

Annales de Géophysique

tome 29, numéro 2

avril-mai-juin 1973

Ann. Geophys., t. 29, fasc. 2, 1973, p. 149-169

Effets induits par l'électrojet équatorial au centre de l'Afrique

par O. FAMBITAKOYE

(O.R.S.T.O.M., - PARIS)

SOMMAIRE. — *A partir d'une chaîne méridienne de neuf stations, constituant un profil de 3 000 km normal à l'équateur magnétique au centre de l'Afrique, la contribution des effets induits aux variations magnétiques transitoires observées est estimée. Il est montré que ceux-ci sont négligeables pour la part de la variation journalière régulière S_R due à l'électrojet équatorial ; par contre, il est aisé de les mettre en évidence pour la part des perturbations irrégulières due à l'électrojet. Cette différence est reliée à celle existant pour les causes de l'induction : rotation de la Terre dans le cas de la variation S_R , variation d'intensité des courants dans le cas des perturbations. Dans un appendice, le résultat contraire (en ce qui concerne la variation S_R) obtenu par Forbush et Casaverde (1961) est critiqué.*

SUMMARY. — *The contribution of the induced effects to transient magnetic variations observed in the region of the equatorial electrojet is estimated from a longitudinal chain of nine stations, forming a North-South profile of 3 000 kms on each side of the magnetic equator in Central Africa. It is pointed out that such effects are negligible for the part of the regular daily variation S_R due to the equatorial electrojet, but their existence is quite clear for the part of the irregular perturbations due to the electrojet. Such difference is related to the difference in the causes of the induction : rotation of the Earth in the case of S_R variation, variation of current intensity in the case of the perturbations. In an appendix, the opposite result, as for the S_R variation, obtained by Forbush and Casaverde (1961) is criticized.*

1 - Introduction

De mars 1968 à mars 1970, une chaîne méridienne de stations a été implantée de part et d'autre de l'équateur magnétique au Tchad et en République Centrafricaine en vue d'étudier les variations transitoires du champ magnétique terrestre liées à l'existence de l'électrojet équatorial.

On sait que les effets de ce phénomène se manifestent aussi bien sur la variation journalière régulière S_R que sur les variations irrégulières (ou perturbations) que nous désignerons ici par le symbole D ("disturbance").

Ainsi la variation S_R de la composante horizontale H observée en des stations situées près de l'équateur magnétique est beaucoup plus grande (souvent d'un facteur deux) qu'en des stations situées à quelques centaines de kilomètres ; de part et d'autre de l'équateur, la variation S_R de la composante Z est également amplifiée. Selon les idées actuellement reçues, cette anomalie est causée par l'amplification, le long de l'équateur magnétique, des courants circulant dans la région E de l'ionosphère parallèlement à cet équateur. Et l'on convient d'appeler "électrojet équatorial" le ruban de courants qui correspond à une intensité accrue, dans

O. R. S. T. O. M.

Collection de Référence

n° 6609

295 JAN. 1974

une région limitée de part et d'autre de l'équateur magnétique, des nappes de courants engendrant la variation S_R dans l'ensemble de l'hémisphère éclairé.

De même, dans la journée, une amplification analogue des variations de type D apparaît sur les composantes H et Z ; elle n'est cependant sensible que sur les variations dont la durée est relativement courte (inférieure à une ou 2 heures, par exemple). Une telle amplification correspond également à l'existence d'un ruban de courants plus intenses, circulant le long de l'équateur magnétique.

L'électrojet équatorial est essentiellement d'origine externe, c'est-à-dire que les processus physiques qui l'engendrent sont situés dans l'ionosphère, plus précisément dans la couche E . Cependant, à première vue, ce ruban de courants, qui cause des variations temporelles, doit donner naissance à des effets internes ou induits. Il est donc essentiel pour une étude d'un tel phénomène d'apprécier au préalable quelle est la contribution des effets induits aux variations observées. Répondre à cette question est le but de l'étude présente.

Après avoir exposé la méthode que nous avons choisie et les limites de notre étude, nous décrivons les données expérimentales utilisées. Nous énumérerons ensuite quelques remarques d'ordre technique ; en effet, l'amplitude très faible des effets internes des variations de type S_R que nous obtenions dès les premières analyses nous a imposé une évaluation de divers facteurs susceptibles soit de contaminer les résultats soit de contribuer à leur explication. La séparation des effets internes et externes sera enfin présentée. L'inexistence des effets induits pour les variations de type S_R , leur présence pour les variations de type D nous conduiront, en concluant, à proposer une explication de cette différence apparemment paradoxale et à énumérer un certain nombre de conséquences que ces résultats impliquent dans toute étude de l'électrojet équatorial du point de vue externe.

2 - Méthode d'analyse

Les effets de l'électrojet équatorial correspondent à un caractère *local* soit des variations de type S_R , soit des variations de type D , qui ont, les unes et les autres, un caractère *planétaire*. Les données dont nous disposons, en tant qu'elles sont acquises sur un profil linéaire de 3 000 km de part et d'autre de l'équateur magnétique, sont capables de bien décrire le caractère local des variations ; d'autre part, l'opérateur K de Kertz (Kertz, 1954) a été spécialement conçu pour une séparation des effets externes et internes à une échelle locale.

Siebert (1962) a montré, en utilisant l'intégrale de Cauchy et son extension au cas d'un point situé sur le contour d'intégration, l'identité de l'opérateur d'intégration K et de la transformation de Hilbert.

Ainsi, considérons une fonction analytique :

$$f(\zeta) = H(x, z) + iZ(x, z) \quad (\zeta = x + iz)$$

Les formules de Hilbert :

$$H(x_0, 0) = \pm \frac{1}{\pi} VP \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{Z(x, 0)}{x_0 - x} dx = \pm K * Z(x, 0) \quad (1)$$

$$Z(x_0, 0) = \mp \frac{1}{\pi} VP \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{H(x, 0)}{x_0 - x} dx = \mp K * H(x, 0) \quad (2)$$

où VP désigne la valeur principale de l'intégrale au sens de Cauchy, résultent immédiatement de l'intégration de la fonction $f(\zeta)/(\zeta_0 - \zeta)$ sur le contour "axe réel + demi-circonférence de rayon infini située dans le demi-plan inférieur" si les sources sont externes (signes supérieurs des équations 1 et 2) ou sur le contour "axe réel + demi-circonférence à rayon infini située dans le demi-plan supérieur" si les sources sont internes (signes inférieurs des équations 1 et 2), ces contours étant parcourus dans le sens direct.

Les indices t désignant le champ total observé et e ou i ses parties externe ou interne, on a alors par exemple :

$$H_e(x_0, 0) = K * Z_e(x, 0) \quad (3)$$

$$H_i(x_0, 0) = -K * Z_i(x, 0) \quad (4)$$

ou, en faisant la différence de ces deux équations :

$$H_e(x_0, 0) - H_i(x_0, 0) = K * Z_t(x, 0) \quad (5)$$

Cette dernière équation, combinée à :

$$H_e(x_0, 0) + H_i(x_0, 0) = H_t(x_0, 0) \quad (6)$$

permet de calculer H_e et H_i en x_0 .

Une condition essentielle d'utilisation de cet opérateur est que les variations analysées tendent vers zéro aux extrémités du profil. Autrement dit, la séparation des effets internes et externes suppose qu'au préalable une *autre* séparation soit réalisée : celle des effets dus au seul électrojet (nous les appellerons S_R^E ou D^E , E pour électrojet) et de ceux correspondant soit aux nappes planétaires de courants engendrant la variation S_R (nous les appellerons S_R^P , P pour planétaire) soit aux courants planétaires engendrant les variations de type D (nous les appellerons D^P).

A première vue, ceci peut paraître un inconvénient. En fait, toute étude de l'électrojet équatorial

suppose qu'une telle séparation soit effectuée. Il est vain par exemple de parler d'amplification causée par l'électrojet si le phénomène qui est amplifié n'est pas, au préalable, lui-même défini. En ce sens, la contrainte que nous impose l'opérateur de Kertz est bénéfique.

Supposons, par exemple, qu'une première tentative de séparation entre S_R^P et S_R^E ait été effectuée et que les effets internes résultant de l'analyse de la variation S_R^E aient une forme éloignée de la variation en latitude à laquelle on pourrait s'attendre. On pourra penser que c'est une "définition" imparfaite de la variation S_R^P qui est la source de tels effets internes et l'on devra chercher à changer cette définition pour faire apparaître, si possible, des effets ressemblant quelque peu à ceux que la variation S_R^E est capable de produire.

En d'autres termes, un des intérêts de cette tentative d'une séparation des effets externes et des effets internes causés par l'électrojet est qu'elle peut devenir une vérification de la *validité* de la séparation faite entre variation due au seul électrojet (S_R^E ou D^E) et variation due aux nappes planétaires de courants (S_R^P ou D^P). Dans la suite de cette analyse, afin d'éviter toute ambiguïté, nous continuerons à parler de "séparation" des effets externes et internes, mais nous parlerons de "définition" des variations S_R^E (ou D^E) et S_R^P (ou D^P).

Forbush et Casaverde (1961), dans leur analyse du profil réalisé de part et d'autre de Huancayo, avaient conclu à l'existence de courants induits pour la variation S_R (courants équivalents à ceux d'une image électrique située à 600 km de profondeur). Comme notre analyse aboutira à une conclusion opposée, c'est-à-dire à une absence de courants induits, nous ferons porter le principal effort de notre analyse sur la démonstration de ce fait ; la "définition" de la variation S_R^P y joue un rôle essentiel. Dans l'étude des variations de type D , nous chercherons seulement à montrer que les effets induits existent ; le soin que nous apporterons à "définir" la variation D^P sera moins grand.

3 - Données expérimentales

La chaîne méridienne de stations implantées de part et d'autre de l'équateur magnétique comprenait cinq variographes Askania enregistrant les trois composantes du champ magnétique terrestre. L'observatoire permanent de Bangui au Sud et une station temporaire (équipée d'un magnétographe La Cour) au Nord d'une part, les observatoires plus lointains de Binza au Sud et de Tamanrasset au Nord complètent ce profil en l'étendant sur 3 000 km. Le

tableau I donne la position des stations et leur distance d en km à l'équateur magnétique défini à 100 km d'altitude (Cain, 1969), soit $10,0^\circ\text{N}$. Dans notre analyse, nous utilisons uniquement des données provenant de 1969, année pendant laquelle l'implantation des cinq Askania visait à encadrer les extremums de la variation en latitude du S_R^E de la composante Z (deux stations autour de chaque extremum) et à mesurer l'extremum du S_R^E de la composante H (une station près de l'équateur magnétique). Tous les observatoires et stations, à l'exception de Tamanrasset qui est décalé d'environ 15° vers l'Ouest, sont situés dans une bande de longitude n'excédant pas 5° de largeur autour du méridien 17°E .

Tableau I

Stations	Latitude	Longitude	d
S1 Tamanrasset	+ 22°48'	05°31'	+ 1 422 km
S2 Largeau	+ 17°56'	19°06'	+ 881 km
S3 Bol	+ 13°28'	14°43'	+ 385 km
S4 Koundoul	+ 11°58'	15°09'	+ 219 km
S5 Miltou	+ 10°14'	17°27'	+ 26 km
S6 Kotongoro	+ 08°36'	18°37'	- 155 km
S7 Bouca	+ 06°30'	18°17'	- 389 km
S8 Bangui	+ 04°26'	18°34'	- 619 km
S9 Binza	- 04°23'	15°16'	- 1 598 km

Pour réaliser la séparation des effets internes et externes, il a semblé préférable de travailler dans le cas du S_R non sur des valeurs de jours individuels mais plutôt sur des moyennes de plusieurs jours. Nous avons donc retenu, pour chaque mois de l'année 1969, les jours pour lesquels, l'activité magnétique étant *relativement faible* ($A_p \leq 9$), les *neuf* stations avaient fonctionné. Le tableau II donne le nombre N de jours utilisés chaque mois et leur A_p moyen. On notera que le mois d'avril est exclu ; le mois de mars avec un seul jour a été maintenu. Ce cas correspond donc à l'analyse d'un jour *individuel*.

Pour chaque jour et en chaque station, un niveau-zéro a été déterminé en interpolant linéairement entre les niveaux des enregistrements à un certain *moment*, apparemment calme, de chacune des nuits encadrant le jour considéré. Ces moments, choisis à l'intérieur d'intervalles de temps où le niveau des courbes est à peu près constant, se trouvent en général après minuit. Les *mêmes* moments, en temps universel, ont été retenus aux *neuf* stations. La cohérence, entre stations, de tels niveaux-zéro est

Tableau II

1969	Jan.	Fev.	Mars	Mai	Juin	Juil.	Août	Sept.	Octo.	Nov.	Déc.
<i>N</i>	9	4	1	6	10	16	9	8	14	11	9
<i>Ap</i>	4	4	9	5	5	4	5	5	5	5	5

ainsi garantie, puisque, les perturbations étant synchrones en temps universel, une variation résiduelle du niveau dû à une perturbation devient à peu près identique à toutes les stations.

Les écarts horaires moyens à ces niveaux-zéro ont été mesurés sur les composantes *H* et *Z* en tenant compte de l'heure *locale* à chaque station. Cette précaution ne joue sans doute un rôle important que dans le cas de Tamanrasset.

Dans notre analyse, nous n'utiliserons que les écarts horaires autour du maximum de la variation S_R (10 h 30, 11 h 30 et 12 h 30). Ils correspondent à des heures auxquelles l'électrojet équatorial circule perpendiculairement à notre profil. Ceci représente une condition optimale pour la séparation des effets externes et internes. Nous appellerons H_T et Z_T les écarts observés définis ci-dessus : ils représentent l'effet *total* de la variation S_R (soit $S_R^E + S_R^P$).

Dans le cas des variations de type *D*, nous n'avons retenu que deux événements de courte durée. Les variations correspondantes observées sur la déclinaison étant presque négligeables, nous nous trouvons également dans une condition optimale pour la séparation des effets internes et externes. Les quantités H_T et Z_T sont alors définies à chaque station par la différence entre les valeurs du champ au début et à la fin de l'évènement pour la composante considérée.

4 - Remarques techniques

4.1 - Procédés d'interpolation

Nous disposons, au long de notre profil de 3 000 km, de 9 points d'observation dont la distribution en latitude n'est pas uniforme. La figure 1 illustre ce fait en montrant comment les stations sont réparties au long de courbes représentant les effets théoriques, en *H* et *Z*, d'un ruban infiniment mince de courants (de demi-largeur *a* égale à 300 km) situé à 105 km d'altitude ou les effets conjugués d'un tel ruban et de son image électrique située à 600 km de profondeur. Une image située à cette profondeur représente bien, selon Forbush et Casaverde (1961), l'effet des courants induits par l'électrojet sur la longitude de Huancayo. Une loi parabolique (Chapman, 1951) de la forme $i = i_0 (1 - x^2/a^2)$ a été choisie pour la variation de l'intensité *i* des courants dans le ruban, i_0 étant la valeur au centre et *x* la distance à ce centre.

L'opérateur de Kertz étant basé sur une méthode d'intégration, nous devons interpoler entre nos neuf points d'observation afin d'obtenir des valeurs correspondant à des points situés à une distance constante les unes des autres. Nous avons choisi un pas de 50 km, approximativement égal au quart de la distance entre nos stations les plus proches. Ce pas peut cependant paraître très petit devant la distance entre les stations situées sur les bords du profil. Nous justifierons ce choix à propos de l'opérateur de Kertz lui-même. Les formes des profils en *H* et *Z* (figure 1) sont extrêmement différentes. Il n'est donc point évident a priori que la

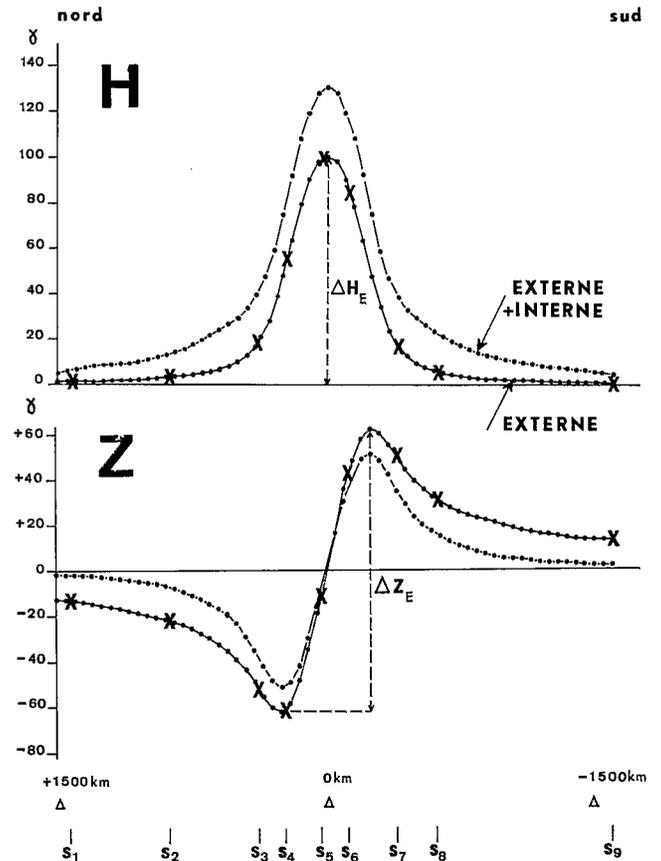


Fig. 1

Variations théoriques le long d'un profil Nord-Sud des effets dus à un ruban externe (demi-largeur 300 km) ou de ce ruban associé à son image à 600 km de profondeur. La position de nos stations expérimentales S_1 à S_9 est repérée sur les courbes elles-mêmes. La définition des quantités ΔH_E et ΔZ_E , illustrée sur les profils correspondant au ruban externe, est valable pour les profils des effets associés du ruban externe et de son image et pour les profils observés qui seront analysés.

même méthode d'interpolation soit applicable aux valeurs expérimentales H_T et Z_T définies précédemment. A cet égard, nous pouvons vérifier les validités relatives de diverses méthodes d'interpolation en les appliquant aux courbes théoriques de la figure 1, puisque nos courbes expérimentales (voir les courbes S_R de la fig. 5) ont une forme analogue. Appelons Y_e les valeurs théoriques aux abscisses des neuf stations pour les effets d'un ruban externe : elles sont les équivalents de nos valeurs "expérimentales". A partir de ces Y_e , nous pouvons calculer des valeurs "interpolées" Y_i de 50 en 50 km le long du profil, puis les différences entre ces valeurs Y_i et les valeurs "théoriques" Y_t en ces mêmes points. La figure 2 représente les différences ainsi obtenues par diverses méthodes pour H ou pour Z , les abscisses des neuf valeurs Y_e étant indiquées en bas (S_1 à S_9). On notera que l'échelle d'ordonnées de cette figure est dilatée quatre fois par rapport à celle de la figure 1.

Une première méthode, très grossière, consisterait à faire une interpolation linéaire entre les neuf valeurs Y_e . Le résultat obtenu est illustré en *a* sur la figure 2. Une méthode plus fine consiste à

lisser les valeurs Y_e à l'aide de fonctions splines (Reinsch, 1967) ; celles-ci donnent la possibilité de calculer des valeurs interpolées en des points quelconques. Les différences Δ ainsi obtenues sont représentées en *b* sur la figure 2. Il serait vain de prétendre obtenir des différences très faibles tout au long des profils en H et Z , en particulier dans la région centrale où les erreurs relatives, dues au mode d'interpolation, deviennent évidemment plus faibles. Les autres différences Δ représentées sur la figure 2 (b_1 et $b_{1,2}$ pour H , b'_1 pour Z) correspondent à des essais pour améliorer l'interpolation sur les bords du profil où les erreurs relatives deviennent beaucoup plus importantes.

Pour la composante Z , l'absence de valeurs observées entre les stations S_8 et S_9 (côté Sud) peut être compensée valablement par l'adjonction d'une valeur Y_e supplémentaire, qui correspondrait à une station fictive F'_1 située à égale distance des stations S_8 et S_9 et qui serait égale à la moyenne des valeurs Y_i obtenues par les interpolations de type *a* et *b*. Un nouveau lissage (de type *b*) appliqué aux 9 valeurs Y_e et à cette valeur supplémentaire donne le résultat illustré en b'_1 .

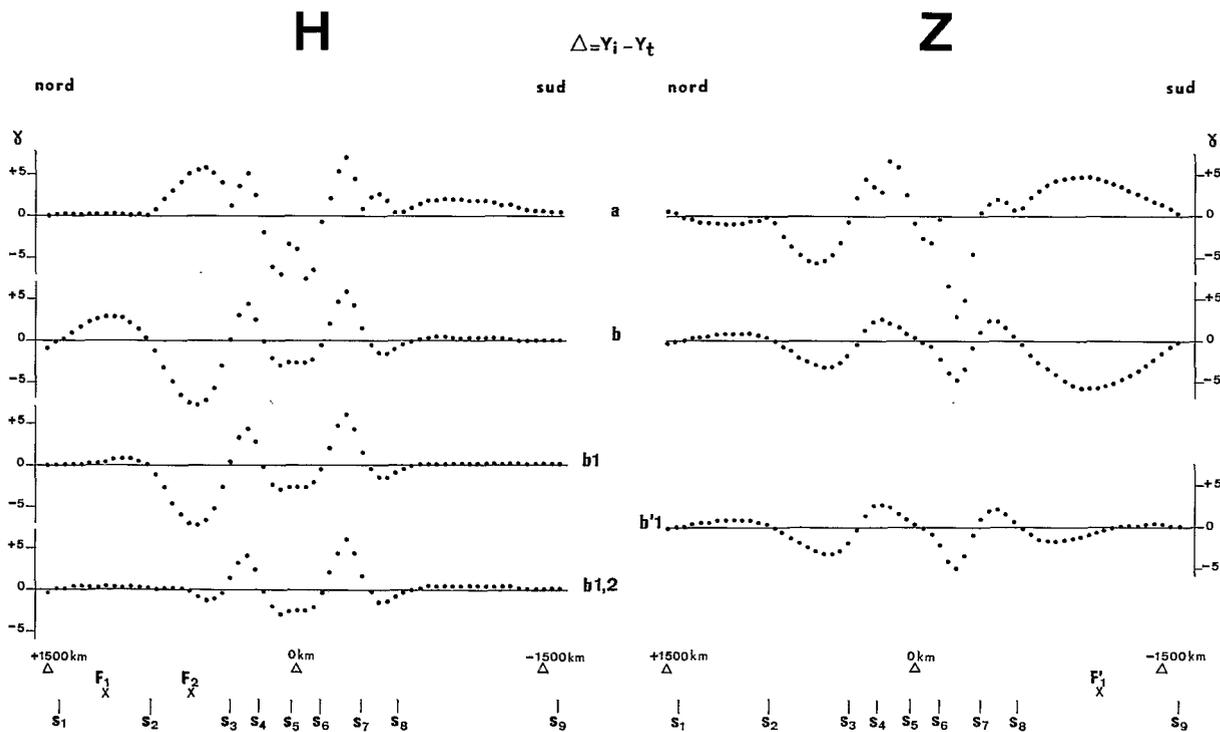


Fig. 2

Différences Δ obtenues au long du profil par diverses méthodes d'interpolation des courbes théoriques (ruban externe) de la figure 1.

Pour la composante H , c'est sur le bord Nord que les interpolations a et b sont les moins satisfaisantes. L'adjonction d'une première valeur supplémentaire Y_e , qui correspondrait à une station fictive F_1 située à égale distance des stations S_1 et S_2 et qui serait égale à la moyenne des valeurs Y_e en S_1 et S_2 , permet déjà d'obtenir une première amélioration (différences Δ en b_1). Pour réduire les différences Δ subsistant entre les stations S_2 et S_3 , nous avons ajouté une seconde station fictive F_2 , à distance égale de S_2 et S_3 . Selon la figure 1, la station S_3 se trouve dans une région où l'effet de l'électrojet sur H croît rapidement et la moyenne des valeurs Y_e en S_2 et S_3 ne serait pas représentative (les différences Δ de l'interpolation linéaire a entre S_2 et S_3 illustrent bien ce fait). Nous avons choisi en conséquence d'introduire, pour cette station fictive, une valeur *calculée*. Selon la courbe théorique de la figure 1, la différence entre les effets sur la composante H aux abscisses S_2 et F_2 est égale à 3,1 gammas lorsque l'amplitude au centre est de 100 gammas ; il est clair que même une erreur de l'ordre de 20 % sur une estimation de l'effet de H au centre, soit H_c (obtenu, par exemple, par la valeur Y_e observée à la station centrale S_5 , moins la moyenne des valeurs Y_e observées aux stations S_2 et S_8 — voir figure 1 —) n'introduira sur la valeur supplémentaire Y_e de la station fictive F_2 qu'une erreur de quelques dixièmes de gammas si nous choisissons pour cette valeur une quantité égale à la somme $Y_{e,S_2} + (3.1 \times H_c)/100$. Les différences Δ , après adjonction de cette seconde station fictive, sont représentées en $b_{1,2}$ sur la figure 2.

Les valeurs interpolées Y_i au centre du profil présentent encore des écarts importants avec les valeurs Y_t . Il serait sans doute assez vain de chercher à réduire encore ces écarts à partir d'une densité de stations aussi faible dans les régions où la variation au long des profils est rapide. Sur les bords, les écarts sont relativement faibles. Nous montrerons dans notre discussion sur l'opérateur de Kertz que ceci est important, car des erreurs sur les bords introduisent des effets parasites plus grands que des erreurs dans la région centrale.

4.2 — L'opérateur de Kertz

La condition d'emploi de l'opérateur de Kertz est que le champ analysé devienne nul aux bords du profil. Cependant, si les effets internes de la variation S_R^E sont très faibles, cette condition ne sera pas réalisée. Ainsi, sur la figure 1, il apparaît que, pour un effet en H au centre de 100 gammas, les effets en Z au bord du profil sont d'environ 13 gammas pour un ruban externe (ils sont inférieurs à 2 gammas pour le ruban associé à son

image interne). Il est nécessaire d'apprécier quelles sont les conséquences de ce fait sur l'opérateur pour introduire, si possible, les corrections utiles.

Un moyen aisé d'estimer ceci consiste à appliquer l'opérateur au champ calculé d'un ruban externe : les effets internes devraient être nuls. La figure 3A donne les valeurs H_i et Z_i (i pour interne) obtenues en analysant par l'opérateur les effets du ruban externe tels qu'ils sont représentés sur la figure 1. Ce que nous appellerons "l'effet de bord" de l'opérateur est très net sur la composante H (environ 4 gammas au centre du profil, il croît jusqu'à 10 gammas aux bords), mais faible sur la composante Z (nul au centre, environ $\pm 0,2$ gammas sur les bords).

Supposons que l'on augmente la longueur du profil analysé pour obtenir une valeur plus faible des effets en Z du ruban externe sur les bords. Le résultat est très clair : l'effet de bord en H au centre est respectivement diminué d'un facteur 0.67 ou 0.57 pour des longueurs de profils de 5 100 km ou 6 900 km au lieu de 3 000 km (les effets en Z du ruban externe sont alors d'environ 7 ou 5 gammas au lieu de 13).

A partir du moment où les profils de H et Z que nous analyserons ne respecteront pas les conditions de nullité du champ aux bords, nous devons donc introduire des corrections pour compenser cet effet de bord.

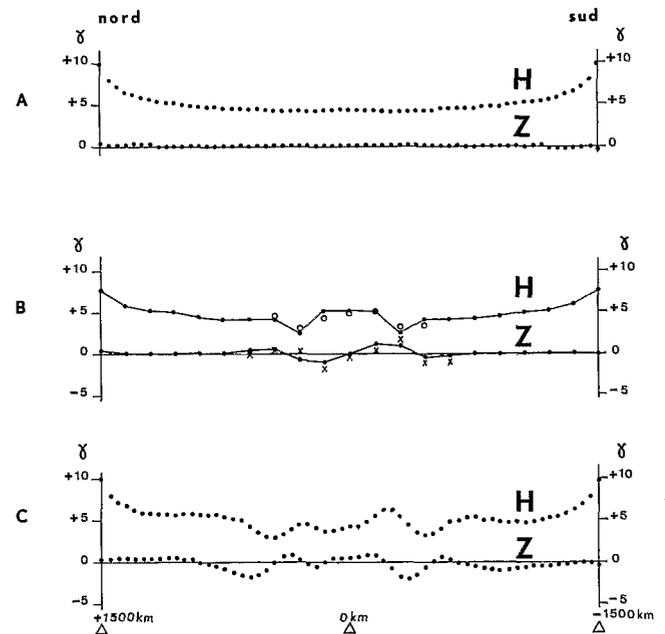


Fig. 3

Variation de l'effet de bord le long du profil. A) pour les valeurs théoriques de la figure 1 (externe pur) avec un pas de 50 kms. B) pour les valeurs théoriques avec un pas de 150 kms. C) pour les valeurs interpolées à partir des valeurs théoriques aux neuf stations avec un pas de 50 kms.

Avant de les décrire, justifions le choix que nous avons fait d'un pas de 50 km. Supposons, par exemple, que l'on utilise un pas de 150 km. L'effet de bord calculé avec un tel pas est représenté sur la figure 3B. Il apparaît au centre des profils de H et Z ce que nous appellerons un effet parasite. En effet, supposons que l'on fasse le même calcul, avec un pas de 150 km, mais en décalant de 50 km sur le profil la position des valeurs analysées : l'effet parasite se déforme (cercles et croix dans la région centrale de la figure 3B). Un tel effet parasite est évidemment dû au fait qu'un pas de 150 km est trop grand pour une analyse de variations spatiales dont la longueur d'onde est proche de 150 km en Z dans la partie centrale.

Lorsque nous analyserons les profils expérimentaux H_T et Z_T , nous pourrions choisir comme correction de "l'effet de bord" des valeurs calculées à partir de celles représentées sur la figure 3A. Ces dernières sont représentatives pour un effet en H au centre de 100 gammas. Soit ΔH_E la valeur expérimentale, due à la variation S_R^E , qui est observée au centre du profil (voir figure 1). Les valeurs de la figure 3A devraient être multipliées par un facteur $p = \Delta H_E/100$.

Cependant, parce que les effets internes que nous obtenions dans l'analyse de nos profils expérimentaux étaient très faibles, nous avons cherché à nous rapprocher des conditions d'emploi que nous faisons de l'opérateur de Kertz en calculant un effet de bord pour des valeurs théoriques interpolées d'une manière analogue à celle que nous avons retenue au paragraphe précédent. Autrement dit, les effets théoriques d'un ruban externe ont été calculés aux latitudes de nos neuf stations et les 61 valeurs interpolées à partir de ces neuf valeurs ont été analysées par l'opérateur. "L'effet de bord" obtenu est représenté sur la figure 3C. De légères distorsions dues à l'interpolation elle-même apparaissent. Ce sont ces valeurs, après multiplication par le facteur p , qui seront utilisées dans la suite de notre analyse.

Il est évident que cet effet de bord est fonction de la largeur choisie pour le ruban théorique. Cependant les demi-largeurs observées ne varient que peu (350 ± 50 km) et la correction calculée doit rester valable.

Nous avons dit à quel point la "définition" du S_R^P constitue le point de départ essentiel de notre analyse. Il peut être intéressant d'apprécier quelle est l'influence d'une définition erronée de cette quantité sur les résultats obtenus. Ceci peut être fait en introduisant une modification arbitraire dans les valeurs théoriques des effets d'un pur ruban externe (par exemple sur une seule composante) et de soumettre les valeurs ainsi obtenues à l'opé-

rateur de Kertz. La figure 4 illustre, parmi d'autres, les effets de deux définitions erronées.

Nous supposons d'abord (figure 4A) que la courbe Z_m (parabole ayant une flèche de 15 gammas au centre du profil) représente le S_R^P de Z au long du profil, et nous définissons les valeurs S_R^E de Z par la différence entre les valeurs théoriques d'un pur ruban externe causant un ΔH_E égal à 100 gammas et ces valeurs S_R^P . Les courbes H_i et Z_i représentent alors, après correction de l'effet de bord, les effets internes introduits par cette mauvaise définition du S_R^P . L'effet résultant se manifeste sur les deux composantes. Il apparaît être de même forme sur la composante modifiée (Z) mais changé de signe. Sur la composante non modifiée (H), il est nul au centre du profil ; il est le plus grand aux deux bords, mais y change de signe. La composante H aurait-elle été modifiée de la même manière que les effets parasites auraient été échangés entre composantes.

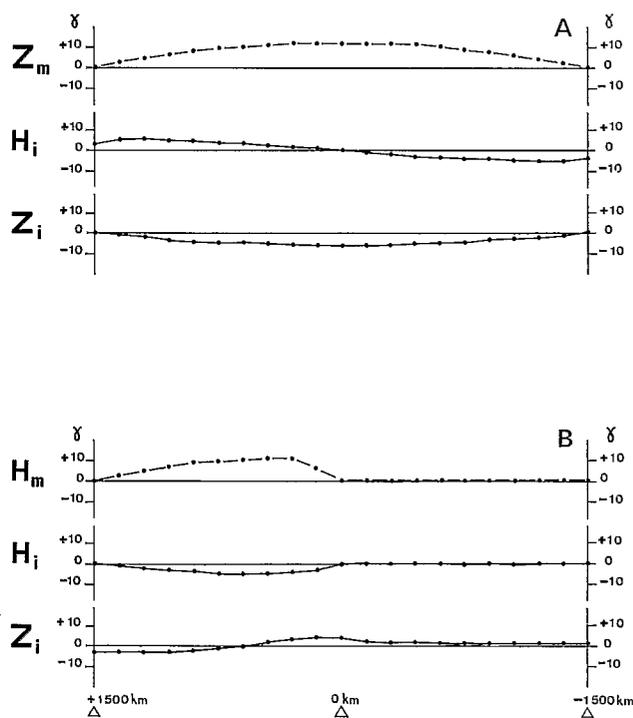


Fig. 4

Effets internes parasites (H_i et Z_i) causés par une modification arbitraire Z_m (ou H_m) des valeurs théoriques du ruban externe de la figure 1.

Dans la figure 4B, une modification H_m est imposée au profil de H , mais seulement sur une partie du profil. Les effets observés sont analogues, à ceci

près que l'effet H_i reste nul dans la partie non modifiée du profil de H tandis que l'effet Z_i apparaît sur toute la longueur du profil.

Ces quelques exemples montrent bien comment une définition inexacte de la variation S_R^P peut introduire des effets parasites importants lors de l'analyse de la variation S_R^E .

5 - Analyse des valeurs expérimentales

5.1 - Variations de type S_R

Dans cette analyse, les valeurs que nous utilisons sont les 61 valeurs interpolées (selon la méthode décrite au paragraphe 4.1) à partir des 9 valeurs H_T et Z_T définies au paragraphe 3, les courbes $b_{1,2}$ et b'_1 de la figure 2 donnent une idée de l'approximation introduite. Nous disposons de telles valeurs pour 10 h 30, 11 h 30 et 12 h 30 (T.L.), de chacun

des mois du Tableau II et aussi bien pour la moyenne de ces mois (à l'exception du mois de mars non inclus dans la moyenne parce que ne comptant qu'un seul jour).

Une première estimation de l'importance des effets internes peut être obtenue de la manière suivante. Ceux-ci sont de même signe que les effets externes sur la composante horizontale, ils sont de signe opposé sur la composante verticale. En conséquence, le rapport de la quantité ΔH_E (précédemment définie -voir figure 1-) et de son équivalent ΔZ_E (amplitude entre les extremums en Z observés au long du profil -voir figure 1-) devrait être très sensible à la présence des effets internes. Le tableau III donne les rapports $\Delta Z_E/\Delta H_E$ pour les effets conjugués d'un ruban externe à densité de courant parabolique, de demi-largeur 300 km, et de son image située à diverses profondeurs. Le dernier rapport concerne un ruban externe pur (∞).

Tableau III

km	300	600	1 100	1 600	2 100	2 600	3-100	∞
$\Delta Z_E/\Delta H_E$	0,45	0,78	0,99	1,06	1,10	1,13	1,15	1,23

On doit prendre garde que de tels rapports théoriques sont fonction du modèle de densité de courants choisi pour le ruban. Le modèle parabolique que nous avons choisi est sans doute assez représentatif puisqu'il donne des effets extrêmement proches sinon presque superposables à ceux du modèle théorique de Undtiedt (1967) ; le rapport $\Delta Z_E/\Delta H_E$ de ce modèle serait égal à 1,24 pour une profondeur infinie de l'image.

Les rapports observés sont respectivement égaux à 1,13, 1,21 et 1,30 pour les moyennes annuelles de 10 h 30, 11 h 30 et 12 h 30 ; ils sembleraient donc correspondre, quant à leur moyenne, à une inexistence de tout courant induit et on peut penser que, si la variation S_R^E contient des effets internes

sur le méridien $17^\circ E$, ils sont probablement très faibles. Ce fait nous guidera constamment dans l'analyse que nous exposerons maintenant.

Le problème fondamental est la définition du S_R^P , qui représente l'effet qui serait observé le long du profil si l'anomalie causée par l'électrojet n'existait pas. Nous essayerons quatre définitions successives pour décomposer les H_T ou Z_T en H_P et H_E ou Z_P et Z_E correspondent respectivement aux variations S_R^P et S_R^E le long du profil. Chacune des définitions est empirique et elles sont de complexité croissante. Le tableau IV en résume les éléments pour chaque composante et indique les notations retenues.

Tableau IV

H		Z
a	Parabole par moindres carrés sur S_1, S_2, S_8, S_9	Droite sur S_1 et S_9
b	Parabole par moindres carrés sur S_1, S_2, S_8, S_9 corrigées	Droite sur S_1 et S_9 corrigées
c	idem	Parabole sur S_1 et S_2 corrigées et le point d'effet nul d'un électrojet symétrique
d	Lissage par spline sur S_1, S_2, S_8, S_9 corrigées	idem

Un profil en latitude de la variation S_R^P présente en H et Z les caractéristiques suivantes. Nulle en H aux foyers des systèmes planétaires de courants, cette variation passe par un large maximum au travers des régions tropicales ; une loi *parabolique* dans ces régions est donc susceptible de représenter la variation S_R^P de H . Minimum en Z au foyer du système Nord et maximum au foyer du système Sud, elle varie de l'un à l'autre de ces extremums au travers de ces mêmes régions ; une loi *linéaire* est

donc susceptible de représenter la variation S_R^P de Z . Ceci d'ailleurs est indépendant d'une dissymétrie plus ou moins importante (même à l'équinoxe : voir, par exemple, Van Sabben, 1964) entre les deux systèmes planétaires de courants ou de la position de la frontière entre ceux-ci. Autrement dit, la latitude du maximum de la parabole (S_R^P de H) peut varier et n'est liée en rien à l'équateur magnétique, de même que la latitude du passage au zéro de la droite (changement de signe du S_R^P de Z).

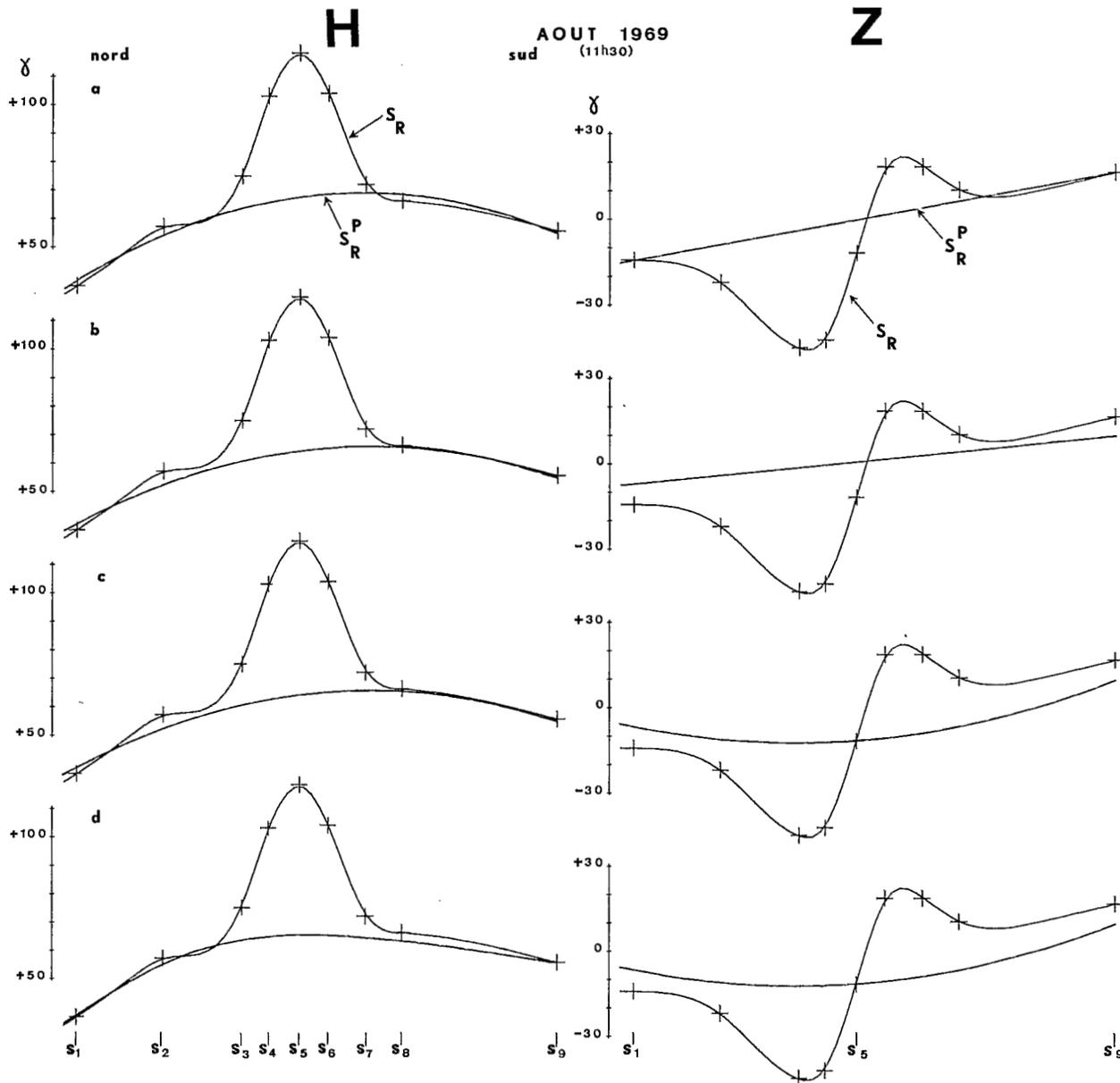


Fig. 5

Variation S_R au long du profil pour le mois d'Août (11 h 30) et diverses définitions du S_R^P (voir tableau IV). Les croix représentent les valeurs expérimentales à partir desquelles les 61 valeurs (pas de 50 kms) ont été interpolées.

La définition *a* consiste à supposer que le S_R^P de *H* peut être représenté par une parabole (calculée par moindres carrés) passant par les valeurs observées aux 4 stations S_1, S_2, S_8 et S_9 , et le S_R^P de *Z* par une droite passant par les valeurs observées aux stations S_1 et S_9 . Selon la figure 1, une telle définition peut être valable pour le S_R^P de *Z* si des effets induits correspondant à une image à 600 km de profondeur existent réellement : les effets totaux de l'électrojet sont en effet à peu près nuls en *Z*

à la latitude de S_1 et S_9 . Pour le S_R^P de *H*, une erreur est manifestement introduite (car les effets de l'électrojet ne sont pas nuls aux 4 stations considérées) ; elle est analogue à la déformation de type Z_m de la figure 4. Nous choisissons cette définition *a* comme point de départ, parce qu'une définition très proche a été utilisée par Forbush et Casaverde (1961).

La définition *b* ne diffère de la précédente que pour satisfaire au fait que les effets internes recherchés sont très faibles ou inexistants selon les valeurs

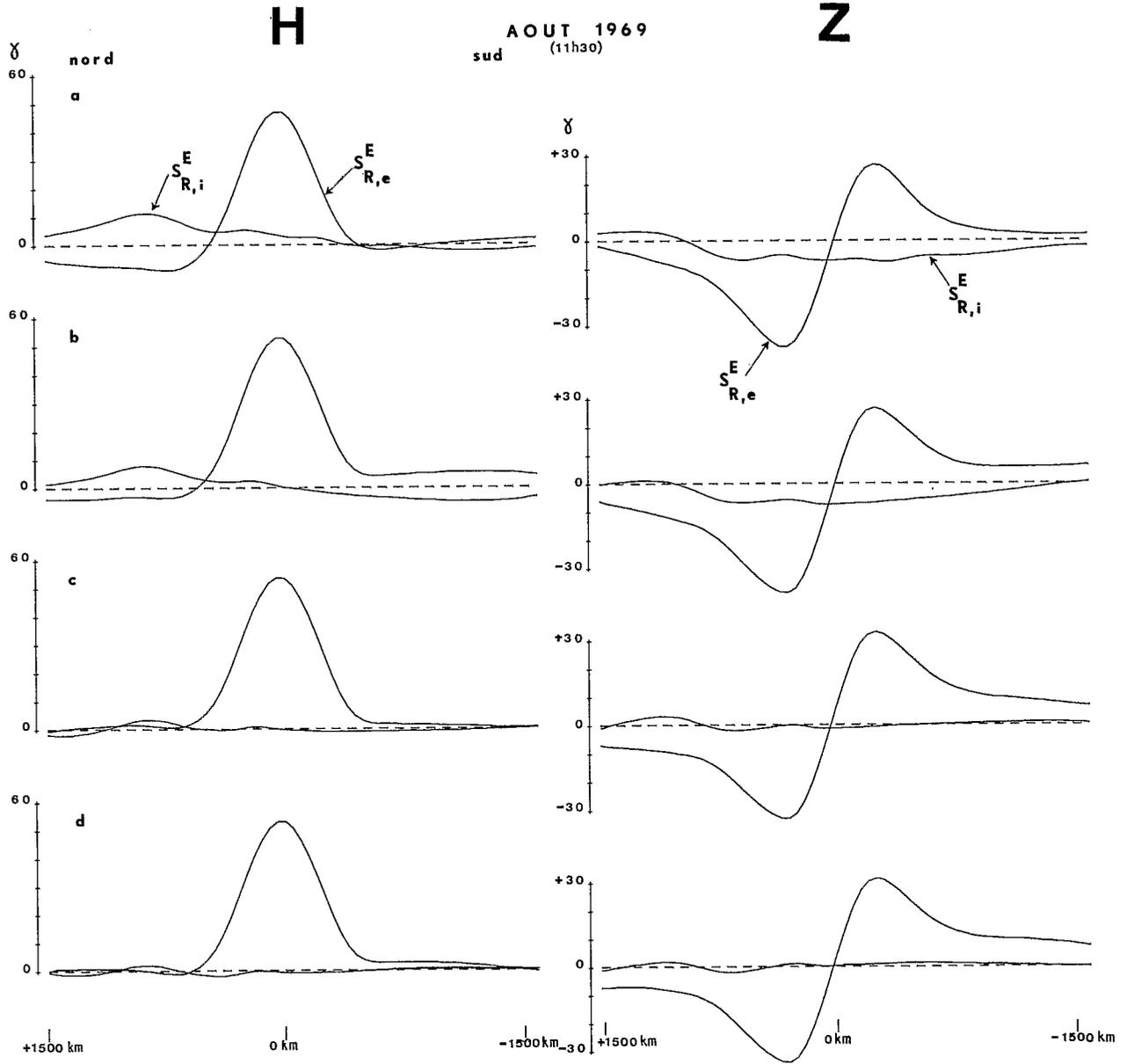


Fig. 6

Variations $S_{R,e}^E$ et $S_{R,i}^E$ au long du profil pour le mois d'août (11 h 30) obtenues pour diverses définitions du S_R^P (figure 5).

observées des rapports $\Delta Z_E/\Delta H_E$. En ce cas, selon la figure 1, les effets en Z de l'électrojet sont encore très sensibles aux stations S_1 et S_9 et le S_R^P de Z ne correspond pas aux valeurs observées Z_T en ces stations. La quantité ΔZ_E étant une mesure relativement bonne de l'intensité de l'électrojet, les effets théoriques d'un ruban parabolique de largeur 300 km, causant un tel ΔZ_E , sont calculés et ajoutés aux Z_T . La droite représentant le S_R^P de Z est tracée à partir des valeurs ainsi corrigées aux stations S_1 et S_9 (voir tableau IV). Des corrections analogues sont apportées aux valeurs H_T des stations S_1, S_2, S_8 et S_9 et une parabole est calculée par moindres carrés.

La figure 5 (a et b) illustre pour un mois et une heure donnés (11 h 30 du mois d'août) les formes des profils en H et Z . Les courbes continues correspondent à l'interpolation faite à partir des valeurs observées H_T et Z_T aux neuf stations et illustrent la variation S_R au long du profil, les valeurs H_T et Z_T étant elles-mêmes représentées par des croix. Les courbes en tirets illustrent l'une ou l'autre des définitions de la variation S_R^P au travers du profil, la variation S_R^E correspondant alors à la différence $S_R - S_R^P$.

La figure 6 (a et b) illustre les résultats de l'analyse, par l'opérateur de Kertz, du S_R^E obtenu par ces deux définitions, les courbes $S_{R,e}^E$ et $S_{R,i}^E$ représentant respectivement les effets externes et internes. La correction d'effet de bord n'a été évidemment introduite que dans le cas de la seconde définition. Une première remarque s'impose. En l'un et l'autre cas (a ou b), la forme de la variation $S_{R,i}^E$ au long du profil ne ressemble en aucune manière à ce que l'on devrait observer ; à savoir des profils du genre de ceux qu'illustre la figure 11 (analyse de variations de type D) et qui correspondent aux effets d'une image électrique localisée à une profondeur plus ou moins grande.

Une deuxième remarque peut être faite à partir

de la définition b, dont nous pouvons penser qu'elle serre de plus près la réalité selon la valeur expérimentale obtenue pour $\Delta Z_E/\Delta H_E$ (voir ci-dessus). Le $S_{R,i}^E$ de H , au lieu de passer par un maximum au centre du profil, y prend une valeur nulle ; la variation, positive au Nord et négative du Sud, ressemble à l'effet parasite illustré par la figure 4 dans le cas de la modification Z_M (voir la courbe H_i). De même, le $S_{R,i}^E$ de Z au lieu de présenter une forme à peu près symétrique du $S_{R,e}^E$, présente une variation presque uniquement négative, qui ressemble également à l'effet parasite illustré sur cette même figure 4 (voir la courbe Z_i). On peut donc se demander si la définition b du S_R^P de Z est exacte.

Or, sur la figure 5b, un fait très net apparaît, qui n'est particulier ni à ce mois ni à cette heure : à supposer que la définition b soit correcte, une dissymétrie considérable existerait dans les effets en Z de l'électrojet. Ils seraient au moins deux fois plus grands au Nord qu'au Sud. Une telle dissymétrie serait très difficile à expliquer par l'électrojet lui-même. Supposons donc que les effets en Z de l'électrojet soient en fait parfaitement symétriques. En ce cas, nous pouvons déterminer le long du profil Z_T l'abscisse du point où la valeur Z_T est égale à la moyenne des valeurs aux extremums. En ce point de symétrie, le S_R^E causé par l'électrojet devrait être nul en Z et la valeur Z_T observée devrait donc être attribuée au seul S_R^P : l'abscisse correspondante représenterait le centre de l'électrojet. Par contre, dans les définitions précédentes (a et b), l'effet de l'électrojet serait nul au point de rencontre de la droite représentant le S_R^P et de la variation Z_T ; ce point serait l'abscisse du centre. Le tableau V donne, pour chacune des 3 heures, la position moyenne (en km, par rapport à l'équateur magnétique) du centre C_E de l'électrojet, déterminé par ces deux méthodes (les résultats obtenus par la définition a sont très proches de ceux obtenus par la définition b) pour les 11 mois du Tableau II. L'écart type σ est indiqué dans chaque cas. Les quatrièmes valeurs correspondent aux 3 heures des 11 mois.

Tableau V

Détermination de la position du centre de l'électrojet à l'aide du profil en Z_T .
(Valeurs en km ; l'équateur magnétique est à 0.0 km)

	Par la droite entre S_1 et S_9		Par l'abscisse du point d'ordonnée moyenne entre les extremums	
	C_E	σ	C_E	σ
10 h 30	- 13,6	± 45,5	+ 20,7	± 16,7
11 h 30	- 9,4	± 37,4	+ 19,4	± 13,2
12 h 30	- 11,4	± 31,6	+ 16,2	± 14,5
Les 3 heures	- 11,5	± 38,7	+ 18,8	± 15,0

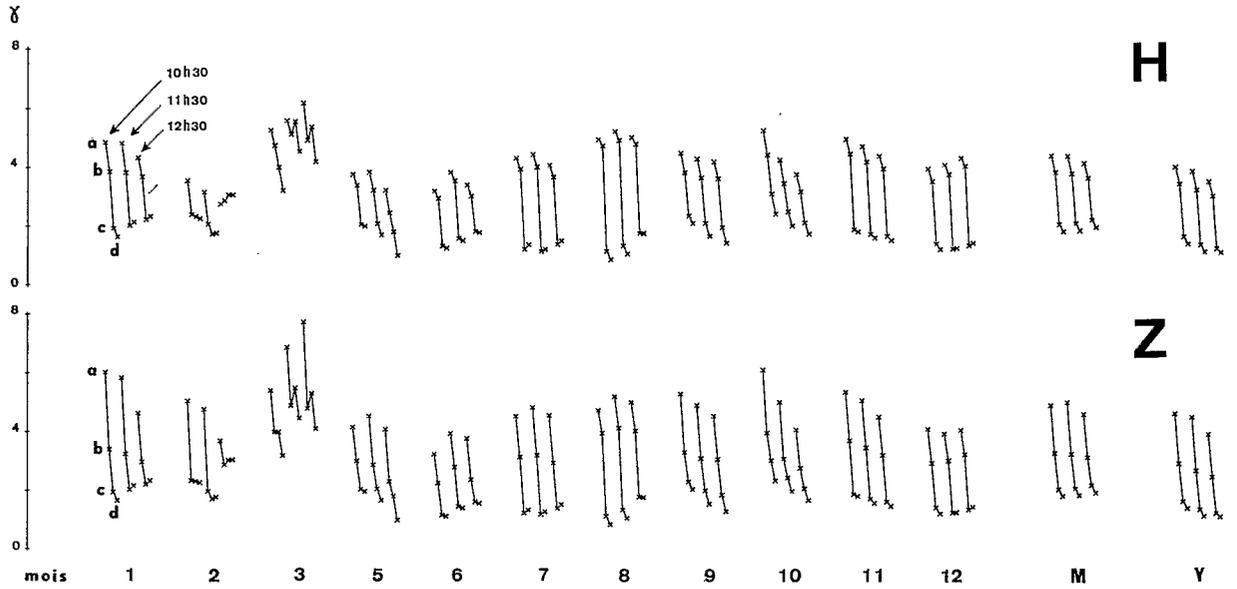


Fig. 8

Valeurs en H et Z des résidus R des variations de $S_{R,i}^E$ au long du profil pour les quatre définitions du $S_{R,i}^P$ (a, b, c, d). Pour chaque mois (ou la moyenne M des mois, ou l'année y), les valeurs sont représentées pour 10 h 30, 11 h 30 et 12 h 30 (en temps local)

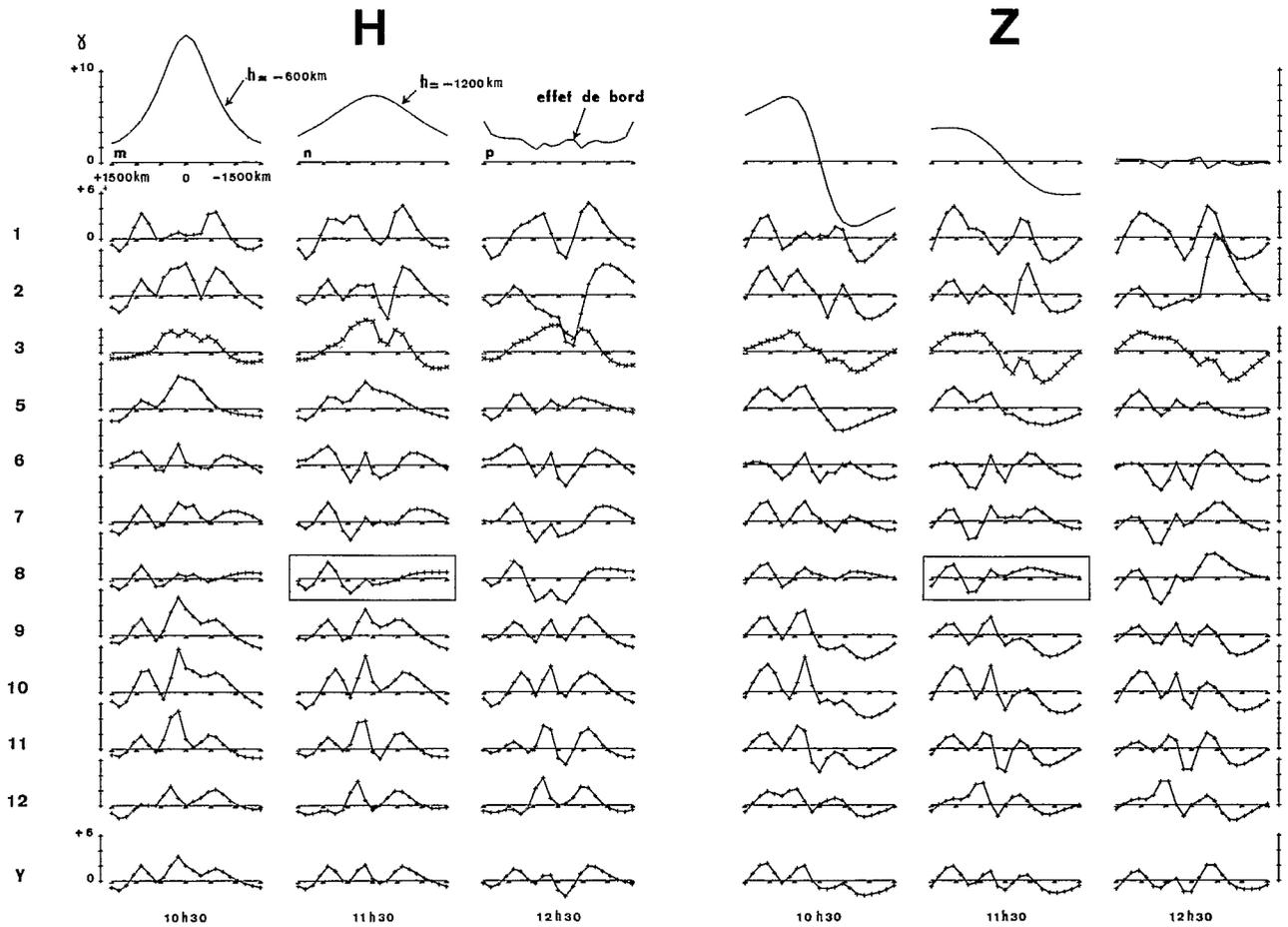


Fig. 9

Variations $S_{R,i}^E$ pour chaque heure des mois ou de l'année, obtenues avec la définition d du $S_{R,i}^P$. Dans la partie supérieure, variations théoriques pour des images situées à 600 kms (m) ou 1 200 kms (n) de profondeur et variation au long du profil de l'effet de bord (p). Les courbes correspondant au mois d'Août (11 h 30) sont encadrées ; elles sont identiques aux $S_{R,i}^E$ de la figure 6d.

La première hypothèse (dissymétrie des effets Nord et Sud en Z) donne des valeurs moyennes de l'abscisse du centre encore plus proches de l'équateur magnétique que la seconde (symétrie des effets) ; mais, dans ce dernier cas, le centre de l'électrojet divague beaucoup moins. Physiquement, une grande divagation du centre serait aussi difficile à expliquer que la dissymétrie des effets.

Nous chercherons donc à définir un S_R^P de Z tel que les effets au Nord et au Sud du S_R^E de cette même composante soient symétriques. Ce sera la définition c du tableau IV. Sans modifier la définition du S_R de H, nous imposons au S_R^P de Z de passer par la valeur moyenne entre les extremums de Z_T à l'abscisse où elle est rencontrée et conservons, aux extrémités du profil, les deux valeurs corrigées en S_1 et S_9 (voir figure 5c). On notera que, pour d'autres mois, la flèche, au centre de la parabole définissant le S_R^P de Z, varie en amplitude et même change de signe. L'analyse par l'opérateur de Kertz du S_R^E ainsi obtenu est illustrée sur la figure 6c. Par rapport à la figure 6b, le changement obtenu est très significatif. Les $S_{R,i}^E$ des deux composantes deviennent réellement négligeables et peuvent être qualifiés de *purs résidus expérimentaux*. Les anomalies existant sur ces $S_{R,i}^E$ avec la définition b ont entièrement disparu ; elles étaient donc effectivement causées par une définition inexacte du S_R^P de Z telle que la figure 4 (Z_m) le laissait prévoir. De plus, et ceci est non moins important, une anomalie existait sur le $S_{R,e}^E$ de la composante H dans le cas de la définition b (voir figure 6b) : valeurs négatives sur l'aile Nord du profil, valeurs positives sur l'aile Sud. Cette anomalie a également disparu sur le $S_{R,e}^E$ avec la nouvelle définition c (voir figure 6c). Nous pourrions déjà conclure à ce stade que les effets induits pour le mois d'août 1969, à 11 h 30, sont inexistant.

Cependant, afin de montrer à quel point la définition du S_R^P est importante pour une séparation exacte des effets internes et externes, nous remarquerons que la définition du S_R^P de H introduit des valeurs faiblement négatives du S_R^E de H sur le bord Nord (voir figure 5c). Ceci est évidemment artificiel et provient de l'ajustement, par moindres carrés, de la parabole définissant le S_R^P de H à travers les 4 points S_1, S_2, S_8, S_9 . C'est également sur le bord Nord qu'une oscillation, d'une amplitude plus grande, apparaît sur les $S_{R,i}^E$ de H et de Z (voir figure 6c). Nous pouvons chercher à éliminer ces valeurs négatives du S_R^E sur le bord Nord en définissant le S_R^P de H par une fonction spline au travers des 4 points corrigés S_1, S_2, S_8 et S_9 (définition d du tableau IV et figure 5d). L'analyse du

S_R^E obtenu avec cette nouvelle définition est illustrée sur la figure 6d. L'oscillation du bord Nord a nettement diminué en amplitude aussi bien sur le $S_{R,i}^E$ de Z que sur celui de H. La figure 7 permet d'apprécier, à partir de valeurs théoriques, l'influence de petites erreurs dans la définition du S_R^P de H ou de Z. Supposons que nous analysions par l'opérateur de Kertz les valeurs théoriques d'un pur ruban externe (celles représentées sur la figure 1, par exemple) en injectant une erreur de 5 gammas à l'une des stations sur l'une des composantes H ou Z. Dans la partie a de la figure 7, cette erreur a été injectée à la station S_2 sur H (a_H) ou sur Z (a_Z), dans la partie b, à la station S_4 . Il apparaît que les effets parasites ainsi introduits sur l'une et l'autre composante sont plus importants dans le cas S_2 . Ceci était prévisible puisque l'erreur relative injectée est plus grande en ce point. Mais ces effets parasites, et là est le point intéressant, ont une forme tout à fait semblable aux oscillations résiduelles des $S_{R,i}^E$ des définitions

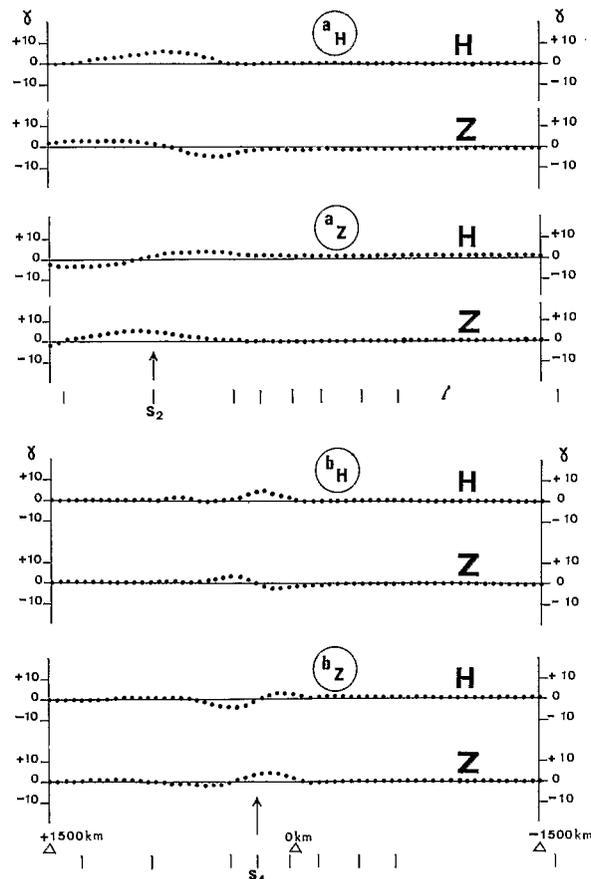


Fig. 7

Effets induits parasites causés en H et Z par l'injection d'une erreur de 5 gammas sur la valeur théorique H de la figure 1 (a_H) ou sur la valeur théorique Z de la figure 1 (a_Z) à la station S_2 . Les courbes b correspondent à une injection analogue à la station S_4 .

c ou d (figure 6c et d). Celles-ci peuvent être d'origine expérimentale (erreurs de mesure, par exemple). Elles peuvent aussi bien provenir de ce que, par exemple, le S_R^P de Z ne peut être représenté valablement par une parabole : un gradient plus ou moins régulier dans la courbure des lignes de courants des systèmes planétaires est tout à fait vraisemblable (voir, par exemple, les cartes construites par Price et Wilkins, 1963) et aucune expression mathématique simple ne peut le figurer.

Les figures 5 et 6 étaient relatives à une heure (11 h 30) d'un seul mois (août). Les figures 8 et 9 résument graphiquement les résultats obtenus soit pour les autres mois, soit pour la moyenne annuelle.

A maints égards, les $S_{R,i}^E$ obtenus peuvent être considérés comme des *résidus*. Dans la figure 8, nous avons représenté graphiquement, pour chaque heure de chaque mois (ou de l'année), la variation de la quantité

$$R = \sqrt{(\sum x^2)/N}$$

où x est l'amplitude du $S_{R,i}^E$ sur l'une ou l'autre composante selon les 4 définitions a à d du tableau IV et N le nombre des valeurs. Les quantités R ainsi obtenues sont reliées entre elles par un trait dans le sens a, b, c, d . La décroissance des quantités R apparaît bien être comme un fait général bien que non absolument systématique (ainsi les R_d ne sont pas toujours inférieurs aux R_c).

La figure 9 représente pour les 3 heures de chaque mois et de l'année (Y) les $S_{R,i}^E$ des composantes H et Z (une valeur seulement sur 3 au long du profil a été dessinée) obtenues à partir de la définition d . Pour comparaison, les effets théoriques de l'image (à 600 km $-m-$ et 1200 km de profondeur $-n-$) d'un ruban externe causant un ΔH_E de 55 gammas au centre du profil (valeur moyenne observée pour l'année 1969), puis la correction d'effet de bord pour ce même ΔH_E ($-p-$) ont été dessinés dans la partie supérieure de la figure.

Manifestement, l'ensemble des $S_{R,i}^E$ ne ressemble guère, en forme, aux effets induits que l'on est en droit d'attendre. Comme pour le mois d'août à 11 h 30 (figure 6d), ce sont bien des résidus qui apparaissent. Un examen des profils des S_R eux-mêmes révélerait qu'une part de ces résidus est d'ailleurs causée par une insuffisance dans la méthode d'interpolation choisie.

Le mois de mars mérite cependant une mention spéciale (il correspond, rappelons-le, à un jour individuel). Les $S_{R,i}^E$, dessinés en ce cas à une échelle deux fois plus petite, ont une forme ressemblant un peu à la forme théorique (maximum en H au centre du profil, valeurs positives au Nord et négatives au Sud en Z). Cependant les valeurs nulles en Z sur les bords sont peu en accord avec les profils théoriques (il n'en sera pas de même avec les variations de type D que nous analyserons ci-dessous).

Finalement, nous pouvons conclure avec une réelle certitude que les effets internes de la variation S_R^E sont pratiquement négligeables au centre de l'Afrique.

5.2 – Variations de type D

Les valeurs que nous utilisons ici sont encore les 61 valeurs interpolées (selon la méthode décrite au paragraphe 4.1) à partir des 9 valeurs H_T et Z_T définies au paragraphe 3. Nous appellerons D_1 et D_2 les deux événements dont nous présentons l'analyse. D_1 est constitué par la partie croissante (entre le début, nettement brusque, et le maximum) d'une perturbation en forme de baie ; D_2 est constitué par une variation presque linéaire. Le tableau VI donne quelques indications numériques sur ces deux événements : l'heure approximative h en T.L., la durée t de l'évènement, l'amplitude a en H à la station centrale S_5 , la vitesse moyenne v de variation (en gammas par minute) en cette station, l'amplification A sur la composante horizontale au centre (rapport entre le maximum observé en H et la valeur de la variation D^P à l'abscisse de ce maximum), le rapport $\Delta Z_E/\Delta H_E$ mesuré sur les profils, la profondeur p théorique de l'image électrique correspondant à ce rapport. On notera déjà à quel point les rapports $\Delta Z_E/\Delta H_E$ diffèrent de ceux obtenus pour les variations S_R (environ 1,20 dans leur cas).

Les figures 10a₁ et 10a₂ sont analogues à la figure 5a. Elles représentent pour les événements D_1 et D_2 le profil en latitude de la variation D (analogue du S_R) et une première tentative de définition de la variation D^P (analogue du S_R^P), supposée représenter ce qu'aurait été le profil si l'effet de l'électrojet ne s'était pas fait sentir. Deux remarques peuvent être faites.

Premièrement, cette définition choisie pour D^P est identique à la définition a du tableau IV (para-

Tableau VI

	h (T.L.)	t	a	v	A	$\Delta Z_E/\Delta H_E$	P
D_1	11 h	24 min	41 γ	1,7 γ /min	4,1	0,88	800 km
D_2	10 h	6 min	74 γ	12,3 γ /min	3,6	0,44	300 km

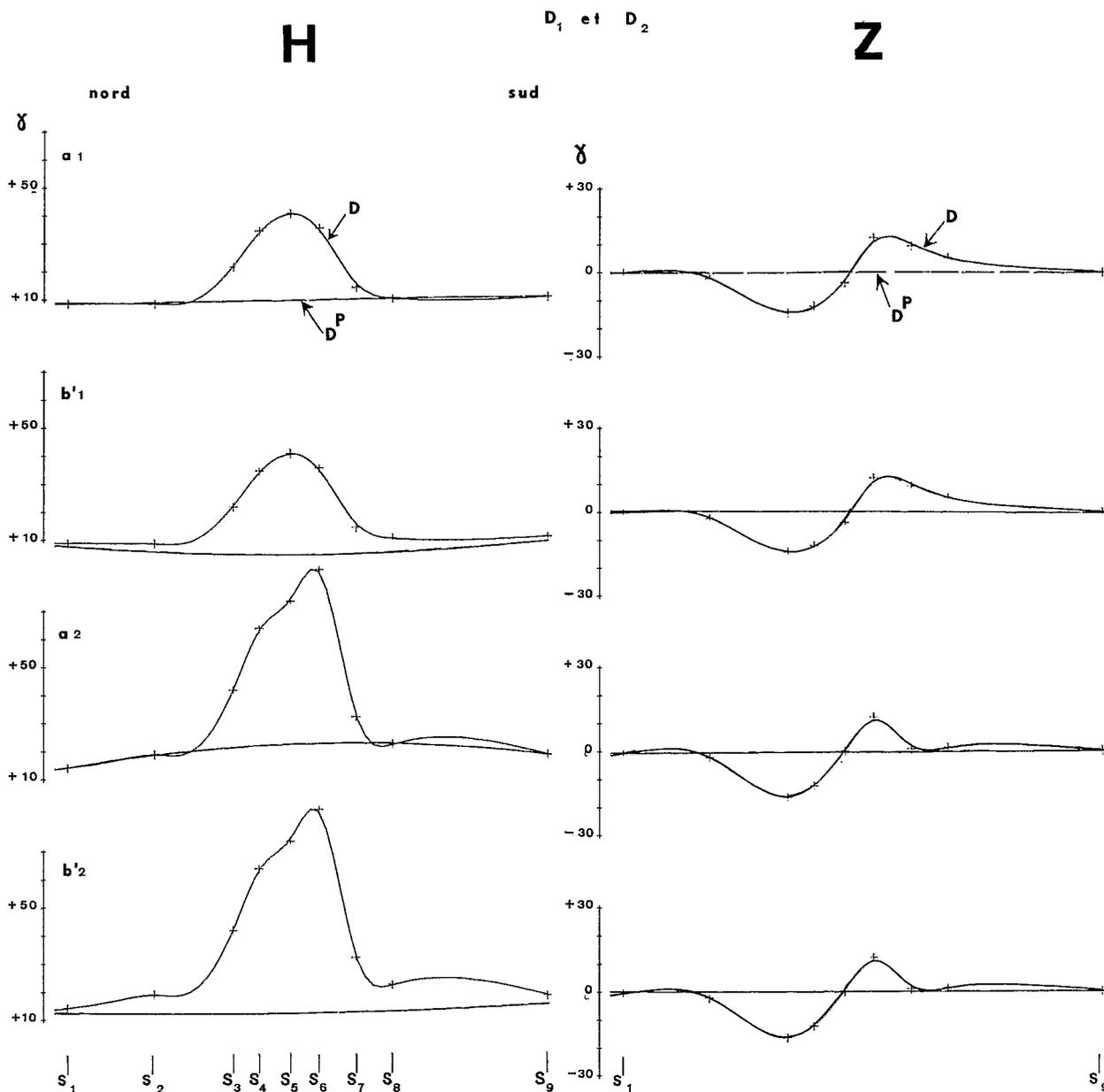


Fig. 10

Variation D au long du profil pour les événements D_1 et D_2 et diverses définitions du D^P (a et b'). Les croix représentent les valeurs expérimentales à partir desquelles les 61 valeurs (pas de 50 kms) ont été interpolées.

bole par moindres carrés à travers les 4 stations S_1, S_2, S_8, S_9 pour H , droite entre S_1 et S_9). Il apparaît que le D^P sur H est presque une droite, alors que le S_R^P présentait une courbure importante (fig. 5a) : le gradient des courants au travers des régions équatoriales est donc beaucoup plus faible que dans le cas du S_R . La pente de la droite figurant le D^P de Z est négligeable et les valeurs aux extrémités Nord et Sud presque nulles : ceci indiquerait que les courants planétaires engendrant ces variations D ont une courbure pratiquement négli-

geable. Dans le cas du S_R^P de Z (fig. 5), les valeurs négatives —extrémité Nord du profil— ou positives —extrémité Sud— (ceci même pour les définitions b, c, d , c'est-à-dire après correction de l'effet de l'électrojet) étaient, autour de midi, la trace d'une certaine courbure des lignes de courants du S_R . Pour ces variations de type D , l'absence de courbure peut être due à deux causes : ou bien la perturbation est d'origine proprement magnétosphérique, ou bien son extension en longitude est beaucoup plus grande.

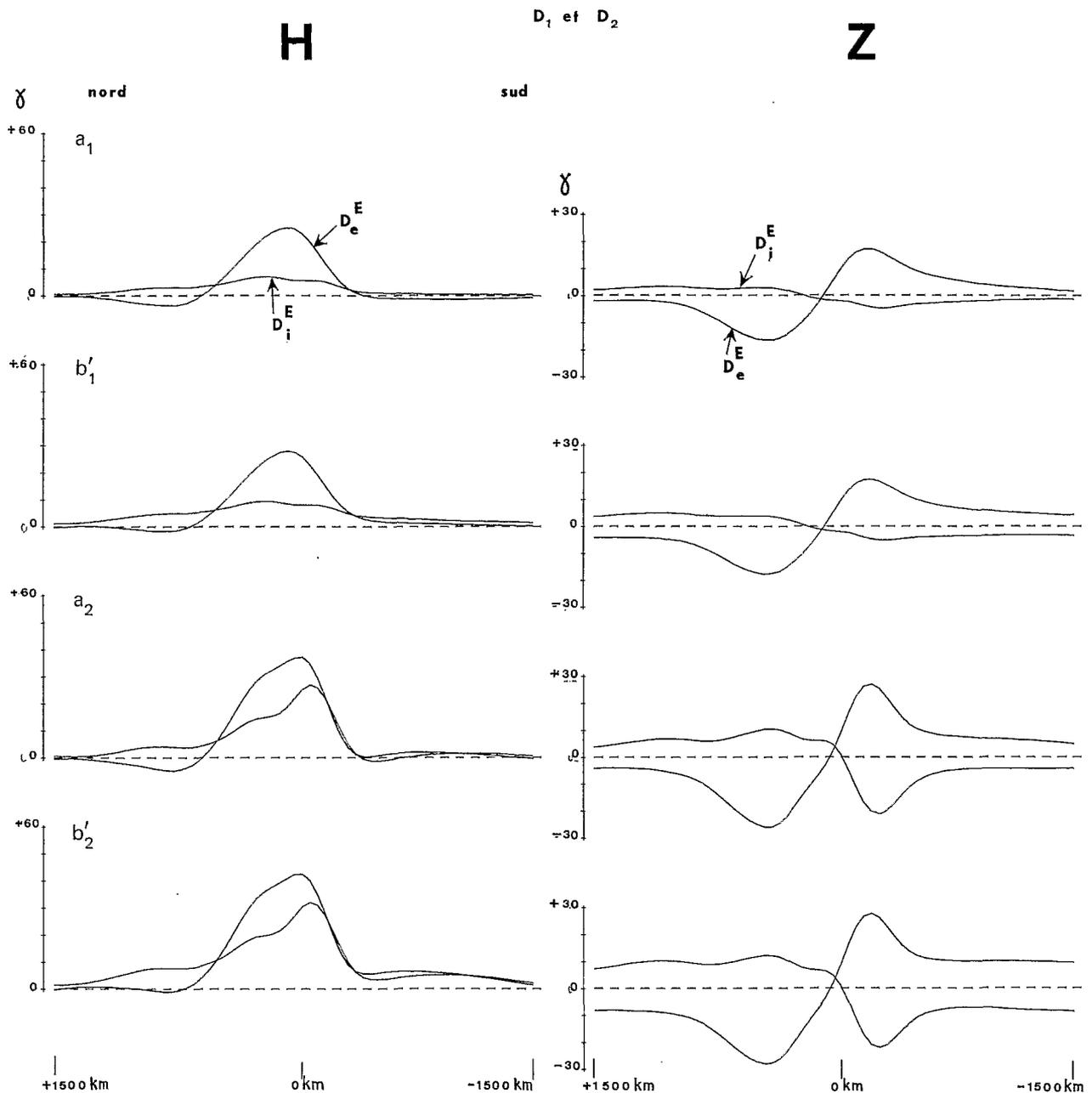


Fig. 11

Variations D_e^E et D_i^E au long du profil pour les événements D_1 et D_2 obtenues à partir des définitions a et b' du D^P (figure 10).

Deuxièmement, une dissymétrie importante apparaît à première vue sur le profil de H dans le cas de D_2 : le maximum n'est plus en S_5 (fig. 5) mais en S_6 , soit un déplacement supérieur à 150 km, et il semblerait qu'autour de S_7 et S_8 , les valeurs observées soient trop faibles. Sur le profil de Z , l'effet nul de l'électrojet reste cependant près de S_5 , c'est-à-dire de l'équateur magnétique, mais une dissymétrie assez importante existe en S_6 et S_7 sur le

profil de Z (valeurs beaucoup plus faibles en valeur absolue qu'en S_3 et S_4).

Selon les valeurs des rapports $\Delta Z_E / \Delta H_E$ (tableau VI), des effets induits non négligeables devraient exister. Les figures 11a₁ et 11a₂, analogues à la figure 6a, illustrent le résultat de l'analyse par l'opérateur de Kertz de la variation D^E , égale à $D - D^P$. Les D_i^E présentent effectivement une forme qui

ressemble aux effets internes attendus. Comparée à l'amplitude des effets externes, celle des effets internes est beaucoup plus grande pour D_2 que pour D_1 , ce qui est en accord avec les rapports $\Delta Z_E/\Delta H_E$ ou avec les vitesses de variation v . De plus, la dissymétrie notée pour D_2 sur le profil de H (fig. 10a₂) est beaucoup plus marquée sur le D_i^E que sur le D_e^E (fig. 11a₂). Il semble donc évident que l'on est en présence d'une anomalie locale, d'origine interne. Ce fait est confirmé par l'examen de perturbations de nuit, ayant des vitesses de variation analogues. Alors que l'effet "electrojet" proprement dit a complètement disparu, l'amplitude de perturbations ayant une vitesse de variation analogue à D_2 est systématiquement plus grande sur H en S_6 qu'aux autres stations ; un effet négatif apparaît sur Z en S_6 et S_7 , qui ressemble à la déformation du profil de D_2 en Z (fig. 10a₂) autour de ces stations. Quoiqu'il en soit de ces déformations d'origine locale pour D_2 , la comparaison du $S_{R,i}^E$ de la figure 6a et du D_i^E des figures 11a₁ et 11a₂ est frappante. Obtenus à partir d'une méthode strictement identique, tandis que les profils des $S_{R,i}^E$ en H et Z ne ressemblent en rien aux formes attendues pour les effets induits, les profils des D_i^E ont, dès la première tentative de définition du D^P , des formes raisonnables.

Cependant, puisque les effets induits par l'électrojet sont importants, il semble justifié d'en tenir compte dans la définition du D^P lui-même, comme nous avons cherché à tenir compte de leur absence dans la définition b des S_R^P . La définition b' (analogue à la définition b) consiste donc à calculer une correction (externe + interne) aux stations S_1, S_9 (H et Z), S_2 et S_8 (H seul) à partir des quantités observées ΔH_E et ΔZ_E . La figure 1 montre que, en ce cas, les corrections sont beaucoup plus importantes sur H que sur Z .

Les figures 10b₁' et 10b₂' représentent ces nouvelles définitions du D^P . Le résultat, sur la composante H , apparaît paradoxal et peu satisfaisant, spécialement dans le cas de D_1 : la variation D^P serait plus faible à l'équateur magnétique qu'aux extrémités du profil. Il n'est pas évident que ce résultat soit correct, mais il illustre à nouveau la difficulté de toute "définition" de ce qui est proprement planétaire (P) et de ce qui est dû à l'électrojet (E). Cependant la correction introduite (externe + interne) est certainement justifiée en grande partie. Les figures 11b₁' et 11b₂' représentent le résultat de l'analyse du D^E résultant de la définition b' . Les modifications ne sont pas essentielles, à l'exception peut-être de celle intervenant sur l'aile Nord du profil en H du D_e^E pour D_1 aussi bien que pour D_2 . Avec la définition a , le D_e^E prenait des valeurs négatives importantes dans cette région ; elles sont très diminuées avec

la définition b' , ce qui est certainement plus satisfaisant. Par contre, les valeurs positives apparaissant sur l'aile Sud des profils de l'évènement D_2 (fig. 11b₂') (aussi bien pour le D_e^E que pour le D_i^E de H) sont dues, pour une part à cette insuffisance de notre méthode d'interpolation que nous avons déjà mentionnée. Ceci apparaît bien sur la partie Sud du profil des valeurs de H_T de l'évènement D_2 (courbe D des figures 10a₂ ou 10b₂' pour la composante H). La convexité prise par le profil entre les stations S_8 et S_9 est évidemment incorrecte ; elle provient d'un jeu complexe des fonctions splines utilisées pour l'interpolation, dont la réponse peut être variable selon les positions respectives des valeurs observées H_T à chaque station.

Quoi qu'il en soit de ces incertitudes provenant de la définition du D^P ou de la méthode d'interpolation elle-même, il est certain que les effets induits par l'électrojet, dans le cas de variations de type D (les perturbations), sont importants. Comme l'on pouvait s'y attendre, ils augmentent avec la vitesse de variation. Dans le cas de la variation D_2 , plus rapide, des effets d'origine locale apparaissent, à propos desquels nous pouvons ajouter deux remarques. D'une part, Louis (1970), à l'aide de mesures gravimétriques et de sondages électriques, a mis en évidence une faille dans les structures géologiques, dirigée Est-Ouest et située à la hauteur de S_6 et S_7 . D'autre part, Boyer, Cagniard et Pham Van Ngoc (1971) ont calculé l'anomalie induite par une faille dirigée parallèlement à une nappe de courants ; les effets en H et Z , illustrés sur leur figure 1, ressemblent à ceux que nous observons (augmentation de H au Nord de la faille et diminution au Sud, effet négatif en Z autour de la faille).

Une étude plus précise des effets induits par les perturbations présenterait certainement un intérêt, mais dépasserait le but que nous sommes fixés dans leur analyse ; nous voulions seulement mettre en évidence leur existence en utilisant une méthode identique à celle mise en œuvre dans l'analyse des variations de type S_R .

6 - Conclusion

Les points essentiels de notre démonstration sont les suivants.

1) Les valeurs observées pour les rapports $\Delta Z_E/\Delta H_E$ sont le signe d'une absence de courants induits dans le cas de la variation S_R^E , de leur présence dans celui des perturbations D^E .

2) Les définitions empiriquement les plus simples (a et b) choisies pour le S_R^P conduisent, par l'analyse du $S_R^E = S_R - S_R^P$, à des résultats aberrants pour les $S_{R,i}^E$ (figures 6a et 6b). Dans le cas des variations D ,

des définitions analogues pour les D^P conduisent à des résultats qui *ressemblent* nettement aux effets internes attendus pour les D_i^E (fig. 11).

3) La "définition" du S_R^P (définition *c*, tableau IV) qui permet de réduire à de purs résidus négligeables les $S_{R,i}^E$, c'est-à-dire de mettre en évidence l'inexistence des courants induits, repose sur une hypothèse satisfaisante *du point de vue externe*. En effet, celle-ci consiste à postuler une *symétrie* des effets en Z de l'électrojet par rapport au *centre* de l'électrojet (effet nul en Z), défini par l'abscisse de l'intersection des profils du S_R et du S_R^P (fig. 5c). La validité de cette hypothèse est confirmée, de ce même point de vue, par la moindre divagation du centre de l'électrojet (15 km, au lieu de 39 km).

4) En postulant une telle symétrie des effets en Z , nous ne prétendons pas affirmer que celle-ci doit toujours être rigoureuse, mais seulement qu'il est très *improbable* que l'on puisse observer, au Nord du centre de l'électrojet, un effet en Z deux fois plus grand que l'effet observé au Sud (fig. 5b). Sans doute, une telle dissymétrie pourrait être attribuée à des effets induits anormaux. Mais, parce qu'elle varie en importance (et même change de sens) d'un mois à l'autre, cette autre hypothèse ne peut être retenue.

5) La définition *c* introduit pour le $S_{R,e}^E$ lui-même (c'est-à-dire pour les effets proprement externes) des modifications importantes, dont la plus significative apparaît sur le profil de H (comparer fig. 6b à fig. 6c) : ce profil est en quelque sorte rééquilibré sur ses ailes par la suppression de valeurs négatives (au Nord) ou positives (au Sud) proprement aberrantes. Ceci, de nouveau, confirme la validité de l'hypothèse d'une symétrie des effets en Z .

Le contraste entre l'absence d'effets internes pour la variation S_R^E et leur présence pour la variation D^E est un résultat nouveau, qui, d'une part, contredit les conclusions obtenues dans une analyse antérieure, et qui, d'autre part, appelle une explication. De plus, ce résultat entraîne quelques conséquences, du point de vue externe, pour les études de l'électrojet équatorial. Nous traiterons successivement ces divers points.

Le seul profil qui avait permis une analyse analogue à la nôtre est celui réalisé en 1957-1959 sur le méridien de Huancayo. Forbush et Casaverde (1961) avaient conclu, pour la variation S_R , à l'existence de courants induits, qui correspondaient à une image électrique située à 600 km de profondeur. Ce résultat cependant paraît paradoxal puisqu'une mesure du rapport $\Delta Z_E / \Delta H_E$ sur leur figure 7 donne une valeur égale à 1,50. Ce rapport, notre analyse l'a montré, est une estimation assez valable de l'importance des effets induits. Ici, il est *supérieur* au rapport correspondant à un pur ruban externe (1,23), et est le *double* de celui correspondant aux effets associés

d'un ruban et de son image à 600 km de profondeur (0,78). Ceci nous a conduit à examiner en détail l'analyse de ces auteurs et nous exposons dans un appendice écrit en collaboration avec P.N. Mayaud les raisons pour lesquelles nous estimons que les effets induits sont négligeables sur le méridien de Huancayo. A cet égard, notre résultat pour le centre de l'Afrique ne serait pas une exception.

S'il en est bien ainsi, peut-on donner une raison de la différence, au point de vue effets induits, entre variations de type S_R^E et variations de type D ? Une première remarque fondamentale semble s'imposer : la *cause* de l'induction n'est pas la même pour ces deux types de variation. Puisque les nappes de courants S_R ont une intensité à peu près constante, c'est la *rotation* de la Terre qui est, en ce cas, la cause principale de l'induction. Pour les perturbations, c'est principalement la *variation d'intensité* des courants (l'induction existerait même si la Terre ne tournait pas).

Cependant, pour les variations de type S_R , notre étude révèle une différence supplémentaire : des effets internes existent pour le S_R^P dans les régions tropicales et équatoriales comme ailleurs, ils n'existent pas pour le S_R^E . Ce paradoxe disparaîtrait si l'on pouvait montrer, en raisonnant sur la configuration du champ magnétique inducteur par rapport à la rotation de la Terre, que les sources d'induction dans ces régions sont négligeables ; les effets internes qu'on y observe seraient alors, comme pour les nappes externes engendrant le S_R , le résultat d'un équilibre général dans le conducteur considéré. On sait que les effets-dynamo dans l'ensemble de la couche E de l'hémisphère éclairé dépendent de l'intensité de la composante verticale du champ principal ; ils sont donc faibles ou négligeables aux basses latitudes, et les courants qui y circulent sont engendrés par les effets dynamos des latitudes supérieures.

Considérons donc le champ magnétique inducteur résultant des nappes externes, *abstraction faite* pour le moment de l'électrojet équatorial. Ce champ reste dans une position à peu près fixe par rapport au Soleil et varie peu en fonction du temps ; supposons-le constant. Le conducteur Terre tourne dans ce champ (soit \vec{B}) ; dans un trièdre fixe par rapport au Soleil, le champ électromoteur engendré en chaque point est égal à $\vec{u} \wedge \vec{B}$, où \vec{u} est la vitesse de ce point.

Deux remarques peuvent être faites :

1) $\text{rot}(\vec{u} \wedge \vec{B})$ est nul en tout point si \vec{B} présente une symétrie de révolution par rapport à l'axe de rotation de la Terre ; il est nul en chaque point où le gradient Ouest-Est de \vec{B} est lui-même nul, ce qui peut être interprété comme correspondant à des régions vides de sources d'induction ; rappelons que l'équation de l'induction s'écrit $\nabla^2 \vec{B} = -\sigma \text{rot}(\vec{u} \wedge \vec{B})$.

2) Si \vec{B} est horizontal, $\vec{u} \wedge \vec{B}$ est vertical et l'on peut montrer qu'il est annulé par un champ antagoniste de type électrostatique (les courants \vec{j} sont toroïdaux).

Or la configuration du champ magnétique inducteur résultant des nappes externes est telle qu'aux basses latitudes, et *seulement* aux basses latitudes (dans la région de *confluence* des systèmes Nord et Sud), on est assez proche d'un champ créé par une nappe de courants rectiligne à densité uniforme. Le gradient de ce champ suivant la direction de \vec{u} est faible, et $\vec{u} \wedge \vec{B}$ est vertical. Par conséquent, les champs électromoteurs sont particulièrement faibles et, de plus, verticaux ; on peut considérer que ces régions sont à peu près vides de sources d'induction. Il en serait donc pour les systèmes internes comme pour les systèmes externes : les courants circulant aux basses latitudes (partie interne du S_R^P) ont pour une grande part leurs sources d'induction localisées aux latitudes supérieures.

Considérons maintenant le champ inducteur supplémentaire causé par le ruban externe "électrojet équatorial". Il est beaucoup moins uniforme que le champ inducteur de la nappe externe sous-jacente ; de plus, il présente une composante verticale non négligeable et $\vec{u} \wedge \vec{B}$ n'est donc pas toujours vertical. Mais le gradient de \vec{B} suivant la direction de \vec{u} est faible dans les *mêmes proportions*. On comprendrait donc pourquoi les effets internes du S_R^E sont négligeables (fig. 9).

Par contre, pour les variations de type D , le champ électromoteur est défini par $\text{rot } \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$. Il est effectif *en tout point* pour le D^P , aux basses latitudes comme aux latitudes supérieures, puisque, aux courants qui varient en fonction du temps, correspond une variation de \vec{B} ; il en est de même pour le D^E puisque le courant "électrojet" varie en fonction du temps. De plus, les effets induits sont d'autant moins profonds que la variation des courants est plus rapide ; en conséquence, des anomalies de conductibilité des couches superficielles interviennent et introduisent une dissymétrie dans l'effet de l'électrojet lui-même.

Venons-en maintenant aux conséquences qu'impliquent l'absence d'effets induits pour les variations de type S_R , leur présence pour les perturbations.

1) L'amplification, par l'électrojet équatorial, des variations magnétiques observées en H sur ses bords est un des paramètres de base de toute description de l'électrojet. Nous avons montré que la "définition" des variations observées sur les bords, plus exactement la définition de la variation qui serait observée au travers de l'équateur magnétique si le phénomène "électrojet équatorial" n'existait pas, était un pro-

blème difficile. Supposons-le résolu pour l'un ou l'autre des types de variations. Appelons P la variation observée en H à l'équateur si l'électrojet n'existait pas, et T la variation totale observée. La mesure de l'amplification A semble apparemment correspondre au rapport T/P . En fait, cette mesure est correcte pour les perturbations, si l'on considère que, quel que soit le taux d'induction (d'ailleurs variable avec la vitesse de variation de la perturbation), l'énergie induite est tirée de l'énergie inductrice. Elle ne l'est pas pour les variations de type S_R puisque il n'y a pas d'effets induits par l'électrojet et que la mesure de la quantité A doit être appréciée alors par un rapport tel que $(T - P_i)/(P - P_i)$ où P_i est la part interne du S_R^P observée à l'équateur. Ainsi, en 1969, la quantité A sur le méridien 17° E n'est pas pour le S_R égale à 1,96 (moyenne des rapports tels que T/P pour l'année) mais à 2,49 si l'on prend pour P_i/P un rapport égal à $1/3$, valeur généralement admise pour le taux d'induction des nappes planétaires de courants engendrant la variation S_R .

2) Dans la mesure où l'absence de courants induits pour le S_R^E serait un phénomène général, des comparaisons en longitude des facteurs d'amplification du S_R^P par l'électrojet seraient significatives. Par contre, il n'en serait pas de même pour les perturbations puisque les profils peuvent être déformés de façon importante (figure 10, profils de H).

3) Si des effets induits existaient pour les variations S_R^E , tels qu'ils avaient d'abord été estimés à partir du profil de Huancayo (image électrique à 600 km de profondeur), leurs effets totaux (externe et interne) deviendraient rapidement négligeables au-delà de 1 500 km (voir fig. 1). On peut estimer qu'ils seraient de quelques dixièmes de gamma à la latitude des foyers des systèmes planétaires de courants S_R (en supposant que les foyers sont situés à environ 30° de l'équateur magnétique). Par contre, si les effets induits n'existent pas et lorsque la variation S_R^E observée à l'équateur magnétique a une amplitude de 100 gammas, l'effet à distance de l'électrojet en des stations situées à la latitude des foyers est de l'ordre de 4 gammas sur chacune des composantes horizontale et verticale (effet en H positif au Nord et au Sud, effet en Z négatif au Nord et positif au Sud) ; dans cette estimation, nous avons évidemment tenu compte de la courbure de la Terre. Il faudrait donc paradoxalement en conclure que, spécialement en H (valeurs très faibles du S_R à la latitude du foyer), la contribution de l'électrojet lui-même n'est pas négligeable.

4) Enfin, pour une étude externe des effets de l'électrojet sur le S_R et, en particulier, de leur variabilité, l'absence de courants induits introduit à une véritable méthode pour définir le S_R^P et donc le S_R^E , méthode d'autant plus précise qu'elle consiste en quelque sorte en une méthode de zéro. Nous es-

pérons pouvoir utiliser cette possibilité pour étudier la variabilité jour-à-jour du S_R^E à partir des données dont nous disposons.

Remerciements

Les données de Binza et Tamanrasset nous ont été gracieusement communiquées par les Directeurs de ces observatoires. Les autres données analysées dans cette étude ont été acquises dans le cadre de la RCP 168 du C.N.R.S. A M. Villeneuve, Chef de la Mission Orstom de Sahr (Tchad), nous sommes redevables de la qualité exceptionnelle des enregistrements. Les Dr. Schmucker et Mayaud nous ont aidé de leurs conseils au cours de cette étude. A chacun d'eux, nous adressons nos remerciements.

Appendice : remarques sur la séparation des effets externes et internes à Huancayo

Par O. Fambitakoye (O.R.S.T.O.M., Paris) et P.N. Mayaud (I.P.G., Paris)

L'étude précédente a montré que la séparation interne-externe était extrêmement sensible à la définition du S_R^P . Or, le profil de Huancayo comprenait seulement 5 stations d'enregistrements simultanés, dont aucune (sauf peut-être Talara pour la composante H) n'était réellement en dehors de l'influence de l'électrojet. De plus, la distribution des stations (trois au Nord de Huancayo, une seule au Sud) était bien moins favorable que celle de nos stations. Nous aurions donc tendance à penser, après avoir expérimenté les difficultés d'une reconstitution de profils interpolés à partir de neuf stations et celles d'une définition du S_R^P (même en disposant de stations *non soumises* en principe à l'effet de l'électrojet : avant cette étude, nous pensions que c'était le cas au moins pour S_1 et S_9), qu'une séparation *précise* des effets internes et externes à partir du profil de Huancayo est peut-être impossible. Une nouvelle définition du S_R^P (les R_N^H et R_N^Z de Forbush et Casaverde) permettrait peut-être de diminuer la valeur du rapport $\Delta Z_E / \Delta H_E$ pour la rapprocher d'une valeur 1,23 (absence de courants induits) ; elle ne permettrait pas d'obtenir une valeur aussi faible que 0,78, celle-là qui correspondrait à des effets induits équivalents à ceux d'une image électrique située à 600 km de profondeur.

Or, l'on doit remarquer que l'image électrique à cette profondeur a été obtenue par Forbush et Casaverde en utilisant *uniquement la moitié Nord* du profil de Z , afin de *supprimer la dissymétrie* existant sur le profil du S_R^E de Z de leur figure 7 (soit leur $R_T^Z - R_N^Z$). Le motif invoqué pour cette reconstruction "a priori" du profil est double : les résultats obtenus lors d'une première tentative de

séparation (leurs figures 10 et 11) donnaient des résultats bizarres (comme le sont ceux de nos figures 6a et 6b) : la dissymétrie du profil du S_R^E de Z , cause de ces résultats non satisfaisants, était interprétée comme étant due à des effets *locaux* d'induction par l'électrojet dans la partie Sud du profil. Une confirmation de ce fait était trouvée dans le changement de forme important apparaissant à l'équinoxe (saison pour laquelle la séparation est effectuée) entre la variation journalière de la déclinaison aux trois stations du profil situées le plus au Nord d'une part, à Huancayo et surtout à Yauca d'autre part.

Mais la comparaison de leurs figures 1 à 3 (courbes de variation journalière à l'équinoxe, au solstice de juin et au solstice de décembre) montre que la forme supposée suspecte à Yauca à l'équinoxe se retrouve tout au long du profil au solstice de décembre. Or une autre explication simple de ces faits existe : ils sont causés par une variation en latitude de la position moyenne de la frontière entre les systèmes planétaires de courants. Ainsi, si cette frontière passe au travers du profil à une saison donnée, un changement de forme interviendra au long du profil ; si la latitude de la position moyenne de la frontière change d'une saison à l'autre, la latitude du changement de forme au long du profil variera elle aussi. Sans doute, sur leurs figures 1 à 3, la variation journalière observée est souvent de type composite, parce que la frontière entre systèmes, proche des latitudes intéressées, varie elle-même en latitude au cours de la journée. Cependant, on peut dire qu'en gros, la forme de la variation journalière est principalement de type Sud au solstice de décembre tout au long du profil, et principalement de type Nord au solstice de juin. A l'équinoxe, elle passe du type Nord au type Sud entre les deux stations extrêmes (Talara et Yauca) ; en particulier, elle est déjà nettement du type Sud à Huancayo. Or la définition choisie pour le R_N^Z (leur figure 7) implique une valeur déjà négative du R_N^Z à Huancayo alors qu'elle devrait être nettement positive selon la variation journalière de la déclinaison (de type Sud). La dissymétrie apparaissant sur leur profil $R_T^Z - R_N^Z$ provient donc, à notre avis, non pas d'effets induits locaux liés à l'électrojet, mais de leur définition erronée du profil R_N^Z .

Or le résultat obtenu par Forbush et Casaverde (existence de courants induits correspondant à une image située à 600 km de profondeur) dépend essentiellement de l'hypothèse que la dissymétrie du profil $R_T^Z - R_N^Z$ (n'apparaissant pas d'ailleurs sur le profil $R_T^H - R_N^H$, voir leur figure 7) était due à des effets locaux d'induction et devait donc être éliminée. Pour cela, conservant le profil observé $R_T^H - R_N^H$, ils ont reconstruit *a priori* un profil $R_T^Z - R_N^Z$ en extrapolant au Sud de 13°S par des valeurs antisym-

métriques de celles au Nord de cette latitude. Le rapport $\Delta Z_E/\Delta H_E$ tombe alors à une valeur d'environ 0,80, ce qui correspond effectivement à une image électrique située à 600 km de profondeur (notre tableau III).

En fait, on peut remarquer (leur figure 7) que l'abscisse de la valeur moyenne entre les extremums du R_T^Z est située un peu au Sud de Huancayo (environ 1° de latitude) ; c'est à peu de chose près, la latitude de l'équateur magnétique. Imposer au R_N^Z de passer par cette ordonnée donnerait une valeur nettement positive au R_N^Z à la latitude de Huancayo (variation journalière de la déclinaison de type Sud) aussi bien qu'à Chimbote (variation journalière de type composite). Toute dissymétrie serait ainsi sup-

primée et il n'y aurait aucune raison de modifier arbitrairement le profil $R_T^Z - R_N^Z$ observé. Le rapport $\Delta Z_E/\Delta H_E$, qui est une bonne estimation de l'importance des effets internes, conserve alors une valeur égale à 1,50. Sans doute, cette valeur est trop élevée mais ceci peut provenir d'une définition imparfaite du R_N^H (rappelons qu'aucune des cinq stations du profil n'est exempte des effets de l'électrojet). Telle quelle, cette valeur reste un signe assez sûr que les courants induits sont négligeables sur la longitude de Huancayo comme au centre de l'Afrique.

Manuscrit reçu le 15 novembre 1972

Version révisée reçue le 25 janvier 1973

REFERENCES

- BOYER D., CAGNIARD L. et PHAM VAN NGOC, " Etude, en régime exponentiel, des anomalies magnéto-telluriques provoquées par une faille verticale," *C.R.A.S.*, Paris, t. 272, p. 1225-1228, 1971.
- CAIN J.C., " The location of the dip equator at E-layer altitude," *Radio Science*, 4, p. 781-784, 1969.
- CHAPMAN S., " The equatorial electrojet as detected from the abnormal electric current distribution above Huancayo, Peru, and elsewhere," *Ach. Meteorol. Geophys. u. Bioclimatol.*, 4, p. 368-390, 1951.
- FORBUSH S.E. et CASAVARDE M., " Equatorial electrojet in Peru," *Carn. Inst. Publ.*, 620, 1961.
- KERT M., " Modelle für erdmagnetisch induzierte elektrische Ströme in Untergrund," *Narch. Akad. Wiss. Cöttingen*, 5, Math.-Physik. Kl. 101-110, 1954.
- LOUIS P., " Contribution géophysique à la connaissance géologique du bassin du Lac Tchad." *Mémoires ORSTOM*, n° 49, 1970.
- PRICE A.T. et WILKINS G.A., " New methods for the analysis of geomagnetic fields, and their application to the Sq field of 1932-3," *Phil. Trans. Roy. Soc. Lond.*, Series A 256, 1963, p. 31-98.
- REINSCH C.H., " Smoothing by spline functions," *Numerische Mathematik*, 10, 177-183, 1967.
- SIEBERT M., " Die Zerlegung eines zeidimensionalen Magnetfeldes in äusseren und inneren Anteil mit Hilfe der Cauchyshen Integralfarnul," *Zeit. f. Geoph.*, 28, p. 231-236, 1962.
- UNTIEDT J., " A model of the equatorial electrojet involving meridional currents," *J.G.R.*, 72 (23), 5799-5810, 1967.
- VAN SABBEN D., " North-South assymetry of Sq," *Journ. Atm. Terr. Phys.*, 26, 1964, p. 1187-1196.