

Etude des plasmas de l'espace à l'Institut d'Aéronomie Spatiale de Belgique.

M. Roth¹, V. Pierrard¹, J. De Keyser¹, H. Lamy¹, M. Echim¹, F. Darrouzet¹,
N.B. Crosby¹, S. Delanoye¹, J. Lemaire², D. Heynderickx³, K. Stegen³ et J. Wéra³.

- (1) Groupe « plasmas spatiaux » de l'IASB
- (2) Collaborateur, professeur émérite à l'UCL
- (3) Groupe « valorisation » de l'IASB

Résumé

L'Institut d'Aéronomie Spatiale de Belgique a commencé ses activités le 1^{er} janvier 1965 autour de la forte personnalité scientifique de son fondateur, le baron Marcel Nicolet. C'est sous son impulsion, qu'au début des années septante, le domaine couvert par l'aéronomie s'ouvre à l'étude des plasmas spatiaux. Cette discipline scientifique commence en effet à prendre son essor avec le lancement des premiers satellites artificiels et les découvertes qui en résultent : la présence des ceintures de radiation de Van Allen et la confirmation de l'existence du vent solaire. Le nouveau groupe de recherches qui se forme alors à l'Institut est conduit par J. Lemaire et acquiert rapidement une renommée internationale, notamment par ses travaux sur le vent solaire et le vent polaire. Après plus de trois décennies de recherches, ce groupe continue à promouvoir la progression du champ des connaissances sans laquelle toute percée technologique serait impossible. Cet article est un compte rendu, non exhaustif, des activités les plus récentes menées à l'Institut d'Aéronomie Spatiale dans le domaine de la physique des plasmas spatiaux.

1. Introduction

Les activités menées à l'Institut d'Aéronomie Spatiale de Belgique (IASB) dans le domaine de la physique des plasmas spatiaux sont avant tout des recherches à caractère fondamental. Ces recherches sont indispensables au développement de la météorologie spatiale, discipline nouvelle qui n'en est encore qu'à ses balbutiements, comme l'était la météorologie de l'atmosphère terrestre à la fin du 19^{ème} siècle. Force est en effet de reconnaître, qu'actuellement, la fiabilité des prévisions en météorologie spatiale reste très limitée, car cette discipline repose essentiellement sur des modèles *empiriques* au fondement scientifique incertain. Par ses activités de recherches fondamentales en physique des plasmas spatiaux, l'IASB met au point des modèles *physiques* du milieu interplanétaire qui sont appelés à pallier l'empirisme dominant la météorologie de l'espace dans son état actuel. L'IASB contribue donc, par ses recherches basées sur une approche strictement cartésienne, à sortir la « météo de l'espace » de son empirisme initial afin d'améliorer la fiabilité de ses prévisions. C'est la voie qu'a choisie notre groupe

de recherches pour rendre cette discipline plus valorisante aux yeux du grand public, des agences spatiales et des décideurs politiques.

2. Le plasma : le quatrième état de la matière

Nous connaissons depuis longtemps les états liquides et solides de la matière. L'existence des gaz ne fut découverte qu'au début du XVII^e siècle. Deux siècles allaient encore s'écouler avant qu'on ne soupçonne l'existence d'un quatrième état de la matière, qu'Irving Langmuir désignera à partir de 1927 par le terme *plasma*. Or, cet état est le plus répandu à l'échelle de l'Univers. Nous ne nous en rendons pas compte car nous vivons essentiellement dans la petite partie de l'Univers non plasmique (environ 1%), sur un corps froid, protégé par son champ magnétique des flux de plasma venant de l'espace. Un plasma est un milieu globalement neutre du point de vue électrique, dont les composants de base sont des ions positifs et des électrons. On sait que la température se traduit par une agitation désordonnée des particules qui correspond à une énergie cinétique moyenne des particules. Ainsi, un plasma en équilibre thermique à la température de 11000 degrés Kelvin, possède une énergie d'agitation thermique de $1,6 \cdot 10^{-19}$ Joule, soit l'équivalent de l'énergie acquise par un électron lorsqu'il est accéléré par un champ électrique sur une distance correspondant à une différence de potentiel de 1 Volt. Il est commode d'utiliser l'électronvolt (eV) comme unité pour cette énergie. En physique des plasmas, on utilise indifféremment l'électronvolt pour caractériser la température et l'énergie cinétique non thermique de ses constituants. L'environnement terrestre est un véritable laboratoire de physique des plasmas qui permet l'étude de plasmas extrêmement diversifiés depuis le plasma froid (1 eV) de l'ionosphère jusqu'aux plasmas très chauds et raréfiés, comme celui des ceintures de radiation de Van Allen dont l'énergie atteint plusieurs centaines de mégaélectronvolts. Ce sont les propriétés spécifiques tout à fait remarquables des plasmas de l'espace que l'Institut d'Aéronomie Spatiale de Belgique cherche à comprendre depuis que la conquête spatiale lui a ouvert un vaste champ d'observations.

3. La météorologie spatiale

Dans le but de protéger les systèmes et les hommes des risques liés aux effets de la météorologie spatiale, nous devons en comprendre les causes.

La météorologie de l'espace est une discipline nouvelle qui est en plein essor. Elle vise l'étude et la prévision de l'impact que peut avoir l'activité solaire sur notre environnement terrestre. A l'IASB, nous nous intéressons à la physique des relations Soleil - Terre, en étudiant les plasmas qui baignent l'espace interplanétaire et l'environnement immédiat de la planète Terre. La météorologie de l'espace vise à prédire *l'arrivée des éjections de masse coronale* et l'impact de ces structures au niveau de la magnétosphère. Les particules du vent solaire peuvent provoquer des perturbations magnétiques importantes qui sont appelées orages magnétiques. Ces orages magnétiques induisent des courants électriques dans l'ionosphère et au sol, qui peuvent être à l'origine de pannes de courant, comme ce fut le cas en 1989 dans une grande partie du Canada et des Etats Unis. Les variations du vent solaire

provoquent également la corrosion de kilomètres de pipelines (de gaz et de pétrole) en Alaska. Les orages perturbent les liaisons radio. On relève aussi des conséquences dommageables dans le domaine de l'aéronautique (décharge électrique des satellites, dommages aux panneaux solaires produits par les radiations, modification de la position des satellites de basse altitude après un orage,...). Les particules chargées du vent solaire peuvent être comparées à un rayonnement radioactif. A plusieurs reprises, un satellite est tombé en panne à la suite d'un rayonnement intense pendant un orage magnétique. Les astronautes peuvent aussi être exposés à des doses importantes de rayonnements ionisants, surtout durant un long séjour dans l'espace. L'IASB collabore à la recherche dans ce domaine avec l'Agence Spatiale Européenne, la KULeuven, et l'Observatoire Royal de Belgique. Le but est de mieux comprendre comment le vent solaire interagit avec la magnétosphère en vue de prévoir les conséquences des orages magnétiques.

4. Le Soleil et le vent solaire

Le Soleil, notre étoile, est indispensable à la vie sur Terre: il nous prodigue lumière et chaleur. Outre ce rayonnement, le Soleil émet en permanence un flot de particules chargées que l'on appelle le vent solaire. Il s'agit en fait de l'expansion radiale dans le milieu interplanétaire de la couronne solaire dont la température atteint un million de degrés Kelvin. Bien que le vent solaire emporte environ un million de tonnes d'hydrogène à chaque seconde, cette masse représente une infime fraction de la masse solaire. Néanmoins, le vent solaire est d'une importance considérable car il interagit avec les environnements planétaires et cométaires. En particulier, le vent solaire façonne l'environnement magnétique (la magnétosphère) autour de la Terre en comprimant les lignes de champ dans la direction solaire et en les étirant vers l'arrière sur plus de 100 rayons terrestres dans la direction opposée au Soleil.

4.1 Le vent solaire

Le vent solaire est un plasma essentiellement constitué d'électrons et de protons. A 1 Unité Astronomique (UA), c'est-à-dire au voisinage de la Terre, la densité du vent solaire est typiquement de quelques particules par centimètre cube et sa température est de l'ordre de 100 000 K. Selon sa vitesse, on distingue deux types de vent solaire: le vent solaire lent, dont la vitesse typique à 1 UA est de 300 à 400 kilomètres par seconde, et le vent solaire rapide dont les vitesses atteignent régulièrement 700 à 800 kilomètres par seconde (Figure 1). Au cours de son voyage autour du Soleil, la sonde Ulysse a révélé que, durant une phase de minimum d'activité solaire, le vent solaire rapide trouve son origine dans les trous coronaux, des régions plus froides et moins denses de la couronne solaire. Lors d'une phase de minimum solaire, les trous coronaux sont confinés dans les régions polaires du Soleil. Le vent solaire lent provient quant à lui de régions plus chaudes qui forment approximativement une bande autour de l'équateur solaire. La situation est beaucoup plus complexe en phase de maximum d'activité solaire pendant laquelle une partie des trous coronaux peut migrer vers les zones équatoriales. Comment le plasma du vent solaire rapide peut-il être accéléré jusqu'à des vitesses

de l'ordre de 800 kilomètres par seconde bien qu'émergeant de régions coronales plus froides ? C'est une des questions à laquelle l'IASB a récemment apporté un élément de réponse.

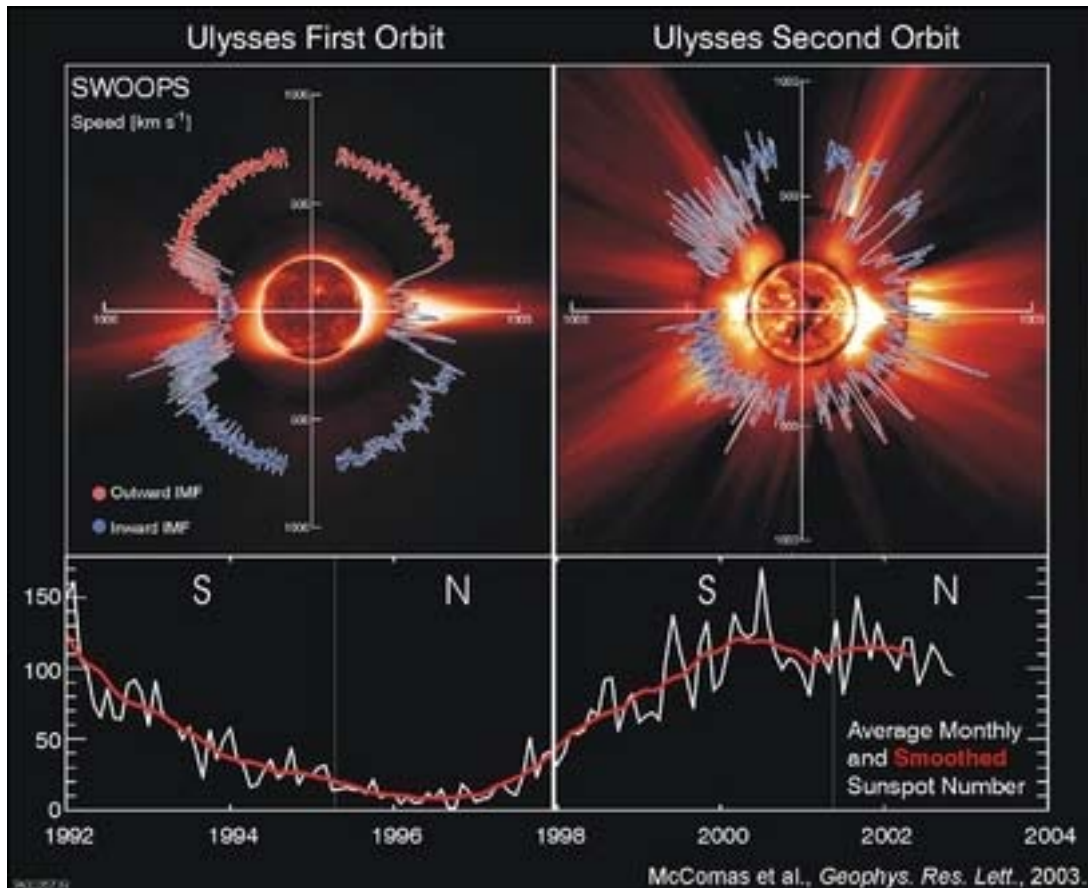


Figure 1: Comparaison des observations de la vitesse du vent solaire obtenues par la sonde Ulysse au cours de ses 2 orbites polaires autour du Soleil. Les données ont été obtenues à environ 6 ans d'intervalle et correspondent respectivement à un minimum d'activité solaire (en haut à gauche) et à un maximum d'activité solaire (en haut à droite). L'activité solaire, notamment mesurée par le nombre de tâches solaires présentes à sa surface, est représentée sur le graphique du bas. Lors du minimum d'activité solaire, le vent solaire est très structuré, le vent solaire lent trouvant son origine dans les régions équatoriales et le vent solaire rapide provenant des régions de plus haute latitude. Dans une phase de maximum d'activité solaire, le vent solaire est beaucoup plus chaotique.

Malgré des décennies de recherches, les mécanismes d'accélération du vent solaire ne sont pas encore bien compris. Le vent solaire peut être décrit au moyen de modèles de type fluide (hydrodynamique) ou cinétique. Bien que très populaire, l'approche fluide est conceptuellement fautive car elle suppose implicitement l'existence d'un grand nombre de collisions entre les particules du milieu assurant que leurs fonctions de distribution des vitesses sont Maxwelliennes. Mais les observations in situ du vent solaire au moyen de satellites ont démontré que ces fonctions de distribution des vitesses ne sont pas Maxwelliennes mais possèdent un excès de particules de haute énergie (également appelées particules

suprathermiques). L'existence de ces particules est étroitement liée au fait que le vent solaire est un milieu très faiblement collisionnel. Afin de tenir compte des effets liés à ces distributions non Maxwelliennes, une théorie cinétique du vent solaire doit être utilisée. L'IASB a développé une grande expertise dans ce domaine. L'approche cinétique la plus simple est le modèle dit exosphérique dans lequel les collisions entre les particules sont complètement négligées. Ces modèles présentent l'avantage d'être analytiques et de mettre en évidence les mécanismes principaux à l'origine de l'accélération du vent solaire. Récemment, ils ont été généralisés pour expliquer l'accélération du vent solaire rapide en supposant l'existence d'un excès d'électrons de haute énergie dans la couronne solaire. Plus ces électrons sont nombreux, plus rapide est le vent solaire à grande distance (figure 2). Ce modèle est cependant trop simple pour reproduire tous les détails observés dans le vent solaire car il s'agit d'un modèle à une dimension, stationnaire et sans collisions. Néanmoins, il possède les ingrédients de base permettant d'accélérer le vent solaire et suggère une alternative à l'accélération au moyen d'ondes de plasma, nécessaire dans les modèles fluides.

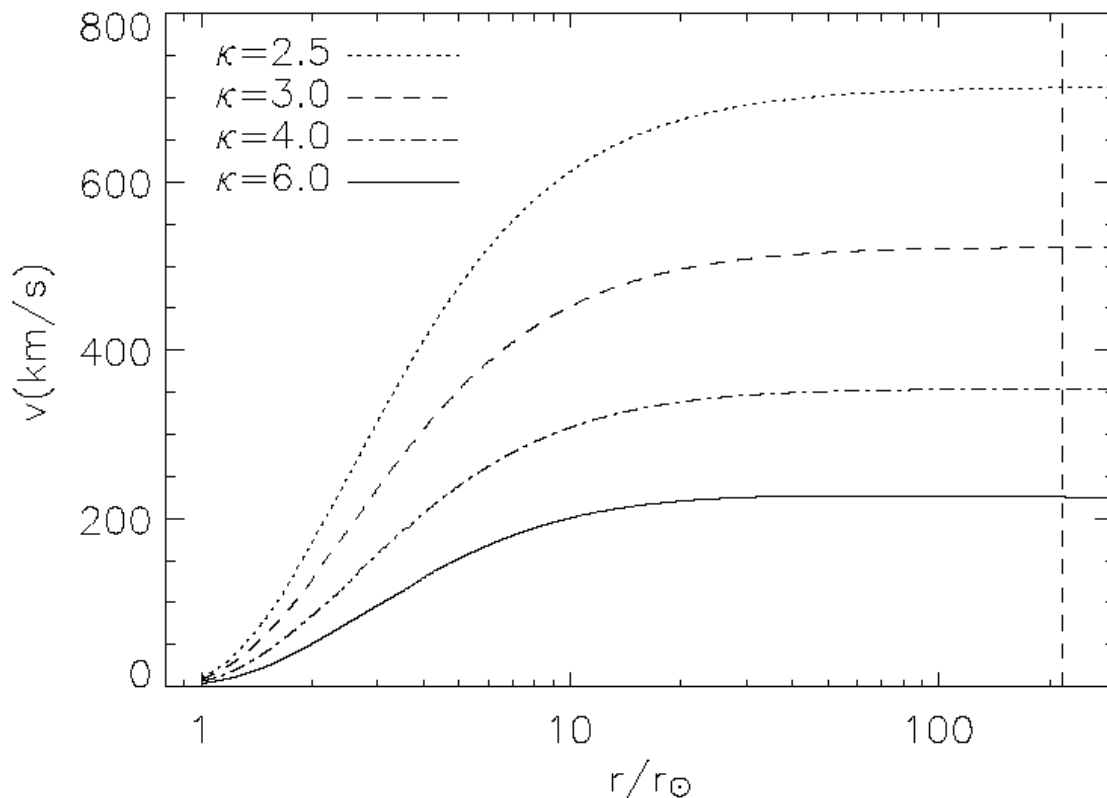


Figure 2: Profils de vitesse du vent solaire en fonction de la distance radiale au Soleil (exprimée en unités de rayons solaires) obtenus avec le modèle exosphérique de vent solaire développé à l'IASB. Le paramètre κ est une mesure de la quantité d'électrons suprathermiques dans la couronne solaire. Plus κ est petit, plus les électrons de haute énergie sont nombreux dans la couronne solaire, et plus le vent solaire est accéléré à grande distance. La ligne verticale en pointillés représente l'orbite terrestre à 1 UA ou 215 rayons solaires.

Le modèle cinétique développé à l'IASB a été mis en ligne sur un site de la NASA (<http://ccmc.gsfc.nasa.gov/>), « The Community Coordinated Modeling Center », dédié à l'étude des plasmas spatiaux et aux modèles de météo spatiale et récemment sur le site de « l'European Space Weather Portal » (ESWEP).

4.2. Les ions lourds du vent solaire

Environ 95% des ions dans le vent solaire sont des protons, mais des ions plus lourds sont également présents en faible quantité. L'hélium est l'ion lourd le plus abondant avec une moyenne d'environ 4% dans le vent solaire rapide. Des ions d'oxygène, de carbone, d'azote, de silicium, de magnésium, de fer, de soufre et d'autres ions mineurs ont également été détectés en quantité infimes (environ 1% des ions du vent solaire en tout). L'étude de ces ions lourds dans le vent solaire rapide au moyen d'analyseurs de particules à bord de la sonde Ulysse a révélé quelques propriétés surprenantes: leurs températures sont plus que proportionnelles à leurs masses et, à 1UA, leurs vitesses sont égales ou supérieures à celle des protons. D'autre part, les mesures spectroscopiques dans la couronne solaire avec le spectromètre UVCS à bord du satellite SOHO révèlent des températures extrêmement élevées pour les ions mineurs, ainsi que des vitesses beaucoup plus élevées que celle des protons dans la zone d'accélération du vent solaire. A l'IASB, nous avons développé un modèle barométrique (en équilibre hydrostatique) de la zone de transition, entre la chromosphère et la couronne, basé sur le phénomène de filtrage des vitesses. Appliqué aux ions mineurs, ce modèle prédit des températures élevées et plus que proportionnelles à leurs masses, en accord avec les observations. A nouveau, il s'agit d'une alternative au chauffage des ions mineurs dans la couronne par des phénomènes de résonance entre des ondes de haute fréquence et la fréquence de giration des ions autour des lignes de champ magnétique. Nous avons ensuite inclus les ions mineurs dans le modèle exosphérique du vent solaire rapide décrit auparavant afin d'investiguer l'influence de ces températures élevées sur leur accélération. Les vitesses asymptotiques obtenues pour les ions mineurs dépendent essentiellement du rapport entre leur masse et leur charge. Pour les ions avec un rapport élevé, la vitesse terminale (à 1 UA) est inférieure à celle des protons. Mais ceux qui ont un rapport « masse sur charge » de l'ordre de 2 (comme par exemple les particules alpha He^{2+}) peuvent être accélérés à des vitesses supérieures du fait de leur haute température. La température élevée des ions mineurs dans la couronne solaire est donc le facteur décisif jouant sur leur accélération.

5. La magnétosphère terrestre

Le champ magnétique terrestre nous protège des particules du vent solaire. La région de l'espace contrôlée par le champ magnétique de la Terre est appelée la *magnétosphère terrestre* (figure 3).

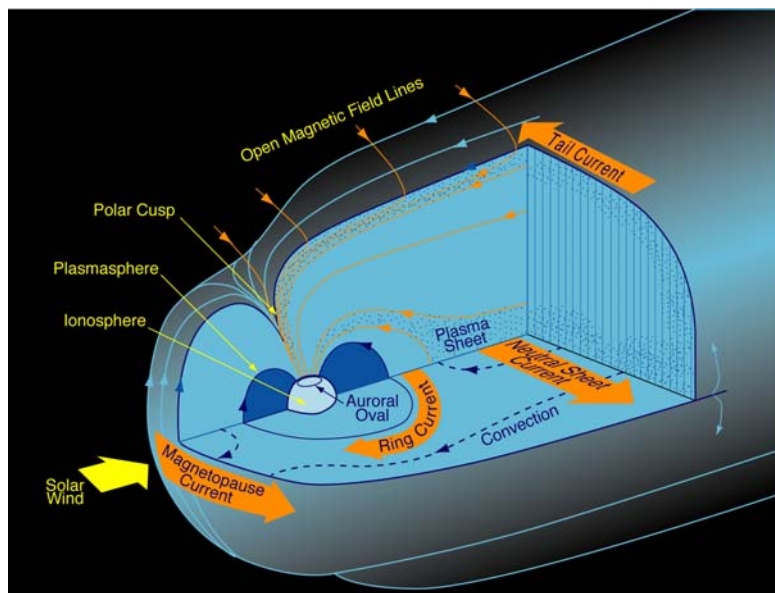


Figure 3: *Vue de la magnétosphère et de ses différentes régions de plasma*

Le champ géomagnétique constitue un bouclier efficace empêchant l'entrée directe dans la haute atmosphère terrestre du plasma solaire (figure 4).

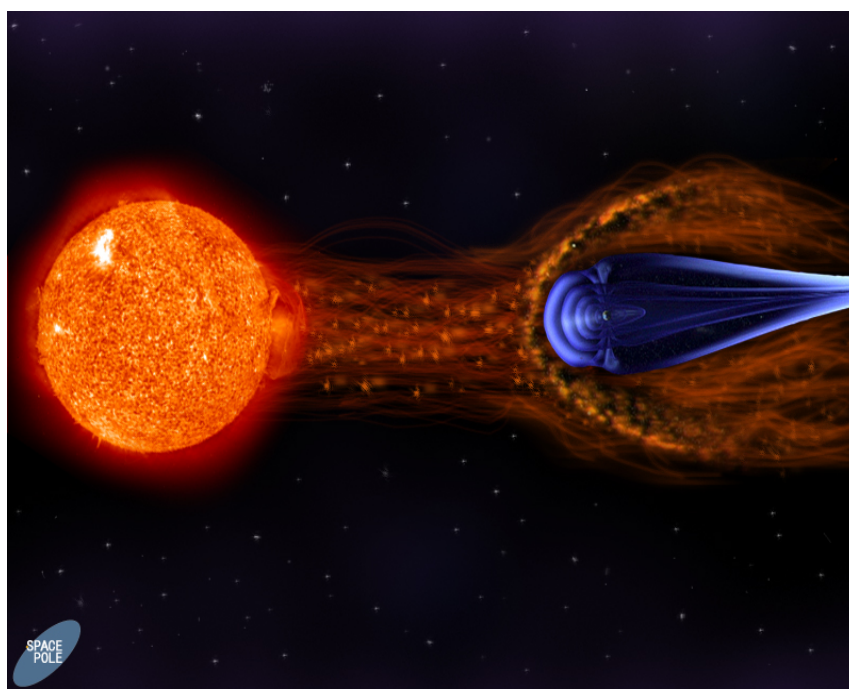


Figure 4: *Vue artistique du vent solaire s'échappant de la couronne solaire et interagissant avec le champ magnétique de la Terre (crédit ESA).*

Le vent solaire s'écarte en effet de l'obstacle magnétique en subissant un écoulement forcé, un peu comme l'eau d'un fleuve qui vient heurter la proue d'un navire, provoquant la formation d'une *onde de choc* située à environ 100 000 km de la Terre dans la direction du Soleil. Un changement brutal des propriétés du vent solaire (pression dynamique, densité, température, vitesse) se produit au passage de l'onde de choc. En aval de cette onde, le plasma solaire forme une région de transition, la *magnétogaine*, où il est comprimé et turbulent. Du côté terrestre, la magnétogaine est bordée par une nappe de courants électriques qui s'est formée lorsque, sous l'influence du champ géomagnétique, les électrons et les ions du vent solaire ont été déviés en sens opposés. Cette nappe de courants électriques délimite autour de la Terre une zone frontière appelée *magnétopause*. La forme de la magnétopause et sa distance par rapport à la Terre sont déterminées par l'équilibre entre les forces engendrées par les courants électriques qui y circulent et la variation de la pression dynamique du vent solaire. La magnétosphère - cavité magnétique à l'intérieur de la magnétopause - est comprimée du côté du Soleil, où elle se situe en moyenne à 10 rayons terrestres ($R_E = 6371$ km) du centre de la planète. Dans l'autre direction, du côté nuit, elle est étirée sur plusieurs millions de kilomètres, sous la forme d'une longue queue magnétique à l'allure de comète. Dans la magnétosphère terrestre, on distingue différentes régions de plasmas, parmi lesquelles la plasmasphère, les ceintures de Van Allen, le feuillet de plasma et les régions aurorales.

L'IASB est notamment impliqué dans deux expériences de la mission CLUSTER. L'objectif de cette mission, constituée de quatre satellites lancés en 2000, est d'établir une cartographie tridimensionnelle et non stationnaire des régions clés où l'interaction de la magnétosphère avec le vent solaire est la plus manifeste.

5.1. Etude de l'interaction du vent solaire avec la magnétosphère terrestre

Lorsque la matière d'une éruption de la couronne solaire (une *éjection de masse coronale*) se propage à travers l'espace interplanétaire et atteint la Terre, la pression dynamique du vent solaire est fortement augmentée, de sorte que la magnétopause est poussée vers l'intérieur, ce qui peut produire un *orage magnétosphérique*. Un des effets des fluctuations mineures continues de la pression dynamique du vent solaire est le mouvement d'oscillation de la magnétopause, comme illustrée à la figure 5.

Grâce aux données de CLUSTER, l'IASB a notamment mis au point une méthode de reconstruction qui permet de cartographier les mouvements d'oscillations de la magnétopause (figure 6).

L'IASB s'est également illustré en proposant un modèle de la structure interne de la magnétopause et un modèle de pénétration impulsive des éléments de plasma du vent solaire à travers la magnétopause.

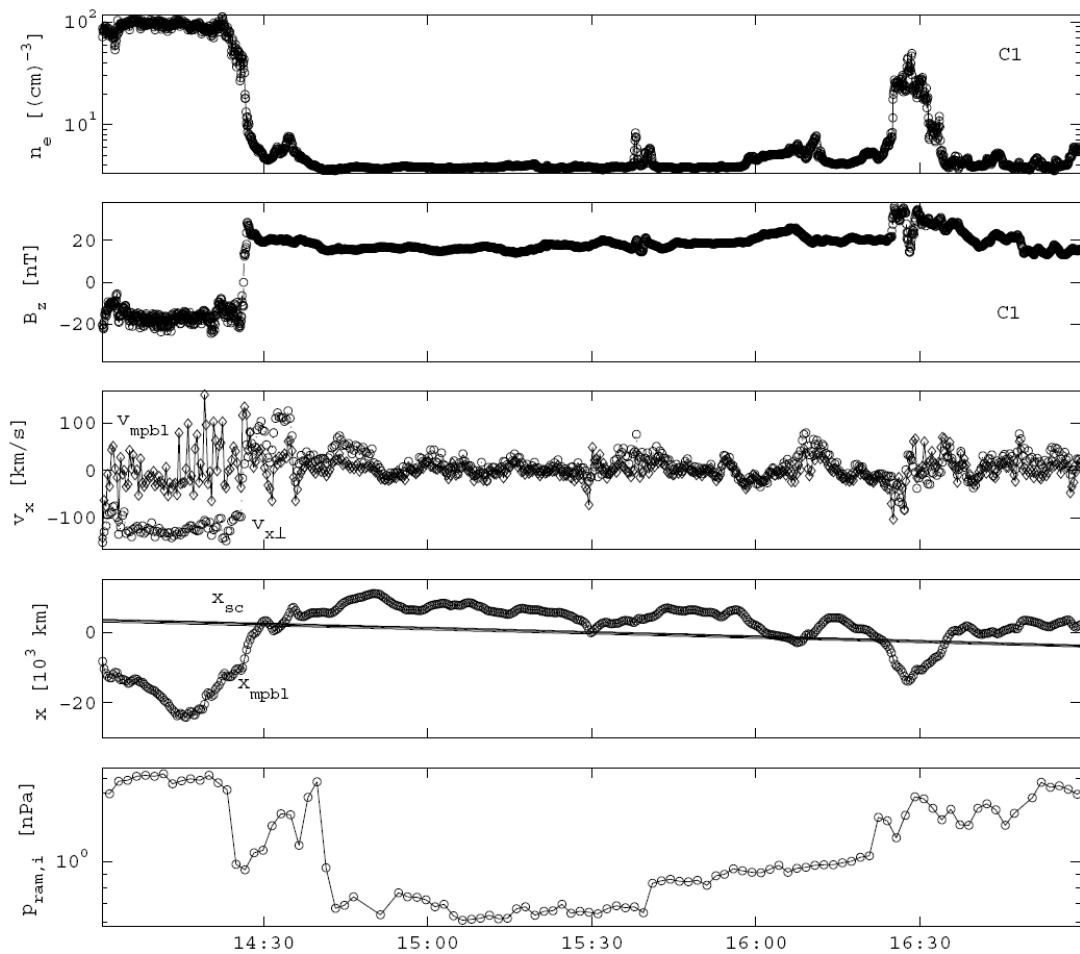


Figure 5: Observations effectuées par un des quatre satellites CLUSTER, durant une traversée de la magnétopause terrestre le 24 avril 2001. Cette figure illustre (en allant du haut vers le bas) : 1) la densité du plasma d'électrons, n_e . Cette densité est élevée à gauche de la figure, car le satellite se trouve encore dans la magnétogaine, cette région de compression du vent solaire qui entoure la magnétosphère ; 2) la composante Nord-Sud du champ magnétique (B_z). Le changement d'orientation de B_z indique la traversée de la magnétopause et l'entrée du satellite dans la magnétosphère où le champ magnétique est orienté vers le Nord ($B_z > 0$) ; 3) Le mouvement de va-et-vient de la magnétopause que reflètent les changements de signe de la vitesse de cette frontière (v_{mpbl}) ; 4) la position de la magnétopause (x_{mpbl}) et du satellite (x_{sc}) ; 5) ainsi que la pression dynamique du vent solaire (p_{ram}) mesurée par le satellite ACE situé en amont de la magnétosphère (au point de Lagrange L_1 du système Terre Soleil. Ce lieu est caractérisé par l'équilibre des forces gravitationnelles dues au Soleil et à la Terre). Notez que l'échelle de temps a été décalée pour tenir compte de la propagation du vent solaire depuis le point L_1 jusqu'à la position du satellite CLUSTER. Cette figure montre clairement l'anti-corrélation entre x_{mpbl} et p_{ram} . Lorsque la pression du vent solaire s'accroît, la magnétopause se rapproche de la Terre, et vice versa.

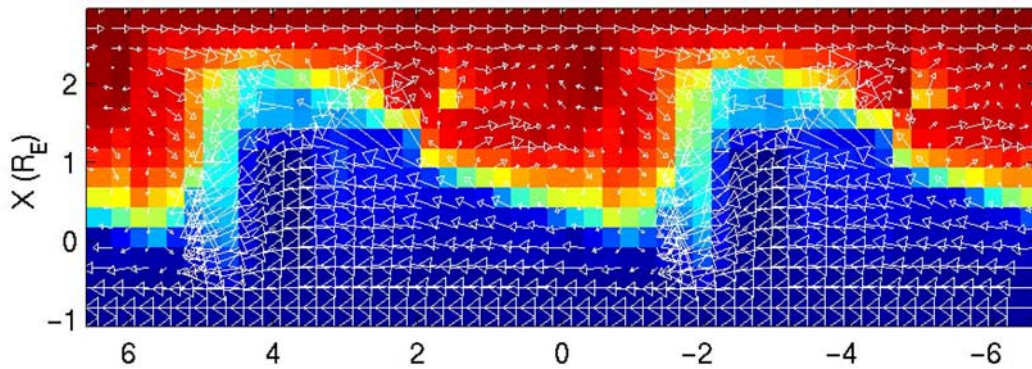
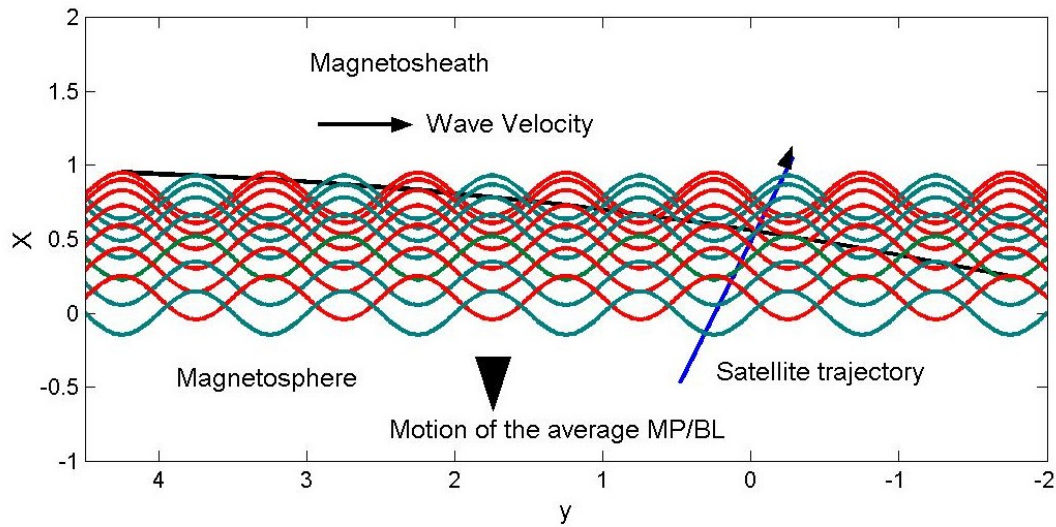


Figure 6: La figure du haut représente schématiquement la structure à deux dimensions de la magnétopause lorsque cette frontière est animée d'un mouvement d'ensemble dans la direction de sa normale et est, en même temps, parcourue par des ondes de surface. La figure du bas est une reconstruction de la densité des ions (représentée par un code couleur : le rouge indique une densité élevée propre à celle rencontrée dans la magnétogaine ; le bleu, une densité plus faible, propre à celle rencontrée dans la magnétosphère). Cette reconstruction est établie dans un système de référence qui glisse le long de la magnétopause avec la vitesse des ondes de surface. La magnétogaine est en haut, la magnétosphère en bas, le Soleil à gauche, la queue magnétosphérique à droite. L'échelle de l'axe des x (la composante normale à la magnétopause) est agrandie. Les flèches représentent les champs de vitesse du plasma dans le plan x - y . On constate que la longueur des ondes de surface est de l'ordre de 7 rayons terrestres et leur amplitude de l'ordre de deux rayons terrestres. La reconstruction montre clairement une forme d'ondes non sinusoïdale, plus escarpée dans la direction de propagation.

Les quatre satellites de la mission CLUSTER de L'ESA qui évoluent en formation rapprochée ont également permis d'étudier en détail la région de la plasmasphère.

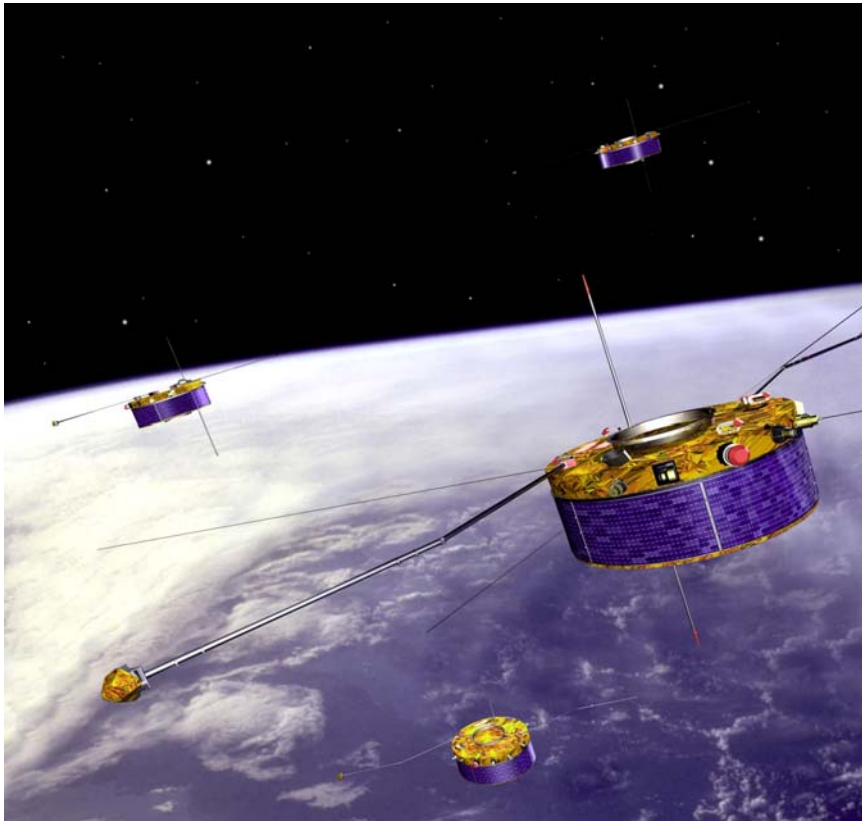


Figure 7: Les quatre satellites CLUSTER évoluant en formation rapprochée pour donner une vue tridimensionnelle de l'environnement spatial de la Terre (crédit ESA).

6. La plasmasphère

La *plasmasphère* constitue le prolongement de l'ionosphère aux basses et moyennes latitudes. Elle contient de très faibles quantités 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) provenant de l'ionosphère et piégés dans le champ magnétique terrestre. À une certaine distance de la Terre, appelée *plasmopause*, la densité des particules décroît de façon abrupte. Cette discontinuité dans la densité de plasma, qui constitue la limite de la plasmasphère, se situe entre 2 et 8 rayons terrestres selon l'intensité de l'activité géomagnétique.

Un modèle dynamique de la formation de la plasmopause a été développé à l'IASB. Il permet de prédire la position de la plasmopause dans le plan équatorial en fonction du niveau de l'activité géomagnétique. Cette activité géomagnétique est caractérisée par un indice K_p s'échelonnant de 0 à 9.

En 2004-2005, des simulations dynamiques de formation de la plasmopause ont été produites et les prédictions du modèle ont été comparées aux observations de l'expérience EUV (Extreme Ultra Violet) embarquée à bord du satellite IMAGE de la NASA, lancé le 25 mars 2000 (voir figure 8). Une collaboration avec l'Université d'Arizona a permis à l'IASB d'avoir accès à ces observations. L'instrument EUV détecte les photons de 30,4 nm de longueur d'onde diffusés par les ions d'hélium de la plasmasphère. Les images prises au-dessus des pôles, près de l'apogée du satellite, permettent pour la première fois d'avoir une vue globale de la plasmasphère et révèlent les détails d'une région hautement dynamique. De nouvelles structures telles que les « plumes », les « épaules » et les « canaux » ont ainsi été découvertes et modélisées.

Les satellites CLUSTER traversent régulièrement la plasmasphère lorsque celle-ci s'étend au-delà de quatre rayons terrestres dans le plan équatorial. Les données de densité transmises par l'expérience WHISPER (Waves of High frequency and Sounder for Probing of Electron density by Relaxation) à bord de la mission CLUSTER, ont également été analysées à l'IASB. Elles ont permis la découverte d'irrégularités de plasma de petites dimensions mais de grande amplitude dans la région de la plasmopause, corroborant ainsi le modèle de formation de la plasmopause développé à l'IASB. Les comparaisons avec les mesures simultanées d'IMAGE et de CLUSTER ont également permis de mieux comprendre la formation des plumes lors de l'augmentation de l'activité géomagnétique.

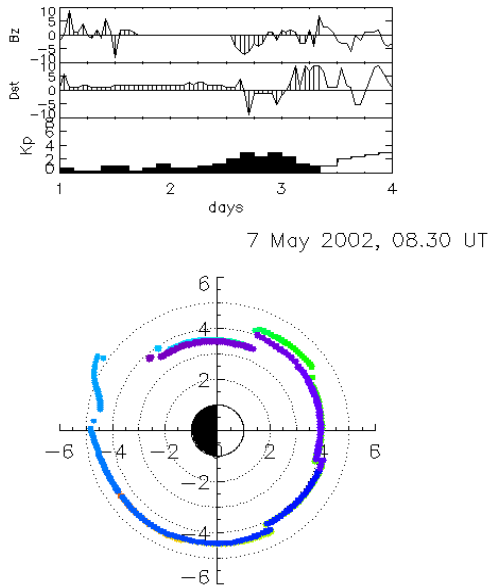
En 2006, les mesures les plus récentes de CLUSTER et d'IMAGE seront analysées et comparées avec les simulations. Le modèle de plasmopause sera mis en ligne sur le site de l'Institut. Il sera également amélioré pour donner non seulement la position de la plasmopause mais aussi la densité à l'intérieur et à l'extérieur de la plasmasphère. L'influence du champ électrique, de la vitesse du vent solaire et du couplage avec l'ionosphère sera également étudiée en détail.

7. Les aurores terrestres

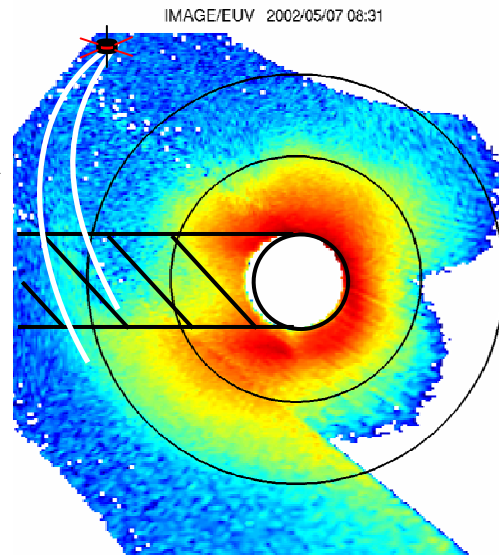
Les aurores sont une des manifestations les plus spectaculaires du couplage entre l'ionosphère et la magnétosphère. Les arcs auroraux discrets sont une des formes aurorales les plus intenses, toujours situés le long du bord interne de l'ovale auroral (voir la figure 9). Ils sont la conséquence de la précipitation dans l'ionosphère d'électrons énergétiques provenant du feuillet de plasma. Ces électrons sont accélérés vers la Terre par une différence de potentiel électrique, alignée le long des lignes de champ magnétique. En dépit de nombreuses études réalisées depuis 25 ans, la compréhension des mécanismes de formation des arcs auroraux reste un problème partiellement résolu.

Les travaux entamés récemment à l'IASB visent à présenter une image unifiée du couplage électrodynamique entre les processus ionosphériques de haute latitude se produisant à petite échelle spatiale, comme les arcs auroraux discrets, et des processus magnétosphériques se produisant à plus grande échelle spatiale

a.



b.



c.

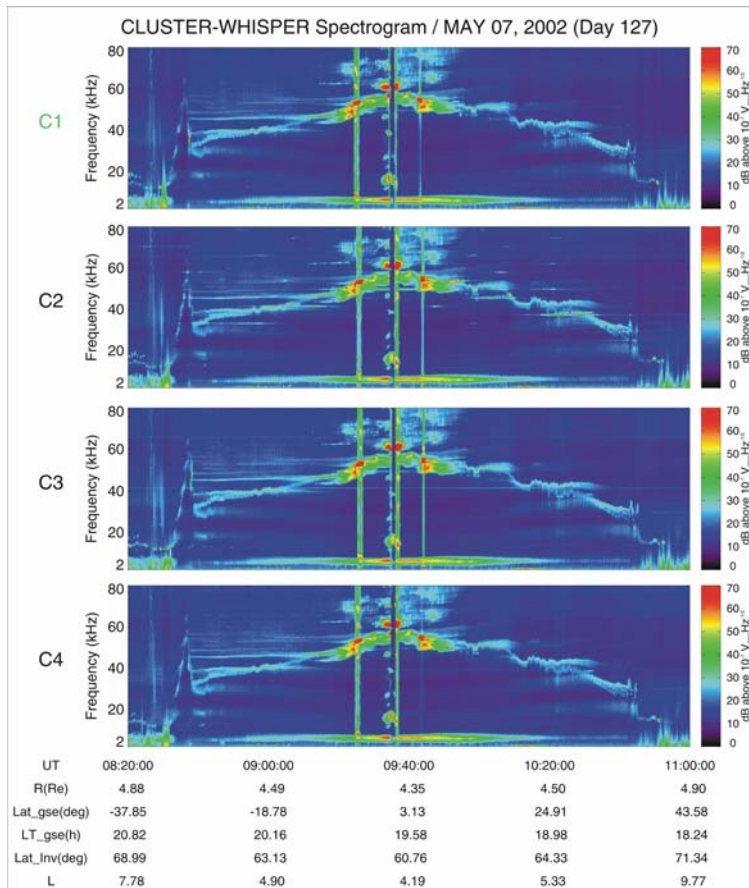


Figure 8:

a. Vue équatoriale de la plasmopause prédite par le modèle développé à l'IASB, pour le 7 mai 2002 à 8h30. L'indice Kp est monté jusqu'à 3+ durant cet événement. Le modèle prédit l'apparition d'une plume du côté nuit.

b. Une plume est également bien visible sur l'observation de la plasmasphère obtenue par le satellite IMAGE projetée dans le plan de l'équateur magnétique. La plasmopause correspond à la région où la densité diminue de façon abrupte.

c. Spectrogramme mesuré par l'instrument WHISPER à bord de chacun des quatre satellites de CLUSTER. La ligne bleu clair est proportionnelle à la densité des électrons le long de l'orbite des satellites. La brusque augmentation de densité observée vers 8h30 correspond à un moment où les satellites CLUSTER se trouvaient dans le prolongement de la plume (voir panneau b).

(cisaillements d'écoulement au travers de couches frontières magnétosphériques, sous-orages magnétiques).



Figure 9: *Une aurore observée en 2000 en Alaska, près du maximum d'activité solaire. (Photo: Jan Curtis)*

A cette fin, des études ont abordé l'origine de la chute de potentiel électrique, concentrée dans une zone d'altitude aurorale assez restreinte et responsable de l'accélération des électrons auroraux au-dessus des arcs discrets. Dans ce but, un modèle de dynamo génératrice a été développé.

Le couplage entre la magnétosphère chaude et raréfiée et l'ionosphère froide et dense constitue un thème de recherche important en raison des répercussions engendrées sur l'environnement ionisé de la Terre. D'immenses régions de l'espace

terrestre proche sont reliées par des “fils” quasi-supraconducteurs – les lignes de champ géomagnétique. Des régions clés de la magnétosphère, telles que la magnétopause et la couche frontière de basse latitude sont des sites où l'énergie, la quantité de mouvement et la masse, d'origine solaire, transportées par le vent solaire, sont transférées vers la magnétosphère terrestre. L'ionosphère et la magnétosphère réagissent dynamiquement aux variations imposées par le vent solaire. Des courants circulent le long des lignes de champ magnétique et transportent l'énergie des points « chauds » de la magnétosphère, comme le feuillet de plasma et sa couche frontière. En raison de la configuration particulière du champ géomagnétique, qui est de type dipolaire, ces points “chauds” magnétosphériques se projettent dans les régions (aurorales) de haute latitude de l'ionosphère, en suivant les lignes du champ. Par conséquent, ces régions aurorales, bien que confinées dans une fourchette d'environ 10 degrés de latitude, sont couplées à de vastes régions de la magnétosphère lointaine.

Au sol, l'activité intense dans le système magnétosphère - ionosphère est détectée par des caméras ciel entier, des radars, des ionosondes et des magnétomètres. L'activation des formes aurorales, les phases des sous-orages magnétiques, les fluctuations du champ électrique et de la conductance ionosphérique figurent parmi les manifestations les plus spectaculaires du couplage magnétosphère - ionosphère.

Des flux importants de particules ionosphériques s'échappent, soit dans la magnétosphère externe, soit dans l'espace interplanétaire. Des variations de la conductance ionosphérique dues au flux d'énergie précipitant modifient l'équilibre général du système global du courant électrique associé à l'arc auroral discret. Par conséquent, il est fondamentalement important d'arriver à comprendre les lois et processus physiques qui régissent la dynamique du couplage complexe entre l'ionosphère aurorale et la magnétosphère externe.

A l'IASB, nous visons à donner une description à deux dimensions du couplage ionosphère - magnétosphère, en partant des principes de base régissant le mouvement des particules chargées, et en utilisant des conditions frontières pertinentes au niveau de l'ionosphère et de la magnétosphère. Le plasma est décrit par des fonctions adéquates de distribution des vitesses pour les populations qui interagissent mutuellement dans un tube de flux magnétique de type auroral.

En 2006 vient de débuter un projet qui consiste à utiliser conjointement des observations d'arcs auroraux discrets obtenues à partir du sol et par satellite afin de mieux comprendre les interactions complexes entre l'ionosphère et la magnétosphère. La tomographie optique à partir de stations au sol et les mesures in situ réalisées à bord de satellites sont deux sources d'information complémentaires qui peuvent être utilisées pour mieux comprendre la physique des plasmas auroraux. La tomographie est une technique d'inversion, empruntée à l'imagerie médicale, qui permet de déterminer la structure spatiale de l'émission aurorale en 3

dimensions à partir d'images bidimensionnelles obtenues simultanément depuis différentes directions. Le spectre d'énergie des électrons qui précipitent le long des lignes de champ magnétique peut être déduit de cette distribution en 3 dimensions de l'émission aurorale si des observations multi spectrales sont disponibles. Pour cela, il faut en outre disposer d'un modèle qui décrit la physique de l'ionosphère et prédit la distribution de l'émission aurorale en connaissant le spectre d'énergie des électrons incidents. Il s'agit donc également d'un problème inverse. Le problème purement géométrique (la tomographie) et celui lié à la physique de l'émission peuvent être résolus séparément ou ils peuvent être combinés afin de résoudre les deux inversions en une seule étape. D'autre part, les populations d'électrons et d'ions magnétosphériques peuvent être étudiées au moyen de mesures in situ de satellites. Avec leur orbite polaire très excentrique, les quatre satellites Cluster passent fréquemment au-dessus de l'ovale auroral et croisent des lignes de champ magnétique qui s'étendent de la zone aurorale à haute latitude jusqu'au feuillet neutre dans la queue magnétosphérique.

Avec plusieurs stations au sol situées dans le Nord de la Scandinavie, un des objectifs du projet ALIS (Auroral Large Imaging System) est justement la tomographie des émissions aurorales. Les caméras de ces stations sont équipées de filtres permettant l'imagerie des aurores à plusieurs longueurs d'onde spécifiques. L'IASB va développer une collaboration avec l'équipe du projet ALIS, localisée à Kiruna en Suède, afin de développer des méthodes d'inversion pour étudier des événements dits conjugués, pendant lesquels la projection magnétique de l'orbite des quatre satellites Cluster traverse le champ de vision de ALIS. En confrontant les modèles et les données, nous tenterons de mieux comprendre l'origine de la formation des arcs auroraux.

8. La turbulence dans les cornets polaires

La turbulence est omniprésente dans les fluides et les plasmas. Elle peut être générée par une grande variété de phénomènes tels que des cisaillements d'écoulement, des gradients de densité ou de température, etc. La turbulence est caractérisée par des fluctuations des propriétés physiques à des échelles de longueur très différentes qui interagissent de manière non linéaire et produisent des structures organisées sous la forme de vortex. Ces vortex sont fréquemment observés dans des domaines d'étude très différents telles que l'océanographie, la climatologie ou l'aérodynamique des ailes d'avions. Ils sont également fréquemment observés dans les plasmas magnétisés tels que le vent solaire ou les magnétosphères planétaires. La turbulence est souvent décrite comme un processus dans lequel l'énergie est transférée de vortex à grande échelle à des vortex de plus en plus petits jusqu'à une échelle spatiale à laquelle l'énergie est finalement dissipée. C'est le schéma classique de la cascade de Kolmogorov, bien connu dans la turbulence fluide.

La transposition de cette cascade aux plasmas spatiaux n'est pas évidente. Dans le cadre général de la magnétosphère terrestre, la compréhension de ces processus de turbulence permettra de comprendre comment l'énergie injectée à grande échelle

par le vent solaire est progressivement transmise à des structures de dimensions spatiales plus petites pour finalement être dissipée et chauffer le plasma ambiant.

Les cornets polaires forment la frontière à haute latitude entre les lignes de champ magnétiques fermées du côté jour (le côté de la Terre exposé au Soleil) et les lignes de champ magnétiques qui sont ouvertes et étirées vers l'arrière pour former les lobes magnétosphériques dans la partie nuit. La localisation et la forme des cornets polaires dépendent essentiellement de la direction du champ magnétique interplanétaire et des paramètres du vent solaire. Dans les cornets polaires, on a un couplage direct entre les plasmas du vent solaire et de l'ionosphère, qui se caractérise, entre autres, par des fluctuations importantes du champ magnétique. L'étude de la topologie du champ magnétique dans ces régions est importante pour comprendre comment la masse et l'énergie sont transférées entre les différentes régions de la magnétosphère.

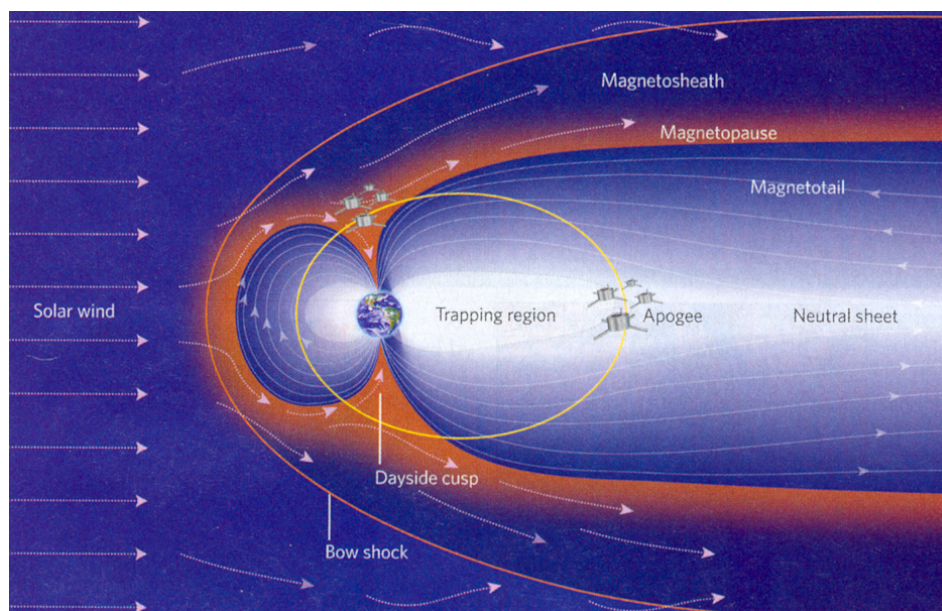


Figure 10: Coupe transverse de la magnétosphère Terrestre. Le Soleil est à gauche. Le plasma du vent solaire est chauffé et ralenti lors de sa rencontre avec le champ magnétique terrestre via une onde de choc. Une partie du plasma de la magnétogaine s'écoule à travers les cornets polaires (« cusps ») vers les hémisphères nord et sud. L'orbite des satellites Cluster illustrée sur ce diagramme croise la région des cornets polaires (crédit ESA).

Nous avons utilisé les données à haute résolution de champ magnétique mesurées par le magnétomètre FGM à bord des quatre satellites Cluster pour investiguer la turbulence du plasma dans les cornets polaires (voir la figure 10 pour l'orbite des satellites). Différentes analyses complémentaires ont été réalisées pour caractériser la turbulence magnétique dans ces régions et comprendre comment l'énergie est transférée.

9. Les ceintures de radiation de Van Allen

Les ceintures de radiation furent découvertes en 1958 par James Van Allen et furent immédiatement reconnues comme étant d'une importance considérable pour les missions spatiales. Il s'agit de régions toroïdales formées par des particules chargées électriquement, très énergétiques, qui sont piégées dans le champ magnétique terrestre. Les particules des ceintures de Van Allen, principalement des électrons, des protons et quelques ions plus lourds, possèdent des énergies cinétiques supérieures à 30 keV. Bien que ces particules de haute énergie ne participent pas significativement à la densité magnétosphérique (due principalement à des particules de plus faible énergie), elles constituent une population importante car elles peuvent endommager les composants électroniques et les cellules photoélectriques des satellites. De plus, ces particules énergétiques peuvent affecter les mesures effectuées dans l'espace, charger électriquement la surface du satellite, abîmer les composants optiques, sans compter qu'elles constituent un danger pour les équipages spatiaux. Pour les protéger, des écrans doivent être placés, mais ceux-ci ne doivent pas non plus être trop lourds pour que le poids du satellite ne soit pas trop élevé.

C'est pourquoi, l'IASB a développé pour l'Agence Spatiale Européenne (ESA) un système qui permet de modéliser les flux de particules de l'environnement spatial ainsi que leurs effets sur les systèmes et les satellites. Ce système appelé « Space ENVironment Information System » (SPENVIS) permet d'analyser et de cartographier les flux de particules mesurés par de nombreux satellites dans les ceintures (figure 11). Il est également possible d'évaluer les flux qui seront rencontrés par un satellite en introduisant les paramètres de son orbite. Des calculs de dose de radiation sont fournis. L'influence de l'activité solaire et le mouvement séculaire du centre du dipôle terrestre ont également été modélisés. Ce système permet d'améliorer la prédiction des spectres d'énergie et des doses de radiation accumulées sur un véhicule spatial se déplaçant dans la magnétosphère. Cette prédiction est utile afin de calculer le temps de vie et de détérioration des cellules photoélectriques, des panneaux solaires et d'autres équipements électroniques, ainsi que les protections à envisager pour les missions habitées. Ce système est amélioré chaque année par l'introduction de nouvelles mesures satellitaires dans la base de données.

10. Les plasmas cométaires

Le groupe « plasmas de l'espace », en collaboration avec le groupe d'Aéronomie Expérimentale, est également impliqué dans l'étude des environnements d'autres objets du système solaire. Ainsi, l'Institut a participé à la construction d'un spectromètre de masse, ROSINA (Rosetta Orbiter Spectrometer for Ion and Neutral Analysis), embarqué à bord de la sonde ROSETTA. Cette dernière a été lancée le 2 mars 2004 à destination de la comète 67P/Churyumov-Gerasimenko qu'elle devrait atteindre en mai 2014. En attendant cette échéance,

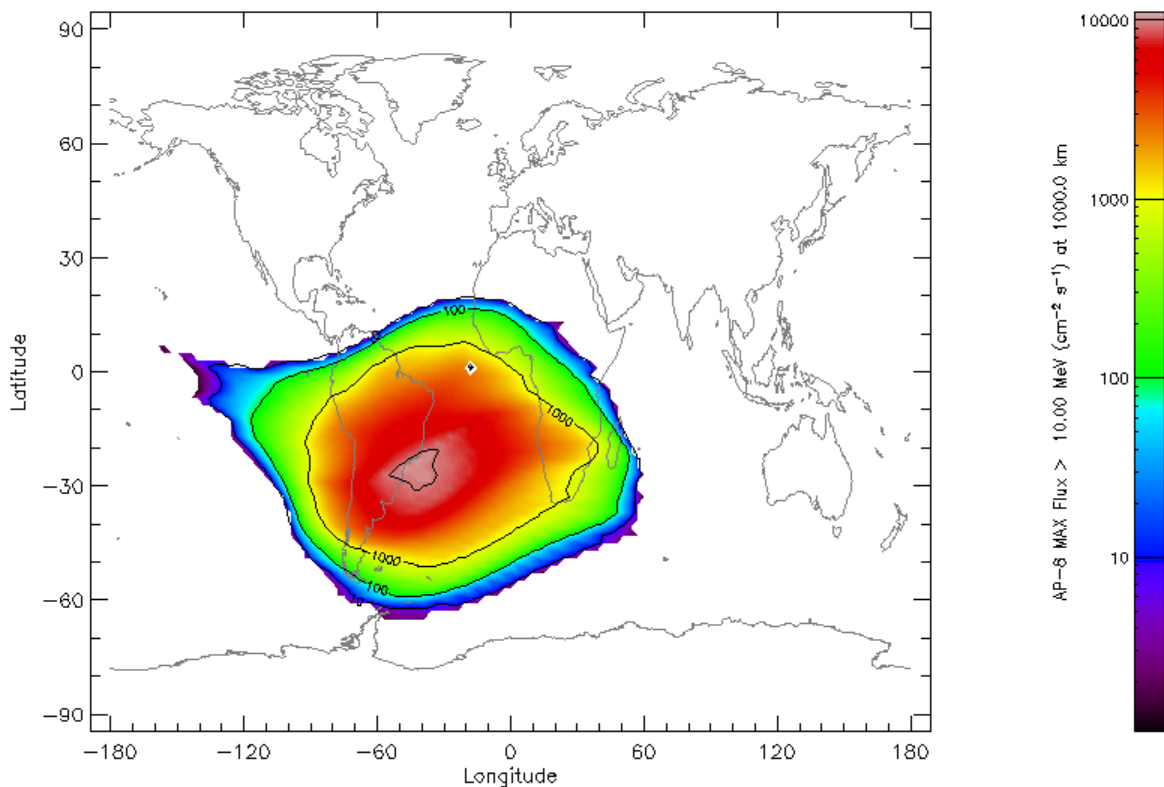


Figure 11: Carte des flux de protons qui ont une énergie supérieure à 10 MeV à 10000 km d'altitude prédite par le modèle AP8 sur SPENVIS. A basse altitude, les flux sont particulièrement élevés au-dessus de l'Atlantique Sud.

l'IASB participe à la calibration de l'expérience avec l'instrument de réserve qui se trouve à l'Université de Berne.

L'atmosphère d'une comète est neutre près de la surface du noyau, mais, en s'éloignant de ce dernier, elle devient progressivement plus ionisée à cause de réactions photochimiques et d'échange de charges avec le vent solaire. Nous préparons une base de données à partir de notre connaissance des vitesses de réaction de ces processus. Cette connaissance est toutefois limitée car les conditions en laboratoire sont très différentes de celles qui règnent dans la coma. Néanmoins, à partir de cette base de données, il sera possible d'interpréter la composition chimique mesurée par ROSINA en 2014-2015.

11. Conclusions

Depuis plus de trois décennies, le groupe « plasmas de l'espace » de l'IASB s'est forgé sa propre réputation internationale par l'excellence de ses travaux en recherche fondamentale. Ce compte rendu des recherches récentes effectuées par notre groupe démontre la continuité de cette excellence.

Aujourd'hui, notre civilisation dépend de plus en plus de technologies basées sur des télécommunications satellitaires sensibles à l'environnement spatial. Les travaux

de recherche en physique des plasmas de l'espace à l'Institut d'Aéronomie Spatiale de Belgique sont donc vitaux pour améliorer la compréhension de notre environnement spatial dont la complexité résulte de son comportement extrêmement dynamique.

Nous terminerons par ces mots du vicomte Dirk Frimout (brochure de l'Institut d'Aéronomie Spatiale, 1995) : *Tant que les chercheurs peuvent se consacrer entièrement à leurs travaux scientifiques, il y a continuité assurée : les chercheurs qui ont déjà trouvé leurs voies peuvent accompagner les jeunes. C'est une nécessité pour tout pays qui veut jouer un certain rôle dans le monde d'aujourd'hui.*

12. Publications les plus pertinentes (2004-2005)

Dans cette section le lecteur trouvera une liste de publications pertinentes relatives aux travaux que nous avons réalisés en 2004 et 2005.

12.1 Avec comité de lecture

12.1.1 Publiées

1. De Keyser, J., G. Gustafsson, M. Roth, F. Darrouzet, M. Dunlop, H. Rème, A. Fazakerley, P. Décréau, and N. Cornilleau-Wehrin, Reconstruction of the magnetopause and low latitude boundary layer topology using Cluster multi-point measurements, *Ann. Geophys.*, 22, 2381–2389, 2004.
2. Darrouzet, F., J. F. Lemaire, P. M. E. Décréau, J. De Keyser, A. Masson, D. L. Gallagher, O. Santolik, B. R. Sandel, J. G. Trotignon, J. L. Rauch, E. Le Guirriec, P. Canu, F. Sedgemore, and M. André, Density structures inside the plasmasphere: Cluster observations, *Ann. Geophys.*, 22, 2577–2585, 2004.
3. J. De Keyser, M. Roth, M. W. Dunlop, H. Rème, C. J. Owen, and G. Paschmann. Empirical reconstruction and long-duration tracking of the magnetospheric boundary in single- and multi-spacecraft contexts. *Annales Geophysicae*, 23:1355-1369, 2005.
4. J. De Keyser, M. W. Dunlop, C. J. Owen, B. U. Ö. Sonnerup, S. E. Haaland, A. Vaivads, G. Paschmann, R. Lundin and L. Rézeau. *Magnetopause and boundary layer*. In G. Paschmann, S. J. Schwarz, C. P. Escoubet, and S. Haaland (eds.): *Outer magnetospheric boundaries: Cluster results*, pages 231-320. ISSI, Berne 2005. Also published in *Space Science Reviews* 118(1-4), 2005.
5. M. Echim, J. Lemaire, Two dimensional Vlasov solution for a collisionless plasma jet across transverse magnetic field lines with a sheared bulk velocity, *Physical Review E*, vol. 72, 036405, 2005
6. M. Echim, J. Lemaire, M. Roth, Kinetic treatment of a collisionless plasma slab in motion across a magnetic field, *Physics of Plasmas*, vol. 12, 072904, 2005.
7. Lui, A. T., C. Jacquey, G. S. Lakhina, R. Lundin, T. Nagai, T.-D. Phan, Z. Y. Pu, M. Roth, Y. Song, R. A. Treumann, M. Yamauchi, and L. M. Zelenyi,

- Critical Issues on Magnetic Reconnection, *Space Sc. Reviews*, 116, 497-521, 2005.
8. Pierrard V., H. Lamy, and J. Lemaire, Exospheric distributions of minor ions in the solar wind, *J. Geophys. Res.*, vol. 109, A2, A02118, doi: 10.1029/2003JA010069, 2004.
 9. Pierrard V. and J. Lemaire, Development of shoulders and plumes in the frame of the interchange instability mechanism for plasmopause formation, *Geophys. Res. Lett.*, 31, 5, L05809, 10.1029/2003GL018919, 2004.
 10. Pierrard V. and J. Cabrera, Comparisons between EUV/IMAGE observations and numerical simulations of the plasmopause formation, *Annales Geophysicae*, 23, 7, 2635-2646, SRef-ID: 1432-0576/ag/2005-23-2635, 2005.
 11. Décréau, P. M. E., Le Guirriec, E., Rauch, J. L., Trotignon, J. G., Canu, P., Darrouzet, F., Lemaire, J., Masson, A., Sedgemore, F., and André, M., Density irregularities in the plasmasphere boundary player: Cluster observations in the dusk sector, *Adv. Space Res.*, 36(10), 1964-1969, 2005.
 12. Décréau, P. M. E., Ducoin, C., Le Rouzic, G., Randriamboarison, O., Rauch, J. L., Trotignon, J. G., Vallières, X., Canu, P., Darrouzet, F., Gough, M. P., Buckley, A. M., and Carozzi, T. D., Observation of Continuum radiations from the CLUSTER fleet : first results from direction finding, *Ann. Geophys.*, **22**, 2607-2624, 2004.
 13. Cougnet C., Crosby N.B., Eckersley S., Foullon C., Guarnieri V., Guatelli S., Heynderickx D., Holmes-Siedle A., Lobascio C., Masiello S., Nieminen P., Parisi G., Parodi P., Perino M.A., Pia M.G., Rampini R., Spillantini P., Tamburini V. and Tracino E., "Radiation Exposure and Mission Strategies for Interplanetary Manned Missions (REMSIM)", *Earth, Moon, and Planets*, ISSN: 0167-9295 (Paper) 1573-0794 (Online), 2005.
 14. Crosby N., Meredith N., Coates A. and Iles R.; "Modelling the Outer Radiation Belt as a Complex System in a Self-Organized State", *Nonlinear Processes in Geophysics*, Vol. 12, No. 6, 993-1001, 2005.
 15. Foullon C., Crosby N.B. and Heynderickx D., "Towards Interplanetary Space Weather: Strategies for Manned Missions to Mars", *Space Weather Journal*, Vol. 3, No. 7, S07004, 2005.
 16. Dmitriev A., Crosby N. and Chao J.-K., "Interplanetary sources of space weather disturbances in 1997 to 2000", *Space Weather*, Vol. 3, No. 3, S03001, 2005.
 17. I. Zouganelis, M. Maksimovic., N. Meyer-Vernet, H. Lamy, K. Issautier, A transonic collisionless model of the solar wind, *ApJ* 606, 542-554, 2004.

12.1.2. Sous presse

1. V.M.Cadez et al.: "Theoretical Modeling of Potential Magnetic Field Distribution in the Corona" in "Solar Magnetic Phenomena" (Eds Hanslmeier, A. et.al), *Astrophysics and Space Science Library*, Springer.
2. J. De Keyser, The Earth's magnetopause: Reconstruction of motion and structure, *Space Sci. Rev.*

3. F. Darrouzet, J. De Keyser, P.M.E. Décréau, J. F. Lemaire, and M. W. Dunlop. Spatial gradients in the plasmasphere. *Geophysical Research Letters*.
4. H. Balsiger, K. Altwegg, P. Bochsler, P. Eberhardt, J. Fischer, S. Graf, A. Jäckel, E. Kopp, U. Langer, M. Mildner, J. Müller, T. Riesen, M. Rubin, S. Scherer, P. Wurz, S. Wüthrich, H. Rème, C. Aoustin, C. Mazelle, J.-L. Médale, J. A. Sauvaud, E. Arijs, S. Delanoye, J. De Keyser, E. Neefs, D. Nevejans, J.-J. Berthelier, J.-L. Bertaux, L. Duvet, J.-M. Illiano, T. I. Gombosi, B. Block, G. R. Carignan, L. A. Fisk, F. Gliem, B. Fiethe, S. A. Fuselier, A. G. Ghielmetti, T. Magoncelli, E. G. Shelley, A. Korth, K. Heerlein, H. Lauche, S. Livi, A. Loose, B. Wilken, J. H. Waite and D. T. Young, H. Wollnik 'Rosetta Orbiter Spectrometer for Ion and Neutral Analysis ROSINA' *Space Sci. Rev.*
5. Crosby N., Rycroft M., and Tulunay Y., "Space Weather: an Application of Solar-Terrestrial Physics in Turkey", *Surveys in Geophysics*.
6. Crosby N.B., "Major Radiation Environments in the Heliosphere and their Implications for Inter-Planetary Travel", a Chapter to be included in a book called "Space Weather: Physics and Effects", Eds. Bothmer V. and Daglis I., Springer Praxis Books,

12.1.3. Soumises

1. Darrouzet, F., J. De Keyser, P. M. E. Décréau, D. L. Gallagher, V. Pierrard, J. F. Lemaire, B. R. Sandel, I. Dandouras, H. Matsui, M. Dunlop, J. Cabrera, A. Masson, P. Canu, J. G. Trotignon, J. L. Rauch, and M. André, Analysis of plasmaspheric plumes: CLUSTER and IMAGE observations and numerical simulation, *Annales Geophysicae*, 2005. Submitted.

12.2. Proceedings et revues scientifiques belges

1. F. Darrouzet, J. De Keyser, P. M. E. Décréau, D. L. Gallagher, V. Pierrard, J. F. Lemaire, B. R. Sandel, I. Dandouras, H. Matsui, M. Dunlop, J. Cabrera, A. Masson, P. Canu, J. G. Trotignon, J. L. Rauch, and M. André. Analysis of plasmaspheric plumes: Cluster, Image, and simulations. In: Proceedings of the Cluster and Double Star symposium, ESA SP, ESA, 2005.
2. Dunlop, M. W., Balogh, A., Shi, Q-Q., Pu, Z., Vallat, C., Robert, P., Haaland, S., Shen, C., Davies, J. A., Glassmeier, K.-H., Cargill, P., Darrouzet, F., and Roux, A., The Curlometer and other gradient measurements with Cluster, Proceedings of the Cluster and Double Star Symposium, 5th Anniversary of Cluster in Space, ESA SP-598, 2005.
3. El-Lemdani Mazouz, F., Grimald, S., Rauch, J. L., Décréau, P. M. E., Bozan, G., Le Rouzic, G., Suraud, X., Vallières, X., Trotignon, J. G., Canu, P., Darrouzet, F., and Boardsen, S., Electrostatic and electromagnetic emissions near the plasmasphere. A case event: 27 May 2003, Proceedings of the Cluster and Double Star Symposium, 5th Anniversary of Cluster in Space, ESA SP-598, 2005.
4. Rauch, J. L., Suraud, X., Décréau, P. M. E., Trotignon, J. G., Ledée, R., Lemerrier, G., El-Lemdani Mazouz, F., Grimald, S., Bozan, G., Vallières, X.,

- Canu, P., and Darrouzet, F., Automatic determination of the plasma frequency using image processing on WHISPER data, Proceedings of the Cluster and Double Star Symposium, 5th Anniversary of Cluster in Space, ESA SP-598, 2005.
5. Trotignon, J. G., Décréau, P. M. E., Rauch, J. L., Suraud, X., Grimald, S., El-Lemdani Mazouz, F., Vallières, X., Canu, P., Darrouzet, F., and Masson, A., The electron density around the Earth, a high level product of the Cluster/WHISPER relaxation sounder, Proceedings of the Cluster and Double Star Symposium, 5th Anniversary of Cluster in Space, ESA SP-598, 2005.
 6. J. De Keyser, M. Roth, M. W. Dunlop, H. Rème, C. J. Owen, and G. Paschmann. Solar wind pressure and the position of the magnetopause. In: Proceedings of the Cluster and Double Star symposium, ESA SP, ESA, 2005.
 7. J. De Keyser, F. Darrouzet, M. Roth, and V. Pierrard. The Earth system: Living in space – A Cluster perspective. In: E. Arijs and B. Ducarme, eds., Geodesy and Geophysics for the Third Millennium in Belgium, pages 69-79, Proceedings of the Contactfora of the Koninklijke Vlaamse Academie van België voor Wetenschappen en Kunsten, 2005.
 8. Dandouras, I., V. Pierrard, J. Goldstein, C. Vallat, G. K. Parks, H. Rème, C. Gouillart, F. Sevestre, M. McCarthy, L. M. Kistler, B. Klecker, A. Korth, M. B. Bavassano-Cattaneo, Ph. Escoubet, and A. Masson, Multipoint observations of ionic structures in the Plasmasphere by CLUSTER - CIS and comparisons with IMAGE-EUV observations and with Model Simulations, Inner Magnetosphere Interactions: New Perspectives from Imaging, AGU Geophysical Monograph, 159, 23-54, 2005. 10.1029/159GM03, Proceedings of the 2004 Yosemite Workshop, (Burch, Schulz, Spence, eds), 23-54, doi:10.1029/2004BK000104, 2005.
 9. Darrouzet, F., De Keyser, J., Décréau, P. M. E., Gallagher, D. L., Pierrard, V., Lemaire, J. F., Dandouras, I., Matsui, H., Dunlop, M., and André, M., Analysis of plasmaspheric plumes: CLUSTER and IMAGE observations and numerical simulations, *Physicalia Magazine*, **27(4)**, 385-395, 2005.
 10. Crosby N.B., "Permanent Job? Being over-educated in the EU is not always an asset", Parliament Magazine, Issue 213, 14 November 2005.
 11. H. Lamy, A la découverte des comètes rasantes avec SOHO, Ciel et Terre, Vol 120, No 3, 81-85, 2004.
 12. H. Lamy, A l'écoute des météores, Ciel et Terre, Vol 121, No 1, 13-20, 2005.
 13. M. Echim, *Kinetic investigation of the impulsive penetration mechanism of 2D plasma elements into the Earth's magnetosphere*, Université Catholique de Louvain, 2004
 14. M. Roth and J. De Keyser, SWYP Scientific Editing, Technical report, part 2, Final Report WP302, ESA pilot project, "Solar Influences Data Analysis Center" (ESTEC Contract 16913/03/NL/LvHS, March 2005.
 15. Foullon, C., Holmes-Siedle, A., Crosby, N.B. and Heynderickx, D., work-package in ESA REMSIM study, WP5000 "Radiation Hazard and Space Weather Warning Systems", 2004, see report at <http://space-env.esa.int/R_and_D/TN5.pdf>.