HAL
open science

Datation des carottes de glace Andine par analyse temps-fréquence

Michel Gay, Martine de Angelis, Jean-Louis Lacoume

To cite this version:

Michel Gay, Martine de Angelis, Jean-Louis Lacoume. Datation des carottes de glace Andine par analyse temps-fréquence. GRETSI 2011 - XXIIIème Colloque francophone de traitement du signal et des images, Sep 2011, Bordeaux, France. pp.163. hal-00646092

HAL Id: hal-00646092

https://hal.science/hal-00646092v1

Submitted on 29 Nov 2011

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.

Datation des carottes de glace Andine par analyse temps-fréquence.

Michel GAY[1], Martine DE ANGELIS[2], Jean-Louis LACOUME[1]

[1]GIPSA-Lab, DIS, CNRS UMR 5216
961 Rue de le Houille Blanche, Domaine Universitaire, BP 46, 38402 Saint Martin d'Hères, France

[2]LGGE, CNRS UMR 5183
4, rue Molière Domaine Universitaire, BP 46, 38402 Saint Martin d'Hères, France

michel.gay@gipsa-lab.grenoble-inp.fr, mdeangelis@lgge.obs.ujf-grenoble.fr
jean-louis.lacoume@gipsa-lab.grenoble-inp.fr

Résumé – Nous proposons une méthode de datation des carottes de glace basée sur l'hypothèse que les concentrations dans la carotte issues des chutes de neige présentent une périodicité annuelle. Par suite de la variation dans le temps de l'épaisseur des couches de neige, la périodicité annuelle de la concentration se traduit par une période variable en fonction de la profondeur. Nous montrons que la détermination de cette période par analyse temps-fréquence permet d'obtenir une datation de la carotte. Cette méthode est appliquée aux données de concentration extraites de la carotte de glace du site de l'Illimani (Andes).

Abstract – We propose a method of ice core dating based on the assumption that concentrations in the core present an annual periodicity. As a result of the variation in time of the annual snow layer thickness, the chemical concentration temporal periodicity results in a period depending on depth. We show that the determination of this period by time-frequency analysis provides a dating of the core. This method is applied to the ion concentration profiles determined along an Andean ice core (Illimani).

1 Introduction

La datation des carottes de glace qui consiste à établir une relation entre le temps et la profondeur de la glace est fondamentale pour l'interprétation des archives glaciaires. Les méthodes actuelles de datation combinent des approches diverses comme la stratigraphie visuelle, les variations saisonnières permettant d'identifier les couches de neige annuelles, la localisation de composés physico-chimiques spécifiques déjà identifiés et bien datés dans les archives sédimentaires ou dans les carottes de glace[**?**][**?**]. Nous proposons une nouvelle méthode de datation permettant de déterminer la fonction $t(p)$ reliant le temps et la profondeur. Cette approche est basée sur l'hypothèse que les concentrations dans la carotte de glace issues des chutes de neige présentent une périodicité due à la saisonnalité des évènements météorologiques. Par suite de la variation dans le temps de l'accumulation annuelle de la neige, de la densification et du mouvement de la glace, la périodicité temporelle de la concentration se traduit par une fréquence (période) variable en fonction de la profondeur. La mesure de cette fréquence permet de déterminer la relation entre le temps et la profondeur et donc d'obtenir la datation.

2 Relation entre la profondeur et le temps.

Soit $t(p)$ l'application bi-univoque reliant la date du dépot t à la profondeur p dans la carrotte. Cette fonction est développée au premier ordre au voisinage de la profondeur p, en supposant que pour de petites variations, les termes d'ordres supérieurs ne sont pas significatifs.

$$\frac{t(p+\Delta p)-t(p)}{\Delta p} = \frac{dt(p)}{dp} \tag{1}$$

L'épaisseur de la couche annuelle $a(p)$, variation de la profondeur au cours d'une période d'un an, est donnée par la relation [1] :

$$a(p) = \frac{dp}{dt} \tag{2}$$

Cette épaisseur, qui varie avec la profondeur, conserve la trace de la périodicité annuelle sous la forme d'une fréquence spatiale dépendant de la profondeur que nous appelons fréquence spatiale locale notée $f_s(p)$ et donnée par :

$$f_s(p) = \frac{1}{a(p)} = \frac{dt(p)}{dp} \tag{3}$$

La détermination de la fréquence spatiale locale est le point clé pour obtenir la relation entre le temps et la profondeur. Ayant déterminé $f_s(p)$, nous en déduisons $t(p)$ à partir de l'équation (3), qui conduit à :

$$t(p) = \int_0^p f_s(u)du \tag{4}$$

Dans cette présentation, nous avons déterminé la fréquence spatiale locale par analyse temps-fréquence et nous avons mis

1. $a(p)$ ne correspond pas seulement à l'accumulation nette annuelle mais comporte aussi les effets de la densification et de l'écoulement de la glace.

au point des procédures d'évaluation de la datation ainsi obtenue. La mise en compétition de la procédure que nous avons développée, avec les méthodes de poursuite en fréquence [**?**] dans le but de déterminer, pour ces données, la méthode optimale est une piste ouverte par ce travail.

3 Traitement des données

Nous illustrons le traitement proposé par la détermination de la fréquence spatiale locale $f_s(p)$, en utilisant le profil continu de concentration en nitrate en fonction de la profondeur ($c_{NO_3}(p)$) mesurée le long d'une carotte de glace prélevée dans la zone sommitale de l'Illimani. L'Illimani est un glacier de la Cordillère Royale en Bolivie situés principalement entre 4800 et 6000 m d'altitude. La campagne de forage a été réalisée en 1999 avec le support de l'IRD, du CNRS et du PSI (Paul Scherrer Institut, Suisse).

3.1 Pré-traitement des données

A partir des 1697 échantillons de $c_{NO_3}(p)$, nous construisons un signal de 2048 échantillons, interpolé par une "spline", centrée et dans lequel nous avons écrêté les pics (provenant d'évènements sporadiques violents). Le signal obtenu appelé "concentration normalisée" contient les informations provenant de la fréquence du signal d'origine et est notée $S_X(n)$, où X est la concentration et n est l'indice des 2048 échantillons. La figure 1 montre le signal prétraité $S_{NO_3}(n)$. La période d'échantillonnage en profondeur, après l'interpolation par des spline est P_s=3.73 $cm\ we$[2]. Cette période d'échantillonnage permet de représenter la concentration dans la bande de fréquence spatiale de 0 à la fréquence spatiale de Shannon, $f_{Shannon}$:

$$f_{Shannon} = \frac{1}{2P_s} = 13.40\, m\, we^{-1} \tag{5}$$

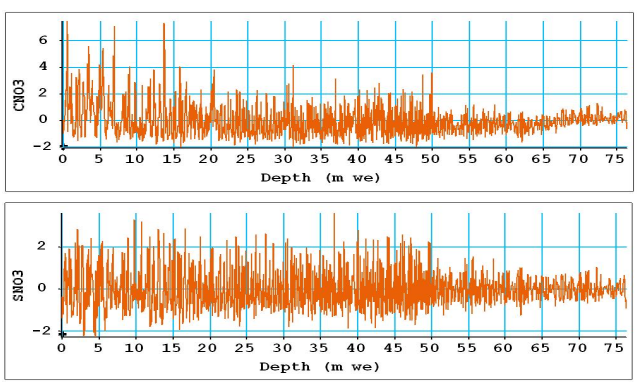

FIGURE 1 – Illimani : concentration initiale $C_{NO_3}(p)$ et concentration de nitrate normalisée $S_{NO_3}(n)$ en fonction de la profondeur.

2. Les centimétres $cm\ we$ ne représentent pas la profondeur réelle dans la carotte mais une profondeur équivalente ramenée en eau.

3.2 Représentation Temps Fréquence (RTF) [?]

Pour la représentation temps fréquence, nous utilisons le spectrogramme par transformée de Fourier à court terme donné par :

$$SPECT(t,f) = |\int_{-\infty}^{+\infty} x(\tau)h(\tau - t)e^{-2j\pi f\tau}d\tau|^2 \tag{6}$$

ou $h(t)$ est une fenêtre glissante pondérée (Hanning). Le signal étant discrétisé, cette formule peut se réécrire sous la forme :

$$SPECT_X(n,f) = |\sum_{l=0}^{N-1} S_X(l)h(l-n)e^{-2j\pi\frac{fl}{N}}|^2 \tag{7}$$

La figure 2 montre le spectrogramme de $S_{NO_3}(n)$ représentant l'énergie du signal en fonction de la profondeur et de la fréquence spatiale locale. On voit apparaitre une trace indiquant l'évolution de la fréquence spatiale locale avec la profondeur. L'augmentation de la fréquence avec la profondeur est cohérente avec les effets de la densification de la neige et de l'écoulement de la glace. Depuis la surface jusqu'à la profondeur 50 $m\ we$ la fréquence augmente allant de 1 $m\,we^{-1}$ jusqu'á 8 $m\,we^{-1}$. Au delà des 50 $m\ we$, la décroissance de la fréquence est due au repliement de spectre introduit par le découpage des carottes de glace.

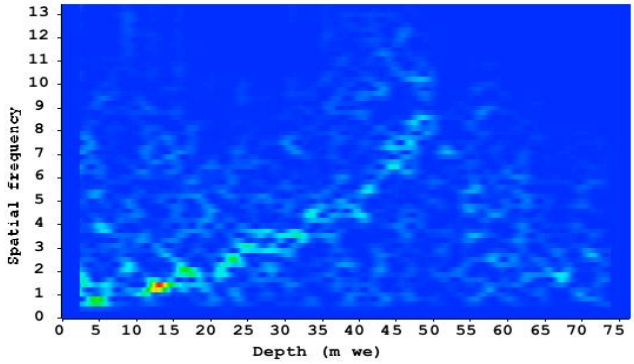

FIGURE 2 – Spectrogramme de $S_{NO_3}(n)$ ($m\ we^{-1}$) pondéré par une fenêtre de Hanning correspondant à 128 échantillons.

3.3 Détermination de la fréquence spatiale locale

La fréquence spatiale locale estimée $\widehat{f_s}(n)$ est obtenue en prenant les maximums d'énergie du spectrogramme profondeur-fréquence. L'estimée de $f_s(n)$ peut s'écrire :

$$\widehat{f_s}(n) = max_f(SPECT_X(n,f)) \tag{8}$$

ou $SPECT_X(n,f)$ est l'amplitude du spectrogramme.

La figure 3 montre l'estimée de $\widehat{f_s}(n)$ basée sur cette méthode utilisant le $SPECT_X(n,f)$ réalisée sur une fenêtre glissante

de 128 échantillons. Dans la figure 3, l'estimation de $\widehat{f}_s(n)$ obtenue pose deux problèmes, les discontinuités et le repliement. Les discontinuités ont été supprimées par un filtre d'ordre[**?**] de taille 33. Le repliement est corrigé en remplacant la partie descendante du spectre par sa symétrique par rapport à la fréquence maximum. Les résultats sont montrés sur la figure 4.

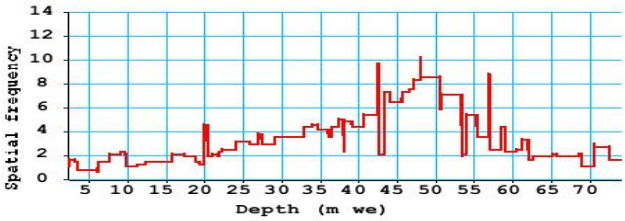

FIGURE 3 – Estimée de $\widehat{f}_s(n)$ correspondant au spectrogramme pondéré par une fenêtre glissante 128 échantilons.

FIGURE 4 – Estimation $\widehat{f}_s(n)$ à partir du spectrogramme réalisée sur une fenêtre glissante 128 échantillons aprè filtrage d'ordre et correction du repliement.

L'estimation de $\widehat{f}_s(n)$ donnée figure 4, nous permet d'obtenir la datation.

4 Datations correspondant aux différents profils de composés chimiques

Nous illustrons la méthode à partir de la datation issue des concentrations de NO_3. Nous comparons ensuite les datations issues des profils de concentrations de 8 composants indépendants.

4.1 Datation de la concentration de NO_3

En utilisant l'équation (4) et l'estimation des fréquences spatiales locales, nous obtenons l'estimée du temps en fonction de la profondeur par la relation :

$$\widehat{t}(p) = \int_0^p \widehat{f}_s(u)du \tag{9}$$

La datation déduite du profil de concentration de NO_3 est montrée sur la figure 5.

Sur la figure 5, nous avons porté le point représentatif de la position en profondeur et de la date de deux phénomnes remarquables, les éruptions des volcans, Mt Agung et Tambora.

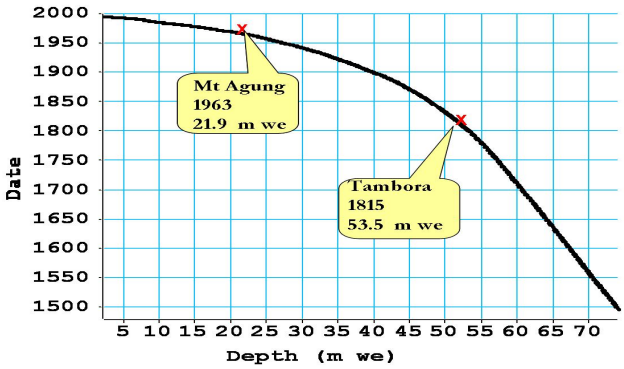

FIGURE 5 – Illimani NO_3 : datation estimée.

Le Mt Agung et le Tambora, volcans d'Indonésie, sont entrés en éruption respectivement le 18 février 1963 et le 10/11 avril 1815. Ces deux éruptions ont été localisées sur la carotte de glace à partir des profils de sulfate et d'acidité à 21.9 $m\ we$ pour le Mt Agung et à 53.5 $m\ we$ pour le Tambora. Nous constatons que nous avons un bon accord de ces références volcaniques avec la datation que nous avons obtenue.

Nous avons ensuite appliqué cette méthodologie aux 7 autres signaux de concentrations provenant de la carotte de glace d'Illimani.

4.2 Evaluation des performances

4.2.1 Comparaison des datations indépendantes des concentrations de NO_3, SO_4, N_a^+, C_a^+ O_x, $Format$, M_g, K

Les datations obtenues à partir des 8 signaux de concentrations de nitrate, sulfate, sodium, calcium oxalate, formate, magnesium et potassium (notés respectivement : NO_3, SO_4, N_a^+, C_a^+ O_x, $Format$, M_g, K) qui sont considérés comme provenant de 8 sources indépendantes [**?**] [**?**] sont cohérentes comme le montre la figure 6.

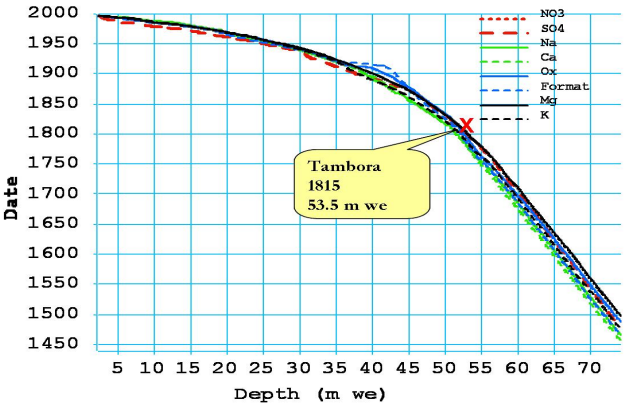

FIGURE 6 – Illimani : datation estimée à partir des profils de NO_3, SO_4, N_a^+, C_a^+, O_x, $Format$, M_g, K.

4.2.2 Estimation de la dispersion des datations

A partir des 8 datations $\widehat{t}_i(d)$, nous évaluons la moyenne empirique donnée par :

$$\widehat{t}_{moy}(d) = \frac{1}{8}\sum_{i=1}^{8}\widehat{t}_i(d) \tag{10}$$

Les fluctuations empiriques données par :

$$\Delta\widehat{t}_i(d) = \widehat{t}_i(d) - \widehat{t}_{moy}(d) \tag{11}$$

sont présentées figure 7.

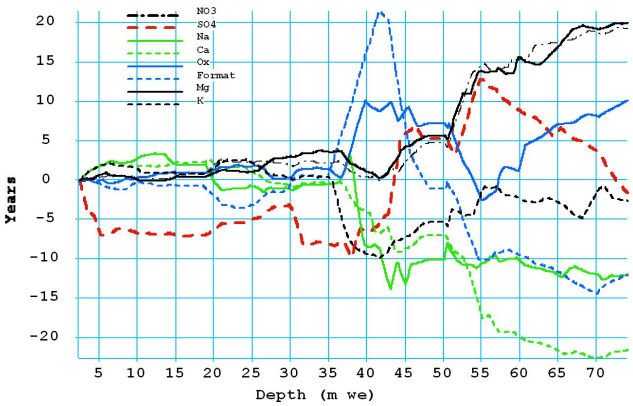

FIGURE 7 – Illimani : fluctuations empiriques des datations obtenues à partir des 8 composants.

La figure 8 présente la déviation standard calculée sur les 8 datations. Avant 35 $m\ we$ cette déviation est voisine de 2,5 années. Au dela de 50 $m\ we$, l'augmentation de la déviation standard est due au repliement. La variation anormale entre 35 et 50 $m\ we$ est imputable à une fluctuation importante et encore mal comprise du formate.

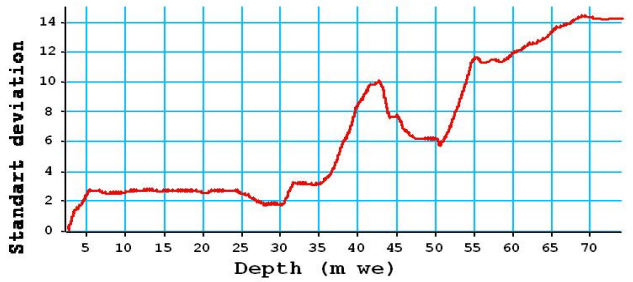

FIGURE 8 – Illimani : déviation standard empirique.

4.3 Comparaison avec une autre datation

Nous comparons figure 9 notre datation à une datation déduite de l'examen combiné de plusieurs proxies proposée pour les 35 premiers $m\ we$ par [**?**] et [**?**]. L'écart entre les deux datations est inférieur à deux ans (Figure 9, Deviation).

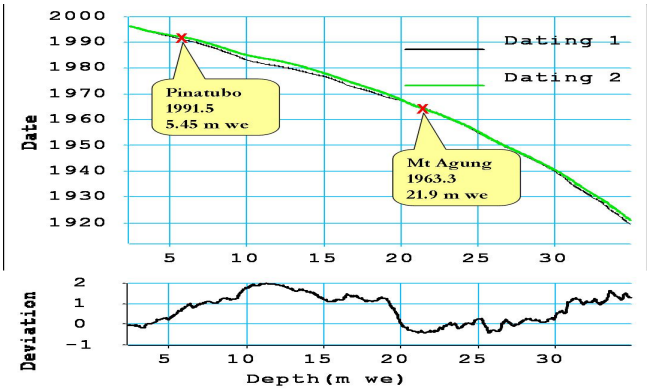

FIGURE 9 – Illimani : comparaison des deux datations.

5 Conclusion

Cette nouvelle méthode de datation des carottes de glace fondée sur la représentation temps-fréquence est automatique et uniquement basée sur les mesures de concentration contrairement aux méthodes qui nécessitent une analyse visuelle des signaux et un recalage par rapport à des évènements climatiques ou volcaniques connus. Nous avons validé ces traitements en montrant la cohérence des résultats obtenus sur les signaux issus de 8 profils différents de concentrations, leurs cohérences avec la datation d'évènements connus et leurs conformité avec une analyse classique des mêmes données sur les 35 premiers $m\ we$ (80 ans).

Références

[1] Kootsookos, Peter J. (1993-01-01) *A Review of the Frequency Estimation and Tracking Problems.* Report 2001, Systems Engineering Department, Australian National University,

[2] Traufetter, F., et al. *Spatio-temporal variability in volcanic sulphate deposition over the past 2 kyr in snow pits and firn cores from Amundsenisen, Dronning Maud Land, Antarctica.*, J. Glaciol., 50, 137-146, 2004.

[3] Narcisi B, Petit JR, Delmonte B, Basile-Doelsch I, Maggi V. *Characteristics and sources of tephra layers in the EPICA-Dome C ice record (East Antarctica) : implications for past atmospheric circulation and ice core stratigraphic correlations.*, Earth and Planetary Science Letters, 2005.

[4] P. Flandrin. *Temps fréquence,* , Hermés, Paris, 1993.

[5] J-P Coquerez et S. Philipp *Analyse d'images : filtrage et segmentation.*, Masson, 1995.

[6] M. de Angelis, J. Simes, H. Bonnaveira, J.D. Taupin and R.J. Delmas *Volcanic erupyions recorder in the Illimani ice core (Bolivia) : 1918-1998 and Tambora periods*Atmospheric Chemistry and Physics (2003), 3, 1-37.

[7] A.Correia, R. Freydier, R.J. Delmas, J.C. Simes, J.D. Taupin, B. Dupr and P. Artaxo *Trace elements I South America aerosol during 20th century inferred from a Nevado Illimani ice core, eastern Bolivian Andes (6350 m asl)*Atmospheric Chemistry and Physics (2003), 3, 1337-1352.