Limites imposées par le bruit magnétique naturel dans la mesure des champs faibles

E. Selzer

► To cite this version:

E. Selzer. Limites imposées par le bruit magnétique naturel dans la mesure des champs faibles. Revue de Physique Appliquée, 1970, 5 (1), pp.233-238. 10.1051/rphysap:0197000501023300 . jpa-00243367

HAL Id: jpa-00243367

<https://hal.science/jpa-00243367>

Submitted on 1 Jan 1970

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

LIMITES IMPOSÉES PAR LE BRUIT MAGNÉTIQUE NATUREL DANS LA MESURE DES CHAMPS FAIBLES

Par E. SELZER,

Faculté des Sciences de Paris, Institut de Physique du Globe, Paris (France).

Résumé. — L'exposé se place dans le cadre de la mesure d'un champ magnétique faible, constant ou variable, dont on veut déterminer la valeur H_t à un instant $t \pm \Delta t$. La durée $2 \Delta t$ de cet « instant » est une caractéristique importante de la mesure, conditionnée par exemple par l'évolution plus ou moins rapide de H dans un complexe spatio-temporel, par la précision désirée, par les servitudes de l'instrument (ou de la méthode) de mesure, etc. Δt joue également un rôle spécifique dans la définition du « bruit magnétique naturel » perturbateur (bruit « géomagnétique »). H pourra être la partie principale d'un champ géomagnétique lui-même, ou un champ de laboratoire (artificiel). Dans ce dernier cas, on supposera résolue la question de sa séparation d'avec le champ géomagnétique principal. De même, nous ne nous occuperons pas de l'action de champs perturbateurs de toute nature d'origines artificielles (ce qui suppose le choix d'un emplacement de mesure et de précautions appropriées).

L'exposé est alors consacré à l'examen de la constitution du bruit géomagnétique tel qu'il peut se manifester dans l'intervalle de temps $t - \Delta t$ à $t + \Delta t$. Cette constitution est essentiellement fonction — en nature et en amplitude — de la valeur de Δt . Suivant les différents cas envisagés, et le caractère plus ou moins aléatoire, ou plus ou moins organisé, de ce bruit, des méthodes pour pallier ses effets sont indiquées et les seuils limites ainsi déterminés pour la précision des mesures sont discutés.

Un cas limite intéressant est celui de la mesure du champ géomagnétique dans certaines régions supérieures de la magnétosphère (y compris la « gaine » magnétosphérique), quand ce champ tend à se confondre avec son « bruit ».

Introduction. — Il importe de déterminer la nature de cet exposé en précisant le sens que nous allons donner — d'une façon conventionnelle — aux termes « bruit magnétique naturel » d'une part, et « mesure des champs faibles » d'autre part.

Notre définition du « bruit » est envisagée ici dans ses rapports avec la notion complémentaire de « mesure ». Nous considérerons comme un bruit toute variation géomagnétique pouvant perturber la mesure du champ faible à laquelle on s'intéresse. La restriction explicite que ce bruit soit « naturel » veut dire qu'il n'a pas été créé — directement ou indirectement — par l'activité humaine. (Nous pourrions noter — à titre de curiosité, mais qui ne serait pas sans intérêt pour notre sujet — que dans certains « espaces » tels que le sein des océans, une activité électromagnétique d'origine *biologique* n'est pas exclue.)

Nous ne ferons aucune réserve quant à la structure de ce bruit, pas plus d'ailleurs qu'à celle du champ faisant l'objet de la mesure. La nature de ces structures joue un rôle très important dans l'interaction entre ces deux grandeurs et nous devons donc l'examiner dans chaque cas avec précision, mais nous voulons justement pouvoir envisager les différents mécanismes de cette interaction en fonction des principaux cas de structures possibles. Très schématiquement, ils se ramènent aux suivants :

- Bruit aléatoire et champ à mesurer (continu ou variable) organisé;
- Bruit organisé et champ à mesurer aléatoire;
- Bruit aléatoire et champ à mesurer également aléatoire;
- Bruit organisé et champ à mesurer également organisé.

Dans cette perspective, assimilant le champ à mesurer à un « signal », la seule distinction systématique, permanente, entre le bruit et le signal tient en ceci : le signal est ce que l'on veut mesurer; le bruit est ce qui contrarie ce dessein. On pourrait, bien entendu, renverser les termes de cette définition si la mesure de ce bruit devenait le sujet principal de la mesure.

En dehors de cet élément psychologique important, il y a donc symétrie dans les données de notre problème. Cette symétrie n'est pas cependant totale par le fait que nous n'avons pas cru devoir restreindre notre sujet aux seules mesures de champs *naturels* (seul le bruit est supposé l'être). De nombreuses techniques modernes du domaine de la physique proprement dite font appel, en effet, à des mesures de champs magnétiques artificiels — ou du moins qui n'ont rien de géophysique ou de spatial — et ces mesures deviennent compliquées ou difficiles quand ces champs à mesurer deviennent d'un ordre de grandeur comparable, ou inférieur, à celui des champs naturels ambiants. Bien entendu, nous ne délaisserons pas le cas où la mesure porte elle-même sur un de ces champs naturels. Notre problème d'interaction « bruit-signal » retrouvera alors toute sa symétrie.

Notre exposé laissera de côté par contre, délibérément, tous les cas où le bruit est d'origine artificielle : savoir s'organiser et se défendre contre un champ magnétique *artificiel*, perturbateur est, certes, d'un intérêt évident, mais ce souci fait l'objet d'autres exposés au cours de ce colloque. Nous supposons donc que, toutes les précautions requises ayant été prises, les niveaux atteints par ces champs artificiels perturbateurs restent nettement inférieurs, non seulement au niveau des champs à mesurer, mais aussi à celui des champs perturbateurs *naturels* envisagés.

Séparation des éléments organisés et des éléments aléatoires constituant le bruit géomagnétique. Leur action sur la mesure. — Le souci conduisant à se préoccuper d'une telle séparation n'est pas nouveau. On le trouve remarquablement exposé, entre autres, dans le chapitre « Hypothèse probabiliste du champ terrestre » de la thèse de G. Bonnet (*Annales de Géophysique*, 18, 1, janvier-mars 1962). Cependant, à l'époque où a été présentée cette thèse, la morphologie de l'ensemble des variations géomagnétiques était loin d'être connue d'une façon aussi complète et précise que ce n'est le cas maintenant. Ceci est notamment vrai relativement aux deux points suivants :

— La structure — et, notamment, la composition spectrale — des variations les plus rapides (c'est-à-dire avoisinant 1 Hz, ou plus rapides);

— Le degré de cohérence de toutes les variations pulsées — périodiques ou pseudo-périodiques — dont on n'avait pas le moyen de se rendre compte avec précision.

De plus, les progrès considérables faits également, depuis 1962, dans les seuils d'amplitude (ou d'énergie) détectables (dépassant maintenant 1/10 000 de gamma — donc, 10^{-9} gauss — entre 1 et 10 Hz) ont permis de mettre en évidence des « fonds de bruit » à peine soupçonnés à cette époque, dont les uns — tels que les oscillations de Schumann — sont partiellement organisés, et les autres — tels que les résidus situés au-dessous des ordonnées de la « courbe en S » de F. Glangeaud [2], relative à des jours calmes — paraissent se rapprocher de la définition d'un « bruit blanc ».

On doit également à F. Glangeaud [3] d'avoir montré le degré relativement élevé d'incohérence que présentaient entre eux de beaux trains successifs de « pulsations continues » du type « pc 3 » (de la nomen-

clature internationale), malgré leur apparence d'oscillations régulières.

En fait, afin de pouvoir discuter d'une façon précise de ces questions, il importe que nous introduisions le rôle fondamental que joue le paramètre *temps* (pris sous la forme exprimant une notion de « durée ») dans le mécanisme de l'interaction bruit-signal que nous désirons étudier.

Il ne suffit pas de connaître le niveau d'amplitude et la nature du champ magnétique faible à mesurer pour pouvoir évaluer l'influence que le bruit géomagnétique pourra avoir sur la précision de la mesure, il faut également être renseigné sur la durée à prévoir pour celle-ci, étant donné les difficultés et les contingences diverses qui la régissent en propre. D'une façon plus précise, nous supposons que la mesure H_t du champ magnétique faible, constant ou variable, soit faite à un « instant » $t \pm \Delta t$. La durée $2\Delta t$ de cet « instant » est imposée, par exemple, par des considérations relatives à l'évolution plus ou moins rapide de H_t dans un complexe spatio-temporel (dans le cas d'une mesure en fusée ou en satellite), ou par la précision désirée (en fonction des servitudes de l'instrument et de la méthode employés).

Cette durée $2\Delta t$ est, en effet, également, une caractéristique importante du bruit géomagnétique perturbateur, et va conditionner — au même titre que les niveaux d'amplitude — son effet sur le signal (c'est-à-dire le champ) à mesurer.

Le caractère *aléatoire* ou *organisé* du bruit géomagnétique doit donc être évalué en fonction d'une durée de référence que l'on aura été conduit à se donner pour chaque type de mesure déterminé. A la limite — durées très longues, ou durées très courtes — ce partage peut être considéré comme déjà fait : vis-à-vis d'une durée très longue tout est aléatoire, alors que dans le cas d'une mesure qui aurait été extrêmement rapide on devrait pouvoir extraire — au moins en théorie — une valeur déterminée du champ perturbateur, quel qu'il soit. Les cas intéressants à discuter sont ceux intermédiaires.

Il va de soi que dans toute cette discussion les durées dont nous parlons n'interviennent que par leurs valeurs relatives : durées de la mesure rapportées aux durées de cohérence du bruit perturbateur. Si nous considérons, par exemple, parmi ce dernier, les variations géomagnétiques classiques lentes, étudiées sous les noms de « variations séculaires », « variations saisonnières ou annuelles », « variations diurnes » (des jours calmes : le Sq de la nomenclature internationale)..., la durée de la mesure sera presque toujours très inférieure aux temps pendant lesquels ces variations restent cohérentes et le problème de la correction correspondante à appliquer aux mesures sera résoluble d'une façon évidente, à condition de disposer d'enregistrements valables du champ géomagnétique et d'avoir effectué les « réductions » (de lieu et de temps) d'une façon correcte.

Si, par contre, la durée de la mesure devenait comparable, ou supérieure, aux temps mis en jeu par ces variations, il faudrait corriger par des valeurs *moyennes* dans lesquelles interviendraient — même pour ces variations très lentes — des facteurs aléatoires.

Tout ceci est classique et nous n'avons pas à nous y appesantir. Pour la même raison, nous laisserons de côté l'effet direct de perturbations telles que les « baies magnétiques », ou les grands « mouvements » dont la

FIG. 1. — Spectre du bruit géomagnétique permanent (« courbe S » normalisée), à Chambon-la-Forêt (d'après F. Glangeaud).

succession (telle qu'elle apparaît enregistrée sur les documents de base des observatoires) donne l'aspect macroscopique d'un orage magnétique. Nous devons seulement signaler ici que ces diverses perturbations présentent presque toutes une « microstructure » plus ou moins complexe — mise en évidence par les enregistrements spéciaux dont sont équipés maintenant un assez grand nombre d'observatoires — dont nous ne devrions pas laisser de côté les effets possibles quant à notre problème de mesure. Ces microstructures comportent toutes sortes de « pulsations », dites « régulières » (ou « continues », et notées « pc » dans la nomenclature internationale), ou « irrégulières » (et notées « pi »), suivant le cas. Simultanément à cette notion de *régularité* ou d'*irrégularité*, on a fait porter la classification de ces pulsations sur l'ordre de grandeur de leurs périodes (ou « pseudo-périodes » en ce qui concerne les irrégulières), ce qui fait que leur nomenclature internationale complète s'échelonne entre les « pc 1 » et les « pc 5 » pour les régulières (de 1/5 s jusqu'à 600 s) et se partage entre « pi 1 » et « pi 2 » pour les irrégulières (pseudo-périodes de quelques secondes, et d'une à deux minutes, respectivement). Il convient enfin de signaler que, parmi toutes les catégories précédentes, les « pc 1 » se présentent, la plupart du temps, par situation magnétique calme, c'est-à-dire ne doivent pas être considérées obligatoirement comme représentant la microstructure (ou « structure fine ») d'un phénomène géomagnétique macroscopique simultané. Cette remarque peut être amenée à jouer un rôle dans la mesure où elle avertit qu'il pourra être nécessaire de tenir compte d'un certain bruit géomagnétique, même quand les mesures de champ faible auront été faites par situation magnétique parfaitement *calme* (au sens classique, traditionnel, de ce terme).

Une remarque analogue à la précédente devra aussi s'appliquer pour toutes les autres variations, plus rapides encore que les pc 1, que nous rencontrerons si nous poussons notre exploration jusqu'à une fréquence de quelques dizaines de hertz. Nous y trouvons alors les fréquences de résonance de la cavité Terre-Ionosphère (oscillations de Schumann), avec leur fondamental autour de 8 Hz et leurs « supérieurs » (ou pseudo-harmoniques) sur 14, 20, 26... Hz, ainsi que les « résidus » les plus rapides de la « courbe en S » de F. Glangeaud, déjà signalée. Malgré leur niveau très faible (entre 1/10 000 et 1/1 000 de gamma en amplitude), les oscillations de ces derniers types tirent leur importance du caractère quasi permanent de leur présence, alors que les pc 1 sont un phénomène relativement peu fréquent (quelques dizaines d'heures par mois, en moyenne), que les pi 1 et les pi 2 rentrent (comme les « pulsations d'orage ») parmi les phénomènes d'occurrence accidentelle (on pourra donc s'astreindre à ne pas faire de mesures de champs faibles pendant les périodes de temps correspondantes), et que seules les pulsations des types pc 3 et pc 4 se manifestent avec une certaine continuité au cours de portions importantes de la plupart des jours.

Parmi les variations les plus rapides susceptibles de perturber les mesures, nous ne pouvons passer sous silence les décharges électromagnétiques accompagnant les éclairs et la foudre lors des orages électriques (« météorologiques », pour les distinguer des orages magnétiques), bien que ces phénomènes soient à la limite des manifestations proprement géophysiques.

Par leurs effets intégrés, ces variations sont responsables de l'excitation quasi permanente de la cavité Terre-Ionosphère et, par conséquent, des oscillations de Schumann que nous avons signalées précédemment, mais nous les considérons maintenant sous l'angle des perturbations qu'elles font subir individuellement au champ magnétique terrestre, dans des limites de distance de l'ordre de quelques dizaines — et parfois de quelques centaines — de kilomètres, ceci suivant l'intensité de la décharge et la sensibilité des appareils récepteurs. Elles augmentent parfois d'une façon très sérieuse la difficulté des mesures de champ faible, surtout au voisinage des régions équatoriales où la permanence, pendant des saisons entières, de ces effets perturbateurs ne permet pas toujours d'attendre que leur niveau soit redevenu faible pour procéder aux mesures. Une autre difficulté tient à leur caractère impulsif (tout au moins à l'échelle du 1/100 de s) et à la distribution aléatoire dans le temps de ces impulsions : en essayant, par exemple, de les éliminer par filtrage, on risque, en étalant l'effet de chacune d'elles, de les incorporer plus étroitement à la mesure et de rendre ainsi les corrections plus incertaines. Une méthode plus raffinée ferait appel à des mesures très rapides que l'on réussirait à faire passer à travers le crible des impulsions perturbatrices. Nous retrouvons là cet énoncé paradoxal (et dont l'application n'est pas générale) qu'une mesure est, parfois, d'autant plus précise qu'elle sait être plus rapide.

Remarquons aussi que la réponse des appareillages de mesure à des excitations par impulsions n'est pas toujours bien connue. Ce problème s'est posé il y a quelque temps pour des magnétomètres à protons : c'est ainsi que dans le cas d'un magnétomètre à polarisation dynamique par effet Abragam-Overhauser, tel que celui étudié par G. Bonnet à Grenoble [1], on peut se demander si les fluctuations très rapides et irrégulières du champ magnétique engendrées par chaque éclair ne perturbent pas de diverses façons des mesures qui seraient faites au même moment avec un tel magnétomètre. On sait que la structure fine de ces fluctuations évolue à l'échelle de temps de l'ordre de la microseconde pour une durée totale de quelques centièmes de seconde. D'après G. Bonnet (cf. [1], *loc. cit.* et communication personnelle de L. Néel), il n'y a pas d'inertie propre aux transitions entre niveaux énergétiques des spins *isolés* et faiblement couplés les uns aux autres pour des phénomènes *moins brefs que 1 ms*. D'autre part, l'inertie du dispositif complet peut apparaître dès lors que le système de spins est couplé à un réseau électrique, tel que celui qui sert à la détection des processus gyromagnétiques, le facteur limitatif étant alors introduit par la surtension de ce réseau. A cette influence possible de diverses causes d'inertie, il faut ajouter certaines non-linéarités qui peuvent s'introduire entre les variations rapides du champ magnétique de l'éclair et la mesure des fréquences correspondantes. Les études des chercheurs du groupe de Grenoble ont conduit à réduire considérablement les effets précédents, mais sans aller peut-être jusqu'à les supprimer suffisamment dans le cas des fortes décharges dues aux éclairs. Il sera donc difficile de tenir compte correctement de ceux-ci pour en corriger les mesures. Dans d'autres cas, ces décharges provoqueront des phénomènes de *saturation*, ceci pendant des durées plus ou moins grandes mais qui pourront dépasser largement la durée même de chaque décharge (tenu compte des

diverses inerties de l'appareillage), d'où introduction d'harmoniques perturbateurs avec suppression plus ou moins complète de la mesure elle-même.

Revenons maintenant à la gamme centrale des variations magnétiques en cause. Nous y trouvons, dans l'ordre des rapidités croissantes :

— Des pi 2, de pseudo-périodes, irrégulières, comprises entre une et trois minutes et d'amplitudes pouvant atteindre une dizaine de gammas. Leur effet reste occasionnel et il sera encore possible de le corriger par des méthodes classiques si l'on dispose de bons enregistrements continus de ces pulsations, ce qui suppose déjà l'usage d'enregistrements spéciaux.

— Des pi 1, à caractère mi-pulsatoire et mi-impulsif, se groupant autour de périodes allant de quelques secondes à quelques dizaines de secondes et dont les amplitudes restent, en général, inférieures à un gamma (sauf si elles accompagnent des orages magnétiques intenses). On retrouve ici les difficultés spécifiques apportées par des perturbations impulsationnelles : il sera impossible, en général, d'éliminer ce *bruit* et l'imprécision qui en résultera pour la mesure ne sera pas toujours réductible par des effets de moyennes. Mieux vaudra attendre des périodes sans bruit.

— Des pc 4 et des pc 3, qui peuvent occuper une portion importante de la journée (depuis 5-6 h du matin jusqu'à 4-5 h du soir, en heure locale). Elles sont parfois très sinusoïdales (avec des périodes dominantes de l'ordre de 20 à 50 s), mais sans que leurs trains successifs soient forcément en cohérence (ces « trains » pouvant avoir des durées très variables, depuis quelques minutes jusqu'à plusieurs dizaines de minutes). Leurs amplitudes dépassent très souvent plusieurs gammas. Ce sont donc, peut-être, ces pulsations qui jouent le rôle le plus important dans la précision ultime que l'on peut attendre — tout en restant dans l'ordre des considérations pratiques — pour les mesures de champs très faibles. L'enregistrement continu de ces pulsations (qui est pratiqué d'une façon régulière dans un certain nombre d'observatoires spécialement équipés — dont Chambon-la-Forêt, en France) permettrait, théoriquement, d'appliquer aux mesures des corrections classiques (soit par valeurs instantanées, soit par valeurs moyennes, ceci suivant la durée de la mesure), si la complexité provenant du caractère partiel de leur cohérence spatio-temporelle ne risquait de rendre ce genre de correction illusoire. On pourrait, il est vrai, rendre la correction plus sûre en pratiquant la mesure du champ à proximité immédiate de l'observatoire. Mais la bonne solution serait alors de s'aider des enregistrements à vue qui s'y inscrivent en temps réel, pour choisir des périodes particulièrement calmes (sans *perturbations* ni même *pulsations* d'aucune sorte) qui se présentent encore assez fréquemment en début de soirées.

— Avec les pc 2, et surtout les pc 1 (notamment sous la forme de « pulsations en perles », dénommées encore : « oscillations hydromagnétiques structurées »), notre examen redevient plutôt théorique, étant donné la faible valeur des amplitudes atteintes (ne dépassant qu'exceptionnellement 1/10 de gamma) et la probabilité réduite qu'elles soient présentes à un instant déterminé, pré-choisi. Nous ne nous y attarderons donc pas.

CAS COMPLEXES. — Beaucoup de variations géomagnétiques, notamment parmi les plus intenses

(orages mondiaux, orages polaires, baies aurorales, « agitation de jour » des régions polaires, etc.) ne sont pas dissociables, à vue, en éléments relativement simples tels que ceux que nous venons de considérer. Bien que la plupart de ces variations aient un caractère épisodique, ce qui permet de procéder aux mesures en leur absence, il y a lieu — sans aborder ici leur étude précise — d'indiquer la voie que l'on pourrait suivre pour étudier plus à fond leurs effets sur les mesures. Il s'agit de l'application des méthodes d'analyse spectrale (par exemple sous forme analogique : « Sonographe », Rayspan », etc.) qui permettent de comparer le « bruit » à la « mesure » dans chaque bande de fréquence ainsi délimitée. Sans insister sur des principes bien connus, indiquons seulement comment, appliquée à l'exemple — pris parmi les plus complexes — des orages, cette méthode permet souvent de séparer dans leur évolution des composantes quasi monochromatiques (parfois multiples et enchevêtrées) et des « bandes » plus ou moins bien délimitées en fréquences. Chacune de ces composantes du bruit total doit être traitée séparément, en fonction du type auquel elle appartient, dans l'examen de son influence sur la mesure.

Conclusion. — Il résulte de l'examen précédent que, suivant le caractère organisé, ou aléatoire, du bruit géomagnétique, des méthodes différentes doivent être utilisées pour éliminer au mieux l'influence perturbatrice de ce bruit sur la précision de la mesure.

Dans le premier de ces cas (bruit organisé, ou structuré), son élimination directe peut être tentée, ceci d'autant mieux que l'étude morphologique, quantitative et spectrale, des variations géomagnétiques entrant dans sa composition aura été plus complète. Cependant, une telle méthode ne sera pleinement efficace que si la durée de la mesure ne se révèle pas incompatible avec une connaissance précise des variations en cause, correspondantes. Pour une durée de mesure déterminée, les plus rapides parmi ces variations seront donc les moins aptes à être éliminées individuellement (c'est-à-dire que l'on ne pourra le faire que statistiquement), mais comme, en général, la période et l'amplitude de ces variations diminuent simultanément, les corrections les plus incertaines seront celles portant sur les termes les plus petits.

Dans le second cas (bruit aléatoire se rapprochant plus ou moins d'un bruit blanc), toute correction individuelle étant exclue, on ne pourra que tenir compte du niveau moyen du bruit et en déduire la précision qui pourra être atteinte par la mesure. Des améliorations pourront cependant être tentées en se servant également des possibilités de l'analyse spectrale et en examinant l'influence perturbatrice du bruit sur la mesure, à l'intérieur de bandes spectrales plus ou moins étroites, convenablement choisies. On retrouve là l'évolution générale caractéristique du rapport signal/bruit, en fonction de la largeur de la bande passante, telle qu'elle est applicable au cas d'un bruit aléatoire proprement dit.

ANNEXE

Examen de deux cas particuliers

Cas d'une mesure spatiale. — Par rapport aux mesures de champ au sol, deux considérations nouvelles

sont introduites par le fait qu'on opère à bord d'un véhicule spatial :

1) Dans quelle mesure les composantes du bruit géomagnétique seront-elles les mêmes que celles au sol ?

2) Quelle va être l'influence du changement de référentiel spatio-temporel dû au mouvement relatif du véhicule par rapport à un système d'axes fixés au sol ?

La réponse à la première de ces questions met en jeu un ensemble de connaissances dont l'état actuel est encore précaire. Il semble, toutefois, que la plupart des *composantes bien structurées* du bruit géomagnétique au sol aient acquis ces structures par l'intervention de mécanismes ayant leur siège soit dans la magnétosphère, soit dans l'ionosphère, soit même (pour les oscillations de Schumann) entre l'ionosphère et le sol. C'est en fonction de la région de l'environnement terrestre où se fait la mesure, et en tenant compte des théories admises pour l'origine des diverses variations magnétiques intervenant dans la composition du bruit au sol, que l'on pourra tenter de donner une réponse. En ce qui a trait à la *portion de caractère aléatoire* de ce bruit, les études de F. Glangeaud déjà citées [2], comparées à celles d'autres auteurs [4, 5 et 6] conduites à partir de mesures faites en satellites, apportent des preuves en faveur d'une origine au moins partiellement interplanétaire de cette portion. Ceci n'exclut pas le rôle, probablement important, que joue la gaine magnétosphérique dans l'élaboration de ce bruit, ni ceux, plus discutés, de certaines portions de la magnétosphère et de l'ionosphère.

Examinons maintenant notre deuxième point :

Éludons (pour ne pas nous laisser entraîner dans la discussion de questions ici secondaires, mais complexes) les distinctions que l'on pourrait être amené à faire entre un système d'axes liés au sol, et un référentiel qui, en chaque point de l'environnement terrestre, serait lié au champ géomagnétique *local* (c'est-à-dire que nous ne faisons pas attention, ici, au glissement possible de certaines portions du champ géomagnétique — notamment du côté de la queue de la magnétosphère — par rapport à la partie solide du Globe terrestre). Soit alors D la distance que le véhicule spatial parcourt — par rapport à ce référentiel commun — pendant la mesure de champ magnétique faite à bord de ce véhicule. Si D est inférieur à la distance pour laquelle un certain type de variation géomagnétique reste en cohérence, l'interaction entre ce type déterminé de variation et la mesure rentre dans le même cas que celui d'une mesure faite en un point stationnaire. S'il n'en est pas ainsi, l'évolution effective, en fonction du temps, de cette variation, telle qu'elle se manifeste à bord du véhicule spatial, s'en trouvera changée. Sa nature, structurée ou non structurée, pourra même en être affectée : par exemple, si une certaine structure aléatoire dans l'espace se trouve ainsi transformée en la structure temporelle équivalente. D'après ce que l'on sait à l'heure actuelle sur la constitution physique de la magnétosphère, ce cas ne peut guère se présenter dans la masse principale de celle-ci, mais il pourrait apparaître dans certaines couches de l'ionosphère, ou dans la gaine magnétosphérique (« magnetosheath »).

La correction à appliquer aux mesures de ce fait échappe à une détermination précise, car l'étude qui

aura pu être faite, par ailleurs, sur la nature des variations magnétiques dans cette portion de l'espace, et sur la façon dont elles y sont distribuées à un instant déterminé, n'aura pu nous apporter que des éléments d'information statistiques ne se traduisant au total, relativement aux mesures, que par des *niveaux* de bruit. Ce sont ces niveaux qui conditionneront la précision de la mesure, sans qu'il soit possible d'améliorer celle-ci par la connaissance des valeurs perturbatrices instantanées.

Dans le cas limite où cette mesure concerne le bruit lui-même, il y aura intérêt à la faire porter sur une bande spectrale étendue, analysable ultérieurement. C'est ainsi que l'on pourra essayer de séparer, dans le bruit total mesuré, ce qui pourrait être dû à des mouvements d'ensemble des frontières de la magnétosphère (bruit de basse fréquence et d'une assez grande cohérence spatiale), de ce qui relève de processus aléatoires proprement dits.

Cas d'une mesure sous-marine. — Parmi les moyens de protection auxquels on peut songer pour se protéger contre le bruit géomagnétique (dont l'examen sortait, dans l'ensemble, de notre sujet), il en est un de très naturel lui-même, celui qui fait appel à l'absorption des variations composant ce bruit par les épaisses couches d'eau conductrices, océaniques. La loi d'affaiblissement qui en résulte pour des ondes de période T est de la forme :

$$A_z = A_0 \exp - z \cdot (K/T)^{1/2} = A_0 \exp - z/h.$$

Dans cette expression, K représente la conductibilité de l'eau de mer (de l'ordre de 4 mho/m), A_0 et A_z désignent respectivement les amplitudes de cette onde, en surface et à une profondeur z . $h = (T/K)^{1/2}$ caractérise la « demi-profondeur de pénétration », correspondant à une absorption dans le rapport $1/e$, soit d'environ 8,7 dB.

Il en résulte que la composante du bruit sur 1 Hz (pulsations de 1 s) sera affaiblie à 8,7 dB sur 250 m et, qu'ainsi, une profondeur de 5 000 m assurera une protection de plus de 170 dB sur cette fréquence, mais seulement de 8,7 dB sur 1/400 de Hz.

A partir de ces données, on pourrait aisément reprendre les niveaux moyens de bruit géomagnétique envisagés pour des observations en surface et les transformer pour évaluer leur influence possible, ou négligeable, à telle ou telle profondeur, 5 000 m par exemple.

En fait, compte tenu d'un ensemble de mesures effectuées en bathyscaphe (à des profondeurs comprises entre 2 000 et 8 000 m) [7, 8], il ne paraît pas que l'on puisse tabler sur de telles prévisions. En effet, indépendamment de difficultés (non insurmontables) provenant des bruits d'appareillage — et dont nous n'avons pas à nous occuper ici — ces mesures ont mis en évidence l'existence de bruits naturels d'origine proprement océanique (ou dérivant du complexe continents-océans) dont le niveau peut dépasser largement — aux grandes profondeurs — celui des bruits géomagnétiques externes, affaiblis ainsi que nous l'avons rappelé.

Il n'en reste pas moins que la possibilité d'avoir recours à ce « blindage » naturel qu'assure l'eau de mer prise en épaisseur suffisante ne doit pas être négligée quand les circonstances s'y prêtent, notamment pour les composantes les plus rapides du bruit. A titre

d'exemple, mentionnons que dans les mesures magnétiques « sur mer » au moyen de magnétomètres à protons remorqués, il peut être avantageux, lors de la traversée des mers tropicales, d'imposer une profondeur d'immersion un peu plus importante pour le remorquage, afin d'assurer au magnétomètre une certaine protection contre les décharges orageuses. Malgré la

limitation à quelques dizaines de mètres des profondeurs auxquelles il sera encore possible d'opérer commodément, le fait qu'on pourra éliminer ainsi les composantes de plus haute fréquence des variations magnétiques liées à ces décharges améliorera — comme nous l'avons vu précédemment — la qualité des mesures faites par ces magnétomètres.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] BONNET (G.), *Annales de Géophys.*, 1962, **18**, 62-91.
 - [2] GLANGEAUD (F.), Mise en évidence d'un bruit de fond de composition spectrale quasi stationnaire pour les variations géomagnétiques au sol, *C. R. Acad. Sci.*, 1967, **264**, série B, 553-556.
 - [3] GLANGEAUD (F.), Communication personnelle.
 - [4] DAVIDSON (M. J.) et HEIRTZLER (J. R.), Communication présentée au Symposium sur la Physique des relations Soleil-Terre, Belgrade, 1966.
 - [5] HOLZER (R. E.), MCLEOD (M. G.) et SMITH (E. J.), *J. Geophys. Res.*, 1966, **71**, 1481.
 - [6] COLEMAN (P. J.), *J. Geophys. Res.*, 1966, **71**, 5509.
 - [7] SELZER (E.), LAUNAY (L.) et LICHTMAN (S. W.), Comptes rendus d'enregistrements électromagnétiques à très basses fréquences faits en bathyscaphe en eaux profondes, Agard Conference Proceedings n° 20 (Sub-Surface Communications), 1966.
 - [8] LAUNAY (L.), LICHTMAN (S. W.) et SELZER (E.), Electrical environment determinations at great ocean depths, I.E.E.E. Technical Proceedings, Ocean Electronics Symposium, Honolulu, 1966, Western Periodicals Co., Hollywood, Cal.
-