

cation des mesures de Be un proxy de l'activité solaire et de l'intensité du champ magnétique terrestre

Nous avons décrit dans le chapitre 1 la manière dont les boucliers héliomagnétiques et géomagnétiques influencent l'intensité et le spectre des radiations cosmiques entrant dans l'atmosphère terrestre, et donc comment ils contrôlent le taux de production des nucléides cosmogéniques. En conséquence, les données de ^{10}Be permettent d'analyser l'activité solaire et l'intensité du champ magnétique terrestre au cours du temps. Ces études sont synthétisées dans ce chapitre.

2.1 Quelles archives et pourquoi ?

Le ^{10}Be est étudié dans des archives naturelles depuis plusieurs dizaines d'années, que ce soit dans les carottes de glace d'Antarctique [Yiou et al., 1985; Raisbeck et al., 1978, 1981b, 1987, 1990, 1992, 2006; Horiuchi et al., 2008; Baroni et al., 2011] et du Groenland [Beer et al., 1990; Finkel and Nishiizumi, 1997; Yiou et al., 1997; Wagner et al., 2001; Muscheler et al., 2004, 2005], ou dans les sédiments [Raisbeck et al., 1985; Robinson et al., 1995; Frank et al., 1997; Ménabréaz et al., 2011, 2012; Ménabréaz, 2012]. Les carottes de glace ont l'avantage d'offrir une manière relativement simple de calculer le flux de ^{10}Be à partir des concentrations mesurées et du taux d'accumulation de neige du site (e.g. équation 1.10 de la section 1.3), mieux contrainte que pour les sédiments marins. Ce calcul est nécessaire lorsque le ^{10}Be tombe principalement par dépôt sec, comme sur le site EDC, afin d'obtenir le signal

de production (voir section 1.3). De plus, la meilleure résolution des carottes de glace est utile pour l'étude d'événements courts (quelques dizaines ou centaines d'années) liés à l'activité solaire par exemple.

Les mesures de ^{10}Be dans les carottes de glace ont débuté dans les années 1980 pour plusieurs applications [Raisbeck and Yiou, 1985] :

- La datation des carottes de glace à l'aide notamment du rapport $^{36}\text{Cl}/^{10}\text{Be}$ pour la glace âgée de plus de 50 000 ans. Cependant, il apparaît qu'une partie du ^{36}Cl déposé dans la glace s'échappe dans l'atmosphère, causant des problèmes de datation. Il est possible que le H^{36}Cl soit relâché dans l'atmosphère durant les processus de recristallisation dans la neige [Beer et al., 2012].
- L'augmentation de la concentration en ^{10}Be dans la glace corrélée avec une diminution des précipitations durant la dernière période glaciaire [Raisbeck et al., 1981b; Yiou et al., 1985] a conduit à la conclusion que le ^{10}Be pourrait être utilisé pour déduire des taux d'accumulation passés. Il est nécessaire de prendre en compte les changements liés à la production ou à la circulation atmosphérique.
- Des informations sur l'afflux d'aérosols stratosphériques dans les régions polaires, en utilisant notamment le rapport $^7\text{Be}/^{10}\text{Be}$ [Raisbeck et al., 1981a].
- L'étude du taux de production de ^{10}Be et donc des variations de l'activité solaire [Raisbeck et al., 1981b, 1990; Beer et al., 1988, 1990], l'hypothèse de départ étant que le ^{10}Be déposé dans les pôles n'est pas influencé par les variations d'intensité du champ magnétique terrestre (production locale, voir Fig. 1.7). Mais des mesures sur la carotte de Vostok, concordantes avec celles d'EDC, montrent un pic de ^{10}Be probablement lié à l'excursion de Laschamp [Raisbeck et al., 1987]. Cela est confirmé par des comparaisons entre différentes séries de ^{10}Be (provenant d'Antarctique et du Groenland) ou avec des données de ^{14}C [Bard et al., 1997; Horiuchi et al., 2008] qui suggèrent que le béryllium piégé dans les carottes de glace représente principalement des variations de production [Raisbeck et al., 1992], liées aux changements d'intensité de l'activité solaire ou du champ magnétique terrestre.

Aujourd'hui, le ^{10}Be dans la glace est donc principalement étudié en tant que proxy des variations de l'activité solaire et de l'intensité du champ géomagnétique. Des données précises concernant l'activité solaire ont été obtenues à l'aide des mesures des moniteurs de neutrons (voir section 1.2.2) sur les 60 dernières années. Pour les périodes plus anciennes, il est possible de reconstruire des données à partir de documents historiques mentionnant les tâches solaires, mais cet exercice est de plus en plus ardu pour les années avant 1600 [Beer et al., 1990]. Ce problème a été

dépassé grâce à l'étude des isotopes cosmogéniques, en particulier le ^{14}C dans les cernes d'arbres et le ^{10}Be dans la glace car leur résolution est suffisante pour détecter les variations séculaires de l'activité solaire. Connaître les variations passées de l'activité solaire est une étape préliminaire primordiale pour étudier l'influence du Soleil sur le climat. La revue de ces études se trouve dans section 2.2. Les mesures de ^{10}Be donnent aussi accès aux variations à plus long terme, liées notamment aux évènements géomagnétiques comme l'excursion de Laschamp ou l'inversion de Brunhes-Matuyama. Ce type d'étude est utile pour la datation des carottes de glace car ces évènements sont datés de manière absolue à l'aide des laves. La détection des variations d'intensité du champ géomagnétique permet aussi de synchroniser (i) plusieurs profils de ^{10}Be de différents sites entre eux, (ii) ou un profil de ^{10}Be avec un enregistrement de paléointensité provenant de sédiments marins sur une même échelle d'âge de manière continue (voir le chapitre 6). Les études du ^{10}Be en tant que proxy de l'intensité du champ géomagnétique sont résumées dans la section 2.3.

2.2 Activité solaire

Dans cette section, nous présentons comment les données de ^{10}Be ont été utilisées afin d'examiner l'activité solaire jusqu'aux 10 000 dernières années, et les connaissances qui en découlent.

2.2.1 Le cycle de 11 ans (cycle de *Schwabe*)

Le cycle de *Schwabe* (11 ans) de l'activité solaire est surtout connu à travers les mesures de l'activité des éruptions solaires (voir section 1.2.2). Les nucléides cosmogéniques, tels que le ^{14}C ou le ^{10}Be , ont aussi été utilisés pour la détection de ce fameux cycle. Le ^{14}C pourrait être un outil puissant car il est mesurable dans les cernes d'arbre, mais le cycle du carbone lisse très fortement les fluctuations à court terme du signal de production. En effet, le facteur d'atténuation des amplitudes du ^{14}C pour le cycle de 11 ans est d' ~ 100 [Siegenthaler et al., 1980]. Cet effet de lissage rend la détection des variations à court terme avec le ^{14}C très difficile. Le transport et la déposition du ^{10}Be étant différent (voir section 1.3), le signal de production n'est atténué que d'un facteur $\sim 1,25$ [Beer et al., 1990]. Le ^{10}Be est donc l'isotope cosmogénique le mieux adapté pour l'étude des variations décennales dues à l'activité solaire. Malgré tout, il est nécessaire d'avoir une résolution suffisante ainsi qu'un profil suffisamment long pour une étude quantitative du cycle de 11 ans.

Avec cette méthode, Beer et al. [1990] ont pu analyser ce cycle à l'aide d'un enregistrement de ^{10}Be sur plusieurs centaines d'années provenant du site groenlandais

Dye-3. Plus récemment, [Berggren et al., 2009], avec un enregistrement annuel de 600 ans de la carotte de glace NGRIP (North Greenland Ice Core Project, Groenland), a aussi détecté le cycle de 11 ans, en corrélation avec les profils de flux de neutrons et de tâches solaires (e.g. Fig. 2.1). Des études de l'activité solaire ont aussi été menées en Antarctique. Baroni et al. [2011] ont étudié deux carottes de glace des sites de Vostok et Concordia sur les 60 dernières années. Il a été observé une atténuation d'un facteur 0,5 de l'amplitude du ^{10}Be mesuré, ainsi qu'un écart de 0 à 2,2 ans entre le signal de ^{10}Be dans la neige et les données du moniteur de neutrons. Il a été déduit une contribution de 35% et 20% du cycle solaire de 11 ans sur la variance des profils de ^{10}Be à Vostok et Concordia respectivement. Une des dernières études en date est celle de Pedro et al. [2012] qui a évalué deux enregistrements de ^{10}Be provenant de sites côtiers (Law Dome sur la côte Est de l'Antarctique, et Das2 au Sud-Est du Groenland) par rapport aux observations de l'activité solaire et aux données climatiques. Une corrélation significative entre leurs mesures et la modulation du rayonnement cosmique par le cycle solaire de 11 ans a été déduite. Et contrairement à la conclusion de Steig et al. [1996] qui ont estimé une contribution des basses à moyennes latitudes relativement faible (<35%) sur la carotte de glace à Taylor Dome, les amplitudes des périodes dans les données de ^{10}Be dans les couches de glace semblent incompatibles avec une contribution uniquement polaire de la production de ^{10}Be .

2.2.2 Le dernier millénaire : les « Grands Minima » d'intensité du champ héliomagnétique

Les profils de ^{10}Be dans la glace, combinés ou comparés avec les enregistrements de ^{14}C , ont donné accès aux variations de l'activité solaire durant le dernier millénaire. Ces études ont donné les bases pour la compréhension des variations à long terme (centenniales) de l'activité solaire (voir section 2.2.3). En effet, plusieurs études ont révélé de plus fortes concentrations en ^{10}Be durant des périodes de faible activité solaire, appelées « Grands Minima ». L'hypothèse d'une correspondance entre les fortes valeurs de production de ^{14}C et les Grands Minima de l'activité solaire fut mise en avant par Eddy [1976], sur la base d'une comparaison durant les 400 dernières années de données solaires et de ^{14}C . Il conclut une anti-corrélation empirique entre les données de ^{14}C et le niveau de l'activité solaire [Beer et al., 2012]. Sur la période 850–1950, cinq pics de production de nucléides cosmogéniques sont visibles sur les différents enregistrements, indiquant cinq Grands Minima de l'activité solaire : Oort (~1050), Wolf (1325–1375), Spörer (1420–1540), Maunder

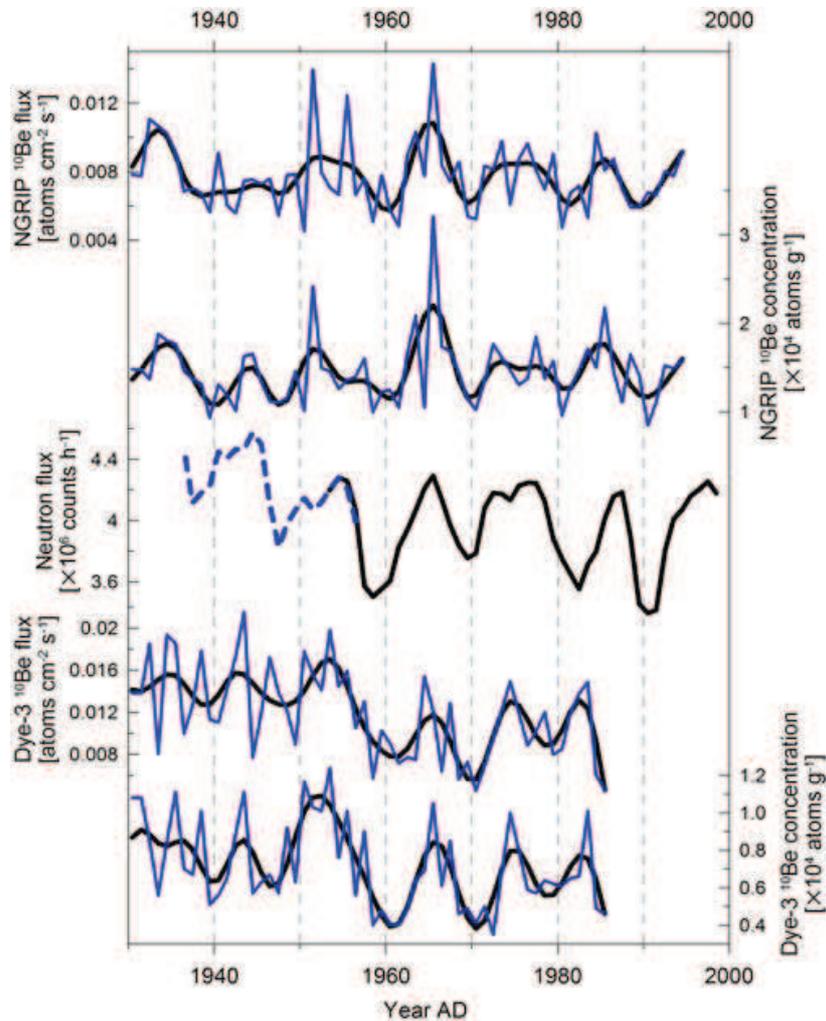


FIGURE 2.1 – Une comparaison des concentrations et flux de ^{10}Be à NGRIP et Dye-3 avec les données de neutrons depuis 1936. Les données brutes de ^{10}Be sont montrées avec celles filtrées passe-bas (fréquence de coupure à 1/6 ans). Les données du moniteurs de neutrons sont compris dans la période 1953–1998, celles de la chambre d’ionisation de 1936 à 1956 (en pointillés) [McCracken and Beer, 2007]. Figure et légende d’après Berggren et al. [2009].

A comparison of NGRIP and Dye-3 ^{10}Be concentration and flux with neutron data since 1936 AD. ^{10}Be raw data are shown together with low pass, 1/6 year cut-off, filtered data. Neutron monitor data from 1953–1998 AD, ionization chamber data from 1936–1956 AD (dashed) [McCracken and Beer, 2007]. Figure and legend from Berggren et al. [2009].

(1645–1715) et Dalton (1790–1830). La détection de ces Grands Minima donna l'idée d'une possible existence d'un cycle de ~ 208 ans (le cycle de *Suess* ou de *de Vries*), d'où les études sur de plus grandes échelles de temps (voir section suivante). On peut aussi noter la présence du « maximum médiéval » sur la période 1140–1240.

Plusieurs enregistrements de ^{10}Be pour cette période de temps sont référencés dans la littérature, mais peu sont des profils complets sur tout le dernier millénaire, en particulier ceux provenant du Groenland (Camp Century [Beer et al., 1988], GRIP [Yiou et al., 1997; Muscheler et al., 2004], Milcent [Beer et al., 1991], Dye-3 [Beer et al., 1990]). Un profil complet de ^{10}Be en Antarctique, nommé « Pôle Sud » [Raisbeck et al., 1990], met en avant les cinq Grands Minima cités plus haut. Un autre enregistrement d'Antarctique à Dome Fuji sur la période 700–1900 [Horiuchi et al., 2008] montre les mêmes types de variations liés aux changements de l'activité solaire (voir les zones surlignées sur la Fig. 2.2).

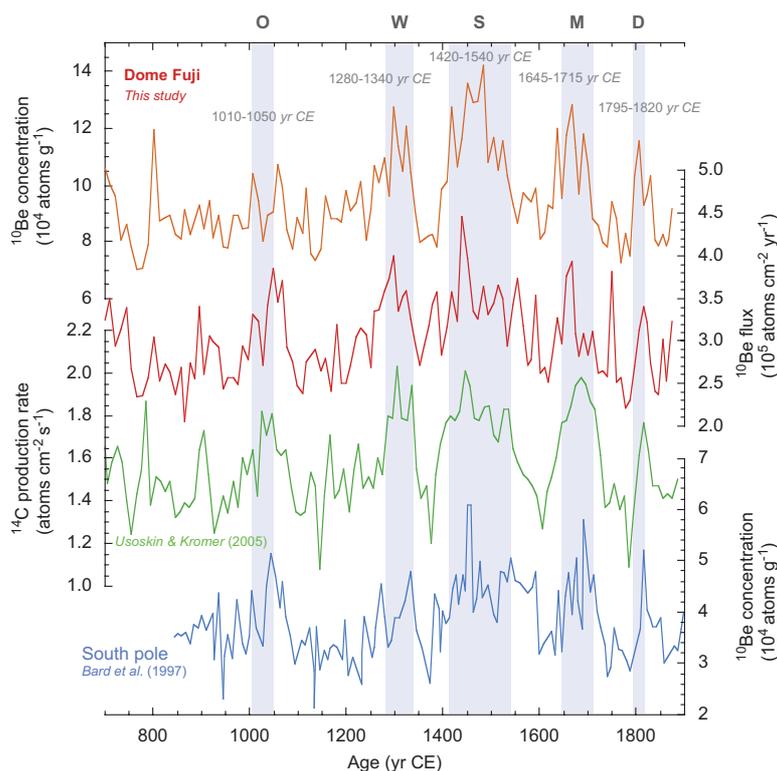


FIGURE 2.2 – De haut en bas : concentration et flux de ^{10}Be à Dome Fuji, taux de production de ^{14}C [Usoskin and Kromer, 2005] et concentration de ^{10}Be au Pôle Sud [Raisbeck et al., 1990]. Figure et légende d'après Horiuchi et al. [2008].

From top to bottom: The concentration and flux of ^{10}Be in the Dome Fuji ice core, the ^{14}C production rate [Usoskin and Kromer, 2005] and the ^{10}Be concentration in the South Pole ice core [Raisbeck et al., 1990]. Figure and legend from Horiuchi et al. [2008].

Afin de tester de manière quantitative l'origine solaire de ces variations dans les profils de nucléides cosmogéniques, [Bard et al. \[1997\]](#) ont comparé un enregistrement de ^{14}C dans les cernes d'arbre avec celui de ^{10}Be au Pôle Sud [[Raisbeck et al., 1990](#)]. Pour cela, les concentrations mesurées en ^{10}Be ont été considérées comme directement reliées aux variations des rayonnements cosmiques et la production de ^{14}C proportionnelle aux données de ^{10}Be . [Bard et al. \[1997\]](#) ont ensuite calculé le $\Delta^{14}\text{C}$ attendu en entrant les données de ^{10}Be dans un modèle en boîtes du cycle du carbone et l'ont comparé avec les mesures de $\Delta^{14}\text{C}$ dans les cernes d'arbre (e.g. Fig. 2.3). En supposant une amplification de la modulation du ^{10}Be dans les régions po-

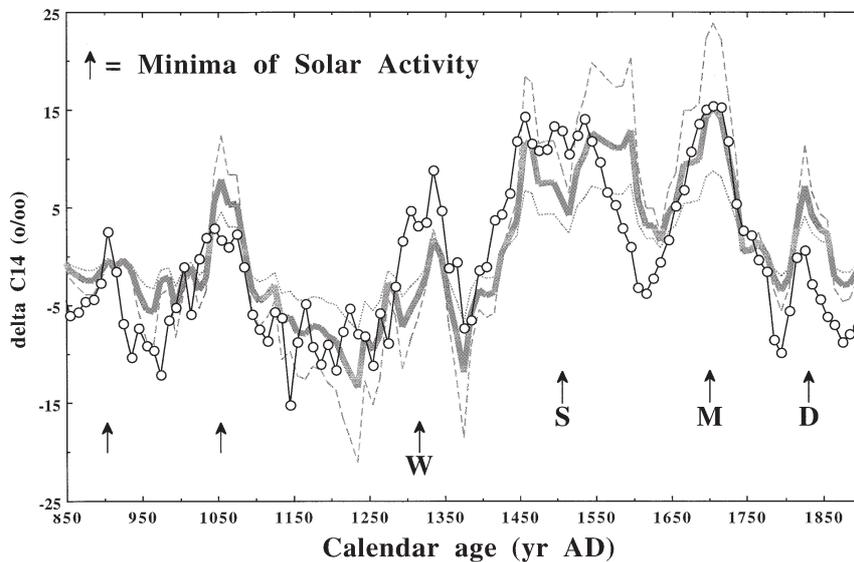


FIGURE 2.3 – Comparaison entre les valeurs de $\Delta^{14}\text{C}$ mesuré dans des cernes d'arbres (cercles) et les variations de $\Delta^{14}\text{C}$ simulées à l'aide d'un modèle en boîtes du cycle du carbone et les changements du ^{10}Be utilisés en entrée du modèle en tant que taux de production (lignes). Détails dans l'article de [Bard et al. \[1997\]](#).

Circles represent the detrended $\Delta^{14}\text{C}$ values measured in American and European tree rings. Lines show the tropospheric $\Delta^{14}\text{C}$ variations simulated by using the 12-box model and the relative changes in ^{10}Be as an input curve for the variable production rate. Details in the article from [Bard et al. \[1997\]](#).

lares due à l'orientation du champ géomagnétique, [Bard et al. \[1997\]](#) ont déterminé un « coefficient d'amplification polaire » de 0,7 (amplitude des variations de ^{10}Be enregistrées à Pôle Sud 1,40 fois plus élevée que celle des changements du taux de production global de ^{10}Be). Leur conclusion est que la majorité du ^{10}Be piégé dans la glace en Antarctique est produite dans les hautes latitudes, en accord avec celle de [Steig et al. \[1996\]](#). Malgré quelques désaccords pouvant indiquer une influence cli-

matique sur l'une des séries (ou les deux), leur corrélation élevée ($r = 0,81$) montre une prédominance forte de la modulation solaire sur la production des nucléides cosmogéniques durant le dernier millénaire. Ce travail a été reproduit par [Delaygue and Bard \[2011\]](#) avec différents modèles du cycle du carbone et un composite des enregistrements de ^{10}Be au Pôle Sud et à Dome Fuji.

Les calculs détaillés de production d'isotopes cosmogéniques dans l'atmosphère [[Masarik and Beer, 1999](#)] ont ouvert la voie aux reconstructions quantitatives de l'activité solaire sur plusieurs milliers d'années. Ces reconstructions se sont aussi bien centrées sur le dernier millénaire que sur toute la période de l'Holocène (voir section suivante). Ainsi, la conclusion de [Bard et al. \[1997\]](#) fut confirmée, que ce soit par la reconstruction du potentiel de modulation Φ [[Muscheler et al., 2007](#)] ou du nombre de tâches solaires [[Usoskin et al., 2003](#)]. Des désaccords entre différentes reconstructions de l'activité solaire eurent pour conséquence de vifs débats sur l'activité solaire relativement plus forte ou non (par rapport aux derniers 1000 ans, voir sur les 8000 dernières années [[Solanki et al., 2004](#)]) durant les 60 dernières années. Alors qu'[Usoskin et al. \[2003\]](#) suggérèrent que l'activité solaire atteignait un maximum durant les 60 dernières années, remarquablement haut par rapport aux 1000 années précédentes (cf. Fig. 2.4a), [Muscheler et al. \[2007\]](#) conclurent que le niveau récent de l'activité solaire était élevé mais pas exceptionnel (voir Fig. 2.4b). Ces résultats divergents peuvent être expliqués tout d'abord par la méthode employée pour la reconstruction de l'activité solaire : [Usoskin et al. \[2003\]](#) ont reconstruit un enregistrement du nombre de tâches solaires tandis que [Muscheler et al. \[2007\]](#) ont préféré déterminer la fonction de modulation solaire Φ . La première demande des étapes supplémentaires de calcul (donc un ajout d'incertitudes) tandis que l'autre possède des incertitudes sur la normalisation des enregistrements de production et les changements de l'intensité du champ géomagnétique. [Usoskin et al. \[2003\]](#) ont choisi l'étude des tâches solaires car ces événements se déroulent au coeur des régions actives du Soleil, responsables des phénomènes liés à l'activité solaire. [Muscheler et al. \[2007\]](#), sur la Fig. 11 de leur article, ont quant à eux comparé les différentes quantités physiques (production de ^{14}C et fonction de modulation avec le nombre de tâches solaires) et mis en lumière une forte différence durant le minimum de Maunder. Alors que le nombre de tâches solaires tombe à zéro durant cette période, la production de ^{14}C et la fonction de modulation continuent de varier, montrant une relation non linéaire entre ces paramètres [[Raisbeck and Yiou, 2004](#)]. De plus, les différences entre les enregistrements de ^{10}Be au Groenland et en Antarctique ont conduit à ces conclusions contradictoires sur l'activité du Soleil dans le passé. En effet, les profils du Groenland indiquent une production relativement faible de ^{10}Be après 1950 alors

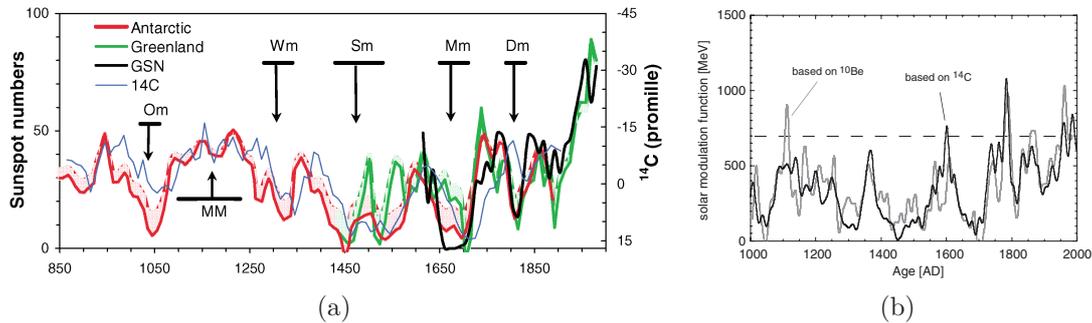


FIGURE 2.4 – (a) Reconstruction du nombre de tâches solaires à partir des concentrations en ^{10}Be en Antarctique (rouge) et au Groenland (vert). La courbe noire montre le nombre de tâches solaires observées depuis 1610, et la courbe bleue la concentration en ^{14}C dans les cernes d’arbres corrigée des variations d’intensité du champ géomagnétique. Figure tirée de [Usoskin et al. \[2003\]](#). (b) Comparaison de la fonction de modulation solaire basée sur le ^{10}Be (courbe grise) et le ^{14}C (courbe noire) d’après [Muscheler et al. \[2007\]](#).

(a) Reconstructions of the sunspot numbers from ^{10}Be concentrations in ice cores from Antarctica (red) and Greenland (green). The thick black curve shows the observed group sunspot number since 1610 and the thin blue curve gives the ^{14}C concentration in tree rings, corrected for the variation of the geomagnetic field. Figure from [Usoskin et al. \[2003\]](#). (b) Comparison of the solar modulation function based on ^{10}Be (grey curve) and ^{14}C (black curve). Figure from [Muscheler et al. \[2007\]](#).

que cette tendance est plutôt contraire dans les enregistrements d’Antarctique [[Raisbeck and Yiou, 2004](#)], non prise en compte par [Usoskin et al. \[2003\]](#). Dans tous les cas, comme indiqué par [Solanki et al. \[2004\]](#), les reconstructions de l’activité solaire nous révèlent que seulement une fraction mineure du réchauffement climatique peut être expliquée par l’activité du Soleil.

2.2.3 L’Holocène : études spectrales des variations centennales de l’activité solaire

Avec les techniques de préparation et de mesures des échantillons de ^{10}Be dans la glace, il est possible d’étendre ces enregistrements à très haute résolution sur tout l’Holocène (10 000 dernières années). L’Holocène étant une période climatique relativement stable, les effets d’accumulation sur la concentration de ^{10}Be dans la glace au Groenland et en Antarctique peuvent être négligés au premier ordre [[Vonmoos et al., 2006](#); [Steinhilber et al., 2012](#)]. Cela évite d’avoir à déduire un taux d’accumulation du site associé avec des incertitudes supplémentaires. Peu d’études des variations temporelles à haute résolution du ^{10}Be ont été effectuées avant l’Ho-

locène, à part certaines périodes « inhabituelles » comme l'évènement de Laschamp [Wagner et al., 2001]. Les données de ^{14}C provenant des cernes d'arbre ont fourni les premières preuves de variations du taux de production des nucléides cosmogéniques liées à l'activité solaire. Avec l'accumulation des données, le cycle de *de Vries* a pu être détecté dans les enregistrements de ^{14}C [Suess, 1980]. D'autres cycles solaires, comme ceux de *Gleissberg* (~ 80 -90 ans), *Eddy* (970 ans) et *Hallstatt* ($\sim 2\,300$ ans), sont aussi connus.

Le premier profil de concentration de ^{10}Be dans la glace avec une résolution suffisante pour étudier les variations centennales de l'activité solaire durant les 10 000 dernières années fut mesuré dans l'enregistrement de Camp Century au Groenland [Beer et al., 1988]. La bonne corrélation de cet enregistrement avec un profil de ^{14}C durant les 5000 dernières années (plus vieux, la résolution n'était pas suffisante) supporte l'idée que les fluctuations dans l'enregistrement de ^{10}Be sont causées par la modulation solaire du flux de rayonnement cosmique. La première reconstruction quantitative de l'activité solaire durant tout l'Holocène (excepté les 100 dernières années), basée sur un enregistrement de ^{10}Be dans la glace polaire par Vonmoos et al. [2006] (provenant de la carotte de glace groenlandaise GRIP), révéla de larges variations de la modulation héliosphérique du rayonnement cosmique. La Fig. 2.5 [Vonmoos et al., 2006] montre clairement une forte variabilité séculaire de l'activité solaire, incluant les grands Minima et confirmant donc la robustesse des reconstructions de l'activité solaire à partir du ^{10}Be . Les variations à plus long terme de leurs reconstructions basées sur le ^{10}Be et le ^{14}C indiquent certains désaccords qui peuvent refléter des changements non détectés du cycle du carbone [Muscheler et al., 2004], des variations à long-terme dans le transport atmosphérique et la déposition du ^{10}Be , des incertitudes sur les calculs des taux de production du ^{10}Be et du ^{14}C , ou une combinaison de tout cela. Une des conclusions majeures de cette reconstruction est que l'activité actuelle du Soleil est élevée mais pas exceptionnellement haute en regard de tout l'Holocène, en désaccord avec les résultats de Solanki et al. [2004]. Cet enregistrement et cette reconstruction donna les bases pour des investigations plus détaillées de l'activité solaire, en relation avec les climats. À la suite de cela, des analyses spectrales de Knudsen et al. [2009] du profil de ^{10}Be à GRIP et de la courbe de calibration de ^{14}C IntCal04 [Reimer et al., 2004] ont mis en lumière la modulation des cycles solaires (~ 220 et ~ 400 ans) durant l'Holocène, avec des comportements périodiques prononcés sur les intervalles 6000–4500 et 3000–2000 ans BP et une absence complète de cycle sur le reste des enregistrements.

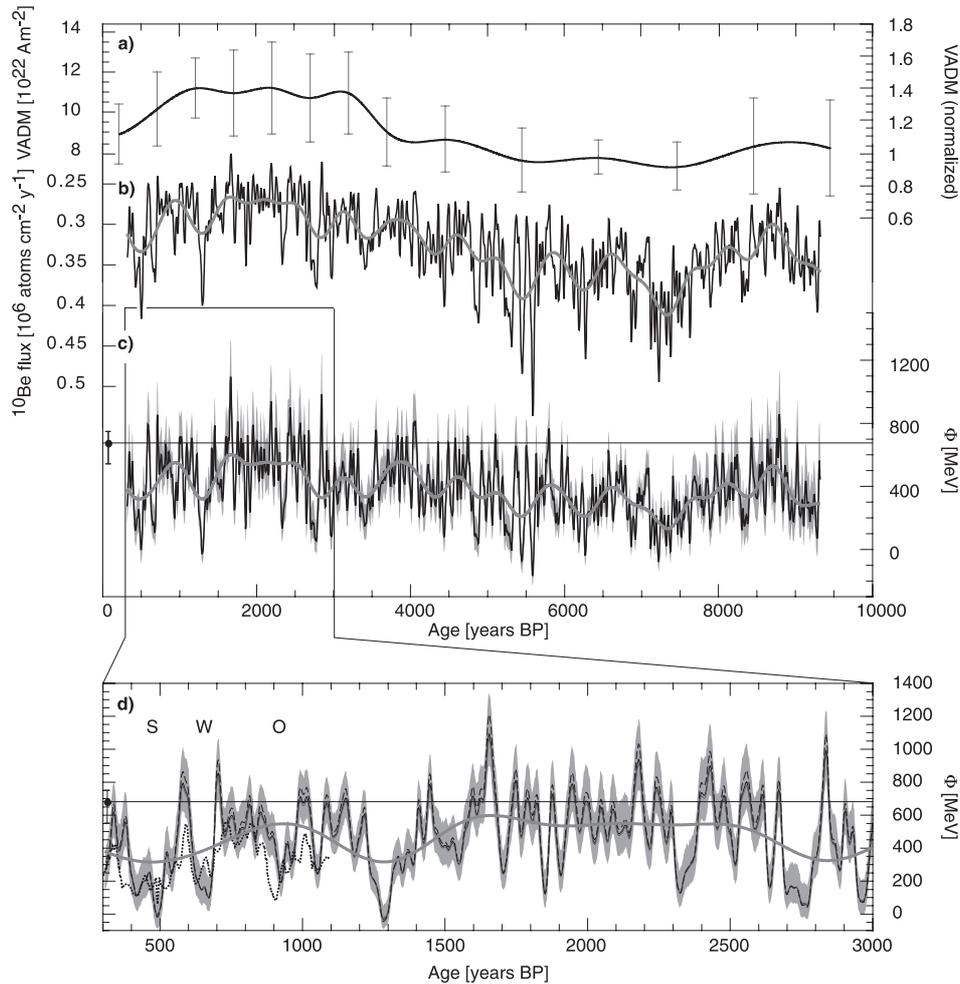


FIGURE 2.5 – Reconstruction de l’activité solaire Φ à partir du ^{10}Be . (a) Moment dipolaire géomagnétique. (b) Flux de ^{10}Be à GRIP. (c) Fonction de la modulation solaire Φ dérivée du profil ^{10}Be . (d) Zoom sur les 3000 dernières années. Détails dans [Vonmoos et al. \[2006\]](#).

Reconstruction of the solar activity Φ from ^{10}Be . (a) Geomagnetic dipole moment. (b) ^{10}Be flux from the GRIP ice core. (c) Solar modulation function Φ derived from the ^{10}Be . (d) Close-up view on the 3000 last years. Details in [Vonmoos et al. \[2006\]](#).

Bien qu’étant dominé par le même signal de production (c’est-à-dire l’activité solaire), ce type de reconstruction de l’activité solaire basée que sur des enregistrements d’un seul proxy (^{14}C ou ^{10}Be) peut contenir des biais climatiques. Pour remédier à cela, [Steinhilber et al. \[2012\]](#) ont combiné différents enregistrements de ^{10}Be provenant du Groenland et d’Antarctique avec le profil global de ^{14}C dans les cernes d’arbre (IntCal09 de [Reimer et al. \[2009\]](#)) en utilisant l’analyse par composante principale afin d’extraire le signal commun de production. Cette approche, consistant notamment à prendre en compte l’influence climatique des hémisphères

Nord et Sud sur les différents enregistrements de radionucléides, est devenue possible grâce au nouvel enregistrement de ^{10}Be à haute résolution à EPICA Dronning Maud Land (EDML) en Antarctique. La première composante principale, (représentant le signal de production lié à l'activité solaire après correction des effets du champ magnétique terrestre) a pu ensuite être utilisée pour la reconstruction du potentiel de modulation solaire sur la période de l'Holocène. Cette reconstruction (Fig. 2.6) donne la possibilité d'étudier les cycles solaires, notamment la période de 210 ans (*de Vries*), et confirme que les amplitudes de ce cycle ont varié durant l'Holocène. L'origine de ce phénomène pourrait être une modulation planétaire de l'activité solaire sur une échelle de temps séculaire [Abreu et al., 2012]. Ce point est étudié plus en détail, à l'aide d'une comparaison avec un enregistrement à haute résolution de ^{10}Be à EDC durant le MIS 9 (voir chapitre 5).

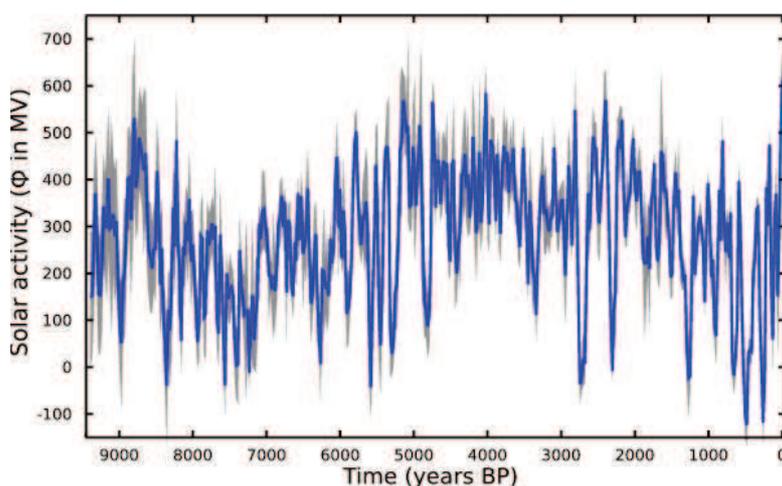


FIGURE 2.6 – Reconstruction du potentiel de modulation solaire ϕ durant l'Holocène basée sur une combinaison d'enregistrements de ^{10}Be dans les carottes de glace (Groenland et Antarctique) et de ^{14}C dans les cernes d'arbre. Figure tirée de Steinhilber et al. [2012].

Reconstruction of the solar modulation potential ϕ during the Holocene using a composite of ^{10}Be ice core records from Greenland and Antarctica and ^{14}C tree ring record. Figure from Steinhilber et al. [2012].

Ailleurs que sur l'Holocène, une étude de l'activité solaire a été faite durant l'excursion de Laschamp, il y a ~ 41 kyr BP, par Wagner et al. [2001] à l'aide d'un enregistrement de ^{10}Be à GRIP, avec une mise en évidence de la modulation géomagnétique du cycle de *de Vries*. En effet, quand l'intensité du champ géomagnétique tombe pratiquement à zéro (comme durant l'évènement de Laschamp), la sensibilité à la modulation solaire de la production d'isotopes cosmogéniques est amplifiée. Ceci se produit car une fraction plus importante des particules de faible énergie compo-

sant le rayonnement cosmique, normalement exclue par le champ géomagnétique, est capable d'atteindre l'atmosphère terrestre.

2.3 Intensité du champ magnétique terrestre

Les premières indications d'une modulation géomagnétique du ^{10}Be déposé dans les glaces polaires ont été observées par la comparaison des enregistrements de Vostok et Dome C en Antarctique [Raisbeck et al., 1987]. En effet, on peut distinguer un pic commun sur les deux profils aujourd'hui connu comme l'excursion de Laschamp. La capture des variations de production du ^{10}Be liées à la modulation géomagnétique dans la glace permet ainsi d'appliquer des connections chronologiques entre des enregistrements de différents réservoirs. La comparaison avec d'autres isotopes cosmogéniques, comme le ^{14}C , ou avec des mesures d'intensité du champ magnétique dans les sédiments est une des implications importantes du ^{10}Be comme proxy de la modulation géomagnétique du rayonnement cosmique. Plusieurs types d'investigations, détaillés dans cette section, ont été menées dans ce champ d'étude : reconstruction de l'intensité du champ magnétique terrestre, étude des événements « exceptionnels » du champ géomagnétique, aide à la datation, ... Des études sur les variations de la composition en ^{14}C de l'atmosphère (liées aux changements du taux de production de cet isotope cosmogénique et au cycle du carbone), à l'aide de mesures de ^{10}Be et d'un modèle en boîtes du cycle du carbone [Bard et al., 1997; Muscheler et al., 2004], ont pu aussi être menées. Le chapitre 3, publié dans Radiocarbon, détaille cet aspect de recherche pour l'évènement de Laschamp.

2.3.1 Reconstruction de l'intensité du champ magnétique terrestre

La manière « traditionnelle » d'étudier le champ géomagnétique est de mesurer les propriétés magnétiques des sédiments, des laves, ... Pendant un certain temps après avoir été déposés au fond de l'océan (ou un lac, etc...), les grains magnétiques restent mobiles et s'alignent avec les lignes du champ magnétique local. Ils deviennent immobiles après avoir été enfouis sous une certaine épaisseur de couches sédimentaires, appelée « profondeur de blocage », enregistrant la direction et l'intensité du champ. Les problèmes liés avec ce type de méthode sont la détermination du délai d'acquisition de l'aimantation rémanente des particules magnétiques, les effets géologiques, chimiques et biologiques pouvant biaiser le signal magnétique, ainsi que les composantes non-dipolaires du champ magnétique enregistrées avec le dipôle ma-

gnétique. Néanmoins, le nombre croissant d'enregistrements paléomagnétiques sur tout le globe et la possibilité de les combiner afin d'obtenir un signal global [Guyodo and Valet, 1999; Laj et al., 2000; Laj et al., 2004; Valet et al., 2005; Channell et al., 2009] améliorent continuellement la qualité et la résolution de ces profils.

Les nucléides cosmogéniques représentent une méthode complémentaire pour l'étude des changements passés du dipôle géomagnétique, que ce soit à l'aide de mesures dans des archives marines [Frank et al., 1997; Ménabréaz et al., 2011, 2012] ou dans des carottes de glace polaire [Wagner et al., 2000; Muscheler et al., 2005]. Ceci est notamment devenu possible grâce aux calculs reliant l'intensité du champ magnétique terrestre et le taux de production des radionucléides [Lal, 1988; Masarik and Beer, 1999]. Par exemple, pour une activité solaire moyenne de 550 MV (niveau pré-industriel [Masarik and Beer, 2009; Kovaltsov and Usoskin, 2010]) et une intensité du champ géomagnétique quasi-nulle, le taux de production globale de ^{10}Be est environ multiplié par deux (voir Fig. 1.6). Les incertitudes sur les calculs des taux de production (voir le chapitre 3), le temps de demi-vie des nucléides cosmogéniques (pour le ^{14}C), la nécessité de séparer les modulations solaires et géomagnétiques, et les effets climatiques (transport, déposition, accumulation, ...) peuvent biaiser les reconstructions.

La Fig. 2.7 montre la comparaison de deux reconstructions de l'intensité du champ géomagnétique, exprimée comme le moment dipolaire (VADM : Virtual Axial Dipole Moment), durant les 60 000 dernières années. La première est dérivée d'enregistrements de ^{10}Be du Groenland, la seconde (appelée NAPIS-75 pour *North Atlantic Paleointensity Stack*) d'une compilation de données de magnétisation rémanente provenant de six carottes sédimentaires forées en Atlantique Nord [Laj et al., 2000]. Le flux de ^{10}Be est calculé à partir d'une combinaison des concentrations de ^{10}Be mesurées dans les carottes de glace groenlandaises GRIP [Yiou et al., 1997; Muscheler et al., 2004] et GISP2 [Finkel and Nishiizumi, 1997]. Pour plus de détails, voir l'étude de Muscheler et al. [2005]. Pour éliminer la composante solaire, un filtre passe-bas avec une période de coupure de 3000 ans a été appliqué sur les données. Supposant que les changements à long terme observés dans le flux de ^{10}Be sont d'origine géomagnétique et que celui-ci est proportionnel au taux de production globale, le profil est converti en moment dipolaire magnétique (voir Fig. 2.7b) à l'aide des différents calculs de taux de productions de ^{10}Be [Lal, 1988; Masarik and Beer, 1999].

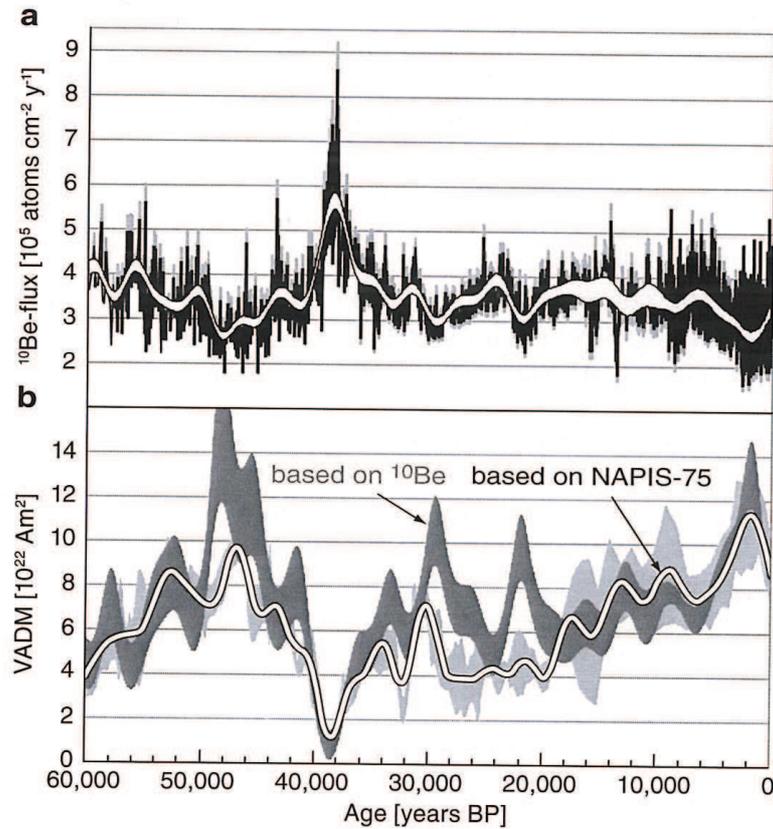


FIGURE 2.7 – Moment dipolaire (VADM) du champ magnétique terrestre calculé à partir des flux de ^{10}Be au Groenland (GRIP + GISP2) durant les 60 000 dernières années. (a) Flux de ^{10}Be brute et après application d'un filtre passe-bas (période de coupure de 3000 ans, bande blanche). (b) Comparaison de la reconstruction de l'intensité du champ géomagnétique dérivée du ^{10}Be filtré (bande gris foncé) avec le composite Atlantique de paléointensité NAPIS-75 (ligne blanche) [Laj et al., 2000]. Figure tirée de Muscheler et al. [2005].

Calculated virtual axial dipole moment (VADM) derived from ^{10}Be flux records in Greenland (GRIP + GISP2) during the last 60,000 years. (a) Raw and 3000-year low-pass filtered (white band) ^{10}Be flux. (b) Comparison of the VADM record derived from the low-pass filtered ^{10}Be flux (bold grey band) with the NAPIS-75 paleointensity Atlantic stack (white line) [Laj et al., 2000]. Figure from Muscheler et al. [2005].

La comparaison entre la reconstruction basée sur le ^{10}Be et l'enregistrement géomagnétique NAPIS-75 révèle un haut degré de similarité. Par exemple, les deux courbes montrent clairement l'excursion de Laschamp il y a $\sim 40\,000$ ans (visible aussi avec l'augmentation de la production de ^{10}Be par un facteur ~ 2 (Fig. 2.7a) comme attendu des calculs de production). Néanmoins, le profil basé sur le ^{10}Be montre des valeurs supérieures d'intensité du champ entre 18 000 et 34 000 ans BP. En particulier, les deux maxima d'intensité à 30 000 et 22 000 ans BP sont beaucoup plus forts dans l'enregistrement dérivé du ^{10}Be que dans NAPIS-75. L'accord, dans

l'ensemble, des deux enregistrements valide l'utilisation des nucléides cosmogéniques pour la reconstruction de l'intensité du champ magnétique terrestre dans le passé.

2.3.2 Excursions et inversions magnétiques

Le ^{10}Be permet, entre autre, de détecter les pics de production dus à la forte baisse d'intensité du champ géomagnétique. Ces pics peuvent être utilisés comme des points de calage pour synchroniser des enregistrements ou bien comme un marqueur daté de manière absolue, et sont donc importants pour mieux contraindre les modèles d'écoulement de flux des carottes de glace (chronologie EDC3 de [Parrenin et al. \[2007b\]](#) par exemple). Ici, nous nous focalisons sur les deux principaux événements géomagnétiques enregistrés dans le ^{10}Be des carottes de glace : l'excursion de Laschamp (~ 41 kyr BP) et l'inversion de Brunhes-Matuyama (~ 780 kyr BP).

L'excursion de Laschamp

C'est l'excursion la plus forte et la mieux identifiée dans les profils de ^{10}Be , aussi bien dans différentes carottes de glace d'Antarctique et du Groenland [[Raisbeck et al., 1987, 2007](#); [Yiou et al., 1997](#)] que dans des sédiments [[Robinson et al., 1995](#); [Ménabréaz et al., 2011, 2012](#); [Nilsson et al., 2011](#)]. L'excursion de Laschamp est un événement géochronologique bien contraint, daté à 40700 ± 950 ans b2k* par [Singer et al. \[2009\]](#) grâce aux méthodes de datation absolue $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$, K-Ar et $^{238}\text{U}/^{230}\text{Th}$. Les plus récentes données publiées de ^{10}Be dans la glace durant cette période [[Raisbeck et al., 2007](#)] sont présentées sur la Fig. 2.8. Cet enregistrement à haute résolution (10 ans), provenant d'EDC, montre clairement le pic de ^{10}Be lié à l'événement de Laschamp, centré autour de 740 m de profondeur dans la carotte de glace. De la même manière que dans l'étude de [Wagner et al. \[2001\]](#), la structure sur des échelles de temps plus courtes (centaines voire dizaines d'années) suggère des effets de la variabilité solaire (voir le dernier paragraphe de la section 2.2.3).

Parce-que les larges variations de production du ^{10}Be dues aux modulations du rayonnement cosmique par les champs héliomagnétique et géomagnétique sont globalement synchrones et indépendants du climat, l'isotope cosmogénique ^{10}Be permet la synchronisation d'enregistrements paléoclimatiques. Ceci est notamment possible durant l'excursion de Laschamp, spécialement pour la synchronisation d'enregistrements à haute résolution du Groenland avec ceux de l'Antarctique. Cette synchronisation directe de plusieurs enregistrements de glace en utilisant le pic de ^{10}Be

*. La notation b2k a été introduite avec l'échelle des âges GICC05 (Greenland Ice Core Chronology 2005) pour les carottes de glace du Groenland. Elle signifie *years before 2000 A.D.*, donc 50 yr b2k = 0 yr BP pour l'année 1950.

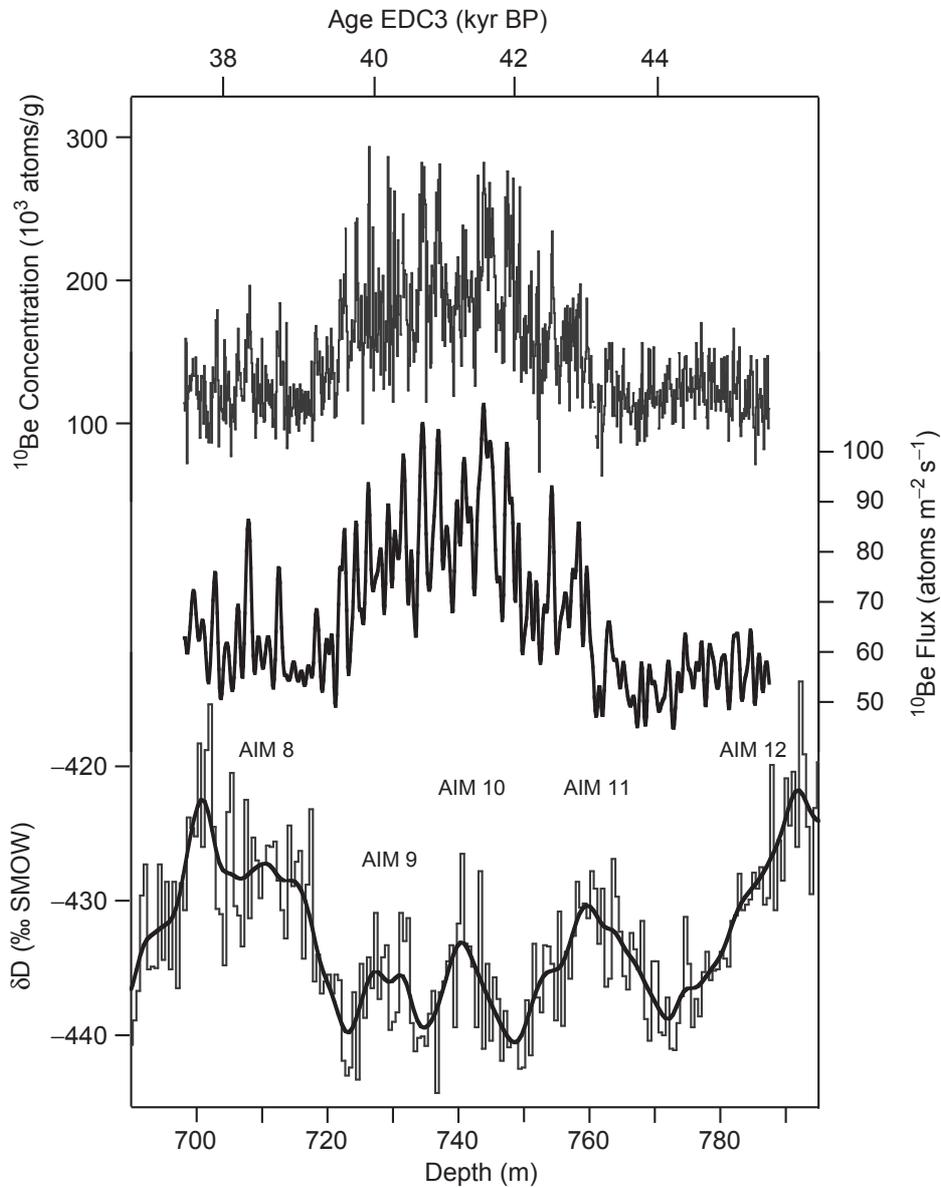


FIGURE 2.8 – Concentrations et flux de ^{10}Be dans la carotte de glace EPICA Dome C, représentés avec le δD et sa moyenne mobile, en fonction de la profondeur et de l'âge (EDC3) [Raisbeck et al., 2007]. L'excursion de Laschamp, visible sur l'enregistrement de ^{10}Be , se manifeste par l'augmentation du flux par un facteur ~ 2 .

^{10}Be concentrations and flux in the EPICA Dome C ice core, represented with the δD and its running average, as a function of depth and age (EDC3) [Raisbeck et al., 2007]. The Laschamp excursion, visible on the ^{10}Be record, occurs with an increase of the flux by a factor ~ 2 .

autour de 41 ka fut d'abord proposée par [Yiou et al. \[1997\]](#), puis reproduite par [Raisbeck et al. \[2007\]](#) avec de nouvelles données de ^{10}Be à haute résolution provenant d'EDC et GRIP. Bien que limitée à la période autour du pic de ^{10}Be , la structure détaillée de ce pic de production lié à l'événement de Laschamp donne accès à des caractéristiques identifiables dans les différents profils. Une étude en cours (par Grant Raisbeck et al.), fournissant de nouvelles données de ^{10}Be à haute résolution à NGRIP (Groenland) et EDML (Antarctique), montre la synchronisation des enregistrements d'Antarctique (EDC, EDML et Vostok) sur l'échelle des âge de NGRIP : GICC05. Sur cette synchronisation Nord-Sud (présentée sur la Fig. 2.9), cinq points de calage, aisément identifiables, ont été sélectionnés (notés 1, 2, 3, 4, 5). La qualité de la corrélation de EDC et EDML sur NGRIP a été testée à l'aide des signatures volcaniques liant les deux enregistrements d'Antarctique [[Severi et al., 2007](#)], montrant une précision de l'ordre de 20 ans de la synchronisation Nord-Sud à l'aide du ^{10}Be . L'objectif est d'étudier les relations de déphasage et d'amplitude des variations climatiques du Nord et du Sud, autrement que par l'utilisation des gaz atmosphériques piégés dans la glace, comme le méthane, pour la synchronisation. En effet, le piégeage du gaz dans la glace s'effectuant à une profondeur typique d' ~ 80 m, où les bulles dans la glace sont isolées de l'atmosphère, l'âge du gaz est plus jeune que l'âge de la glace qui l'entoure. Cette différence [âge de la glace] - [âge du gaz] est évaluée grâce au Δage ou Δdepth . Une des manières de déterminer ce paramètre est d'utiliser les pics de ^{10}Be , même si cette méthode ne peut concerner que la période autour de l'excursion de Laschamp [[Louergue et al., 2007](#)]. Tout cela montre l'utilité de la détection de ces pics de production de ^{10}Be pour la datation (relative ou absolue) des carottes de glace.

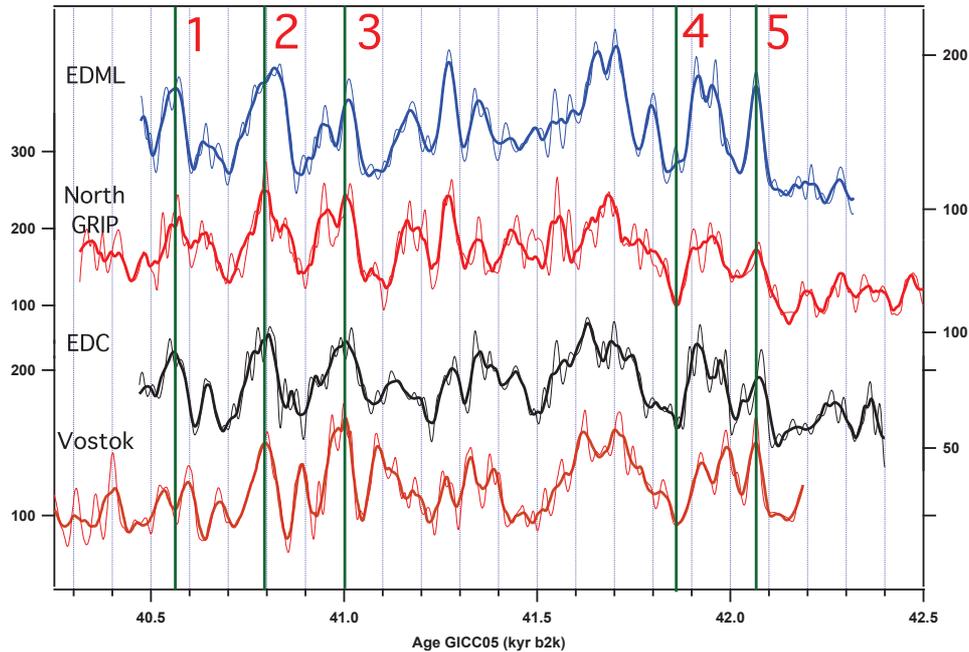


FIGURE 2.9 – Flux lissés de ^{10}Be à haute résolution durant l'excursion de Laschamp (40,2 – 42,5 ka b2k) synchronisés sur l'échelle des âges GICC05. Sont représentés, de haut en bas, les enregistrements de EDML (bleu), NGRIP (rouge), EDC (noir) et Vostok (marron) [Raisbeck et al., in preparation].

Smoothed high resolution ^{10}Be flux during the Laschamp excursion (40.2 – 42.5 kyr b2k) synchronized on the GICC05 age scale. Are represented, from top to bottom, EDML (blue), NGRIP (red), EDC (black) and Vostok (brown) [Raisbeck et al., in preparation].

L'inversion de Brunhes-Matuyama

La dernière fois que la polarité du moment dipolaire de la Terre s'est inversée a été durant l'inversion de Brunhes-Matuyama (M-B), il y a ~ 780 kyr BP. Cet événement a été intensivement étudié, aussi bien dans les sédiments marins que dans les roches volcaniques. Une synthèse des âges $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dans les laves de l'inversion de M-B supporte l'idée de l'existence d'un « précurseur » ~ 15 ka avant cet événement [Singer et al., 2005] et donc d'un âge absolu de 776 ± 2 ka pour l'inversion de M-B [Coe et al., 2004], en accord avec des calibrations astronomiques [Bassinot et al., 1994; Tauxe et al., 1996]. Parce-que cet événement remonte trop loin dans la passé, il fut impossible de l'étudier dans les carottes de glace jusqu'au forage d'EPICA Dome C qui fournit un enregistrement couvrant la période de temps nécessaire. La Fig. 2.10 montre le profil de ^{10}Be (concentrations et flux) entre 700 et 800 ka BP (échelle des âges EDC3), incluant l'inversion de M-B et son précurseur (zones grisées) [Raisbeck et al., 2006; Dreyfus et al., 2008]. En rouge est aussi inclus le flux

médian du flux de ^{10}Be (médiane mobile à 5 points). Cette procédure est nécessaire car, comme le montrent les profils bruts de concentrations et flux de ^{10}Be , il est nécessaire d'éliminer les pics anormalement élevés, ne pouvant être causés par des variations de production. Une hypothèse de Raisbeck et al. [2006] pour expliquer ce phénomène est un effet de concentration locale dû à une migration horizontale des impuretés aux interfaces des cristaux de glace à partir d'une certaine profondeur dans la carotte EDC. L'inversion de M-B et son précurseur couvrent les périodes 764 – 776 ka (vers la fin du Stade Isotopique Marin 19 (MIS 19)) et 788 – 798 kyr BP respectivement sur la chronologie EDC3 pour une incertitude de 6000 ans (2σ) sur l'âge absolu [Dreyfus et al., 2008]. Ces données suggèrent que la durée de l'inversion de M-B a été d'environ 12 000 ans, un intervalle de temps considérablement plus long que dans le cas de l'excursion de Laschamp. L'amplitude des pics de production de ^{10}Be sur cette période est cohérente avec les calculs de production en fonction de l'intensité du champ géomagnétique. En considérant la transition de M-B au milieu du pic de ^{10}Be , un âge de 770 ± 6 kyr BP (2σ) a été déduit, cohérent avec celui de Coe et al. [2004]. Une calibration récente du standard utilisé pour la méthode de datation $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$, par datation de la sanidine (roche magmatique) de Fish Canyon (FCs) à l'aide d'une méthode d'ajustement orbital, a été proposée par Kuiper et al. [2008]. En utilisant cette révision sur les mesures de Coe et al. [2004], on obtient un âge de $780,4 \pm 3,4$ kyr BP, plus vieux que celui obtenu dans la carotte de glace EDC.

Ces deux exemples d'enregistrement d'événements exceptionnels de variations du champ géomagnétique dans le ^{10}Be illustre la validité de la méthode. Il est donc possible de synchroniser ces variations longues du ^{10}Be dans la glace, d'origine géomagnétique, avec les changements de paléointensité enregistrés dans les sédiments marins afin d'obtenir une chronologie relative continue des proxies des climats pour ces deux réservoirs (voir le chapitre 6).

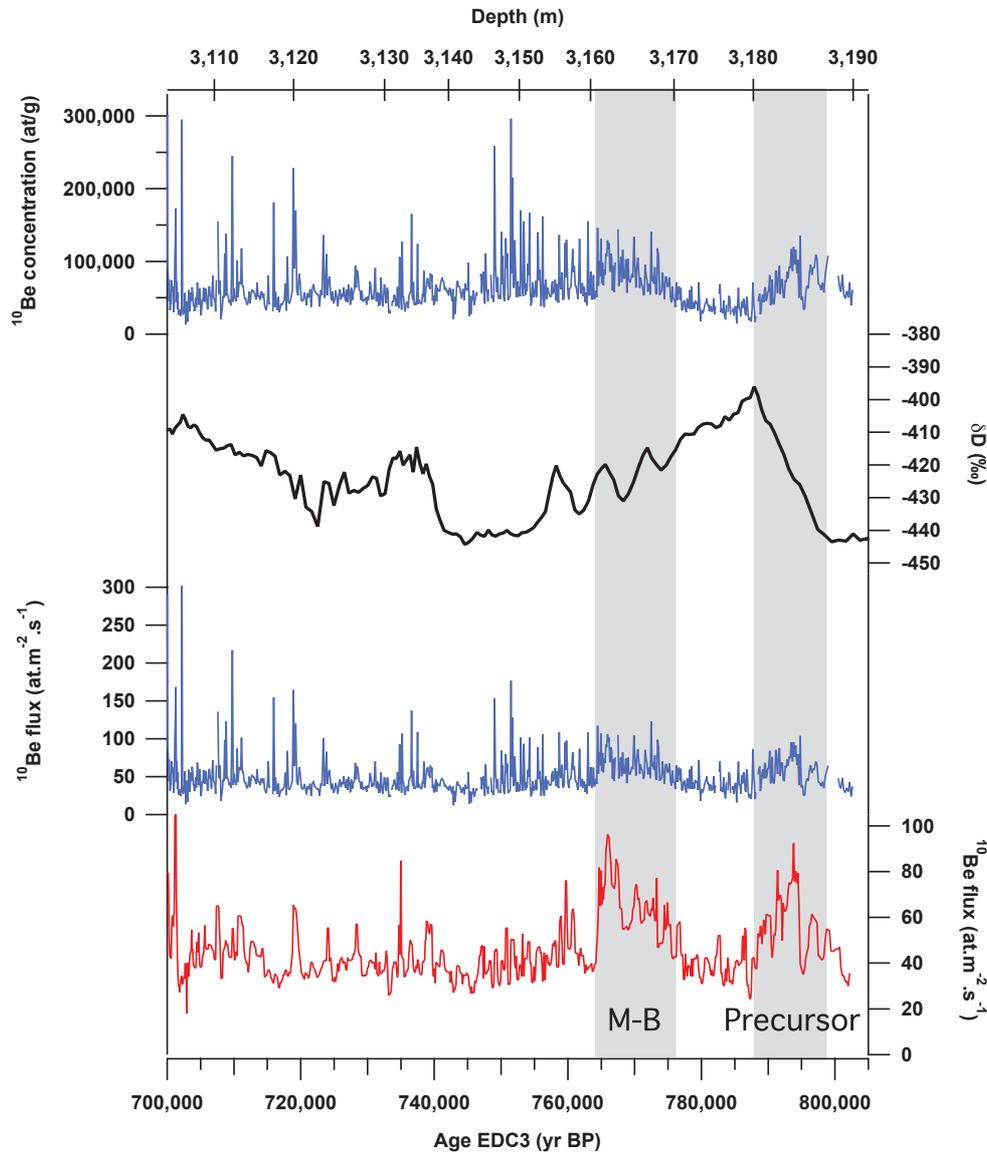


FIGURE 2.10 – Profil de ^{10}Be à EDC durant l'inversion de Brunhes-Matuyama. De haut en bas : le profil de concentrations en ^{10}Be , le δD du site, le flux de ^{10}Be et ce même flux après application d'une médiane mobile à 5 points afin d'éliminer les grands pics probablement dus à des effets de post-déposition (voir texte). Les zones grisées montrent l'inversion de Brunhes-Matuyama et son précurseur déterminés par les pics de ^{10}Be . Les enregistrements sont exprimés en fonction de la profondeur et de l'âge EDC3 [Raisbeck et al., 2006; Dreyfus et al., 2008].

^{10}Be profile at EDC during the Matuyama-Brunhes inversion. From top to bottom: the ^{10}Be concentration, the δD of the site, the ^{10}Be flux and the 5-point running median ^{10}Be flux in order to eliminate the huge spikes probably due to post-deposition effects (see text). The shaded areas highlight the Matuyama-Brunhes inversion and its precursor, as determined by the ^{10}Be peaks. The records are expressed as a function of the depth and the age (EDC3) [Raisbeck et al., 2006; Dreyfus et al., 2008].