

# Observations magnétiques de la terre

Mioara MANDEA

Institut de Physique du Globe de Paris

## 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.

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 ( $\vec{B}_i$ ), la seconde à l'extérieur ( $\vec{B}_e$ ).

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

- Le champ principal ( $\vec{B}_p$ ) 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  $11^\circ$  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 ( $\vec{B}_c$ ) a ses sources dans la croûte terrestre et est beaucoup plus faible, en moyenne, que  $B_p$  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.

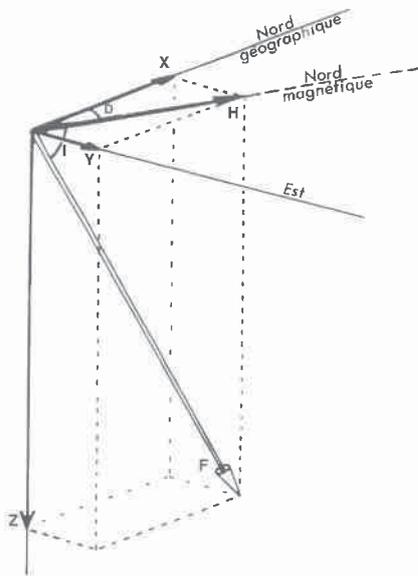
Le champ externe ( $\vec{B}_e$ ) est engendré par des courants électriques circulant au-delà d'une altitude de quelque 100 km. Si la Terre était seule dans l'espace, son champ magnétique se propagerait à l'infini dans l'univers. En théorie, ce champ serait celui d'un dipôle incliné par rapport à l'axe 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 magnétopause, 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.

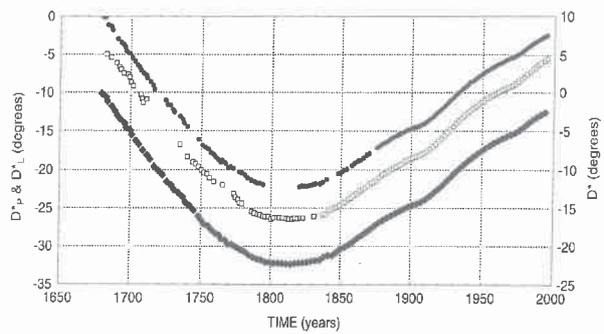
### L'OBSERVATION DU CHAMP GÉOMAGNÉTIQUE

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.



**Figure 1 :** 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<sup>ème</sup> 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