

ÉLECTROJET, CONTRE-ÉLECTROJET ET RÉGION F A SARH (TCHAD)

Jacques VASSAL

Géophysicien O.R.S.T.O.M.
Centre Géophysique O.R.S.T.O.M., B.P. 50, MF Bour, Sénégal

RÉSUMÉ

L'étude des magnétogrammes de Sarh (Tchad) et de Bangui (Centrafrique) et des ionogrammes de Sarh pendant une période de six mois, de janvier à juin 1971, montre que la variation diurne du pic de densité de la région F_2 , $N_M F_2(t)$, qui présente au voisinage de l'équateur magnétique une grande variabilité jour à jour, peut être reliée à la morphologie de la variation diurne de la composante H du champ géomagnétique.

Des trois principaux types de variations diurne de $N_M F_2(t)$, définis par FAYNOT et VILA (1979), le type B (« noon bite out ») se voit les jours de forte amplification de la composante H du champ magnétique (présence de l'électrojet), le type P (« plateau ») est lié à l'absence de l'amplification de H, et le type R (« Reversed ») moins fréquent, apparaît les jours où on observe l'après-midi une inversion de la variation de H (contre-électrojet). Les types M (« morning peak ») et D (« Dome ») peuvent se ramener aux cas précédents.

ABSTRACT

ELECTROJET, COUNTER-ELECTROJET AND F REGION (SARH, CHAD)

The study of magnetograms at Sarh (Chad) and Bangui (Central Africa) and ionograms at Sarh over six months from January to June 1971 shows that the diurnal variation in the density peak of the region F_2 , $N_M F_2(t)$, which indicates a big day to day variability near the magnetic equator, can be related to the morphology of the diurnal variation in the H component of the geomagnetic field.

Among the three main types of diurnal variations of $N_M F_2(t)$ determined by FAYNOT and VILA (1979), the B type ("noon bite out") is seen when there is a high amplification of the H component of the magnetic field (presence of the electrojet), the P type ("plateau") is related to the absence of H amplification and the R type ("Reversed") which is less frequent, appears when it is observed a reversal in the H variation in the afternoon (counter-electrojet). The M ("morning peak") and D ("Dome") types can be reduced to the preceding cases.

1. Introduction

(a) LA MORPHOLOGIE DE LA VARIATION DIURNE DU CHAMP GÉOMAGNÉTIQUE au voisinage de l'équateur magnétique a été étudiée par CHAPMAN dès 1951, puis par MAYAUD (1967) et FAMBITAKOYE (1976). Sa variabilité a été liée à l'intensité des courants électriques dans la région E (FAMBITAKOYE, 1971). Des phénomènes d'inversion de la variation du champ magnétique observés par GOUIN et MAYAUD (1967) ont amené ceux-ci à proposer l'existence d'un contre-électrojet se superposant à l'électrojet. Des mesures par radar cohérent de vitesses électroniques dans l'électrojet équatorial en Afrique ont récemment confirmé que le phénomène de contre-électrojet est dû à un courant ionosphérique circulant dans la direction opposée à l'électrojet (HANUISSE *et alii*, 1979). Les conditions d'établissement de ce contre-électrojet, ainsi que sa localisation spatiale ne sont pas encore bien connues. Ainsi il ne semble pas y avoir de relation nette entre électrojet et C.E.J., et le champ magnétique interplanétaire (KANE, 1978). Différents modèles ont été proposés par SUGUIRA et CAIN (1966), RICHMOND (1973), GAGNEPAIN, CROCHET et RICHMOND (1977), MAYAUD (1977), en supposant plusieurs sources possibles. Les relations qui existent entre courant ionosphérique, électrojet et variations magnétiques au sol ont été étudiées par HARPER (1977) et STENING (1977) et sont maintenant assez bien établies.

(b) DANS LES RÉGIONS ÉQUATORIALES, la variation diurne du pic de densité de la couche F_2 , déduite de la fréquence critique foF_2 , et ses relations avec les variations magnétiques a été abordée par de nombreux chercheurs. Sa morphologie en fonction du temps local, de la saison, du cycle luni-solaire et ses modifications en fonction de l'activité magnétique sont maintenant assez bien connues. La présence d'un courant électrique est-ouest et d'un champ magnétique perpendiculaire, horizontal, est propice à l'apparition de l'anomalie équatoriale de la région F_2 découverte par APPLETON (1946). La décroissance de la fréquence critique foF_2 à midi (noon bite out) a été étudiée par RASTOGI et SANATANI (1968). Cette variation diurne s'observe aussi bien sur l'absorption ionosphérique mesurée par riomètre (PARAMESWARAN et KRISHNAMURTHY, 1976), que sur le paramètre Te (BOWEN *et al.* 1964).

On sait aussi que le champ magnétique interplanétaire intervient pour une part dans l'état de l'ionosphère équatoriale (PATEL 1978, RASTOGI, WOODMAN et HEDGECOCK, 1978). Une synthèse des études sur la structure de la région F a été présentée par RAJARAM (1977).

(c) CLASSIFICATION DES $N_M F_2(t)$: FAYNOT et VILA (1979) proposent une classification en 5 types de la variation diurne de $N_M F_2(t)$ observée à Sarh de mai 1969 à septembre 1971.

- 1 : le type B (noon bite out), présent dans 50 % des cas est caractérisé par deux maximums, un le matin et l'autre l'après-midi, séparés par un minimum à 12 h TL.
- 2 : le type M, avec un maximum le matin (24 % des cas).
- 3 : le type D (7 %), où la variation diurne a la forme d'un dôme.
- 4 : le type R (11 % des cas) qui présente un maximum l'après-midi.
- 5 : le type P (8 % des cas) en forme de plateau. La figure 1 présente schématiquement ces différents types de variation.

On se propose de montrer, par quelques exemples que les différents types de variations de foF_2 , permettant d'obtenir les variations de $N_M F_2(t)$ décrites ci-dessus, se reflètent de façon assez nette sur les magnétogrammes.

2. Documents utilisés

Ce sont ceux qui ont été obtenus dans le cadre de la RCP 168 du CNRS, « étude de l'électrojet équatorial au Tchad et en RCA ».

Les magnétogrammes que nous avons utilisés sont des enregistrements Lacour (vitesse d'enregistrement de 15 mm/h) provenant des stations magnétiques de Sarh (lat. géographique 9,2° N, lon-

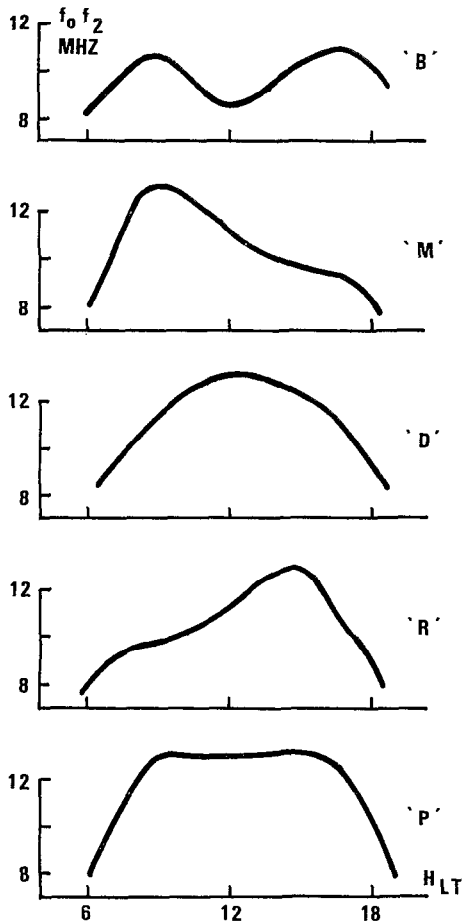


FIG. 1. — Les différents types de variation diurne du paramètre foF_2 .

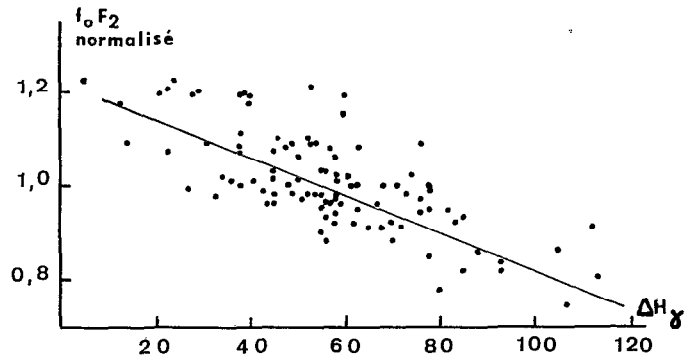


FIG. 2. — Corrélation entre foF_2 normalisé à Sarh et $\Delta H = H_{SRH} - H_{BNG}$, à l'heure du maximum de la variation diurne de H. On a tracé sur la figure la droite des moindres carrés.

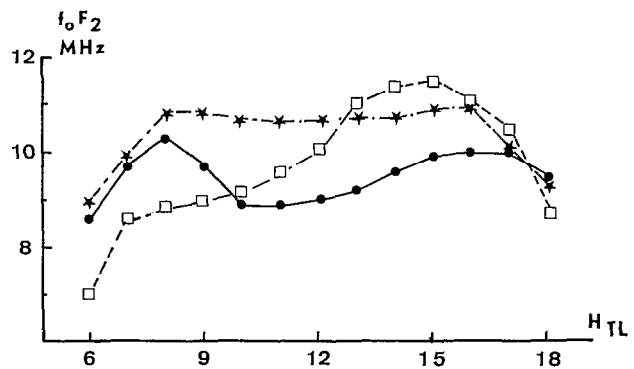


FIG. 3. — Variation diurne du paramètre foF_2 pour les jours où $\Delta H > 70nT$ (●), $0 < \Delta H < 40nT$ (★) et $\Delta H < 0$ (□).

gitude $18,4^\circ$ E) au Tchad et de Bangui (lat. géog. $4,4^\circ$ N, longitude $18,6^\circ$ E) en Centrafrique. Les ionogrammes, dont nous utilisons les dépouillements horaires, provenaient de la station ionosphérique de Sarh, équipée d'un sondeur vertical SP 35.16.

Les stations de Sarh et de Bangui sont à la même heure locale, Sarh étant en outre pratiquement sous l'électrojet et Bangui nettement au sud. Les latitudes magnétiques définies suivant CAIN (1969) sont de $-1,4^\circ$ à Sarh et $-5,9^\circ$ à Bangui.

Nous avons limité notre étude à la période qui s'étend de janvier à juin 1971 pendant laquelle on a sélectionné 100 jours pour lesquels les magnétogrammes de Sarh et de Bangui et les ionogrammes de Sarh étaient simultanément exploitables.

3. Méthode d'étude

Seule la composante H des magnétogrammes a été considérée. En suivant sensiblement la méthode décrite par MAYAUD (1965), on détermine un niveau de nuit, commun à Bangui et à Sarh, que l'on prend comme référence. On détermine ensuite, heure par heure et en heure locale, la différence $\Delta H = H_{SRH} - H_{BNG}$, en rappelant que Sarh et Bangui sont à des longitudes très voisines, $18,4^\circ$ E et $18,6^\circ$ E.

Cette différence entre stations très proches de l'équateur magnétique et non équatoriales permet selon RAJARAM (1977), d'obtenir une bonne représentation de l'intensité de l'électrojet pour $\Delta H > 0$ et indique la présence d'un contre-électrojet pour $\Delta H < 0$.

4. Corrélation entre électrojet et foF₂ au voisinage de midi

La valeur de foF₂ a été notée à l'heure où ΔH est positif et maximum, au voisinage de 12 h TL. Pour minimiser l'effet saisonnier sur la variation du foF₂, on normalise les valeurs de la fréquence critique en considérant le rapport de chaque valeur à la moyenne du mois.

On obtient ainsi : foF₂ normalisé = foF₂/foF₂ moyen mensuel.

Sur la figure 2, les valeurs de foF₂ ainsi normalisées ont été portées en fonction de ΔH maximum.

Le coefficient de corrélation entre ces deux paramètres est de $r = -0,72$ pour 100 jours.

Ce résultat montre, à Sarh, une meilleure corrélation entre foF₂ et ΔH (à l'heure du maximum de la variation diurne) que celle obtenue par DUNFORT (1967) à Trivandrum (lat. géom. +1°) par une méthode voisine ($r = -0,49$).

5. Electrojet, contre-électrojet et variation diurne de foF₂

Les valeurs de ΔH , déterminées à partir des magnétogrammes de Sarh et de Bangui ($\Delta H = H_{\text{SRH}} - H_{\text{BNG}}$) ainsi que l'examen morphologique des courbes de variations journalières à Sarh et à Bangui, permettent de définir 3 classes de jours de caractéristiques magnétiques nettement différentes.

Classe 1: jour à fort électrojet : $\Delta H > 70$ nT.

Classe 2: jour à faible électrojet : $0 < \Delta H < 40$ nT.

Classe 3: jour à C.E.J. de l'après-midi : $\Delta H < 0$.

Pour la période considérée on obtient, ainsi, environ 60 % de jours des classes 1 et 2 et 16 % de jours de la classe 3. Cette classe 3 est beaucoup plus fréquente en janvier et février que pour les autres mois étudiés. On sait que l'occurrence du contre-électrojet est en effet plus fréquente en hiver (MAYAUD, 1977). Les 24 % de jours restant, correspondant soit à un électrojet moyen ($40 \text{ nT} < \Delta H < 70 \text{ nT}$) ont été soit à des jours magnétiquement trop perturbés, n'ont pas été pris en compte ici.

Nous avons porté sur la figure 3 la variation diurne moyenne du foF₂ pour chacune de ces classes. On remarque ainsi que les variations diurnes de foF₂ des jours des différentes classes sont nettement différenciées. On illustre ce résultat, figure 4, en traçant les variations diurnes de H à Sarh et à Bangui et les courbes foF₂(t) pour 3 jours particulièrement caractéristiques.

6. Discussion

Ces résultats sont en bon accord avec ceux de RUSH et RICHMOND (1973) et RAJARAM et RASTOGI (1973).

On peut lier les 3 classes de variation diurne magnétiques observées, aux différents types de variation de foF₂(t) définis par FAYNOT et VILA (1979).

A la classe 1, correspondant aux jours de fort électrojet, se rattache le type B (noon bite out). On la retrouve principalement les jours calmes, favorables à l'établissement d'un électrojet intense.

L'occurrence des jours à électrojet seul (56 %), déterminée par FAMBITAKOYE (1976), est sensiblement la même que l'occurrence d'apparition du type B sur les ionogrammes de Sarh (50 %).

Dans la classe 2 se retrouvent des jours calmes à faible électrojet, et des jours perturbés où l'électrojet ne trouve pas de conditions favorables à son établissement. On peut rapprocher cette classe des types D (dôme) et P (plateau) du foF₂(t).

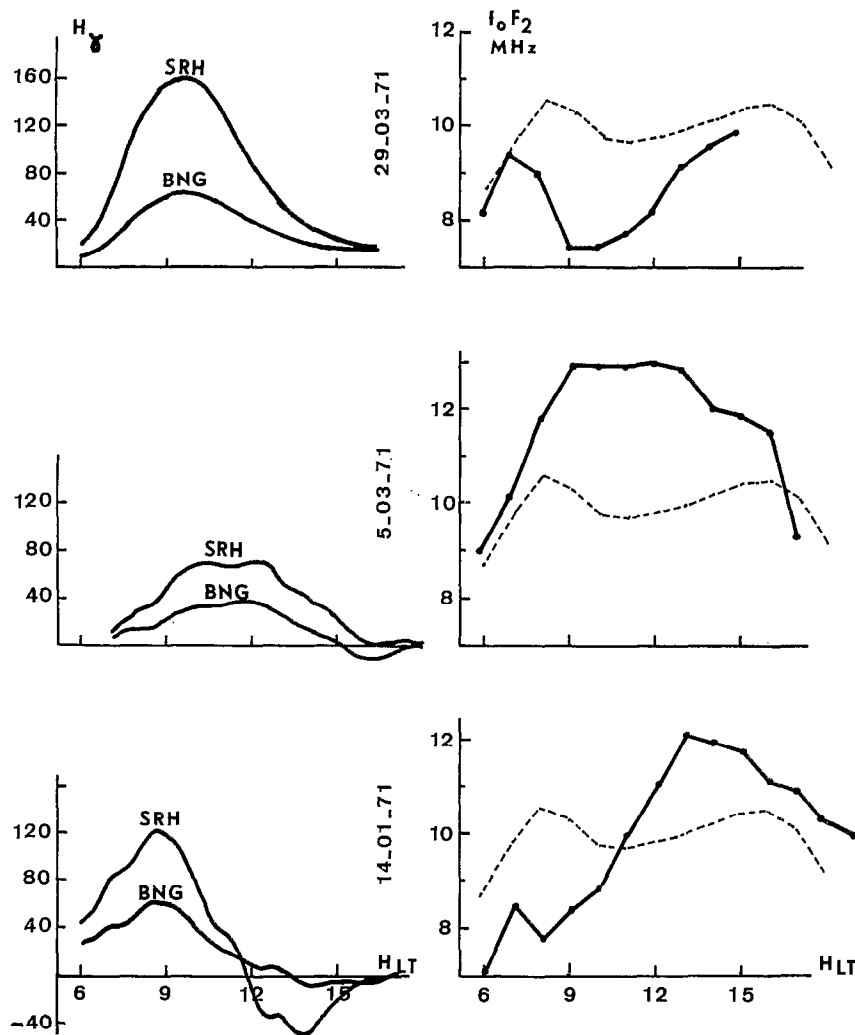


FIG. 4. — Pour 3 jours particuliers : *A gauche* : Variation diurne du champ magnétique horizontal à Sarh (SRH) et à Bangui (BNG) ; *à droite* : Variation diurne du paramètre foF_2 à Sarh. On a tracé sur la figure la variation diurne moyenne du foF_2 pour la période considérée (---).

La classe 3, où se manifeste le contre-électrojet de l'après-midi, est à rapprocher du type R (Reversed). L'occurrence d'apparition de ce contre-électrojet est de 15 %, FAMBITAKOYE (1976), de 16 % dans notre cas, et correspond à la valeur de 11 % d'apparition du type R chez FAYNOT et VILA.

Seul le type M (Morning peak) n'a pu être lié spécifiquement à une variation diurne de H particulière. Ce type fréquent (24 % des cas d'après FAYNOT et VILA), correspond sans doute à une superposition des autres types.

On remarquera en effet que dans notre détermination des 3 classes magnétiquement caractéristiques (§ 5), on n'a pas pris en compte 24 % des jours étudiés correspondant en partie à un électrojet « moyen ». Il semble donc que le type M de variation de foF_2 englobe un certain nombre de jours aux caractéristiques magnétiques peu tranchées.

Ce type M pourrait aussi être lié à la présence d'un contre-électrojet le matin. Mais l'heure d'appa-

rition de ce C.E.J., visible sur la morphologie des magnétogrammes, se situe entre 6 h et 7 h 30 TL, et ne correspond pas à l'heure du maximum du foF₂ pour le type M, qui se place vers 10 h-10 h 30 TL.

Au total, 76 % des jours étudiés ici ont pu être liés de façon nette à un type de variation de foF₂.

7. Conclusion

Par l'intermédiaire de l'étude des magnétogrammes, nous avons constaté une forte dépendance, à Sarh, entre région E, siège de l'électrojet et du contre-électrojet, et région F. Cette liaison, les jours où l'on observe l'électrojet, vient du processus de dérive vers le haut de l'ionisation équatoriale due à la force $E \times B$, E étant le champ électrique est-ouest, B le champ magnétique horizontal nord-sud. Cette remontée de l'ionisation tend à accroître la densité électronique de la couche F équatoriale. Elle est contrée les jours de contre-électrojet qui produit une dérive vers le bas, et est plus ou moins annihilée les jours d'orages magnétiques pendant lesquels la composante H du champ horizontal est soumise à de brutales fluctuations.

REMERCIEMENTS

Les données de Sarh ont été acquises au cours de la R.C.P. 168 financée par le C.N.R.S., l'I.P.G., le C.N.E.T.; et l'O.R.S.T.O.M. Je tiens à remercier, pour la qualité de leurs enregistrements, M. CHABRAT, responsable du magnétisme et MM. DECOURT et FAYNOT qui assuraient le fonctionnement du sondeur ionosphérique.

La routine de l'observatoire magnétique O.R.S.T.O.M. de Bangui était assurée par M. MAUPLAT que je remercie ici.

Manuscrit reçu au Service des Éditions de l'O.R.S.T.O.M. le 29 octobre 1980

BIBLIOGRAPHIE

- APPLETON (E. V.), 1946. — Two anomalies in the ionosphere. *Nature*, Lond. 157, 691.
- BOWEN (P. J.), BOYD (R. L. F.), HENDERSON (C. L.) and WILLMORE (A. P.), 1964. — Electron temperature in the Upper F-region. *Proc. R. Soc. A* 281, 526.
- CAIN (J. C.), 1969. — "The location of the dip equator at E-Layer altitude", *Radio Science*, 4 : 781-784.
- CHAPMAN (S.), 1951. — "The equatorial electrojet as detected from the abnormal electric current distribution above Huancayo, Peru, and elsewhere", *Ach. Meteorol. Geophys. u. Bioclimatol.* : 368-390.
- DUNFORD (E.), 1967. — "The relationship between the ionosphere equatorial anomaly and the E. region current system", *J. Atmos. Terr. Phys.*, 29 : 1489-1498.
- FAMBITAKOYE (O.), 1971. — « Variabilité jour à jour de la variation journalière régulière du champ magnétique terrestre dans la région de l'électrojet équatorial ». *C.R. Ac. Sc. Paris*, 272, série B : 637-640.
- FAMBITAKOYE (O.), 1976. — « Étude des effets magnétiques de l'électrojet équatorial ». Thèse de Doctorat d'État, Paris VI, 1974 — Ed. O.R.S.T.O.M., Paris, *Géophys.*, 14.
- FAMBITAKOYE (O.) et MAYAUD (P. N.), 1976a. — "Equatorial electrojet and regular daily variation S_R — I. A determination of the equatorial electrojet parameters", *J. Atmos. Terr. Phys.*, 38 : 1-17.
- FAMBITAKOYE (O.) et MAYAUD (P. N.), 1976b. — "Equatorial electrojet and regular daily variation S_R — II. The centre of the equatorial electrojet", *J. Atmos. Terr. Phys.*, 38 : 19-26.
- FAMBITAKOYE (O.), MAYAUD (P. N.) et RICHMOND (A. D.), 1976c. — "Equatorial electrojet and regular daily variation S_R — III. Comparisons of observations with a physical model", *J. Atmos. Terr. Phys.*, 38 : 113-121.
- FAMBITAKOYE (O.) et MAYAUD (P. N.), 1976d. — "Equatorial electrojet and regular daily variation S_R — IV. Special features in particular days", *J. Atmos. Terr. Phys.*, 38 : 123-134.
- FAYNOT (J. M.) and VILA (P.), 1979. — "F region strata at the magnetic equator". *Ann. Geophys.*, 35 : 1-9.
- GAGNEPAIN (J.), CROCHET (M.), RICHMOND (A. D.), 1977. — "Comparison of equatorial electrojet models". *J. Atmos. Terr. Phys.*, 30 : 1119-1124.
- GOUIN (P.), MAYAUD (P. N.), 1967. — « A propos de l'existence possible d'un « contre-électrojet » aux latitudes magnétiques équatoriales », *Ann. Géophys.*, 23 : 41-47.

- HANUISSE (C.), CROCHET (M.), GOUIN (P.), OGUBAZGHI (G.), 1979. — "Radar observation of the equatorial counter-electrojet". *Ann. Geophys.*, 35 : 201-202.
- HARPER (R. M.), 1977. — "A comparison of Ionospheric currents, magnetic variations and Electric fields at Arecibo", *J. Geophys. Res.*, 82 : 3233-3242.
- KANE (R. P.), 1978. — "Counterelectrojet and interplanetary magnetic field", *J. Geophys. Res.*, 83 : 2671-2674.
- MAYAUD (P. N.), 1965. — « Analyse morphologique de la variabilité jour à jour de la variation journalière « régulière » S_R du champ magnétique terrestre », *Ann. Géophys.*, 21 : 514-544.
- MAYAUD (P. N.), 1967. — « Corrélation entre les variations journalières du champ magnétique terrestre sous l'électrojet équatorial et dans les régions avoisinantes », *Ann. Geophys.*, 23 : 387-406.
- MAYAUD (P. N.), 1977. — "The equatorial counter-electrojet — a review of its geomagnetic aspects", *J. Atmos. Terr. Phys.*, 39 : 1055-1070.
- PARAMESWARAN (K.), KRISHNAMURTHY (B. V.), 1976. — "Studies on ionospheric absorption by riometer technique at magnetic equator", *Ann. Geophys.*, 32 : 419-428.
- PATEL (V. L.), 1978. — "Interplanetary magnetic field variations and the electromagnetic state of the equatorial ionosphere", *J. Geophys. Res.*, 83 : 2137-2144.
- RAJARAM (G.), 1977. — "Structure of the equatorial F — region topside and bottomside — a review", *J. Atmos. Terr. Phys.*, 39 : 1125-1144.
- RAJARAM (G.), RASTOGI (R. G.), 1973. — Longitudinal seasonal and solar cycle effects on ionosphere F-region disturbances. I. *Riv. ital. geofis.*, 22, nos 5-6 : 391-400.
- RASTOGI (R. G.), SANATANI (S.), 1968. — "Forenoon bite-out of F_2 layer ionisations at tropical latitudes", *Ann. Geophys.*, 24 : 75-80.
- RASTOGI (R. G.), WOODMAN (R. F.), HEDGECOCK (P. C.), 1978. — "Correlated changes in the equatorial electrojet and in the interplanetary magnetic field during a geomagnetic storm", *J. Atmos. Terr. Phys.*, 40 : 867-869.
- RICHMOND (A. D.), 1973. — "Equatorial electrojet. — II. Use of the model to study the equatorial ionosphere", *J. Atmos. Terr. Phys.*, 35 : 1105-1118.
- RUSH (C. M.), RICHMOND (A. D.), 1973. — "The relationship between the structure of the equatorial anomaly and the strength of the equatorial electrojet", *J. Atmos. Terr. Phys.*, 35 : 1171-1180.
- STENING (R. J.), 1977. — "Magnetic variations at other latitudes during reverse equatorial electrojet", *J. Atmos. Terr. Phys.*, 39 : 1071-1077.
- SUGUIRA (M.), CAIN (J. C.), 1966. — "A model equatorial electrojet", *J. Geophys. Res.*, 71 : 1869-1877.
- WALKER (G. O.), CHAN (C. S.), 1976. — "The diurnal variation of the equatorial anomaly in the topside ionosphere at sunspot maximum", *J. Atmos. Terr. Phys.*, 38 : 699-706.