

La Plasmasphère

J. Lemaire

Institut d'Aéronomie Spatiale de Belgique, 1180 Bruxelles

Institut G. Lemaître, UCL, 1348 Louvain-la-Neuve

Abstract : *The plasmasphere is a toroidal region encircling the Earth at geomagnetic latitudes typically less than about 65 degree. It is the high altitude extension of the low latitude ionosphere along geomagnetic field lines. The plasmasphere is filled with co-rotating cold plasma of ionospheric origin distributed along magnetic flux tubes in the Earth gravitational field. The relatively dense plasma distribution terminates sometimes rather abruptly along a surface called the plasmapause. The geomagnetic field lines, along which this sharp discontinuity forms during magnetic substorm events, cross the geomagnetic equatorial plane at radial distances ranging from 2.5 R_E to beyond 7 R_E , depending on the strength of the magnetic substorm: i.e. the maximum intensity of the convection electric field enhancement in the nightside local time sector of the magnetosphere. The discovery of the plasmasphere by whistlers observations, as well as by in-situ measurements on board of the Russian LUNIK-2 spacecraft are recalled. The latest experimental results concerning the plasmasphere and plasmapause obtained from the currently operating Cluster and IMAGE spacecraft are also presented and discussed.*

A theory for the formation of sharp plasmapause density gradients is briefly outlined, as well as a numerical simulation illustrating the deformation of the plasmasphere and plasmapause during a moderate enhancement of the level of geomagnetic activity.

1. La découverte de la plasmasphère

Comme l'atmosphère, la troposphère, l'exosphère ou l'ionosphère, la plasmasphère est une région géophysique enveloppant notre planète. Elle fait partie de la magnétosphère terrestre. Cette région de forme toroïdale est constituée de gaz complètement ionisés, c'est-à-dire un plasma d'électrons libres et d'ions positifs ($> 90\%$ de H^+ , $< 10\%$ de He^+ , ainsi que des ions O^+ , D^+ , He^{++} , O^{++} , N^+ , et N^{++} en beaucoup plus faibles concentrations). L'énergie cinétique de ces particules est inférieure à 2 eV.

La plasmasphère est une émanation de l'ionosphère terrestre dont les ions et les électrons libres sont principalement produits par la photo-ionisation des atomes de l'atmosphère de la Terre par le rayonnement UV du Soleil. Les différentes couches D, E, F₁ et F₂ de l'ionosphère sont connues et étudiées depuis 1902, quand, suite à la première transmission transatlantique par télégraphie sans fil en 1901, Heaviside suggéra que les ondes radioélectriques pouvaient

contourner la Terre par réflexion sur une couche ionisée de l'atmosphère supérieure, appelée depuis cette époque la couche de Heaviside.

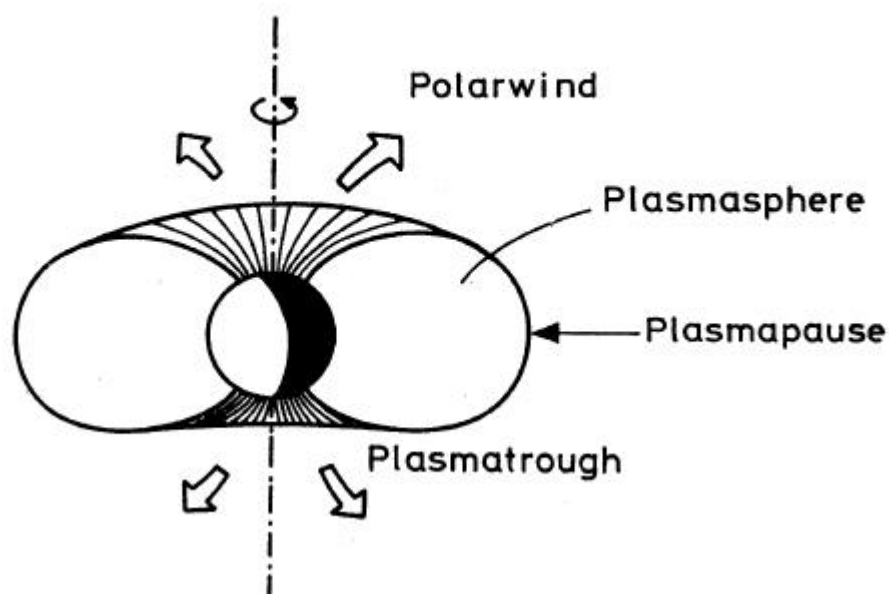


Fig. 1. Représentation de la plasmasphère et de la plasmopause. La plasmopause est la surface qui établit la frontière extérieure de la plasmasphère, séparant celle-ci de la "plasmatrough" (terme anglais dont il n'existe pas de traduction française usuelle). Dans la région du vent polaire (polar wind) les ions H^+ et He^+ de l'ionosphère s'échappent avec des vitesses moyennes supersoniques vers la queue de la magnétosphère; cette région se trouve à des latitudes géomagnétiques supérieures à $70^\circ - 75^\circ$. Les lignes de champ géomagnétique le long desquelles se forme la plasmopause traversent l'ionosphère à des latitudes géomagnétiques variant de 50° à 60° selon le niveau d'activité géomagnétique (d'après Lemaire et Gringauz [6]).

Le terme "plasmasphère" n'est apparu que soixante années plus tard. Il fut introduit la première fois en 1966 par Carpenter [1] du *Space Telecommunications and Radioscience Laboratory* de l'Université de Stanford. C'est dans cet article historique, cité très souvent pendant plus de 40 ans, que Don Carpenter utilisa aussi pour la première fois le mot "plasmopause", pour désigner la frontière extérieure de la plasmasphère. Celle-ci est schématiquement illustrée dans la figure 1.

1.1. Plasmasphère en 3D

La plasmopause apparaît dans cette figure comme une surface, ou plus précisément comme une région, qui épouse approximativement la forme des lignes du champ magnétique terrestre.

Elle intersecte le plan équatorial à 4 - 5 rayons terrestres ($R_E = 6371$ km). Cependant, cette étendue radiale comptée à partir du centre de notre planète varie en fonction de l'activité géomagnétique, c'est-à-dire en fonction de l'importance des perturbations de la magnétosphère. En effet, lorsqu'un sous-orage magnétique survient et perturbe la distribution des champs électriques et magnétiques dans la cavité magnétosphérique, la plasmopause se forme plus près de la Terre; par exemple, lors de perturbations extrêmement fortes du champ électrique le rayon équatorial de la plasmopause peut se réduire à moins de $2.5 R_E$. Par contre, après une période de plusieurs jours d'accalmie (c'est-à-dire sans agitation géomagnétique notable), la plasmasphère peut s'étendre au-delà de 7 - 8 R_E , et se confondre avec les régions de la magnétosphère extérieure, sans transition nette.

La section équatoriale de la plasmasphère n'est généralement pas circulaire, mais est souvent plus étendue dans le secteur de temps local* compris entre 16 et 20 heures (c'est-à-dire du côté du crépuscule). Une asymétrie jour-nuit a été mise en évidence ultérieurement par les observations satellitaires de Bezrukikh et Gringauz [2] en ex-Union Soviétique ; ces observations ont montré que la plasmasphère présentait aussi un renflement centré autour de midi temps local.

1.2. Filamentation de la distribution du plasma

La frontière inférieure de la plasmasphère se confond avec l'ionosphère. Cette dernière est d'ailleurs la source principale des particules qui constituent la plasmasphère. Dans les régions supérieures de l'ionosphère (> 300 km) et donc aussi dans la plasmasphère, les fréquences de collisions entre, d'une part les électrons ou les ions, avec d'autre part les atomes neutres de l'atmosphère sont de plus en plus faibles, et deviennent plus petites que la fréquence de rotation de Larmor de ces particules chargées à haute altitude dans le champ magnétique local. Par conséquent, le plasma aura une tendance naturelle à se distribuer le long des lignes du champ géomagnétique. En effet, les particules chargées peuvent se déplacer sur de longues distances parallèlement aux lignes du champ géomagnétique sans subir de collisions, alors que leur mouvement hélicoïdal autour de celles-ci limite leur déplacement latéral. De ce fait, les irrégularités de plasma ont une tendance naturelle à s'aligner et à se redistribuer le long des tubes magnétiques. C'est dans de tels filaments de plasma, que se propagent d'un hémisphère à l'autre, certaines ondes électromagnétiques polarisées circulairement. Ces ondes que l'on nomme "sifflements" (en anglais "whistlers") sont produites naturellement par les

éclair atmosphérique lors des orages; ces ondes électromagnétiques de très basses fréquences (TBF ou VLF: very low frequency, en anglais; 4 - 40 kHz) se propagent donc sur des distances considérables au sein de la magnétosphère, le long de ces filaments de plasma qui constituent en quelque sorte des guides d'ondes.

De la décharge électrique (l'éclair atmosphérique) qui donne naissance à l'onde, à l'arrivée de celle-ci dans l'autre hémisphère où se trouve l'antenne réceptrice, l'intervalle de temps est de l'ordre d'une seconde. La vitesse de propagation de ces ondes TBF est fonction de la densité électronique ainsi que de la fréquence de celle-ci. La densité dans le tube magnétique dans laquelle elle se propage affecte donc le temps de propagation de ces ondes électromagnétiques d'un hémisphère à l'autre. C'est en mesurant ces temps de propagation en fonction de la fréquence que Storey [3] fut le premier à déterminer, dès 1953, la distribution de la densité des électrons libres au-dessus de l'ionosphère, et ce jusqu'à plusieurs rayons terrestres dans le plan équatorial du champ géomagnétique.

1.3. Distribution de la densité dans la plasmasphère

Afin de maintenir la quasi-neutralité électrique du plasma, la densité des électrons libres (n_e) dans l'ionosphère et la magnétosphère est toujours égale à la somme des densités de charge des ions (n_i). Ces densités électroniques et ioniques sont pratiquement en équilibre hydrostatique ; elles décroissent de manière continue le long des tubes magnétiques depuis l'altitude du maximum d'ionisation dans la région F (vers 300 km d'altitude), jusqu'à un minimum situé dans le plan équatorial, où la distribution du potentiel gravifique possède un maximum le long des lignes magnétiques, et où l'intensité du champ géomagnétique est minimale.

Sur base d'observations radioélectriques TBF, il est très vite apparu que le plasma confiné dans ces tubes magnétiques tourne presque en bloc avec la vitesse angulaire de l'ionosphère terrestre. Le plasma piégé dans la plasmasphère est donc généralement en co-rotation avec l'ionosphère, qui elle-même, est entraînée par l'atmosphère neutre en co-rotation avec la Terre. Les observations récentes obtenues à l'aide du satellite IMAGE (expérience EUV) ont cependant permis de mettre en évidence des écarts significatifs à cette tendance générale [Carpenter, *communication personnelle*, 2002]. Ce sont ces écarts à la co-rotation du plasma au sein de la plasmasphère que nous voudrions évaluer et étudier à l'avenir en utilisant la méthode des ondelettes †.

1.4. La plasmasphère

Les valeurs des densités du plasma dans la plasmasphère et à sa frontière extérieure ont été obtenues à partir de la méthode dite des "sifflements TBF". Elles sont illustrées dans la figure 2 qui fut présentée pour la première fois par Carpenter [5], en 1963. La courbe en trait plein montre la distribution équatoriale de n_e en fonction de L_{\dagger} (distance équatoriale mesurée en rayons terrestres). On constate qu'au sein de la plasmasphère, la diminution de densité en fonction de L est relativement régulière et lente jusqu'à une distance radiale d'environ $3 R_E$.

Le gradient de la densité y est inversement proportionnel à l'échelle de hauteur (H)§. Dans la plasmasphère, comme dans l'ionosphère où les plasmas sont approximativement en équilibre hydrostatique, H est approximativement proportionnel à la température (T) du plasma: $H \approx kT/mg$. La température augmente cependant avec l'altitude [2], et l'accélération gravifique (g) diminue avec celle-ci; ceci explique l'augmentation de H en fonction de l'altitude, tant le long des lignes de champ magnétique, que transversalement à celles-ci, comme on le voit dans la figure 2 pour $L < 3$.

Mais on constate également qu'au-delà de $L = 3$, la valeur de H diminue brusquement: en effet au-delà de $3 R_E$ la densité diminue de manière plus abrupte, d'un ordre de grandeur (de 300 à moins de 30 électrons par cm^3) sur une distance radiale qui est parfois inférieure à un dixième de rayon terrestre (< 600 km). Ce changement de déclivité marque la frontière extérieure de la plasmasphère où l'échelle de hauteur cesse d'être déterminée par la température du plasma, comme c'est le cas aux altitudes plus basses où la force gravifique (mg) confine le plasma au sein du puits de potentiel gravifique de la Terre. La plasmopause est simplement cette étroite région, où le gradient de densité change brusquement de valeur. Elle est située entre 3 et $3.5 R_E$ sur la figure 2.

Les mesures de densité effectuées à bord de satellites artificiels traversant la plasmopause, juste après un sous-orage magnétique, indiquent que le gradient de densité est quelquefois bien plus raide encore que celui illustré dans la figure 2. Immédiatement après un sous-orage, la plasmopause apparaît comme une discontinuité semblable à celle qui se forme au bord d'une banquise lorsqu'un bloc de glace s'en détache pour former un iceberg qui sera emporté au loin par les courants océaniques.

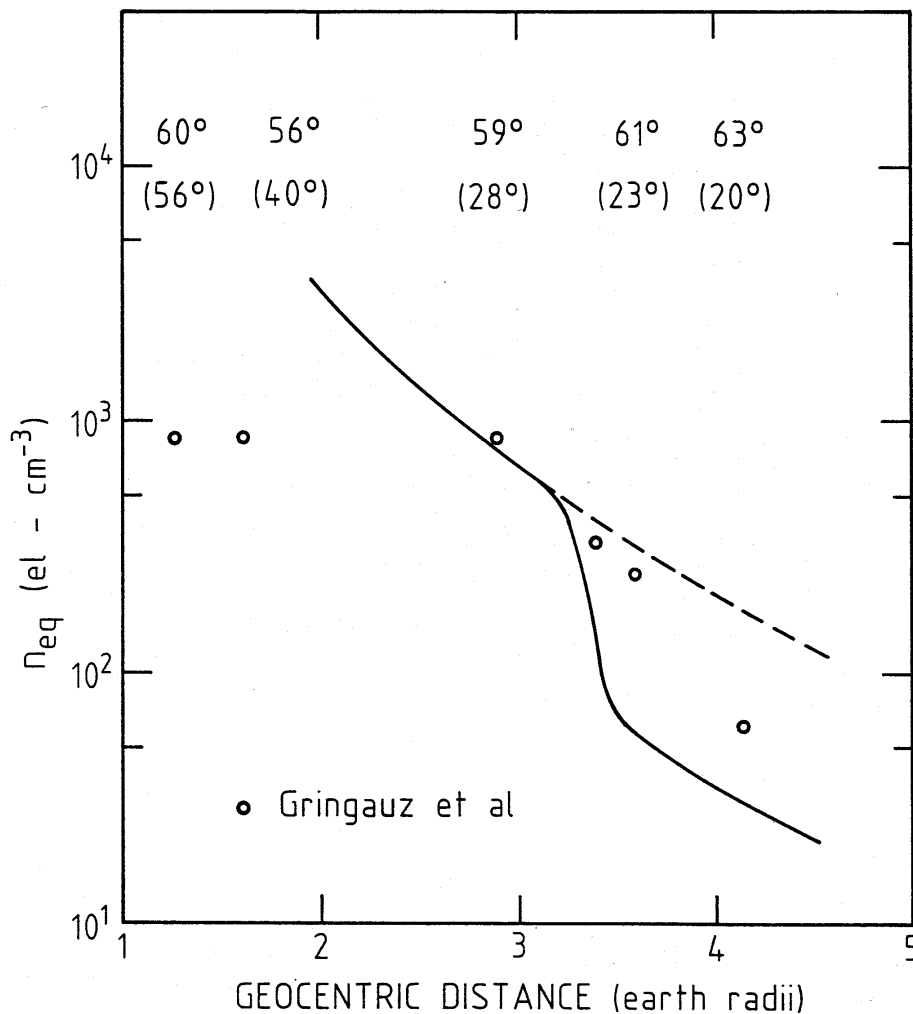


Fig. 2. Distributions radiales de la densité dans la magnétosphère. La courbe en trait plein représente la densité des électrons dans le plan équatorial en fonction de la distance radiale (en rayons terrestres, R_E). Une nouvelle plasmopause s'est formée vers $3.5 R_E$ suite à un sous-orage magnétique: c'est-à-dire une perturbation de la distribution du champ électrique de la magnétosphère. La courbe en traits interrompus - prolongation de la courbe en trait plein - correspond à la distribution de densité juste avant le sous-orage magnétique, lorsque la plasmasphère en co-rotation avec l'ionosphère terrestre, s'étendait au-delà de $7 - 8 R_E$. Les distributions de la densité électronique sont déterminées à partir de l'analyse des observations de "sifflements radioélectriques" ("whistlers", dans la littérature anglo-saxonne) découvertes par Storey [3, 16-17] et développées par Carpenter [5, 20-23] et d'autres (voir [6]). Les mesures de la densité ionique effectuées par Gringauz [4] à bord de la sonde spatiale soviétique LUNIK-2 sont données à titre de comparaison. On constate qu'il y existe aussi un changement important dans le gradient de la densité du plasma magnétosphérique aux environs de $3.5 R_E$. La région où se produit cette discontinuité dans la distribution radiale des densités d'ions et d'électrons magnétosphériques est appelée la plasmopause (d'après Carpenter [5]).

La position et la forme de la plasmopause ont longtemps été assimilées avec la dernière équipotentielle fermée du champ électrique global de la magnétosphère. Cette surface fermée (purement mathématique) est traditionnellement désignée par les initiales LCE, signifiant en

anglais "Last Closed Equipotential". Cette surface contient un point singulier (un point de stagnation) où l'intensité du champ électrique est nulle, et où la vitesse de convection magnétohydrodynamique du plasma est nulle également. Malheureusement, ce modèle théorique s'est avéré trop simpliste et inexact, bien qu'il reste encore souvent invoqué dans la littérature, en raison de sa simplicité et de la popularité qu'il avait acquis dans les années 60. Mais, les observations accumulées au cours des trente dernières années, et surtout celles obtenues récemment grâce à l'expérience EUV à bord du satellite IMAGE, montrent sans ambiguïté qu'une discontinuité aussi abrupte que la plasmopause ne peut se former que sous l'effet d'un mécanisme physique autre que celui qui fut imaginé trop hâtivement en 1967.

1.5. La plasmopause formée par une instabilité d'échange

Sur base des récentes observations auxquelles nous ferons encore allusion plus loin, il s'avère de plus en plus que le changement de déclivité à la plasmopause est en réalité la conséquence d'un mécanisme d'instabilité convective dans la plasmasphère: l'instabilité d'échange.

Selon la théorie développée depuis 1974 à l'Institut d'Aéronomie Spatiale de Belgique [8,9,10], l'augmentation brusque de l'intensité du champ électrique dans le secteur entre minuit et 6 heures, associée à un sous-orage magnétique, est la cause de cette instabilité hydrodynamique. En effet, cette augmentation de l'intensité du champ électrique induit une augmentation de la vitesse de convection: c'est-à-dire un changement de la vitesse angulaire, et par conséquent de l'accélération et de la force d'inertie s'exerçant sur le plasma. Ceci modifie les forces extérieures dans les couches les plus éloignées de la plasmasphère. Le plasma initialement en co-rotation est soudainement déséquilibré dans les couches extérieures de celle-ci; son équilibre hydrodynamique aussi.

La réduction de la somme des forces dans la direction parallèle au champ magnétique engendre naturellement un mouvement ascensionnel du plasma ionosphérique le long des lignes de champ géomagnétique. Cet écoulement hydrodynamique vers le haut a plusieurs conséquences observables: il diminue d'abord la concentration des ions légers (H^+ et He^+) dans l'ionosphère aux latitudes moyennes, donnant ainsi naissance à ce que les anglo-saxons appellent le "Light Ion Trough"; il s'agit d'un appauvrissement de l'ionosphère en ions H^+ et He^+ dans les deux hémisphères aux latitudes géomagnétiques moyennes.

Cet écoulement hydrodynamique en direction du plan équatorial, transporte du plasma ionosphérique vers le puits de potentiel qui s'établit à grande distance radiale dans la région

équatoriale à cause l'accélération centrifuge. En effet, à cause de l'augmentation soudaine de la vitesse angulaire dans le secteur de minuit, un puits de potentiel se forme au-delà d'une surface appelée la "surface de force parallèle nulle" ou, en anglais, la "Zero-Parallel-Force surface" [9]. Cette surface est le lieu des points où la force d'accélération - force d'inertie - est égale et opposée à la force gravifique dans la direction parallèle aux lignes du champ magnétique. A cet endroit un élément de matière a tendance à se fractionner en deux parties, l'une tombant vers la Terre sous l'effet de la force de marée, et l'autre à s'éloigner de la Terre sous l'effet de l'accélération centrifuge.

Le long des lignes magnétiques tangentes à cette "ZPF surface" un clivage se forme dans la distribution des densités du plasma: du côté extérieur le plasma possède une vitesse angulaire de convection plus rapide, ce qui induit son expansion et son écoulement hydrodynamique vers le haut (comme indiqué précédemment), alors que du côté intérieur de cette surface, où l'état de convection du plasma n'est pas perturbé, celui-ci reste approximativement en équilibre hydrostatique dans le champ gravifique. Sous cette surface, la distribution de la densité est donc pratiquement inchangée, alors qu'elle est fortement diminuée au-delà de celle-ci, à cause de l'expansion hydrodynamique le long des lignes de champ magnétique.

Selon cette théorie de la formation de la plasmopause par instabilité d'échange, la position de ce clivage, ainsi formé dans la distribution de la densité du plasma transversalement à ces lignes de champ magnétiques, détermine la position de la frontière extérieure de la plasmaspère: c'est-à-dire la plasmopause.

1.6. Les premières observations de la plasmopause

La première observation de la plasmopause, directement à l'aide d'un instrument de mesure scientifique embarqué dans une sonde spatiale, est attribuée à Konstantin Gringauz, un pionnier russe de la recherche spatiale. Celui-ci avait installé à bord des sondes interplanétaires LUNIK-1 et LUNIK-2 des détecteurs (ion-traps) capables de mesurer le flux des ions dans l'espace au-dessus de l'atmosphère [4]. Ses mesures effectuées en 1959 le long de la trajectoire de LUNIK-2 lui permirent de déterminer des valeurs de la densité ionique jusqu'à plus de 100 000 km d'altitude. Ces densités sont reportées sur la figure 2 où elles sont indiquées par des cercles. Bien que les densités obtenues lors de cette mission ne soient pas des densités équatoriales, comme celles de la courbe en trait plein, on voit très distinctement

le changement de pente dans la distribution de la densité des ions vers $L = 3$: c'est-à-dire environ à la même distance radiale que la plasmopause identifiée par Carpenter en utilisant la méthode des whistlers [5]. Cette excellente correspondance n'est cependant ici due qu'à une heureuse coïncidence, en effet ces deux types d'observations ont été faites à des dates différentes.

La figure 2 possède un caractère historique car elle illustre la découverte de la plasmopause par deux méthodes de mesures très différentes, et par des scientifiques de deux nations, alors opposées dans la conquête spatiale. La figure 2 contenant les deux séries d'observations (américaines et russes) fut présentée en 1963 par Carpenter à la XIVème Assemblée Générale de l'URSI à Tokyo [5]. C'est lors de cette réunion internationale que celui-ci rencontra pour la première fois son homologue russe, co-découvreur de ce phénomène remarquable et inexplicable de la plasmopause. En raison de l'inflexion de la courbe en trait plein, Carpenter la décrivit alors comme un "genou" ("knee", en anglais) dans la distribution de la densité du plasma. C'est pourquoi la plasmopause est encore parfois appelée "Carpenter's knee". L'histoire de la découverte de la plasmopause à l'Est de l'ancien rideau de fer était assez mal connue jusqu'en 1998, lorsqu'une monographie sur la plasmasphère fut publiée chez *Cambridge University Press* [6].

Dans ce livre intitulé "*The Earth Plasmasphere*" les auteurs relatent les difficultés que Gringauz rencontra auprès de certains Académiciens russes de l'époque pour obtenir l'autorisation de publier en 1960 les résultats inattendus qu'il avait trouvés lors de la mission historique de LUNIK-2. On y décrit aussi les étapes successives qui ont conduit Carpenter à découvrir la plasmopause par l'observation au sol des ondes TBF. Une synthèse des multiples observations réalisées par cette méthode au cours des trente années qui suivirent cette importante découverte au début de l'ère spatiale, est également présentée dans ce livre [6].

Parallèlement aux sondages radioélectriques de la plasmasphère par les whistlers, une quantité impressionnante de résultats expérimentaux furent obtenus à l'aide de différents types d'instruments de mesures scientifiques opérants à bord de satellites artificiels américains, soviétiques et européens. Ces observations ont permis d'établir tout un ensemble de propriétés de la plasmasphère, du plasma dont elle est formée, et de sa frontière extérieure : la plasmopause. La position et la forme de la plasmopause sont très sensibles aux distributions des champs magnétiques et électriques dans la magnétosphère, et à leurs variations au cours

du temps, dépendant elles-mêmes de l'activité solaire et de l'orientation du champ magnétique interplanétaire.

Il est évidemment hors de propos de présenter ici, en détails, toutes les connaissances acquises depuis plus de trente années au sujet de ces régions magnétosphériques. Je me limiterai donc à relater quelques uns des résultats expérimentaux les plus récents recueillis par les missions spatiales américaine IMAGE et européenne Cluster. Celles-ci sont toujours en cours, au moment de la rédaction de ce manuscrit (novembre 2002).

2. Les résultats recueillis au cours des missions Cluster et IMAGE

Dans un numéro précédent de "*Physicalia Magazine*", Darrouzet *et al.* [7] décrivaient les objectifs scientifiques assignés à la mission Cluster (voir aussi [38-39]). Celle-ci est composée de quatre satellites évoluant en formation rapprochée sur des orbites très inclinées (90°) et très excentriques (périgée à $4 R_E$, apogée à $19.6 R_E$). La distance inter-satellites a été modifiée (de 100 km et quelques milliers de kilomètres) au cours de la mission qui débuta en août 2000. Grâce à ce type d'orbite, les plates-formes spatiales, toutes quatre équipées d'instruments de mesure identiques et des plus perfectionnés qui soient, pénètrent périodiquement à l'intérieur de la plasmasphère et en ressortent au cours de leur révolution autour de la Terre; les satellites peuvent traverser la plasmopause deux fois toutes les 57 heures (période orbitale commune): dans l'hémisphère Sud, en s'approchant de la Terre, et ensuite dans l'hémisphère Nord, en s'en éloignant. Notons cependant que ce passage au sein de la plasmasphère n'est réellement effectif que lorsque celle-ci s'étend dans le plan équatorial au-delà de $L=4$, c'est-à-dire en période de faible niveau d'agitation géomagnétique. Dans la figure 2, la plasmopause était située à $L \leq 3.5$; elle n'aurait dès lors pas pu être observée par des satellites comme Cluster dont les périgées sont situés au-delà de cette distance radiale.

Les courbes supérieures dans les deux parties de la figure 3 montrent les quatre distributions de densités électroniques déterminées à partir de la mesure de la fréquence de plasma sur les spectres d'ondes TBF des quatre expériences WHISPER [39]. Ces spectres sont enregistrés environ toutes les 2 secondes le long des orbites des quatre satellites Cluster, familièrement baptisés Rumba, Salsa, Samba et Tango.

A partir des éphémérides des quatre satellites il est possible de déterminer les positions de ceux-ci dans le champ géomagnétique. Il est possible aussi de tracer les lignes de champ

magnétique passant par les quatre points d'observation et donc de calculer la distance radiale (R_{equat}) à laquelle ces lignes de champ magnétique traversent (en principe) le plan équatorial où l'intensité du champ magnétique, \mathbf{B} , est minimale, et où la section droite des tubes magnétiques est maximale. Dans la figure 3, les densités observées à l'altitude des satellites sont représentées en trait plein en fonction de cette distance radiale, R_{equat} (exprimée en rayon terrestre, comme L dans la figure 2).

Enfin, nous avons divisé ces densités mesurées par un facteur égal au rapport de la valeur de $|\mathbf{B}|$ à l'endroit de la mesure, avec la valeur calculée (B_{equat}) à la distance équatoriale (R_{equat}) le long de la ligne de champ magnétique passant par le point d'observation. Ce rapport est égal au rapport des sections droites des tubes magnétiques entre ces deux altitudes. Cette extrapolation nécessite l'adoption d'un modèle théorique ou empirique du champ géomagnétique. Nous avons utilisé le modèle IGRF-1995 pour le champ magnétique interne, et un des modèles de Tsyganenko pour le champ externe.

Les densités extrapolées sont représentées par les courbes inférieures (en traits interrompus) dans les deux panneaux de la figure 3. Ces courbes sont donc obtenues par une transformation mathématique linéaire dépendant de la position des satellites ainsi que du modèle de champ géomagnétique adopté [7]. Les densités équatoriales ainsi calculées peuvent être comparées à celles obtenues par la méthode des whistlers (voir figure 2).

2.1. Irrégularités de densités

On constate immédiatement d'après la figure 3 que les densités mesurées par les quatre satellites Cluster avec une résolution temporelle de 2 secondes présentent des détails et des structures fines qui n'apparaissent pas dans les observations au sol par la méthode des whistlers. Notons également la présence d'un grand nombre d'irrégularités de grande amplitude mais de faible dimension dans la direction de la vitesse orbitale des satellites. Ces irrégularités de densité sont particulièrement abondantes et serrées dans la région de la plasmopause qui se situe ici entre 4 et 5 R_E .

La présence de telles irrégularités de très faible dimension ($\Delta R_{\text{equat}} \cong 10$ km), et dans lesquelles la densité de plasma varie parfois de plus d'un facteur 2, n'avait pas été mise aussi clairement en évidence avant la mission Cluster. Ces résultats spectaculaires sont importants car ils montrent la structure fine des irrégularités présentes dans la région de la plasmopause.

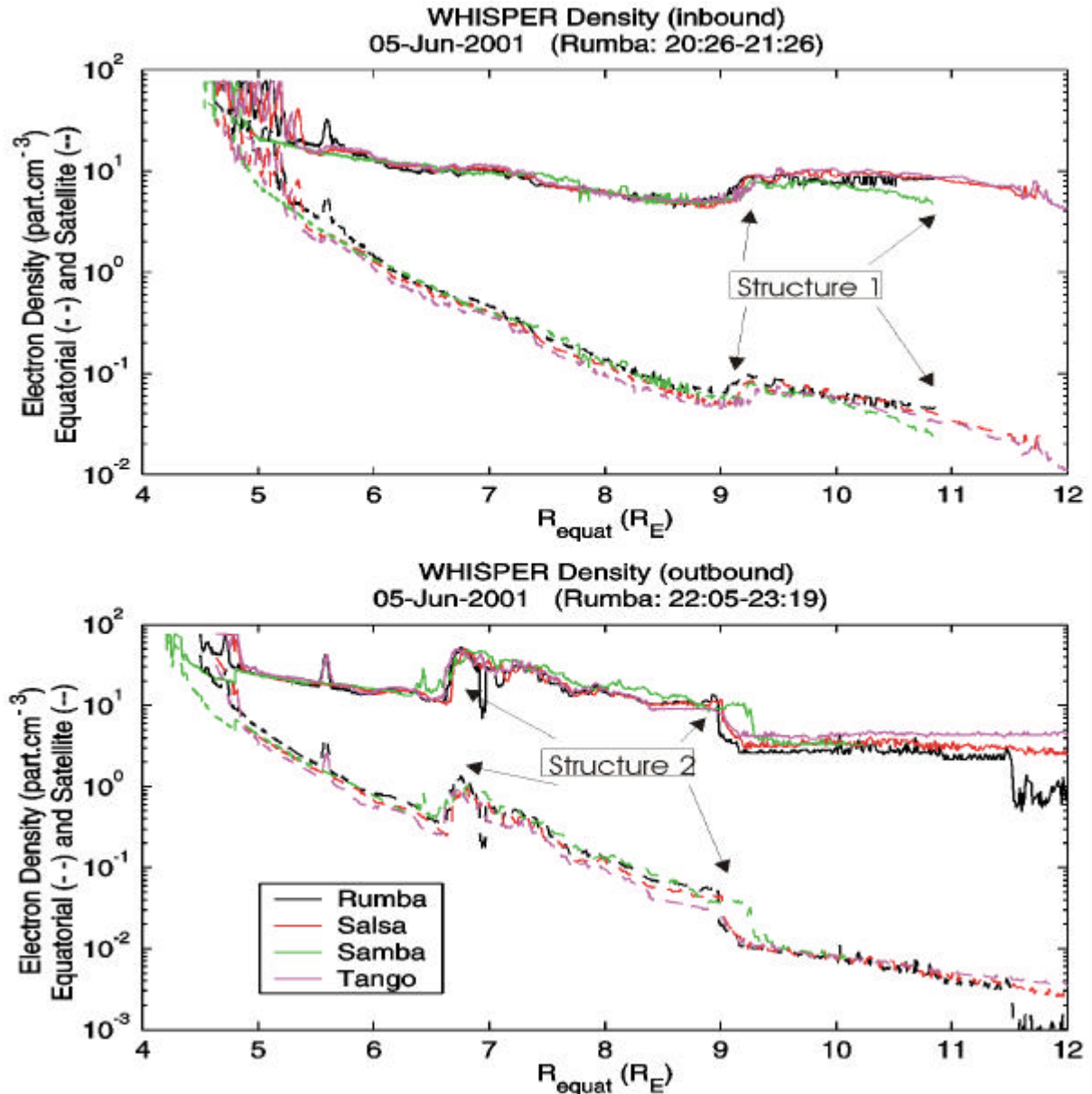


Fig. 3. Distributions de la densité des électrons obtenues à partir de la mesure des quatre satellites de la mission Cluster. Ces densités sont calculées à partir de la valeur de la fréquence de plasma déduite des spectres d'ondes radioélectriques mesurés par les expériences WHISPER. Les différences entre les quatre mesures de densités ainsi que leur variation en fonction de la distance radiale R_{equat} (exprimée en rayon terrestre, R_E) indiquent la présence d'irrégularités de petites dimensions mais de grandes amplitudes, surtout dans la région de la plasmapause ($R_{\text{equat}} < 5 R_E$). Les courbes supérieures correspondent aux densités mesurées à la position des quatre satellites appelés Rumba, Salsa, Samba et Tango. La série des quatre courbes inférieures dans chacun des deux panneaux sont des extrapolations théoriques de ces mêmes densités dans le plan de l'équateur géomagnétique.

Le panneau supérieur correspond aux mesures effectuées le 5 juin 2001 lorsque les satellites s'approchent de la Terre, et plongent dans la plasmasphère. Le panneau inférieur correspond aux observations effectuées lorsqu'ils en ressortent et s'éloignent de la Terre dans l'hémisphère Nord (d'après Darrouzet *et al.* [7]).

Notons cependant que des irrégularités de dimension beaucoup plus larges avaient déjà été observées et mentionnées dans la littérature [35 - 37] par le passé. Les observations d'ondes radioélectriques de l'expérience RPI à bord du satellite IMAGE, confirment elles aussi l'existence de de telles irrégularités, et la "rugosité de la surface de la plasmopause" insoupçonnée jusqu'à présent [11].

La présence accrue de ces irrégularités au voisinage de la plasmopause corrobore le mécanisme de formation de la plasmopause proposé par Lemaire [8-10, 18], et selon lequel la frontière de la plasmasphère est formée par une instabilité hydrodynamique de celle-ci. En effet, il était déjà apparu dès 1970 dans les mesures de la vitesse de convection aux hautes latitudes et dans la magnétosphère, que la vitesse angulaire du plasma augmente fortement lors des sous-orages magnétiques dans le secteur entre minuit et 6 heures [30]. Comme indiqué dans la section 1.5, cette augmentation de la vitesse angulaire rend les couches extérieures de la plasmasphère convectivement instables [9]. Cette instabilité d'échange peut donc engendrer les nombreuses irrégularités de densité observées dans la région de la plasmopause par Cluster et IMAGE.

Il existe de nombreux types d'instruments de mesure (et, à fortiori, de méthodes de mesure) capables de déterminer les valeurs de la densité des électrons et des ions à bord des quatre plates-formes de la mission Cluster ainsi qu'à bord d'autres missions qui sillonnent ou ont sillonné la magnétosphère, telles qu' IMAGE, INTERBALL, POLAR, Intercosmos, ISEE, AKEBONO, GEOS, Dynamic Explorer-1 & 2, Prognoz, OGO-5, Cosmos... [11-15, 25-28, 31-37, 40]. Notons cependant que les mesures effectuées au cours de ces missions plus anciennes ne donnent pas toujours des mesures absolues de la densité électronique et ionique, comme c'est le cas pour les expériences WHISPER à bord de Cluster, et dont les résultats sont illustrées dans la figure 3.

Pour terminer la description de la figure 3, notons que les valeurs des densités équatoriales données par les quatre courbes inférieures sont bien du même ordre de grandeur (par exemple à $R_{\text{equat}} = 5 R_E$) que celles que l'on obtiendrait en extrapolant jusqu'à $L = 5$ les observations de whistlers illustrées dans la figure 2. Ceci confirme, que l'interprétation des spectrogrammes des ondes TBF proposée en 1951, dans la thèse de doctorat de Owen Storey [3, 16, 17] était parfaitement correcte, contrairement à l'avis de certains de ses collègues, à cette époque. En effet, dans la région au-delà de la plasmopause, la densité équatoriale est bien du même ordre de grandeur quand on la détermine, d'une part par la méthode des whistlers, et d'autre part de

manière absolue par la détermination de la fréquence de plasma à l'aide des expériences WHISPER.

2.2. Élément de plasma détaché de la plasmasphère

La figure 3 montre également que, le 5 juin 2000, les quatre satellites ont pénétré entre $11.7 R_E$ et $9.2 R_E$, dans un élément de plasma deux fois plus dense que le plasma observé aux altitudes immédiatement inférieures (voir panneau supérieur de la figure 3). Par contre, dans le panneau inférieur, lorsque les satellites s'éloignent de la plasmasphère, une structure semblable (avec le même excès de densité d'un facteur 2, et environ la même extension radiale: $2.5 R_E$) est observée dans l'hémisphère Nord entre $R_{\text{equat}} = 6.6 R_E$ et $9.1 R_E$. Ce "bloc" de plasma nettement détaché de la plasmasphère pourrait être une excroissance de la plasmasphère comme celle dont la formation est simulée dans la figure 4 [19].

Les sections équatoriales de la plasmopause sont illustrées dans chacun des neuf panneaux par une succession de points entourant les zones hachurées représentant la plasmasphère. Ces neuf panneaux (a-i) illustrent les résultats obtenus à l'aide d'un modèle dynamique de la plasmasphère. Les déformations de celle-ci sont données toutes les 3 heures entre 18 heures TU le 27 juillet 1991, et 18 heures TU le lendemain. Au cours de cette période de 24 heures l'index d'activité géomagnétique K_p variait comme indiqué dans le panneau supérieur de la figure 4.

Cette simulation numérique est basée sur la théorie de formation de la plasmopause par instabilité d'échange comme décrit ci-dessus [19]. On y utilise les modèles de la distribution du champ géomagnétique (\mathbf{B}) et du champ électrique global (\mathbf{E}) qui ont été déterminés par McIlwain [30] sur base d'observations par satellites. Ces modèles de champ servent à calculer la vitesse de convection $(\mathbf{E} \times \mathbf{B})/B^2$ en chaque point du plan équatorial et à chaque instant. En effet, le modèle du champ électrique de McIlwain dépend de l'indice d'activité K_p , et celui-ci dépend lui-même du temps universel comme l'indique le panneau supérieur de la figure 4.

Cette simulation de la formation de la plasmopause réalisée à l'Institut d'Aéronomie Spatiale de Belgique [19] reproduit de manière satisfaisante un certain nombre d'observations accumulées depuis plus de trente années grâce à la méthode des whistlers, aux mesures in-situ effectuées à l'aide de satellites, et même par analyse des signaux GPS qui permettent aussi d'évaluer les densités dans la plasmasphère intégrées le long du trajet des ondes radio de télécommunication entre le satellite et une antenne réceptrice au sol [31].

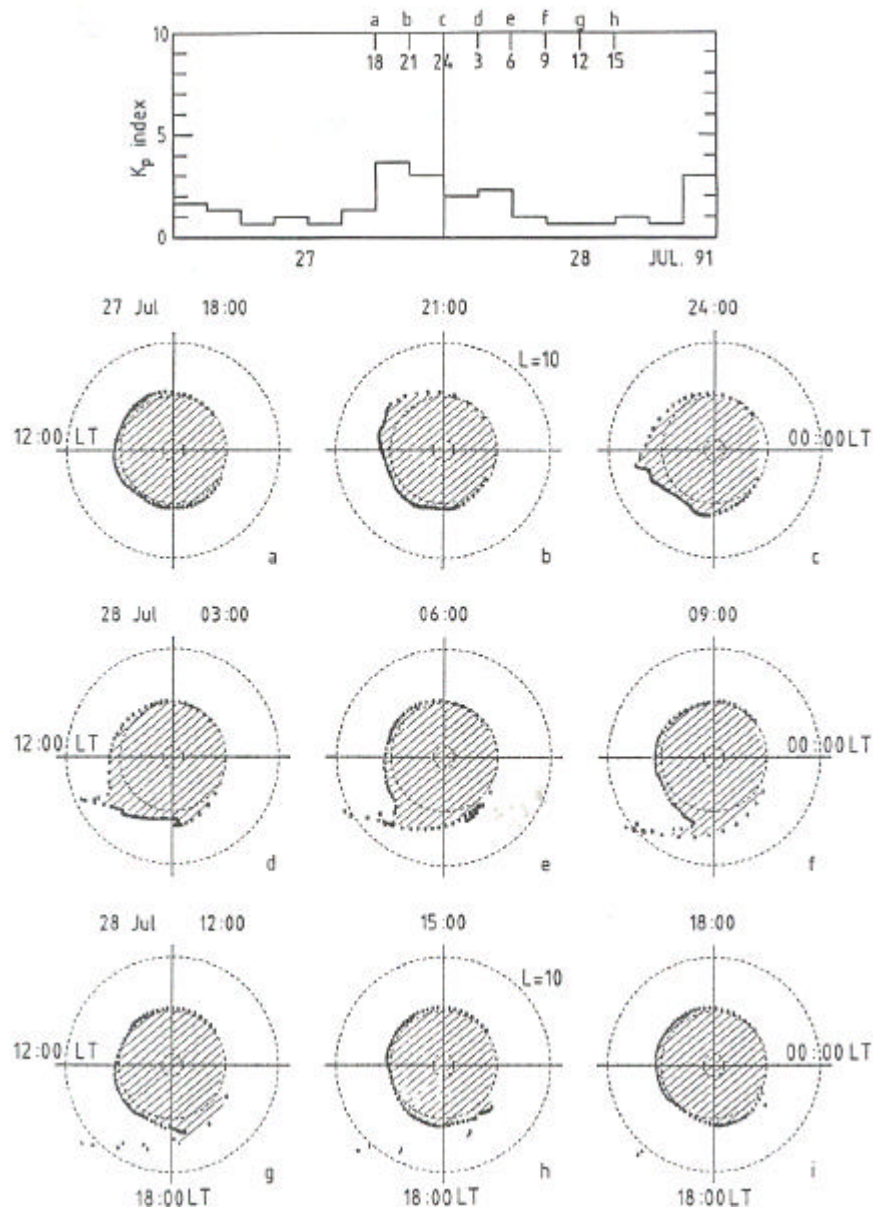


Fig. 4. Evolution temporelle de la forme et de la position de la plasmopause au cours d'un sous-orage magnétique, lors d'une augmentation de l'intensité du champ électrique dans la magnétosphère. Cette intensification du champ électrique de convection est modulée par l'augmentation de l'index K_p mesurant le niveau d'activité géomagnétique (voir panneau supérieur). Les sections équatoriales de la plasmasphère (surface hachurée) et de sa frontière, la plasmopause, ont été calculées à l'aide d'un programme de simulation numérique en supposant cette frontière formée par le dit mécanisme d'instabilité échange comme proposé par Lemaire [8-10, 18]. Les positions successives de la plasmopause calculées toutes les 3 heures illustrent la formation d'une queue de plasma dans le secteur de l'après-midi. Les structures 1 et 2 détachées de la plasmasphère et visibles dans les deux panneaux de la figure 3, pourraient être dues à la formation d'une telle queue de plasma dans le secteur de l'après-midi, précisément là où les quatre satellites de la mission Cluster ont observé ces structures, le 5 juin 2001 (d'après Lemaire [19]).

3. La plasmopause: sa formation et ses déformations

Notons qu'après une longue période géomagnétiquement calme le 27 juillet 1991, au cours de laquelle la valeur de K_p est restée inférieure à 2, la plasmasphère possède une forme approximativement circulaire avec une légère asymétrie jour-nuit et matin-soir. Par contre, lorsque l'activité magnétique augmente (c'est-à-dire lorsque K_p augmente dans le panneau supérieur de la figure 4), la plasmasphère devient convectivement instable. L'instabilité d'échange se développe dans le secteur entre minuit et 6 heures de temps local. Elle y est alors engendrée par l'augmentation de la vitesse de convection dans ce secteur de temps local comme décrit ci-dessus.

D'après cette simulation numérique [19], une queue de plasma peut se développer à partir d'une légère déformation de la surface de la plasmasphère dans le secteur 7 - 12 heures de temps local. Celle-ci est produite par l'augmentation de la vitesse de convection magnétosphérique dans le modèle du champ électrique de McIlwain [30]. Cette légère "bosse" dans la forme de la plasmasphère se déforme ensuite au cours de sa révolution autour de la Terre: la forme de queue étirée qui en résulte dans le secteur de l'après-midi est dès lors une conséquence du cisaillement de la vitesse angulaire du plasma autour de la Terre; en effet, d'après ce modèle de champ électrique cette vitesse moyenne de rotation diminue en fonction de la distance radiale dans le secteur de 9 - 17 heures ; ceci implique une vitesse azimutale plus lente au sommet de la "bosse" que dans ses ailes situées à des distances radiales plus petites. Ce cisaillement de la vitesse angulaire engendre le développement de l'élément de plasma en forme de queue dans le secteur de l'après-midi.

L'élément de plasma détaché observé par Cluster dans l'hémisphère sud à 16 heures (voir le panneau supérieur de la figure 3 entre 9.2 et 17.7 R_E), pourrait correspondre à une telle queue de plasma. Notons que ce même élément de plasma détaché est ensuite observé une heure plus tard entre 6.8 et 8.8 R_E dans l'hémisphère Nord (voir panneau inférieur). La différence d'éloignement radial de cette queue de plasma dans les deux hémisphères pourrait être expliquée de diverses façons : (1) soit par une asymétrie Nord-Sud dans la distribution des lignes du champ géomagnétique, mais dont le modèle de champ magnétique utilisé dans notre simulation n'a pas tenu compte ; (2) soit par un mouvement de chute de celui-ci vers le centre d'attraction gravitationnel de la Terre, étant donné que cet élément de plasma est plus dense que le plasma du milieu ambiant dans lequel il baigne ; une étude plus approfondie pour la période du 5 juin 2001 serait nécessaire pour tirer cette question au clair...

4. Détermination de la vitesse de convection dans la plasmasphère

Des films d'animations ont été réalisés à l'Université d'Arizona, à partir des observations de l'expérience EUV à bord du satellite IMAGE. Ces images très spectaculaires obtenues grâce à l'expérience EUV sont accessibles sur la toile : <http://euv.lpl.arizona.edu/euv> . Ces séquences d'images à intervalle de 10 minutes montrent très distinctement l'évolution temporelle de la frontière de la plasmasphère du côté nuit (c'est-à-dire, là où plasmopause est formée). Ces films d'animations permettent aussi de voir le mouvement de co-rotation et de convection du plasma à l'intérieur de la plasmasphère. Ils démontrent aussi très clairement que la surface de la plasmopause est parfois très irrégulière [32-32], et bien différente de celle qui nous était proposée dans le scénario LCE.

En collaboration avec D.L. Gallagher et B.R. Sandel, Principal Investigateur de l'expérience EUV-IMAGE, et avec l'aide de l'équipe de J.P. Antoine à l'UCL, nous envisageons d'utiliser la méthode des ondelettes afin d'analyser ces images. L'objectif de cette future collaboration est de déterminer la vitesse angulaire de convection en tous les points de la plasmasphère. Afin de bien comprendre la physique et la dynamique de la plasmasphère, il est en effet primordial de déterminer l'état de co-rotation/convection dans la plasmasphère, ainsi que ses variations en fonction de l'activité géomagnétique.

5. Perspectives dans l'avenir

Les missions Cluster et IMAGE déversent encore actuellement une manne de nouvelles données expérimentales d'une qualité technique inégalée à ce jour. Celles-ci permettront d'affiner nos connaissances concernant la plasmasphère et les phénomènes physiques qui s'y déroulent, notamment lors des orages géomagnétiques ou lors des sous-orages magnétiques. Ce sont ces événements occasionnels au cours desquels se forment d'une part, de nouvelles plasmopause par détachement de blocs de plasma de la plasmasphère dans le secteur de nuit, et d'autre part des queues de plasma dans le secteur de l'après-midi, comme dans la figure 4.

Gageons que lorsque ces nouvelles masses de données d'observations seront analysées et correctement interprétées, d'autres idées trop hâtives passeront dans l'oubli et seront progressivement éliminées des livres de cours et des références bibliographiques.

Remerciements

Je tiens à remercier tout particulièrement Don Carpenter. Son intérêt soutenu pour les recherches développées à l'Institut d'Aéronomie Spatiale de Belgique m'a beaucoup stimulé dans mes recherches. Je lui sais gré aussi pour l'aide qu'il m'a témoigné au cours de la rédaction du livre *"The Earth's Plasmasphere"* [6].

Je voudrais remercier Fabien Darrouzet, engagé à l'IASB dans le cadre de PRODEX-Cluster, pour l'excellent travail d'analyse des données des quatre satellites Cluster, et en particulier pour l'analyse des observations de l'expérience WHISPER dont je tiens à souligner ici la remarquable qualité technique. Je voudrais témoigner aussi toute ma gratitude à Pierrette Décréau, Principal Investigateur des expériences WHISPER, de m'avoir accepté comme Co-Investigateur dans le cadre de la mission Cluster. Ceci m'a en effet donné accès à des millions de spectres d'ondes radioélectriques, qui constituent des mines inépuisables de résultats expérimentaux de toute première qualité.

Je voudrais remercier Dennis Gallagher, du NSSTC, Huntsville, ainsi que Bill Sandell, de l'Université d'Arizona, d'avoir mis à notre disposition les observations de l'expérience EUV. L'analyse par la méthode des ondelettes des séries d'images de la plasmasphère réalisées à partir des observations de cette expérience est envisagée à partir de 2003. Je remercie en particulier Jean-Pierre Antoine, Chef du département de Physique, à l'UCL, et Laurent Jacques, assistant à l'unité de Physique mathématique, d'avoir accepté de nous conseiller dans cette future aventure que constituera l'analyse des images EUV par la méthode des ondelettes.

Je remercie aussi Viviane Pierrard de reprendre en charge les codes de simulation concernant la plasmasphère, et de poursuivre le développement des simulations de l'évolution temporelle de cette intéressante région de la magnétosphère. Je la remercie, ainsi que Fabien Darrouzet, Samuel Batteux et Don Carpenter d'avoir relu les premières épreuves de ce manuscrit, et de m'avoir ainsi permis d'en améliorer la compréhension et la présentation.

Les études théoriques de la plasmasphère ainsi que les analyses de données décrites dans cet article n'auraient pas pu être réalisées sans les supports de la Direction de l'IASB, ainsi que sans ceux des *Services Fédéraux des Affaires Scientifiques, Techniques et Culturelles* (SSTC). Cet article a été préparé dans le cadre du Projet PRODEX-CLUSTER.

Liste des références bibliographiques

- [1] Carpenter, D.L., Whistler studies of the plasmopause in the magnetosphere, I. Temporal variations in the position of the knee and some evidence on plasma motions near the knee, *J. Geophys. Res.*, **71**, 693-709, 1966.
- [2] Bezrukikh, V.V. and Gringauz, K.I., The hot zone in the outer plasmasphere of the earth, *Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics*, **38**, 1085-91, 1976.
- [3] Storey, L.R.O., An investigation of whistling atmospheric, *Philosophical Transactions of the Royal Society (London)*, **A**, **246**, 113-41, 1953.
- [4] Gringauz, K.I., Bezrukikh, V.V., Ozerov, V.D., and Rybehinskii, R.E., Investigation of interplanetary ionized gas, Energetic Electrons, and Corpuscular solar Radiation using three-electrode traps of charged. Particles on board the Second Space Rocket, *Dokl. Akad. Nauk. SSSR*, **131**, n° 6, pp. 1301-1304, 1960.
Gringauz, K.I., Some results of experiments in interplanetary space by means of charged particle traps on soviet space probes, *Space Research II*, 539-53, 1961.
- [5] Carpenter, D.L., Whistler evidence of a 'knee' in the magnetospheric ionization density profile, *J. Geophys. Res.*, **68**, 1675-82, 1963.
- [6] Lemaire, J.F. and Gringauz, K.I., The Earth's Plasmasphere, with contributions from D.L. Carpenter and V. Bassolo, *Cambridge University Press*, Cambridge (ISBN 0.521.43091.7), 346 pp., 1998.
- [7] Darrouzet F., Décréau P.M.E. and Lemaire J., The Cluster mission: preliminary results obtained with the WHISPER experiment, *Physicalia Magazine*, **24**, 3-16, 2002.
- [8] Lemaire, J., The 'Roche-limit' of ionospheric plasma and the formation of the plasmopause, *Planet. Space Sci.*, **22**, 757-766, 1974.
- [9] Lemaire, J., The mechanisms of formation of the plasmopause, *Ann. Geophys.*, **31**, 175-189, 1975 ;
Lemaire, J., Frontiers of the plasmopause (Theoretical aspects). Thèse d'agrégation de l'enseignement supérieur, Editions Cabay, Louvain-la-Neuve, ISBN 2-87077-310-2; *Aeronomica Acta* **A 298**, 1985.
Lemaire, J., Hydrostatic and convective stability in the plasmasphere, *Journal of Atmospheric Solar-Terrestrial Physics*, **61**, 867-878, 1999.
- [10] Lemaire, J.F., The formation of the light-ion-trough and peeling off the plasmasphere, *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, **63**, 1285-1291, 2001.
- [11] Carpenter D.L., Maria Spasojevic, Timothy F. Bell, Umran Inan, Bodo W. Reinisch, Ivan Galkin, Robert F. Benson, James Green, Shing F. Fung, Scott Boardsen, Small-scale field-aligned plasmaspheric density structures inferred from RPI on IMAGE, *J. Geophys. Res.*, **107** (A9), 10-1029/2001 JA009199, 2002.
- [12] Laakso, H. and A. Pedersen, Ambient electron density derived from differential potential measurements, in Measurements Techniques in Space Plasmas, Edited by J. Borovsky, P. Pfaff, and D. Young, *AGU Monograph* **102**, pp. 49-54, AGU Washington DC, 1998.
Laakso, H., Variation of the spacecraft potential in the magnetosphere, *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, **64**, 1735-1744, 2002.
- [13] Décréau, P.M.E., Ferreau, P., Krasnoselskikh, V., Le Guirriec, E., Leveque, M., Martin, Ph., Randriamboarison, O., Rauch, J.L., Sene, F.X., Seran, H.C., Trotignon, J.G., Canu, P., Cornilleau, N., De Feraudy, H., Alleyne, H., Yearby, k., Mögensen, P.B., Gustafsson, G., Andre, M., Gurnett, D.C. Darrouzet, F., and Lemaire, J., Harvey, C.C., Travnicek, P., and Whisper experimenters, Early results from the whisper experiment on cluster: an overview. *Annales Geophysicae*, **19**, 1241-1258, 2001.
- [14] Bezrukikh, V.V., Verigin, M.I., Kotova, G.A., Lezhen, L.A., Venediktov, Yu.I. and Lemaire, J., Dynamics of the plasmasphere and plasmopause under the action of geomagnetic storms, *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, **63**, 1179-1184, 2001.

- [15] Bezrukikh, V.V., Verigin, M.I., Kotova, G.A., Lezhen, L.A., Lemaire, J. and Venediktov, Yu.I. , Plasmapause dynamics and distribution of cold plasma density in the earth's plasmasphere in the course of development of geomagnetic storms: results of Auroral Probe/Alpha-3 experiment, *Cosmic Research*, **38**, 502-513, 2000.
- [16] Storey, L.R.O., An Investigation of Whistling Atmospherics. Ph.D. thesis, *Cambridge: Cambridge University*, 1951.
- [17] Storey, L.R.O., A method to detect the presence of ionised hydrogen in the outer atmosphere, *Canadian Journal of Physics*, **34**, 1153-1159, 1956.
- [18] Lemaire, J., Plasma distribution models in a rotating magnetic dipole and refilling plasmaspheric flux tubes, *Physics of Fluids*, **32**, 1519-1527, 1989.
- [19] Lemaire, J., The formation plasmaspheric tails, *Phys. Chem. Earth (C)*, **25**, 9-17, 2000.
- [20] Carpenter, D.L., Identification of whistler sources on visual records and a method of routine whistler analysis, SEL 5910 technical report, n° 5, 48 pp., Radio Sci. Lab., Stanford University, Stanford, Calif., 1960; Carpenter, D.L., Ph.D. thesis - The magnetosphere during magnetic storms: a whistler analysis, *SEL 62059, Radio Sci. Lab.*, N° **12**, 75 pp., Stanford University, Stanford Calif., 1962.
- [21] Carpenter, D.L., Whistler studies of the plasmasphere shape and dynamics, *Adv. Sp. Res.*, **6(3)**, 5-19, 1986.
- [22] Carpenter, D.L., Some aspects of plasmapause probing by whistlers, *Radio Science*, **18**, 917-925, 1983.
- [23] Carpenter, D.L., Earth plasmasphere awaits rediscovery, *EOS. Trans. AGU*, **76(9)**, 89-92, 1985.
- [24] Lemaire, J., Rotating ion-exospheres, *Planet. Space Sci.*, **24**, 975-985, 1976.
- [25] Lemaire, J. and Kowalkowski, L., The role of plasma interchange motion for the formation of a plasmapause, *Planet. Space Sci*, **29**, 469-478, 1981.
- [26] Carpenter, D.L. and Anderson, R.R., An ISEE/whistler model of equatorial electron density in the magnetosphere, *J. Geophys. Res*, **97**, 1097-1108, 1992.
- [27] Pierrard, V., and Lemaire, J., Exospheric model of the plasmasphere, *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, **63**, 1261-1265, 2001
- [28] Lemaire, J. and Storey, L.R.O., The plasmasphere revisited: a tribute to Donald Carpenter, *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, **63**, 1105-1106, 2001.
- [29] Gringauz, K.I., The structure of the ionized gas envelope of Earth from direct measurements in the USSR of local charged particle concentrations, *Planet. Space Sci.*, **11**, 281-296, 1963.
- [30] McIlwain, C.E., A Kp dependent equatorial electric field model, *Adv. Sp. Res.* **6(3)**, 187-197, 1986.
- [31] Hartmann, G.K., Plasmaspheric electron content, *Revista de la Union Geofisica Mexicana*, **18**, 92-111, 1979.
- [32] Reinisch, B.W., Huang, X., Haines, D.M., Galkin, I.A., Green, J.L., Bension, R.F., Fung, S.F., Taylor, W.W.L., Reiff, P.H., Gallagher, D.L., Bougeret, J.-L., Manning, R., Carpenter, D.L., and Boardsen, S.A., First results from the Radio Plasma Imager on IMAGE, *Geophys. Res. Lett.*, **28**, n° **6**, 1167-1170, 2001.
- [33] Burch, J.L., Mende, S.B., Mitchell, D.G., Moore, T.E., Pollock, C.J., Reinisch, B.W., Sandel, B.R., Fuselier, S.A., Gallagher, D.L., Green, J.L. , Perez, J.D., and Reiff, P.H., Views of Earth Magnetosphere with the IMAGE satellite, *Science*, **291**, 619-624, 2001.
- [34] Gallagher, D.L., Craven, P.D., and Comfort, R.H., An empirical model of the Earth's plasmasphere, *Adv. Sp. Res.*, **8**, n° **8**, 815-823, 1988.
- [35] Carpenter, D.L., Giles, B.L., Chappell, C.R., Décréau, P.M.E., Anderson, R.R., Persoon, Plasmasphere dynamics in the duskside bulge region: a new look at an old topic, *J. Geophys. Res.*, **98** A11, 243-271, 1993.
- [36] Bullough, K., and Sagredo, S., Longitudinal structure in the plasmapause: VLF Goniometer observations of knee-whistlers, *Nature*, **225**, 1038-1039, 1970.
- [37] Carpenter, D.L., Lightning whistler reveal the plasmapause, and unexpected boundary in space, *History of Geophysics*, **7**, 47-59, 1997.

- [38] Escoubet, C.P., Russell, C.T., and Schmidt, R., (Eds.), The Cluster and Phoenix Missions, *Kluwer Academic Publishers*, 658 pp., 1997.
- [39] Décréau, P.M.E., Fergeau, P., Krasnoselskikh, V., Lévêque, M., Martin, Ph., Randriamboarison, O., Sené, F.X., Trotignon, J.G., Canu, P., Mögensen, P.B., and WHISPER investigators, WHISPER, a resonance sounder and wave analyser: performances and perspectives for the Cluster mission, *Space Science Reviews*, **79**, 157-193, 1997.
- [40] Moullard, O., Masson, A., Laakso, H., Parrot, M., Décréau, P., Santolik, O., and André, M., Density modulated whistler mode emissions observed near the plasmopause, *Geophys. Res. Lett.*, **29** (19), 10.1029/2002GL015101, 20002.

* Secteur de temps local (TL): lorsqu'il est midi (heure locale) notre position sur la Terre fait face au Soleil. Le secteur de temps local définit une région comprise entre deux temps locaux. Par exemple, le secteur 16-20 heures correspond à la zone du crépuscule ; le secteur 6-10 heures correspond à l'aurore ; etc...

† L'analyse par ondelette est une généralisation, à deux dimensions, de l'analyse par transformée de Fourier. L'analyse par ondelette est indiquée dans le traitement de signaux telles que les images obtenues à l'aide de l'expérience EUV.

‡ Le paramètre L correspond approximativement à la distance radiale (mesurée en unité de rayon terrestre, $R_E = 6371$ km) à laquelle les tubes magnétiques traversent le plan équatorial géomagnétique.

§ L'échelle de hauteur de l'atmosphère ou de l'ionosphère d'une planète est la différence d'altitude correspondant à une diminution de la densité par un facteur $e = 2.7$.

** La "surface de force parallèle nulle" ou "ZPF surface" (en anglais) avait initialement été appelée 'Limite de Roche' [8]. Mais ce choix prêtait à confusion avec une surface portant le même nom dans la théorie des systèmes d'étoiles binaires en rotation. C'est pourquoi nous avons suggéré d'utiliser la nouvelle appellation. Celle-ci est plus explicite sur la signification physique de cette surface qui est le lieu des points où la somme de toutes les forces mécaniques possède une composante nulle dans la direction parallèle au champ magnétique dipolaire.