

OBSERVATIONS MAGNETIQUES DE LA TERRE

Mioara MANDEA

Institut de Physique du Globe de Paris

*

:

:

" "

INTRODUCTION :

The study of the terrestrial magnetic field is one of the most ancient subjects of the physics of the globe. In the past, measures of geomagnetic field, that mobilized many observers and required a lot of effort and of time, served to descriptions of the field especially , of its temporal variation and to calculations of geomagnetic potential models. It is during the last decades that the geomagnetic brought some essential information to a better understanding of the dynamics of the planet : by taking measure made in observatories and aboard satellites, precious information on processes that are located in the fluid core of the planet, on interaction between the core and coat and on certain properties of the deep coat have been gotten.

The theory "dynamo" that tempts to explain the mechanism that maintains the terrestrial magnetic field has, in the same time, begun to take into account the whole terrestrial and spatial observations which are available.

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 interactions 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.

* Article paru dans la revue XYZ, N° 82 et publié dans le Bulletin des Sciences Géographiques avec leur aimable autorisation.

. 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 (**Bi**), la seconde à l'extérieur (**Be**).

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

Le champ principal (**Bp**) aussi appelé champ nucléaire, a son origine 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 environ 60 000 nT aux pôles et 30 000 nT à l'équateur.

Le champ principal, représentant en moyenne plus de 90% du champ observé à la surface du Globe, est engendré par des courants électriques circulant dans la partie fluide du noyau de la Terre composé 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 et de nouveaux courants électriques sont induits comme lorsque l'on modifie la géométrie d'un circuit conducteur fermé placé dans un champ magnétique. Ce processus permet de transformer de l'énergie mécanique en énergie magnétique, c'est la 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.

Le champ principal possède, en outre, la possibilité 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. Ainsi, la dernière inversion observée remonte à 780 000 ans.

Le champ crustal (**Bc**) a ses sources dans la croûte terrestre et est beaucoup plus faible, en moyenne, que **Bp** mais il peut néanmoins atteindre, par endroits, à la surface du Globe, plusieurs milliers de nT. Il est engendré par les roches aimantées de la croûte terrestre situées au-dessus de la surface isotherme dite de Curie. 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 de continents à partir de la cartographie des anomalies magnétiques marines.

Le champ externe (**Be**) est engendré par des courants électriques circulant au-delà d'une altitude de quelque 100 km. Si la Terre était seule dans l'espace, son champ magnétique se propagerait à l'infini dans l'univers. En théorie, ce champ serait celui d'un dipôle incliné par rapport à l'axe de rotation de la Terre. Mais en réalité, la Terre baigne dans un environnement magnétique, du en partie au vent solaire.

Ce vent empêche le champ magnétique terrestre de s'étendre à l'infini et le confine dans une cavité appelée magnétosphère. Le bord intérieur de cette cavité est l'ionosphère. La géométrie de la magnétosphère est liée à sa position par rapport au Soleil.

Le vent solaire est composé de particules ionisées, essentiellement des protons et des électrons, expulsés de la couronne solaire. Ces particules se déplacent avec une certaine énergie cinétique En suivant l'axe Soleil Terre et repoussent les lignes de champ terrestre. Le bord extérieur de la magnétosphère, appelé la magnéto-pause, est, en première approximation, imperméable aux particules du vent solaire. On compare ainsi la magnétosphère à un bouclier protégeant la Terre des particules à haute énergie du vent solaire.

En cas de forte activité solaire, certaines particules pénètrent dans la magnétosphère. A la surface de la Terre, cela se traduit par des phénomènes parfois spectaculaires comme les aurores boréales et les orages magnétiques.

L'OBSERVATION DU CHAMP GÉOMAGNÉTIQUE

Fonctionnant depuis plus d'un siècle, les observatoires géomagnétiques enregistrent de façon 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 (Figure 1) parmi les sept suivantes: la déclinaison D, l'inclinaison I, l'intensité totale F, la composante horizontale H 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.

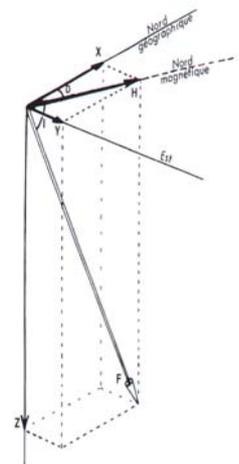


Figure1: Les composantes du champ magnétique dans un système géocentrique.

Les éléments géomagnétiques, définis dans la figure 1, ne sont pas complètement déterminés que depuis quelque 150 ans. À notre connaissance, c'est seulement au XVI^{ème} siècle que l'on a mesuré la déclinaison magnétique. Les séries de mesures les plus longues dont on dispose sont celles de Paris et de Londres qui couvrent quasiment 400 ans. On a pu, à partir de celles-ci, reconstruire une courbe de la variation temporelle de la déclinaison et ainsi mieux comprendre la variation séculaire (variation temporelle du champ en un point donné P à l'instant t, c'est à dire la dérivée première par rapport au temps du champ principal en P) du champ principal durant les quatre derniers siècles (Figure 2)

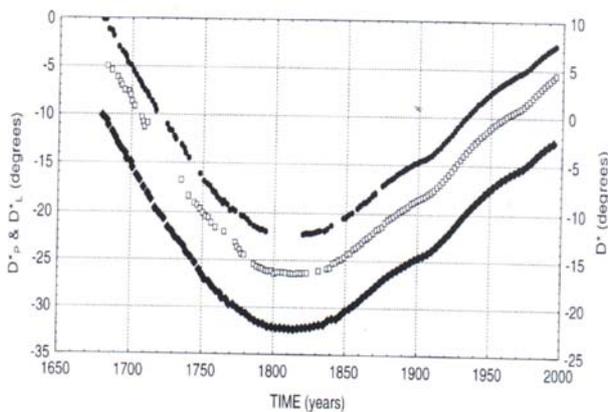


Figure 2 : Courbes des moyennes annuelles de la déclinaison, corrigées et ajustées aux repères de l'observatoire de Chambon la Forêt (D_p - courbe du haut) et à celui d'Hardland D_L - courbe intermédiaire). La courbe inférieure représente la courbe synthétique de la déclinaison.

LES OBSERVATOIRES MAGNÉTIQUES

Le réseau mondial comporte environ 200 observatoires dont la distribution à la surface de la terre et l'équipement sont très hétérogènes. 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 (World Data Center - 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 des 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. 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 CD-rom. 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 3a ; leur nombre a constamment augmenté depuis la création du réseau : de 44 observatoires en 1992, à 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.

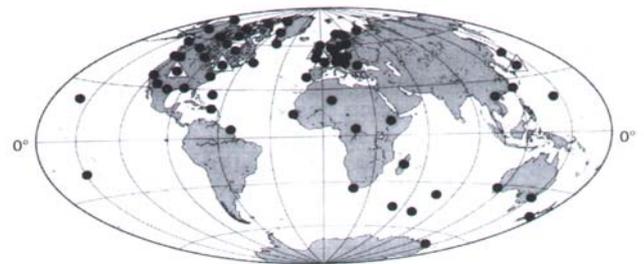


Figure 3a : Distribution des observatoires (cercles pleins), des GIN's (triangles ouverts) du programme INTERMAGNET



Figure 3b : Distribution des observatoires du Bureau Central de Magnétisme Terrestre

Quatorze observatoires (Figure 3b) font partie du "Bureau Central de Magnétisme Terrestre" (BCMT) : observatoires français ou en coopération destinés à mesurer le champ magnétique terrestre. Tous les observatoires du BCMT 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. 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 sont importantes.

L'OBSERVATOIRE MAGNÉTIQUE NATIONAL DE CHAMBON LA FORÊT

Parmi les quatorze observatoires, CHAMBON LA FORÊT est l'observatoire magnétique national perdu au milieu de la forêt d'Orléans, à une vingtaine de km de PITHIVIERS (Figure 4). L'observatoire de CHAMBON LA FORÊT a été construit en 1935. Installé tout d'abord à St-MAUR de 1883 à 1900, un déménagement a dû être envisagé : la raison était l'installation du tramway qui perturbait les mesures : ensuite à VALJOYEUX (Yvelines) de 1901 à 1934, et on a dû une fois de plus penser à un autre lieu car c'est l'électrification du train qui était cette fois-ci l'élément perturbateur ! Alors pourquoi CHAMBON LA FORÊT : situé à plusieurs km de l'habitation la plus proche, le site possède un autre sol dont la nature ne crée pas de forte anomalies locales.



Figure 4 : Site de l'observatoire de Chambon la Forêt.

Aujourd'hui ce sont les variomètres magnétiques qui font les enregistrements en permanence des variations du champ magnétique. Mais ces instruments ne restent pas stables dans le temps et ils doivent être étalonnés par des mesures dites "absolues". La valeur exacte des trois composantes du champ magnétique est donc déterminée par ces mesures absolues faites deux - trois fois par semaine. Les appareils utilisés pour les mesures absolues ont été très différents au cours du temps. Notons, par exemple, que pour mesurer la déclinaison, on a passé de l'utilisation du théodolite à aimant suspendu au très moderne déclinomètre - inclinomètre à vanne de flux (figure 5).

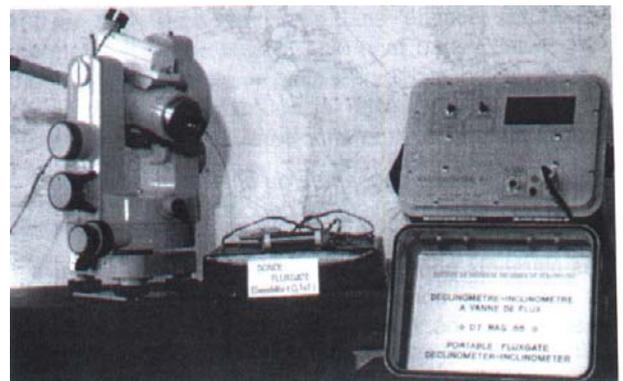


Figure 5 : Déclinomètre-Inclinomètre portable utilisé dans les observatoires magnétiques français.

Une poignée de personnes sont les "gardiens" du champ magnétique... Ils sont perdus au milieu de la forêt d'Orléans pour veiller à la bonne marche de l'observatoire, dont la tranquillité ne doit être troublée que par les orages magnétiques que provoquent parfois notre soleil...

LES DONNÉES GÉOMAGNÉTIQUES - QU'EN FAIRE ?

Les données d'observatoire sont diffusées systématiquement dans les centres mondiaux (WDC, INTERMAGNET). Ces données sont régulièrement utilisées pour étudier d'une façon plus précise le champ magnétique terrestre.

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/mètre.

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/mètre pour le manteau inférieur, valeur en remarquable accord avec celle obtenue en laboratoire. 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 1974 et 1987, ont été utilisées dans une inversion 3-D. 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.

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 1970, 1979 et 1992.

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. 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 Géomagnetic Indices ASY et SYM", 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. Ces trois exemples, ainsi que des études, montrent bien la contribution essentielle des observatoires magnétiques dans un domaine où les applications à la prédiction des perturbations qui affectent l'environnement électromagnétique de la Terre sont en plein développement.

PARTICIPATION AU PROGRAMME ORSTED

Le projet ORSTED 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'ORSTED 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 (ORSTED 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 CD-rom annuel. Ces données seront utilisées par les principaux investigateurs du programme ORSTED pour valider ou corriger rapidement les données reçues des instruments embarqués.

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.

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.

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 complet, bien instrumenté, d'observatoires, sera essentiel pour réduire les données fournies par les satellites (SAC-C et CHAMP sont des missions satellitaires prévues pour l'année 2000). A long terme, les connaissances sur le champ magnétique terrestre issues des observations, ainsi que les résultats des modèles numériques et des montages expérimentaux devraient nous conduire à comprendre le fonctionnement de la géodynamo encore énigmatique...