

Prospection Magnétique

Introduction

La prospection magnétique s'intéresse au champ magnétique terrestre dont le but est d'étudier les anomalies magnétique qui apporteront des informations sur les sources plus ou moins profondes dans la croûte terrestre qui peuvent intéresser le prospecteur, en prospection magnétique le paramètre fondamental est la susceptibilité magnétique des roches elle permet de caractériser la composition de ces roches. Le champ magnétique peut être défini par 3 composantes en tous point donné : Nord, Sud et verticale (X, Y, Z). On donne une valeur exprimée par la grandeur du champ total F et sa déclinaison D ainsi que son inclinaison I ; où D est l'angle entre la composante horizontale du champ et le Nord géographique et I , l'angle entre F et l'horizontale. Ce champ peut être assimilé à celui d'un dipôle centré dont l'axe ne coïncide pas avec celui de la rotation de la terre puisqu'ils forment actuellement un angle de 11.5° , une valeur qui évolue au cours du temps en fonction du noyau de la terre. Au dipôle centré sont associées des lignes de champ magnétique qui relient le pôle Sud au pôle Nord. Le champ magnétique est un champ relativement faible, de l'ordre de 0.5 Gauss, soit $5 \cdot 10^{-5}$ tesla. Le champ magnétique terrestre n'est pas constant dans le temps il est affecté par une variation très lente dite séculaire.

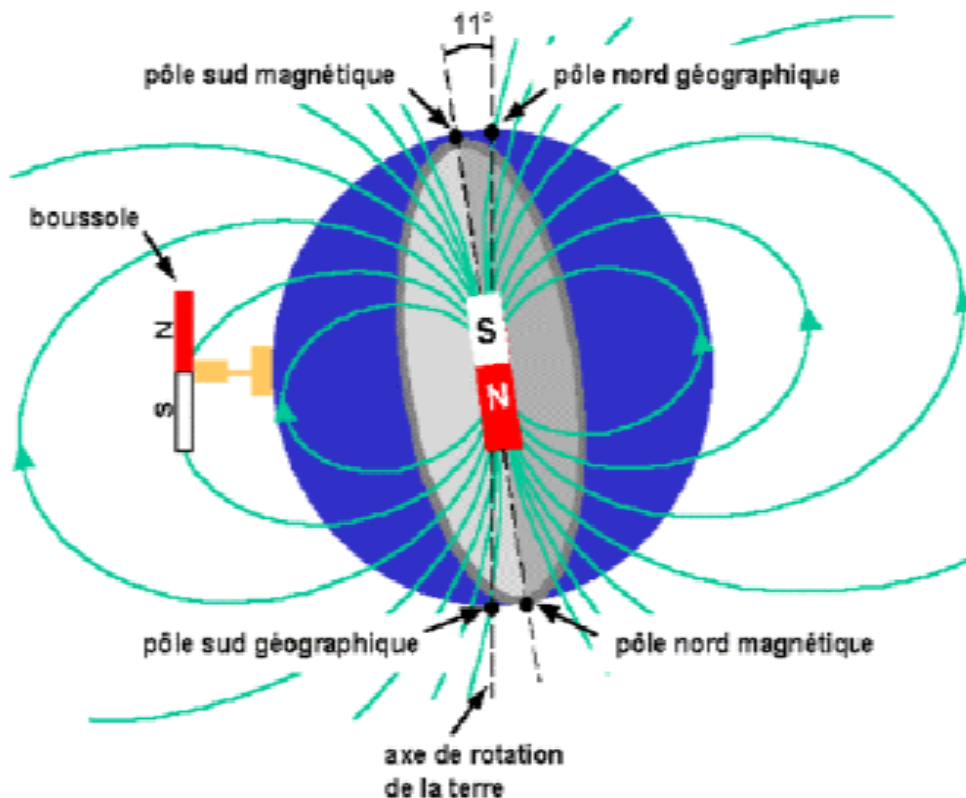


FIG : Champ magnétique terrestre

1 / Principe et théorie élémentaire :

1.1 / Force magnétique : l'expression de la force magnétique se déduit de la loi de coulomb pour les pôles magnétique son expression est donnée par la relation suivante :

$$\vec{F} = \frac{m_1 m_2}{\mu r^2} \vec{r}$$

Ou : F : force en dynes ($\text{cm.g/s}^2 = 10^{-5}$ N), m_1, m_2 : masse magnétique ou pôles, r : distance entre les deux pôles, μ : perméabilité du milieu.

1.2 / Champ magnétique : Une masse magnétique m_1 apportée au point M de l'espace est soumise a l'attraction émanant d'une autre masse magnétique m située a une distance r du point M. L'intensité du champ magnétique H est définie comme la force exercée sur un pôle

unitaire : $\vec{H} = \frac{\vec{F}}{m_1} = \frac{m}{\mu r^2} \vec{r}$ en unité C.G.S, l'unité du champ est l' **oersted**.

1.3 / Moment magnétique : Il n'y a pas de masse magnétique libre. Seul le dipôle, association de deux pôles $-m$ et $+m$ séparés d'une distance l , a une signification physique.

Le moment magnétique \vec{M} du dipôle est un vecteur dirigé suivant la droite joignant $-m$ à $+m$, orienté de $-m$ à $+m$ et d'intensité : $\vec{M} = ml \vec{r}$.

1.4 / Intensité d'aimantation : Un corps magnétique placé dans un champ magnétique externe sera magnétisé par induction. L'intensité de la magnétisation est proportionnelle à la force du champ, et sa direction est dans celle du champ. Elle est définie comme le moment

magnétique par unité de volume : $\vec{I} = \frac{\vec{M}}{V}$

1.5 / Susceptibilité magnétique : Le degré de magnétisation d'un corps sera déterminé par sa susceptibilité magnétique k qui est donnée par la relation suivante :

$$K = \frac{\vec{I}}{\vec{H}}$$

En prospection magnétique, la susceptibilité magnétique est un paramètre fondamental, puisque la réponse magnétique des roches est fonction du contenu en matériel magnétique, qui lui aura une susceptibilité beaucoup plus grande que celle de la roche elle-même.

1.6 / Induction magnétique : Un corps magnétique placé dans un champ magnétique externe \vec{H} , aura ses pôles magnétiques plus ou moins alignés sous l'effet de \vec{H} , produisant un champ \vec{H}' relié a l'intensité de la magnétisation \vec{I} . L'induction magnétique sera alors le champ total à l'intérieur du corps :

$$\vec{B} = \vec{H} + \vec{H}'$$

$$\text{En unités CGS} = \vec{H} + 4\pi \vec{I} = (1 + 4\pi K) \vec{H}$$

Par définition, le rapport de l'induction sur le champ magnétique principal est la perméabilité μ .

$$\vec{B} = (1 + 4\pi K) \vec{H} = \mu \vec{H}$$

Dans le système CGS, \vec{B} : gauss, \vec{H} : Oersted

On a donc que la perméabilité magnétique $\mu = (1 + 4\pi K)$. en général on peut écrire $\mu = \mu_0(1 + 4\pi K)$ avec $\mu_0 = 1$ pour le vide (Unité CGS).

1.7 / Perméabilité magnétique : si l'on place un échantillon dans un champ magnétique extérieur \vec{H} , \vec{B} permet de décrire le comportement de la substance au sein de \vec{H} . Il existe une relation entre \vec{B} et \vec{H} telle quelle : $\vec{B} = \mu \vec{H}$

Où μ_0 : est la perméabilité magnétique exprimée en A/m.

$\vec{B} = \mu_0(1 + X_m) \vec{H}$, on appelle $(1 + X_m) = \mu_r$ la perméabilité relative. X_m, μ_r n'ont pas de dimension. Pour les substances ferromagnétique, X_m n'est pas constant et dépend de H ($X_m=10^4$). Pour les substances paramagnétiques 10^{-5} , pour les substances diamagnétiques, X_m est de l'ordre de -1.10^{-5} .

3 / Origine du champ Magnétique terrestre :

Le champ magnétique principal peut théoriquement être causé par une source interne ou externe dont le magnétisme peut être rémanent ou engendré par un flux de courant.

Plusieurs hypothèses ont été avancées pour expliquer les mécanismes des sources internes, parmi lesquelles on a :

a) La théorie Blackett : Il avait évalué le rapport des moments cinétiques et magnétiques des 3 astres (terre, soleil et étoile) et avait constaté que les rapports étaient voisins. Il avait conclu qu'il s'agissait d'une propriété fondamentale des corps en rotation.

b) La Dynamo : Suggère que le champ magnétique terrestre est crée et entretenu par un processus d'induction des courants électriques intenses circulerait dans le noyau extérieur possédant une conductibilité électrique très forte (noyau extérieur : la partie liquide du noyau située entre $r = 1300$ et 3500 km). On assume aujourd'hui que le noyau est une combinaison de fer (Fe) et de nickel (Ni), tous deux de bon conducteurs électriques, même si le noyau était formé d'éléments moins conducteurs, l'énorme pression retrouvée pourrait presser les électrons de façon à former des gaz à électrons libres de conductivité satisfaisante. La source magnétique est illustrée par le modèle auto-excité. C'est à dire, un fluide de grande conductivité bouge dans un mouvement complexe et des courants électriques sont causés par des variations chimiques produisant un champ magnétique.

4 / Magnétisme des roches et des minéraux :

a) Les principaux types de magnétisme : les anomalies magnétiques sont entièrement dues à la quantité de minéraux magnétiques que contiennent les roches, par la suite il devient nécessaire d'étudier ces minéraux et surtout leur susceptibilité magnétique.

b) Diamagnétisme : Un diamagnétique parfait offre une grande résistance au passage du champ magnétique. Les lignes de champ \mathbf{H} ne pénètrent pas dans le matériau. La perméabilité est donc nulle. C'est l'attribut d'un matériel qui a une susceptibilité magnétique négative ($k < 0$), c'est à dire que l'intensité de la magnétisation induite dans le corps par un champ \mathbf{H} sera dans la direction opposée à \mathbf{H} .

c) **Paramagnétisme** : Par définition, tous les matériaux qui ne sont pas diamagnétiques sont paramagnétiques, c'est à dire $k > 0$. Dans un matériau paramagnétique, chaque atome a un moment magnétique non-nul. Sous l'action d'un champ extérieur, ces moments magnétiques s'orientent et augmentent le champ **H** appliqué.

d) **Ferromagnétisme** : La magnétisation d'un matériau ferromagnétique correspond à l'orientation des dipôles élémentaires dans une même direction. A la différence des paramagnétiques, cette orientation peut se faire spontanément, en l'absence d'un champ H extérieur. La région de l'espace dans laquelle tous les moments magnétiques sont orientées selon une même direction s'appelle un domaine (de Weiss) et les limites entre ces domaines, des parois (de Bloch). Si on place un matériau ferromagnétique dans un champ H extérieur, les parois vont se déplacer de manière à renforcer le champ H extérieur. Si H augmente beaucoup, le domaine favorablement orienté occupera tout le volume du matériau qui est alors magnétisé a saturation.

Type	Susceptibility $\times 10^6$ emu		Type	Susceptibility $\times 10^6$ emu	
	Range	Average		Range	Average
Sedimentary			Igneous		
Dolomite	0-75	10	Granite	0-4000	200
Limestones	2-280	25	Rhyolite	20-3000	
Sandstones	0-1660	30	Dolerite	100-3000	1400
Shales	5-1480	50	Augite-Syenite	2700-3600	
Av. Var. Sed. (48)	0-4000	75	Olivine-Diabase		2000
Metamorphic			Diabase	80-13,000	4500
Amphibolite		60	Porphyry	20-16,700	5000
Schist	25-240	120	Gabbro	80-7200	6000
Phyllite		130	Basalts	20-14,500	6000
Gneiss	10-2000		Diorite	50-10,000	7000
Quartzite		350	Pyroxenite		10,500
Serpentine	250-1400		Peridotite	7600-15,600	13,000
Slate	0-3000	500	Andesite		13,500
Av. Var. Met (61)	0-5800	350	Av. acid Ign.	3-6530	650
			Av. basic Ign.	44-9710	2600

FIG : la susceptibilité magnétique dans différentes roches

5 / Magnétisme terrestre : variation, anomalie et mesure :

5.1 / Variation du champ géomagnétique :

Le champ magnétique varie dans le temps et dans l'espace. Il existe une variation séculaire, lente et régulière d'environ 15 nanotesla / an depuis 30 ans à Chambon, la forêt que l'on observe après élimination des variations rapides par filtrage, et une variation journalières, de plus courte longueur d'onde qui s'étendent des pulsations de très faible amplitudes et de courtes périodes. Au cours de temps géologique, le champ magnétique de la terre a subi de forte fluctuations, vécu des périodes d'instabilité et connu plusieurs inversion de ses pôles magnétiques (le plus récent des renversements des pôles nord et sud remonte à 790000 ans.).

5.2 / Anomalie magnétique : la prospection magnétique consiste à analyser les anomalies magnétiques, lesquelles sont des distorsions locales du champ terrestre qui modifient direction

et longueur du vecteur représentant localement ce champ. Ces anomalies sont provoquées par la présence dans le sous sol de corps aimantables : eau, silice, fer, acier,... L'allure de ces anomalies dépend de l'inclinaison du champ : pour les anomalies induites, c'est l'inclinaison actuelle du champ terrestre qui influe sur les caractéristiques de distorsions du champ, pour les anomalies rémanentes, ces caractéristiques dépendent de l'inclinaison du champ lors d'autres périodes géologiques. Il faut signaler aussi que la forme, la position, les dimensions et la nature du corps perturbateurs influent sur l'allure générale.

5.3 / Instrument de mesure du champ Magnétique : Quatre types principaux de magnétomètre ont été développés, chacun fonctionnant sur un principe différent :

1. Balance magnétique, 2. Sursaturation magnétique (ou Fluxgate" en anglais), 3. Précession nucléaire, 4. Pompage optique.

Seuls les trois derniers sont en usages de nos jours. Le premier est utilisé pour mesurer une seule composante du champ alors que les autres mesurent le champ total.

a) Fluxgate : Développé durant la 2^{ème} guerre mondiale pour détecter les sous-marins.

1^{er} magnétomètre à être utilisé pour les levées aéroportées, Chaque noyau est a l'intérieur d'une bobine, Les 2 bobines sont identiques et connectées en série mais l'enroulement est inverse, Les 2 bobines se retrouvent a l'intérieur d'une troisième bobine, Lorsqu'on envoie un courant dans les 2 bobines, le champ engendrée par chacune d'elle sera de même intensité et opposée → le champ total est nul et il n'y pas de courant induit dans la troisième bobine, En présence d'un champ extérieur, le champ d'une bobine sera augmenté et celui de l'autre diminué.

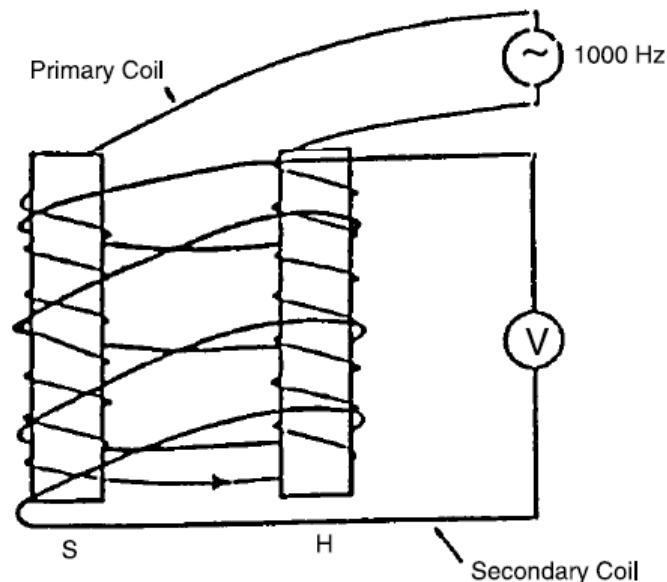


FIG : Fluxgate magnétomètre.

6 / Prospection magnétique :

Fait appel à des méthodes considérées comme non destructives afin d'offrir, par une série de mesures, la meilleure image possible du sol. Elle implique un travail de préparation essentiel :

- localisation précise du secteur à prospector sur une carte.
- Établissement du plan des points de mesure.
- La maille choisie ne doit pas être large au point de nuire aux résultats sans être non plus trop serrée au risque de perdre inutilement du temps.

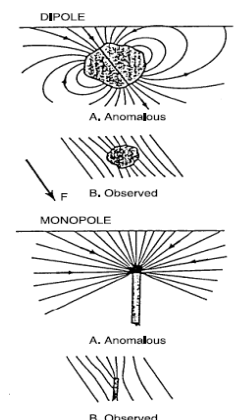
La prospection magnétique repose sur la mesure des variations locales du champ magnétique terrestre. Il s'agit d'étudier les anomalies du champ magnétique associées à des sources situées dans la croûte terrestre. Basée essentiellement sur le champ magnétique terrestre et sur la susceptibilité magnétique des minéraux composant les roches (la susceptibilité est la propriété qu'on certain matériaux a devenir aimantes en présence d'un champ magnétique ambiant), la prospection magnétique consiste à chercher et à localiser les roches, les gisements par les anomalies ou variations locales qu'ils produisent dans le champ terrestre. La plupart des minéraux ont une susceptibilité magnétique très faible sauf la magnétite (Fe_3O_4) qui est omniprésente dans presque toutes les roches en quantité variable, une fraction de 1% étant détectable.

Des petites fluctuations peuvent être provoquées par des différences d'aimantation entre le sol et les vestiges enfouis : les sols anthropiques sont plus magnétiques que les structures maçonnées. De plus fortes variations peuvent aussi, de la même façon perturber le champ magnétique : présence d'objets archéologique liés à la métallurgie (scories, chutes, produit en cours d'élaboration...) ; les chauffes répétées dans des structures de combustion et la cuisson des argiles engendrent la transformation minéralogique de certain oxydes de fer en minéraux hautement magnétique. Elles se traduisent sur les cartes produites par de très fortes anomalies.

Même si la présence de minéraux magnétiques est facilement détectable par la prospection magnétique, il est impossible d'évaluer les potentialités économiques d'un gisement ou d'un réservoir d'eau. La magnétite a une susceptibilité supérieure aux autres matériaux ferriques et les données magnétiques reflètent surtout sa concentration. Ainsi une faible quantité de magnétite dans une roche non magnétique peut donner une anomalie beaucoup plus importante qu'un dépôt. Plus une roche est basique, plus la teneur en magnétite est haute, donc plus la susceptibilité est haute. La gamme de valeurs possibles de la susceptibilité d'un type de roche est relativement large et recouvre les valeurs d'autre type de roches. Il est impossible d'identifier avec certitude la roche en se basant seulement sur sa susceptibilité.

7 / Mise en œuvre et interprétation d'une campagne magnétique :

La zone à prospector est découpée en bloc carrés de 50 m de coté. Le mode opératoire par bloc consiste à prospector le long de profils parallèles espacés d'une distance constante, distance évaluée selon les dimensions caractéristiques des structures sondées. Le long de chaque profil le magnétomètre acquiert les données en continu tous les 10 cm. La rapidité de mise en œuvre des magnétomètres récents permet de couvrir de larges surfaces.

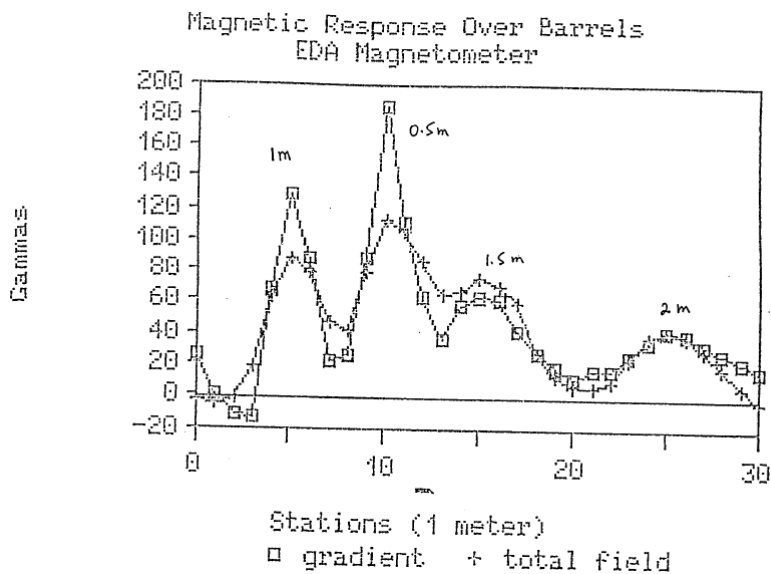


a) Approche qualitative :

Une anomalie est le reflet d'une perturbation dans le champ magnétique qui provient d'un changement local dans l'aimantation ou dans les contrastes d'aimantation, les anomalies magnétiques sont asymétriques conséquence de la nature et de la forme de la source : unipole ou dipôle. Plus la source est profonde et plus large est l'anomalie observée en surface. Cette propriété permet de calculer la profondeur de ces sources. D'autant plus, la quantité de la magnétite dans la source par rapport à l'encaissant, la forme géométrique du corps perturbateur (Filons, Failles, Amas minéralisés) y influent considérablement.

b) Approche quantitative :

Consiste à calculer les anomalies théorique produite par les corps perturbateur de symétrie cylindrique parmi les méthodes de calculs on cite la méthode de Talwani (1964).



8 / Application de la méthode magnétique :

- **Exploration minière** : détection directe : gisement de fer magnétique, magnétite et gisement d'amiante (les fibres sont associées à la magnétite et se trouve dans des roches très basiques), détection indirecte : Nickel associée à des roches basiques et minéralisation associée à des structures (Faille, plissements, intrusifs).

- **Cartographie** : utilisation tant au sol qu'aéroporté, tant local que régional, permet d'interpoler entre les affleurements sans être obligé de forer ou de creuser.

- **Exploration pétrolière** : détection directe : Etude des bassins sédimentaires à partir des anomalies causées par des structures du socle ou sa topographie et détection indirecte : piège structuraux (Failles, plis) et recherche hydrographique.

9/ Corrections : Le choix des magnétomètres et les corrections à apporter aux mesures dépendent de l'objectif visé.

Pour une étude portant sur la détermination des anomalies magnétiques de la croûte océanique, en vue de déterminer l'âge de la plaque ou les vitesses d'expansion, on se suffit d'un système minimal. Un magnétomètre à protons classique est suffisant. On se contente de corriger les variations régionales en se référant au modèle IGRF (International geomagnetic regional field) qui calcule les douze premières harmoniques du champ de Gauss. Disponible

depuis 1995, le DGRF (Definitive geomagnetic regional field) prend en compte la dérive du champ calculé jusqu'à l'an 2000.

Pour des études plus précises, portant sur la structure géomagnétique locale (recherche de chambre magmatique, de formations minéralisées, d'épaves, de sites archéologiques, etc.), on préfère un magnétomètre plus précis à effet Overhauser ou à pompage optique. Pour effectuer les corrections journalières, on utilise un second magnétomètre à point fixe, soit à terre, soit sur une bouée, soit posé sur le fond dans un conteneur étanche. Avec un site aérien, on peut établir une liaison radio permettant les corrections en temps réel. L'utilisation de magnétomètres montés en série peut être utile pour obtenir directement le gradient, lorsque l'on s'intéresse aux variations rapides du champ : recherche d'épaves par exemple.