

Schott Jean-Jacques , Di Mauro Domenico, Pérès Alain, Cafarella Lili, Magno Luigi, Cantin Jean-Michel, Zirizotti Achille, Meloni Antonio

Schott Jean-Jacques : Ecole et Observatoire des Sciences de la Terre, 5 rue René Descartes F-67084 Strasbourg Cedex, France. email: JeanJacques.Schott@eost.u-strasbg.fr  
 Di Mauro Domenico: Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, via di Vigna Murata, 605, Rome, Italie. email : dimauro@ingv.it  
 Pérès Alain : EOST, 5 rue René Descartes F-67084 Strasbourg Cedex, France. email : Alain.Peres@eost.u-strasbg.fr  
 Cafarella Lili : INGV, via di Vigna Murata, 605, Rome, Italie. email : cafarella@ingv.it  
 Magno Luigi: INGV, via di Vigna Murata, 605, Rome, Italie. email : magno@ingv.it  
 Cantin Jean-Michel: EOST, 5 rue René Descartes F-67084 Strasbourg Cedex JeanMichel.Cantin@eost.u-strasbg.fr  
 Zirizotti Achille : INGV, via di Vigna Murata, 605, Rome, Italie. email: zirizotti@ingv.it  
 Meloni Antonio : INGV, via di Vigna Murata, 605, Rome, Italie. email : meloni@ingv.it

Les activités scientifiques de la base Concordia au Dôme C comporteront l'observation permanente du champ magnétique. Cette station de haute latitude sera la seule, à l'intérieur du continent antarctique, qui mesurera le champ en vraie grandeur sans subir l'influence du champ crustal et des effets côtiers. Ces caractéristiques en feront une source de données utiles pour l'étude du champ d'origine interne. Le site est à l'intérieur de la calotte polaire, c'est-à-dire dans une zone de connexion directe des lignes de champ avec la magnétopause et donc une zone privilégiée pour l'étude de l'influence du vent solaire sur le champ d'origine externe. Cet article offre une synthèse des résultats obtenus au cours de trois campagnes de tests préliminaires, en 1999-2000, 2001 et 2003-2004.

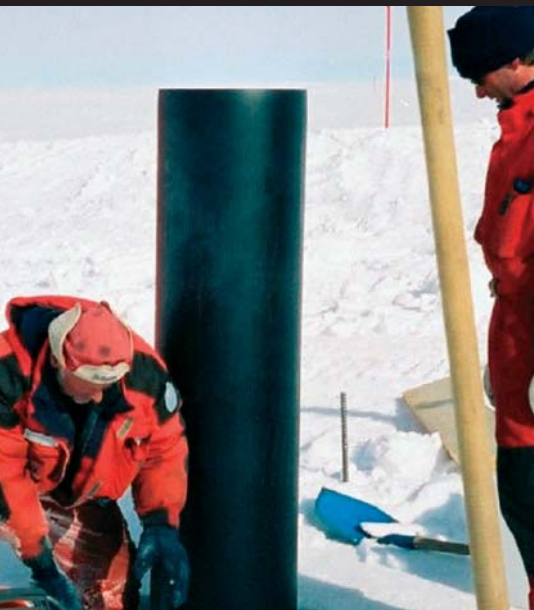
*The continuous measurement of the Earth's magnetic field will be one aspect of the scientific activities foreseen at the new Concordia station (Dome C, Antarctica). This high latitude station is located on the ice shelf, in a site where coast effects and crustal field influence will be negligible. It will be the only observatory on the whole continent providing absolute values of the field under such favourable conditions and will be therefore valuable for internal field studies. On the other hand, the observatory is located within the polar cap, that is within a region of the Earth where the field lines are connected to the magnetopause and will offer opportunities to study the interaction between the solar wind and the magnetosphere.*

*This paper summarizes the results gathered during three summer campaigns, in 1999-2000, 2001 and 2003-2004.*

## OUVERTURE D'UN

### 1. INTÉRÔTS SCIENTIFIQUES DE L'OBSERVATOIRE

Les observatoires magnétiques sont relativement nombreux sur le continent antarctique. Mais comme le montre la figure 1, seuls deux observatoires – Dumont d'Urville (DRV) et Scott Base (SBA) – effectuent des mesures du champ en vraie grandeur conformes aux standards modernes, c'est-à-dire appropriées pour des études sur le champ d'origine interne (champ du noyau liquide, qui est le champ principal) et le champ de la croûte. DRV est sous la responsabilité de l'EOST et bénéficie du soutien de l'IPEV en moyens logistiques et en personnel, SBA est un observatoire néo-zélandais. En nombre d'observatoires ayant cette qualification, le déséquilibre est flagrant avec la zone de haute latitude de l'hémisphère nord. De plus, DRV et SBA sont situés tous deux sur un socle rocheux extrêmement magnétique, produisant un champ local intense, ce qui est un



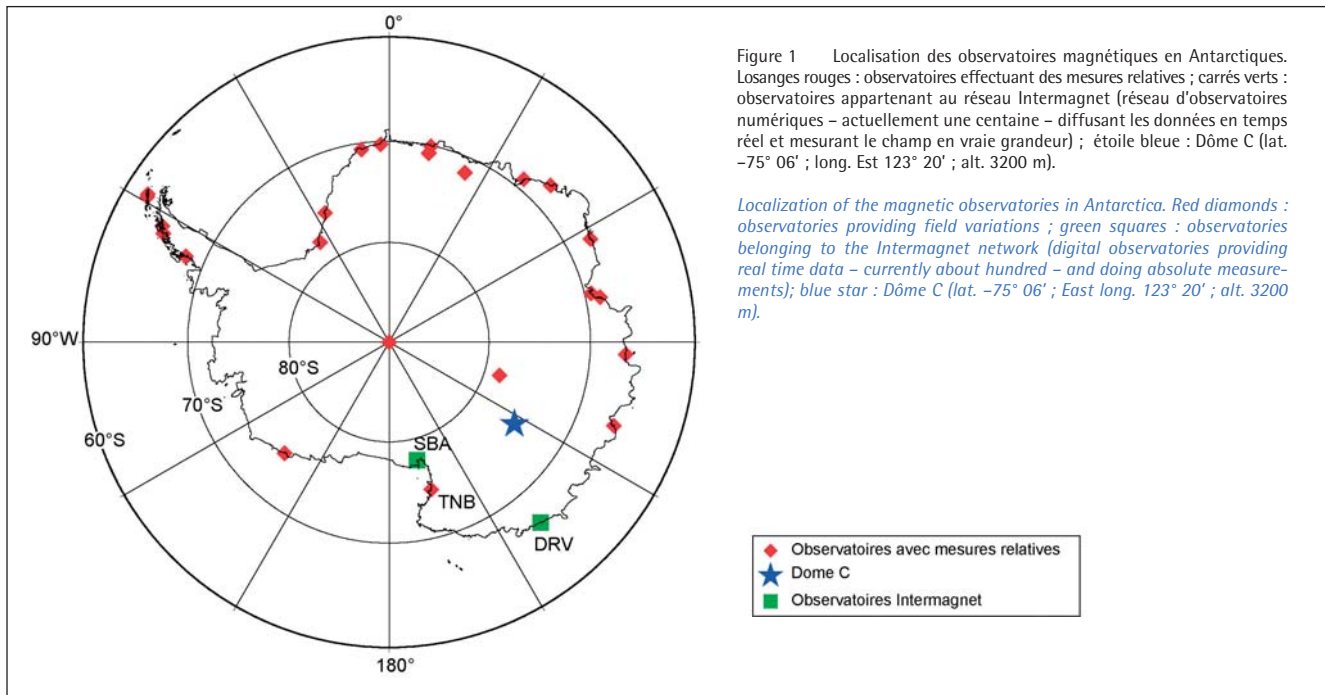


Figure 1 Localisation des observatoires magnétiques en Antarctique. Losanges rouges : observatoires effectuant des mesures relatives ; carrés verts : observatoires appartenant au réseau Intermagnet (réseau d'observatoires numériques – actuellement une centaine – diffusant les données en temps réel et mesurant le champ en vraie grandeur) ; étoile bleue : Dôme C (lat.  $-75^{\circ} 06'$  ; long. Est  $123^{\circ} 20'$  ; alt. 3200 m).

Localization of the magnetic observatories in Antarctica. Red diamonds : observatories providing field variations ; green squares : observatories belonging to the Intermagnet network (digital observatories providing real time data – currently about hundred – and doing absolute measurements); blue star : Dôme C (lat.  $-75^{\circ} 06'$  ; East long.  $123^{\circ} 20'$  ; alt. 3200 m).

## OBSERVATOIRE MAGNÉTIQUE AU DÔME C : ENJEUX SCIENTIFIQUES ET DÉFIS TECHNOLOGIQUES.

inconvenient sérieux lorsque l'on utilise les données d'observatoire pour calculer des modèles globaux (voir paragraphe 4 pour une discussion plus détaillée). Ils sont soumis en outre à des effets côtiers qui modifient le contenu spectral aux périodes diurnes et au-delà.

Dôme C (noté DMC par la suite) est sous la responsabilité scientifique conjointe de l'Ecole et Observatoire des Sciences de la Terre de Strasbourg et l'Istituto Geofisica e Vulcanologia de Rome et bénéficie du soutien logistique de l'IPEV et du PNRA. Il sera le seul observatoire du continent, mesurant le champ en vraie grandeur, sans être affecté par les effets mentionnés ci-dessus. Nul doute que les données recueillies dans ce site seront importantes non seulement pour la validation des modèles globaux, mais aussi dans la perspective de l'élaboration de modèles régionaux du champ et de sa variation séculaire (De Santis et al, 2002, Torta et al., 2002) ainsi que dans la production de cartes d'anomalies crustales de l'Antarctique (projet ADMAP).

Du point de vue du champ externe, DMC est situé dans la calotte polaire, qui est la zone comprise à l'intérieur de l'ovale auroral, près du pôle d'invariant. La distance d'une station au pôle d'invariant gouverne la géométrie des lignes de champ passant par cette station : plus elle est proche du pôle d'invariant, plus ses lignes de champ sont reliées, soit à la queue de la magnétosphère, soit directement à la magnétopause. L'ovale auroral et la calotte polaire sont deux régions dans lesquelles la variation spatiale des phénomènes d'origine externe (orages magnétiques, sous-orages, pulsations) est particulièrement rapide. Par conséquent, leur étude nécessite une densité d'observatoires plus élevée qu'ailleurs. C'est le cas, une fois encore, de l'hémisphère nord. Dans l'hémisphère sud, l'ensemble constitué par les observatoires de Vostok, Casey, Dôme C, Dumont d'Urville, Terra Nova Bay et Scott Base offrira de nouvelles opportunités d'étude de ces régions de hautes latitudes magnétiques. Une première étude réalisée grâce aux données de DMC de la campagne d'été

de 1 999 confirme les affirmations sur l'intérêt de ce nouveau site (Lepidi et al., 2003).

Les premiers résultats présentés ci-dessous ont été obtenus au cours de trois campagnes d'été effectuées en décembre 1999 – janvier 2000, décembre 2001 et décembre 2003 – janvier 2004.

### 2. DESCRIPTION DES ÉQUIPEMENTS ET DU PROTOCOLE DES MESURES

L'observatoire est construit sur le modèle classique des observatoires mesurant le champ en vraie grandeur. Ce type d'observatoire, qui a pour vocation de faire partie d'un réseau international comme le réseau Intermagnet, est à distinguer des chaînes d'observatoires automatiques dans lesquels les enregistrements se font sans présence humaine permanente, mais qui ne mesurent que les variations du champ. Ces

## Abri mes. absolues

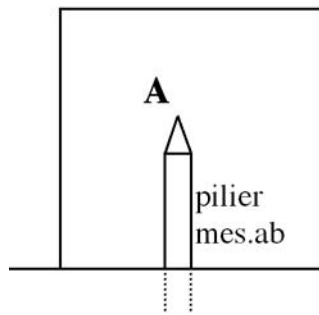
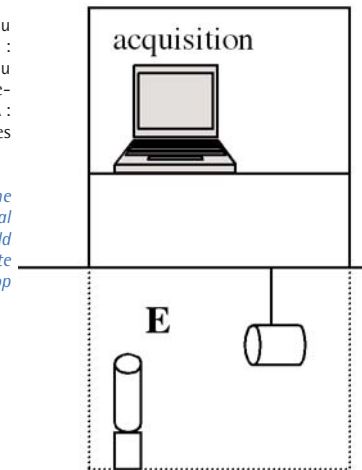


Figure 2. Schéma de l'équipement d'un observatoire de mesure du champ en vraie grandeur comme le sera celui de Dôme C. Point E : capteur triaxial dans l'abri des variomètres, enregistrant en continu les variations du champ. Ce capteur est complété par un magnétomètre à protons mesurant en continu l'intensité absolue du champ. Point A : point de référence de l'observatoire sur le pilier de mesures absolues situé dans « l'abri des mesures absolues ».

*Sketch of the equipment in a magnetic observatory measuring the absolute field, like Dome C observatory. E: location of the triaxial sensor in the "variometer shelter" recording continuously the field variations. In addition, a proton magnetometer records the absolute field intensity. A: reference point of the observatory, located on top of the absolute pillar set up inside the "absolute shelter".*

## Abri variomètres



chaînes d'observatoires (par exemple IMAGE en Arctique) sont dédiées à l'étude du champ d'origine externe.

Un observatoire qui mesure le champ en vraie grandeur comprend trois types d'instruments (fig. 2) :

- a) un capteur triaxial composé classiquement de 3 sondes à vanne de flux, qui mesure les variations du champ dans deux directions horizontales et la direction verticale. A Dôme C, bien que l'inclinaison du champ soit élevée et donc que la direction horizontale soit difficile à définir avec précision, les capteurs horizontaux sont orientés respectivement dans la direction du champ (nord-sud magnétique) et

perpendiculairement à cette direction (est-ouest magnétique). Le capteur triaxial a été réalisé par le Danish Meteorological Institute. Il équipe plus d'une centaine d'observatoires dans le monde. Le constructeur l'a adapté pour qu'il supporte les basses températures de Dôme C. Le pas d'échantillonnage est d'une mesure par seconde.

- b) Cette mesure vectorielle est complétée par une mesure scalaire de l'intensité du champ, à l'aide d'un magnétomètre à protons à effet Overhauser, fabriqué par la société canadienne GEM. Cette mesure permet de vérifier l'étalonnage du capteur triaxial et de détecter une éventuelle dérive instrumentale.

Les deux appareils sont installés dans un abri, appelé traditionnellement abri des variomètres. Plus précisément, ils se trouvent sous l'abri, dans une cave, à 2,5 mètres de profondeur. Il y règne, en campagne d'été, une température constante de  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$  (qui est, soulignons-le, une température très inhabituelle pour un capteur magnétique terrestre). Le capteur triaxial est posé sur un pilier enfoncé d'un mètre cinquante dans le névé (fig. 3), la sonde du magnétomètre à protons est suspendue au plafond.

- c) Un appareil de mesures absolues. L'appareil communément utilisé est constitué d'un théodolite amagnétique muni d'une sonde à vanne de flux disposée parallèle-



Figure 3. Variomètre triaxial à vanne de flux installé sur un pilier dans la cave de l'abri des variomètres. Le pilier est enfoncé dans le névé sur une hauteur de 1,5m. Le variomètre est de type suspendu, enregistrant trois composantes du champ, respectivement dans les directions N-S magnétique, E-W magnétique et verticale, au rythme d'une mesure par seconde pour chaque composante.

*Suspended triaxial fluxgate variometer installed on a pillar in the cave beneath the variometer shelter. The pillar is buried into the ice over 1.5m. The variometer records field components respectively in magnetic N-S, magnetic E-W and vertical directions, at a one second sampling rate.*

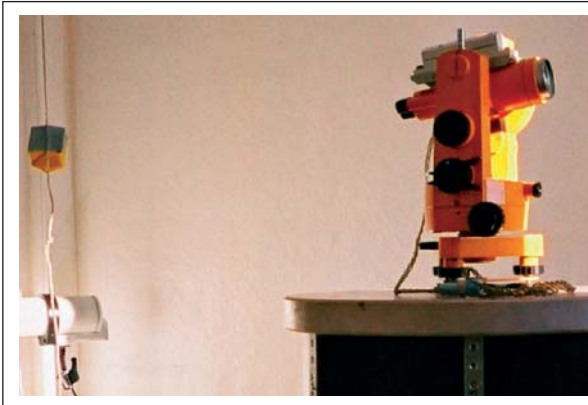


Figure 4 Théodolite amagnétique équipé d'un capteur à vanne de flux pour les mesures de déclinaison et d'inclinaison du champ magnétique. Il est du type Zeiss 10A. Les lectures se font en grades et leur précision nominale est 0.001 grade. Les mesures de D et I sont complétées par des mesures d'intensité réalisées avec un magnétomètre à protons. D, I, F permettent de restituer le champ complet.

*Magnetic theodolite equipped with a fluxgate sensor for doing magnetic declination and inclination measurements. The theodolite is a Zeiss 10A type with readings in grades. Its nominal accuracy is 0.001 grade. D and I measurements are completed with intensity measurements carried out with a proton magnetometer. The absolute field is completely determined by D, I, F.*

ment à l'axe optique du théodolite (fig. 4). A l'aide de cet instrument, on mesure classiquement la déclinaison D et l'inclinaison I du champ par une méthode de zéro (ou une variante) qui évite les problèmes d'étalonnage et de dérive de la sonde. Les mesures de D et I sont complétées par des mesures d'intensité F effectuées avec un magnétomètre à protons semblable à celui qui est installé dans l'abri des variomètres. Ces mesures sont, dans l'état actuel de la technologie, nécessairement effectuées manuellement, à intervalles réguliers (typiquement une semaine), par un observateur entraîné.

Le théodolite est installé, pour chaque série de mesures, sur un pilier stable qui constitue le véritable point de référence de l'observatoire (fig. 5a, b, c). C'est à ce point que sont rappor-

tées toutes les mesures du champ. Le pilier sur lequel sont effectuées les mesures du champ est situé dans un abri appelé traditionnellement abri des mesures absolues.

### 3. ENREGISTREMENTS DES VARIATIONS DU CHAMP

Nous disposons en tout, à l'issue des trois missions, de 81 journées de données complètes. Les enregistrements au pas d'une minute ont été traités conformément aux directives du réseau mondial Intermagnet. La figure 6 montre un exemple d'enregistrement pour les journées du 22 et 23 janvier 2004 dans les observatoires d'Amsterdam (AMS), Crozet (CZT), Kerguelen (PAF), Dumont d'Urville (DRV) et Dôme C (DMC). On y distingue le déclenchement d'un orage magnétique à 1h36 TU et les

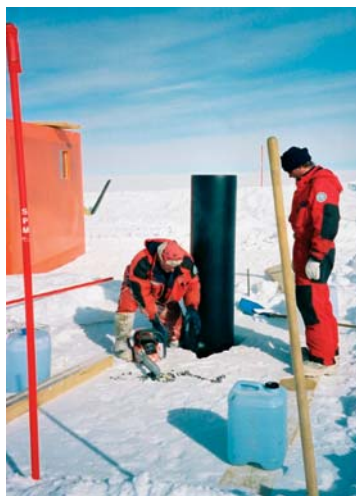
différences très nettes dans son amplitude et son développement selon que l'on se trouve dans la zone sub-aurorale (AMS, CZT, PAF), aurorale (DRV) ou polaire (DMC).

### 4. LE CHAMP EN VRAIE GRANDEUR

Le champ en vraie grandeur n'est connu qu'aux instants des mesures absolues. Pour connaître le champ (au point A) à tout instant, on admet que ses variations sont les mêmes en A et en E (fig. 2) et on applique la relation suivante :

$$B(A, t_a) = BV(E, t_a) + B_{ib}(t_a) \quad (1)$$

où  $B_{ib}(t_a)$  est constitué des "valeurs de base" des 3 composantes du variomètre. Pour la composante horizontale, de direction E-W magnétique, la valeur de base n'est constituée que de la valeur d'offset instrumental et de la différence de champ entre A et E.



Figures 5a, b, c. Photos illustrant le remplacement du pilier de mesures absolues au cours de la campagne 2003-2004. L'ancien pilier, en bois, trop instable à cause du dessèchement du bois, a été remplacé par un pilier en polyéthylène enfoncé de 2,60m dans la glace. Trois étapes du remplacement sont illustrées : a) arrachement de l'ancien pilier, après enlèvement de l'abri ; b) mise en place du nouveau pilier ; c) repositionnement de l'abri, enfilé par-dessus le pilier qui passe à travers un trou ménagé dans le fond de l'abri.

*The previous pillar, made up in wood, was unstable due to wood drying out. During the last 2003-2004 campaign, it was replaced by a polyethylene pillar, penetrating 2.6m into the ice. Three steps are illustrated: a) removal of the old pillar (after having put away the shelter); b) new pillar setting up; c) shelter put over the pillar which passes through a hole cut up into the floor of the shelter*

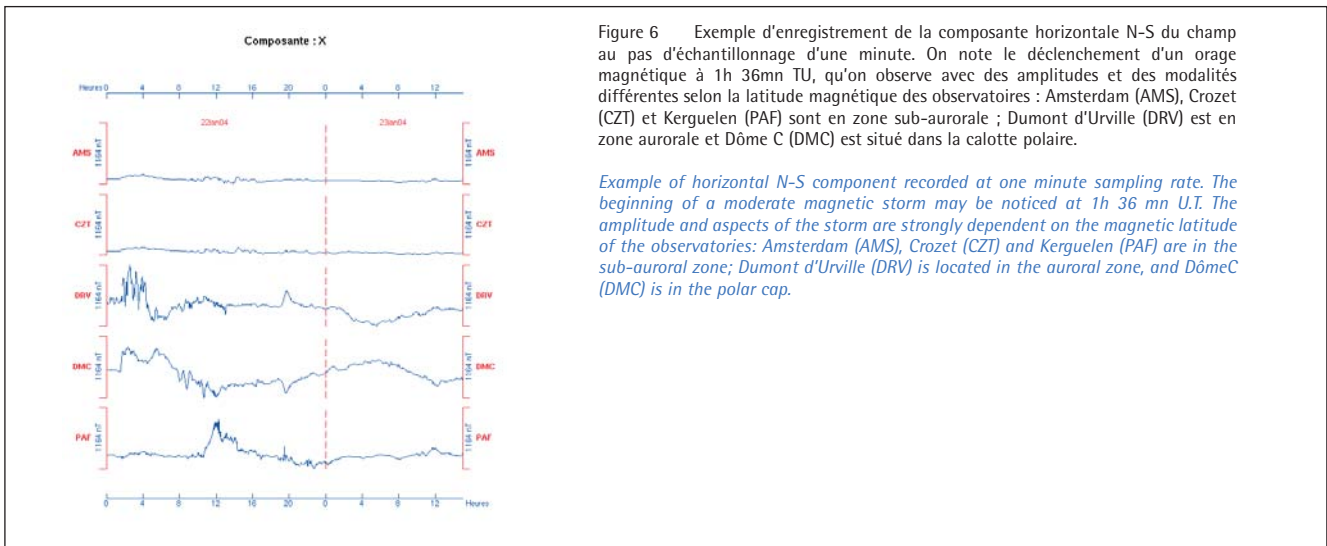


Figure 6 Exemple d'enregistrement de la composante horizontale N-S du champ au pas d'échantillonnage d'une minute. On note le déclenchement d'un orage magnétique à 1h 36mn TU, qu'on observe avec des amplitudes et des modalités différentes selon la latitude magnétique des observatoires : Amsterdam (AMS), Crozet (CZT) et Kerguelen (PAF) sont en zone sub-aurorale ; Dumont d'Urville (DRV) est en zone aurorale et Dôme C (DMC) est situé dans la calotte polaire.

*Example of horizontal N-S component recorded at one minute sampling rate. The beginning of a moderate magnetic storm may be noticed at 1h 36 mn U.T. The amplitude and aspects of the storm are strongly dependent on the magnetic latitude of the observatories: Amsterdam (AMS), Crozet (CZT) and Kerguelen (PAF) are in the sub-auroral zone; Dumont d'Urville (DRV) is located in the auroral zone, and Dôme C (DMC) is in the polar cap.*

Pour la composante horizontale d'orientation N-S magnétique et la composante verticale, s'y ajoutent un champ de compensation créé par une bobine cylindrique qui entoure les capteurs pour éliminer la plus grande partie du champ terrestre. Cette disposition est essentiellement imposée par la dynamique limitée du convertisseur analogique/numérique du système d'acquisition.

En réalité, dans la formule (1), l'inconnue est le champ  $B_{10}(t_a)$  que l'on obtient simplement en soustrayant  $B_v(E, t_a)$  de  $B(A, t_a)$ . On obtient ainsi un échantillonnage de  $B_{10}(t_a)$ . On calcule ensuite  $B_{10}$  à n'importe quel instant  $t$ , fonction de l'échantillonnage de  $B_v$ , par une interpolation des valeurs  $B_{10}(t_a)$ . On en déduit le champ en vraie grandeur, au point A, par une formule analogue à (1), dans laquelle  $t_a$  est remplacé par  $t$ , instant quelconque, lié au pas d'échantillonnage du champ  $B_v$ .

La figure 7 illustre le traitement effectué sur les données de janvier 2004. Les courbes bleues représentent

les valeurs moyennes horaires en vraie grandeur, les traits horizontaux mauves, les moyennes journalières, les traits en pointillé noir les moyennes mensuelles. La courbe verte du tracé inférieur constitue un test de cohérence entre l'intensité du champ mesurée et l'intensité recalculée à partir des valeurs des trois composantes X, Y, Z. Cette courbe fait apparaître une dérive instrumentale de 3 nanoteslas sur le mois dont l'origine reste à établir. Elle est vraisemblablement liée à une dérive de la température dans l'abri des variomètres.

La figure 8 établit une comparaison entre les évolutions des moyennes journalières de la composante verticale, sur les trois années, dans les observatoires DRV, SBA et DMC (courbes bleues) ainsi qu'une comparaison des champs des trois observatoires avec ceux prédits par les modèles IGRF (International Geomagnetic Reference Field) 1995 et 2000. A DRV et SBA, un accord relativement satisfaisant n'est obtenu qu'à la condition de tenir compte d'un

"biais" d'observatoire, qui représente le champ crustal, très important. Il est de  $-2820$  nT à DRV et de  $-3751$  nT à SBA, pour la composante verticale (Mandea et Langlais, 2002). Le bon accord observé à DMC n'a nécessité aucune correction. C'est un résultat remarquable si l'on se réfère à l'étude de Mandea et Langlais (2002) qui montre qu'un grand nombre d'observatoires sont contaminés par le champ crustal. Des différences mineures subsistent néanmoins comme on le voit pour DRV et SBA (notons au passage l'intérêt d'un enregistrement continu pour l'observation de ce fait). Elles traduisent l'existence, bien connue en Europe, de spécificités régionales de la variation séculaire (Korte et Haas, 2000).

## 5. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Les tests réalisés au cours des trois campagnes d'été, de 1999-2000, 2001 et 2003-2004 ont montré qu'il était possible d'installer au Dôme C,

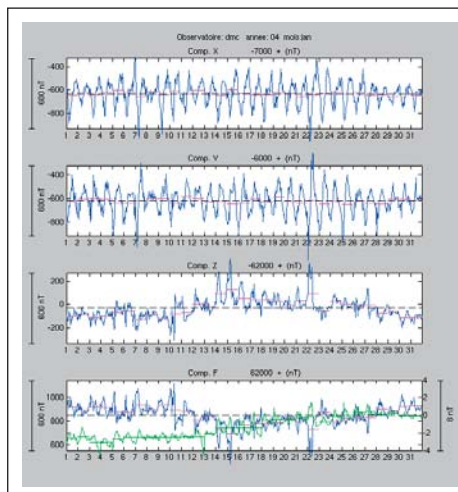


Figure 7 Exemple de traitement permettant de calculer les composantes du champ en vraie grandeur par combinaison des mesures absolues et des variations. Courbes bleues : moyennes horaires ; traits horizontaux mauves : moyennes journalières ; tirets horizontaux noirs : moyennes mensuelles. La courbe verte du dessin inférieur est la différence entre l'intensité du champ mesurée et l'intensité recalculée à partir des trois composantes X, Y, Z. Ce test de cohérence fait apparaître une dérive vraisemblablement due à une dérive thermique de l'électronique du variomètre triaxial.

*Example of data processing, mixing up absolute measurements and variations in order to compute one minute absolute field values. Blue line: hourly mean values; purple horizontal segments: daily means; black dashed lines: monthly means. Green line in the bottom drawing: difference between measured intensity and intensity computed from X, Y, Z components used as a consistency test. The drift observed is probably due to a thermal instability of the triaxial variometer electronics.*

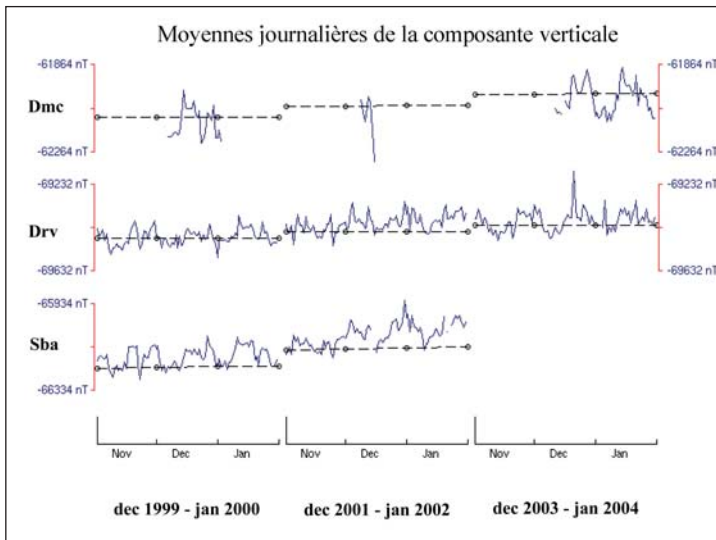


Figure 8 Synthèse, sur les trois ans, des valeurs moyennes journalières de la composante verticale et comparaison avec le champ du modèle IGRF pour les stations de Dôme C (DMC), Dumont d'Urville (DRV) et Scott base (SBA). Courbes bleues : moyennes journalières ; cercles et tirets noirs : valeurs de la composante verticale données dans chacune des stations par le modèle global IGRF (International Geomagnetic Reference Field). Voir le paragraphe 4 pour des commentaires plus détaillés.

*Three year measurements summarized with the daily means of the vertical component and comparison with the IGRF model for the stations of DômeC (DMC), Dumont d'Urville (DRV) and Scott base (SBA). Blue lines: daily means; black circles and dashed lines: vertical component predicted by the IGRF model (International Geomagnetic Reference Field) in each station. See section 4 for further comments.*

malgré les conditions de températures extrêmes, un observatoire magnétique répondant aux exigences modernes de qualité des données, comme l'illustrent les figures 7 et 8. Un effort doit cependant être encore accompli pour atteindre une stabilité parfaitement compatible avec les normes imposées par le réseau Intermagnet par exemple. En raison de l'insignifiance des perturbations dues au champ crustal, on aura alors des conditions d'observation du champ incomparablement meilleures que dans les observatoires côtiers et que dans beaucoup d'autres observatoires à travers le monde. On peut cependant éprouver quelques inquiétudes sur le long terme relativement à la stabilité du pilier de mesures absolues, qui, comme le décrit la section 4, est le point de référence de l'observatoire. En effet, sa stabilité dépendra de celle de la glace dans laquelle il est implanté. Nous n'avons à ce jour aucune indication sur son comportement local.

Aussi bien l'allure des variations à court terme (fig. 6) que celle de la variation séculaire (fig. 8) montre que le comportement du champ au Dôme C ne reproduit pas celle des champs observés dans les stations voisines, distantes en moyenne de 1 100 km. Ce résultat est attendu pour ce qui concerne les variations externes en raison de leur grande variabilité spatiale dans les régions aurorales et polaires. Il n'est pas surprenant non plus pour le champ interne dont la variation séculaire présente un caractère régional marqué. Pour les deux problématiques, ces remarques soulignent l'intérêt d'un observatoire magnétique à Dôme C.

Enfin, un observatoire magnétique opérant dans ces conditions extrêmes de température peut être un point d'appui très utile pour d'autres expérimentations. On peut citer le projet de test de capteurs magnétiques destinés à une exploration de Mars (projet Centre d'Etudes des Environnements Terrestres et Planétaires, St-Maur, France – Danish Space Research Institute, Copenhague, Danemark). Leur exposition à la température ambiante durant une année reproduira d'une manière réaliste les conditions martiennes et la comparaison de leurs enregistrements avec ceux, dûment contrôlés de l'observatoire, constituera une validation significative.

## REMERCIEMENTS

Les équipements de l'observatoire (abris, capteurs, acquisitions) ont été financés, pour la partie française, par l'IPEV, et pour la partie italienne, par le PNRA. Leur installation a été réalisée par l'IPEV et les modifications ultérieures conjointement par l'IPEV et le PNRA. Les missions du personnel français ont été financées par l'IPEV.

## BIBLIOGRAPHIE

- ADMAP. British Antarctic Survey, 2001
- De Santis, A., Torta, J.M. et Gaya-Piqué, L.R., 2002. The first Antarctic geomagnetic reference model (ARM). *Geophys. Res. Lett.*, 29, (8), 10.1029/2002GL0144675.
- Korte, M. et Haak, V., 2000. Modelling European magnetic repeat station and survey data by SCHA in search of time-varying anomalies. *Phys. Earth. Plan. Int.*, 122, 205-220.
- Lepidi, S., Cafarella, L., Francia, P., Meloni, A., Palangio, P. et Schott, J.J., 2003. Low frequency geomagnetic field variations at Dome C (Antarctica). *Annales Geophysicae*, 21, 923:932.
- Mandea, M. and Langlais, B., 2002. Observatory crustal magnetic biases during MAGSAT and Orsted satellite missions. *Geophysical Research Lett.*, 29 (15), 8003, doi: 2001GL013693
- Torta, J.M., De Santis, A, Chiappini, M. et von Frese R.R.B., 2002. A model of the secular change of the geomagnetic field for Antarctica. *Tectonophysics*, 347, 179:187.