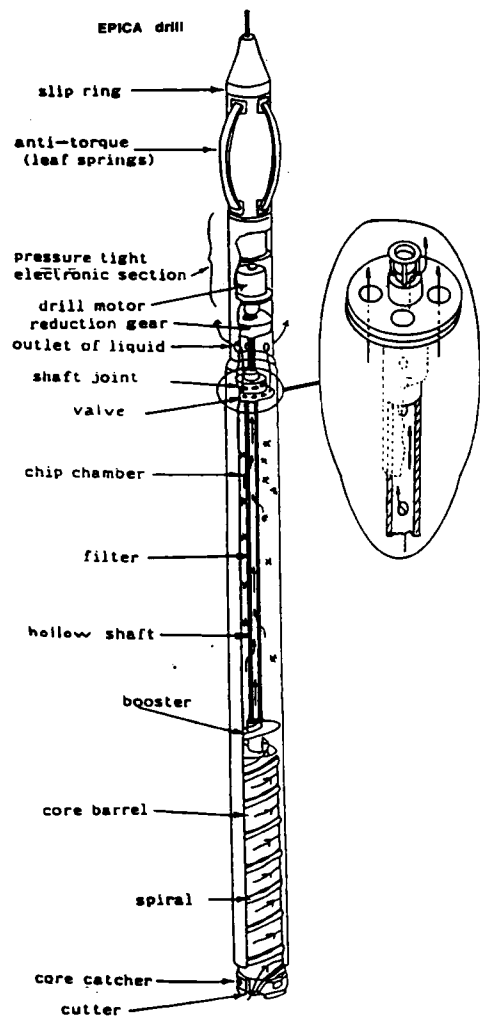
Voici les principales particularités ou innovations techniques introduites dans ce travail :

- L'arbre central (hollow-shaft) qui transmet le mouvement du moteur du carottier à la tête de forage est creux et percé sur toute sa longueur ; un filtre est placé en manchon autour de cet arbre. Le fluide peut donc être séparé du mélange fluide/copeaux sur toute la hauteur de l'arbre,
- Deux systèmes de valves situées de part et d'autre de l'arbre permettent ou non un écoulement à travers le corps du carottier. Le liquide peut passer à travers le corps du carottier durant la descente (valves ouvertes), alors que durant le forage et la montée le mélange liquide/copeaux est maintenu stocké sans fuite possible dans le tube réservoir (Clip Chamber) (valves fermées),
- A la descente, le liquide peut circuler à l'intérieur de l'arbre central, alors qu'à la remontée, une balle de densité proche de celle du fluide joue le rôle de clapet et y empêche la circulation du fluide.

Les objectifs fonctionnels de ces innovations en matière de carottage électromécanique sont

- de permettre au fluide de s'écouler au travers du corps du carottier à la descente.. Un calcul hydraulique de la vitesse de déplacement du carottier dans son trou de forage a en effet montré qu'un gain de vitesse de 30 % était alors obtenu,
- d'assurer une bonne étanchéité du tube réservoir durant les phases de montée et de forage,
- d'augmenter la surface de filtrage et d'assurer ce filtrage aussi bien en partie basse qu'en partie haute du tube réservoir,

Notre équipe attend avec impatience les résultats des tests mentionnés ci-dessus, qui, nous l'espérons, confirmeront l'opiniâtreté de ces nouvelles solutions. Si tel est le cas, une version définitive sera mise en oeuvre au LGGE en



**Figure 6.5 :**

*Principe de fonctionnement du carottier EPICA. 1995-1996, qui devrait permettre de forer (~ 3000 m de glace) à Dôme Concordia.*

### **1.2.7 Station de prélèvements atmosphériques :**

Ont participé à ce projet : G. Marec, E. Lefebvre, M. Maitre

Cette station de prélèvements atmosphériques a été étudiée pour obtenir des échantillons d'aérosols en régions polaires. Afin de préserver un secteur dit propre et de générer un minimum de contamination, la station est alimentée par énergie solaire. Autonome, elle est équipée d'un système d'alimentation électrique par panneaux solaires, reliés à des batteries tampons. Ces panneaux sont constitués de cellules photovoltaïques à haut rendement. L'énergie ainsi obtenue alimente des

pompes à air. Un tableau régulateur permet d'éviter à la fois la surcharge et la décharge des batteries, en fonction de l'ensoleillement. Connecté au régulateur, un tableau de commande sélectionne les pompes dans un mode de fonctionnement déterminé (marche normale, marche forcée ou arrêt). Le piégeage des aérosols est obtenu par un filtre Téflon, après quelques heures de pompage.

*Modifications et extensions :*

Une fois modifiée, la station est maintenant composée de 30 panneaux solaires ainsi que de batteries spéciales basses températures. Les panneaux solaires (de 1040x460mm) montés sur supports orientables, permettent d'obtenir une puissance unitaire maximale de 48 Watts. Des relais optoélectroniques et l'électronique de contrôle gèrent l'utilisation.

La station a parfaitement fonctionné durant deux saisons au Groenland puis trois saisons en Terre Adélie (île du Gouverneur). Après modifications et extensions le matériel renvoyé en Terre Adélie n'a pu être installé et testé pour des problèmes de logistique.

*Pré-étude de la télécommande :*

La télécommande a pour but de contrôler et de piloter la station, située dans un secteur propre, depuis un camp de base (distance: quelques kilomètres). La gestion à distance n'effectuera pas toutes les opérations de contrôle local mais doit permettre:

- \* l'arrêt ou la mise en fonctionnement des pompes.
- \* le contrôler de l'alimentation des pompes.
- \* la gestion d'une image de la tension batterie.
- \* les lignes d'énergie des batteries, et le contrôle de la charge et la décharge.
- \* la visualisation du fonctionnement global de la station.

L'ensemble de la télécommande est composé de deux éléments indépendants :

- a) Un système de contrôle des processus (Pilote station) ; la base du système est un microprocesseur Z80, qui contrôle et pilote la station de prélèvements.
- b) Un micro ordinateur compatible IBM PC (Gestion station) ; programmé pour représenter une image du fonctionnement de la station, il reçoit et visualise les informations en provenance de la station et transmet les commandes de pilotage.

Le système étant appelé à être utilisé en région polaire et alimenté par énergie solaire, il doit répondre à deux contraintes principales :

- La tenue en température des composants. Cette température peut varier suivant les sites de -10°C à -25°C en régions côtières et de -35°C à -55°C sur le plateau Antarctique.
- De réduire au minimum la consommation des cartes. L'alimentation par batterie impose l'utilisation de composants à faibles consommations.

Nous avons utilisé, pour répondre à ces critères, la famille du microprocesseur Z80 en version CMOS, ainsi que la technologie HCMOS pour les circuits logiques :

- Température basse de fonctionnement des composants est de -40°C, boîtiers plastiques et -55°C pour la série militaire.
- Technologie faible consommation (15mA à 4Mhz pour le microprocesseur), la tension d'alimentation de l'ensemble est de +5Volts.

L'ensemble du pilote station a été entièrement développé au laboratoire. Les tests matériels et logiciels ont été réalisés à l'aide d'un outil de développement (HP64000 de HEWLETT PLACKARD). L'application PC a été écrite en langage C avec l'utilisation de VISUAL C++ (système de développement MICROSOFT sous windows).

## II SERVICE INFORMATIQUE

### Equipement informatique du LGGE :

L'équipement informatique du LGGE a suivi l'évolution des technologies. D'une informatique centralisée dans les années 80 (mini-ordinateur et terminaux passifs), grâce à un embryon de réseau local installé dès 1988, nous nous sommes orientés très tôt vers une informatique distribuée avec l'adoption de certaines technologies devenues des standards du marché (système UNIX, réseaux Ethernet TCP/IP).

L'obtention de financements réguliers, notamment de la part de l'INSU, a permis une mise à niveau constante du parc. Parallèlement, la baisse notable du coût du matériel nous a permis d'accroître considérablement les capacités locales en terme de calcul, de stockage et de traitements graphiques. Les stations UNIX, actuellement au nombre de 10, représentent un total de 300 MFLOPS et de 15 GO de mémoire de masse.

Le parc actuel comprend :

- *des stations UNIX :*
- . stations HEWLETT PACKARD série 700 :
  - une 735 avec 112 Mo RAM, 2 disques internes 1 Go, une baie de stockage externe comprenant un disque 1,3 Go, un DAT, un lecteur de CDROM
  - une 720 avec 64 Mo RAM et deux disques internes de 420 Mo
  - une 715/50 avec 96 Mo RAM, un disque interne de 1 Go, un DON de 1,3 Go, un lecteur de CDROM et un disque externe de 4 Go.
  - une 715/33 avec 32 Mo RAM et un disque de 1Go
  - une 715/33 avec 96 Mo RAM et un disque de 1Go
  - deux 712/80 avec 32 Mo RAM et un disque de 1 Go
  - une 712/60 avec 32 Mo RAM et un disque de 1 Go
  - une 712/60 avec 16 Mo RAM et un disque de 260 Mo
- . *station SUN:*
  - une SS2 avec 32 Mo RAM et deux disques (au total : 1,4 Go), un lecteur de CDROM et une unité de cassettes.

- 70 micro-ordinateurs de type PC ou MAC en réseau, une dizaine autonomes ainsi que des périphériques divers :
- 2 imprimantes réseau (QMS 860 et LaserJet 4 M Plus)
- 1 scanner à plat monochrome HEWLETT PACKARD
- une imprimante couleur jet d'encre DESKJET 1200C
- un terminal X couleur
- plusieurs imprimantes laser ou jet d'encre réparties dans les bureaux.
- quelques lecteurs de cdrom et don 128 Mo.

Réseau : de type lan partagé, actuellement en cablage de type coaxial fin.raccordé à la fibre optique du réseau campus (ARAMIS) par un pont filtrant et fédéré par un répéteur 3COM LINKBUILDER 10 voies BNC.

Logiciels:

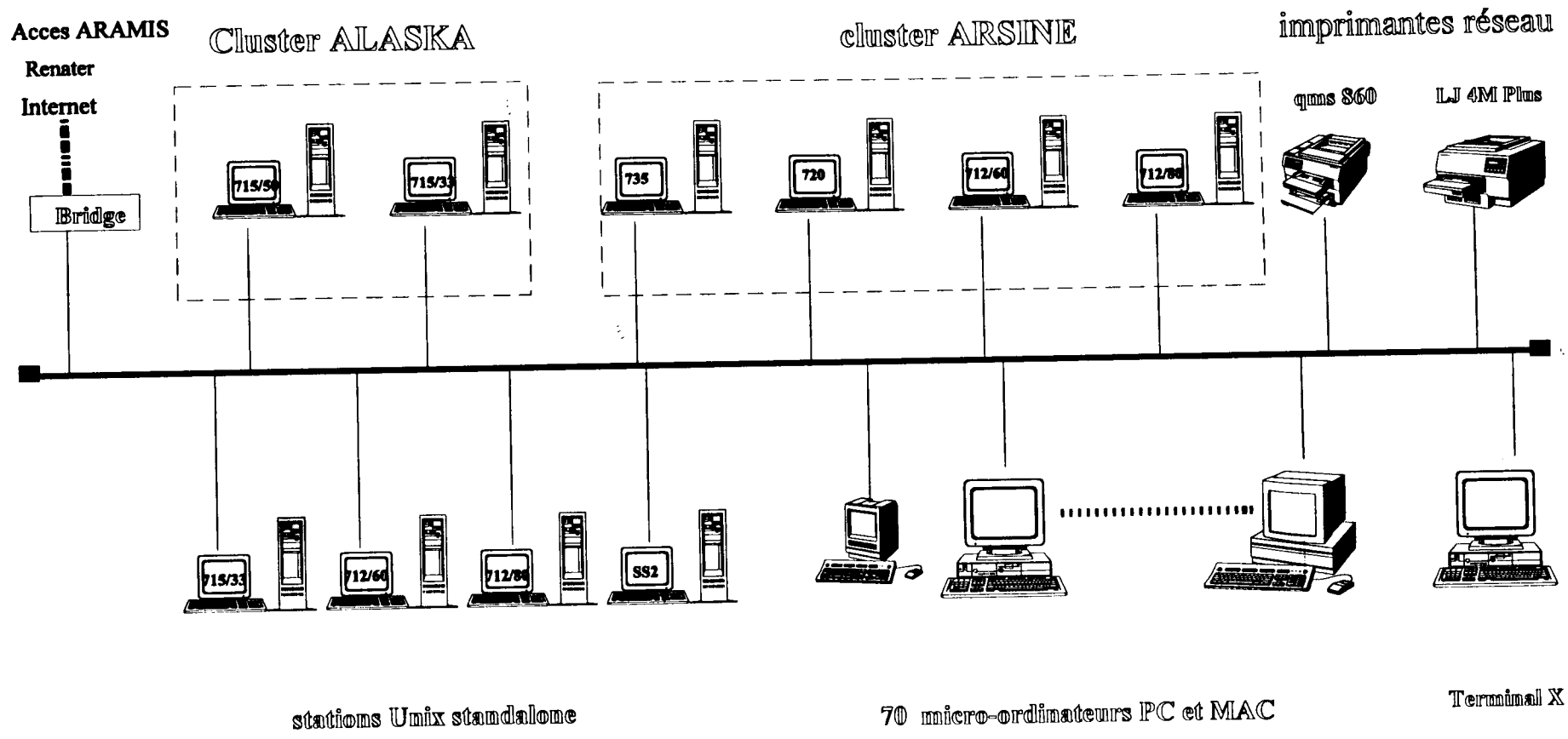
- bureautique :
  - traitement de texte: WORD PERFECT version PC (Dos et Windows), MAC et UNIX. WORD de Microsoft. LATEX sous UNIX.
  - tableur: EXCEL
  - SGBD: OMNIS pour la gestion du laboratoire : Xlab, Labintel
- scientifique:
  - grapheurs: GRAPHER (PC) et IGOR (MAC)
  - Langages: C, FORTRAN, PASCAL
  - Bibliothèques: mathématiques HARWELL,
  - graphique : NCAR, GMT
  - Statistiques: UNISTAT

Réseau:

- couche IP :PC/TCP pour les PC. MAC TCP pour les MAC
- autres: couche X11 : EXCEED pour les PC, MAC X pour les MAC.
- utilitaires divers : EUDORA, MOSAIC,...
- serveur LAN MANAGER pour une douzaine de PC.

### Fonctionnement

A l'heure actuelle, pratiquement tout le personnel (hors atelier) dispose d'un poste de travail (micro ou station) permettant d'assurer à la fois la fonction bureautique



# Réseau local LGGE 05/95

(logiciels en local) et la fonction poste de calcul (accès aux stations UNIX par réseau). Les stations UNIX assurent essentiellement les fonctions de serveur : calcul, impression, stockage, sauvegarde, messagerie, accès internet...

Pour simplifier l'utilisation des stations, l'espace utilisateurs est géré en automount (répartition des comptes sur les disques de toutes les stations et montage automatique des espaces par la technique automount de NFS). Les stations du service sont regroupées en 2 clusters (simplification de l'administration, des mises à jour système et meilleure exploitation des ressources).

Une partie des travaux notamment en modélisation est soumise à des serveurs de calcul externes (IDRIS, CGCV,...), environ 550 Heures CPU depuis 4 ans. Le besoin est actuellement en croissance nette.

### **Potentiel humain**

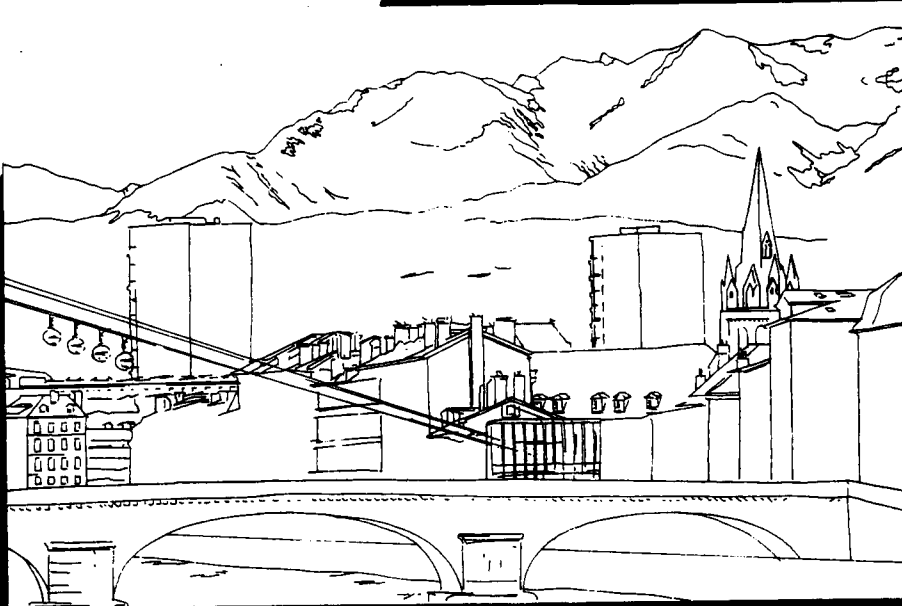
Création d'un poste assistant ingénieur en Janvier 1993 faisant suite à l'embauche sur un poste CDD les 2 années précédentes. Le service comprend actuellement 2 personnes.

MC MIEULET : IR2. responsabilité du service (temps partiel 80 %)

E. DREVET : AI. Administration des systèmes.

L'explosion du nombre de machines, de logiciels et d'étudiants accueillis pèse lourd sur la charge de travail. Une saturation se fait sentir depuis quelque temps. Les «services» rendus ont de ce fait aussi beaucoup évolués. La banalisation des postes informatiques induit une charge de plus en plus importante en assistance et maintenance.

**ERCA**



European Research Course on Atmospheres

**TOPICS IN ATMOSPHERIC  
AND INTERSTELLAR PHYSICS  
AND CHEMISTRY**

Chapitre 7 :

**ACTIVITE ENSEIGNEMENT**



Les activités d'enseignement ont toujours occupé une place privilégiée au Laboratoire de Glaciologie et Géophysique de l'Environnement, fondé par le Pr. Lliboutry. Ces activités ont cependant pris une nouvelle dimension au cours de ces dernières années avec la mise sur pied du «European Research Course on Atmospheres» («ERCA») en 1993 et celle, à partir de la rentrée universitaire 1995, de la nouvelle Formation Doctorale «Climat et Physico-Chimie de l'Atmosphère» («CPCA»).

## 1. PERSONNEL IMPLIQUÉ

Le LGGE comprend actuellement dix enseignants chercheurs, se répartissant entre 3 Professeurs et 7 Maîtres de conférences :

Professeurs : Claude Boutron (Pr. 1e classe ; vient d'être nommé membre senior de l'Institut Universitaire de France) ; Jurgen Klinger et Michel Vallon (Pr. 2e classe).

Maîtres de conférences : Jean-Pierre Benoist (MCF 1e classe) ; Michel Fily (MCF 1e classe) ; Stéphane Houdier (MCF 2e classe) ; Anne Letreguilly (MCF 2e classe) ; Marie-Antoinette Mélières (MCF 1e classe) ; Armelle Philip (MCF 2e classe) ; Louis Reynaud (MCF 1e classe).

En tant que laboratoire, le LGGE est rattaché à l'UFR de Mécanique de l'Université Joseph Fourier. Cependant, un seul de ses enseignants chercheurs a son service d'enseignement géré par cette UFR. Pour différentes raisons, la plupart des enseignants chercheurs du LGGE dépendent en effet de l'UFR de Physique pour leurs enseignements. Les seules exceptions, en plus de celle mentionnée ci-dessus, concernent un enseignant chercheur géré par l'UFR de Géologie et un autre géré par l'UFR de Chimie. Cette relative dispersion, qui reflète non seulement l'aspect pluridisciplinaire du LGGE mais aussi des contraintes locales, se retrouve au niveau des sections du CNU dont dépendent les enseignants chercheurs du LGGE. Ils se répartissent en effet entre les sections :

- 37 («Météorologie, Océanographie Physique et Physique de l'Environnement») : 6 enseignants chercheurs,
- 34 («Astronomie, Astrophysique») : 1 enseignant chercheur,
- 36 («Géologie et Paléontologie») : 1 enseignant chercheur
- 31 («Chimie théorique, physique, analytique») : 1 enseignant chercheur,
- 60 («Mécanique, Génie mécanique Génie civil») : 1 enseignant chercheur

À côté des enseignants chercheurs, un certain nombre de chercheurs CNRS du LGGE sont fortement impliqués dans des activités d'enseignement non seulement en 3e cycle (DEA) mais aussi en 2e cycle, avec des volumes horaires souvent importants. Ceci mérite d'être d'autant plus souligné que seule leur participation active a rendu possible certaines initiatives comme la création du nouveau DEA CPCA. Parmi ces chercheurs, on peut notamment mentionner Michel Legrand, Paul Duval, Florent Dominé et Dominique Reynaud.

Les activités d'enseignement les plus directement liées au LGGE (ERCA et nouvelle Formation Doctorale CPCA) impliquent un travail de secrétariat important. Il s'agit là d'un réel problème qui n'a pas été résolu de manière vraiment satisfaisante. Pour ERCA, le secrétariat (équivalent à environ 1/2 poste) est en effet effectué par une secrétaire CNRS, le budget d'ERCA assurant la compensation par recrutement de secrétaires vacataires. Pour la formation doctorale CPCA, le secrétariat (équivalent à environ 1/4 de poste) est effectué par une secrétaire d'enseignement supérieur (Marie-Laurence Savarino) provisoirement affectée au LGGE et dont le poste vient d'être repris par l'UJF..

## 2. PANORAMA GÉNÉRAL DES ENSEIGNEMENTS EFFECTUÉS

En moyenne, les enseignements effectués au cours de ces dernières années se répartissent de la façon suivante : environ 48. % en 1er cycle (Deug A et B) ; 38 % en 2e cycle (Licences, Maîtrises, Magistères,...) , et 14 % en 3e cycle (différents DEAs).

Une grande partie de ces enseignements ne sont pas directement liés aux thèmes de recherche du LGGE, avec notamment des contributions importantes de travaux pratiques et travaux dirigés de Deug.

Une partie correspond cependant à des enseignements directement reliés aux thèmes de recherche du LGGE. Ils comprennent (chiffres annuels moyens approximatifs) :

- Deug A2, option Géophysique : 44 H
- Licence et Maîtrise de Physique et Applications, option Géophysique : 100 H
- Magistère de Physique : 24 H
- Magistère Rhône Alpes Auvergne des Sciences de la Terre (ENS Lyon) : 12 H
- ESIGEC Chambéry : 43 H
- DEA Mécanique des Milieux Géophysiques et Environnement : 104 H

# European Research Course on Atmospheres

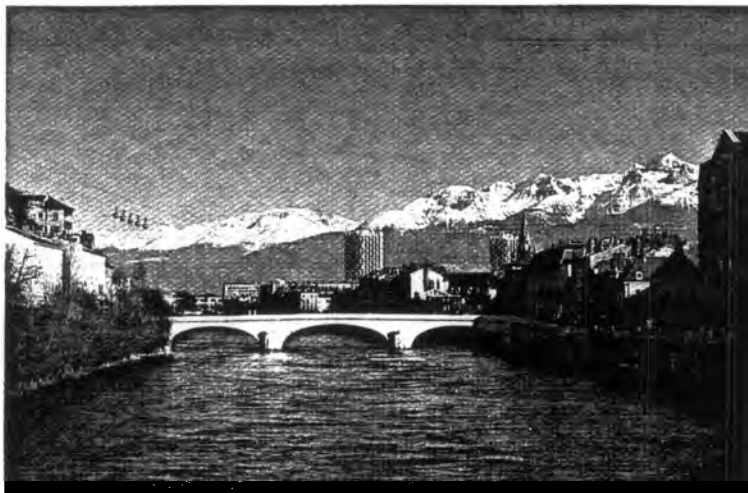
## Cours de Recherche Européen sur les Atmosphères



# 1996



*CLIMATE AND ATMOSPHERIC PHYSICS AND CHEMISTRY*  
*CLIMAT, PHYSIQUE ET CHIMIE DES ATMOSPHERES*



**Director:**  
**C. BOUTRON,**  
University  
of Grenoble /  
CNRS Grenoble /  
Institut Universitaire  
de France

**GRENOBLE**  
**(FRANCE)**  
(January 8 -  
February 7  
1996)

## PROGRAMME

### \* Lectures and Tutorials

- 1. Physics and Chemistry of the atmosphere of the Earth**  
Structure of the atmosphere; general atmospheric chemistry; radiative transfer and greenhouse effect; stratospheric and tropospheric ozone; aerosols; atmospheric circulation; atmospheric phase of biogeochemical cycles; biosphere-atmosphere exchanges; paleo data from ice cores; modelling.
- 2. Climate system and climate change**  
Fundamentals and modelling of the climate system (atmosphere, oceans, land processes, sea-ice, glaciers and ice sheets); interactions between components of the climate system and climate dynamics; past changes and global warming.
- 3. Physics and chemistry of the atmosphere of other solar system objects**  
Physics, chemistry, photochemistry, formation and evolution of the atmospheres of telluric planets, giant planets and satellites; physico-chemistry of comets.
- 4. The basics of cosmochemistry**  
The various phases of the interstellar medium and their associated physico-chemistry.

The lecturers will include: F. Adams (Antwerpen), S. Atreya (Ann Arbor), G. Brasseur (Boulder), T. Cox (Cambridge), P. Crutzen (Mainz), R. Duce (College Station), S. Fuzzi (Bologna), D. Gautier (Paris), I. James (Reading), S. Joussaume (Paris), M. Legrand (Grenoble), G. Megie (Paris), J. Oerlemans (Utrecht), J. Plane (Norwich), M. Prather (Irvine), T. Stocker (Bern), F. Taylor (Oxford), M. Walmsley (Bonn).

### \* Seminars

- \* **Poster presentation of the research work of the participants**
- \* **Visit of the European Synchrotron Radiation Facility (ESRF)**
- \* **Experimental atmospheric measurements at Observatoire de Haute-Provence**  
(Temperature, wind and ozone lidars, Michelson interferometer Micado, balloon sounding).

## APPLICANTS

- \* **Students registered in the doctoral programme of a European University**
- \* **Scientists and Research Engineers from public and industrial european laboratories**
- \* **Permanent scientists of the french CNRS (Formation Permanente).**
- \* **Thesis students and researchers from non european countries.**

## Scientific advisory committee

**F. ADAMS,**  
University of Antwerpen  
**A. BERGER,**  
University of Louvain  
**T. COX,**  
University of Cambridge  
**R.A. DUCE,**  
Texas A.M. University  
**D. GAUTIER,**  
Observatory of Paris-Meudon  
**D. KLEY,**  
University of Wuppertal  
**G. MEGIE,**  
University of Paris  
**J. PLANE,**  
University of East Anglia  
**R. ROSSET,**  
University of Toulouse  
**E. ROUEFF,**  
Observatory of Paris-Meudon  
**G. SHAW,**  
University of Alaska  
**H. VAN DOP,**  
University of Utrecht  
**B. VERSINO,**  
Ispra Research Center  
**R. WAYNE,**  
University of Oxford

## Organizing committee

**S. ANQUETIN,**  
CNRS Grenoble  
**J. CHAPPELLAZ,**  
CNRS Grenoble  
**R.J. DELMAS,**  
CNRS Grenoble  
**G. DUVERT,**  
Observatory of Grenoble  
**C. GENTHON,**  
CNRS Grenoble  
**A. HAUCHECORNE**  
CNRS Verrières  
**J. JOUZEL,**  
CEA Saclay  
**J. KLINGER,**  
University of Grenoble  
**W. KOFMAN,**  
Observatory of Grenoble  
**M. LEGRAND,**  
CNRS Grenoble  
**C. LE PROVOST,**  
CNRS Grenoble  
**P. MARTINERIE,**  
CNRS Grenoble

## Supported by

- **Université Joseph Fourier**
- **Centre National de la Recherche Scientifique (Formation Permanente)**
- **Ministère de l'Education Nationale**
- **Institut d'Etudes Scientifiques Avancées de Grenoble (IESAG) du Pôle Européen Universitaire et Scientifique de Grenoble**
- **Région Rhône-Alpes**

## Information

Secrétariat ERCA (Michèle POINSOT)  
Laboratoire de Glaciologie et Géophysique de l'Environnement  
Domaine Universitaire - B.P. 96  
38402 Grenoble / Saint-Martin-d'Hères (France)  
phone (33) 76 82 42 62 - fax (33) 76 82 42 01  
e.mail : michele@glaciog.grenet.fr

**DEADLINE FOR APPLICATIONS: SEPTEMBER 15, 1995 - NUMBER OF PARTICIPANTS LIMITED TO ABOUT 45**

- DEA Astrophysique et Milieux Dilués : 9 H
- DEA Chimie de la Pollution Atmosphérique et Physique de l'Environnement : 12 H

A ces enseignements effectués à Grenoble ou dans les villes voisines, il faut ajouter diverses contributions dans d'autres sites, par exemple dans le DEA Géosciences de l'Environnement de Marseille ou dans le DEA de Bordeaux.

Il faut enfin mentionner une activité très significative de vulgarisation qui s'est notamment traduite par diverses interventions au Centre Culturel Scientifique et Technique et accueil de stagiaires de lycée.

### 3. EUROPEAN RESEARCH COURSE ON ATMOSPHERES (ERCA)

Il s'agit d'une formation nouvelle annuelle de caractère résolument pluridisciplinaire et européen qui s'adresse aux étudiants en thèse et aux jeunes chercheurs (dont cinq places réservées pour des chercheurs ou ingénieurs CNRS dans le cadre de la Formation Permanente CNRS). Elle a été créée et est dirigée par Claude Boutron (qui occupe une position de Chargé de mission auprès du Président de l'Université Joseph Fourier), dans un contexte de collaboration entre le CNRS (et notamment le LGGE) et l'Université Joseph Fourier (Institut d'Etudes Scientifiques Avancées de Grenoble présidé par Hubert Curien et dirigé par Alain Nemoz).

Trois sessions ont déjà eu lieu (1993, 1994 et 1995), et la préparation de la quatrième session (1996) est très avancée (voir, ci-joint, la copie de la dernière affiche correspondante). Chaque session dure quatre semaines et demie, en Janvier-Février.

Les quatre premières semaines ont lieu à Grenoble, dans les locaux de l'Observatoire de Grenoble très aimablement mis à notre disposition par Claude Bertout (le LGGE ne dispose malheureusement ni de la salle de conférence de taille moyenne nécessaire pour les cours ni des salles annexes requises pour les tutoriels, sessions posters, pauses, ...). Ces quatre semaines comprennent un ensemble très complet de cours (environ 80 H), de tutoriels, de séminaires et de visites de laboratoires (ESRF, Interféromètre de l'IRAM sur le Plateau de Bure, LGGE, Coriolis, selon les années). Les enseignants sont des professeurs ou chercheurs très réputés que nous faisons venir des divers pays européens et des Etats-Unis. Parmi les enseignants de ces quatre premières sessions, on peut par exemple mentionner Sushil Atreya

(Université du Michigan), André Berger (Université de Louvain), Tony Cox (Université de Cambridge), Paul Crutzen (Université de Mayence), Robert Duce (Université du Texas), Sandro Fuzzi (Université de Bologne), Daniel Gautier (Observatoire de Meudon), Ivar Isaksen (Université d'Oslo), David Jewitt (Université d'Hawaii), Dieter Kley (Université de Wuppertal), Michel Legrand (LGGE) Jonathan Lunine (Université d'Arizona), Gérard Megie (Université de Paris), Henning Rodhe (Université de Stockholm), Robert Rosset (Université de Toulouse), Glenn Shaw (Université d'Alaska), Han Van Dop (Université d'Utrecht), et Malcolm Walmsley (Université de Bonn).

Les quatre derniers jours sont consacrés à un séjour à l'Observatoire de Haute Provence. Les participants y sont accueillis par nos collègues du Service d'Aéronomie du CNRS, qui leur présentent les différents instruments (lidars, interféromètre Micado, Spectromètre Dobson, ballons sondes). Ils peuvent voir ces instruments en fonctionnement en soirée et participent à l'exploitation des données obtenues. Une visite des coupoles optiques est également organisée (avec possibilité d'utilisation d'un télescope de 90 cm par les participants).

Chaque session réunit environ 45 participants, se répartissant entre 4/5 d'étudiants en thèse et 1/5 de chercheurs confirmés. De nombreuses nationalités sont représentées (19 en 1995). Outre les participants d'Europe de l'Ouest, nous avons une dizaine de participants d'Europe de l'Est à chaque session, ainsi que quelques participants non-européens (Etats-Unis, Australie, Israël, Chine, ...).

Il était essentiel de s'orienter vers la publication d'ouvrages. C'est ce qui a été réalisé avec la publication d'un premier livre par les Editions de Physique. Ce premier livre est constitué d'une vingtaine de chapitres écrits par une sélection d'enseignants des sessions 1993 et 1994. Un deuxième livre est en cours de gestation, avec une sortie prévue en 1996.

Le LGGE a joué un rôle essentiel dans la création d'ERCA et joue un rôle prépondérant dans l'organisation des sessions. Tout d'abord au niveau des personnes : les enseignants chercheurs, chercheurs et ATOS du LGGE sont largement présents à tous les niveaux (direction d'ERCA (Claude Boutron), Secrétariat d'ERCA (Michèle Poinot), Comité d'Organisation (Jérôme Chappellaz, Robert Delmas, Christophe Genthon, Jean Jouzel, Jurgen Klinger, Patricia Martinerie), enseignants (Michel Legrand). Par

ailleurs, ERCA n'a pu être montée que grâce à la très grande réputation internationale du LGGE, et aux multiples collaborations internationales dans lesquelles il est engagé : cela a permis de disposer d'un formidable réseau de connaissances qui a permis d'obtenir la venue (et un soutien très actif) d'une grande partie des meilleurs spécialistes mondiaux du domaine. Enfin, le LGGE assure la gestion d'une partie des moyens financiers d'ERCA et est souvent mis à contribution pour assurer des avances financières, une partie des financements ne se concrétisant qu'en cours, voire après, la session concernée.

#### 4. FORMATIONS DOCTORALES

Jusqu'à cette année, le LGGE a été principalement impliqué dans la Formation Doctorale «Mécanique des milieux Géophysiques et Environnement (MMGE)» (responsable : Guy Perrier) aussi bien en ce qui concerne les enseignements que pour le nombre de stagiaires de DEA et de thésards. A titre d'illustration, sur les 34 thésards que comptait le LGGE pendant l'année universitaire 1993-1994, 14 provenaient de la Formation Doctorale MMGE. Cette implication a eu beaucoup d'aspects positifs, même s'il apparaissait depuis longtemps que la composante «externe» de l'enseignement donné en MMGE ne répondait qu'imparfaitement aux souhaits de plusieurs des équipes du LGGE.

En dehors de la Formation Doctorale MMGE, le LGGE est aussi impliqué à des degrés divers, et depuis plus ou moins longtemps, dans plusieurs autres Formations Doctorales. Il s'agit notamment des Formations suivantes (le chiffre entre parenthèses représente le nombre de thésards de l'année universitaire 1993-94, issus de la formation concernée) : Chimie de la Pollution

Atmosphérique et Physique de l'Environnement (2) (l'UJF est établissement cohabilité pour cette formation) ; Astrophysique et Milieux Dilués UJF (3) ; Océanologie, Météorologie et Environnement, Paris 6 (2) ; Chimie Physique Mulhouse (1) ; Génie des Procédés UJF (1) ; Géologie Sud-Est (1) ; Géosciences Marseille (1) ; Géosciences Nancy (1) ; Lasers, Molécules et Rayonnement Atmosphérique, Lille 1 (1) ; Physique de la Matière et du Rayonnement, UJF (1) ; Mécanique des Fluides, Marseille (1) ; Méthodes Physiques en Télédétection, Paris 7 (1) ; Physique des Matériaux, Lyon (1) ; Energétique Physique, UJF (1) ; Science et génie des Matériaux, UJF (1) ; étranger dispensé de DEA par équivalence (1).

La campagne d'habilitations pour la rentrée universitaire d'Octobre 1995 va changer considérablement ce paysage. Le groupe d'experts du DSPT3 du MESR a en effet demandé la création d'une nouvelle Formation Doctorale intitulée «Climat et Physico-Chimie de l'Atmosphère» (CPCA) pilotée par l'Université Joseph Fourier avec co-habilitation de l'Université Blaise Pascal (Clermont-Ferrand 2). Cette nouvelle Formation Doctorale placée sous la responsabilité de Claude Boutron vient de recevoir son habilitation pour 4 ans à compter de l'année universitaire 1995-1996. Elle s'appuie de façon privilégiée sur le LGGE (où est situé le secrétariat) tant en ce qui concerne les enseignements que pour le potentiel d'accueil de stagiaires de DEA et de thésards. CPCA sera dorénavant la principale formation à laquelle le LGGE sera rattaché. Nous continuerons cependant bien entendu à être impliqués dans diverses autres formations, notamment MMGE (dans sa nouvelle géométrie) et «Astrophysique et Milieux Dilués», en particulier les équipes «Rhéologie» et «Planétologie».

**SEMINAIRES LGGE**

## **Année 1991**

<b>J. MALEY</b>	<b>Paléoenvironnement des forêts intertropicales( Afrique - Amazonie) au quaternaire récent. Apport de la Palynologie et de la géochimie du carbone</b>	<b>Laboratoire de Palynologie Montpellier</b>
<b>Paul PETTRE</b>	<b>Le climat de l'Antarctique et le climat de Dumont d'Urville</b>	<b>Météo France</b>
<b>Martine De ANGELIS Michel LEGRAND</b>	<b>La chimie dans GRIP</b>	<b>Laboratoire de Glaciologie et Géophysique de l'Environnement</b>
<b>Eric BRUN Yves DURAND</b>	<b>Modélisation numérique de l'évolution du manteau neigeux</b>	<b>Centre d'Etude de la Neige Grenoble</b>
<b>Pascal YIOU</b>	<b>Approches complémentaires de l'analyse des données et applications à des séries paléoclimatiques du dernier cycle interglaciaire</b>	<b>Laboratoire de Modélisation du Climat et de l'Environnement Saclay</b>

## Année 1992

<b>François LE DIMET</b>	Assimilation de données : une approche par le contrôle optimal	Laboratoire de Modélisation et Calcul (IMAG)
<b>Nathalie DUCOUDRE</b>	Paramétrisation des échanges entre la végétation et l'atmosphère dans les modèles de climat	Laboratoire de Modélisation du Climat et de l'Environnement (CEA Saclay)
<b>Athena COUSTENIS</b>	L'atmosphère de Titan - Analyse et modélisation	Observatoire de Meudon
<b>Anne LETREGUILLY</b>	La calotte groenlandaise pendant le dernier cycle glaciaire-interglaciaire	Laboratoire de Glaciologie et Géophysique de l'Environnement
<b>Antti JOENSUU</b>	La politique en matière de recherche et de technologie. Le système de formation et la technique arctique de la Finlande	Ambassade de Finlande à Paris
<b>Sandrine LEVI-ALVARES</b>	Simulations numériques des écoulements urbains à l'échelle de la rue	Ecole Centrale de Nantes
<b>Christian LE PROVOST</b>	Le niveau de la mer : un paramètre mesurable pour l'océanographie et la climatologie	Laboratoire des Ecoulements Géophysiques et Industriels (Institut de Mécanique de Grenoble)
<b>Bruno HAMELIN</b>	Traçages isotopiques du cycle du plomb anthropique	Laboratoire de Géosciences de l'Environnement Marseille
<b>Edouard BARD</b>	Chronologie des variations du niveau de la mer des 2 derniers cycles glaciaires	Laboratoire de Géosciences de l'Environnement Marseille
<b>Tobias C. OWEN</b>	Pluto, Triton and Titan : three small bodies with atmospheres	Institute for astronomy - University of Hawaii (USA)
<b>Sylviane SURDYK</b>	Etude globale sur l'Antarctique - Comparaison des signatures spectrales microondes avec les données caractéristiques du terrain	Laboratoire de Glaciologie et Géophysique de l'Environnement
<b>Neal YOUNG</b>	Antarctic Australian activities : an overview (Law Dome, Lambert glacier basin, Remote sensing, new cooperative research center)	Antarctic Australian Division - Cooperative Research Center for the Antarctic and Southern Ocean Environment, Hobart (Tasmania, Australie)
<b>J. OERLEMANS</b>	A glacio-meteorological experiment in the melting zone of the greenland ice sheet	Institute for Marine and Atmospheric Research (Utrecht University)
<b>Dorthe DAHL-JENSEN</b>	Annual layers detected in the GRIP ice core used to model past accumulation rates and time scales	University of Copenhagen
<b>Naceur BOUZIANI</b>	Vers un modèle physique du matériau cométaire	Laboratoire de Glaciologie et Géophysique de l'Environnement

## Année 1993

Jan POLCHER	Les processus de sol dans les modèles de circulation générale	Laboratoire de Météorologie Dynamique / E.N.S.
Abdel BENCHKOURA	Modélisation du transport de volatils à la surface de Triton	Laboratoire de Glaciologie et Géophysique de l'Environnement
Frédéric HOURDIN	Circulation générale de l'atmosphère martienne : simulation numérique	Laboratoire de Météorologie Dynamique
Chuck WILSON	Heterogeneous processes in ozone depletion : evidence from aircraft measurements concerning the role of particles in ozone loss	University of Denver (USA)
Jean JOUZEL	Les surprises de l'enregistrement climatique	Laboratoire de Modélisation du Climat et de l'Environnement (CEA Saclay)
Eric LEMEUR	Présentation du phénomène isostatique au travers des différents modèles existants et proposition d'un modèle adapté au contexte glaciaire	Alfred Wegner Institute, Bremerhaven (Allemagne) et Laboratoire de Glaciologie et Géophysique de l'Environnement
Pierre FRIEDLINGSTEIN	Interactions biosphère continentale-climat au cours du dernier maximum glaciaire	Institut d'Aéronomie Spatiale (Bruxelles)
S. K. BARTARYA	Distribution and fallout of <sup>137</sup> Cs and other radionuclides over Antarctica	Wadia Institute of Himalayan Geology (Dehradun, India)
Sylvie JOUSSAUME	Modélisation des climats passés	Laboratoire de Modélisation du Climat et de l'Environnement (CEA Saclay) et LODYC
Bradley MURPHY	A study of strong wind events in coastal east Antarctica	Dept Earth Sciences (University of Melbourne)
Christophe LEFORT	Le transport de la glace de mer dans le détroit de Fram étudié par télédétection satellitaire	Laboratoire de Glaciologie et Géophysique de l'Environnement
Jean-Pierre BIBRING	L'exploration de Mars et des comètes	Institut d'Astrophysique Spatiale (CNRS Université Paris XI)
Shuji FUJITA	Microwave dielectric properties of ice and remote sensing of the internal structure of the antarctic ice sheet	Dept. of Applied Physics (Faculty of Engineering, Hokkaido University, Japan)
Katrine ANDERSEN	Transportation of dust	University of Copenhagen



## Année 1994

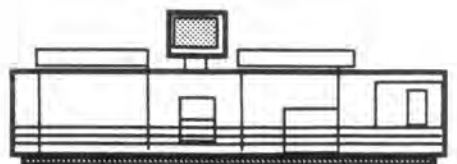
Roberto BINI	A general view of infrared spectroscopy of molecular solid and of molecules trapped in matrix	Laboratorio di Spettroscopia Molecolare (Universita degli studi di Firenze)
Roberto BINI	Phonon relaxation studied by FTIR spectroscopy	Laboratorio di Spettroscopia Molecolare (Universita degli studi di Firenze)
Yves BALKANSKI	Modélisation des aérosols de $^{210}\text{Pb}$ à l'aide d'un modèle 3D : application au calcul des temps de résidence des aérosols troposphériques	Laboratoire de Modélisation du Climat et de l'Environnement (CEA Saclay)
Roger FRANCEY	The trend in atmospheric $\delta^{13}\text{C}$	CSIRO, Division of Atmospheric Research (Aspendale, Australia)
Pascal DESCAMPS	Activité volcanique de Io : méthodes d'observation	Bureau des Longitudes (Paris)
P. THOMAS et M. ALLEMAND	Géologie des satellites et planètes de glace	Ecole Normale Supérieure de Lyon
Edouard BARD	Paléotempératures de la surface de l'océan - Apport des nouvelles techniques géochimiques	Géosciences et Environnement (Université Aix-Marseille)
Bob SAMUELSON	Ices and aérosols in Titan's atmosphere	NASA-GSFC (Greenbelt, MD, USA)
Nadine CHAUMERLIAC	Modélisation de l'impact des nuages sur la chimie troposphérique	LaMP (Université Blaise Pascal/CNRS, Aubière)
Anders GRIMVALL and Hans BOREN	Chloroacetic acids and other organohalogens in snow and ice	Dept. of Water and Environmental Studies (Linköping University, Sweden)
Sylviane SURDYK	Mesure constante diélectrique de la neige	Laboratoire de Glaciologie et Géophysique de l'Environnement
Isabelle SHERJAL	Opération PORTOS	Laboratoire de Glaciologie et Géophysique de l'Environnement
Catherine LEROUX	Modélisation de la réflectance bidirectionnelle de la neige	Laboratoire de Glaciologie et Géophysique de l'Environnement
Margit SCHWIKOWSKI	Atmospheric research at high-alpine sites	Laboratory of Radio and Environmental Chemistry (Paul Scherrer Institut, Villigen, Switzerland)

## Année 1995

Anders GRIMVALL and Hans BOREN	Chloroacetic acids and other organohalogens in snow and ice	Dept. of Water and Environmental Studies (Linköping University, Sweden)
Paul PETTRE	Validation de simulations climatiques en Antarctique	Centre National de Recherche Météorologique
S. PAUER	Raman spectroscopy of atmospheric air inclusion in the GRIP ice core	Alfred Wegener Institut (Bremerhaven, Germany)
Jeremy H. COTTON	Microwave emission from snow	Antarctic Cooperative Research Centre (Australia)
Louis LLIBOUTRY	La glaciologie en l'an 2000	Laboratoire de Glaciologie et Géophysique de l'Environnement
Leonard A. BARRIE	Canadian studies of arctic air pollution	Atmospheric Environment Service (Toronto, Canada)
R. GAMMON	Balancing the global carbon budget Role of the terrestrial biosphere Role of the ocean	University of Washington (Seattle, USA)
R. GAMMON	Balancing the carbon cycle The terrestrial biosphere	University of Washington (Seattle, USA)
David WALLAND	Impact of snow on climate and climatic variability	School of Earth Sciences (University of Melbourne, Australia)
Ian BAKER	Synchrotron X-ray topographic studies of dislocation/grain boundary interactions in ice	Thayer School of engineering (Dartmouth College, Hanover, NH, USA)



*Grenoble, juillet 1995*



*Impression et finition réalisées sur Rank Xerox 5090,  
au Service Reprographie du CNRS.*