

LE CHAMP MAGNETIQUE TERRESTRE

par

Gaston Fischer

Observatoire Cantonal

CH-2000 Neuchâtel, Suisse

Dans un article précédent (voir la Revue Polytechnique de juin 1973, p. 609) nous avons parlé de la production de champs magnétiques très intenses au moyen de supraconducteurs. Aujourd'hui, nous nous proposons de parler d'un champ magnétique beaucoup plus faible, celui de la Terre. Chacun connaît l'existence de ce champ qui aligne l'aiguille des boussoles et permet au voyageur de s'orienter. Ce que le profane sait moins souvent, c'est que ce champ varie d'un endroit à l'autre de la Terre, qu'il varie dans le temps et qu'à tous les âges il a été intimement lié à l'histoire de notre planète. Nous allons, dans le présent article, essayer de présenter ces divers aspects du champ magnétique terrestre (CMT) et, autant que possible, essayer de les comprendre.

Deux pôles nord

Les usagers de la boussole, en particulier les navigateurs, se sont assez tôt rendus compte que la boussole ne pointait pas, en général, exactement vers le nord géographique, c'est-à-dire vers le pôle de rotation de la Terre. On a ainsi été conduit à établir des cartes qui donnent pour chaque endroit du globe la déviation angulaire, ou déclinaison*, du nord magnétique par rapport au nord géographique. La fig. 1a est une telle carte, établie sur la base des valeurs de la déclinaison pour 1965.

Trois remarques s'imposent lorsqu'on considère la fig. 1a. La première est que le CMT est une grandeur dirigée, donc un vecteur, caractérisée non seulement par son amplitude ou grandeur, mais aussi par sa direction dans l'espace. C'est

* Nous écrivons en italique les termes du jargon scientifique à leur première apparition. Ces termes ont en général une signification scientifique bien précise dans le langage du chercheur spécialisé.

pourquoi l'on représente souvent un champ magnétique à l'aide du concept des lignes de force, comme on le voit sur la fig. 2. On conçoit donc bien qu'à la surface de la Terre le vecteur magnétique n'est pas représenté uniquement par la déclinaison et l'amplitude que nous venons de définir, mais qu'il faut aussi donner son inclinaison par rapport à l'horizontale. De fait, il existe des cartes d'amplitude et d'inclinaison, similaires à la carte des déclinaisons donnée par la fig. 1a. La représentation mathématique du CMT permet de faire la distinction entre une partie régulière (champ dipolaire) et des anomalies du CMT. La deuxième remarque que suscite la fig. 1a a trait à la situation des pôles magnétiques. On voit, d'une part, que ces pôles ne coïncident pas avec les pôles géographiques, cause principale des fortes déclinaisons qu'on observe lorsqu'on s'approche des pôles magnétiques, et d'autre part, on note que les deux pôles magnétiques ne sont pas dans des positions symétriques par rapport au centre de la Terre. Finalement, la date de validité apposée à la fig. 1a suggère que la déclinaison, et par suite aussi les autres paramètres du CMT, ne sont pas immuables. En fait, s'il est vrai que la déclinaison varie peu d'une année à l'autre, les instruments précis et sensibles dont on dispose aujourd'hui démontrent sans ambiguïté que tous les paramètres du CMT changent continuellement en un endroit donné (voir la fig. 1b). On a observé que ces changements semblent découler presque entièrement d'une lente mais irrégulière rotation d'est en ouest des anomalies du CMT. On estime qu'un tour complet de ce mouvement requiert de 2 à 5 mille ans. En Suisse, la déclinaison diminue maintenant d'un dixième de degré par an et l'inclinaison est pratiquement stationnaire.

Les propriétés du CMT que nous venons de présenter peuvent toutes être vérifiées à l'aide de la boussole classique bien connue. Si l'on ne disposait pas d'instruments plus précis et surtout plus sensibles, on pourrait croire que le CMT est de nature très quète, soumis seulement à ces

lentes variations séculaires que nous avons décrites plus haut. On en concluerait aussi qu'il est d'origine entièrement interne à la Terre, résultant de quelque boucle de courant près du centre de notre planète. Comme nous allons le voir, il n'en est pas du tout ainsi.

Une activité fébrile

Les magnétomètres modernes ont révélé que le CMT était continuellement le siège de variations rapides autour de cette valeur moyenne qu'indique la boussole. Si la boussole ne permet pas, en général, de les déceler, c'est que l'amplitude de ces variations n'est que de l'ordre du millième de l'amplitude de ce champ moyen ou champ principal que mesure la boussole. Si l'on accepte que la majeure partie du CMT provient de courants électriques à plusieurs milliers de kilomètres sous la surface de la Terre, alors les lois de l'électro-dynamique nous disent que ces variations rapides ne peuvent en aucun cas venir de l'intérieur de la Terre (effet skin ou de peau), et viennent par conséquent de l'espace. Il y a donc deux sources distinctes au CMT, l'une interne et l'autre externe à la planète, mais nous verrons aussi que ces deux sources ne sont pas sans interactions aux conséquences importantes.

Le champ interne

La sismologie, ou étude des tremblements de terre, a révélé que l'intérieur de notre planète n'était solide que jusqu'à une profondeur d'environ 2900 km (voir la fig. 3). Cette partie est appelée manteau de la Terre. Au-dessous, en raison des températures élevées qui règnent à ces profondeurs, la Terre a un noyau liquide, formé essentiellement de fer fondu. Tout au centre de la Terre, on a finalement un cœur de fer solide, d'un rayon d'environ 1300 km. Cette solidifi-

cation est le résultat des pressions énormes, de plusieurs millions d'atmosphères, qui règnent au centre du globe. A l'interface, entre manteau et noyau, la conductivité électrique change brusquement, le noyau liquide étant environ 1000 fois plus conducteur que le manteau solide. A cause de sa rotation avec la planète, cette masse hautement conductrice est le siège de phénomènes d'induction électromagnétiques et semble fonctionner comme une dynamo unipolaire, dont nous représentons un modèle simplifié à la fig. 4. Le caractère encore quelque peu conditionnel de cette affirmation est dû au fait que la répartition exacte des lignes de courant de la vraie dynamo terrestre n'a pas encore été élucidée.

Il nous reste à comprendre pourquoi la partie principale du CMT est si irrégulière à la surface de la Terre. Revenons à l'interface entre manteau solide et noyau liquide. On doit admettre que cette surface n'est ni bien franche, ni parfaitement sphérique. Il y a une zone de transition (voir fig. 3) qui est le siège de forces de frottement. La rotation du solide entraîne bien le liquide, mais par suite de causes qui ne sont pas encore bien connues, il y a par moments des différences de vitesse de rotation entre liquide et solide. A cause de ces différences de vitesse et des irrégularités de l'interface, le liquide s'écoule de façon turbulente au voisinage de l'interface. Mais puisque c'est dans cette région que circulent les plus forts courants de la dynamo terrestre, ces courants sont déviés par la turbulence de la matière liquide et sont à leur tour de nature turbulente. Le champ magnétique produit par ces courants irréguliers est lui aussi irrégulier. Vu la grandeur de l'échelle sur laquelle se produisent ces phénomènes, la durée des irrégularités de courant et du champ est très grande et de toute manière, à cause de l'effet de peau cité plus haut, seules les fluctuations très lentes du champ peuvent être perçues à la surface de la Terre; la durée des fluctuations les plus rapides est de

l'ordre de 10 à 100 ans. Une partie des irrégularités du champ principal provient donc de la turbulence des courants du noyau. Une deuxième partie provient des inhomogénéités du manteau solide. La distribution de ces inhomogénéités est elle-même sujette à une lente évolution; en effet, malgré le qualificatif de "solide", le manteau est en mouvement à des vitesses de l'ordre de 1 à 10 cm/an par écoulement plastique d'un ensemble de cellules de matière.

Quant à la dérive d'est en ouest des anomalies du CMT, on ne sait pas, pour l'instant, s'il s'agit d'un phénomène passager ou permanent. Ce sont les relevés récents, de quelques centaines d'années au plus, qui la révèlent, mais on n'a pas encore pu en confirmer l'existence dans un passé plus lointain. Aucune explication théorique de son existence ne s'est d'ailleurs imposée.

Le champ externe

Comme nous le disions plus haut, la seconde contribution au CMT est d'origine externe et comprend en particulier toutes les variations rapides de ce champ. L'environnement de la Terre se révèle, à mesure qu'on le connaît mieux, plus complexe qu'on ne le pensait d'abord. Au-dessus de l'atmosphère terrestre, dans les couches inférieures de laquelle nous vivons, on trouve des régions très diversifiées de par le nombre et le type de particules qu'elles contiennent. Certaines de ces régions ne renferment guère que des particules chargées, électrons et protons, liées à la Terre précisément par son champ magnétique qui force ces particules sur des orbites assez bien définies. A ces mouvements de particules chargées sont associés des courants en haute altitude et par suite des champs magnétiques. D'autres particules chargées sont envoyées vers la Terre par le soleil, en même temps que la lumière, bien qu'à des

vitesse 100 ou 1000 fois moins grandes que la vitesse de la lumière. Ce vent solaire interagit violemment avec le CMT. Dans les régions éloignées de la Terre le vent solaire domine complètement la scène établissant son propre champ magnétique. C'est la région à gauche de la surface de choc, dans la fig. 2, où rien ne trahit la présence du CMT. Entre la surface de choc et la magnétopause se trouve la zone où les particules chargées du vent solaire sont déviées de leur trajectoire rectiligne par le CMT; c'est la région où vent solaire et CMT interagissent violemment. A l'intérieur de la magnétopause, la Terre réussit à établir les lignes de force de son champ, c'est la magnétosphère, mais comme le montre la fig. 2, côté soleil la magnétosphère se trouve comprimée par le vent solaire, tandis que de l'autre côté le vent solaire semble entraîner au loin les lignes de force du CMT. La compression du CMT par le vent solaire produit à la surface de la Terre des variations diurnes ou journalières caractéristiques, différentes d'endroit en endroit, et dépendantes avant tout de la latitude, comme l'indique la fig. 5.

Mais le vent solaire n'est pas un vent régulier; en réalité il est connu pour ses sautes d'humeur, en général imprévisibles, reflets de ce que l'on appelle l'activité solaire. Le nombre et la grandeur des taches solaires sont un indice de cette activité. Plus il y a de taches, plus la surface du soleil est en activité et plus le vent solaire souffle en rafales turbulentes qui se traduisent, à la surface de la Terre, par d'importantes et rapides variations des paramètres du CMT. On parle à cet égard d'activité géomagnétique ou, selon les cas, d'orages magnétiques. Comme l'activité solaire est soumise à un cycle de 11 ans, avec des années calmes et des années de grande activité, il en va de même de l'activité géomagnétique. Il y a encore d'autres périodicités, soit liées au système Soleil-

A 3

Terre donnant lieu en particulier aux variations diurnes et à des variations annuelles, soit au Soleil seul qui semble être sujet à certaines variations périodiques très lentes, dont une de 60 ans, une autre d'environ 78 ans, et probablement d'autres aux périodes encore beaucoup plus longues. On voit ainsi que le champ externe produit à la surface de la Terre des fluctuations couvrant un spectre quasi continu, depuis les périodes les plus courtes (moins d'une seconde) aux périodes les plus longues. Le champ d'origine interne, par contre, ne peut contribuer qu'aux variations lentes, commençant par les variations séculaires; mais nous verrons maintenant comment, dans le domaine des variations lentes, des interactions entre les deux sources de champ se produisent.

Des instabilités de la dynamo terrestre ou des renversements des pôles magnétiques

Nous avons vu plus haut que la dynamo unipolaire de la fig. 4 n'est qu'un modèle extrêmement schématique de la dynamo terrestre, dynamo dont on ne connaît pas, en réalité, le fonctionnement exact, et surtout pas la distribution des courants. Néanmoins on peut tout de même, en considérant la fig. 4, tirer des conclusions générales valables pour toutes les dynamos unipolaires, en particulier celle de la Terre.

En circulant dans le disque et le fil de la dynamo, le courant transforme de l'énergie en chaleur qui se perd, par exemple par rayonnement, vers l'environnement. La source de cette énergie est mécanique: en l'absence d'un moteur entraînant l'arbre de la dynamo, celle-ci se ralentit et finit par s'arrêter. Il en va de même de la dynamo terrestre; bien que ce soit par le biais de mécanismes mal connus, l'énergie que dissipent les courants de la dynamo proviennent en dernier ressort du mouvement de rotation de la Terre.

Notons en passant que ce réservoir d'énergie est très grand; le ralentissement de la rotation terrestre se traduit par une augmentation annuelle de la longueur du jour de 20 millièmes de seconde environ, ce qu'on peut aussi exprimer en disant que la longueur du jour, il y a 600 millions d'années, ne valait que 21 de nos heures. Une partie du ralentissement vient d'ailleurs d'autres causes, telles les marées et leur dissipation d'énergie par frottement.

Une autre propriété de la dynamo unipolaire est celle de fonctionner indifféremment avec un champ magnétique orienté parallèlement ou antiparallèlement à l'axe de rotation. Pour voir cela supposons la machine en rotation, mais en l'absence de champ magnétique; il n'y aura donc pas non plus de courant induit. Supposons maintenant qu'une perturbation passagère produise un champ magnétique parallèle à l'axe. Si la machine satisfait certains critères de construction, cette perturbation induit des courants qui renforcent le champ perturbateur, ou pour le moins la composante selon l'axe de la dynamo. Après disparition de la perturbation il reste donc un champ dirigé dans l'axe de la dynamo. Selon la direction de la perturbation on aura un champ dirigé dans un sens ou dans l'autre de l'axe, et surtout on voit que la situation où le champ est nul est instable vis-à-vis de la plus petite perturbation. Mais la conclusion principale à tirer de cette propriété de la dynamo unipolaire, est que le CMT n'est pas un vestige du passé qui va diminuant, mais est continuellement entretenu par la rotation de la Terre. La dynamo terrestre est donc une dynamo self-excitée. D'autre part, si le modèle simplifié de dynamo (fig. 4) est sensible aux perturbations externes, la dynamo terrestre avec sa distribution de courants très complexe et surtout non localisés par des fils comme dans le modèle, y est encore beaucoup plus sensible. C'est là que se trouve le mécanisme

d'interaction entre les champs de source externe et interne. La dynamo terrestre est instable vis-à-vis de certaines perturbations d'origine externe qui peuvent aller jusqu'à renverser la polarité de la dynamo terrestre. En fait, on admet que la dynamo terrestre est instable même en l'absence de perturbations externes et l'on a réussi à créer, en laboratoire, des dynamos self-excitées d'un type naturellement plus complexe que celui de la fig. 4, qui changent de polarité de façon tout à fait aléatoire. Les études paléomagnétiques, c'est-à-dire l'étude du magnétisme rémanent des laves et des roches sédimentaires qui se sont formées à des âges différents, révèlent l'histoire du CMT et fournissent une preuve indéniable des renversements fréquents de la polarité du CMT. Elles ont aussi montré qu'il y a eu, dans le passé, autant de périodes avec la polarité que nous avons aujourd'hui que de périodes à polarité inversée. La fig. 6 confirme ces faits.

Paléomagnétisme et dérive des continents

Le paléomagnétisme n'a pas permis seulement de confirmer les inversions de polarité du CMT et de reconstituer toute l'histoire de ses variations séculaires en intensité et direction, mais il est en train de fournir une information précise et détaillée du mécanisme des inversions. Il faut de 3 à 20 mille ans pour compléter une inversion qui se manifeste par des signes précurseurs tels qu'un affaiblissement de l'amplitude du CMT à la surface de la Terre et des oscillations plus rapides et plus grandes de sa direction autour des pôles géographiques. Un comportement semblable précède le rétablissement d'un régime plus stable en position inversée. Ces études, il est certain, permettront une compréhension meilleure de la dynamo terrestre.

Le paléomagnétisme est en voie de fournir encore bien d'autres clefs vers la connaissance du passé de notre planète. Faute de place, nous ne pouvons en signaler que la plus révolutionnaire. Le magnétisme rémanent des roches d'une certaine région conduit en général à des résultats parfaitement concordants quant à l'histoire du CMT. Ces régions sont souvent de la grandeur d'un continent entier et il est alors intéressant de constater que les directions de la magnétisation rémanente d'une époque bien définie convergent toutes vers un pôle qui se trouve ainsi être bien localisé. Si l'on passe à un autre continent, ou quelquefois à une autre partie d'un continent, on constate à nouveau une concordance parfaite de toutes les données de cette nouvelle région, mais un désaccord total avec celles déduites des échantillons du premier continent. Une étude approfondie de ces désaccords a démontré de façon éclatante qu'ils provenaient tout simplement de la dérive des continents, à la surface de la Terre. On a même pu reconstruire l'histoire de la dérive des divers continents, ou sous-continent, l'un par rapport à l'autre durant les 600 millions d'années qui nous précèdent. L'hypothèse formulée il y a 60 ans par Wegener se trouve non seulement confirmée, mais on commence même à comprendre aujourd'hui les mécanismes par lesquels ces dérives se sont produites. Les données recueillies jusqu'à ce jour suggèrent qu'il y a quelques centaines de millions d'années encore, toutes les terres émergées ne formaient qu'un seul continent. Le morcellement qui a suivi s'est fait en plusieurs étapes. Par exemple, l'Asie d'aujourd'hui comprend un sous-continent, l'Inde, qui a vogué seul à une certaine époque, après s'être détaché d'une plaque qui contenait l'Afrique et l'Antarctique il y a probablement moins de 100 millions d'années, pour heurter la masse continentale de l'Eurasie (nom donné au bloc Europe-Asie) voici 30 à 40 millions d'années seulement. Les plissements et soulèvements qui ont formé la chaîne des montagnes de

A.3

l'Himalaya en sont la conséquence et l'on a de fortes raisons de penser que la poussée du sous-continent indien sur l'Eurasie n'a pas encore cessé.

Nous avons pu nous convaincre que la science du géomagnétisme a progressé bien au-delà de l'art de la boussole et qu'elle fournit aujourd'hui un des moyens d'étude les plus puissants des phénomènes géophysiques, c'est-à-dire des phénomènes qui se passent et se sont passés autour et à l'intérieur de notre planète. La connaissance de ce passé et des mécanismes actifs présentement nous conduira peut-être à modifier notre comportement et influencera la prise de certaines décisions, là où les activités humaines sont en interaction avec les processus naturels.

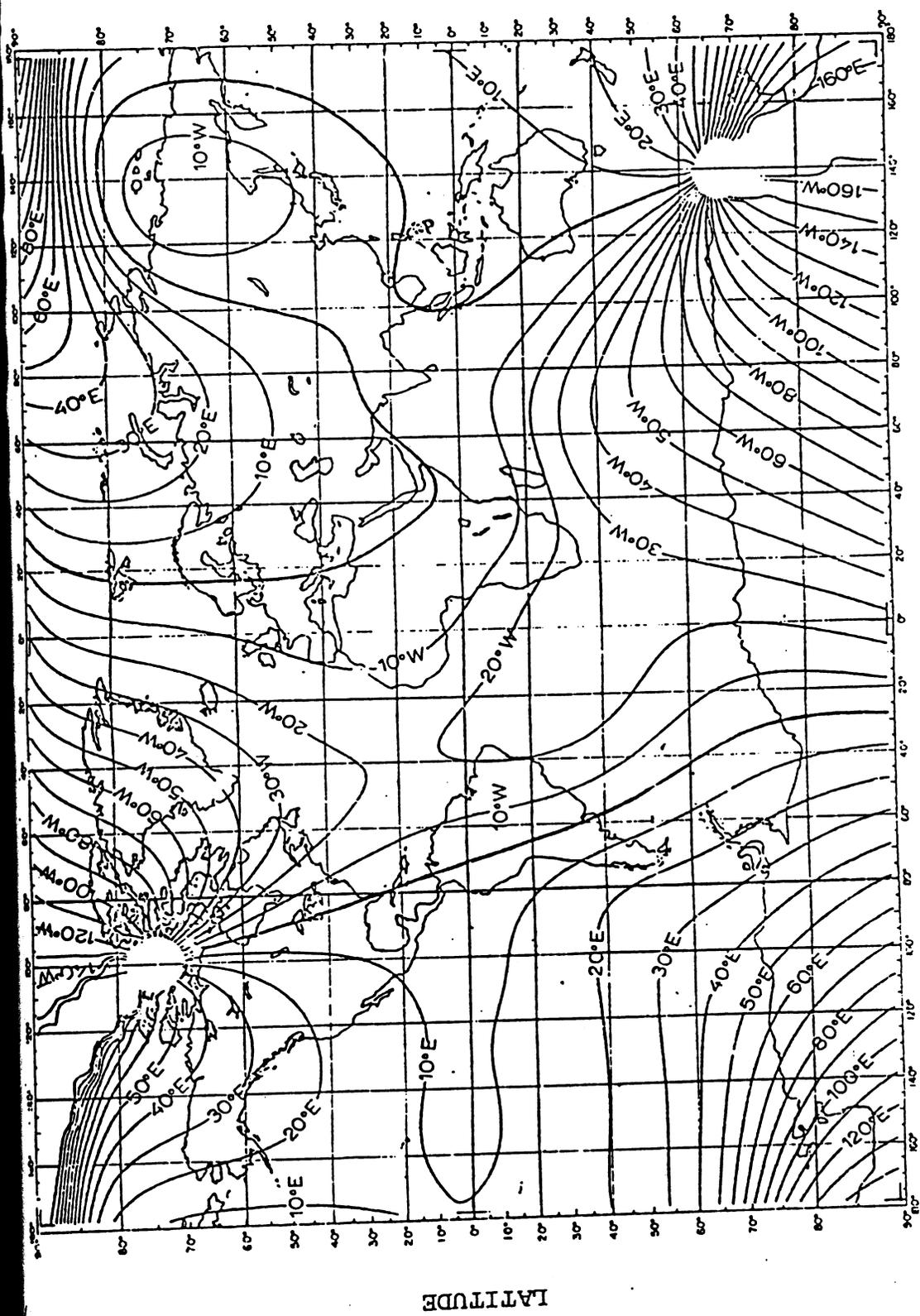


Fig. 1a Déclinaison magnétique en degrés d'arc pour 1965.
E = Est, W = Ouest. 15°W signifie que l'aiguille
de la boussole pointe 15° à l'ouest du nord
géographique (selon Cain).

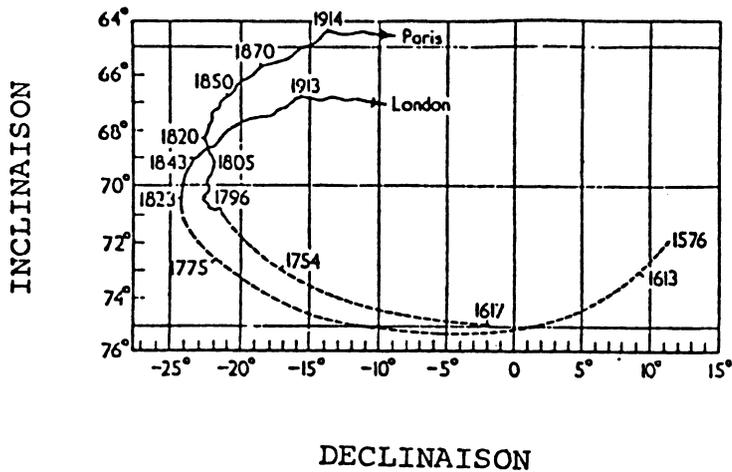


Fig. 1b Inclinaison et déclinaison à Londres, depuis 1576, et à Paris, depuis 1613. (reproduit de Runcorn).

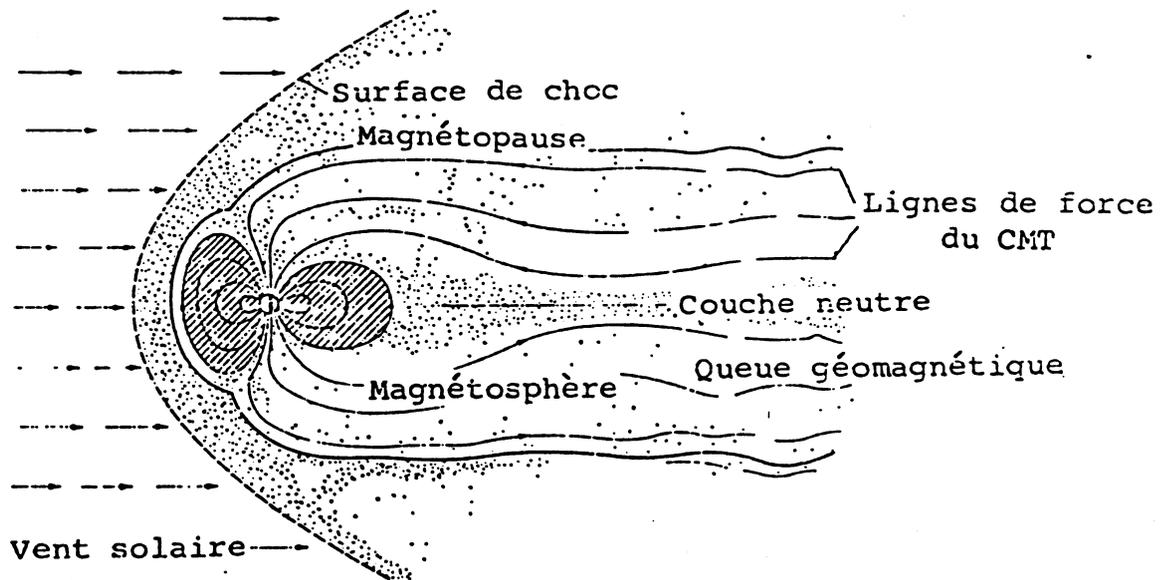


Fig. 2 Représentation schématique du champ magnétique terrestre (CMT) dans le plan du méridien de midi. Les zones hachurées contiennent des particules chargées, prisonnières du CMT. On remarquera la direction des lignes de force à la surface de la Terre: perpendiculaires au sol aux pôles et parallèles au sol à l'équateur.

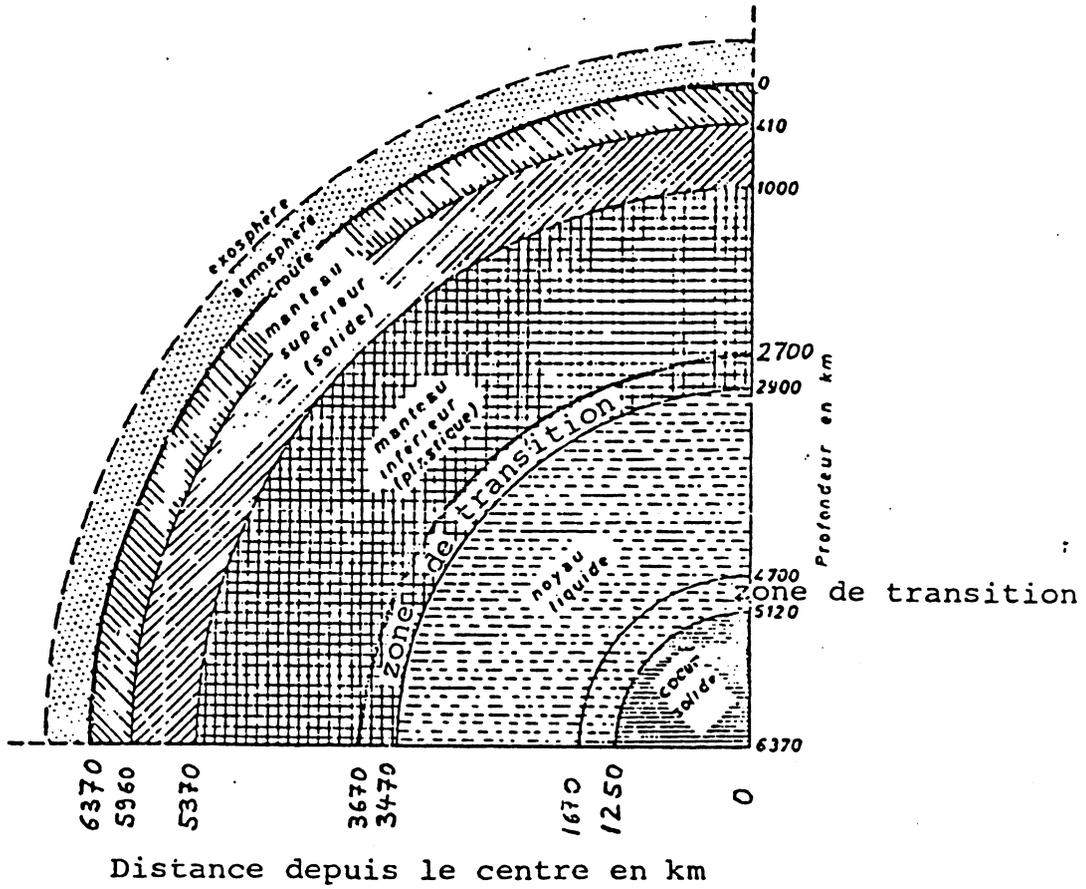


Fig. 3 Représentation schématique de l'intérieur de la Terre.

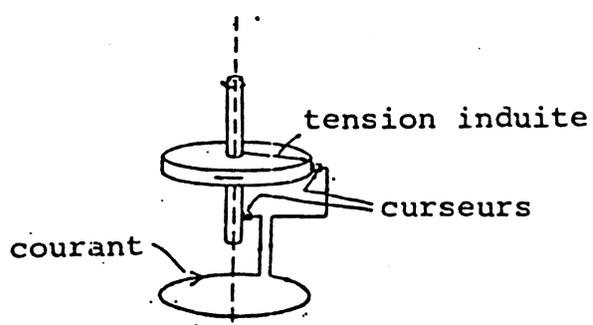


Fig. 4 Modèle de dynamo unipolaire self-excitée.

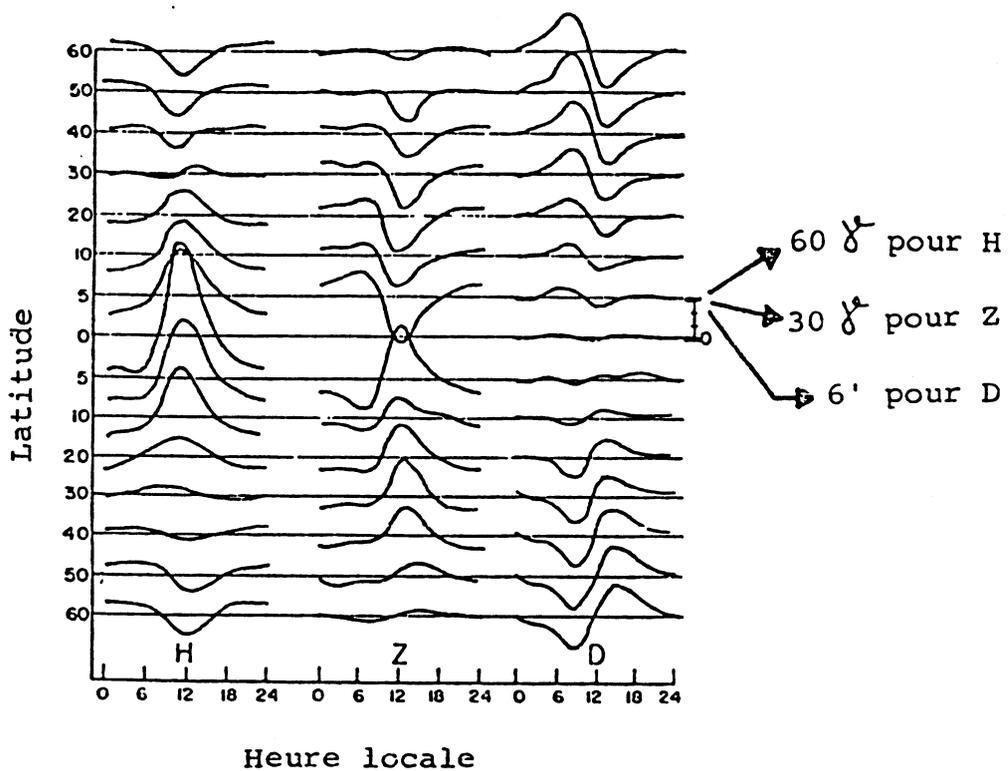


Fig. 5 Variations diurnes du CMT, où H en est la composante horizontale, Z la verticale et D est la déclinaison. Remarquez les valeurs différentes de l'unité d'ordonnée. Un γ vaut un cent millièrme d'Oersted ou un nano-Tesla (env. 1/46'000 de l'amplitude du CMT en Suisse). Pour les variations de D l'unité d'ordonnée est donnée en minutes d'arc (selon Matsushita).

ECHELLES DES POLARITES DU CHAMP MAGNETIQUE TERRESTRE
(résultats jusqu'en 1969)

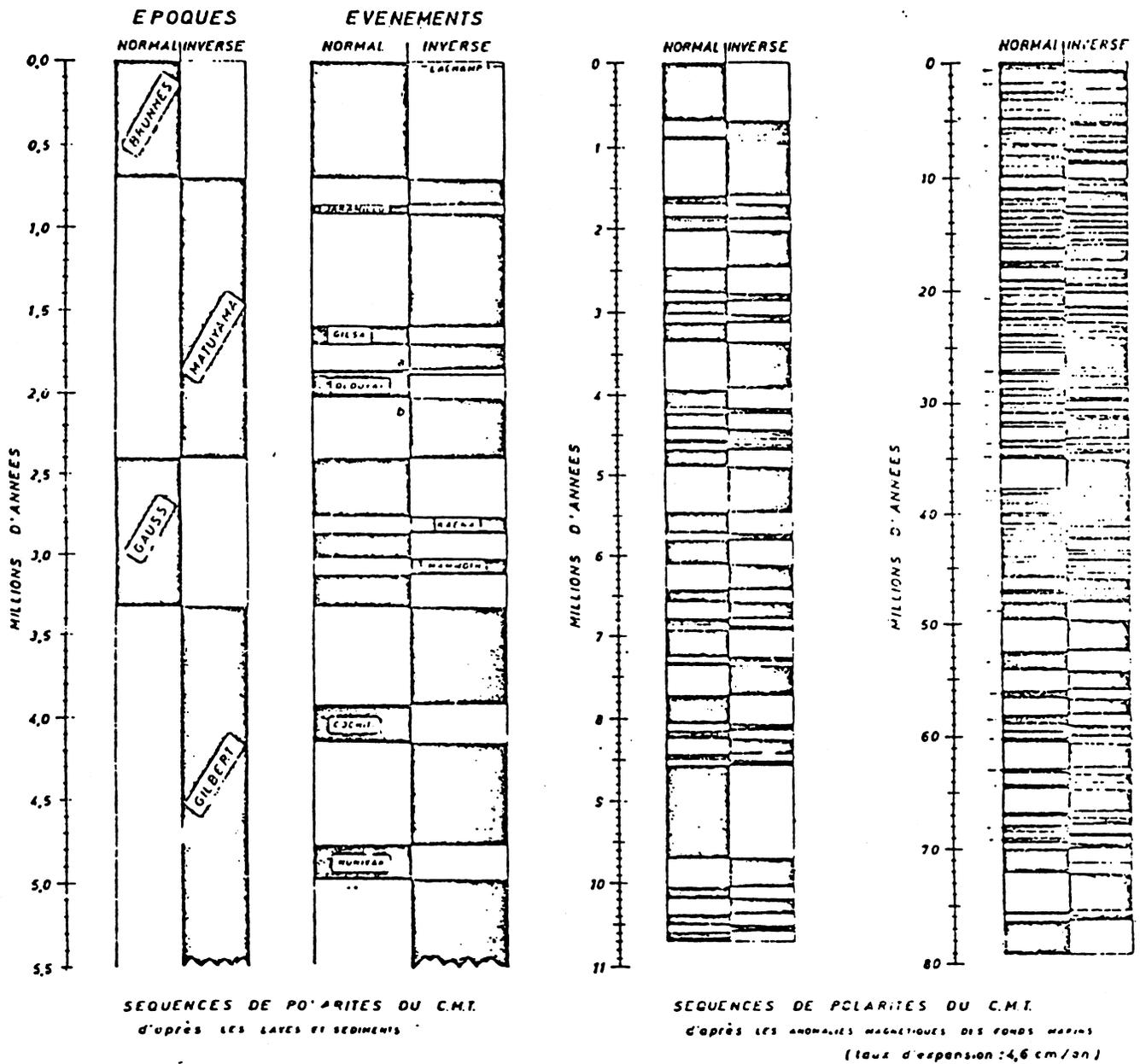


Fig. 6 Les renversements de polarité du CMT durant les 80 millions d'années qui nous précèdent. Notez les trois échelles de temps différentes à gauche des diagrammes et la distinction que l'on peut faire entre "époque" et "événement" pour le passé récent (selon Cox et al. et Heirtzler et al.).