

## EPREUVE DE TIPE- PARTIE D

TITRE: CHAMP MAGNETIQUE TERRESTRE ET EFFET DYNAMO

Temps de préparation : 2 h 15

Temps de présentation devant le jury : 10 minutes

Entretien avec le jury : 10 minutes

GUIDE POUR LE CANDIDAT :

Le dossier ci-joint comporte :

Document principal : 10 pages

Documents complémentaires : 2 pages

**Travail suggéré au candidat:**

Le candidat pourra faire une synthèse du texte, en mettant l'accent sur (au choix) :

- la problématique qui est posée, les éléments de réponse qui existent et ceux que l'on attend encore.

- le bilan énergétique de l'effet dynamo, dans le cas du modèle simple de la dynamo de Bullard et dans le cas de la Terre.

CONSEILS GENERAUX POUR LA PREPARATION DE L'EPREUVE :

- Lisez le dossier en entier dans un temps raisonnable
- Réservez du temps pour préparer l'exposé devant le jury.

## Champ magnétique terrestre et effet dynamo

### 1 Le champ magnétique de la Terre et des planètes.

L'existence du champ magnétique terrestre est connue depuis longtemps, puisque son application à la boussole a permis aux navigateurs du XV<sup>ème</sup> siècle de s'orienter sur les océans et d'atteindre ainsi de nouveaux territoires. En revanche, il existe encore actuellement de nombreuses interrogations quant à l'origine de ce champ magnétique, tant sur le plan de la physique que de la géophysique.

#### 1.1 Le champ magnétique terrestre.

Le champ magnétique terrestre est principalement dipolaire à la surface de la Terre (voir le texte donné en annexe). L'axe de symétrie du dipôle est actuellement incliné de 11° par rapport à l'axe de rotation de la Terre. Le pôle Sud magnétique (intersection de l'axe du dipôle avec la surface du globe) se situe aujourd'hui dans le nord du Canada. L'intensité du champ est de 70  $\mu\text{T}$  aux pôles et de 35  $\mu\text{T}$  à l'équateur.

Mais il n'en a pas toujours été ainsi. En effet, il est maintenant possible de connaître avec une certaine précision l'orientation du champ magnétique à travers l'histoire géologique. Le principe de ces mesures, appelées mesures de "paléomagnétisme", consiste à observer l'orientation du champ magnétique dans de petites particules d'un matériau ferromagnétique qui ont été immobilisées à une époque donnée lorsqu'elles se sont retrouvées prisonnières, soit dans une roche volcanique lors de sa solidification, soit dans des sédiments. L'analyse de ces roches volcaniques ou de ces sédiments, complétée par une datation, permet de remonter à l'orientation et (plus difficilement) à l'intensité du champ magnétique au cours de l'échelle de temps géologique.

Le résultat essentiel de ces mesures a été de montrer que le champ magnétique de la Terre a subi au cours de l'histoire géologique de la planète de nombreux retournements (inversion des pôles Sud et Nord). Ces retournements ont été très rapides (toujours à l'échelle géologique qui se compte en millions d'années) et semblent avoir eu lieu de manière assez aléatoire, ainsi que le montre la figure 1, qui décrit l'évolution de l'orientation du champ dipolaire au cours des derniers quatre millions d'années.

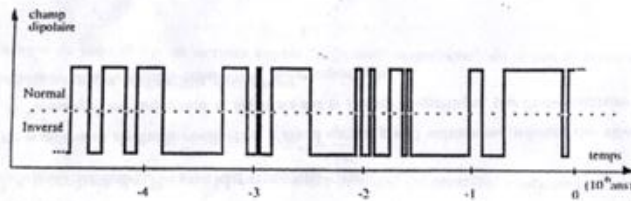


Figure 1

### 1.2 Cas des autres planètes du système solaire.

Les autres planètes du système solaire possèdent aussi un champ magnétique. Le tableau suivant donne quelques informations sur les planètes les plus proches, pour lesquelles des mesures de champ ont pu être effectuées.

Planète	rayon (km)	densité moyenne (kg.m <sup>-3</sup> )	période de rotation (jours)	champ magnétique (tesla)
Mercure	2440	5400	59	$3,3 \cdot 10^{-7}$
Vénus	6050	5200	243	$< 1,8 \cdot 10^{-8}$
Terre	6380	5500	1,0	$3,11 \cdot 10^{-5}$
Mars	3390	3900	1,026	$6,36 \cdot 10^{-6}$
Jupiter	71400	1300	0,41	$3,61 \cdot 10^{-4}$

Le résultat donné pour Vénus sous forme d'inégalité indique que le champ magnétique de Vénus, s'il existe, est trop faible pour être mesuré et on est donc contraint de donner simplement une borne supérieure à son intensité.

### 1.3 L'origine du champ magnétique terrestre.

Comme il a été mentionné en introduction, l'origine du champ magnétique de la Terre et des autres planètes est encore mal comprise actuellement. Avant de se lancer dans l'examen de diverses tentatives d'explications qui ont été étudiées au cours de ce siècle, il est utile de donner quelques informations sur la structure interne de la Terre, qui, comme on le verra, conditionne fortement les hypothèses sur l'origine du champ magnétique.

#### 1.3.1 La structure interne de la Terre.

Schématiquement la structure interne

de la Terre est celle représentée sur la figure 2.

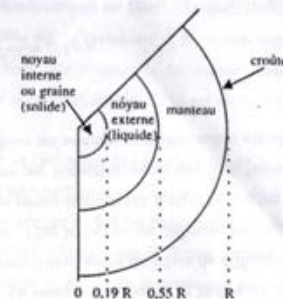


figure 2

La croûte et le manteau sont des parties solides. Le noyau externe est formé de fer liquide et la graine est composée d'un alliage solide de fer et de nickel.

Le fluide du noyau externe est en mouvement. La raison en est la suivante : la chaleur qui permet au noyau externe de rester liquide n'est pas produite au sein de la Terre mais est une relique de l'énergie qui a été libérée lors de la formation de la Terre (la formation d'une planète correspond à un état plus stable et donc libère de l'énergie). En conséquence, la Terre se refroidit peu à peu et le noyau externe se solidifie lentement au contact de la graine solide. Cette solidification implique une libération de chaleur (chaleur latente de solidification) localement à la frontière entre graine et noyau externe. Et au contraire, la frontière entre noyau externe et manteau est refroidie par le contact avec le manteau plus froid. Dans le noyau externe, on est donc en présence d'un liquide "chauffé par le bas" et "refroidi par le haut". On estime l'écart de température d'environ 1000 °C. Cette configuration est instable puisque le fluide du bas, plus chaud et donc moins dense, a tendance à se déplacer vers le haut et inversement pour le fluide du haut. Ce type de mouvement est appelé mouvement de "convection".

#### 1.3.2 Les hypothèses sur l'origine du champ magnétique terrestre.

Revenons maintenant aux causes possibles de l'existence du champ magnétique terrestre. Gauss a montré en 1835, par un calcul théorique basé sur la forme du champ mesuré, que celui-ci était nécessairement d'origine interne à la Terre. On a depuis établi que les sources magnétiques sont

trop faibles dans la croûte et le manteau pour être rendues responsables de l'intensité du champ magnétique que l'on observe en surface. Quant au noyau, constitué principalement de fer (ou fer + nickel pour la graine), donc de matériaux ferromagnétiques, on pourrait penser qu'il constitue une sorte d'aimant permanent. Mais il faut rappeler que le fer et le nickel perdent leurs propriétés ferromagnétiques au-dessus d'une température appelée la température de Curie, qui vaut 1101 °C pour le fer et 650 °C pour le nickel. Ces températures étant bien inférieures à celles du noyau, l'hypothèse d'un aimant permanent est aussi à écarter.

Un champ magnétique peut aussi exister dans un matériau conducteur non ferromagnétique mais sa durée de vie y est limitée par l'existence des courants électriques qu'il crée lui-même dans le matériau et qui dissipent l'énergie magnétique sous forme de chaleur par effet Joule. Dans le cas de la Terre, le temps de dissipation d'un champ magnétique est de l'ordre de 40000 ans. Or les mesures paléomagnétiques sur des échantillons très anciens permettent d'affirmer que la Terre possède un champ magnétique depuis au moins 3.2 milliards d'années. Ces données impliquent qu'il existe nécessairement un mécanisme d'entretien du champ magnétique terrestre, qui lui a permis de se maintenir ainsi sur une telle durée malgré les pertes par effet Joule.

Il est maintenant accepté dans la communauté scientifique que ce mécanisme est lié au mouvement de convection du fer liquide dans le noyau externe. Cet effet est appelé "effet dynamo".

## 2 L'effet dynamo

L'interaction entre un écoulement de liquide conducteur et un champ magnétique fait intervenir deux types de phénomènes : par l'intermédiaire de la force de Laplace, un champ magnétique peut modifier un écoulement, mais à l'inverse, par le phénomène d'induction, un écoulement peut créer des courants et donc modifier un champ magnétique. L'étude générale de l'ensemble de ces phénomènes est appelée "magnétohydrodynamique" et l'effet dynamo n'en est qu'un aspect parmi d'autres, mais dont l'enjeu scientifique est particulièrement important comme nous le verrons par la suite.

### 2.1 Le nombre de Reynolds magnétique.

Lorsqu'un écoulement de fluide conducteur s'étend sur un grand volume ou présente des vitesses élevées, le "brassage" est important et les effets sur le champ magnétique, par l'intermédiaire des courants induits dans le liquide conducteur, sont importants.

Par ailleurs, il a été mentionné au § 1.3.2 qu'un champ magnétique présent initialement dans un milieu a tendance à disparaître (on dit qu'il diffuse), et ce d'autant plus vite que la conductivité du milieu est faible (puisque c'est l'effet Joule qui est la cause de la diffusion du champ). Plus précisément, on caractérise ce phénomène par une durée appelée temps de diffusion, qui est le temps au bout duquel l'intensité du champ, si la source initiale de ce champ a été coupée, aura été réduite d'une fraction importante. Dans un milieu de taille  $L$ , de perméabilité magnétique  $\mu$  et de conductivité électrique  $\sigma$ , l'ordre de grandeur du temps de diffusion du champ est :

$$\tau_{diff} = \mu \sigma L^2$$

On comprend bien la présence des paramètres  $\sigma$  et  $L$  dans cette expression puisque la diffusion sera d'autant plus lente que la conductivité du milieu est élevée et que celui-ci est de grande taille. Quant à la perméabilité magnétique du milieu, elle relie champ magnétique et courants induits par l'équation de Maxwell-Ampère :

$$\text{rot} \vec{B} = \mu \vec{j} \quad (1)$$

Plus cette perméabilité est importante, plus grande est l'influence des courants induits sur le champ magnétique. Or la présence de courants induits retarde la diffusion, ce qui explique que le temps de diffusion croisse avec la perméabilité magnétique.

On peut définir par ailleurs le temps "de brassage" du fluide (plus couramment appelé "temps d'advection") qui est simplement le temps mis par le fluide se déplaçant à la vitesse  $U$  pour traverser le milieu de taille  $L$  :  $\tau_{adv} = L/U$ . La comparaison entre le temps de diffusion et le temps d'advection permet alors d'estimer la compétition entre les effets de diffusion dus à l'effet Joule et les effets d'induction dus au brassage. Plus le temps de diffusion est grand devant le temps d'advection et plus les effets du brassage seront importants malgré les pertes par diffusion (le fluide "a le temps" de fabriquer des courants par induction avant que la diffusion ne les fasse disparaître). Le rapport de ces deux temps donne un nombre sans dimension appelé le "nombre de Reynolds magnétique" :

$$R_m = \frac{\tau_{diff}}{\tau_{adv}} = U L \sigma \mu \quad (2)$$

On peut donc dire que plus ce nombre est grand, moins les effets de diffusion du champ sont importants.

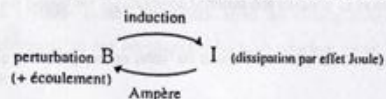
L'inverse du produit  $\sigma\mu$  est souvent appelé "diffusivité magnétique" du milieu et notée  $\nu_m$ . Le nombre de Reynolds magnétique s'écrit alors :

$$R_m = \frac{UL}{\nu_m} \quad (3)$$

Nous allons voir que ce nombre est le paramètre principal qui contrôle l'existence (ou l'absence) de l'effet dynamo.

## 2.2 Le principe de base de l'effet dynamo

L'effet dynamo est basé sur le principe illustré par le schéma ci-dessous :



Si un faible champ magnétique (d'origine externe, dans le cas de la Terre, il peut être dû au soleil ou aux autres planètes) apparaît dans un fluide conducteur, le mouvement du fluide en présence de ce champ va donner naissance à des courants induits. Ces courants vont à leur tour donner naissance à un champ magnétique.

Pour qu'un mécanisme de ce type permette à un champ magnétique d'être auto-entretenu, deux conditions sont nécessaires :

- le champ créé par les courants doit pouvoir s'ajouter au champ initial. Il faut pour cela qu'ils soient colinéaires et de même sens. Cette condition contraint la forme de l'écoulement, puisque c'est cette forme qui va imposer le sens des courants et donc du champ induit ;

- comme il est mentionné sur le schéma, les courants induits vont avoir tendance à se dissiper par effet Joule dans le fluide. Il faut donc qu'ils soient suffisamment importants pour pouvoir créer un champ magnétique malgré la dissipation. Cela signifie que les effets d'induction, liés à l'importance des mouvements du fluide, doivent dominer les effets de dissipation par effet Joule. Cette condition se traduit directement sur le nombre de Reynolds magnétique : celui-ci doit être suffisamment grand. On dit qu'il existe une condition de seuil sur le nombre de Reynolds magnétique.

Dans le cas du noyau terrestre, le nombre de Reynolds magnétique est estimé à environ 50.

## 2.3 La saturation du champ magnétique.

Lorsque les conditions sont réunies pour donner lieu à un tel effet d'auto-entretien d'un champ magnétique, on est en présence d'un phénomène dit "d'instabilité" : le champ induit s'ajoutant au champ initial, on va donc assister à une croissance progressive du champ. Cependant, il est physiquement impossible que ce champ croisse ainsi indéfiniment. Quel est alors le mécanisme qui limite la croissance du champ ?

Jusqu'à maintenant, nous n'avons parlé que de l'influence de l'écoulement sur le champ magnétique, le premier type de phénomènes dont il est question dans l'introduction du § 2. Le champ magnétique étant supposé au départ faible, on néglige en fait les phénomènes du deuxième type, lorsque le champ magnétique modifie l'écoulement. Mais lorsque le champ devient important, on ne peut plus négliger ces effets. Et c'est justement ce qui limite la croissance du champ : lorsque celui-ci devient suffisamment grand, l'écoulement est modifié de telle façon que l'effet d'induction devient moins important et le champ s'arrête alors de croître. On dit qu'il y a "saturation".

## 2.4 La dynamo de Bullard.

En 1955, le physicien anglais Bullard a proposé une illustration simple de ce mécanisme de dynamo à l'aide d'un simple disque tournant. Le schéma en est donné sur la figure 3.

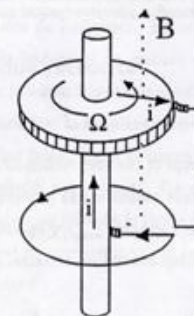


Figure 3

En présence d'un champ magnétique vertical orienté vers le haut, le disque, tournant à vitesse constante, va être parcouru par un courant radial vers l'extérieur puisque le vecteur densité de courant correspondant est donné par  $\vec{j} = \sigma \vec{v} \wedge \vec{B}$  et la vitesse  $\vec{v}$  (celle du disque) est orthoradiale.

Le courant radial ainsi induit va parcourir le circuit qui est relié au bord du disque et à l'axe de rotation par des balais qui permettent un contact tournant. Le circuit est orienté de telle façon que lorsqu'il est parcouru par un courant, cela crée un champ magnétique vertical vers le haut. Ce champ peut donc venir s'ajouter au champ initial et on a bien un champ auto-entretenu.

Un calcul simple permet de faire le lien avec la condition de seuil sur le nombre de Reynolds magnétique. Si le champ magnétique est supposé uniforme sur tout le volume du disque, la f.é.m. d'induction est donnée par :

$$e = \oint \vec{v} \wedge \vec{B} \cdot d\vec{r} = \int_0^a r\omega B \, dr = \frac{\omega B r_0^2}{2} \quad (4)$$

où  $r_0$  est le rayon du disque et  $\omega$  sa vitesse de rotation.

Le circuit électrique est formé du générateur de f.é.m.  $e$ , de la résistance  $R$  du circuit et de son inductance  $L$ . L'équation de maille du circuit s'écrit donc :

$$L \frac{di}{dt} + Ri = e = \frac{\omega B r_0^2}{2} \quad (5)$$

Et si l'on suppose que le champ magnétique  $B$  est créé par la spire que forme le circuit (supposé de rayon  $r_0$  elle aussi), on a alors :

$$B = \frac{\mu_0 i}{2r_0} \quad (6)$$

Ceci est bien sûr une approximation grossière puisque le champ créé par la spire n'est pas du tout uniforme alors qu'il est supposé uniforme dans le calcul de la f.é.m. d'induction, mais on cherche ici simplement à se donner une idée schématique du phénomène.

On obtient ainsi, en remplaçant  $i$  dans (5) par son expression tirée de (6), une équation différentielle pour le champ  $B$  :

$$\frac{dB}{dt} + B \left( \frac{R}{L} - \frac{\omega r_0 \mu_0}{4L} \right) = 0 \quad (7)$$

Si l'on suppose qu'à l'instant  $t = 0$ , le champ valait  $B_0$ , la solution de cette équation est :

$$B(t) = B_0 \exp \left[ \left( \frac{\omega r_0 \mu_0}{4} - R \right) \frac{t}{L} \right] \quad (8)$$

On retrouve bien les deux conditions pour que le champ ne s'annule pas :

- le mouvement doit avoir une configuration particulière : si le disque tournait dans l'autre sens, le courant induit serait aussi inversé et le champ créé s'opposerait au champ initial ;
- l'effet d'induction doit être assez grand par rapport à la dissipation par effet Joule : en effet, pour que la solution ne tende pas vers zéro, la condition suivante doit être vérifiée :

$$\omega r_0 \mu_0 > 4R \quad (9)$$

Et on peut remplacer  $R$  par son expression en fonction de la conductivité  $\sigma$  du milieu et des dimensions caractéristiques du circuit, longueur  $l$  et section  $S$  :

$$R = \frac{l}{\sigma S} \quad (10)$$

On obtient alors la condition suivante :

$$r_0 \omega \frac{S}{l} \mu_0 \sigma > 4 \quad (11)$$

Cette condition ressemble fortement à une condition sur un "nombre de Reynolds magnétique" où  $r_0 \omega$  est la vitesse,  $S/l$  la taille caractéristique du système et  $\mu_0 \sigma = 1/\nu_m$  l'inverse d'une diffusivité magnétique.

Cet exemple, bien que fort simplifié, donne une bonne illustration de ce qu'est l'effet dynamo. Cependant, il n'est qu'une "expérience de pensée" car un calcul plus exact et une application numérique montreraient que la vitesse de rotation à obtenir pour atteindre le seuil sur le "nombre de Reynolds magnétique" est beaucoup trop élevée pour que ce dispositif puisse être mis en place expérimentalement.

Ces considérations conduisent naturellement à se demander quel est l'état actuel des connaissances sur l'effet dynamo, en particulier du point de vue expérimental.

## 2.5 L'état actuel des connaissances

Le premier à proposer qu'un effet dynamo pourrait être à l'origine du champ magnétique terrestre a été le physicien J. Larmor, en 1919. Depuis, de nombreuses théories de l'effet dynamo ont été proposées, tant dans le cadre de la Terre que du point de vue plus général de la magnétohydrodynamique. Certaines de ces théories parviennent même à expliquer les inversions aléatoires du sens du champ magnétique terrestre.

En revanche, l'effet dynamo n'a jamais été mis en évidence expérimentalement dans un fluide. La raison principale est qu'il est difficile d'atteindre dans une expérience des valeurs élevées de nombre de Reynolds magnétique. Les valeurs les plus élevées atteintes jusqu'à maintenant sont de l'ordre de la dizaine, alors que les résultats analytiques et numériques prédisent généralement que, pour les configurations expérimentales existant actuellement, l'effet dynamo ne peut se produire que pour des valeurs de  $R_m$  supérieures à la centaine.

C'est actuellement un enjeu scientifique important et plusieurs projets sont en cours de réalisation, avec des écoulements de sodium, qui est l'un des métaux les plus conducteurs, et dont la température de fusion est relativement basse (98 °C). Deux de ces projets, en Allemagne et en Lettonie, se basent sur un écoulement complètement contraint (le fluide est forcé à circuler suivant une trajectoire donnée) dans une configuration pour laquelle l'effet dynamo est prévu théoriquement et numériquement. À l'inverse, deux autres projets, en France et aux États-Unis, travaillent avec un écoulement beaucoup plus libre, ce qui permettra, si l'effet dynamo se produit, d'observer l'effet de saturation du champ mentionné au § 2.3, c'est-à-dire la modification de l'écoulement par le champ créé.

Pour ces quatre projets, des résultats sont attendus dans le courant de l'année 1999. Quels que soient ces résultats, ils apporteront certainement beaucoup d'informations essentielles dans un domaine où jusqu'à maintenant, théoriciens et numériciens ont beaucoup travaillé sans pouvoir vérifier expérimentalement leurs prédictions.

Cependant, même si des résultats positifs sont obtenus par ces divers projets, ces derniers sont tous assez éloignés par leur conception de la configuration terrestre et beaucoup de questions restent encore ouvertes quant à ce qui se passe réellement au cœur de notre planète.

## Annexe : Précisions sur les notions de champ dipolaire et non-dipolaire.

Le champ magnétique mesuré à la surface du globe est la superposition d'une partie interne, qui trouve sa source à l'intérieur du globe, et d'une partie externe dont les sources se situent dans l'atmosphère supérieure et au-delà, dans la magnétosphère. Le calcul qui consiste à séparer la partie interne de la partie externe montre que cette dernière est négligeable : cela permit à Gauss, dès 1838, de proposer une origine interne pour le champ géomagnétique principal.

Ce dernier se présente mathématiquement sous la forme d'une somme de termes dont le premier, dominant, représente le champ qui serait engendré par un dipôle magnétique placé au centre de la Terre : le champ qui en résulte est analogue à celui qui serait créé par un barreau aimanté et est appelé champ du dipôle centré. Le champ privé du terme dipolaire est appelé simplement champ non dipôle. Sa distribution à la surface du globe est complexe et s'organise en vastes régions où la composante verticale est tantôt positive, tantôt négative.

L'intensité du champ dipolaire représente en moyenne environ 90 % de l'intensité du champ total mesuré à la surface, bien que le champ non dipôle soit loin d'être négligeable, avec une intensité qui peut par endroits représenter jusqu'au tiers du champ dipolaire. Le champ dipolaire décroît quand on s'éloigne de la source comme l'inverse du cube de la distance, donc plus vite que le champ gravitationnel (le célèbre "carré de la distance" de la loi de Newton). Mais les termes non dipolaires décroissent encore plus vite. Si l'on tente de reconstituer le champ qui doit régner à la limite supérieure du noyau, à 2 900 kilomètres de profondeur (opération qui porte le nom de prolongement vers le bas), on s'aperçoit que le terme dipolaire domine beaucoup moins nettement les autres termes (bien qu'il soit encore dominant). Une carte tracée à la surface du noyau est beaucoup plus complexe que la carte lissée que nous observons à la surface. On conçoit donc aisément l'importance des composantes non dipolaires dans l'étude des inversions.

De manière plus précise, les termes non dipolaires portent le nom de multipôles d'ordre supérieur : quadrupôles, octupôles, hexadécupôles et ainsi de suite. On peut construire un dipôle à partir de deux monopôles (ou charges) l'un positif et l'autre négatif, que l'on rapproche indéfiniment dans une direction déterminée (tout en faisant croître leur charge de manière à ce que le produit de cette charge par la distance reste constant). Contrairement à ce qui se passe dans les domaines de l'électricité et de la gravité, ces monopôles magnétiques sont fictifs et n'ont encore jamais pu être isolés. Le dipôle est donc la source magnétique la plus simple. De la même manière, on fabrique un quadrupôle en rapprochant deux dipôles tête-bêche, et ainsi de suite...

280 Sur une Terre au champ purement dipolaire (ou dipolaire dominant) il n'y a que deux pôles magnétiques, c'est-à-dire deux points (opposés) où le champ est localement vertical. Sur une Terre au champ multipolaire, comme c'est peut-être le cas pendant une inversion, il peut avoir un nombre très élevé de pôles. En un point donné, le champ terrestre évolue continuellement au cours du temps. Toutefois, sur des intervalles suffisamment longs de l'ordre de quelques milliers ou quelques dizaines de milliers d'années, les variations du champ non dipolaire sont de moyenne nulle. C'est l'hypothèse de base du paléomagnétisme qui admet que, moyenné sur une durée de l'ordre d'une dizaine de milliers d'années, le champ géomagnétique se réduit au champ d'un dipôle centré aligné sur l'axe de rotation terrestre (pôles magnétiques et pôles géographiques sont alors confondus).