

# Le climat tropical dans l'intimité des glaciers andins

Françoise Vimeux

Institut de recherche pour le développement (IRD)  
et Laboratoire des sciences du climat et de l'environnement (IPSL/LSCE)  
Centre d'études de Saclay - L'Orme des Merisiers,  
Bât. 701 - 91191 Gif-sur-Yvette Cedex  
francoise.vimeux@lsce.ipsl.fr

## Résumé

La cordillère des Andes en Amérique du Sud représente un cordon de glaciers de haute altitude, s'étalant sur plus de 7 000 km, depuis l'équateur jusqu'à la péninsule Antarctique. Cet article montre comment les carottes de glace qui ont été extraites de la partie tropicale de la cordillère (entre 0° et 20° S) sont utilisées pour étudier, depuis plus de vingt-cinq ans, l'histoire du climat dans cette région. En particulier, cet article se concentre sur les informations climatiques qui sont déduites de la composition isotopique de la glace (oxygène 18 et deutérium), sur des périodes allant du dernier siècle, avec une résolution temporelle saisonnière, jusqu'au dernier maximum glaciaire, il y a 20 000 ans environ.

## Abstract

### Tropical climate in the depths of Andean glaciers

The Andean Cordillera of South America is a 7,000 km-long, high altitude, glaciated mountain range stretching from the Equator to the Antarctic Peninsula. This paper shows how the ice cores extracted from the tropical glaciers of the Andes (between 0° and 20°S) have for about 25 years been used to study past tropical climate history. This paper focuses on the climate information derived from the isotopic composition of the ice (oxygen 18 and deuterium) from the last century to the last Glacial Maximum around 20,000 years ago with seasonal resolution.

## Historique

Depuis près de cinquante ans, les glaces du Groenland et de l'Antarctique sont exploitées pour reconstruire l'histoire de notre climat à l'échelle globale (Masson-Delmotte et Chappellaz, 2002 ; Vimeux, 2003). Les neiges accumulées au cours du temps dans ces régions froides gardent en mémoire les conditions climatiques de leur époque et ont permis de reconstruire les grands traits de l'évolution de notre climat, sur près de 800 000 ans, pour ce qui concerne le récent forage sur le site d'Epica - Dôme C en Antarctique de l'Est (Epica community members, 2004).

Séduite par la potentialité offerte par les glaces polaires, une équipe américaine a prélevé pour la première fois, en 1983, une carotte de glace dans un glacier de haute altitude des Andes péruviennes (glacier du Quelccaya, Pérou, 5 670 m, 13° 56' S, 70° 50' W). Ce forage faisait suite à une première reconnaissance sur place en 1974, conduisant à une excellente conservation des couches de neige annuelles. L'analyse de deux carottes, d'une longueur de près de 160 mètres, a démontré que ces glaciers renfermaient des indices inédits sur l'histoire du climat tropical sur les 1 500 dernières années, avec une résolution saisonnière sur la majeure partie de l'enregistrement (Thompson et al., 1985).

Face à la richesse climatique préservée dans ces glaciers tropicaux, d'autres forages dans les Andes tropicales ont été mis en œuvre par la suite (figure 1). En 1993, un forage au sommet du Huascarán (Pérou, 6 048 m, 9° 06' S, 77° 30' W) a offert, pour la première fois, la possibilité de reconstruire les variations climatiques tropicales sur près de 18 000 ans à partir d'une carotte de glace andine (Thompson et al., 1995). Les carottages du Sajama en 1997 (Bolivie, 6 542 m, cordillère occidentale, 18° 06' S, 68° 53' W), de l'Illimani en 1999 (Bolivie, 6 350 m, cordillère orientale, 16° 37' S, 67° 46' W - figure 2), du Chimborazo en 2000 (Équateur, 6 268 m, 1°28'S, 78°48'W) et du Coropuna en 2003 (Pérou, 6 425 m, 15°32'S, 72°39'W), réalisés par l'Institut de recherche pour le développement (IRD) et ses partenaires sud-américains et européens, ont complété ces indications climatiques, sur des périodes remontant à 25 000 ans, et sur une bande de latitude d'environ 20 degrés (Thompson et al., 1998 ; Ramirez et al., 2003).

Sur chacun des sites de forage, des études sur les processus de postdéposition, susceptibles d'affecter les enregistrements chimiques et isotopiques (fonte et sublimation en surface, percolation de l'eau de fonte dans le névé et lessivage des traceurs), ont montré que les glaciers andins culminant à plus de 6 000 mètres offraient, pour la plupart,



Figure 1 - Emplacement des différents sites de forage dans les glaciers de la cordillère andine depuis l'Équateur jusqu'à la Patagonie. (©2001 National Geographic Society and Earth System Research Laboratory - NOAA, 2001)

des conditions de température assez basses tout au long de l'année pour assurer une excellente préservation de la neige, et de l'information climatique qu'elle renferme.

Cet article se concentre sur les glaciers tropicaux. Ils ne sont cependant pas les seuls glaciers de la cordillère andine à avoir été forés. Plus au sud, au Chili, un forage a été entrepris en 1999 au som-

met du Cerro Tapado (5 550 m, 30° 08' S, 69° 55' W), mais les phénomènes de postdéposition s'y sont révélés particulièrement importants et, en conséquence, la conservation de l'information climatique est perturbée. Enfin, en Patagonie, et ce malgré les conditions météorologiques épouvantables, plusieurs tentatives de forage ont été menées ces dernières années, et une mission sur le sommet du San Valentin

(46° 35' S, 73° 19' W) a enfin été menée, avec succès, en mai 2007, permettant de rapporter plusieurs carottes de cette région, jusqu'alors vierge de tout forage jusqu'au socle rocheux (voir la partie « Le forage du San Valentin en Patagonie chilienne », à la fin de cet article).

### Carottage à plus de 6 000 mètres d'altitude

Les expéditions de carottage sur les glaciers tropicaux sont menées dans des conditions difficiles. L'altitude élevée, ajoutée aux basses températures et aux vents intenses, rend fort peu agréable le séjour sur le site de forage. En amont, l'acheminement de tout le matériel nécessaire à la mission (carottiers, tentes de forage, caisses pour la descente de la



Figure 2 - Sommet de l'illimani vu depuis le bas de la ville de La Paz, en Bolivie. (Base Indigo © IRD, Denis Wirrmann)

glace, nourriture, etc.) est particulièrement périlleux. Les équipes sont composées généralement d'une dizaine de scientifiques, entraînés à la haute montagne, qui vont s'installer sur le glacier pour environ une semaine (figure 3). Au terme de la mission, une carotte de glace, échantillonnant le glacier depuis sa surface jusqu'au socle rocheux, sera extraite (figure 4). Dans les Andes tropicales, la longueur des carottes varie entre 130 et 150 m, et celles-ci sont forées par tronçons cylindriques d'environ 1 m, avec un diamètre variant de 6 à 9 cm, selon le carottier utilisé. Ces morceaux de carotte sont ensuite redescendus précautionneusement dans des chambres froides, avant d'être transportés en France. Le transport est un passage délicat, car la carotte doit toujours rester gelée pour préserver les traceurs physiques et chimiques. Arrivées à l'aéroport Charles-de-Gaulle, les carottes sont généralement transportées au Laboratoire de glaciologie et géophysique de l'environnement (LGGE) à Grenoble, lequel possède une importante capacité de stockage en chambre froide. Elles y seront découpées pour les diverses analyses, selon un schéma précis de partage (figure 5).

Les expéditions ne se déroulent pas pour autant toutes dans des conditions idéales ou n'aboutissent pas toutes aux résultats souhaités. Par exemple, la glace prélevée au sommet du Chimborazo, en l'an 2000, s'est révélée inexploitable, à cause de l'éruption du volcan Tungurahua quelques mois auparavant. La cendre déposée sur le glacier a noirci sa surface, et provoqué la fonte de la neige, qui a ensuite percolé dans le névé sur plusieurs dizaines de mètres, et lessivé la majorité des éléments chimiques. En Patagonie, au printemps 2006, une mission au sommet du San Valentin n'a pu aboutir, à cause de très fortes chutes de neige de plusieurs mètres, qui ne cessaient d'ensevelir les tentes du campement.

## Quelles analyses, pour quelles informations climatiques ?

Les mesures réalisées sur la glace qui apportent des données quantitatives et qualitatives sont les mesures de la composition isotopique (oxygène 18 et deutérium), et de la concentration en éléments chimiques (calcium, sulfate, chlore, etc.).



Figure 3 - Partie du campement installé au sommet de l'Ilhimani lors de la mission de forage en 1999. (Base Indigo © IRD, Bernard Francou)

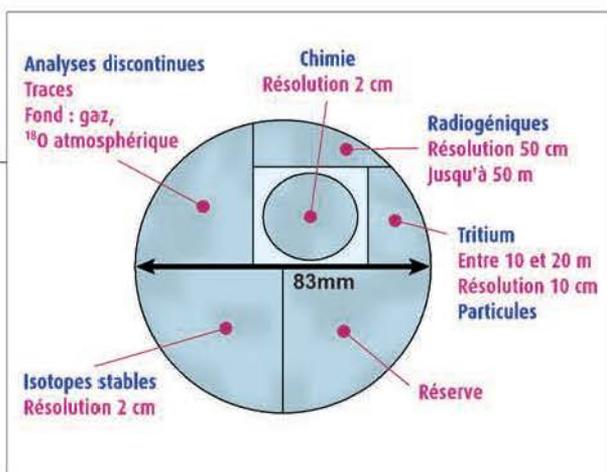
Si la composition isotopique (deutérium et oxygène 18) de la glace polaire apporte une information en termes de température, il en est autrement sous les tropiques, où le cycle de l'eau atmosphérique est beaucoup plus complexe. Tout d'abord, les pluies sont majoritairement issues de processus convectifs, où les gouttelettes d'eau subissent de nombreux cycles d'évapocondensation, modifiant à chaque fois leur composition isotopique. De plus, les masses d'air tropicales sont soumises à de forts recyclages de la vapeur d'eau, via la végétation (transpiration, évaporation de l'eau de pluie interceptée par la canopée) et l'évaporation des eaux stagnantes (rivière, zone inondée), lesquels modifient fortement leur composition isotopique. Il est

ainsi plus difficile d'exploiter les profils isotopiques des carottes de glace tropicale, en termes d'une seule variable climatique quantifiée. Cependant, de gros efforts, couplant des observations directes (réseaux de collecte des précipitations) et la modélisation du cycle de l'eau et de la convection, ont été entrepris, depuis quelques années, afin d'établir précisément la composition isotopique des précipitations. Il en ressort que la composition isotopique des neiges andines est principalement contrôlée par la quantité de précipitations que la masse d'air perd tout le long de sa trajectoire, depuis sa formation au-dessus de l'océan Atlantique tropical, jusqu'aux derniers flocons de neige sur les sommets andins.

Figure 4 - Tronçon de carotte de glace provenant du forage du Chimborazo en Équateur. Des traces de cendres volcaniques sont visibles sur la section droite de la carotte. (Base Indigo © IRD, Patrick Wagnon)



Figure 5 - Exemple de découpage d'une carotte de glace pour les diverses analyses isotopiques et chimiques.



Pour l'expliquer, partons de la source des précipitations. En s'évaporant, la surface de l'océan crée une vapeur d'eau légèrement enrichie en molécules d'eau légères ( $H_2O^{16}$ ), par rapport aux molécules lourdes ( $HDO$  ou  $H_2O^{18}$ ) qui restent préférentiellement dans la phase condensée. Au cours de son voyage, cette masse d'air va se refroidir en s'élevant lors des ascendances liées aux systèmes convectifs et, par conséquent, son contenu en vapeur d'eau va se condenser. À chaque condensation, la vapeur d'eau s'appauvrit encore un peu plus en molécules lourdes, qui quittent la masse d'air, définitivement emportées par les précipitations. Ainsi comprend-on que, plus les pluies sont intenses au cours du déplacement de la masse d'air, plus les neiges précipitant sur les sommets andins sont appauvries en molécules lourdes. Ainsi, en étudiant la composition isotopique des glaces andines (le rapport entre molécules d'eau lourdes et légères, relativement au rapport moyen dans l'océan), peut-on retracer l'histoire de la précipitation que les masses d'air perdent au cours de leur trajectoire. Plus finement, l'étude du cycle de l'eau dans cette région, à travers les réanalyses météorologiques, montre que la masse d'air est principalement affectée par les énormes systèmes convectifs qu'elle rencontre en début de parcours, au-dessus de l'océan et au-dessus du bassin amazonien (Vimeux et al., 2005). L'impact de la quantité de précipitation perdue par une masse d'air sur sa composition isotopique se nomme couramment l'« amount effect ».

L'atmosphère ne transporte pas que des pluies. Elle transporte aussi des poussières, des pollens, des cendres volcaniques, des sels marins, des résidus de feux de biomasse et divers composés chimiques. L'étude de leur concentration dans la glace nous délivre des indications importantes sur la circulation atmosphérique, les sources des masses d'air, mais aussi l'impact de l'homme sur son environnement.

## Quelles périodes de temps, et à quelle résolution, pouvons-nous étudier à partir des carottes de glace tropicales ?

Les carottes de glace extraites des glaciers tropicaux nous permettent de reconstruire l'histoire du climat jusqu'au **Dernier maximum glaciaire**, il y a environ 20 000 ans. Mais la carotte du Sajama, par exemple, remonte jusqu'à il y a près de 25 000 ans. La dynamique rapide des glaciers, la forte accumulation neigeuse par an (entre 0,5 et 1 m de neige par an) et les épaisseurs de glace réduites (150 m au maximum) ne permettent pas d'accéder à des archives climatiques plus anciennes, contrairement aux carottages polaires (allant jusqu'à 800 000 ans en Antarctique de l'Est, pour une carotte de près de 3,5 km et une accumulation neigeuse de 2 cm/an). En contrepartie, les carottes tropicales permettent d'étudier notre climat avec une très bonne résolution temporelle, atteignant la saison sur les derniers siècles (seule une résolution de plusieurs décennies, voire de plusieurs siècles, est atteinte dans les carottes polaires).

La datation des carottes de glace tropicales découle d'une combinaison de méthodes. Lorsque la résolution temporelle le permet, généralement sur la première moitié de la carotte (les premiers 50-60 m), la datation se fait par comptage des cycles saisonniers des éléments chimiques et de la composition isotopique de la glace. La présence de cycles saisonniers marqués s'explique par l'alternance de saisons sèches et humides modifiant, d'une part la manière dont les éléments chimiques se déposent

(dépôt sec ou humide), d'autre part la composition isotopique de la neige, à cause de l'« amount effect » précité. Cette datation par comptage est contrainte par des repères dits absolus : identifications de couches de cendre correspondant à une éruption volcanique connue (le Tambora en 1815, par exemple, ou le Pinatubo en 1991) et des tests thermonucléaires, laissant dans l'atmosphère des traces telles que de fortes concentrations en tritium ou en césium 137 (doubles pics caractéristiques des essais atmosphériques de 1963). On utilise aussi la décroissance de certains éléments radioactifs, comme le plomb 210.

La datation établie sur les cycles saisonniers permet de dater à plus ou moins deux ans le dernier siècle, suivant la carotte considérée. L'erreur sur la datation augmente avec la profondeur, et peut atteindre plusieurs dizaines d'années à la profondeur où les cycles saisonniers disparaissent (vers 70-80 m à Illimani, par exemple). Ainsi, lorsque la compaction de la neige ne permet plus d'identifier les cycles saisonniers dans les analyses, la datation peut être effectuée en utilisant des modèles d'écoulement de la glace, calculant l'évolution de la compaction de la neige en fonction de la profondeur, par comparaison avec d'autres carottes possédant des profondeurs bien datées. Par exemple, des débris végétaux et un insecte retrouvés dans la carotte du Sajama ont permis de donner un âge à la glace, grâce à des mesures de carbone 14 sur ces matériaux ; ou encore, pour ce qui concerne le fond de la carotte, en utilisant la composition isotopique de l'oxygène de l'air piégé dans les bulles d'air, dont la valeur est connue de manière globale suivant la période climatique (**l'holocène**, période chaude qui a débuté il y a 10 000 ans, la dernière déglaciation entre 18 000 et 11 000 ans, ou le Dernier maximum glaciaire ; voir aussi la figure 7).

## Qu'apprenons-nous sur notre climat à partir des carottes de glace tropicales ?

L'étude des climats tropicaux a été tardive. La variabilité du climat tropical était plutôt perçue, jusqu'à il y a encore une quinzaine d'années, comme une réponse de faible ampli-

tude aux variations climatiques qui naissent et se développent dans les plus hautes latitudes, sous l'effet de forçages extérieurs naturels (ensoleillement, éruptions volcaniques, variations de l'orbite terrestre) ou anthropiques. La machine climatique est en réalité bien plus complexe, et surtout non linéaire. Les zones tropicales ont une dynamique propre face aux forçages, et participent aux variations climatiques globales, via des téléconnexions tropiques-tropiques et tropiques-hautes latitudes, et des rétroactions complexes qu'il est important de décortiquer. Il ne faut pas oublier, par exemple, que c'est dans le Pacifique tropical que prend naissance le principal mode de variabilité climatique interannuelle au niveau global : le phénomène El Niño.

Les carottes de glace issues des glaciers andins sont donc une aubaine pour mieux comprendre les réactions du climat tropical au fil du temps, dans des contextes de forçages très différents.

## Reconstitution du climat sur le dernier siècle

La forte accumulation neigeuse sur les glaciers andins permet de reconstruire, sur le dernier siècle, la variabilité des précipitations, avec une résolution saisonnière. L'un des résultats phares de l'étude des carottes tropicales est le signal isotopique décennal commun à toutes les carottes, depuis l'Équateur jusqu'au sud de la Bolivie. Ce signal, que nous avons appelé **Index isotopique andin (IIA)**, représente les variations de l'intensité des pluies dans le bassin amazonien et sur l'Atlantique tropical Nord (Hoffmann et al., 2003) [figure 6]. Ce signal isotopique présente une corrélation significative avec l'évolution de la variabilité interannuelle des précipitations globales, contrôlées, au premier ordre, par le phénomène El Niño. Ce phénomène, qui peut être considéré comme une oscillation interne du système climatique, apparaissant à des intervalles irréguliers allant de 2 à 7 ans et résultant du couplage entre l'océan et l'atmosphère, entraîne des déplacements de masses d'eau chaude de part et d'autre du Pacifique tropical. Il modifie ainsi la température de surface de l'océan, ce qui provoque un déplacement de la cellule de circulation atmosphérique (dite de Walker) au-dessus de l'Amérique du Sud, laquelle joue un rôle de courroie de transmission, en modifiant large-

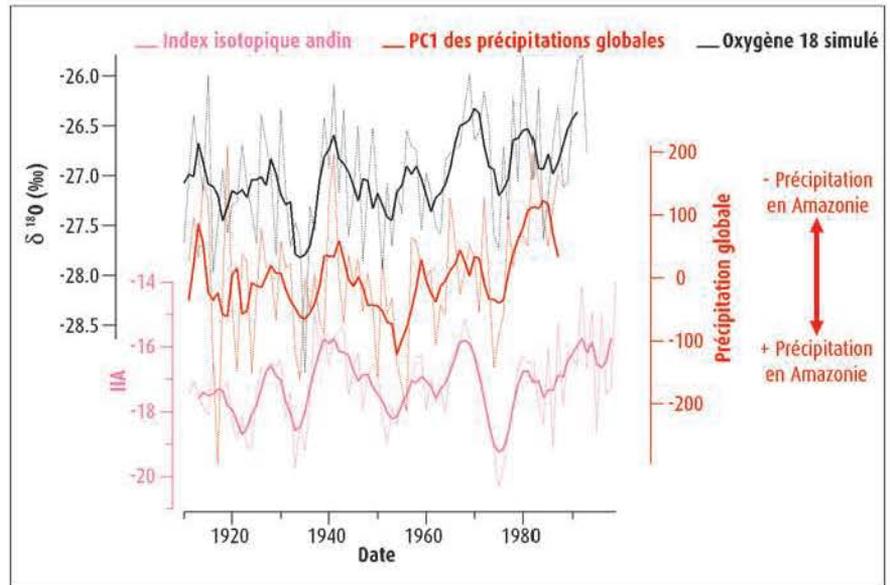


Figure 6 - L'index isotopique andin (courbe et échelle violettes), la première composante d'une analyse en composantes principales des précipitations globales (courbe et échelle rouges) et la composition isotopique de l'oxygène 18 de la vapeur d'eau amazonienne simulée par le modèle atmosphérique Echam-4, adaptée de Hoffmann et al., 2003 (courbe et échelle noires). Les courbes en gras représentent une moyenne mobile sur cinq années.

ment l'abondance des pluies dans la région de l'Amazonie. La composition isotopique des pluies, moins appauvries<sup>(1)</sup> lors de ces périodes El Niño (conditions sèches sur l'Amazonie), montre que les carottes de glace andines sont susceptibles d'enregistrer des modifications de ce phénomène qui, rappelons-le, provoque de terribles et meurtrières inondations dans certaines régions tropicales comme sur les régions côtières du nord du Pérou.

## Des traces du « Petit âge de glace »

Le terme de **Petit âge de glace** désigne une période relativement froide allant du XV<sup>e</sup> à la fin du XIX<sup>e</sup> siècle, avec un paroxysme entre les années 1600 et 1800. L'extension géographique de ce phénomène, tout comme son origine, sont débattues, mais un consensus existe pour dire que ce phénomène a été centré sur l'Europe. Celui-ci a été mis en évidence grâce à l'étude de certaines archives climatiques, comme les cernes d'arbres, mais aussi grâce à la lecture de nombreux écrits qui l'attestent, et au travers d'anciennes gravures et peintures (tableaux du peintre Pieter Bruegel, montrant des hivers particulièrement froids dans le nord de l'Europe).

Dans l'hémisphère Sud, les traces de cette période sont plus rares. Les glaciologues l'ont pourtant recherchée dans les glaciers andins. Entre 1650 et 1780,

la composition isotopique de la glace montre une diminution significative (d'environ 1,5 ‰ en oxygène 18), qui pourrait s'interpréter comme une augmentation du régime des précipitations. Il n'y a pas d'indication en termes de température au cœur des carottes, mais il est avéré qu'à cette même époque, l'avancée des glaciers andins était maximale (V. Jomelli, communication personnelle). Ainsi, le Petit âge de glace aurait-il laissé aussi des traces dans cette région tropicale de haute altitude, comme étant une période plus froide et plus humide qu'aujourd'hui.

## La dernière transition glaciaire-interglaciaire

La mesure de la composition isotopique sur le fond des carottes de glace andines, les derniers mètres, a apporté une surprise de taille. Le signal obtenu est très similaire à celui enregistré dans les calottes de glace polaires, alors que, dans ces deux environnements glacés, le rapport entre le nombre de molécules d'eau lourdes et légères n'a absolument pas la même signification (lié à la température aux pôles, mais aux précipitations aux tropiques).

(1) La composition isotopique des pluies est donnée en termes d'appauvrissement en molécules lourdes par rapport à la composition isotopique moyenne de l'eau de mer. Cette échelle relative est donc construite de telle sorte que, plus une masse d'air a subi une vidange importante de son contenu en eau, plus sa composition isotopique est appauvrie.

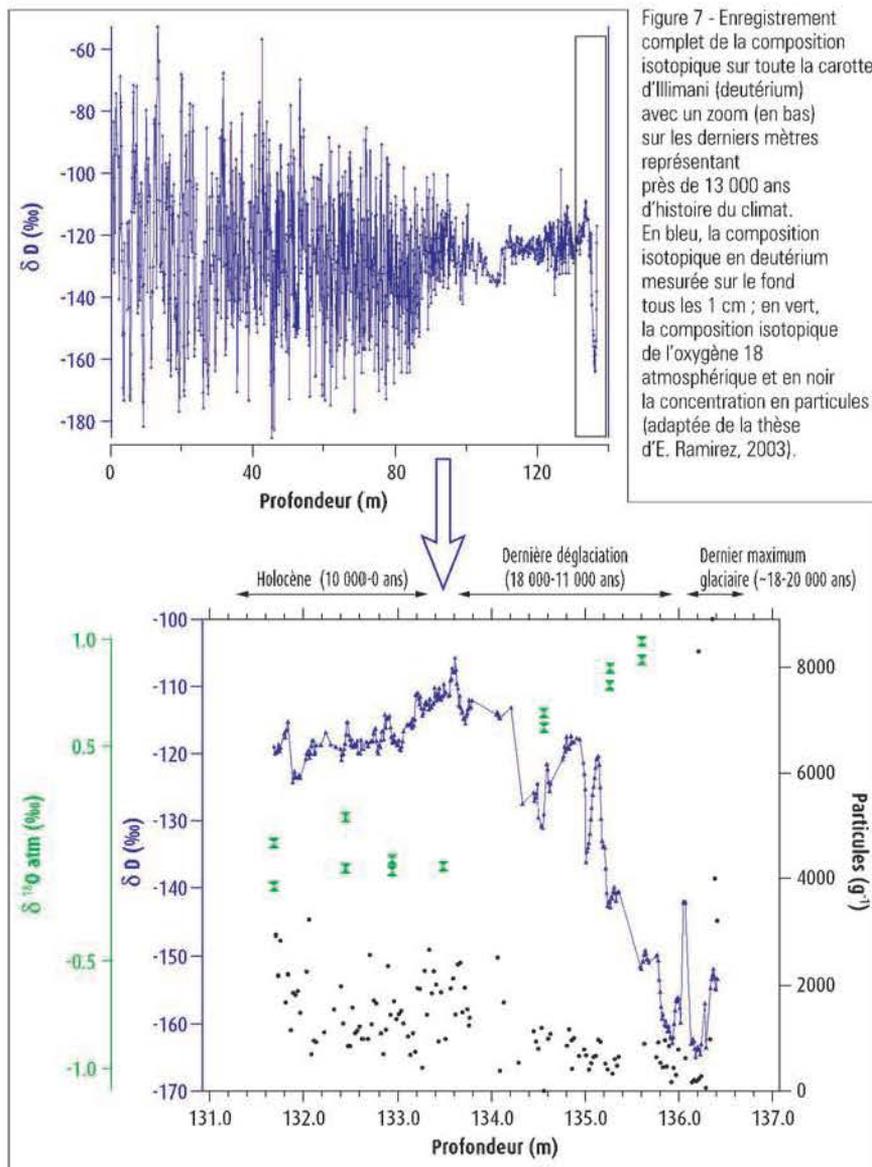


Figure 7 - Enregistrement complet de la composition isotopique sur toute la carotte d'Illimani (deutérium) avec un zoom (en bas) sur les derniers mètres représentant près de 13 000 ans d'histoire du climat. En bleu, la composition isotopique en deutérium mesurée sur le fond tous les 1 cm ; en vert, la composition isotopique de l'oxygène 18 atmosphérique et en noir la concentration en particules (adaptée de la thèse d'E. Ramirez, 2003).

La composition isotopique des carottes de glaces extraites au Huascarán, au Sajama et à Illimani (figure 7) montre un fort appauvrissement, sur les derniers mètres de la carotte, de la composition isotopique, suivi d'une remontée significative du signal, interrompue par un léger appauvrissement, avant d'atteindre une composition relativement stable. Cette variation commune (de l'ordre de 7 à 9 ‰ en oxygène 18, suivant la carotte considérée), de type glaciaire-interglaciaire, est tout à fait comparable à celle enregistrée dans les pôles. Elle est interprétée en termes de variations de température : un climat plus froid d'environ 10 °C en Antarctique, et d'environ 20 °C au Groenland, lors du dernier maximum glaciaire il y a 20 000 ans, suivi d'une déglaciation marquée par un retour à des conditions froides vers 12 000 ans, période connue sous le nom de « Younger Dryas », avant d'atteindre la période de l'holocène il y a 10 000 ans, période chaude caractérisée par une stabilisa-

tion de la composition isotopique à l'échelle du millier d'années, brièvement précédée par un optimum de température, appelé optimum de l'holocène (il y a 11 000 ans environ).

Notre connaissance de la physique des isotopes stables et le travail de calibration sur site nous permettent de dire que le signal des glaciers andins, bien que similaire à celui de plus hautes latitudes, est relié au régime des précipitations. Ainsi, l'hypothèse apportée par ces signaux glaciaires tropicaux est que les régions andines et amazoniennes, ainsi que l'océan Atlantique tropical Sud (sources des précipitations), auraient été plus humides il y a 20 000 ans, ce qui n'exclut pas un climat moyen plus froid de 2 à 4 °C dans ces régions, comme le montrent les simulations des modèles de climat.

Pour comprendre cette situation, revenons aux modifications qui ont touché les régions tropicales lors du Dernier

maximum glaciaire. Dans un climat plus froid, la bande de convergence intertropicale (l'équateur météorologique, lieu de précipitations convectives très intenses) est décalée vers le sud, à cause de la présence d'une immense calotte glaciaire dans les hautes latitudes de l'hémisphère Nord, qui accentue la dissymétrie entre les deux hémisphères, provoque un gradient de température nord-sud anormal et repousse plus au sud la branche descendante de la cellule de Hadley de l'hémisphère Nord (Chiang et Bitz, 2005). Cela a pour conséquence de créer une augmentation des précipitations, principalement au-dessus de l'Atlantique tropical sud, dans une zone interceptée par les trajectoires des masses d'air précipitant sur les Andes (Vimeux et al., 2005). Les modèles couplés de climat simulent parfaitement cette augmentation des précipitations sur l'océan Atlantique tropical sud, et montrent peu de changement au-dessus de l'Amazonie (Khodri, communication personnelle). Ils suggèrent aussi que le début de la saison humide était légèrement plus précoce qu'aujourd'hui. Ainsi, il y a 20 000 ans, le cumul des précipitations le long des trajectoires des masses d'air est augmenté et la composition isotopique des neiges andines est plus appauvrie en molécules lourdes.

La figure 7 montre de plus la concentration en particules dans la carotte de l'Illimani (Ramirez, 2003). Contrairement aux enregistrements polaires, sur lesquels on constate un fort taux de poussière en période glaciaire, dû principalement à des sources continentales plus étendues (niveau de la mer plus bas de 120 m) et à un transport plus efficace, la carotte de l'Illimani montre le contraire : une concentration plus élevée à l'holocène qu'il y a 20 000 ans. Ce résultat, encore non exploité ni expliqué, met en avant la particularité, et la non-redondance des informations enregistrées dans les glaces tropicales.

## Le forage du San Valentin en Patagonie chilienne

Les Andes sud-américaines représentent un cordon montagneux nord-sud qui s'étend sur environ 7 000 km, depuis l'équateur jusqu'au « bout » de l'Amérique du Sud, là où la distance avec le continent antarctique n'est plus, à vol d'oiseau, que de 1 000 km.

Posséder une même archive de notre climat à une si grande échelle spatiale est une opportunité que nous ne retrouvons nulle part ailleurs sur la Terre. Outre des informations sur le climat tropical ou polaire, nous pouvons comparer les différents forages entre eux, en se fondant sur les mêmes traceurs isotopiques ou chimiques, et nous intéresser aux téléconnexions climatiques entre les tropiques et les hautes altitudes.

Il faut noter, cependant, qu'aucun forage exploitable n'avait été réalisé à ce jour entre le domaine tropical et l'Antarctique, aux moyennes latitudes, là où la majeure partie de la population vit. En effet, il y a, dans cette zone, peu de sommets au-dessus de 2 500 m offrant des températures assez froides pour préserver les traceurs géochimiques enfermés dans la glace. De plus, les conditions météorologiques sont, la plupart de l'année, exécrables, offrant peu de possibilités aux équipes de foreurs de se rendre sur place.

Un projet phare de l'IRD et de son partenaire chilien, le Centre d'études scientifiques de Valdivia (CECS), est de combler ce vide, en forant les glaciers patagoniens. La calotte patagonienne (troisième calotte mondiale en volume d'eau après le Groenland et l'Antarctique) se divise en deux sous-calottes : les calottes Nord et Sud. Une équipe d'« éclaireurs des neiges » a repéré, il y a quelques années, le sommet du San Valentin, situé sur la frontière entre le Chili et l'Argentine, culminant à 4 100 m (46° 35' S, 73° 19' W) et semblant être un bon candidat pour fournir de la glace exploitable. C'est ce qu'a confirmé une étude test, réalisée sur une carotte courte de 16 m, prélevée en avril 2005 sur place. Les traceurs isotopiques et chimiques sont remarquablement préservés grâce à une glace froide (-11 °C). Une première datation, combinant des mesures d'éléments radiogéniques (tritium, césium, américium, plomb 210) et le comptage des cycles saisonniers des

espèces chimiques, estime l'accumulation neigeuse moyenne annuelle à 30 cm/an.

Une mission de forage réalisée sur ce sommet en mai 2007, avec le soutien de l'Agence nationale pour la recherche (ANR), a permis de forer le glacier du San Valentin sur toute son épaisseur (122 m). Par analogie avec les glaciers plus au nord, et en tenant compte de l'accumulation estimée, cette nouvelle carotte devrait nous permettre de découvrir l'histoire du climat de cette région sur au moins les 1 000 dernières années, voire d'approcher le dernier maximum glaciaire, en étudiant finement les derniers mètres de la carotte. Les analyses inédites qui seront réalisées sur cette glace devraient venir combler le maillon manquant dans la documentation glaciaire de notre climat à toutes les latitudes du continent sud-américain.

## Bibliographie

- **Chiang J. C. H.** et **C. M. Bitz**, 2005 : Influence of the high latitude ice cover on the marine Intertropical Convergence Zone. *Climate Dyn.*, DOI: 10.1007/s00382-005-0040-5.
- **Epica community members**, 2004 : Eight glacial cycles from an Antarctic ice core. *Nature*, 429, 623-628.
- **Hoffmann G., E. Ramirez, J. D. Taupin, B. Francou, P. Ribstein, R. Delmas, H. Dürr, R. Gallaire, J. Simoes, U. Schotterer, M. Stievenard et M. Werner**, 2003 : Coherent isotope history of Andean ice cores over the last century. *Geophys. Res. Lett.*, 30, 1179-1184.
- **Masson-Delmotte V.** et **J. Chappellaz**, 2002 : Au cœur de la glace, les secrets du climat. *La Météorologie*, 8<sup>e</sup> série, 37, 18-25.
- **Ramirez E.**, 2003 : *Interprétation de la variabilité climatique enregistrée dans les carottes de glace à partir des isotopes stables de l'eau : cas des Andes tropicales*. Thèse de doctorat, Université Paris 6, 175 pages.
- **Ramirez E., G. Hoffmann, J. D. Taupin, B. Francou, P. Ribstein, N. Caillon, F. A. Ferron, A. Landais, J. R. Petit, B. Pouyaud, U. Schotterer, J. C. Simoes et M. Stievenard**, 2003 : A new Andean deep ice core from Nevado Illimani (6350 m), Bolivia. *Earth Planet. Sci. Lett.* 212, 337-350.
- **Thompson L. G., E. Mosley-Thompson, J. F. Bolzan et B. R. Koci**, 1985 : A 1500-year record of tropical precipitation recorded in ice cores from the Quelccaya ice cap. *Science*, 229, 971-973.
- **Thompson L. G., E. Mosley-Thompson, M. E. Davis, P. N. Lin, K. A. Henderson, J. Cole-Dai, J. F. Bolzan et K. B. Liu**, 1995 : Late glacial stage and Holocene tropical ice core records from Huascarán, Peru. *Science*, 269, 46-50.
- **Thompson L. G., M. E. Davis, E. Mosley-Thompson, T. A. Sowers, K. A. Henderson, V. S. Zagorodnov, P. N. Lin, V. N. Mikhalenko, R. K. Campen, J. F. Bolzan, J. Cole-Dai et B. Francou**, 1998 : A 25,000-year tropical climate history from Bolivian ice cores. *Science*, 282, 1858-1864.
- **Vimeux F.**, 2003 : La surface de l'océan dans les profondeurs des glaces polaires. *La Météorologie*, 8<sup>e</sup> série, 42, 28-35.
- **Vimeux F., R. Gallaire, S. Bony, G. Hoffmann, J. C. Chiang**, 2005 : What are the climate controls on isotopic composition ( $\delta D$ ) of precipitation in Zongo Valley (Bolivia) ? Implications for the Illimani ice core interpretation. *Earth Plan. Sci. Lett.*, 240, 205-220.