

**Contribution à l'étude des éléments de plasma détachés  
dans la magnétosphère**

par L. KOWALKOWSKI et J. LEMAIRE (\*)

Institut d'Aéronomie Spatiale  
3 Av. Circulaire, B-1180 Bruxelles

*Résumé.* — A partir des données de concentration d'ions du satellite OGO V, nous avons établi la distribution d'éléments de plasma détachés dans la magnétosphère.

Nous avons aussi étudié la fréquence relative d'apparition des éléments détachés dans différents secteurs de temps local; enfin, nous avons analysé la dépendance de cette fréquence avec l'activité magnétique.

1. LES DONNÉES D'OBSERVATION

Les données d'observation du spectromètre de masse ionique installé à bord du satellite OGO V ont été fournies par le National Space Science Data Center (NSSDC). La description de l'instrument de mesure est donnée par Harris et Sharp [1969]. Le satellite OGO V, lancé le 4 mars 1968, était sur une trajectoire très elliptique dont l'apogée et le périogée étaient respectivement de 148.228 km et 272 km de hauteur, sa période orbitale était de 2,64 jours. Les données que nous avons reçues du NSSDC sous la forme de bandes magnétiques sont échelonnées sur une période allant du 7 mars 1968 au 26 février 1969, ce qui en raison de la précession de l'orbite nous a permis de disposer d'observations dans tous les secteurs de temps local.

Chaque point de mesure le long de l'orbite du satellite est caractérisé par ses coordonnées d'espace ( $R$  = distance radiale,  $\lambda$  = lati-

---

(\*) Présentés par M. NICOLET.

tude géomagnétique,  $l$  = longitude géomagnétique,  $L$  = paramètre de McIlwain)<sup>(1)</sup> et par ses coordonnées de temps (UT = temps universel, LT = temps local). En chacun de ces points, nous disposons de la concentration des ions  $H^+$  ( $n_H$  exprimée en  $cm^{-3}$ ). Nous avons exclu de cette étude les éléments détachés observés au-delà de  $L = 8$ . A partir de ces données, nous avons tracé les graphiques de densité en fonction de  $L$  pour les 280 révolutions de OGO V dont nous disposons. La figure 1 est un exemple de distribution de densité ionique en fonction de  $L$ , obtenue au cours du 37<sup>e</sup> jour de vol de OGO V. La figure 2 donne la projection des trajectoires du satellite sur le plan équatorial dans le système de coordonnées ( $L$ , LT). Le

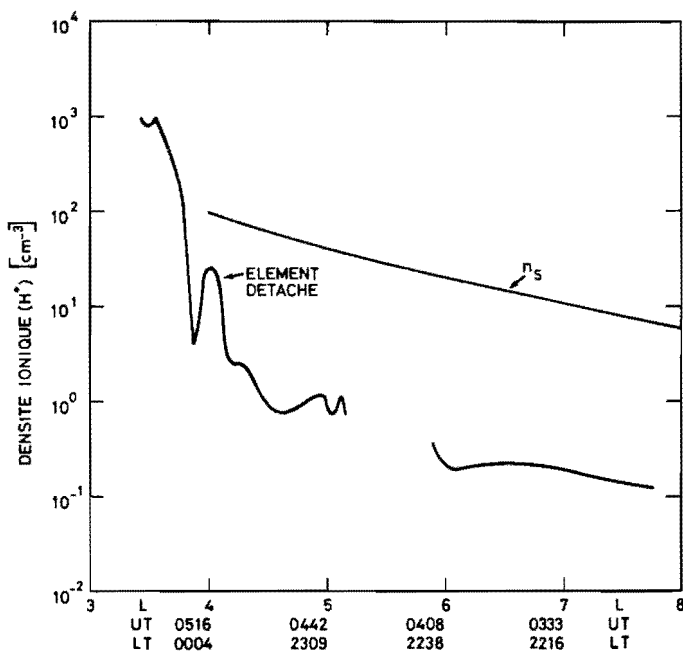


FIG. 1. — Exemple de graphique de densité ionique de OGO V obtenu le 37<sup>e</sup> jour de vol.

$L$  est le paramètre de McIlwain exprimé en rayon terrestre; UT est le temps universel exprimé en heures et minutes; LT est le temps local exprimé en heures et minutes.

(<sup>1</sup>) Le paramètre de McIlwain ( $L$ ) caractérise la distance radiale équatoriale de la ligne de force dipolaire passant par le point d'observation.  $L$  est exprimé en rayons terrestres.

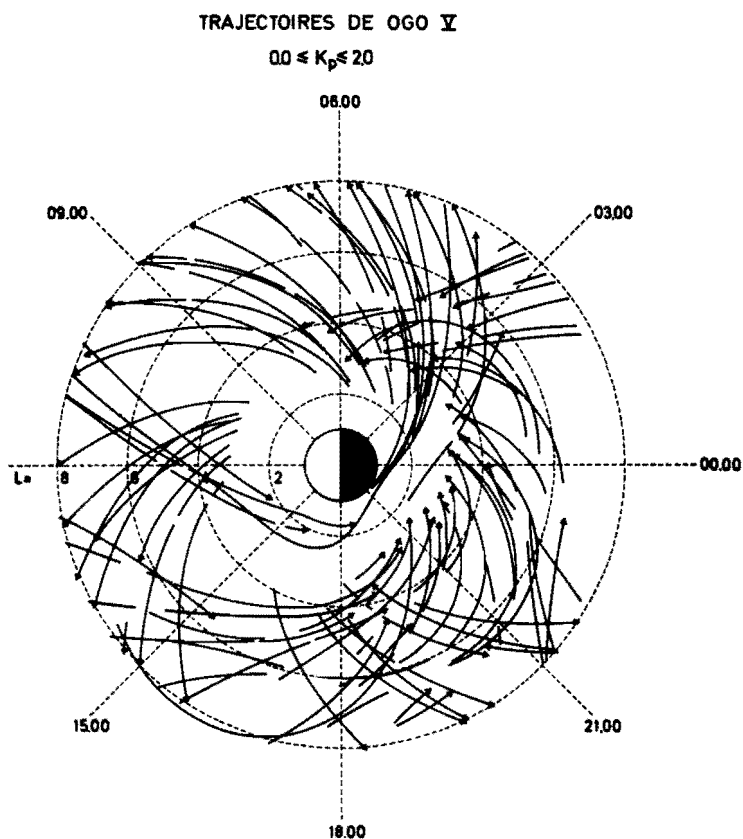


FIG. 2. — Projection des trajectoires du satellite sur le plan équatorial pour  $0.0 < K_p (UT') < 2.0$ .

premier type de graphique permet de déterminer la position de la plasmopause et de situer les régions où l'on a observé des éléments de plasma détachés; à l'intérieur de ces éléments, la densité est nettement supérieure à celle que l'on observe en dehors de la plasmasphère. Rappelons que la plasmasphère est l'extension de l'ionosphère équatoriale et que celle-ci se termine à une distance équatoriale de 3-5 rayons terrestres par une diminution très brusque de la densité ionique dans la région appelée « plasmopause ». Dans la figure 1, la plasmopause est rencontrée en  $L = 3,6$ . Afin d'étudier l'influence de l'activité magnétique sur les éléments détachés, nous avons classé les

observations en fonction de l'indice Kp. La valeur de Kp que nous avons prise est celle correspondant au moment où le plasma — supposé en mouvement de corotation avec la Terre — se trouvait à minuit de temps local. A cet effet, il suffit de considérer l'activité au temps universel

$$UT' = UT - LT \quad (1)$$

où UT et LT sont respectivement le temps universel et le temps local au moment de l'observation.

Nous avons alors classé les observations d'éléments détachés en deux catégories: celles pour lesquelles la valeur de Kp(UT') est comprise entre 0.0 et 2.0, d'une part, et celles pour lesquelles Kp(UT') > 2.0, d'autre part.

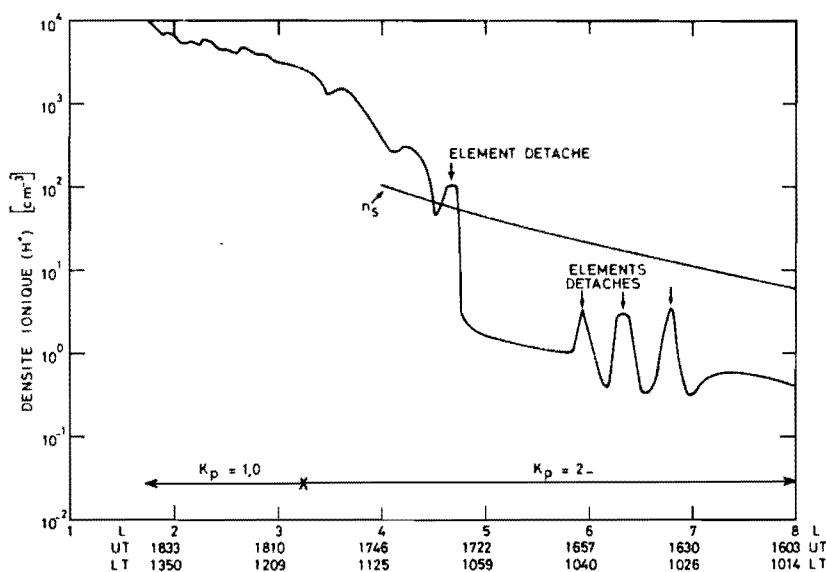


FIG. 3. — Éléments détachés rencontrés sur une trajectoire de OGO V.

## 2. ANALYSE DES POSITIONS DES ÉLÉMENTS DÉTACHÉS

Contrairement à Chappell [1974] nous n'avons pas déterminé les positions des éléments détachés à partir d'un critère de sélection automatique portant sur la valeur absolue de l'excès de densité dans l'élé-

ment détaché. Chappell localise les positions où se trouvent les îlots de plasma en traçant les positions des trajectoires de OGO V où la densité ionique possède un maximum supérieur à un seuil arbitrairement fixé à

$$n_s = 100 (4/L)^4 \text{ (cm}^3\text{)} \quad (2)$$

Malheureusement, cette méthode de sélection est trop rigide et laisse échapper deux catégories importantes d'îlots de plasma détachés: premièrement, tous les éléments de plasma clairement définis mais dont la densité maximum n'excède pas le seuil  $n_s$  et deuxièmement,

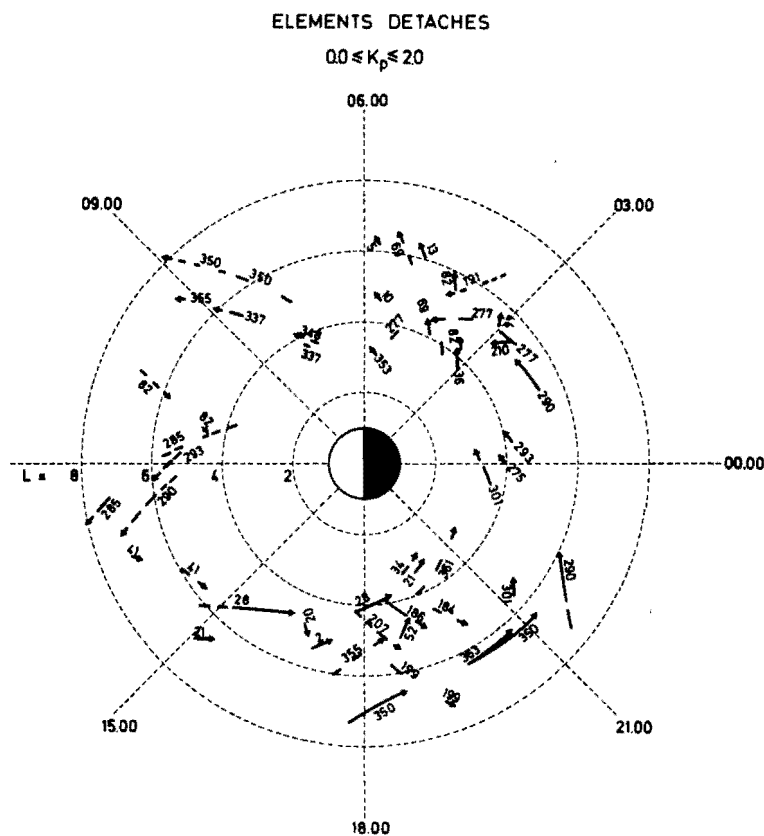


FIG. 4. — Distribution des éléments détachés pour  $0.0 < K_p < 2.0$ . Les numéros indiquent les numéros d'orbite de OGO V. Les flèches indiquent le sens dans lequel les portions d'orbites sont parcourues.

tous les éléments de plasma pour lesquels le minimum de densité n'est pas inférieur à  $n_c$ . Pour remédier à cette lacune nous avons préféré un critère plus qualitatif basé sur la forme de la courbe de densité et sur l'existence de maxima (c'est-à-dire des pics de densité) situés en dehors de la plasmopause.

L'œil et le jugement de l'observateur sont alors utilisés comme instrument de sélection au lieu de l'ordinateur. C'est ainsi que nous avons pu inclure dans notre statistique les éléments détachés tels que ceux qui sont indiqués sur la figure 3, alors que ces mêmes flots ont échappé au critère de sélection trop systématique de Chappell.

Les figures 4 et 5 montrent les portions des trajectoires où OGO V traversait des éléments de plasma détachés respectivement lorsque

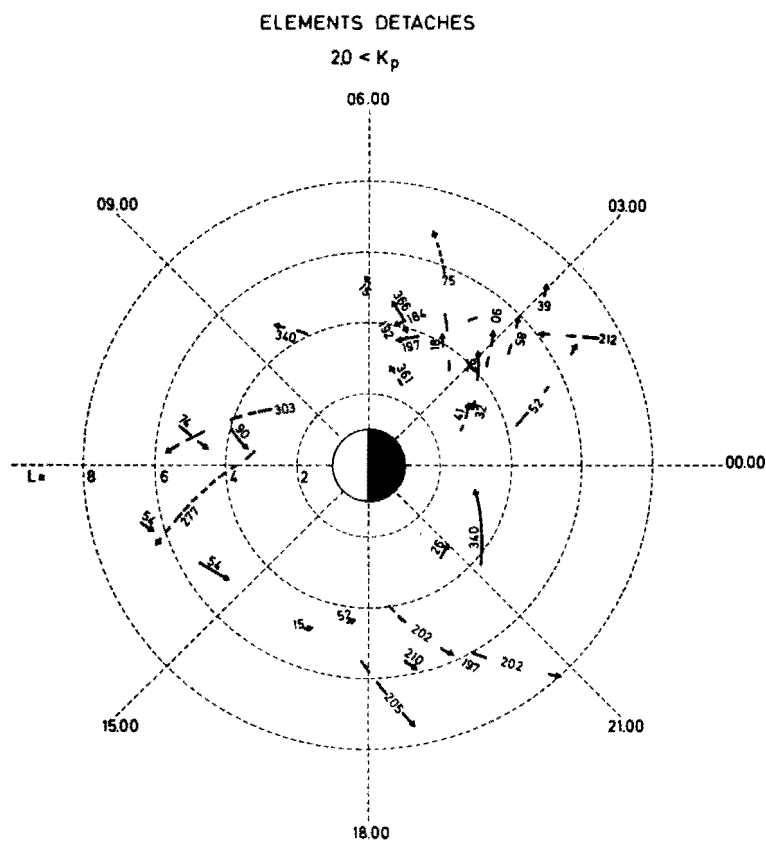


FIG. 5. — Distribution des éléments détachés pour  $K_p$  (UT') > 2.0.

$0.0 < K_p(UT') < 2.0$  et lorsque  $K_p(UT') > 2.0$ . Les observations faites pendant les moments de faible et forte activité magnétique sont donc respectivement illustrées dans les figures 4 et 5.

La figure 6 montre la fréquence relative des éléments détachés, c'est-à-dire, le rapport du nombre de trajectoires contenant au moins un élément détaché au nombre total de trajectoires dans chaque secteur trihoraire de temps local.

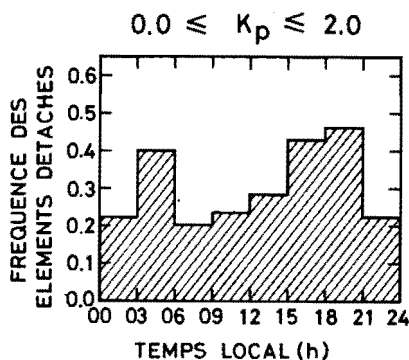


FIG. 6. — Fréquence des éléments détachés pour  $0.0 < K_p(UT') < 2.0$ .

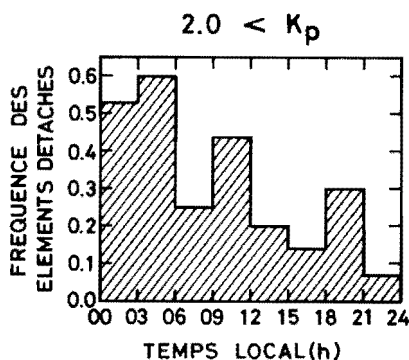


FIG. 7. — Fréquence des éléments détachés pour  $K_p(UT') > 2.0$ .

Pour  $0.0 < K_p(UT') < 2.0$  (fig. 6) les éléments de plasma sont observés le plus souvent dans le secteur 1500 LT-2100 LT. Ce résultat avait déjà été obtenu par Chappell [1974] en utilisant un critère de sélection différent du nôtre. Mais on remarquera aussi que dans le

conclure que notre critère de sélection est au moins aussi sélectif que celui de Chappell. Notons que le maximum entre 0300 LT et 0600 LT, mis en évidence dans la figure 6, apparaît aussi dans la figure 8 comme une valeur supérieure à la moyenne. Néanmoins, l'écart à la moyenne n'est pas suffisant pour exclure l'hypothèse d'une fluctuation statistique probable.

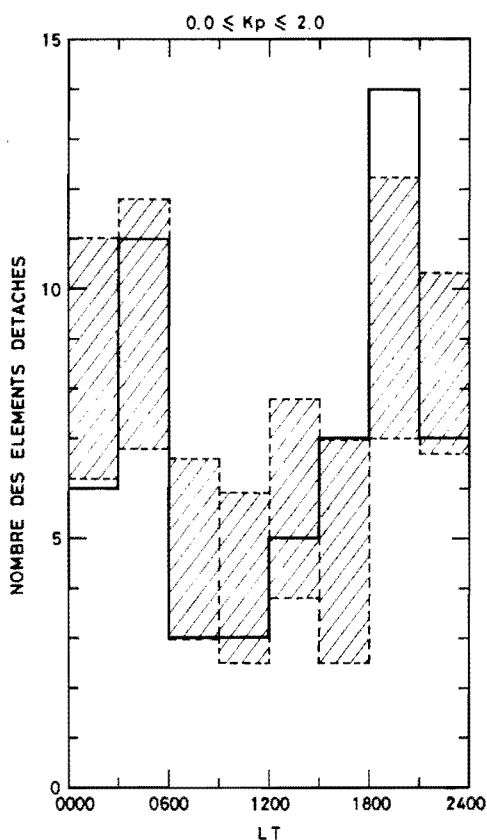


FIG. 8. — Nombre d'éléments détachés (trait plein) et intervalle de dispersion (partie hachurée)  $0.0 < K_p (UT') < 2.0$ .

2° CAS. — Forte activité magnétique.

Lorsque  $K_p > 2.0$  on trouve d'après le tableau 2 que  $p = 0,33$ . La figure 9 donne alors l'intervalle de dispersion  $m_i \pm \sigma_i$  ainsi que la



TABLEAU 2. — Distribution observée et théorique des éléments détachés lorsque  $2.0 < Kp (UT')$ ,  $p = 0,33$ .

$i$	1	2	3	4	5	6	7	8
LT	0000 0300	0300 0600	0600 0900	0900 1200	1200 1500	1500 1800	1800 2100	2100 2400
$N_i$	15	22	8	9	10	14	20	15
$d_i$	7	13	2	4	2	2	6	1
$m_i$	4,9	7,3	2,6	2,9	3,3	4,6	6,6	4,9
$\sigma_i$	1,8	2,2	1,3	1,4	1,5	1,7	2,1	1,8

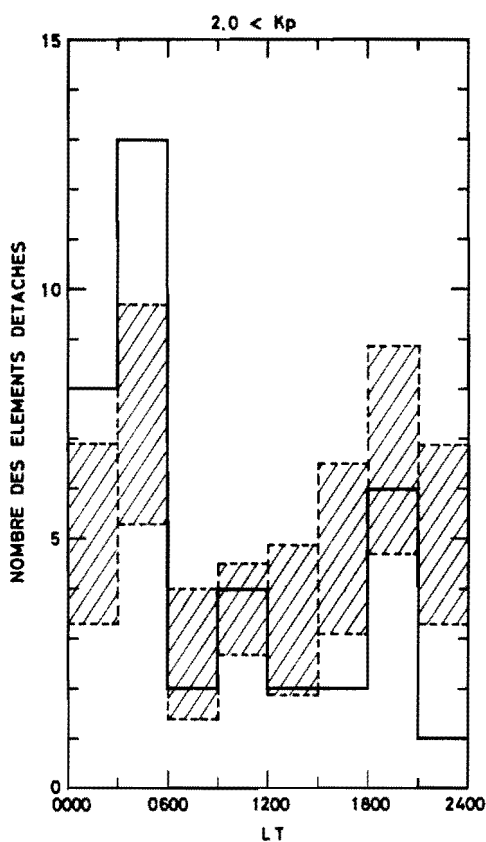


FIG. 9. — Nombre d'éléments détachés et intervalle de dispersion pour  $2.0 < Kp (UT')$ .

distribution observée  $d_i$  pour chaque secteur trihoraire. Dans le secteur 0000 LT-0600 LT, le nombre d'éléments détachés dépasse la moyenne  $m_i$  de plus de 2 fois  $\sigma_i$ . L'accumulation d'éléments dans ce secteur semble donc très significative. La valeur du Chi carré est définie par

$$\chi^2 = \sum_i \frac{(d_i - m_i)^2}{m_i} \quad (6)$$

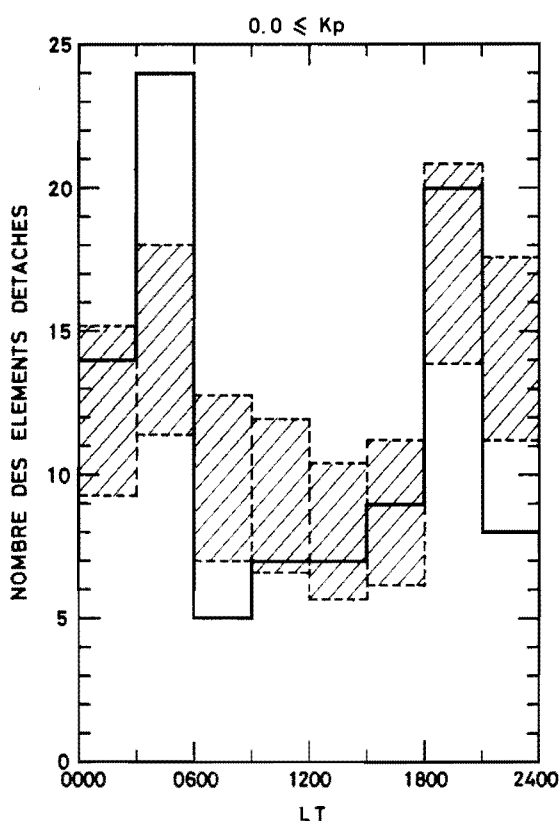


FIG. 10. — Nombre d'éléments détachés et intervalle de dispersion quelle que soit la valeur de Kp (UT').

pour la distribution illustrée dans la fig. 8  $\chi^2 = 11,2$ ; avec 7 degrés de liberté l'hypothèse nulle  $H_0$  n'a qu'une probabilité de 15 % d'être vérifiée. La probabilité d'apparition d'un élément

détaché est donc effectivement fonction du secteur de temps local lorsque  $K_p(UT') > 2.0$ .

3<sup>e</sup> CAS. — Activité magnétique quelconque.

Lorsqu'on considère tous les cas (quelle que soit la valeur de  $K_p$ ) on obtient une probabilité théorique  $p = 0,29$ . La figure 10 illustre la distribution observée et les limites  $m_i \pm \sigma_i$ . Notons le maximum dans le secteur 0300 LT-0600 LT qui dépasse la moyenne  $m_i$  de plus de 2 fois  $\sigma_i$ . Le test de  $\chi^2$  montre que l'hypothèse nulle  $H_0$  n'a qu'une probabilité de 0,5 % d'être vérifiée. En d'autres termes, si l'on considère l'ensemble des observations pour toutes les valeurs de  $K_p$  on trouve que la probabilité d'apparition d'un élément détaché n'est pas uniforme et dépend du secteur de temps local. Comme dans les deux cas précédents, on obtient une valeur supérieure à la moyenne dans le secteur de 1800 LT à 2100 LT. Notons aussi que le secteur 0900 LT-1200 LT n'apparaît comme favorisé dans aucune des figures 8, 9, 10 (contrairement à l'impression que l'on pourrait avoir d'après la figure 7 donnant des fréquences relatives).

Les seuls maxima statistiquement significatifs et donc les secteurs de temps local où l'on trouve le plus souvent des éléments détachés sont les secteurs 0000 LT-0600 LT et 1800 LT-2100 LT.

#### 4. DISCUSSION ET CONCLUSIONS GÉNÉRALES

La distribution obtenue par Chappell [1974] diffère de celle donnée dans la figure 8 pour les raisons suivantes:

1. Chappell détermine une distribution dans un volume plus grand que celui dans lequel nous avons fait notre analyse ( $L < 8$ ). D'après son analyse, une partie des éléments détachés de son échantillon est située au-delà de  $L = 8$  et notamment dans le secteur allant de 0900 LT-1700 LT.

2. Le critère de sélection de Chappell étant différent de celui utilisé ici, il n'est pas surprenant d'obtenir des résultats différents, même dans la région où  $L < 8$ . Ceci est notamment le cas dans le secteur de temps local après minuit, où nous avons trouvé un nombre maximum d'éléments supérieurs à la moyenne. La plupart des éléments détachés

qui constituent ce maximum entre 0300 LT et 0600 LT sont situés à l'extérieur de la plasmasphère, mais à une distance faible de la plasmopause. Le minimum de densité entre le bord de l'élément et le bord de la plasmasphère n'est généralement pas inférieur au seuil  $n_c$ , arbitrairement imposé par Chappell [1974] (cf. fig. 3). Ceci explique pour quelle raison la distribution publiée par Chappell ne fait pas apparaître ce maximum entre 0300 LT et 0600 LT. Les filots de plasma de cette catégorie semblent être des « morceaux » de plasma fraîchement arrachés de la plasmasphère et encore en voie de détachement. Leur présence dans le secteur de temps local allant de 0300 LT à 0600 LT, présente un intérêt tout particulier dans les théories de formation de la plasmopause. En effet, dans la théorie MHD de Brice [1967] - Nishida [1966] l'épluchage de la plasmasphère devrait s'observer vers 1800 LT. Par contre, dans la théorie de Lemaire [1974 et 1976] l'arrachement des éléments de plasma se fait dans la région située après minuit, c'est-à-dire là où le champ électrique (E) de convection magnétosphérique possède sa valeur maximale [cf. McIlwain 1972 et 1974]. En effet, à cet endroit la vitesse de dérive azimuthale ( $\vec{E} \times \vec{B} / B^2$ ) est maximale et la force centrifuge dépasse la force d'attraction gravifique à une distance de 4,5 rayons terrestres. C'est donc à cet endroit qu'une instabilité convective tend à éloigner tout filament de plasma ayant un excès de densité. Par contre, à une distance radiale inférieure (c'est-à-dire, à l'intérieur de la plasmasphère) ce même filament aurait eu tendance à se rapprocher du centre de la terre sous l'effet dominant de la force gravifique.

Il apparaît donc que l'existence du maximum entre 0300 LT et 0600 LT dans la distribution de la fréquence des éléments détachés est une preuve en faveur de la seconde théorie de formation de la plasmopause.

#### RÉFÉRENCES

- BRICE, N. M., 1967. Bulk motion of the magnetosphere, *J. Geophys. Res.*, **72**, 5193-5211.
- CHAPPELL, C. R., 1974. Detached plasma regions in the magnetosphere, *J. Geophys. Res.*, **79**, 1861-1870.
- HARRIS, K. K. and SHARP, G. W., 1969. OGO 5 ion spectrometer, *IEEE Trans. Geosci. Electron.*, GE-7, 93-98.

- HOEL, P. G., 1947. Introduction to mathematical statistics, Ed. B. M. J. WILEY AND SONS, INC., New York.
- LEMAIRE, J., 1974. The "Roche-limit" of ionospheric plasma and the formation of the plasmopause, *Planet. Space Sci.*, **22**, 757-766.
- LEMAIRE, J., 1976. Steady state plasmopause positions deduced from McIlwain's electric field models, *J. Atm. Terr. Phys.*, **38**, 1041-1046.
- McILWAIN, C. E., 1972. Plasma convection in the vicinity of the geosynchronous orbit, in *Earth's Magnetospheric Processes*, Ed. B. M. McCormac, D. Reidel Publishing Company, Dordrecht-Holland, pp. 268-279.
- McILWAIN, C. E., 1974. Substorm injection boundaries, in *Magnetospheric Physics*, Ed. B. M. McCormac, D. Reidel Publishing Company, Dordrecht-Holland, pp. 143-154.
- NISHIDA, A., 1966. Formation of plasmopause, or magnetospheric plasma knee, by the combined action of magnetospheric convection and plasma escape from the tail, *J. Geophys. Res.*, **71**, 5669-5679.