



**HAL**  
open science

## Laboratoire de glaciologie et géophysique de l'environnement : rapport d'activité juin 1999 - décembre 2001

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 juin 1999 - décembre 2001. 2002. hal-01573091

**HAL Id: hal-01573091**

**<https://hal-lara.archives-ouvertes.fr/hal-01573091>**

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.

16623



Laboratoire de Glaciologie et Géophysique de l'Environnement

# RAPPORT D'ACTIVITE

JUIN 1999

DECEMBRE 2001

A  
S  
-10A  
TIO  
48C

6 123 53899



3 5400 01064583 7

i206 39429



# SOMMAIRE

AVANT PROPOS	5
ACTIVITES DES EQUIPES	11
<i>Chapitre 1 : EQUIPE CLIMAT</i>	<i>15</i>
1. CLIMAT ET ATMOSPHERE AUX ECHELLES DE TEMPS LONGUES	18
1.1. Validité des enregistrements et fonctions de transfert	18
1.1.1. Piégeage des gaz	
1.1.2. Relations isotope/température et méthode de datation	
1.2. Variabilité haute résolution des signaux environnementaux : interglaciaires et terminaisons	23
1.2.1. Gaz à effet de serre (CO <sub>2</sub> , CH <sub>4</sub> et N <sub>2</sub> O)	
1.2.2. Les poussières	
1.2.3. Séquences des événements climatiques durant les terminaisons I à IV - Relations Nord-Sud	
1.3. Paléo-circulation atmosphérique : modélisation des temps de transport	30
1.4. Développements analytiques	31
1.4.1. Automate Exam (EXtraction et Analyse du Méthane dans la glace)	
1.4.2. Isotopes du CO et du CO <sub>2</sub>	
1.5. Actions transversales	32
1.5.1. La glace de lac dans la carotte de Vostok	
1.5.2. Le stade isotopique marin 11 dans la carotte de Vostok	
2. EVOLUTION RECENTE DE L'ATMOSPHERE : INFLUENCE ANTHROPIQUE	34
3. CLIMAT ET ENVIRONNEMENT ATMOSPHERIQUE RECENTS ET ACTUELS EN REGIONS POLAIRES	36
3.1. Analyses météorologiques en régions polaires et « guidage latéral » des modèles	36
3.2. Variabilité climatique récente	37
3.2.1. Variabilité et tendance de fonte antarctique	
3.2.2. Précipitations antarctiques et ENSO	
3.3. Bilan de masse antarctique	39
3.3.1. Mesures de terrain	
3.3.2. Modélisation climatique	
3.4. Interactions surface-atmosphère dans les hautes latitudes Nord continentales	40
3.5. Caractéristiques physiques de la neige en surface des calottes de glace	42
3.5.1. Caractérisation de la neige par traitement d'images numériques	
3.5.2. Modélisation numérique du manteau neigeux polaire	
3.5.3. Télédétection de la surface des calottes polaires	
3.6. Traceurs et chimie atmosphériques	43
4. CLIMAT DU XXI <sup>EME</sup> SIECLE A HAUTES LATITUDES	44
<i>Chapitre 2 : EQUIPE CHIMIE</i>	<i>49</i>
1. OBJECTIFS SCIENTIFIQUES ET FIL CONDUCTEUR DE L'ACTIVITE	51
2. DEVELOPPEMENT DE L'ANALYSE DE NOUVEAUX TRACEURS	52



<b>3. LES ARCHIVES GLACIAIRES</b>	<b>53</b>
3.1. Les carottes de glace polaire	53
3.1.1. <i>EPICA</i>	
3.1.2. <i>VOSTOK</i>	
3.2. Les carottes Alpines	55
3.3. Les carottes Andines	58

<b>4. RELATION « AIR-NEIGE » ET IMPACT DU MANTEAU NEIGEUX SUR LA CHIMIE DE L'ATMOSPHERE</b>	<b>59</b>
4.1. Etudes des nuages glacés au Puy de Dôme	59
4.2. Impact du manteau neigeux sur la chimie de l'atmosphère	60
4.3. Etudes en laboratoire	65

<b>5. ETUDES DE L'ATMOSPHERE ACTUELLE</b>	<b>66</b>
5.1. Etudes atmosphériques à Dumont d'Urville (zone côtière Antarctique)	66
5.2. Etudes atmosphériques à Summit (Groenland Central) et dans l'Arctique Européen	69
5.3. Etudes atmosphériques dans les vallées alpines	71

<b>6. MODELISATION DE LA CHIMIE DE L'ATMOSPHERE</b>	<b>74</b>
---	-----------

### ***Chapitre 3 : EQUIPE METAUX LOURDS***

<b>1. CADRE GENERAL</b>	<b>81</b>
<b>2. ARCHIVES GLACIAIRES DES METAUX LOURDS</b>	<b>82</b>
2.1. Terre de Coats, Antarctique	82
2.2. Autres sites antarctiques	86
2.3. Sajama, Bolivie	86
2.4. Groenland et Alpes	87
2.5. Autres archives	87
<b>3. SPECIATION DE MERCURE DANS L'AIR, LE NUAGE ET LES PRECIPITATIONS NEIGEUSES</b>	<b>88</b>

3.1. Extension des bases de données françaises en TGM (Total Gaseous Mercury). Surveillance de l'exposition des populations, évolutions temporelles et spatiales des concentrations en mercure	88
3.1.1. <i>Mesures du mercure gazeux à Champ sur Drac. Influence des sources anthropiques</i>	
3.1.2. <i>Mesures en site urbain. Exposition des populations</i>	
3.1.3. <i>Mesures en site de fond</i>	
3.2. Compréhension des mécanismes de dépôts et d'échange en mercure entre atmosphère et manteau neigeux	89
3.2.1. <i>Formation des précipitations. Transferts à l'interface liquide/gaz dans les nuages</i>	
3.2.2. <i>Transformations photochimiques dans le manteau neigeux</i>	

<b>4. QUANTIFICATION DES DEPOTS DE METAUX LOURDS DANS LE MANTEAU NEIGEUX SAISONNIER</b>	<b>90</b>
---	-----------

### ***Chapitre 4 : EQUIPE RHEOLOGIE DES GLACES ET MODELISATION DES CALOTTES POLAIRES***

<b>1. RHEOLOGIE DES GLACES POLAIRES ET MODELISATION DES CALOTTES POLAIRES</b>	<b>99</b>
1.1. Modélisation des calottes polaires éléments du système climatique	100
1.1.1. <i>Dynamique de l'Antarctique</i>	
1.1.2. <i>Modélisation de la déglaciation des calottes de l'Hémisphère Nord</i>	

1.2. Modèle de calotte polaire intégrant l'anisotropie de la glace	105
1.2.1. <i>Modèles pour le comportement anisotrope et pour l'évolution des textures</i>	
1.2.2. <i>Simulation d'un écoulement de glace présentant une anisotropie induite évolutive</i>	
1.2.3. <i>Écoulement de la glace anisotrope aux alentours du forage de Dôme C (Antarctique)</i>	
1.2.4. <i>Modélisation basée sur l'hypothèse de la couche mince</i>	
1.2.5. <i>Comparaison méthodes d'homogénéisation/éléments-finis</i>	
1.3. Mécanismes physiques de la déformation, rhéologie des glaces polaires	107
1.3.1. <i>Déformation de la glace aux faibles contraintes ; rôle de la migration des joints de grains</i>	
1.3.2. <i>Caractérisation de la microstructure des glaces par diffraction X</i>	
1.3.3. <i>Simulation de l'évolution des textures par l'approche auto-cohérente</i>	
1.3.4. <i>Simulation de l'évolution des textures par l'approche auto-cohérente : rôle de la recristallisation par rotation</i>	
1.3.5. <i>Microstructure des glaces polaires</i>	
1.3.6. <i>Déformation du monocristal de glace</i>	
1.3.7. <i>Déformation viscoplastique et dynamique collective des dislocations</i>	
<b>2. ENDOMMAGEMENT, FRACTURATION DE LA GLACE ET INTERACTION GLACE-STRUCTURE</b>	<b>112</b>
2.1. Déformation, fracture et fragmentation de la glace : propriétés et lois d'échelle	112
2.1.1. <i>Surfaces et fronts de rupture</i>	
2.1.2. <i>Réseaux de fractures et fragmentation</i>	
2.1.3. <i>Dynamique et fracturation d'un glacier</i>	
2.2. Etude du frottement glace-élastomère	114
2.3. Comportement ductile de la neige	115
 <b>Chapitre 5 : EQUIPE GLACIERS</b>	 <b>119</b>
<b>1. AXES DE RECHERCHE ET EVOLUTION DE L'EQUIPE</b>	<b>121</b>
1.1. Axes de recherches et rappel des objectifs	
1.2. Evolution de l'équipe depuis 1999	
<b>2. SENSIBILITE DES BILANS DE MASSE GLACIAIRES AUX VARIATIONS CLIMATIQUES ET EVOLUTION DES BILANS DE MASSE DANS LES ALPES FRANCAISES DEPUIS LE DEBUT DU 20<sup>EME</sup> SIECLE</b>	<b>122</b>
<b>3. ANALYSE STATISTIQUE DES DISTRIBUTIONS SPATIALES ET TEMPORELLES DES SERIES DE BILANS DE MASSE DES GLACIERS ET DES CALOTTES POLAIRES DE L'HEMISPHERE NORD</b>	<b>123</b>
<b>4. REPONSE DES MASSES GLACIAIRES ARCTIQUES AU CHANGEMENT CLIMATIQUE</b>	<b>124</b>
<b>5. RISQUES NATURELS D'ORIGINE GLACIAIRE</b>	<b>125</b>
<b>6. DYNAMIQUE DES GLACIERS TEMPERES</b>	<b>126</b>
<b>7. ANALYSE DES BILANS DE MASSE EN ANTARCTIQUE A PARTIR DES RADIOELEMENTS</b>	<b>127</b>
7.1. Dronning Maud Land	127
7.2. Terra Nova – Dôme Concordia	127
7.3. Caractérisation du pic radioactif de 1955	127
<b>8. SEDIMENTS LACUSTRES</b>	<b>128</b>
8.1. Alpes	128
8.2. Guyane : Le programme « Mercure Guyane » (1998-2001)	128

<b>9. FLUX RADIOELEMENTS</b>	<b>129</b>
9.1. Antarctique	
9.2. Guyane : Mise en place de la station de Petit Saut en juillet 1999-premiers résultats	
9.3. Banque de données	
<b>10. BILANS D'ENERGIE ET BILANS DE MASSE SUR LES GLACIERS ANDINS</b>	<b>130</b>
10.1 Bilans d'énergie du glacier Zongo, Bolivie (thèse de P. Wagon, soutenue en avril 1999, dirigée par L. Reynaud et P. Ribstein)	
10.2 Bilans d'énergie de haute altitude des glaciers tropicaux	
10.3 Bilans d'énergie des glaciers tropicaux (Bolivie et Equateur)	
10.4 Bilans d'énergie de la couverture neigeuse des Andes tropicales	
 <i>Chapitre 6 - SERVICES TECHNIQUES</i>	 <b>135</b>
 <b>PUBLICATIONS (Revue du Rang A) et THESES</b>	 <b>145</b>
 <b>ENSEIGNEMENT ET DIFFUSION DE L'INFORMATION</b>	 <b>161</b>
 <b>FORMATION PERMANENTE</b>	 <b>171</b>
 <b>HYGIENE ET SECURITE</b>	 <b>181</b>

## Avant-Propos

***Préliminaire : Ce rapport d'activité couvre une période de deux ans et demi depuis la rédaction de notre dernier rapport d'activité (Juin 1999 à Décembre 2001). Cette durée, écourtée par rapport à la période habituelle de 4 ans entre 2 comités d'évaluation, est due à la mise en phase des calendriers du CNRS et du Quadriennal. C'est pour cette même raison que le LGGE est passé du statut CNRS d'Unité Propre de Recherche (UPR) à celui de Formation de Recherche en Evolution (FRE) au 1er Janvier 2000 et ce jusqu'en fin décembre 2002.***

Le LGGE est une unité de recherche du CNRS associée à l'Université Joseph Fourier de Grenoble et intégrée au sein de l'Observatoire des Sciences de l'Univers de Grenoble (OSUG). Sa mission première est de produire une recherche originale et compétitive au niveau international dans le domaine de la glaciologie, du climat et de l'environnement mais il contribue largement à l'effort de formation par la recherche. Le laboratoire assure des tâches de diffusion de l'information scientifique auprès des écoles, lycées et du grand public.

Le LGGE présente un caractère assez unique, et généralement envié au niveau international, en regroupant en un seul site une large panoplie d'outils et de compétences permettant de travailler sur le matériau glace à différentes échelles spatio-temporelles. Les études portent sur les glaces naturelles des calottes polaires et celles des glaciers de type alpin, ainsi que sur la glace météorique (précipitations solides). Elles allient des développements technologiques et analytiques à une approche de modélisation numérique touchant à des domaines variés (climat, circulation atmosphérique, chimie atmosphérique, mécanique et écoulement des masses de glace, modélisation de processus). Ces études contribuent à la compréhension de grands problèmes scientifiques qui sont aussi des enjeux de société cruciaux tels que l'effet de serre, la variabilité naturelle du climat et de l'environnement en comparaison avec l'impact des activités humaines, le bilan de masse de la cryosphère en relation avec l'évolution du niveau marin, la pollution à l'échelle globale et régionale (Alpes), ou encore les risques naturels en milieu alpin. Les études développées sur la rhéologie des glaces trouvent aussi des applications technologiques : interactions glaces/structures marines ou frottement glace/gomme.

Au cours des 4 dernières années, le LGGE a fédéré 5 équipes scientifiques couvrant l'étude du climat et la chimie atmosphérique à différentes échelles de temps, la rhéologie de la glace et la modélisation des calottes glaciaires, et les glaciers alpins. Les 4 thématiques dégagées lors de la dernière prospective et déclinées en termes de projets inter-équipes ont structuré la dynamique scientifique. Il s'agit de :

- Climat et environnement moderne, une approche à partir des régions polaires et alpines ;
- Paléoclimats et paléoenvironnement, une approche à partir des archives glaciaires et des interactions climat - calottes polaires ;
- Nuage, neige, névé, glace : étude de processus ;
- Rhéologie des glaces et modélisation des calottes polaires.

Le LGGE est aussi fortement impliqué par ses services techniques dans l'étude, le développement et la mise en oeuvre d'équipements pour les carottages et les mesures de terrain. Chaque année, quatre à cinq ingénieurs et techniciens participent à des missions internationales dans les régions polaires. L'équipe technique du laboratoire a la responsabilité des opérations du carottage européen EPICA au centre de l'Antarctique.

S'agissant de la formation à et par la recherche, le LGGE est un laboratoire d'accueil de plusieurs formations doctorales. Cette diversité tient à la pluridisciplinarité des recherches menées au laboratoire (géophysique, chimie analytique et réactionnelle, physique, mécanique des fluides et des solides). La modélisation numérique est évidemment un outil indispensable. Le laboratoire est rattaché à l'École doctorale "Terre, Univers et Environnement " (TUE), essentiellement par les DEA CPCA et MMGE. Le LGGE compte actuellement 21 doctorants. Il accueille un grand nombre de stagiaires DEA, Maîtrise, Licence, écoles d'ingénieurs, IUT etc; Son action auprès des lycées et collèges en accueillant de nombreux groupes est très appréciée.

Le LGGE participe à l'enseignement et à la mise en place annuelle du Cours de recherche Européen sur les Atmosphères (ERCA, 10<sup>e</sup><sup>me</sup> anniversaire en 2001), dirigé par un enseignant-chercheur du laboratoire. Il s'est aussi largement mobilisé pour la mise en place d'une nouvelle licence/maîtrise de Sciences de l'Univers présentant un volet environnement et climat qui nécessiterait d'être encore développé.

Enfin un point fort dans la relation entre l'UJF et le LGGE a été le rattachement de notre laboratoire à l'OSUG avec l'implication de plusieurs membres du LGGE dans les structures de fonctionnement de l'Observatoire.

## QUELQUES RÉSULTATS MARQUANTS

□ Les orientations majeures de *l'Équipe "Climat"* concernent l'évolution du climat et de l'environnement atmosphérique dans le passé à partir des archives glaciaires, l'évolution récente de l'atmosphère au cours des dernières décennies et derniers siècles, la modélisation climatique en régions polaires et l'utilisation à des fins climatiques des données de surface des calottes obtenues par mesures terrain et par télédétection.

A partir de ces orientations, les principaux objectifs sont de déceler et comprendre les mécanismes qui participent à l'évolution du climat à différentes échelles spatiales et temporelles et de contribuer à la prévision des changements climatiques et de leurs impacts (niveau des mers par exemple).

Parmi les résultats majeurs enregistrés :

- Le papier "Nature" de Petit et al. (1999) sur l'enregistrement de Vostok couvrant les 4 derniers cycles climatiques est désormais une référence dans le domaine de la paléoclimatologie. Des résultats originaux ont été obtenus depuis qui viennent de faire l'objet d'une section spéciale dans "Journal of Geophysical Research – Atmosphere" (2001) avec une forte contribution émanant du LGGE et de ses collaborations (*Parrenin et al., 2001 ; Pépin et al., 2001 ; Basile et al., 2001 ; Ritz et al., 2001 ; Kotlyakov et al., 2001*). Ces résultats concernent la datation de la carotte de Vostok, le rôle hémisphérique des forçages climatiques durant les transitions glaciaires-interglaciaires, l'identification des poussières volcaniques déposées au centre de l'Antarctique de l'Est ou encore l'évolution de la calotte antarctique au cours des derniers 400.000ans. La carotte de Vostok a aussi inspiré une étude sur les forçages climatiques (insolation et CO<sub>2</sub>) et une évaluation de la contribution de l'Antarctique au niveau marin durant l'interglaciaire stade 11 (il y a environ 400.000 ans) qui est généralement considéré comme un excellent analogue des conditions naturelles actuelles et futures de notre planète (*Raynaud et al., sous presse*). Enfin la collaboration avec le LSCE a permis de tester, pour l'enregistrement de Vostok la validité de notre modèle de densification (utilisé pour le calcul de l'âge du gaz) à partir de l'isotopie des gaz piégés (*Caillon et al., sous presse*)
- La partie Holocène et dernière déglaciation du carottage européen EPICA en cours à Dôme C a déjà été largement étudiée. Des résultats particulièrement originaux ont été obtenus par l'Institut de Physique de Berne et le LGGE sur le CO<sub>2</sub> qui indique un couplage insoupçonné entre température des hautes latitudes sud et CO<sub>2</sub> (Monnin et al. 2001). De même l'étude détaillée des variations granulométriques des poussières éoliennes incorporées dans la glace de Dôme C a révélé une autre surprise : des variations présentant une périodicité variant entre 1000 et 2000 ans (*Delmonte et al., sous presse*) qui restent à expliquer.

- Dans le cadre du projet européen Firetracc/100 (1998-2000), nous avons développé un modèle de diffusion des gaz dans le névé polaire (*Fabre et al., 2000*), constituant un outil de base pour l'ensemble des partenaires du projet, et désormais en "libre service" pour la communauté scientifique internationale. En collaboration avec l'Institut Max-Planck de Mayence, nous avons reconstitué pour la première fois à partir de l'air du névé polaire la tendance atmosphérique des isotopes (C et H) du méthane au cours des derniers 50 ans, suggérant un ralentissement du taux d'augmentation des sources de ce gaz depuis le milieu des années 70 (*Braünlich et al., 2001*). L'étude pionnière du sulfure de carbone (COS) en liaison avec nos collègues de l'Université d'East Anglia a permis de mettre en évidence une relative stabilité de ses teneurs sur la deuxième moitié du 20ème siècle, suggérant ainsi que ce gaz n'est pas responsable de l'augmentation des teneurs en aérosols sulfatés dans la stratosphère (*Sturges et al., 2001*).
  - La télédétection satellitale dans le domaine des micro-ondes passives caractérise la distribution de paramètres structurels de la neige en surface des calottes. La sensibilité climatique de ces paramètres a été illustré à l'aide d'un modèle de neige développé en collaboration avec le Centre d'Etude de la Neige de Grenoble. En réponse à un forçage atmosphérique issu d'analyses météorologiques, ce modèle a permis de reproduire la distribution spatiale de l'émissivité micro-onde de la surface dans l'intérieur du Groenland (*Genthon et al. 2001*). De plus les micro-ondes ont récemment permis une caractérisation originale de la variabilité climatique estivale en Antarctique, par détection et comptage des événements d'humidification de la surface (Torinesi, Fily, Genthon) : variabilité interannuelle marquée portant la trace du mode annulaire Antarctique, tendances significatives confirmant une évolution complexe du climat de la région Antarctique à la fin du XXème siècle.
  - La mise en oeuvre de traceurs à l'intérieur d'un modèle du climat optimisé en régions polaires a permis d'étendre l'analyse des circulations atmosphériques de ces régions (*Krinner et Genthon, Tropospheric transport under varying climatic conditions, soumis à Tellus*), au delà d'aspects climatiques plus traditionnels tels que l'hydrologie des calottes de glace, sujet qui reste néanmoins propice à l'innovation (Genthon et Krinner, 2001). La modélisation couplée de la physique de la circulation atmosphérique et de traceurs de cette circulation a ouvert la voie, en partenariat avec l'équipe "chimie" du LGGE, à la simulation de l'environnement chimique (cycle atmosphérique du soufre) de la région Antarctique.
- L'équipe " **chimie** " aborde un ensemble de problématiques atmosphériques à différentes échelles de temps, essentiellement en régions polaires et alpines.
- Concernant l'étude des archives glaciaires, tout en restant mobilisé sur la glaciologie polaire (Antarctique et Groenland), nos recherches ont également porté sur les glaciers froids de moyenne et basse latitudes (Alpes et Andes). Parmi les résultats les plus marquants, nous avons pu montrer l'importante contrainte que fournit les signaux chimiques de la glace du Mont Blanc pour reconstruire l'évolution de la charge atmosphérique en aérosols (sulfate et ammonium par exemple) au dessus de l'Europe au cours des 100 dernières années (*Preunkert et al., 2000; 2001*) en réponse à la pression anthropique. Associé au suivi des aérosols dans l'atmosphère réalisé depuis 2 ans à l'Observatoire Vallot (4450 m, massif du Mont Blanc), ce type d'étude se situe dans la perspective de la quantification du forçage radiatif des aérosols à partir de la distribution calculée des aérosols.
  - Des études internationales récentes viennent de démontrer que le manteau neigeux pouvait avoir un impact très important sur la chimie de l'atmosphère. Déjà impliquée dans l'étude des processus contrôlant la relation air/neige et l'incorporation des impuretés dans les hydrométéores solides, nous nous sommes logiquement investi dans cette problématique nouvelle à travers les campagnes internationales à Alert. Notre contribution, focalisée sur la microphysique de la neige et sa composition en aldéhydes, a permis de proposer que le manteau neigeux sert de support à la photolyse de composés organiques ce qui se traduit par une émission d'acétalhédyde vers l'atmosphère (*série de papiers dans un " special issue " sous presse de Atmospheric Environment : Houdier et al., Perrier et al., Dominé et al., Cabannes et al.*)

- Nous avons poursuivi l'étude de l'atmosphère actuelle en régions polaires à la fois dans le bassin Arctique (Finlande) et en Antarctique (Dumont d'Urville). Les données (propriétés physiques, chimiques et optiques des aérosols associé à une étude parallèle de la phase gazeuse) obtenues en Finlande représente un jeu de données très complet qui permettra de valider les processus de vieillissement de l'aérosol atmosphérique, cet aspect restant actuellement un problème mal géré dans l'évaluation du rôle des aérosols sur le climat (*Ricard et al., 2001, a,b,c*). L'étude réalisée depuis 3 ans à Dumont d'Urville associant mesure des aérosols soufrés et de leurs précurseurs gazeux (DMS, DMSO et SO<sub>2</sub>) représente une série unique au sud du 40°S. Des résultats très novateurs ont été ici obtenu tant sur les mécanismes d'oxydation du DMS à basses températures que sur la variabilité interannuelle de ces compésés dans cette zone de l'Océan Austral (*Jourdain and Legrand, 2001; Legrand et al., 2001*). Notons ici que ces mesures sont confrontées à des simulations numériques avec LMDZ.
  - Enfin, et c'est une nouveauté, nous avons commencé à investir dans l'étude de la pollution régionale à travers un programme de pollution des vallées Alpines (POVA). Des résultats originaux ont été obtenus pour évaluer l'effet de la fermeture du tunnel du Mont Blanc sur la qualité de l'air près de Chamonix.
- **L'équipe "métaux lourds"** a été créée en 1998. Elle a été particulièrement active malgré sa petite taille, grâce à des collaborations intenses avec plusieurs partenaires étrangers, notamment l'Université Ca Foscari de Venise et l'université Curtin de Perth.
- D'importants développements analytiques ont permis la mesure de nombreux métaux rarement étudiés jusqu'ici (Cr, Co, Ag, Bi, U et Hg) et des isotopes de Pb à des niveaux extraordinairement bas (jusqu'au fg/g) (*Planchon et al ; 2001a ; Vallelonga et al ; 2001a ; Ferrari et al ; 2000*). Ils ont permis de montrer que la pollution de l'Antarctique en métaux lourds ne concerne pas seulement Pb, mais s'entend aussi à des métaux comme Cu, Zn, Ag, Bi et U (*Planchon et al ; 2001b*) et que la pollution de l'Antarctique par Pb a commencé dès la fin du 19<sup>ème</sup> siècle, (*Planchon et al ; 2001c*).
  - Plusieurs "premières" ont été récemment obtenues :
    - Premières mesures de métaux lourds dans des glaces de haute altitude de la région intertropicale, à partir de la carotte prélevée au Sajama en Bolivie par l'IRD et l'Université de l'Ohio (*Ferrari et al ; 2001*).
    - Mise en évidence d'une pollution atmosphérique à grande échelle (détectée au Groenland) due aux pots d'échappement catalytiques (*Barbante et al ; 2001a*) et d'une augmentation de l'uranium dans les glaces alpines après la 2<sup>ème</sup> guerre mondiale attribuée aux développements des activités minières dans l'ex RDA et dans une moindre mesure en France (*Barbante et al ; 2001b*).
    - Premières mesures du mercure gazeux dans la phase interstitielle des nuages grâce à des expériences réalisées au Puy de Dôme (*Dommergue et al., 2001*).
- Les travaux de l'équipe "**Rhéologie des glaces et Modélisation des calottes polaires**" font référence en Glaciologie, Géophysique et Science des matériaux.
- Dans le domaine de la *rhéologie des glaces polaires*, l'équipe a obtenu des résultats marquants sur la simulation du comportement mécanique de ces glaces souvent anisotropes en adoptant des approches multi-échelles permettant de décrire la déformation des glaces souvent anisotropes des calottes polaires à partir de celle du cristal (*Gagliardini et al., 2001; Meyssonier et Philip, 2000*). Le contenu physique de la modélisation est évidemment un atout qui permet de tester les hypothèses inhérentes à ces approches. Le mode de déformation de ces glaces est essentiellement le glissement sur les plans de base accommodé par la migration des joints (*Montagnat et Duval, 2000; Duval et Montagnat, sous presse*). Les

incompatibilités de déformation entre les grains conduit à une forte hétérogénéité de la déformation intra-granulaire (Mansuy, 2001 ; Montagnat 2001). C'est grâce aux résultats de cette équipe et aux collaborations engagées en Science des Matériaux que la glace est maintenant considérée comme un matériau modèle pour tester diverses méthodes de transition d'échelles.

- Pour ce qui concerne la *modélisation des calottes polaires*, le modèle de l'Antarctique construit par C. Ritz est un des rares modèles qui intègrent les ice-shelves et ice-streams. Ce modèle permet d'étudier la réponse d'une calotte polaire aux variations climatiques et d'interpréter les enregistrements climatiques tirés de l'analyse des carottes profondes. L'application récente de ce modèle a été la simulation de l'Antarctique au cours des quatre derniers cycles climatiques (Ritz et al., 2001). La calotte de l'Antarctique de l'ouest est plus étendue pendant les périodes froides; ceci est directement lié à la baisse du niveau des mers qui provoque une avancée de la ligne de transition ice-streams-ice-shelves. L'Antarctique de l'est étant principalement gouverné par les précipitations est beaucoup plus stable.
  - La simulation de la déglaciation des calottes de l'hémisphère nord depuis 20 000 ans est essentielle pour valider les modèles du fait de nombreuses données géologiques, mais surtout pour comprendre le rôle de ces calottes dans l'évolution du climat. La déglaciation est bien simulée en prenant en compte les changements d'insolation, du gaz carbonique et des précipitations (Charbit et al., sous presse).
  - Les résultats obtenus sur la *fracturation de la glace* au contact d'une structure ont permis une avancée marquante sur les propriétés d'échelle. La géométrie des surfaces et fronts de rupture est parfaitement invariante d'échelle (Weiss, 2000, 2001). Les conséquences de ce caractère auto-affine de la géométrie des fissures sont importantes. Par exemple, des fractures sur la banquise peuvent être activées pour des contraintes de l'ordre de quelques kPa à comparer avec quelques MPa. pour des échantillons de laboratoire. Il faut signaler que ces travaux ont permis des collaborations des plus fructueuses avec les théoriciens des phénomènes critiques (Carmen-Miguel et al., 2001).
- L'activité de l'équipe "**Glaciers**" est centrée sur l'étude des fluctuations et des bilans de masse (et d'énergie) des glaciers des Alpes et tropicaux. Parmi les résultats marquants, il faut citer:
- l'analyse de la sensibilité des bilans de masse aux divers paramètres climatiques. La sensibilité de l'ablation à la température décroît fortement avec l'altitude; elle est très élevée sur les langues des glaciers (Vincent, sous presse). La sensibilité de la ligne d'équilibre (transition entre la zone d'ablation et la zone d'accumulation) à la température apparaît beaucoup moins élevée que celle généralement imposée dans les modèles de prévision de variations de ces glaciers. Les bilans hivernaux et estivaux de quatre glaciers ont pu être reconstitués à partir des relations entre bilans et variables météorologiques. (Vincent, sous presse). A noter que le programme d'observation des glaciers des Alpes françaises est maintenant reconnu comme *Service d'Observatoire de l'OSUG*. Les données sur les bilans de masse de cinq glaciers depuis plus de 40 ans ont une valeur exceptionnelle.
  - l'analyse statistique des distributions spatiales et temporelles des bilans de masse des glaciers de l'hémisphère nord. Une bonne covariance est trouvée à l'échelle d'un massif. La réponse des glaciers aux variations climatiques peut s'interpréter à partir des variables météorologiques, mais aussi en tenant compte de l'oscillation Nord Atlantique (Six et al., 2001).
  - le bilan d'énergie du glacier Zongo (Bolivie). P. Wagnon a montré que l'albédo contrôle en grande partie l'énergie nécessaire à la fusion. La sublimation importante durant les périodes d'été contrecarre la fusion ce qui explique les faibles débits des torrents émissaires en été (Wagnon, 1999, 2001).

Les travaux du groupe "*Radioactivité, accumulation de neige et sédiments lacustres*" sont largement reconnus par la communauté internationale. Les données servent souvent de base pour établir les cartes d'accumulation de neige. Un travail original a été réalisé sur le mercure dans les sols et sédiments lacustres en Guyane. Il est montré que le mercure déposé dans les sédiments restait en partie stocké dans les couches superficielles. Ce résultat doit être pris en compte pour évaluer l'impact anthropique de l'augmentation des teneurs en mercure dans les sols et sédiments.

En conclusion, le rayonnement international du LGGE est remarquable pour la plupart de ses thématiques. Les collaborations sont nombreuses et fructueuses, ceci grâce aux contrats européens, mais aussi grâce à son dynamisme. L'équilibre entre la modélisation et la nécessaire acquisition de données est exemplaire. L'équipe " Glaciers " s'est bien relancée et l'avenir est prometteur avec une collaboration renforcée avec l'IRD et le recrutement espéré d'un chercheur en 2002.

Sur le plan technique, il est important de mentionner la compétitivité des services techniques dans l'étude et la construction de carottiers avec une participation marquée de ce groupe dans les projets internationaux (Vostok, EPICA ..) et un projet technologique fort en collaboration avec l'IFRTP et la DT INSU (projet carottier 1000m).

# **ACTIVITE DES EQUIPES**

# **Chapitre 1**

## **EQUIPE CLIMAT**

# EQUIPE CLIMAT

Responsable : Christophe GENTHON

## PRINCIPAUX AXES DE RECHERCHE

Climat récent, actuel et futur en région polaire	Evolution récente de l'atmosphère : influence anthropique	Etude du climat et de l'atmosphère dans le passé
<ul style="list-style-type: none"> <li>○ Analyses météorologiques</li> <li>○ Modélisation de la circulation atmosphérique et des sols à haute latitude</li> <li>○ Etude des caractéristiques physiques de la neige de surface</li> <li>○ Télédétection</li> <li>○ Niveau des mers</li> <li>○ Modélisation chimie/climat atmosphérique</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ Analyse de l'air dans le névé polaire et étude de la diffusion des gaz</li> <li>○ Evolution de la capacité oxydante de l'atmosphère</li> <li>○ Enregistrement des signaux climatiques dans les sites à forte accumulation</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ Circulation atmosphérique en climat glaciaire</li> <li>○ Reconstruction des signaux atmosphériques et climatiques à partir des archives glaciaires</li> <li>○ Variations à long terme (Vostok)</li> <li>○ Variabilité à court terme pendant le dernier cycle climatique (EPICA)</li> </ul>

## COMPOSITION DE L'EQUIPE

	Climat actuel en région polaire	Evolution récente de l'atmosphère : influence anthropique	Etude du climat et de l'atmosphère dans le passé
<b>Chercheurs CNRS</b>			
J.M. BARNOLA (CR1)		X	X
J. CHAPPELLAZ (CR1)		X	X
C. GENTHON (CR1)	X	X	X
G. KRINNER (CR2)	X	X	X
C. LORIUS (DR0 Emérite)			X
P. MARTINERIE (CR1) (50%)		X	
J.R. PETIT (DR2)			X
D. RAYNAUD (DR0)		X	X
<b>Enseignants-chercheurs</b>			
J.P. BENOIST (MC1)	X		
M. FILY (MC1)	X		
M.A. MELIERES (MC1)			X
<b>I.T.A.</b>			
G. TESTE (AJT)		X	
P. SASSIN (IE2) temps partiel		X	
<b>Doctorants (Thèse en cours)</b>			
O. ABALLAIN		X	
B. BELLIER			X
S. BERNARD		X	
E. COSMES	X		
B. DELMONTE			X
F. PARRENIN			X
E. POUTOU	X		
O. TORINESI	X		
<b>Post-doc et visiteurs</b>			
C. GOUJON		X	
D. SIX	X		
J. MAK		X	

## PUBLICATIONS (revues à comité de lecture)

Fin 1999	2000	2001
12	9	29

## PRINCIPALES COLLABORATIONS

<i>Nationales</i>	<i>Internationales</i>
LSCE (Saclay)	Université de Berne, Suisse
LMD (Paris)	Université de Copenhague, Danemark
CNRM (Toulouse)	Université Bibocca, Milan
CEN (Grenoble)	Université d'Heidelberg, Allemagne
LOA (Lille)	Université de Bruxelles, Belgique
LEGOS (Toulouse)	Université Catholique de Louvain, Belgique
LGIT (Grenoble)	Université de Rhode Island, USA
LAMA (Grenoble)	Université de Miami, USA
IMAG (Grenoble)	Université de Washington, USA
CSNSM (Orsay)	Université du Wisconsin, USA
Université de Bordeaux	Université de Stony Brook, USA
ENS Lyon	Arctic and Antarctic Research Institut, Saint Petersburg, Russie
IRD	NCAR, Boulder, Colorado, USA
	CSIRO, Melbourne, Australie
	British Antarctic Survey, UK
	ENEA, Italie
	Lamont, New York, USA
	Hadley Center, UK
	Université East Anglia, UK
	MPI Hambourg, Allemagne
	MPI Mayence, Allemagne
	Geological Survey Antactica
	ECMWF, UK
	Byrd polar Research Center, Ohio, USA
	CARTEL, Sherbrooke, Canada
	Laboratory of Ice Core and Cold Environment, Lanzhou, Chine

## FINANCEMENT

	1999	2000	2001
<b>PROGRAMMES NATIONAUX</b>			
PNCA			
ACI Blanche			
ATI-étude du mercure et des isotopes stables des BTEX en milieu atmosphérique urbain			
<b>COMMISSION EUROPEENNE</b>			
Pole-Ocean-Pole : global stratigraphy for millennial climate (POP)			
European Project for Ice Coring in Antarctica (EPICA)			
Firn record of trace gases relevant to atmospheric chemical changes over 100 years (FIRETRACC)			
<b>AUTRES CONTRATS</b>			
CNES-végétation			
CNES-exobiologie			
IFRTP-sur la trace de la calotte glaciaire en presqu'île de Taymir			
IFRTP-Lac Vostok : Approche par l'étude de la glace basale			
IFRTP-Glacioid			
IFRTP-Glaciolac			
IFRTP-Concordia			

Les principaux objectifs de l'équipe climat sont de déceler et comprendre les mécanismes qui participent à l'évolution du climat et de contribuer à la prévision des changements climatiques et de leurs impacts (niveau des mers par exemple). Dans ce contexte, une des spécificités du LGGE, et particulièrement de l'équipe Climat, est l'étude des régions polaires. Pour atteindre ces objectifs, il faut à la fois observer (mesurer, surveiller) les indicateurs climatiques et s'attacher à modéliser les évolutions pour disposer d'un outil de prévision. Une idée majeure est d'utiliser le passé, récent ou lointain, pour comprendre les interactions et les mécanismes et tester les modèles sur plusieurs échelles de temps.

Le LGGE a une longue expérience dans la réalisation de carottages de glace polaire et l'analyse et l'étude paléo-climatologique de leurs enregistrements. Au cours des ans une collaboration très étroite s'est développée dans le domaine de l'analyse des carottes entre plusieurs acteurs nationaux et internationaux, dont :

- Le LSCE Saclay (analyses de la glace et des inclusions gazeuses),
- Le CSNSM/Orsay (mesures du Beryllium 10)
- Le Département de Géologie et Océanographie de Bordeaux (géochimie des poussières)
- L'institut de Physique de Berne (analyse des gaz).

et le LGGE (analyse des gaz, des poussières des aérosols solubles – cf. aussi chapitre chimie polaire et chapitre Rhéologie des glaces).

Pendant la période 1999-2001, l'analyse détaillée de l'enregistrement 400.000 ans de Vostok a été poursuivie (Projet PNEDC 4 Cycles) avec une focalisation sur la datation, le début de la mesure haute résolution du profil de CH<sub>4</sub> comme indicateur du climat du Nord (dans le cadre du programme européen POP), l'étude détaillée des événements climatiques durant les transitions glaciaires – interglaciaires et l'étude du stade 11.

Cette même période a été celle de la poursuite du forage européen EPICA à Dôme C avec le soutien de l'IFRTP (la profondeur de 2 000 m a été dépassée en décembre 2001) et de l'étude de la séquence, couvrant l'Holocène et la dernière transition glaciaire-interglaciaire. Des résultats particulièrement originaux ont été obtenus sur les traces gazeuses (CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>O) en collaboration avec l'Institut de Physique de Berne et sur les poussières.

Les études paléo-climatologiques non seulement fournissent des informations sur les mécanismes qui régissent la machine climatique, mais permettent aussi de situer le contexte de la perturbation anthropique. Dans ce cadre, l'air piégé dans la glace ou en équilibre diffusionnel dans les pores du névé polaire offre la possibilité unique d'étendre l'enregistrement directement mesuré en continu dans l'atmosphère (depuis 1958 pour le CO<sub>2</sub> et plus récemment pour d'autres traces gazeuses). Nous avons dans ce domaine, qui recoupe des thèmes à la fois d'intérêt climatique et de chimie atmosphérique, procédé à des avancées très significatives dans l'étude de l'évolution récente de l'atmosphère à partir de l'analyse de l'air du névé (projet européen Firetracc 100). Les progrès parallèlement effectués sur la compréhension du piégeage des gaz et le développement de méthodes analytiques (en particulier pour les isotopes des gaz) vont permettre de prolonger cette étude dans le temps à partir des mesures sur la glace (et non plus seulement le névé).

Parallèlement aux études paléoclimatiques à partir des enregistrements glaciaires, le LGGE a progressivement développé des programmes de modélisation climatique et de télédétection. La modélisation vise à la compréhension de la circulation actuelle au-dessus des régions polaires, y compris des processus d'interaction avec les sols et des rétroactions potentielles associées, de l'hydrologie des calottes de glace et de leur contribution au niveau des mers, et de la composition chimique de l'atmosphère. En collaboration avec le LMD, le LGGE a contribué au développement, à l'amélioration et à l'exploitation d'un Modèle de Circulation Générale d'Atmosphère (MCGA) à grille variable, le modèle LMDZ. Ce modèle nous a permis d'améliorer considérablement notre capacité à simuler le climat des régions polaires, avec des applications importantes en paléoclimatologie

(circulation, interprétation des isotopes, des traceurs atmosphériques). Ceci ouvre la voie à une prévision plus fiable du climat pour le siècle prochain (PNEDC). Le LGGE s'est également engagé dans l'effort national de développement et d'exploitation d'un outil de modélisation de la chimie atmosphérique à grande échelle, le modèle LMDZ-T, appliqué au soufre dans la région Antarctique (PNCA). L'analyse du climat (XXème siècle) et l'amélioration des modèles se fonde, entre autres, sur les données issues de la télédétection qui, seule, permet la couverture globale des régions polaires. Dans ce sens, le LGGE s'est engagé dans plusieurs programmes de validation, calibration et utilisation des données de télédétection (POLDER, SPOT4, radiométrie micro-onde) en collaboration avec le LEGOS et avec le soutien du CNES et du PNTS.

La suite du rapport de l'équipe est chronologiquement structurée, décrivant successivement le paléoclimat (1), l'évolution depuis le début de l'ère industrielle (2), le climat et l'environnement atmosphérique du XXème siècle et actuel (3), et enfin le climat du XXIème siècle (4).

## 1. CLIMAT ET ATMOSPHERE AUX ECHELLES DE TEMPS LONGUES

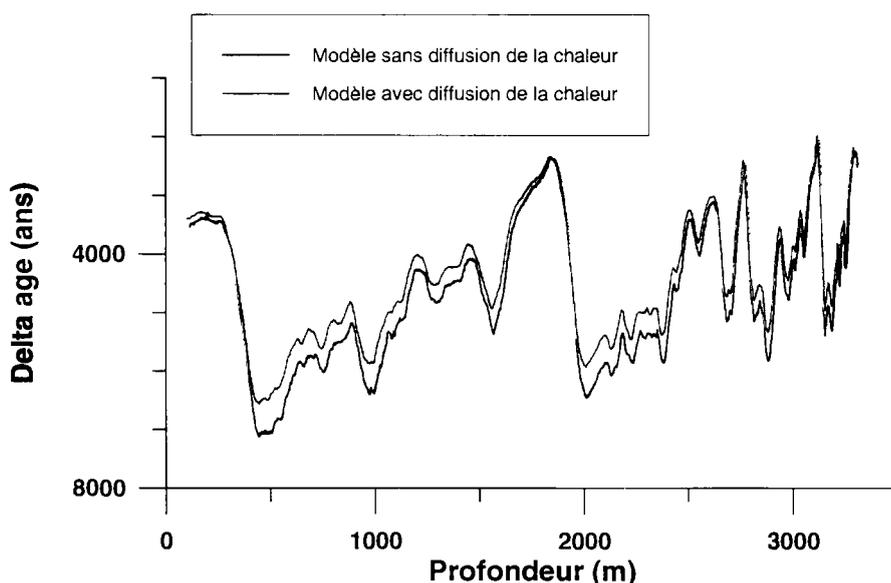
### 1.1 Validité des enregistrements et fonctions de transfert

#### 1.1.1 PIEGEAGE DES GAZ

##### 1.1.1.1. Densification

(J.-M. Barnola, L. Arnaud, J. Chappellaz, C. Goujon, P. Duval)

Sur la base du modèle semi-empirique de densification établi il y a une dizaine d'années (Barnola *et al.*, 1991), nous avons développé un modèle physique de densification du névé basé sur la déformation de sphères de glace. Dans ce modèle la structure du matériau à la transition neige-névé près de la surface a une importance particulière (Arnaud *et al.*, 1998). Au cours d'une mission à Vostok en 1995-96 nous avons étudié la structure du névé en utilisant une nouvelle technique de prise d'image 2D permettant de caractériser à la fois les grains et leurs joints, et les pores (Arnaud *et al.*, 1998). Ce travail a été finalisé (Arnaud *et al.*, 2000) et le nouveau modèle permettra à terme d'obtenir la densité du close-off en mesurant des paramètres structuraux de la glace, indépendamment de la relation empirique entre la densité du close-off et la température utilisée actuellement.



*Figure 1.1: comparaison des estimations de la différence d'âge air/glace à partir du modèle de densification du névé appliqué à Vostok en prenant en compte ou non la diffusion de la chaleur*

Dans le cadre du projet européen Pole-Ocean-Pole, Céline Goujon, contractuelle post-doctorale, a développé le modèle physique de densification du névé polaire (Arnaud *et al.*, 2000) en y introduisant les phénomènes de diffusion de la chaleur entre la surface et le fond du névé. Pour une profondeur donnée, la vitesse de densification est donc calculée en tenant compte de la température locale du névé et non plus de la température moyenne annuelle du site immédiatement propagée en profondeur. Ce nouveau modèle permet de reproduire, avec une bonne corrélation, les profils de température actuels de sites ayant des caractéristiques (température, accumulation) très différentes, tels que Vostok en Antarctique ou GRIP et GISP2 au Groenland. La prise en compte de la diffusion de la chaleur dans la densification du névé polaire permet également d'estimer avec plus de précision la valeur du delta-âge entre la glace et le gaz. Si, en périodes interglaciaires, les valeurs calculées sont comparables à celles obtenues avec l'ancien modèle, le modèle avec diffusion de la chaleur donne un âge du gaz qui peut atteindre jusqu'à 500 ans de plus en périodes glaciaires (figure 1.1, Goujon *et al.*, *manuscrit en préparation*). Ce nouveau modèle détermine également l'évolution au cours du temps des gradients thermiques dans le névé. Il constitue donc un moyen d'estimer le fractionnement thermique des gaz occlus tels que l'azote et l'argon (cf section ci-dessous).

Une collaboration avec N. Caillon et J. Jouzel au CEA/LSCE nous a permis de tester la validité du modèle de densification en s'appuyant sur les isotopes des gaz permanents piégés dans la glace. Les changements de température et de taux d'accumulation à la surface de la calotte modifient les conditions de densification du névé et donc l'épaisseur de la colonne diffusive par laquelle transitent les gaz avant d'être piégés dans les bulles d'air à l'interface névé-glace. Comme ces gaz fractionnent légèrement par gravitation, un enregistrement très détaillé des rapports  $^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$  ou  $^{36}\text{Ar}/^{40}\text{Ar}$  (par exemple) mettra en évidence tout changement de ce fractionnement gravitationnel et par conséquent toute modification de l'épaisseur de la colonne diffusive. D'autre part, si le changement de température est suffisamment brutal et rapide, il produira un autre phénomène de fractionnement physique des gaz, lié au différentiel de température entre l'air en surface et le névé en profondeur. Ce phénomène laissera une trace sous forme d'une anomalie dans le rapport isotopique des gaz permanents comme  $^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$  ou  $^{36}\text{Ar}/^{40}\text{Ar}$ .

Nous avons focalisé notre étude sur 2 périodes de réchauffement relativement abrupt pour les conditions de Vostok : la transition 5d-5c à 110 Ka BP et la transition 8-7.5 à 240 ka BP. Dans les 2 cas, nous observons un décalage isotopique concomitant à la variation enregistrée dans les isotopes de l'eau, reflétant principalement le changement d'épaisseur de la colonne diffusive via l'effet gravitationnel. Pour la transition 5d-5c, une très faible anomalie thermique apparaît également dans le rapport  $^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$  mais n'est pas encore visible dans le signal  $^{36}\text{Ar}/^{40}\text{Ar}$ . Grâce à ces marqueurs climatiques enregistrés dans la phase gaz, nous pouvons donc à 2 périodes différentes déterminer la différence d'âge air/glace indépendamment du modèle de densification. Pour la transition 5d-5c, le modèle sous-estime ce delta-âge d'environ 400 ans (Caillon *et al.*, *sous presse*). En revanche pour la transition 8-7.5, les deux approches indépendantes concordent parfaitement (Caillon *et al.*, *manuscrit en préparation*).

### **1.1.1.2. Porosité tridimensionnelle de la neige et de la glace**

(J-M Barnola, C. Goujon)

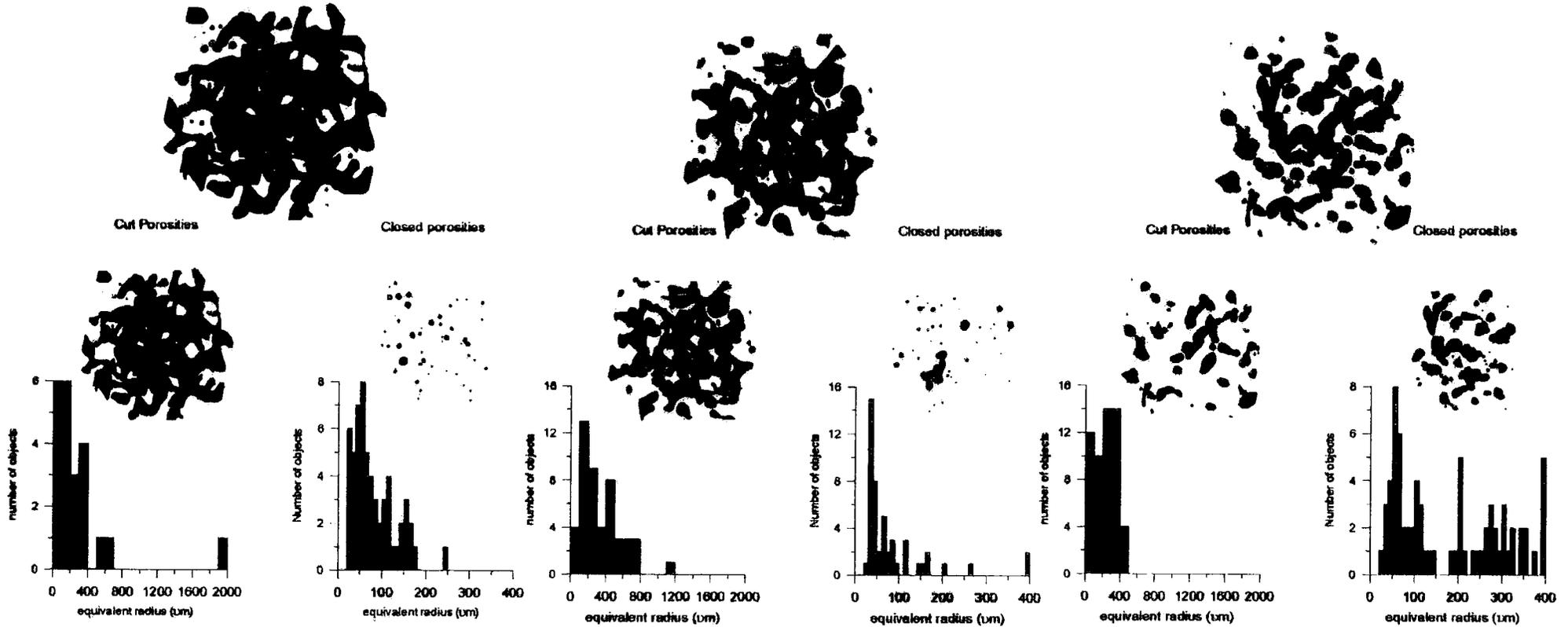
Dans l'objectif de mesurer précisément l'évolution de la porosité du névé lors du processus de densification, en collaboration avec le Centre d'Etudes de la Neige (CEN, Météo-France), nous avons réalisé des images tridimensionnelles à haute résolution de la neige et de la glace polaire. La méthode utilisée est la tomographie en rayons-X sur la ligne de lumière ID19 de l'European Synchrotron Radiation Facility (ESRF) à Grenoble. Des échantillons cylindriques de 9mm de diamètre et 9mm de hauteur (neige) et des échantillons cubiques de 15mm de côté (glace) ont été analysés avec une résolution spatiale de 10  $\mu\text{m}$ , en les immergeant dans une cellule refroidie à l'azote liquide pour éviter la fusion et la métamorphose de l'échantillon compte-tenu de l'énergie considérable apportée par le faisceau synchrotron.

Un total de 12 échantillons répartis entre 62 et 120m de profondeur dans la carotte de Vostok a été analysé. La caractérisation en parallèle de la structure cristalline de la glace n'est hélas pas obtenue, en revanche cette méthode nous a permis pour la première fois de mettre en évidence l'existence de très

BH8 80 m (d=.784) "Open firm"

BH8 94 m (d=.832) "Transition zone"

BH8 120 m (d=.874) "Ice"



20

Figure 1.2 : Images tridimensionnelles du névé et de la glace de Vostok, obtenues par tomographie X à l'ESRF. Chaque code couleur représente des volumes d'air connectés entre eux. De gauche à droite sont représentées successivement de la neige au début de la zone de fermeture des pores, de la neige au milieu de cette zone, et de la glace, avec en plan inférieur pour chaque cas la porosité totale et la porosité fermée, ainsi que le mode de distribution en taille (microns) des différents volumes.

petites bulles (quelques dizaines de  $\mu\text{m}$  de diamètre) formées bien avant la zone supposée de fermeture des pores (à partir de la densité 0,78) et représentant déjà une part significative de la porosité fermée (figure 1.2). Les densités reconstituées par cette méthode sont en excellent accord avec celles déterminées par la méthode volumétrique plus classique. En revanche la porosité fermée est nettement plus faible que celle obtenues sur le terrain par méthode de détente. Cette différence pourrait être liée à un effet d'échelle, la taille des échantillons différant d'un ordre de grandeur entre les deux expériences. La prise en compte de ces données comme contrainte pour le modèle de densification constituera une étape future à ce travail.

## 1.1.2. RELATIONS ISOTOPE/TEMPERATURE ET METHODE DE DATATION

### 1.1.2.1. Effet de la saisonnalité

(G. Krinner, C. Genthon)

Un problème majeur lors de l'interprétation des enregistrements isotopiques dans la glace polaire en termes de températures passées est le fait qu'elle repose sur l'hypothèse que la corrélation actuelle observée entre composition isotopique et température moyenne annuelle reste valable pour le passé. Or, des évidences de plus en plus nombreuses tendent à montrer que cette hypothèse n'est pas toujours valable (Jouzel J., *Towards a calibration of the isotopic paleothermometer. Science*, 286, 910-913, 1999). En particulier, il semble que la reconstruction des températures au centre du Groenland pendant le dernier maximum glaciaire (DMG, 21 Ka BP) soit affectée d'un biais *chaud* (Johnsen S., D. Dahl-Jensen, W. Dansgaard and N. Gundestrup, *Greenland paleotemperatures and ice core isotopic profiles. Tellus*, 47, 624-629, 1995 ; Cuffey K., G. Clow, R. Alley, M. Stuiver, E. Waddington and R. Saltus, *Large Arctic temperature change at the Wisconsin-Holocene deglacial transition. Science*, 270, 455-458, 1995). L'analyse de simulations numériques à l'aide de MCGA (modèles de circulation générale de l'atmosphère) par Krinner et al. (1997) et Werner et al. (2000) a appuyé l'hypothèse que ce biais chaud pourrait être dû à un changement du cycle annuel des précipitations : un changement du rapport entre les précipitations d'été et d'hiver en faveur des premiers induit un biais chaud dans la composition isotopique de la glace.

En collaboration avec M. Werner (MPI für Biogeophysik, Jena), la plausibilité de cette hypothèse a été réexaminée à l'aide de sorties d'une vingtaine de MCGA faites dans le cadre du projet PMIP (Paleoclimate Model Intercomparison Project). La principale question à laquelle nous avons tenté de répondre était de savoir si, pour le DMG, les modèles PMIP simulaient, comme les modèles utilisés dans les études de Krinner et al. (Krinner G., C. Genthon and J. Jouzel, *GCM analysis of local influences on ice core  $\delta$  signals. Geophys. Res. Lett.*, 24, 2825-2828, 1997) et Werner et al. (2000) (Werner M., U. Mikolajewicz, M. Heimann and G. Hoffmann, *Borehole versus isotope temperatures on Greenland: Seasonality does matter. Geophys. Res. Lett.*, 27, 723-726, 2000). un changement important du cycle annuel de précipitations au centre du Groenland (introduisant un biais chaud dans le signal isotopique) mais pas en Antarctique. Ce travail a montré que les différents modèles examinés ne donnent pas une réponse cohérente. Certains modèles suggèrent même des effets opposés à ceux observés dans les études précédentes. En plus, des versions successives de plusieurs MCGA (LMDZ2/3, ECHAM3/4) ne donnent pas des résultats identiques. Néanmoins, certaines tendances semblent être communes à la plupart des modèles analysés :

- Le cycle annuel des précipitations au centre du Groenland semble être susceptible de fortes variations lors de changements climatiques, sans qu'il soit pour l'instant possible à l'aide de GCM de conclure avec certitude dans quel sens vont ces variations. En tout cas, aussi bien pour le moyen Holocène (il y a 6000 ans) que pour le DMG, les biais ainsi introduits dans le signal isotopique peuvent être aussi importants que le signal de changement climatique lui-même.
- Pour le plateau de l'Antarctique de l'Est, les changements de cycle annuel de la précipitation ont un impact moins fort sur le signal isotopique. Les paléotempératures déduites à partir du signal isotopique ne semblent pas être faussées par des variations du cycle annuel des précipitations.

Ce travail a donné lieu à un article par Krinner et Werner qui est sur le point d'être soumis à Tellus.

### 1.1.2.2. Datation des forages par méthode inverse

(F. Parrenin, J.M. Barnola, en collaboration avec C. Ritz (équipe rhéologie)).

Une méthode inverse a été appliquée au modèle de datation glaciologique de Vostok, couplé au modèle de névé (permettant d'évaluer la différence d'âge air/glace). Cette approche nous a permis de contraindre la valeur des paramètres mal connus du modèle de datation (paramètres d'écoulement et paramètres d'accumulation en surface) grâce à des informations chronologiques présentes le long du forage. Elle a en outre les avantages suivants :

- On utilise de manière optimale toutes les informations chronologiques disponibles,
- La datation résultante est une datation glaciologique, donc respectant les lois physiques. En particulier, l'épaisseur des couches annuelles, et donc la durée des événements climatiques, sont mieux évalués.
- La datation n'étant pas calée fermement sur les variations des paramètres orbitaux de la Terre, on peut en déduire des informations sur les déphasages du climat par rapport à ces variations d'insolation.
- La méthode permet de reconstruire des intervalles d'incertitudes sur les paramètres reconstruits, tant sur les paramètres du modèle de datation que sur la datation obtenue.

Les résultats que nous avons obtenus sont les suivants (Parrenin *et al.*, sous presse) :

- La durée du précédent interglaciaire à Vostok ( $16 \pm 2$  ka à mi-transitions) semble significativement plus grande que la durée donnée par les courbes de niveau marin ( $\sim 12$  ka).
- Le déphasage du deutérium à Vostok par rapport à l'insolation, tout comme celui de l'oxygène 18 des bulles d'air, semble varier significativement au cours de la période étudiée.
- Notre modèle n'est pas capable de produire une datation raisonnable à partir du stade isotope marin 7 (250 ka BP). Nous avons montré que ce problème peut être dû à une mauvaise paramétrisation de la variation spatiale d'accumulation à Vostok, qui pourrait présenter une discontinuité à  $\sim 100$  km de Ridge B, point d'origine de la glace de Vostok. Ce résultat semble être confirmé par d'autres indicateurs comme le sodium ou l'excès en deutérium.
- Nous obtenons une datation optimale sur les deux derniers cycles climatiques, avec un intervalle de confiance associé.
- Nous montrons que la relation spatiale actuelle deutérium - température de surface semble sous-estimer la variation de température passée de 15% ( $\pm 15\%$ ).

Cette approche est actuellement étendue à d'autres forages (Dome C, Dome F), situés sur des dômes. Nous espérons ainsi obtenir une datation plus fiable en s'affranchissant des problèmes de variations spatiales du champ d'accumulation et des vitesses d'écoulement. D'autre part, nous avons débuter une étude visant à évaluer quel site est le plus approprié pour obtenir le stade isotope marin 11 (420 ka BP) avec la meilleure résolution possible en Antarctique.

### 1.1.2.3. Datation d'EPICA

(J-R Petit)

L'obtention en 1999 d'une première carotte jusqu'à 788 m de profondeur à Dome Concordia dans le cadre du projet européen EPICA nous permet de compléter notre description des conditions climatiques et environnementales sur le plateau antarctique sur les  $\sim 45000$  dernières années. L'établissement d'une chronologie fiable de ce forage est un pré-requis pour les interprétations ultérieures. Nous avons contribué à cette étude, en collaboration avec nos collègues européens du projet, en reliant les données EPICA à celles bien datées par ailleurs et obtenues sur d'autres forages antarctiques : il s'agissait en particulier du profil de conductivité électrique (ECM, relié à des événements volcaniques majeurs) de Vostok et de Byrd, du profil de Béryllium-10 de Vostok et d'un pic de fluor à  $17320 \pm 320$  années BP selon la datation de Byrd. En calant les variables du modèle glaciologique afin de rendre compte des chronologies de ces différents événements, nous avons abouti à une précision chronologique de l'ordre de  $\pm 200$  ans à 10000 années BP et de  $\pm 2000$  ans à 41000

années BP (*Schwander J., Jouzel J., Hammer C.U., Petit J.R., Udisti R. and Wolff E., A tentative chronology for the EPICA Dome Concordia ice core, Geophys. Res. Lett., 28, 4243-4246, 2001*).

## 1.2. Variabilité haute résolution des signaux environnementaux : interglaciaires et terminaisons

### 1.2.1. GAZ A EFFET DE SERRE (CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> et N<sub>2</sub>O)

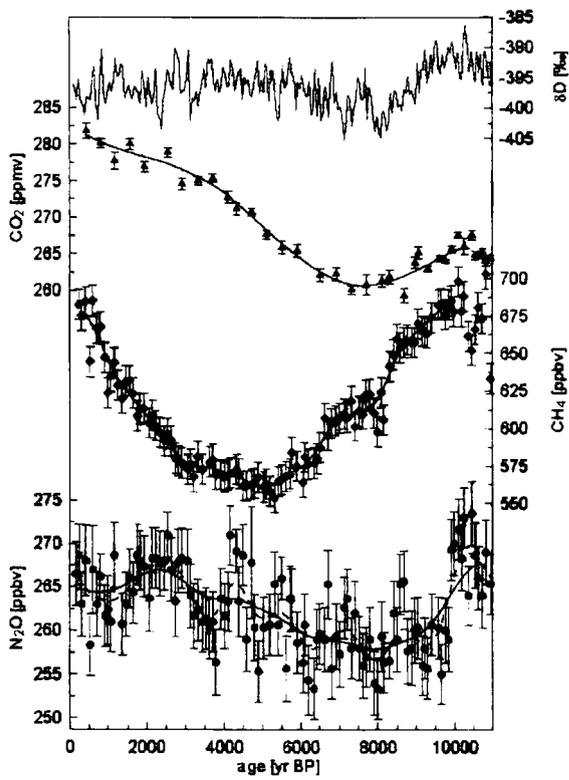
(*J.M. Barnola, B. Bellier, J. Chappellaz, M. Delmotte, G. Krinner, L. Pépin, E. Poutou, D. Raynaud*)

Après avoir décrit les grandes tendances des rapports de mélange de CO<sub>2</sub> et CH<sub>4</sub> au cours des 4 derniers cycles climatiques (*Petit et al., 1999*), nos efforts se portent désormais sur l'étude de leur variabilité à court terme. A cela deux objectifs : décrire et comprendre la variabilité naturelle de ces gaz (en y ajoutant le N<sub>2</sub>O) en conditions interglaciaires, en focalisant sur l'Holocène (les derniers 11500 ans) ; caractériser la variabilité climatique et environnementale rapide (similaire aux événements Dansgaard/Oeschger au Groenland durant la dernière glaciation) au cours des précédentes glaciations. Nous avons également étudié en détail l'évolution du CO<sub>2</sub> au cours de la dernière déglaciation, en collaboration avec nos collègues suisses de Berne.

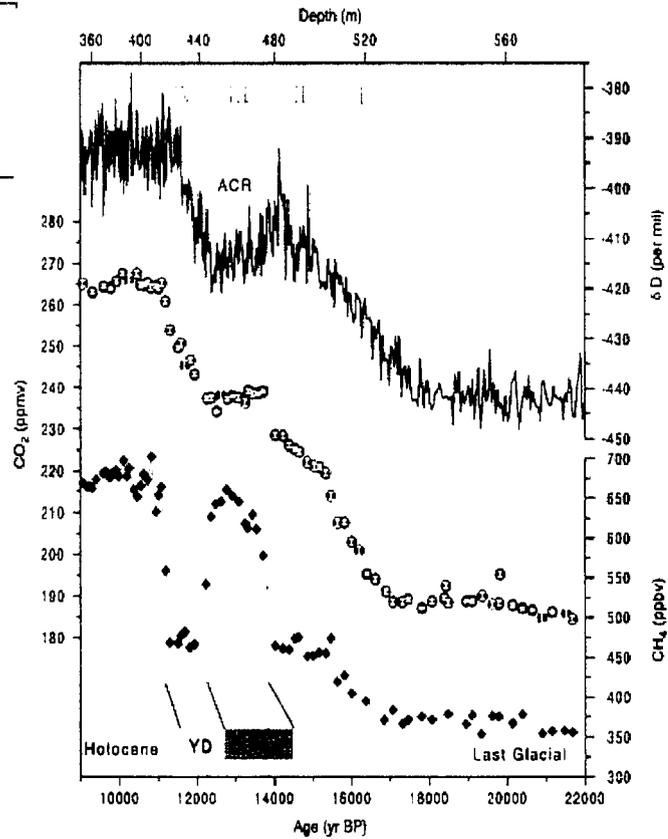
Les mesures de CO<sub>2</sub> sur la carotte EPICA prélevée à Dome Concordia confirment les tendances observées sur les carottes de Vostok et Taylor Dome, à savoir une légère décroissance du CO<sub>2</sub> de 268 à 260 ppmv entre environ 10.000 ans BP et 8.000 ans BP, suivie d'une augmentation progressive jusqu'à 280 ppmv il y a 200 ans (figure 1.3). Des mesures préliminaires du rapport isotopique <sup>13</sup>C/<sup>12</sup>C du CO<sub>2</sub> (par technique classique en collaboration avec E. Michel du CEA/LSCE) réalisées sur la carotte BH7 de Vostok montrent une dérive vers des valeurs plus négatives de ce rapport. Cela suggère que l'augmentation du CO<sub>2</sub> durant le deuxième tiers de l'Holocène proviendrait du re-largage de carbone accumulé dans la biosphère continentale au début de l'Holocène. Ces résultats sont conformes à ceux récemment publiés par nos collègues de Berne (*Indermühle et al, Nature 1999*). Toujours en collaboration avec les Bernois, nous avons publié le premier profil détaillé de N<sub>2</sub>O couvrant l'ensemble de l'Holocène, obtenu sur la carotte EPICA (*Flückiger et al., sous presse*) (figure 1.3). Les fluctuations de ce gaz apparaissent très faibles (entre 258 et 268 ppbv, soit 14% de la variabilité glaciaire-interglaciaire) et semblent plutôt corrélées aux variations du gaz carbonique. Les causes de ces variations demeurent spéculatives à ce stade mais sont probablement liées au premier ordre à celles des sources de protoxyde d'azote (océans, nitrification/dénitrification dans les sols) plutôt qu'à celles des puits (dissociation dans la stratosphère, intensité du transfert troposphère/stratosphère).

Grâce à l'exceptionnelle qualité de la glace d'EPICA sur la période en question, nous avons pu étudié en détail l'augmentation glaciaire-interglaciaire du CO<sub>2</sub> au cours de la dernière transition climatique. L'augmentation de 76 ppmv prend place sur une durée de 6000 ans et en quatre périodes distinctes présentant une forte corrélation avec la température antarctique mais aussi, au moment des transitions, avec le méthane (figure 1.4). Ces données suggèrent que l'océan circum-antarctique a probablement joué un rôle primordial dans la régulation des teneurs atmosphériques en CO<sub>2</sub> sur cette période et que les augmentations rapides du CO<sub>2</sub> au début du Bölling/Allerod et à la transition Dryas récent / Holocène résultent d'une contribution additionnelle via la circulation thermohaline lors de ses fluctuations majeures (*Monnin et al., 2001*).

Concernant le méthane, nous avons étudié en détail le signal obtenu dans les derniers 200m de la carotte EPICA de 1999, couvrant les derniers 45000 ans. Les fluctuations très marquées de ce gaz, associées aux événements Dansgaard/Oeschger, nous permettent de confirmer la datation obtenue grâce aux informations chimiques (cf section 1.1.2.3) : à 780 m de profondeur, nous enregistrons la décroissance atmosphérique de CH<sub>4</sub> associée à la fin de l'événement D/O 9, il y a 40000 ans. Une surprise issue de ce profil détaillé concerne l'amplitude du signal méthane sur des événements comme le D/O 6 ayant une durée inférieure à 500 ans. Alors que les estimations du temps de piégeage du gaz à Dome C (modèle de densification) laissent entendre que ces événements seraient largement atténués par ce temps de piégeage, nous observons une amplitude similaire à celle mesurée dans le forage de Byrd alors que le taux d'accumulation, et donc l'inverse du temps de lissage, y est quatre fois plus grand. Cette observation nous laisse espérer pouvoir reconstituer avec une résolution séculaire l'évolution de la composition de l'atmosphère en s'appuyant sur la prolongation du forage EPICA en



**Figure 1.3 :** Evolution comparée de  $N_2O$ ,  $CH_4$ ,  $CO_2$  et composition isotopique de la glace au cours de l'Holocène, à partir du forage EPICA (Flückiger et al., sous presse)



**Figure 1.4 :** Evolution temporelle comparée du  $CO_2$ , du  $CH_4$  et de la composition isotopique de la glace (proxy de température antarctique) au cours de la dernière transition climatique glaciaire-interglaciaire, obtenue à partir du forage EPICA à Dome Concordia (Monnin et al., 2001)

cours. En s'appuyant sur les profils détaillés de CH<sub>4</sub> obtenus sur les carottes de GRIP, Byrd et Vostok, nous avons également étudié l'évolution du gradient inter-polaire de méthane au cours de la période 46-11 Ka BP. Son interprétation en terme d'importance relative des sources boréales et tropicales fait ressortir une prédominance des sources tropicales sur toute la période étudiée mais également une contribution potentiellement très large des hautes latitudes nord durant les événements rapides du stade isotopique marin 3. La question d'une participation des hydrates de CH<sub>4</sub> via des dégazages massifs lors de ces événements est donc de nouveau posée (*Dällenbach et al., 2000*). Afin de compléter l'information spatiale issues des deux pôles pour la distribution passée du méthane dans l'atmosphère, nous avons abordé le potentiel des forages sur glaciers tropicaux et tempérés, en analysant les forages du col du Dôme (Alpes françaises, projet européen Alpclim), de Dundee et de Dasuopu (Himalaya, collaboration avec T. Yao et B. Xu de l'Université de Lanzhou, Chine) et de l'Illimani (Andes, collaboration avec l'IRD). Dans les quatre cas, nous observons des artefacts pouvant localement augmenter d'un facteur deux les teneurs en méthane piégé dans la glace (*Xu et al., 1999 ; Yao et al., manuscrit soumis à Nature et actuellement révisé pour Geophys. Res. Lett.*). Seule une sélection rigoureuse des échantillons basés sur la chimie détaillée des forages, permettant de sélectionner les couches d'hiver non perturbées, permettra à terme d'extraire une information spatiale pertinente de ces forages en terme de contrainte sur le méthane passé. A ce stade, les profils peuvent être exploités uniquement en terme de contrainte sur la datation de la glace. Ils montrent que pour le col du Dôme, de la glace préindustrielle est présente dans les derniers 10m des forages C10 et C11. Pour Dasuopu, environ 1000 ans d'histoire paraissent enregistrés sans discontinuité glaciologique (*Yao et al., en révision*).

Nous avons entamé l'étude à haute résolution (quelques dizaines d'années) du méthane au cours des précédents cycles climatiques, en s'appuyant sur le forage Vostok et en collaboration avec E. Brook de l'Université de Vancouver (Washington, USA). L'objectif étant d'utiliser ce signal comme proxy du climat groenlandais, compte-tenu de sa corrélation remarquable avec ce dernier au cours des derniers 110000 ans, et donc de caractériser l'évolution climatique nord-sud et l'amplitude des variations climatiques groenlandaises sur des périodes où aucun forage groenlandais n'est disponible. En mettant l'accent dans un premier temps sur le stade 6 (160 à 185000 ans BP), nous avons révélé l'existence d'événements rapides en CH<sub>4</sub> dont la séquence, en s'appuyant sur l'estimation de la différence d'âge air/glace basée sur le modèle de densification et validée par les mesures d'isotopes des gaz permanents (cf section 1-1-1), est retardée d'environ 1000 ans par rapport au signal antarctique (*Delmotte et al., manuscrit en préparation*).

Afin de progresser dans la quantification du bilan passé du méthane, nous avons travaillé en collaboration avec N. De Noblet-Ducoudré (CEA/LSCE) et M. Coe (Université du Wisconsin, USA) sur la modélisation de la distribution spatio-temporelle des zones inondées dans le passé. Nous nous sommes appuyés sur le code HYDRA (Hydrological Routing Algorithm) simulant l'écoulement de l'eau à la surface des continents. Il s'agit d'un modèle de réservoir linéaire contraint par la géomorphologie et la climatologie. Travaillant à 5' de résolution et au pas de temps horaire, il permet en particulier de calculer à l'équilibre les fractions de maille recouvertes d'eau et les hauteurs d'eau correspondantes. Il permet de rendre compte des zones marécageuses à nappe phréatique émergente mais pas de l'hydrologie du sol proprement dit. Son application à l'échelle globale n'a pas encore été réalisée et compte-tenu des temps de calcul importants du modèle, nous avons focalisé pour le moment son utilisation le bassin de l'Amazone et l'Afrique équatoriale.

En forçant HYDRA avec les sorties du modèle climatique LMD5.3 pour les conditions d'insolation, de teneurs en CO<sub>2</sub>, de couverture de glace continentale et de température de surface des océans correspondant au dernier interglaciaire (126 Ka BP) et au dernier maximum glaciaire (21 Ka BP), nous avons mis en valeur paradoxalement une augmentation de la surface des zones marécageuses en Amazonie en période froide, liée à la transformation de zones lacustres en zones marécageuses propices à la production de méthane (*De Noblet-Ducoudré et al., soumis*). Une application d'HYDRA à d'autres régions du globe, combinée à une simulation mécaniste de la production de méthane, devrait nous permettre à l'avenir d'étendre cette étude et de quantifier la distribution spatiale des zones marécageuses sur ces périodes-clé.

1.2.2. LES POUSSIÈRES  
(J-R Petit, B. Delmonte)

1.2.2.1. Poussières continentales

Un profil détaillé des poussières a été réalisé sur la carotte EPICA de Dome Concordia (B. Delmonte, thèse en co-tutelle avec l'Université de Milan). L'absence de fracture, et donc de contamination par le fluide de forage, permet pour la première fois l'obtention de mesures fiables des concentrations et des distributions couvrant les derniers 45000 ans. Le nouvel appareil Coulter dont nous avons récemment fait l'acquisition permet de réaliser des mesures avec une bonne précision (256 canaux au lieu de 16 auparavant) et une excellente reproductibilité. Nos résultats confirment l'existence de concentrations

plus élevées de poussières en période froide, avec une variation d'un facteur 50 en passant aux conditions Holocène. En fait, nos mesures détaillées démontrent que le rapport des concentrations varie selon la taille des poussières : il vaut 50 pour celles ayant un diamètre de 0.7 à 1 micron, mais décroît au-delà de 2 microns et vaut ~6 pour celles de 5 microns. En condition glaciaire, les "grosses" particules ont donc plus de difficultés que les "petites" poussières à atteindre le centre de l'Antarctique. Cette observation résulte probablement de l'existence de deux types de circulation atmosphérique : majoritairement zonale lorsque la calotte glaciaire est très froide et les échanges méridiens réduits ; majoritairement méridienne lorsque le front polaire recule en période interglaciaire. Au cours de l'Holocène, le mode de la distribution du volume des poussières se décale progressivement vers les valeurs plus grosses.

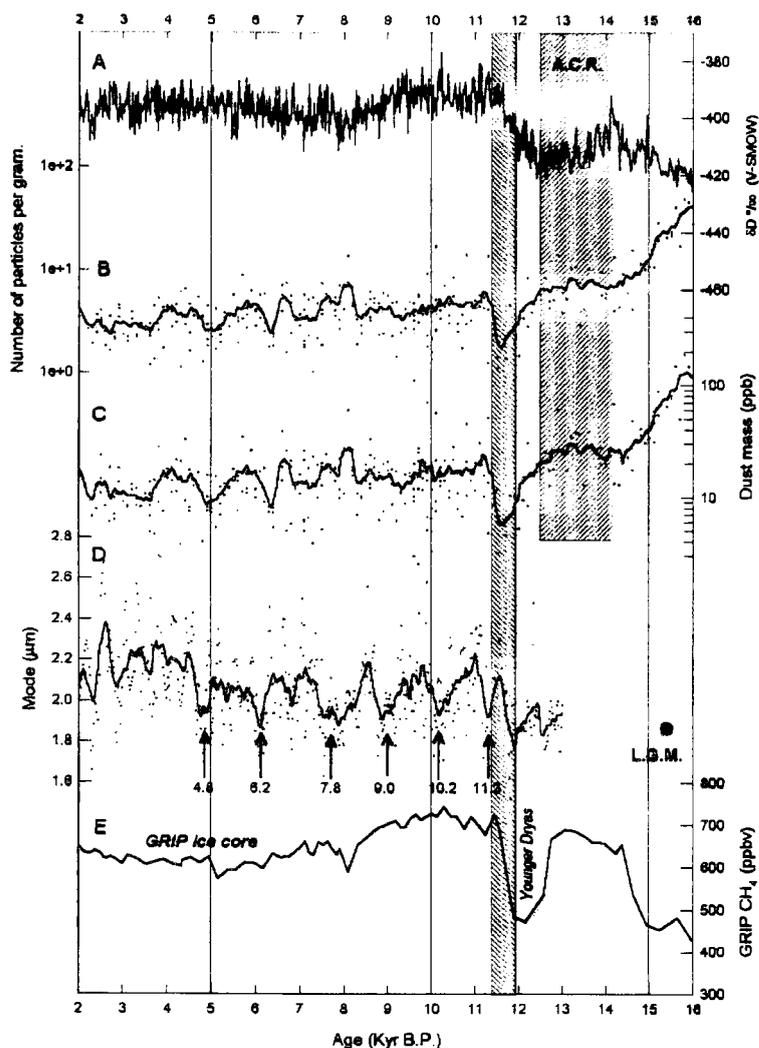


Figure 1.5 : évolution temporelle du nombre, de la masse et du mode dominant des poussières dans le forage EPICA au cours de la dernière déglaciation et de l'Holocène (Delmonte et al., sous presse), comparée au signal isotopique antarctique et au méthane atmosphérique.

Durant la déglaciation et en particulier la période de "l'Antarctic Cold Reversal" (ACR), les concentrations restent à un niveau faible mais deux fois plus élevé que celui de la période Holocène. Un minimum des concentrations (2-4 ppb de matière) apparaît vers 11400 ans, et correspond à la fin du Dryas récent, concomitant à l'augmentation rapide des teneurs en méthane atmosphérique. Si ce dernier phénomène résulte de l'intensification du cycle hydrologique au niveau global, les très faibles niveaux de concentration en poussières observés dans la glace EPICA pourraient refléter une

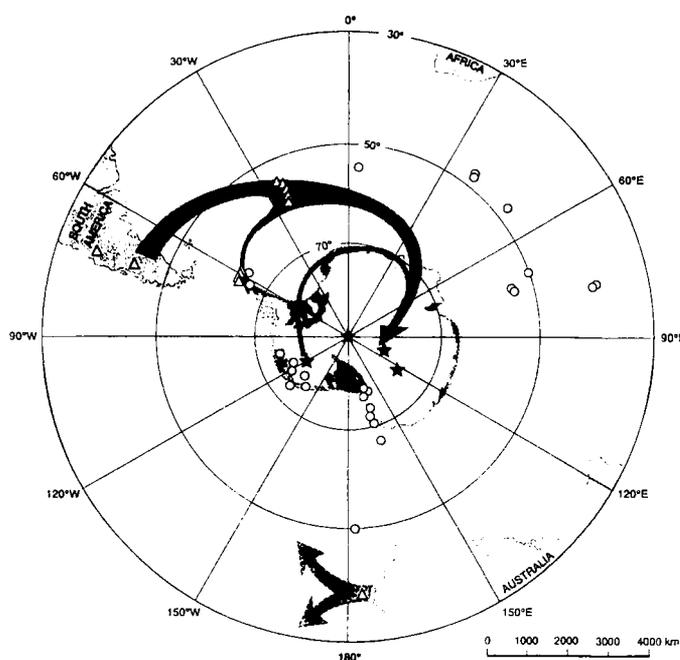
augmentation de l'humidité en Amérique du sud, source principale des poussières atteignant l'Antarctique à cette période (*Delmonte et al, sous presse*).

En améliorant les conditions de décontamination des carottes et en choisissant avec soin des échantillons non fracturés, il a été possible d'améliorer la fiabilité des mesures en ce qui concerne les périodes chaudes à faibles concentrations comme l'Holocène, toujours à partir de la glace d'EPICA.

Les changements de la granulométrie des poussières éoliennes sont pris comme indicateurs de l'efficacité du transport atmosphérique. En effet au cours de leur trajet entre la source (continent de l'hémisphère sud, avec dominance de la Patagonie) et le site antarctique, les grosses poussières ont tendance à sédimenter et le mode de la distribution se décale progressivement vers les petits diamètres. Des changements significatifs sont observés au cours de l'Holocène (figure 1.5). Ceux-ci sont organisés suivant une structure suggérant des variations pseudo cycliques avec une périodicité variant de 1000 à 2000 ans. De telles variations rappellent celles observées dans de nombreux enregistrements marins de l'Atlantique Nord et dont l'origine reste à déterminer (*Delmonte et al, sous presse*).

### 1.2.2.2. Détermination des source des tephra dans la carotte de Vostok

L'avancée dans ce domaine est l'identification des sources volcaniques qui ont produit 15 horizons de cendres repérés dans la carotte de Vostok (*Basile et al., sous presse*).



**Figure 1.6.** Schéma des trajectoires des cendres volcaniques suggérées d'après l'identification des sources de 15 événements trouvés dans la carotte de Vostok. La largeur des flèches est proportionnelle à la fréquence des trajectoires. Bien que le transport vers Vostok soit plutôt direct, les trajectoires sont inspirées des résultats des modèles de trajectoires inverses (*Genthon C., communication personnelle et Andriani et al., 1995*). D'après *Basile et al., sous presse*.

Ces couches visibles à l'œil nu contiennent suffisamment de matière pour permettre les analyses à la microsonde (éléments majeurs) ainsi qu'à l'ICP-MS (mesures des concentrations en terres rares) et à la technique de thermo-ionisation (TIMS pour la mesures des isotopes du Strontium et du Néodyme). La taille des tephra de 20 à 50 microns restreint les sources potentielles à la région sub-polaire. Ainsi les signatures géochimiques de ces horizons ont été comparées à la composition des laves de l'inventaire des volcans antarctiques et sub-antarctiques, qui ont été actifs au cours des derniers 500 000 ans. C'est ainsi parmi les 15 événements étudiés, 9 sont issus de l'activité des volcans des îles Sandwich du sud (dans l'ouest de l'océan atlantique sud), 3 viendraient de la région sud de l'Amérique du sud, un de la péninsule Antarctique (Bransfield strait) et un de la région volcanique de Marie Byrd en Antarctique de l'ouest.

Toutes ces sources sont distantes de Vostok de plusieurs milliers de kilomètres aussi, la taille des micro-tephra impose un transfert atmosphérique rapide entre la source et le plateau Est Antarctique. Ces transports troposphériques rapides entre la région sud ouest atlantique et l'Antarctique de l'Est ont existé pendant toute la période étudiée et indépendamment du type de climat : glaciaire ou interglaciaire. En dépit du nombre limité d'événements volcaniques de ce type dans la carotte de Vostok (moyenne : 1 événement tous les 20.000 ans) le trajet de ces cendres volcaniques apparaît cohérent avec une advection pratiquement continue des poussières continentales issues du sud de l'Amérique du sud.

### 1.2.3. SEQUENCES DES EVENEMENTS CLIMATIQUES DURANT LES TERMINAISONS I à IV – RELATION NORD-SUD

(L. Pépin, D. Raynaud, J-M Barnola)

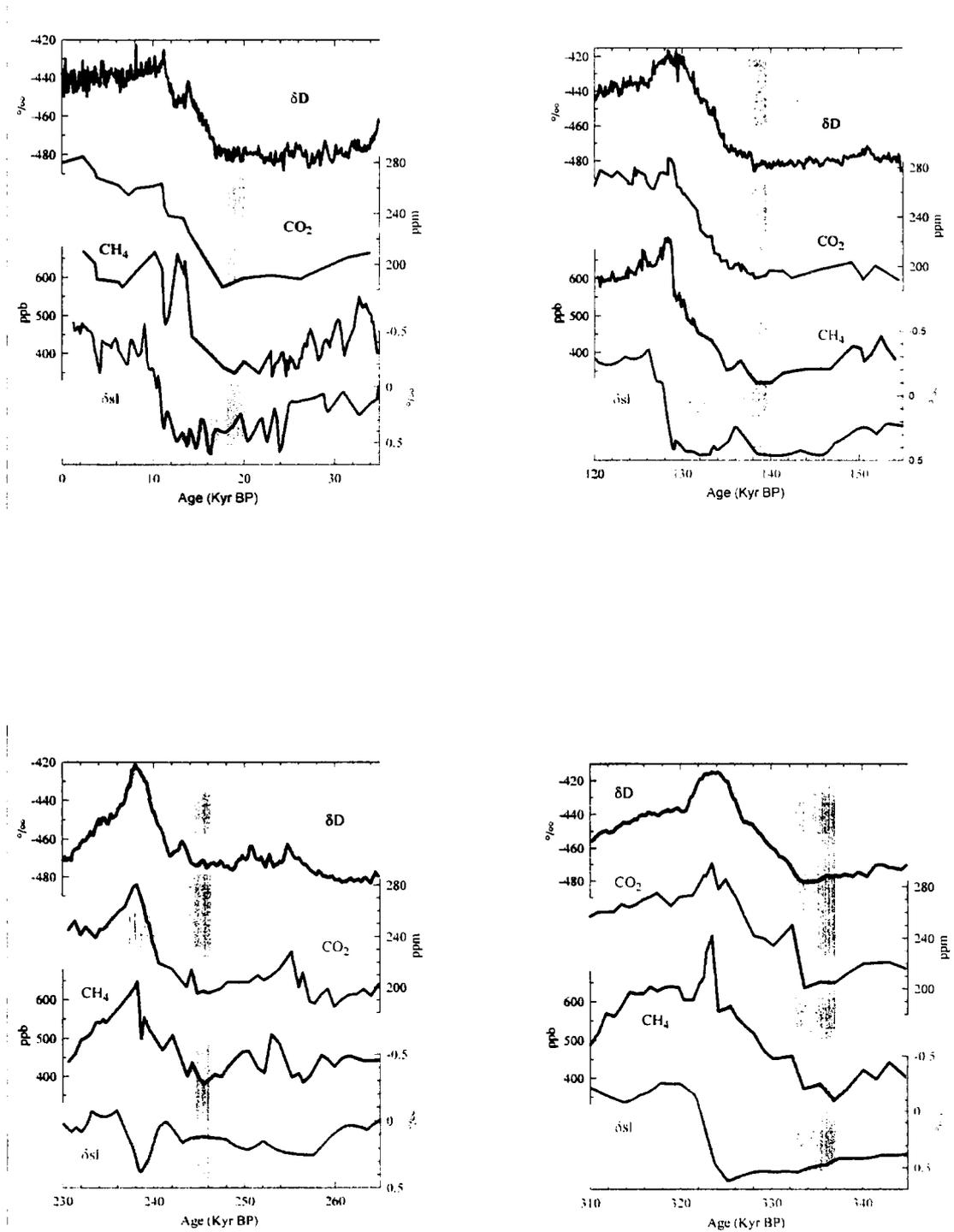
Collaboration pour la partie modélisation : Louvain la Neuve

*Note : Nous utilisons ici le terme terminaison pour caractériser les transitions entre conditions glaciaires et interglaciaires. La terminaison I correspond à la dernière transition entre le dernier maximum glaciaire et l'Holocène, la II entre le stade isotopique marin 6 et le 5 (Eemien), etc....*

Le synchronisme Nord-sud du cycle de 100 000 ans est souvent présenté comme une des énigmes du forçage orbital (Milankovitch) et ce synchronisme nécessite d'être précisé. Notre approche est d'utiliser la signature contenu dans l'enregistrement de la carotte de VOSTOK de forçages et d'évènements climatiques opérant dans les deux hémisphères et d'utiliser pour les quatre terminaisons marquant le cycle de 100 000 ans que comporte l'enregistrement de VOSTOK les signatures suivantes (Petit et al., 1999 ; Pépin, 2000 ; Pépin et al., 2001, cf aussi fig.1.7) :

- la composition en deutérium comme proxy du réchauffement glaciaire-interglaciaire aux hautes latitudes Sud ;
- le CO<sub>2</sub> comme indicateur des variations des gaz à effet de serre ;
- la deuxième phase de l'augmentation en méthane, caractérisée par une nette accélération de cette augmentation, comme proxy du réchauffement marqué aux hautes latitudes Nord ;
- la composition isotopique de l'oxygène de l'air contenu dans les bulles d'air de la glace comme indicateur des variations du volume des glaces continentales.

La séquence temporelle des températures Sud et Nord ainsi que des forçages effet de serre et albédo de la glace (via le volume des glaces) observée sur l'enregistrement VOSTOK constitue un résultat robuste puisqu'elle est la même pour les 4 terminaisons. La température de l'air antarctique et les gaz à effet de serre augmentent les premiers avec la température antarctique précédent de quelques centaines d'années au maximum le CO<sub>2</sub> (Monnin et al., 2001). Par contre le réchauffement marqué au Nord (par exemple cas du Bolling pour la terminaison I) prend place systématiquement plusieurs milliers d'année après et coïncide avec la décroissance importante du volume des glaces attribuée à la fusion des calottes de l'Hémisphère Nord. A partir des résultats VOSTOK, mais aussi EPICA, nous suggérons donc un scénario pour lequel l'effet de serre joue un rôle majeur dans le réchauffement au Sud, sans cependant en être l'initiateur. Si le réchauffement forcé par l'effet de serre n'apparaît pas initialement au Nord c'est qu'il doit être contrebalancé par un autre mécanisme climatique qui va le retarder.



**Figure 1. 7.** .Les quatre Terminaisons à Vostok (d'après Pépin et al, 2001). De haut en bas pour chaque terminaison et en fonction de l'âge : teneur en deuterium de la glace, teneur en  $CO_2$  de l'air des bulles, teneur en  $CH_4$  de l'air des bulles, composition isotopique de l'oxygène des bulles corrigée de l'influence du cycle hydrologique afin d'avoir une signature plus pure du volume des glaces.

Pour tester cette idée nous collaborons avec Michel Crucifix de Louvain la Neuve qui utilise son modèle Mobidic (modèle climatique à complexité intermédiaire et couplant atmosphère, océan, biosphère et cryosphère) pour simuler les événements climatiques qui caractérisent la terminaison I. Les résultats viennent d'être présentés à l'AGU (*Crucifix et Berger soumis, Pépin, Crucifix et al., San Francisco, Décembre 2001*). Ils montrent qu'une décharge d'icebergs générée dans le modèle par une instabilité des calottes Nord, et qui pourrait correspondre à l'événement Heinrich 1, maintient effectivement les hautes latitudes Nord froides alors que les latitudes plus au Sud se réchauffent, forcées par le CO<sub>2</sub> et l'insolation dans le modèle. Le réchauffement aux basses latitudes conduit progressivement à une augmentation de la salinité des eaux de surface qui va se propager plus au Nord et réactiver la circulation thermohaline pour conduire à un réchauffement très marqué au Nord qui correspondrait au Bolling. Le modèle simule alors un ralentissement du réchauffement au Sud, conformément à l'observation de l'Antarctic Cold Reversal. Cette simulation permet donc de décrire les mécanismes qui ont pu opérer au cours des terminaisons et conduit au retard observé du climat des hautes latitudes Nord sur celui des hautes latitudes Sud.

### 1.3 - Paléo-circulation atmosphérique : modélisation des temps de transport

(G. Krinner, C. Genthon)

L'interprétation des archives glaciaires est compliquée par le fait que certains paramètres mesurés, par exemple le contenu en poussières, sont influencés par une multitude de processus : sources, transport vers le lieu de déposition, déposition (lessivages sec et humide...), et processus ayant lieu après la déposition elle-même. Les variations des caractéristiques du transport des traceurs et des masses d'air constituent ainsi parfois des "perturbations" qui empêchent une interprétation aisée des variations observées de la concentration d'une espèce donnée. D'un autre côté, l'interprétation de ces variations en termes de changements des caractéristiques de la circulation atmosphérique peut être l'objectif même du travail. Dans le premier cas, c'est surtout la durée du transport entre les régions sources et le lieu de déposition sur la calotte de glace qui est d'intérêt.

Nous avons développé un nouveau diagnostic de ce temps de transport dans le modèle de circulation générale (MCGA) LMDZ. Cette méthode, facilement utilisable dans d'autres MCGA pourvus d'un schéma de transport des traceurs, consiste en l'introduction de deux traceurs idéalisés par région source. Ces traceurs ont les caractéristiques suivantes : leur concentration dans la plus basse couche atmosphérique au-dessus de la région source est imposée et non-nulle à chaque pas de temps, et leur décroissance est radioactive avec des constantes de temps de quelques jours. On peut montrer que dans ce cas, le temps de transport entre une région source (par exemple, la Patagonie) et un lieu de déposition à l'extérieur de cette source (par exemple, à Vostok ou à Dôme C en Antarctique) est une fonction du rapport des concentrations des deux traceurs.

Cette méthode a ensuite été appliquée à une étude du temps de transport de traceurs continentaux entre des régions sources situées en Patagonie, Australie et Afrique Australe et la région de déposition en Antarctique. Les périodes climatiques étudiées étaient le présent, le dernier maximum glaciaire (21 Ka BP) et la dernière entrée en glaciation (115 Ka BP). Les résultats de cette étude (*Krinner and Genthon, soumis*) sont les suivants :

- Au DMG, le transport atmosphérique depuis la Patagonie vers l'Antarctique était plus efficace, ce qui pourrait expliquer une partie de l'augmentation observée des concentrations de poussières à cette époque (*Petit et al., 1999*).
- A la dernière entrée en glaciation, le transport atmosphérique vers l'Antarctique montre des signes d'une circulation plus intense, sans que ceci ait des conséquences notables sur les concentrations ni sur le temps de transport des traceurs continentaux, ce qui est en accord avec les mesures de poussières dans la carotte de Vostok (*Petit et al., 1999*). Le transport atmosphérique à cette époque était donc en quelque sorte intermédiaire entre celui d'un climat glaciaire et interglaciaire.

## 1.4. Développements analytiques

### 1.4.1. AUTOMATE EXAM (EXTRACTION ET ANALYSE DU METHANE DANS LA GLACE)

(J. Chappellaz)

Depuis 1997, une part importante des analyses de méthane sont dévolues non plus seulement à l'étude du cycle biogéochimique de ce gaz, mais à l'utilisation du méthane comme marqueur stratigraphique permettant de dater les forages relativement les uns aux autres. Ceci a considérablement accru la quantité de mesures à réaliser (désormais plusieurs centaines de mesures par forage). Nous avons donc développé, avec l'aide d'une stagiaire de Magistère de Physique (C. Bordes) et des services techniques du LGGE (services mécanique et électronique), une ligne d'extraction et d'analyse entièrement automatisée et pilotée par le logiciel LabView. Le principe expérimental demeure identique au système utilisé jusqu'ici : les gaz sont extraits par fusion-regel sous vide et analysés par chromatographie en phase gazeuse. Désormais, toutes les phases expérimentales sont gérées par une interface SCXI mesurant les données d'entrée (pressions, températures) et pilotant des relais (vannes, résistances, support élévateur, chromatographes) en fonction du temps. Ce montage offre ainsi un gain de productivité de près de 75%. 11 échantillons de 50g chacun sont analysables en ~7h et le système peut fonctionner la nuit, augmentant d'autant le rendement. Toutes les variables du système étant contraintes, l'automatisation a permis d'améliorer encore la reproductibilité analytique, qui avoisine désormais  $\pm 10$  ppbv ( $2\sigma$ ) au lieu de  $\pm 20$  ppbv auparavant et offre accès à encore plus de détail dans l'évolution temporelle du méthane atmosphérique.

Nous avons également couplé un deuxième chromatographe en phase gazeuse permettant l'analyse du N<sub>2</sub>O à partir des mêmes échantillons que pour le méthane. Le système offre encore une précision moyennement satisfaisante ( $\pm 8$  ppbv) et nous avons bon espoir de le rendre plus compétitif dans les mois à venir. Nous prévoyons également d'accéder au rapport O<sub>2</sub>/N<sub>2</sub> toujours sur le même échantillon en modifiant prochainement le montage chromatographique.

### 1.4.2. ISOTOPES DU CO ET DU CO<sub>2</sub>

(J. Chappellaz, J.M. Barnola, B. Bellier, S. Bernard, J. Mak)

Le système de couplage chromatographie / spectrométrie de masse installé et mis au point au LGGE pour les isotopes du carbone du méthane peut en principe être adapté pour d'autres espèces gazeuses organiques, à la condition de disposer de suffisamment de gaz à partir de la glace (~1 à 5 nmoles de carbone). Nous avons donc entrepris de l'appliquer à deux gaz organiques déjà étudiés pour leur rapport de mélange et pour lesquels l'information isotopique aiderait grandement à comprendre l'origine des variations passées : le CO<sub>2</sub> et le CO. Pour ce dernier, le travail expérimental a été mené à bien en collaboration avec John Mak, chercheur à l'Université de Stony Brook (USA) invité au LGGE comme chercheur associé INSU de septembre 2000 à mars 2001, et spécialiste de l'étude des isotopes du CO par technique en flux continu.

Nous avons modifié l'interface combustion de manière à pouvoir facilement shunter les fours d'oxydation et de réduction, susceptibles de perturber les signaux isotopiques de CO<sub>2</sub> et CO, tout en séchant le gaz via la membrane Nafion et en l'introduisant dans le spectromètre de masse via l'open split. Deux nouveaux standards de CO<sub>2</sub> purs ont été acquis et calibrés pour encadrer au mieux les valeurs isotopiques attendues pour ces deux gaz dans l'atmosphère passée. Enfin nous avons incorporé dans la ligne de pré-concentration des gaz un réactif de Schütze permettant la conversion en ligne du CO en CO<sub>2</sub> et nous avons installé des boucles de détente de volume variable pour s'adapter facilement aux différents ordres de grandeur de carbone disponibles en fonction du gaz étudié (centaines de ppmv pour le CO<sub>2</sub>, dizaines de ppbv pour le CO). Les tests sont en cours et devraient déboucher dans le courant de l'année 2002. John Mak sera à nouveau invité par l'UJF, l'OSUG et l'INSU pour une durée totale de 9 mois, afin de mener à bien la partie CO du projet et avec le soutien d'une nouvelle doctorante (S. Bernard).

## 1.5. Actions transversales

### 1.5.1 LA GLACE DE LAC DANS LA CAROTTE DE VOSTOK

(J-R Petit, D. Raynaud)

Collaborations : LSCE, Saclay ; ULB, Bruxelles ; AARI, St Petersburg, Russie

La glace prélevée sous la profondeur de 3538m à Vostok présente des propriétés très différentes de celle de glacier formant les couches déposées au-dessus de cette profondeur : faible conductivité électrique, cristaux à très large taille (jusqu'à 1m !), inclusions de roche visible à l'œil nu, teneur en gaz pratiquement nulle et composition isotopique de la glace révélant qu'elle a été formée à partir du regel de l'eau du lac sous-glaciaire de Vostok. Cette découverte du phénomène d'accrétion de glace du lac à Vostok a fait l'objet d'une publication dans la revue SCIENCE (Jouzel et al, 1999). D'autre part Souchez et al. (2000) ont montré à partir de sa signature isotopique que cette glace accrétée est un mélange de frasil et d'eau du lac. Enfin l'analyse en  $^4\text{He}/^3\text{He}$  de la glace d'accrétion indique l'absence de source chaude ou de contribution mantellique de forte enthalpie à la base du lac (Jean Baptiste et al., 2001).

Cette découverte de glace d'accrétion du lac est réellement importante car son analyse physique, chimique et biologique ouvre l'accès aux informations sur la composition de ce milieu extrême qu'est le lac sous-glaciaire de Vostok, sans pour autant avoir à pénétrer le lac lui-même.

### 1.5.2 LE STADE ISOTOPIQUE MARIN 11 DANS LA CAROTTE DE VOSTOK

(D. Raynaud, J.M. Barnola, J. Chappellaz, F. Parrenin, J-R Petit, C. Ritz)

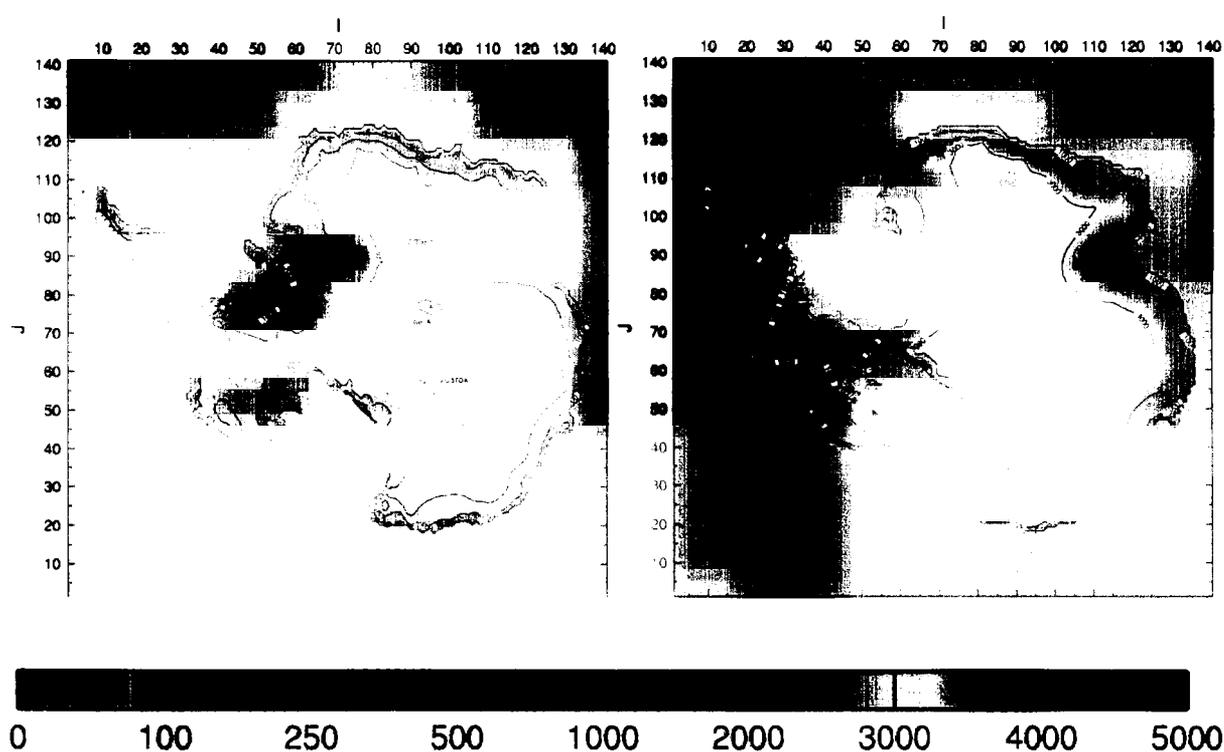
Collaboration avec l'Institut d'Astronomie et de Géophysique, Louvain la Neuve (Belgique), LSCE, Saclay

Le stade 11 est un interglaciaire qui s'est produit il y a environ 400 000 ans et qui semble avoir été particulièrement long et chaud dans certaines régions du globe. Certains auteurs estiment que le niveau des mers était alors 20 m au-dessus de l'actuel. C'est aussi l'époque où la Grande Barrière de Corail s'est formé, reflétant de profonds changements dans le cycle océanique du carbone. Enfin il a été suggéré d'utiliser cette période du passé comme un analogue particulièrement intéressant de notre climat futur, aussi en raison des conditions de forçage orbital de l'insolation durant le stade 11 qui sont identiques à celles de l'Holocène et des dizaines de milliers d'années à venir.

Dans ce contexte la carotte de Vostok présente la particularité d'offrir le seul enregistrement atmosphérique continu remontant à cette période mais cet enregistrement ne couvre qu'une partie du stade 11 car il est plus bas perturbé par des anomalies dans l'écoulement de la glace. Nous montrons (Raynaud et al., sous presse), par comparaison entre la chronologie de Vostok et celle des carottes marines ainsi que l'examen du couple de données  $\delta^{18}\text{O}_{\text{air}}-\text{CH}_4$ , que la glace de Vostok a vraisemblablement enregistré des conditions (en  $\text{CO}_2$  et température) proches de celles de l'optimum climatique du stade 11. Par contre l'enregistrement de l'excès en deutérium à Vostok ne confirme pas cette conclusion. Néanmoins l'enregistrement de Vostok n'indique des teneurs atmosphériques en  $\text{CO}_2$  et des températures antarctiques plus faibles que celles enregistrées pour les interglaciaires 5 et 9. En fait la caractéristique majeure du stade 11 (comparé aux interglaciaires suivants) pourrait bien être sa longueur plus que des conditions extrêmes en température ou gaz à effet de serre. Nous avons testé cette hypothèse en collaboration avec l'Institut d'Astronomie et de Géophysique de Louvain la Neuve. Les simulations du modèle climatique LLN 2-D NH indiquent que si un seuil de  $\text{CO}_2$  atmosphérique (de l'ordre de 250 ppmv) doit être dépassé pour déglacer suffisamment l'Hémisphère Nord pendant le stade 11, par contre la longueur de l'interglaciaire dépend essentiellement de la phase entre  $\text{CO}_2$  et insolation.

Enfin nous avons abordé la question d'un niveau marin plus élevé de 20m par rapport au niveau actuel. Pour engendrer un tel niveau il faut à la fois faire fondre le Groenland (7 m équivalent), l'Antarctique de l'Ouest (5m équivalent), mais aussi une partie non négligeable de l'Antarctique de l'Est pour les 8m restants. Nous avons donc simulé l'état de l'Antarctique à cette époque avec le modèle calotte 3-D du LGGE. Nous avons ainsi montré que l'Antarctique au stade 11 était assez semblable aux états atteints lors des autres interglaciaires et à peine plus réduit que l'état actuel car

celui-ci n'a pas encore fini sa réponse à la dernière montée du niveau de l'océan. Puis nous avons effectué divers tests pour évaluer à quelles conditions l'Antarctique pourrait contribuer à 13 m de niveau des mers au dessus de l'état actuel (les 7 m supplémentaires pour atteindre 20 m étant supposés fournis par la fonte totale du Groenland). En augmentant d'un facteur 2.5 la fusion basale sous les ice-shelves durant le stade 11 (changement d'environ 0.4 m/an à 1 m/an), le modèle simule une disparition quasi-complète de l'Antarctique de l'Ouest dont il ne reste plus que quelques îles. Même ainsi, la contribution au niveau des mers n'est que de 5 m car l'Antarctique de l'Est n'est pas affectée par la disparition de l'Antarctique de l'Ouest. Ce résultat montre d'une part la grande sensibilité à la fusion basale sous les ice-shelves. D'autre part, il implique aussi que même si une telle désintégration est survenue dans le passé, il est vraisemblable qu'elle n'ait pas été enregistrée dans la glace de Vostok. Enfin pour réduire suffisamment le volume de l'Antarctique pendant une période interglaciaire il faut soit supposer des températures plus chaudes qu'actuellement d'au moins 10 degrés (ce qui est en contradiction avec de nombreuses données), soit supposer une accumulation réduite de moitié mais il resterait alors à comprendre pourquoi et à en montrer l'évidence dans des enregistrements. L'explication la plus plausible de la contradiction apparente entre les données des terrasses marines en zone tectoniquement stables (indiquant 20m d'élévation du niveau des mers) et nos résultats de modélisation de l'Antarctique réside dans les incertitudes concernant la datation des terrasses en question (Raynaud *et al.*, *sous presse*).



**Figure 1.8 :** Réponse en terme d'altitudes de surface du modèle calotte 3-D du LGGE (Ritz *et al.*, *sous presse*) dans les conditions actuelles de température et niveau marin (carte de gauche) et dans celles correspondant au stade 11 en considérant une relation constante entre température et précipitation (carte de droite). On note le peu de changement entre ces deux interglaciaires, la situation durant le MS11 correspondant à une contribution maximum de la calotte antarctique au niveau marin de 5 m.

En perspective sur ce sujet, nous voulons effectuer, dans le cadre du travail de thèse de Frederic Parrenin, un ensemble de simulation pour rechercher les sites antarctiques les plus favorables en vue d'obtenir un enregistrement complet et de bonne résolution du cycle des stades 12-11-10.

## 2. EVOLUTION RECENTE DE L'ATMOSPHERE : INFLUENCE ANTHROPIQUE

(O. Aballain, L. Arnaud, J.M. Barnola, J. Chappellaz, A. Fabre, J. Mak, P. Martinerie)

Dans le cadre du projet européen Firetracc/100 (1998-2000), nous avons étudié l'évolution de la composition gazeuse de l'atmosphère au cours des dernières décennies, via l'analyse de l'air interstitiel du névé polaire. Notre contribution au projet s'est faite sous quatre angles : (1) réalisation de campagnes de terrain pour effectuer les prélèvements, (2) modélisation de la diffusion des gaz dans le névé, (3) analyses de certaines traces gazeuses, (4) modélisation chimique de l'atmosphère pour l'interprétation des signaux temporels reconstitués.

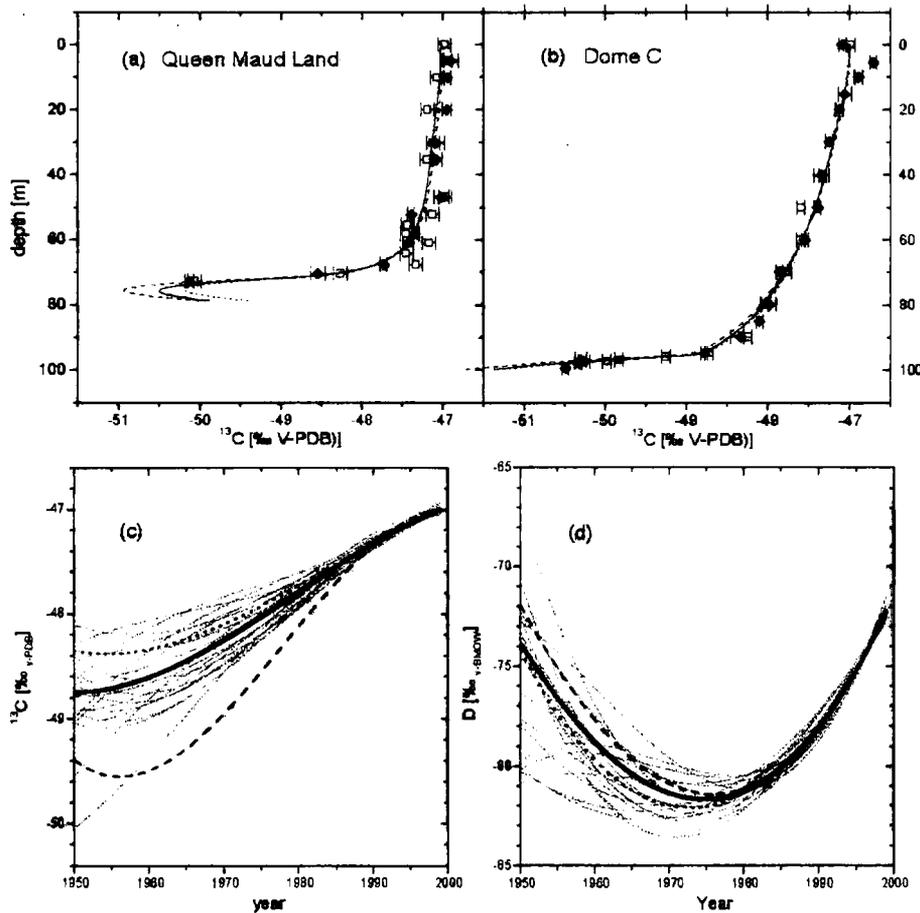
Nous avons mené à bien deux campagnes de prélèvements d'air dans le névé en Arctique (Devon Island, 75°N 82°W, altitude: 1800 m) et en Antarctique (Dome C, 75°S, 123°E, altitude 3233 m). La nouveauté par rapport aux campagnes précédentes consistait à contrôler la qualité et à choisir les profondeurs de prélèvement via l'analyse en continu des teneurs en CO<sub>2</sub> dans le névé grâce à un analyseur infrarouge Li-Cor. A Devon Island et Dome C, nous avons ainsi échantillonné respectivement 18 et 21 niveaux de profondeur et remplis 134 et 87 bouteilles d'air provenant des différents laboratoires du consortium Firetracc/100.

Adeline Fabre, chercheur post-doctoral au LGGE, a développé un modèle de diffusion des gaz dans le névé, en mode direct et en mode inverse, avec application spécifique aux structures de névé de Queen Maud Land (Antarctique, site où des prélèvements ont été réalisés par le British Antarctic Survey), Devon Island et Dome C [Fabre et al., 2000]. Le mode inverse a permis de reconstruire les profils de tortuosité du névé à partir des rapports de mélange de CO<sub>2</sub> et CH<sub>4</sub> mesurés au LGGE. Le mode direct était utilisé en liaison avec des simulations Monte-Carlo pour tester plusieurs milliers de scénarios atmosphériques pour chaque composé gazeux et retenir la gamme de scénarios capable de reproduire les profils dans le névé en tenant compte des incertitudes analytiques. La comparaison des coefficients de diffusion effectifs obtenus par le modèle et par des mesures expérimentales sur la neige a montré l'existence d'un fort effet d'échelle et indiqué que seul le modèle permet de rendre compte des hétérogénéités de tortuosité à macro-échelle [Fabre et al., 2000]. D'autre part nous avons développé une version exécutable du modèle, désormais disponible sur le site internet du projet Firetracc et qui pourra bénéficier à d'autres chercheurs du domaine public ou privé.

Notre contribution majeure aux analyses d'air du névé a porté sur les isotopes du méthane. Nous avons finalisé la mise au point de la technique de mesure en flux continu (GC-C-irMS), permettant d'atteindre une reproductibilité analytique de  $\pm 0,05\%$  sur 80ml d'air et situant cet équipement analytique au niveau des meilleurs équipements disponibles à l'heure actuelle sur l'isotopie du carbone du méthane. En collaboration avec l'Institut de Chimie Max-Planck (Mayence), nous avons analysé les deux rapports d'isotopes stables de CH<sub>4</sub> (<sup>13</sup>C/<sup>12</sup>C et D/H) sur l'air du névé de Queen Maud Land et Dome C (figure 1.9). Les scénarios atmosphériques capables de reproduire via le modèle de diffusion les profils obtenus convergent dans le sens d'un alourdissement moyen de  $1,7 \pm 0,7\%$  du <sup>13</sup>CH<sub>4</sub> atmosphérique entre 1950 et 1999 (figure XX) [Bräunlich et al., 2001]. Au cours des 15 dernières années, la tendance obtenue est de  $+0,04 \pm 0,01\%$  par an, ce qui est en excellent accord avec les résultats obtenus sur la même période par nos collègues australiens à partir de l'analyse des bouteilles pressurisées de Cape Grim. Nos résultats sur l'air de Pôle Sud (collaboration avec T. Sowers, Université de Pennsylvanie) suggèrent que cette tendance existe depuis au moins le début du 20<sup>ème</sup> siècle [Aballain et al., *manuscript en préparation*]. Concernant le rapport D/H, Les scénarios atmosphériques obtenus révèlent une inversion de tendance au milieu des années 70, avec un fort alourdissement dans les années récentes (figure 1.9). Le mécanisme le plus probable pour rendre compte de cette inversion est que le taux d'augmentation du méthane (et donc des sources anthropiques) dans l'atmosphère ait commencé à se réduire à cette période [Bräunlich et al., 2001]. Nous avons également participé à l'interprétation des mesures du sulfure de carbone (COS) en collaboration avec l'Université d'East Anglia (Royaume-Uni). Aussi bien en Arctique qu'en Antarctique, nous n'observons pas de tendance temporelle significative de COS sur les derniers 50 ans, ce qui suggère que ce composé ne serait pas responsable de l'augmentation des teneurs en aérosols sulfatés dans la stratosphère [Sturges et al., 2001].

Sur le plan analytique, nous nous sommes également lancés dans le développement d'un système analytique permettant l'analyse sous flux continu des isotopes du monoxyde de carbone, en

complément des mesures du rapport de mélange de CO. Avec l'aide de John Mak (Université de Stony Brook, USA), chercheur associé INSU durant 6 mois en 2000-2001, l'équipement du LGGE pour la pré-concentration des gaz-traces en amont du spectromètre de masse a été modifié et de nombreux tests ont été réalisés sur environ 500ml d'air par échantillon. La reproductibilité souhaitée (de l'ordre de  $\pm 0,2\%$  pour les rapports isotopiques du carbone et de l'oxygène) n'est pas encore au rendez-vous et ce travail continuera donc au cours des prochaines années, toujours avec le soutien de J. Mak (invité pour 9 mois en 2002).



**Figure 1.9 :** (a) et (b) : profils de  $^{13}\text{CH}_4$  dans le névé de Queen Maud Land et Dome C, mesurés à l'Institut Max-Planck de Mayence (carrés ouverts) par technique classique sur quelques litres d'air et au LGGE (losanges pleins) par couplage GC-C-irMS sur 80 ml d'air. (c) scénarios atmosphériques de  $^{13}\text{CH}_4$  au cours des derniers 50 ans reconstitués à partir des profils dans le névé. (d) idem pour  $\text{CH}_3\text{D}$  (Braünlich et al., 2001).

En modélisation atmosphérique, nous avons simulé l'évolution temporelle de 13 composés organo-halogénés de 1907 à 1998 en utilisant le modèle 2D de chimie atmosphérique adapté au LGGE à partir de celui du NCAR (Boulder, USA). Sur la période de temps commune avec le réseau d'observation international, un excellent accord est obtenu aussi bien pour l'évolution temporelle que pour les gradients méridiens. Mais pour certains substituts des CFCs, nous avons observé d'importantes différences, attribuables à une sous-estimation des inventaires d'émission. Des simulations faites spécifiquement  $\text{CH}_3\text{CCl}_3$  et le HCFC-22, en considérant les teneurs en OH constantes, ont donné des résultats très proches des scénarios temporels issus des données du névé et des observations récentes, suggérant que les teneurs en OH au niveau global n'ont pas significativement changé sur la période considérée. Nous avons également simulé l'évolution du  $\delta^{13}\text{CH}_4$  atmosphérique liée à celle des feux de biomasse au cours des 20 dernières années, et à l'impact de la charge en chlore stratosphérique (fractionnant fortement les isotopes du méthane lors de la réaction  $\text{CH}_4 + \text{Cl}$ ) en liaison avec l'évolution des organo-halogénés reconstruits via Firetracc. La somme des deux effets simulés (feux de biomasse et fractionnement par le chlore) peut expliquer les deux tiers environ ( $0,026\%/an$ ) de la tendance récente de  $\delta^{13}\text{CH}_4$  ( $0,04\%/an$ ). Par ailleurs, un décalage de 5 ans entre le maximum du flux d'émission par les feux de biomasse et le maximum correspondant de la signature isotopique du méthane atmosphérique souligne l'intérêt d'une telle étude évolutive pour un gaz de longue durée de vie tel que le méthane.

### **3. CLIMAT ET ENVIRONNEMENT ATMOSPHERIQUE RECENTS ET ACTUELS EN REGIONS POLAIRES**

#### **3.1. Analyses météorologiques en régions polaires et « guidage latéral » des modèles**

*(C. Genthon, G. Krinner, E. Cosme)*

La densité des observations sur les calottes polaires est plus faible que dans la plupart des autres régions du monde. Les analyses météorologiques, par exemple celles produites par le Centre Européen de Prévisions Météorologique à Moyen Terme (CEPMMT, ou ECMWF en anglais) à Reading (UK), y ont donc un potentiel considérable pour l'étude de la météorologie et de la climatologie des calottes, mais elles doivent être extensivement vérifiées, à la mesure du faible contrôle par les observations. Le réalisme des analyses et des premières réanalyses (ERA15) du CEPMMT sur les calottes de glace a été largement évalué au laboratoire dans le passé. La variabilité, les tendances et divers autres diagnostics relatifs au bilan hydrique et énergétique des régions polaires ont également été analysés. C'est pourquoi nous avons été récemment sollicité pour contribuer à l'évaluation préliminaire, en régions polaires et sur les calottes, d'une nouvelle réanalyse (ERA40) en cours de réalisation au CEPMMT. Quelques années seulement sont disponibles pour le moment et elles présentent quelques défauts significatifs, mais globalement le produit est plutôt encore en progrès par rapport à ERA15 [Genthon, 2001]. A terme (horizon 2003), ERA40 couvrira plus de 40 années, depuis 1957 jusqu'à 2001. Cette durée, combinée à notre expérience des analyses en régions polaires et aux relations que nous entretenons avec le CEPMMT, nous ouvre de belles perspectives dans l'étude de la variabilité et des tendances climatiques en régions polaires.

Par ailleurs, afin de combiner certains avantages des vraies analyses (contrainte par les observations, chronologie) avec ceux d'un modèle de climat (expérimentations numériques multiples, optimisations polaires, traceurs et chimie imbriqués), nous avons développé une méthode de « guidage latéral » du MCGA LMDZ en région Antarctique. Dans cette méthode, les vents et la pression de surface issus des analyses météorologiques du CEPMMT sont utilisés pour corriger la circulation du modèle à la périphérie de la région Antarctique. Dans la région Antarctique elle-même, le modèle est complètement libre. Ainsi, les défauts circumpolaire du modèle sont limités et une chronologie réaliste est introduite, y compris dans la région Antarctique, mais sans que la circulation de cette région ne soit directement contrainte. Une publication sur cette méthode originale et sur son potentiel est sous presse au Monthly Weather Review [Genthon et al., 2001b]. La méthode est en particulier appliquée pour des études du transport de traceurs vers l'Antarctique (c.f. activité sur les climats passés, Krinner et Genthon [2001]) et pour introduire une variabilité atmosphérique réaliste dans les études de la chimie Antarctique.

Notons que la circulation atmosphérique du modèle « guidé » n'est pas contrainte par les observations sur la calotte Antarctique. C'est ainsi que la comparaison de la circulation guidée du modèle sur la calotte, avec celle des analyses mêmes utilisées pour le guidage (mais latéral seulement) a permis de confirmer un problème - précédemment signalé par d'autres - d'assimilation des données à l'une des stations météorologiques Antarctiques [Genthon et al., 2001b] et de révéler un problème similaire à une autre station [Genthon, 2001]. Ce problème est lié à une connaissance encore imprécise de l'altitude à la surface de la calotte. En conséquence une vérification et éventuelle révision des altitudes des stations météorologiques Antarctiques est en cours, en collaboration avec le CEPMMT et Frédérique Remy au LEGOS.

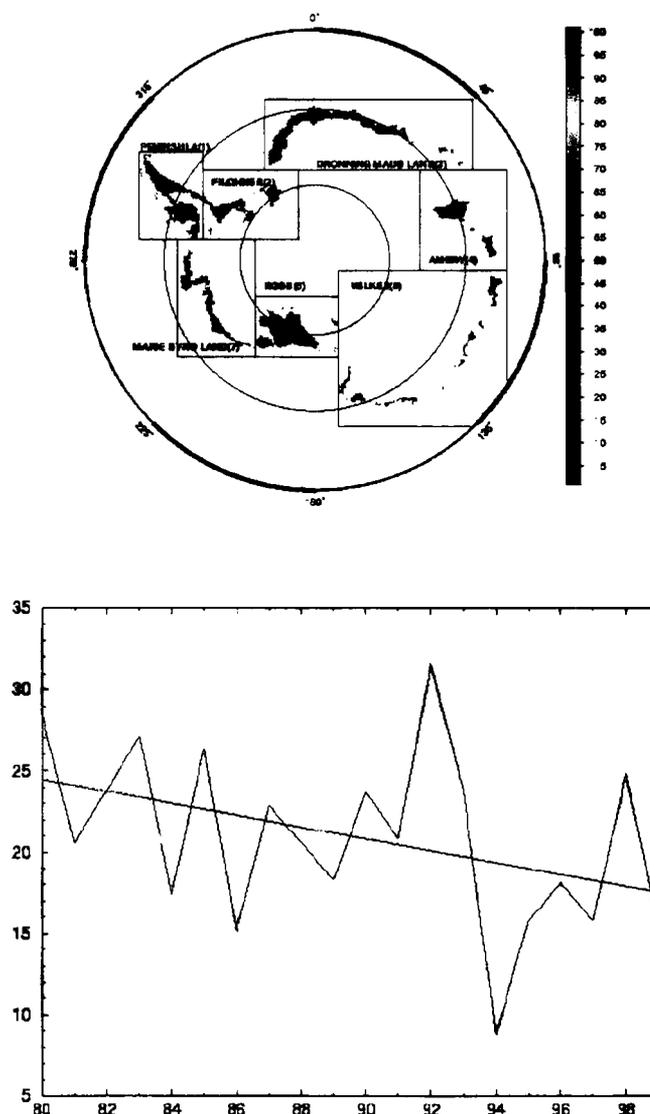
#### **3.2. Variabilité climatique récente**

##### **3.2.1. VARIABILITE ET TENDANCE DE FONTE ANTARCTIQUE**

*(O. Torinesi, M. Fily, C. Genthon)*

L'émissivité de la neige dans le domaine des micro-ondes de fréquences comprises entre quelques GHz et quelques dizaines de GHz est extrêmement sensible à la présence d'eau liquide. Des radiomètres micro-ondes aux fréquences appropriées, embarqués sur satellites à orbite polaire, permettent donc de détecter la présence ou non d'eau liquide en surface des calottes de glace, même en très petite quantité. De tels radiomètres existent depuis plus de 20 ans et permettent une estimation, non seulement des surfaces et périodes annuelles affectées par l'eau liquide en moyenne pour le climat actuel, mais aussi de la variabilité interannuelle et de la tendance récente. En Antarctique, à l'exception du nord de la Péninsule, la fonte en surface représente essentiellement une humidification,

éventuellement très ténue, du manteau neigeux en été sans ruissellement. Cette humidification est la signature d'un bilan énergétique positif en surface du manteau neigeux à 0°C.



**Figure 1.10-a :** Durée moyenne de la fonte estivale Antarctique (en jour)

**Figure 1.10-b :** Evolution interannuelle de la fonte sur la période 1980-99 (en ordonnée :  $10^6$  jours.km<sup>2</sup>)

Un algorithme de détection du signal de fonte en Antarctique dans les données des capteurs SMMR puis SSM/I (canal 19 GHz), en activité depuis la fin de l'année 1979, a été développé au laboratoire. La figure 1-10a montre que, en moyenne, la fonte Antarctique affecte une partie substantielle des régions côtières pour un nombre de jours par an variable. Encore plus intéressant, l'examen de la série annuelle (figure 1.10-b) montre, d'une part une variabilité interannuelle forte, d'autre part une tendance significative sur les 20 dernières années du XXème siècle. Les variations interannuelles ont été explorée par analyse spectrale et par corrélation avec des indices de variabilité connus. Ni la signature de l'onde circumpolaire Antarctique, ni celle de l'oscillation Sud (ENSO) n'ont été clairement mises en évidence. Par contre, une forte composante d'oscillation Antarctique a été trouvée, suggérant une relation entre la distribution en masse de l'atmosphère entre les moyennes et hautes latitudes Sud et le bilan de l'énergie de surface d'été. Cette relation reste à explorer plus avant, en particulier par modélisation.

La tendance de la fonte Antarctique sur 20 ans est à la décroissance. Ce résultat peut paraître incompatible avec un réchauffement climatique souvent évoqué en Antarctique. En fait, le signal de réchauffement climatique Antarctique le plus clair concerne la Péninsule, une région où, justement, l'indice de fonte est en légère croissance. Ailleurs, plusieurs stations indiquent un refroidissement sur les 20 dernières années (alors que, sur 50 ans, la tendance est plutôt au réchauffement). Ces résultats

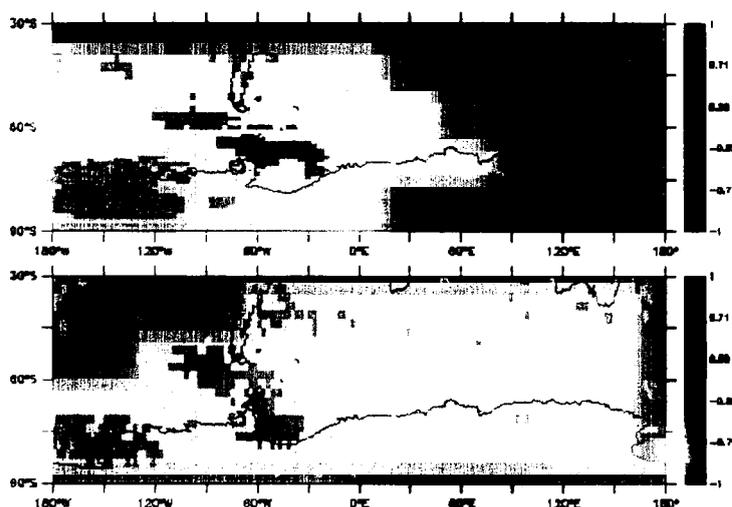
reflètent la complexité du climat Antarctique. Notre signal de fonte par télédétection apporte une contrainte supplémentaire à la compréhension du système Antarctique. Ce travail est effectué dans le cadre d'une thèse, et une publication a été soumise au Journal of Climate [Torinesi et al., 2001].

### 3.2.2. PRECIPITATIONS ANTARCTIQUES ET ENSO

(C. Genthon, G. Krinner)

Les études de corrélation (y compris analyses en composantes principales) montrent une influence marquée de l'oscillation Sud (ENSO) à l'échelle globale. Toutefois, pour la précipitation, ces études se sont toujours limitées aux latitudes tropicales à sub-polaire ( $\sim 60^\circ$ ) par manque de données fiables à plus hautes latitudes. Quelques données glaciologiques et certaines analyses météorologiques (c.f. section 3.1.) suggèrent une relation entre précipitation Antarctique et ENSO mais elles sont actuellement insuffisantes pour une démonstration convaincante. Le MCGA LMDZ, optimisé pour les régions polaires au LGGE et contraint par des conditions aux limites de température de surface d'océan et de couverture de glace de mer observées, reproduit une corrélation réaliste entre ENSO et précipitations en régions tropicales, mais ne suggère pas de corrélation significative à plus hautes latitudes. Toutefois, la faible contribution des conditions aux limites de surface océanique à la variabilité climatique (en particulier à la précipitation) Antarctique, que ce soit dans le modèle LMDZ ou dans d'autres modèles climatiques, a été montrée à plusieurs reprises. Ceci renforce l'idée (en particulier suggérée par Laurent Li au LMD) d'une téléconnexion essentiellement atmosphérique entre le Pacifique tropical et les hautes latitudes Sud. En corollaire, si le modèle LMDZ ne propage pas de signal d'ENSO dans les précipitations des hautes latitudes Sud, c'est peut être (en admettant que cette propagation existe) le signe qu'il ne reproduit pas cette téléconnexion avec tout à fait assez de sensibilité.

En effet, placé sous guidage latéral (c.f. 3.1. Notons à nouveau que le guidage latéral affecte la dynamique circumpolaire, mais en aucun cas directement l'hydrologie du modèle), le modèle LMDZ simule, sur la période 1988-1999, une variabilité de la précipitation Antarctique fortement corrélée à l'ENSO (figure 1.11). En fait, la corrélation est aussi significative de part et d'autre de la péninsule Antarctique que dans les régions tropicales, et plus significative que partout ailleurs, y compris dans l'hémisphère Nord. Les observations directes de la précipitation en Antarctique sont rares et très sujettes à caution. La télédétection satellitale des précipitations est également sujette à caution à hautes latitudes. Toutefois, les méthodes de télédétection récentes (TOVS sur les satellites polaires de la NASA, depuis fin 1987) confirment de fortes corrélations, précisément là où ces corrélations sont les plus fortes dans le modèle guidé (figure 1.10). Ces résultats, déjà présentés en conférence (i.e. GEWEX à Paris à l'automne), sont en cours d'interprétation.



**Figure 1.11 :** Corrélation entre l'indice d'oscillation Sud (ENSO) et les précipitations simulées dans le modèle guidé (en haut) et estimées par télédétection (Global Precipitation Climatology Project). Période : 1988-1999.

Une corrélation supérieure à 0.58 ou 0.71 est significative à plus de 95 ou 99% respectivement.

### 3.3. Bilan de masse Antarctique

#### 3.3.1. MESURES DE TERRAIN

(M. Fily, M. Gay, avec la collaboration de M. Pourchet et C. Vincent de l'équipe Glaciers)

Le bilan de masse de l'Antarctique et son évolution sont encore très mal connus et cela constitue une des incertitudes quant à la prévision de l'évolution du niveau des mers au siècle prochain. Les deux termes importants du bilan en Antarctique sont le taux d'accumulation de neige et la quantité de glace évacuée vers les océans, la fonte restant une composante négligeable.

L'objectif scientifique de notre programme de mesure sur le terrain est de contribuer à une meilleure évaluation du bilan de masse dans le secteur de l'Antarctique de l'Est compris entre Terra Nova Bay (TNB), Dôme C (DC) et Dumont d'Urville (DDU). Ce secteur est mal connu et fait l'objet d'un programme à long terme en collaboration avec les équipes italiennes de l'ENEA, programme qui comporte, entre autres, des mesures le long des 3 côtés du triangle TNB - DC - DDU. Ce travail rentre dans le cadre du programme international ITASE dont l'objectif est d'étudier l'évolution climatique et environnementale en Antarctique lors des 200 dernières années. Ces mesures permettent également de contrôler les modèles de circulation générale et de servir de données d'entrée pour les modèles d'évolution de la calotte de glace.

Lors des dernières années l'implication du LGGE s'est traduite par notre participation à plusieurs campagnes :

- TNB-DC: raid en 98-99 avec, entre autres, mesures d'accumulation et positionnement de balises pour détermination de la vitesse
- autour de Dôme C: à une échelle plus réduite de quelques dizaines de kilomètres tout un programme de mesure de vitesses et d'accumulation est également mené autour de la station par les italiens et les français. Nous avons en particulier effectué 12 forages de faible profondeur en 99-00.
- 2000-2001 : des carottages pour déterminer l'accumulation ont été effectués entre TNB et DC hors de la route des raids en utilisant un avion. Les résultats préliminaires sont très intéressants car ils montrent une accumulation plus faible que celle qui est donnée sur les cartes actuelles.
- DDU-TNB: raid prévu en 2000-2001 avec, entre autres, mesures d'accumulation et positionnement de balises pour détermination de la vitesse. Les mesures sur cet axe sont particulièrement importantes car, à cause de la plus forte accumulation, cette région intervient beaucoup dans le bilan de masse et que, par ailleurs, il existe un fort gradient spatial entre Dumont d'Urville et Terra Nova Bay.

Toutes ces données sont analysées en collaboration avec nos collègues de l'ENEA afin de proposer une nouvelle carte d'accumulation de neige et une estimation du bilan de masse dans ce secteur. La figure 1.12 illustre clairement la nécessité de renouveler les cartes existantes dans la région. La technique utilisée au LGGE est la mesure de la radioactivité le long d'un carottage afin de retrouver les horizons radioactifs correspondant aux tests nucléaires atmosphériques des années 1955 et 1965. C'est la méthode la plus fiable sur cette échelle de temps. Parallèlement les italiens déterminent l'accumulation à d'autres échelles de temps par analyse des signaux saisonniers ou des repères volcaniques. Tous les sites sont reliés par radar, ce qui permet l'étude de la variabilité spatiale. Des balises positionnées par GPS permettront, lors d'une revisite des sites par avion, de mesurer les vitesses et déformations de la calotte.

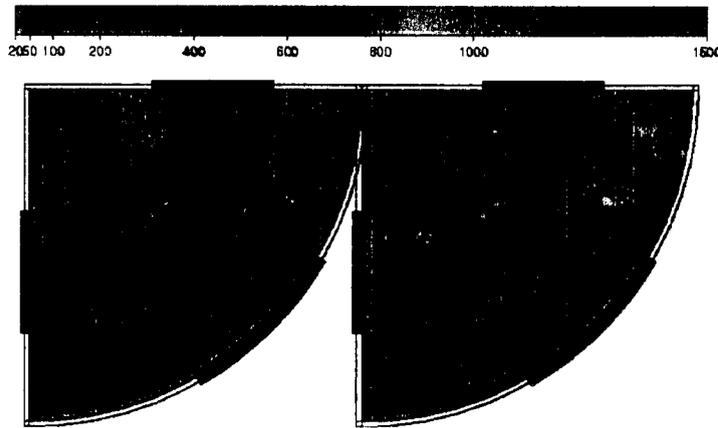


Figure 1.12. : Comparaison entre 2 cartes d'accumulation publiées et largement référencées dans la littérature (fonds de carte), et les mesures effectuées avec la collaboration du laboratoire (cercles), en particulier au cours du raid ITASE TNB-DC en 98-99 (unité : mm/an).

### 3.3.2 MODELISATION CLIMATIQUE

(C. Genthon, G. Krinner)

Dans le cadre de projets antérieurs (en particulier, le projet Européen HIRETYCS), une collection de résultats de modèles climatiques à haute résolution spatiale (~100 km) sur la région Antarctique a été construite. L'analyse de cette collection suggère que le bilan de masse de surface de l'Antarctique dans les modèles de climat est affecté par des biais systématiques, c'est à dire des erreurs similaires retrouvés avec plus ou moins d'intensité dans tous les modèles. Ces biais pourraient signaler des défauts systématiques dans la configuration ou la physique des modèles. Plusieurs hypothèses ont été testées, y compris l'influence de la résolution spatiale ou d'une prise en compte erronée de la topographie Antarctique, toutes deux rejetées. L'érosion de la neige par le vent, ignorée dans tous les modèles, est un candidat sérieux pour certains biais mais pas pour tous. Finalement, les cartes d'accumulation développées sur la base de données glaciologiques, y compris la plus récente (publiée en 1999), sont à nouveau prises en défaut (c.f. 3.2.1) : certains biais apparaissent clairement comme des erreurs dans ces cartes et non pas dans les modèles. Ces erreurs sont dues soit à des observations et/ou des critères de sélection des observations contestables, soit à une interpolation douteuse à travers des régions sous-échantillonnées (c.f. 3.2.1). Dans une publication récente [Genthon et Krinner, 2001], nous suggérons que, sans utiliser des résultats de modèle pour construire de telles cartes, une attention envers ces résultats pourrait signaler les régions dans lesquels un effort particulier d'analyse, de tri et d'interpolation des données disponibles est nécessaire.

Par ailleurs, nous avons récemment été sollicité pour contribuer, à la lumière de notre expérience de la simulation des bilans de masse des calottes polaires dans les modèles de climat et dans les analyses météorologiques, à la rédaction d'un ouvrage à paraître prochainement faisant le point sur le bilan de masse de la cryosphère globale [Greuell et Genthon, 2001].

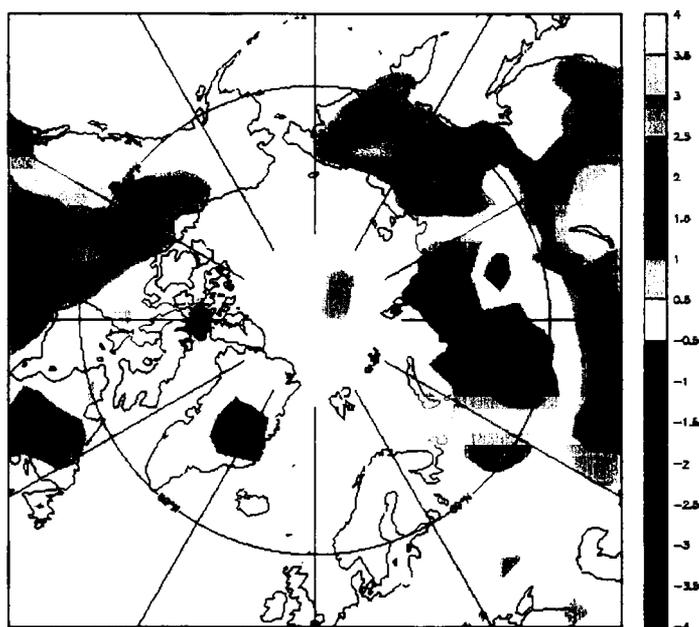
### 3.4. Interactions surface-atmosphère dans les hautes latitude Nord continentales

(G. Krinner, E. Poutou, C. Genthon)

Dans les régions continentales boréales, les interactions physiques entre surface et atmosphère sont fortement influencées par les caractéristiques de la surface. Outre le manteau neigeux ou la végétation boréale, ce sont aussi le gel du sol et la présence de vastes étendues de surfaces saturées en eau (marécages, lacs) qui déterminent les échanges entre surface et atmosphère. Le MCGA LMDZ a été modifié de façon à inclure des représentations physiques des effets liés au gel du sol et à la présence des lacs.

Les effets du gel du sol sont simulés en tenant compte du stockage et de la libération d'énergie lors du cycle gel/dégel. La capacité d'infiltration d'eau dans le sol est diminuée lorsque le sol est gelé. Dans ce cas, l'eau est stockée en surface (elle stagne) avant de ruisseler. La vitesse à laquelle ce stock d'eau en surface se vide par ruissellement dépend du relief (pente) et du type de sol. Si pendant le printemps la capacité d'infiltration augmente à cause du dégel, l'eau stockée en surface peut retourner dans le sol sans ruisseler. De cette manière, le modèle crée des surfaces saturées en eau (« wetlands ») typiques pour les zones boréales. Un problème non résolu pour l'instant est qu'en réalité, les « wetlands » ne sont que très rarement aussi grands qu'une maille du modèle atmosphérique. L'étendue saisonnière de ces terres immergées peut ainsi être surestimée, même si les données existantes sur l'étendue globale des « wetlands » sont contradictoires. Ces terres immergées sont une source importante de méthane, puissant gaz à effet de serre. Ainsi, ces travaux font partie d'une recherche sur les sources naturelles de méthane dans les hautes latitudes financée dans le cadre du programme ACI « Jeunes Chercheurs ». L'étendue simulée du pergélisol et d'autres aspects du gel du sol (par exemple, la profondeur de la couche active) ont été comparés aux données existantes ; les résultats sont satisfaisants. L'impact de ces modifications sur le climat simulé est majeur aux échelles saisonnières et régionales (figure 1.13).

Un modèle des processus thermiques des lacs a été développé au LGGE. Ce modèle simule explicitement tous les processus importants du point de vue du couplage entre la surface lacustre et l'atmosphère, c'est à dire tous les processus déterminant la température et le bilan d'eau en surface des lacs : conduction turbulente d'énergie, convection profonde, pénétration de rayonnement solaire, flux de surface turbulents d'énergie sensible et latente, gel/dégel du lac, bilan d'eau (ruissellement, précipitation, évaporation). Ce modèle a été couplé à LMDZ après avoir été validé en version « stand-alone » contre les données de couverture de glace et de températures de surface de lacs boréaux. Cette validation a montré que le modèle représente très correctement les durées annuelles d'englacement des lacs. L'impact des lacs sur le climat simulé est important surtout à l'échelle régionale. Un résultat quelque peu surprenant est qu'à cause d'importantes rétroactions impliquant l'eau atmosphérique (nuages, vapeur d'eau), la présence de lacs en été peut en fait mener à un réchauffement du climat local, plutôt qu'à un refroidissement. Un article sur le développement de ce modèle, sa validation et l'impact sur le climat présent est en cours de rédaction. Ce travail sera utilisé dans des simulations du climat futur et passé.



**Figure 1.13 :** Impact de la prise en compte du gel dans le sol sur les températures d'été simulées avec LMDZ (en °C).

### 3.5. Caractéristiques physiques de la neige en surface des calottes de glace

Les études sur les caractéristiques physiques du manteau neigeux se justifient par le fait que celui-ci est l'interface entre l'atmosphère et la calotte sous-jacente et, à ce titre, reflète et contrôle les échanges d'énergie et les transferts de masse entre ces deux milieux. Il contrôle les échanges radiatifs au travers de l'albédo ainsi que les conditions de piégeage de l'air et des composants chimiques dans la glace lors de son métamorphisme. Il reflète les processus d'accumulation de neige ainsi que les conditions météorologiques au travers de sa température et de sa structure. La télédétection de la surface des calottes polaires relève essentiellement de la télédétection de la neige en surface, c'est à dire des caractéristiques physiques de cette neige.

#### 3.5.1. CARACTERISATION DE LA NEIGE PAR TRAITEMENT D'IMAGES NUMERIQUES

(M. Gay, M. Fily, C. Genthon)

Que ce soit pour décrire le manteau neigeux ou pour comparer les résultats d'un modèle avec la réalité il est nécessaire de pouvoir décrire la neige d'une manière objective, c'est-à-dire indépendante de l'expérimentateur, ce qui n'est évidemment pas le cas lors d'une simple analyse visuelle. Lors du précédent rapport nous avons présenté les techniques utilisées basées sur le traitement d'images numériques. Les études ont été poursuivies tant pour la collecte des échantillons en Antarctique (raid Terra-Nova-Bay – Dôme C en 98-99, Dôme C en 99-00) que pour leur analyse. Tous les résultats ont été rassemblés dans un article soumis au Journal of Glaciology (Gay *et al.* [2001]). Hormis le fait que l'on a démontré que la technique utilisée était robuste et fiable, nous montrons quelques caractéristiques du manteau neigeux à savoir une grande homogénéité des grains de surface sur la plupart des sites sauf sur l'axe TNB-DC où l'on trouve des grains de grande taille associés à de très faibles accumulations. En profondeur les évolutions sont variées, montrant que seul un modèle de métamorphisme de la neige peut prendre en compte de manière réaliste l'évolution de la neige dans les premiers mètres.

#### 3.5.2. MODELISATION NUMERIQUE DU MANTEAU NEIGEUX POLAIRE

(C. Genthon, M. Fily)

A la faveur d'un précédent projet Européen (Polar Snow, coordonné au laboratoire), un modèle numérique de la structure et de la thermodynamique des neiges polaires avait été adapté du modèle CROCUS du Centre d'Etudes de la Neige de Grenoble. Ce modèle a été appliqué à la simulation du manteau neigeux en plusieurs sites du Groenland sélectionnés de façon à échantillonner des gradients spatiaux particulièrement fort d'émissivité micro-onde. Les champs d'émissivité ont été déduits de mesures satellitales de brillance. Les données météorologiques d'entrée du modèle de neige ont été extraites des analyses opérationnelles et des réanalyses (ERA15) du CEPMMT (c.f. 3.1). Dans les deux cas, une reconstruction des caractéristiques du manteau neigeux (taille des grains, densité, stratigraphie) a été produite, dont les variations spatiales sont au moins partiellement corrélées à celle de l'émissivité micro-onde : Il paraît donc possible de reproduire une structure du manteau neigeux compatible avec l'information de télédétection satellitale. Toutefois, seul un modèle de transfert de rayonnement micro-onde dans le manteau pourra quantifier physiquement cette relation.

Dans le détail, les deux météorologies (opérationnelle et ERA15) appliquées au modèle de neige ne produisent pas le même résultat. D'après le modèle, le manteau neigeux est donc suffisamment sensible pour que, à condition de disposer des données de terrain appropriées ou mieux, de pouvoir utiliser le signal satellital comme contrainte, il soit possible de discriminer entre deux jeux de données météorologiques de surface au niveau de qualité d'une analyse météorologique. Ces résultats sont publiés [Genthon *et al.*, 2001].

#### 3.5.3. TELEDETECTION DE LA SURFACE DES CALOTTES POLAIRES

(M. Fily, D. Six, J. P. Benoist, S. Alvain)

La télédétection est actuellement le seul moyen d'avoir une information globale et répétitive sur tout le continent Antarctique. Notre objectif est de déterminer des caractéristiques de surface de la calotte polaire qui ont un intérêt climatique. Dans le spectre solaire le paramètre le plus intéressant est l'albédo de la neige qui dépend, entre autres, du type de neige (taille des grains) et de la rugosité

(sastrugi). Suite aux travaux de modélisation de C. Leroux et à ceux de J. Mondet, nous nous sommes associés avec Neal Young pour établir une cartographie de la taille des grains en Antarctique. Pour ce faire nous utilisons la forte dépendance de la réflectance de la neige dans le moyen infrarouge avec la taille des grains. Les données utilisées sont celles du radiomètre ATSR de ERS2. Les méthodes de sélection des nuages et de calcul des tailles de grains ont été mises au point au LGGE. Plusieurs centaines d'images ont été utilisées qui donnent une image globale moyenne sur l'Antarctique ainsi que l'évolution temporelle de la taille des grains en fonction du temps après une chute de neige. Cette cartographie, en cours de publication, servira de base à une proposition de paramétrisation de l'albédo. Notre expertise dans ce domaine nous a amené à commencer à travailler sur un projet d'utilisation de Dôme Concordia comme site d'étalonnage des capteurs satellitaires. Bien que cette étude soit plutôt du domaine de la prospective à l'heure actuelle des travaux d'analyse des données de SPOT4/Végétation ont déjà été menés pour en déduire la réflectance bidirectionnelle de la neige ainsi qu'une étude du transfert atmosphérique à DC pour déduire la réflectance du sol à celle mesurée par le satellite.

### 3.6. Traceurs et chimie atmosphériques

(E. Cosme, C. Genthon, P. Martinerie, en collaboration avec B. Jourdain et M. Legrand de l'équipe Chimie)

Si l'IPSL est l'un des centres nationaux de développement et de distribution d'outils numériques pour l'étude du climat et de l'environnement, il convient de noter qu'un travail de pionnier a été dans le passé réalisé au LGGE sur la modélisation couplée de la circulation et de traceurs atmosphériques dans les modèles du LMD. Ainsi, encore récemment, nous avons participé et contribué par nos résultats à des expériences d'intercomparaisons de modèles de traceur dans le cadre du PRMC [Rasch et al., 2000], intercomparaisons actuellement utilisées pour vérifier et valider le modèle climat / traceur LMDZ-T développé autour de l'IPSL. Le module de traceur de ce modèle a en partie son origine dans les développements précédemment réalisés au LGGE, et nous participons aux groupes de réflexion sur l'évolution de LMDZ-T.

Au LGGE, le passage à la modélisation de la chimie atmosphérique dans un modèle de climat a constitué, au cours des deux dernières années, une évolution majeure de notre activité « traceurs ». A l'interface entre l'équipe Climat et l'équipe Chimie, et figurant comme l'une des « transversales » du laboratoire, l'étude du cycle du soufre dans les moyennes et hautes latitudes Sud s'affiche comme une extension naturelle de la modélisation du climat polaire et des traceurs. Dans ces latitudes, et en particulier près de l'Antarctique, le soufre est essentiellement d'origine naturelle marine : Cette étude vise donc la branche naturelle du soufre, ses composantes spatiales et temporelles, physiques et chimiques, et *in fine* sa sensibilité climatique et son potentiel de rétroaction sur le climat. Le laboratoire (équipe Chimie) entretient depuis plusieurs années un observatoire de la chimie atmosphérique à la station Antarctique côtière de Dumont d'Urville (DDU). Un observatoire similaire devrait être déployé à la future station intérieure de Dôme Concordia (DC). La collaboration avec le LSCE et avec d'autres instituts Européens donne accès à des données de soufre en différentes régions de l'Antarctique et à plus basses latitudes. Un jeu d'information approprié pour l'évaluation d'un modèle climat / chimie aux moyennes et hautes latitudes Sud existe donc ou est en projet. Le modèle contribue en retour à l'interprétation (signification et extrapolation spatiale, origine spatiale des espèces, contributions dynamiques à la variabilité...) de ces données.

Le module de chimie du soufre de LMDZ-T est celui développé au LOA (O. Boucher) et au SA (M. Pham). Au LGGE, des simulations pluriannuelles ont été réalisées avec « guidage latéral » de la circulation atmosphérique Antarctique (c.f. 3.1) pour limiter les biais circumpolaires du modèle de climat et pour reproduire une variabilité dynamique réaliste, et avec « zoom » Antarctique pour atteindre une résolution spatiale de l'ordre de ~100 km. Dans cette configuration, des résultats réalistes sont obtenus aux différentes stations Antarctique et de moyenne latitude, y compris à DDU (Figure 1.14). Deux problèmes sont cependant identifiés :

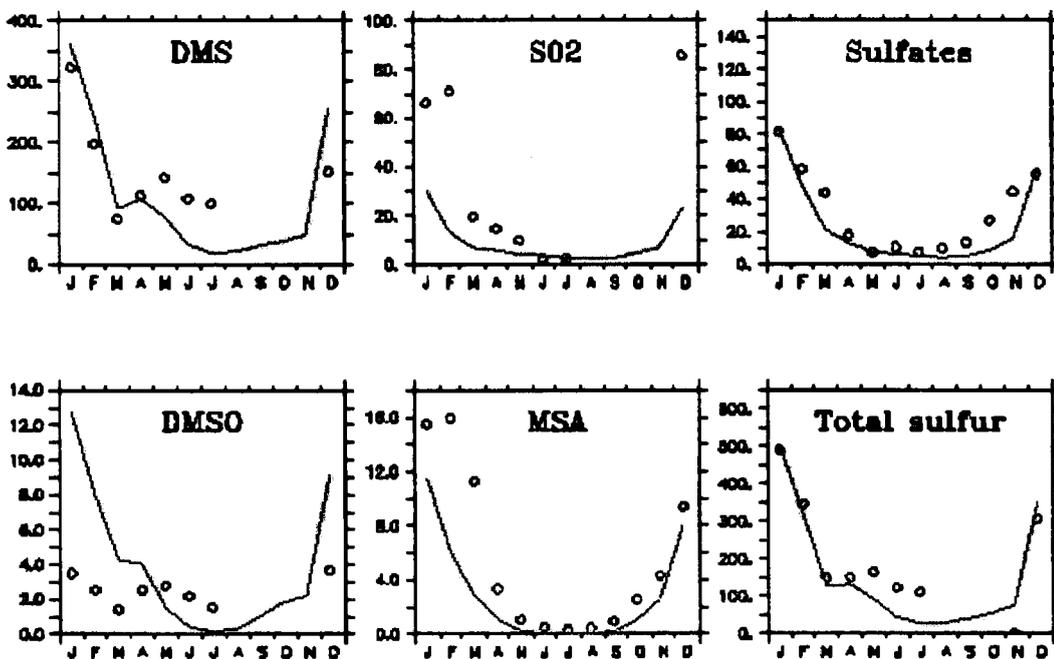
- La représentation des sources océaniques de DMS est insuffisante. Il s'agit d'une climatologie qui ne permet pas d'obtenir la variabilité intra et interannuelle observée aux stations de mesure. La modélisation a néanmoins pu mettre en évidence la sensibilité des concentrations mesurées à la source. Une première approche de modélisation des sources, ainsi qu'une

évaluation préliminaire du potentiel de la télédétection (SEAWIFS) pour prescrire ces sources, ont été mises en œuvre.

- Le DMSO (oxysulfure de diméthyle) est surestimé et le MSA (acide méthane-sulfonique) est corrélativement sous-estimé en Antarctique. Ceci suggère qu'une réaction d'oxydation par voie hétérogène du DMSO, espèce issue de l'oxydation du DMS et précurseur du MSA, est omise dans le modèle. Cette réaction n'a été que récemment identifiée, et à notre connaissance elle est ignoré dans tous les modèles.

L'échantillonnage temporel des mesures disponibles de SO<sub>2</sub> (dioxyde de soufre) est insuffisant pour établir des moyennes temporelles fiables. A cause de cette limitation, il n'est pas encore possible de conclure à un défaut du modèle pour cette espèce à DDU (figure 1.14). Le modèle prédit, pour toutes les espèces, une saisonnalité et en général une variabilité temporelle très différente à DC. Il prévoit par ailleurs que, à cause de la couche d'inversion sur le plateau, les différences entre la surface et l'atmosphère libre seront bien plus marquées qu'à DDU.

Ce travail est réalisé dans le cadre d'une thèse. Une publication est en cours de rédaction.



**Figure 1.14 :** Rapports de mélange (pptv) des principales espèces sulfurées à DDU. Les cercles symbolisent les observations en moyenne mensuelle, les courbes rouges les résultats du modèle. Pour les espèces gazeuses, les observations sont celles de la période déc. 1998 - juil. 1999 (données publiées).

#### 4. CLIMAT DU XXIÈME SIECLE AUX HAUTES LATITUDES

(E. Poutou, G. Krinner, Michel Sacchetti, C. Genthon)

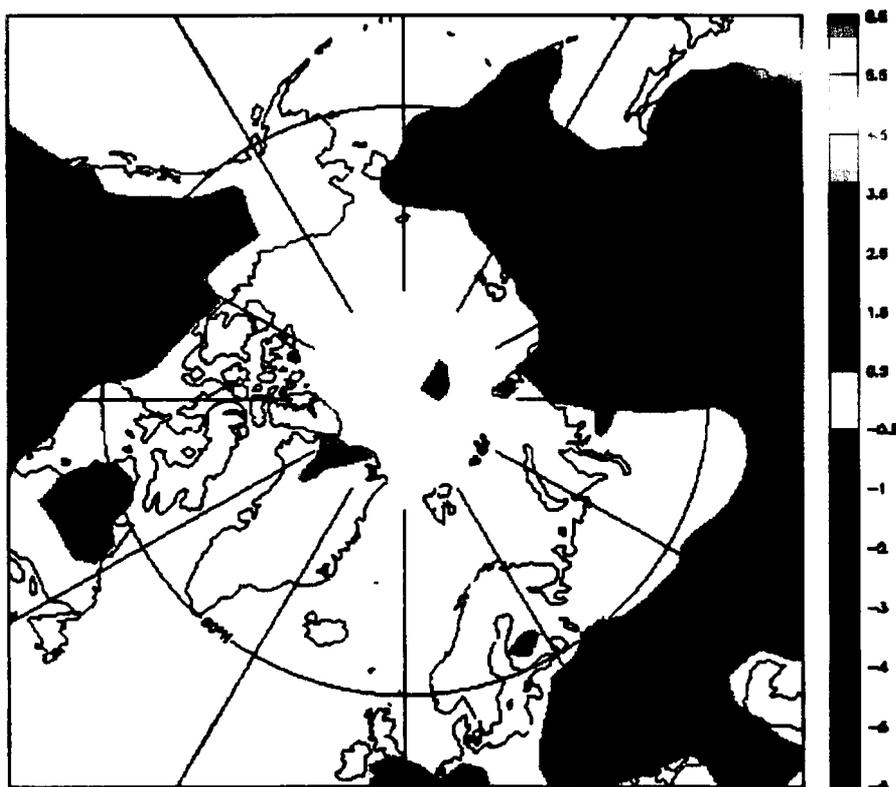
Une prospective en climat du XXIème siècle a été affichée pour la première fois au LGGE lors de notre dernière évaluation il y a 2 ans et demi. Cette activité a réellement démarrée avec l'arrivée effective de G. Krinner (début 2000) et finalement d'E. Poutou (doctorante, fin 2000) et M. Sacchetti (ingénieur, fin 2001) au laboratoire. Les résultats décrits sont donc récents et pour certains très préliminaires.

Le modèle LMDZ a été utilisé pour des prévisions climatiques du XXIème siècle. LMDZ étant un modèle atmosphérique, un travail préliminaire important pour les simulations de changements climatiques est la préparation des conditions aux limites océaniques. Il existe essentiellement deux

options, premièrement, l'utilisation directe des températures de surface océaniques calculées par des modèles couplés, et deuxièmement, une méthode indirecte, dite « des anomalies », qui consiste à utiliser des observations des conditions océaniques présentes et d'y ajouter un signal de changement climatique issu de simulations couplées. A priori, cette deuxième méthode est préférable, mais elle est compliquée dans les régions polaires par la présence de la glace de mer. Avec des méthodes simplistes du type « anomalie », des incohérences entre les changements de température de surface océanique et le changement de la couverture de glace de mer sont généralement inévitables à cause de la représentation imparfaite du climat présent par les modèles numériques. Pour cette raison, nous avons développée une méthode d'anomalies dont la caractéristique principale est de conserver le changement relatif de la surface totale de glace de mer simulé par les modèles de référence.

Néanmoins, pour des raisons pratiques, les premières applications de LMDZ aux études du climat futur au LGGE ont été effectuées en utilisant directement des conditions océaniques issues de modèles couplés (principalement ECHAM et HADCM). Ces applications sont :

- Une étude de l'impact du gel du sol sur le changement climatique futur. L'impact du gel du sol (c.f. 3.4.) sur le changement climatique futur a été étudié à l'aide de 4 simulations (2 pour le climat présent, 2 pour le futur, à chaque fois une sans et une avec prise en compte du gel dans le sol). Les résultats de cette étude indiquent entre autres que l'amplitude du changement climatique futur est importante, mais fortement variable selon les régions. Cet impact est principalement dû à des rétroactions impliquant l'hydrologie de surface. Par exemple, le réchauffement d'été prévu est fortement atténué dans les simulations prenant en compte le gel dans le sol, car ceci induit un réchauffement du climat présent à cause d'un assèchement du climat, tandis que cet effet est plus faible dans le futur. Le résultat est un réchauffement plus faible si le gel du sol est pris en compte. Cette étude est effectuée dans le cadre d'un travail de thèse. Un article sur les résultats est actuellement en cours de rédaction.



*Figure 1.15 : Impact de la prise en compte du gel du sol sur le changement de températures d'été (Juin-Juillet-Août, en °C). Des valeurs négatives indiquent que le gel du sol réduit l'amplitude du changement.*

- *Changement climatique en Antarctique et au Groenland et niveau des mers.* Une étude du changement climatique futur sur les calottes de glace a également été effectuée. On note, en particulier, une augmentation sensible de la profondeur de la dépression circumpolaire Antarctique et une augmentation du gradient méridien de pression. Associés à un réchauffement de l'atmosphère, ces changements dynamiques contribuent à une augmentation presque générale de la précipitation dans la région. Pour le Groenland, le modèle simule une augmentation significative de la fonte correspondant à une élévation du niveau des mers de 3 mm/an, mais ce chiffre est soumis à de fortes incertitudes à cause de l'imperfection de la simulation du climat groenlandais présent par le modèle. L'accumulation Antarctique, au contraire, augmente d'environ 10% avec le réchauffement. Il en résulte une baisse du niveau des océans, assez faible (-0.5 mm/an) mais constituant probablement le facteur de modération de l'élévation du niveau des mers le plus important dans l'avenir. Ces résultats sont préliminaires (résolution moyenne, simple doublement de CO<sub>2</sub>) et devront être affinés avant publication.

## **Chapitre 2**

**EQUIPE CHIMIE**

## EQUIPE « CHIMIE »

Responsable : Michel LEGRAND

### PRINCIPAUX AXES DE RECHERCHES

CHIMIE POLAIRE	CHIMIE « MOYENNES et BASSES LATITUDES »
<ul style="list-style-type: none"> <li>○ Archives glaciaires (cycles biogéochimiques)</li> <li>○ Etude des échanges air/neige (terrain et laboratoire)</li> <li>○ Etudes atmosphériques en région polaire</li> <li>○ Modélisation de chimie de l'atmosphère</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ Archives glaciaires (Alpes et Andes)</li> <li>○ Pollution locale et régionale</li> </ul>

### COMPOSITION DE L'EQUIPE

	CHIMIE POLAIRE	CHIMIE « MOYENNES et BASSES LATITUDES »
<b>Chercheurs</b>		
R. DELMAS (DR1)	X	X
F. DOMINE (DR2)	X	X
J.L. JAFFREZO (CR1)	X	X
M. LEGRAND (DR2)	X	X
P. MARTINERIE (CR1) (1/2)	X	
<b>Enseignants-chercheurs</b>		
S. HOUDIER (MC)	X	X
<b>Ingénieurs –chercheurs</b>		
M. DE ANGELIS (IR1)	X	X
<b>I.T.A.</b>		
P. SASSIN (temps partiel)	X	X
<b>Doctorants (en cours)</b>		
G. AYMOZ		X
A. CABANES	X	
L. LEGAGNEUX	X	
S. PERRIER	X	
H. BONNAVEIRA		X
F. FERRON	X	X
<b>Post-doc</b>		
S. PREUNKERT		X

### PUBLICATIONS (revues à Comité de lecture)

Fin 1999	2000	2001
2	7	18

### PRINCIPALES COLLABORATIONS

#### Nationales

- . Laboratoire de Météorologie Physique de Clermont Ferrand
- . Centre des Faibles Radioactivités (Gif-sur-Yvette)
- . Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement (CEA- Saclay)
- . LESA (Université de Savoie)
- . Groupe de Recherche sur l'Environnement et la Chimie Appliquée (GRECA) – UJF
- . Laboratoire des Ecoulements Géophysiques et Industriels (LEGI) – UJF

- . SIEGAD – UJF
- . Laboratoire d'Application de la Chimie à l'Environnement (LACE)
- . LPCE Orléans
- . Université Louis Pasteur, Strasbourg
- . IRD
- . LTPCM, Toulouse

#### Internationales

- . Department of Marine Sciences - University of Connecticut
- . Institut de Spectroscopie de Fluorescence atomique laser (Russie)
- . Paul Scherrer Institut (Villigen – Suisse)
- . Max Planck Gesellschaft zur Förderung der Wissenschaften, Munich
- . Universitaet Gesamthochschule Essen
- . Università degli Studi di Milano
- . Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik, Vienne
- . Universität Zürich, Department of Geopgraphy
- . Institut for Analytical Chemistry, Vienna University of Technology
- . Air Chemistry Group of the Hungarian Academy of Sciences
- . Max Plank Institut fuer Meteorologie
- . Alfred Wegener Institute
- . LEGAN, Mendoza, et Institut Antarctique Argentin
- . Laboratorio de Pesquisas Antarticas e Glaciologicas Instituto de Geociencias - UFRGS, Porto Alegre.
- . GEPA - Instituto de Fisica da USP - Dep. Fisica Aplicada, Sao Paulo.
- . Dip. Sanita' Pubblica e Chimica Analitica Ambientale Università di Firenze, Florence.
- . NIPR, Tokyo
- . Arctic and Antarctic Research Institute St. Petersburg.
- . Labor für Radio- und Umweltchemie, Université de Berne
- . University of Arizona Dept. of Hydrology & Water Resources, Tucson
- . University of California - Dpt. Chem & Biochemistry, San Diego.
- . British Antarctic Survey
- . Université de Heidelberg
- . University of Cambridge (UK)
- . University of York (UK)
- . Ecole Polytechnique Lausanne
- . Università di Milano Bicocca
- . Institut de Physique de Berne.
- . Universidade de Aveiro
- . Norwegian Meteorological Institute
- . Institut Botanique, Université Bohême
- . Geological & Nuclear Sci, Lower Hutt
- . EAWAG, Dübendorf

#### FINANCEMENT

	1999	2000	2001
<b>PROGRAMMES NATIONAUX</b>			
PNEDC			
PNCA			
<b>COMMISSION EUROPEENNE</b>			
Chemistry of the upper troposphere : laboratory studies of heterogeneous processes in ICE (CUT-ICE)			
Environmental and climatic record from high elevation (ALPCLIM)			
Present and retrospective state of organic versus inorganic aerosol over Europe : Implications for climate (CARBOSOL)			
European Project for Ice Coring in Antarctica (EPICA)			
<b>AUTRES CONTRATS</b>			
IFRTP-Production d'Oxydes d'Azote dans la neige en Arctique			
IFRTP-Source, caractéristiques et impact radiatif des aérosols aux hautes latitudes nord			
IFRTP-Atmosphère polaire			
IFRTP-European Arctic Aerosol Study			
IFRTP-Concordia			
IFRTP-Microphysique et chimie de la neige dans l'Arctique			
INERIS-Primequal			
REGION Rhône-Alpes-Pollution des vallées alpines			
Air des 2 Savoie			

## 1. OBJECTIFS SCIENTIFIQUES ET FIL CONDUCTEUR DE L'ACTIVITE

L'émergence successive de différents problèmes environnementaux (pluies acides, ozone stratosphérique, pollution photochimique, ou encore changement climatique) a montré que notre environnement est un milieu vulnérable et que les polluants qui y sont introduits ont des effets à l'échelle régionale comme à l'échelle globale.

Les régions polaires possèdent un avantage unique pour l'étude de notre environnement: les précipitations s'y accumulent et emmagasinent sur de longues périodes de temps nombre d'informations sur l'état de l'atmosphère existant à l'époque où elles se sont déposées. L'apparition du "trou d'ozone Antarctique" et du phénomène "d'Arctic Haze" démontrent bien la fragilité de l'équilibre de l'environnement, même dans des régions très éloignées des sources anthropiques. L'atmosphère de ces régions dites de "bruit de fond" (hautes latitudes ou encore sites glaciaires de haute altitude) étant en fait déjà largement perturbée par les activités humaines, l'étude de la glace qui s'y dépose représente le moyen unique pour remonter à la composition chimique de l'atmosphère de ces régions d'avant la période industrielle. Le décryptage de ces informations ouvre un champ d'investigations très large mais qui nécessite une bonne connaissance de la relation liant la composition chimique de la neige et celle de l'atmosphère au moment du dépôt (relation "air-neige"). Par ailleurs des études très récentes montrent que le manteau neigeux peut lui-même influencer de manière spectaculaire la chimie des basses couches de l'atmosphère de ces régions enneigées.

La relation "air-neige" et l'impact du manteau neigeux sur la chimie de la basse atmosphère sont des problèmes complexes, faisant intervenir de nombreux processus encore mal connus, gérant tant l'incorporation des impuretés (gaz et aérosols) dans la précipitation que les mécanismes prenant place dans le manteau neigeux après le dépôt. Pour aborder ces problèmes, les études menées au sein de l'équipe chimie du LGGE se sont développées suivant une double approche: identification des processus par les observations "terrain" et quantification en laboratoire des interactions gaz-glace.

L'étude des archives glaciaires pose également le problème de la représentativité spatiale des signaux observés qui concernent les aérosols et les gaz solubles dans l'eau, espèces dont le temps de vie atmosphérique varie de quelques jours à quelques semaines. Ces études nécessitent donc une bonne connaissance de la répartition géographique des différentes sources d'impuretés et des modes de transport atmosphérique vers le site étudié. Par exemple la déconvolution des signaux enregistrés dans les carottes extraites des régions centrales de l'Antarctique nécessite de caractériser la source d'impuretés que constitue l'océan Antarctique.

Depuis trois ans, l'activité du groupe peut se décliner autour des thèmes suivants:

- **Etude des archives glaciaires:** tout en restant mobilisés sur la glaciochimie polaire (carottes Antarctiques (Vostok et EPICA) et Groenlandaises (EUROCORE, GRIP)) notre effort a également porté sur l'étude des glaciers froids de moyennes et basses latitudes avec pour objectifs de reconstruire l'histoire de la pollution à l'échelle de l'Europe (carottes Alpines) ou encore la fréquence passée des événements ENSO (carottes Andines).
- **Etude de la relation "air-neige" et rôle du manteau neigeux sur la chimie de l'atmosphère:** Les études terrain ont pris place à travers des campagnes dans les nuages glacés au Puy de Dôme ainsi qu'à Alert et au Spitsberg. Initiée sur HCl et HNO<sub>3</sub>, l'étude en laboratoire des interactions entre gaz trace et le solide glace s'est étendue à d'autres composés clés comme l'acétone et autres composés carbonylés. Ces études portent sur la thermodynamique, la cinétique ainsi que l'adsorption de gaz sur une glace dont la physique (état de surface, surface spécifique) avait été préalablement caractérisée.

- **Etude de l'atmosphère actuelle:** Ces études ont pris place à Dumont d'Urville en zone côtière Antarctique (caractérisation des émissions biogéniques marines de l'océan Austral), en Finlande et à Summit (atmosphère du bassin Arctique) et plus récemment dans les zones fortement anthropisées des vallées Alpines (programme POVA).
- **Modélisation de la chimie de l'atmosphère:** Parmi les différents aspects nécessitant un appui de la modélisation, notre effort a porté ici sur le vieillissement des panaches de feux de forêts boréales (en relation avec les signaux enregistrés dans la glace du Groenland) et la modélisation du cycle du Soufre aux hautes latitudes de l'hémisphère Sud (en relation avec les études atmosphériques menées par le LGGE à Dumont d'Urville).

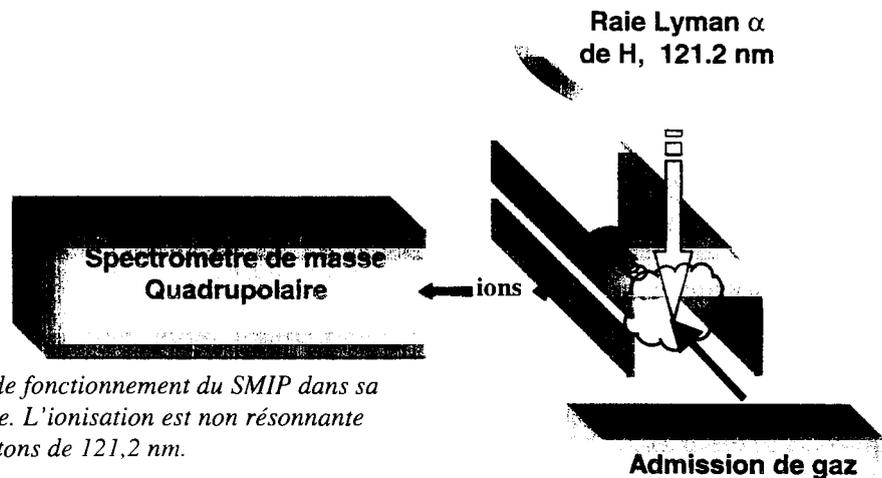
## 2. DEVELOPPEMENT DE L'ANALYSE DE NOUVEAUX TRACEURS:

Depuis 1980, la chromatographie ionique a été l'outil de base pour mener à bien l'étude des cycles biogéochimiques du Soufre, de l'Azote, et des Halogènes en régions polaires. L'évolution récente des problématiques scientifiques touchant à l'environnement a incité notre équipe à développer plusieurs outils nouveaux.

La mise au point de la mesure de la composition isotopique en  $^{34}\text{S}$  du sulfate [*Patris et al.*, 2000] nous a ainsi permis d'asseoir nos conclusions sur l'origine du sulfate (volcanique, biogénique ou anthropique) dans la glace Antarctique et Groenlandaise [*Patris et al.*, 2001].

L'étude des acides carboxyliques légers dans la glace du Groenland a montré que la précipitation polaire contient des informations sur certains composés organiques clés de la chimie de l'atmosphère passée. Ceci nous a incité à promouvoir l'étude d'autres composés organiques d'intérêt atmosphérique comme les aldéhydes et cétones. Une méthode de mesure par fluorescence du formaldéhyde, de l'acétaldéhyde, du benzaldéhyde et de l'acétone a été élaborée. Plus sensible que la méthode classique par détection UV utilisant la DNPH (dinitrophénylhydrazine) [*Houdier et al.*, 1999] elle permet leur mesure en phase aqueuse au niveau du  $\text{ng g}^{-1}$  [*Houdier et al.*, 2000]. L'étude d'autres paramètres organiques, en particulier la fraction organique de l'aérosol (fraction la moins bien documentée de l'aérosol vis à vis de son impact sur le bilan radiatif) est en cours à travers différentes collaborations nationales ou internationales (par exemple dans le cadre de POVA, paragraphe 1.5.3.).

Le besoin de techniques rapides et sensibles pour l'analyse de gaz traces nous a incités à développer un spectromètre de masse à ionisation photonique (SMIP). Le principe, décrit en Figure 2.1, consiste à ioniser un gaz par une radiation de longueur d'onde adéquate. Les ions formés sont sélectionnés selon leur masse par un filtre quadropolaire. Idéalement, la radiation doit être en résonance avec l'absorption des molécules analysées, ce qui nécessite l'utilisation d'un laser accordable. De tels lasers produisent des rayonnements d'énergie maximale vers 250 nm, alors que l'énergie d'ionisation de la plupart des molécules qui nous intéressent se situe vers 100-150 nm, ce qui imposera une ionisation à 2 photons. Dans un premier temps, nous avons utilisé la raie Lyman  $\alpha$  de H à 121 nm. Cette raie ionise efficacement les composés soufrés et a permis de commencer l'optimisation de notre appareillage en attendant l'obtention des financements pour un système laser.



**Figure 2.1.** Schéma de fonctionnement du SMIP dans sa configuration actuelle. L'ionisation est non résonnante et se fait par des photons de 121,2 nm.

L'optimisation de la source ionique a été commencée avec le méthyl mercaptan,  $\text{CH}_3\text{SH}$ . Le signal obtenu à la masse 48 lors de l'admission d'un mélange contenant 1.8 ppbv de  $\text{CH}_3\text{SH}$  indique une sensibilité de l'ordre d'environ 300 pptv pour un temps de mesure < 5 s. Les améliorations prévues, notamment l'installation d'une ionisation résonnante à 2 photons laissent présager une sensibilité au moins 100 fois meilleure pour de nombreux gaz.

### 3. LES ARCHIVES GLACIAIRES

Ces études trouvent leur motivation dans deux grands axes de recherche:

- le rôle des émissions anthropiques sur les cycles biogéochimiques,
- la relation "Cycles Biogéochimiques/Atmosphère/Climat".

#### 3.1. Les carottes de glace polaire

##### 3.1.1. EPICA

(*M. De Angelis*)

Dans le cadre du projet EPICA (European Project for Ice Coring in Antarctica) dont la 3<sup>ème</sup> phase débute, 6 laboratoires européens collaborent à l'analyse par chromatographie ionique de la carotte extraite au Dôme C (Antarctique central, 3233m d'altitude). Une lamelle de glace de 55 cm tous les 2.75 m est attribuée à chacun des 5 laboratoires. Cette coopération concerne les ions  $\text{F}^-$ , MSA,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Mg}^{++}$  et  $\text{Ca}^{++}$ . Elle doit permettre d'obtenir pour la 1<sup>ère</sup> fois en Antarctique et ce sur plusieurs cycles climatiques les profils continus à haute résolution de ces ions, puis, en les comparant aux données d'autres sites ayant des caractéristiques différentes (Vostok en Antarctique, GRIP, NGRIP et Renland au Groenland) de mieux comprendre les causes des variations observées en terme de source, de transport mais aussi de puits, cette dernière notion incluant notamment les effets post-déposition éventuels et leurs fluctuations dans le temps. Le LGGE est par contre seul en charge de la mesure des carboxylates ( $\text{CH}_3\text{COO}^-$ ,  $\text{HCOO}^-$  et  $\text{C}_2\text{O}_4^{2-}$ ). La carotte actuellement extraite a une longueur de 788 m et couvre les derniers 45 ka. L'intercomparaison de nos résultats (548 échantillons) avec ceux de nos partenaires ainsi que, pour certains ions ( $\text{Cl}^-$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{Ca}^{++}$ ), avec des mesures effectuées en continu sur le terrain s'est révélée satisfaisante.

Les changements de la fraction non marine de  $\text{Ca}^{++}$  (aérosol continental éolien), de  $\text{Na}^+$  (aérosol marin primaire) et du MSA (activité biogénique marine) sont en accord avec les résultats obtenus antérieurement sur la carotte de 905 m prélevée en 1978. Contrairement à l'apport éolien, l'apport marin primaire augmente pendant l'Antarctic Cold Reversal, ce qui pourrait s'expliquer par un climat plus humide sur la Patagonie à cette époque. Enfin, les fluctuations de  $\text{F}^-$  à la fin de la transition glaciaire/interglaciaire (pic atteignant 100 fois le bruit de fond) suggèrent que l'activité volcanique locale a pu être renforcée par l'isostasie.

L'étude des acides carboxyliques et de l'ammonium sur les carottes du Groenland avait montré que ces espèces sont très sensibles à la contamination gazeuse [Legrand and De Angelis, 1996]. Nous disposions initialement de 2 séries d'échantillons d'EPICA préparés pour les mesures communes aux 5 laboratoires: la première série (0 à 580 m) provenait de lamelles prélevées sur l'extérieur de la carotte stockées dans des gaines en polyéthylène et décontaminées mécaniquement, la deuxième (580 à 788 m) provenait de lamelles plus larges situées à l'intérieur de la carotte, au centre desquelles les échantillons étaient prélevés par fusion. Un examen critique des résultats a montré qu'aucun de ces échantillons ne convenait pour  $\text{CH}_3\text{COO}^-$ ,  $\text{HCOO}^-$ , et  $\text{NH}_4^+$  (contamination extérieure résiduelle, contamination gazeuse) et que seule la deuxième série était fiable pour  $\text{C}_2\text{O}_4^{2-}$  (qui n'est pas sensible à la contamination gazeuse). Nous avons donc préparé entre 0 et 580 m une troisième série de 100 échantillons (décontamination mécanique et découpe de lamelles stockées dans des feuilles d'aluminium suivies, pour chaque échantillon, de 3 rinçages). Nous avons ainsi obtenu, sur les derniers 29 ka, des profils fiables de  $\text{NH}_4^+$  et de  $\text{CH}_3\text{COO}^-$  où les concentrations varient de quelques dixièmes de ppb (Holocène) à 1 ou 2 ppb (LGM),  $\text{HCOO}^-$  étant en limite de sensibilité (~ 0.2 ppb) et ne montrant pas de tendance significative. Contrairement à ce qui a été observé au Groenland,  $\text{CH}_3\text{COO}^-$  et  $\text{NH}_4^+$  augmentent en période glaciaire et sont significativement corrélés à  $\text{Na}^+$  ( $r = 0.68$ ), suggérant une source essentiellement océanique pour l'acétate. Nous devons améliorer notre seuil de sensibilité pour  $\text{HCOO}^-$  afin de confirmer ou d'infirmer l'absence de tendance glaciaire/interglaciaire. Les teneurs en  $\text{C}_2\text{O}_4^{2-}$  sur les derniers 45 ka augmentent en période froide et suivent celles de  $\text{NO}_3^-$ , la corrélation étant particulièrement remarquable sur les derniers 29 ka ( $r = .93$ ). La seule origine potentielle de  $\text{C}_2\text{O}_4^{2-}$  évoquée jusqu'à présent pour l'Antarctique (région côtière) était la production locale ornithogénique [Legrand et al., 1998]. La corrélation avec  $\text{NO}_3^-$  suggère l'existence ici d'une source continentale et/ou d'un piégeage de cette espèce sur l'aérosol continental.

### 3.1.2. VOSTOK

(*M. de Angelis, collaboration avec les équipes "Climat" et "Rhéologie"*)

Nos études récentes de la carotte de Vostok se sont focalisées sur la partie basse de la carotte. De la surface à 3310 m de profondeur, l'enregistrement n'est pas perturbé et couvre les derniers 420 000 ans. De 3263 à 3538 m (profondeur finale du forage) on observe de la glace accrétée formée par regel de l'eau du lac sous-glaciaire. Entre ces 2 types de glace, on trouve de la glace de glacier remaniée par des phénomènes dynamiques, comme en témoigne la présence de couches inclinées de cendres volcaniques.

L'étude des ions majeurs, microparticules (concentration et distribution en taille) et isotopes stables dans la glace perturbée a permis de distinguer 2 zones:

- De 3350 à 3450 m de profondeur, les concentrations en ions majeurs et microparticules ont des valeurs intermédiaires entre celles observées en période interglaciaire et durant les extrema glaciaires. Il a été possible de mettre en évidence, à l'intérieur de ce premier niveau, une alternance de sous couches semblant correspondre à des climats plus ou moins froids, ce qui pourrait être la trace d'un 5<sup>ème</sup> cycle glaciaire,
- De 3450 à 3538 m, on trouve de grosses particules, atteignant parfois 30 $\mu\text{m}$ , qui proviennent du socle rocheux. La texture de cette glace et sa fabrique suggèrent qu'elle correspond à une zone de cisaillement et que les particules ont pu être entraînées sur des épaisseur atteignant 90 m lorsque le glacier frottait sur le socle en amont du lac.

L'analyse par chromatographie la partie de la carotte comprise entre 3538 et 3611 m de profondeur, composée de gros cristaux de glace d'accrétion pouvant atteindre plusieurs dizaines de cm indique une composition complètement différente de celle de la glace de glacier: certaines teneurs s'effondrent ( $\text{NO}_3^-$  et MSA), d'autres augmentent de façon très importante. Les teneurs de  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Ca}^{++}$ ,  $\text{Mg}^{++}$  qui étaient en moyenne de 145, 65, 40, 10 et 7 ppb dans la glace de glacier, atteignent dans cette glace d'accrétion, plusieurs centaines de ppb, voire plusieurs ppm. Deux niveaux, épais de quelques mètres et centrés autour de 3540 m et 3590 m, ainsi que la glace située au dessous de 3609 m ont des concentrations extrêmement faibles (total des ions de l'ordre de quelques dizaines de ppb, soit 10 fois plus faible que dans la glace de glacier) et correspondent vraisemblablement à de la glace de regel « pure », c'est à dire composée de frazil consolidé par l'eau du lac. Partout ailleurs la teneur

totale en ions reste 5 à 50 fois supérieure à ce qu'on observe dans la glace de glacier, les impuretés solubles étant essentiellement constituées de NaCl, CaSO<sub>4</sub> ou MgSO<sub>4</sub> avec des traces importantes de fluor. Cette signature, très différente de celle de la glace de glacier ayant ou non frotté sur un socle granitique, suggère l'existence d'un sol de type évaporitique au voisinage du lac sous-glaciaire, ainsi que la présence, en amont du lac principal, de lacs de petite profondeur, l'alternance couche de glace pure/couche chargée provenant du passage successif du glacier au dessus de surfaces liquides et de dépôts évaporitiques.

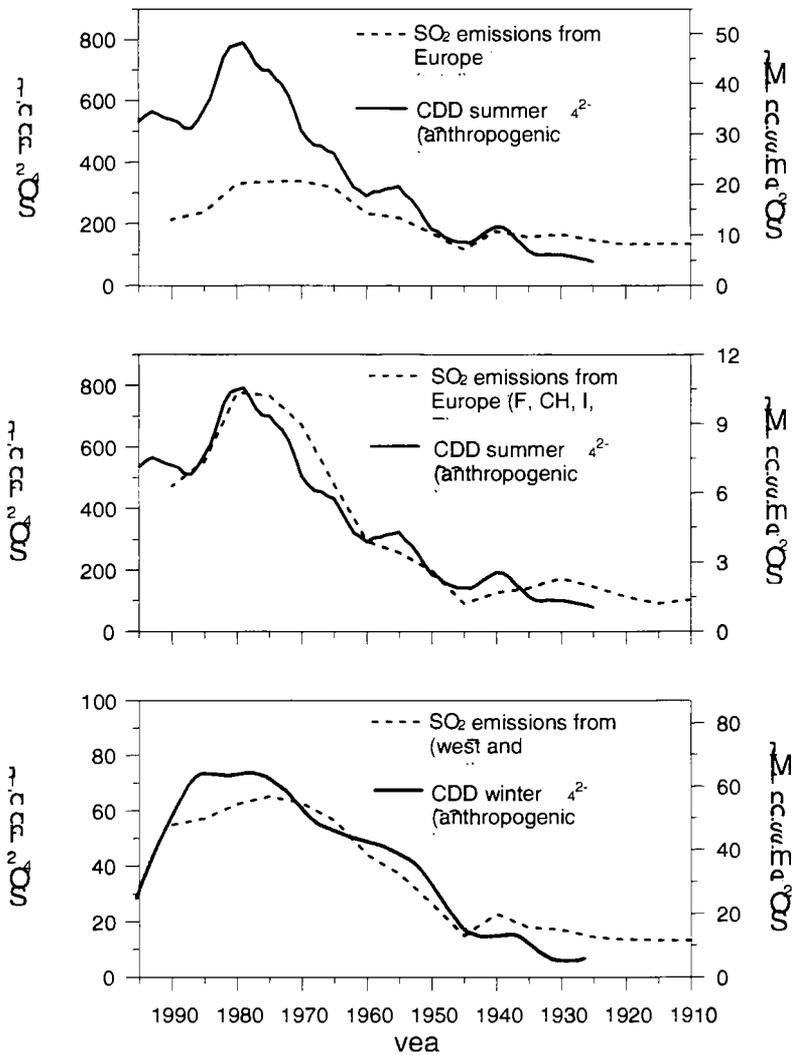
### 3.2. Les carottes Alpines

(M. Legrand, S. Preunkert)

L'étude des archives glaciaires couvrant les 200 dernières années dans l'hémisphère Nord trouve sa motivation dans notre connaissance encore insuffisante des inventaires d'émissions anthropiques et de leurs impacts sur la capacité oxydante de l'atmosphère et le forçage climatique par l'aérosol atmosphérique. L'étude des carottes du Groenland a montré que les régions de hautes latitudes Nord sont depuis plusieurs décennies perturbées par les émissions anthropiques de SO<sub>2</sub>, l'examen approfondi de ces enregistrements montrant que les USA et l'Europe avaient contribué à ce changement. Les enregistrements de sulfate au Groenland peuvent donc permettre de contraindre l'évolution passée des émissions de SO<sub>2</sub> de ces 2 pays, moyennant une bonne simulation du transport atmosphérique vers ces régions de hautes latitudes. Malheureusement, à l'heure actuelle, les modèles de transport ne reproduisent qu'imparfaitement le transport des polluants vers les hautes latitudes Nord. Ceci motive l'étude d'archives glaciaires extraites de sites plus intimement liés aux sources d'émissions.

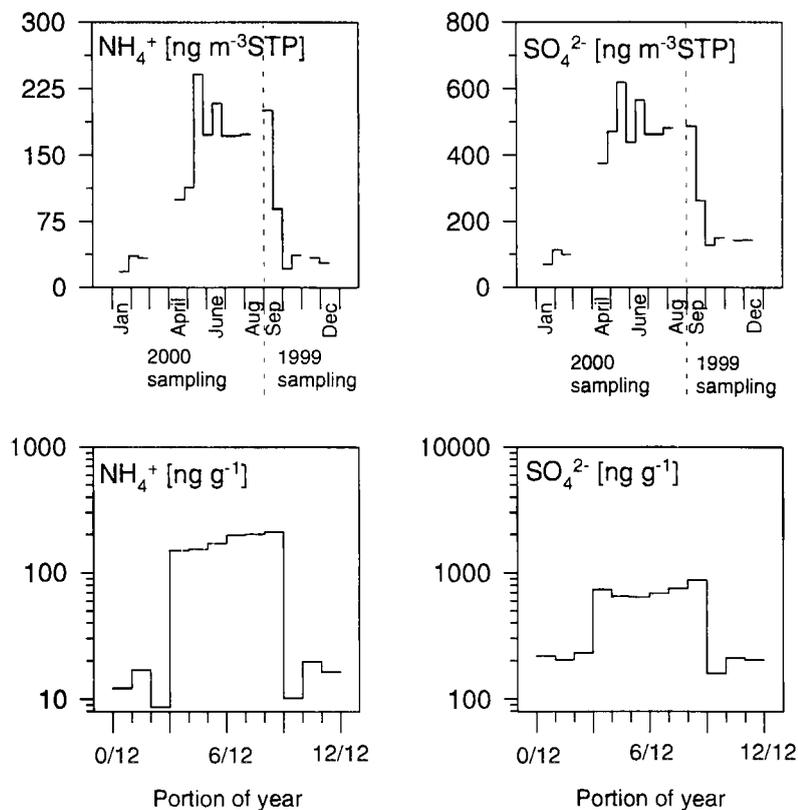
L'Europe de l'Ouest et le Nord Est des USA sont les 2 régions de l'hémisphère Nord où l'impact des aérosols soufrés sur le climat est le plus important. Une des incertitudes majeures dans l'évaluation de ce forçage reste, pour le cas des sulfates, leur distribution spatiale. Les données n'étant pas suffisantes pour évaluer le forçage radiatif, celui-ci est estimé à partir de distributions de sulfate simulées par des modèles de chimie-transport. L'intercomparaison des modèles les plus récents montre encore des divergences d'un facteur 2 à 3 sur les distributions simulées. Ceci motive l'examen du potentiel que représente la glace des Alpes. Avec pour objectif général la reconstitution de l'histoire de la pollution en Azote, Soufre, et Halogènes à l'échelle de l'Europe au cours des 200 dernières années, un travail a été réalisé dans le cadre du projet Européen ALPCLIM (1998-2001).

Avec une accumulation annuelle de neige de plus de 2 m d'eau, le site du Col du Dôme (CDD) permet l'examen saisonnier de la chimie de la précipitation à plus de 4000 m d'altitude en Europe et ce au moins sur les 75 dernières années [Preunkert, et al., 2000]. L'augmentation des teneurs estivales en sulfate (un facteur 10 entre la période préindustrielle et les années 80, Figure 2.2) est très bien corrélée aux émissions passées de SO<sub>2</sub> d'une partie de l'Europe de l'Ouest (700-1000 km autour des Alpes dont la France, l'Italie, l'Espagne et la Suisse) en liaison avec la convection depuis la couche limite vers la troposphère libre à cette saison. L'étude des couches d'hiver (Figure 2) montre par contre une pollution plus modérée (un facteur 4 entre la période préindustrielle et maintenant) de la troposphère libre mais prenant place à une plus grande échelle (Europe de l'Ouest, Europe de l'Est et ex. URSS) [Preunkert et al., 2001a]. En utilisant les observations atmosphériques mises en place depuis 2 ans à l'Observatoire Vallot (Figure 2.3), nous avons pu inverser ces données « glace » en concentrations atmosphériques de sulfate à 4000 m au dessus de l'Europe. Ces données indiquent une surestimation d'un facteur 2 environ des teneurs simulées pour cette altitude par les modèles globaux alors que ces mêmes modèles tendent à sous-estimer les concentrations en surface. Associées aux mesures de sulfate obtenues dans les stations EMEP situées autour des Alpes à plus basse altitude, ces données représentent une contrainte forte pour la distribution verticale du sulfate simulée par les modèles et par là même pour l'évaluation du forçage radiatif et son évolution passée au dessus de l'Europe depuis le début du 20<sup>ième</sup> siècle [Preunkert et al., 2001a].



**Figure 2.2.** Evolution des teneurs en sulfate (été en rouge, hiver en bleu) comparées aux inventaires d'émissions anthropiques de  $\text{SO}_2$  (en tireté) pour différentes régions sources en Europe. Adapté de Preunkert, Legrand and Wagenbach [JGR, in press, 2001a].

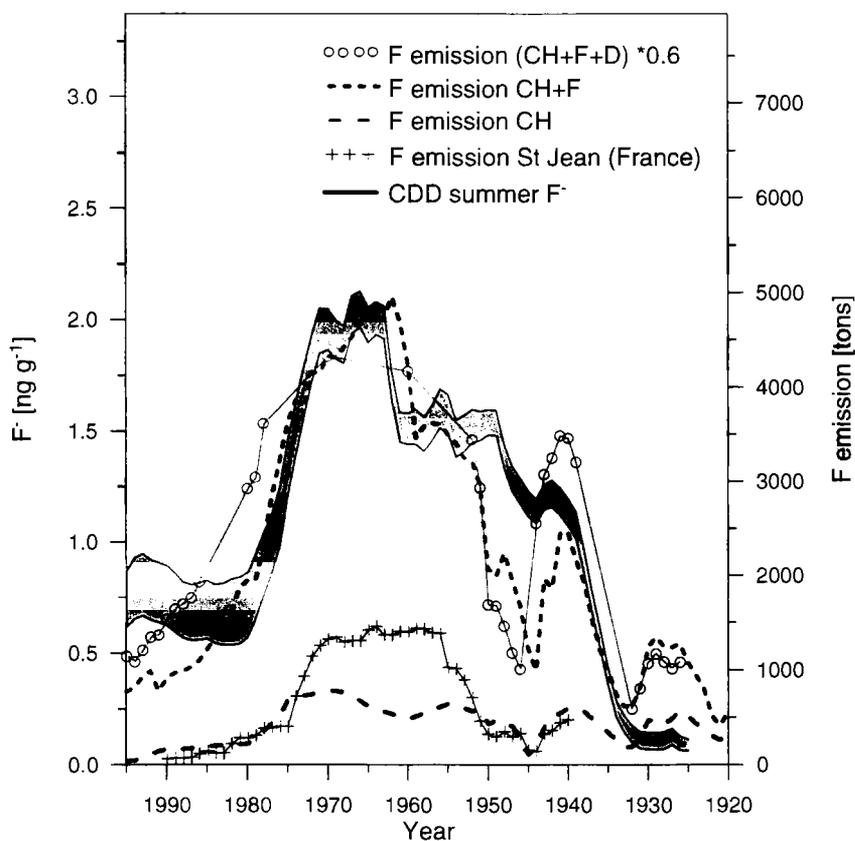
Avec une accumulation annuelle de neige de plus de 2 m d'eau, le site du Col du Dôme (CDD) permet l'examen saisonnier de la chimie de la précipitation à plus de 4000 m d'altitude en Europe et ce au moins sur les 75 dernières années [Preunkert, et al., 2000]. L'augmentation des teneurs estivales en sulfate (un facteur 10 entre la période préindustrielle et les années 80, Figure 2.2) est très bien corrélée aux émissions passées de  $\text{SO}_2$  d'une partie de l'Europe de l'Ouest (700-1000 km autour des Alpes dont la France, l'Italie, l'Espagne et la Suisse) en liaison avec la convection depuis la couche limite vers la troposphère libre à cette saison. L'étude des couches d'hiver (Figure 2.2) montre par contre une pollution plus modérée (un facteur 4 entre la période préindustrielle et maintenant) de la troposphère libre mais prenant place à une plus grande échelle (Europe de l'Ouest, Europe de l'Est et ex. URSS) [Preunkert et al., 2001a]. En utilisant les observations atmosphériques mises en place depuis 2 ans à l'Observatoire Vallot (Figure 2.3), nous avons pu inverser ces données « glace » en concentrations atmosphériques de sulfate à 4000 m au dessus de l'Europe. Ces données indiquent une surestimation d'un facteur 2 environ des teneurs simulées pour cette altitude par les modèles globaux alors que ces mêmes modèles tendent à sous-estimer les concentrations en surface. Associées aux mesures de sulfate obtenues dans les stations EMEP situées autour des Alpes à plus basse altitude, ces données représentent une contrainte forte pour la distribution verticale du sulfate simulée par les modèles et par là même pour l'évaluation du forçage radiatif et son évolution passée au dessus de l'Europe depuis le début du 20<sup>ième</sup> siècle [Preunkert et al., 2001a].



**Figure 2.3.** Evolution saisonnière des teneurs atmosphériques en  $\text{SO}_4^{2-}$  et  $\text{NH}_4^+$  à l'Observatoire Vallot (4450 m) à l'aide d'un collecteur automatique d'aérosol fonctionnant sur panneaux solaires et dans les couches de neige déposées au CDD durant la période correspondante. Adapté de Preunkert, Wagenbach, and Legrand [Atmos. Environ., in press, 2001b].

Ces études montrent par ailleurs que les teneurs en fluor ont très rapidement augmenté dans les années 30, passant par un maximum vers 1970, pour redescendre nettement entre 1975 et 1980 (Figure 2.4). La tendance est donc ici très différente de celle du sulfate qui commence à augmenter de manière importante après guerre. Ceci met en évidence une composante anthropique qui contrairement à ce que nous avons vu au Groenland n'est pas liée à la combustion du charbon [De Angelis and Legrand, 1994]. Nous avons pu attribuer cette tendance dans les Alpes aux rejets de fluor liés au développement de l'industrie de l'aluminium (électrolyse fondue de l'alumine utilisant la cryolite) [Preunkert et al., 2001c]. La forte décroissance dans les années 70 des teneurs en fluor de la glace du Mont Blanc correspond à la mise en place par Pechiney de capots d'alumine au dessus des cuves d'électrolyse (Figure 2.4). Notons que cette étude qui nous a permis de mieux cerner le budget mal connu de cette espèce montre également que les émissions locales en provenance des vallées alpines ne sont pas seules à l'origine des dépôts au dessus de 4000 m comme en témoigne l'évolution différente des émissions de fluor de l'usine voisine (~ 40 km) de Saint Jean de Maurienne (Figure 2.4).

Ce type d'étude a également été effectué sur d'autres espèces dont le budget atmosphérique reste mal cerné à l'échelle de l'Europe. Ainsi l'augmentation des teneurs en HCl que nous avons mise en évidence dans la glace du Mont Blanc est principalement due aux émissions par les incinérateurs et dans une moindre mesure à la combustion du charbon en Europe de l'Ouest [Legrand et al., 2001]. Enfin l'absence observée d'évolution des teneurs en oxalate suggère que les émissions biogéniques dominent encore actuellement le budget de cette espèce en régions continentales fortement anthropisées. Ceci nous amène à nous interroger sur l'évolution passée de l'aérosol organique, un autre acteur important (avec le sulfate) du forçage du climat par l'aérosol.



**Figure 2. 4.** Tendances récentes du fluor dans la neige déposée au Mt Blanc depuis 1925 (enveloppe en gris). Les teneurs qui furent très importantes de 1940 à 1970 coïncident avec les émissions de fluor de l'industrie de l'Aluminium, principalement de France et de Suisse. Adapté de Preunkert, Legrand, and Wagenbach [JGR, 2001c].

### 3.3. Les carottes Andines

(R. Delmas, M. De Angelis, A. Correia, J. Simoes)

Grâce aux carottes de glace du Groenland et de l'Antarctique, on commence à avoir une idée assez précise de la variabilité du système environnemental aux hautes latitudes. Mais qu'en est-il des zones tropicales, là où les travaux les plus récents montrent que la variabilité du climat a été grande durant l'Holocène? Les enregistrements paléoclimatiques disponibles dans ces régions sont peu nombreux. Nous avons donc tenté l'aventure andine, en espérant qu'une meilleure connaissance des paléoenvironnements de l'Amérique du Sud rejaillirait sur notre capacité à interpréter les carottes antarctiques. Cet espoir est logique si on se réfère aux études antarctiques montrant que certaines impuretés de la neige ont des sources sud-américaines. Mais d'autres raisons nous ont aussi incités à nous engager dans cette aventure et à créer des liens entre l'équipe des glaciologues de l'IRD et le LGGE:

- Les glaciers tropicaux sont en régression rapide et les enregistrements climatiques constitués depuis des millénaires sont en train de disparaître définitivement. Les glaciologues ont le devoir de récupérer ces enregistrements avant qu'il ne soit trop tard.
- L'extension des compétences du LGGE aux glaciers tropicaux, via l'équipe IRD, doit à terme permettre de conforter les activités de type "les glaciers observatoires du climat global" que le LGGE propose au niveau national.
- Enfin, d'une façon générale, il est urgent de soutenir la formation de scientifiques dans les **pays en voie de développement**. Ces activités en Amérique Latine permettront de former des jeunes sud-américains à la problématique du changement global sur leur continent.

Dans la mesure où le LSCE prenait en charge les analyses isotopiques, une action nationale sur les carottes de glace andines, reposant sur le savoir-faire IRD en matière de logistique, devenait viable. Il faut rappeler que les carottes récupérées par l'équipe américaine spécialiste de ce type d'études avaient

été transportées dans des conditions ne permettant pas des analyses chimiques satisfaisantes (les carottes étaient passées par 0°C pendant leur transport). Une fois ce problème crucial résolu, on pouvait penser que notre "consortium national", en étroite collaboration avec un groupe de glaciologues suisses particulièrement expérimentés, avait toutes les chances de réussir.

Plusieurs carottages de très haute altitude (>6000m) ont été récemment réussis par l'IRD en Bolivie (Sajama, Illimani) et en Equateur (Chimborazo). Le programme analytique (A. Correia, J. Simoes, M. De Angelis, JR Petit et R. Delmas au LGGE ainsi que les chercheurs de l'IRD) est actuellement en cours sur la carotte Illimani et les résultats ne sont encore que fragmentaires. Seule l'analyse isotopique couvre l'intégralité de la carotte (mesures LSCE). Il semble qu'au fond du forage la dernière période glaciaire soit atteinte. En chimie, les 100 premiers mètres ont été échantillonnés en détail (744 échantillons sur les 50 premiers mètres) et analysés en 20 éléments par ICP-MS (à Toulouse), en ions majeurs par chromatographie ionique (M. de Angelis) et en espèces insolubles (J. Simoes, JR Petit). La variabilité saisonnière est remarquable. Par conductivité électrique, les éruptions volcaniques majeures des derniers siècles ont été repérées, ce qui permet de dater la carotte bien mieux qu'on ne l'espérait. Nous sélectionnerons parmi les éléments déterminés par ICP-MS ceux qui nous permettront de détecter une contribution des feux de biomasse d'Amazonie d'une part, les fluctuations de type El Nino (si possible) d'autre part. Une modélisation atmosphérique est programmée pour 2002 dans le cadre d'une thèse au MPI Hambourg.

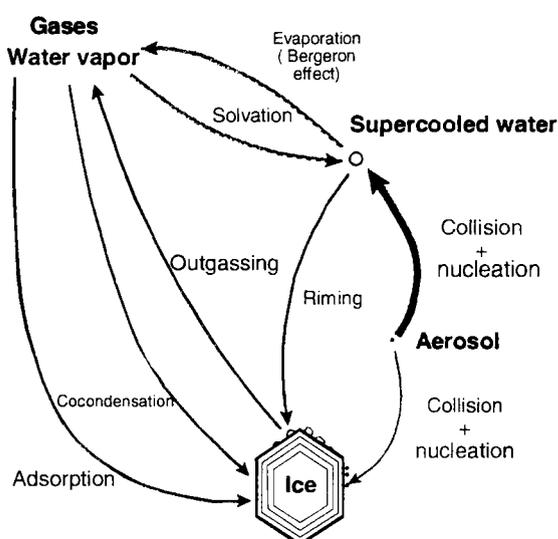
Ces recherches intensives et convergentes dans le domaine de la glaciochimie andine devraient nous permettre de confirmer l'intérêt de ce type d'étude pour les régions non polaires. Actuellement, seul l'Américain L. Thompson s'est attelé avec succès à cette tâche.

#### 4. RELATION "AIR-NEIGE" ET IMPACT DU MANTEAU NEIGEUX SUR LA CHIMIE DE L'ATMOSPHERE

##### 4.1 Etude des nuages glacés au Puy de Dôme

(*M. Legrand, D. Voisin, S. Preunkert*)

Les études antérieurement menées au Groenland n'ont pas permis d'aborder complètement le problème de l'incorporation des impuretés dans la glace du fait de l'existence de gradients verticaux de concentrations d'une part, de l'absence d'étude microphysique des précipitations d'autre part.



**Figure 2.5.** Processus clés régissant l'incorporation des gaz dans la phase solide et liquide des nuages mixtes. Adapté de Voisin, Legrand, and Chaumerliac [JGR, 2000].

Le Puy de Dôme, site bien équipé pour documenter la microphysique du nuage, permet, en conditions hivernales, d'étudier les processus d'incorporation des impuretés dans les nuages mixtes constitués de gouttelettes d'eau surfondue et de cristaux de glace. En collaboration avec le LaMP, nous y avons mené plusieurs campagnes de mesures. Les mesures réalisées dans l'air interstitiel, les gouttelettes surfondues et les flocons de neige nous ont permis d'examiner les phénomènes clés régissant l'incorporation des impuretés dans le flocon de neige (Figure 2.5).

Pour les gaz, l'incorporation dans le flocon se fait par le givrage mais aussi par incorporation cinétique de gaz durant la croissance du cristal par effet Bergeron (phénomène de co-condensation). Nous avons montré que, durant le givrage, tandis que les espèces fortement solubles comme  $\text{HNO}_3$  sont bien retenues dans les gouttelettes d'eau gelées, d'autres gaz comme le  $\text{SO}_2$  et l'acide acétique sont au contraire partiellement ré-émis dans la phase gazeuse. Enfin, si les espèces très solubles sont majoritairement incorporées dans le flocon via le givrage, l'incorporation de gaz par co-condensation durant la croissance du cristal devient importante pour les espèces moins solubles comme les acides carboxyliques qui restent présent à des concentrations relativement élevées en phase gazeuse. Au delà de son apport pour la compréhension de la relation "air-neige", cette étude de la chimie des différentes phases du nuage, associée à des études microphysiques permet de mieux cerner le rôle joué par la glace dans les nuages mixtes et plus généralement la manière avec laquelle les espèces clés de la troposphère vont être redistribuées par ce type de nuages [Voisin *et al.*, 2000].

Pour les aérosols, l'essentiel de l'incorporation dans le flocon se fait par collision avec les gouttelettes d'eau surfondue (le givrage) ayant initialement nucléé sur les aérosols (Figure 2.5). Au cours de la campagne réalisée en Février 2001, nous avons étudié le comportement de l'aérosol dans le nuage en fonction de sa composition chimique (fraction minérale, carbone organique, carbone suie, etc) et de sa taille. Ces résultats montrent que l'incorporation de la fraction submicronique de l'aérosol dans les hydrométéores est nettement plus faible pour l'aérosol organique que pour les fractions minérales comme le sulfate (K. Sellegri, P. Laj, R. Dupuy, M. Legrand, S. Preunkert, JP. Putaud, and H. Cachier, *Size-dependent scavenging efficiencies of multi-component atmospheric aerosols in clouds, en préparation pour le JGR*).

#### 2.4.2. Impact du manteau neigeux sur la chimie de l'atmosphère

(F. Dominé, S. Houdier, S. Perrier, L. Legagneux, A. Cabanes)

La chimie de la troposphère en zone polaire reste très mal comprise. Par exemple, les modèles de chimie atmosphérique sont incapables de reproduire les concentrations de formaldéhyde ( $\text{HCHO}$ ) ou d'oxyde d'azote  $\text{NO}_x$  ( $\text{NO} + \text{NO}_2$ ) mesurées en Antarctique et au Groenland. D'autres indices de phénomènes inhabituels incluent la destruction totale de l'ozone au niveau du sol, et ce sur une épaisseur allant jusqu'à 1000 m (Figure 2. 6).

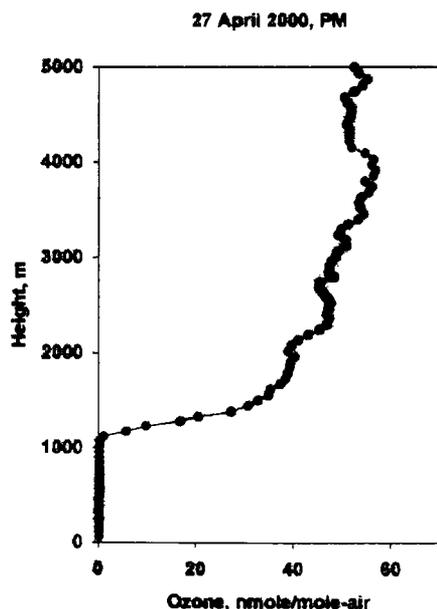


Figure 2.6. Profil vertical d'ozone lors d'un épisode de destruction, montrant la disparition totale de ce gaz sur 1100 m d'épaisseur. L'ozone ne retrouve sa concentration normale d'environ 40 ppb que vers 1500 m. Cet épisode a duré plusieurs jours.

HCHO, NO<sub>x</sub> et O<sub>3</sub> sont impliqués dans les réactions chimiques qui gouvernent la concentration de l'oxydant principal de l'atmosphère, le radical OH. Si nous ne comprenons pas la chimie des molécules précitées, nous ne pouvons prédire ni les concentrations de OH, ni les temps de vie de nombreuses espèces chimiques en régions polaires.

Une des particularités de ces régions est qu'elles sont recouvertes de neige la majeure partie de l'année. La neige est un solide très divisé dont la surface totale peut atteindre plusieurs milliers de m<sup>2</sup> par m<sup>2</sup> de surface au sol. La neige peut donc adsorber de grandes quantités de gaz traces qui vont pouvoir être échangés avec la troposphère et avoir ainsi un impact important sur sa composition. La neige peut également servir de support à des réactions catalytiques, impliquant ou non la lumière.

L'impact de la neige ne se limite d'ailleurs pas aux pôles et a aussi été observé aux latitudes moyennes. Comme la neige recouvre jusqu'à 50% des terres émergées de l'hémisphère nord en hiver, il est clair qu'à l'échelle globale, la couverture neigeuse peut avoir un impact considérable sur la chimie de la troposphère. Cet impact reste à déterminer pour réduire une des causes majeures d'incertitudes des modèles de chimie atmosphérique.

Dans le cadre du réchauffement global, comprendre l'effet de la neige est nécessaire pour évaluer l'impact de la réduction de la couverture neigeuse sur la composition de l'atmosphère. Cet aspect des interactions air-neige est de plus nécessaire pour reconstituer précisément les compositions des atmosphères passées à partir des carottes de glace.

Afin d'étudier le rôle du manteau neigeux sur la chimie atmosphérique, le LGGE (F. Dominé et collaborateurs) ont participé à 2 campagnes internationales : ALERT 2000 à Alert (82°30'N, 62°20'W, côte Nord de l'île d'Ellesmere, Figure 2.7) en février et avril 2000, et NICE au Svalbard en avril-mai 2001. Les résultats de NICE sont en cours de dépouillement, et seuls les résultats d'ALERT 2000 seront résumés ici. Les objectifs spécifiques étaient d'élucider les mécanismes de destruction de l'ozone, et de production de NO<sub>x</sub> et d'aldéhydes comme HCHO et l'acétaldéhyde CH<sub>3</sub>CHO par le manteau neigeux. La contribution du LGGE s'est focalisée sur la microphysique et la composition chimique de la neige, en particulier en aldéhydes. Ces mesures, associées aux mesures des aldéhydes en phase gazeuse effectuées par Purdue University, avaient pour but majeur de comprendre les échanges d'aldéhydes entre le manteau neigeux et l'atmosphère.



*Figure 2.7. Camp établi sur la banquise au large d'Alert en avril 2000. Le ballon captif a été utilisé pour les profils verticaux de paramètres météorologique et pour la mesure de l'ozone.*

*Démarche scientifique:* Les processus pouvant intervenir dans le manteau neigeux comprennent :

- L'adsorption/désorption de gaz traces et la catalyse de réactions hétérogène, avec ou sans intervention de la lumière.

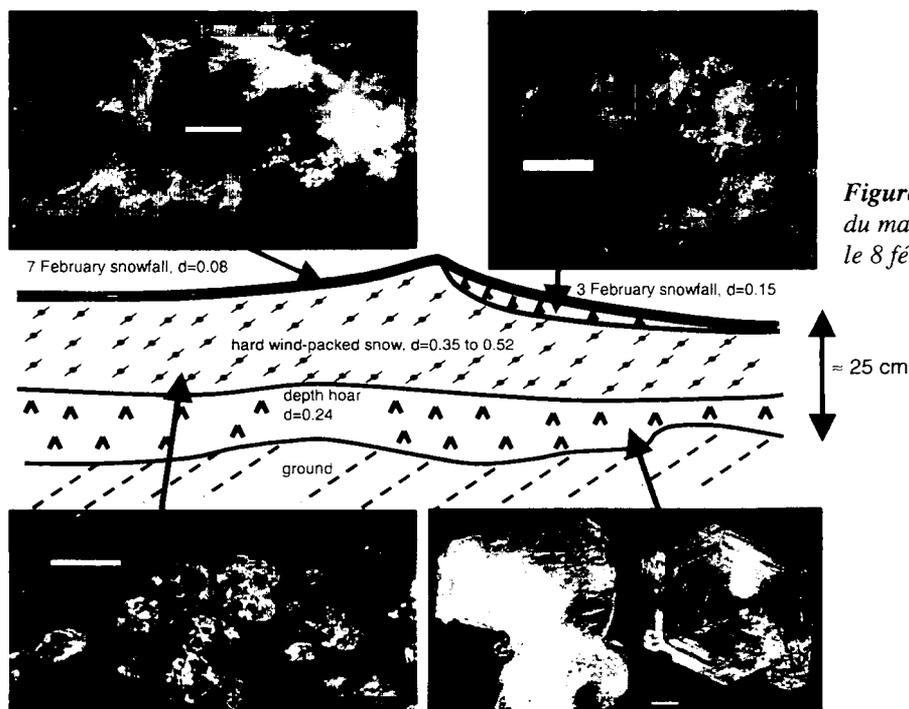
- L'échange de gaz traces dissous dans les cristaux de neige lors du métamorphisme du manteau neigeux, qui inclue les cycles de sublimation/condensation de la vapeur d'eau responsables du changement de taille et de forme des grains de neige.

La physique du manteau neigeux va influencer sur son impact chimique et notre contribution comprenait des aspects physique et chimique. L'aspect physique a consisté à observer la stratigraphie et à mesurer la densité et la surface spécifique (SS) d'échantillons de chaque couche. La SS est la surface totale accessible aux gaz [Hanot et Dominé, 1999; Dominé et al., 2001]. Plus simplement, on peut parler de la surface totale développée par un solide divisé. La SS doit être connue pour quantifier la capacité de piégeage de gaz traces à la surface des cristaux de neige et pour calculer la vitesse des réactions hétérogènes. Le métamorphisme conduit à une réduction de la SS et à un relargage de gaz traces adsorbés.

Les mesures chimiques ont consisté à mesurer le formaldéhyde et l'acétaldéhyde dans l'atmosphère et à quantifier ces 2 composés dans chaque couche de neige, afin de pouvoir évaluer la teneur totale du manteau neigeux. Les mesures ont été réparties sur 2 campagnes. L'une a eu lieu en février, pendant la nuit polaire, où l'obscurité était totale, et l'autre en avril, où le jour était continu, afin de détecter l'influence des processus photochimiques.

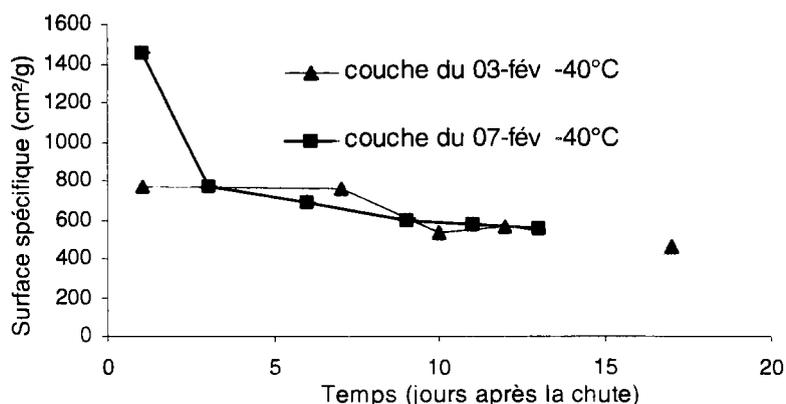
**Résultats:** Le manteau neigeux à Alert est saisonnier. La climatologie indique une précipitation annuelle de 150 mm, avec un maximum en août et septembre (24 mm) et un minimum en février (6 mm). La température reste négative au moins 10 mois de l'année. La neige s'accumule dès septembre, et le manteau neigeux atteint 40 à 50 cm en mai. La fonte a lieu en juin ou juillet. La faible accumulation implique que les couches de neige observées sont en général liées à des épisodes de vent, qui remodèle la neige précipitée, plutôt qu'à des précipitations distinctes.

La structure du manteau neigeux observée en février est représentée en Figure 2.8. Une couche de givre de profondeur, une épaisse croute formée par le vent, et deux fines couches de neige récentes sont aisément identifiables. La densité et la SS de chaque couche ont été mesurées. La SS a été déterminée par adsorption de méthane à 77 K [Hanot et Dominé, 1999; Dominé et al., 2001]. Brièvement, on détermine le nombre de molécules de méthane nécessaires pour recouvrir la surface de la neige. Connaissant la surface d'une molécule, on détermine la surface S de l'échantillon de neige. Après mesure de la masse M de l'échantillon, on obtient la  $SS = S/M$ , exprimée en  $cm^2/g$ . La SS des neiges âgées a un faible potentiel d'évolution. Par contre, les SS élevées des neiges fraîches peuvent évoluer très vite (Figure 2.8). Ces mesures de SS sont les premières réalisées en région polaire.



**Figure 2.8:** Stratigraphie du manteau neigeux à Alert le 8 février 2000

Ces mesures ont permis d'évaluer la surface totale (ST) de chaque couche de neige et du manteau neigeux. La ST est une grandeur sans dimension, car elle représente le nombre de m<sup>2</sup> de surface de neige pour 1 m<sup>2</sup> de surface au sol. Les données de SS et de ST sont regroupées dans le Tableau 1, qui montre que la ST du manteau neigeux en février est de 1720 m<sup>2</sup>/m<sup>2</sup>. Des couches de neige supplémentaires ont été observées en avril, ce qui a porté la ST du manteau à 2740 m<sup>2</sup>/m<sup>2</sup> le 28 avril.



**Figure 2.9:** Evolution de la SS de deux couches de neige fraîche en hiver. La température moyenne avoisinait -40°C.

**Tableau 1 :** Surface totale moyenne du manteau neigeux, et contribution des différentes couches à cette surface totale.

Couche de neige	Epaisseur moyenne cm	Densité moyenne g/cm <sup>3</sup>	Surface spécifique cm <sup>2</sup> /g	Surface totale m <sup>2</sup> /m <sup>2</sup>
Chute du 7 février	1	0,08	1460	117
Chute du 7 février	1	0,15	760	114
Couche dure ventée	15	0,48	160	1152
Givre de profondeur	10	0,22	155	341
Surface totale du manteau neigeux				1720

HCHO et CH<sub>3</sub>CHO ont été mesurées dans chaque couche de neige et dans l'atmosphère. Les mesures de CH<sub>3</sub>CHO dans la neige étaient les premières jamais réalisées. Deux objectifs ont été poursuivis. Tout d'abord il fallait établir le partage de ces espèces entre le manteau neigeux et la couche d'échange atmosphérique, c'est à dire la couche de l'atmosphère où l'acétaldéhyde peut interagir directement avec la neige. Comprendre ce partage est essentiel pour évaluer si la neige a le potentiel d'influencer les concentrations d'aldéhydes dans l'atmosphère. Ensuite, nous avons suivi simultanément l'évolution des concentrations en aldéhydes des neiges fraîches et de la troposphère. Les variations observées nous ont amené à tenter de comprendre les mécanismes d'incorporation des aldéhydes dans la neige, afin de pouvoir décrire quantitativement les échanges air-neige. Seuls les résultats obtenus sur l'acétaldéhyde seront décrits ici.

En hiver, la concentration de CH<sub>3</sub>CHO dans la neige fraîche se limite à 2.5 ppbw, mais elle atteint 10 ppbw au printemps. Sa concentration a tendance à décroître avec l'évolution de la neige. Le tableau 2 résume le partage air/couche limite de l'acétaldéhyde. La couche d'échange correspond à la distance verticale sur laquelle peut diffuser l'acétaldéhyde pendant sa durée de vie : 300 m en hiver, mais seulement 20 m au printemps, à cause de la photolyse. Il apparaît que la majorité de CH<sub>3</sub>CHO de l'ensemble (neige + couche d'échange) se trouve dans la neige, qui peut donc constituer un réservoir important de ce composé.

Tableau 2 : Répartition de  $\text{CH}_3\text{CHO}$  entre le manteau neigeux et la couche limite atmosphérique

Saison	Charge du manteau neigeux ( $\text{ng}/\text{cm}^2$ )	$P_{\text{CH}_3\text{CHO}}$ moyen (pptv)	Épaisseur de la couche limite (m)	Fraction de $\text{CH}_3\text{CHO}$ dans la neige (%)
Hiver	10.1	74	300	74
Printemps	19.2	228	20	96

Notre stratégie a été de mesurer simultanément la teneur en  $\text{CH}_3\text{CHO}$  dans la neige et dans l'air ainsi que la température et la SS de la neige. La Figure 10 montre l'évolution simultanée de la teneur en acétaldéhyde et de la SS de la neige tombée le 14 avril. Les décroissances des 2 paramètres sont corrélées, et il semble plausible que l'acétaldéhyde soit localisé à la surface des cristaux de neige. Ce résultat signifie que les échanges avec l'atmosphère seront rapides, de l'ordre de l'heure. La neige pourra donc émettre de l'acétaldéhyde lors de la décroissance de sa SS, mais aussi lors d'une augmentation de température. Inversement, un refroidissement pourra s'accompagner d'une incorporation  $\text{CH}_3\text{CHO}$  à la surface des cristaux de neige, et d'une décroissance de la teneur atmosphérique. Si  $\text{CH}_3\text{CHO}$  était par contre dissous dans le volume des cristaux, les échanges se feraient par diffusion en phase solide, ou lors du métamorphisme, qui ont une constante de temps de l'ordre de plusieurs jours ou plus.

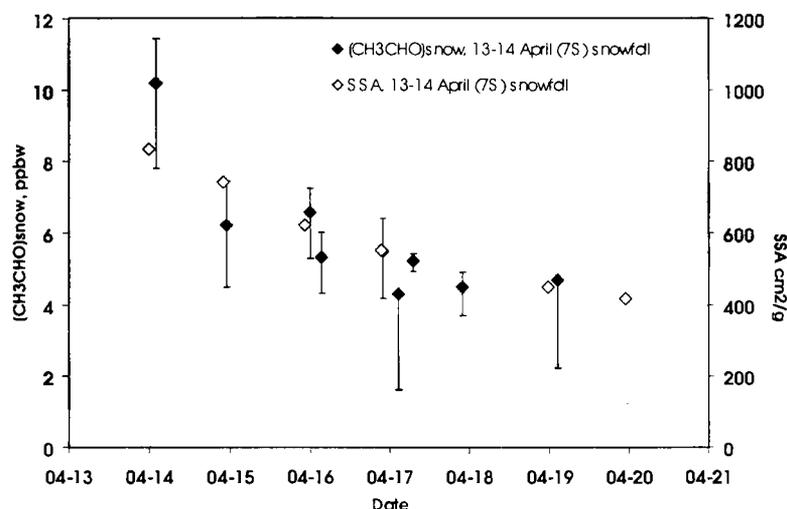
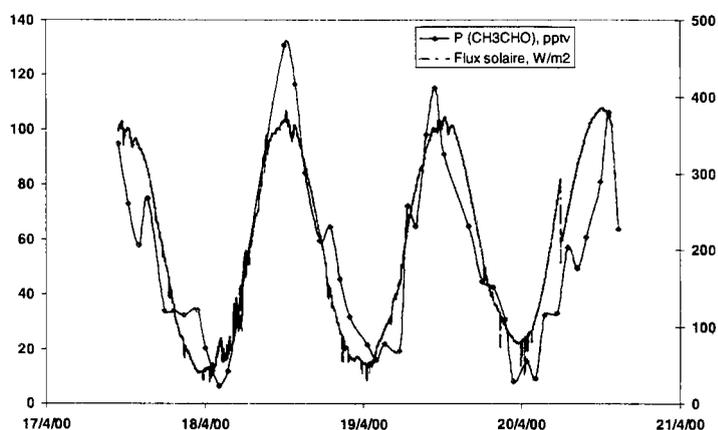


Figure 2.10. Evolution de la surface spécifique et de la teneur en aldéhyde de la chute de neige du 14 avril

Une analyse plus détaillée de nos résultats, y compris des mesures atmosphériques, a montré que les interactions acétaldéhyde-neige étaient en fait extrêmement complexes. Les processus sont apparus très différents au printemps et en hiver, et nous ont menés à postuler une production photochimique dans la neige au printemps, à partir de précurseurs non encore identifiés. Cette photochimie est responsable du cycle journalier très marqué de ce composé dans la couche d'échange (Figure 2.11).



**Figure 2.11 :** Cycle diurne de la pression partielle d'acétaldéhyde (échelle de gauche) 1 m au dessus de la surface de la neige. Le flux solaire (échelle de gauche) est également indiqué

En conclusion, de nombreux résultats novateurs ont été obtenus pendant la campagne ALERT 2000. Les premières mesures de la surface totale du manteau neigeux polaire ont été réalisées : la neige offre une surface allant jusqu'à 3000 m<sup>2</sup> par m<sup>2</sup> de sol, et peut donc servir à adsorber des gaz traces réactifs échangeables avec l'atmosphère et à catalyser des réactions hétérogènes. Les premières mesures de CH<sub>3</sub>CHO dans la neige ont également été réalisées. Plus généralement, cette campagne était la première à proposer une étude conjointe détaillée de la chimie de l'atmosphère et de la neige, et qui intégrait également la physique du manteau neigeux.

Cette association large a permis de montrer que la neige avait un impact important sur la chimie atmosphérique. Dans le cas de l'acétaldéhyde, développé plus en détail ici, nous proposons que le manteau neigeux serve de support à la photolyse de composés organiques, produisant CH<sub>3</sub>CHO qui est relargué dans l'atmosphère, de telle sorte que la pression partielle d'acétaldéhyde augmente d'un facteur 10 entre la nuit et le jour.

Le manteau neigeux est donc un acteur essentiel de la chimie atmosphérique dans les zones enneigées. L'étude de son impact ne fait que commencer, et de nombreuses campagnes d'étude devront être programmées pour le quantifier. Des mesures en laboratoire des paramètres physico-chimiques caractérisant les interactions gaz-glace devront compléter ces observations.

#### 4.3. Etudes en laboratoire

(F. Dominé, L. Hanot, I., Xueref)

Dans le cadre d'une collaboration au sein d'un projet PNCA coordonné au LGGE, le LPCE d'Orléans a entrepris la construction d'un nouveau système de mesure des coefficients de diffusion des gaz dans la glace, basés sur une ablation par faisceau ionique suivi par une analyse par spectrométrie de masse. Récemment, Livingston et al. (2000), en utilisant une technique semblable, a obtenu des coefficients de diffusion de HCl dans la glace plusieurs ordres de grandeur supérieurs à ceux mesurés au LGGE il y a quelques années. Nous avons suspecté que la glace utilisée par Livingston et al. était très différente de la glace atmosphérique, et qu'un plus grand désordre, voire un état amorphe, était responsable des valeurs obtenues. Des expériences en IRTF [Dominé et Xueref, 2001] ont permis de montrer que la glace utilisée par Livingston et al. était très probablement amorphe, et que les résultats obtenus ne pouvaient donc pas s'appliquer à l'atmosphère. Les conclusions qui s'imposaient en ont été tirées pour la fabrication de la glace prévue au LPCE.

## 5. ETUDES DE L'ATMOSPHERE ACTUELLE

### 5.1 Etude atmosphérique à Dumont d'Urville (zone côtière Antarctique)

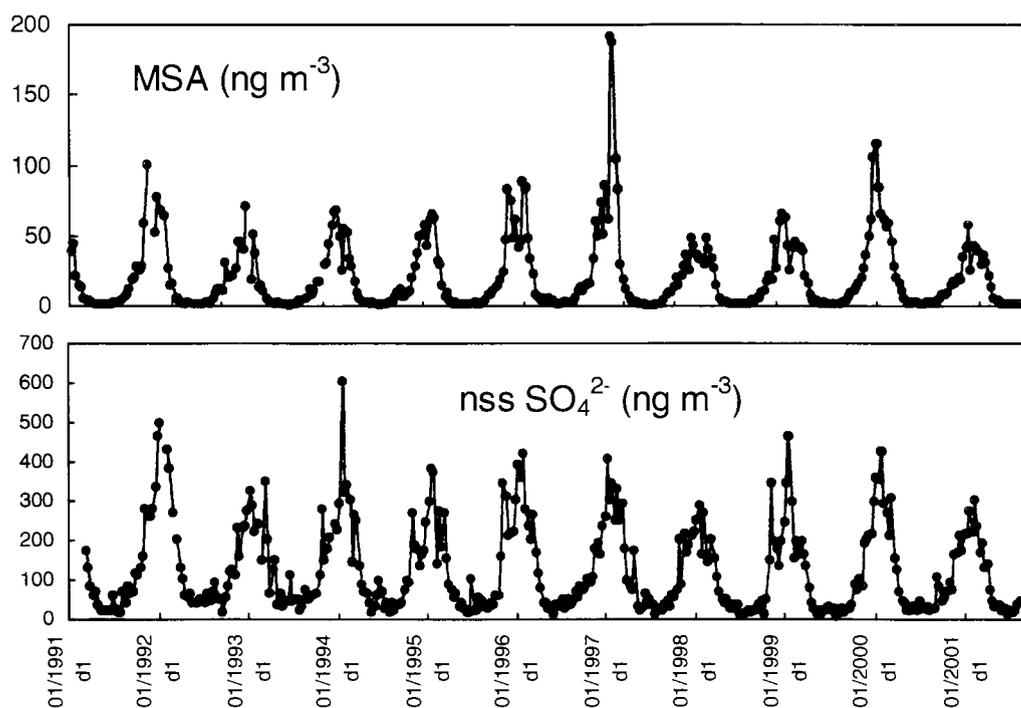
(*M. Legrand, B. Jourdain*)

Deux grands objectifs motivent l'étude de la basse atmosphère en Antarctique. Tout d'abord, une vaste partie de l'hémisphère Sud reste très mal documentée au delà du 40°S (stations d'Amsterdam et de Cape Grim). Ce manque de données entre 40° et 90°S affaiblit fortement les possibilités de validation des modèles globaux. De plus, la caractérisation (intensité, saisonnalité, variabilité interannuelle) des émissions de DMS de l'océan polaire, ainsi que de la capacité oxydante très spécifique de ces atmosphères de haute latitude sont rigoureusement nécessaires pour évaluer l'impact de l'océan austral sur les signaux "soufre" enregistrés dans les carottages comme EPICA ou Vostok. Soutenu par l'IFRTP, ce programme a vu la mise en place, depuis 1991, de la mesure des aérosols (Figure 2.12). Les premiers résultats mirent en évidence plusieurs particularités de la basse atmosphère Antarctique:

- (1) un fractionnement de l'aérosol marin,
- (2) l'importance des émissions biogéniques de l'océan sur le cycle du Soufre,
- (3) des émissions d'ammoniac par les colonies de manchots,
- (4) le rôle prépondérant de la stratosphère sur le budget de HNO<sub>3</sub>. Au cours de ces 2 dernières années, l'effort a porté sur l'étude globale du cycle du soufre (aérosols, et gaz comme DMS, DMSO et SO<sub>2</sub>) ainsi que sur la mesure de la distribution en taille de l'aérosol.

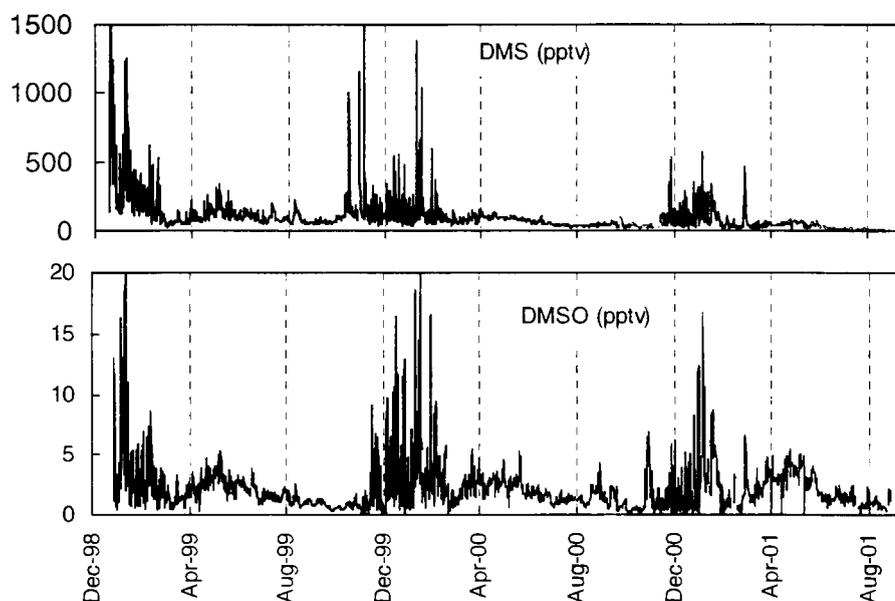
Un fractionnement de l'aérosol marin, caractérisé par un appauvrissement en sulfate relatif au sodium par rapport à la composition de l'eau de mer, a été mis en évidence dans ces régions en liaison avec la précipitation de mirabillite (Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>·10H<sub>2</sub>O) vers -8°C. L'appauvrissement en SO<sub>4</sub> atteint un facteur 4 en hiver et la prise en compte de ce fractionnement est ici essentielle pour l'évaluation des concentrations de sulfate en excès (nssSO<sub>4</sub>) d'origine biogénique ou volcanique. La quantification du fractionnement a pu être effectuée pour la période hivernale à partir des filtres totaux (quasi-absence de sulfate en excès biogénique), mais restait difficile pour le printemps et l'automne, périodes caractérisées par une diminution du fractionnement de l'aérosol marin et une présence devenue non négligeable de sulfate biogénique. Les mesures réalisées à Dumont d'Urville depuis 2 ans à l'aide d'un impacteur 12 étages ont permis de suivre l'évolution de la composition chimique de l'aérosol marin (collecté sur les premiers étages de l'impacteur) et de l'aérosol de sulfate submicronique (collecté sur les derniers étages de l'impacteur). Ces mesures ont permis de connaître la période exacte du fractionnement à DDU (de Mars à début Novembre) et de calculer précisément cette fois le sulfate en excès. Elles appuient de plus l'hypothèse du rôle important joué par la glace de mer dans le processus physique de fractionnement (impaction d'embruns marins et formation de mirabillite sur la glace de mer à partir de -8°C puis ré-émission sélective de la phase appauvrie en sulfate par le vent) [*Jourdain and Legrand, JGR, soumis*].

La série d'observations "long-terme" (10 ans) nous permet de commencer à examiner les causes possibles de la variabilité inter-annuelle. Deux types d'anomalies majeures sont mis en évidence par nos mesures. Le premier concerne le sulfate en excès qui a augmenté plus rapidement que les autres années au printemps (Septembre à Décembre) 1991 (Figure 2.12) et ceci en liaison avec l'arrivée du nuage volcanique du Cerro Hudson [*Legrand and Wagenbach, 1999*]. De plus, nous avons montré que les teneurs en sulfate à la fin des étés et des hivers 1992 et 1993 sont caractérisées par la présence de sulfate d'origine volcanique liée à la présence du nuage du Pinatubo. Enfin, cette étude d'une perturbation volcanique dans les basses couches de l'atmosphère, associée aux mesures radiochimiques (<sup>7</sup>Be et <sup>210</sup>Pb) effectuées à Neumayer suggère une sous-estimation très nette de la charge en sulfate de la stratosphère estimée à partir des mesures satellitaires [*Legrand and Wagenbach, 1999*].



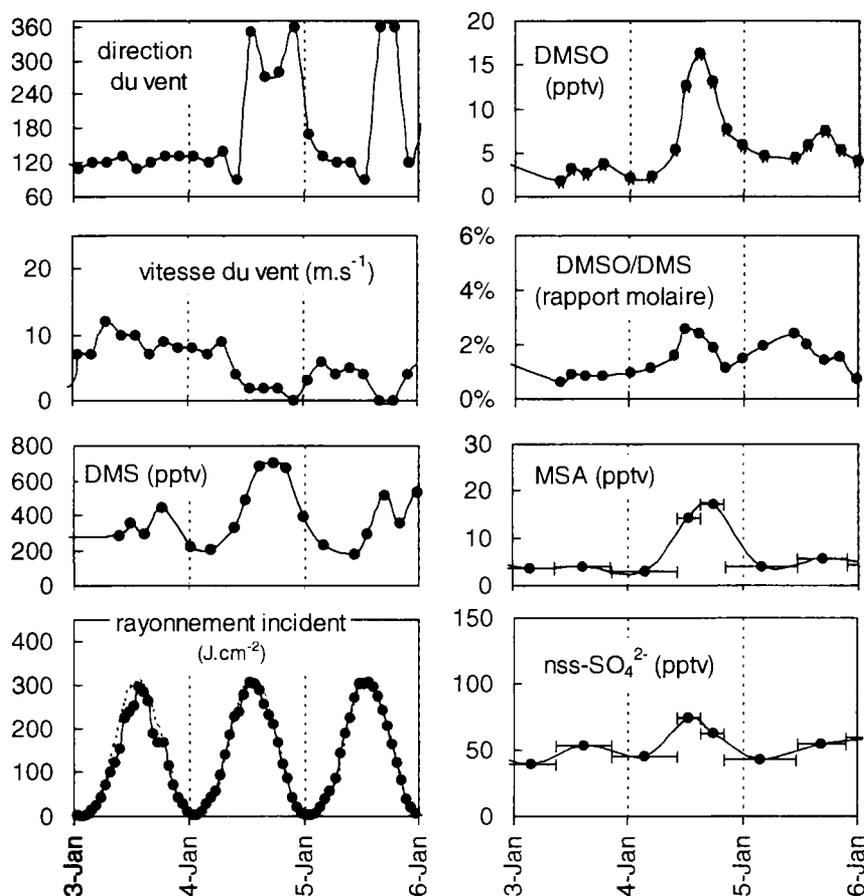
**Figure 2.12.** Mesures journalières (ici moyennées sur 10 jours) des concentrations en aérosols soufrés (sulfate en excès et MSA) à Dumont d'Urville sur la période 1991-2001. Les mesures sont effectuées sur le site par chromatographie ionique par les VAT, et les résultats transmis à l'IFRTP et au LGGE (programme n° 241 à l'IFRTP, M. Legrand, Thèse de B. Jourdain).

Un autre type de perturbation apparaît dans les enregistrements de DDU (Figure 2.12): des teneurs en MSA relativement élevées (près de 3 fois plus importantes au cours de l'été 1997 et dans une moindre mesure en 2001 par rapport aux 8 autres années). L'interprétation de ces perturbations d'origine biogénique, pouvant être dues à une variabilité de la source de DMS, une modification de l'oxydation du DMS ou encore du transport vers le site est complexe. Ceci a motivé la mise en place depuis 3 ans de la mesure du DMS (Figure 2.13).



**Figure 2.13.** Concentrations en DMS et DMSO observées à DDU depuis Décembre 1998 (~ 2600 mesures). Adapté de Jourdain and Legrand [JGR, 2001] et B. Jourdain (Thèse 2001).

Nous disposons maintenant d'une série unique de données sur le DMS et le DMSO en zone Antarctique pour l'été comme pour l'hiver. Ces résultats très novateurs ont fait l'objet de 2 « companion papers » au JGR en 2001. Les valeurs observées en hiver à DDU n'ont pas d'équivalent dans la littérature mais démontrent que, contre toute attente, tandis que les concentrations en produits d'oxydation du DMS (MSA et sulfate biogénique) s'effondrent, le DMS devient le principal composé soufré présent en hiver sur le continent Antarctique probablement en liaison avec un temps de résidence dans l'atmosphère du DMS très long suite à l'absence de radiations solaires. Les mesures montrent par ailleurs une forte variabilité interannuelle qui semble au premier degré liée à une forte variabilité des émissions résiduelles de DMS locales (eau libre du pack) d'une année sur l'autre. En été les teneurs en DMS observées sur les 3 dernières années montrent une certaine variabilité interannuelle avec des épisodes très chargés en particulier en 1999. Ceci a pu être relié à des émissions très locales de l'océan ouvert comme le suggère les fortes teneurs en DMS de l'eau de mer en face de DDU (50 nM en début Janvier 99 contre 4 à 20 nM au cours des 2 étés suivants). Notons que les fortes teneurs en MSA de l'été 2000 semblent découplées des teneurs en DMS locales. En effet les fortes teneurs en MSA durant l'été 2000 sont accompagnées d'un apport relativement modeste de DMS suggérant un taux de vieillissement important de la masse d'air correspondante.



**Figure 2.14.** Etude de cas effectuée en Janvier 1999 à DDU: Suite à une advection d'air marin riche en DMS (700 pptv) arrivant sur le site le 4 Janvier, les fortes conditions d'insolation entraînent une production de DMSO, suivie d'une rapide formation de MSA. Adapté de Legrand, Sciare, Jourdain and Genthon [JGR, 2001b].

Les mesures de DMS et DMSO réalisées de manière intensive (jusqu'à 8 prélèvements par jour) en 1999 ont permis d'examiner plusieurs aspects importants du mécanisme d'oxydation du DMS. Tout d'abord, le DMSO qui n'est produit que par la voie d'addition dans l'oxydation du DMS, présente à DDU des variations diurnes marquées en réponse à l'insolation comme le montre le cas du 4 Janvier 1999 reporté sur la Figure 2.14. Nos observations font également apparaître une augmentation quasi simultanée des teneurs en DMSO et en MSA suggérant une oxydation ultérieure du DMSO en MSA relativement rapide (quelques heures). Une telle rapidité de l'oxydation du DMSO en MSA ne semble

(à la vue de nos connaissances mécanistiques) pas possible en phase gazeuse, suggérant l'existence d'une voie d'oxydation hétérogène. Ces observations ont permis de proposer un schéma réactionnel nouveau qui inclut une chimie hétérogène du DMSO aboutissant à la formation de MSA, le meilleur ajustement entre valeurs simulées et observées suggérant une vitesse de réaction hétérogène du DMSO dépendant des teneurs en radicaux OH :  $k_4 = 0.510 \cdot 10^{-10}[\text{OH}] + 5.5 \cdot 10^{-5}$  (en  $\text{s}^{-1}$ ) [Legrand *et al.*, 2001b].

## 5.2. Etude Atmosphérique à Summit (Groenland Central) et dans l'Arctique Européen

(JL. Jaffrezo, V. Ricard)

Des changements climatiques sont déjà perceptibles dans les régions des hautes latitudes Nord (circulation océanique, circulation atmosphérique, étendue et épaisseur de la glace de mer). Des études de modélisation climatique montrent que ces régions doivent être particulièrement sensibles à ces changements, avec en particulier une rétroaction positive entre albedo et extension de la glace de mer. L'atmosphère de ces régions étant soumise de façon très marquée aux influences anthropiques, une évaluation précise de ces changements est nécessaire, devant inclure les interactions entre chimie et climat. Cependant, les modèles atmosphériques actuels (transport/chimie transport/climat) ne reproduisent qu'imparfaitement les phénomènes de transport observés pour les aérosols (comme par exemple l'impact de l'"Arctic Haze", des feux de forêts boréaux, ou des apports de poussières désertiques de printemps), alors que les campagnes d'observation sont rares pour valider ces modèles et fournir des paramétrisations adaptées aux conditions spécifiques du milieu, particulièrement pour les sites d'altitude (Summit) ou les régions de l'Arctique Européen.

Les premières séries temporelles de concentrations pour les espèces ioniques pour la phase aérosol atmosphérique et les neiges de surface ont été obtenues à Summit (Groenland Central) en 1997-1998 (résultats présentés dans le précédent rapport d'activité). Ces séries représentent entre autres la première opportunité pour tenter de relier les seules informations disponibles jusqu'à présent, obtenues indirectement par des puits de neige, avec des concentrations atmosphériques. En effet, par manque d'observations directes, la datation de ces puits et la description des cycles saisonniers qui en résultait ne reposaient que sur un certain nombre d'hypothèses. Pour ce qui concerne la relation air-neige, les principaux résultats obtenus (en cours de publication) indiquent :

- une forte probabilité de mélange des couches de surface, particulièrement en hiver, conduisant à des profils chimiques « lissés » dans les puits, par rapport aux signaux atmosphériques, de nature plus épisodique (cas du sodium, du sulfate, ...),
- un bon enregistrement dans les neiges de surface et les puits des épisodes de poussières désertiques au printemps,
- la forte probabilité de phénomènes post-dépôt modifiant de façon conséquente les profils chimiques entre les neiges de surface et les puits pour certaines espèces (ammonium, MSA, formate, acétate, nitrate, ...),
- la possibilité d'incorporation directe de  $\text{SO}_2$  dans les neiges de surface en hiver, qui seule pourrait expliquer les fortes concentrations mesurées dans ce milieu, alors que les concentrations atmosphériques de sulfate particulaire sont relativement faibles.

Après le dépôt d'un dossier (refusé) au premier appel d'offre du 5<sup>ème</sup> PCRD pour l'établissement d'une base européenne permanente à Summit (JL Jaffrezo coordinateur), la continuation de ce programme est assurée depuis l'été 2001 par une collaboration avec la NSF qui maintient du personnel hivernant à Summit. Dans le cadre du programme SCIRA (Sources, Caractéristiques, et Impact radiatif des Aérosols aux hautes latitudes Nord, financements à l'IFTRP et au PNCA), nous avons mis en place un suivi continu des aérosols pour 2 cycles annuels (été 2001/été 2003) afin de réaliser un bilan de masse des différentes composantes (aérosol soufré, carboné, marin et crustal) qui permettra d'évaluer entre autres l'impact radiatif des aérosols dans cette région des hautes latitudes Nord. Les premiers échantillons ne rentreront au LGGE qu'au printemps 2002.

Une action d'envergure a par ailleurs pris place dans l'Arctique Européen au niveau de la mer. Le programme EAAS (European Arctic Aerosol Study) a été mis en œuvre en 1997 afin d'étudier en détail les caractéristiques physiques, chimiques et optiques des aérosols dans des conditions très

différenciées (été/hiver), et pour des types de masses d'air correspondant à une grande diversité de source. L'objectif principal de ce programme était de proposer des profils d'aérosols pour une paramétrisation réaliste des modèles de transport, de chimie-transport et de climat aux hautes latitudes nord. Les études de terrain ont pris place sur un site au nord de la Finlande (69° 35 N; 28° 50 E; altitude 130 m). Une partie de ce programme a constitué le travail de thèse de V Ricard (2001).

Un premier axe de ce programme concernait le suivi des concentrations d'aérosol (espèces minérales ioniques, acides organiques, carbone total et carbone suie) sur deux cycles annuels, selon deux classes de taille, ce qui a permis d'établir des profils chimiques quantifiés saisonniers et en fonction du type de masses d'air. Les principaux résultats [Ricard *et al.*, 2001a; Ruellan *et al.*, 2001] indiquent :

- que l' "Arctic Haze" n'est pas aussi marqué dans l'arctique européen que dans la zone Amérique du Nord/Groenland, avec une variabilité des concentrations (sulfate, carbone suie, carbone total) résultant plus de changements rapides de masses d'air que de larges processus saisonniers,
- que certaines espèces sont cependant caractérisées par des variations saisonnières marquées, liées à des effets de sources et/ou de processus d'oxydation (MSA, certains acides organiques, ...),
- que les feux de forêts boréaux et les apports de poussières crustales ne sont pas très marqués dans cette zone (au moins lors de notre période d'étude),
- que le sulfate représente généralement la composante majoritaire (en masse) de l'aérosol, excepté en été où la matière organique devient prédominante. Cette large présence du sulfate rend l'aérosol généralement acide, compte tenu de la faiblesse des sources d'ammonium aux hautes latitudes,
- que la composante crustale et les nitrates ne participent au bilan de masse que de façon très marginale (au contraire des résultats sur la majorité des sites continentaux aux latitudes moyennes),
- une large décroissance de la contribution massique des espèces marines (Na, Cl, Mg, ...) en allant des masses d'air marines aux masses d'air continentales, avec une augmentation symétrique de la contribution des sulfates en excès,
- une augmentation parallèle très significative du carbone élémentaire (EC, résultant des processus de combustion) et de l'ammonium,
- la constance de la masse moyenne de l'aérosol selon le type de masse d'air,
- des variations relativement faibles de la contribution de la matière organique et des nitrates selon le type de masse d'air.

Pour le second axe du programme, nous avons mis en œuvre des prélèvements par impacteurs (une centaine de runs) lors des périodes de terrain intensives (étés 1997 et 1998, hiver 1998), permettant de connaître la répartition des espèces chimiques selon la distribution en taille des aérosols dans des conditions d'humidité relative ambiante [Ricard *et al.*, 2001b, Maenhaut *et al.*, 1999] ou réduite [Ricard *et al.*, 2001c]. Ces résultats ont permis de construire des tables de paramètres modaux caractérisant les spectres de tailles pour les espèces chimiques principales, selon le type de masse d'air [Ricard *et al.*, 2001b]. Sans entrer dans le détail de ces résultats, on retiendra qu'ils permettent de préciser certains des modes de formation des aérosols, et qu'ils mettent en avant des différences importantes selon le type de masse d'air qu'il sera nécessaire de prendre en compte pour tout travail de modélisation du transport des aérosols et du forçage radiatif induit. On met particulièrement en avant la bimodalité quasi permanente du sulfate dans le mode submicronique, due aux différents processus de formation (dont les réactions hétérogènes en gouttelettes nuageuses). Pour aller dans le sens de la définition de paramètres nécessaires à ces modèles, nous avons réalisé des mesures permettant d'accéder à la fonction de grossissement des aérosols en fonction de l'humidité relative et aux paramètres de l'aérosol sec [Ricard *et al.*, 2001c]. Les résultats obtenus à Sevetijarvi sont comparés avec les paramétrisations employées dans différentes modélisations globales du transport et du forçage radiatif du sulfate. On note que peu d'entre elles prennent en compte la bimodalité du mode submicronique, et qu'elles utilisent généralement des dispersions de mode très importantes. Il conviendra de tester la sensibilité du forçage obtenu pour des paramétrisations qui soient plus réalistes pour les hautes latitudes européennes.

Un troisième axe du programme concernait l'évaluation du rôle des espèces gazeuses sur les caractéristiques chimiques et physiques des aérosols. Les résultats obtenus avec ces impacteurs lors de la saison d'été 1997, couplés avec les mesures de gaz acides et d'ammoniac effectuées par chambres à nébuliser, servent de données d'entrée à une modélisation thermodynamique des échanges gaz-particules. Nous avons développé une collaboration avec M. Jacobson (Stanford, USA) pour l'utilisation du modèle EQUISOLV II. Ce modèle est l'un des seuls qui prend en compte de façon détaillée la variabilité des concentrations chimiques selon la distribution en taille de particules. Les résultats obtenus sont extrêmement prometteurs. Ils montrent une diversité des conditions d'équilibre selon le type de masse d'air rencontrée et permettent d'obtenir des informations novatrices sur les mélanges internes et externes des espèces chimiques selon le type de particules et les processus de formation. Ces résultats mettent aussi en avant le rôle des cations divalents ( $\text{Ca}^{2+}$  et  $\text{Mg}^{2+}$ ) sur les équilibres avec les phase gaz HCl et  $\text{HNO}_3$  [Fridlind *et al.*, 2000].

Ces mesures d'espèces gazeuses sont intéressantes aussi par elles-mêmes, étant très rares (voir uniques) au nord du cercle polaire. Elles montrent par exemple des concentrations en  $\text{NH}_3$  extrêmement basses aussi bien en été qu'en hiver (de l'ordre de quelques  $\text{ng m}^{-3}$ ). Les observations existant précédemment sur les gaz acides (HCl,  $\text{HNO}_3$ , HCOOH,  $\text{CH}_3\text{COOH}$ , HONO) étaient elles aussi peu nombreuses, particulièrement en hiver. Nos résultats mettent en avant le rôle des sources biogéniques locales, des processus d'oxydation et des échanges avec la phase particulaire dans l'évolution des concentrations, avec de forts contrastes entre les niveaux mesurés entre été et hiver (publication en préparation).

Finalement, un dernier axe du programme de terrain concernait le lien entre les propriétés physiques, chimiques et optiques des aérosols. Ce travail sur les données (runs d'impacteurs, distribution en taille par batteries de diffusion (SMPS+APS), caractéristiques optiques obtenues par néphélomètre) est en cours. On a pu montrer entre autres pour la première fois que la phase organique pouvait intervenir de façon prépondérante sur les propriétés de diffusion de l'aérosol, et que de larges variations existaient en fonction des saisons. Une première estimation du forçage radiatif indique un fort potentiel de forçage positif, très dépendant des conditions saisonnières.

### **5.3. Etudes atmosphériques dans les allées Alpines**

*(JL. Jaffrezo, G. Aymoz)*

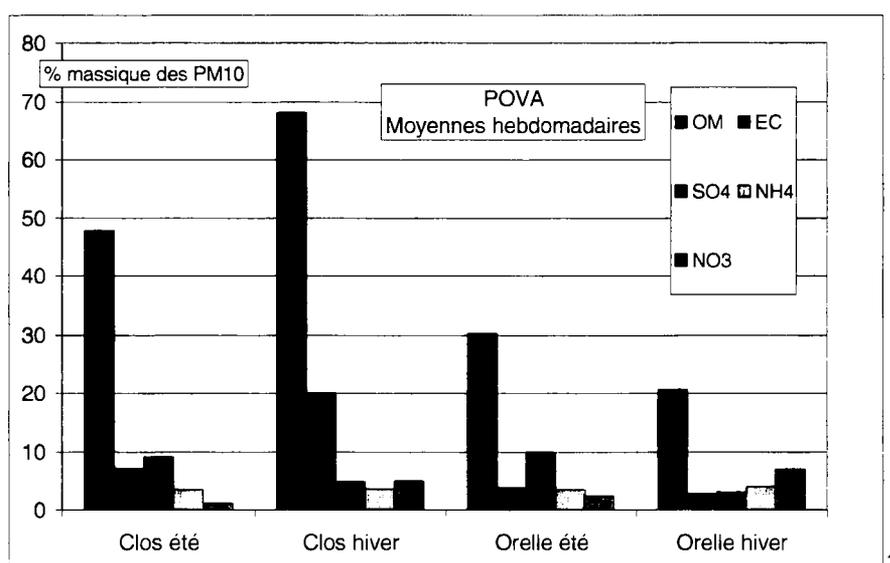
Les vallées alpines représentent un cadre très particulier pour les études de chimie de l'atmosphère, compte tenu de la concentration spatiale des émissions de précurseurs (en particulier celles dues au trafic routier) en vallées encaissées, et des conditions dynamiques et chimiques spécifiques (activité convective, brises de vallée et forçage orographique, rayonnement solaire intense lié à l'altitude, couverture neigeuse, etc...). A ces contraintes géographiques locales s'ajoutent des spécificités majeures plus « sociales » pour la problématique générale de la qualité de l'air en Rhône Alpes (incendie du tunnel du Mont Blanc, impact de la liaison ferroviaire Lyon Turin, préservation de la qualité de l'air pour l'attrait touristique). Ce contexte nous a conduit à proposer un projet de recherche (**POVA : PO**llution des **V**allées **A**lpines, JL Jaffrezo coordinateur, 2000-2003, financements Région Rhône Alpes/ADEME/MATE/METL/Primequal 2/PNCA; 10 laboratoires partenaires) avec 4 objectifs généraux :

- dresser un état des lieux comparatif de la pollution liée au trafic véhiculaire en vallée de Chamonix et de la Maurienne, avant et après la réouverture du tunnel du Mont Blanc,
- évaluer les parts respectives des différents types d'émissions : biogéniques et anthropiques (émissions véhiculaires, émissions industrielles, émissions domestiques, feux de végétaux, etc...) et déterminer leurs variabilités en fonction des conditions environnementales,
- développer un outil opérationnel de modélisation de la dispersion de la pollution atmosphérique appliqué au cas des vallées alpines, qui soit directement exploitable à terme par L'Air des 2 Savoie, et qui permette de réaliser des études de scénario,
- initier des études d'impact de la pollution dans ces deux vallées, avec l'établissement de cartes d'exposition en fonction des études de scénario.

Outre la coordination générale du programme, la contribution du LGGE porte sur la mesure des constituants chimiques majeurs des aérosols et de leur évolution en fonction des variations du milieu (bilan de masse, distribution en taille, profils chimiques,...), ainsi que sur les mesures des espèces gazeuses précurseurs. Ces mesures ont pour objectifs le développement d'une modélisation des processus de formation et de vieillissement des aérosols. Deux campagnes de terrain intensives (en été 2000 et en hiver 2000-2001) ont été effectuées dans les vallées de Chamonix et de la Maurienne (une semaine de mesures sur 5 sites par vallée), et des suivis continus journaliers ont été mis en place à Chamonix et à St Jean de Maurienne depuis Janvier 2001. La première campagne a fait l'objet du DEA de C Joannin, et le travail de thèse de G Aymoz (début en Nov 2001) est entièrement consacré à certains aspects du programme. Un très fort accent est mis sur la matière organique particulaire, avec des collaborations étroites avec d'autres laboratoires sur, entre autres, la spéciation des constituants (TEPE-LESAM) ou les mesures de COV et des groupements fonctionnels (GRECA). Un important travail de développement des techniques instrumentales et analytiques concernant les espèces organiques atmosphériques est mené en parallèle au LGGE dans le cadre de différents programmes coordonnés par JL Jaffrezo soutenus au PNCA.

L'ensemble des résultats sur les campagnes intensives est maintenant disponible, mais n'a pas encore fait l'objet d'une synthèse globale. De nombreux points peuvent cependant être dégagés :

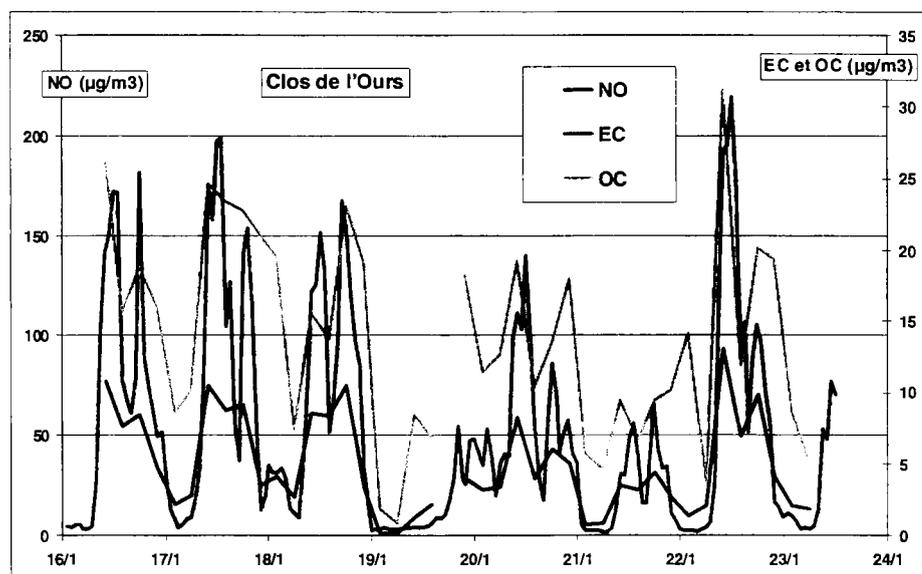
- En hiver, les concentrations de PM10 sont significativement plus élevées (un facteur 2) sur la zone urbaine et sub urbaine de Chamonix que sur tous les autres sites de mesures (sites ruraux dans la vallée de Chamonix, sites ruraux et urbains dans la vallée de la Maurienne). Ces différences sont beaucoup moins nettes en été.
- Excepté pour les sites urbains de Chamonix (pour lesquels elles sont très similaires), ces concentrations sont significativement plus faibles (un facteur 2) comparées à celles obtenues sur les mêmes sites pour une période d'été.
- Le site du Plan de l'Aiguille est découplé des sites de fond de vallée en hiver alors que des connections existent en été.
- Le constituant principal (en terme de masse) de l'aérosol pour l'ensemble des sites sur les deux saisons est le carbone organique, qui représente en moyenne au moins 50 % de la masse des PM10 (Figure 2.15),



**Figure 2.15.** Contribution massique des principaux constituants aux PM10 pour les stations du Clos de l'Ours (zone sub-urbaine de Chamonix) et d'Orelle (zone semi rurale en Maurienne) (moyennes hebdomadaires sur les périodes d'été et d'hiver).

- Les autres constituants majeurs sont le carbone élémentaire (carbone « suie »), le sulfate, le nitrate, et dans une moindre mesure, les chlorures,

- Les profils chimiques des aérosols évoluent entre les deux saisons. Le point le plus remarquable est la plus grande part prise par le carbone « suie » au bilan de masse des aérosols en hiver, qui peut représenter jusqu'à 24 % en moyenne (une valeur très exceptionnelle) de la masse des PM10 sur la zone urbaine de Chamonix,
- La très bonne corrélation (en hiver sur les sites de la vallée de Chamonix) entre les variations de concentration des fractions carbonées (carbone organique et carbone « suie ») et celles de NO (elles-mêmes très liées au trafic véhiculaire) permet de penser qu'une très large proportion de ces fractions carbonées dans l'aérosol est issue d'émissions par les véhicules et est constituée de carbone primaire (Figure 2.16),



**Figure 2.16.** Evolution hebdomadaire en hiver des concentrations de EC, OC et NO au Clos de l'Ours. La très bonne corrélation semble indiquer une source essentiellement primaire véhiculaire (ce qui est le cas pour NO) pour les fractions carbonées de l'aérosol.

- Certains indicateurs mettent en avant des processus de vieillissement rapides de cette fraction carbonée (Figure 2.17),
- La situation est moins nette sur les sites de la vallée de la Maurienne, pour lesquelles cette fraction carbonée semble déjà « âgée » et représentant une moyenne de fond,
- La corrélation est beaucoup moins nette en été, ce qui semble indiquer un rôle beaucoup plus important des sources biogéniques à cette saison,
- Pour les sites sur lesquels les concentrations en chlorures sont significatives en hiver, son origine pourrait être la remise en suspension du sel de salage des routes,
- Les concentrations particulières en nitrate semblent très dépendantes des conditions d'oxydation des précurseurs (les NOx) et varient dans une plus large mesure que celles de ces espèces précurseurs.

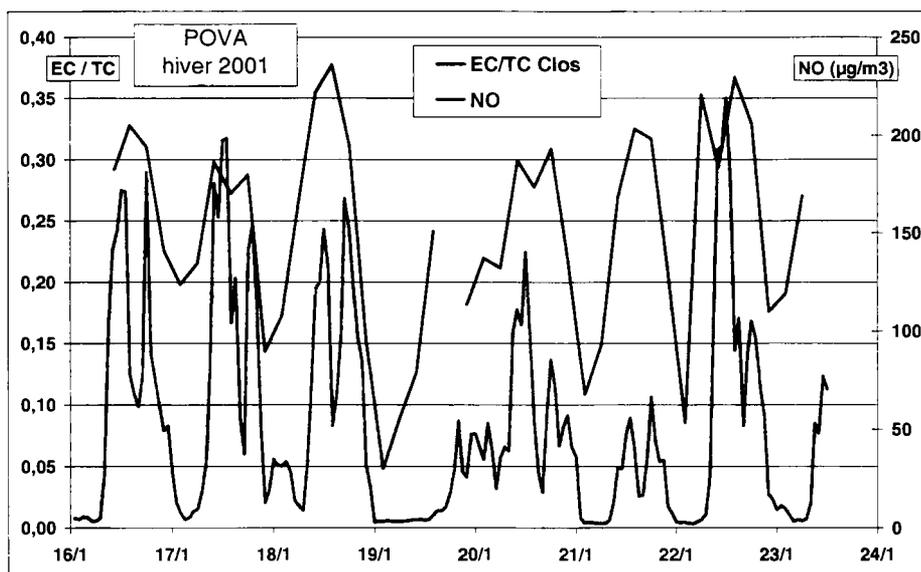


Figure 2.17. Evolution hebdomadaire en hiver des concentrations de NO et du rapport EC / (EC+OC) au Clos de l'Ours. Le cycle diurne marqué pour le rapport EC/TC pourrait traduire des processus de vieillissement de l'aérosol liés à la formation de OC particulaire dans des conditions d'émission plus faibles (de nuit).

## 6. MODELISATION DE LA CHIMIE DE L'ATMOSPHERE

(P. Martinerie, G. Guérinot, M. Legrand)

Une part importante du travail de modélisation en chimie atmosphérique est présentée dans les activités de l'équipe Climat (modélisation de  $\delta^{13}\text{C}\text{H}_4$ , des hydrocarbures halogénés, et du cycle du soufre en Antarctique). Nous présentons ici le travail de modélisation de Guérinot (thèse 2000) qui fut mandatée par les enregistrements de panache de feux de forêts obtenus antérieurement au Groenland.

L'étude des carboxylates légers dans les carottes du Groenland a mis en évidence de brusques augmentations des teneurs dans certaines couches de glace d'été, attribuées à des épisodes de feux de forêts [*Legrand and De Angelis*, 1996]. La comparaison de ces données à la composition chimique de panaches de feux jeunes (environ 3 jours) au Canada suggère une évolution de la signature chimique des feux au cours de leur transport vers le Groenland. Les enregistrements de gaz solubles dans les neiges et glaces du Groenland montrent une nette influence du pH. Cette observation est à l'origine de l'introduction du calcul du pH dans le modèle (modèle 0-D à chimie complexe). A notre connaissance, les modèles existants calculent simplement des pH à l'équilibre de Henry, bien que les observations atmosphériques suggèrent que cet équilibre n'est pas toujours atteint. C'est pourquoi nous avons calculé le pH résultant de la cinétique de dissolution des gaz dans les gouttes d'eau.

L'évolution de la concentration des acides formique et acétique en phase gazeuse résulte de leur destruction par le radical OH et de leur production par oxydation des hydrocarbures non méthaniques. La chimie de l'éthène, du propène et de l'isoprène (hydrocarbures les plus importants pour notre étude) d'un modèle récent a été introduite dans notre modèle, et les principales voies de production d'acides carboxyliques ont été identifiées. Pourtant, les résultats montrent que les concentrations en acides formique et acétique en phase gazeuse évoluent peu au cours du vieillissement des panaches de feu. Ceci rejoint des observations antérieures selon lesquelles la production d'acide formique s'effectue très rapidement après l'émission des panaches, et est compatible avec les données publiées de concentrations atmosphériques au Groenland. Mais la chimie en phase gazeuse ne peut expliquer les valeurs très importantes du rapport formate/acétate observé dans les glaces du Groenland.

Les équilibres qui s'établissent à l'issue de la dissolution des gaz dans les gouttes d'eau (équilibres de Henry, équilibres acide-base) peuvent conduire à des rapports de concentration très différents entre phase condensée et gazeuse. Le modèle simule des rapports proches de ceux de la carotte de Summit pour des nuages de faible teneur en eau liquide, similaires aux brouillards radiatifs fréquemment

rencontrés au Groenland. Deux processus peuvent perturber ces équilibres : la destruction des acides carboxyliques en phase aqueuse par le radical OH, et la production d'acide formique par oxydation du formaldéhyde. Ces réactions se sont avérées trop lentes pour affecter les résultats à moins d'un transport prolongé en conditions nuageuses.

Le modèle utilisé ne permet pas de prendre en compte la phase glace. C'est pourquoi un calcul simple de l'impact de différents processus de formation de neige sur les concentrations dans la précipitation a été réalisé, à partir des concentrations en phase gazeuse et aqueuse modélisées ci-dessus. La comparaison des résultats de ces calculs aux données expérimentales issues des glaces du Groenland a conduit aux conclusions suivantes : dans la gamme de pH modélisés (pH compris entre les pKa des deux acides), l'acide formique est incorporé sous forme ionique (essentiellement par givrage). Au contraire, l'acide acétique est incorporé sous forme moléculaire (principalement par co-condensation). Si les concentrations en acide formique calculées sont proches des observations, les niveaux calculés pour l'acide acétique sont trop élevés. Nous suggérons que l'acide acétique, sous forme moléculaire, peut être ré-émis après le dépôt de la neige.

## **Chapitre 3**

# **EQUIPE METAUX LOURDS**

# EQUIPE METAUX LOURDS

Responsable : Claude BOUTRON

## PRINCIPAUX AXES DE RECHERCHE

Archives glaciaires polaires et tempérées des métaux lourds, de leur isotopie et de leur spéciation	Chimie atmosphérique du mercure en zone polaire et alpines
---	--

## COMPOSITION DE L'EQUIPE

	Archives glaciaires polaires	Chimie atmosphérique du mercure
<b>Chercheurs CNRS</b>		
<b>Enseignants Chercheurs</b>		
C. BOUTRON (PR0)	X	
C. FERRARI (MC)		X
<b>Doctorants (thèse en cours)</b>		
DOMMERGUE	X	X
	X	

## PUBLICATIONS (revues à comité de lecture)

Fin 1999	2000	2001
4	5	8

## PRINCIPALES COLLABORATIONS

*Nationales :* Institut pour la Recherche et le Développement  
 Université Blaise Pascal, Laboratoire de Météorologie Physique  
 (Clermont Ferrand)

*Internationales :* Environment Canada, Québec  
 INRS-Eau, Québec, Canada  
 National Environmental Research Institute, Danemark  
 Antarctic CRC, Hobart, Nouvelle Zélande  
 British Antarctic Survey, Cambridge, UK  
 Université d'Ohio, USA  
 Université d'Anvers  
 Korean Ocean Research and Development Institute  
 Curtin University of Technology, Perth, Australie  
 Université Ca Foscari de Venise, Italie  
 GKSS, Hambourg, Allemagne

## FINANCEMENT

	1999	2000	2001
<b>PROGRAMMES NATIONAUX</b>			
ATI-étude du mercure et des isotopes stables des BTEX en milieu atmosphérique urbain			
<b>COMMISSION EUROPEENNE</b>			
European Project for Ice Coring in Antarctica (EPICA)			
<b>AUTRES CONTRATS</b>			
ADEME			

## 1 - CADRE GENERAL

L'équipe « métaux lourds » a été créée en juin 1998 au sein du laboratoire, en réponse à la forte montée en puissance de cette thématique au cours des années précédentes, à la nomination de Claude Boutron comme membre senior de l'Institut Universitaire de France (avec renouvellement en juin 2000 pour une deuxième période de 5 ans) et au recrutement de Christophe Ferrari comme Maître de Conférences sur le poste créé à cette occasion.

Depuis, cette équipe a été particulièrement active malgré des moyens humains très limités sur le site de Grenoble (2 enseignants chercheurs, par ailleurs très impliqués dans la vie de l'Université, avec en moyenne 2 thésards et 1 stagiaire de DEA). Ceci a été rendu possible par les collaborations très fructueuses mises en place avec des laboratoires partenaires en Italie (Université Ca Foscari de Venise), Australie (Curtin University of Technology, Perth), en Corée (Korean Ocean Research and Development Institute) et en Belgique (Université d'Anvers). Ces collaborations donnent tout à la fois accès à des techniques analytiques très sophistiquées comme l'ICP-MS à haute résolution, la spectrométrie de masse à thermoionisation ou le couplage chromatographie ICP-MS à temps de vol, et à des moyens humains Adélocalisés@ très significatifs. C'est ainsi par exemple qu'un chercheur permanent (Sungmin Hong, ancien thésard de notre équipe) et un thésard travaillent à temps plein avec nous au Korean Ocean Research and Development Institute à Ansan près de Séoul. Malgré cela, les 2 enseignants chercheurs de l'équipe sont surchargés de travail et le recrutement d'un nouveau permanent (Maître de Conférences ou Chargé de Recherche CNRS) s'avère indispensable à court terme.

Ces dernières années ont vu notre équipe beaucoup diversifier ses activités. L'étude des métaux lourds dans les archives glaciaires reste bien sûr une thématique importante, mais avec une forte diversification des métaux étudiés rendue notamment possible par les étonnantes possibilités de l'ICP-MS à haute résolution. C'est ainsi qu'une bonne partie de nos efforts porte maintenant sur des métaux autres que le plomb ou le cadmium comme le platine, le palladium, le rhodium, le mercure, l'uranium, le bismuth ou l'argent. Par ailleurs, l'origine géographique de ces carottes a été elle aussi beaucoup diversifiée : au cours de ces dernières années, nous avons ainsi travaillé sur des échantillons provenant du Groenland, du Massif du Mont-Blanc, du massif du Mont-Rose, de Bolivie, et de plusieurs sites Antarctiques (Terre de Coats, Terre de Victoria, Law Dome, Dôme C et Ile de Livingston). Ceci à nouveau grâce à un vaste ensemble de collaborations avec par exemple l'Université de l'Ohio et l'IRD (Bolivie), le British Antarctic Survey (Terre de Coats) et l'Antarctic CRC de Hobart en Australie (Law Dome).

Mais d'autres thématiques ont été lancées. Il s'agit tout d'abord de l'étude de la spéciation du mercure dans l'air, les nuages et les précipitations neigeuses. Cette nouvelle thématique est au centre des activités de Christophe Ferrari et fait l'objet d'une thèse actuellement en cours (Aurélien Dommergue). Elle a bénéficié d'un soutien de l'INSU dans le cadre des Actions Thématiques Innovantes de de divers autres soutiens financiers (Ademe, Ministère de l'Environnement, ...) qui ont permis à notre équipe d'acquérir plusieurs instruments de mesure aussi bien pour la mesure de Hg dans l'air (3 analyseurs Gardis) que pour la mesure de Hg en solution aqueuse (analyseur Perkin Elmer FIMS 100). Elle repose aussi sur diverses collaborations, notamment avec le Laboratoire de Météorologie Physique de Clermont-Ferrand (mesure du mercure dans la phase interstitielle des nuages au Puy de Dôme), et avec le National Environmental Research Institute du Danemark et Environnement Canada (mercure dans le manteau neigeux et dans l'atmosphère au Groenland et dans l'Arctique Canadien).

Il s'agit enfin de l'étude des dépôts de métaux lourds dans le manteau neigeux alpin de moyenne altitude, dans le cadre d'une thèse (Audrey Veysseyre) co-financée par l'Ademe, EDF et le Ministère de l'Environnement. Travail qui a bénéficié d'un important soutien logistique des Parcs Nationaux et Régionaux et de divers autres organismes.

Après ce préambule, nous allons maintenant donner un panorama succinct des principaux résultats obtenus depuis 1999.

## 2. ARCHIVES GLACIAIRES DES METAUX LOURDS

(C. Boutron, F. Planchon)

Seuls les résultats obtenus en Terre de Coats seront décrits en détail. Les autres ne sont qu'énumérés rapidement.

### 2.1. Terre de Coats, Antarctique

Après avoir beaucoup travaillé sur le Groenland et les Alpes, nous avons consacré l'essentiel de nos efforts au cours de ces deux dernières années à l'Antarctique, et plus particulièrement à l'étude de la période post-révolution industrielle en Antarctique.

C'est ainsi qu'une thèse (Frédéric Planchon) a été consacrée à l'étude des variations de nombreux métaux (Al, V, Cr, Mn, Co, Cu, Zn, Ag, Cd, Ba, Pb, Bi and U), et des isotopes du plomb dans une excellente série d'échantillons couvrant en continu la période 1830-1990, prélevée par E. Wolff et ses collègues du British Antarctic Survey en Terre de Coats dans la région de la Mer de Weddell (secteur Océan Atlantique de l'Antarctique). Il s'agissait d'une série de blocs de neige prélevés selon des méthodes ultraproces particulièrement rigoureuses à partir des parois de 2 puits, et d'une carotte de neige obtenue à partir du fond de l'un des puits.

Les concentrations extrêmement basses rencontrées ont tout d'abord nécessité un important travail analytique d'amélioration des limites de détection et d'optimisation des blancs aussi bien pour l'ICP-MS haute résolution (ICP-SF-MS) (instrument Finnigan MAT Element) que pour la Spectrométrie de masse à thermoionisation (TIMS) et la spectrométrie d'absorption atomique avec four graphite (GFAAS). A titre d'exemple, il est maintenant possible de mesurer des concentrations d'U aussi basses que 0,003 pg/g ( $3 \times 10^{-15}$  g/g) ar ICP-SF-MS sur des échantillons de quelques millilitres (Planchon *et al.*, *Analyt. Chim. Acta* 450, 193-205, 2001). Ou encore il est possible de déterminer la concentration de Pb (par dilution isotopique avec un traceur enrichi en  $Pb^{205}$ ) et la composition isotopique de ce plomb ( $Pb^{204}$ ,  $Pb^{206}$ ,  $Pb^{207}$ ,  $Pb^{208}$ ) dans un échantillon de neige Antarctique ne contenant que quelques pg ( $10^{-12}$  g) de Pb (Vallelonga *et al.*, *Analyt. Chim. Acta*, *in press*).

La Figure 3.1 représente les variations de Pb (exprimées sous la forme des variations du facteur d'enrichissement crustal  $EF_{crust}$  (Pb) de ce métal par rapport à la composition de la croûte supérieure moyenne) et du rapport isotopique  $^{206}Pb/^{207}Pb$  dans la neige de la Terre de Coats de 1830 à 1990 (Planchon *et al.*, *Geochim. Cosmochim. Acta*, *soumis*).

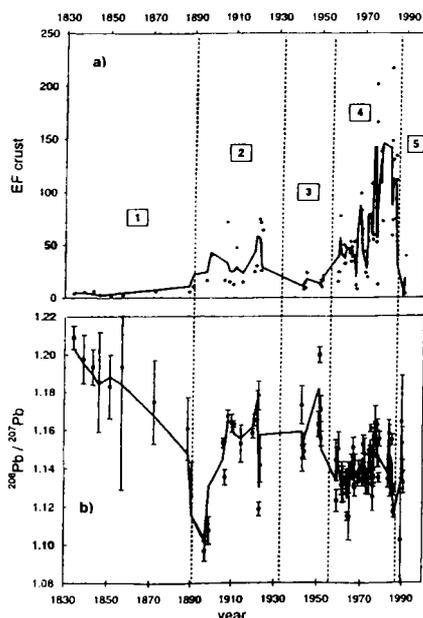


Figure 3.1. Variations du facteur d'enrichissement  $EF_{crust}$  (Pb) et du rapport isotopique  $^{206}Pb/^{207}Pb$  dans la neige de la Terre de Coats, Antarctique, de 1830 à 1990.

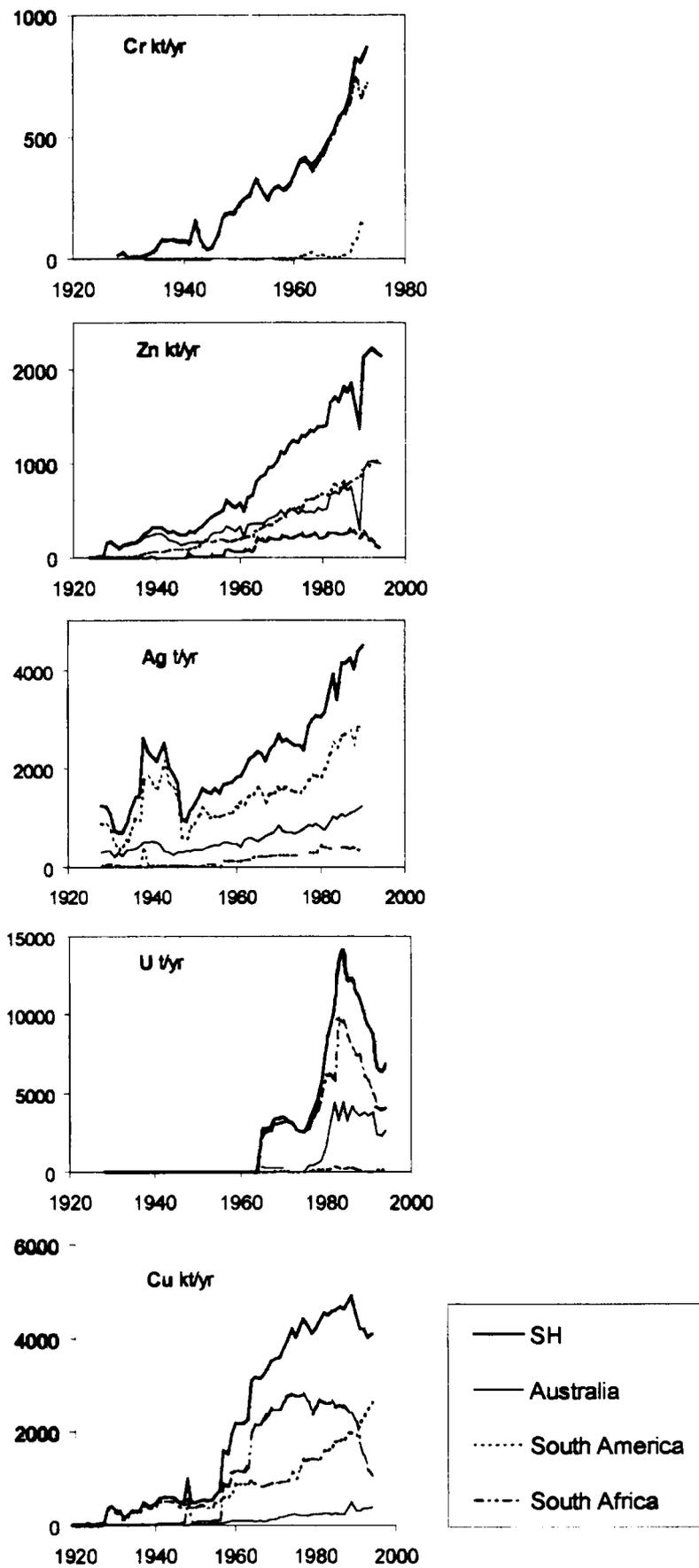


Figure 3.2. Terre de Coats, Antarctique : variations du facteur d'enrichissement crustal pour Cu, Zn, Ag, Bi et U de 1830 à 1990.

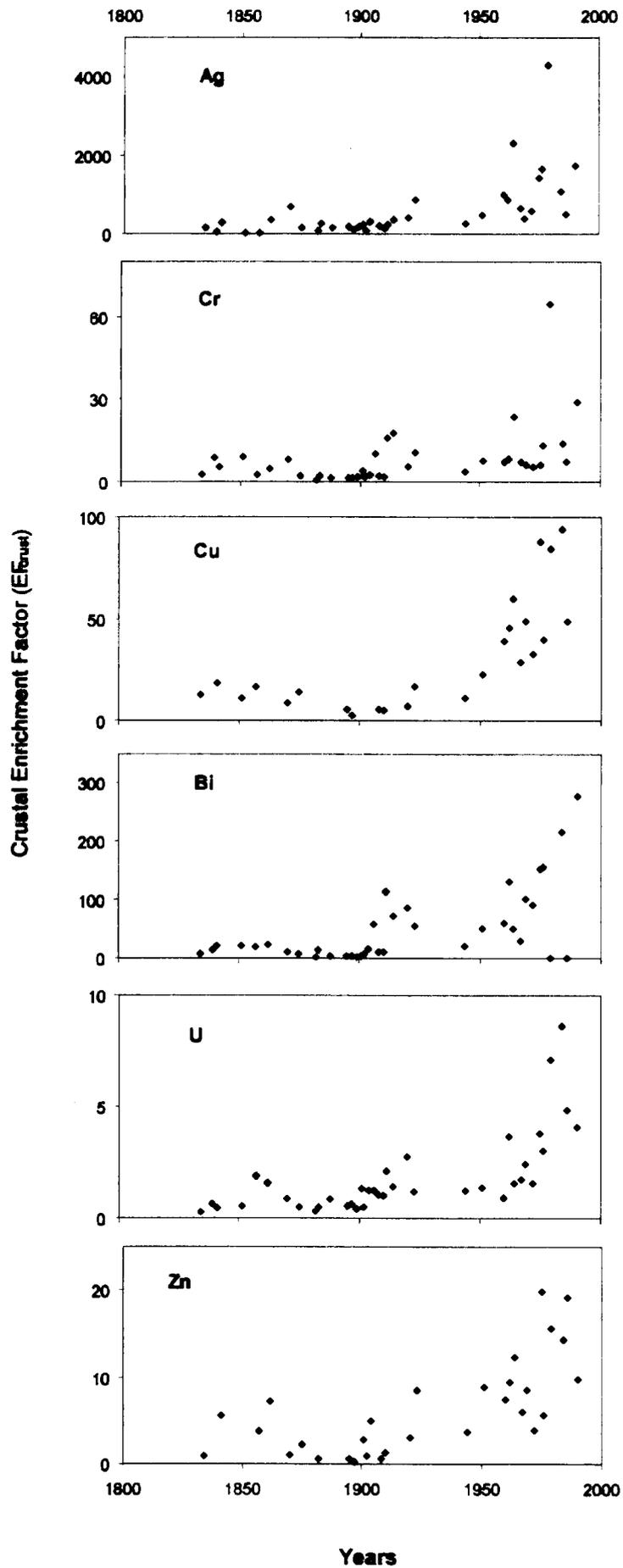
La Figure 3.1 montre que la pollution en Pb de l'Antarctique a débuté dès la fin du 19e siècle, avec plusieurs maxima successifs dans les années 1900, 1920 et 1970-1980. Si ce dernier maxima n'est pas vraiment une surprise (il est clairement lié à l'ascension puis à la chute des additifs au plomb dans l'essence dans les pays de l'hémisphère sud), les deux autres sont plus inattendus. Et encore plus extraordinaire est l'existence de signatures isotopiques très différentes pour les années 1900 ( $^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb} \cdot 1, 10$ ) et pour les années 1920 ( $^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb} \sim 1.16$ ). Ceci met en évidence d'importants changements d'apports anthropiques en ce début de siècle. Le maximum des années 1900 serait lié à des apports d'origine australienne, peut-être par suite de l'utilisation du charbon australien par les navires baleiniers. Le maximum des années 1920 serait par contre associé à des apports sud-américains, notamment liés aux importantes activités d'extraction minière de métaux non ferreux dans des pays comme le Chili ou le Pérou.

La Figure 3.2 représente les variations de Cu, Zn, Ag, Bi and U (à nouveau sous la forme de facteurs d'enrichissement crustaux) dans la neige de la Terre de Coats de 1830 à 1990 (*Planchon et al., Earth Planet Sci. Lett., soumis*). Cette figure montre une augmentation marquée des facteurs d'enrichissement de ces cinq métaux pendant la 2e moitié du vingtième siècle. Ceci indique que la pollution de l'Antarctique en métaux lourds ne se limite pas, comme on le pensait jusqu'ici, aux seuls Pb et Cu, mais concerne aussi divers autres métaux. Ceci illustre le caractère global de la pollution de l'atmosphère en métaux lourds.

Ces augmentations seraient pour une large part liées aux activités de production de métaux au Sud de l'Equateur, en Amérique Latine et en Australie, notamment au Chili, au Pérou, au Zaïre, en Zambie, en Afrique du Sud et en Australie. La production de minerai de divers métaux a fortement augmenté au Sud de l'Equateur au cours du 20e siècle, comme l'illustre la Figure 3.3 pour Cu, Zn, Ag et U (*Planchon et al., Earth Planet. Sci. Lett., soumis*). Ces activités minières ainsi que les activités de traitement de minerais sont connues comme d'importantes sources d'émissions de métaux vers l'atmosphère.

Plutôt inattendue est l'augmentation observée pour U. Une telle augmentation avait bien été observée au Mont-Blanc ; elle avait été attribuée pour l'essentiel au transport troposphérique des poussières très fines émises lors de l'extraction massive de minerai de ce métal à ciel ouvert dans les fameuses mines de la société SDAG Wismut dans l'ex RDA. Mais c'est la première fois qu'elle est observée en Antarctique. L'explication la plus vraisemblable est qu'elle serait due au transport de poussières émises dans les mines d'Uranium en Australie, en Afrique du Sud et en Namibie.

Nos données permettent aussi d'avoir un premier aperçu des variations à court terme (intra et interannuelles) des concentrations de métaux lourds dans les neiges Antarctiques (*Planchon et al., The Sci. Tot. Environ., soumis*). Ces variations n'avaient jusqu'ici pratiquement jamais été étudiées. Les données obtenues en terre de Coats montrent une très importante variabilité intra et interannuelle des concentrations, avec des apports pulsés sur lesquels les isotopes de Pb donnent de précieuses informations. Par ailleurs, elles permettent d'étudier les couches marquées par des retombées volcaniques d'origine lointaine (éruption de l'Agung au début des années 1960) ou plus locale (volcans de l'Ile de Deception).



*Figure 3.3. Evolution de la production de minerais de Cu, Zn, Ag et U au Sud de l'Equateur des années 1920 à nos jours.*

## 2.2. Autres sites antarctiques

En parallèle au travail effectué en Terre de Coats dans le cadre de la thèse de Frédéric Planchon, nous avons participé à l'étude de carottes prélevées en Terre de Victoria (Glacier Styx dans la région de la base italienne de Terre Nova Bay) et au Law Dome par nos collègues italiens et australiens. Il s'agissait d'étudier la période post-révolution industrielle de ces deux sites qui complètent très bien géographiquement la Terre de Coats. Les efforts ont surtout porté sur les isotopes de Pb, et les résultats correspondants seront bientôt soumis pour publication. Il est intéressant de mentionner qu'une partie essentielle du travail sur ces deux autres sites a été effectuée en Australie par deux anciens thésards de notre équipe (Katja Van de Velde (séjour post-doctoral de 2 ans à Curtin University of Technology à Perth) et Jena-Pierre Candelone (CDD à l'Antarctic CRC de Hobart)).

Nous avons également participé à l'analyse de divers échantillons prélevés par notre ancien thésard Sungmin Hong sur l'île de Livingston, au large de l'extrémité Nord de la Péninsule Antarctique (Hong et al., *J. Korean Soc. Atmosph. Environ.* 16, 85-96). Il s'agit d'un site rendu particulièrement intéressant par sa proximité de la pointe sud de l'Amérique du Sud.

## 2.3. Sajama, Bolivie

Nous avons lancé un vaste programme d'étude des métaux lourds dans la très intéressante carotte de neige/glace prélevée en 1997 par l'IRD et l'Université de l'Ohio à une altitude d'environ 6500 m sur la calotte glaciaire froide du Sajama à l'Ouest de la Bolivie. Cette carotte couvre près de 25000 ans. En ce qui concerne les métaux lourds, son intérêt principal réside dans la possibilité qu'elle ouvre d'étudier les périodes des Incas et surtout des Conquistadors. Ces périodes ont en effet été marquées par une activité très importante d'extraction minière, notamment pour Ag et Au, avec utilisation d'énormes quantités de Hg.

Depth and age of the core section				
Metal <sup>a</sup>	124 m <sup>b</sup> (22.000 BP)	101 m <sup>c</sup>	60 m <sup>d</sup> (AD 1650)	40 m <sup>e</sup> (AD 1897)
Al	205.000	140.000	540.000	373.000
Na	63.000	74.000	165.000	118.000
Ti	1400	1630	380	960
V	56	150	71	105
Cr	34	45	10	24
Mn	2460	3525	5160	3620
Co	61	35	56	43
Cu	90	240	58	147
Zn	266	224	205	380
Mo	5.5	14.4	8.3	10.5
Pd	0.32	0.42	0.28	0.32
Ag	0.54	0.66	0.58	1.71
Cd	1.8	4.0	6.0	7.9
Sb	1.6	2.5	5.1	111
Ba	1780	1910	1300	1290
Pt	0.09	0.10	0.12	0.14
Au	0.08	0.08	0.08	0.08
Pb	30	90	57	356
Bi	0.30	1.7	0.37	7.1
U	4.4	8.1	2.7	5.3

<sup>a</sup> metals are ranked according to increasing atomic weights

<sup>b</sup> depth interval : 124.45 - 124.80 m

<sup>c</sup> depth interval : 101.57 - 101.92 m

<sup>d</sup> depth interval : 60.0 - 60.35 m

<sup>e</sup> depth interval : 40.07 - 40.43 m

**Table 1.** Concentration de vingt métaux dans des carottes de glace du Sajama, Bolivie. Toutes les concentrations sont exprimées en pg/g (1 pg = 10<sup>-12</sup> g)

Nous avons tout d'abord effectué une étude préliminaire de quelques sections de carottes datant de 22000 ans BP à AD 1897. Le Tableau 1 montre les concentrations de 20 métaux mesurées dans 4 de ces carottes (Ferrari et al., *Atmosph. Environ.* 35, 5809-5815, 2001). D'autres sections sont actuellement en cours d'analyse, avec pour objectif l'obtention de séries temporelles détaillées pour les périodes des Incas et des Conquistadores, du même type que celles que nous avons obtenues au Groenland pour l'Antiquité Gréco-Romaine et qui avaient fait l'objet de deux articles dans la revue Science.

## 2.4. Groenland et Alpes

Nous avons continué la publication des très nombreux résultats obtenus au cours de ces dernières années. C'est ainsi qu'ont été publiés en Mars 2001 les profils de Pt, Pd et Rh obtenus à Summit au Groenland pour les dernières décennies (Barbante et al., *Environ. Sci. Technol.*, 35, 835-839, 2001). Ces résultats avaient été décrits en détail dans le précédent rapport d'activité Cet article a eu un retentissement considérable car il remet quelque peu en cause la stratégie « tout pôt catalytique » en vogue. Il a été sélectionné comme l'un des « 100 meilleurs articles scientifiques de l'année 2001 » (toutes disciplines scientifiques confondues) par le magazine américain « Observer ». Il a été largement repris par la presse écrite française et étrangère, la radio et la télévision (A2, FR3, M6, Télévision Suisse-Romande, ...).

Nous avons aussi poursuivi la publication des nombreux résultats obtenus au Mont-Blanc (col du Dôme) au cours de la thèse de Katja Van de Velde puis au cours du stage de DEA d'Ann Lauremoreau. C'est notamment le cas pour le profil d'U (Barbante et al., *Environ. Sci. Technol.* 35, 4026-4030, 2001), pour le profil d'isotopes du Plomb (Rosman et al., *Earth Planet. Sci. Lett.* 176, 413-424, 2000), et pour les résultats obtenus pour V et Ni (Moreau et al., *Atmospheric Environment*, soumis).

## 2.5. Autres archives

Comme cela est le cas depuis de nombreuses années, nous avons continué à nous intéresser à d'autres types d'archives lorsque l'occasion se présentait. C'est ainsi que nous avons étudié les isotopes du plomb sur des carottes de sédiments du Lac d'Annecy couvrant une bonne partie de l'Holocène. A titre d'illustration, la Figure 3.4 montre les variations observées pour le rapport isotopique  $^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$  et pour les concentrations de Pb (Vallelonga et al., *Environ. Sci. Technol.*, soumis).

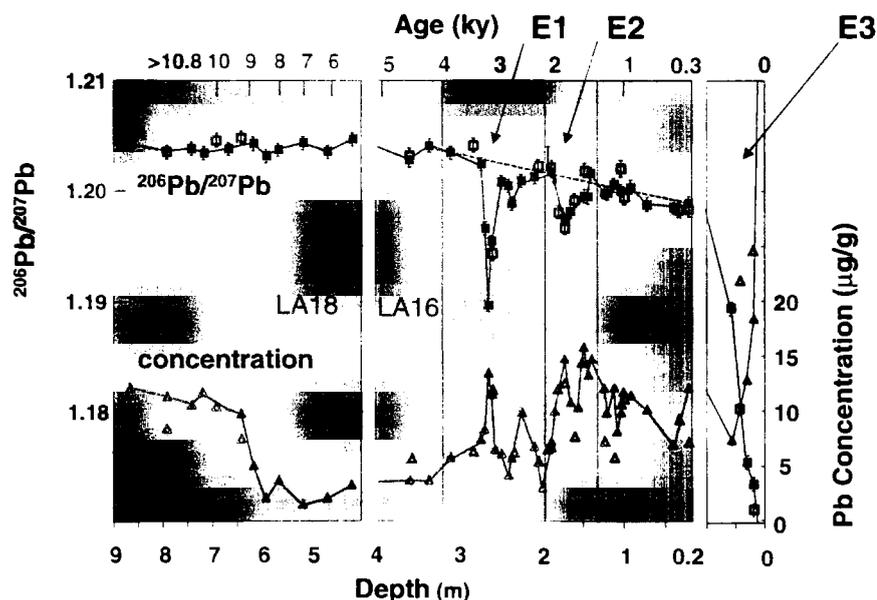


Figure 3. 4. Variations du rapport isotopique  $^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$  et des concentrations de Pb dans les sédiments du Lac d'Annecy au cours de l'Holocène.

Ces données montrent une influence humaine dès ~ 5000 ans BP. Trois épisodes de pollution en Pb sont observés : le premier il y a ~ 3100 ans, d'une durée de 200 ans environ, serait lié à des activités minières locales des tribus celtes ; le second il y a 2000 ans environ, serait lié à l'installation d'un camp romain au bord du lac ; le troisième débute il y a ~ 300 ans et correspond à l'industrialisation de l'Europe.

### 3 SPECIATION DU MERCURE DANS L'AIR, LE NUAGE ET DANS LES PRECIPITATIONS NEIGEUSES

Les études menées sur la spéciation du mercure dans l'atmosphère ont été réalisées grâce au soutien de l'INSU dans le cadre des Actions Thématiques Innovantes.

#### 3.1 Extension des bases de données françaises en TGM (Total Gaseous Mercury). Surveillance de l'exposition des populations, évolutions temporelles et spatiales des concentrations en mercure.

Au sein de l'union européenne, la France est en retard en ce qui concerne la mesure du mercure atmosphérique gazeux puisque à ce jour n'existaient sur notre territoire que quelques données ponctuelles. Nous avons initié les premières mesures à long terme sur trois types de site : un site urbain, un site péri-urbain sous l'influence directe de sources et un site de fond.

##### 3.1.1. MESURE DU MERCURE GAZEUX A CHAMP SUR DRAC. INFLUENCE DES SOURCES ANTHROPIQUES.

(C. Ferrari, A. Dommergue)

Au cours de l'année 1999-2000, nous avons effectué 4 campagnes intensives de mesure du mercure gazeux dans l'agglomération de Champ sur Drac (sud de Grenoble). Ces campagnes de mesure, d'une durée de 10 jours environ, réparties selon chaque saison ont été couplées avec les mesures simultanées de O<sub>3</sub>, SO<sub>2</sub>, NO, NO<sub>2</sub> ainsi que de nombreux paramètres météorologiques fournis par l'ASCOPARG (ASsociation pour le COntôle et la Préservation de l'Air de la Région Grenobloise). Sur l'ensemble de ces campagnes (*i.e.* 3600 points de mesures), la moyenne des concentrations en TGM était de 3.4 ng/m<sup>3</sup>. Cette valeur est acceptable au regard des concentrations couramment mesurées dans la troposphère, et elle est, de plus, bien en deçà des normes fixées par l'OMS.

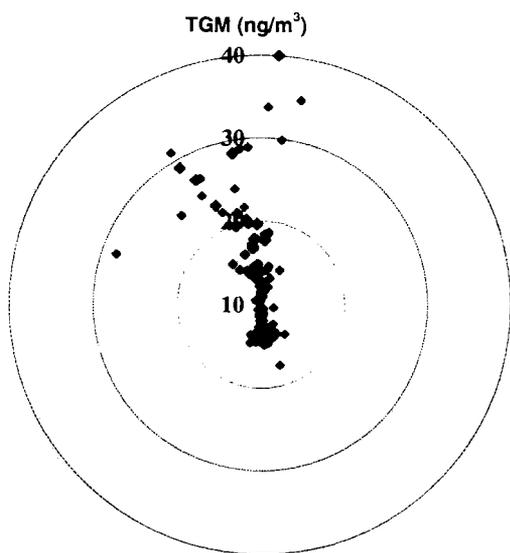


Figure 3.5 : Concentration en mercure atmosphérique en fonction de la direction du vent. L'échelle de concentrations commence à 10 ng

Cependant il apparaît qu'épisodiquement, à la faveur de conditions météorologiques particulières, des concentrations 10 à 15 fois supérieures sont mesurées. Grâce à une estimation des sources potentielles de mercure dans l'agglomération grenobloise, nous avons pu déterminer que les principaux émetteurs de mercure étaient l'usine de production de chlore soude (utilisation d'électrolyseurs au mercure) sur le site de Jarrie et l'incinérateur de déchets de Grenoble, situés tous deux au nord de notre site de

mesure (Dommergue et al., soumis). Leur influence est illustrée sur la figure 3.5 représentant les concentrations en mercure supérieure à  $10 \text{ ng/m}^3$  en fonction de la direction du vent (seules les concentrations pour lesquelles les vitesses de vent sont supérieures à  $1 \text{ m/s}$  ont été gardées).

### 3.1.2. MESURES EN SITE URBAIN. EXPOSITION DES POPULATIONS.

Dans l'optique de mesurer l'influence du trafic automobile sur les concentrations en mercure et d'observer les niveaux en milieu urbain, un analyseur de mercure a été placé sur le Boulevard Foch à Grenoble. Ces mesures en parallèle avec celles de l'ASCOPARG (NO, SO<sub>2</sub>, PM<sub>10</sub>, CO et compteur de trafic) ont été réalisées du 25/04/2001 au 17/05/2001. Les niveaux mesurés sont en moyenne nettement supérieurs à ceux mesurés à champ sur Drac, puisque le TGM moyen est de  $4.7 \text{ ng/m}^3$ . A première vue, le niveau d'exposition des populations est plus élevé qu'ailleurs, sans que l'on puisse pour autant imputer aux automobiles cet air plus pollué en mercure. En effet, bien que ce site soit très proche d'une voie à grande circulation (entre 40 000 et 70 000 véhicules circulent chaque jour : à titre de comparaison, la circulation moyenne annuelle sur l'A7 est de 50 000 véhicules /jours), les variations de trafic ne s'accompagnent pas de variations conjointes des concentrations en mercure gazeux. Cependant il convient de rester prudent quant à l'interprétation de telles données puisque nos mesures ne prennent pas en compte le mercure particulaire qui, en règle générale, ne représente qu'une faible proportion du mercure atmosphérique (i.e moins de 1%). En milieu pollué, cette part peut s'accroître de manière non négligeable puisque le mercure particulaire peut représenter jusqu'à 15-20% (voire beaucoup plus près de zone de forte émission) du mercure atmosphérique total.

### 3.1.3. MESURES EN SITE DE FOND.

Depuis le mois de mars 2001, un analyseur mesure en continu le mercure à Chamonix (figure 3.6). Les niveaux mesurés y sont très faibles (inférieurs à  $1 \text{ ng/m}^3$ ) et une variabilité diurne est observable. Cette variabilité peut être expliquée par les mouvements de masse d'air dans la vallée, mais aussi par des phénomènes d'émissions liées à l'ensoleillement et l'augmentation de température. A plus long terme, cet analyseur sera basé en continu dans la vallée de Chamonix et permettra l'acquisition de bases de données conséquentes en mercure. De plus, dans le cadre de nos expériences sur la neige (cf. parties suivantes), ces mesures s'avèrent d'une grande utilité afin de comparer un signal de fond de vallée avec des mesures effectuées en altitude.

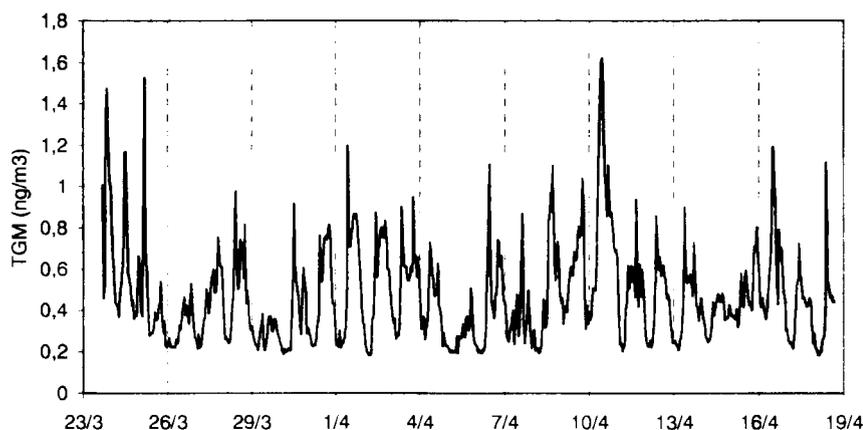


Figure 3.6 : Mercure atmosphérique gazeux mesuré à Chamonix du 23 mars au 19 avril 2001

## 3.2. Compréhension des mécanismes de dépôts et d'échange en mercure entre atmosphère et manteau neigeux.

Afin de faire le lien entre concentration atmosphérique et concentration dans la neige, il est important d'examiner attentivement les processus physico-chimiques intervenant aussi bien dans l'atmosphère que dans le manteau neigeux.

### 3.2.1. FORMATION DES PRECIPITATIONS. TRANSFERTS A L'INTERFACE LIQUIDE/GAZ DANS LES NUAGES

(C. Ferrari, A. Dommergue, P. Laj)

Pour la première fois, le mercure gazeux a été échantillonné dans les nuages. Ces expériences ont été conduites en mars 2001 en collaboration avec le LaMP (Laboratoire de Météorologie Physique) de Clermont-Ferrand au sommet du Puy de Dôme (1465 m). Les dispositifs expérimentaux présents nous ont permis d'échantillonner la phase interstitielle des nuages grâce à l'utilisation du RJ (Round Jet Impactor). En couplant cet appareil avec un analyseur de mercure nous avons pu déterminer les concentrations en mercure gazeux dans la phase interstitielle des nuages. En parallèle, un deuxième analyseur mesurait le mercure total dans l'atmosphère, nous permettant de déduire par différence les concentrations en mercure dans la phase aqueuse du nuage. Des données multiples de polluants, du rayon des gouttelettes, du contenu en eau complètent cette étude du nuage. Les premiers résultats montrent des teneurs en mercure élevées dans les gouttes contrairement aux estimations théoriques ainsi qu'aux valeurs obtenues par divers modèles atmosphériques. Cette sursaturation à l'intérieur des gouttelettes de nuage pourrait être expliquée par la présence d'autres espèces du mercure (par prises en compte dans les calculs) et/ou par une réactivité chimique différente de celle mentionnée habituellement. La présence de particules de carbone dans l'atmosphère semble jouer un rôle prépondérant dans cette chimie atmosphérique (Dommergue et al., 2001). L'analyse de ces données se révèle très délicate du fait de la complexité des phénomènes mis en jeu (processus physiques d'adsorption, réactivité chimique et photochimique en milieu hétérogène). En l'état actuel des choses, nous ne pouvons comparer ces données avec des expériences similaires étant donnée leur unicité. Dans l'avenir, de façon à faire un lien direct entre les nuages et le manteau neigeux, il serait intéressant de répéter cette série d'expériences dans des nuages plus froids.

### 3.2.2. TRANSFORMATIONS PHOTOCIMIQUES DANS LE MANTEAU NEIGEUX.

(C. Ferrari, A. Dommergue)

Au cours de l'année 2000, des expériences conduites en laboratoires ont démontré l'existence de processus photochimiques dégradant certains complexes du mercure. Des échantillons de neiges alpines collectés au cours de l'année précédente ainsi que quelques échantillons de neige collectés à la fin d'hiver 2000 ont été analysés en mercure au sein du laboratoire. La méthode analytique couple un spectromètre d'absorption atomique vapeur froide et un réacteur chimique en téflon (Ferrari et al., 2000). Brièvement, l'échantillon est traité par une solution de chlorure stanneux permettant la réduction des complexes de mercure II réactif en mercure élémentaire gazeux, ensuite entraîné par un flux d'air comprimé vers l'analyseur. Ces mesures couplées à des mesures par chromatographie ionique ont montré que le pH de la neige est le paramètre déterminant la nature chimique des complexes présents dans le manteau neigeux. Ainsi, nous avons pu montrer que lorsque le pH de la neige est inférieur à 4, les complexes mercuriels majoritaires sont  $\text{HgCl}_2$  et  $\text{HgC}_2\text{O}_4$ . Lorsque le pH est plus élevé, correspondant à des précipitations peu influencées par des apports anthropiques, le complexe majoritaire est  $\text{Hg}(\text{OH})_2$  (Dommergue, 2000 ; Ferrari et al., sous presse). Ces complexes, comme l'ont démontrées certaines études effectuées en laboratoire, sont susceptibles d'être réduits sous l'action de la lumière, ce qui pourrait expliquer leur disparition au sein du manteau neigeux. Ce phénomène conduirait à un flux de ré-émission de mercure gazeux vers l'atmosphère.

## 4 - QUANTIFICATION DES DEPOTS DE METAUX LOURDS DANS LE MANTEAU NEIGEUX SAISONNIER

Cette étude s'est déroulée sur une période de deux ans, intégrant ainsi deux hivers: 1997-98 et 1998-99 et porte sur le massif alpin exclusivement, entre à l'Est les frontières italiennes et suisses et à l'Ouest, la vallée du Rhône. Le domaine d'étude a été délimité à cette région, d'une part car il fallait trouver un domaine de montagne où l'on avait des altitudes suffisamment élevées (> 1500m) pour obtenir un manteau neigeux conséquent pendant une assez longue période. D'autre part, la région Rhône-Alpes est dotée de vallées fortement industrialisées, avec un fort trafic routier, ce qui nous a permis de suivre entre autre des polluants traceurs ainsi que leur répartition spatiale, et les niveaux de contamination des Alpes.

La principale caractéristique de ce protocole de prélèvement « propre » est d'être vêtu de vêtements non émissifs de poussières, de porter des gants en polyéthylène non contaminant pour les échantillons,

et d'utiliser du matériel en polyéthylène ayant fait l'objet au préalable d'un nettoyage poussé dans les salles blanches du L.G.G.E. La procédure de prélèvement se doit d'être suivie avec précaution, afin d'éviter au possible tout problème de contamination des échantillons (voir photo 1).



Photo 1: Site de Sixt (Chablais).  
L'opérateur effectue un puits au pied  
de la balise jusqu'à  
atteindre la plaque de repérage.  
(photo: agent APEGE)

Au cours de ce travail, les cartographies des flux de métaux lourds (Pb, Cd, Zn, Cu, As, Ni, Cr, Ag) dans les Alpes Françaises ont été dressées, répondant ainsi au besoin de l'ADEME et du Ministère de l'Aménagement du Territoire et de l'Environnement, de posséder des données précises sur le dépôt atmosphérique de ces métaux.

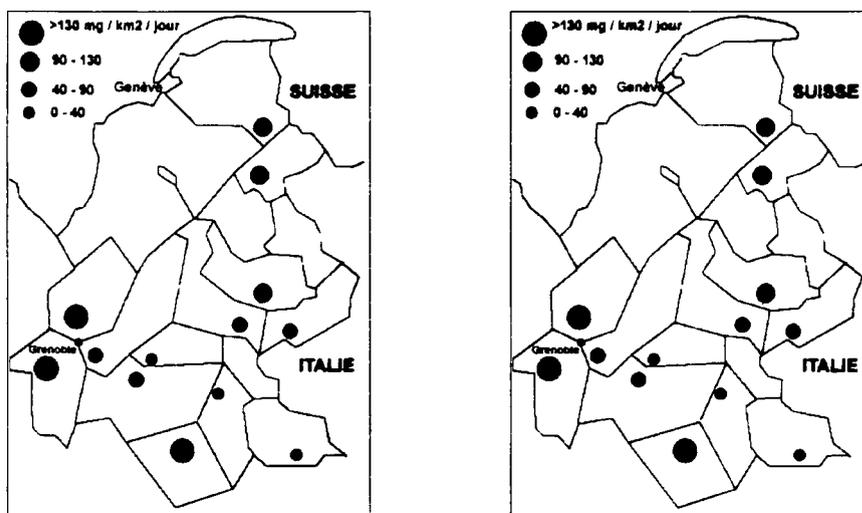


Figure 3.7. : Flux de Cadmium 1997-98 (en mg / km<sup>2</sup> / jour) et flux de Cadmium 1998-99 (en mg / km<sup>2</sup> / jour)

Ces outils permettront dans un second temps d'accéder à des cartes d'excès de polluants, destinées à évaluer les réductions d'émissions nécessaires pour préserver les milieux naturels européens. Ces cartes de dépôt (qui ne correspondent qu'à la période hivernale) montrent en général des niveaux relativement faibles, comparables à ceux obtenus dans d'autres études menées en France et en Europe sur des sites dits de "bruit de fond". Il existe cependant une grande variabilité en fonction des massifs considérés, qui a pu être observée grâce au maillage relativement fin du massif alpin.

Au delà de ce travail de cartographie, cette étude s'est attachée à identifier les différents facteurs influençant la localisation et l'importance du dépôt, qui se traduit par cette grande variabilité entre les différents massifs. Trois paramètres clés gouvernent ce dépôt:

- **Le paramètre source**, c'est à dire principalement le trafic routier et les industries de la région Rhône-Alpes. En superposant les cartes de dépôts à la carte localisant les principaux sites industriels émetteurs de poussières de la région Rhône-Alpes, on s'aperçoit que les massifs les

plus au sud, qui reçoivent les dépôts les moins importants, sont également ceux où les établissements industriels sont les moins implantés. Au contraire, les sites environnant l'agglomération Grenobloise ou encore la vallée de la Maurienne, montrent bien souvent des dépôts relativement plus élevés, qui sembleraient se justifier par la présence importante et la proximité des sites industriels.

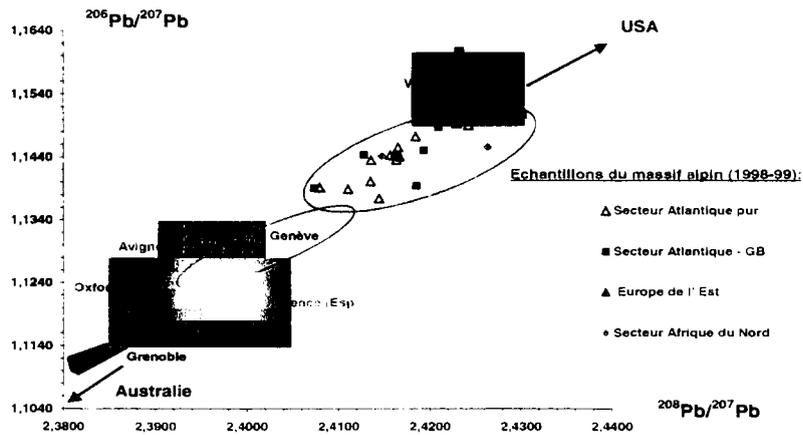
- **Le paramètre météorologique**, c'est à dire les trajectographies et l'évolution des masses d'air à l'origine des précipitations neigeuses. Ces dernières ont pu se charger en polluants au cours du transport et possèdent ainsi une composition chimique caractéristique d'une source longue distance.
- **Le paramètre géographique**, c'est dire le relief montagneux. Ce dernier peut générer des situations très particulières en période hivernale telles que les couches d'inversion, dont la formation permettra ou non la dispersion des polluants à plus haute altitude. Ce relief constitue également le premier obstacle aux perturbations d'origine atlantique, majoritaires en période hivernale, et influencera donc fortement l'intensité des précipitations et donc l'importance du dépôt.

L'étude particulière menée sur le site de l'Alpe du Grand Serre (au cours de laquelle nous avons déterminé la signature isotopique d'échantillons de neige et de filtres atmosphériques collectés parallèlement), et une analyse fine, détaillant chaque massif et événement neigeux, nous a permis de conclure que les dépôts atmosphériques observés dans le massif alpin possèdent une double origine:

- o d'une part les polluants issus du lessivage "dans le nuage", et qui peuvent être issus d'un transport moyenne ou longue distance, en fonction du trajet de la masse d'air, de son altitude et des précipitations survenant au cours de ce trajet qui vont charger ou décharger la masse d'air en polluants. L'efficacité de ce lessivage dépendra beaucoup du type de nuage conduisant à la précipitation, et des conditions de température régnant au sein du nuage (processus de givrage).
- o d'autre part les polluants issus du lessivage "sous le nuage", et qui sont caractéristiques des émissions régionales. L'importance relative de ces polluants sera fonction de la localisation du site de prélèvement par rapport aux sites industriels pouvant induire une contamination. Les conditions météorologiques auront également leur importance, en permettant ou non une recharge suffisante de l'atmosphère ou encore la création de couches d'inversions qui isoleront nos sites des émissions régionales.

Il n'existe donc pas de cas général pour l'ensemble du massif alpin, les polluants observés résultent d'un mélange entre des émissions régionales et celles issues d'un transport à longue distance. Les premières sont souvent prépondérantes en terme de concentration, du fait de leur proximité, et "noient" le signal longue distance, difficilement identifiable. La détermination de la composition isotopique du plomb ne nous permet pas clairement de discriminer ces différentes sources, les principaux candidats, comme les émissions italiennes ou les émissions industrielles françaises possédant des signatures assez similaires. Il ressort cependant que les dépôts observés sur les sites en bordure de la frontière italienne semblent être influencés par les émissions de ce pays. On note également que le plomb issu des émissions automobiles n'est plus majoritaire et que l'utilisation croissante de l'essence sans plomb laisse apparaître une signature industrielle plus radiogénique, qui caractérise désormais les émissions françaises (voir figure 3.8).

L'ensemble de ces observations fait donc ressortir une situation complètement différente de ce qui peut se passer sur les sites côtiers où les apports longue distance sont aisément distingués dans les pluies et les aérosols. Cette situation semble caractéristique du massif alpin, car d'une part, il est situé à l'intérieur du continent, laissant le temps à la masse d'air de se décharger avant d'atteindre les sites considérés. D'autre part, le relief influence fortement la dispersion des polluants et la localisation du dépôt



*Figure .3.8 : Composition isotopique d'échantillons de neige du massif alpin et d'aérosols atmosphériques issus de villes européennes.*

Finalement, nous nous sommes intéressés à l'influence des émissions régionales sur la répartition altitudinale des polluants dans les vallées, avec une étude menée dans les vallées de Chamonix et de la Maurienne, sur deux hivers consécutifs. Cette étude a montré qu'il existait une tendance décroissante des concentrations en métaux lourds dans la neige lorsque l'on s'élève en altitude. L'utilisation de la signature isotopique du plomb nous a permis d'établir que cette tendance n'était pas liée à un phénomène de dilution de l'échantillon. Cet outil fait apparaître clairement la contribution des émissions italiennes sur le dépôt total en plomb, mais ne nous permet pas de déterminer la contribution relative de chaque source.

Il semble que la répartition des polluants en fonction de l'altitude soit beaucoup plus complexe. En effet, des phénomènes météorologiques très locaux étant à prendre en compte (couche d'inversion, écoulement de vent le long des pentes...) et une simple mesure des concentrations de métaux lourds pour étudier leur distribution spatiale est insuffisante. C'est pourquoi nous nous sommes impliqués dans un travail de collaboration avec d'autres équipes de recherche pour établir un modèle de transport méso-échelle des polluants appliqué aux vallées alpines qui pourrait nous permettre de compléter nos résultats et d'approfondir leur exploitation.

## **Chapitre 4**

# **EQUIPE RHEOLOGIE DES GLACES ET MODELISATION DES CALOTTES POLAIRES**

# EQUIPE "RHEOLOGIE DES GLACES"

Responsable Jacques MEYSSONNIER

## PRINCIPAUX AXES DE RECHERCHE

<b>Modélisation des calottes polaires</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>○ RA</li> <li>○ Evolution</li> <li>○ Interpretation des formations glaciaires</li> </ul>
<b>Rhéologie des glaces</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>○ Mécanismes physiques de la déformation des glaces (microstructure, recristallisation, déformation hétérogène et localisée)</li> <li>○ Comportement mécanique des glaces polaires anisotropes</li> <li>○ Modélisation du comportement anisotrope et de l'évolution des textures des glaces polaires</li> <li>○ Développement d'un modèle de calotte polaire intégrant l'anisotropie de la glace et son évolution</li> </ul>
<b>Interaction glace – structure</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>○ Endommagement, fracturation et fragmentation de la glace</li> <li>○ Rôle du glissement intergranulaire</li> <li>○ Couplage comportement / endommagement</li> <li>○ Frottement glace - matériau de structure</li> </ul>

## COMPOSITION DE L'EQUIPE

		GLACES	INTERACTIONS GLACE-STRUCTURE
P. DUVAL (DR)	X	X	
J. MEYSSONNIER (DR)	X	X	X
J. LEBLANC (CR)	X		
J. WEISS (CR)		X	X
<b>Enseignants-chercheurs</b>			
A. PHILIP (MC)	X	X	
J. LEBLANC (MC)		X	
<b>Doctorants (thèse en cours)</b>			
C. DUMAS	X		X
A. HEMELUTTER		X	X
A. DEMONCHIEU		X	
G. DURAND		X	
<b>Post-doc</b>			
S. WADDE			X

## PUBLICATIONS (revues à comité de lecture)

Fin 1999	2000	2001
11	13	16

## PRINCIPALES COLLABORATIONS

*Nationales :* LPMTM (Villetaneuse)  
 ENS (Cachan)  
 LPCES (Orsay)  
 LMSSMat-ECP  
 LSCE (Saclay)  
 LEGOS (Toulouse)  
 LMC (Grenoble)  
 LGIT (Grenoble)  
 L3S (Grenoble)  
 L3S-CEMAGREF (Grenoble)

*Internationales :* IRAA, Saint Petersburg  
 Université de Rosario, Argentine  
 Dartmouth College, Ice Research Laboratory, USA  
 AWI Bremerhaven, Allemagne  
 ICTP Trieste, Italie  
 INFN Rome, Italie  
 Université de Barcelone, Espagne  
 Université de Milan, Italie  
 Université de Bologne, Italie  
 Université de Californie à Santa Cruz, USA  
 Université de Toronto, Canada

## FINANCEMENT

	1999	2000	2001
<b>PROGRAMMES NATIONAUX</b>			
<b>PNEDC</b>			
ATI -phénomènes critiques et invariances d'échelle dans les processus de déformation et de rupture des géomatériaux			
ATI (dynamique des transferts terrestres)			
<b>COMMISSION EUROPEENNE</b>			
Measurements on structures in ice (STRICE)			
European Program for ice coring in Antarctica (EPICA)			
Networking studies on ice and compliant structures (NEST)			
Validation of low level ice forces on coastal structures (LOLEIF)			
<b>AUTRES CONTRATS</b>			
MICHELIN			

Les travaux de l'équipe dans les deux principaux thèmes que sont la rhéologie des glaces polaires et la modélisation des calottes polaires font désormais référence dans la communauté des glaciologues.

Dans le domaine de la rhéologie, les travaux récents de ces deux dernières années permettent d'accroître le contenu physique d'une modélisation multi-échelles décrivant la déformation du cristal de glace, du grain dans le polycristal, le comportement du polycristal, jusqu'à l'écoulement « local » d'une calotte (à l'échelle de son épaisseur).

Concernant la modélisation des calottes polaires appliquée à l'étude du climat, nous faisons partie du groupe de tête avec l'un des rares modèles de l'Antarctique intégrant les ice-shelves et les ice-streams qui jouent un rôle majeur sur la stabilité de cette calotte.

Cette capacité à conjuguer les études sur le matériau glace et les applications géophysiques constitue la force de notre équipe.

Notre contribution à l'étude des mécanismes mis en jeu dans l'endommagement et la fracturation de la glace est reconnue comme un apport fondamental par la communauté du Génie Civil en régions polaires traitant des Interactions Glace-Structure, ce qui se traduit par notre participation à plusieurs contrats européens dédiés à l'établissement de normes de construction pour les ouvrages soumis à l'action des glaces (LOLEIF, STRICE, NEST).

D'autre part, les collaborations engagées en Science des Matériaux et en Géophysique montrent que la glace peut être considérée comme un matériau modèle en dehors du champ de la glaciologie : par exemple, l'étude de la densification du névé polaire, du comportement mécanique de la neige ou de la recristallisation peuvent s'inscrire dans le cadre plus général de l'étude du frittage des poudres (céramiques, métaux, mousses) ; la simulation d'un écoulement de glace polaire développant une anisotropie induite évoque celle de la mise en forme des métaux ; l'étude des mécanismes de fissuration s'intègre dans le cadre plus général de l'étude du comportement des géomatériaux.

## **1 RHEOLOGIE DES GLACES POLAIRES ET MODELISATION DES CALOTTES POLAIRES.**

Les calottes polaires jouent un rôle important dans le système climatique. La modélisation de leur évolution a pour objectifs d'une part l'étude de la réaction des calottes polaires à une variation climatique, d'autre part une aide à l'interprétation des enregistrements contenus dans les carottes extraites des forages profonds en Antarctique ou au Groenland (datation, origine de la glace).

Un modèle de calotte polaire permet d'obtenir les champs de vitesses et de températures pour une géométrie donnée (altitude de la surface, topographie du socle) et des conditions aux limites fixées (accumulation, conditions aux bords et à l'interface glace-socle). La datation d'une carotte est obtenue d'après les trajectoires correspondant au champ de vitesses calculé, et l'évolution d'une calotte polaire en réponse à une variation climatique est obtenue en faisant varier les conditions aux limites.

La simulation d'une calotte réelle implique la manipulation d'un nombre considérable de données, notamment pour rendre compte de la topographie. Les interactions entre climat et calottes polaires sont simulées par des couplages avec d'autres modèles (circulation atmosphérique globale pour l'accumulation, niveau des mers pour les conditions d'écoulement sur les bords, isostasie glaciaire pour l'altitude du socle). Cette complexité fait que le modèle de calotte polaire utilisé dans le cadre d'un thème Climat et Paléoclimat doit être considéré comme un outil.

Dans ce contexte vient s'ajouter une difficulté liée à la description du comportement mécanique de la glace polaire au cœur du modèle d'écoulement. A ce jour, les modèles de calotte polaire, dans leur majorité, prennent en compte un modèle de glace isotrope de type visqueux non linéaire. Cependant les analyses de carottes extraites en différents sites de l'Antarctique et du Groenland, ont révélé qu'au cours de sa déformation la glace polaire acquiert des textures cristallographiques marquées et devient anisotrope. Compte tenu de l'extrême anisotropie viscoplastique du monocristal cette anisotropie macroscopique, induite par la déformation, influence très fortement l'écoulement de la glace et doit être prise en compte. Les vitesses de déformation étant de l'ordre de  $10^{-12}$  à  $10^{-10} \text{ s}^{-1}$ , l'expérimentation en laboratoire est exclue et les modèles de comportement de glace anisotrope qui sont construits ne peuvent être testés que vis à vis de mesures de terrain (essentiellement la microstructure de la glace). Comme l'évolution de la texture cristallographique dépend de l'histoire de la déformation vécue par la glace, l'interprétation des mesures de terrain ne peut se faire qu'à travers des simulations de l'écoulement réalistes donc dépendantes du modèle de comportement adopté pour la glace.

On conçoit donc que le thème *Rhéologie des glaces polaires et Modélisation des calottes polaires* peut être perçu de différentes façons selon que l'on s'intéresse plus à l'aspect *matériau* (modélisation du comportement mécanique de la glace intégrant le maximum de physique) à l'aspect *calotte polaire élément du système climatique*, ou à établir le lien entre ces deux pôles en mettant en oeuvre des modèles de comportement mécanique complexes dans la simulation de l'écoulement d'une calotte polaire et notamment en développant un modèle d'écoulement de glace douée d'une anisotropie induite évolutive.

## **1.1 Modélisation des calottes polaires éléments du système climatique.**

L'approche consiste à développer des modèles numériques pour calculer l'évolution des calottes polaires au cours du temps et aider à l'interprétation des forages glaciaires. Ces modèles s'appliquent à toutes les grandes calottes glaciaires existantes (Antarctique et Groenland) et passées (Laurentide et Fennoscandie).

Ce thème étant à l'interface entre plusieurs domaines, seule la partie dynamique de l'Antarctique et « calottes de l'hémisphère nord » est présentée ici. Les aspects « datation » et « stade II » sont développés dans le thème transversal « Paleo ».

### **1.1.1 DYNAMIQUE DE L'ANTARCTIQUE.** (C. Ritz, Ch. Dumas)

#### **1.1.1.1 Objectifs**

L'intérêt de la modélisation de l'Antarctique est double. D'une part, on étudie la réponse de cette calotte aux variations climatiques telles que les changements de température, précipitation et niveau des océans. On cherche ainsi à estimer comment la géométrie de la couche de glace est affectée, avec quel temps de réaction et quelles sont les implications sur le niveau des mers global. Un objectif important est également de prédire cette évolution dans le proche futur en réponse à un éventuel réchauffement global mais aussi en tenant compte de la tendance à long terme liée au fait que l'Antarctique réagit encore aux événements climatiques qui se sont produits il y a 15 000 ans lors de la dernière déglaciation. 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. Ce point va prendre de l'importance en raison du forage profond (EPICA) en cours actuellement à Dôme C (Plateau Antarctique). 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 tiré de ces mêmes forages glaciaires (ici Vostok, pour des raisons de proximité et de résolution).

### 1.1.1.2. Spécificités du modèle Antarctique du LGGE.

La mise au point d'un modèle de calotte marine pour l'Antarctique est un enjeu très important pour mieux comprendre les interactions de l'Antarctique avec le niveau des mers y compris dans un proche futur, pour une meilleure interprétation des forages, et pour mieux tirer parti de la comparaison entre la surface modélisée et celle mesurée par altimétrie satellitaire.

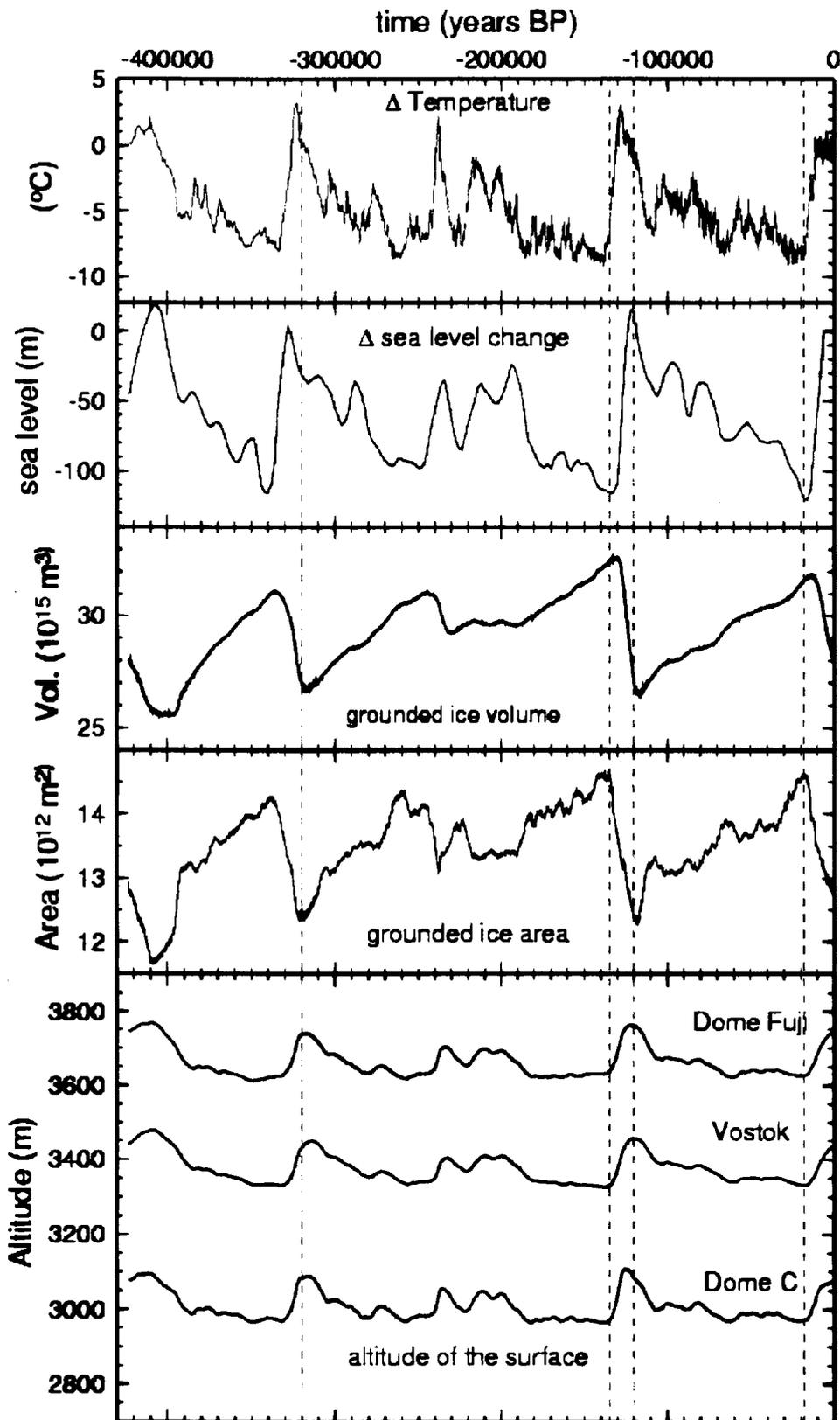
Notre modèle Antarctique permet de simuler l'évolution de la géométrie en fonction à la fois du bilan de masse en surface (accumulation neigeuse-ablation) et de l'écoulement de la glace. Ce dernier point demande la résolution des champs couplés de température et de vitesse (couplage thermomécanique). Il convient ici de noter que l'Antarctique est une calotte dite « marine », c'est à dire qu'une grande partie repose sur le socle mais que pour de grandes régions celui-ci se trouve au dessous du niveau de la mer. D'autre part, l'essentiel de cette glace s'évacue par de grands courants de glace appelés ice-streams vers des plates-formes de glace flottantes (les ice-shelves). La position de la ligne d'échouage (la ligne où la glace commence à flotter) interagit avec l'écoulement en amont et en aval. Pour simuler l'évolution de l'Antarctique, le modèle doit donc prendre en compte l'écoulement des ice-shelves et calculer de façon interactive la position de la ligne d'échouage.

Dans notre modèle d'Antarctique nous considérons trois régions :

- la partie posée de la calotte (Inlandsis), pour laquelle l'écoulement est essentiellement gouverné par la pente de la surface. La contrainte prédominante est le cisaillement dans un plan vertical. Les vitesses dans cette région sont en général assez lentes (inférieures à 100 m/an).
- les ice-shelves flottant sur la mer, pour lesquels la déformation se fait par extension horizontale. Les vitesses typiques sont de l'ordre du km/an. Nous utilisons, un modèle d'ice shelf qui est une version légèrement modifiée de celui développé en 1996 (Rommelaere et Ritz, 1996)
- les régions avec des ice-streams ou fleuves de glace. La plus importante zone connue se situe en Antarctique de l'Ouest, entre la partie posée et le Ross ice-shelf. Bien que la glace repose sur le socle, ce sont des régions à la fois très plates et très rapides. La déformation de la glace en cisaillement ne compte que pour quelques mètres par an alors que certains ice-streams atteignent 600-1000 m/an, il nous a donc semblé nécessaire de traiter cet écoulement d'une façon spécifique

C'est sur la modélisation des zones d'ice-stream que notre modèle est le plus original. Par exemple, ce type de région n'existe pas dans le modèle de Huybrechts (1990). Surtout, notre modèle est le seul qui détermine la position des ice-streams dynamiquement ce qui est indispensable pour des simulations de longue durée dans lesquelles la géométrie de la calotte glaciaire change notablement. Pour cela nous utilisons un critère basé le frottement à la base de la glace, ce frottement dépendant lui même de la pression d'eau sous-glaciaire. Au point de vue écoulement ces régions sont traitées comme des ice-shelves flottant sur le socle.

Le couplage entre les différentes régions se fait à la fois par la conservation de la masse et par les vitesses qui sont données comme conditions aux limites des régions ice-shelves et ice-streams. Cette formulation permet de prendre en compte l'effet du niveau des mers sur l'écoulement de la glace. Quand par exemple le niveau des mers monte, la pression d'eau sous la glace augmente dans certaines régions (les régions côtière qui ont un socle sous le niveau des mers), le frottement basal diminue, certaines zones deviennent des ice-streams et d'autres qui sont déjà de ce type, se mettent à glisser plus vite car le frottement les retient moins. L'intensification de l'écoulement provoque un amincissement de la couche de glace, amincissement qui d'une part se propage vers l'intérieur de la calotte, d'autre part provoque un recul de la ligne d'échouage.



**Figure 4.1-** Simulations effectuées avec le modèle Antarctique et couvrant les quatre derniers cycles glaciaire-interglaciaire. Sur les deux panneaux du haut sont tracés les deux forçages (température et niveau des mers). Les trois panneaux du bas représentent les sorties du modèle, respectivement (du haut vers le bas) le volume, la surface de glace posée et l'altitude de quelques sites de forage, tous localisés sur le Plateau Antarctique (Antarctique de l'Est).

Les simulations avec une première version de ce modèle couplé ont commencé en 1998 mais le travail de mise au point s'est poursuivi pendant jusqu'en 2000.

### ***1.1.1.3. Evolution de l'Antarctique au cours des 4 derniers cycles glaciaire-interglaciaire***

La principale application de ce modèle a été la simulation de l'Antarctique au cours des quatre derniers cycles glaciaire-interglaciaire (*Ritz et al. 2001*). Les variations de température au cours du temps sont imposées à partir de l'enregistrement en température de Vostok (*Petit et al. 1999*) et les variations de niveau des mers sont déduites d'un enregistrement de la composition isotopique de l'océan profond (*Bassinot et al. 1994*). Ces forçages sont représentés sur les deux panneaux du haut de la Figure 1. Deux autres variables climatiques dépendent de la température. Il s'agit de la précipitation qui décroît lorsque la température baisse et de la fusion sous les ice-shelves qui décroît également pendant les climats froids car on suppose que l'océan apporte alors moins de chaleur à la base des ice-shelves.

Sur les trois panneaux inférieurs de la Figure 4.1, sont représentés l'évolution des principales caractéristiques de l'Antarctique en réponse à ce forçage : le volume de glace reposant sur le socle, l'étendue de la calotte reposant sur le socle (les ice-shelves ne sont pas comptés) et l'altitude de quelques sites de forage situés sur le plateau Antarctique.

On voit que pendant les périodes froides, la calotte Antarctique est plus étendue et son volume est plus grand que pendant les périodes interglaciaires. Pourtant, l'altitude des sites de forages, qui sont représentatifs du Plateau Antarctique, montre l'évolution inverse (ils sont plus bas pendant les périodes glaciaires). Cette réponse provient du fait que les deux parties de l'Antarctique répondent d'une façon opposée. L'Antarctique de l'Ouest est gouverné par les mouvements de la ligne d'échouage. Lorsque le niveau des mers baisse, les ice-shelves « se posent » sur le fond marin (qui n'est pas très profond dans ces baies) et la ligne d'échouage avance. Ce processus est facilité par la réduction de la fusion sous les ice-shelves et contrecarré par la réduction de la précipitation sur les ice-shelves.

Cette avancée de la ligne d'échouage permet ensuite un épaissement de la couche de glace et une augmentation du volume. L'Antarctique de l'Est par contre est gouverné par la précipitation. Le fait que le volume global suive l'étendue de glace posée, indique que ce sont les processus de migration de la ligne d'échouage qui sont les plus importants pour l'ensemble de la calotte. Enfin, on peut voir sur cette figure que les trois sites du Plateau Antarctique ont une évolution très similaire. Ce résultat est important car cela va grandement faciliter la comparaison des différents enregistrements. De plus, ce résultat est très robuste et ne dépend pas de ce qui se passe en Antarctique de l'Ouest.

### ***1.1.1.4. Etude systématique des transitions glaciaires - interglaciaires***

Devant le rôle joué par les mouvements de la ligne d'échouage lors des englacements et des déglaciations, nous avons entrepris une étude systématique des mécanismes mis en jeu. En particulier, nous cherchons à évaluer l'impact relatif des variations de température, de fusion sous les ice shelves, d'accumulation et de niveau des mers, ainsi que la sensibilité à la rapidité de ces variations. Les premiers résultats montrent une asymétrie entre englacement et déglaciation. Par exemple, le recul de la ligne d'échouage demande une synergie de tous les processus, faute de quoi l'Antarctique reste à son extension de type glaciaire c'est à dire jusqu'au talus continental. A l'opposé, pendant un englacement les processus sont presque additifs. L'asymétrie est également marquée en ce qui concerne le temps de réaction, l'englacement est ainsi beaucoup plus lent que la déglaciation.

### ***1.1.1.5. Simulation de l'Antarctique au stade 11***

Nous avons enfin effectué quelques simulations pour étudier la géométrie de l'Antarctique pendant le stade MIS 11. Ce point est inclus dans le sujet « stade 11 » du thème transversal « Paleo ».

## 1.1.2 *MODELISATION DE LA DEGLACIATION DES CALOTTES DE L'HEMISPHERE NORD* (C. Ritz ; S. Charbit et G. Ramstein, LSCE)

Les calottes de l'hémisphère nord ont joué un rôle prépondérant dans l'évolution du climat au cours des derniers cycles glaciaire-interglaciaire et notre objectif est d'utiliser la modélisation numérique afin de mieux comprendre ce rôle. Pendant ces deux années, nous avons essentiellement travaillé sur la dernière déglaciation (Charbit et al. sous presse).

### 1.1.2.1. *Méthode employée*

Notre modèle simule l'évolution d'une calotte polaire en réponse à des conditions climatiques qui lui sont imposées. Nous avons choisi de traiter l'ensemble de l'hémisphère nord car lorsqu'on compare avec les données géologiques, il s'agit non seulement de simuler le Laurentide (sur l'Amérique du Nord), la Fennoscandie (sur l'Eurasie) et le Groenland, mais aussi de ne pas simuler de calotte sur la Sibérie et sur l'Alaska (où il n'y en avait pas). De plus nous nous orientons vers un vrai couplage avec un modèle de climat et nous voulons prendre en compte les interférences entre les différentes calottes via la circulation atmosphérique.

Ces calottes de l'hémisphère nord présentent une différence importante avec l'Antarctique : leur bord est en majeure partie sur la terre ferme. Une conséquence de ce bord terrestre est que c'est la fusion estivale qui limite leur extension, la limite avec l'océan jouant un rôle plus marginal. Les processus liés à l'atmosphère sont par conséquent particulièrement sensibles. Pour imposer le bilan de surface (précipitation, fonte) nous utilisons des sorties de modèles de circulation générale de l'atmosphère (MGCA). Les MGCA ne donnent que des climats instantanés (à l'échelle de temps des calottes glaciaires) et nous nous sommes limités à forcer le modèle de glace avec les champs atmosphériques issus d'un MGCA (en l'occurrence le modèle LMD5). Pour cela, nous interpolons les champs issus du MCGA sur la grille beaucoup plus fine (50 km) du modèle de glace et nous tenons compte des différences d'altitude entre les topographies des deux modèles par un gradient vertical de température dans l'atmosphère. Nous prenons ainsi en compte la rétroaction « altitude de la calotte - fusion estivale » qui est essentielle. Plus une calotte est plate, plus l'ablation est forte ce qui tend à aplatir la calotte encore plus. Ce mécanisme est quelquefois appelé « instabilité des petites calottes ».

Avant de procéder aux expériences de déglaciation, le climat instantané a été calculé pour diverses époques clé : 21, 15, 9, 6 kyr BP ainsi que le climat actuel. Notons que 21 kyr BP, 6 kyr BP et présent faisaient partie des expériences PMIP. Pour imposer le climat à la surface des calottes entre les instantanés fournis par le MCGA, les champs atmosphériques ont été interpolés dans le temps.

### 1.1.2.2. *Résultats des expériences de déglaciation*

Dans nos simulations, nous obtenons effectivement une déglaciation quasi-complète. Cela signifie que les changements d'insolation, de concentration atmosphérique en CO<sub>2</sub> et de conditions aux limites suffisent à expliquer la disparition des grandes calottes. Il faut noter que nous avons utilisé exactement la même approche et les mêmes paramètres du modèle pour obtenir des calottes stationnaires au DMG (avec le climat calculé à 21 kyr BP) et pour simuler la déglaciation. La disparition des calottes que nous obtenons est donc bien due aux changements de climat.

Cependant, la déglaciation simulée se produit notablement plus tard (de 2 à 4 milliers d'années) que ce qu'indiquent les données. Afin de comprendre ce retard et d'évaluer le rôle des différents mécanismes, nous avons effectué un grand nombre d'expériences de sensibilité. Nos résultats indiquent par exemple que la Fennoscandie ayant une plus grande portion avec un bilan de surface négatif, est plus sensible que le Laurentide à l'instabilité des petites calottes que nous avons mentionnée plus haut. Nous avons aussi montré que la variabilité millénaire accélère la déglaciation en raison de la non-linéarité du bilan de masse avec la température, qu'un écoulement plus intense ou une accumulation neigeuse plus faible durant les périodes froides permettent d'une part d'avoir des calottes plus plates et ressemblant plus à celles proposées par Peltier (1994), d'autre part de déglacer légèrement plus vite.

Cependant, aucun de ces mécanismes ne permet une déglaciation assez rapide ni surtout assez précoce. Il semble en effet que le désaccord avec les données soit un retard dans le déclenchement de la déglaciation plutôt qu'une déglaciation trop lente. Il reste donc peut-être un mécanisme à chercher, vers l'époque 15-13 kyr BP. Ce mécanisme n'est pas forcément très intense, car il ne doit expliquer que le déphasage et non pas l'ensemble de la déglaciation. Etant donné que l'impact de l'océan est traité de façon très (trop) simple dans nos expériences, nous pensons que c'est le domaine dans lequel chercher le mécanisme éventuellement manquant.

## 1.2. Modèle de calotte polaire intégrant l'anisotropie de la glace.

La vitesse de déformation d'un monocristal de glace varie de plusieurs ordres de grandeur selon que la sollicitation favorise ou non le glissement dans les plans de base (plans de densité maximum des atomes d'oxygène, perpendiculaires à l'axe  $c$  de symétrie hexagonale). Aussi, le comportement de l'agrégat polycristallin est-il fortement dépendant de la distribution des orientations cristallines de ses grains (axes  $c$ ). Au cours de sa déformation la glace polaire développe des textures préférentielles et devient macroscopiquement anisotrope. Des textures très fortement marquées ont été observées sur des carottes prélevées en Antarctique et au Groenland (selon les sites alignement des axes  $c$  selon la verticale, ou répartition uniforme des axes  $c$  dans un plan vertical probablement transverse à la direction d'écoulement). Compte tenu de l'énorme anisotropie plastique du monocristal de glace, cette anisotropie macroscopique induite influence fortement l'écoulement des calottes polaires.

### 1.2.1. *MODELES POUR LE COMPORTEMENT ANISOTROPE ET POUR L'EVOLUTION DES TEXTURES*

Il s'agit d'introduire l'anisotropie induite évolutive de façon suffisamment simple pour qu'une simulation d'écoulement de calotte polaire reste matériellement possible (un modèle global comporte un minimum de  $10^5$  noeuds). Les simplifications introduites concernent le modèle micro décrivant le comportement du grain et la représentation de la texture de l'élément de volume représentatif. La caractéristique essentielle du monocristal de glace étant sa très forte anisotropie viscoplastique, celui-ci est considéré comme un milieu continu orthotrope de révolution autour de son axe  $c$  et se déformant aisément par cisaillement parallèlement aux plans de base. La deuxième simplification a consisté à utiliser une fonction de distribution des orientations (ODF) pour représenter la distribution statistique des axes  $c$  : le grain étant supposé orthotrope de révolution, seule l'orientation de son axe  $c$  est à repérer et ainsi l'ODF n'est fonction que de deux variables.

Le passage micro-macro permettant d'obtenir le comportement du polycristal a été abordé de deux façons :

#### 1.2.1.1. *Modèle « extrémal hétérogène »*

*(O. Gagliardini ; M. Arminjon et D. Imbault, Laboratoire 3S)*

Le modèle extrémal hétérogène, développé au Laboratoire 3S par M. Arminjon et D. Imbault, permet de décrire, par homogénéisation, le comportement mécanique de l'agrégat polycristallin en fonction de sa texture cristallographique. Pour une hétérogénéité  $r$  de la distribution des vitesses de déformation dans les grains, le champ des vitesses de déformation est obtenu par minimisation du potentiel de dissipation viscoplastique. Ce modèle permet donc de décrire continûment l'ensemble des solutions : du modèle à vitesses de déformation uniformes ( $r=0$ ) au modèle à contraintes uniformes ( $r=R$ ). Les applications conduites sur la glace, en utilisant un modèle de grain orthotrope de révolution linéaire ont permis d'obtenir de nombreux résultats qui n'avaient pas été mis en évidence jusqu'alors, du fait de la trop grande complexité des modèles de grains utilisés (prenant en compte le glissement sur les plans cristallographiques). Il a notamment été montré que la solution du modèle autocohérent 1-site, dans le cas linéaire et avec le même modèle de grain, correspondait exactement à l'une des solutions obtenues avec le modèle extrémal hétérogène, pour une valeur particulière de l'hétérogénéité (Gagliardini et al., 2001).

### **1.2.1.2. Modèle à contraintes uniformes**

*(O. Gagliardini, J. Meyssonier)*

Dans cette deuxième approche on fait l'hypothèse d'un champ de contrainte uniforme dans le polycristal (hypothèse de Reuss). Le défaut de ce modèle est qu'il est sans doute très éloigné de la réalité physique. Par contre il permet, dans le cas d'un comportement linéaire, d'obtenir de façon entièrement analytique le comportement du polycristal et l'évolution de la texture d'une glace initialement isotrope vers une texture orthotrope (*Gagliardini and Meyssonier 1999*).

### **1.2.2. SIMULATION D'UN ECOULEMENT DE GLACE PRESENTANT UNE ANISOTROPIE INDUITE EVOLUTIVE.**

*(O. Gagliardini, J. Meyssonier)*

Les développements analytiques du modèle à contraintes uniformes ont permis de paramétrer l'ODF dans le cas orthotrope avec trois paramètres indépendants. Le comportement anisotrope a été implémenté dans un code éléments-finis pour simuler un écoulement plan (déformation plane et axisymétrique).

Le calcul du champ de textures correspondant à un régime stationnaire est fait en utilisant l'histoire de la déformation subie par la glace, supposée isotrope en surface, le long des trajectoires fournies par le calcul aux éléments-finis (problème couplé) (*Gagliardini and Meyssonier, 1999, 2001*). Ce calcul a été amélioré par rapport à la première version du modèle avec un traitement plus rigoureux des équations d'évolution de la texture : l'évolution des trois paramètres de l'ODF est obtenue comme solution d'un système d'équations différentielles à intégrer le long des lignes de courant (dans le cas stationnaire). Ceci permet un gain significatif sur les temps de calcul. Cependant l'application de ce modèle reste restreinte à une modélisation locale de l'écoulement (limitation du volume de données et du temps de calcul). Pour que celle-ci ait un sens il faut la coupler à une modélisation globale. Dans ce sens, l'influence de l'application de conditions aux limites sur les frontières du modèle local a été analysée (*Gagliardini et Meyssonier, 2002*).

### **1.2.3. ECOULEMENT DE LA GLACE ANISOTROPE AUX ALENTOURS DU FORAGE DE DOME C (ANTARCTIQUE).**

*(O. Gagliardini, C. Gomez, J. Meyssonier, C. Ritz)*

Une application préliminaire du modèle d'écoulement local au site de forage EPICA de Dôme Concordia (Antarctique) a été conduite dans le cadre du stage de DEA de Cécile Gomez. Le travail a consisté dans un premier temps à récolter l'ensemble des données disponibles (cartographie, topographie, vitesses de surface, accumulation). Les mesures de températures n'ayant pas encore été réalisées dans le forage, la température en chaque nœud du maillage a été calculée par un modèle 1D vertical (en collaboration avec C. Ritz). Une modélisation 2D de l'écoulement a été réalisée en supposant que l'écoulement a lieu dans un plan perpendiculaire aux courbes de niveau de la surface. Cette étude a mis en avant les difficultés liées à une modélisation réelle (à partir de données de terrain), notamment pour ce qui concerne l'influence de la topographie de la surface, dont les moindres variations de pente ont des répercussions immédiates sur l'écoulement.

### **1.2.4. MODELISATION BASEE SUR L'HYPOTHESE DE LA COUCHE MINCE**

*(A. Philip, M. Bougamon, J. Meyssonier)*

Le but de cette étude est de prendre en considération le caractère anisotrope de la glace dans la modélisation de l'écoulement d'une calotte avec l'hypothèse de la couche mince (approximation justifiée par le rapport d'aspect des calottes : épaisseur/longueur, de l'ordre de  $10^{-3}$ ). La solution d'un écoulement stationnaire et isotherme en déformation plane a été calculée jusqu'à l'ordre deux pour une glace orthotrope, dans le cas général où ni l'horizontale ni la verticale ne sont un axe privilégié de l'orthotropie. Ce type d'anisotropie couvre la majorité des textures observées lors des carottages profonds effectués au Groenland et en Antarctique. Il a été montré que la solution à l'ordre zéro reste largement prépondérante par rapport à celles obtenues aux ordres supérieurs et qu'elle est différente de la solution correspondant à un comportement isotrope (*Philip and Meyssonier 1999*). En effet,

dans le cas isotrope, la solution à l'ordre zéro fait intervenir uniquement la contrainte de cisaillement dans un plan vertical, alors que pour une orthotropie quelconque, toutes les composantes du tenseur des contraintes sont présentes.

### 1.2.5. COMPARAISON METHODES D'HOMOGENEISATION / ELEMENTS-FINIS

(J. Meyssonier, A. Philip)

Parallèlement, compte tenu de l'extrême anisotropie du cristal de glace, il a semblé nécessaire d'estimer l'efficacité du modèle auto-cohérent 1-site pour modéliser le comportement macroscopique de la glace en effectuant des comparaisons avec des calculs par éléments-finis. Celles-ci ont été faites en ne considérant que le cas d'une glace orthotrope de révolution chargée dans son plan d'isotropie et dans l'approximation des déformations planes, et en conservant le modèle de grain continu orthotrope de révolution. Dans la gamme pertinente du paramètre qui décrit la forte anisotropie du grain, l'hypothèse de contraintes uniformes conduit à des fluidités nettement surestimées, d'un facteur 50 lorsque le comportement du grain est supposé linéaire, 1000 dans le cas non linéaire. Le modèle de Taylor (vitesses de déformation uniforme dans les grains) sous-estime la fluidité d'un facteur 1/5 et 1/50 dans les cas linéaire et non-linéaire. Compte tenu des écarts énormes entre les deux modèles, l'encadrement qu'ils fournissent n'est d'aucune utilité. Le schéma autocohérent 1-site donne des fluidités surestimées d'un facteur environ 3 pour un comportement du grain linéaire, et sous-estimées d'un facteur 3 en non linéaire (Meyssonier and Philip, 1999, 2000 et Meyssonier 2001).

## 1.3. Mécanismes physiques de la déformation, rhéologie des glaces polaires.

### 1.3.1. DEFORMATION DE LA GLACE AUX FAIBLES CONTRAINTES ; ROLE DE LA MIGRATION DES JOINTS DE GRAINS

(M. Montagnat, P. Duval)

Des informations essentielles sur les modes de déformation de la glace aux faibles contraintes ont pu être obtenues grâce à l'étude de la microstructure des glaces extraites en Antarctique jusqu'à plus de 3000m de profondeur. Il n'est en effet pas envisageable de réaliser des essais mécaniques en laboratoire dans les conditions in situ i.e. à des vitesses de déformation inférieures à  $10^{-10}$  s<sup>-1</sup>. Ces travaux ont permis de montrer que, malgré ces faibles vitesses de déformation, la déformation est produite par le glissement intracristallin. Nous sommes sur ce point en désaccord avec plusieurs auteurs, qui, du fait de la faible valeur du paramètre de sensibilité à la contrainte ( $< 2$ ), admettent un comportement type « superplastique » avec un glissement aux joints prépondérant (Duval et Montagnat, sous presse).

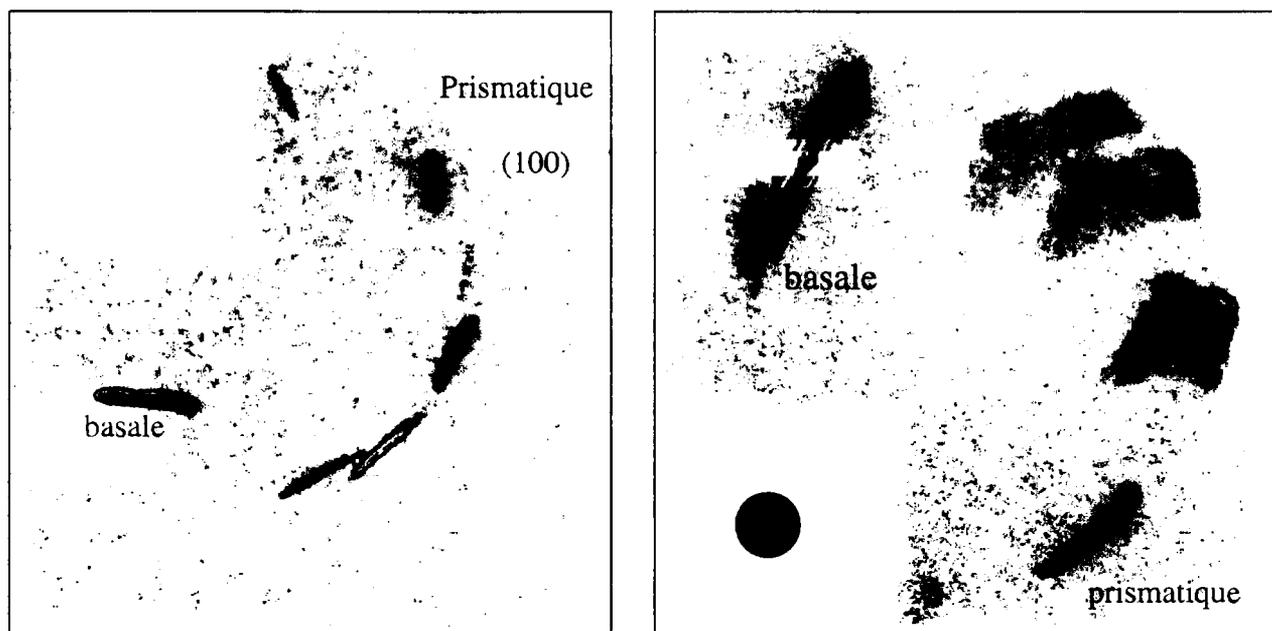
Nous avons établi un modèle physique basé sur l'équilibre écrouissage/restauration. La migration des joints de grains associée au grossissement normal des grains et à la recristallisation par rotation est le principal processus de restauration. Ce modèle est compatible avec le comportement mécanique des glaces polaires aux faibles contraintes (Montagnat et Duval, 2000a).

### 1.3.2. CARACTERISATION DE LA MICROSTRUCTURE DES GLACES PAR DIFFRACTION X

(M. Montagnat, P. Duval ; P. Bastie – Lab. Spectrométrie Physique, Grenoble)

L'exceptionnelle anisotropie plastique du cristal de glace est à l'origine d'un écrouissage dit « cinématique » directement lié à l'incompatibilité de déformation entre les grains. De forts gradients de déformation sont observés et les dislocations présentes dans les grains sont surtout des dislocations « géométriquement nécessaires ». Les mesures de diffraction X faites à l'Institut Laue Langevin ont permis de caractériser la distorsion des cristaux des glaces de la carotte de 3623m de Vostok (Antarctique). Des cristaux d'une grande qualité cristalline ont été trouvés en dessous de 3600m (densité des dislocations inférieure à  $10^8/m^2$ ). Ces cristaux d'une taille supérieure à 20 nm se sont formés par congélation de l'eau du lac sous-glaciaire et auraient acquis cette qualité cristalline par grossissement anormal durant plus de 100000 ans (Montagnat et al., 2001). Pour ce qui concerne les glaces de glaciers, des distorsions continues du réseau cristallin ont été observées. Il s'agit d'une part d'une rotation autour de l'axe c par des dislocations vis et, d'autre part, d'une flexion des plans de base par des dislocations coin (Montagnat et Duval, 2000b; Thèse Montagnat, 2001). La glace se

particularise ainsi par l'importance des dislocations géométriquement nécessaires par rapport aux dislocations statistiquement réparties dont la densité reste toujours faible.



**Figure 4.2** Images de diffraction obtenues sur des échantillons de la carotte de Vostok : a) glace de lac à 3600m, b) glace de glacier à 3516m. Pour la glace de glacier, les tâches de diffraction sur les plans de base (002) et prismatiques (100) sont fines (de l'ordre de la minute d'arc). L'inclinaison qui résulte de la distorsion continue du réseau cristallin varie de 11' pour la réflexion (100) à 27' pour la réflexion (002).

### 1.3.3. SIMULATION DE L'EVOLUTION DES TEXTURES PAR L'APPROCHE AUTO-COHERENTE (M. Montagnat, P. Duval)

Le modèle auto-cohérent viscoplastique à 1 site VPSC de Lebensohn et Tomé, basé sur la linéarisation du comportement du milieu équivalent par l'approximation tangente, simule bien le comportement mécanique instantané des glaces isotropes et anisotropes. Cependant, les textures modélisées sont systématiquement trop fortes. Plusieurs hypothèses sont proposées pour expliquer ces différences entre textures observées et simulées : l'importance de la raideur de l'interaction grain/matrice et le rôle de la recristallisation. La cinétique de formation des textures est directement liée à l'activité des systèmes de glissement basal. Celle-ci augmentant avec la souplesse de l'interaction grain/matrice, les textures se développent plus rapidement avec l'approximation tangente qu'avec l'approximation sécante.

Dans le but de mieux prendre en compte l'anisotropie microscopique, nous avons introduit une interaction grain/matrice qui dépend de l'orientation du grain (cf. Tomé, 1999). La raideur de l'interaction est biaisée vers l'approximation sécante pour les grains « mous », bien orientés pour le glissement basal, et vers l'approximation tangente pour les grains « durs ». Ce modèle reproduit bien les textures observées dans les calottes polaires sans faire appel à la recristallisation, mais au prix d'une activité basale plus faible que celle imposée par l'approximation tangente. Nous montrerons plus loin que la prise en compte des hétérogénéités de déformation intra-granulaires est essentielle pour traduire le comportement réel de la glace (*Thèse Montagnat, 2001*).

### 1.3.4. SIMULATION DE L'EVOLUTION DES TEXTURES PAR L'APPROCHE AUTO-COHERENTE : ROLE DE LA RECRISTALLISATION PAR ROTATION

(M. Montagnat, P. Duval)

La recristallisation par désorientation progressive des sous-joints, *la recristallisation par rotation*, intervient largement dans les calottes polaires. La migration des joints associée à cette recristallisation dynamique accommode le glissement intra-cristallin et donne à la glace un comportement faiblement non linéaire ( $n < 2$ ). Un modèle simple de recristallisation a été établi et couplé au modèle VPSC variable pour estimer son influence sur le développement des textures. La germination est introduite en considérant la déformation et la densité des dislocations dans chaque grain. La migration des joints est directement liée à la variation de l'énergie stockée (énergie des dislocations) entre un grain et son voisin.

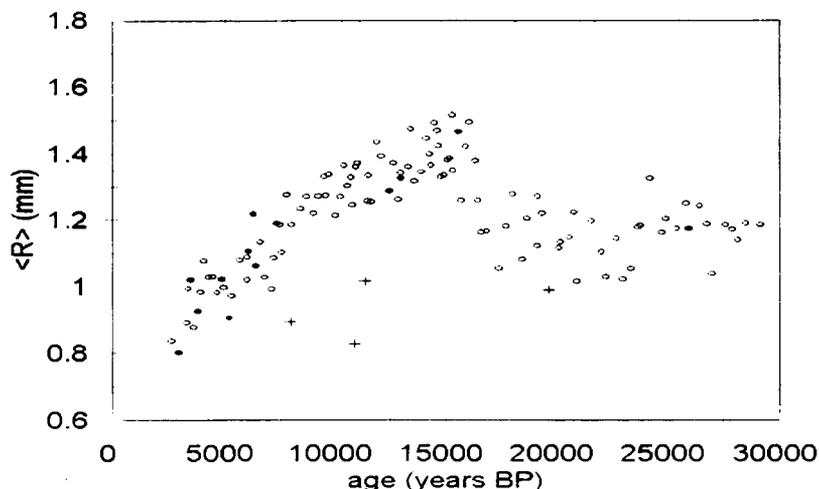
Contrairement aux hypothèses faites antérieurement, la recristallisation par rotation ne semble pas influencer directement le développement des textures. Son rôle serait « limité » au maintien de grains de forme équiaxe et à l'accommodation du glissement, ce qui n'est pas anodin pour le choix et la validation du modèle de déformation (*Thèse Montagnat, 2001*).

### 1.3.5. MICROSTRUCTURE DES GLACES POLAIRES

(J. Weiss, M. Gay, L. Arnaud, G. Durand, J. Vidot)

Un forage glaciaire profond a débuté à Dome Concordia sur la calotte polaire antarctique au cours de l'été austral 1996-97 dans le cadre du programme européen EPICA. Le LGGE est très impliqué dans l'interprétation climatique de l'analyse de cette carotte de glace. On a étudié l'évolution avec la profondeur (et donc l'âge) de la microstructure de la glace (taille et forme des grains), afin de comprendre les processus de grossissement des grains, de recristallisation, et de relier ceux-ci à certains paramètres climatiques. Deux missions de terrain (J. Weiss en 97-98; L. Arnaud en 98-99) ont permis de réaliser des séries de lames minces de glace, jusqu'à une profondeur d'environ 600m. Un algorithme original d'analyse d'images développé au laboratoire a permis d'extraire les microstructures (joints de grains) à partir de l'observation de ces lames minces en lumière polarisée (*Gay and Weiss, 1999*). Il est ainsi possible de déterminer automatiquement de nombreux paramètres structuraux et topologiques 2D. On a dès lors pu déterminer une cinétique de grossissement normal des grains. Cette étude a également révélé un écrasement des grains dans le plan horizontal qui augmente avec la profondeur, en accord avec la déformation du matériau au niveau d'un dôme. La première transition glaciaire/interglaciaire est quant à elle révélée par une diminution brutale de la taille de grain moyenne (Figure 4.3). Les distributions des tailles de grain sont également légèrement modifiées lors du passage interglaciaire/glaciaire (*Arnaud et al., 2000*). On a ensuite analysé les corrélations entre ces paramètres microstructuraux et l'évolution de traceurs climatiques (isotopes) ou de signaux liés comme les teneurs en impuretés (ions majeurs, poussières). Ceci a permis de montrer que l'évolution de la microstructure lors des changements climatiques est lié à l'épinglage des joints de grains par des poussières dont la quantité contenue dans la glace augmente fortement lors des périodes glaciaires, plutôt que par un dragage des impuretés solubles (*Weiss et al., 2002*). Un modèle numérique simple est actuellement développé dans le cadre de la thèse de G. Durand pour prédire l'évolution de la taille des grains en fonction du temps, de la teneur en poussières et de la température.

Ce travail présente un fort caractère interdisciplinaire entre science des matériaux, rhéologie, climatologie et glaciologie. Il s'effectue de ce fait en collaboration avec de nombreux autres chercheurs du LGGE. Ce travail va se poursuivre au cours des prochaines années dans le cadre de la thèse de G. Durand par l'analyse de la partie plus profonde du forage EPICA



**Figure 4.3** Evolution de la taille moyenne des cristaux de glace du forage EPICA en fonction de la profondeur.

Cercles vides : couches « normales »

Cercles pleins : couches contenant une forte quantité d'impuretés solubles, sans modification significative de la taille de grain

Croix : couches de cendres volcaniques

#### 1.3.6. DEFORMATION DU MONOCRISTAL DE GLACE

(Ph. Mansuy, J. Meyssonier, A. Philip, A. Demongeot)

La déformation d'un polycristal de glace est très hétérogène. La très forte anisotropie viscoplastique du monocristal engendre une forte hétérogénéité intergranulaire qui engendre à son tour une forte hétérogénéité intragranulaire. Une connaissance détaillée des mécanismes conduisant à cette hétérogénéité inter et intra granulaire, et à son évolution, est essentielle pour comprendre l'influence de la microstructure sur le comportement macroscopique du polycristal, l'évolution de sa texture et sur l'apparition de la localisation de la déformation intragranulaire et son éventuelle extension à l'échelle mésoscopique voire macroscopique.

Des essais de fluage ont été effectués sur des lames épaisses de glace à grain fin chargées dans leur plan et contenant une inclusion mono ou multi cristalline. La visualisation de la déformation de l'inclusion est obtenue par éclairage en lumière polarisée.

Dans le cas d'une inclusion monocristalline dans une matrice à grains fins la déformation se fait de manière homogène avec des bandes de glissement régulièrement espacées. Dans les autres configurations, on a pu mettre en évidence différentes formes de localisation telles que bandes en genou (kink bands), bandes de flexion, polygonisation, et la recristallisation dynamique. L'influence des points triples (jonctions de 3 grains) et de la taille relative des grains voisins sur l'apparition de la localisation a également été mise en évidence.

Des simulations des expériences par éléments-finis ont été faites en appliquant le modèle simple de grain orthotrope de révolution aux grains de l'inclusion. Dans le cas d'une inclusion monocristalline initialement circulaire, la simulation permet de reproduire la rotation des plans de base mesurée au cours de la déformation (ils tendent à se placer perpendiculairement à la direction de compression), le changement de forme de l'inclusion qui se transforme en ellipse de plus en plus aplatie, ainsi que sa rotation d'ensemble. Pour les inclusions multicristallines, l'étude de la désorientation cristallographique a été couplée à celle du champ des cisssions résolues sur les plans de base (avec un système de glissement basal unique, les points ou la cisssion résolue s'annule sont des points d'arrêt potentiels pour les dislocations). Les simulations numériques ont permis de reproduire correctement l'évolution de la forme des grains des multicristaux (clusters de 7 hexagones) ainsi que celle de leurs orientations moyennes. Les bandes de localisation diffuse (bandes de flexion) sont bien décrites, par

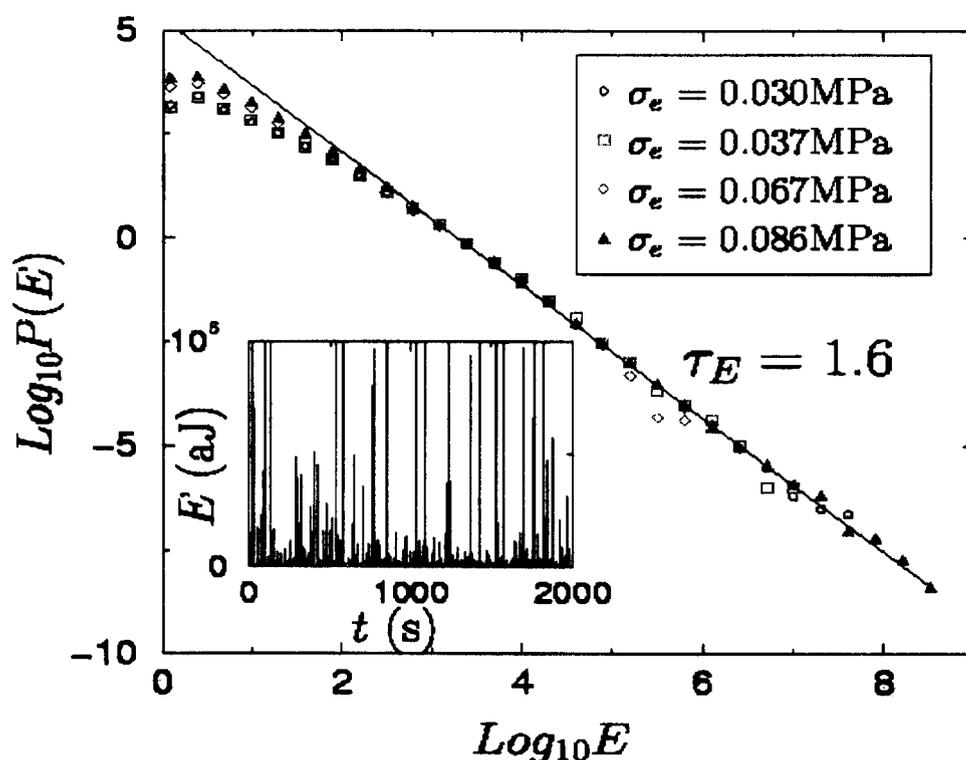
contre la simulation de la localisation sous forme de bandes en genou ou parois de polygonisation laisse à désirer : l'emplacement des bandes est bien prédit mais leur largeur et leur désorientation restent imprécises (*Thèse Mansuy, 2001, Mansuy et al. 1999, 2000, 2001*).

### 1.3.7. DEFORMATION VISCOPLASTIQUE ET DYNAMIQUE COLLECTIVE DES DISLOCATIONS.

(*J. Weiss, J.R. Grasso, LGIT, S. Zapperi, Univ. Rome, A. Vespignani, ICTP, Trieste, M.C. Miguel, Univ. Barcelone*)

Jusqu'à récemment, seuls les processus fragiles de fracturation/rupture faisant intervenir des interactions élastiques entre fissures étaient supposés présenter un caractère critique au cours de la déformation des (géo)matériaux (cf. B.1). Or les ingrédients participant à l'émergence de comportements collectifs organisés et à une dynamique critique (grand nombre d'entités, dynamique de seuil, interactions longue distance) sont également pertinents dans le cas des dislocations. On peut donc se poser la question de l'émergence d'une telle dynamique non-linéaire critique dans le cas de la déformation viscoplastique. Cette idée va à l'encontre de l'approche classique en champ moyen de l'écoulement viscoplastique par mobilité des dislocations (relation d'Orowan). Dans ce cas, cette mobilité est supposée homogène à la fois dans l'espace et dans le temps.

Les travaux menés au LGGE sur l'émission acoustique générée au cours de la déformation viscoplastique de la glace, effectués en collaboration avec des collègues du LGIT de Grenoble ainsi qu'italiens et espagnols, indiquent que la dynamique collective des dislocations au cours de l'écoulement viscoplastique pur (absence de fracturation; déformation ductile) présente un caractère critique. Des statistiques en loi puissance des amplitudes des microséismes générés par des mouvements collectifs de dislocations (avalanches, ou instabilités plastiques) ont été systématiquement observées au cours des essais effectués (Figure 4.4) (*Miguel et al., 2001a; Weiss et al., 2000*).



*Figure 4. 4 Distributions des énergies acoustiques générées par des mouvements collectifs de dislocations lors de la déformation viscoplastique de monocristaux de glace.  $\sigma_e$  : cisaillement résolu appliqué sur le plan basal de glissement. Petite fenêtre : dissipation de l'énergie au cours du temps.*

Un tel comportement sans échelle caractéristique révèle une très forte hétérogénéité de la déformation viscoplastique et suggère fortement que la dynamique collective des dislocations est un système proche d'un (ou dans un) état critique (*Miguel et al., 2001a*). Dans une telle situation, les instabilités plastiques sont imprévisibles à la fois en terme de temps, d'énergie ou de localisation spatiale, et l'énergie dissipée par le système (en d'autres termes: la déformation viscoplastique) l'est au cours de fortes instabilités, plutôt que par des mouvements individuels de dislocations. De fait, une analyse détaillée des intervalles de temps entre microséismes montrent que ces avalanches de dislocations sont constituées d'un événement majeur (mainshock) temporellement corrélé avec une séquence d'aftershocks. Ces avalanches sont elles-mêmes décorréées dans le temps. Ces travaux permettent de déterminer les exposants critiques associés à ce processus, et semblent indiquer des différences entre un régime du type fluage secondaire (équilibre global entre génération et disparition des dislocations) et des régimes en déséquilibre global (fluage primaire ou tertiaire) (*Weiss et al., 2001*). Un modèle numérique 2D de dynamique des dislocations permet de reproduire de façon satisfaisante les principales caractéristiques des observations, ce qui confirme le fait qu'une telle dynamique n'est certainement pas spécifique à la glace (*Miguel et al., 2001a; Miguel et al., 2001b*).

Ce travail, tout à fait novateur et inédit, a été récemment publié dans la revue *Nature* (5 avril 2001). Il est important non seulement en mécanique et sciences des matériaux mais également du point de vue de la physique statistique pour les raisons évoquées plus haut.

## **2. ENDOMMAGEMENT, FRACTURATION DE LA GLACE ET INTERACTION GLACE-STRUCTURE**

L'étude du comportement de la glace dans le domaine fragile et ductile/fragile a pour objet de comprendre les mécanismes mis en jeu lors de l'endommagement et de la fracturation de la glace au contact d'une structure. Ces travaux présentent un intérêt qui dépasse la cadre strict de la glaciologie car la glace peut être considérée comme un matériau modèle pour l'étude des processus de fracturation et fragmentation des géomatériaux.

D'autre part, nous classons sous la bannière « Interaction glace-structure » les travaux sur la caractérisation du frottement à l'interface entre la glace et différents matériaux, ainsi que l'étude du comportement mécanique de la neige dans le domaine ductile en vue d'applications de type Génie Civil (retenue par ouvrages paravalanches).

### **2.1 Déformation, fracture et fragmentation de la glace: propriétés et lois d'échelle**

En utilisant des outils de la physique statistique et de la géométrie fractale, on étudie les propriétés d'échelle (lois et invariances d'échelle) des variables associées aux processus de déformation et de fracturation (distributions dans les champs temps, espace, énergie des défauts ou des événements; évolution de variables mécaniques avec l'échelle, ...) ainsi que la complexité associée (émergence à l'échelle du système global de structures et de comportements absents à l'échelle du défaut individuel). Le principaux objectifs sont les suivants:

- (i) Etablir des liens quantitatifs entre échelles
- (ii) Mieux comprendre et modéliser les processus de déformation et fracturation aux échelles géophysiques (par exemple: banquise, glaciers)
- (iii) Analyser les effets d'échelle pouvant apparaître sur certains paramètres mécaniques comme la ténacité ou la résistance mécanique. Ceci est important dans le cadre des interactions glace/structure
- (iv) Mieux cerner la nature de ces processus, et en particulier expliquer leur caractère fortement hétérogène à la fois en termes de temps, d'espace ou d'énergie.

#### **2.1.1 SURFACES ET FRONTS DE RUPTURE**

(*J. Weiss*)

La mécanique de la rupture classique s'intéresse à la stabilité d'une fissure de géométrie simplifiée. Cette situation est tout à fait théorique. Il est maintenant bien établi que la propagation fragile (sans

dissipation viscoplastique) d'un front de fissure dans un milieu hétérogène engendre une géométrie auto-affine invariante d'échelle et des surfaces de rupture rugueuses. Cette invariance d'échelle provient du couplage entre l'hétérogénéité du milieu et du fait que les facteurs d'intensité de contrainte le long du front sont corrélées à longue distance.

De telles géométries auto-affines ont été observées dans de nombreux matériaux. La glace ne fait pas exception (*Weiss, 2000*). Dans cet article, on a examiné la rugosité de surfaces de rupture obtenues pour de la glace de mer sous chargements de traction ou compression uniaxiale. Dans tous les cas, une géométrie auto-affine des surfaces de rupture est obtenue sur toute la gamme d'échelle observable, soit environ deux ordres de grandeur. En traction, on observe un exposant de rugosité égal à 0.8 quelle que soit la vitesse de déformation appliquée. L'invariance d'échelle observée sur des échantillons de laboratoire se prolonge de façon étonnamment précise à des échelles de l'ordre de la centaine de mètres correspondant à la rupture de la banquise. Des exposants plus élevés (0.94) sont obtenus sous compression, mais une étude plus complète serait nécessaire pour confirmer ces différences en fonction des conditions aux limites.

La première conséquence de cette invariance d'échelle de la géométrie des fronts et surfaces de rupture est le caractère lui-même invariant d'échelle du processus de propagation: la même physique s'applique à toutes les échelles. Cette constatation, qui peut paraître triviale, est importante pour la communauté de la mécanique de la glace qui a été confrontée à un vif débat sur ce thème au cours de ces dernières années. Une conséquence importante de l'universalité des mécanismes de fracturation est que les niveaux de contrainte nécessaires à la propagation de fractures aux échelles géophysiques sont beaucoup plus faibles que celles observées en laboratoire. En effet, si la ténacité de la glace est invariante d'échelle, des fractures sur la banquise pourront être activées pour des contraintes de l'ordre de quelques kPa, à comparer aux quelques MPa nécessaires pour rompre des échantillons de laboratoire. Ces niveaux de contrainte (kPa) correspondent effectivement à ceux mesurés sur le terrain (*Weiss, 2001a*).

Les conséquences du caractère auto-affine de la géométrie des fissures pour la mécanique de la rupture commencent à peine à être explorées. Par exemple, le simple fait d'ignorer cette géométrie complexe lors de l'analyse d'essais mécaniques peut engendrer des effets d'échelle apparents sur certains paramètres comme l'énergie de rupture  $G_F$ , et entraîner ainsi une mauvaise interprétation des données (*Weiss, 2001b*). Une analyse géométrique simple montre que cette ignorance induit un effet d'échelle apparent sur la détermination de l'énergie de rupture:  $G_F$  augmente de façon asymptotique avec la taille de l'échantillon. De tels effets d'échelle sur  $G_F$  ont été observés et décrits dans la littérature.

### 2.1.2 RESEAUX DE FRACTURES ET FRAGMENTATION (*J. Weiss, E. Schulson, Dartmouth College*).

On a effectué différentes analyses (réseaux de fractures et de crevasses, fragmentation) ainsi qu'une synthèse des travaux et observations de la littérature (*Weiss, 2001a*) sur les propriétés d'échelle des observables liées à la fracturation de la glace, depuis l'échelle du grain jusqu'aux échelles géophysiques (banquise, glaciers). Cette synthèse met en lumière l'existence de différentes lois d'échelle: organisation fractale des réseaux, distributions en loi de puissances, ... Comme pour le cas de la propagation d'un front de fissure, ces observations indiquent que les mêmes mécanismes de fracturation et de fragmentation sont opérant à toutes les échelles. Toutefois, le lien quantitatif entre ces échelles ne peut s'effectuer par des procédures d'homogénéisation. En effet, l'invariance d'échelle implique que ces procédures d'homogénéisation deviennent inopérantes car toute échelle caractéristique du milieu disparaît, rendant ainsi impossible la définition d'un volume représentatif équivalent. Le passage d'une échelle à l'autre dans un système invariant d'échelle nécessiterait l'utilisation de procédures de renormalisation.

Au delà de cette caractérisation géométrique, il reste à déterminer les raisons de l'émergence de ces invariances d'échelle au sein d'une population de fractures en évolution. Au cours de la dernière dizaine d'années a émergé l'idée que cette organisation de la fracturation puisse résulter de la mécanique de seuil de la rupture fragile et de la redistribution des contraintes dans le milieu à la suite

d'une rupture locale. Dans le cas d'une rupture purement fragile dont il est généralement question dans la littérature, cette redistribution est dictée par les équations de l'élasticité qui ne comportent aucune échelle intrinsèque. Ceci engendre des corrélations à longue portée qui, couplées aux effets d'amplification ou d'écran, donnent au processus de fracturation son caractère hétérogène et fractal. Ces corrélations à longue distance impliquent également qu'une petite perturbation (p.ex. fluctuation locale de contrainte, microfissuration) peut déclencher des événements de toutes tailles (p.ex. macrorupture, séismes), ce qui milite en faveur du caractère non linéaire et critique de la rupture. En particulier, les invariances d'échelle observées sont de même nature que celles observées au voisinage d'un point critique en physique statistique. L'idée d'interpréter la fracturation et la rupture comme un phénomène ou un point critique est assez récente mais semble partagée par une portion croissante de la communauté scientifique.

De ce point de vue, la déformation et la fracturation des glaciers semble faire exception: les réseaux de crevasses ne sont pas invariants d'échelle et les relations longueur-ouverture ne respectent pas la mécanique linéaire de la rupture. Une explication possible pourrait être le mode de déformation majoritaire du glacier (écoulement viscoplastique) qui nous éloigne des conditions de la rupture élastique fragile.

### 2.1.3 DYNAMIQUE ET FRACTURATION D'UN GLACIER

(J. Weiss, A. Helmstetter et J.R. Grasso, LGIT)

Dans le cadre de la thèse d'Agnès Helmstetter, en collaboration avec J.R. Grasso du LGIT de Grenoble, a commencé en 1999 un travail de synthèse sur la dynamique de la fracturation d'objets géophysiques comme les glaciers ou la banquise.

Quelques campagnes préliminaires de mesures sur le glacier de la Girose (Hautes Alpes) au cours de ces deux dernières années ont permis de démontrer la faisabilité du projet et ont donné les principaux résultats suivants:

- le glacier est sismiquement très actif, jusqu'à quelques centaines de séismes par heure détectés par des stations sismologiques classiques dans une zone fortement crevassée. Dans des zones moins crevassées en apparence (ou zones de crevasses fermées), l'activité sismique est plus faible mais néanmoins soutenue.
- l'utilisation sur le terrain de stations sismologiques comme de capteurs d'émission acoustique habituellement utilisés en laboratoire indique que le glacier est actif sur une très large gamme de fréquences, depuis le Hz jusqu'au moins la centaine de kHz.
- dans les zones fortement crevassées, la localisation des sources s'avère très difficile voire impossible, du fait des phénomènes d'atténuation ou de résonance liés à l'ouverture des crevasses. Ceci exclut malheureusement une étude sismologique détaillée dans ces zones particulièrement actives.
- dans des zones où les crevasses sont fermées, le glacier reste actif et la localisation est possible. Le catalogue exploitable recueilli lors de la dernière campagne (été 2000) est néanmoins trop limité pour une étude statistique. Par contre, l'inversion des signaux sismiques (effectuée par des chercheurs du LGIT) a permis une étude détaillée des mécanismes de rupture: rupture en mode d'ouverture (composante de cisaillement négligeable), alignement des sources perpendiculairement au sens d'écoulement, estimation des contraintes de rupture (autour de 50-100 kPa).

## 2.2. Etude du frottement glace-élastomère.

(V. Lenöel-Déloye, J. Meyssonier, S. Borel)

Après une période d'observation de deux ans (codirection de deux stages de fin d'études de l'ECL), une collaboration formelle a été engagée au début 1999 avec la Société Michelin pour étudier les mécanismes du frottement glace/polymère dans le cadre de la thèse CIFRE de Valérie Déloye. Il s'agit d'un domaine fortement pluridisciplinaire, toujours d'actualité, et dont les retombées économiques sont importantes.

Des séries d'essais ont été réalisées avec un pendule de frottement (scléromètre) utilisé couramment sur des revêtements routiers. Les valeurs absolues des coefficients de frottement mesurés sont sans rapport avec celles correspondant aux mesures de terrain, par contre les classements de gommes de natures différentes sont conformes à ce qui est attendu.

Un appareillage spécifique (système pion-disque), conçu et réalisé par Michelin, a été mis au point au laboratoire ce qui a nécessité des modifications importantes. Le principe est celui d'une piste de glace tournant à vitesse constante sur laquelle on fait frotter un patin de gomme. Les efforts normaux et tangentiels sont mesurés avec un capteur de force. La vitesse varie entre 2 et 11 m/s, la contrainte normale nominale entre 1 et 4 bars, et les essais sont faits à température fixée entre -5 et -20°C. La génération d'un flux de chaleur à l'interface due au frottement est un paramètre prépondérant dans ces conditions.

Après chaque essai une caractérisation de la surface frottée a été effectuée par des observations au microscope. Ces observations ont montré la formation d'eau liquide sous le patin, quelles que soient les conditions expérimentales. Plusieurs mélanges de gomme et formes de patin ont été étudiées.

Dans la gamme des paramètres étudiés (vitesse de glissement  $V$ , pression, température) on a observé une phase transitoire correspondant au rodage de la piste de glace, très dépendante de la vitesse de glissement et de la souplesse de la gomme qui a une influence directe sur l'aire réelle de contact. Après cette phase transitoire, un régime permanent s'établit. Les résultats obtenus montrent que le frottement diminue lorsque l'un des trois paramètres vitesse, contrainte normale nominale, ou température, augmente. La trace du patin dans la glace montre l'hétérogénéité du champ de pression sous le patin, qui conduit à une géométrie de trace complexe et dépendante de la souplesse de la gomme, du centrage de l'application de la charge et de la géométrie du patin. Ces aspects mettent en évidence la difficulté pour modéliser proprement ce type d'expérience. Les essais réalisés avec des patins de différentes géométries permettant un centrage ou un décentrage de la charge normale et dotés ou non d'une lamelle (placée à l'avant ou à l'arrière) ont permis d'étayer l'hypothèse, non évidente a priori dans le cas de la glace, de l'existence d'une zone sèche à l'avant du patin. Cette fraction sèche conditionne le niveau de frottement. La décroissance du coefficient de frottement en  $V^{1/2}$  indique la prédominance de la conduction thermique (par rapport au cisaillement visqueux du film d'eau).

### **2.3. Comportement ductile de la neige**

*(C. Cabanac, O. Gagliardini, J. Meyssonier)*

Dans le cadre du projet PRANE (ouvrages de Protection soumis à l'Action de la Neige, cf. rapport de prospective), notre contribution vise à améliorer la description du comportement mécanique de la neige se déformant à faibles vitesses, afin de mieux estimer les efforts induits par la reptation du manteau neigeux sur des filets paravalanches. Cette étude préliminaire avait pour objectif de dimensionner la machine d'essai qui sera utilisée pour la partie expérimentale du projet. Cette machine est une tuyère où la neige sera comprimée, soit à vitesse constante, soit à contrainte constante, et le champ des déformations mesuré par analyse d'images. La modélisation a été faite par éléments finis avec une loi de comportement de matériaux poreux adaptée des poudres métalliques à la neige. Cette loi avait été utilisée dans une étude précédente pour la modélisation de l'écoulement d'un glacier froid recouvert d'une épaisse couche de névé (*Gagliardini et Meyssonier, 1996*). L'étude a permis d'estimer l'ordre de grandeur des efforts à appliquer et l'optimisation des dimensions de la tuyère.

## **Chapitre 5**

# **EQUIPE GLACIERS**

## EQUIPE GLACIERS

Responsable : Christian VINCENT

### PRINCIPAUX AXES DE RECHERCHE

GLACIERS ALPINS ET ANDINS	GLACIERS TROPICAUX	RADIOACTIVITE
<p>Recherche fondamentale et appliquée sur les glaciers alpins et andins, en particulier sur les glaciers de montagne et les glaciers de cirque.</p> <p>Recherche sur les processus de dégradation des glaciers, les variations de leur surface et de leur volume, les interactions avec l'atmosphère et le climat.</p> <p>Recherche sur les glaciers de montagne et les glaciers de cirque, en particulier sur les glaciers de montagne et les glaciers de cirque.</p> <p>Recherche sur les glaciers de montagne et les glaciers de cirque, en particulier sur les glaciers de montagne et les glaciers de cirque.</p>	<p>Recherche fondamentale et appliquée sur les glaciers tropicaux, en particulier sur les glaciers de montagne et les glaciers de cirque.</p> <p>Recherche sur les processus de dégradation des glaciers, les variations de leur surface et de leur volume, les interactions avec l'atmosphère et le climat.</p> <p>Recherche sur les glaciers de montagne et les glaciers de cirque, en particulier sur les glaciers de montagne et les glaciers de cirque.</p> <p>Recherche sur les glaciers de montagne et les glaciers de cirque, en particulier sur les glaciers de montagne et les glaciers de cirque.</p>	<p>Recherche fondamentale et appliquée sur la radioactivité, en particulier sur les radionucléides et les isotopes stables.</p> <p>Recherche sur les processus de dégradation des glaciers, les variations de leur surface et de leur volume, les interactions avec l'atmosphère et le climat.</p> <p>Recherche sur les glaciers de montagne et les glaciers de cirque, en particulier sur les glaciers de montagne et les glaciers de cirque.</p> <p>Recherche sur les glaciers de montagne et les glaciers de cirque, en particulier sur les glaciers de montagne et les glaciers de cirque.</p>

### COMPOSITION DE L'EQUIPE

	GLACIERS ALPINS	GLACIERS TROPICAUX	RADIOACTIVITE
Enseignants-chercheurs	X		
Ingénieurs	X		
Chercheurs IRD	X		X

### PUBLICATIONS (revues à comité de lecture)

Fin 1999	2000	2001
5	4	8

### PRINCIPALES COLLABORATIONS

*Nationales :*

- Cemagref (Grenoble)
- Institut pour la Recherche et le Développement (Paris)
- L3S (Grenoble)
- Parc National des Ecrins
- Service du RTM (Gap)

*Internationales :* VAW de Zürich, section Glaciologie, Suisse  
 Société Météorologique de Turin, Italie  
 Université de Milan, Italie  
 Institut Topographique de Bologne, Italie

## FINANCEMENT

	1999	2000	2001
<b>COMMISSION EUROPEENNE</b>			
Survey and prevention of extreme glaciological hazards in european mountainous regions (GLACIORISK)			
The response of Arctic Ice masses to climate change modelling, remote sensing and field measurements (ICEMASS)			
210 Pb and 137 Cs as tracers of global circulation (ENRICH)			
<b>AUTRES CONTRATS</b>			
OSUG - Services d'observations			
Emosson-Evolution du Glacier d'Argentières			
Cemagref-risques naturels			

# 1 - AXES DE RECHERCHE ET EVOLUTION DE L'EQUIPE

## 1.1. Axes de recherches et rappel des objectifs

L'activité de l'équipe glaciers s'articule autour de 3 axes de recherche :

- l'étude des bilans de masse et des bilans d'énergie en relation avec les changements climatiques
- l'étude des fluctuations glaciaires nécessaire à la compréhension des processus d'écoulement des glaciers.
- l'analyse des radioéléments mesurés dans l'air, la neige, les sédiments lacustres et les sols.

Les bilans de masse constituent des indicateurs directs de l'évolution climatique. Ils sont observés depuis le milieu du 20<sup>ème</sup> siècle en Europe, sur quelques glaciers ; dans les Alpes françaises en particulier, ils sont mesurés depuis 1949 sur le glacier de Sarennes et depuis 1957 sur le glacier de Saint Sorlin. Depuis 1993, notre réseau d'observation s'est étendu à l'ensemble de la surface de 4 glaciers et concerne désormais des mesures bi-annuelles : les bilans hivernaux sont liés aux précipitations hivernales, et les bilans estivaux représentent la fusion estivale, conséquence directe des flux d'énergie en surface.

Les fluctuations glaciaires (variations d'épaisseur et vitesses d'écoulement) sont, via les processus d'écoulement, le résultat des bilans de masse de l'année et des décennies antérieures. La dynamique des glaciers tempérés est loin d'être comprise; en particulier, les mécanismes liés au dérapage du glacier sur son lit constituent un champ de recherche très vaste; cette étude nécessite des séries d'observations longues et continues. En France, grâce au service des Eaux et Forêts, nous disposons d'observations de variations d'épaisseur et de vitesse sur la langue d'une douzaine de glaciers entre 1900 et 1960. Une partie de ces observations a été reprise par le LGGE au début des années 80. Ces études sur la dynamique ont pour objectifs de comprendre les processus d'écoulement, de les modéliser, de préciser les conditions climatiques dans le passé (Petit Age de Glace) à partir des fluctuations de longueurs, de faire des prédictions de l'évolution des glaciers pour le 21<sup>ème</sup> siècle, d'anticiper certains risques naturels liés aux glaciers (chutes de séracs, lacs proglaciaires).

Enfin, l'analyse des radioéléments permet la datation des carottes utilisées comme archive des paléoenvironnements, et en outre, l'estimation des précipitations. Les radioéléments naturels et artificiels permettent d'accéder à ces données. C'est dans cette optique que s'est développée et perfectionnée depuis de nombreuses années au laboratoire l'utilisation de ces techniques. Leur extension à d'autres milieux naturels, comme les sédiments lacustres s'est faite naturellement, en particulier pour compléter la couverture géographique partielle des glaciers. Parallèlement, une exploitation complémentaire des données de radioactivité permet d'utiliser les radionucléides comme traceurs des masses d'air qui les supportent : dans ce but, une banque de données sur le Pb210 a été élaborée et est mise à la disposition des modélisateurs.

## I. 2 Evolution de l'équipe depuis 1999.

Quelques évènements ont marqué ces 2 dernières années :

- o J.F Pinglot est parti à la retraite en mars 2001. M. Pourchet se retrouve ainsi seul permanent dans le groupe radioactivité ; son départ à la retraite est également prévu à l'échelle de un an ou deux. Un nouveau poste (actuellement demandé en concours externe) est absolument nécessaire pour poursuivre cette spécialité du LGGE.
- o Le LGGE accueille dans ses locaux, depuis novembre 2000, Patrick Wagnon, chercheur à l'IRD, dont le thème de recherche est l'étude des glaciers tropicaux. Sa spécialité concerne les bilans d'énergie à la surface des glaciers ; il travaille en étroite collaboration avec l'équipe glaciers du LGGE sur des thèmes similaires ; c'est la raison pour laquelle il a été intégré dans cette équipe. L'objet de la recherche (milieu tropical) reste éloigné géographiquement mais les outils et méthodes d'analyse sont les mêmes. Cette collaboration devrait se renforcer dans les

années qui viennent. Un autre chercheur de l'IRD, Bernard Francou, qui travaille sur les bilans de masse des glaciers tropicaux, a également été intégré à l'équipe glaciers à la fin de l'année 2001.

- Le programme d'observations des glaciers (POG) a été reconnu en 2000 service d'observatoire de l'OSUG qui permet de garantir la pérennité des observations : ce réseau recouvre en particulier les observations bi-annuelles des bilans de masse et les mesures de dynamique de 4 glaciers des Alpes françaises.

## 2 - SENSIBILITE DES BILANS DE MASSE GLACIAIRES AUX VARIATIONS CLIMATIQUES ET EVOLUTION DES BILANS DE MASSE DANS LES ALPES FRANÇAISES DEPUIS LE DEBUT DU 20<sup>EME</sup> SIECLE.

(C. Vincent, M. Vallon, L. Reynaud, A. Letreguilly, P. Wagnon)

Les observations bi-annuelles des bilans de masse effectués sur 4 glaciers depuis 1993, entre 1600 et 3600 m d'altitude ont permis de quantifier la sensibilité des bilans de masse aux variations climatiques. Cette analyse montre que la sensibilité de l'ablation à la température décroît fortement avec l'altitude (Figure 5.1) : à 1800m d'altitude, l'ablation augmente de 1.4 m d'eau pour une élévation de température de 1°C alors qu'elle augmente de 0.5 m d'eau seulement à 2900 m, à proximité de la ligne d'équilibre (rappelons que la ligne d'équilibre, qui sépare la zone d'ablation de la zone d'accumulation sur un glacier, se trouve en moyenne à 2900 m dans les Alpes, et que la variation du bilan de masse avec l'altitude est de l'ordre de 0,7m d'eau par 100m). Les résultats de cette analyse conduisent aux conclusions suivantes : d'une part, ils indiquent que la sensibilité de la ligne d'équilibre à la température est de 60 à 70 m/°C (une migration de 60-70 m pour un réchauffement de 1°), soit environ la moitié des résultats utilisés dans les scénarios classiques de décroissance des glaciers alpins au cours du 21<sup>ème</sup> siècle (qui de ce fait sont probablement surestimés d'un facteur 2) ; d'autre part, il apparaît que la sensibilité de l'ablation à la température est maximum sur les langues des glaciers (1.4 m d'eau/°C à 1800 m) et qu'il est par conséquent primordial, d'un point de vue climatique, de disposer d'observations dans ces régions.

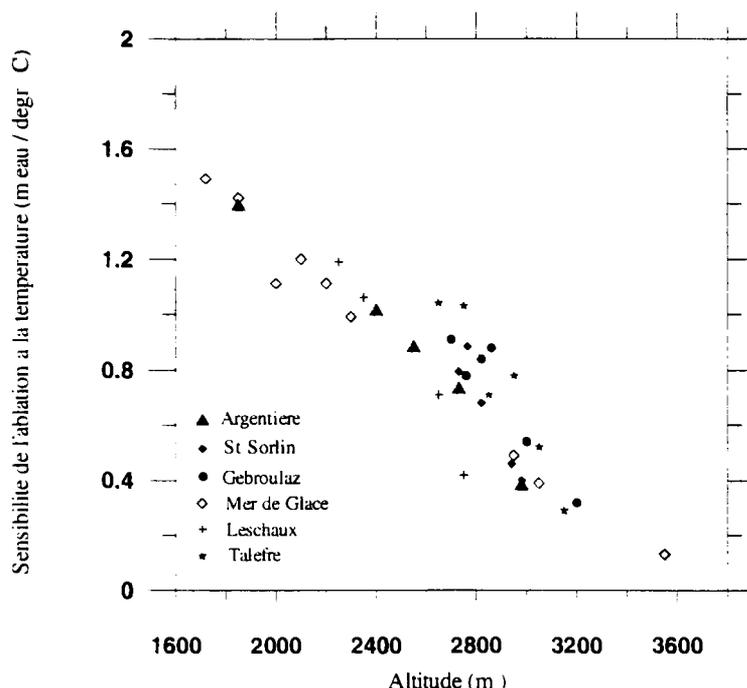
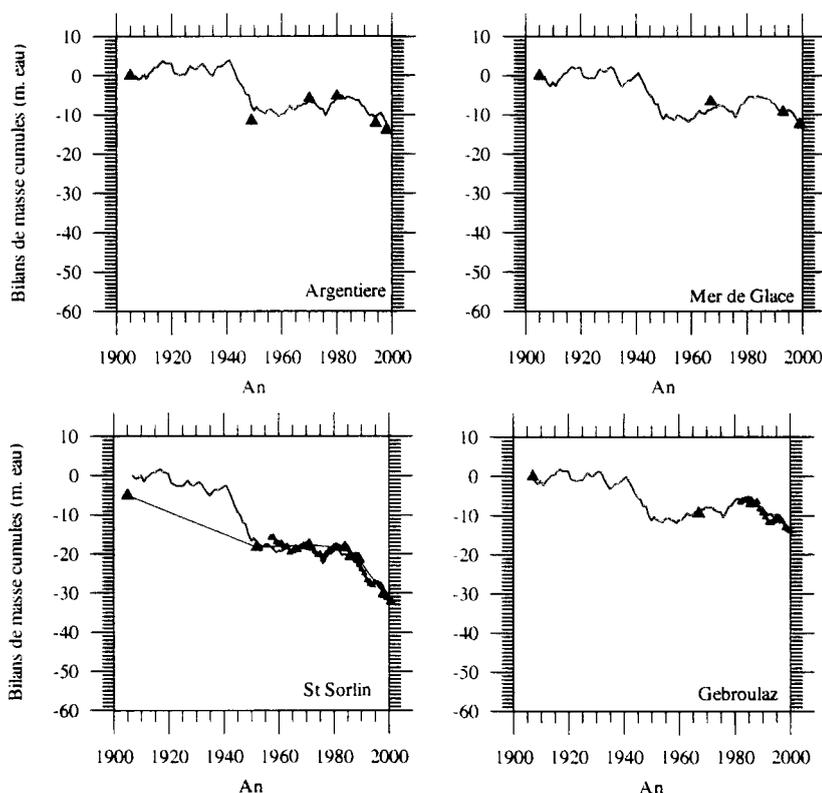


Figure 5.1 - Sensibilité de l'ablation annuelle à la température, en fonction de l'altitude.  
Adapté de Vincent [JGR, sous presse]

Les bilans de masse hivernaux et estivaux de 4 glaciers des Alpes françaises ont été reconstitués à partir des relations entre bilans et variables météorologiques et validée à partir de données topographiques, photogrammétriques (figure ci-dessous). La décroissance des glaciers au cours du

20<sup>ème</sup> siècle n'est pas du tout uniforme et le 20<sup>ème</sup> siècle peut être divisé en 4 périodes : 2 périodes 1907-1941 et 1954-1981 pour lesquelles les volumes des glaciers restent à peu près constants et 2 autres périodes 1942-1953 et 1982-1999 caractérisées par une très forte réduction de la masse glaciaire. La forte décrue de la décennie 1940 est la conséquence d'hivers peu enneigés et d'une importante fusion estivale. Au cours de cette période, l'ablation estivale était même plus élevée que celle enregistrée au cours des 18 dernières années (une partie de cette ablation est imputable à la diminution de l'albédo de surface). Au contraire, l'avance de la plupart des glaciers alpins observée entre 1954 et 1981 est clairement liée aux faibles valeurs d'ablation. Sur la dernière période (1982-1999), la fusion estivale augmente très significativement et l'accumulation hivernale augmente légèrement. Entre 1954-1981 et 1982-1999, l'ablation estivale a augmenté considérablement, de 44% à 2800 m d'altitude (de 1.9 à 2.8 m d'eau) et indique que les bilans d'énergie en surface ont augmenté de 284 MJ/m<sup>2</sup> (soit 22 W/m<sup>2</sup> sur la période estivale). L'augmentation de la température de l'air d'environ 0.8 °C observée sur cette période dans les Alpes pourrait expliquer plus de 60% de la fonte supplémentaire, à travers les changements de flux de chaleur sensible et la variation des radiations grandes longueurs d'onde incidentes. L'élévation du bilan des radiations des courtes longueurs d'onde, influencé par une forte rétroaction de l'albédo de surface, pourrait également expliquer une large part de l'ablation supplémentaire. Elle proviendrait d'une diminution de la nébulosité dans les Alpes au cours des 20 dernières années, qui reste à vérifier. L'ensemble de ces résultats est en cours de publication (Vincent, *Journal of Geophysical Research*, sous presse).



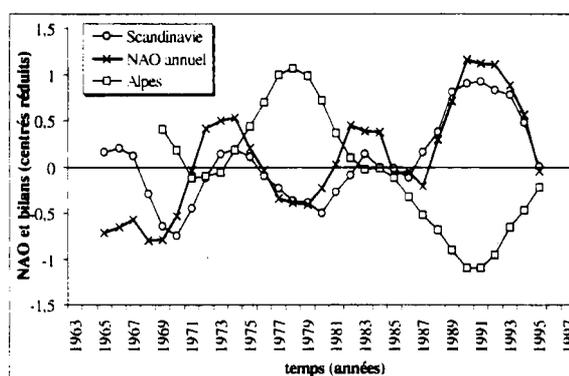
**Figure 5.2** - Variations de volume de 4 glaciers des Alpes françaises, obtenues à partir des mesures directes de bilans (petits triangles), des cartes topographiques ou photogrammétriques (triangles larges) et d'une reconstitution à l'aide de variables météorologiques (trait plein).  
Adapté de Vincent [JGR, sous presse].

### 3 ANALYSE STATISTIQUE DES DISTRIBUTIONS SPATIALES ET TEMPORELLES DES SERIES DE BILANS DE MASSE DES GLACIERS ET DES CALOTTES POLAIRES DE L'HEMISPHERE NORD.

(D. Six, A. Letreguilly, L. Reynaud (Thèse de D. Six, décembre 2000))

L'étude des bilans glaciaires a nécessité tout d'abord un inventaire complet des séries de mesures disponibles, ce qui représente environ 70 glaciers de l'hémisphère nord et 80 sites de relevés au Groenland. A partir de cet ensemble de données, une analyse statistique a permis de rechercher des structures dans la distribution spatiale et temporelle des séries, ceci de façon à mieux comprendre la

relation glacier-climat aux différentes échelles, d'un glacier, d'un massif ou d'un continent. Sur un glacier, l'histoire des bilans est généralement très différente d'un point à l'autre, liée à la différence de sensibilité du bilan aux fluctuations climatiques notamment quand la gamme d'altitude est importante. En revanche, la covariance de différents glaciers entre eux peut être très forte si l'on passe à l'échelle du massif. C'est le cas dans les Alpes et en Scandinavie, même si certaines périodes montrent des inhomogénéités de variations non négligeables, probablement liées au rôle plus important de l'accumulation hivernale. C'est le cas également de la zone d'ablation du sud-ouest du Groenland Atlantique (Six et al., 2001a). Cette cohérence n'apparaît toutefois pas pour d'autres régions parfois moins étendues, comme les glaciers américains ou la zone d'accumulation du Groenland. Pour cette dernière, les analyses montrent qu'il est difficile d'extraire un signal annuel global cohérent qui soit distinct du bruit de mesure. Enfin, l'étude des données météorologiques et de l'Oscillation Nord Atlantique (Six et al., 2001b) a permis de détailler les réponses des bilans aux sollicitations climatiques sur les dernières décennies. Il semble que les modifications des caractéristiques des températures et des précipitations sur le bassin Atlantique (et par conséquent, les variations des bilans des glaciers bordant ce bassin) sont assez fortement reliées aux changements décennaux de l'Oscillation Nord Atlantique et permettent plus particulièrement d'expliquer les variations en opposition de phase des séries de bilan de masse relevés sur les massifs Alpin et Scandinave (figure 5.3).



**Figure 5.3** - Bilans moyens de 9 glaciers des Alpes et de 7 glaciers scandinaves sur la période commune 1967-1997, comparés à l'indice de NAO annuel. Les séries sont centrées, réduites par l'écart-type et moyennées à l'aide d'un filtre pondéré sur 5 ans. Adapté de Six et al . [Comptes rendus à l'Académie des Sciences, sous presse].

#### 4. REPONSE DES MASSES GLACIAIRES ARCTIQUES AU CHANGEMENT CLIMATIQUE

(Programme « Ice Mass » contrat EC n°ENV4-CT97-0490).

(L. Reynaud, J.F. Pinglot)

Un contrat européen (1997-2000) intitulé « The response of Arctic Ice Masses to Climate Change . (Modelling, Remote sensing and Field Measurements) » a réuni des chercheurs de Norvège (Jon Ove Hagen, coordinateur), France, Hollande, Angleterre, Suède, Islande, Autriche ainsi que des partenaires associés de Russie et de Pologne. Pour la France, 2 membres de l'équipe Glaciers du LGGE ont soumis un programme :

- Louis Reynaud : Analyse des répartitions de Bilan de masse glaciaire sur l'Arctique (Groenland et Arctique asiatique). Ces analyses ont constitué une part de la thèse de Delphine SIX, soutenue en décembre 2000, en co-direction avec Anne Letréguilly (cf. analyse des bilans de masse sur l'hémisphère nord) et ont donné lieu à deux publications sous presse actuellement au Journal of Glaciology et aux Comptes Rendus de l'Académie des Sciences.
- Francis Pinglot : Carottages au Svalbard et analyses des éléments radioactifs artificiels pour la détermination de la répartition du bilan de masse et de ses variations dans le temps. Pour cette étude de répartition de l'accumulation sur la calotte glaciaire Austfonna (Nordaustlandet,.

Svalbard), 29 carottages à faible profondeur ont été effectués au cours des années 1998 et 1999. L'accumulation moyenne sur la période 1954-1974 est déduite de la détection des couches de dépôts radioactifs provenant soit des retombées dues aux essais nucléaires aériens (avec un maximum de retombées en 1963) soit de celles caractéristiques de l'accident de la centrale nucléaire de Tchernobyl (1986). Le gradient altitudinal de répartition du bilan de masse ainsi que l'altitude de la ligne d'équilibre ont été déterminés sur 5 profils transversaux à partir du sommet de la calotte. Ces deux caractéristiques de la distribution du bilan de masse révèlent un fort degré d'asymétrie entre la partie exposée à l'Est et celle à l'Ouest, d'une façon semblable à celle de la répartition de l'accumulation hivernale. D'autre part, la variabilité inter annuelle des bilans nets de masse est élevée. Cependant, on n'a pas pu dégager de tendance d'évolution du bilan net de masse entre deux périodes, celle de 1963 à 1986 et celle de 1986 aux plus récents forages (1998-99).

## 5 RISQUES NATURELS D'ORIGINE GLACIAIRE

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

Les risques naturels d'origine glaciaires constituent une manifestation des modifications glaciaires heureusement peu fréquente mais souvent meurtrière. À ce titre, l'équipe Glaciers du LGGE est impliquée dans différents programmes de recherche :

- 1) **Etude de l'évolution du glacier et du lac proglaciaire d'Arsine** : suite à l'alerte du risque de débordement du lac pro-glaciaire d'Arsine en 1986 et aux travaux effectués par les services du RTM pour créer un exutoire, l'équipe glaciers du LGGE a poursuivi des observations régulières de cette région qui continue d'évoluer fortement (apparition d'un autre lac proglaciaire). L'objectif de l'étude, demandée par la Municipalité du Monestier les Bains (05), concerne, d'une part la surveillance du site (observations annuelles sur le glacier et les lacs), d'autre part la compréhension de l'écoulement du glacier afin d'anticiper l'évolution de lacs potentiellement dangereux.
- 2) **XI° Contrat de plan Etat-Région, Programme sur les risques naturels d'origine glaciaire**, 1998 et 1999, proposition LGGE-Cnrs et ETNA-Cemagref, Coordinateur Louis Reynaud, LGGE. Avec François Valla du Cemagref, nous avons proposé de réaliser un premier inventaire des glaciers alpins français à risque, avec une localisation, un historique des événements anciens ou modernes, en fournissant une analyse et une évaluation des risques pour les 3 principales formes : chutes de séracs, ruptures de lacs pro-glaciaires, vidanges de poches d'eau. Pour cela nous avons proposé trois stages d'études à des étudiants de fin de maîtrise ou d'école d'ingénieurs pour couvrir les massifs du Mont-Blanc, Vanoise Grandes Rousses et Ecrins (Christophe Dumas, Maîtrise des sciences de la Terre, Jussieu et Anne Buisson, Olivier Georgel, Ecole d'Ingénieur IST Grenoble). Ainsi préparé, cet inventaire a été mis en forme et publié avec le support du Cemagref, sous la direction de François Valla : « Glaciers à risques, Alpes Françaises, Inventaire et suivi, Février 1999 ».
- 3) **Contrat « Glaciorisk », EESD-ENV-99-2 : « Survey and prevention of extreme glaciological hazards in Europe, montaneous regions »**. Ce contrat européen, coordonné par François Valla du Cemagref, porte sur la période de 2000 à 2003 et réunit des chercheurs Français, Italiens, Suisses, Autrichiens, Norvégiens et Islandais. La participation du LGGE porte sur l'évolution d'une chute de séracs ; celle du glacier de Tacconnaz, qui a déjà provoqué des dégâts importants dans la vallée de Chamonix, a été choisie comme étude de cas. Les premières observations, qui ont débuté en juin 2001 (vitesses d'écoulement en surface, bilans de masse) ont pour but d'évaluer le volume de vèlage annuel de séracs. Par la suite, nous tâcherons, à partir d'observations répétées, d'établir une relation vitesses d'écoulement – occurrence d'une chute, afin d'être en mesure d'anticiper une chute, en particulier au cours de la saison hivernale ; en effet, ces chutes de séracs s'avèrent particulièrement dangereuses en hiver puisqu'elles déclenchent à l'aval des avalanches de neige.

## 6. DYNAMIQUE DES GLACIERS TEMPERES.

(M. Vallon, C. Vincent, L. Reynaud, E. Le Meur)

La longue série (1957-2001) de mesures de déplacements des balises sur le glacier de Saint Sorlin (massif des Grandes Rousses) a été utilisée par C. Vincent (Vincent et al., 2001) pour tester la capacité du modèle classique imaginé par J. Weertman (1958, *AIHS*, 47, pp162-168) et développé par J.F. Nye (1960, Proc. Roy. Soc. London A 256 p559-584), modèle exposé dans tous les traités et précis de glaciologie, de Lliboutry (1965) à Paterson (1994), à rendre compte de la dynamique d'un petit glacier de montagne. Il est bien connu que le paradigme sur lequel repose ce modèle, à savoir l'existence d'une relation entre vitesse de dérapage et scission basale, n'a jamais pu être confirmé par les observations faites sur de grands glaciers rapides (Meier, 1967, *AIHS* 79, p. 49-57 ; Lliboutry et Reynaud, 1981, *J. of Glaciology*, 27(96), p. 207-226) mais on pouvait espérer que sur un petit glacier montrant un dérapage de seulement quelques mètres par an, une loi de dérapage de type Weertman puisse être utilisée pour rendre compte des variations des fronts glaciaires dues aux fluctuations climatiques. Pour le glacier de Saint Sorlin, toutes les données nécessaires à une telle modélisation (histoire des bilans de masse, topographie du lit et champ de vitesses en surface) ainsi que celles permettant de tester les résultats (histoire des variations d'épaisseur et de vitesses) sont connues avec une bonne précision. Partant d'une topographie entièrement déglacée, le modèle permet de bâtir, en quelques 5 siècles pour un bilan supérieur en tout point de 550 kg/m<sup>2</sup> au bilan moyen 1957-1997, un glacier comparable à l'état de 1905. L'histoire détaillée des bilans annuels du 20<sup>ème</sup> siècle (bilans reconstitués à partir des données météorologiques pour la période 1905-1956 et bilans observés de 1957 à 1997) est alors appliquée.

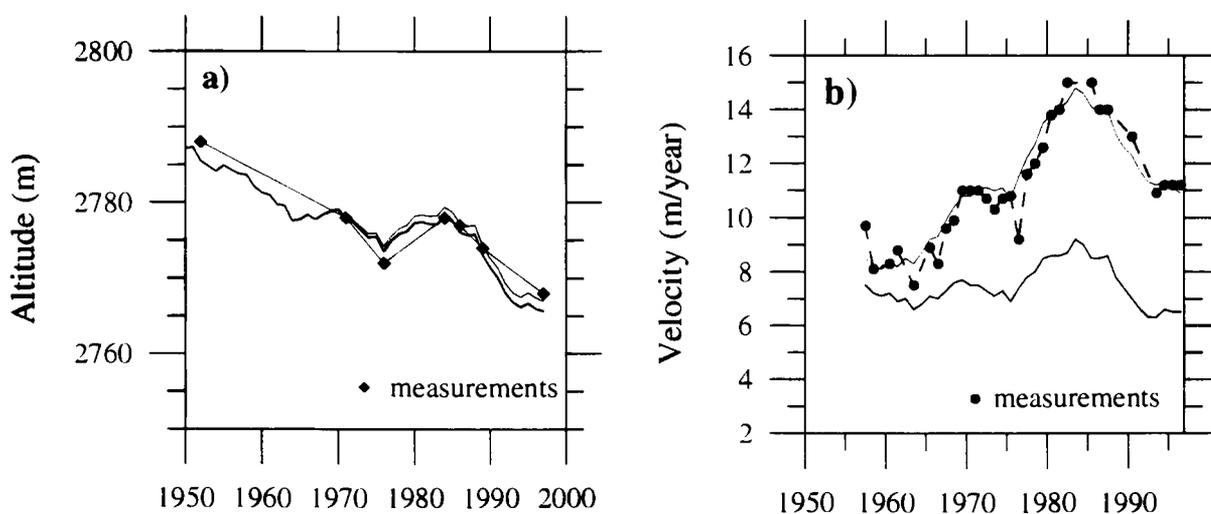


Figure 5.4 - Variations d'épaisseurs (a) et vitesses d'écoulement en surface (b) au centre du glacier de saint Sorlin, obtenues à partir des observations (points) et d'un modèle d'écoulement (trait plein).

Adapté de Vincent et al., 2000.

On constate que :

- le modèle rend bien compte des variations d'épaisseur du glacier au cours du 20<sup>ème</sup> siècle, résultat attendu d'un modèle faisant explicitement intervenir la conservation de la masse (équation de continuité)
- les vitesses calculées sont par contre très différentes des vitesses effectivement observées.
- Le modèle est incapable de rendre compte du fait que les vitesses en surface sont partout supérieures en 1997 aux valeurs observées en 1960, alors que le glacier était plus épais en 1960 qu'en 1997.
- La vitesse de dérapage que l'on peut estimer en comparant vitesses observées et vitesses calculées selon le modèle est une fonction du temps, la même pour tout le glacier, indépendante du lieu, de l'épaisseur de glace et de ses fluctuations temporelles ainsi que des différents termes du bilan de masse.

- e) Tous les ajustements de paramètres concernant la loi de déformation de la glace ou la « loi » de dérapage que l'on a réalisés n'ont jamais permis d'améliorer la capacité du modèle à rendre compte des observations.

L'origine de l'évolution de la dynamique du glacier réside peut-être dans la région amont du glacier. En effet :

- a) au dessus de 2900 m d'altitude, la période d'accélération du glacier (1960-1980) est une période pendant laquelle le glacier s'épaissit d'une dizaine de mètres et pourrait constituer une zone motrice « poussant » la région aval en voie d'amincissement continu.
- b) Lliboutry (*J. of Glaciology, sous presse*), comparant la dynamique du glacier de Saint Sorlin en 1961-62 et en 1973-74 note qu'il semble que l'accélération observée entre ces 2 époques correspond à une migration du point « isotrope », c'est à dire de la limite entre convergence et divergence des lignes de courant située vers 2800 m d'altitude. La clef de la dynamique du glacier pourrait donc se situer près de la ligne d'équilibre ou en zone d'accumulation.

## **7. ANALYSE DES BILANS DE MASSE EN ANTARCTIQUE A PARTIR DES RADIOELEMENTS**

*(M. Pourchet, J.F. Pinglot)*

La datation des carottes de neige en Antarctique est basée soit sur le repérage des horizons radioactifs artificiels associés aux essais thermonucléaires atmosphériques des années 50 et 60 ou par l'accident de Chernobyl en 1986, soit sur la décroissance du Pb210 déposé avec le manteau neigeux. Les techniques de mesure sont la mesure de la radioactivité bêta, les spectrométries alpha et gamma.

### **7.1. Dronning Maud Land**

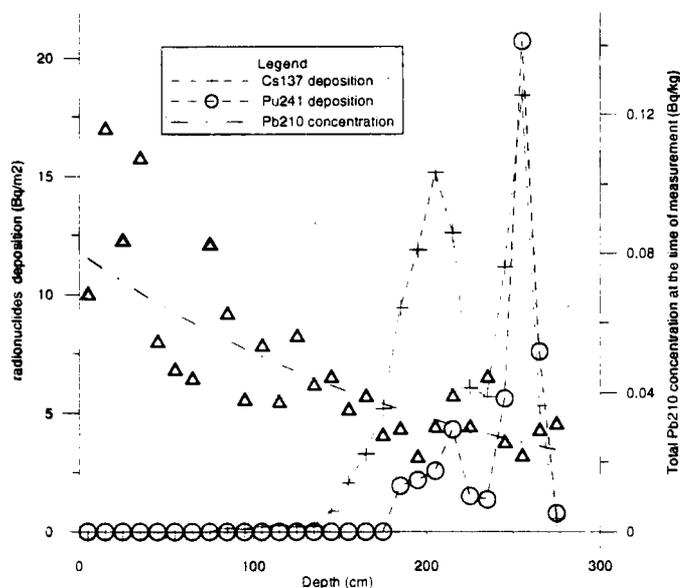
Une nouvelle série de 6 carottes a été prélevée par nos collègues Norvégiens sur le plateau polaire en 2000-2001. L'analyse des mesures de l'accumulation a commencé. Cette série vient compléter les 25 forages déjà analysés dans cette zone et dont les résultats sont en cours de publication.

### **7.2. Terra Nova - Dome Concordia**

Le but final de ce travail est de mieux cerner la distribution de l'accumulation sur la zone de l'Antarctique comprise entre les méridiens 90 et 180 ° E. Dans le cadre des programmes EPICA et CONCORDIA (coopération franco-italienne) des prélèvements effectués durant un premier raid en 1999-2000 entre Terra Nova et Dome Concordia ont mis en évidence des hiatus d'accumulation sur des zones très importantes : de ces mesures et des observations satellitaires effectuées par les italiens, il apparaît qu'une grande partie de la région intérieure de l'Antarctique de l'Est pourrait avoir un bilan de masse nul ou légèrement négatif. Une seconde campagne très légère de prélèvement a été faite à partir de la base de Terra Nova durant la saison d'été 2000-2001 en utilisant un avion léger (Twin Otter). Ces prélèvements, en cours d'analyse sont destinés à préciser les limites des zones à faible accumulation et seront complétés durant le raid de 1400 km entre Dumont d'Urville et Terra Nova (novembre 2001 à Février 2002).

### **7.3 Caractérisation du pic radioactif de 1955**

En Antarctique, la datation par les radioéléments artificiels est basée sur le repérage de 2 pics principaux correspondant à des dépôts en janvier 1955 et janvier 1965. Pour certaines stations la caractérisation simultanée de ces 2 pics est parfois ambiguë. Une nouvelle méthode développée au LGGE a permis de lever cette ambiguïté. La mesure par spectrométrie gamma à très bas niveau de l'Américium 241 fournit une signature non ambiguë des explosions des années 50. En effet ces bombes étaient beaucoup plus riches en Plutonium 241 que celles des années 60. Cette méthode, appliquée aux stations de Vostok et de Dome Concordia, donne de très bons résultats (publication en cours).



**Figure 5.5** - Sur ce graphe correspondant à la station de Vostok, on peut observer en fonction de la profondeur : la décroissance générale du Pb210 (triangles), le profil en Cs137 (croix), caractérisé par 2 pics principaux à 200 et 260 cm correspondants respectivement à 1965 et 1955, le profil en Pu241 (cercles) caractérisé par le pic de 1955 synchrone avec les arrivées de Cs137.

## 8 - SEDIMENTS LACUSTRES

(M. Pourchet, M.A. Mélières)

### 8.1 Alpes

Les Alpes Françaises comptent plus de 4000 lacs, dont les sédiments offrent une source potentielle très importante pour l'étude des paléoenvironnements (pollution, séismes, climat...). Dans les sédiments du lac du Bourget, le couplage des datations par les radionucléides avec le repérage et la caractérisation des homogénites a permis d'identifier sans ambiguïté le séisme historique de 1822 et en retour le recalage absolu des datations au  $^{210}\text{Pb}$  (Chapron *et al.*, 1999). Ce développement a été rendu possible par la collaboration active que nous avons avec le laboratoire de Géodynamique des Chaînes Alpines de l'Université de Savoie

### 8.2 Guyane : Le programme "Mercure Guyane"(1998-2001)

Le  $^{210}\text{Pb}$  est utilisé ici à la fois comme outil chronologique et marqueur de l'aérosol, dans les sols et sédiments dans l'étude de la pollution par le mercure liée aux pratiques d'orpaillage. Les campagnes de prélèvement ont eu lieu dans 5 régions, dont une particulièrement éloignée de toute source de pollution et trois au voisinage de centres d'orpaillage. Les analyses en Pb210 et mercure total concernant l'échantillonnage en sols, sédiments et canopée sont en cours. Les premiers résultats relatifs aux sédiments montrent que souvent une partie du Hg déposée dans le sédiment est progressivement relarguée sous forme soluble, le reste étant enfoui définitivement. Ceci implique que les sédiments ne constituent bien souvent pas un piègeage efficace de la pollution par le Hg. Ceci implique également que les reconstitutions historiques faites à partir des profils sédimentaires peuvent être biaisées et que l'augmentation du Hg vers la surface du sédiment, attribué à l'impact anthropique, peut être le résultat de la diagenèse précoce. Des critères basés sur le profil du Pb210 dans le sédiment ainsi que celui de la matière organique sont à l'étude afin d'éliminer ce biais. En Guyane, des teneurs élevées en mercure ont été observées dans différents milieux. La connaissance des mécanismes de transfert entre les différentes cases écologique a été entreprise dans le cadre du programme Mercure en Guyane, financé par la communauté européenne en collaboration avec 11 laboratoires. Notre contribution à ce programme est d'utiliser les radionucléides comme traceurs de ces échanges. Les campagnes de prélèvements et de mesures du  $^{137}\text{Cs}$  et du  $^{210}\text{Pb}$  dans des sols et des sédiments nous ont permis d'identifier plusieurs sites non perturbés par les activités d'orpaillage et de préciser les critères de reconnaissance des profils dans lesquels il y a une fixation totale du mercure déposé ou au contraire une remobilisation partielle. Par ailleurs, à Petit Saut la collecte en continu des dépôts et des

concentrations dans l'air nous a permis de caractériser les mécanismes de dépôt des aérosols (voir chapitre sur les flux de radioéléments).

## 9 - FLUX DE RADIOELEMENTS

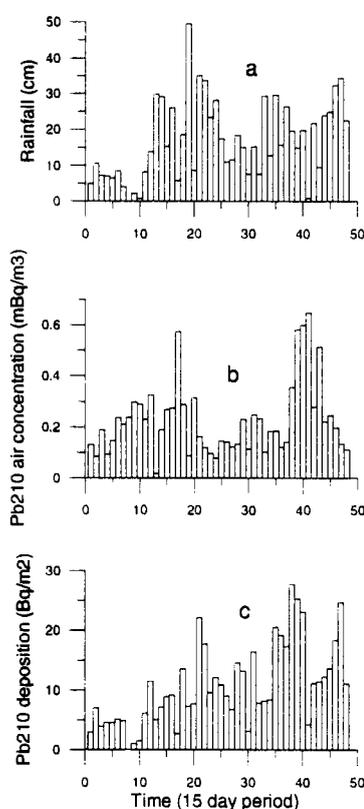
(M. Pourchet, M.A. Mélières)

### 9.1. Antarctique:

L'analyse simultanée de plusieurs radionucléides naturels et artificiels a mis en évidence la très forte corrélation entre les flux de dépôt des radionucléides naturels et les bilans de retombées des radionucléides artificiels. Il en résulte que les radionucléides peuvent être utilisés comme traceurs de la pollution amenée par la stratosphère. Pour le secteur Antarctique 90-180 E, une nouvelle carte détaillée des retombées de radionucléides est en cours d'élaboration.

### 9.2. Guyane : Mise en place de la station de Petit Saut en juillet 1999 – premiers résultats

Cette station mesure en continu la concentration en Pb210 et Be7 dans l'air ainsi que leur flux de dépôt total (retombée sèche et humide), avec un pas de temps de 15 jours. Ces deux radionucléides sont des traceurs du transfert et dépôt atmosphérique de l'aérosol. Ce suivi, unique dans cette bande de latitude, a été mis en place dans un double but :



*Figure 5.6 - Sur ces 3 profils obtenus à la station de Petit Saut, on peut observer que le flux de dépôt du Pb210 (c) est sensiblement proportionnel à la pluviométrie (a), alors que la concentration dans l'air (b) est peu affectée par les précipitations.*

- une meilleure connaissance du processus de dépôt de l'aérosol afin d'estimer le flux de retombée moyen annuel sur les différentes zones de la Guyane. La connaissance de ces flux permettra d'interpréter les profils obtenus en  $^{210}\text{Pb}$  et en Hg dans les sols et sédiments pour calibrer les retombées et transfert de l'aérosol atmosphérique.
- la simulation à l'aide de modèles GCMA / CTMA de l'évolution saisonnière mesurée (flux et concentration) en  $^{210}\text{Pb}$  et  $^7\text{Be}$ , permettant de tester la pertinence des schémas de dépôt et

transport dans cette zone côtière tropicale, ceci en vue ultérieurement d'utiliser ces modèles pour la simulation de la pollution d'origine atmosphérique dans cette région.

Les résultats en cours font apparaître la très grande variabilité climatique entre les deux années consécutives de mesures. Ils révèlent cependant un résultat inattendu : une concentration dans l'air comparable entre la saison sèche et la saison humide, et ce, malgré un facteur 4 dans les précipitations. Ceci s'interprète par le renouvellement rapide des masses d'air comparé à leur épuisement par les précipitations et va permettre la paramétrisation du flux de retombée en fonction des précipitations. Ce suivi est unique dans cette bande de latitude tropicale en Amérique du sud.

### 9.3 Banque de données

La banque de données sur le Pb210 mise à la disposition des modélisateurs (site Web du LGGE) depuis plusieurs années est régulièrement mise à jour, à la fois par un travail bibliographique et par nos propres mesures. Elle s'est en particulier enrichi par plusieurs sites d'observations des cycles saisonniers. La banque de donnée a été utilisée en particulier dans le cadre d'une expérience internationale d'intercomparaison regroupant près d'une dizaine de modèles GCMA et GCTA sur la simulation de l'aérosol sulfaté (expérience COSAM 1998-2001), menée dans le cadre de WCRP. Le Pb210 y est utilisé comme traceur du transport et dépôt des aérosols. La synthèse des mesures disponibles dans cette banque a conduit à choisir certains sites géographiques pertinents pour les simulations. L'ensemble de l'expérience est en cours de publication (*L. A. Barrie et al. Tellus, Vol 53B, 2001, accepté*). La banque de donnée a également été utilisée dans le cadre du programme européen «Radionucléides, tracers of global circulation» (ENRICH) pour établir la synthèse de la couverture géographique existante actuellement. Ceci a contribué à la définition d'un projet auquel participe notre équipe, présenté récemment aux communautés européenne : "IMPACT MOMENT" (IMProved observations of Aerosol- atmOspheric attachMent and scavEnging in a chaNGing climaTe). (Coorganisation d'un Workshop : «Radionucléides, tracers of global circulation» (EU Programme) - Uppsala, Suède, nov 1999 - (30 participants) Contribution : The Grenoble 210 Pb data bank : an overview - Where to extend the coverage. M. A. Mélières)

## 10. BILANS D'ENERGIE ET BILANS DE MASSE SUR LES GLACIERS ANDINS

(P. Wagnon, L. Reynaud)

### 10.1. Bilan d'énergie du glacier Zongo, Bolivie (Thèse de P. Wagnon, soutenue en avril 1999, dirigée par L. Reynaud et P. Ribstein)

Cette thèse effectuée au LGGE et encadrée à la fois par Louis Reynaud et Pierre Ribstein (IRD), montre que les glaciers tropicaux sont des indicateurs climatiques très sensibles. Ce travail donne les caractéristiques du bilan d'énergie d'un glacier tropical, le glacier Zongo en Bolivie sur une période de plus de deux années entre 1996 et 1998. Ce bilan d'énergie traduit un métabolisme propre aux glaciers tropicaux. L'albédo est le paramètre essentiel qui contrôle la quantité d'énergie disponible pour la fusion en surface du glacier. La particularité fondamentale de ces glaciers réside en la très forte consommation d'énergie sous forme de chaleur latente (ce qui se traduit par une sublimation élevée). En outre, le flux de chaleur latente présente une saisonnalité marquée à l'origine du régime hydrologique du torrent qui s'échappe du glacier. En effet, en saison sèche, la sublimation est maximale et il reste peu d'énergie pour la fusion d'où le faible débit du torrent émissaire. La situation opposée se produit en saison humide. [Wagnon et al., 1999a et 1999b].

À l'échelle de l'ensemble de la période étudiée, le bilan de masse nettement déficitaire de l'année El Niño 1997-98 s'explique surtout par un déficit de précipitations, responsable d'une chute de l'albédo moyen annuel. Le manteau neigeux réduit lors de la saison d'accumulation 1997-98 a disparu plus vite que celui de l'année précédente, laissant affleurer une surface de glace sale, d'albédo faible, pendant une période plus longue. De plus, la chaleur sensible plus élevée et la sublimation réduite ont aussi contribué à augmenter la fusion superficielle, diminuant ainsi le bilan de masse du glacier. [Wagnon et al., 2001].

## **10.2. Bilan d'énergie de haute altitude des glaciers tropicaux**

Depuis novembre 2000, P. Wagnon travaille comme chercheur dans l'unité de recherche GREAT ICE de l'IRD (Glaciers et Ressources en Eau des Andes Tropicales ; Indicateurs Climatiques et Environnementaux) et est accueilli dans l'Equipe Glaciers du LGGE. Dans ce cadre, il a participé à un carottage de glace au Chimborazo (Equateur) (Novembre-Décembre 2000). Afin d'aider à l'interprétation des carottes de glace andines, P. Wagnon dirige un programme qui vise à étudier spécifiquement les processus se produisant à l'interface air/neige en menant simultanément une expérimentation météorologique de bilans d'énergie et des analyses chimiques et isotopiques des couches superficielles sur les sites de forage (projet ACI-Jeunes Chercheurs 2001-2003, 59 000 Euros).

Une première expérimentation a eu lieu sur le site de forage de l'Illimani (Bolivie, 6340 m) en mai 2001. Les mesures météorologiques ont permis de calculer la sublimation qui est forte à cette altitude dans cette zone climatique (moyenne de 1.2 mm d'eau par jour en saison sèche) [*Wagnon et al., Soumis à JGR*]. Les échantillons de neige prélevés lors de cette mission de terrain ont été analysés au LGGE (chimie) et au LSCE (isotopes) et sont en cours d'interprétation.

## **10.3. Bilans d'énergie des glaciers tropicaux (Bolivie et Equateur)**

Avec son équipe de l'IRD, P. Wagnon s'occupe de gérer les stations météorologiques de bilan d'énergie installées sur les glaciers Zongo (Bolivie) et Antizana (Equateur). Les données recueillies sur le glacier Zongo sont traitées par J.E. Sicart qui terminera sa thèse début 2002, thèse dirigée par Pierre Ribstein et en partie encadrée par P. Wagnon. Les données du glacier Antizana vont servir à la thèse de Vincent Favier qui a débuté en octobre 2001. La partie bilan d'énergie est encadrée par P. Wagnon.

## **10.4. Bilan d'énergie de la couverture neigeuse des Andes tropicales**

P. Wagnon est responsable de la partie bilan d'énergie du projet PNRH 01-37 intitulé Dynamique de la couverture neigeuse des Andes tropicales et coordonné par P. Chevallier (IRD, Great Ice). Depuis octobre 2001, une station météorologique fonctionne non loin du glacier Zongo, sur une zone morainique. Cette station vise à mesurer le bilan d'énergie de la couverture neigeuse intermittente qui couvre les moraines en saison humide. Cette station fournit toutes les données d'entrée du modèle CROCUS de Météo France qui sera testé sur cette zone.

## **Chapitre 6**

# **SERVICES TECHNIQUES**

## PRESENTATION DES SERVICES TECHNIQUES

	Bureau d'Etudes	Atelier Général	Atelier Electronique	Infrastructure	Participation mission polaires	Activité
O. Alemany, IR2					X	Responsable services techniques Coordinateur EPICA Responsable technique projet carottier 1000 mètres
L. Augustin (IE)	X				X	Etudes Chef foreur EPICA à Dôme C
J.P. Balestrieri (TCS)		x				Electromécanicien ACMO du Laboratoire
J.F. Chemin (AI)				X	X	Responsable chambres froides
J.L. Gabarre (TCN)				X	X	Responsable bâtiment
E. Lefebvre (AI)			X			Electronique digitale et analogique
A. Manouvrier (IE)		X			X	Mécanicien
P. Possenti (TCN)	X	X			X	Mécanicien 50 % atelier 50 % études

### COLLABORATIONS

#### Collaborations internationales

ENEA, Brasimone  
Saint Pétersbourg Mining Institute (Etude carottiers)  
Brisish Antarctic Survey (Etude carottiers)

#### Collaborations nationales

Division technique de l'INSU  
Laboratoire des Ecoulements Géophysiques Industriels  
Institut des Sciences Nucléaires de Grenoble  
SERAS, CNRS Grenoble  
SIEG, CNRS Grenoble  
Service Interuniversitaire de Gestion du Domaine  
Universitaire

Les services techniques du LGGE regroupent différents services ou ateliers. Ceux-ci sont organisés pour permettre de répondre aux besoins spécifiques des équipes du laboratoire. Ce soutien concerne aussi bien la conception d'ensembles instrumentaux complets que la réalisation de pièces mécaniques et d'assemblages, la conception et réalisation de circuits électroniques ou la maintenance des bâtiments et des salles techniques du laboratoire. Toutes ces activités nécessitent des compétences pointues dans des domaines comme la mécanique, l'hydraulique, l'électrotechnique, l'électronique, ou la transmission de données en milieu hostile (températures allant jusqu'à -50°C ou pression jusqu'à 400 bars).

Il est important de noter que, dans la plupart des cas, les instruments conçus et réalisés dans les différents ateliers du LGGE sont mis en œuvre sur le terrain (Antarctique, Groenland, Alpes...) par les personnes ayant participé au développement de ces outils. Ces missions mobilisent entre 3 et 4 membres des services techniques pendant plus de trois mois chaque année.

## **1 ACTIVITE DES ATELIERS**

### **1.1 Bureau d'études**

Les logiciels de conceptions utilisés au bureau d'études sont :

- Euclid (installé sur une station UNIX)
- SolidWorks (installé sur deux PC)

Ces deux dernières années, les activités du bureau d'études ont essentiellement été axées sur le développement d'ensembles de forages polaires. Quelques instruments expérimentaux ont toutefois été conçus (tout ou partie) par le bureau d'études, ceux-ci seront listés un peu plus loin.

#### *1.1.1 CONCEPTION DE CAROTTIERS POLAIRES*

##### o *Carottier EPICA (European Project for Ice Coring in Antarctica)*

L'objectif du carottier EPICA est de réaliser des carottages polaires profonds jusqu'à une profondeur de 4000 mètres. Ce carottier a été réalisé en collaboration avec les universités de Copenhague et de Bern ainsi qu'avec l'ENEA de Brasimone. Après les phases d'études, de conception et de réalisation (1995-1998), ces deux dernières années ont principalement été consacrées aux modifications (nouvelles têtes de forage, système de libération du carottier...) et à la maintenance du carottier.

Un banc d'essais du compartiment moteur a ainsi été conçu puis réalisé en 1999 afin de tester en chambres froides, à -50°C, le comportement du moteur et de l'électronique embarquée du carottier EPICA.

Il faut ici noter que Laurent Augustin, ingénieur d'études du bureau d'étude, a été nommé « chef foreur » du projet EPICA en 1997 et que depuis, il consacre l'essentiel de son temps à la maintenance de l'ensemble de forage et à la préparation des saisons de terrain.

##### o *Carottier 1000 mètres*

Ce projet de développement technologique est lié au projet scientifique d'étude détaillée du climat et de la composition de l'atmosphère sur les 15000 dernières années. Il s'agit notamment de comprendre la variabilité naturelle du climat dans des conditions proches de celles que nous connaissons aujourd'hui. Afin de distinguer les fluctuations de faible amplitude du bruit, plusieurs forages pour lesquels on pourra établir une chronologie commune détaillée sont nécessaires. Ce projet est mené avec le soutien de l'IFRTP (Institut Français pour la Recherche et la Technologie Polaire), le BAS (British Antarctic Survey) et la division technique de l'INSU.

Ici, le travail technique réalisé ces deux dernières années a été consacré aux phases de pré-étude puis d'étude du carottier ; la conception proprement dite n'ayant commencé que depuis mai 2001. Il s'agit, en fait, de concevoir un nouvel ensemble de forages aisément transportable sur les calottes polaires, devant permettre d'atteindre la profondeur de 1000 mètres en une saison terrain sans infrastructure lourde.

Ce travail de conception s'appuie sur l'expérience acquise lors de la conception du carottier « EPICA » tout en adaptant à un cahier des charges un peu différent. Notre attention s'est notamment portée sur :

- ✓ l'amélioration de la circulation du mélange fluide/copeaux dans la partie basse du carottier ;
- ✓ l'étude des interactions outils de coupe/glace ;
- ✓ l'étude d'une nouvelle géométrie de tête de carottiers ;
- ✓ le dimensionnement des pièces pour les rendre transportables par TwinOtter

### *1.1.2 CONCEPTION D'INSTRUMENTS DE LABORATOIRE*

Le bureau d'étude a également été fortement impliqué dans la conception des instruments de laboratoire suivants :

- ✓ spectromètre de masse à ionisation photonique (SMIP), conception de quelques enceintes sous ultra-vide ;
- ✓ amélioration d'une piste d'essais pour simuler l'interaction gomme/glace ;
- ✓ pré-étude d'une installation de compression de la neige à vitesse constante ;
- ✓ conception d'une installation d'essais destinée à simuler le fonctionnement des carottiers électromécaniques.

## **I.2 Atelier électronique**

L'atelier est équipé d'un logiciel de CAO électronique qui comprend :

- ✓ une saisie de schéma
- ✓ un simulateur analogique/numérique
- ✓ un routage de circuits imprimés multicouches et routeur automatique 4 couches.

L'activité de cet atelier est essentiellement orientée vers l'étude et la réalisation :

- ✓ de dispositifs de télémessure et de télécommande destinés aux systèmes de carottage et de mesures dans les trous de forage ;
- ✓ d'instruments de mesures 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 de terrain.

***Les derniers travaux réalisés par l'équipe sont :***

- ✓ participation aux modifications de l'électronique embarquée du carottier EPICA
- ✓ amélioration et maintenance de la sonde de contrôle des paramètres de forage (Logger) qui a été réalisée de 1996 à 1998 : calibration des capteurs, écriture de nouveaux programmes d'acquisition, traitement des données...
- ✓ Etude d'un nouveau système de mesure de températures dans les trous de forages. La précision de ces mesures étant du 1/100 de degré Celsius en relatif avec une résolution au 1/1000 de degré.

## **I.3 Atelier mécanique**

Outre leur participation à quasiment toutes les missions de terrain, les membres de l'atelier mécanique sont également impliqués dans les travaux de développement technologique et de préparation technique liés aux :

### *1.3.1 FORAGES*

- ✓ Usinage de têtes de carottiers électromécaniques sur des centres d'usinages 4 axes au SERAS (Service d'Etudes et Réalisation d'Appareillage Scientifique) ;

- ✓ Usinage d'un nouveau type de pompe volumétrique pour carottier ;
- ✓ Maintenance de pièces de carottier (arbre creux, tube carottier...).

### *1.3.2 APPAREILS SCIENTIFIQUES DE LABORATOIRE*

- ✓ Equipe climat
  - amélioration et automatisation de la ligne d'extraction du méthane
- ✓ Equipe chimie
  - réalisation de la chambre d'ionisation pour un spectromètre de masse
  - aide au montage du SMIP
- ✓ Equipe rhéologie des glaces
  - modifications et montage de l'installation de simulation du frottement gomme-glace ;
- ✓ Equipe glaciers tempérés
  - modification de la sonde à vapeur ;
  - machine permettant d'usiner les lames minces.

## **1.4 Infrastructure**

Les personnes veillant au bon fonctionnement du bâtiment et des salles techniques du laboratoire travaillent bien entendu en collaboration avec les équipes scientifiques du LGGE mais également avec les autres services chargés du patrimoine, tant à la délégation Rhône Alpes du CNRS (SIEG : Services d'Intervention et d'Entretien Général) qu'à l'Université (SIGDU : Service Interuniversitaire de Gestion du Domaine Universitaire). Ils ont pris une part active à la rédaction du cahier des clauses techniques particulières de la nouvelle salle de conférence qui doit être réalisée au laboratoire en 2002.

Deux des ateliers de «l'infrastructure», la menuiserie et les chambres froides, sont des supports essentiels de beaucoup d'expériences scientifiques du laboratoire. Les personnes qui en ont la responsabilité ont également pris une part active à la préparation de nombreuses missions terrains dans lesquelles le laboratoire est impliqué (EPICA, North Grip, Col du Dôme) et ont participé à quelques opérations de terrain dans le cadre des projet EPICA et James Ross.

### *1.4.1 LA MENUISERIE*

Les missions principales de la menuiserie sont :

- préparation de support pour les installations d'essais en chambres froides ;
- préparation de matériel technique pour les missions de terrain (balises d'ablation...) ;
- réalisation de caisses nécessaires à l'acheminement du matériel technique et scientifique sur les différents lieux de missions.

### *1.4.2 LES CHAMBRES FROIDES*

Le LGGE est équipé de 9 chambres froides dans lesquelles sont réalisées presque toutes les expériences de laboratoire sur la glace nécessitant des basses températures. Ces chambres froides dont la température peut varier entre -50°C et 0°C avec une précision de +/- 0.2 °C occupent un volume de 800 m<sup>3</sup>.

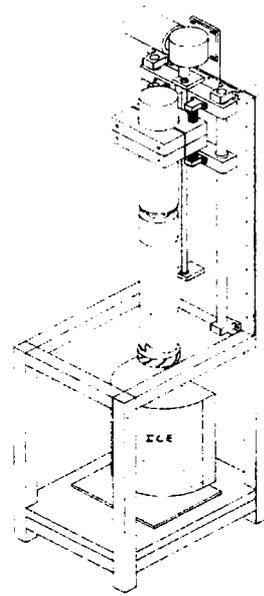
En 2000 une nette dégradation de la nappe phréatique a été constatée. Les échangeurs d'eau ont alors été « attaqués » par des bactéries d'origine ferreuse. Il a donc été nécessaire, en collaboration avec un bureau d'étude spécialisé et avec le soutien financier de l'INSU, de faire réaliser un nouveau puits de pompage d'eau.

## 2. ZOOM SUR QUELQUES REALISATIONS OU TRAVAUX D'ETUDE

### 2.1. Réalisation d'une installation d'essais

Cette installation a pour objectif de permettre de valider les innovations technologiques apportées aux carottiers, dans des conditions de fonctionnement aussi proches de la réalité que possible. Ceci en terme :

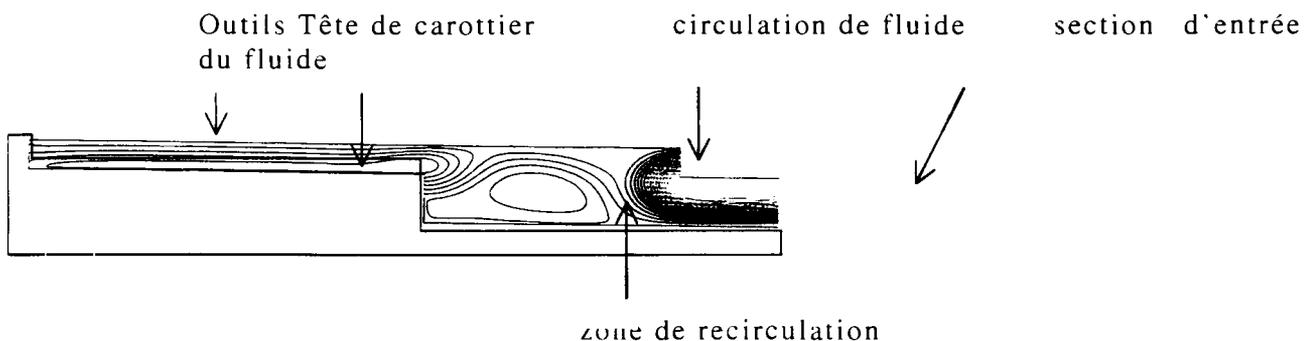
- de température (l'installation étant installée en chambre froide, les essais peuvent être réalisés entre 0°C et -50°C) ;
- d'immersion (l'ensemble étant monté dans un « bac » étanche) ;
- de débit (une pompe étant installée pour simuler les écoulements dans les carottiers) ;
- de vitesse de pénétration (une vis sans fin accouplée à un moteur électrique permet la simulation de la pénétration du carottier dans la glace).



Les conditions de pression dans le trou de forage n'ont toutefois pas pu être simulées.

### 2.2. Etude des Ecoulements diphasiques (fluide/copeau) autour des têtes de carottier

Ces études numériques et expérimentales, réalisées en collaboration avec l'équipe « pamir » du LEGI (DEA d'Hedy Mityar) ont mis en évidence une circulation délicate du mélange fluide-copeaux de glace autour des têtes de carottier, mettant notamment en évidence des zones de recirculation.

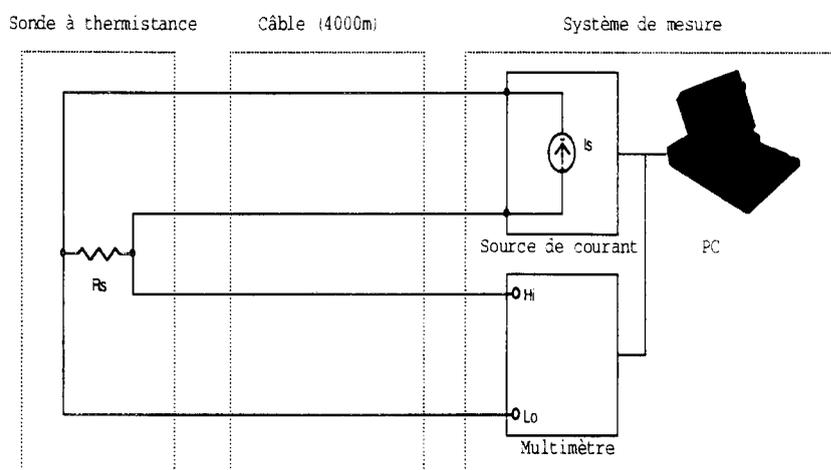


Un nouveau type de tête de carottier a ainsi été conçu afin d'éliminer ce phénomène. Les essais de validation de ces nouvelles géométries sont en cours.

### 2.3 Avant-projet d'appareil de mesure de températures

Le principe de la mesure des températures repose essentiellement sur la mesure de la résistance électrique de la thermosonde. Pour des mesures de grande précision nous utiliserons un montage en quatre fils, cette méthode permettant d'éliminer l'influence des fils de liaison.

Un courant de quelques dizaines de microampères est généré par une source de courant très stable, la tension produite à travers la sonde est mesurée par un multimètre à haute impédance d'entrée. La température du trou est ensuite déduite par calcul de la résistance de la sonde.



Ce type de sonde est en cours de réalisation et devrait servir aux programmes de Vostok et Concordia.

### 3. PRINCIPALES MISSIONS DANS LESQUELLES LE SERVICE TECHNIQUE A ETE IMPLIQUE DEPUIS 1999

#### 3.1 EPICA (European Project for Ice Coring in Antarctica) 1999-2001

Les membres du service technique ayant participé sur le terrain à cette opération sont : O. Alemany (saison 1999/2000), L. Augustin (saisons 1999/2000, 2000/2001, 2001/2002), E. Lefebvre (saison 1999/2000, 2000/2001, 2001/2002), A. Manouvrier (saisons 1999/2000, 2000/2001, 2001/2002), P. Possenti (saison 2000/2001).

L'objectif du projet EPICA est de reconstituer l'évolution du climat et de l'environnement depuis près de 500 000 ans. Le projet s'appuie sur deux forages en Antarctique de l'est. L'un, sur le site de Dôme C, se trouve sous l'influence de l'océan Indien, et l'autre sur le site de « Queen Maud Land », sous l'influence de l'océan Atlantique. Une telle approche est nécessaire en raison de la complexité de l'atmosphère au dessus de l'Antarctique et de ses interactions avec les océans adjacents. Les services techniques du laboratoire ont plus particulièrement été impliqués dans le forage en Antarctique de l'Est sur le site de Dôme C. Le projet EPICA Dôme C est la première priorité technique du LGGE. Les activités techniques de ces dernières saisons ont été consacrées :

- au déplacement de l'installation de forage, au creusement d'une nouvelle tranchée, à la réalisation de l'avant trou et pose du tubage (1999/2000) ;
- au forage de la profondeur de 200 mètres à la profondeur de 1450 mètres (2000/2001) ;
- au forage jusqu'à la profondeur de 2000 mètres, au remplacement du câble et au changement de l'électronique embarquée du carottier ; puis à la reprise du forage jusqu'à la profondeur de 2500 mètres (2001/2002) ;
- à la coordination, scientifique, technique et logistique du projet.

#### 3.2 North Grip 1999/2000

Les membres des services techniques ayant participé à cette opération sur le terrain sont : O. Alemany (1999), L. Augustin (1999, 2000).

Cette opération a pour objectif de confirmer les résultats obtenus lors du forage de Grip, à savoir la reconstitution de l'évolution du climat et de l'environnement sur plus de 200 000 ans grâce à l'analyse de carottes de glace extraites jusqu'à une profondeur proche de 3000 mètres.. Le site de ce forage se trouve au « sommet » de la calotte polaire du Groenland. Le laboratoire s'est impliqué dans ce projet européen. Il a

notamment permis de valider certaines options techniques utilisées sur les carottier North Grip et EPICA, les carottiers pour ces deux opérations ayant été conçus en parallèle.

### **3.3 Forage au col du Dôme 1999**

Deux petits forages de 150 et 200 mètres ont été réalisés en collaboration avec une équipe technique de l'Université de Berne. Le matériel utilisé était le carottier électromécanique léger Suisse. Une personne des services techniques, P. Possenti, a été fortement impliqué dans ce projet.

## **4 PARTICIPATION A DES CONGRES INTERNATIONAUX**

**Alemanly. O, Mityar H, Alemanly A** : modelling of the two phases flow around the drill head, *Proceeding of the fifth International Workshop on Ice Drilling Technologie, Nagaoka, Novembre 2000.*

**Augustin L** : The EPICA deep drilling programs, *Proceeding of the fifth International Workshop on Ice Drilling Technologie, Nagaoka, Novembre 2000*

**Lefebvre E, Augustin L** : The EPICA borehole logger, *Proceeding of the fifth International Workshop on Ice Drilling Technologie, Nagaoka, Novembre 2000*

# **PUBLICATIONS**

**(Revue de rang A)**

## **THESES**

**Juin 1999/**

**Décembre 2001**

## Equipe Climat

**1999**

Armengaud, A. and F. Hourdin, The Use of Finite-Volume Methods for Atmospheric Advection of Trace Species. Part I.: Test of various Formulations in a General Circulation Model. *Monthly Weather Review*, **127**, (5) 822-837, 1999.

Barnola, J.-M., Status of the atmospheric CO<sub>2</sub> reconstruction from ice cores analyses. *Tellus*, **51B**, (Special Issue) 151-155, 1999.

Delmotte, M., D. Raynaud, V. I. Morgan and J. Jouzel, Climatic and glaciological information inferred from air-content measurements of a Law Dome (East Antarctica) ice core. *Journal of Glaciology*, **45**, (150) 255-263, 1999.

Fily, M., J.-P. Dedieu and Y. Durand, Comparison between the Results of a Snow Metamorphism Model and Remote Sensing Derived Snow Parameters in the Alps. *Remote Sensing of Environment*, **68**, 254-263, 1999.

Flückiger, J., A. Dallenbach, T. Blunier, B. Stauffer, T. Stocker, D. Raynaud and J.-M. Barnola, Variations in Atmospheric N<sub>2</sub>O Concentration During Abrupt Climatic Changes. *Science*, **285**, (5425) 227-230, 1999.

Ikeda, T., H. Fukazawa, S. Mae, L. Pépin, P. Duval, B. Champagnon, V. Y. Lipenkov and T. Hondoh, Extreme fractionation of gases caused by formation of clathrate hydrates in Vostok Antarctic ice. *Geophysical Research Letters*, **26**, (1) 91-94, 1999.

Jouzel, J., J.-R. Petit, R. Souchez, N. I. Barkov, V. Y. Lipenkov, D. Raynaud, M. Stievenard, N. I. Vassiliev, V. Verbeke and F. Vimeux, More than 200 meters of lake Vostok, Antarctica. *Science*, **286**, (5447) 2138-2141, 1999.

Krinner, G. and C. Genthon, Altitude dependence of the ice sheet surface climate. *Geophysical Research Letters*, **26**, (15) 2227-2230, 1999.

Malaizé, B., D. Paillard, J. Jouzel and D. Raynaud, The Dole effect over the last two glacial-interglacial cycles. *Journal of Geophysical Research*, **104**, (D12) 14199-14208, 1999.

Mondet, J. and M. Fily, The reflectance of rough snow surfaces in Antarctica from POLDER/ADEOS remote sensing data. *Geophysical Research Letters*, **26**, (23) 3477-3480, 1999.

Wolff, E. W., I. Basile, J.-R. Petit and J. Schwander, Comparison of Holocene electrical records from Dome C and Vostok, Antarctica. *Annals of Glaciology*, **29**, 89-93, 1999.

Xu, B., T. Yao, L. Tian and J. Chappellaz, Variation of CH<sub>4</sub> concentrations recorded in Dunde ice core bubbles. *Chinese Science Bulletin*, **44**, (4) 383-384, 1999.

**2000**

Arnaud, L., J.-M. Barnola and P. Duval, Physical modeling of the densification of snow/firn and ice in the upper part of polar ice sheets. in *Physics of Ice Core Records*, (Hondoh, T., Ed.), 2000.

Bonnefoy, N., O. Brissaud, B. Schmitt, S. Douté, M. Fily, W. Grundy and P. Rabou, Experimental study of planetary surface materials BRDF. *Remote Sensing Reviews*, **19**, 59-74, 2000.

Dällenbach, A., T. Blunier, J. Flückiger, B. Stauffer, J. Chappellaz and D. Raynaud, Changes in the atmospheric CH<sub>4</sub> gradient between Greenland and Antarctica during the Last Glacial and the transition of the Holocene. *Geophysical Research Letters*, **27**, (7) 1005-1008, 2000.

Fabre, A., J.-M. Barnola, L. Arnaud and J. Chappellaz, Determination of gas diffusivity in polar firn : comparison between experimental measurements and inverse modeling. *Geophysical Research Letters*, **27**, (4) 557-560, 2000.

Krinner, G., D. Raynaud, C. Doutriaux and H. Dang, Simulations of the last glacial maximum ice sheet surface climate : Implications for the interpretation of ice core air content. *Journal of Geophysical Research*, **105**, (D2) 2059-2070, 2000.

Masson, V., F. Vimeux, J. Jouzel, V. I. Morgan, M. Delmotte, P. Ciais, C. U. Hammer, S. J. Johnsen, V. Y. Lipenkov, E. Mosley-Thompson, J.-R. Petit, T. Staffelbach, E. J. Steig, M. Stievenard and R. Vaikmae, Holocene Climate Variability in Antarctica Based on 11 Ice-Core Isotopic Records. *Quaternary Research*, **54**, 348-358, 2000.

Rasch, P. J., et al. (don't C. Genthon) , A comparison of scavenging and deposition processes in global models : results from the WCRP Cambridge Workshop of 1995. *Tellus B*, **52**, 1025-1056, 2000.

Raynaud, D., J.-M. Barnola, J. Chappellaz, T. Blunier, A. Indermuhle and B. Stauffer, The ice record of greenhouse gases : a view in the context of future changes. *Quaternary Science Reviews*, **19**, 9-17, 2000.

Souchez, R., J.-R. Petit, J.-L. Tison, J. Jouzel and V. Verbecke, Ice formation in subglacial Lake Vostok, Central Antarctica. *Earth and Planetary Science Letters*, **181**, 529-538, 2000.

## **2001**

Barrie, L. A., et al., (dont Mélières, M. A.) A comparison of large scale atmospheric sulphate aerosol models (COSAM) : overview and highlights. *Tellus*, **53B**, 2001.

Bräunlich, M., O. Abbalin, T. Marik, P. Jöckel, C. A. M. Brenninkmeijer, J. Chappellaz, J.-M. Barnola, R. Mulvaney and W. T. Sturges, Changes in the global atmospheric methane budget over the last decades inferred from <sup>13</sup>C and D isotopic analysis of Antarctic firn air. *Journal of Geophysical Research*, **106**, (D17) 20465-20481, 2001.

Genthon, C., M. Fily and E. Martin, Numerical simulations of Greenland snowpack and comparison with passive microwave spectral signatures. *Annals of Glaciology*, **32**, 109-115, 2001.

Genthon, C. and G. Krinner, Antarctic surface mass balance and systematic biases in GCMs. *Journal of Geophysical Research*, **106**, (D18) 20653-20664, 2001.

Jean-Baptiste, P., J.-R. Petit, V. Y. Lipenkov, D. Raynaud and N. I. Barkov, Constraints on hydrothermal processes and water exchange in Lake Vostok from helium isotopes. *Nature*, **411**, (6836) 460-462, 2001.

Jouzel, J., V. Masson, O. Cattani, S. Falourd, M. Stievenard, B. Stenni, A. Longinelli, S. J. Johnsen, J. P. Steffensen, J.-R. Petit, J. Schwander, R. Souchez and N. I. Barkov, A new 27 ky high resolution East Antarctic climate record. *Geophysical Research Letters*, **28** (16), 3199-3202, 2001..

- Legrand, M., J. Sciare, B. Jourdain and C. Genthon, Subdaily variations of atmospheric dimethylsulfide, dimethylsulfoxide, methanesulfonate, and non-sea-salt sulfate aerosols in the atmospheric boundary layer at Dumont d'Urville (coastal Antarctica) during summer. *Journal of Geophysical Research*, **106**, (D13) 14409-14422, 2001.
- Monnin, E., A. Indermühle, A. Dallenbach, J. Flückiger, B. Stauffer, T. Stocker, D. Raynaud and J.-M. Barnola, Atmospheric CO<sub>2</sub> Concentration over the Last Glacial Termination. *Science*, **291**, (5501) 112-114, 2001.
- Montagnat, M., P. Duval, P. Bastie, B. Hamelin, O. Brissaud, M. de Angelis, J.-R. Petit and V. Y. Lipenkov, High crystalline quality of large single crystals of subglacial ice above Lake Vostok (Antarctica) revealed by hard X-ray diffraction. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences (Série II a)*, **333**, (8) 419-425, 2001.
- Schwander, J., J. Jouzel, C. U. Hammer, J.-R. Petit, R. Udisti and E. W. Wolff, A tentative chronology for the EPICA Dome Concordia ice core. *Geophysical Research Letters*, **28**, (22) 4243-4246, 2001.
- Siegert, M. J., C. J. Ellis-Evans, M. Tranter, C. Mayer, J.-R. Petit, A. N. Salamatin and J. C. Prisco, Physical, chemical and biological processes in Lake Vostok and other Antarctic subglacial lakes. *Nature*, **414**, (6864) 603-609, 2001.
- Sturges, W. T., H. P. McIntire, S. A. Penkett, J. Chappellaz, J.-M. Barnola, R. Mulvaney, E. Atlas and V. Stroud, Methyl bromide, other brominated methanes, and methyl iodide in polar firn air. *Journal of Geophysical Research*, **106**, (D2) 1595-1606, 2001.
- Sturges, W. T., S. A. Penkett, J.-M. Barnola, J. Chappellaz, E. Atlas and V. Stroud, A long-term record of carbonyl sulfide (COS) in two hemispheres from firn air measurements. *Geophysical Research Letters*, **28**, (21) 4095-4098, 2001.
- Vimeux, F., V. Masson, J. Jouzel, J.-R. Petit, E. J. Steig, M. Stievenard, R. Vaikmae and J. W. C. White, Holocene hydrological cycle changes in the Southern Hemisphere documented in East Antarctic deuterium excess records. *Climate Dynamics*, **17**, (7) 503-513, 2001.
- Basile, I., J.-R. Petit, S. Touron, F. E. Grousset and N. I. Barkov, Volcanic tephra in Antarctic (Vostok) ice-cores : source identification and atmospheric implications. *Journal of Geophysical Research*, sous presse.
- Caillon, N., J. P. Severinghaus, J.-M. Barnola, J. Chappellaz, J. Jouzel and F. Parrenin, Estimation of temperature change and of gas age - ice age difference, 108kyr BP, at Vostok, Antarctica. *Journal of Geophysical Research*, sous presse.
- Delmonte, B., J.-R. Petit and W. Maggi, Glacial to Holocene implications of the new 27,000-year dust record from the EPICA Dome C (East Antarctica) ice core. *Climate Dynamics*, sous presse.
- Delmonte B., Petit J.R., Maggi V., LGM-Holocene changes and Holocene millennial scale oscillations of dust particles in the EPICA-Dome C ice core (East Antarctica), *Annals of Glaciology*, sous presse.
- Ekaykin A.A., Lipenkov V.Y., Barkov N.I., Petit J.R., Masso-Delmotte V. : Spatial and temporal variability in isotope composition of recent snow in the vicinity of Vostok station : implications for ice core record interpretation, *Annals of Glaciology*, sous presse.
- Flückiger, J., E. Monnin, B. Stauffer, J. Schwander, T. Stocker, J. Chappellaz, D. Raynaud and J.-M. Barnola, High resolution Holocene N<sub>2</sub>O ice core record and its relationship with CH<sub>4</sub> and CO<sub>2</sub>. *Global Biogeochemical Cycles*, sous presse.
- Genthon C., Krinner G. and E. Cosme, 2001. Free and laterally-nudged Antarctic climate of an atmospheric general circulation model. *Month. Weath. Rev.* sous presse.

Greuell W. and C. Genthon, Surface mass balance modelling in “*Mass balance of the cryosphere observations and modelling of contemporary and future change*”s. J. Bamber ed., Cambridge University Press, sous presse.

Parrenin, F., J. Jouzel, C. Waelbroeck, C. Ritz and J.-M. Barnola, Dating the Vostok ice core by an inverse method. *Journal of Geophysical Research*, sous presse.

Pepin, L., D. Raynaud, J.-M. Barnola and M. F. Loutre, Hemispheric roles of climate forcings during glacial-interglacial transitions, as deduced from the Vostok record and LLN-2D model experiments. *Journal of Geophysical Research*, sous presse.

Raynaud, D., M. F. Loutre, C. Ritz, J. Chappellaz, J.-M. Barnola, J. Jouzel, V. Y. Lipenkov, J.-R. Petit and F. Vimeux, The Vostok record in the context of Marine Isotope Stage (MIS) 11, CO<sub>2</sub> forcing and stability of East Antarctica. *AGU Monograph*, sous presse.

Simoes, J. C., J.-R. Petit, R. Souchez, V. Y. Lipenkov, M. de Angelis, L. Liu, J. Jouzel and P. Duval, Evidence of glacial flour in the deepest 89 m of the Vostok glacier ice core. *Annals of Glaciology*, sous presse.

Stauffer, B., J. Flückiger, E. Monnin, J. Schwander, J.-M. Barnola and J. Chappellaz, Atmospheric CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> and N<sub>2</sub>O records over the past 60,000 years based on the comparison of different polar ice cores. *Annals of Glaciology*, sous presse.

Sturges, W. T., S. A. Penkett, J.-M. Barnola, J. Chappellaz, E. Atlas and V. Stroud, A long-term record of carbonyl sulfide (COS) in two hemispheres from firn air measurements. *Geophysical Research Letters*, sous presse.

Weiss, J., J. Vidot, M. Gay, L. Arnaud, P. Duval and J.-R. Petit, Dome Concordia ice microstructure : impurities effect on grain growth. *Annals of Glaciology*, **35**, sous presse.

## **Equipe Chimie**

### **1999**

Hanot, L. and F. Dominé, Evolution of the Surface Area of a Snow Layer. *Environmental Science and Technology*, **33**, 4250-4255, 1999.

Legrand, M., E. W. Wolff and D. Wagenbach, Antarctic aerosol and snowfall chemistry : implication for deep Antarctic ice-core chemistry. *Annals of Glaciology*, **29**, 66-72, 1999.

### **2000**

Fridlind, A. M., M. Z. Jacobson, V. M. Kerminen, R. Hillamo, V. Ricard and J.-L. Jaffrezo, Analysis of gas-aerosol partitioning in the Arctic : Comparison of size-resolved equilibrium model results with field data. *Journal of Geophysical Research*, **105**, (D15) 19891-19904, 2000.

Houdier, S., S. Perrier, E. Defrancq and M. Legrand, A new fluorescent probe for sensitive detection of carbonyl compounds : sensitivity improvement and application to environmental water samples. *Analytica Chimica Acta*, **412**, 221-233, 2000.

Legrand, M., E. W. Wolff and D. Wagenbach, Antarctic aerosol and snowfall chemistry : Implications for deep antarctic ice core chemistry. *Annals of Glaciology*, **29**, 66-72, 2000.

Masclet, P., V. Hoyau, J.-L. Jaffrezo and H. Cachier, Polycyclic aromatic hydrocarbon deposition on the ice sheet of Greenland. Part I : superficial snow. *Atmospheric Environment*, **34**, (19) 3195-3207, 2000.

Patris, N., R. J. Delmas and J. Jouzel, Isotopic signatures of sulfur in shallow Antarctic ice cores. *Journal of Geophysical Research*, **105**, (D6) 7071-7078, 2000.

Preunkert, S., D. Wagenbach, M. Legrand and C. Vincent, Col du Dome (Mont Blanc Massif, French Alps) suitability for ice core studies in relation with past atmospheric chemistry over Europe. *Tellus*, **52B**, (3) 993-1012, 2000.

Voisin, D., M. Legrand and N. Chaumerliac, Scavenging of acidic gases (HCOOH, CH<sub>3</sub>COOH, HNO<sub>3</sub>, HCl, and SO<sub>2</sub>) and ammonia in mixed liquid-solid water clouds at the Puy de Dome mountain (France). *Journal of Geophysical Research*, **105**, (D5) 6817-6835, 2000.

## 2001

Dominé, F., A. Cabanes, A.-M. Taillandier and L. Legagneux, Specific Surface Area of Snow Samples Determined by CH<sub>4</sub> Adsorption at 77 K and Estimated by Optical Microscopy and Scanning Electron Microscopy. *Environmental Science and Technology*, **35**, 771-780, 2001.

Dominé, F. and I. Xueref, Evaluation of Depth Profiling Using Laser Resonant Desorption as a Method to Measure Diffusion Coefficients in Ice. *Analytical Chemistry*, **73**, (17) 4348-4353, 2001.

Jourdain, B. and M. Legrand, Seasonal variations of atmospheric dimethylsulfide, dimethylsulfoxide, sulfur dioxide, methanesulfonate, and non-sea-salt sulfate aerosols at Dumont d'Urville (coastal Antarctica) (December 1998 to July 1999). *Journal of Geophysical Research*, **106**, (D13) 14391-14408, 2001.

Legrand, M., J. Sciare, B. Jourdain and C. Genthon, Subdaily variations of atmospheric dimethylsulfide, dimethylsulfoxide, methanesulfonate, and non-sea-salt sulfate aerosols in the atmospheric boundary layer at Dumont d'Urville (coastal Antarctica) during summer. *Journal of Geophysical Research*, **106**, (D13) 14409-14422, 2001.

Montagnat, M., P. Duval, P. Bastie, B. Hamelin, O. Brissaud, M. de Angelis, J.-R. Petit and V. Y. Lipenkov, High crystalline quality of large single crystals of subglacial ice above Lake Vostok (Antarctica) revealed by hard X-ray diffraction. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences (Série II a)*, **333**, (8) 419-425, 2001.

Preunkert, S., M. Legrand and D. Wagenbach, Causes of enhanced fluoride levels in Alpine ice cores over the last 75 years : Implications for the atmospheric fluoride budget. *Journal of Geophysical Research*, **106**, (D12) 12619-12632, 2001.

Aristarain, A. J. and R. J. Delmas, Snow chemistry measurements on James Ross Island (Antarctic Peninsula) showing sea-salt aerosol modifications. *Atmospheric Environment*, sous presse.

Beine, H. J., R. E. Honrath, F. Dominé, W. R. Simpson and J. D. Fuentes, NO<sub>x</sub> during background and ozone depletion periods at ALERT : fluxes above the snow surface. *Atmospheric Environment*, sous presse.

Beine, H. J., R. E. Honrath, F. Dominé, X. Zhou and W. R. Simpson, Snow-pile and chamber experiments during the polar sunrise experiment "ALERT 2000" : exploration of nitrogen chemistry. *Atmospheric Environment*, sous presse.

Grannas, A. M., P. B. Shepson, C. Guimbaud, M. Albert, W. Simpson, F. Dominé, H. Boudries, J. W. Bottenheim, H. J. Beine, R. Honrath and X. Zhou, A Study of Carbonyl Compounds and Photochemistry in the Arctic Atmospheric Boundary Layer. *Atmospheric Environment*, sous presse.

Guimbaud, C., A. M. Grannas, P. B. Shepson, J. D. Fuentes, H. Boudries, J. W. Bottenheim, F. Dominé, S. Houdier, S. Perrier, T. B. Biesenthal and B. G. Splawn, Importance of the snowpack in

processing acetaldehyde and acetone in the arctic atmospheric boundary layer. *Atmospheric Environment*, sous presse.

Houdier, S., S. Perrier, F. Dominé, A. Cabanes, L. Legagneux, A. M. Grannas, C. Guimbaud, P. B. Shepson, H. Boudries and J. W. Bottenheim, Acetaldehyde and acetone in the Arctic snowpack during the ALERT2000 field campaign. Snowpack composition, incorporation processes and atmospheric impact. *Atmospheric Environment*, sous presse.

Jourdain, B. and M. Legrand, Seasonal variations of dimethyl sulfide, dimethyl sulfoxide, sulfur dioxide, methanesulfonate, and non sea-salt sulfate aerosols at Dumont d'Urville (December 1998-July 1999). *Journal of Geophysical Research*, sous presse.

Patris, N., R. J. Delmas, M. Legrand, M. de Angelis, F. A. Ferron, M. Stievenard and J. Jouzel, First sulfur isotope measurements in central Greenland ice cores along the preindustrial and industrial periods. *Journal of Geophysical Research*, sous presse.

Perrier, S., S. Houdier, F. Dominé, A. Cabanes, L. Legagneux, A. L. Sumner and P. B. Shepson, Formaldehyde in Arctic Snow. Incorporation into Ice Particles and Evolution in the Snowpack. *Atmospheric Environment*, sous presse.

Ricard, V., J.-L. Jaffrezo, V. M. Kerminen, R. Hillamo, S. Sillanpaa, S. Rudnev, S. Ruellan, C. Liousse and H. Cachier, Two years of continuous aerosol measurements in northern Finland. *Journal of Geophysical Research*, sous presse.

Simoès, J. C., J.-R. Petit, R. Souchez, V. Y. Lipenkov, M. de Angelis, L. Liu, J. Jouzel and P. Duval, Evidence of glacial flour in the deepest 89 m of the Vostok glacier ice core. *Annals of Glaciology*, sous presse.

Sumner, A. L., P. B. Shepson, A. M. Grannas, J. W. Bottenheim, K. G. Anlauf, D. Worthy, W. H. Schreder, F. Dominé, S. Houdier and S. Perrier, Atmospheric chemistry of formaldehyde in the arctic troposphere at polar sunrise and influence of the snowpack. *Atmospheric Environment*, sous presse.

## **Equipe Métaux lourds**

### **1999**

Barbante, C., G. Cozzi, G. Capodaglio, K. Van de Velde, C. Ferrari, C. F. Boutron and C. Paolo, Trace element determination in alpine snow and ice by double focusing inductively coupled plasma mass spectrometry with microconcentric nebulization. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, **14**, 1433-1438, 1999.

Barbante, C., G. Cozzi, G. Capodaglio, K. Van de Velde, C. Ferrari, A. Veysseyre, C. F. Boutron, G. Scarponi and C. Paolo, Determination of Rh, Pd and Pt in Polar and Alpine Snow and Ice by Double-Focusing ICPMS with Microconcentric nebulization. *Analytical Chemistry*, **71**, 4125-4133, 1999.

Heisterkamp, M., K. Van de Velde, C. Ferrari, C. F. Boutron and F. C. Adams, Present Century Record of Organolead Pollution in High Altitude Alpine Snow. *Environmental Science and Technology*, **33**, (24) 4416-4421, 1999.

Van de Velde, K., C. Ferrari, C. Barbante, I. Moret, T. Bellomi, S. Hong and C. F. Boutron, A 200 Year Record of Atmospheric Cobalt, Chromium, Molybdenum, and Antimony in High Altitude Alpine Firn and Ice. *Environmental Science and Technology*, **33**, (20) 3495-3501, 1999.

## 2000

Ferrari, C., S. Hong, K. Van de Velde, C. F. Boutron, S. N. Rudniev, M. A. Bolshov, W. Chisholm and K. J. R. Rosman, Natural and anthropogenic bismuth in Central Greenland. *Atmospheric Environment*, **34**, (6) 941-948, 2000.

Ferrari, C., A.-L. Moreau and C. F. Boutron, Clean conditions for the determination of ultra-low levels of mercury in ice and snow samples. *Fresenius Journal of Analytical Chemistry*, **366**, 433-437, 2000.

Rosman, K. J. R., C. Ly and K. Van de Velde, A two century record of lead isotopes in high altitude Alpine snow and ice. *Earth and Planetary Science Letters*, **176**, (3/4) 413-424, 2000.

Van de Velde, K., C. Barbante, G. Cozzi, I. Moret, T. Bellomi, C. Ferrari and C. F. Boutron, Changes in the occurrence of silver, gold, platinum, palladium and rhodium in Mont Blanc ice and snow since the 18th century. *Atmospheric Environment*, **34**, (19) 3117-3127, 2000.

Van de Velde, K., C. F. Boutron, C. Ferrari, A.-L. Moreau, R. J. Delmas, C. Barbante, T. Bellomi and G. Capodaglio, A two hundred years record of atmospheric Cadmium, Copper and Zinc concentrations in high altitude snow and ice from the French-Italian Alps. *Geophysical Research Letters*, **27**, (2) 249-252, 2000.

## 2001

Barbante, C., K. Van de Velde, G. Capodaglio, P. Cescon, F. Planchon, S. Hong, C. Ferrari and C. F. Boutron, Post-World War II Uranium Changes in Dated Mont Blanc Ice and Snow. *Environmental Science and Technology*, **35**, (20) 4026-4030, 2001.

Barbante, C., A. Veysseyre, C. Ferrari, K. Van de Velde, C. Morel, G. Capodaglio, P. Cescon, G. Scarponi and C. F. Boutron, Greenland Snow Evidence of Large Scale Atmospheric Contamination for Platinum, Palladium and Rhodium. *Environmental Science and Technology*, **35**, 835-839, 2001.

Ferrari, C., T. Clotteau, L. G. Thompson, C. Barbante, G. Cozzi, P. Cescon, S. Hong, L. Maurice-Bourgoin, B. Francou and C. F. Boutron, Heavy metals in ancient tropical ice : initial results. *Atmospheric Environment*, **35**, 5809-5815, 2001.

Planchon, F., C. F. Boutron, C. Barbante, E. W. Wolff, G. Cozzi, V. Gaspari, C. Ferrari and P. Cescon, Ultrasensitive determination of heavy metals at the sub-picogram per gram level in ultraclean Antarctic snow samples by inductively coupled plasma sector field mass spectrometry. *Analytica Chimica Acta*, (450) 193-205, 2001.

Veysseyre, A., K. Moutard, C. Ferrari, K. Van de Velde, C. Barbante, G. Cozzi, G. Capodaglio and C. F. Boutron, Heavy metals in fresh snow collected at different altitudes in the Chamonix and Maurienne valleys, French Alps : initial results. *Atmospheric Environment*, **35**, (2) 415-425, 2001.

Ferrari, C., A. Dommergue and C. F. Boutron, Mercury speciation in alpine snow cover : photoreduction processes. *The Science of the Total Environment*, sous presse.

Vallelonga, P., K. Van de Velde, J.-P. Candelone, K. J. R. Rosman, C. F. Boutron, V. I. Morgan and D. Mackey, Recent advances in measurement of Pb isotopes in polar ice and snow at sub-picogram/gram concentrations using Thermal Ionisation Mass Spectrometry. *Analytica Chimica Acta*, sous presse.

Veysseyre, A., A. F. Bollhöfer, K. J. R. Rosman, C. Ferrari and C. F. Boutron, The origin of lead in fresh snow and aerosols in the french Alps determined from isotopic tracers. *Environmental Science and Technology*, sous presse.

## **Equipe Rhéologie des Glaces – Modélisation des calottes polaires**

### **1999**

Gagliardini, O. and J. Meyssonier, Plane flow of an ice sheet exhibiting strain-induced anisotropy. *6th Int. Symp. on Thermal Engineering and Sciences for Cold Regions*, (Hutter, K. et al., Eds), Advances in Cold Region Thermal Engineering and Sciences, Technological, Environmental and Climatological Impact, 171-182, 1999.

Gagliardini, O. and J. Meyssonier, Analytical derivations for the behavior and fabric evolution of a linear orthotropic ice polycrystal. *Journal of Geophysical Research*, **104**, (B8) 17797-17809, 1999.

Gay, M. and J. Weiss, Automatic reconstruction of polycrystalline ice microstructure from image analysis : application to the EPICA ice core at Dome Concordia, Antarctica. *Journal of Glaciology*, **45**, (151) 547-554, 1999.

Mansuy, P., J. Meyssonier and A. Philip, Modelling the ice single-crystal viscoplastic behavior. *6th Int. Symp. on Thermal Engineering and Sciences for Cold Regions*, (Hutter, K. et al., Eds), Advances in Cold Region Thermal Engineering and Sciences, Technological, Environmental and Climatological Impact, 215-224, 1999.

Meyssonier, J. and A. Philip, Remarks on self-consistent modelling of polycrystalline ice. *6th Int. Symp. on Thermal Engineering and Sciences for Cold Regions*, (Hutter, K. et al., Eds), Advances in Cold Region Thermal Engineering and Sciences, Technological, Environmental and Climatological Impact, 225-236, 1999.

Meyssonier, J. and O. Plé, An analysis of crack nucleation during creep of S2 columnar under uniaxial compression. *15th international Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions (POAC'99)*, **2**, 470-479, 1999.

Miyamoto, A., H. Narita, T. Hondoh, H. Shoji, K. Kawada, O. Watanabe, D. Dahl-Jensen, N. S. Gundestrup, H. B. Clausen and P. Duval, Ice-sheet flow condition deduced from mechanical tests of ice core. *Annals of Glaciology*, **29**, 179-183, 1999.

Philip, A. and J. Meyssonier, Anisotropic isothermal ice-cap flow with the shallow ice approximation. *6th Int. Symp. on Thermal Engineering and Sciences for Cold Regions*, (Hutter, K. et al., Eds), Advances in Cold Region Thermal Engineering and Sciences, Technological, Environmental and Climatological Impact, 237-248, 1999.

Staroszczyk, R. and O. Gagliardini, Two orthotropic models for strain-induced anisotropy of polar ice. *Journal of Glaciology*, **45**, (151) 485-494, 1999.

Weiss, J., The ductile behaviour of damaged ice under compression. *15th International Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions*, (Tuhkuri, J. et al., Eds), POAC'99, **1**, 70-80, 1999.

Weiss, J., N. Hotellier and M. Gay, The coupling between viscoplastic deformation and damage in ice. *14th International Symposium on Ice*, (Shen, H. T., Ed.), Ice in Surface Waters, **2**, 967-972, 1999.

### **2000**

Arnaud, L., J.-M. Barnola and P. Duval, Physical modeling of the densification of snow/firn and ice in the upper part of polar ice sheets. in *Physics of Ice Core Records*, (Hondoh, T., Ed.), 2000.

Arnaud, L., J. Weiss, M. Gay and P. Duval, Shallow-ice microstructure at Dome Concordia, Antarctica. *Annals of Glaciology*, **30**, 8-12, 2000.

Duval, P., Deformation and dynamic recrystallization of ice in polar ice sheets. *in Physics of Ice Core Records*, (Hondoh, T., Ed.), 103-113, 2000.

Duval, P., L. Arnaud, O. Brissaud, M. Montagnat and S. de La Chapelle, Deformation and recrystallization processes of ice from polar ice sheets. *Annals of Glaciology*, **30**, 83-87, 2000.

Gagliardini, O. and J. Meyssonier, Simulation of anisotropic ice flow and fabric evolution along the GRIP-GISP2 flow line (Central Greenland). *Annals of Glaciology*, **30**, 217-223, 2000.

Mansuy, P., A. Philip and J. Meyssonier, Identification of strain heterogeneities arising during deformation of ice. *Annals of Glaciology*, **30**, 121-126, 2000.

Meyssonier, J., P. Duval, O. Gagliardini and A. Philip, Constitutive modelling and flow simulation of anisotropic polar ice. *Continuum Mechanics and Applications in Geophysics and the Environment*, 250-275, 2000.

Meyssonier, J. and A. Philip, Comparison of finite-element and homogenization methods for modelling the viscoplastic behaviour of a S2 columnar ice polycrystal. *Annals of Glaciology*, **30**, 115-120, 2000.

Montagnat, M. and P. Duval, Relation between deformed grain orientations, nucleation and texture development in ice. *21st Riso International Symposium on Materials Science: Recrystallization - Fundamental Aspects and Relations to Deformation Microstructure*, (Hansen, N. et al., 459-465, 2000.

Montagnat, M. and P. Duval, Rate controlling processes in the creep of polar ice ; influence of grain boundary migration associated with recrystallization. *Earth and Planetary Science Letters*, **183**, 179-186, 2000.

Payne, T., P. Huybrechts, A. Abe-Ouchi, R. Calov, J. L. Fastook, R. Greve, S. J. Marshall, I. Marsiat, C. Ritz, L. Tarasov and M. P. A. Thomassen, Results from the EISMINT model intercomparison : the effects of thermomechanical coupling. *Journal of Glaciology*, **46**, (153) 227-237, 2000.

Weiss, J., F. Lahaie and J.-R. Grasso, Statistical analysis of dislocation dynamics during viscoplastic deformation from acoustic emission. *Journal of Geophysical Research*, **105**, (B1) 433-442, 2000.

Weiss, J. and E. M. Schulson, Grain-boundary sliding and crack nucleation in ice. *Philosophical Magazine A*, **80**, (2) 279-300, 2000.

## 2001

Carmen-Miguel, M., A. Vespignani, S. Zapperi, J. Weiss and J.-R. Grasso, Intermittent dislocation flow in viscoplastic deformation. *Nature*, **410**, 667-671, 2001.

Carmen-Miguel, M., A. Vespignani, S. Zapperi, J. Weiss and J.-R. Grasso, Complexity in dislocation dynamics : model. *Materials Science and Engineering : A*, **A309-310**, 324-327, 2001.

Gagliardini, O., M. Arminjon and D. Imbault, An inhomogeneous variational model applied to predict the behaviour of isotropic polycrystalline ice. *Archives of Mechanics*, **53**, (1) 3-21, 2001.

Mansuy, P., A. Philip and J. Meyssonier, Localization of deformation in polycrystalline ice. *Journal de Physique IV Processes, Microstructures and Mechanical Properties*, (Aeby-Gautier, E. et al., **11 (Pr4)**), 267-274, 2001.

Montagnat, M., P. Duval, P. Bastie, B. Hamelin, O. Brissaud, M. de Angelis, J.-R. Petit and V. Y. Lipenkov, High crystalline quality of large single crystals of subglacial ice above Lake Vostok (Antarctica) revealed by hard X-ray diffraction. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences (Série II a)*, **333**, (8) 419-425, 2001.

Weiss, J., Fracture and fragmentation of ice : a fractal analysis of scale invariance. *Engineering Fracture Mechanics*, **68**, (17-18) 1975-2012, 2001.

Weiss, J., Self-affinity fracture surfaces and implications on a possible size effect on fracture energy. *International Journal of Fracture*, **109**, 365-381, 2001.

de la Chapelle, S. and P. Duval, Recrystallization in a hot deformed Al-Mg-Si alloy : the effect of fine precipitates. *Textures and Microstructures*, sous presse.

Duval, P. and M. Montagnat, Comments on "Superplasticity deformation of ice : experimental observations by D.L. Goldby and D.L.Kohlstedt. *Journal of Geophysical Research*, sous presse.

Gagliardini, O. and J. Meyssonier, Lateral boundary conditions for a local anisotropic ice flow model. *Annals of Glaciology*, sous presse.

Mansuy, P., J. Meyssonier and A. Philip, Localization of deformation in polycrystalline ice : experiments and numerical simulation with a simple grain model. *Computational Material Science*, sous presse.

Parrenin, F., J. Jouzel, C. Waelbroeck, C. Ritz and J.-M. Barnola, Dating the Vostok ice core by an inverse method. *Journal of Geophysical Research*, sous presse.

Raynaud, D., M. F. Loutre, C. Ritz, J. Chappellaz, J.-M. Barnola, J. Jouzel, V. Y. Lipenkov, J.-R. Petit and F. Vimeux, The Vostok record in the context of Marine Isotope Stage (MIS) 11, CO<sub>2</sub> forcing and stability of East Antarctica. *AGU Monograph*, sous presse.

Simoës, J. C., J.-R. Petit, R. Souchez, V. Y. Lipenkov, M. de Angelis, L. Liu, J. Jouzel and P. Duval, Evidence of glacial flour in the deepest 89 m of the Vostok glacier ice core. *Annals of Glaciology*, sous presse.

Weiss, J., Scale invariance of fracture surfaces in ice. *IUTAM symposium on Scaling Laws in Ice Mechanics and Ice Dynamics*, (Dempsey, J.), sous presse.

Weiss, J., J. Vidot, M. Gay, L. Arnaud, P. Duval and J.-R. Petit, Dome Concordia ice microstructure : impurities effect on grain growth. *Annals of Glaciology*, **35**, sous presse.

## Equipe Glaciers

### 1999

Isaksson, E., M. R. van den Broeke, J.-G. Winther, L. Karlof, J.-F. Pinglot and N. S. Gundestrup, Accumulation and proxy-temperature variability in Dronning Maud Land, Antarctica, determined from shallow firn cores. *Annals of Glaciology*, **29**, 17-22, 1999.

Pinglot, J.-F., M. Pourchet, B. Lefauconnier, J. O. Hagen, E. Isaksson, R. Vaikmae and K. Kamiyama, Accumulation in Svalbard Glaciers tempérés deduced from ice cores with nuclear tests and Chernobyl reference layers. *Polar Research*, **18**, (2) 315-321, 1999.

Van den Broeke M.R., J.-G. Winther, E. Isaksson, J.F. Pinglot, T. Eiken and L. Karlof, Climate variables along a traverse line in Dronning Maud Land, East Antarctica, *J. Glaciol.*, **45** (150) 295-302, 1999.

Wagnon, P., P. Ribstein, B. Francou and B. Pouyaud, Annual cycle of energy balance of Zongo Glacier, Cordillera Real, Bolivia. *Journal of Geophysical Research*, **104**, (D4) 3903, 1999.

Wagnon, P., P. Ribstein, G. Kaser and P. Berton, Energy balance and runoff seasonality of a Bolivian glacier. *Global and Planetary Change*, **22**, 49-58, 1999.

## 2000

Holmlund, P., K. Gjerde, N. S. Gundestrup, M. Hansson, E. Isaksson, L. Karlof, M. Nyman, R. Pettersson, J.-F. Pinglot, C. H. Reijmer, M. Stenberg, M. P. A. Thomassen, R. S. W. van de Wal, C. van der Veen, F. Wilhelms and J.-G. Winther, Spatial gradients in snow layering and 10 m temperatures at two EPICA-Dronning Maud Land (Antarctica) pre-site-survey drill sites. *Annals of Glaciology*, **30**, 13-19, 2000.

Karlof, L., J.-G. Winther, E. Isaksson, J. Kohler, J.-F. Pinglot, F. Wilhelms, M. Hansson, P. Holmlund, M. Nyman, R. Pettersson, M. Stenberg, M. P. A. Thomassen, C. van der Veen and R. S. W. van de Wal, A 1500 year record of accumulation at Amundsenisen westrn Droning Maud Land, Antarctica, derived from electrical and radioactive measurements on a 120 m ice core. *Journal of Geophysical Research*, **105**, (D10) 12741-12483, 2000.

Pourchet, M., P. Richon and J. C. Sabroux, Lead-210 and Radon-222 anomalies in the Mont Blanc snow, French Alps. *Journal of Environmental Radioactivity*, **48**, (3) 349-358, 2000.

Vincent, C., M. Vallon, L. Reynaud and E. Le Meur, Dynamic behaviour analysis of glacier de Saint-Sorlin, France, from 40 years of observations, 1957-97. *Journal of Glaciology*, **46**, (154) 499-506, 2000.

## 2001

Ferrari, C., T. Clotteau, L. G. Thompson, C. Barbante, G. Cozzi, P. Cescon, S. Hong, L. Maurice-Bourgoin, B. Francou and C. F. Boutron, Heavy metals in ancient tropical ice : initial results. *Atmospheric Environment*, **35**, 5809-5815, 2001.

Ramirez, E., B. Francou, P. Ribstein, M. Descloitres, R. Guérin, J. Mendoza, R. Gallaire, B. Pouyau and E. Jordan, Small glaciers disappearing in the tropical Andes : a case-study in Bolivia : Glaciar Chacaltaya (16°S). *Journal of Glaciology*, **47**, (157) 187-194, 2001.

Wagnon, P., P. Ribstein, B. Francou and J.-E. Sicart, Anomalous heat and mass budget of Glaciar Zongo, Bolivia, during the 1997/98 El Nino year. *Journal of Glaciology*, **47**, (156) 21-28, 2001.

Pinglot, J.-F., J. O. Hagen, K. Melvold, T. Eiken and C. Vincent, A mean accumulation pattern derived from radioactive layers and radar soundings on the Austfonna ice cap, Nordaustlander, Svalbard. *Journal of Glaciology*, sous presse.

Pinglot, J.-F., J. O. Hagen, K. Melvold, T. Eiken and C. Vincent, A mean accumulation pattern derived from radioactive layers and radar soundings on the Austfonna ice cap, Nordaustlander, Svalbard. *Journal of Glaciology*, sous presse.

Six, D., L. Reynaud and A. Letreguilly, Les glaciers alpins et scandinaves, témoins de l'oscillation du climat de l'Atlantique Nord. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences*, sous presse.

Torinesi, O., A. Letreguilly and F. Valla, A century reconstruction of the mass balance of Glacier de Sarennes in the French Alps. *Journal of Glaciology*, sous presse.

Vincent, C., Influence of climate change over the 20th Century on four French glacier mass balances. *Journal of Geophysical Research*, sous presse.

## Equipe Climat

### Depuis juin 1999

Gay M. : Caractérisation de la neige, du névé et de la glace par traitement d'images. *Thèse de l'Université Joseph Fourier, Grenoble, soutenue le 22 octobre 1999*

### 2000

Pépin L. : Variation de la teneur en CO<sub>2</sub> de l'atmosphère au cours des 4 derniers cycles glaciaire-interglaciaires, à partir de l'analyse de la carotte de Vostok (Antarctique). Implication sur l'évolution du climat et du cycle du carbone. *Thèse de l'Université Joseph Fourier, Grenoble, soutenue le 22 mai 2000*

### Thèses en cours

Aballain O. : Mise au point d'une méthode sensible d'analyse du rapport <sup>13</sup>C/<sup>12</sup>C du méthane dans la glace polaire - reconstitution de l'évolution de ce rapport dans le passé

Bellier B. : Etude des variations passées du rapport C13/C12 du CO<sub>2</sub> atmosphérique à partir de l'analyse des glaces polaires

Bernard S. : Evolution temporelle du méthane et du monoxyde de carbone dans l'atmosphère : contraintes par l'analyse de leurs isotopes stables dans le névé et la glace polaire

Cosme E. : Modélisation du soufre en Antarctique

Delmonte B. : Origine et variation des concentrations et distributions des poussières d'origine continentale dans les forages de glace en Antarctique

Parrenin F. : Méthodes mathématiques pour l'interprétation des forages glaciaires profonds et conséquences paléoclimatiques

Poutou E. : Etude numérique du rôle des interactions entre surface et atmosphère dans le changement climatique aux hautes latitudes

Torinési O. : Variabilité du climat antarctique par télédétection et modélisation

## Equipe Chimie

### Depuis juin 1999

Xueref I. : Etude de l'incorporation d'HCl et d'HBr dans la glace par spectroscopies IR et EXAFS. Applications atmosphériques. *Thèse de l'Université Joseph Fourier, Grenoble, soutenue le 15 octobre 1999*

## **2000**

Guérinot G. : Etudes théorique et expérimentale de la signature chimique des feux de forêts boréales retrouvée dans les carottes de glace, *Thèse de l'Université Joseph Fourier*, Grenoble, soutenue le 27 juin 2000

## **2001**

Jourdain B. : Etude du cycle du soufre aux hautes latitudes Sud (Dumont d'Urville), *Thèse de l'Université Joseph Fourier*, Grenoble, soutenue le 6 décembre 2001

Preunkert S. : Chimie de l'atmosphère et des précipitations au Col du Dôme (Massif du Mont-Blanc), *Thèse de l'Université Joseph Fourier*, Grenoble, soutenue le 27 juillet 2001

Ricard V. : Aérosols dans le bassin arctique : sources, transformation et impact radiatif, *Thèse de l'Université Joseph Fourier*, soutenue le 5 octobre 2001

## **En cours**

Aymoz G. : Mesure et modélisation de la chimie de l'atmosphère dans les vallées alpines ; influence du trafic routier

Bonnaiveira H. : Cycle hydrologique et variabilité climatique enregistrée dans les précipitations et les glaces des Andes tropicales

Cabanes A. : Interactions gaz traces - glace. Application à la chimie des nuages et aux transferts de gaz traces entre l'atmosphère et les systèmes terrestres.

Corréia A. : Etude comparative de la composition chimique de l'aérosol tropical en Amazonie et de la neige des Andes

Legagneux L. : Évolution de la microphysique du manteau neigeux mesures de terrain, expérimentation, et modélisation

Perrier S. : Aldéhydes et cétones dans l'environnement : de la phase gaz à la phase condensée

## **Equipe Métaux**

### **2000**

Veysseyre A. : Dépôts de métaux lourds sur le manteau neigeux alpin français. *Thèse de l'Université Joseph Fourier*, Grenoble, soutenue le 21 septembre 2000

### **2001**

Planchon F. : Les métaux lourds et leur isotope dans les neiges et glaces de l'Antarctique : traceurs de la pollution globale et des paramètres climatiques des derniers cycles glaciaires, *Thèse de l'Université Joseph Fourier*, Grenoble, soutenue le 20 décembre 2001

## **En cours**

Dommergue A. : Etude des échanges en mercure entre atmosphère et manteau neigeux saisonnier. Spéciation du mercure dans les neiges et glaces polaires et alpines et étude des flux de dépôt et d'émission

Gabrieli P. : Métaux lourds au cours des derniers cycles climatiques en Antarctique, basée sur la carotte de Dôme C (et Vostok)

## **Equipe Rhéologie**

### **2000**

Fiorio B. : Etude du frottement glace/béton par essai de cisaillement direct. *Thèse de l'Université Joseph Fourier, Grenoble, soutenue le 19 janvier 2000*

### **2001**

Lenoel V. : Etude des mécanismes de frottement gomme/glace. *Thèse de l'Université Joseph Fourier, Grenoble, soutenue le 29 novembre 2001*

Mansuy P. : Contribution à l'étude du comportement viscoplastique d'un multicristal de glace : hétérogénéité de la déformation et localisation, expériences et modèles. *Thèse de l'Université Joseph Fourier, Grenoble, soutenue le 2 février 2001*

Montagnat M. : Comportement mécanique et recristallisation dynamique des glaces des calottes polaires, *Thèse de l'Université Joseph Fourier, Grenoble, soutenue le 23 novembre 2001*

## **En cours**

Demongeot A. : Hétérogénéité de déformation dans la glace

Dumas C. : Modélisation de la dynamique de la calotte antarctique et de son évolution au cours des derniers cycles climatiques

Durand G. : Etude de la microstructure des glaces polaires : grossissement des grains, recristallisation, rôle des impuretés

Helmstetter A. : Fracturation et sismicité d'un glacier

## **Equipe Glaciers**

### **2000**

Six D. : Analyse statistique des distributions des séries de bilans de masse des glaciers alpins et des calottes polaires de l'Hémisphère Nord, *Thèse de l'Université Joseph Fourier, Grenoble, soutenue le 4 décembre 2000*

# **ENSEIGNEMENT ET DIFFUSION DE L'INFORMATION**

# 1 - ENSEIGNEMENT

L'enseignement a occupé au cours des ces dernières années un rôle particulièrement important au Laboratoire de Glaciologie et Géophysique de l'Environnement, avec une forte implication non seulement des enseignants chercheurs du laboratoire mais aussi des chercheurs CNRS ainsi que des étudiants qu'ils soient moniteurs ou vacataires. Cette implication s'est également illustrée par la pérennisation du "Cours de Recherche Européen sur les Atmosphères" dont la 10<sup>ème</sup> session vient d'être organisée.

## 1.1-Moyens en personnel

Onze enseignants chercheurs de l'Université Joseph Fourier sont rattachés à notre laboratoire (deux professeurs et 9 maîtres de conférences) :

- Professeurs : Claude Boutron (PR 37<sup>e</sup> section, Membre senior de l'Institut Universitaire de France) ; Michel Vallon (PR, 37<sup>e</sup> section).
- Maîtres de conférences : Jean-Pierre Benoist (MCF 37<sup>e</sup> section) ; Christophe Ferrari (MCF, ISTG 37<sup>e</sup> section) ; Michel Fily (MCF, 37<sup>e</sup> section) ; Stéphane Houdier (MCF 31<sup>e</sup> section) ; Anne Letreguilly (MCF, 37<sup>e</sup> section) ; Marie-Antoinette Melières (MCF, 37<sup>e</sup> section) ; Armelle Philip (MCF, 60<sup>e</sup> section) ; Louis Reynaud (MCF, 37<sup>e</sup> section), Olivier Gagliardini (MCF, 60<sup>e</sup> section).

Pour ce qui est du CNU, la principale section de rattachement est la 37 (Météorologie, Océanographie Physique et Physique de l'Environnement), avec 8 enseignants-chercheurs. Les 3 autres dépendent de la 31 (Stéphane Houdier), 36 (Anne Letreguilly) et 60 (Olivier Gagliardini). Le volume d'enseignements réalisés par ces personnes représentent environ 2000 heures éq TD.

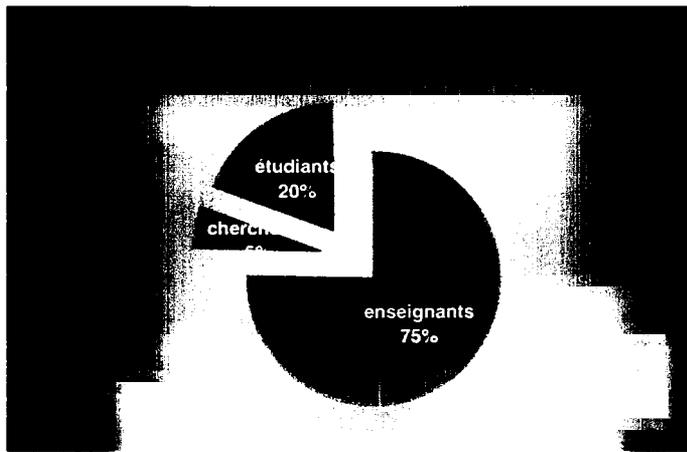
Il est à noter que parmi ces enseignants, un seul (Olivier Gagliardini) a été recruté au cours de ces trois dernières années.

Le LGGE a continué à voir ses enseignants chercheurs dispersés entre diverses UFR de rattachement : Physique, Mécanique, Chimie, OSUG et ISTG.

Les chercheurs CNRS du LGGE ont continué à être fortement impliqués dans les activités d'enseignement avec au total environ 170 heures éq. TD. Il s'agit plus particulièrement d'enseignements effectués au niveau 3<sup>e</sup> cycle : En DEA CPCA et CPAPE. Michel Legrand, Christophe Genthon, Jérôme Chappellaz, Jean Marc Barnola. En cours de Thèse : Jérôme Chappellaz, Catherine Ritz, Jean Marc Barnola,... et en Maîtrise des Sciences de la Terre et de l'Univers (MSTU): Florent Dominé, Michel Legrand. Mais il s'agit également d'enseignements effectués en 1<sup>er</sup> cycle (une vingtaine d'heures dans des modules de Géophysique de 1<sup>e</sup> et 2<sup>e</sup> années de Deug Smb) et 2<sup>e</sup> cycle (UFR de Mécanique) et INPG (CUEFA, 30 heures).

Les étudiants en thèse sont également très impliqués dans les activités d'enseignement. En effet, qu'ils soient moniteurs ou bien vacataires, le volume d'enseignement avoisine les 520 heures éq TD. Le graphique ci après montre que 75% des enseignements sont réalisés par les maîtres de conférences et professeurs, 20 % par les étudiants et 5% par les chercheurs CNRS.

Le personnel administratif du LGGE est impliqué que dans le secrétariat d'ERCA (Un tiers de poste compensé partiellement sur le budget d'ERCA).



## 1.2 Participation aux conseils et commissions universitaires

Un certain nombre d'enseignants chercheurs et chercheurs du LGGE participent activement aux différents conseils et commissions de l'UJF. On peut notamment citer (liste non exhaustive) :

- Conseil Scientifique : Christophe Ferrari,
- Conseil de l'UFR de Mécanique : Paul Duval, Armelle Philip,
- Conseil de l'UFR OSUG : Michel Fily, Catherine Ritz
- Conseil de l'ISTG : Christophe Ferrari
- Commission de Spécialistes "Sciences de la Terre et de l'Univers" (35e, 36e et 37e sections du CNU) :

membres titulaires : Claude Boutron , Jérôme Chappellaz, Michel Fily, Marie-Antoinette Mélières,

membres suppléants : Christophe Genthon, Michel Legrand, Dominique Raynaud, Louis Reynaud, Michel Vallon,

- Commission de Spécialistes de Mécanique (60e section du CNU) : Armelle Philip (titulaire),
- Commission de Spécialistes de chimie (31e section du CNU) : Stephan Houdier (titulaire),
- Conseil de l'Ecole Doctorale "Terre, Océans, Espace, Environnement" : Claude Boutron

Au niveau national, Claude Boutron et Michel Fily font partie du CNU 37e section.

On peut également mentionner la participation de membres du LGGE à des Commissions de Spécialistes d'autres établissements (par exemple Paul Duval à l'Institut National Polytechnique de Grenoble ou Michel Legrand à l'Université Blaise Pascal de Clermont-Ferrand).

Il faut également mentionner le travail important effectué par Jean-Pierre Benoist à l'UJF comme Chargé de Mission "Apogée".

## 1.3 Enseignements en 1<sup>er</sup>, 2<sup>ème</sup> cycles

Une bonne partie des enseignements effectués sont directement liés aux thèmes de recherche du LGGE. Il s'agit de cours, TD et TP dans différentes filières de 1er et 2e cycles de l'UJF (aussi bien les filières classiques que les filières de type IUP ou ISTG). Cependant plusieurs enseignants –et chercheurs CNRS) sont impliqués dans des filières autres que celles rattachées aux Sciences de la Terre.

Les principales filières d'enseignement sont listés ci-dessous :

- Licence et Maîtrise de Physique et Applications,
- Maîtrise de Physique Recherche,
- Licence et Maîtrise de Sciences de la Terre et de l'Univers,
- Maîtrise de Chimie-Physique,
- Magistère de Mécanique (mise en place d'une plate-forme d'essais mécaniques en chambre froide)
- Deug SMA , SMB et SV-ST
- IUP Génie civil
- IUP Génie Mécanique et productique
- Licence technologique et mécanique
- Maîtrise de mécanique
- DESS Modélisation et simulation
- Maîtrise des sciences de la Terre et de l'Univers
- DEUG SV-ST
- Licence de sciences physiques
- Licence physique et application
- Licence des sciences de la Terre et de l'Univers
- DEUG SMA SMB
- Maîtrise physique et recherche
- Maîtrise E.E.A.
- I.S.T.G. (Prévention des risques industriels, hygiène, sécurité, environnement)

Ces enseignements peuvent être caractérisés par les mots clés suivants : climat, environnement, atmosphère, neige, glace, télédétection, pollution, développement durable.

#### 1.4 Enseignements de 3e cycle

Au cours de ces dernières années, la principale formation de 3e cycle dans laquelle les enseignants chercheurs et chercheurs du laboratoire ont été impliqués est le DEA "Climat et Physico-Chimie de l'Atmosphère" ("CPCA"). Depuis sa création en 1995, il associe l'Université Joseph Fourier de Grenoble et l'Université Blaise Pascal de Clermont-Ferrand. Il est placé sous la responsabilité de Claude Boutron et Andrea Flossmann (Laboratoire de Météorologie Physique de Clermont-Ferrand).

Depuis la rentrée d'Octobre 1999, le DEA fonctionne selon une maquette modifiée conforme aux nouvelles orientations fixées par le Ministère. C'est ainsi que le volume total des enseignements théoriques a été réduit à 150 h de cours, sous la forme de 6 modules de 25 H enseignés pour moitié à Grenoble (3 semaines bloquées consécutives en Octobre) et pour moitié à Clermont-Ferrand (3 semaines bloquées en Novembre). Ces examens théoriques correspondants ont lieu en Décembre, permettant ainsi aux étudiants d'être en stage à temps plein dans les laboratoires d'accueil dès le début Janvier.

Les enseignants chercheurs et chercheurs du laboratoire sont largement impliqués dans les trois modules enseignés à Grenoble. Il s'agit des modules "Atmosphère globale et fonctionnement du système climatique" (responsable : Christophe Genthon) ; "Bilans énergétiques en différentes régions de la cryosphère terrestre (responsable : Eric Martin du Centre d'Etude de la Neige de Meteo-France) ; et "Pollution atmosphérique locale et impacts sanitaires" (responsable : Christophe Ferrari).

Par ailleurs, ils ont proposé plusieurs des modules de "Cours avancés" (25 H chacun) offerts au titre de CPCA aux thésards de l'**Ecole Doctorale "Terre, Univers, Environnement"**. Ce sont les modules "Glace, glaciers" (responsable : Armelle Philip), "Cycles biogéochimiques actuels et passés : perturbations climatiques et anthropiques" (responsable : Jean-Marc Barnola) et "Télédétection et traitement d'images des surfaces planétaires (responsable : Michel Fily).

Les effectifs annuels du DEA CPCA sont de l'ordre de 12 à 16 étudiants, inscrits administrativement pour partie à l'Université Joseph Fourier et pour partie à l'Université Blaise Pascal. De quatre à cinq d'entre eux font leur stage de recherche dans notre laboratoire.

# ERCA 2002

COURS DE RECHERCHE EUROPÉEN SUR LES ATMOSPHÈRES

EUROPEAN RESEARCH COURSE ON ATMOSPHERES

10<sup>TH</sup>  **INVERSA Y**

Grenoble, France

January 8 - February 8, 2002

## 1.5 Cours de recherche européen sur les atmosphères (“ERCA”)

Le succès de cette formation qui n’a toujours pas d’équivalent en France ou à l’étranger ne s’est pas démenti au cours de ces dernières années. La septième session a eu lieu en 1999, la huitième en 2000 et la neuvième en 2001. La dixième session aura lieu du 8 janvier au 8 février 2002.

Notre laboratoire tient un rôle essentiel dans cette formation. C’est ainsi que la direction d’ERCA est assurée depuis sa création par Claude Boutron (en tant que Chargé de Mission auprès du Président de l’Université Joseph Fourier), et la direction adjointe par Christophe Ferrari. Le secrétariat est assuré par Michèle Poinot. Plusieurs membres du laboratoire font par ailleurs partie du Comité d’organisation local. Enfin le laboratoire fournit un soutien important à ERCA tant au point de vue pratique qu’au point de vue de la gestion financière.

Au total près de 450 participants ont suivi les 9 sessions déjà organisées. Ils provenaient d’une quarantaine de pays différents, européens bien sûr mais aussi non européens. Plus de cent cinquante conférenciers se sont succédés à Grenoble pour ces sessions successives, avec la plupart des grands noms de la science actuelle dans les domaines concernés, comme Paul Crutzen, Prix Nobel de Chimie 1995.

Chaque session dure un mois environ. Les quatre premières semaines ont lieu à Grenoble dans les locaux de l’Observatoire des Sciences de l’Univers. Elles comprennent une centaine d’heures de cours, des séminaires, des tables rondes, des sessions posters au cours desquelles les participants présentent leur travail de recherche personnel oralement et sous forme de posters, et des visites d’organismes de recherche (ESRF, Coriolis, notre laboratoire, ...). Les cinq derniers jours sont consacrés à un séjour à l’Observatoire de Haute Provence au cours duquel les participants se familiarisent avec l’instrumentation moderne pour l’étude de l’atmosphère (lidars, spectromètres, interféromètres, ...) et les télescopes optiques (avec notamment la mise à disposition d’ERCA d’un télescope de 1,20 m).

Si la physique et la chimie de l’atmosphère de notre planète sont bien sûr au coeur des enseignements, ceux-ci vont cependant bien au delà, illustrant ainsi le caractère résolument pluridisciplinaire d’ERCA. C’est ainsi que les enseignements comportent une partie significative de planétologie, avec des enseignants réputés comme Jonathan Lunine (Université d’Arizona), Chris McKay (NASA Ames) ou James Kasting (Pennsylvania State Université). Ils comportent aussi par exemple une partie consacrée à l’océan (enseignée ces dernières années par Thomas Stocker de l’Université de Berne ou par Stefan Rahmstorf du Potsdam Institute for Climate Impact Research), et une partie consacrée aux aspects sanitaires, économiques ou politiques de la pollution atmosphérique (faisant intervenir par exemple en 1992 Peter Brimblecombe de l’Université d’East Anglia et Patrick Criqui de l’Institut d’Economie et de Politique de l’Energie du CNRS de Grenoble).

Par ailleurs, nous avons poursuivi la politique de publication de livres associés à ERNA qui avait débuté en 1994. C’est ainsi qu’un quatrième livre intitulé “From weather forecasting to exploring the solar system” a été publié en 2000 chez EDP Sciences. Comme les précédents, il comprend une vingtaine de chapitres écrits par une sélection de conférenciers (notamment Carlo Barbante, André Berger, Mike Bergin, Marcello Coradini, G. Kockarts, Jonathan Lunine, Chris McKay, John Plane, Gérard Thuillier, Rita Schulz et Eric Wolff). Un cinquième volume est prévu pour décembre 2002.

Financièrement, ERCA représente une opération assez importante. Le budget de chaque session est en effet de l’ordre de 700 KF, et le budget cumulé des neuf sessions déjà organisées atteint plus de 6 MF, ce qui est considérable au niveau universitaire. Les trois quarts environ de ce budget proviennent des droits d’inscription des participants. Le restant provient pour une part du quadriennal de l’Université Joseph Fourier et du financement que nous avons obtenu chaque année du Ministère de l’Education Nationale pour la prise en charge de 7 à 8 participants de l’Est européen (programme ACCESS). Jusqu’en 1999, il provenait également d’un financement très significatif du Pôle Européen de Grenoble dans le cadre de l’Institut d’Etudes Scientifiques Avancées. Ce dernier financement a malheureusement pris fin il y a deux ans dans des circonstances peu acceptables : c’est ainsi que le pôle Européen n’a pas été en mesure d’honorer la convention (pour un montant de 75 KF) qui avait pourtant été signée officiellement par l’Institut d’Etudes Scientifiques Avancées pour la session 2000, et a continué à refuser de l’honorer malgré de multiples relances. Pour finir, c’est l’Université Joseph Fourier qui a dû se substituer au Pôle Européen, ce qui est

pour le moins anormal. L'arrêt de ce financement du Pôle Européen n'a pas été sans provoquer de sérieux problèmes pour ERNA, problèmes qui n'ont pu trouver une solution que tout récemment grâce à un soutien exceptionnel de l'Université Joseph Fourier.

La prochaine session aura lieu du 8 janvier au 8 février 2002. Elle marquera le dixième anniversaire d'ERCA. L'ouverture de cette dixième session sera honorée de la présence d'Hubert Curien, Président de l'Académie des Sciences et ancien Ministre de la Recherche, Philippe Gillet, Directeur de l'INSU, Roger-Maurice Bonnet, directeur scientifique sortant de l'Agence Spatiale Européenne et Paul Crutzen, Prix Nobel de Chimie 1995.

Le nombre de participants de cette dixième session sera particulièrement élevé (plus de cinquante). Ceci en réponse au grand nombre de candidatures reçues, gage de la bonne santé de cette formation qui est souvent citée en exemple par l'Université Joseph Fourier et jouit d'une réputation internationale certaine.

### 1.6 Accueil de stagiaires

Le LGGE a maintenu une tradition d'ouverture pour l'accueil de stagiaires de différents niveaux et provenances. Il ne s'agissait pas seulement de stagiaires de DEA ou de Maîtrise et d'Ecoles d'Ingénieurs, mais aussi de stagiaires de l'enseignement secondaire (collèges notamment) et de classes préparatoires (nous avons encadré de nombreux binômes et trinômes de Math Spé de toute la France pour leurs TIPE).

	1999	2000	2001
Maitrises – Ecoles d'Ingénieurs	10	9	
Autres stagiaires (IUT, Licence)	17	12	
DEA	11	7	10
Doctorants	27	20	22

## 2 – DIFFUSION DE L'INFORMATION

### 2.1 – Actions d'information auprès des Ecoles, Lycées et grand public

Plusieurs groupes d'élèves de troisième et de première effectuent des stages d'une semaine (3 groupes en 2001). Il faut aussi mentionner les nombreux séminaires et conférences grand public, les interventions dans les émissions de radio ou de télévision et la publication d'articles dans des revues de vulgarisation :

Pépin, L., J.-M. Barnola, J.-R. Petit and D. Raynaud, Evolutions temporelles de la concentration en gaz à effet de serre et du climat d'après la carotte de Vostok (Antarctique). *La Houille Blanche*, (3/4) 64-67, 2000.

Masson-Delmotte, V. and J. Chappellaz, Au coeur de la glace, les secrets du climat. *Revue du Palais de la Découverte*, (286) 46-56, 2001.

Rémy, F. and C. Ritz, Les calottes polaires. *Pour la Science*, (282) 60-67, 2001.

Vincent, C. 2001. La lente érosion des glaciers alpins. CNRS info. Lettre d'information destinée aux médias

### 2.2 – Séminaires

Plusieurs séminaires ont été organisés au LGGE.

Nom de l'intervenant	Titre du séminaire	Date de présentation
<i>Séminaires faits par des intervenants extérieurs</i>		
Edouard BARD (CEREGE, Aix-Marseille)	Productivité océanique intertropicale pendant les 4 derniers cycles climatiques	Juin 1999
Paulo ARTAXO (Instituto de Fisica, Sao Paulo, Brésil)	Amazon basin atmospheric chemistry	Septembre 1999
Nicolas PATRIS (LSCE Saclay)	Isotopie du soufre dans les glaces polaires et les aérosols marins	Septembre 1999
Christian ZDANOWICZ (Commission Géologique du Canada, Ottawa)	Aperçu de travaux glaciologiques récents dans l'Archipel Arctique Canadien	Octobre 1999
Olivier MARCHAL (Université de Berne, Suisse)	Couplage climatique inter-hémisphère à l'échelle millénaire et variations biogéochimiques associées	Octobre 1999
Nick HALL (Université McGill, Montréal, Canada)	L'utilisation de modèles simples pour l'étude des variations climatiques	Novembre 1999
Masa KAGEYAMA (LSCE Saclay)	Le climat des latitudes extratropicales boréales au Dernier Maximum Glaciaire	Decembre 1999
Baiqing XU (Chinese Academy of Sciences, Lanzhou, Chine)	Preliminary study in a certain number aspects of the Dasuopu ice core, Himalaya	Decembre 1999
Andreas INDERMUHLE (Université de Berne, Suisse)	Carbon cycle dynamics based on CO <sub>2</sub> trapped in ice at Taylor Dome, Antarctica	Janvier 2000
Robert J. CHARLSON (Université de Stockholm, Suède)	The history of research on the greenhouse effect : a basis for understanding what has controlled progress	Janvier 2000
Françoise VIMEUX (LSCE Saclay)	Variations de l'excès en deuterium en Antarctique au cours des 400000 dernières années	Février 2000
Jöel SAVARINO (Université La Jolla, Californie, USA)	Chimie des isotopes stables de l'oxygène ( <sup>16</sup> O, <sup>17</sup> O, <sup>18</sup> O)	Mars 2000
Marie-France LOUTRE (Université Catholique de Louvain, Belgique)	Modélisation de la réponse du système climatique au forçage astronomique	Avril 2000
Denis COHEN (Yale Université, New Haven, USA)	Rhéologie de la glace au voisinage du lit du glacier Engabreen, Norvège	Mai 2000

Laurence MAURICE-BOURGOIN (IRD Bolivie)	Etude de la contamination par le mercure des eaux, des sédiments et des poissons du haut-bassin du Beni (Amazonie Bolivienne)	Juin 2000
Fred SINGER (Université de Virginie, USA)	Climate is not warming but sea is level rising : A paradox ?	Septembre 2000
Nicolas SHACKLETON (Université de Cambridge, U.K.)	Orbital eccentricity, carbon dioxide and the 100,000 year glacial cycle	Décembre 2000
John MAK (State University at New-York, USA)	Paleo-atmospheric chemistry and the isotopic characterization of carbon monoxide	Février 2001
Filip LEFEBRE (Institut d'Astronomie et de Géophysique Georges Lemaitre, Louvain, Belgique)	Modelling south-Greenland's climate	Mars 2001
Alexander A. PROKOPENKO (Université de Caroline du Sud, USA)	The long high-resolution continental paleoclimate record from Lake Baikal	Avril 2001
Bertrand CHEYNET (Thermodata), Francisco FERRON (LSCE) et François LE GUERN (LSCE)	Chimie du soufre atmosphérique : utilisation comme traceur	Avril 2001
Niels EDWARDS (visiting scientist au LEGI)	Développement d'un modèle d'Océan global	Avril 2001
Thomas ROCKMANN (Max Planck Institut, Heidelberg, Allemagne)	Isotope measurements on laughing gas	Mai 2001
Cécile TOUBIN (Laboratoire de Physique Moléculaire, Besançon)	Structure et dynamique de l'interface polluants atmosphériques/glace	Juin 2001
Jean-Emmanuel SICART (Laboratoire de Géologie Appliquée, Paris VI)	Bilan d'énergie et écoulement de fonte d'un glacier tropical en Bolivie	Juin 2001
Sergey BULAT (Petersburg Nuclear Physics Institute, Russia)	Vostok ice core : Molecular biology benefits and pitfalls	Octobre 2001
François DULAC (LSCE, Saclay)	Un bilan de l'étude des aérosols pendant INDOEX	Octobre 2001

Laurier POISSANT (Environnement Canada, Montréal)	Les échanges surface-atmosphère du mercure gazeux dans l'écosystème Grands Lacs/Saint Laurent	Novembre 2001
Paul BARRETTE (Université de Newfoundland, Canada)	Etude des propriétés physiques et mécaniques de la glace d'iceberg	Novembre 2001
Patrick GINOT (Université de Berne, Suisse)	Glaciochemical studies of Andean ice cores	Décembre 2001
<i>Séminaires faits par des intervenants internes au LGGE</i>		
Maurine MONTAGNAT (Thésarde)	Comportement mécanique et recristallisation dynamique des glaces des calottes polaires	Septembre 1999
Delphine SIX (Thésarde)	Analyse statistique de la distribution spatiale et temporelle des bilans de masse des glaciers alpins et des calottes polaires de l'Hémisphère Nord	Novembre 1999
Vincent RICARD (Thésard)	Synthèse du Programme EAAS (European Arctic Aerosol Study)	Décembre 1999
Audrey VEYSSEYRE (Thésarde)	Etude des dépôts de métaux lourds sur le manteau neigeux alpin au cours des hivers 97/98 et 98/99	Janvier 2000
Olivier ABALLAIN (Thésard)	Reconstruction de l'évolution du rapport $^{13}\text{CH}_4/^{12}\text{CH}_4$ dans l'atmosphère au cours du dernier siècle, à partir de l'analyse du névé et de la glace polaires	Février 2000
Frédéric PLANCHON (Thésard)	Les métaux lourds et leur isotopie dans les neiges et glaces de l'Antarctique : évolution sur les 150 dernières années et sur le LGM	Avril 2000
Valérie DELOYE (Thésarde)	Etudes expérimentales de l'indentation de la glace et du frottement élastomère-glace	Novembre 2000
Jean-Luc JAFFREZO	Le Programme POVA (Pollution des Vallées Alpines)	Décembre 2000
Christian VINCENT	Evolution des glaciers alpins au cours du 20e siècle et relation avec l'évolution climatique	Mars 2001
Alexandre CORREIA (Thésard)	Premiers résultats des analyses ICP-MS sur la carotte andine de l'Illimani	Avril 2001

Olivier ALEMANY, Laurent AUGUSTIN, Eric LEFEBVRE et Alain MANOUVRIER	Le forage glaciologique EPICA à Dôme C (Antarctique)	Avril 2001
Frédéric PARRENIN (Thésard)	Chronologies et théorie de Milankovitch	Mai 2001
Olivier TORINESI (Thésard)	Evénements chauds sur l'Antarctique au cours des 20 dernières années à partir de données satellites et comparaison avec des observations météorologiques	Juin 2001
Karine SELLEGRINI (Thésarde)	Caractérisation expérimentale des noyaux de condensation pendant la campagne Puy de Dôme 2001	Juin 2001
Sébastien PERRIER (Thésard)	Les composés carbonylés dans la neige de l'Arctique : un exemple de l'impact du manteau neigeux sur la chimie atmosphérique	Juin 2001

## **Rédaction et édition de la Lettre PIGB-PMRC France « Changement global »**

*(M.A. Mélières)*

Cette Lettre est liée à l'activité du Comité CNFCG qui est l'expression à l'échelle de la France, des trois comités internationaux IGBP – WCRP et IHDP. Elle paraît sous l'égide du Ministère de la Recherche et son but est à faire le point sur l'avancement de la recherche française dans le domaine des deux grands programmes internationaux : IGBP (International Geosphere Biosphere Programme), et WCRP (World Climate Research Programme). Le troisième programme IHDP (International Human Dimension Programme) sera progressivement intégré.

Ces programmes ont pour but de faire progresser la compréhension du système Terre et des facteurs forçant affectant le changement global. Les principaux sous-programmes qui y sont rattachés permettent de rassembler la communauté internationale et de favoriser le développement d'axes de recherche qui apparaissent nécessaire à l'heure actuelle. Ils trouvent presque tous, à des degrés de développement cependant différents, une résonance dans la recherche française.

L'ensemble de la recherche impliquée dans ces différents programmes concerne plus d'une cinquantaine de laboratoires, plusieurs centaines de chercheurs. Cette recherche se déroule dans environ une vingtaine de grands organismes dont les suivants sont parmi les plus importants (l'INSU-CNRS, les Universités, Météofrance, le CNES, l'IRD ou ex-ORSTOM, l'IFREMER, le CEA, l'INRA, le CEMAGREF, le SHOM)

Cette Lettre, d'environ 70 pages, est tirée à 3500 exemplaires, elle est à parution bisannuelle et est diffusée gratuitement en France et à l'étranger, principalement auprès des organismes de recherche et d'enseignement. Actuellement le N°13 est en cours de montage.

Elle est réalisée grâce au soutien apporté par l'INSU-CNRS, l'Université J. Fourier, Météo-France, le Ministère de la Recherche et MEDIAS.

## **Responsabilité scientifique du site « Climat » du CNRS**

*(M.A. Mélières)*

Ce site a été ouvert au public il y a un an. Il a pour but de présenter l'activité de la recherche française dans ce domaine. Il est régulièrement mis à jour. Il s'ensuit une interaction fréquente avec le public.

**FORMATION**  
**PERMANENTE**

.../...

## **EXTRAIT DU PLAN DE FORMATION ELABORE EN JUIN 2000 ET MIS A JOUR EN JUILLET 2001**

### **3) LA FORMATION AU LGGE**

#### ***3-1) Axes prioritaires de formation pour 2001-2002 :***

La mise en œuvre de la prospective scientifique du LGGE requiert des moyens importants à la fois logistiques, techniques, analytiques et informatiques. Elle s'appuie sur des services techniques et un service informatique performants et fait appel à des compétences de plus en plus spécifiques en matière de gestion financière et administrative. Enfin, l'ensemble du personnel est amené à travailler dans un contexte international.

Les besoins en formation pour 2001-2002 seront, comme l'année dernière, exprimés en tenant prioritairement compte, mais sans classement, des critères ci-dessous :

- (1) priorités technologiques
- (2) service informatique
- (3) réactualisation des connaissances
- (4) mouvements des personnels (mise en adéquation des personnels nouvellement recrutés avec leur fonctions, reconversions internes partielles)

#### ***3-2) Méthodes employées pour la mise à jour (juin 2001) du plan de formation rédigé en juin 2000 :***

Le plan de formation 2000-2001 a été le premier plan élaboré au LGGE. Sa mise à jour (juin 2001) a été faite en tenant compte des formations effectuées en 2000 et de leur efficacité, ainsi que de l'évolution des nos besoins par rapport à l'an dernier. L'ensemble des personnels (permanents et non permanents) a été consulté par la correspondante de formation permanente, d'abord via un questionnaire puis par des entretiens lorsqu'il y avait lieu de préciser certains points. Ce document a été rédigé par la correspondante de formation après discussion avec /et sous couvert de la direction.

#### 4) BILAN DES FORMATIONS EFFECTUEES DE JUIN 2000 A JUIN 2001 :

##### 4-1) Tableau des stages effectués depuis la rédaction de notre PFU (06/2000 – 12/ 2001)

<b>ITA</b>			
ALLEMANY O.	IR2	Gestion de Projet Solid Works	1, 8, 15 et 22 juin 2001 du 11 au 26 octobre 2000
AUGUSTIN L.	IE2	Rencontre nationale mécaniciens	du 14 au 18 mai 2001
CHEMIN J.F.	AI	Habilitation électrique – recyclage Communication orale en anglais	18 avril 2001 60 heures. octobre-décembre 2000
DE ANGELIS M.	IR1	Techniques de communication Communication orale en anglais Evaluation des effets de la formation	18, 19 janvier, 1 <sup>er</sup> et 2 février 2001 60 heures, février-juin 2001 les 28 et 29 novembre 2000
DREVET E.	AI	Sécurité Informatique Administration Réseaux Systèmes	11, 12, 13, 18, 19 et 20 juin 2001
LEFEBVRE	AI	Rencontre nationales électroniciens	Du 14 au 18 mai 2001
MANOUVRIER A.	IE2	Solid Works	du 11 au 26 octobre 2000
MIEULET M.C.	IR1	Sécurité réseaux	21, 22 et 29 septembre 2000
POSSENTI P.	TCN	Préparation aux concours internes  Solid Works	10 et 11 mai 2001 (écrit) 17 et 18 septembre 2001 (oral) du 11 au 26 octobre 2000
ROQUEMORA J.	AAR	Montage de projets européens	25 septembre 2000
SASSIN P.	IE2	Labview Technique du vide en pratique Journée nouveaux entrants Technique du vide	18, 19 et 20 avril 2001 3 et 4 mai 2001 15 décembre 2000 du 4 au 7 décembre 2000
SEGUINEL S.	TCN	Journée nouveaux entrants Formation nouveaux entrants BAP5 Nabucco	15 décembre 2000 du 25 au 29 septembre 2000 février (2j) et mars(2j) 2001
VINCENT C.	IE1	Communication orale en anglais	60 heures, octobre-décembre 2000
<b>CHERCHEURS</b>			
DOMINE F.	DR2	Ecole Thématique	du 25 au 29 septembre 2000
CHAPPELLAZ	CR1	Gestion de Projet	1, 8, 15 et 22 juin 2001
JAFFREZO J.L.	CR1	Gestion de Projet Création et édition de pages Web en langage HTML	1, 8, 15 et 22 juin 2001 10 et 11 février 2000
MARTINERIE P.	CR1	Linux	10 et 11 mai 2001
<b>POST-DOCS - CHERCHEURS ASSOCIES</b>			
GOUJON C.	CDD	Unix utilisateurs	30, 31 mai, 6 et 7 juin 2001
MAK John	C.A.	Français pour étrangers	24 heures, octobre-décembre 2000
<b>THESITIFS</b>			
BONNAVEIRA H.	Thèse	'Conception et réalisation d'un projet TICE'**	
CABANES A.	Thèse	Ecole Thématique Anglais Techniques de recherche d'emploi*	du 25 au 29 septembre 2000
COSME	Thèse	Doctoriales	
COULOMB A.	Thèse	Anglais	
DUMAS C.	Thèse	Ecole d'Eté	septembre 2000
JOURDAIN B.	Thèse	Techniques de recherche d'emploi*	
LENOEL/DELOYE	Thèse	Anglais	
PERRIER S.	Thèse	Ecole Thématique	du 25 au 29 septembre 2000
RICARD V.	Thèse	Techniques de recherche d'emploi*	
SIX D.	Thèse	Anglais	
<b>STAGES OUVERTS A TOUS</b>			
7 personnes		Secourisme du travail (recyclage)	14 mai 2001
5 personnes		Utilisation d'extincteurs (initiation)	19 octobre 2000

\*Cours proposé par le Centre d'Initiation à l'Enseignement Supérieur et ouvert à tous

\*\* Cours proposé par le Centre d'Initiation à l'Enseignement Supérieur et réservé aux moniteurs

#### 4-2) Bilan :

Le bilan est globalement positif, dans la mesure où bon nombre des formations affichées comme prioritaires en juin 2000 ont été suivies et mises en application. La formation 'Bureau d'étude Solid Works' suivie à l'IUT par 3 personnes a été jugée particulièrement bien adaptée. Toutefois un certain nombre de problèmes existent :

#### **Certaines formations à caractère prioritaire posent un réel problème de mise en œuvre :**

- '**Automatisme industriel**' (J.F. Chemin) est une formation importante, qui reste urgente et pour laquelle nous n'avons trouvé aucune solution adaptée sur la région.
- '**Conduite de travaux d'étude**' (A. Manouvrier, P. Possenti): nous n'avons pour le moment pas trouvé de solution pour cette formation qui participe de la logique propre au dessin industriel. Il existe des formations courtes mais pas adaptées. Le LGGE va essayer de monter une solution originale qui puisse être proposée à un groupe (recrutement dans d'autres laboratoires de personnes intéressées, via le réseau des mécaniciens ou par connaissance).

Il semble également difficile de trouver une formation de base, théorique (niveau Baccalauréat) et pratique en électronique et sur les lasers. Sans doute faudra-t-il se tourner, en ce qui concerne la partie théorique, vers une bibliographie (IUT ?).

Les problèmes de manque de temps sont récurrents, c'est pourquoi certaines demandes sont réitérées dans cette mise à jour alors qu'il existait une solution, soit via la FP CNRS (gestion de la recherche, bureautique) soit dans d'autres organismes (positionnement par GPS à l'IGN, Windows 2000). Comme nous l'exposons plus bas, le financement de ce type de formations pose également un problème.

Un délai plus long que prévu entre les dates possibles de formation à certains outils informatiques (Nabucco, Labview) et leur application (installation des logiciels ou du hardware) a induit une perte d'efficacité de ces formations.

La formation '**nouveaux entrants BAP 5**' dure 3 semaines. Elle s'est avérée redondante par moment tout en n'abordant pas, malgré sa durée importante, des points tels que la TVA ou les contrats européens qui paraissaient importants.

La formation '**Création et édition de pages Web en langage HTML**' est très spécifique, comporte beaucoup de programmation, mais n'a permis à la personne qui l'a suivie ni de créer et de gérer son site Web ni de transmettre quelque chose à d'autres.

Le financement pour les personnels CNRS de certaines formations, très bien adaptées mais onéreuses reste à trouver souvent au coup par coup en accord éventuellement avec la FP. Parmi les formations demandées en juin 2000, citons : '**Windows 2000**' (M.C. Mieulet), cette formation n'est pas assurée par la FP CNRS, il en existe une certifiée Microsoft (10 000 F). '**Positionnement par satellite – Géodésie par GPS**' (C. Vincent), stage IGN (10 000 F). **Le financement des formations pour les Enseignants-chercheurs et les thésards est toujours problématique.**

#### **5) MISE A JOUR DES BESOINS EN FORMATION POUR 2001-2002**

Nous avons modifié le tableau présenté dans notre PFU en tenant compte des axes définis au paragraphe 3-1.

En ce qui concerne l'axe (4), il faut préciser que P. Sassin (IE recrutée en octobre 1999) va progressivement basculer du SMIP sur un spectromètre de masse dédié à la mesure des isotopes du carbone d'abord en phase gazeuse puis en phase aérosol et dont le fonctionnement devra être piloté sous LABVIEW et que G. Teste qui va prendre ses fonctions en octobre 2001 devra acquérir les compétences techniques lui permettant de reprendre complètement la mesure de gaz traces réactifs (CO) dans la glace.

Enfin S. Seguinel (TCN recrutée en novembre 1999) va continuer à se former à l'administration et à la gestion essentiellement en interne avec l'AAR responsable du service administratif.

### 5-1) Priorités dans le domaine technologique et mouvement de personnels

Intitulé de la formation	Personnel concerné	Organisateur	Observations
<b>DEVELOPPEMENT D'UN CAROTTIER 1000 M</b>			
<b>Anglais</b> : conversation, lecture de documents techniques, rédaction de textes simples	J.P. Balestrieri (TCS) E. Lefebvre (AI) P. Possenti (TCN)	FP CNRS	
<b>Métrologie pratique des températures</b> (module de base)	E. Lefebvre (AI)	Institut National de Métrologie, CNAM Paris (8500 F)	A mettre en place rapidement (fin 2001)
<b>Automatismes industriels</b> : le but de cette formation serait d'acquérir les connaissances théoriques et pratiques nécessaires (électronique analogique, électronique de puissance) à la maîtrise des systèmes de commande de machines électriques.	cette formation permettrait à J.F. Chemin de combler partiellement le vide laissé par le départ à la retraite d'un électronicien (M. Maître) et l'impossibilité médicale qu'a un électromécanicien (J.P. Balestrieri) de partir sur le terrain	Il faut une formation sur 2 ans axée surtout sur des problèmes pratiques. Nous n'avons pas trouvé de solution à ce jour	Formation longue et urgente qui aurait dû commencer en 2000
<b>Formation sur logiciels CAO d'électromécanique</b> : sera appliquée surtout aux installations frigorifiques du LGGE	J.F. Chemin (AI)	IUT ?	
<b>Conduite de travaux d'études</b> : établir le cahier des charges et conduire une étude concernant de petits assemblages mécaniques	A. Manouvrier (IE2) B. Possenti (a déjà des bases) (TCN)	A définir, des formations courtes existent mais ne conviennent pas. Le LGGE prospecte et va essayer de trouver d'autres personnels intéressés	
<b>DEVELOPPEMENT DE LA SPECTROMETRIE DE MASSE</b>			
<b>Lasers, bases théoriques</b>	P. Sassin (IE2)	IUT bibliographie	Urgent
<b>Lasers, bases pratiques</b>	P. Sassin (IE2)	Laboratoire de Physique de l'Atome et des Molécules, Lille-1	Septembre 2001
<b>Electronique de base</b> : être capable de concevoir et monter des circuits simples, de faire des réparations simples sur des cartes	P. Sassin (IE2)	?	Urgent
<b>Opération et maintenance sur spectromètre de masse MAT 252</b> (matériel LGGE)	P. Sassin (IE2)	Stage chez le fabricant Finnigan (12 000F)	
<b>PERSONNELS NOUVELLEMENT RECRUTES</b>			
<b>Technique du vide, théorie Niveau technicien</b>	G. Teste (AJT)	FP CNRS	Urgent
<b>Technique du vide, pratique</b>	G. Teste (AJT)	FP CNRS	Urgent début
<b>Cryogénie, niveau technicien</b>	G. Teste (AJT)	FP CNRS	Urgent
<b>LABVIEW</b>	G. Teste (AJT)	FP CNRS	

5-2) Administration et Service Informatique : les demandes sont classées par ordre d'urgence

Intitulé du stage	Personnel concerné	Organisation
<b>ADMINISTRATION</b>		
<b>Création de pages Web</b>	J. Roquemora	FP CNRS
<b>SERVICE INFORMATIQUE</b>		
<b>Windows 2000 : administration, active directory, migration d'un domaine NT4 vers W2000 (commandé par évolution du parc)</b>	M.C. Mieulet (IR1)	Formation certifiée Microsoft (10 000 F)
<b>Linux</b>	E. Drevet (AI)	FP CNRS
<b>Formation d'administration SOLARIS</b> (système d'exploitation des stations SUN)	E. Drevet (AI)	Formation SUN (21 000F). Prioritaire sur M.C. Mieulet, car E. Drevet gère les station UNIX du LGGE
<b>Formation d'administration SOLARIS</b> (système d'exploitation des stations SUN)	M.C. Mieulet (IR1)	Formation SUN (21 000F). Pas prioritaire
<b>Administration système : langage perl</b>	M.C. Mieulet (IR1)	Société de formation
<b>Nouvelles techniques web : XML, PHP</b>	M.C. Mieulet (IR1)	Société de formation

### 5-3) Actualisation des connaissances

Intitulé du stage	Personnel concerné	Organisation
<b>TECHNIQUES</b>		
<b>Habilitation Haute Tension/Basse Tension</b>	J.P. Balestrieri (TCS) J.L. Gabarre (TCN) P. Possenti (TCN)	A développer par l'ingénieur sécurité du CNRS
<b>Positionnement par satellite – Géodésie par GPS (perfectionnement)</b>	C. Vincent (IEI)	IGN (10 000 F)
<b>Utilisation d'un système radar pour mesure d'épaisseur glacier</b>	C. Vincent	Institut Polytechnique Fédéral de Zurich (collaboration en cours, la formation a commencé et doit se poursuivre)
<b>Simulation analogique Pspice (logiciel au LGGE)</b>	E. Lefebvre (AI)	FP CNRS (stage spécifique si utilisateurs assez nombreux)
<b>Analyse HPLC-MS</b>	J.L. Jaffrezo (CR1)	FP CNRS ?
<b>Analyse GC-MS</b>	J.L. Jaffrezo (CR1)	FP CNRS ?
<b>Soudure classique et TIG</b>	S. Preunkert (CDD)	FP CNRS
<b>Soudure TIG</b>	J.P. Balestrieri (TCS)	FP CNRS
<b>GESTION DE LA RECHERCHE ET ECOLES THEMATIQUES</b>		
<b>Formation des chefs d'équipes</b>	J.Chappellaz (CR1) F. Dominé (DR2)	FP CNRS
<b>Conduite de réunions, animation de groupes</b>	F. Dominé (DR2)	FP CNRS
<b>Gestion de gros projets</b>	F. Dominé (DR2)	FP CNRS
<b>Gestion du temps</b>	J. Chappellaz (CR1) J.L. Jaffrézo (CR1) M. de Angelis (IR1) J. Roquemora (AAR)	FP CNRS
<b>Gestion des conflits</b>	J. Chappellaz (CR1) J.L. Jaffrezo (CR1) M. de Angelis (IR1)	FP CNRS
<b>Ecoles Thématiques (si adaptées)</b>	F. Dominé (DR2) M. Legrand (DR2)	CNRS
<b>INFORMATIQUE (besoins concernant les utilisateurs de gros moyens de calcul)</b>		
<b>Fortran 90 Matlab (ou Scilab), Maple (ou Mupad)</b>	C. Ritz (CR1)	IDRIS UJF interne
<b>Portage sur les machines CNRS ou CEA</b>	Besoin général gros utilisateurs	Stages en général organisés par les organismes en question
<b>Système d'information géographique (de préférence arcview)</b>	C. Ritz (CR1)	LTHE interne
<b>Logiciel graphique : ferret</b>	Besoins généraux	Interne
<b>LANGUES</b>		
<b>Communication scientifique en anglais</b>	Besoins généraux	FP CNRS
<b>Expression écrite et orale en anglais</b>	Besoins généraux	FP CNRS
<b>Rédaction d'articles scientifiques en anglais</b>	Besoins généraux	FP CNRS
<b>Italien (écrit, oral)</b>	F. Dominé	FP CNRS
<b>BUREAUTIQUE</b>		
<b>Création et gestion d'un site WEB (non axé sur programmation HTML uniquement !)</b>	Besoins généraux	FP CNRS
<b>Excel – Word</b>	Besoins généraux	FP CNRS
<b>Création de posters</b>	Besoins généraux	Société réalisant des posters (Numeriprint) pourrait organiser une formation de 1j au LGGE

#### 5-4) Doctorants

La plupart des demandes sont récurrentes et concernent toutes plusieurs doctorants. Elles sont listées dans le tableau ci-dessous. Il faudrait, idéalement proposer un certain nombre d'entre elles annuellement (celles qui permettent notamment l'utilisation correcte des outils informatiques dont dispose certains doctorants).

Intitulé du stage	Personnel concerné	Organisation
<b>Ecoles d'été ou thématiques :</b>		
Karthaus - 2000 Summer School on Dynamics of Glaciers and Ice Sheets (September 2000)	<i>C. Dumas</i>	<i>Ecole d'été</i>
Réactivité à la surface de la glace	<i>S. Perrier</i>	<i>école thématique du GDR 'Glace'</i>
ERCA	<i>plusieurs doctorants/an</i>	<i>ERCA</i>
<b>Anglais</b>		
Expression écrite et orale Rédaction d'articles scientifiques en anglais		Certaines formations peuvent être suivies dans le cadre d'Ecoles Doctorales (en particulier l'Ecole Doctorale 'Terre, Univers Environnement' pour les doctorants du LGGE) et du Collège Doctorale de l'INPG dans le cadre des cours de thèse (certains cours théoriques ou techniques, Anglais, insertion professionnelle). L'UJF va mettre sur pied un cours sur Matlab, il en existe un sur Mapple (module libre de l'UFR de Math). Il faut prospecter la façon dont certains doctorants pourraient être intégrés dans ces cours. D'autres formations pourraient éventuellement être assurées en interne (LATEX, Ferret, Logiciels sous Unix, rédaction d'articles scientifiques en anglais, LABVIEW, création et gestion d'une page Web) par des permanents déjà formés. Enfin, des enseignements périodiques pourraient être organisés au LGGE sous forme de cours ou de documents (F(90), méthodes statistiques, Unix)
<b>Logiciels d'acquisition de données : LABVIEW, LABTECH</b>		
<b>Calcul</b>		
Fortan 90		
Matlab, Maple		
<b>Traitements de données :</b>		
Traitement du signal (gestion de série temporelles) Traitement statistique de séries de données		
<b>Unix</b>		
Commandes Programmation sous Unix Utilisation des logiciels libres intégrés sous Unix (GMTetc..)		
<b>LATEX : formation rapide pour rédiger une thèse ou un rapport</b>		
<b>Recherche d'emploi</b> <i>Relation avec l'industrie, Doctoriales</i>		
<b>Création et gestion d'un site Web</b>		

Certaines de ces formations, qui concernent aussi des personnels permanents pourraient être organisées au LGGE : fortran 80, matlab / scilab, maple (si version récente au LGGE), initiation unix, traitement du signal, statistiques (suivant besoins), initiation à LATEX, initiation à LABVIEW si suffisamment d'appareillages sont équipés. Enfin, la société Numeriprint, qui réalise les posters du LGGE et prête à venir sur place assurer, pour les personnels intéressés, une formation de 1j sur la création de posters.

## DEVENIR DES DOCTORANTS

NOM	DATE THESE	POST-DOC	RECHERCHE EMPLOI	EMPLOI TEMPORAIRE	EMPLOI DEFINITIF
DESVOIRES E.	06/07/1999				Professeur agrégé de lycée
GAY M.	22/10/1999				Poste permanent CEMAGREF
XUEREFI.	15/10/1999			Emploi temporaire à l'Université d'Harvard (USA)	
FIORO B.	28/01/2000				PRAG à Cergy-Pontoise (IUT Génie Civil)
PEPIN L.	22/05/2000	Post-doc 2 ans au LSCE dès 01/09/2000			
GUERINOT G.	27/06/2000				CDI à Paris dès le 01/07/2000
VEYSSEYRE A.	21/09/2000				CDI chez AXA assurances
SIX D.	04/12/2000			Contrat CNES (Fily) 3 ans	
MANSUY P.	02/02/2001				CDI chez Michelin dès le 02/01/2001
PREUNKERT S.	27/07/2001	Post-doc LGGE/CNRS dès 01/01/2002			
RICARD V.	05/10/2001			CDD Sté Terre Environnement dès 01/12/2001	
MONTAGNAT M.	23/11/2001	Post-doc à Dartmouth College (USA) dès 10/12/2001			
DENOEL V.	29/11/2001			CDD UNILOG dès 01/12/2001	
JOURDAIN B.	06/12/2001	Post-doc à l'Université de Chambéry		½ poste ATER Université Chambéry	
PLANCHON F.	20/12/2001	Post-doc à Venise dès 01/03/2002			

**HYGIENE**  
**ET**  
**SECURITE**

**Compte rendu de la réunion du CHS du LGGE / CNRS  
du 2 décembre 1999**

PRESENTS : M.C. Alibert, M. de Angelis, J.Ph. Balestriéri, J.F. Chemin, P. Duval, L. Gerbore, Dr. V. Naline, J. Roquemora et E. Tricart

*Excusé* : J.L. Gabarre

**1. Bilan des accidents du travail**

- Pas de déclaration cette année

**2. Actions de sécurité et travaux effectués**

- L'affichage des n° urgents avec la liste des secouristes du LGGE a été réalisé
- Le palan de l'atelier de soudure a été contrôlé par l'APAVE
- La mise en conformité des armoires électriques du sous/sol "chambres froides" a été faite. J.F. Chemin dispose d'un téléphone sans fil. Les éclairages de sécurité ont été mis en place et le palan à bras a été contrôlé
- Plusieurs planches de la fosse ont été remplacées
- La douche de sécurité du 1<sup>er</sup> étage a été testée
- Le stockage d'azote et de CO2 dans les chambres froides est interdit
- Le transport de gaz par voiture est interdit (sauf autorisation particulière)

**3. Actions de formation**

- Secourisme : une formation est prévue durant l'année 2000
- Le LGGE doit rapidement proposer une date pour une formation sur les gaz asphyxiants
- J. Ph. Balestriéri et Ph. Possenti devraient suivre une formation en 2000 pour obtenir l'habilitation électrique
- Un recyclage (et formation) pour les "caristes" est prévue en 2000
- Dr. Naline rappelle les règles pour le travail en altitude. L. Reynaud a suivi en 1999 une formation aux risques liés à l'altitude. Les thésards doivent contacter le service médical de l'UJF pour participer à ces missions en altitude
- Le LGGE se doit de prendre toutes les dispositions pour prévenir les risques d'incendie liés à l'automatisme du dispositif de mesure du méthane (stockage d'alcool à haute température)
- A noter que le LGGE n'utilise plus de Laser

**4. Travaux à réaliser**

- La fraiseuse installée en chambre froide va être remplacée
- Un éclairage de sécurité doit être installé à l'atelier de mécanique
- Un détecteur d'oxygène doit être installé dans la casemate
- La liste des produits chimiques à retirer du LGGE va être faite par M. De Angelis

**5. Autres points**

- Une réunion des ACMO du CNRS est prévue en 2000
- Une visite du chalet du Clos de l'Ours est à prévoir avec Dr. Naline, Mme Tricart et M<sup>me</sup> Alibert
- Les vaccins pour les missions lointaines sont pris en charge par le CNRS
- Les formations "radioactivité" sont à prévoir à l'avance
- Une visite du LGGE par Mme Tricart et J. Ph. Balestriéri est prévue au début de l'année 2000

Paul Duval

Le 30 décembre 1999

**Compte rendu de la réunion du CHS du LGGE / CNRS  
du 22 décembre 2000**

**PRESENTS :** E. Balastegui, J.Ph. Balestriéri, J.F. Chemin, P. Duval, J.L. Gabarre, L. Gerbore, Dr. V. Naline, J. Roquemora et E. Tricart  
*Excusée :* M. de Angélis

**Adoption de l'ordre du jour**

**Adoption du procès-verbal de la réunion du 2/12/99**

**Bilan des accidents du travail**

- Pas de déclaration cette année ; il est à noter un accident de circulation lors du trajet habitation/LGGE, pas pris en compte comme un accident du travail.

**Actions de sécurité et travaux effectués ou à réaliser(J. Ph. Balestriéri)**

- o Mise en conformité des machines outils : La plupart des machines ont été mises en sécurité. Un devis de 87000 F a été établi pour la mise en conformité des machines restantes. Les crédits spéciaux pour cette mise en conformité étant épuisés, il faudra faire une demande auprès de la direction de l'INSU après avoir sélectionné les machines à mettre en sécurité. .
- o Une nouvelle société a été choisie pour l'entretien de l'ascenseur.
- o Les divers travaux de sécurité prévus dans le bâtiment "1973" qui ne sont pas d'une extrême urgence seront réalisés lors de la rénovation de ce bâtiment en 2002.
- o Le transformateur à pyralène ainsi que la distribution basse tension vont être remplacés (ou rénovés) (dossier suivi par le SIEG).
- o La mise en sécurité des appareillages électriques du laboratoire est de la responsabilité du LGGE.
- o Le plan ETARE du LGGE a été transmis au SIGDU pour transmission aux pompiers.

**Actions de formation**

- Secourisme : il n'y a pas eu de formation en 2000. Une formation initiale est prévue au polygone au printemps 2001. Pour le recyclage, Jean Philippe se charge de l'organisation en relation avec le Docteur Naline.
- Incendie : une formation a été organisée au LGGE en 2000.
- Pour ce qui concerne l'habilitation électrique, il faut prévoir un stage de formation et de recyclage en 2001. Il en est de même pour la formation de caristes.
- Une formation sur les gaz asphyxiants va être organisée en 2001 ; Mme Tricart se charge de l'organisation.
- D'autres formations sont prévues au polygone : risque chimique, laser ... Pour la formation "radioactivité", un stage à Lyon peut être demandé en cas d'urgence.

**Autres points**

- Une visite du Clos de l'Ours est à prévoir avec Dr. Naline et Mme Tricart.
- Le projet de construction d'une salle de conférence et de rénovation du bâtiment 1973 devra être transmis à Mme Tricart pour avis.
- Une visite de sécurité du LGGE est prévue en 2001.
- L'évacuation des piles, néons et batteries est prévue (cf J. L. Gabarre)
- Il faut d'urgence consulter les deux entreprises spécialisées dans le recyclage des produits chimiques pour évacuer les produits non utilisés (cf M. de Angélis et J. Ph. Balestriéri).

Paul Duval

Le 30 décembre 2000

**Compte rendu de la réunion du CHS du LGGE / CNRS  
du 8 novembre 2001**

**PRESENTS** : E. Balastegui, J.Ph. Balestriéri, M. de Angéllis, P. Duval, J.L. Gabarre, Dr. V. Naline, J. Roquemora et E. Tricart

*Excusés* : L. Gerbore et J.F. Chemin

**Adoption de l'ordre du jour** : Adopté

**Adoption du procès-verbal de la réunion du 22/12/2000** : Adopté

### **Bilan des accidents du travail**

Un accident de circulation sans gravité a été déclaré lors du trajet habitation/LGGE.

### **Actions de sécurité et travaux effectués ou à réaliser**(J. Ph. Balestriéri)

- **Mise en conformité des machines outils** : La plupart des machines ont été mises en sécurité. Il manque encore 67000 F pour terminer la mise en conformité des machines de l'atelier. Une nouvelle scie a été achetée en remplacement d'une ancienne machine hors d'usage. Pour les chambres froides, la mise en conformité du tour de la chambre I reste à réaliser. Le LGGE devra trouver le financement pour réaliser les mises en conformité les plus urgentes.
- **Une nouvelle société a été choisie pour l'entretien de l'ascenseur**. Une mise en conformité devra être réalisée en 2002. Il s'agit essentiellement d'un éclairage de secours, d'un téléphone et de la mise en place d'une échelle au bas de l'ascenseur.
- **Les divers travaux de sécurité prévus dans le bâtiment "1973"** qui ne sont pas d'une extrême urgence seront réalisés lors de la rénovation de ce bâtiment en 2002.
- **Le transformateur à pyralène** ainsi que certains équipements liés à la distribution basse tension vont être remplacés (ou rénovés) (dossier suivi par le SIEG).
- **La mise en sécurité des appareillages électriques** des différents laboratoires est de la responsabilité du LGGE.
- **Des blocs d'éclairage de secours** vont être installés dans l'atelier.
- **La mise en conformité électrique du Laboratoire de chimie** du 1<sup>er</sup> étage (labo. M. Pourchet) devra être réalisée avant les travaux de rénovation.
- Il est demandé à J.F. Chemin d'évaluer **les risques "incendie" liés aux 3000 litres d'huile** au silicone (liquide caloporteur des chambres froides).

### **Actions de formation**

- **Secourisme** : Un stage est prévu en 2001/2002. Pour le recyclage, Jean Philippe se charge de l'organisation en relation avec le Docteur Naline.
- **Incendie** : une formation est organisée au LGGE le 28 novembre 2001.
- Pour ce qui concerne l'habilitation électrique, un stage de formation et de recyclage devrait être organisé avant la fin 2001. O. Alémany et J-Ph. Balestriéri sont volontaires. Ph. Possenti devrait être intéressé.
- L'utilisation du chariot élévateur du LGGE est réservée à ceux qui ont suivi un stage de cariste ou à ceux qui ont une autorisation spéciale.
- Une formation sur les gaz asphyxiants va être organisée en 2002 ; Mme Tricart se charge de l'organisation.

- o D'autres formations sont prévues au polygone : risque chimique, laser ... Une évaluation des risques devra être faite.
- o Le nombre de bouteilles de gaz sous pression a fortement augmenté. Un problème de sécurité lié à leur rangement dans un râtelier se pose actuellement.

### **Autres points**

- Une visite du Clos de l'Ours est à prévoir avec Dr. Naline et Mme Tricart.
- Le projet de construction d'une salle de conférence et de rénovation du bâtiment 1973 sera transmis à Mme Tricart dès réception du permis de construire.
- J. L. Gabarre se charge de l'évacuation des piles, néons et batteries du LGGE.
- Un détecteur d'oxygène devra être acheté.
- Les règles de sécurité doivent être transmises à tous les nouveaux stagiaires ou personnes recrutées.
- Vaccinations: toute information peut être obtenue du service médical du CNRS.
- Une information sur les risques liés au travail au froid ou à haute altitude peut être fournie par le Docteur Naline. Une formation pourra être organisée si nécessaire.
- Une information sur les risques liés au travail sur écrans sera fournie par le Docteur Naline (Cf M. de Angélys).
- Mme Tricart s'inquiète du respect des règles de sécurité liées à l'utilisation des bains d'alcool (60 litres) (à vérifier).

Paul Duval

Le 14 novembre 2001