

La plasmasphère en période de recouvrement magnétique. Etude combinée des données des satellites OGO 4, OGO 5 et des sifflements reçus au sol

par P. CORCUFF et Y. CORCUFF

Laboratoire de Physique de la Haute Atmosphère, Université de Poitiers, 86 022 Poitiers, France.

D.L. CARPENTIER

Radioscience Laboratory, Stanford University, Stanford, California 94 305, U.S.A.

C.R. CHAPPELL

Lockheed Palo Alto Research Laboratory, Palo Alto, California 94 304, U.S.A.

J. VIGNERON

Groupe de Recherches Ionosphériques, 94 – Saint Maur des Fossés, France.

N. KLEIMENOVA

Institut de Physique de la Terre, Moscou, U.R.S.S.

RESUME. — *La structure équatoriale et la dynamique de la plasmasphère au cours de la période de recouvrement magnétique comprise entre les 13 et 23 septembre 1968 sont étudiées à l'aide d'un ensemble de données expérimentales comprenant :*

- *les profils de densité en ions H^+ mesurés dans les secteurs de nuit et de l'après-midi par le satellite à orbite excentrée OGO 5,*
- *la position L_p de la plasmopause dans le secteur ~ 01 TL déduite des enregistrements TBF du satellite à orbite polaire OGO 4,*
- *les densités électroniques calculées à partir des sifflements radioélectriques reçus à Kerguelen ($L \sim 3,7$) et à Byrd ($L \sim 7$), stations au sol séparées par 150° de longitude.*

Une analyse détaillée de ces données est faite et les résultats obtenus sont interprétés en termes de convection magnétosphérique, de corotation et de remplissage de la magnétosphère du côté diurne de la Terre.

L'accent est mis notamment sur l'évolution du profil équatorial de la magnétosphère et sur la structure irrégulière du bord de la plasmasphère liée à une activité récurrente de sous-orage se produisant alors que la magnétosphère est en état de recouvrement.

ABSTRACT. — *The equatorial structure and dynamics of the plasmasphere during the period of magnetic recovery, lasting from the 13 th to the 23 d of september 1968, are studied thanks to many experimental data including :*

- *H^+ ions density profiles measured in the night and afternoon sectors by the excentered orbital satellite OGO 5 ;*
- *L_p positions of the plasmopause in the ~ 01 TL sector, deduced from the VLF records of the polar orbital satellite OGO 4 ;*
- *electron densities calculated from the whistlers received at Kerguelen ($L \sim 3.7$) and Byrd ($L \sim 7$), ground stations 150 degrees of longitude apart.*

The detailed analysis of these data and the results obtained are reviewed in terms of magnetospheric convection, corotation and filling of the magnetosphere on the dayside of the Earth.

There is a stress on the evolution of the equatorial profile of the magnetosphere and on the irregular structure of the edge of the plasmasphere associated with a recurrent substorm activity which takes place when the magnetosphere is in a recovery state.

I - Introduction

Il est maintenant bien établi que la Terre est entourée d'une région de plasma thermique de forte densité —ou plasmasphère— s'étendant dans le plan équatorial jusqu'à une distance de quelques rayons terrestres. La plasmopause, qui en constitue la limite, se manifeste souvent par un gradient aigu dans la distribution radiale des densités électronique [Carpenter, 1963 ; Angérami et Carpenter, 1966] et ionique [Taylor, Brinton et Smith, 1965 ; Chappell, Harris et Sharp, 1970 a et b].

En période magnétiquement perturbée, les dimensions de la plasmasphère diminuent [Carpenter, 1966, 1967 ; Binsack, 1967 ; Taylor, Brinton et Pharo, 1968 ; Chappell et al., 1970 a et b] et la distance géocentrique de la plasmopause peut devenir aussi faible que 2 rayons terrestres lors d'orages magnétiques intenses [Corcuff Y. et Delaroche, 1964 ; Corcuff Y., 1965]. Cet effet peut s'expliquer par une érosion de la plasmasphère dans le secteur du crépuscule sous l'influence des champs électriques de convection magnétosphérique dont l'intensité dépend de l'activité magnétique [Chappell et al., 1970 b, 1971, 1972].

Le comportement de la plasmasphère en période de recouvrement magnétique est, par contre, bien moins connu. On sait cependant qu'une nouvelle plasmopause tend à se former à des distances L plus élevées. En effet, la région de faible densité —ou "plasmatrough"— située entre cette plasmopause en formation et celle de la période perturbée est alors dominée par la corotation et peut se remplir de plasma ionosphérique [Chappell et al., 1971]. Mais le processus de remplissage est lent et il se poursuit jusqu'à ce que l'ionisation magnétosphérique atteigne un niveau tel que la magnétosphère et l'ionosphère soient en équilibre diffusif ce qui peut demander plus de huit jours [Park, 1970 ; Banks, Nagy et Axford, 1971]. Or, pendant ce laps de temps, il peut se produire une activité récurrente de sous-orage qui doit se traduire par une structure irrégulière, plus ou moins locale et temporaire, du profil équatorial de la région de transition en cours de remplissage. L'objet de ce travail, qui concerne la période du 13 au 24 septembre 1968, est de présenter les premiers résultats mettant en évidence cette structure complexe et la dynamique de la plasmasphère en phase de recouvrement magnétique.

Les figures 1 et 6 représentent respectivement les variations de l'indice magnétique planétaire K_p et celles de l'indice AE de l'électrojet auroral au cours de cette période. Les 13, 14 et 15 septembre, l'activité magnétique est relativement importante ; elle décroît régulièrement ensuite jusqu'au 21. Toutefois,

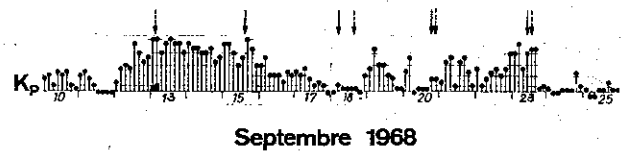


Fig. 1

Indices magnétiques K_p relatifs à la période du 10 au 25 septembre 1968. Les flèches verticales indiquent approximativement les instants de passage du satellite OGO 5 à travers la limite de la plasmasphère dans les secteurs de nuit (en trait continu) et de l'après-midi (en trait discontinu).

les 19 et 20 septembre notamment, on peut remarquer l'existence de brèves recrudescences de l'activité qui, comme on le verra par la suite, sont suivies d'effets relatifs à la forme, aux dimensions et au profil de densité de la plasmasphère.

Cette étude s'appuie sur un ensemble de données expérimentales fournies :

- par le spectromètre de masse ionique du Lockheed Research Laboratory placé à bord du satellite OGO 5 dont l'orbite excentrée (300 km — 23 R_E) reste voisine du plan équatorial ;
- par le récepteur *TBF* à large bande de l'Université de Stanford installé à bord du satellite OGO 4 à orbite polaire (400 — 900 km) ;
- par les "knee-whistlers" reçus au sol à Kerguelen ($L = 3,7$) et à Byrd ($L \sim 7$), stations séparées l'une de l'autre par 150° de longitude.

Ces données sont utilisées pour mettre en évidence, respectivement :

- le remplissage progressif, au cours de la période de recouvrement magnétique, de la région de faible densité située à l'extérieur de la plasmopause de la période perturbée ;
- les variations temporelles du rayon de la plasmopause dans le secteur $\sim 01 TL$;
- la structure irrégulière et variable du bord externe de la plasmasphère observée les 19 et 20 septembre.

Nous allons tout d'abord exposer les résultats expérimentaux correspondant à ces divers types d'étude ; puis nous les discuterons, notamment en termes de convection magnétosphérique.

Dans tout l'exposé on désignera par gradient de densité toute variation rapide dans la distribution radiale de l'ionisation. Il sera dit "faible" si le rapport $P = (N_E)_i / (N_E)_e$ des densités équatoriales juste à l'intérieur et à l'extérieur de cette variation est de l'ordre de 1 à 5, "aigu" s'il est supérieur à 10.

II - Profils de la densité ionique dans les secteurs de nuit et de l'après-midi

Au cours de la période considérée, le satellite OGO 5 a une orbite telle qu'il traverse la plasmasphère au voisinage du plan équatorial, entre les latitudes géomagnétiques -25° et $+5^\circ$, deux fois tous les deux jours et demi environ. Il fournit alors des informations très détaillées sur la densité équatoriale des ions H^+ notamment.

Du 13 au 24 septembre, quatre passages ont lieu dans le secteur de nuit, entre 23 et 06 TL, et quatre autres dans le secteur de l'après-midi, entre 13 et 17 TL. Les traces équatoriales des orbites correspondantes sont représentées sur la figure 2 dans un système de coordonnées L - temps local. Les instants, en temps universel, où le satellite traverse les régions de densité ~ 10 ions/cm³ sont indiqués sur les figures 1 et 6 par des flèches verticales, en trait continu pour les passages dans le secteur de nuit, en trait discontinu pour les passages dans le secteur de l'après-midi.

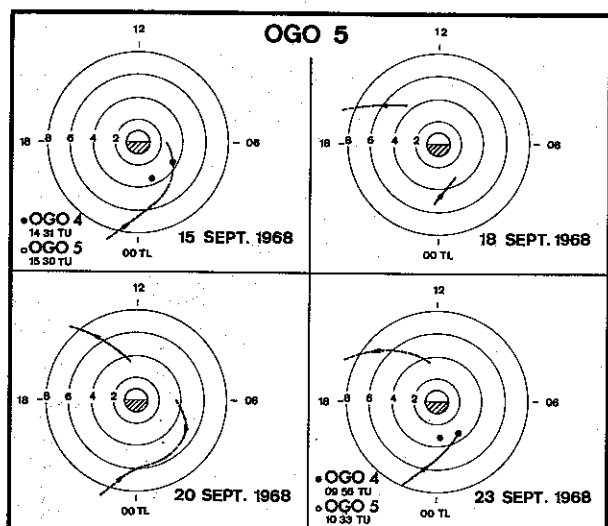


Fig. 2

Traces équatoriales des portions d'orbite du satellite OGO 5 auxquelles se rapportent les mesures de densité en ions H^+ portées sur la figure 3. Les traversées de la plasmapause par OGO 4 et OGO 5 les 15 et 23 septembre dans le secteur de nuit sont respectivement indiquées par un astérisque (*) et un petit cercle (o).

II.1 - Profils relatifs au secteur de nuit

La figure 3a montre les profils ioniques fournis par OGO 5 les 15, 18, 20 et 23 septembre 1968 dans le secteur 23-06 TL. Une courbe K/L^4 est également tracée comme référence ; elle est normalisée à la valeur de 420 ions/cm³ à $L = 4$ caractéristique de la densité du plasma à cette distance géocentrique les 18 et 20 septembre.

Le 15 septembre, alors que l'agitation magnétique commence à diminuer, la traversée de la plasmapause dans le secteur 04-05 TL n'est pas nettement définie. En effet, la densité ionique décroît rapidement vers $L = 3$, puis plus lentement entre $L = 3$ et $L = 4$ pour atteindre des valeurs inférieures à 10 ions/cm³ à $L > 3,5$. Chappell et al. [1970 a] ont proposé d'utiliser la position du niveau de concentration inférieure à 10 ions/cm³ pour définir la limite externe de la plasmasphère dans le secteur 00-04 TL. Aussi, on peut considérer que cette limite se situe à $L_p = 3,5$ le 15 septembre. Au-delà et jusqu'à $L = 5$, la densité ionique présente des fluctuations assez importantes, spécifiques des périodes perturbées, mais toutefois peu fréquentes dans le secteur de nuit [Chappell et al., 1971]. Il semble bien que l'on assiste au début de la disparition d'une plasmapause qui, le 13 septembre -jour le plus perturbé de la période considérée- devait probablement se situer au voisinage de $L_p = 3$, valeur que les données d'OGO 4 tendent d'ailleurs à confirmer (figure 6).

Le remplissage progressif, au cours de la période de recouvrement magnétique, de la région de faible densité située à l'extérieur de la plasmapause "perturbée" est nettement mis en évidence par les profils des 18 et 20 septembre obtenus chacun après plus de 12 heures de calme magnétique. On peut remarquer que les densités augmentent, d'un jour à l'autre, d'autant plus vite que L est plus faible et, en outre, que le processus de remplissage prend fin lorsque la concentration atteint un certain niveau d'équilibre. Le gradient aigu de densité, définissant la position de la plasmapause, disparaît et il devient très difficile de fixer cette position.

Le 23 septembre, lors d'une nouvelle période d'agitation magnétique au cours de laquelle l'indice K_p atteint des valeurs voisines de 4, le profil de densité ionique montre que la région magnétosphérique qui s'était remplie progressivement de plasma depuis le 15 septembre a perdu une partie très importante de son contenu. Une nouvelle plasmapause constituée par un gradient de densité aigu s'est formée à $L_p = 3,3$ dans le secteur 02 TL.

II.2 - Profils relatifs au secteur de l'après-midi

Les profils ioniques fournis par OGO 5 les 13, 18, 20 et 23 septembre dans le secteur 13-17 TL sont représentés figure 3b.

Ils se différencient des précédents par des caractéristiques qui leur sont propres [Taylor et al., 1970 ; Chappell et al., 1971] :

- la densité dans la "plasmatrough" y est plus élevée ce qui est dû à une diffusion vers la magnétosphère de plasma ionosphérique du côté diurne de la Terre ;

— soit au voisinage de la plasmopause, soit nettement détachées du corps principal de la plasmasphère, des masses de plasma relativement dense sont observées, principalement à la suite de périodes d'activité magnétique forte à modérée. La densité γ est souvent très fluctuante et peut atteindre par endroits des valeurs supérieures à 50 ions/cm^3 . C'est le cas

notamment les 13 et 23 septembre qui constituent deux exemples très nets de ce phénomène.

En période d'activité magnétique accrue, ce plasma dense, qui est transporté par convection en direction de la magnétopause dans le secteur de l'après-midi, provient de la région du "bulge" qui, antérieurement

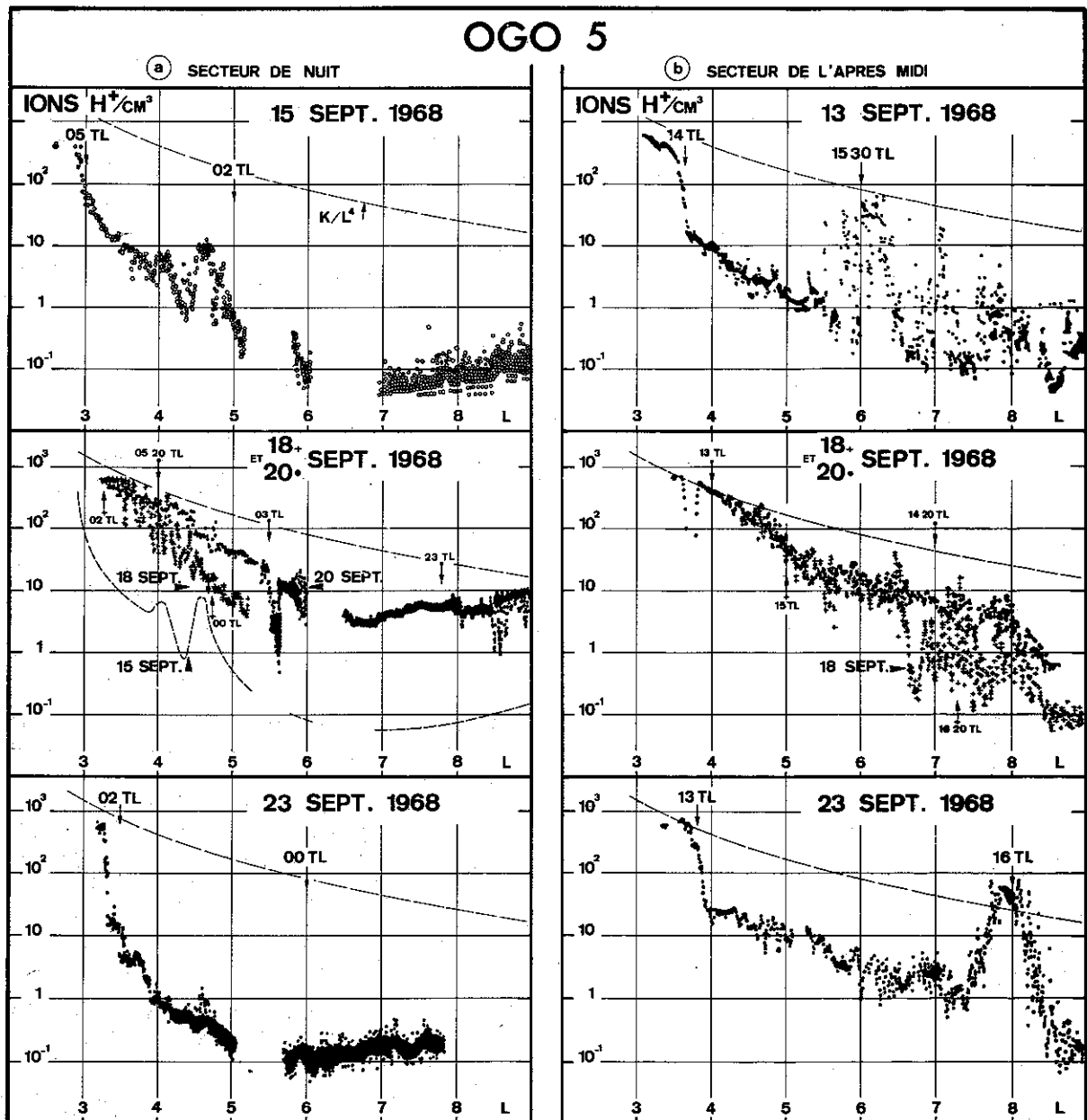


Fig. 3

Profils de densité en ions H^+ mesurés par OGO 5 :

- a) dans le secteur de nuit,
- b) dans le secteur de l'après-midi.

La courbe K/L^4 tracée sur chaque diagramme (voir texte) sert de référence.

à la perturbation, était en corotation. A ce plasma s'ajoute d'ailleurs celui d'origine ionosphérique qui s'accumule dans la région de faible densité du côté diurne de la Terre.

Malgré ces différences, on constate une réelle similitude dans l'évolution des profils de nuit et de l'après-midi. En effet, une plasmopause de période perturbée caractérisée par un gradient aigu de densité, s'établit le 13 septembre à $L_p = 3,7$ dans le secteur 14 TL. Puis, au cours de la période de recouvrement magnétique, la "plasmatrough" se remplit progressivement de plasma d'autant plus vite que L est plus faible comme le mettent en évidence les profils des 18 et 20 septembre. La position de la plasmopause devient alors difficile à localiser, bien que le 18 septembre après plus de 24 heures de calme magnétique ($K_p < 1^\circ$) un gradient de densité pouvant lui correspondre est observé à $L_p = 6,7$. Le 23 septembre une nouvelle plasmopause de période perturbée se forme à $L_p = 3,9$ dans le secteur 13 TL en relation avec l'augmentation de l'activité magnétique.

En résumé, ces observations montrent qu'en période de recouvrement magnétique le gradient aigu de densité définissant la plasmopause disparaît du moins tant que le remplissage de la région de

transition reste partiel. Elles sont à rapprocher de celles faites le 13 juillet 1966 par OGO 3 lors de la phase de recouvrement de l'orage du 9 juillet [Taylor et al., 1968].

III — Variations de la position de la plasmopause dans le secteur 01 TL

Sur les enregistrements *TBF* de satellites à orbite polaire, tels que OGO 4, la traversée de la plasmopause peut être identifiée soit par une très rapide diminution du taux d'occurrence des sifflements provenant de l'hémisphère opposé, soit par une brusque apparition ou variation de l'activité des bruits *TBF* en fonction de la latitude [Carpenter et al., 1968 ; Taylor et al., 1969]. Les figures 4 et 5 montrent quelques spectres obtenus les 20 et 23 septembre 1968 à la station de télémesure de Byrd ; ils sont relatifs à des passages successifs d'OGO 4 dans le secteur ~ 01 TL. Sur la plupart d'entre eux, on observe une très nette apparition ou modification des bruits *TBF*, en général accompagnée d'une disparition presque totale des sifflements, pour une valeur de L repérée par un astérisque.

En période d'activité magnétique accrue — c'est le cas du 23 septembre — ces brusques variations

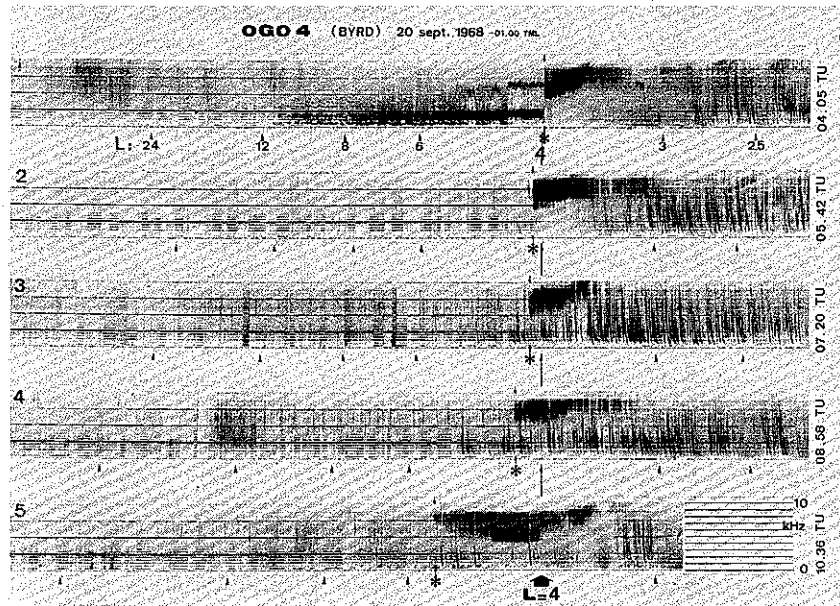


Fig. 4

Spectres *TBF* obtenus le 20 septembre 1968 par OGO 4 lors de cinq passages consécutifs du satellite dans le méridien ~ 01 TL. Les instants TU à $L = 4$ sont indiqués à droite de la figure. La traversée probable de la plasmopause est signalée par un astérisque (*).

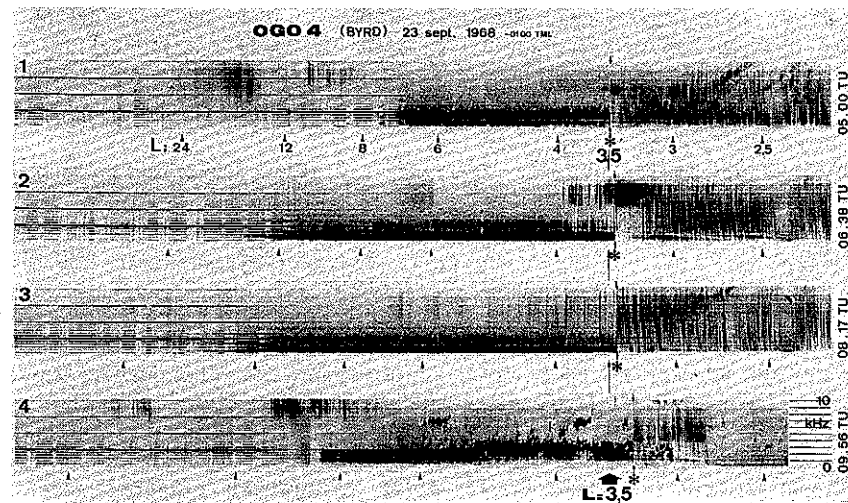


Fig. 5

Spectres *TBF* obtenus par OGO 4 le 23 septembre 1968, jour magnétiquement agité.

d'occurrence marquent très certainement la traversée, L_P , de la plasmopause. Nous en voyons d'ailleurs la confirmation dans la comparaison des résultats fournis quasi-simultanément par OGO 4 et OGO 5 dans des secteurs de temps locaux voisins les 15 et 23 septembre (figures 2 et 6) :

— le 15 septembre

$$\text{OGO 4} \rightarrow L_P = 3,35$$

dans le secteur 0130 *TL* à 1431 *TU*,

$$\text{OGO 5} \rightarrow L_P = 3,5$$

dans le secteur 04 *TL* à 1530 *TU* ;

— le 23 septembre

$$\text{OGO 4} \rightarrow L_P = 3,15$$

dans le secteur 0030 *TL* à 0956 *TU*,

$$\text{OGO 5} \rightarrow L_P = 3,3$$

dans le secteur 0230 *TL* à 1033 *TU*.

Par contre, on peut se demander quelle est la signification de ces brusques variations en période de recouvrement magnétique alors que le gradient aigu de densité caractérisant la plasmopause tend à disparaître, au moins temporairement, comme nous l'avons vu précédemment. Néanmoins nous continuerons à désigner par L_P la valeur de L pour laquelle se produisent ces variations mais en n'ignorant pas l'incertitude qui demeure sur la signification exacte de cette frontière. Nous verrons au paragraphe IV.2 qu'il pourrait s'agir de la limite de la plasmasphère uniformément remplie et dont le bord serait marqué, en phase de recouvrement, par un ou plusieurs gradients de densité de faible amplitude.

Nous la désignerons par le terme de plasmopause "instantanée".

Les valeurs de L_P , ainsi déduites des données d'OGO 4 pour la période du 14 au 24 septembre 1968, sont portées sur la figure 6 en fonction du temps *TU*. Bien qu'au cours de cette période, OGO 4 se déplaçait approximativement dans le plan 01-13 *TL* (± 1 h), les données reproduites ici sont celles relatives au secteur ~ 01 *TL*. Les différents symboles correspondent aux différentes stations de télémessure : Winkfield en Angleterre, Rosman en Caroline du Nord, Ulaska en Alaska et Byrd en Antarctique. L'échelle des L est linéaire en $1/L^2$ de façon à mettre en évidence un taux constant de déplacement de la plasmopause pour une valeur donnée de la composante est-ouest du champ électrique de convection magnétosphérique. Enfin, les variations de l'indice magnétique *AE* de l'électrojet auroral sont également représentées en fonction du temps *TU*.

Cette figure montre que le rayon moyen de la plasmasphère dans le secteur 00-02 *TL*, minimum au moment du maximum de la perturbation magnétique du 13 septembre, croît régulièrement au cours de la période de recouvrement à un taux de 0,25 R_E /jour : la valeur moyenne de L_P , égale à 3,25 environ le 14 septembre, est de l'ordre de 5 le 21. Mais, à cette variation régulière, se superposent de rapides et importantes fluctuations, étroitement associées aux brèves recrudescences de l'activité magnétique qui se produisent notamment les 19 et 20 septembre. Ces observations confirment les résultats obtenus par Carpenter et Stone [1967] au moyen des sifflements et par Chappell et al. [1970 a] à

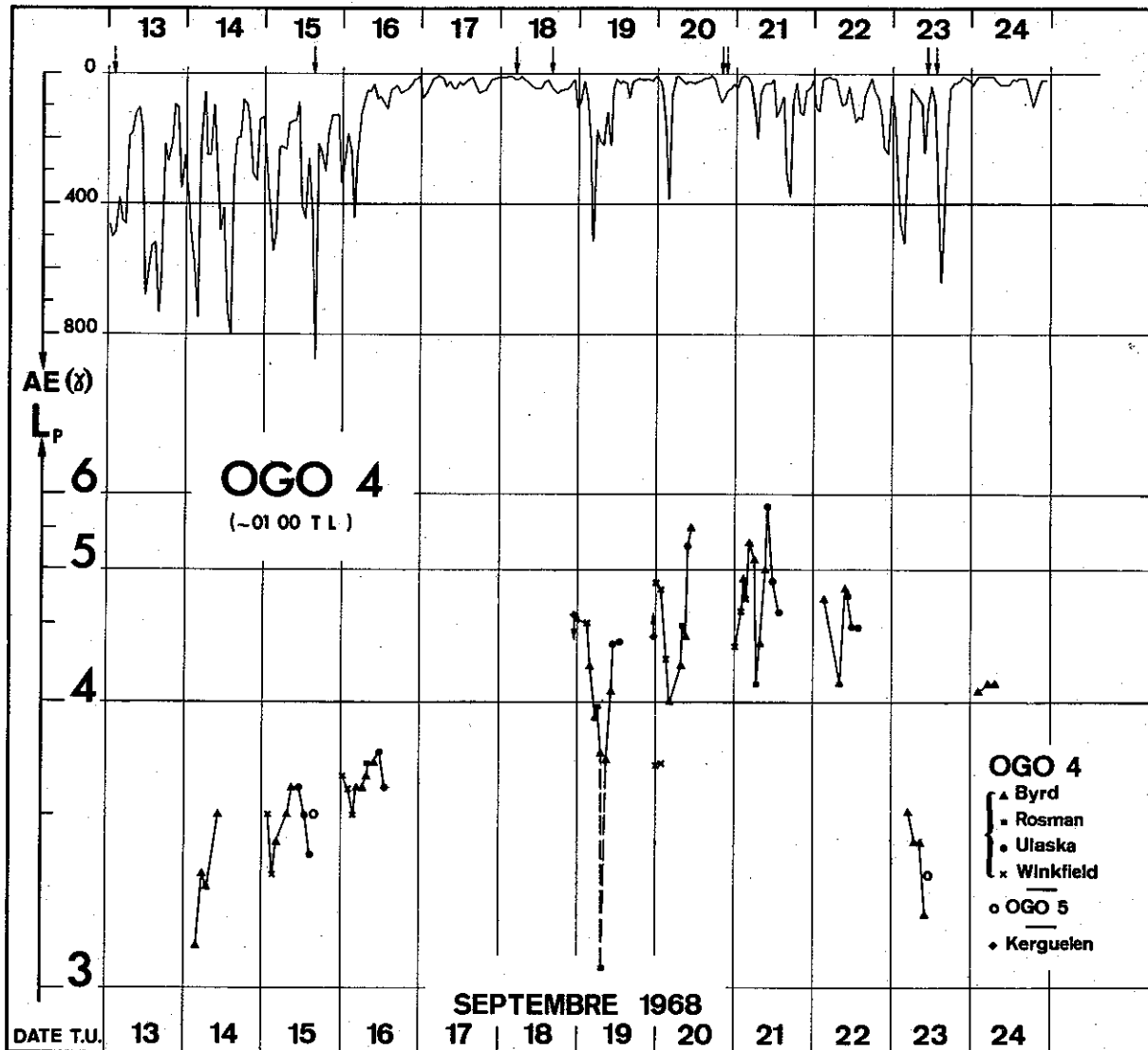


Fig. 6

Variations de l'indice magnétique AE de l'électrojet auroral et de la position L_p de la plasmopause dans le méridien ~ 01 TL, déduite des données d'OGO 4. Les flèches verticales tracées sur l'échelle supérieure indiquent, comme en figure 1, les instants de passage du satellite OGO 5 à travers la limite de la plasmasphère.

partir des données d'OGO 5. En effet, pour les premiers, la plasmopause et le plasma magnétosphérique au voisinage du minuit local dérivent de façon appréciable vers la Terre lors des sous-orages ; pour les seconds, c'est dans ce secteur de temps local que la plasmopause réagit le plus rapidement aux variations de l'activité magnétique.

C'est ainsi que le 19 septembre, la valeur de L_p égale à 4,5 à 0250 TU commence à décroître entre 03 et 04 TU alors que, simultanément, l'indice AE augmente rapidement. Puis elle atteint un minimum à 0730 TU quand l'activité magnétique amorce une

décroissance. Il demeure une certaine incertitude sur la position de ce minimum ; en effet, dans le cas présent, la valeur de $L_p = 3,05$ correspond au dernier sifflement observé alors que la plupart des autres valeurs de L_p portées sur la figure 6 correspondent à une brusque variation des bruits TBF , celle-ci ne coïncidant pas toujours avec la rapide diminution du taux d'occurrence des sifflements. A 11 TU, alors que la période d'agitation magnétique vient de prendre fin, L_p est de nouveau égal à 4,35.

Le 20 septembre, un comportement semblable

est encore observé ; mais l'agitation magnétique qui se manifeste entre 02 et 04 TU est plus faible et corrélativement l'amplitude des variations de L_P est également plus faible. En outre, pour les passages du satellite qui ont lieu respectivement le 19 septembre, de 2343 à 2354 TU, et le 20 septembre, de 0118 à 0132 TU, on observe sur les spectres TBF deux transitions très nettes dans l'activité des bruits, à des distances $L = 3,7$ et $4,8$, comme si le bord de la plasmasphère était limité par un double gradient de densité. Les données des sifflements reçus simultanément dans un secteur de temps local voisin (cf paragraphe IV-2) confirmeront cette interprétation.

Enfin, le 23 septembre, la plasmopause se rapproche de nouveau de la Terre en liaison étroite avec l'augmentation relativement importante de l'activité magnétique.

IV – Structure complexe du bord de la plasmasphère le 20 septembre 1968.

Les sifflements radioélectriques reçus à Kerguelen le 20 septembre 1968 ont des spectres fréquence-temps particulièrement complexes comme le met en évidence l'exemple de la figure 7. Ils sont le reflet d'une structure irrégulière et variable de la région équatoriale vue de cette station, structure que nous allons tout d'abord étudier. Les données des sifflements reçus le même jour à Byrd permettront ensuite de comparer le comportement de secteurs de la magnétosphère séparés par 150° de longitude.

IV.1 – Remarques préliminaires sur la méthode d'analyse des sifflements

La plupart des sifflements reçus à Kerguelen les 19 et 20 septembre comportent deux ou trois groupes distincts de composantes montrant la présence de deux ou trois gradients de densité électronique à l'intérieur de la région magnétosphérique équatoriale vue de la station d'observation. Toutefois, les temps de transit des diverses composantes sont du même ordre de grandeur ce qui justifie l'emploi d'un seul modèle de distribution électronique le long des lignes de force dans le calcul des densités équatoriales N_E ; celles-ci étant toutes caractéristiques de la plasmasphère, nous avons utilisé le modèle d'équilibre diffusif –ou modèle DE– préconisé par Angérami [1966]. Les temps de propagation t_n relatifs aux fréquences de "nose" f_n ont été déterminés soit par mesure directe, soit par extrapolation. Dans tous les cas, les résultats ainsi obtenus ont été comparés à ceux fournis par des abaques construits en faisant l'hypothèse d'un modèle DE et d'un champ dipolaire. Certains de ces résultats ont, par ailleurs, été vérifiés à l'aide des sifflements enregistrés à Sogra, conjugué magnétique de Kerguelen.

En ce qui concerne les données de Byrd Station, seule la position des gradients de densité a pu être déduite des sifflements disponibles.

IV.2 – Résultats déduits des données de Kerguelen

Les valeurs de la densité électronique N_E obtenues à différents instants de la période du 18 au 20 septembre et connues avec une précision de l'ordre de 10 % sont portées, en fonction du paramètre L , sur les figures 8 et 9. Une courbe K/L^4 , normalisée

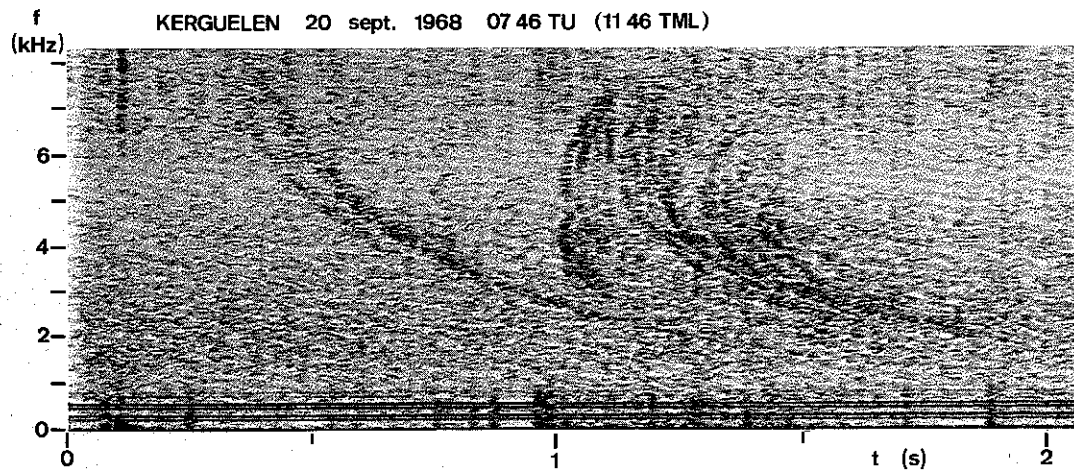


Fig. 7

Exemple de spectrogramme de "knee-whistler" reçu à Kerguelen le 20 septembre 1968.

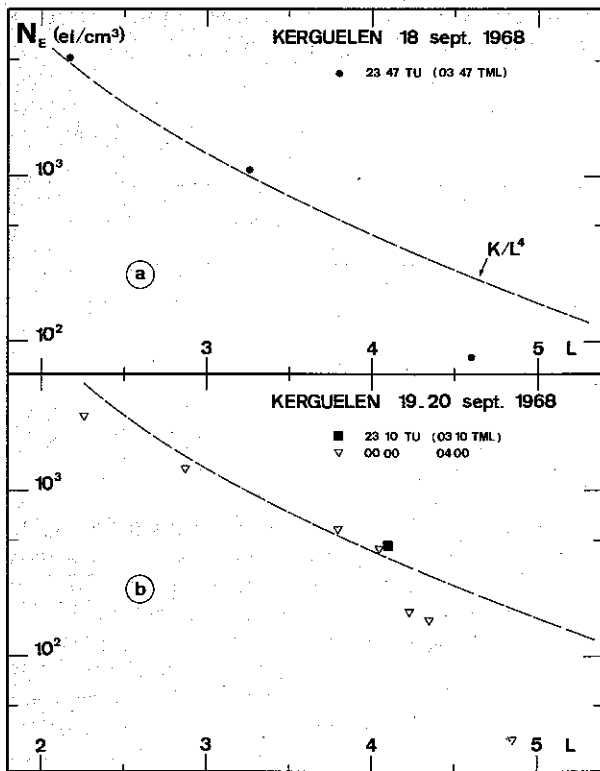


Fig. 8

Densités électroniques équatoriales N_E , en fonction de L , déduites de l'analyse de sifflements reçus à Kerguelen les 18 et 19 septembre 1968.

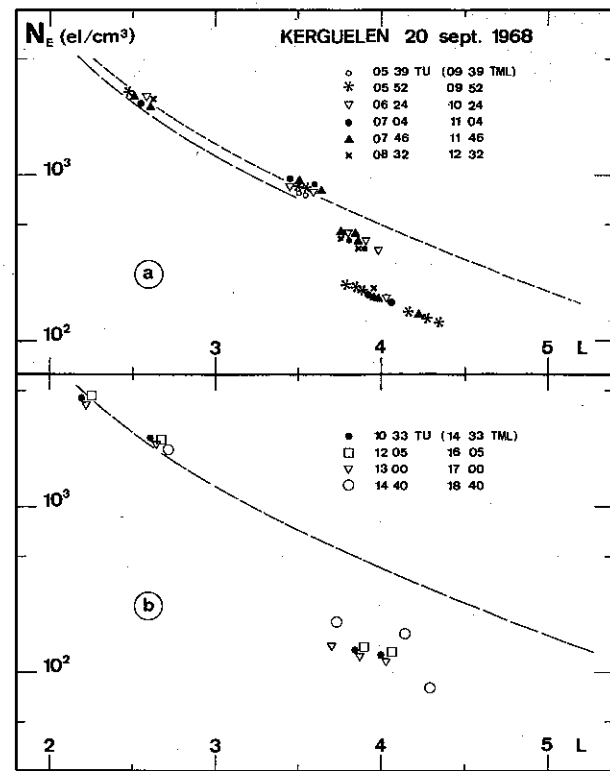


Fig. 9

Densités électroniques N_E , en fonction de L , le 20 septembre 1968.

à la valeur de 420 ions/cm³ obtenue les 18 et 20 septembre par OGO 5 à $L = 4$, est tracée comme référence.

L'ensemble des données montre qu'à l'intérieur de la plasmasphère, jusqu'à des distances $L \sim 3,5$, les valeurs de la densité électronique sont particulièrement stables. Il n'en est pas de même au voisinage de $L = 4$ où existe au moins un gradient radial de densité, faible comparé à celui caractéristique de la plasmopause des périodes perturbées.

Le 18 septembre à 2347 TU (\sim 0347 TML) ce gradient se situe à une distance $L \leq 4,6$ (figure 8a). Or, le 19 septembre à 0240 TU —juste avant le début d'une première période de sous-orage— les données d'OGO 4 fournissent une valeur de $L_p = 4,5$ dans le secteur 01 TL (figure 6). Ces distances sont du même ordre de grandeur et on peut penser qu'à la plasmopause instantanée identifiée par OGO 4 correspond un faible gradient de densité semblable à celui décelé sur le profil électronique. Cette hypothèse semble confirmée par les observations faites le 20 septembre au voisinage de 00 TU. Comme le montre la figure 8b, il existe alors dans le méridien

04 TML un double gradient de densité dont les caractéristiques sont les suivantes :

1^{er} gradient :

$$4,05 < L_1 < 4,2 \quad P_1 = 1,35$$

2^{ème} gradient :

$$4,4 < L_2 < 4,8 \quad P_2 = 5,15$$

Or, nous avons signalé au paragraphe III l'existence dans le secteur \sim 01 TL, à des distances $L = 3,7$ et $L = 4,8$, de transitions très nettes dans l'activité des phénomènes TBF enregistrés sur OGO 4 les 19 et 20 septembre à 2350 TU et 0130 TU respectivement. Là encore, on peut penser que ces transitions correspondent à de faibles gradients de densité semblables à ceux observés quasi-simultanément sur le profil électronique relatif à un secteur de temps local voisin.

Le 20 septembre à partir de 0520 TU, soit une heure environ après la fin d'une brève période d'agitation magnétique, et jusque 0832 TU au moins, les spectres (f, t) des sifflements sont très complexes et variables. On peut cependant déduire des plus

nets les données portées sur la figure 9a qui mettent clairement en évidence l'existence dans le secteur 0950-1230 TML d'un, puis de deux gradients

de densité dont les caractéristiques sont indiquées dans le tableau I :

Tableau I

Heure TU	Position du ou des gradients de densité	$P = (N_E)_i / (N_E)_e$
0552	$3,55 < L < 3,8$	$P = 3,6$
0624 \	$3,6 < L_1 < 3,8$ $L_2 = 4,0$	$P_1 = 1,85$ $P_2 = 2$
0704	$3,6 < L_1 < 3,8$ $L_2 = 3,9$	$P_1 = 1,95$ $P_2 = 1,9$
0746	$3,6 < L_1 < 3,8$ $L_2 = 3,9$	$P_1 = 1,95$ $P_2 = 1,9$
0832	$L_1 < 3,75$ $3,9 < L_2 < 4,0$	$P_2 = 1,8$

A 0552 TU (0952 TML), un seul gradient est observé ; il est plus proche de la Terre que le premier des deux gradients décelés à 00 TU (04 TML) mais la valeur de P qui le caractérise est presque trois fois plus grande. Puis, à partir de 0624 TU (1024 TML) il fait place à deux discontinuités très proches l'une de l'autre, qui subsistent au moins jusqu'à 0832 TU (1232 TML), la première occupant la position du gradient unique observé à 0552 TU. La figure 10 où ont été portées, dans un diagramme L - temps magnétique local-, les positions équatoriales de ces différents gradients met clairement en évidence cette situation.

Lorsque Kerguelen pénètre ensuite dans le secteur de l'après-midi, de 1030 TU (1430 TML) à 13 TU (17 TML), il n'est plus possible -faute de données entre $L = 2,8$ et $L = 3,6$ - de fixer la position exacte du gradient de densité qui existe cependant, comme le montre la figure 9b. On peut seulement dire qu'il se situe à une distance $L \leq 3,7$ et que la seconde discontinuité, observée à $L = 3,9$ jusqu'à 0832 TU, n'existe plus.

A 1440 TU, dans le secteur du crépuscule, il semble que le gradient unique détecté dans le secteur de l'après-midi fasse de nouveau place à deux gradients de densité.

Ainsi, le 20 septembre, la structure de la région équatoriale vue de Kerguelen et correspondant au bord de la plasmasphère est irrégulière et variable ; elle est notamment caractérisée par des effets de double gradient de densité. Un très bel exemple d'un tel effet, également observé en période de recouvrement d'une faible perturbation magnétique, a récemment été relaté par Chappell et al. [1971].

Il est intéressant de noter que du cœur fut enregistré dans la bande 1-3 kHz de 0950 TML à 1320 TML environ, c'est-à-dire grossièrement pendant l'intervalle de temps où les deux gradients de densité, très proches l'un de l'autre, furent observés

(figure 10). Par ailleurs, les composantes des sifflements se propageant juste au-delà de ces gradients déclenchèrent fréquemment des émissions TBF de fréquence supérieure à la fréquence de "nose" des composantes. Selon Carpenter [1963], ces émissions sont souvent observées juste à l'extérieur de la plasmopause et, pour Dowden [1971], elles sont engendrées et se propagent également au voisinage de la plasmopause mais généralement à l'intérieur de la plasmasphère. Nos observations semblent indiquer que des conditions favorables au mécanisme de déclenchement de ces émissions sont réalisées juste au-delà de gradients de densité même si ces derniers sont faibles.

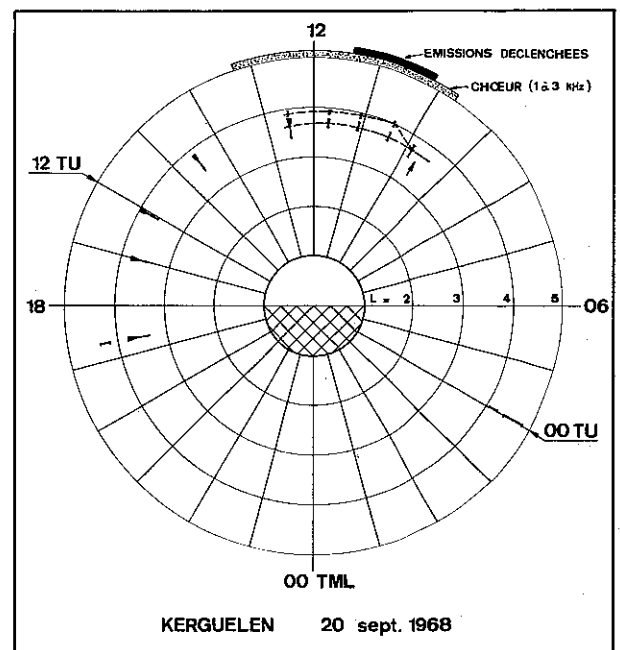


Fig. 10

Représentation dans un diagramme (L - Temps Magnétique Local) de la position équatoriale des gradients de densité électronique observés le 20 septembre depuis Kerguelen.

IV.3 – Résultats déduits des données de Byrd

Les sifflements enregistrés le 20 septembre à Byrd, à partir de 11 TU, montrent qu'il n'existe dans la région équatoriale vue de cette station et s'étendant entre $L = 3,6$ et $L = 4,8$ qu'un seul gradient de densité. Sa position, voisine de $L = 4,5$, est pratiquement indépendante de l'heure locale comme le met en évidence la figure 11. Bien que relativement faible, ce gradient peut, là encore, être assimilé à la plasmopause instantanée. En effet, lorsque Byrd passe à 07 TU dans le secteur 01 TML, la valeur de L_p déduite simultanément des données d'OGO 4 est de 4,2, position qui est tout à fait compatible, compte tenu de la forme équatoriale de la plasmopause, avec celle du gradient radial détecté à Byrd au moyen des sifflements.

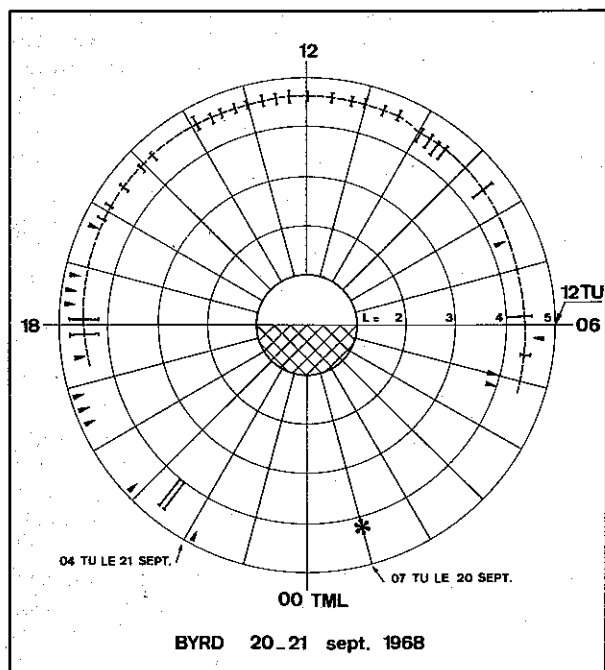


Fig. 11

Représentation dans un diagramme ($L - TML$) de la position équatoriale des gradients de densité électronique observés le 20 septembre depuis Byrd Station. L'astérisque (*) indique la position de la plasmopause détectée par OGO 4 dans le secteur $\sim 01 TL$ lorsque Byrd passe dans ce méridien à 07 TU.

Ces résultats diffèrent de ceux déduits des données de Kerguelen ce qui prouve que les régions magnétosphériques équatoriales vues de ces deux stations, séparées par environ 150° de longitude, sont indépendantes l'une de l'autre et que les processus de convection qui peuvent les affecter sont de nature localisée dans l'espace et le temps.

Cette conclusion est confirmée par les observations faites par OGO 5 le 20 septembre à $\sim 2020 TU$

et $\sim 2130 TU$ (figures 1 et 6), respectivement dans les secteurs de nuit et de l'après-midi (figure 2). Les profils ioniques correspondants (figures 3a et 3b) présentent, en effet, une cassure nette — mais de faible amplitude — à $L \approx 4,5$ dans le méridien $\sim 05 TL$ et à $L \approx 4,75$ dans le méridien 1320 TL.

V – Synthèse et discussion des résultats

V.1 – Influence de l'activité magnétique des 19 et 20 septembre 1968 sur la structure équatoriale de la plasmaspère : prévisions d'un modèle de convection et résultats expérimentaux

L'analyse des sifflements reçus à Kerguelen montre que, le 20 septembre 1968, la structure de la région équatoriale vue de cette station est complexe contrairement à celle de la zone explorée à partir de Byrd Station. Il est vraisemblable que ce comportement localisé soit lié à l'activité récurrente de sous-orage qui eut lieu les 19 et 20 septembre pendant la période de recouvrement magnétique de la perturbation du 13 septembre. Pour tenter de le mettre en évidence, nous allons utiliser un modèle de convection semblable à celui proposé en 1968 par Kavanagh et al. et repris depuis par Chappell et al. [1970 b].

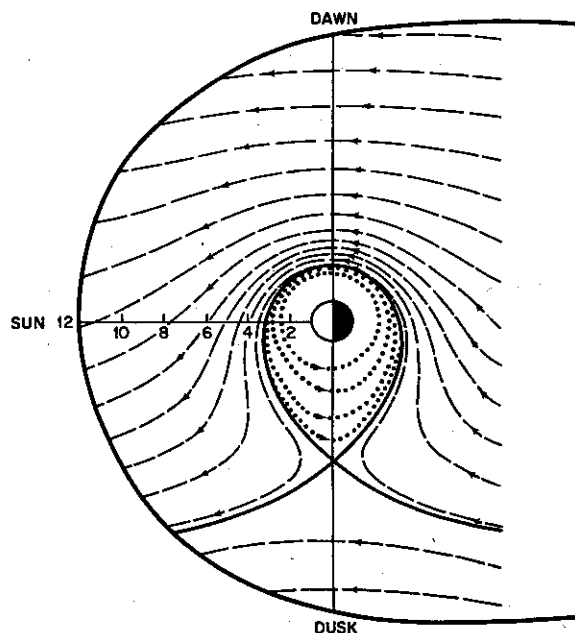


Fig. 12

Diagramme d'écoulement équatorial du plasma magnétosphérique d'après Kavanagh et al. [1968]. Les pointillés montrent les directions d'écoulement des tubes de flux dominés par la rotation de la Terre à l'intérieur de la plasmaspère ; les traits discontinus, celles des tubes de flux dominés par la convection.

Pour un champ électrique donné à travers la queue de la magnétosphère, ce modèle est représenté par un diagramme d'écoulement équatorial tel que celui de la figure 12. La plasmopause —courbe fermée en trait continu— y apparaît comme la limite entre les tubes de flux dont le mouvement est dominé soit par la rotation de la Terre, soit par la convection magnétosphérique. Les premiers restent constamment fermés et conservent donc leur plasma dont la distribution est celle d'un équilibre diffusif ; les seconds sont transportés par convection vers la magnétopause où ils se vident. Il est bien évident que la forme équatoriale de la plasmasphère et la direction des lignes d'écoulement du plasma ne peuvent être considérées que d'une manière qualitative car notamment les effets de la conductivité électrique de l'ionosphère, très élevée du côté diurne de la Terre, ne sont pas pris en considération dans ce modèle.

Lorsque l'activité magnétique varie, il en est de même de l'intensité du champ de convection et corrélativement les dimensions de la plasmopause se modifient comme l'indique la figure 13 due à Chappell et al. [1971]. Elle a été obtenue en superposant les diagrammes d'écoulement équatorial

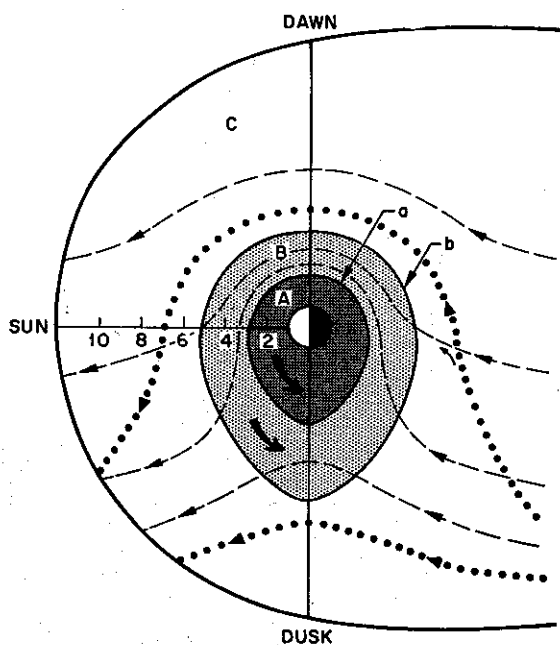


Fig. 13

Superposition de deux diagrammes d'écoulement équatorial correspondant à deux valeurs distinctes du champ électrique de convection à travers la queue de la magnétosphère [d'après Chappell et al., 1971]. La région A et les traits discontinus représentent les directions d'écoulement en corotation et en convection pour une période magnétiquement active. La région A + B et les pointillés sont relatifs à une période magnétiquement calme.

relatifs à des valeurs du champ de convection de l'ordre de 0,2 mV/m pour une période magnétique calme et de 0,6 mV/m pour une période magnétique perturbée. Les courbes b et a représentent les limites respectives des régions dominées par la corotation c'est-à-dire les positions correspondantes de la plasmopause. Ces diagrammes sont relatifs à deux situations magnétiques différentes mais stables. En période de variation de l'activité magnétique, la configuration de la plasmopause est, en réalité, dans un état dynamique souvent très complexe [Grébowsky, 1970, 1971].

C'est en adoptant un tel modèle à champ variable et en utilisant le maximum d'informations expérimentales que nous avons tracé les schémas de la figure 14 qui donnent une image de la structure équatoriale de la plasmasphère avant, pendant et après les brèves périodes d'activité magnétique des 19 et 20 septembre. Les instants considérés ont été choisis en fonction des données disponibles. Les positions du bord de la plasmasphère fournies par OGO 4, dans le secteur 01 TL, sont indiquées par un astérisque et celles déduites de l'analyse des sifflements par un point.

Le 19 septembre à 0240 TU, juste avant le début de la première période de sous-orage, OGO 4 traverse la plasmopause instantanée à $L_P = 4,5$. La situation magnétique au cours des 24 heures qui précèdent étant particulièrement calme et stable, la limite de la plasmasphère dans le plan équatorial peut être schématisée par la courbe de la figure 14a.

Puis débute une période d'agitation magnétique qui se manifeste sur les magnétogrammes de Byrd et de Great Whale River par une succession de baies négatives relativement importantes et qui s'achève vers 1030 TU (figure 15). Lorsque l'activité magnétique et par suite le champ de convection augmentent, les tubes de flux dans le secteur de nuit sont entraînés vers la Terre [Chappell et al., 1972] comme l'indiquent les petites flèches représentées figure 14b et le rayon de la plasmasphère diminue ; il atteint une valeur minimum à 0730 TU dans le plan 01 TL. Ce mouvement vers la Terre des tubes de flux et de la plasmopause ne peut pas se produire dans le secteur de jour. En fait, en raison de l'augmentation de la convection magnétosphérique, une partie des tubes de flux est drainée, dans ce secteur, vers la magnétopause ce qui tend à éroder le bord de la plasmasphère.

Ensuite, lorsque l'activité magnétique décroît, il y a relâchement de la convection magnétosphérique et la plasmopause se met alors à tourner avec la Terre. Il en résulte une augmentation immédiate de son rayon dans le secteur de nuit ; à 1230 TU, soit deux heures après la fin de la période d'activité magnétique, L_P est égal à 4,3 dans le plan 01 TL (figure 14c).

19 septembre 1968

20 septembre 1968

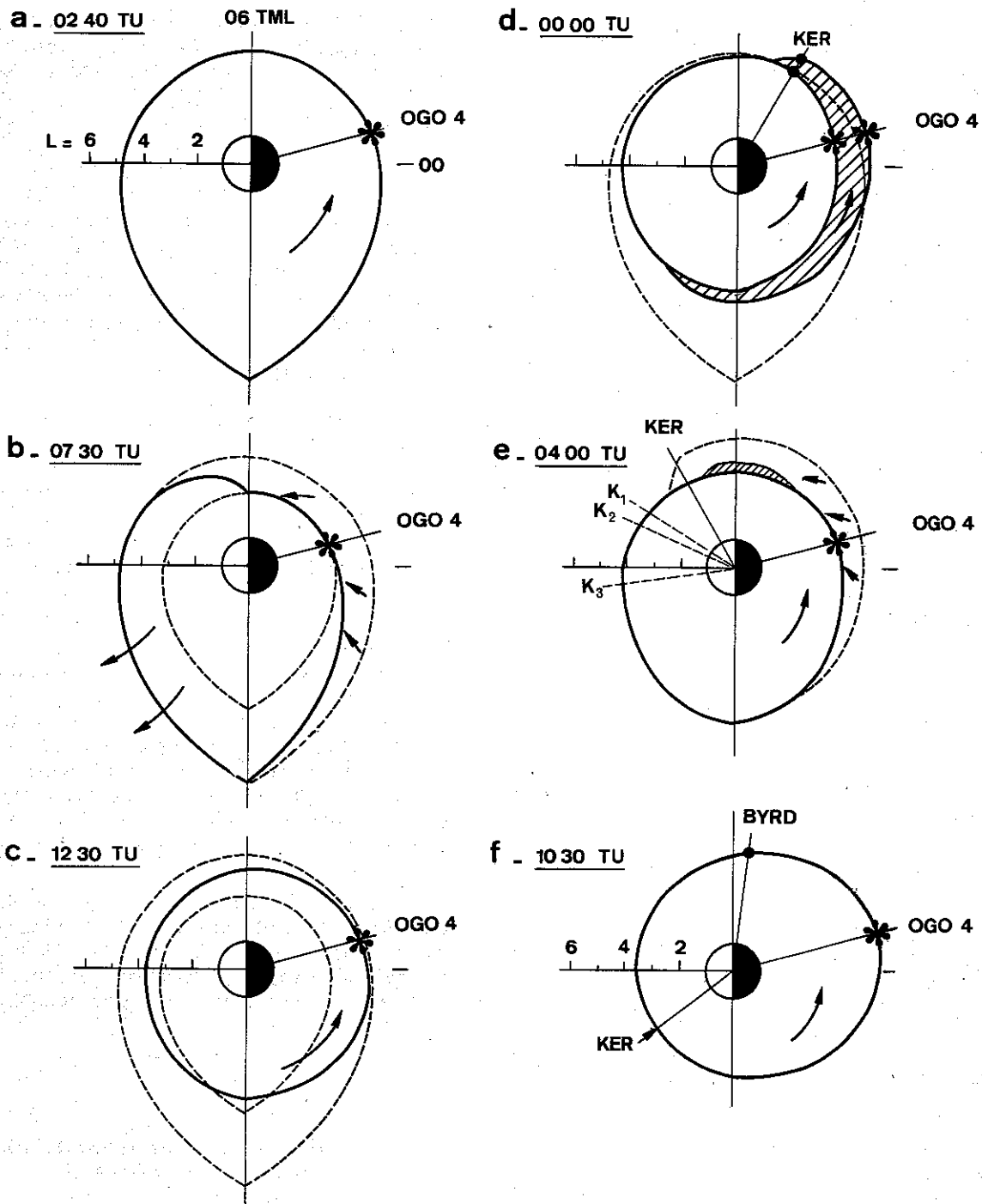


Fig. 14

Schémas montrant les variations de la forme et des dimensions de la plasmasphère liées aux brèves recrudescences de l'activité magnétique qui se sont produites successivement les 19 et 20 septembre 1968 :

- a) avant, b) pendant, c) après la période d'activité du 19 septembre ;
 d) avant, e) pendant, f) après la période d'activité du 20 septembre.

Simultanément, une partie des tubes de flux situés à l'extérieur de la plasmasphère et qui, initialement, étaient entraînés par convection vers la magnétopause, ont un mouvement qui est alors dominé par la corotation. Ils se remplissent partiellement de plasma ionosphérique du côté diurne de la Terre de sorte que, lorsqu'ils pénètrent dans le secteur de nuit, ils forment une zone -hachurée sur la figure 14d- de densité intermédiaire entre celles de la plasmasphère et de la région située au-delà. On peut alors s'attendre à observer dans cette région des effets de double gradient de densité comme ce fut précisément le cas à Kerguelen et sur OGO 4 le 20 septembre 1968 à 00 TU, respectivement dans les secteurs 04 TML et 01 TML.

Si l'activité magnétique continuait à décroître ou restait stable, les tubes de flux de cette région intermédiaire achèveraient de se remplir lorsque, par corotation, ils parviendraient de nouveau du côté diurne de la Terre. Mais une seconde période d'agitation magnétique, toutefois moins importante que la précédente, a lieu le 20 septembre entre 0215 TU et 0425 TU environ (figure 15). Les tubes de flux situés dans le secteur de nuit sont alors entraînés vers la Terre comme l'indiquent les petites flèches de la figure 14e, ce qui doit avoir pour effet de faire disparaître totalement ou partiellement la région de densité intermédiaire. C'est ce que les données d'OGO 4, obtenues à 04 TU, tendent à prouver.

Puis, lorsque cesse la période d'activité magnétique, l'ensemble de la plasmopause tourne avec la Terre. Les données disponibles à 1030 TU (figure 14f) dans

les secteurs 01, 0530 et 1430 TML et fournies respectivement par OGO 4 et les sifflements reçus à Byrd et à Kerguelen confirment de façon évidente ce mouvement de corotation.

Il reste à interpréter qualitativement les deux faibles gradients de densité, très proches l'un de l'autre, détectés le 20 septembre 1968 à Kerguelen dans le secteur $\sim 10-13$ TML. Nous avons vu qu'à 0552 TU un seul gradient, localisé dans le plan équatorial entre $L = 3,55$ et $L = 3,8$, est observé à cette station qui se trouve alors dans le plan K_1 de la figure 14e. Puis de 0624 TU à 0832 TU au moins, lorsque Kerguelen se déplace entre les plans K_2 et K_3 , le profil équatorial du bord de la plasmasphère présente deux faibles discontinuités, la première occupant la position du précédent gradient. Cette structure peut s'expliquer par de lentes dérives radiales du plasma au voisinage du bord de la plasmasphère, mais également par un déplacement en azimuth, à une vitesse supérieure à celle de rotation de la Terre, d'une étroite région de densité intermédiaire -hachurée sur la figure 14e- qui subsisterait dans le secteur 06 TML après la brève période d'activité magnétique du 20 septembre. On peut alors se demander s'il n'existe pas quelque lien entre l'occurrence de choc à Kerguelen dans le secteur 0950-1320 TML et le passage, dans la région équatoriale vue de cette station, de cette structure localisée sur le bord de la plasmasphère à $L \sim 3,7$.

Enfin, le modèle proposé montre, conformément aux résultats expérimentaux, que les processus de convection liés aux brèves recrudescences de l'activité magnétique sont de nature localisée ; ils affectent différemment des secteurs de la plasmasphère séparés en longitude comme ceux vus de Kerguelen et de Byrd. On voit alors l'importance d'un réseau longitudinal de réception des sifflements pour étudier ces processus.

En résumé, on peut conclure que la structure irrégulière du bord équatorial de la plasmasphère vue de Kerguelen le 20 septembre 1968 résulte de l'activité magnétique récurrente qui eut lieu les 19 et 20 septembre alors que la magnétosphère était en état de recouvrement magnétique.

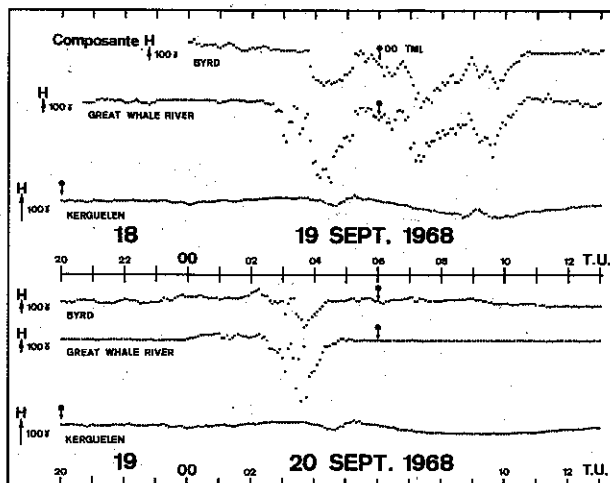


Fig. 15

Magnétogrammes (H) enregistrés à Byrd, Great Whale River -conjugué magnétique de Byrd- et Kerguelen les 18-19 et 19-20 septembre 1968 de 20 TU à 13 TU. Le minuit magnétique local à chaque observatoire est repéré par le symbole (\clubsuit).

V.2 - Evolution du profil équatorial de la plasmasphère en période de recouvrement magnétique

Les profils équatoriaux de densité ionique ou électronique mesurés dans les secteurs de nuit et de jour au cours de la période du 13 au 23 septembre 1968 sont caractérisés par une très grande

diversité et variabilité. Ils ont déjà été présentés au début de cet exposé (figures 3, 8 et 9) et permettent de compléter la description de la dynamique de la plasmasphère du paragraphe précédent. Pour cela, nous avons schématisé figure 16 quelques-uns de ces profils obtenus dans le secteur de nuit aux instants repérés par une flèche verticale dans le diagramme des indices K_p .

Le profil relatif à l'instant t_0 représente celui d'une plasmasphère uniformément remplie jusqu'à des distances $L > 8$ après une longue période magnétiquement calme. Il va servir de référence pour décrire l'évolution du profil de la plasmasphère au cours de la période étudiée.

L'instant t_1 se situe le 13 septembre au moment du maximum de la perturbation magnétique. Le profil correspondant n'a pas été mesuré mais tracé en tenant compte des données d'OGO 4 obtenues le 14 septembre (figure 6), du profil ionique fourni par OGO 5 le 13 septembre dans le secteur de l'après-midi (figure 3b) et de la forme usuelle des profils obtenus dans le secteur de nuit en période perturbée [Chappell et al., 1970 a]. Il est caractérisé par un gradient très aigu de la densité de plasma localisé à une distance L relativement faible, de l'ordre de 3.

Le 15 septembre à l'instant t_2 , alors que l'activité magnétique commence à régresser, le profil ionique fourni par OGO 5 montre que les processus

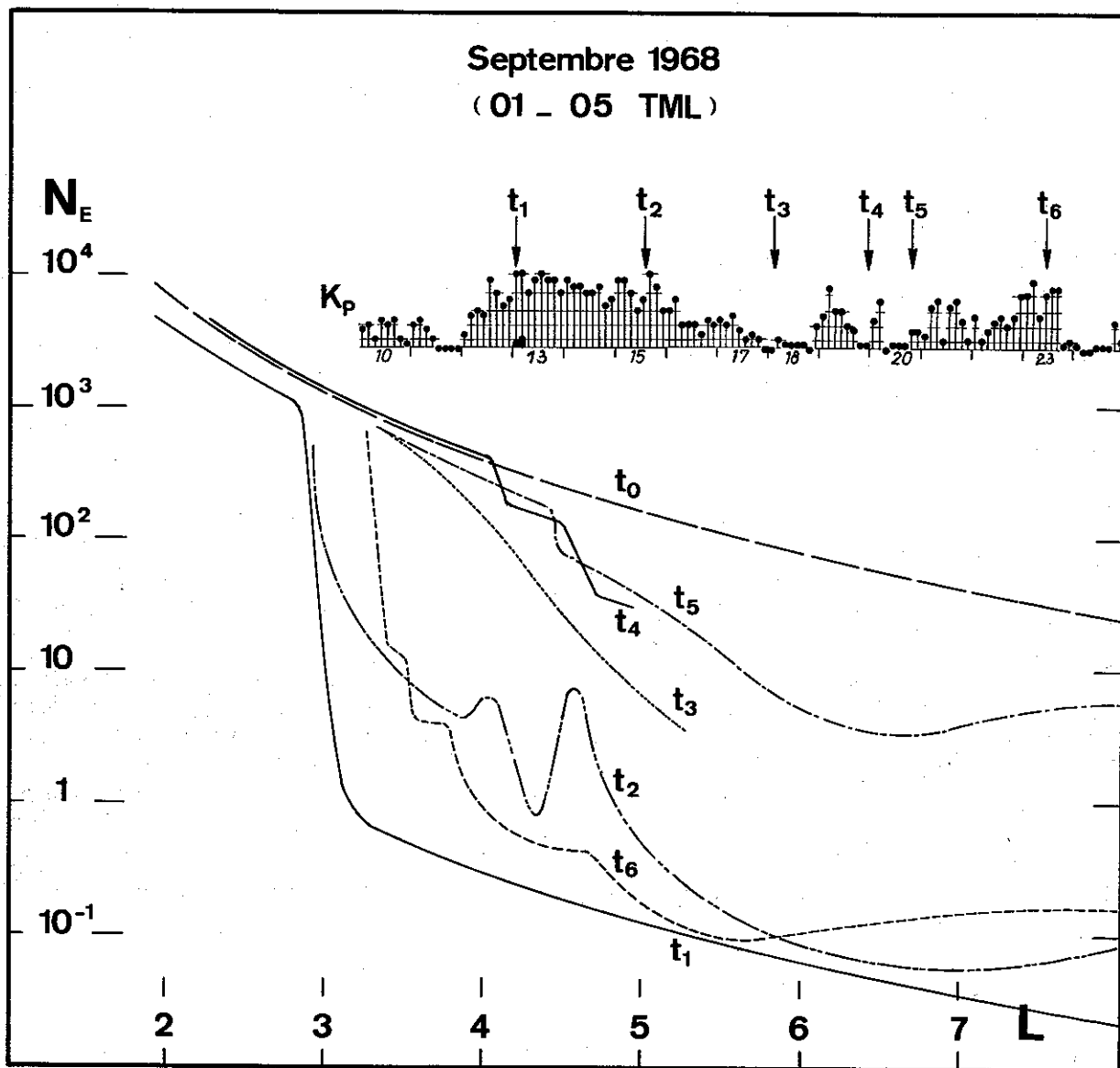


Fig. 16

Evolution du profil équatorial de la plasmasphère dans le secteur de nuit au cours de la période du 13 au 23 septembre 1968.

de convection responsables de l'établissement d'une plasmopause "perturbée" à $L = 3$ se relâchent. Bien que l'empreinte de cette plasmopause subsiste encore, la région de faible densité située entre $L = 3$ et $L \sim 5$ n'est plus dominée par ces processus. Les effets combinés du remplissage des tubes de flux du côté diurne de la Terre et de la corotation se traduisent alors dans cette région par une augmentation de la densité du plasma d'autant plus importante que la valeur de L est plus faible. Les fluctuations importantes de la densité qui existent entre $L = 4$ et $L = 5$ caractérisent vraisemblablement une masse de plasma, détachée de la plasmasphère dans le secteur de l'après-midi — telle que celle détectée par OGO 5 le 13 septembre, figure 3b— et qui est ensuite transportée par corotation dans le secteur de nuit lorsque l'activité magnétique décroît.

Les processus de recouvrement s'étendent ensuite progressivement à des régions de plus en plus éloignées de la Terre comme le montrent les profils ioniques des 18 et 20 septembre obtenus respectivement aux instants t_3 et t_5 . Corrélativement, le gradient de densité de la plasmopause devient de moins en moins prononcé. Ces résultats peuvent expliquer l'absence de gradient aigu de densité sur les nombreux profils déduits de l'analyse des Pc 1 [Kenney, Knafllich et Liemohn, 1968], micropulsations dont l'occurrence est maximum pendant la phase de recouvrement d'un orage magnétique.

Une activité de sous-orage comme celle qui a lieu le 19 septembre n'affecte pas profondément le profil équatorial de la plasmasphère ; elle se traduit dans la région en cours de remplissage, entre $L = 4$ et $L = 5$, par des effets de double gradient de densité comme le met en évidence le profil électronique obtenu le 20 septembre à l'instant t_4 .

Par contre, l'augmentation de l'activité magnétique qui se produit le 23 septembre est suffisante pour que, de nouveau, les processus de convection soient prédominants jusqu'à des distances L relativement faibles et entraînent l'établissement à $L_p = 3,3$ d'une plasmopause très bien définie, caractéristique des périodes perturbées ; le profil ionique relatif à l'instant t_6 en est une preuve évidente.

VI — Conclusion

Une plasmopause caractérisée par un gradient

aigu de densité s'établit à des distances L relativement faibles, de l'ordre de 3, lors des périodes magnétiquement agitées des 13 et 23 septembre 1968.

Pendant la phase de recouvrement de la perturbation du 13 septembre, la région de faible densité, située à l'extérieur de cette plasmopause et dont le mouvement du plasma est dominé par la rotation de la Terre, se remplit progressivement et d'autant plus vite que L est plus faible ; son profil équatorial est très variable et le gradient de densité définissant la plasmopause instantanée devient beaucoup moins prononcé qu'en période perturbée, du moins tant que le remplissage de cette région de transition reste incomplet.

Des effets de double gradient de densité apparaissent dans certains secteurs de cette région, en relation avec l'activité de sous-orage qui se produit le 19 septembre. La récurrence, le 20 septembre, d'une telle activité se traduit par une structure complexe mais localisée du bord de la plasmasphère.

Ces résultats, qu'il convient de confirmer et de préciser par de nouvelles études, montrent que l'image devenue usuelle d'une plasmopause caractérisée par un gradient aigu de densité n'est certainement pas réelle la plupart du temps en période de recouvrement magnétique ; il convient de décrire avec précaution la plasmasphère en état de recouvrement.

Remerciements

Ce travail a été réalisé grâce à l'appui de plusieurs organismes comprenant :

- le Centre National de la Recherche Scientifique (RCP 213) et l'Administration des Terres Australes et Antarctiques Françaises [Mlle Y. Corcuff, MM. P. Corcuff et J. Vigneron] ;
- le "National Aeronautics and Space Administration (contrats NGL-05-020-008 et NGR-05-020-288), l'"Office of Polar Programs of the National Science Foundation" (contrat GV-28840 X) et l'"Atmospheric Sciences Section of the National Science Foundation (contrats GA 18128 et GA 32590 X) [D.L. Carpenter] ;
- le "National Aeronautics and Space Administration" (contrat NAS 5-9092) [C.R. Chappell].

Manuscrit reçu le 14 Avril 1972

REFERENCES

- ANGERAMI J.J., "A whistler study of the distribution of thermal electrons in the magnetosphere", SEL-66-017, Radioscience Lab., Stanford Electronics Labs., Stanford University, mai 1966.
- ANGERAMI J.J. and CARPENTER D.L., "Whistler studies of the plasmopause in the magnetosphere, 2, Electron density and total tube content near the knee in magnetospheric ionization", *J. Geophys. Res.*, **71** (3), 711-726, 1966.
- BANKS P.M., NAGY A.F. and AXFORD W.I., "Dynamical behavior of thermal protons in the mid-latitude ionosphere and magnetosphere", *Planet. Space Sci.*, **19** (9), 1053-1067, 1971.
- BINSACK J.H., "Plasmopause observations with the M.I.T. experiment on IMP 2", *J. Geophys. Res.*, **72** (21), 5231-5327, 1967.
- CARPENTER D.L., "Whistler evidence of a knee in the magnetospheric ionization density profile", *J. Geophys. Res.*, **68** (6), 1675-1682, 1963.
- CARPENTER D.L., "Whistler studies of the plasmopause in the magnetosphere, 1, Temporal variations in the position of the knee and some evidence on plasma motions near the knee", *J. Geophys. Res.*, **71** (3), 693-710, 1966.
- CARPENTER D.L., "Relations between the dawn minimum in the equatorial radius of the plasmopause and Dst, K_p and local K at Byrd Station", *J. Geophys. Res.*, **72** (11), 2969-2971, 1967.
- CARPENTER D.L. and K. STONE, "Direct detection by a whistler method of the magnetospheric electric field associated with a polar substorm", *Planet. Space Sci.*, **15** (2), 395-397, 1967.
- CARPENTER D.L., F. WALTER, R.E. BARRINGTON and D.J. McEWEN, "Alouette 1 and 2 observations of abrupt changes in whistler rate and of VLF noise variations at the plasmopause; a satellite-ground study", *J. Geophys. Res.*, **73**, 2929-2940, 1968.
- CARPENTER D.L., "Whistler evidence of the dynamic behavior of the duskside bulge in the plasmasphere", *J. Geophys. Res.*, **75** (19), 3837-3847, 1970.
- CHAPPELL C.R., HARRIS K.K. and SHARP G.W., "A study of the influence of magnetic activity on the location of the plasmopause as measured by OGO 5", *J. Geophys. Res.*, **75** (1), 50-56, 1970 a.
- CHAPPELL C.R., HARRIS K.K. and SHARP G.W., "The morphology of the bulge region of the plasmasphere", *J. Geophys. Res.*, **75** (19), 3848-3861, 1970 b.
- CHAPPELL C.R., HARRIS K.K. and SHARP G.W., "The dayside of the plasmasphere", *J. Geophys. Res.*, **76** (31), 7632-7647, 1971.
- CHAPPELL C.R., HARRIS K.K. and SHARP G.W., "Plasmasphere dynamics inferred from OGO-5 observations", *Space Research XII*, 1972 (in press).
- CORCUFF Y. et DELAROCHE M., « Augmentation du gradient d'ionisation dans la proche magnétosphère en périodes de forte activité magnétique », *C.R. Acad. Sc.*, **258**, 650-653, 1964.
- CORCUFF Y., « Etude de la magnétosphère au moyen des sifflements radioélectriques », *Thèse de Doctorat d'Etat*, Editions du C.N.R.S., 1965.
- DOWDEN R.L., "Location of generation region (in L and λ) of midlatitude VLF discrete emissions by dispersion analysis of ground stations observations", *J. Geophys. Res.*, **76** (7), 1729-1737, 1971.
- GREBOWSKY J.M., "Model study of plasmopause motion", *J. Geophys. Res.*, **75** (22), 4329-4333, 1970.
- GREBOWSKY J.M., "Time-dependent plasmopause motion", *J. Geophys. Res.*, **76** (25), 6193-6197, 1971.
- KAVANAGH L.D., Jr., FREEMAN J.W., Jr. and CHEN A.J., "Plasma flow in the magnetosphere", *J. Geophys. Res.*, **73** (17), 5511-5519, 1968.
- KENNEY J.F., KNAFLICH H.B. and LIEMOHN H.B., "Magnetospheric parameters determined from structured micropulsations", *J. Geophys. Res.*, **73** (21), 6737-6749, 1968.
- PARK C.G., "Whistler observations of the interchange of ionization between the ionosphere and the protonosphere", *J. Geophys. Res.*, **75** (22), 4249-4260, 1970.
- TAYLOR H.A., Jr., BRINTON H.C. and SMITH C.R., "Positive ion composition in the magnetoionosphere obtained from the OGO-A satellite", *J. Geophys. Res.*, **70** (23), 5769-5781, 1965.
- TAYLOR H.A., Jr., BRINTON H.C. and PHARO M.W., "Contraction of the plasmasphere during geomagnetically disturbed periods", *J. Geophys. Res.*, **73** (3), 961-968, 1968.
- TAYLOR H.A., BRINTON H.C., CARPENTER D.L., BONNER F.M. and HEYBORNE R.L., "Ion depletion in the high-latitude exosphere; simultaneous OGO 2 observations of the light ion trough and the VLF cutoff", *J. Geophys. Res.*, **74** (14), 3517-3528, 1969.
- TAYLOR H.A., Jr., BRINTON H.C. and DESHMUKH A.R., "Observations of irregular structure in thermal ion distribution in the duskside magnetosphere", *J. Geophys. Res.*, **75** (13), 2481-2489, 1970.

