

PRIX DE GÉOPHYSIQUE DU CNFGG 1999

Roch SMETS

DYNAMIQUE DES ÉLECTRONS AUX FRONTIÈRES DE LA MAGNÉTOSPHÈRE TERRESTRE

UNIVERSITÉ D'ORSAY -PARIS 11-

Thèse de Doctorat soutenue le 20 Mai 1998

Résumé : La magnétosphère terrestre résulte de l'interaction du champ magnétique interplanétaire porté par le vent solaire avec le champ magnétique d'origine planétaire. La cavité magnétosphérique ainsi constituée n'est pas fermée et il est admis qu'il existe des transferts de masse et d'énergie entre le vent solaire et la magnétosphère interne. Ces transferts s'effectuent au niveau des régions de reconnexion magnétique, où la pression magnétique est très faible. Les rayons de giration des particules autour des lignes de champ magnétique sont alors très grands et peuvent être de l'ordre de ou supérieurs au rayon de courbure des lignes de champ magnétique. Le transport du plasma s'effectue alors de manière non-adiabatique (rupture des invariants du mouvement défini dans le cadre de la mécanique Hamiltonienne) et il en résulte une déformation des fonctions de distribution. Nous avons étudié cette déformation des fonctions de distribution dans les régions de reconnexion pouvant exister dans la queue lointaine de la magnétosphère, puis au voisinage d'un plasmatoïde. À l'aide de simulations numériques particulières, nous avons prédit des signatures caractéristiques des fonctions de distribution que l'on retrouve dans les observations des satellites GEOTAIL et INTERBALL. Plusieurs modèles analytiques ont été développés afin de déterminer la localisation et la topologie des sites de reconnexion.

Reconnexion magnétique dans les plasmas non-collisionnels

Une frontière importante dans la magnétosphère est celle existant entre les lobes et le feuillet de plasma (cf. Figure 1). Dans l'ionosphère, les schémas de convection déduits des mesures radars mettent en évidence un mouvement du plasma dans la direction anti-solaire dans les lobes (en blanc dans la Figure 1), et dans la direction solaire à plus basse latitude dans le feuillet de plasma (en grisé). Puisqu'il s'agit essentiellement du même plasma, ceci implique l'existence de processus permettant de reconnecter deux lignes de champ ouvertes des lobes pour former une ligne de champ fermée dans le feuillet de plasma, et une ligne de champ libre du milieu interplanétaire. On trouve dans la littérature deux types de définition pour la reconnexion, à savoir :

- écoulement du plasma à travers une surface séparant deux régions dont les lignes de champ ont des topologies différentes [*e.g. Vasyliunas, 1975*].
- dissipation de l'énergie magnétique dans une région de renversement de champ magnétique en énergie cinétique des particules [*e.g. Hill, 1975*].

Ces deux définitions sont en fait équivalentes. Dans la première, le champ magnétique en aval de la région de reconnexion est inférieur à celui en amont. Cela signifie comme dans la deuxième définition, une diminution de l'énergie magnétique à l'origine des processus d'accélération et de chauffage des particules.

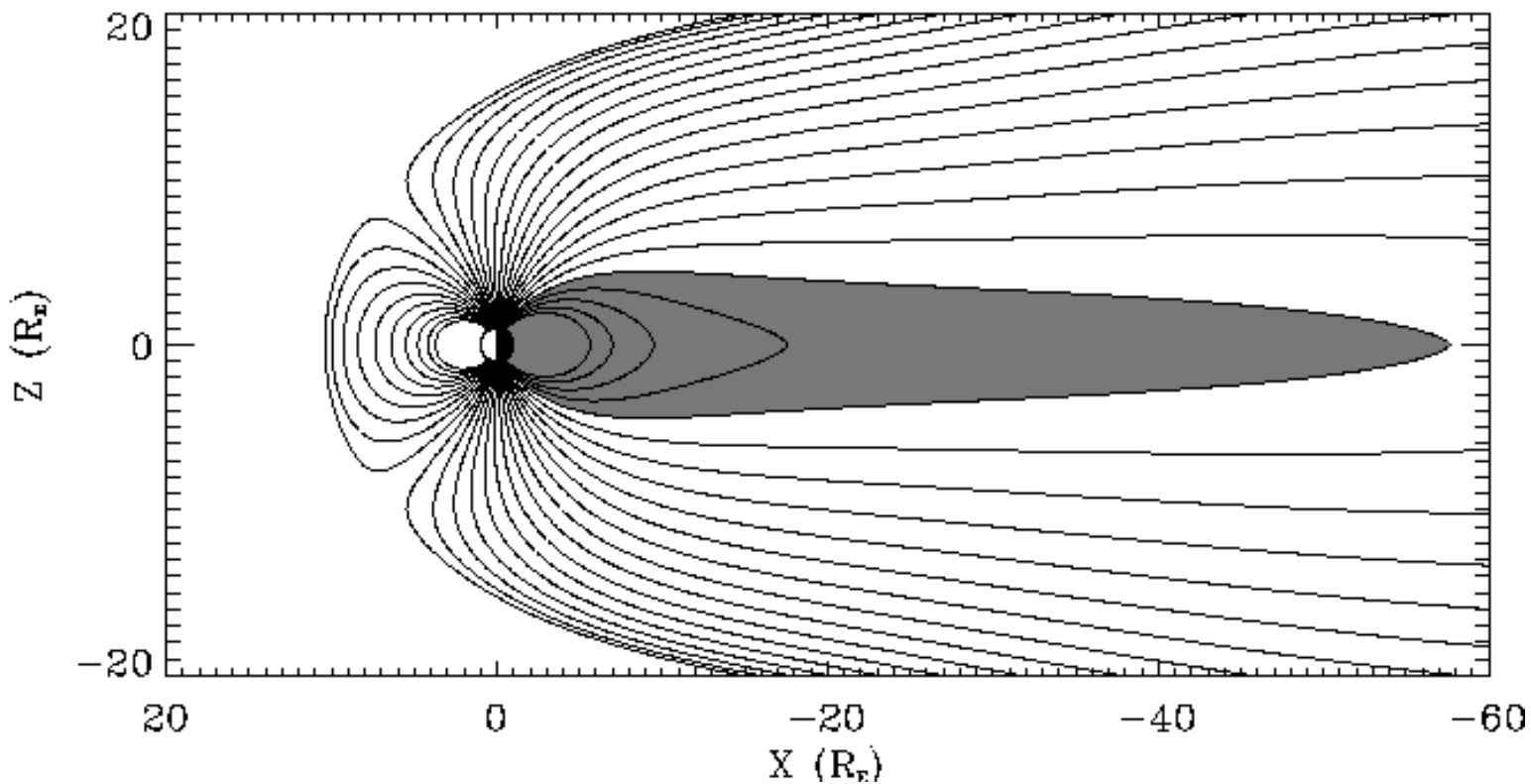


FIGURE 1.

A l'aide de l'équation de Maxwell-Faraday et de la loi d'Ohm simplifiée (valable pour des phénomènes de basse fréquence et de grande longueur d'onde), on montre que la dérivée temporelle du champ magnétique est proportionnelle à un terme de transport et à un terme de diffusion. Lorsque ce dernier est négligeable (dans un plasma de conductivité infinie), on peut faire l'approximation du "champ gelé" où le plasma se déplace avec les lignes de champ magnétique. On démontre facilement que si l'on considère deux points situés sur une même ligne de force, ils le resteront au cours du temps. On ne peut donc pas couper un tube de flux pour le recoller à un autre tube de flux.

Gurnett [1989] a étudié les similitudes existant entre les processus de reconnexion dans les plasmas spatiaux et ceux que l'on observe dans le sillage des ailes d'un avion. La loi d'évolution (en fluides neutres) du vecteur tourbillon (ou de la vortécité défini comme le rotationnel du vecteur vitesse) est très semblable à l'équation d'évolution du champ magnétique. La structure du vecteur tourbillon dans le sillage d'un avion est illustrée sur la Figure 2. On observe une topologie similaire à celle du champ magnétique dans queue de la magnétosphère où l'on a des lignes de champ anti-parallèles.

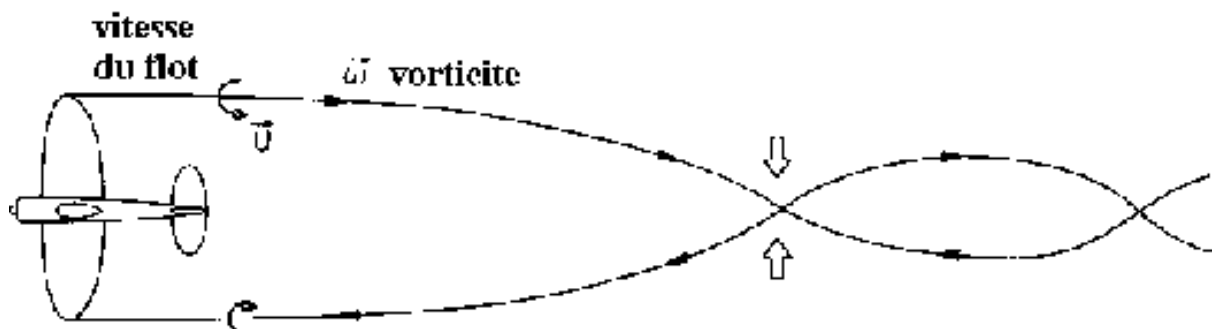


FIGURE 2.

En fluide neutre, la fréquence de collision est trop faible pour faire diffuser la vorticité. Les observations montrent néanmoins que la reconnexion des lignes de vorticité s'effectuent sur des temps caractéristiques plus court que ceux prévus théoriquement. On déduit de ces observations que dans l'air, même si la fréquence de collision entre les neutres est *a priori* trop faible pour permettre la reconnexion, celle-ci est néanmoins observée dans le sillage de l'avion. De plus, ces observations montrent qu'il ne s'agit pas d'un phénomène stationnaire, la reconnexion étant sporadique et très localisée. Ceci suggère que la résistivité qui apparaît dans la loi d'Ohm n'est pas nécessairement celle du milieu considéré. Sans que cela soit démontré, la résistivité à l'origine de cette reconnexion dans le sillage d'un avion serait due à la micro-turbulence existant dans l'air. Pour les plasmas spatiaux, de nombreux travaux ont été menés pour trouver de bons candidats à cette résistivité que l'on appelle alors résistivité anormale.

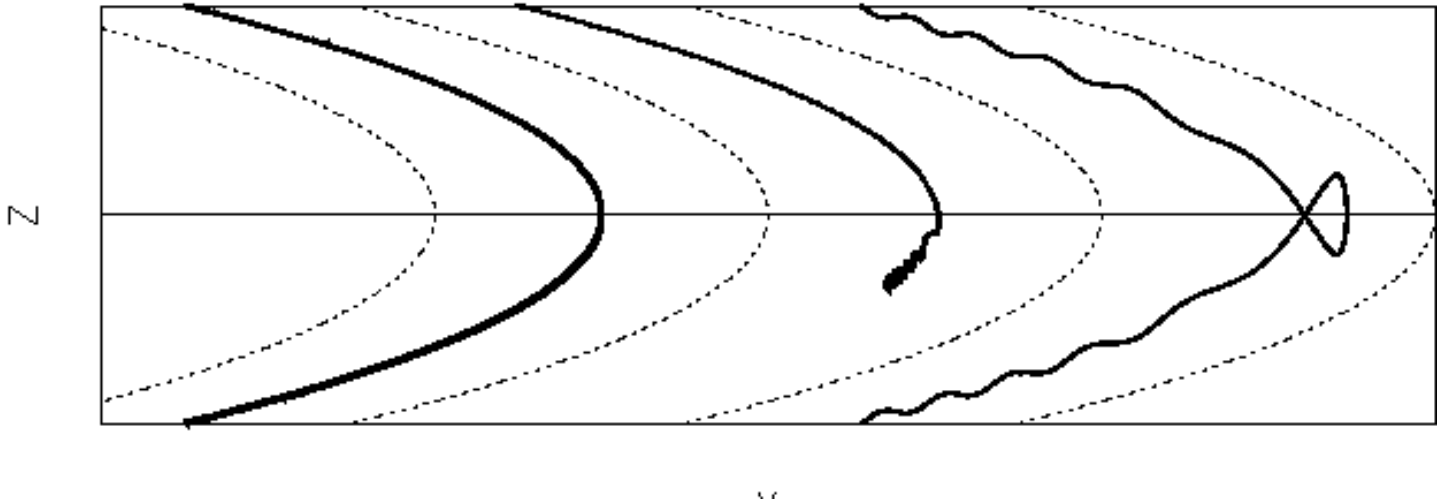


FIGURE 3.

On a choisi pour cette étude de considérer que le processus de reconnexion magnétique a eu lieu, afin de voir de quelle manière il modifie ou perturbe la forme de la fonction de distribution des électrons, c'est à dire de leur densité dans l'espace des phases. En raison de la faible valeur du champ magnétique dans les régions de reconnexion, les particules ont des rayons de giration qui deviennent localement très grands, et qui peuvent être supérieur aux longueurs caractéristiques de gradient. Le mouvement des particules n'est alors plus un mouvement régulier de giration autour des lignes de champ magnétiques et peut devenir chaotique. La Figure 3 illustre de tels orbites (en traits plein épais) pour lesquels les lignes de champ magnétiques semblables à celles que l'on trouve dans la queue de la magnétosphère sont représentées en traits pointillés. Cette dynamique non-linéaire est à l'origine de déformation des fonctions de distribution.

Méthode de calcul

Pour reconstruire des fonctions de distribution dans l'espace des phases, nous avons pour un point d'observation donné (ou l'on veut reconstruire la forme de fonction de distribution) remonté dans le temps les trajectoires de particules qui l'atteignent à l'aide de codes numériques. Les calculs sont effectués dans un modèle de champ électrique et magnétique pr scrit. Le calcul de ces trajectoires est interrompu lorsque les particules parviennent à la position source ou l'on connaît la forme de la fonction de distribution. On reconstruit la fonction de distribution au point d'observation en pesant la particule dans la distribution initiale en utilisant le théorème de Liouville comme ceci est illustré schématiquement dans la Figure 4. Ce théorème peut être utilisé ici car le système considéré est Hamiltonien (c'est-à-dire qu'il n'y a pas de dissipation d'énergie, le système est conservatif).

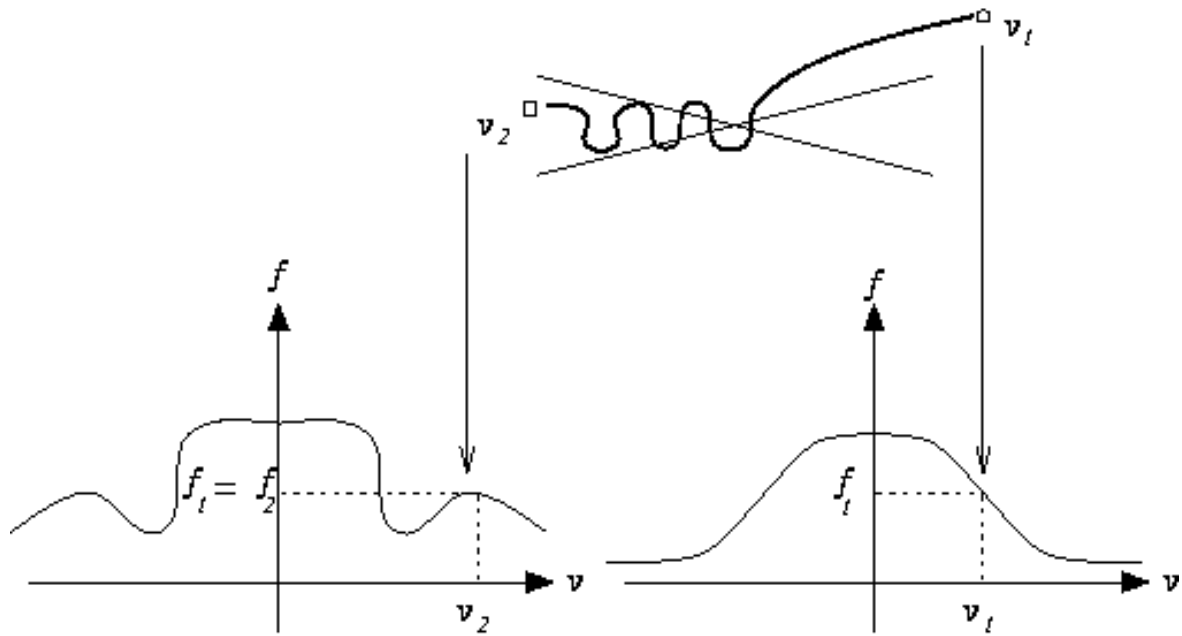


FIGURE 4.

Fonction de distribution au voisinage d'un site de reconnexion

La Figure 5 présente un exemple de fonction de distribution électronique obtenue au voisinage d'un site de reconnexion. On observe une ligne de fracture correspondant à un fort gradient de densité. Elle est assez large et peu marquée à basse énergie et devient plus fine et plus prononcée à haute énergie. Elle sépare deux régions de l'espace des phases : une région A où la densité est importante, et une région B où la densité est plus faible. On observe également des structures à petite échelle composées de trous de densité positionnés autour de la ligne de fracture de manière assez symétrique.

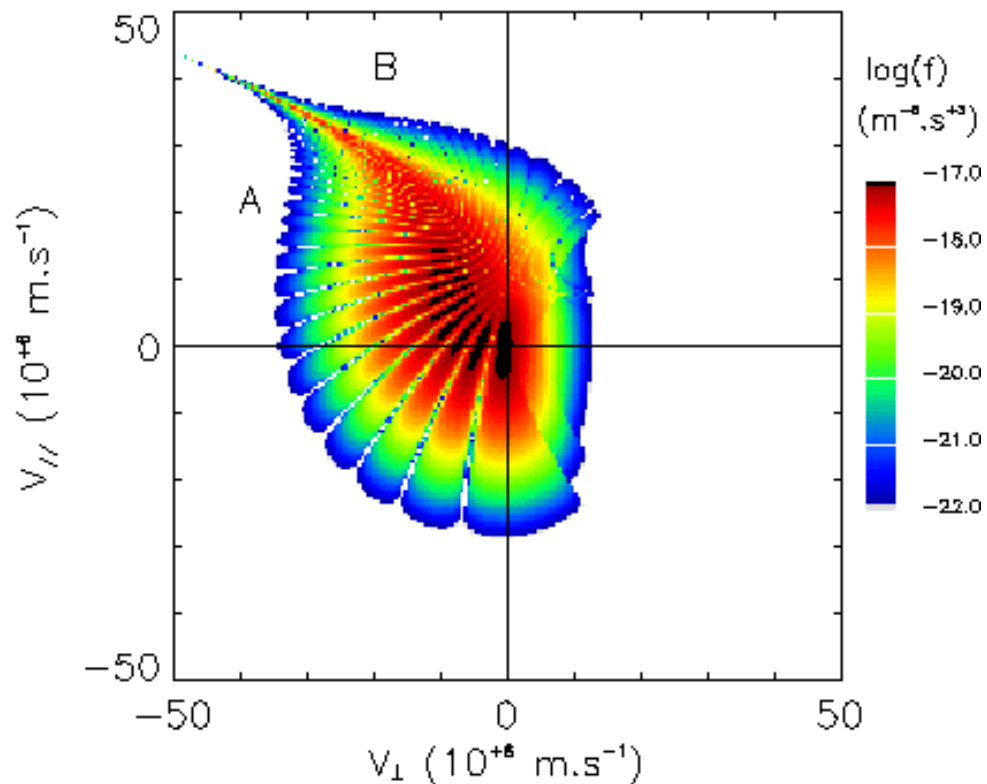


FIGURE 5.

Les lignes de fracture et les plumes de densité présentées dans la Figure 5 apparaissent donc comme caractéristiques des fonctions de distribution dans le voisinage proche d'un site de reconnexion. Le manque d'observations ne nous a pas permis de rechercher de telles structures de densité, et dans un premier temps nous nous sommes intéressés à la question de leur observabilité. En particulier, le département EMI du CESTP est impliqué dans l'expérience PEACE embarquée à bord des satellites CLUSTER-2 (lancement prévu au cours de l'an 2000) et qui mesurera les électrons dans la gamme d'énergie 0.6 eV - 30 keV. Dans sa résolution maximale, cet instrument disposera de 88 portes en énergie, de 12 angles polaires, et de 15 angles azimutaux. Sa période de spin (periode de rotation du satellite sur lui même) est de 4 secondes. En utilisant les caractéristiques de cet instrument, il a paru utile d'examiner si les structures de densité décrites dans ce chapitre étaient détectables. La Figure 6 présente la fonction de distribution électronique de la Figure 5 telle qu'elle serait observée par PEACE.

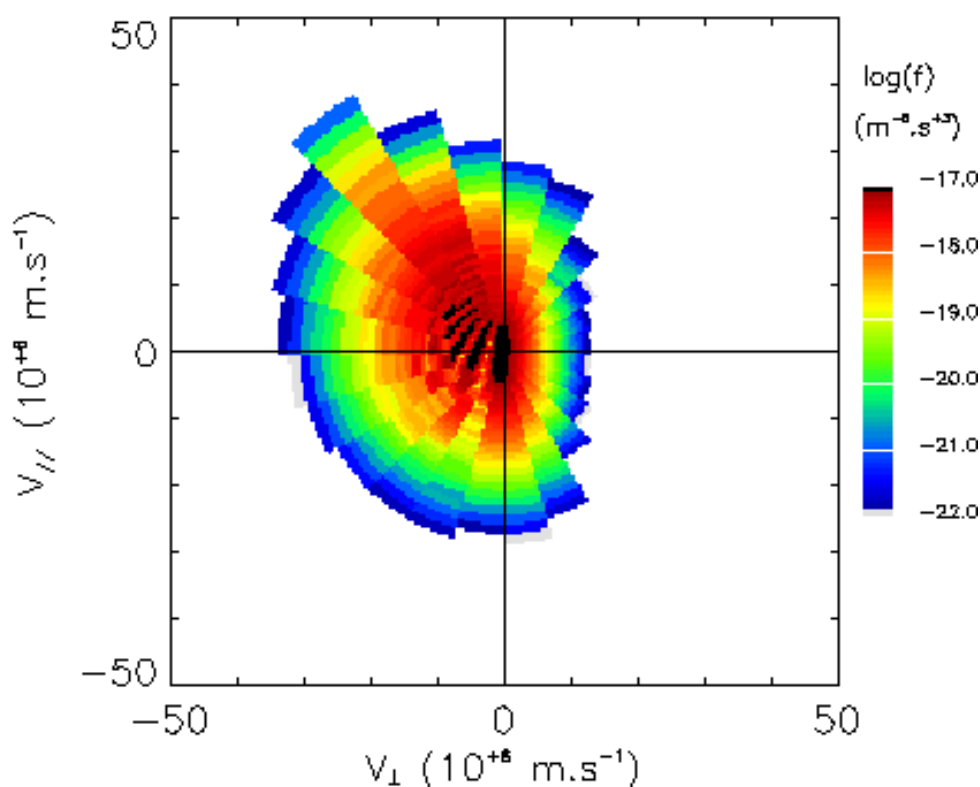


FIGURE 6.

Tandis que les multiples plumes de densité dans la Figure 5 ne sont pas résolues dans la Figure 6, la ligne de fracture à grande échelle est elle clairement visible, même si l'effet de moyenne dans les différentes portes conduit à un élargissement et à une atténuation du niveau de densité. Cette structure fournit ainsi une signature potentielle d'un site de reconnexion.

Fonction de distribution sur le bord externe du feuillet de plasma

Nous nous sommes en suite intéressé à la forme de ces fonctions de distribution pour un point d'observation situé plus en aval du site de reconnexion. Dans ce cas, les électrons ont un nombre d'interactions non-adiabatiques très limité et leur dynamique est assez régulière. Ceci est illustré dans la Figure 7 qui montre la fonction de distribution obtenues.

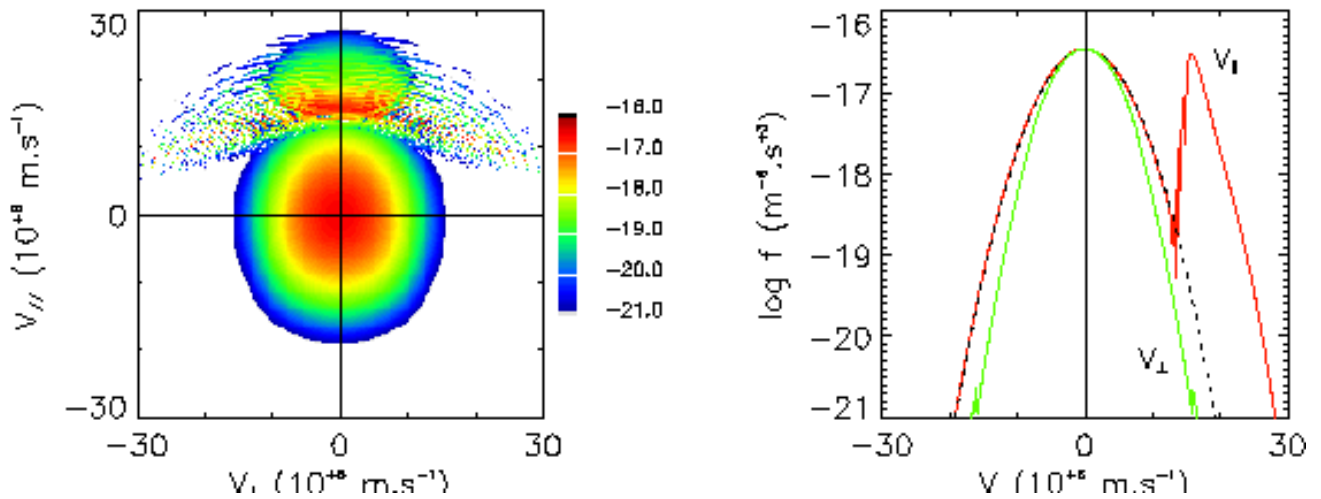


FIGURE 7.

Deux populations distinctes apparaissent à savoir : une population froide directement issue des lobes et une population à haute énergie caractérisée par un faisceau dense le long du champ magnétique. On notera également que la région de transition entre ces 2 populations est très bruitée. Ce résultat est dû au comportement chaotique des particules. Cet aspect bruité est beaucoup plus marqué que dans le cas des ions et affecte peu le faisceau produit par accélération des particules au voisinage de la ligne neutre.

Si l'on considère maintenant un point d'observation plus à l'intérieur du feuillet de plasma, les électrons subissent un plus grand nombre d'interactions non-adiabatiques avec la zone de diffusion, et le comportement fortement chaotique qui en résulte nous a conduit à recourir à une méthode statistique. La Figure 8 illustre les résultats obtenus pour un point d'observation situé plus à l'intérieur du feuillet de plasma.

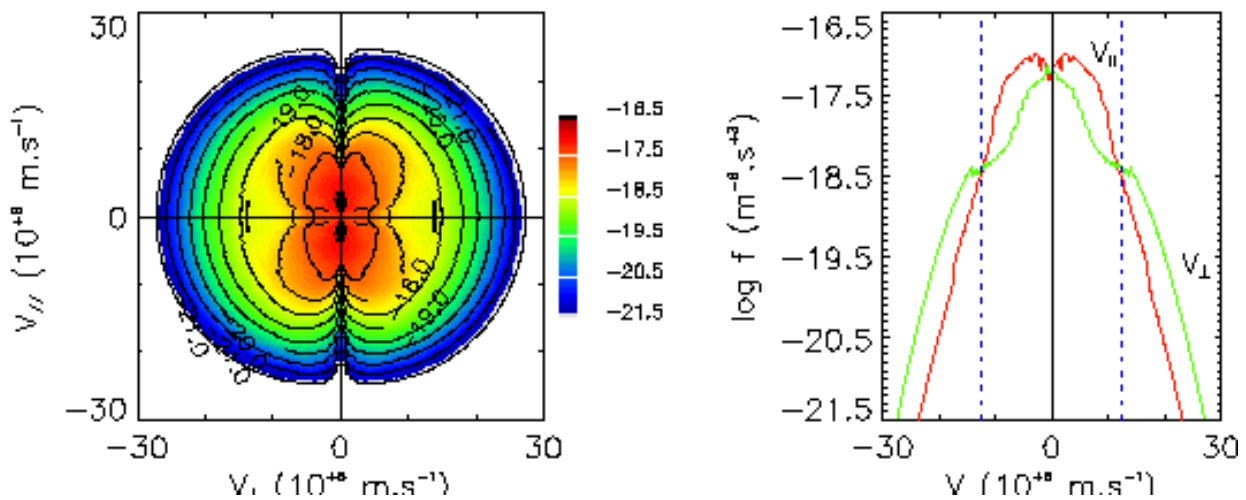


FIGURE 8.

Il apparait clairement dans cette figure une composante de la fonction de distribution essentiellement le long du champ magnétique à basse énergie et dans une direction plus perpendiculaire à haute énergie. Nous avons vérifié la stabilité de ces structures au cours du temps. La structure en oeil qui caractérise ces distributions peut être mieux appréciée dans le panneau de droite des Figures 8.

Au vu de notre étude, les distributions en oeil observées sur le bord externe du feuillet de plasma résultent d'un processus en 2 temps : (1) production d'une distribution en cigare (ou tout du moins d'une anisotropie au voisinage de la ligne neutre) (2) diffusion en aval de la ligne neutre ce qui conduit à une distribution en oeil. Ces structures

expliquent ainsi les distributions en faisceaux et en oeil observées dans la queue lointaine de la magnétosphère par le satellite japonais GEOTAIL [e.g. *Mukai et al.*, 1996].

Dans ce cadre d'interprétation, la structure en oeil des distributions électroniques recèle une information sur la topologie des lignes de champ. Nous avons montré que la connaissance de la vitesse pour laquelle les valeurs de la fonctions de distribution dans les directions parallèles et perpendiculaires au champ magnétique étaient égales, permet de déduire l'épaisseur de la couche de courant. On a ainsi obtenu une épaisseur de la couche de l'ordre de 5000 kilomètres ce qui est en accord avec des observations directes antérieurs.

Conclusion

Les études des processus de reconnexion qui peuvent exister dans la magnétosphère terrestre ont commencé au début des années soixante. Elles ont d'abord été menées dans le cadre de théories MHD et avec des observations *in situ* rares et de résolution limitée. Bien que le nombre croissant de satellites et la qualité des instruments embarqués nous apportent une connaissance plus fine de la physique magnétosphérique, il existe encore bien des zones d'ombre sur l'existence, l'origine, et les implications des processus de reconnexion.

Dans le cadre d'une magnétosphère ouverte qui permet la pénétration de plasma issu du vent solaire, il existe une ou plusieurs régions de reconnexion à la surface de la magnétopause. Le modèle standard de magnétosphère ouverte [e.g. *Dungey*, 1961] prévoit notamment l'existence d'un site de reconnexion au nez de la magnétopause sur la face avant. Le transport de ces lignes de champ reconnectées dans la direction anti-solaire conduit de plus à l'existence d'un site reconnexion dans la queue lointaine afin d'expliquer la forme des 2 cellules de convection observées au niveau de l'ionosphère [e.g. *Akasofu*, 1977]. De même, de tels processus de reconnexion pourraient permettre la pénétration de plasma issu du vent solaire dans la couche limite à basse latitude [e.g. *Treumann et al.*, 1992], région dense des flancs de la magnétosphère sur le bord interne de la magnétopause. Enfin, lors des sous-orages magnétosphériques, les reconfigurations brutales du champ magnétique ainsi que les injections de particules pourraient résulter de la formation d'une ligne neutre de reconnexion dans la queue proche de la magnétosphère [e.g. *Coppi et al.*, 1966].

Le plasma magnétosphérique étant très ténu, le temps caractéristique de collisions entre les particules est nettement supérieur à tout les autres temps caractéristiques d'évolution du plasma. On peut donc décrire l'état du plasma à l'aide de la théorie MHD idéale (dans la mesure où les hypothèses MHD sont valides, à savoir : phénomènes à basse fréquence et faibles gradients). Or, on ne peut dans le cadre de cette théorie reconnecter une ligne de champ magnétosphérique à une ligne de champ du vent solaire comme le suggèrent de nombreuses observations (aurores diffuses et précipitations de particules dans les cornets polaires notamment). De nombreux travaux ont été menés [e.g. *Coroniti*, 1985; *Sonnerup*, 1988; *Dungey*, 1988; *Treumann et al.*, 1992] pour expliquer ce paradigme. Dans cette thèse, nous avons considéré que de tels sites de reconnexion existent (en éludant l'origine), et nous nous sommes intéressés à caractériser la forme des fonctions de distribution résultant du transport du plasma à travers ces sites. Nous avons pour cela eu recours à des simulations numériques en utilisant des particules-test pour reconstruire les fonctions de distribution. Chaque fois que cela a été possible, nous avons confronté nos résultats à des observations *in situ*.

La reconnexion magnétique impliquant l'existence de points où le champ magnétique est nul ou très faible, nous avons examiné en particulier le rôle des effets non-adiabatiques en cours de transport. Nous avons montré que l'existence de sites de reconnexion conduit à des fonctions de distribution anisotropes et agiotropes tout près du site de reconnexion. La faible étendue spatiale de ces régions et la finesse des structures prédites rendent cependant ces distributions difficilement observables. Une généralisation de cette étude pour un point d'observation situé sur le bord externe du feuillet de plasma nous a permis de mettre en évidence des structures propres aux distributions électroniques, lesquelles sont observées par le satellite GEOTAIL. L'interprétation que nous avons avancée permet en outre d'évaluer l'épaisseur de la couche de courant dans la queue lointaine, de l'ordre de quelques dixièmes de rayons terrestres.

Les calculs développés au cours de cette thèse devaient initialement être confrontés aux observations de la grappe de satellites CLUSTER. L'échec du tir d'Ariane 5 en Juin 1996 et le report de la mission CLUSTER-2 à l'an 2000 nous obligent donc à patienter un peu avant d'obtenir des données pour lesquelles on pourra distinguer les effets spatiaux des effets temporels. En effet, les observations dont on dispose jusqu'à présent sont fournies par un seul satellite qui se déplace

en même temps dans l'espace et dans le temps. Des mesures multi-points permettront d'identifier le caractère spatial ou temporel des variations que l'on observe. L'un des principaux objectifs de CLUSTER vise l'observation des régions frontières de la magnétosphère, en particulier l'étude de leur structure fine et de leur dynamique. L'orbite prévue (apogée à une vingtaine de rayons terrestres) permettra notamment d'étudier la magnétopause du côté jour ainsi que la queue géomagnétique proche et moyenne. Cette mission permettra ainsi d'explorer la plupart des régions dans lesquelles on soupçonne l'existence de processus de reconnexion. De plus, l'étendue spatiale des sites de reconnexion et le fait qu'ils existent de manière stationnaire sont deux grandes questions auxquelles on espère pouvoir répondre à l'aide de ces données.

Références

Akasofu S. I., Physics of magnetospheric substorms, *Astrophys. Space Sci. Lib.* 47, 1977.

Coppi B., G. Laval, & R. Pellat, Dynamics of the geomagnetic tail, *Phys. Rev. Lett.* 16, 1207, 1966.

Coroniti F. V., Space plasma turbulent dissipation: reality or myth?, *Space Sci. Rev.* 42, 399, 1985.

Dungey J. W., Interplanetary magnetic field and the auroral zone, *Phys. Rev. Lett.* 6, 47, 1961.

Dungey J. W., Noise-free neutral sheet, *Proc. on Reconnexion in space plasma*, ESA SP-285, Potsdam, Germany, 15, 1988.

Gurnett D. A., Merging of aircraft vortex trails: similarities to magnetic field merging, *Geophys. Res. Lett.* 16, 17, 1989.

Hill T. W., Magnetic merging in a collisionless plasma, *J. Geophys. Res.* 80, 4689, 1975.

Mukai T., M. Fujimoto, M. Hoshino, S. Kokubun, S. Machida, K. Maezawa, A. Nishida, Y. Saito, T. Terasawa, & T. Yamamoto, Structure and kinetic properties of plasmoids and their boundary regions, *J. Geomag. Geoelectr.* 48, 541, 1996.

Sonnerup B. U. Ö., Adiabatic particle orbits in a magnetic null sheet, *J. Geophys. Res.* 76, 8211, 1971.

Treumann R. A., J. LaBelle, & R. Pottellette, Plasma transport through magnetic boundaries, *Proc. on Study of the solar-terrestrial system*, ESA SP-346, Killarney, Ireland, 115, 1992.

Vasyliunas V. M., Theoretical models of magnetic field line merging, 1, *Rev. Geophys.* 13, 303, 1975.