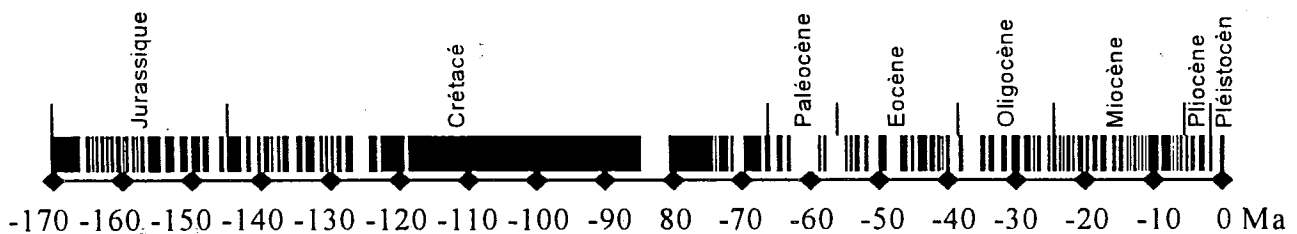


A la différence du repère invariant que constitue pour nous le nord géographique, le nord magnétique, vers lequel pointent nos boussoles, s'est déplacé au cours des temps géologiques allant jusqu'à passer, en l'espace de quelques milliers d'années, du nord au sud ou du sud au nord. Reconstituer la chronologie de ces inversions est possible grâce à l'étude des laves et des roches sédimentaires. Mais
330 quels sont les mécanismes responsables du champ et de ses inversions ?

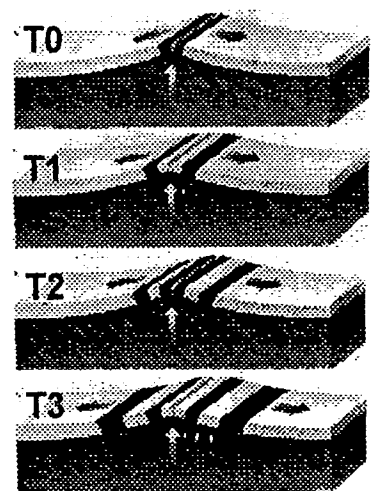
Champ dipôle et champ non dipôle

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 montrant que la contribution externe est négligeable, c'est dès 1838 que Gauss proposa 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 barreau aimanté, un dipôle magnétique placé au centre de la Terre. La distribution de l'autre terme, multipolaire, 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, mais les autres composantes peuvent atteindre, par endroit, le tiers du champ dipolaire. En un point donné, le champ terrestre évolue continûment au cours du temps. Toutefois, sur des intervalles suffisamment longs de l'ordre d'une dizaine de milliers d'années, les variations du champ non dipolaire sont de moyenne nulle : sur cette durée, le champ géomagnétique moyen se réduit au champ d'un dipôle centré, aligné sur l'axe de rotation terrestre (pôles magnétique et géographique sont, en moyenne, confondus). Sur une Terre au champ 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 où le terme dipolaire deviendrait négligeable, comme, peut-être, pendant une inversion, il pourrait y avoir un nombre très élevé de pôles !
345

Les inversions du champ magnétique terrestre



La chronologie des inversions du champ magnétique terrestre au cours des derniers 170 millions d'années (figure ci-dessus) a été déterminée grâce à la mesure des anomalies magnétiques de la croûte océanique dont l'origine est présentée schématiquement ci-contre. Les laves basaltiques émises au sommet des dorsales océaniques s'épanchent de part et d'autre. Lorsque les composés magnétiques contenus dans la lave se refroidissent en dessous de leur *température de Curie*, ils s'aimantent dans le sens du champ magnétique ambiant : d'une polarité « normale » au temps T_0 (l'aiguille aimantée de la boussole s'oriente vers le nord géographique, comme actuellement), on passe à une polarité « inverse » (temps T_1), (l'aiguille aimantée s'oriente vers le sud géographique) et ainsi de suite pour T_2 et T_3 . La distribution zébrée des anomalies magnétiques des fonds océaniques reflète le sens, alternativement normal (noir) et inverse (blanc), du champ magnétique. La première échelle de polarité géomagnétique publiée par A. Cox en 1969 portait sur les cinq derniers millions d'années. Est-il
365

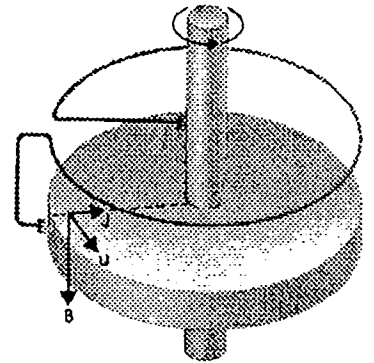


possible de dégager une loi de probabilité simple qui régirait l'apparition des inversions sur la Terre ? Une telle analyse est forcément restreinte aux cent cinquante derniers millions d'années, période pour laquelle l'échelle est suffisamment précise. Toutes les études montrent que, contrairement au cas du champ magnétique solaire qui s'inverse grossièrement tous les vingt-deux ans, le temps écoulé entre deux inversions du champ magnétique terrestre est une grandeur totalement aléatoire. De plus, il n'y a pas de mémoire de l'état précédent : le déclenchement d'une inversion n'encourage ni ne contrarie celui des inversions futures. Dans le détail, cette question fait encore l'objet d'un léger débat.

Origine du champ magnétique terrestre - La géodynamo

On s'accorde aujourd'hui sur le fait que le champ magnétique terrestre a son origine dans le noyau liquide qui se comporte en dynamo auto-excitée ou auto-entretenu.

Un exemple simple de dynamo auto-excitée est la dynamo-disque de Faraday présentée ci-contre. Cette dynamo est principalement constituée par un disque conducteur qui tourne autour de son axe dans un champ magnétique continu. La force de Lorentz agissant sur les charges libres du conducteur impliquent un déplacement radial de celles-ci (vers l'extérieur pour des électrons dans le cas de la figure) ce qui développe une différence de potentiel entre l'axe et la périphérie du disque. Ce générateur est le réciproque strict du moteur de



B : induction magnétique
 u : vitesse tangentielle
 J : courant induit

Barlow. Si l'on relie ce générateur à une boucle conductrice centrée sur l'axe et convenablement orientée, le champ créé par celle-ci vient renforcer le champ appliqué. Lorsque la vitesse de rotation devient suffisamment élevée, le champ primaire devient négligeable par rapport au champ secondaire lequel induit, en retour, un courant suffisant pour qu'il se maintienne ; la dynamo est dite alors auto-excitée. En fait, tous autres paramètres constants, résistance totale du circuit, nombre de tours de la boucle, etc ..., il existe une vitesse critique au delà de laquelle le champ produit par la boucle devient supérieur au champ primaire. Dès que cette vitesse critique est dépassée, les équations régissant le problème montrent (voir glossaire) que le processus d'auto-excitation diverge : le champ initial peut n'être qu'une simple perturbation magnétique transitoire, aussi faible soit elle, le processus s'amorce et se maintient dans le sens de la perturbation initiale. Dans la pratique, la divergence est limitée par le couple maximum que l'on peut fournir pour maintenir la vitesse critique de rotation, la puissance mécanique fournie équilibrant alors exactement la puissance électrique dissipée (et les frottements).

Il y a certes un grand pas à franchir entre cette dynamo simple quoique de topologie complexe et la dynamo homogène qui doit fonctionner dans un volume pratiquement sphérique et continu de fluide conducteur tel que le noyau terrestre. Dans ce second cas, la topologie est simple et les mouvements doivent être complexes. Les équations de Maxwell qui décrivent le couplage des champs électrique et magnétique par l'intermédiaire du conducteur fluide en mouvement, et les équations du mouvement sous l'effet des forces gravitationnelles, visqueuses, de Coriolis (due à la rotation de la Terre) et électromagnétiques, sont en effet des équations non linéaires couplées. Notons en passant que les équations de Maxwell admettent deux solutions stables symétriques : en d'autres termes, les positions normale et inverse du champ magnétique terrestre, comme pour la dynamo simple, sont parfaitement compatibles avec notre compréhension théorique de l'électromagnétisme. Quant aux inversions leur cause est pour l'instant inexpliquée. Compte tenu du caractère critique de l'auto-excitation, on peut imaginer que, sous l'action d'une perturbation temporaire, la géodynamo passe en régime sous-critique (les conditions d'auto-entretien ne sont plus satisfaites), s'éteint, puis, les conditions critiques rétablies, se rallume dans le même sens ou en sens inverse. Notons qu'une dynamo-disque unique, bien qu'assez instable, ne présente pas d'inversion spontanée du sens du champ ni de régime chaotique. En revanche deux dynamos-disque couplées, dans lesquelles le courant produit par l'une crée le champ magnétique inducteur de l'autre et réciproquement, présentent des inversions spontanées du sens des champs magnétiques induits ; ces renversements apparaissent de façon totalement aléatoire, bien que leur déclenchement résulte d'un phénomène déterministe ; il s'agit d'un exemple de chaos déterministe dû à des phénomènes non linéaires.