

CONTRIBUTION DE LA FRANCE À L'OBSERVATION DU CHAMP MAGNÉTIQUE TERRESTRE

CONTRIBUTION OF FRANCE TO THE OBSERVATION OF THE EARTH'S MAGNETIC FIELD

J. BITTERLY¹, M. MANDEA ALEXANDRESCU¹, J.-J. SCHOTT², J. VASSAL³.

¹Institut de Physique du Globe de Paris, Observatoire magnétique national, carrefour des 8 Routes, 45340 Chambon la Forêt

²École et Observatoire des Sciences de la Terre, 5, rue René Descartes, 67084 Strasbourg Cedex

³Institut de Recherche pour le Développement, LGI, 32, avenue Henri Varagnat, 93143 Bondy Cedex

ABSTRACT

The aim of our paper is to show the importance of geomagnetic data to the knowledge of the main geomagnetic field and its secular variation, and also of the temporal, in order to survey the Earth's environment.

Firstly, we recall the results obtained on the high-resolution secular variation of the geomagnetic field in two sites situated in Western Europe (London and Paris) over the last four centuries. The declination data are remarkably well correlated between the two sites and can be used to construct a more complete and accurate synthetic series, in which many gaps or times with scattered or uncertain data can be amended. The built declination synthetic series is believed to be valid for much Western Europe, and information about the secular variation in this area are obtained.

But, to characterise the geomagnetic field, the spatial variations are also important. To monitor the field variations an international program has been developed since 1988. Under the INTERMAGNET program, high quality data from a global network of geomagnetic observatories are sent in near real time via satellite and computer links to world-wide collection and dissemination points called "Geomagnetic Information Nodes" or GIN's. All INTERMAGNET observatories operate with the same common specifications (resolution, filtering, sampling rate, data formats etc.). Today, the INTERMAGNET observatories data-sets of 1.0 minute values with good baselines are available within minutes and hours from about 60 observatories. An other INTERMAGNET goal is to fill out the global geomagnetic observatory distribution. In fact, a recent study specified the minimum number of equally spaced observatories needed to do a degree and order 10 spherical harmonic model of the main field. The model required a minimum of 92 observatories on about a 2,000 km spacing. Eight sites would require ocean bottom observatories. There are large empty areas in the Southern hemisphere and in the oceans.

The 14 magnetic observatories maintained by the France in the frame of project named "Observatoire Magnétique Planétaire" are an important contribution to the INTERMAGNET program and to K indices network.

The geomagnetic observatories are the most important sources of data in building secular varia-

tion models. These models give information on the motion of the fluid core and provide tests for the different models of field generation which have been put forward. Also, the shortest period components of the secular variation reaching the Earth's surface which are not completely screened by the mantle make it possible to estimate some average value of its electrical conductivity, recently evaluated around 15 S/m. On the other hand, techniques based on long period electromagnetic induction processes provide profiles down to the upper part of the lower mantle, and 3-D conductivity structures of the Earth can be obtained.

Although the permanent observatory yields continuous data for a single point, several other stations are required to describe the spatial variations. In France, the last measurement campaign took place in the summer of 1997. The data was added to the existing data-base. The comparison between the maps of declination for the epochs 1948 and 1997 shows that the declination varied about 5.5° in the last half of century. In Africa a network of 38 repeat station has also been established between 1992-1994.

In this epoch, when new and exciting satellite missions (CERSTED, Sac-C/MMP, CHAMP) would investigate hitherto hidden features of the geomagnetic field, the role of ground observatories could be interrogated. But, only the combined analysis of data obtained from geomagnetic observatories and satellite missions will drastically enhance the signal-to-noise ratio and the extraction of the various sources of the field, enabling a unique separation hereof.

1. INTRODUCTION

L'étude du champ magnétique terrestre est l'une des plus anciennes disciplines de la physique du Globe. Dans le passé les mesures du champ géomagnétique, qui ont mobilisé de nombreux observateurs et exigé beaucoup d'efforts et de temps, ont servi surtout à des descriptions du champ, de sa variation temporelle et à des calculs de modèles de potentiel géomagnétique. C'est au cours des dernières décennies que le géomagnétisme a apporté des informations essentielles à une meilleure compréhension de la dynamique de la planète : en tirant des mesures faites dans les observatoires et à bord des satellites de précieuses informations sur les processus qui ont leur siège dans le noyau fluide de la planète, sur les interac-



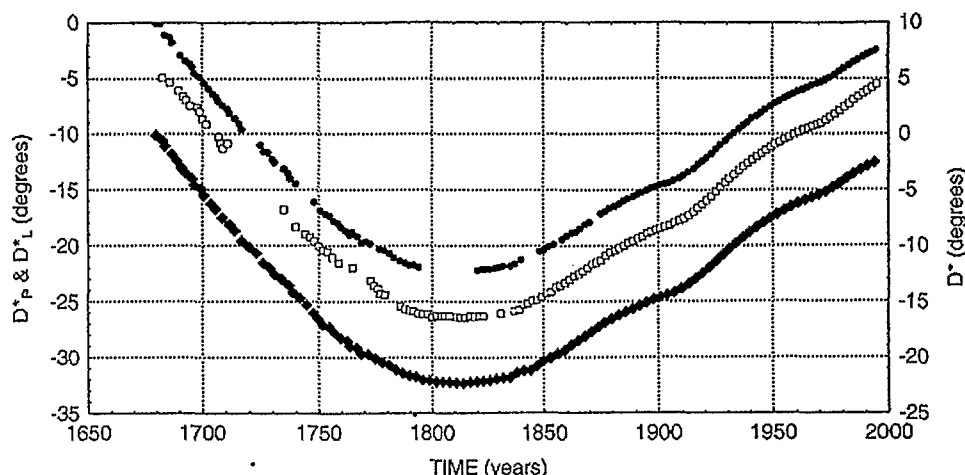


Fig. n°1 : Courbes des moyennes annuelles de la déclinaison, corrigée et ajustées aux repères de l'observatoire de Chambon la Forêt (cercles pleins) et à ceux d'Hartland (carrés ouverts) ainsi que la courbe synthétique de la déclinaison (losanges pleins).

tions entre le noyau et le manteau et sur certaines propriétés du manteau profond ont été obtenues. La théorie "dynamo", qui tente d'expliquer le mécanisme qui maintient le champ magnétique terrestre a, dans le même temps, commencé à prendre en compte l'ensemble des observations terrestres et spatiales disponibles.

Le champ magnétique terrestre est un phénomène complexe, riche d'échelles spatiales et de constantes de temps variées. Il est la somme, en un point de la surface de la Terre, de deux parties, dont la première a ses sources à l'intérieur de la Terre, la seconde à l'extérieur.

Le champ interne est lui-même la somme de deux parties : le champ principal et le champ crustal.

Le champ principal, connu aussi comme le "champ nucléaire", a son origine à plus de 2 900 km de profondeur, dans le noyau terrestre. En première approximation, sa géométrie générale à la surface de la Terre est celle du champ d'un dipôle qui serait situé au centre de la planète et dont le support ferait un angle de 11° avec l'axe de rotation ; son intensité varie entre 60 000 nT aux pôles et 30 000 nT à l'équateur. Le champ principal, représentant en moyenne 99 % du champ observé à la surface du Globe, est engendré par des courants électriques circulant dans la partie fluide du noyau de la Terre, composée principalement de fer conducteur. Si le noyau était au repos, ces courants disparaîtraient en quelques dizaines de milliers d'années par effet Joule. Mais le fluide conducteur en mouvement coupe les lignes de force du champ magnétique ; de nouveaux courants électriques sont induits comme lorsque l'on modifie la géométrie d'un circuit conducteur fermé placé dans un champ magnétique. Ces courants, à leur tour, créent un champ magnétique. Ce processus permet de transformer de l'énergie mécanique en énergie magnétique ; c'est la dynamo terrestre, ou géodynamo.

La variation temporelle du champ principal sur des périodes de quelques dizaines à quelques centaines d'années est connue comme "la variation séculaire". Si, en

première approximation, l'évolution du champ principal apparaît régulière, il est possible de constater, à intervalles irréguliers, des changements de tendance très rapides de cette évolution (1-2 ans), quasi-simultanés en de larges domaines de la surface de la Terre. Mis en évidence depuis peu de temps, ce phénomène est appelé "secousse géomagnétique" ou "saut de variation séculaire" (Courillot et al., 1978, Alexandrescu et al., 1996).

Le champ principal possède, en outre, la propriété remarquable de s'inverser. Ces inversions de polarité s'accompagnent d'une baisse significative de son intensité. Durant les derniers millions d'années les inversions de polarité se sont produites en moyenne tous les 200 000 ans, mais avec une cadence irrégulière (Valet et Courillot, 1992). Ainsi la dernière inversion observée remonte à 780 000 ans.

Les sources du champ crustal sont des roches aimantées situées dans les quarante à cinquante premiers kilomètres de la Terre, soit au-dessus de la surface isotherme dite de Curie ; surface dont la température est égale à la température de Curie maximale des constituants magnétiques des roches (par exemple celle de l'hématite est de 670°C). Ce champ crustal est beaucoup plus faible, en moyenne, que le champ principal ; mais il peut néanmoins atteindre, à la surface du Globe, par endroits, plusieurs dizaines de milliers de nanoteslas (nT) : à Kursk (400 km sud de Moscou) le champ varie de 45 000 à plus 195 000 nT sur 250 km, et à Kiruna (Suède) sa valeur maximale est de plus de 360 000 nT. L'étude de ce champ, connu aussi sous le nom de "champ anormal", est réalisée à partir des levés magnétiques terrestres et aéroportés, des profils magnétiques en mer et des mesures fournies par les satellites de basse altitude. Une de ses applications importantes a été la mesure de la vitesse de dérive des continents à partir de la cartographie des anomalies magnétiques marines.

Le champ externe est engendré par des courants électriques circulant dans l'ionosphère et dans la magnétosphère, au-delà d'une altitude de quelque 100 km. Ces courants varient dans le temps en réponse aux marées thermiques de l'ionosphère, aux interactions entre le vent solaire et la magnétosphère, aux variations de l'activité solaire. L'amplitude du champ externe est très variable, de quelques dizaines à quelques milliers de nT. Ses variations temporelles sont principalement déterminées par les mouvements de la Terre et du Soleil (les principales périodes sont celles de 24 heures, 27 jours, 1 an), ainsi que par l'activité solaire (le cycle solaire de 11 ans et ses harmoniques). Schématiquement, les conséquences des éruptions solaires se traduisent d'abord par une intense émission de rayons X et ultraviolets UV, suivie par des protons qui peuvent atteindre la Terre en une heure, menaçant au passage d'irradier les spationautes. Finalement une éjection d'autres particules chargées électriquement atteint le proche environnement terrestre deux jours après l'éruption en provoquant les aurores boréales et les orages magnétiques. Ces derniers, s'ils sont intenses, peuvent perturber les réseaux de distribution électrique, comme cela s'est produit au Québec en mars 1989. Le champ magnétique terrestre est un phénomène très important pour notre existence : sans lui, les particules chargées venues du Soleil détruiraient vraisemblablement toute vie sur terre. L'objectif de cet article est de montrer l'apport fondamental de longues séries de données d'observatoire à la connaissance du champ géomagnétique principal et de sa variation séculaire ainsi qu'à la détermination des variations transitoires du champ magnétique, domaine très utile à la surveillance de l'environnement terrestre. Après quelques repères historiques nous examinerons l'organisation actuelle des réseaux d'observation dans le cadre des programmes internationaux, on apportera ensuite un éclairage d'actualité sur la contribution française au réseau mondial et on précisera, par quelques exemples, l'apport des données d'observatoires dans les thèmes de recherche abordés au cours des cinq dernières années par les équipes françaises.

2. QUATRE SIÈCLES D'OBSERVATION GÉOMAGNÉTIQUE EN EUROPE

En Europe les premières mesures clairement documentées de la déclinaison magnétique (angle entre le plan méridien géographique du lieu et le plan méridien magnétique repéré par la direction de l'aiguille aimantée de la boussole), ont été effectuées en 1510 à Rome, en 1541 à Paris et en 1580 à Londres (Felgentraeger, 1892, Malin et Bullard, 1981, Alexandrescu, 1996). Les mesures d'inclinaison (angle entre le vecteur champ et le plan horizontal) sont réalisées un siècle plus tard. Très rapidement navigateurs, géographes et mathématiciens s'intéressent à la connaissance du champ magnétique. En 1600, avec "De Magnete" de William Gilbert, qui affirme l'origine interne du champ magnétique de la terre (Magnus magnes ipse

est Globus terrestris), le géomagnétisme fait son entrée comme science de la nature et ne se limite plus à une technique empirique de navigation. Entre 1698 et 1700 Edmund Halley fait deux voyages en Atlantique ayant comme but la mesure de la déclinaison, et la première carte pour cette zone est publiée en 1701. Les seules données d'observations de déclinaison et d'inclinaison qui permettent une étude sur un intervalle de près 400 ans sont celles de Paris et de Londres. Alexandrescu et al. (1997) ont récemment repris de façon critique la construction d'une des plus longues séries géomagnétiques existantes, celle de Paris. La similitude des séries de déclinaison et d'inclinaison à Paris et à Londres est frappante et rassurante à la fois. L'examen comparé de la variation séculaire dans ces deux sites, depuis 1680, a permis de reconstruire une courbe "synthétique" de la variation temporelle de la déclinaison (Figure n°1) et de mieux comprendre et caractériser la variation séculaire du champ principal durant les quatre derniers siècles.

Après 1700 les observations du champ magnétique terrestre se sont multipliées à l'occasion des grandes explorations et, vers 1830, l'allure de ses variations est déjà connue à l'échelle globale. Utilisant les observations disponibles et établissant la première analyse mathématique du champ magnétique à la surface du globe, Gauss (1839) propose une description permettant de calculer, en chaque point de la terre, la valeur des éléments du champ magnétique. Les premières observations continues datent de cette époque (création en 1834 d'un observatoire à Göttingen, en 1848 à Greenwich et en 1883 à Saint Maur en France). La communauté scientifique recommandait alors la création d'un réseau d'observatoires magnétiques permanents. Ce sont les grands programmes internationaux, depuis la première année polaire en 1882-1883, qui ont accéléré le développement de ce réseau mondial : 1932-1933 la seconde année polaire, 1957-1958 l'année géophysique internationale, 1963 le levé magnétique mondial aéroporté et 1979 le satellite MAGSAT.

L'évolution au cours du temps du champ géomagnétique principal reste l'une des principales sources d'information sur les mouvements qui animent le noyau fluide de la terre et donc sur les caractéristiques de la géodynamo qui entretient ce champ magnétique. Le champ géomagnétique principal est un processus dynamique dont les constantes de temps sont plus courtes qu'il n'était imaginé ; on observe des variations notables sur des intervalles de temps de l'ordre de la dizaine d'années seulement. Quant à la géophysique externe les domaines étudiés impliquent l'observation simultanée et la caractérisation de phénomènes se produisant à l'échelle de la planète (indices d'activité, orages magnétiques).

3. LE RÉSEAU MONDIAL D'OBSERVATION

Fonctionnant depuis un peu plus d'un siècle, les observatoires géomagnétiques enregistrent de façon

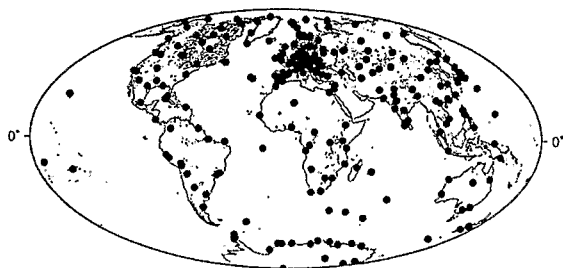


Fig. n°2a : Distribution des observatoires du réseau IAGA ayant procurés au moins une valeur annuelle entre 1970 et 1995.

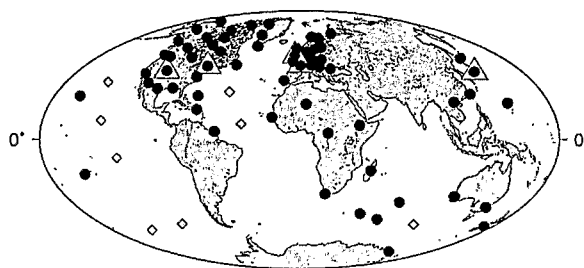


Fig. n°2b : Distribution des observatoires (cercles pleins), des GIN's (triangles ouverts) du programme INTERMAGNET, et des sites proposés pour les observatoires fond de mer.

continue le champ magnétique terrestre et ses variations temporelles en un site donné dans le but de mesurer les éléments permettant de définir à chaque instant le vecteur champ magnétique. La détermination complète du vecteur champ magnétique en un point nécessite la mesure de trois composantes indépendantes parmi les sept suivantes : la déclinaison D , l'inclinaison I , l'intensité totale F et les composantes cartésiennes X (nord géographique), Y (est géographique) et Z (verticale). Un observatoire doit être en opération durant plusieurs décennies. La cartographie du champ magnétique terrestre et sa mise à jour régulière ont nécessité la mise en place de "réseaux magnétiques de répétition" là où les observatoires faisaient défaut. Les sites retenus pour les stations d'un réseau doivent constituer un échantillonnage représentatif de la zone étudiée, le choix et la conservation des sites de mesure sont particulièrement importants. Les éléments du champ magnétique y sont en général mesurés une fois tous les deux à cinq ans, la plupart des pays disposant d'un réseau magnétique de répétition sur leur territoire.

3.1. Les observatoires magnétiques en 1999

Le réseau mondial comporte environ 200 observatoires dont la distribution à la surface de la terre et l'équipement sont très hétérogènes (Figure n°2a). Le programme d'observation, fixé par l'Association Internationale de Géomagnétisme et d'Aéronomie (AIGA), demande :

- la mesure absolue des éléments du champ terrestre et l'enregistrement continu de ses variations temporelles (observatoires permanents et stations de répétition).

- la mise à la disposition des centres mondiaux (WDC) et sur une base annuelle, des données utilisées dans les applications traditionnelles (valeurs moyennes destinées à la mise à jour régulière des modèles de champ magnétique, valeurs instantanées et indices d'activité).

L'idée d'un programme international qui permette de relier entre eux l'ensemble des observatoires géomagnétiques a été exposée dès 1987 au cours de l'assemblée de l'Union Géodésique et Géophysique Internationale (UGGI). La Division V de l'AIGA a alors émis le vœu que la communauté géomagnétique installe des observatoires automatisés, avec transmission des données par

satellite. Suivant cette résolution, mais à sa propre initiative, le programme INTERMAGNET (International Magnetic Observatory Network) s'est fixé comme objectifs généraux de maintenir et créer des observatoires pour compléter le réseau mondial, d'encourager l'installation d'observatoires numériques dans les pays en voie de développement avec la volonté de contribuer à l'élévation du niveau de la science et de la technologie dans ces pays, d'établir un système global d'échange rapide de données en ligne pour tous les observatoires du réseau et de produire des modèles et indices globaux avec la collaboration des institutions participantes (Green et al., 1998). INTERMAGNET est donc un réseau global d'observatoires magnétiques numériques transmettant leurs données en temps quasi-réel par satellites ou par Internet.

Les critères retenus pour un observatoire du réseau INTERMAGNET vont au delà des recommandations de l'AIGA citées plus haut, ils exigent : la mesure vectorielle et scalaire du champ magnétique terrestre, l'échantillonnage des données toutes les minutes avec une résolution de 0,1 nT, la détermination absolue régulière de la valeur des éléments du champ magnétique (les dérives instrumentales doivent être contrôlées de façon à ce que 95 % des données définitives soient comprises dans une fourchette de ± 5 nT par rapport à la valeur absolue de l'élément mesuré), la transmission des données dans des formats de dissémination standards dans un délai inférieur à 72 heures et la mise à disposition des données définitives dans un délai de six mois après la fin de l'année pour archivage sur cédérom. Les données sont transférées vers des centres d'information géomagnétiques régionaux (GINs) qui fonctionnent à, Golden (États-Unis), Ottawa (Canada), Kyoto (Japon) Édimbourg (Grande Bretagne) et Paris. Un comité des opérations fixe les standards instrumentaux (INTERMAGNET Technical reference manual, 1996) et contrôle annuellement la qualité des données. Les observatoires du réseau qui sont présentés sur la Figure n°2b : leur nombre a constamment augmenté depuis la création du réseau : 44 observatoires en 1992, 60 en 1994, 70 en 1998.

Compte tenu des exigences de qualité imposées, le programme INTERMAGNET constitue un outil remarquable tant pour des objectifs de recherche fondamentale

concernant la Terre profonde que pour l'observation et la prévision de l'environnement électromagnétique de la Terre (Space Weather) dont l'impact est chaque jour plus considérable.

3.2. La distribution géographique des observatoires : importance pour les modèles géomagnétiques

Il existait 75 observatoires magnétiques permanents en 1933, dont près du tiers en Europe. A cette époque le réseau présentait de grands vides en Afrique, en Asie centrale, dans les régions polaires et bien entendu dans les océans. Aujourd'hui, environ 200 observatoires sont en fonctionnement mais leur distribution reste très irrégulière. Cette distribution est gouvernée par des considérations politiques, financières et logistiques autant que par la nécessité d'obtenir des données scientifiques. Si le nombre de stations dans les régions polaires nord et sud a beaucoup augmenté pendant ces 40 dernières années la distribution des observatoires demeure encore avantageuse pour l'Europe, tandis qu'il reste des espaces importants sans observatoires : en Afrique, Asie, Amérique du Sud et au Groenland, et, bien entendu, toujours dans les océans.

La modélisation du champ géomagnétique souffre de la mauvaise répartition des données à la surface de la Terre. La qualité des modèles du champ principal et de sa variation séculaire dépend en effet de la distribution des stations : plus la distribution en est dense et uniforme, meilleur est le modèle. Par exemple, un modèle tronqué au degré/ordre 10, inclut toutes les structures de longueur d'onde supérieure à 4 000 km. Les points d'observation nécessaires au calcul d'un tel modèle devraient, en théorie, être espacés, selon les deux directions horizontales, de la moitié de cette distance, soit 2 000 km. Différentes études quantitatives du rôle de la distribution des observatoires dans les modèles ont été menées au cours des dernières années. Alexandrescu et al. (1994), en étudiant l'effet sur des modèles de différent degré/ordre de la distribution des observatoires et en considérant soit des distributions voisines de la distribution réelle, soit des distributions aléatoires, montre comment compléter le réseau d'observatoires. Deux possibilités sont retenues : augmenter le nombre de stations au sol et développer un réseau d'observatoires fond de mer (Heirtzler et al., 1994). On a vu en effet que de vastes régions océaniques sont mal couvertes. On pouvait penser d'abord à équiper systématiquement les îles océaniques, mais outre la difficulté d'accès à certaines d'entre elles, elles peuvent présenter d'autres inconvénients liés à leur structure géologique. Un exemple est fourni par les enregistrements faits sur le Piton de la Fournaise à l'île de la Réunion (Michel, 1995). L'auteur montre qu'en deux stations d'enregistrements situées à quelques kilomètres l'une de l'autre, les "variations séculaires" (de l'ordre de 40 nT/an) sont très différentes. L'interprétation avancée (Zlotnicki et al., 1993) est un effet électrocinetique à l'échelle de la zone principale de fractures du volcan, liées aux circulations d'eau au sein

de l'édifice. Ce type de problème et l'absence d'îles dans de vastes secteurs, a renforcé l'idée d'installer des observatoires magnétiques sur les fonds marins. Le projet "observatoires fond de mer" (Ocean Bottom Geomagnetic Observatory) pose toutefois des problèmes très spécifiques. En effet les mesures doivent être acquises automatiquement, la consommation doit être limitée à quelques watts, les données doivent être stockées sur une longue durée et transmises en surface suivant des techniques particulières, l'environnement des capteurs doit être "propre" d'un point de vue magnétique et la détermination du Nord géographique est délicate (pour connaître le champ à mieux que 25 nT près sur les trois composantes, le système doit être positionné à mieux que une minute d'arc, ce que les équipes de constructeurs indiquent comme facilement réalisable, mais la démonstration n'en a pas été faite à ce jour). Trois avantages sont, en revanche, à signaler : la couche d'eau de mer est un filtre passe-bas pour les variations géomagnétiques, un échantillonnage toutes les cinq minutes n'entraîne donc pas de repliement de fréquences dans le signal ; l'environnement de fond de mer, aux profondeurs de 4 000 à 5 000 m, est très stable d'un point de vue thermique, 4°C à $\pm 0.01^{\circ}\text{C}$ près ; enfin, même pour une disposition des axes des capteurs qui diffère de un degré par rapport à l'orientation exacte, l'erreur sur les estimations de la variation séculaire est inférieure à 2 %.

Remarquons enfin que les représentants des programmes internationaux recherchent aujourd'hui la possibilité d'exploiter des sites d'observation communs, de combiner matériel et personnel existants et de mener des études pluridisciplinaires (séismo-magnétique, séismo-géodésique ou magnéto-géodésique) dans un réseau de stations automatisées convenablement distribuées à la surface de la Terre a. Citons les principaux programmes concernés : Incorporated Research Institutions for Seismology (IRIS), Global Positioning Systems (GPS), Fiducial Laboratories for an International Science Network (FLINN), Very Long Baseline Interferometers (VLBI), et les réseaux Satellite Laser Ranging (SLR), Solar-Terrestrial Energy Programme (STEP), Doppler Orbitography and Radiopositioning Integrated by Satellite (DORIS), Global Long-Period Seismometers Network (GEOSCOPE) et International Magnetic Observatory Network (INTERMAGNET). La localisation des sites "observatoires fond de mer" proposés est visible sur la Figure n°2b.

4. L'OBSERVATOIRE GÉOMAGNÉTIQUE AUJOURD'HUI

4.1. Installation d'un observatoire magnétique

On trouvera les informations nécessaires concernant l'installation et les techniques de mesure dans les observatoires géomagnétiques et les réseaux de répétition dans deux ouvrages de référence édités par l'AIGA :

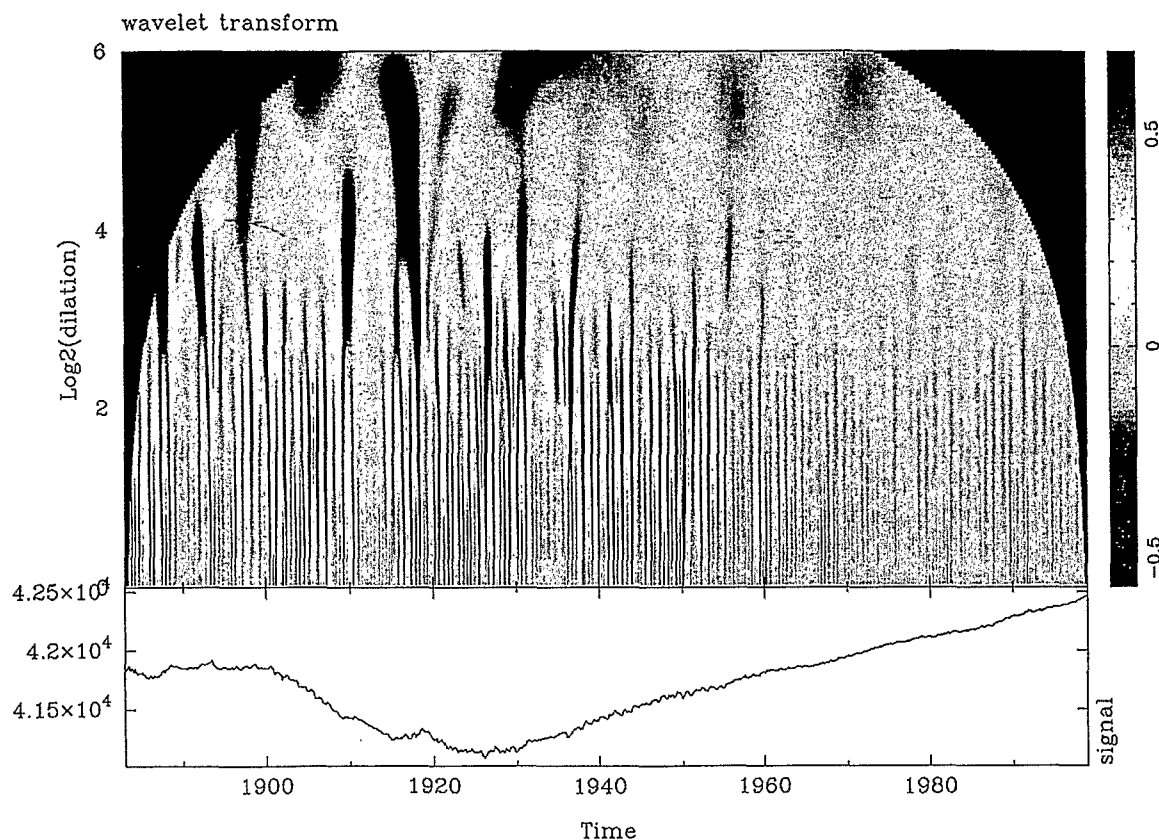


Fig. n°3 : Carte de transformées en ondelettes de la composante Z pour Chambon la Forêt. Après 1955 une réduction du niveau du bruit est observée, la carte de transformées devient plus homogène pour les périodes de l'ordre de l'année (dilatation inférieure à 2).

Jankowski et Sucksdorff (1996), Newitt et al., (1996) ; nous ne citerons donc ici que quelques aspects significatifs. Rappelons tout d'abord qu'à l'emplacement d'un observatoire il est souhaitable que les composantes géomagnétiques soient "normales" (autrement dit que le champ géomagnétique ne soit pas trop modifié par d'importantes anomalies magnétiques locales dues aux structures géologiques de diverses échelles) et que le sous-sol du voisinage ait une conductivité électrique horizontalement assez homogène. La précision exigée des observations impose des conditions très sévères pour la construction des infrastructures de l'observatoire et pour l'installation des appareils (matériaux rigoureusement non magnétiques, appareils installés sur des piliers parfaitement stables et désolidarisés des bâtiments).

L'instrumentation d'un observatoire respectant les critères définis par INTERMAGNET comporte :

- un appareillage de mesures absolues : Déclinomètre-Inclinomètre à vanne de flux (précision meilleure que 5 secondes d'arc) pour les mesures de la déclinaison et de l'inclinaison et magnétomètre à protons (précision 0,2 nT à 0,5 nT) pour les mesures de l'intensité du champ total ;

- un variomètre trois composantes à vanne de flux (résolution 0,1 nT et stabilité à long terme meilleure que 5 nT/an), associé généralement à un magnétomètre à protons à effet Overhauser (résolution 0,1 nT) ; les enregis-

trements des variations du champ magnétique terrestre sont effectués à l'aide de dispositifs d'acquisition numérique basés sur une architecture type PC ;

- une plate-forme de transmission de données par satellite (Météosat, GOES ou GMS), ou l'accès sur site à Internet.

Notons que pour la communauté scientifique directement impliquée dans les activités d'observatoire, l'AIGA organise tous les deux ans un "Atelier international sur les instruments d'observatoire magnétique" (Workshop on Geomagnetic Observatory Instruments Data Acquisition and Processing). Les trois derniers ateliers se sont tenus respectivement à Dourbes (Belgique) en 1994, à Potsdam-Niemegk (Allemagne) en 1996 et à Vassouras (Brésil) en 1998. Le CNFEGG a financé plusieurs déplacements de participants français. Les actes de colloque des réunions de 1994 et 1996 ont été publiés respectivement en 1996 et en 1998 et l'on y trouvera l'état de l'art pour les mesures en géomagnétisme pour cette période.

4.2. La qualité des données géomagnétiques

Un observatoire doit chercher à obtenir la plus grande précision possible sur toutes les mesures géomagnétiques, car les phénomènes à étudier, comme les sauts de la variation séculaire, ont des amplitudes faibles qui sont de l'ordre de quelques nT/an² ; une précision absolue de l'ordre du nT s'impose donc. La qualité des données

fournies est cependant souvent difficile à apprécier. Une méthode très intéressante pour déterminer la qualité d'un observatoire consiste à analyser les séries publiées, composante par composante, en utilisant un outil mathématique récent, la transformée en ondelettes. A titre d'exemple, cette analyse, appliquée aux séries des valeurs mensuelles de la composante verticale Z de Chambon-la-Forêt montre clairement la réduction du niveau du bruit après 1955, date à partir de laquelle le magnétomètre à protons est utilisé pour calculer cette composante (Figure n°3).

4.3. Les données fournies par les observatoires magnétiques

Chaque observatoire contribue à la constitution de banques de données intéressant aussi bien les aspects de la géophysique interne que ceux de la géophysique externe. La diffusion des données est effectuée auprès :

- des centres mondiaux pour le Géomagnétisme (gérés par l'AIGA) : WDCA (Boulder), WDC-C2 (Kyoto), WDC-C1 (Edimbourg et Copenhague) pour les valeurs minutes et les valeurs moyenne horaires ; WDC-B2 (Moscou) pour les valeurs moyennes annuelles ;
- des centres d'information géomagnétiques régionaux (GINs) du réseau INTERMAGNET : pour les observatoires qui en font partie
- du Service International des Indices Géomagnétiques (SIIG, St Maur, France) : pour la diffusion des indices d'activité (caractère K) ;
- du NOAA, Solar-Geophysical Data : pour la publication mensuelle des principaux orages magnétiques (série Prompt reports) ;
- du Projet CERSTED : pour la transmission chaque mois des valeurs mensuelles (Monthly means data base).

Par ailleurs la plupart des observatoires continuent à diffuser un bulletin annuel d'observations (Yearbook).

5. LA CONTRIBUTION FRANÇAISE AU RÉSEAU MONDIAL

5.1. Les observatoires maintenus par la France

Au plan national le Bureau Central de Magnétisme Terrestre (BCMT) coordonne et évalue l'activité des observatoires magnétiques maintenus par la France, sur le territoire national ou en coopération. Créée en 1921, cette structure a été réactivée en 1988, six objectifs principaux ont été assignés au BCMT : être l'interlocuteur français privilégié des organismes équivalents nationaux ou internationaux (AIGA), centraliser les données de tous les observatoires concernés (le BCMT harmonise leur présentation en fonction des recommandations de l'AIGA et publie chaque année un bulletin de données), mener une politique cohérente quant à l'installation des observatoires magnétiques, définir les protocoles de mesure dans les observatoires français et les stations des réseaux de répétition, coordonner le développement des

équipements au sein des organismes concernés et assurer la formation des observateurs.

L'Institut de Physique du Globe de Paris (IPGP), l'École et Observatoire des Sciences de la Terre à Strasbourg (EOST) et l'Institut de Recherche pour le Développement (IRD), réunis au sein du BCMT, assurent la responsabilité scientifique de neufs observatoires magnétiques :

- En France : Chambon la Forêt (IPGP)
- En Polynésie française : Pamataï à Tahiti (IPGP)
- En Guyane française : Kourou (IPGP)
- Dans le Territoire des Terres Australes et Antarctiques Françaises (TAAF) les observatoires de Martin de Viviers à l'île Amsterdam, de Port Alfred dans l'archipel des Crozet, de Port-aux-Français aux îles Kerguelen et de Dumont d'Urville en Terre Adélie sont maintenus par l'EOST,

l'Institut Français pour la Recherche et la Technologie Polaires (IFRTP) assurant outre-mer le financement et le soutien logistique nécessaires.

- En République de Centrafrique : Bangui (IRD)
- Au Sénégal : M'Bour (IRD)

Le BCMT maintient quatre observatoires magnétiques en coopération :

- En Algérie : Tamanrasset (CRAAG, Alger/IPGP)
- En Éthiopie : Addis Ababa (Université d'Addis Ababa/IPGP)
- A Madagascar : Antananarivo (IOGA/EOST)
- Au Vietnam : Phu Thuy (Institut Géophysique d'Hanoi / IPGP)

5.2. État des lieux pour les observatoires français ou maintenus en coopération : le projet OMP

Les quatorze observatoires cités ci-dessus font partie du projet "Observatoire magnétique planétaire" (OMP), soutenu par l'Institut National des Sciences de l'Univers (INSU). Les premières années du projet ont été consacrées au développement du magnétomètre vectoriel qui devait équiper ces observatoires. Ce développement, ainsi que celui d'un magnétomètre spatial financé par le CNES (projet Magnolia) a suscité une collaboration étroite entre l'IPGP et la société Thomson Marconi Sonar à Brest et a permis de maintenir en France une compétence dans le domaine de la magnétométrie vectorielle. De son côté l'EOST a poursuivi son activité dans le domaine de l'appareillage de mesures absolues désigné sous l'appellation Déclinomètre-Inclinomètre à vanne de flux ou D-I Flux, appareil maintenant adopté comme référence absolue dans la plupart des observatoires (Bitterly et al., 1996). Une collaboration entre l'EOST et le "Lviv Centre of Space Research of National Academy of Sciences of Ukraine" (LCISR) s'est concrétisée par la réalisation d'une version remise à niveau de cet appareillage (Bitterly et al., 1998). Le magnétomètre vectoriel et le D-I Flux ont été présentés lors des tests d'intercomparaison organisés pendant les Ateliers sur les instruments d'observatoire magnétique à Dourbes (1994) et à Potsdam-Niemegk (1996).

Tous les observatoires OMP sont aux normes INTERMAGNET et leur équipement est relativement homogène. La transmission des données en temps quasi-réel par satellites permet une surveillance continue et efficace du fonctionnement des observatoires lointains (Bitterly et al., 1996). Le projet OMP constitue la contribution française-majeure- au programme international INTERMAGNET. Un simple coup d'œil à une carte représentant la distribution des observatoires montre combien l'hémisphère Sud est encore mal couvert et combien les stations françaises, existantes et à venir, sont importantes.

6. UTILITÉ DES DONNÉES DES OBSERVATOIRES MAINTENUS PAR LA FRANCE

Nous avons déjà indiqué que les données d'observatoire sont diffusées systématiquement dans les centres mondiaux (WDC, INTERMAGNET). Ces données sont régulièrement utilisées pour la mise à jour des modèles de champ magnétique (Cohen et al., 1997). Nous allons maintenant donner quelques illustrations de la contribution des observatoires du BCMT à des services ou à des programmes de recherches dans le cadre national et international.

6.1. Contribution à l'étude de la Terre profonde

Parce que, jusqu'à aujourd'hui aucun forage terrestre n'a dépassé 15 kilomètres de profondeur, nous n'avons accès qu'à des informations indirectes sur la terre profonde, fournies par la sismologie, la géodésie ou la géochimie. A partir des modèles du champ principal et de sa variation séculaire, modèles contraints essentiellement par les données d'observatoires magnétiques, une grande quantité d'informations complémentaires à ces disciplines peut être extraite. Nous retiendrons en particulier l'étude de la conductivité du manteau profond et celle des mouvements qui animent la surface du noyau.

Les variations du champ géomagnétique, entre le noyau où elles sont engendrées et la surface de la terre où elles sont observées, sont atténuées par la présence du manteau conducteur, et cela d'autant plus fortement que la conductivité du manteau serait plus élevée. L'expérimentation en laboratoire, utilisant des "cellules à diamant" capables de reproduire des conditions thermodynamiques comparables à celles qui règnent dans le manteau, conduit à estimer la conductivité électrique du manteau profond à environ 10 siemens par mètre (Poirier et al., 1998). En caractérisant, à partir des données d'observatoires, la secousse magnétique observée en 1970, il a été possible de calculer une valeur de conductivité moyenne d'environ 15 siemens par mètre pour le manteau inférieur, valeur en remarquable accord avec celle obtenue en laboratoire (Mandea Alexandrescu et al., 1999). Par ailleurs une étude récente a été menée sur la conductivité de la partie supérieure du manteau inférieur (jusqu'à 870 km). Les longues séries de valeurs mensuelles de 78 observatoires, obtenues entre

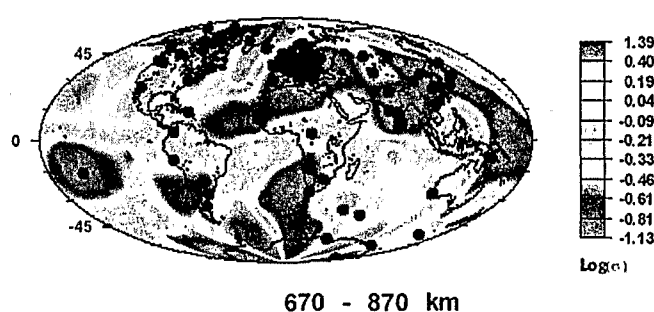
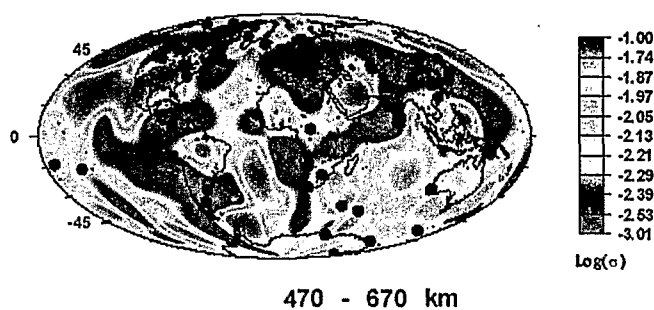


Fig. n°4 : Modèles 3D de la distribution de la conductivité électrique du manteau à des profondeurs de 470-670 km et 670-870 km.

1974 et 1987, ont été utilisées dans une inversion 3-D. Deux exemples de la distribution de la conductivité en 3-D sont présentés sur la Figure n°4. Les modèles pour des profondeurs de 470-670 et de 670-870 km sont en bon accord avec les images connues de la tomographie sismique du manteau (Tarits et al., 1998).

Les modèles de champ sont un intermédiaire nécessaire au calcul des mouvements qui animent la surface du noyau. Le modèle de Terre utilisé pour le calcul de ces mouvements est constitué d'un noyau conducteur et d'un manteau parfaitement isolant. L'équation qui gouverne l'évolution du champ montre que ses changements dans le noyau résultent d'une "compétition" entre le mouvement du fluide créant le champ par l'induction et la diffusion qui tend à détruire ce champ par effet de dissipation ohmique des courants électriques. Aujourd'hui on cherche à préciser la relation entre les différentes composantes des mouvements à la surface du noyau et les phénomènes observés à la surface de la Terre, en particulier les secousses affectant la variation séculaire. Dans cet objectif les données de 160 observatoires ont été analysées pour caractériser la géométrie des secousses reconnues en 1969, 1979 et 1992 (Alexandrescu et al., 1996, Le Huy et al., 1998).

VOIR CAHIER COULEUR

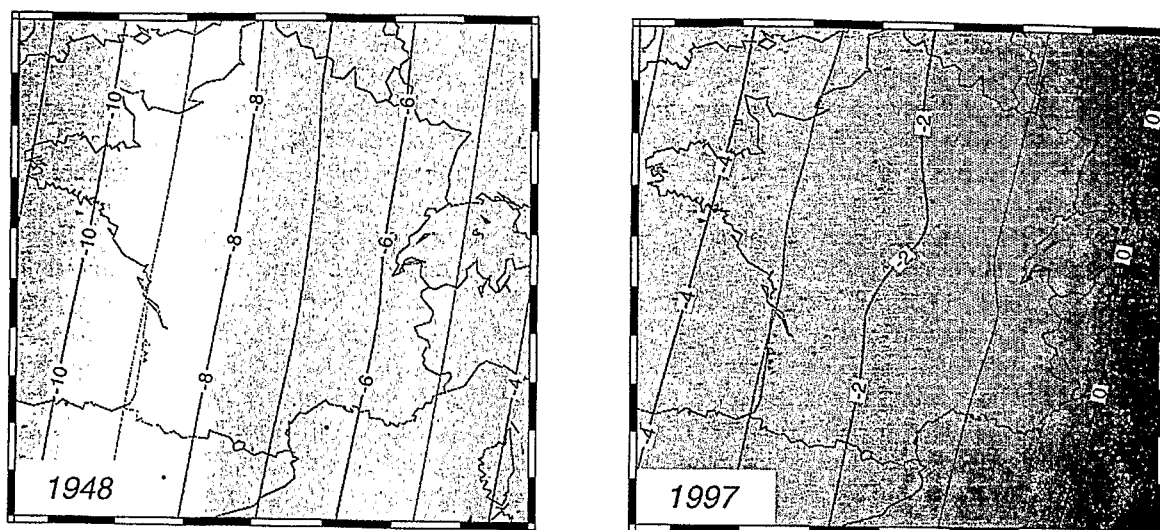


Fig. n°5 : Cartes de la déclinaison magnétique en France obtenues avec les seules données des stations de répétition, pour les années 1948 et 1997. Si l'on admet une évolution de la déclinaison voisine de celle des vingt dernières années, la valeur de la déclinaison à Paris serait nulle (0°) en 2015.

6.2. Contribution à la cartographie magnétique : les réseaux de répétition

Le réseau de répétition français est placé sous la responsabilité de l'IPGP, l'IRD effectue des campagnes de mesures dans un réseau de bases magnétiques établi en Afrique de l'ouest et en Afrique centrale, l'EOST réoccupe, selon les possibilités logistiques, quatre stations dans les îles subantarctiques et une station en Antarctique.

Le réseau de répétition en France Métropolitaine a été établi en 1947, il comportait alors 12 stations. Les premières mesures, sont rapportées à l'époque 1948.0. En 1965, 13 autres stations complémentaires sont établies avant le survol de la France pour réaliser la carte aéromagnétique (Le Borgne et Le Mouél, 1969). Ce réseau comporte actuellement 33 stations utilisées, notamment, pour réactualiser la carte des isogones de France. En utilisant seulement ces données il est possible d'obtenir une image des modifications du champ à l'échelle d'un demi-siècle sur le territoire français (Mandea Alexandrescu et al, 1999). La Figure n°5 illustre le changement de la déclinaison observé entre 1948 et 1997.

En Afrique, en 1993-1994, à partir des observatoires de Mbour (Sénégal) et Bangui (Centrafrique), l'IRD a entrepris une campagne de réoccupation de 38 bases de son réseau de répétition en Afrique de l'Ouest et en Afrique Centrale (Figure n°6).

Dans les Terres Australes et Antarctiques Françaises les observatoires magnétiques installés aux îles Kerguelen (1957), Crozet (1974) et Amsterdam (1981) sont situés sur des terrains basaltiques où les anomalies locales peuvent atteindre plus de 1 000 nT sur quelques kilomètres. Dans ces conditions il était essentiel de vérifier que la variation séculaire déterminée à partir des données de ces observatoires est bien représentative à l'échelle régionale. Plusieurs stations de répétition ont

été créées dans ce but en tenant compte d'une part des possibilités logistiques et d'autre part en privilégiant des sites de mesures historiques antérieurement visités par des expéditions scientifiques.

Les résultats obtenus par l'IPGP, l'IRD et l'EOST lors de la réoccupation de ces stations ont été rassemblés dans le bulletin n°8 du BCMT (1996). Les futurs besoins de la cartographie magnétique ne feront pas appel seulement à des satellites. Les observatoires géomagnétiques permanents, associés aux stations de répétition, sont depuis plus de 150 ans un instrument essentiel à la connaissance du champ principal et le demeureront.

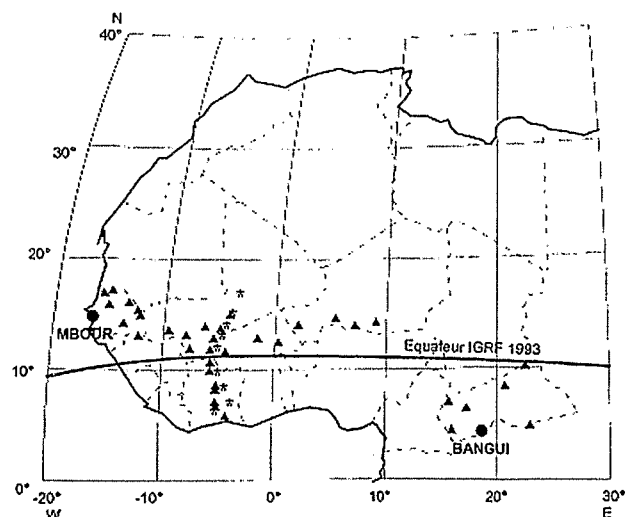


Fig. n°6 : Localisation des stations de répétition du réseau africain de l'IRD (triangles pleins) et des stations temporaires (astérisques) mises en place dans le cadre de l'AIEE.

6.3. Contribution à la détermination des indices d'activité magnétique

Les valeurs minute fournies par les observatoires de Crozet, Kerguelen et de l'île Amsterdam et transmises par satellite sont utilisées pour le calcul en temps quasi-réel de l'indice planétaire am (Menvielle et al., 1995). Pour cela le Service International des Indices Géomagnétiques (SIGG), utilise un réseau mondial constitué par 24 observatoires dont 9 seulement dans l'hémisphère sud (d'où l'importance des trois observatoires subantarctiques français). Depuis 1989 les données recueillies à l'île Amsterdam sont également utilisées pour le calcul des "Mid-Latitude Geomagnetic Indices ASY et SYM²", élaborés mensuellement par le centre mondial WDC-C2 à Kyoto (Amsterdam est l'un des deux observatoires de l'hémisphère sud utilisé pour le calcul de ces indices). En 1996 on a proposé un nouvel indice représentatif de l'activité magnétique dans les régions de hautes latitudes sud (Southern High Latitudes Index AES-80), l'observatoire de Dumont d'Urville fait partie des cinq observatoires antarctiques retenus pour cette étude (Ballatore et al., 1998).

Ces trois exemples, ainsi que des études récentes (Bitterly et al., 1996 ; Berthelier et al., 1996 ; Menvielle et Berthelier, 1996), montrent bien la contribution essentielle des observatoires français austraux dans un domaine où les applications à la prédiction des perturbations qui affectent l'environnement électromagnétique de la Terre sont en plein développement (Francq et Menvielle, 1996).

6.4. Participation à l'Année Internationale de l'Electrojet Equatorial (AIEE)

Dans le cadre de l'Année Internationale de l'Electrojet Equatorial, proposée à la communauté internationale par l'assemblée générale de l'IUGG en 1987 à Vancouver, l'IRD, s'appuyant sur les observatoires de M'Bour et de Bangui, a mis en place de 1992 à 1994 un réseau de 10 stations magnétotelluriques s'étendant sur 1 200 km de Tombouctou à Abidjan selon un profil nord-sud de part et d'autre de l'équateur magnétique (Figure 6).

Le but de cette opération était d'une part l'étude de la signature magnétique de l'électrojet équatorial, et d'autre part la caractérisation des variations du champ électrique induit. Les composantes magnétiques horizontales étaient mesurées avec des variomètres classiques de type "Mosnier" à asservissement par un système capacitifs, la composante magnétique verticale avec un magnétomètre à vannes de flux et les variations du champ tellurique avec des lignes de 200 mètres orientées nord-sud et est-ouest reliant des électrodes en plomb. La base complète de ces données électromagnétiques pour l'AIEE est disponible sur un cédérom édité par le laboratoire de géophysique de l'IRD. Cette expérience électromagnétique conduite en zone équatoriale a fourni le premier jeu d'enregistrements continus et simultanés des variations des

champs magnétiques et telluriques pour cette région (Doumouya et al., 1998). Le résultat majeur de cette expérience est que l'induction par la variation diurne du champ magnétique n'a pu être mise en évidence. Les variations diurnes des champs magnétiques et électriques ne présentent pas la même variabilité jour à jour dans les régions équatoriales, démontrant l'existence de deux sources ionosphériques distinctes responsables de ces variations diurnes. Un autre résultat intéressant est la mise en évidence d'un effet de source, apparaissant durant la journée pour les phénomènes de longues périodes, effet dû à la distribution gaussienne de la conductivité ionosphérique, et qui rend impossible le sondage magnétotellurique profond en zone équatoriale (Vassal et al., 1998).

6.5. Participation au programme CESTED

Le projet CESTED est un satellite géomagnétique de recherche pour la période 1999-2000 (lancement le 23 février 1999), ce projet associe certains observatoires sol du réseau mondial (ceux du réseau INTERMAGNET en particulier). Les objectifs d'CESTED intéressent à la fois les études du champ magnétique principal, du champ d'anomalies et les interactions entre le vent solaire et la magnétosphère. La participation des observatoires du BCMT a été sollicitée compte tenu de leur position géographique et géophysique privilégiée. Les données sol sont rassemblées à Copenhague (CESTED Data Centre). Par ailleurs le Centre de données géomagnétiques (GIN) de Paris a été choisi pour assurer le maintien en ligne des données définitives de tous les observatoires participant à INTERMAGNET en attendant qu'elles soient disponibles sur le cédérom annuel. Ces données seront utilisées par les principaux investigateurs du programme CESTED pour valider ou corriger rapidement les données reçues des instruments embarqués.

6.6. Les données des observatoires magnétiques : Où est comment les obtenir ?

Les bases de données sont à considérer à la fois au niveau de l'institution ayant en charge le fonctionnement des observatoires (IPGP, EOST et IRD), au niveau national (BCMT), au niveau du réseau INTERMAGNET et enfin à celui des centres mondiaux (WDC). C'est le premier niveau qui assure la mise à jour des autres bases de données en fournissant à chacune d'elles des résultats définitifs mis en forme au format convenable.

Deux initiatives sont à signaler dans l'effort entrepris pour regrouper les données anciennes d'observatoires magnétiques. La première concerne le BCMT qui a entrepris la constitution d'une base de données rassemblant toutes les données disponibles sous forme numérique pour les observatoires français depuis leur création. Cette base de données sera disponible sur cédérom en 1999. La seconde concerne le Laboratoire de Géomagnétisme de l'IPGP qui, constatant que les valeurs mensuelles dispo-

nibles dans les centres mondiaux ne constituaient pas une base suffisamment longue et complète pour permettre l'étude des caractéristiques de la variation séculaire comme les secousses magnétiques, a rassemblé et surtout validé les séries mensuelles des observatoires (Alexandrescu, 1998).

Pour obtenir les données des 14 observatoires déjà cités diverses possibilités existent :

- Bulletins et données historiques des observatoires français :

BCMT, Institut de Physique du Globe de Paris, IPGP - B89-, 4, place Jussieu, 75252 Paris Cedex 05. (Télécopie : 33 (0)1 44 27 33 73 ; E mail : bcmt@ipgp.jussieu.fr)

- Données temps réel disponibles pour les observatoires du réseau INTERMAGNET : Les valeurs minutes s'obtiennent auprès des GIN's (Geomagnetic Informations Nodes), sur une base journalière. Les GIN's maintiennent 45 jours de données accessibles en ligne, l'adresse du GIN français maintenu par l'IPGP est : par_gin@ipgp.jussieu.fr

- Données visibles sur les serveurs WWW (tracés des magnétogrammes temps réel) dont les adresses sont : <http://obsmag.ipgp.jussieu.fr> pour le serveur de l'IPGP, et <http://eost.u-strasbg.fr/obsmag> pour le serveur de l'EOST. Sur ces deux serveurs il existe un lien possible avec tous les autres serveurs du réseau INTERMAGNET.

- Données définitives (valeurs minutes, horaires, mensuelles et annuelles) : sur le cédérom réalisé par INTERMAGNET.

7. PERSPECTIVES POUR LES OBSERVATOIRES DU BCMT

7.1. Évolution vers l'automatisation des mesures

L'automatisation des mesures dans les observatoires magnétiques est un impératif auquel sont confrontés de nos jours, pour des raisons diverses - qui ont souvent en commun une raison économique - la plupart des observatoires. Pour des raisons d'ordre métrologique, la plupart des observatoires fonctionnent selon le principe suivant : (1) mesures "continues" de valeurs relatives de composantes (à l'aide de trois "variomètres"), par rapport à un niveau de référence connu avec une justesse insuffisante ; (2) mesures absolues effectuées la plupart du temps manuellement à raison d'une à deux fois par semaine. Ces mesures sont destinées à déterminer les valeurs de référence (appelées valeurs de base) des mesures relatives. Seule la combinaison des deux permet de déterminer à chaque instant les composantes du champ en vraie grandeur, l'importance des mesures absolues a été à nouveau soulignée par le Conseil exécutif d'INTERMAGNET. L'automatisation des observatoires magnétiques, et donc à terme celle des mesures absolues, constitue l'objectif qui mobilisera les efforts des cinq prochaines années dans le domaine de l'instrumentation magnétique. Des solutions ont été proposées avec plus ou moins de réussite depuis longtemps, le défi à relever étant d'éviter la perte de la justesse et de la précision dans cette opération.

Une approche, pour l'instant théorique du problème, a été développée à l'EOST, à partir des informations fournies d'une part par les variomètres, d'autre part par un magnétomètre à protons enregistrant, avec le même pas d'échantillonnage que les variomètres, c'est-à-dire chaque minute des mesures d'intensité en vraie grandeur. L'objectif de cette nouvelle tentative est d'estimer les valeurs de base permettant de reconstituer le champ complet au niveau du magnétomètre à protons. Le principe mis en œuvre revient à comparer le champ B_v mesuré par les variomètres au champ théorique $B_a - C$ où B_a est le champ régnant au voisinage du magnétomètre à protons - dont on ne connaît que l'intensité - et C est le champ des valeurs de base qui est le paramètre inconnu du problème. Le problème est naturellement sous-déterminé mais on peut le contraindre raisonnablement par les considérations suivantes :

- des tests ont montré que les composantes de C étaient pratiquement statistiquement indépendantes dans un repère e_1, e_2, e_3 tel que e_3 est dirigé suivant la direction moyenne du champ, e_1 est horizontal, orthogonal au plan du méridien magnétique moyen, et e_2 complète le repère. C_3 est bien déterminé sans contrainte supplémentaire, mais ce n'est pas le cas de C_1 et C_2 .

- il est nécessaire d'estimer l'angle des vecteurs B_a et $C + B_v$. Le négliger introduit un biais considérable dans l'estimation des composantes C_1 et C_2 . Son estimation repose sur des arguments d'ordre statistique. Moyennant une hypothèse gaussienne sur les erreurs affectant B_v , on peut calculer la distribution de probabilité de l'angle $(B_a, C + B_v)$ et attribuer une valeur à l'angle par un tirage au sort sur cette loi.

- il est d'usage de définir une valeur de base par jour. On peut alors introduire une contrainte, employée dans l'inversion d'Occam, pénalisant les sauts des valeurs de base entre deux journées consécutives.

- enfin, on peut introduire comme information a priori des mesures réelles de B_a effectuées à des intervalles de temps arbitraires.

Pour l'estimation de C , deux algorithmes ont été mis au point : un premier algorithme d'inversion non linéaire classique, faisant appel néanmoins, à chaque itération, à un tirage au sort sur l'angle $(B_a, C + B_v)$ et un second, fondé sur la méthode de Monte Carlo par chaîne de Markov, qui fournit une estimation de la loi de probabilité marginale des composantes de C pour chaque journée.

Les résultats obtenus, pour l'instant sur des données synthétiques, montrent, comme indiqué plus haut, que C_3 est très bien déterminé. En se contentant d'une contrainte de lissage, on peut estimer C_1 et C_2 à 2 ou 3 nT près selon l'importance du lissage. Naturellement, l'estimation va en s'améliorant lorsqu'on introduit de vraies mesures absolues de B_a : avec une mesure par mois, l'incertitude se réduit à 1 à 2 nT, avec une mesure par semaine, elle ne dépasse pas le nT (Houssou, 1998, Schott et al., 1998).

Mais l'objectif reste bien évidemment de réduire au minimum (typiquement une mesure par an) les interventions manuelles que représentent les mesures absolues traditionnelles.

7.2. Nouvelles stations du projet OMP, installation d'un observatoire magnétique en Antarctique

Pour les prochaines années l'objectif primordial, fixé par le BCMT, est de renforcer les stations OMP existantes (doublement des capteurs et des dispositifs d'acquisition pour une meilleure fiabilité, automatisation des installations). En complément il paraît raisonnable d'installer encore quelques stations OMP supplémentaires : les prochains sites cibles retenus sont situés à l'île de Pâques (coopération IGP/NASA), à Langzou en Chine et à Qsaybeh au Liban. Dans le Pacifique l'IRD a récemment installé une station magnétique provisoire en Nouvelle Calédonie, à proximité de Nouméa, une évaluation est en cours pour déterminer si cette station doit à terme être transformée en observatoire permanent.

Le projet franco-italien Concordia, prévoit l'installation d'un observatoire magnétique permanent à l'intérieur du continent antarctique (site du Dôme C, 75°S et 124° E, altitude 3 200 m). L'installation de cet observatoire magnétique automatisé présentera un intérêt certain : implanté à plus de 1 000 km de l'observatoire le plus proche, sur une calotte glaciaire de plus de 4 000 m d'épaisseur et donc très au dessus du socle rocheux, cet observatoire sera beaucoup moins affecté par les anomalies superficielles que tous les autres observatoires antarctiques tous installés en bordure du continent. Il permettra en outre de combler une lacune considérable dans le réseau des observatoires de l'hémisphère sud et les données recueillies seront de première importance pour le calcul des modèles globaux. L'EOST est le partenaire français de ce projet.

CONCLUSION

Surveiller le champ magnétique sur des échelles temporelles allant de la seconde au siècle, en des points régulièrement distribués à la surface de la terre représente une contribution importante à la connaissance de notre planète et à la surveillance de son environnement. L'étude de la variation séculaire reposera toujours en partie même quand aura été décidé le lancement d'une série de satellites magnétiques de longue durée- sur les données des observatoires géomagnétiques. En effet, un réseau d'observatoires complet, bien instrumenté et automatisé, sera essentiel pour réduire les données fournies par les satellites. Depuis peu, quelques observatoires sont en danger de fermeture pour des raisons financières ou politiques. Des efforts doivent être menés pour les maintenir et aussi pour installer de nouvelles stations dans les zones mal couvertes.

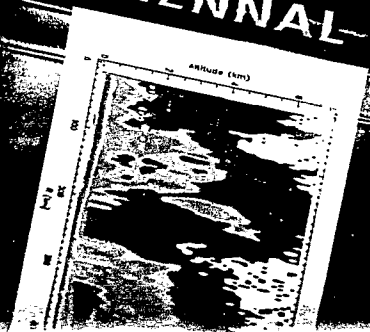
RÉFÉRENCES

- Alexandrescu, M., C. Ha Duyen, J-L. Le Mouél, Geographical distribution of magnetic observatories and field modelling, *J. Geomag. Geoelectr.*, 46, 891-901, 1994.
- Alexandrescu, M., Le champ géomagnétique et ses observatoires, Thèse, Institut de Physique du Globe de Paris, 23 avril 1996.
- Alexandrescu, M., V. Courtillot, J-L. Le Mouél, Geomagnetic field direction in Paris since the mid-XVIth century, *Phys. Earth Planet. Inter.*, 98, 321-360, 1996.
- Alexandrescu, M., D. Gibert, G. Hulot, J-L. Le Mouél & G. Saracco, Worldwide wavelet analysis of geomagnetic jerks, *J. Geophys. Res.*, B10, 21, 975-994, 1996.
- Alexandrescu, M., V. Courtillot and J-L. Le Mouél, High resolution secular variation of the geomagnetic field in western Europe over the last 4 centuries: comparison and integration of historical data for Paris and London, *J. Geophys. Res.*, 102, B9, 20245-20258, 1997.
- Alexandrescu, M., Database of geomagnetic observatory monthly means seeks contributors, *EOS Trans. AGU*, 79, 29, July 21, 1998.
- Alexandrescu, M., D. Gibert, J-L. Le Mouél, G. Hulot and G. Sarcco, About the electrical conductivity of the lower mantle, *J. Geophys. Res.*, accepted, 1999.
- BCMT : Réseaux magnétiques de répétition, France Métropolitaine 1992, Terres Australes et Antarctiques Françaises 1990-1993, Afrique de l'Ouest et Afrique Centrale 1992-1993, Bulletin n° 8, Bureau Central de Magnétisme Terrestre, France, 1-129, 1996.
- Balatore, P., C.G. MacLennan, M.J. Engebretson, M. Candidi, J. Bitterly, C.I. Meng, and G. Burns, A new southern high-latitude index, *Ann. Geophysicae* 16, 1589-1598, 1998.
- Berthelier, A., M. Menvielle, & M. Bitterly, Quasi-real time determination of K derived planetary indices: The K index derivation, *Proceedings of the VIth Workshop on Geomagnetic Observatory Instruments, Data Acquisition and Processing*, Dourbes, Institut Royal Météorologique de Belgique, 144-147, 1996.
- Bitterly, J., D. Gilbert, J.M. Cantin, J. Burdin, & A. Pères, Développement des magnétomètres à vanne de flux dans les observatoires magnétiques français 1975-1995, in: *Observations magnétiques*, Bureau central de Magnétisme Terrestre, Paris, n° 8, 99-129, 1996.
- Bitterly, M., M. Menvielle, J. Bitterly, & A. Berthelier, A comparison between computer derived (FMI method) and hand scaled K indices at Port-aux-Français and Port Alfred French observatories, *Proceedings of the VIth Workshop on Geomagnetic Observatory Instruments, Data Acquisition and Processing*, Dourbes, Institut Royal Météorologique de Belgique, 136-143, 1996.
- Bitterly, J., M. Bitterly, J.M. Cantin, & A. Pères, Remote monitoring of French subantarctic and antarctic observatories using satellite communications, *Proceedings of the VIth Workshop on Geomagnetic Observatory Instruments, Data Acquisition and Processing*, Dourbes, Institut Royal Météorologique de Belgique, 181-184, 1996.

- Bitterly, J., J.M. Cantin, B. Bondaruk, V. Korepanov, and L. Rakhlin, An experience of joint development of D-I meter, Proceedings of the VIIth Workshop on Geomagnetic Observatory Instruments Data Acquisition and Processing, GeoForschungs Zentrum Potsdam, 119-130, 1998.
- Cohen, Y., M. Alexandrescu, G. Hulot, J.-L. Le Mouél, Candidate models for 1995 revision of IGRF, a worldwide evaluation based on observatory monthly means, *J. Geomag. Geoelectr.*, 49, 279-290, 1997.
- Courtilot, V., J. Ducruix, J.-L. Le Mouél, Sur une accélération récente de la variation séculaire du champ magnétique terrestre, *C.R. Hebd. Séances Acad. Sci. sér. D*, 287, 1095-1098, 1978.
- Doumouya, V., J. Vassal, Y. Cohen, O. Fambitakoye, and M. Menvielle, Equatorial electrojet at African longitudes: first results from magnetic measurements, *Ann. Geophysicae*, 16, 6, 658-676, 1998.
- Felgentraeger, W., Die Längste nachweisbare säkulare periode des Erdmagnetischen elemente, teil I: Deklination, 64 pp., Göttingen, 1892.
- Franco C. and M. Menvielle, A model for the am (Km) planetary geomagnetic activity index and application to prediction, *Geophys. J. Int.*, 125, 729-746, 1996.
- Gauss, C.F., Allgemeine Theorie des Erdmagnetismus, Leipzig, 1839.
- Green, A.W., R.L. Coles, D.J. Kerridge and J.-L. Le Mouél, INTERMAGNET, Today and Tomorrow, Proceedings of the VIIIth Workshop on Geomagnetic Observatory Instruments Data Acquisition and Processing, GeoForschungsZentrum Potsdam, 277-286, 1998.
- Heirtzler, J.R., A.W. Green, J. Booker, R.A. Langel, A. Chave, and N.W. Peddie, An enhanced geomagnetic observatory network, Report to the U.S. Geodynamics Committee, National Research Council, 1994.
- Houssou, P., Acquisition et traitement de données d'observatoires géomagnétiques : application à l'océan Indien, Thèse, École et Observatoire des Sciences de la Terre, Strasbourg, 24 juin 1998.
- INTERMAGNET, Technical reference manual, version 3.0., 74 pp., Edited by D.F. Trigg & R. L. Coles, revised by B.J. St Louis & E.A. Sauter, Intermagnet Office, Denver, 1996.
- Jankowski, J., and C. Sucksdorff, Manual on magnetic measurements and observatory practice, 235 pp., International Association of Geomagnetism and Aeronomie, Boulder, Co., 1996.
- Le Borgne, E. et J.-L. Le Mouél, La nouvelle carte magnétique de la France, Annales de l'Institut de Physique du Globe de Paris et du Bureau Central de Magnétisme Terrestre, vol. XXXV, 197-224, 1969.
- Le Huy, M., M. Alexandrescu, G. Hulot, and J.-L. Le Mouél, On the characteristics of successive geomagnetic jerks, *Earth Planets Space*, 50, sous presse, 1998.
- Malin, S.C.R. and Sir E. Bullard, The direction of the Earth's magnetic field at London, 1570-1975, *Phil. Trans. Roy. Soc. Lond.*, 299, 1450, 357-423, 1981.
- Mandea Alexandrescu, M., S. Gilder, V. Courtillot, J.-L. Le Mouél and D. Gilbert, Looking back on a half century of repeat magnetic measurements in France, *EOS Trans. AGU*, vol. 80, 3, January 19, 1999.
- Menvielle, M., N. Papitashvili, L. Häkkinen, & C. Sucksdorff, Computer production of K indices: review and comparison of methods, *Geophys. J. Int.*, 123, 866-886, 1995.
- Michel, S., Effets électriques et magnétiques sur le Piton de la Fournaise (île de la Réunion) : influence des circulations de fluides, Thèse, Université de Paris VII, 1995.
- Newitt, L.R., C.E. Barton, & J. Bitterly, Guide for Magnetic Repeat Station Surveys, 112 pp., International Association of Geomagnetism and Aeronomie, Boulder, Co., 1996.
- Poirier, J.P., V. Malavergne, and J.-L. Le Mouél, Is there a thin electrically conducting layer at the base of the mantle? AGU volume on the Core-Mantle Region (sous presse), 1998.
- Proceedings of the VIth Workshop on Geomagnetic Observatory Instruments Data Acquisition and Processing, 249 pp., Editor Jean L. Rasson, publication n°003, Institut Royal Météorologique de Belgique, 1996.
- Proceedings of the VIIth Workshop on Geomagnetic Observatory Instruments Data Acquisition and Processing, 450 pp., Editors A. Best and H.-J. Linthe, Scientific Technical Report STR98/21, publication Adolf Schmidt-Observatory for Geomagnetism Niemeck, GeoForschungsZentrum Potsdam, 1998.
- Ranaivo Nomemenjanahary, F.N., C. Andriamaampianina, L. Rakotovo, J. Bitterly, J.-J. Schott, and C. Barton, Statistical comparative study between IGRF 1995's candidate models, Proceedings of the VIIth Workshop on Geomagnetic Observatory Instruments Data Acquisition and Processing, GeoForschungsZentrum Potsdam, 209-216, 1998.
- Schott, J.-J., J. Bitterly, and M. Menvielle, Automatic magnetic observatories: A tentative procedure, Proceedings of the VIIIth Workshop on Geomagnetic Observatory Instruments Data Acquisition and Processing, GeoForschungsZentrum Potsdam, 189-200, 1998.
- Tarits, P. and M. Mandea Alexandrescu, Global Induction with magnetic observatories data: Role of sea floor observatories, AGU, U41A-67, San Fransico Dec. 1998.
- Vassal, J., M. Menvielle, M. Dukhan, K. Boka, Y. Cohen, V. Doumouya and O. Fambitakoye, A study of the transient variations of the Earth electromagnetic field at dip latitudes in Western Africa (Mali and Ivory Coast), *Ann. Geophysicae*, 16, 6, 677-697, 1998.
- Zlotnicki, J., J.-L. Le Mouél, J.C. Delmond, C. Pambrun and H. Delorme, Magnetic variations on Piton de la Fournaise volcano. Volcanomagnetic signals associated with the November 6 and 30, 1987, eruptions, *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 56, 281-296, 1993.

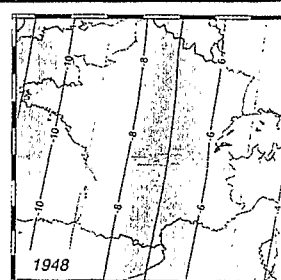
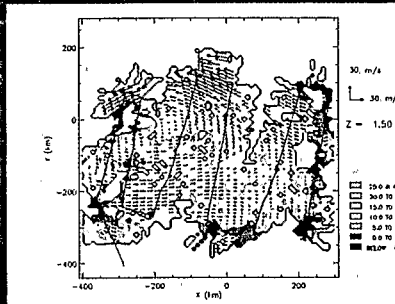
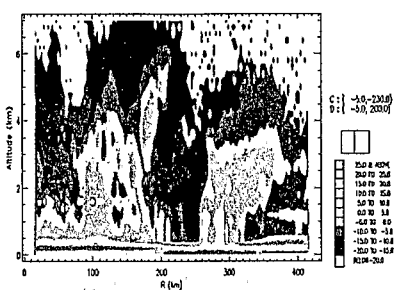
CNFGG - RAPPORT QUADRIENNAL 1995 - 1998

de l'un



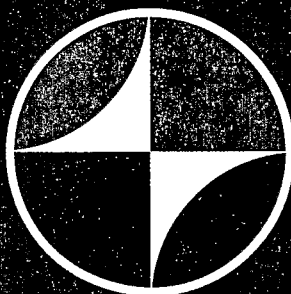
RAPPORT QUADRIENNAL

1995 - 1998



XXII^e Assemblée Générale de l'Union Géodésique et Géophysique Internationale

Birmingham (Angleterre), du 18 au 30 juillet 1999



RAPPORT QUADRIENNAL

1995 - 1998

Edité par Jean-Pierre Barriot
Observatoire Midi-Pyrénées
14, avenue Edouard Belin, 31400 Toulouse

LE COMITÉ NATIONAL FRANÇAIS DE GÉODÉSIE ET GÉOPHYSIQUE

HISTORIQUE

