

ICECHRONO1 : UN MODÈLE PROBABILISTE POUR CALCULER UNE CHRONOLOGIE COMMUNE ET OPTIMALE POUR PLUSIEURS CAROTTES DE GLACE



Frédéric PARRENIN¹, Lucie BAZIN², Émilie CAPRON^{3, 4}, Amaëlle LANDAIS²,
Bénédicte LEMIEUX-DUDON^{5, 6} & Valérie MASSON-DELMOTTE²

RÉSUMÉ

Les forages polaires fournissent des archives exceptionnelles des conditions climatiques et environnementales passées. Produire une datation robuste des carottes de glace ainsi qu'une estimation de l'incertitude associée est essentiel pour interpréter les enregistrements climatiques et environnementaux qu'elles contiennent. Cependant, c'est une tâche complexe car elle implique d'utiliser différentes méthodes. Dans cet article, nous présentons IceChrono1, un modèle probabiliste qui combine différentes sources d'information chronologique pour produire une datation commune et optimale pour plusieurs carottes de glace, ainsi qu'une estimation de l'incertitude associée. IceChrono1 est basé sur l'inférence de trois quantités : le taux d'accumulation de neige en surface, la profondeur de piégeage de l'air et la fonction d'amincissement. IceChrono1 intègre de multiples informations chronologiques : un scénario modélisé du processus de sédimentation (accumulation de la neige, densification de la neige en glace et piégeage de l'air, écoulement de la glace), des horizons bien datés pour contraindre l'âge de la glace ou l'âge de l'air, des intervalles de profondeur définis sur la glace ou via des mesures sur l'air piégé dont la durée est connue, des observations du Δ profondeur (le décalage en profondeur entre des événements synchrones enregistrés dans la glace et dans l'air) et finalement des liens stratigraphiques reliant des marqueurs identifiés dans la glace, dans l'air piégé ou dans les deux à la fois entre les carottes de glace. L'inférence est formulée comme un problème d'optimisation aux moindres carrés, impliquant que toutes les densités de probabilités sont supposées gaussiennes. Elle est résolue numériquement en utilisant l'algorithme de Levenberg-Marquardt (supposant ainsi que le modèle est presque linéaire au voisinage de la solution) et une évaluation numérique du Jacobien du modèle. IceChrono1 est librement disponible sous la licence libre GPL v3 (General Public License v3).

Mots-clés : Glaciologie, carotte de glace, datation, modèle probabiliste

ABSTRACT

ICECHRONO1: A PROBABILISTIC MODEL TO COMPUTE A COMMON AND OPTIMIZED CHRONOLOGY FOR SEVERAL ICE CORES

Polar ice cores provide exceptional archives of past environmental conditions. The dating of ice cores and the estimation of the age-scale uncertainty are essential to interpret the climate and environmental records that they contain. It is, however, a complex problem which involves different methods. Here, we present IceChrono1, a new probabilistic model integrating various sources of chronological information to produce a common and optimized chronology for several ice cores, as well as its uncertainty. IceChrono1 is based on the inference of three quantities: the surface accumulation rate, the lock-in depth (LID) of air bubbles and the thinning function. The chronological information integrated into IceChrono1 are modeling scenarios of the sedimentation process (accumulation of snow, densification of snow into ice and air trapping, ice flow), ice- and air-dated horizons, ice and air depth intervals with known durations, Adepth observations (depth shift between synchronous events recorded in the ice and in the air) and finally ice, air or mix stratigraphic links in between ice cores. the inference problem is formulated as a least squares optimisation, implying that all densities of probabilities are assumed to be Gaussian. It is numerically solved using the Levenberg-Marquardt algorithm (thus assuming that the model is almost linear in the vicinity of the solution) and a numerical evaluation of the model's Jacobian. IceChrono1 is freely available under the General Public License v3 open source license.

Keywords: Glaciology, ice core, dating, probabilistic model

¹ Univ. Grenoble Alpes, CNRS, IRD, IGE, F-38000 GRENOBLE, France. *Courriel* : frederic.parrenin@univ-grenoble-alpes.fr

² Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement, GIF-SUR-YVETTE, France. *Courriel* : lucie.bazin@lsce.ipsl.fr, amaelle.landais@lsce.ipsl.fr

³ Centre for Ice and Climate, Niels Bohr Institute, Université de Copenhague, COPENHAGUE, Danemark. *Courriel* : Capron@nbi.ku.dk

⁴ British Antarctic Survey, CAMBRIDGE, Royaume-Uni.

⁵ Laboratoire Jean Kuntzmann, GRENOBLE, France. *Courriel* : lemieux.benedicte@gmail.com

⁶ Ocean Modeling and Data Assimilation Division, Centro Euro-Mediterraneo sui Cambiamenti Climatici, BOLOGNA, Italy

1 - INTRODUCTION

Les carottages polaires fournissent des enregistrements continus de paramètres informant sur l'évolution du climat et de l'environnement à l'échelle locale, régionale mais aussi globale (par exemple, EPICA community members, 2004 ; NorthGRIP project members, 2004 ; PAGES 2k Consortium, 2013 ; WAIS Divide Project Members, 2013). En particulier, il est possible de déterminer les séquences d'événements sur des échelles de temps allant de la saison aux cycles glaciaire-interglaciaire à partir de la mesure de variables qui permettent de retracer le climat polaire (par exemple, Jouzel *et al.*, 2007), la topographie de la calotte polaire (NEEM community Members, 2013), le cycle de l'eau (par exemple, Schoenemann *et al.*, 2014 ; Stenni *et al.*, 2010 ; Winkler *et al.*, 2012), la déposition d'aérosols (par exemple, Lambert *et al.*, 2012 ; Wolff *et al.*, 2006) ou encore la composition atmosphérique globale (par exemple, Ahn & Brook, 2014 ; Loulergue *et al.*, 2008 ; Marcott *et al.*, 2014).

Cependant, avant d'interpréter les enregistrements des carottes de glace, les scientifiques ont la tâche complexe d'établir deux échelles de temps robustes, une pour les traceurs mesurés dans la glace et une autre pour ceux mesurés dans la phase gaz. En effet, le névé, la couche superficielle de 50-120 m des calottes polaires où la neige est graduellement compactée en glace, est perméable et l'air est seulement piégé à sa base, à une profondeur appelée la *profondeur de piégeage* (en anglais Lock-In Depth, LID). Par conséquent, pour chaque niveau de profondeur au sein d'une carotte de glace, l'air piégé est toujours plus jeune que la glace qui l'entoure.

Une datation commune et optimale de plusieurs carottes de glace peut être construite au travers de la combinaison de plusieurs méthodes de datation dans le cadre d'une approche probabiliste. Dans cet article, nous présentons un nouveau modèle probabiliste de datation, IceChrono1, qui remplit cette fonction (Parrenin *et al.*, 2015). IceChrono1 est basé sur les mêmes principes que le modèle Datice (Lemieux-Dudon *et al.*, 2010b), qui a notamment été utilisé pour produire la chronologie AICC2012 (Bazin *et al.*, 2013 ; Veres *et al.*, 2013). AICC2012 est une chronologie pour 4 carottes d'Antarctique et une carotte du Groenland : EPICA Dome C (EDC), Vostok (VK), Talos Dome (TALDICE), EPICA Dronning Maud Land (EDML) et North-GRIP (NGRIP). Elle permet de présenter les enregistrements paléoclimatiques et paléoenvironnementaux de ces 5 carottes de glace sur une échelle d'âge cohérente allant jusqu'à 800 ka b1950 (kilo-ans avant 1950) pour la carotte EDC.

2 - LES DIFFÉRENTES INFORMATIONS CHRONOLOGIQUES

Plusieurs stratégies ont été développées au cours des dernières décennies pour construire des chronologies glace et air. Nous décrivons brièvement ces méthodes, leurs forces et inconvénients ci-dessous.

- Le comptage des couches annuelles (par exemple, Rasmussen *et al.*, 2006 ; WAIS Divide Project Members, 2013 ; Winstrup *et al.*, 2012). Seulement applicable lorsque le taux d'accumulation est suffisamment élevé pour que l'identification des couches annuelles soit possible, cette méthode fournit une estimation précise de la durée des événements et des âges absolus bien contraints dans les sections peu profondes. Cependant, la nature cumulative des erreurs mène à une décroissance de la précision des âges absolus avec la profondeur dans le forage.

- L'utilisation d'horizons datés. Par exemple, des couches de cendre, aussi appelées téphras, bien datées ou des pics de béryllium-10 associés à des événements géomagnétiques datés fournissent des horizons dont l'âge est connu. Cette méthode repose sur l'identification de ces événements avec leurs homologues datés précisément au sein d'autres archives climatiques.

- Les datations orbitales. Comme il y a peu de contraintes sur l'âge absolu des carottes de glace au-delà de 60 ka b1950, le calage orbital est la méthode la plus efficace pour fournir des contraintes chronologiques sur les sections les plus profondes des carottes de glace. Trois traceurs complémentaires sont actuellement utilisés : l'oxygène-18 du O₂ atmosphérique ($\delta^{18}\text{O}_{\text{atm}}$) (par exemple, Bender *et al.*, 1994 ; Dreyfus *et al.*, 2007), le $\delta(\text{O}_2/\text{N}_2)$ (par exemple, Bender, 2002 ; Kawamura *et al.*, 2007 ; Suwa & Bender, 2008) et le contenu total en air (par exemple, Raynaud *et al.*, 2007). Sans compréhension précise des mécanismes reliant ces traceurs à leurs cibles orbitales respectives, les incertitudes associées restent grandes : 6 ka pour $\delta^{18}\text{O}_{\text{atm}}$ (Dreyfus *et al.*, 2007) et 3-4 ka pour $\delta(\text{O}_2/\text{N}_2)$ et la teneur en air (Landais *et al.*, 2012 ; Lipenkov *et al.*, 2011).

- La synchronisation des carottes de glace. Des calages inter-carottes, c'est-à-dire des relations entre les profondeurs de deux carottes différentes, sont déterminés pour pouvoir transférer des informations absolues d'une carotte à l'autre. Ils sont généralement basés sur la ressemblance des enregistrements de la composition atmosphérique globale par les différentes carottes (concentration en CO₂, CH₄ et $\delta^{18}\text{O}_{\text{atm}}$) (Bender *et al.*, 1994 ; Blunier & Brook, 2001 ; Capron *et al.*, 2010 ; Monnin *et al.*, 2004), sur l'identification de pics volcaniques communs (Parrenin *et al.*, 2012 ; Severi *et al.*, 2007) ou encore sur l'hypothèse de déposition synchrone d'aérosols (Seierstad *et al.*, 2014). Dans le premier cas, les limitations sont dues à la reconstruction imprécise et lissée du signal atmosphérique (en effet, le processus de piégeage de l'air lisse les variations atmosphériques les plus brutales, et ce lissage s'ajoute aux erreurs d'analyse de l'air piégé dans la glace). Dans le second cas, des mauvais calages peuvent être liés à une mauvaise identification d'événements volcaniques communs dans différentes carottes de glace. Enfin le troisième cas repose sur l'hypothèse de variations synchrones des dépôts d'aérosols à différents sites.

- La corrélation avec d'autres événements climatiques bien datés. Dans certain cas, des enregistrements haute-résolution de la composition isotopique de la calcite

($\delta^{18}\text{O}$) et des datations U/Th précises sur les spéléothèmes ont été utilisés pour ajuster la chronologie des carottes de glace (Barker *et al.*, 2011 ; Buizert *et al.*, 2015 ; Parrenin *et al.*, 2007b). Cependant, ces exercices reposent sur l'hypothèse que les changements abrupts enregistrés dans les carottes de glace et les spéléothèmes sont simultanés. De plus, ces contraintes sur l'âge absolu sont ponctuelles et leur précision décroît lorsque l'âge augmente.

- La modélisation du processus de sédimentation : accumulation de neige en surface, densification de la neige en glace, piégeage de l'air et écoulement de la glace (Goujon *et al.*, 2003 ; Huybrechts *et al.*, 2007 ; Johnsen *et al.*, 2001 ; Parrenin *et al.*, 2007a). Les modèles de sédimentation fournissent une chronologie dérivée de l'épaisseur des couches annuelles et, par conséquent, mènent à des durées d'événements réalistes lorsque la fonction d'amincissement est bien contrainte, comme dans le haut des forages. Des produits dérivés des modèles de sédimentation sont le taux d'accumulation initial et l'origine spatiale de la glace/neige, qui sont tous deux utiles à l'interprétation des enregistrements. Les faiblesses de cette méthode tiennent aux paramètres mal connus (par exemple, l'amplitude des changements du taux d'accumulation entre période glaciaire et interglaciaire ou encore le taux de fusion à la base de la calotte) et aux hypothèses simplificatrices des modèles de sédimentation.

3 - RÉSUMÉ DE LA MÉTHODE

La chronologie vraie d'une carotte, c'est-à-dire les âges glace et air à toute profondeur, est une fonction de trois variables (qui sont aussi fonctions de la profondeur) : le taux d'accumulation initiale (le taux d'accumulation

lorsque la particule de neige/glace était en surface), la profondeur de piégeage initiale et la fonction d'amincissement dans le forage (le rapport entre l'épaisseur d'une couche et son épaisseur initiale lorsqu'elle était en surface). C'est ce que nous appelons le *modèle direct*. Ces variables ne sont pas connues et pour déterminer notre chronologie optimale, nous les estimons en nous basant sur :

- des informations *a priori* sur leurs valeurs pour chaque carotte de glace à partir d'un modèle de sédimentation ;
- des observations chronologiques, comme (voir Figure 1)
 - l'âge de la glace ou de l'air à certaines profondeurs ;
 - la durée temporelle d'un intervalle séparant deux profondeurs ;
 - des liens stratigraphiques entre deux profondeurs glace ou air de deux carottes différentes ;
 - le décalage en profondeur entre deux profondeurs glace et air synchrones dans la même carotte.

Ces différents types d'information, décrits mathématiquement par des densités de probabilité, sont supposés indépendants et sont combinés en utilisant un cadre de travail bayésien pour obtenir des estimations *a posteriori* des trois variables d'entrée (accumulation, profondeur de piégeage et amincissement) et de la chronologie résultante. Les incertitudes sur les valeurs *a priori* et sur les observations sont supposées gaussiennes et le modèle direct est linéarisé, ce qui permet d'utiliser l'algorithme de Levenberg-Marquardt (Levenberg, 1944 ; Marquardt, 1963) pour résoudre ce problème d'optimisation de moindres carrés.

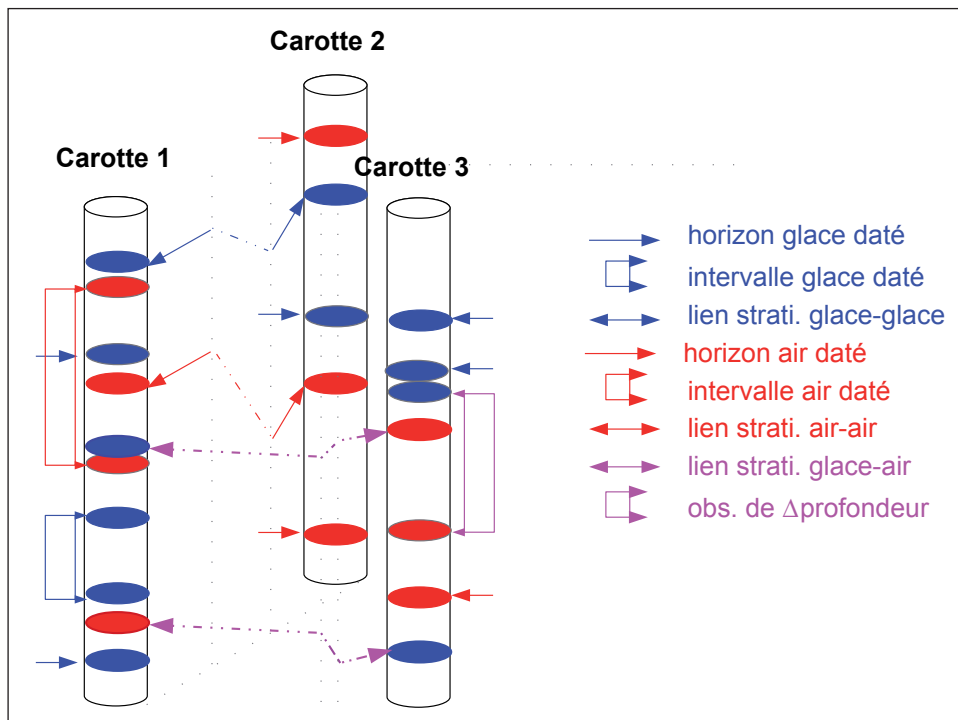


Fig. 1 : Schéma illustrant les différents types d'informations chronologiques utilisés pour contraindre la chronologie des carottes de glace dans le modèle probabiliste IceChrono1.

Fig. 1: Scheme illustrating the various types of chronological information used to constrain the chronology in the IceChrono1 probabilistic model.

4 - EXEMPLE D'APPLICATION

IceChrono1 est similaire dans les principes au modèle de datation Datice (Lemieux-Dudon *et al.*, 2010a, 2010b), qui a été utilisé pour produire la datation AICC2012 (Bazin *et al.*, 2013 ; Veres *et al.*, 2013). Nous avons donc appliqué IceChrono1 sur une expérience type AICC2012, c'est-à-dire en utilisant (1) les mêmes scénarios *a priori* (taux d'accumulation, fonction d'amincissement, profondeur de piégeage initiale) conduisant à une datation *a priori* et (2) les mêmes observations pour contraindre la datation finale (marqueurs d'âge absolu et orbital, liens stratigraphiques). Nous ne les détaillerons pas ici, ils sont

disponibles dans les suppléments des articles AICC2012 (Bazin *et al.*, 2013 ; Veres *et al.*, 2013).

La Figure 2 illustre la datation glace obtenue par IceChrono1 en fonction de la profondeur sur la carotte EDC. On peut y voir les horizons datés le long du forage et comment la datation *a priori* n'est pas tout à fait en accord avec ceux-ci. La datation *a posteriori*, par contre, passe par les horizons datés. L'erreur sur la chronologie résultante, quant à elle, augmente lorsque l'on s'éloigne des observations d'âge.

La Figure 3 compare, sur la carotte EDC, la chronologie glace obtenue par IceChrono1 avec AICC2012, obtenue par le modèle Datice. On peut voir que les

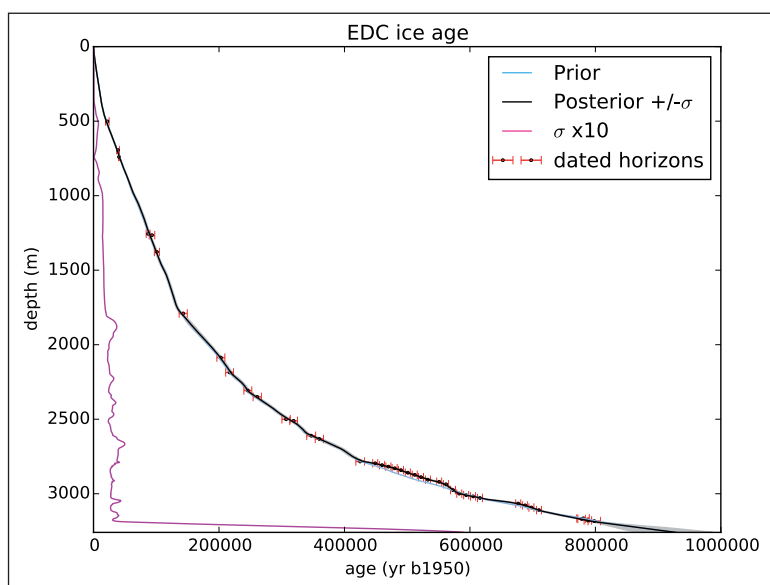


Fig. 2 : Âge de la glace en fonction de la profondeur dans le forage EDC calculé par le modèle de datation IceChrono1 selon une expérience type AICC2012.

(Bleu) Datation *a priori*. (Rouge) horizons datés le long du forage. (Noir) datation *a posteriori*. (Rose) Incertitude 1σ de la datation *a posteriori*. Cette figure a été produite automatiquement par le modèle IceChrono1.

Fig. 2: Ice age as a function of depth in the EDC ice core, as calculated by the probabilistic model IceChrono1 in a AICC2012-like experiment. (Blue) Prior chronology. (Red) Dated horizons along the ice core. (Black) Posterior chronology. (Pink) 1σ uncertainty of the posterior chronology. This figure was automatically produced by the IceChrono1 model.

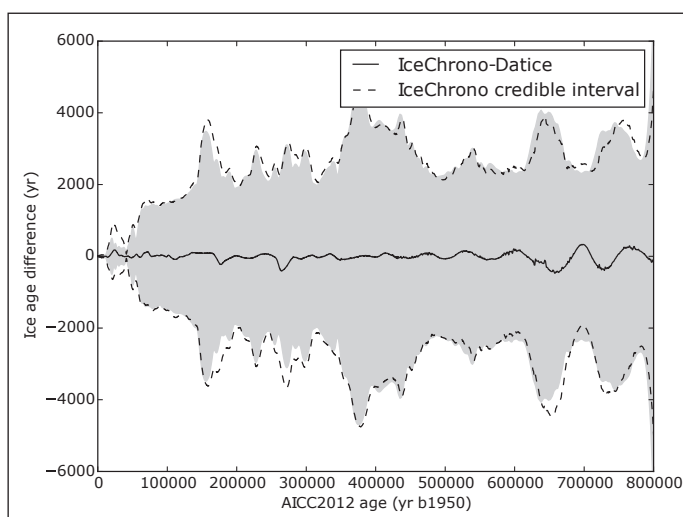


Fig. 3 : Comparaison des chronologies obtenues par le modèle Datice (utilisé comme référence ici) et par le modèle IceChrono1 sur une expérience type AICC2012.

La zone grisée représente l'intervalle de crédibilité obtenu par Datice. Le trait plein et les traits en pointillés représentent respectivement la datation obtenue par IceChrono1 et son intervalle de crédibilité.

Fig. 3: Comparison of chronologies obtained by the DATICE model (used as a reference here) and by the IceChrono1 model on a AICC2012 experiment. The grey area represents the credible interval obtained by DATICE. The plain line and the dashed lines show respectively the chronology obtained by IceChrono1 and its credible interval.

deux chronologies sont en bon accord, avec des différences n'excédant pas 200 ans sur les 800 000 années du forage EDC. Les erreurs sur ces datations sont également comparables. Les différences mineures qui subsistent sont liées à différentes approches numériques choisies dans IceChrono1 et Daticice.

5 - CONCLUSION

Nous avons développé et rendu librement accessible un nouveau modèle probabiliste pour produire une chronologie commune et optimale pour plusieurs carottes de glace, prenant en compte des informations issues de la modélisation du processus de sédimentation ou d'observations. Bien qu'initialement construit pour les carottes de glace, IceChrono1 peut aussi être utilisé pour d'autres archives paléoclimatiques, comme les carottes sédimentaires marines et lacustres, les spéléothèmes, etc.

La flexibilité du code d'IceChrono1 ouvre de nombreuses perspectives d'amélioration : la prise en compte de corrélations croisées inter-carottes et inter-couples de carottes, le couplage avec des modèles de sédimentation, le couplage avec des méthodes de synchronisation automatique des enregistrements et le couplage avec des méthodes de comptage automatiques des couches annuelles. Ces développements seront rendus disponibles dans de futures versions d'IceChrono.

Le code est disponible à l'adresse suivante : <https://github.com/parrenin/IceChrono>.

REMERCIEMENTS

Ce travail a été financé grâce aux projets INSU/LEFE « IceChrono » et « CO2Role ».

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- AHN J. & BROOK E. J., 2014 - Siple Dome ice reveals two modes of millennial CO₂ change during the last ice age. *Nature Communications*, 5 (3723), doi:10.1038/ncomms4723.
- BARKER S., KNORR G., EDWARDS R. L., PARRENIN F., PUTNAM A. E., SKINNER L. C., WOLFF E. & ZIEGLER M., 2011 - 800,000 Years of Abrupt Climate Variability. *Science*, 334 (6054), 347-351, doi:10.1126/science.1203580.
- BAZIN L., LANDAIS A., LEMIEUX-DUDON B., TOYÉ MAHAMADOU KELE H., VERES D., PARRENIN F., MARTINERIE P., RITZ C., CAPRON E., LIPENKOV V., LOUTRE M.-F., RAYNAUD D., VINHTER B., SVENSSON A., RASMUSSEN S. O., SEVERI M., BLUNIER T., LEUENBERGER M., FISCHER H., MASSON-DELMOTTE V., CHAPPELLAZ J. & WOLFF E., 2013 - An optimized multi-proxy, multi-site Antarctic ice and gas orbital chronology (AICC2012): 120-800 ka. *Climate of the Past*, 9 (4), 1715-1731, doi:10.5194/cp-9-1715-2013.
- BENDER M., SOWERS T., DICKSON M. L., ORCHADO J., GROOTES P., MAYEWSKI P. A. & MEESE D. A., 1994 - Climate connection between Greenland and Antarctica during the last 100,000 years. *Nature*, 372, 663-666.
- BENDER M. L., 2002 - Orbital tuning chronology for the Vostok climate record supported by trapped gas composition. *Earth and Planetary Science Letters*, 204, 275-289, 2002.
- BLUNIER T. & BROOK E. J., 2001 - Timing of millennial-scale climate change in Antarctica and Greenland during the last glacial period. *Science*, 291 (5501), 109-112.
- BUIZERT C., CUFFEY K. M., SEVERINGHAUS J. P., BAGGENSTOS D., FUDGE T. J., STEIG E. J., MARKLE B. R., WINSTRUP M., RHODES R. H., BROOK E. J., SOWERS T. A., CLOW G. D., CHENG H., EDWARDS R. L., SIGL M., MCCONNELL J. R., & TAYLOR K. C., 2015 - The WAIS Divide deep ice core WD2014 chronology - Part 1: Methane synchronization (68-31 ka BP) and the gas age-ice age difference. *Climate of the Past*, 11 (2), 153-173.
- CAPRON E., LANDAIS A., LEMIEUX-DUDON B., SCHILT A., MASSON-DELMOTTE V., BUIRON D., CHAPPELLAZ J., DAHL-JENSEN D., JOHNSEN S., LEUENBERGER M., LOULERGUE L. & OERTER H., 2010 - Synchronising EDML and NorthGRIP ice cores using $\delta^{18}\text{O}$ of atmospheric oxygen ($\delta^{18}\text{O}_{\text{atm}}$) and CH₄ measurements over MIS5 (80-123 kyr). *Quaternary Science Reviews*, 29 (1-2), 222-234.
- DREYFUS G. B., PARRENIN F., LEMIEUX-DUDON B., DURAND G., MASSON-DELMOTTE V., JOUZEL J., BARNOLA J.-M., PANNO L., SPAHNI R., TISSERAND A., SIEGENTHALER U. & LEUENBERGER M., 2007 - Anomalous flow below 2700 m in the EPICA Dome C ice core detected using ^{18}O of atmospheric oxygen measurements. *Climate of the Past*, 3 (2), 341-353.
- EPICA COMMUNITY MEMBERS, 2004 - Eight glacial cycles from an Antarctic ice core. *Nature*, 429, 623-628.
- GOUJON C., BARNOLA J.-M. & RITZ C., 2003 - Modeling the densification of polar firn including heat diffusion: application to close-off characteristics and gas isotopic fractionation for Antarctica and Greenland sites. *Journal of Geophysical Research*, 108 (D24), ACL10/1-10, doi:10.1029/2002JD003319.
- HUYBRECHTS P., RYBAK O., PATTYN F., RUTH U. & STEINHAGE D., 2007: Ice thinning, upstream advection, and non-climatic biases for the upper 89% of the EDML ice core from a nested model of the Antarctic ice sheet. *Climate of the Past*, 3 (4), 577-589.
- JOHNSEN S. J., DAHL-JENSEN D., GUNDESTRUP N., STEFFENSEN J. P., CLAUSEN H. B., MILLER H., MASSON-DELMOTTE V., SVEINBJORNSDOTTIR A. E. & WHITE J., 2001 - Oxygen isotope and palaeotemperature records from six Greenland ice-core stations: Camp Century, Dye-3, GRIP, GISP2, Renland and NorthGRIP. *Journal of Quaternary Science*, 16, 299-307.
- JOUZEL J., MASSON-DELMOTTE V., CATTANI O., DREYFUS G., FALOURD S., HOFFMANN G., MINSTER B., NOUET J., BARNOLA J. M., CHAPPELLAZ J., FISCHER H., GALLET J. C., JOHNSEN S., LEUENBERGER M., LOULERGUE L., LUETHI D., OERTER H., PARRENIN F., RAISBECK G., RAYNAUD D., SCHILT A., SCHWANDER J., SELMO E., SOUCHEZ R., SPAHNI R., STAUFFER B., STEFFENSEN J. P., STENNI B., STOCKER T. F., TISON J. L., WERNER M. & WOLFF E. W., 2007 - Orbital and Millennial Antarctic Climate Variability over the Past 800,000 Years. *Science*, 317 (5839), 793-796.
- KAWAMURA K., PARRENIN F., UEMURA R., VIMEUX F., SEVERINGHAUS J. P., MATSUMOTO K., NAKATA H., NAKAZAWA T., AOKI S., JOUZEL J., FUJII Y. & WATANABE O., 2007 - Northern Hemisphere forcing of climatic cycles over the past 360,000 years implied by absolute dating of Antarctic ice cores. *Nature*, 448, 912-917.
- LAMBERT F., BIGLER M., STEFFENSEN J. P., HUTTERLI M. & FISCHER H., 2012 - Centennial mineral dust variability in high-resolution ice core data from Dome C, Antarctica. *Climate of the Past*, 8 (2), 609-623.
- LANDAIS A., DREYFUS G., CAPRON E., POL K., LOUTRE M. F., RAYNAUD D., LIPENKOV V. Y., ARNAUD L., MASSON-DELMOTTE V., PAILLARD D., JOUZEL J. & LEUENBERGER M., 2012 - Towards orbital dating of the EPICA Dome C ice core using O₂/N₂. *Climate of the Past*, 8 (1), 191-203.
- LEMIEUX-DUDON B., PARRENIN F. & BLAYO E., 2010a - A Probabilistic Method to Construct an Optimal Ice Chronology for Ice Cores. In T. Hondoh (ed.) *Physics of Ice Core Records 2*, 68, 233-245.
- LEMIEUX-DUDON B., BLAYO E., PETIT J. R. E., WAELBROECK C., SVENSSON A., RITZ C., BARNOLA J.-M., NARCISI B. M. & PARRENIN F., 2010b - Consistent dating for Antarctica and Greenland ice cores. *Quaternary Science Reviews*, 29 (1-2), 8-20.
- LEVENBERG K., 1944 - A method for the solution of certain problems in least squares. *Quarterly of applied mathematics*, 2, 164-168.
- LIPENKOV V. Y., RAYNAUD D., LOUTRE M. F. & DUVAL P., 2011: On the potential of coupling air content and O₂/N₂ from trapped air for establishing an ice core chronology tuned on local insolation. *Quaternary Science Reviews*, 30 (23), 3280-3289.
- LOULERGUE L., SCHILT A., SPAHNI R., MASSON-DELMOTTE V., BLUNIER T., LEMIEUX B., BARNOLA J. M., RAYNAUD D., STOCKER T. F. & CHAPPELLAZ J., 2008

- Orbital and millennial-scale features of atmospheric CH₄ over the past 800,000 years. *Nature*, **453** (7193), 383-386.
- MARCOTT S. A., BAUSKA T. K., BUIZERT C., STEIG E. J., ROSEN J. L., CUFFEY K. M., FUDGE T. J., SEVERINGHAUS J. P., AHN J., KALK M. L., MCCONNELL J. R., SOWERS T., TAYLOR K. C., WHITE J. W. C. & BROOK E. J., 2014 - Centennial-scale changes in the global carbon cycle during the last deglaciation. *Nature*, **514** (7524), 616-619.
- MARQUARDT D. W., 1963 - An algorithm for least-squares estimation of nonlinear parameters. *Journal of the Society for Industrial and Applied Mathematics*, **11** (2), 431-441.
- MONNIN E., STEIG E. J., SIEGENTHALER U., KAWAMURA K., SCHWANDER J., STAUFFER B., STOCKER T. F., MORSE D. L., BARNOLA J.-M., BELLIER B., RAYNAUD D. & FISCHER H., 2004 - Evidence for substantial accumulation rate variability in Antarctica during the Holocene, through synchronization of CO₂ in the Taylor Dome, Dome C and DML ice cores. *Earth and Planetary Science Letters*, **224** (1-2), 45-54.
- NEEM COMMUNITY MEMBERS, 2013 - Eemian interglacial reconstructed from a Greenland folded ice core. *Nature*, **493** (7433), 489-494.
- NORTHGRIP PROJECT MEMBERS, 2004 - High-resolution record of Northern Hemisphere climate extending into the last interglacial period. *Nature*, **431**, 147-151.
- PAGES 2K CONSORTIUM, 2013 - Continental-scale temperature variability during the past two millennia. *Nature Geoscience*, **6** (5), 339-346.
- PARRENIN F., DREYFUS G., DURAND G., FUJITA S., GAGLIARDINI O., GILLET F., JOUZEL J., KAWAMURA K., LHOMME N., MASSON-DELMOTTE V., RITZ C., SCHWANDER J., SHOJI H., UEMURA R., WATANABE O. & YOSHIDA N., 2007a - 1D ice flow modelling at EPICA Dome C and Dome Fuji, East Antarctica. *Climate of the Past*, **3**, 243-259.
- PARRENIN F., BARNOLA J.-M., BEER J., BLUNIER T., CASTELLANO E., CHAPPELLAZ J., DREYFUS G., FISCHER H., FUJITA S. & JOUZEL J., 2007b - The EDC3 chronology for the EPICA Dome C ice core. *Climate of the Past*, **3**, 485-497.
- PARRENIN F., PETIT J.-R., MASSON-DELMOTTE V., WOLFF E., BASILE-DOELSCH I., JOUZEL J., LIPENKOV V., RASMUSSEN S. O., SCHWANDER J., SEVERI M., UDISTI R., VERES D. & VINTHER B. M., 2012 - Volcanic synchronisation between the EPICA Dome C and Vostok ice cores (Antarctica) 0-145 kyr BP. *Climate of the Past*, **8** (3).
- PARRENIN F., BAZIN L., CAPRON E., LANDAIS A., LEMIEUX-DUDON B. & MASSON-DELMOTTE V., 2015 - IceChronol: a probabilistic model to compute a common and optimal chronology for several ice cores. *Geoscience Model Development*, **8** (5), 1473-1492.
- RASMUSSEN S. O., ANDERSEN K. K., SVENSSON A. M., STEFFENSEN J. P., VINTHER B. M., CLAUSEN H. B., SIGGAARD-ANDERSEN M.-L., JOHNSEN S. J., LARSEN L. B., DAHL-JENSEN D., BIGLER M., RÖTHLISBERGER R., FISCHER H., GOTO-AZUMA K., HANSSON M. E. & RUTH U., 2006 - A new Greenland ice core chronology for the last glacial termination. *Journal of Geophysical Research*, **111**, D06102.
- RAYNAUD D., LIPENKOV V., LEMIEUX-DUDON B., DUVAL P., LOUTRE M.-F. & LHOMME N., 2007 - The local insolation signature of air content in Antarctic ice. A new step toward an absolute dating of ice records. *Earth and Planetary Science Letters*, **261** (3-4), 337-349.
- SCHOENEMANN S. W., STEIG E. J., DING Q., MARKLE B. R. & SCHAUER A. J., 2014 - Triple water-isotopologue record from WAIS Divide, Antarctica: Controls on glacial-interglacial changes in ¹⁷O_{excess} of precipitation. *Journal of Geophysical Research Atmosphere*, **119** (14), 8741-8763.
- SEIERSTAD I. K., ABBOTT P. M., BIGLER M., BLUNIER T., BOURNE A. J., BROOK E., BUCHARDT S. L., BUIZERT C., CLAUSEN H. B., COOK E., DAHL-JENSEN D., DAVIES S. M., GUILLEVIC M., JOHNSEN S. J., PEDERSEN D. S., POPP T. J., RASMUSSEN S. O., SEVERINGHAUS J. P., SVENSSON A. & VINTHER B. M., 2014 - Consistently dated records from the Greenland GRIP, GISP2 and NGRIP ice cores for the past 104 ka reveal regional millennial-scale δ¹⁸O gradients with possible Heinrich event imprint. *Quaternary Science Reviews*, **106**, 29-46.
- SEVERI M., CASTELLANO E., MORGANTI A., UDISTI R., RUTH U., FISCHER H., HUYBRECHTS P., WOLFF E., PARRENIN F., KAUFMANN P., LAMBERT F. & STEFFENSEN J. P., 2007 - Synchronisation of the EDML1 and EDC3 timescales for the last 52 kyr by volcanic signature matching. *Climate of the Past*, **3**, 367-374.
- STENNI B., MASSON-DELMOTTE V., SELMO E., OERTER H., MEYER H., RÖTHLISBERGER R., JOUZEL J., CATTANI O., FALOURD S., FISCHER H., HOFFMANN G., IACUMIN P., JOHNSEN S. J., MINSTER B. & UDISTI R., 2010 - The deuterium excess records of EPICA Dome C and Dronning Maud Land ice cores (East Antarctica). *Quaternary Science Reviews*, **29** (1-2), 146-159.
- SUWA M. & BENDER M. L., 2008 - O₂/N₂ ratios of occluded air in the GISP2 ice core. *Journal of Geophysical Research*, **113** (D11), D11119.
- VERES D., BAZIN L., LANDAIS A., TOYÉ MAHAMADOU KELE H., LEMIEUX-DUDON B., PARRENIN F., MARTINERIE P., BLAYO E., BLUNIER T., CAPRON E., CHAPPELLAZ J., RASMUSSEN S. O., SEVERI M., SVENSSON A., VINTHER B. & WOLFF E. W., 2013 - The Antarctic ice core chronology (AICC2012): an optimized multi-parameter and multi-site dating approach for the last 120 thousand years. *Climate of the Past*, **9** (4), 1733-1748.
- WAIS DIVIDE PROJECT MEMBERS, 2013 - Onset of deglacial warming in West Antarctica driven by local orbital forcing. *Nature*, **500** (7463), 440-444.
- WINKLER R., LANDAIS A., SODEMANN H., DÜMBGEN L., PRIÉ F., MASSON-DELMOTTE V., STENNI B. & JOUZEL J., 2012 - Deglaciation records of ¹⁷O-excess in East Antarctica: reliable reconstruction of oceanic normalized relative humidity from coastal sites. *Climate of the Past*, **8** (1), 1-16.
- WINSTRUP M., SVENSSON A. M., RASMUSSEN S. O., VINTHER O., STEIG E. J. & AXELROD A. E., 2012 - An automated approach for annual layer counting in ice cores. *Climate of the Past*, **8** (6), 1881-1895.
- WOLFF E. W., FISCHER H., FUNDEL F., RUTH U., TWARLOH B., LITTOT G. C., MULVANEY R., RÖTHLISBERGER R., DE ANGELIS M., BOUTRON C. F., HANSSON M., JONSELL U., HUTTERLI M. A., LAMBERT F., KAUFMANN P., STAUFFER B., STOCKER T. F., STEFFENSEN J. P., BIGLER M., SIGGAARD-ANDERSEN M. L., UDISTI, R., BECAGLI S., CASTELLANO E., SEVERI M., WAGENBACH D., BARBANTE C., GABRIELLI P. & GASPARI V., 2006 - Southern Ocean sea-ice extent, productivity and iron flux over the past eight glacial cycles. *Nature*, **440**, 491-496.