

II. PLASMAS ET CHAMPS DU SYSTEME SOLAIRE

57
00445

A. La magnétosphère terrestre

Introduction

56. La magnétosphère est la région de l'espace entourant la Terre dans laquelle le champ magnétique terrestre a une influence déterminante sur le comportement du plasma (gaz ionisé) qu'elle contient. Le mot magnétosphère n'a été forgé qu'en 1959. Il désigne une région beaucoup plus grande que la Terre, s'étendant de l'ionosphère (partie ionisée de la haute atmosphère commençant à une altitude d'environ 65 km) jusqu'à quelque 60 000 km (10 rayons terrestres) dans la direction du Soleil et, dans la direction opposée, jusqu'à peut-être plusieurs centaines ou même plusieurs milliers de rayons terrestres, un peu comme une queue de comète s'éloignant du Soleil (voir figure 5). Le comportement du plasma est déterminé par les champs électrique et magnétique présents; l'origine de ces champs peut être soit extérieure, soit intérieure au plasma.

57. Le phénomène du géomagnétisme est connu depuis l'antiquité, par son effet sur les pierres aimantées (magnétite) et sur les aiguilles de boussole. C'est Gilbert, médecin de la reine Elizabeth I, qui constata pour la première fois que la Terre avait un champ magnétique semblable à celui d'un barreau aimanté. En 1716, Halley rattacha ce fait au comportement des aurores boréales, qui ont souvent une structure rayonnée dont le dessin ressemble à ce que l'on attendrait du champ magnétique d'un dipôle terrestre. Il pensa que les émissions aurorales résultaient de "particules magnétiques" se déplaçant le long des lignes de force du champ magnétique. Quinze ans plus tard, de Mairan avançait que du gaz solaire était en quelque sorte projeté dans les régions polaires, là où les phénomènes auroraux se produisent normalement. Le phénomène associé des perturbations géomagnétiques a été noté pour la première fois en 1724; le rapport entre activité solaire et activité géomagnétique fut établi dans la seconde moitié du XIXe siècle. Malgré de nombreuses observations au sol (par exemple les Années polaires internationales de 1882/83 et 1932/33) et des travaux théoriques approfondis, la compréhension des problèmes de l'activité géomagnétique et des aurores fit des progrès relativement lents jusqu'à l'Année géophysique internationale de 1957 et au lancement du premier satellite artificiel.

58. Pendant de nombreuses années, les physiciens qui étudiaient l'ionosphère s'occupèrent surtout des effets ionosphériques sur la propagation des ondes radio observés au sol. Il y avait une tendance naturelle à négliger les questions liées à l'extension de l'ionosphère dans l'espace dans les régions situées au-delà de 300 km d'altitude, qui n'étaient pas observables directement depuis le sol. Mais au début des années 50, Storey fit sensiblement évoluer cette attitude lorsqu'il découvrit que le comportement des signaux radioélectriques de très basse fréquence appelés "sifflements", et qui sont dus aux éclairs, ne pouvait s'expliquer que si les ondes radio se propagent le long des lignes de force du champ magnétique terrestre jusqu'à des distances très grandes (25 000 km, soit 4 rayons terrestres) et si un plasma relativement dense existe dans ces régions pour permettre cette propagation. Ce plasma, la plasmasphère, constitue le prolongement de l'ionosphère dans la magnétosphère. Il y a des rapports très étroits entre l'ionosphère et la magnétosphère, et des phénomènes auroraux, géomagnétiques et ionosphériques similaires se produisent dans les régions magnétiquement conjuguées des deux hémisphères de la Terre.

/...

1. Découvertes faites grâce aux engins spatiaux

59. La première grande découverte de l'ère spatiale a été faite en 1958 par Van Allen et ses collègues, en utilisant les observations effectuées avec un tube de Geiger emporté par le satellite Explorer 1. Ils ont trouvé que le champ magnétique de la Terre contenait des particules chargées énergétiques piégées (radiations) qui, après un examen plus détaillé, se révélèrent être la source des plus grandes perturbations géomagnétiques observées aux basses latitudes (orages géomagnétiques) et aussi des mécanismes d'excitation des émissions aurorales dans la haute atmosphère. On découvrait de nouveaux phénomènes, et de nouveaux problèmes se posaient. Par exemple, on constata que la Terre est une source puissante d'émissions radioélectriques (rayonnement kilométrique terrestre), évidemment créées dans les régions polaires de la magnétosphère par les particules énergétiques qui causent les aurores polaires, et qu'il se produit des reconfigurations à grande échelle de toute la magnétosphère (sous-orages) qui sont à bien des égards semblables aux éruptions observées sur le Soleil.

60. On pense maintenant que les particules magnétosphériques énergétiques ont surtout leur origine dans l'atmosphère externe du Soleil, qui s'enfuit de celui-ci dans toutes les directions à des vitesses très élevées (environ 400 km/seconde) en formant le vent solaire. Au début des années 50, l'étude des queues de comète, qui sont toujours orientées dans une direction opposée à celle du Soleil, a fait naître l'idée que la seule explication de leur comportement était l'existence d'un flux continu de particules chargées s'éloignant du Soleil selon des trajectoires plus ou moins radiales. Plus récemment, ce plasma électriquement neutre appelé vent solaire a été observé directement par quantité de satellites et de sondes interplanétaires. Il se compose principalement de protons et d'électrons dotés d'une énergie cinétique de l'ordre d'une fraction de kilovolt.

61. L'extension du champ géomagnétique dans l'espace est limitée par son interaction avec le vent solaire. Lorsque le plasma de vent solaire rencontre le champ géomagnétique, ses protons et ses électrons sont déviés dans des directions opposées, créant un vaste système de courants. Ces courants produisent un champ magnétique qui a pour effet de protéger le plasma de vent solaire du champ géomagnétique, et forment la frontière entre les deux. Ce champ s'ajoute au champ magnétique terrestre à l'intérieur de la frontière et lui fait perdre sa forme dipolaire. La région où le champ géomagnétique subsiste est appelée la magnétosphère. La frontière sur laquelle se produit l'interaction entre le champ géomagnétique et le vent solaire et où ces courants s'écoulent s'appelle la magnétopause (voir figure 5).

62. A cause de la vitesse supersonique avec laquelle le vent solaire "souffle" sur la région de la Terre lorsqu'il rencontre le champ magnétique terrestre, une onde de choc distincte existe "en amont" de la Terre. La région située entre le choc et la magnétopause est appelée la magnétogainé. Cette région subit l'influence prépondérante du vent solaire choqué.

63. Dans la magnétosphère "intérieure", le champ géomagnétique reste essentiellement dipolaire. Les particules chargées qui sont "piégées" dans cette région dipolaire forment les ceintures de rayonnement et sont la source des aurores polaires. Leur étude, qui doit nécessairement se faire en premier lieu à l'aide de satellites mis en orbite autour de la Terre, est devenue importante non seulement pour la lumière qu'elle jette sur des phénomènes terrestres comme ceux que l'on vient de décrire, mais aussi parce que nous savons maintenant que l'accélération des particules chargées dans des plasmas à très basse densité est un phénomène cosmique très répandu, qui se produit dans toutes les magnétosphères planétaires, sur le Soleil sous la forme d'éruptions solaires, dans le milieu interstellaire, dans les restes de supernovae, dans les pulsars, les sources de rayons X et les noyaux galactiques.

64. Des particules chargées, comme celles qui constituent les ceintures de rayonnement énergétique de Van Allen, tournent autour et rebondissent le long des lignes de force du champ magnétique en décrivant une orbite autour de la Terre. Comme les radiations de Van Allen, beaucoup d'autres particules de basse énergie sont aussi piégées dans la magnétosphère intérieure. L'étude détaillée du champ magnétique dans cette région a montré que ces particules piégées produisent un courant annulaire qui subsiste à tout moment et qui tend à affaiblir le champ magnétique total dans la magnétosphère intérieure. Parfois, lors d'éruptions solaires, ce courant en anneau se renforce et produit la signature de tempête magnétique que l'on voit dans le champ magnétique de surface de la Terre. Cela prend la forme d'une diminution de 1 p. 100 du champ de 0,3 gauss; la perturbation du champ est de l'ordre de 300 nT (ou 300 gammas; un gamma équivaut à 10^{-5} gauss).

65. Bien qu'il soit nécessaire d'étudier plus en détail l'énergie des particules de courant annulaire, on sait déjà que pendant les orages magnétiques, beaucoup de particules ayant des énergies cinétiques de quelques dizaines de kiloélectronvolts (keV) peuplent cette région de la magnétosphère intérieure. Comme les particules de vent solaire ont des énergies qui dépassent rarement 1 keV, ces systèmes de courants sont la preuve que les particules chargées doivent être considérablement énergétisées à l'intérieur de la magnétosphère. Cette importante observation doit encore être expliquée en détail sur le plan quantitatif.

66. Un troisième système de courants magnétosphériques très important traverse le centre de la région de la magnétosphère opposée au Soleil, que l'on appelle la magnétoqueue. Une section transversale de cette queue (figure 5) montre qu'elle se compose de trois régions : deux lobes où le champ magnétique est dirigé soit vers la Terre (dans l'hémisphère nord), soit dans la direction opposée (hémisphère sud), et entre les deux une troisième région, le feuillet de plasma, où le plasma traverse le centre de la queue. C'est dans la région de feuillet de plasma que les courants de queue traversent le centre de la queue et se referment ensuite sur la magnétopause ou dans la magnétogaine. Ces courants de queue donnent au champ magnétique de queue la forme qu'il a et ils jouent un grand rôle dans la dynamique des sous-orages magnétosphériques. Un sous-orage magnétosphérique est caractérisé par de brusques modifications de la structure du feuillet de plasma et du champ magnétique de la queue. On constate aussi des modifications spectaculaires de l'ionosphère des hautes latitudes et du champ magnétique de surface pendant les sous-orages magnétosphériques.

67. Bien que ces trois grands systèmes de courants magnétosphériques existent à tout moment, chaque courant réagit différemment et d'une façon complexe au vent solaire, à d'autres phénomènes magnétosphériques, et au champ magnétique interplanétaire (le champ magnétique associé au vent solaire). On peut déterminer les variations d'intensité et de taille du système de courants de la magnétopause en égalant la pression cinétique du vent solaire à la densité d'énergie (ou pression) du champ géomagnétique total (qui comprend le champ principal et les champs dus aux trois systèmes de courants magnétosphériques). La pression du vent solaire dépend de sa densité et de sa vitesse. La densité du vent solaire varie, d'après les observations qu'on a faites, entre moins de 10^5 et plus de 10^8 particules par m^3 . La vitesse du vent solaire est un peu moins variable, et se situe entre 200 et 800 km par seconde. Correspondant à cette variabilité du vent solaire, la position de la magnétopause, que l'on trouve en général (dans la direction du Soleil) à environ 10 rayons terrestres du centre de la Terre, varie d'après les observations entre moins de 6 et plus de 15 rayons terrestres. Les intensités des courants de la magnétopause et leurs champs magnétiques associés varient d'environ un ordre de grandeur entre ces positions, augmentant lorsque le vent solaire comprime la magnétosphère.

68. Une conclusion essentielle concernant notre connaissance actuelle de la magnétosphère est qu'elle "respire", c'est-à-dire qu'elle n'est pas statique, mais qu'elle a des systèmes de courants (et des champs magnétiques associés) qui varient en fonction du vent solaire et du champ magnétique interplanétaire. C'est pourquoi la topologie des champs de la magnétosphère et les populations de particules chargées qu'elle contient présentent des variations temporelles marquées. Les modifications dans le temps du champ magnétique magnétosphérique créent par induction dans la magnétosphère des champs électriques qui jouent un rôle important dans l'énergétisation des particules chargées.

2. Champs électriques de la magnétosphère

69. Le champ électrique est une quantité dont on n'a réalisé que récemment toute l'importance pour la physique de la magnétosphère. Une des raisons en est que, aux débuts de la recherche spatiale, les données d'observation limitées dont on disposait étaient interprétées au moyen de modèles théoriques très idéalisés du plasma magnétosphérique. Ces modèles sous-estiment le rôle des champs électriques. Mais avec les instruments de plus en plus perfectionnés dont sont dotés les satellites, l'importance des champs électriques magnétosphériques est de plus en plus évidente, en particulier dans le contexte des aurores polaires. Une autre raison de cette situation est le fait que les mesures directes du champ électrique sont extrêmement difficiles techniquement et que les premières mesures de champ électrique dans la magnétosphère externe sont toutes récentes.

70. La matière remplissant la magnétosphère est un plasma, c'est-à-dire qu'elle consiste en électrons et en ions positifs plutôt qu'en atomes neutres et en molécules. A la différence d'un gaz ordinaire, où les collisions entre les atomes ou les molécules qui le composent ont une importance décisive, le plasma

magnétosphérique est un milieu raréfié "sans collision". Les déplacements des électrons et des ions formant le plasma magnétosphérique sont contrôlés presque exclusivement, excepté aux très basses altitudes, par les champs électriques et magnétiques. Ainsi le champ électrique joue un rôle essentiel dans la dynamique du plasma magnétosphérique. En outre, les champs électriques sont le seul moyen d'énergétiser les particules chargées du plasma magnétosphérique. Bien que l'énergétisation puisse souvent être causée par les champs électriques à petite échelle des ondes de plasma (voir par. 82 à 88), l'énergétisation directe par des champs électriques macroscopiques est importante elle aussi.

71. Alors que l'ensemble de l'univers est surtout composé de plasma magnétisé, la magnétosphère est le seul système de plasma cosmique se prêtant facilement à des études in situ. Ce que l'on y apprend sur l'interaction complexe entre champs électriques et plasmas cosmiques est donc loin d'avoir pour seul intérêt d'aider à résoudre le vieux problème des aurores boréales.

72. La source la plus importante du champ électrique magnétosphérique est le vent solaire. Son déplacement en présence d'un champ magnétique interplanétaire constitue une dynamo électrique. La magnétosphère est immergée dans un champ électrique interplanétaire d'une densité de l'ordre de 1 à 2 volts km, ce qui correspond à une différence de potentiel de plusieurs centaines de milliers de volts d'un bout à l'autre de la magnétosphère.

73. Sur une surface aussi vaste qu'une section de la magnétosphère perpendiculaire au vent solaire, l'énergie cinétique de celui-ci représente un apport d'énergie de l'ordre de la dizaine de térawatts (1 térawatt = 1 000 milliards de watts). Une petite fraction de cette puissance pénètre dans la magnétosphère, où elle alimente les orages magnétiques et les phénomènes auroraux et énergétise les particules chargées piégées dans le champ géomagnétique. La quantité réelle d'énergie absorbée dépend d'une façon caractéristique de la direction du champ magnétique interplanétaire. Un champ magnétique interplanétaire orienté vers le sud, ce qui implique un grand champ électrique dirigé du côté aube au côté crépuscule de la magnétosphère, favorise la pénétration des champs électriques, de l'énergie et du plasma du vent solaire dans la magnétosphère. En fait, la réaction globale de la magnétosphère est ici très semblable à celle d'un redresseur dont le sens de conduction serait de l'aube au crépuscule. Bien que cette caractéristique globale de l'apport d'énergie puisse être décrite en termes aussi simples, il faut souligner que c'est là le résultat de processus dynamiques extrêmement complexes au niveau du plasma.

74. Une autre cause des champs électriques magnétosphériques est la rotation de la Terre en présence de son propre champ magnétique. L'atmosphère est entraînée dans ce mouvement et sa partie externe conductrice, l'ionosphère, se comporte comme le conducteur d'une dynamo électrique. Vue de l'espace extra-atmosphérique, l'ionosphère apparaît donc positive près des pôles magnétiques et négative à l'équateur magnétique. Son potentiel total est voisin d'une centaine de milliers de volts. La "charge" de cette dynamo terrestre est formée par les divers plasmas qui peuplent la magnétosphère. Aux basses latitudes, la réaction du plasma au champ de la dynamo est simple, c'est la corotation avec l'ionosphère.

Aux hautes latitudes, la dynamo ionosphérique est connectée à des volumes de plasma qui sont trop grands pour tourner avec elle et qui du fait de leur basse densité et de leur température élevée, ont des propriétés électriques particulières. Ces plasmas sont soumis à des champs électriques imposés à l'extérieur par le vent solaire et de l'intérieur par l'ionosphère en rotation. Ensemble, ils déterminent la distribution à grande échelle du champ électrique dans la magnétosphère externe.

75. Les vents ionosphériques, qui créent des champs de dynamo électrique supplémentaires superposés à ceux dus à la rotation de l'ensemble de l'ionosphère, constituent une troisième source de champs électriques.

76. Par suite de l'interaction vent solaire-magnétosphère, de forts courants (des millions d'ampères) s'écoulent à l'intérieur de la magnétosphère, en particulier en direction et en provenance des régions aurorales et à travers la queue de la magnétosphère. L'énergie du vent solaire peut être temporairement stockée sous forme d'énergie magnétique associée à un courant électrique accru perpendiculaire à la queue. Lorsque cette énergie est libérée, il se produit un phénomène violent, le sous-orage magnétosphérique, caractérisé par de rapides modifications du champ géomagnétique et par des phénomènes auroraux intenses. La modification du champ magnétique crée de forts champs d'induction électrique à tous les niveaux de la magnétosphère. Au niveau du sol, ces variations magnétiques créent des courants de terre et des différences de potentiel de surface correspondantes qui peuvent perturber les réseaux de distribution d'électricité et les réseaux téléphoniques et télégraphiques. Dans la magnétosphère, il se produit des repositionnements spectaculaires du plasma magnétosphérique, et un réchauffement. Un engin spatial plongé dans un plasma chauffé par un sous-orage peut se charger électriquement jusqu'à plusieurs milliers de volts et, dans un certain nombre de cas, cela a eu des effets destructeurs. Le mécanisme qui provoque le mouvement extrêmement rapide et le réchauffement du plasma magnétosphérique n'est pas encore connu, mais les champs d'induction électrique à grande échelle de la magnétosphère y jouent sans doute un rôle essentiel.

77. Les champs électriques de la magnétosphère ont d'abord été étudiés dans le bas de la magnétosphère, c'est-à-dire dans l'ionosphère. Aux altitudes explorées par les fusées-sondes, deux techniques ont été principalement utilisées pour déterminer le champ électrique : ce sont l'observation de nuages ionisés artificiels (dont les déplacements mettent en évidence le champ électrique) et les mesures directes par des sondes électriques doubles. La cartographie la plus complète des champs électriques ionosphériques a été faite au moyen de sondes doubles et d'appareils de mesure de la dérive du plasma sur des satellites polaires orbitant à basse altitude. Des mesures effectuées au moyen de sondes accrochées à des ballons et des mesures radar au sol ont fourni des renseignements supplémentaires sur la répartition à grande échelle des champs électriques.

78. Par conséquent, on connaît assez bien le caractère global de la distribution à grande échelle des champs électriques dans l'ionosphère, et la façon dont ils dépendent des conditions interplanétaires. Cette distribution se caractérise par un champ électrique général traversant la calotte polaire, à des latitudes supérieures à environ 70° de latitude magnétique, dirigé du côté crépuscule vers le côté aube de la Terre, et par un champ directement opposé aux basses latitudes. Les équipotentielles électriques dessinent des boucles caractéristiques. Le champ a une intensité maximale aux latitudes aurorales et atteint 100 volts par km ou davantage.

79. On obtient les caractéristiques globales du champ électrique magnétosphérique en extrapolant le champ électrique ionosphérique vers le haut le long des lignes de force du champ géomagnétique. Ces caractéristiques ont été confirmées par des mesures faites par satellite des particules géomagnétiquement piégées se déplaçant sous l'influence du champ électrique. La distribution spatiale du potentiel électrique déduite de ces mesures des particules chargées est représentée sur la figure 6.

80. Il est difficile de mesurer directement le champ électrique dans le haut de la magnétosphère. Deux méthodes sont principalement utilisées. L'une repose sur des sondes électriques de forme sphérique ou cylindrique placées au bout de mâts fixés sur un engin spatial; l'autre consiste à déduire le champ électrique du mouvement d'un faisceau d'électrons éjectés de l'engin et y retournant. Les résultats, qui sont encore en cours d'analyse, ont déjà permis des conclusions fort importantes. Les mesures faites par le satellite S3-3 montrent que le champ électrique au-dessus des régions aurorales a des composantes non seulement transversales, mais aussi parallèles au champ géomagnétique. Cela découle de l'observation des champs électriques transverses à haute altitude, qui sont incompatibles avec des lignes de force du champ magnétique électriquement équipotentielles. Une conséquence en est que des particules chargées, notamment les électrons, qui se meuvent le plus facilement le long des lignes de force du champ géomagnétique, peuvent être directement accélérées par le champ électrique et projetées dans l'atmosphère, où elles créent des phénomènes auroraux. En même temps, des ions positifs d'origine ionosphérique sont éjectés dans l'espace. Cela explique pourquoi la magnétosphère externe, dont on pensait encore récemment qu'elle se composait exclusivement de plasma d'hydrogène provenant du Soleil, est partiellement peuplée par un plasma d'origine terrestre et consistant surtout en ions oxygène. Les satellites GEOS et ISEE ont mesuré les champs électriques dans les régions des latitudes basses et moyennes de la magnétosphère externe. La figure 7 montre un exemple dans lequel le champ électrique global aube → crépuscule mentionné plus haut est bien mis en évidence par les deux engins. Un résultat particulièrement intéressant des mesures d'ISEE-1 est la détection d'un champ électrique tangentiel (aube → crépuscule) sur la magnétopause elle-même.

81. Ces mesures directes montrent que le champ électrique dans la magnétosphère est beaucoup plus variable qu'on ne le pensait. Les variations de son intensité sont comparables à sa valeur moyenne, quelques volts par kilomètre, et se produisent en l'espace de 0,5 à 5 minutes. Des champs électriques beaucoup plus intenses se manifestent pendant les sous-orages magnétiques; on enregistre alors souvent des intensités transitoires de l'ordre de 20 à 30 v/km. La durée de ces champs électriques transitoires, observée à l'endroit où se trouve le satellite, est de l'ordre d'une minute. Fréquemment, le champ électrique montre des oscillations régulières, d'une amplitude pouvant aller jusqu'à 10 v/km, qui traduisent les oscillations à grande échelle du plasma magnétosphérique.

B. Les ondes de plasma dans la magnétosphère terrestre

1. Ondes de plasma

82. Un plasma d'électrons et d'ions traversé par un champ magnétique peut servir de support à la propagation d'ondes de plasma très diverses. Une classification conventionnelle de ces ondes consiste à relier leur fréquence à certaines fréquences caractéristiques particulières au plasma. Ces fréquences fondamentales sont les fréquences cyclotron et les fréquences de plasma. Les fréquences cyclotron (ou gyrofréquences) d'électrons et d'ions sont celles auxquelles les électrons et les ions respectivement tournent dans un champ magnétique ambiant dans lequel le plasma est plongé. Comme les ions sont bien plus lourds que les électrons, ils tournent à une vitesse relativement plus lente; en outre, plus le champ magnétique est intense, plus toutes les gyrofréquences sont élevées. La fréquence électronique de plasma est celle à laquelle les électrons oscilleraient en essayant de rétablir l'équilibre s'ils se déplaçaient en bloc par rapport aux ions. Elle est indépendante du champ magnétique et est liée à la densité numérique des électrons; plus cette densité est élevée, plus la fréquence de plasma est grande. Une fréquence de plasma analogue existe pour chaque espèce d'ions, sa valeur étant de nouveau bien plus faible, car la masse d'un ion est plus grande que celle d'un électron.

2. Paramètres de la magnétosphère

83. Dans la magnétosphère terrestre, l'intensité du champ magnétique diminue rapidement lorsqu'on s'éloigne de la Terre. La gyrofréquence d'électrons est d'environ 1,6 MHz dans l'ionosphère polaire, et de 800 kHz dans l'ionosphère équatoriale. A des distances de $10R_T$ (où R_T est le rayon terrestre, soit 6 370 km), le champ magnétique est si faible qu'il ne peut résister à la pression du bombardement par le plasma du vent solaire. A ces distances, la gyrofréquence électronique du côté de la Terre exposé au Soleil tombe à 1 kHz. Il existe des gyrofréquences bien plus faibles dans la queue de la magnétosphère, particulièrement dans le plan équatorial à de grandes distances.

84. La densité du plasma et, par conséquent, la fréquence de plasma, diminuent aussi à mesure qu'augmente la distance au-dessus de l'ionosphère. Cette baisse n'est que relativement lente à l'intérieur de la plasmaphère, qui est la région où le plasma est entraîné dans le mouvement de rotation, limitée par la plasmopause sur les lignes de force du champ magnétique traversant l'équateur à une distance d'environ $4R_T$. La fréquence de plasma dans l'ionosphère est généralement de l'ordre de 2 à 10 MHz, alors qu'immédiatement à l'intérieur de la plasmopause, elle peut tomber à quelques centaines de kHz. A la plasmopause, il y a une chute brusque de la densité qui fait que la fréquence de plasma tombe à quelques dizaines de kHz sur une distance inférieure à un rayon terrestre.

85. Les valeurs des gyrofréquences et des fréquences de plasma citées ci-dessus ne servent qu'à indiquer des ordres de grandeur pour permettre de visualiser dans le contexte approprié les ondes de plasma qui seront décrites. Les adjectifs "haute" ou "basse" qualifiant les fréquences des ondes de plasma donnent peu d'information en l'absence de valeurs comparatives des fréquences cyclotron et de plasma. On peut déduire des valeurs mentionnées que dans la plupart des régions de la magnétosphère, la fréquence de plasma est plus élevée que la fréquence cyclotron. La dépression plasmique nocturne et les régions aurorales et polaires constituent des exceptions importantes.

3. Ondes de plasma de la magnétosphère

86. La figure 8 fournit un tableau synoptique des diverses ondes de plasma observées dans les différentes régions de la magnétosphère. A première vue, cela paraît confus, mais on obtient une image plus claire si l'on classe les types d'ondes d'après les fréquences caractéristiques du plasma dans les différentes régions. Là où le mot turbulence apparaît, il a été impossible d'identifier le mode d'ondes, ou bien il s'agit vraiment d'un cas de turbulence; ces phénomènes ne seront pas examinés ici. Un autre phénomène que la figure 8 met en évidence, mais qui n'a pas encore été clairement intégré dans le tableau des ondes de plasma, est celui des bouffées de bruit magnétique constatées dans la queue de la magnétosphère et qui peuvent être un bruit du mode des sifflements.

87. La figure 9 est une tentative de classification des divers types d'ondes de plasma qui peuvent exister dans un plasma constitué d'électrons (e) et de deux espèces d'ions, les ions d'hydrogène (H^+ , ou protons) et les ions d'hélium (He^+). Par sa présence, le champ magnétique ne se contente pas de fixer les fréquences cyclotron (c), soit f_{ce} , f_{cH^+} , f_{cHe^+} , mais il impose aussi certaines limitations aux modes de propagation des diverses ondes. Pour cette raison, la figure 9 représente deux plans : l'un comprend les modes qui peuvent se propager avec leur normale à l'onde parallèle au champ magnétique, et l'autre ceux dont la normale à l'onde peut être perpendiculaire à ce champ. Les types d'ondes qui se trouvent dans ce dernier plan ne peuvent exister que dans un plasma non froid et sont fortement amorties si leur normale à l'onde s'écarte trop de la perpendiculaire. Elles sont classées parmi les ondes électrostatiques parce que leur champ électrique est beaucoup plus intense que leur champ magnétique. Les ondes classées dans le plan parallèle sont des modes électromagnétiques et peuvent se propager dans le plasma froid et dans le plasma non froid. Ces ondes peuvent aussi se propager perpendiculairement au champ magnétique, bien que les gammes de fréquence où cette propagation est possible diffèrent beaucoup dans certains cas des gammes permises aux ondes dont la normale est parallèle au champ.

88. Il est commode de représenter les divers modes d'ondes énumérés dans la figure 9 comme s'ils se répartissaient en trois catégories. Premièrement, les ondes localisées, qui ne peuvent pas se propager très loin de leur région d'origine sans être fortement amorties. Tous les modes classés dans le plan perpendiculaire appartiennent à cette catégorie. Dans la deuxième, on trouve les ondes confinées qui, bien que pouvant se propager sur des distances qui sont grandes par comparaison aux ondes localisées, sont limitées à la magnétosphère terrestre.

Ce sont les modes classés dans le plan parallèle, qui ont des limites supérieures dans leurs gammes de fréquences, c'est-à-dire les gyrofréquences ioniques et électroniques. Il est clair qu'à mesure que les ondes se propagent en s'éloignant de la Terre, elles arrivent dans des régions de gyrofréquences plus faibles, ce qui fait que leur gamme de fréquences de propagation admissibles devient de plus en plus limitée à mesure que f_{ce} et f_{CH^+} diminuent. La troisième catégorie, les modes d'évasion, contiennent les autres modes du plan parallèle, notamment les ondes O (ordinaires) et X (extraordinaires), qui n'ont aucune limite supérieure de fréquence à leur propagation. Ces ondes peuvent s'échapper de la magnétosphère terrestre et se propager librement à travers l'espace interplanétaire et au-delà. C'est en recevant de telles ondes qu'un observateur extraterrestre identifierait la Terre comme une source d'ondes radioélectriques.

a) Modes localisés : Chacun des modes énumérés dans le plan perpendiculaire est considéré à son tour, en commençant par les fréquences les plus basses.

- i) Ondes "ion-cyclotron-harmoniques" (ICH). Ces ondes peuvent exister dans les bandes de fréquences se trouvant entre les harmoniques de la gyrofréquence ionique $f_{c \text{ ion}}$. Dans la figure 9, elles peuvent donc se propager entre f_{cHe^+} et $2f_{cHe^+}$, entre $2f_{cHe^+}$ et $3f_{cHe^+}$, etc., jusqu'à et au-delà de la fréquence hybride inférieure f_{LHR} , qui est la fréquence au dessus de laquelle les ions ont peu d'effet. Cependant, les ondes ICH subissent un fort amortissement aux harmoniques mêmes de la gyrofréquence, c'est-à-dire à nf_{cHe^+} , où n est un entier, ce qui fait que la propagation d'une bande de fréquences à l'autre est inhibée. Le satellite S3-3 a observé les ondes ICH dans les zones aurorales en association avec les harmoniques de la gyrofréquence des protons, ces derniers étant les ions qui prédominent dans cette région. Ces ondes sont apparemment produites par des courants électriques intenses alignés sur le champ et l'on pense qu'ils contribuent à augmenter la température des ions froids au point que ces derniers s'échappent de l'ionosphère aurorale et pénètrent dans la magnétosphère externe pendant les périodes d'activité. Des ondes ICH ont aussi été observées par GEOS-1 dans la dépression plasmique du côté jour dans des conditions de géomagnétisme calme. Elles sont associées aux harmoniques de la gyrofréquence de He^+ et se produisent lorsque la concentration d'ions froids He^+ est relativement élevée. Il apparaît dans ce cas que les protons énergétiques sont la source d'énergie, et il semble également que les ondes chauffent de préférence les ions He^+ froids.
- ii) Les ondes acoustiques ioniques, ou pseudo-sonores, qui ne sont pas mentionnées dans la figure 9, peuvent se propager perpendiculairement au champ magnétique à des fréquences inférieures à la fréquence de plasma des protons f_{pH^+} . Elles peuvent être produites dans l'ionosphère par un effet de canalisation des électrons, qui se déplacent par rapport aux ions (et aux neutres) avec une vitesse supérieure à la vitesse acoustique des ions.

iii) Ondes "électron-cyclotron-harmoniques" (ECH). Ce sont les équivalents électroniques des ondes ICH. Elles peuvent exister dans les bandes de fréquences situées entre les harmoniques de la gyrofréquence d'électrons, ce qui fait qu'on les a appelées ondes $(n + \frac{1}{2})f_{ce}$. On observe qu'elles sont les plus intenses à la plasmopause du côté éclairé et au-delà, et elles paraissent être confinées à quelques degrés au plus de l'équateur magnétique, ce qui permet peut-être pour la première fois de déterminer avec précision la position de ce dernier. La source d'énergie de ces ondes réside dans la distribution des électrons de basse énergie; certaines composantes de cette distribution sont étroitement confinées sur l'équateur géomagnétique, c'est-à-dire dans les régions où les ondes sont observées. On pense que les ondes ECH sont responsables de la précipitation aurorale diffuse de particules de 1 à 10 keV. Des ondes ECH plus faibles ont été observées à ces latitudes éloignées de l'équateur et sont aussi vues parfois dans le feuillet de plasma de la queue (voir figure 8).

iv) Ondes UHR (upper-hybrid-resonance waves) et modes f_q . Ces ondes appartiennent à la même famille que les ondes ECH, mais on les considère séparément parce que leur fréquence est comparable à celle des ondes d'évasion O et X. Elles ne peuvent se propager à grande distance, mais on pense qu'elles peuvent se coupler, linéairement ou non, à des ondes O et X, ce qui est un concept important dans le domaine de la radioastronomie planétaire. Les ondes UHR représentent l'un des types les plus intenses d'ondes observés à l'intérieur de la magnétosphère terrestre; on les trouve dans les mêmes régions que les ondes ECH et l'on pense qu'elles sont produites de façon similaire. Elles ont un accès direct au mode E de plasma froid et c'est la raison pour laquelle ce dernier, bien qu'étant un mode électromagnétique, est inclus dans le plan perpendiculaire de la figure 9. Des raies d'émission relativement faibles sont parfois observables à partir de GEOS-1 à des fréquences voisines de 45 kHz; ce sont les modes f_q , caractérisés par le fait que leur vitesse de groupe est nulle. Ainsi, une fois que les ondes sont excitées aux fréquences f_q , l'énergie ne peut se propager. Les émissions f_q appartiennent aussi à la famille des ondes ECH.

b) Modes confinés : Comme dans le cas de a), ces ondes sont considérées successivement, à partir des modes des fréquences les plus basses, notamment les ondes d'Alfvén.

i) Ondes d'Alfvén. Ce sont des ondes hydromagnétiques (ou magnétohydrodynamiques) dont les périodes d'oscillation sont de l'ordre de la dizaine de minutes; les lignes de force du champ magnétique résonnent à peu près comme une corde vibrante tendue, telle une corde de violon. La fréquence d'oscillation est liée à la longueur de la ligne de force, ainsi qu'à la "charge" de plasma qui est déplacée pendant l'oscillation. Les ondes dont la période est la

plus longue sont associées aux lignes de force les plus longues, notamment celles qui s'étendent vers la magnétopause et que l'on croit être excitées par des ondes de surface (Kelvin-Helmholtz) sur la magnétopause, induites par le vent solaire. Des ondes de période plus courte sont liées aux courants électriques intenses de l'électrojet auroral dans le secteur de minuit, et peut-être à d'autres moments, aux ondes de surface de la plasmopause. Comme leurs caractéristiques sont liées à la charge du plasma, on les utilise de plus en plus pour faire à partir du sol des estimations de la densité du plasma à de grandes distances.

- ii) Ondes "ion-cyclotron" (IC). Elles constituent le prolongement électromagnétique naturel des ondes d'Alfvén vers les fréquences plus hautes. Elles se produisent aux fréquences voisines des gyrofréquences ioniques, auxquelles il ne suffit plus de considérer le plasma comme un fluide. On pense qu'elles sont produites par des protons énergétiques; inversement, une fois produites, elles pourraient être responsables de la perte de protons de courant annulaire. D'après les observations de GEOS-1, elles sont généralement situées à l'extérieur de la plasmopause du côté éclairé, et lorsqu'on observe des ondes ICH, on observe simultanément des ondes IC. On pense que le bruit de basse fréquence appelé "rugissement de lion" est produit par une résonance ion-cyclotron lorsque les protons à 10 keV traversent la magnétogaine, particulièrement pendant les périodes d'orage géomagnétique; des ondes ion-cyclotron associées à des courants d'ions ont été observées dans la région du cornet polaire. Les sifflements ion-cyclotron ont une origine complètement différente. Leur source d'énergie est constituée par les éclairs qui se produisent à la surface de la Terre; les ondes de sifflement électron-cyclotron, qui se propagent vers le haut à travers l'ionosphère, sont converties en sifflements ion-cyclotron. Ces derniers, qui ont été observés sur les satellites à faible altitude, ont été utilisés pour fournir des informations sur les espèces d'ions le long du trajet de propagation.
- iii) Ondes électron-cyclotron (EC). Comme on vient de le dire, les sifflements électron-cyclotron ont leur origine dans les éclairs. Ils sont observés au sol et leurs trajectoires de propagation s'étendent jusqu'à la plasmopause équatoriale et au-delà. Les sifflements sont donc probablement les phénomènes ondulatoires de la magnétosphère les plus intensément étudiés, car ils peuvent fournir des informations de grande valeur sur la densité du plasma dans ces régions éloignées. Pour expliquer les sifflements à bords multiples qui font écho entre les hémisphères, il est nécessaire d'imaginer des conduits de densité alignés sur le champ; des technique goniométriques au sol fournissent actuellement des informations sur les mouvements de ces conduits et, par conséquent, sur les champs électriques à l'intérieur de la plasmasphère.

Les émissions électron-cyclotron le plus souvent observées à l'intérieur de la magnétosphère sont les "choeurs" et les "chuintements" (dans les aurores et la plasmasphère). Les premiers sont essentiellement des émissions de fréquence croissante que l'on pense être produites à l'équateur géomagnétique par une résonance cyclotron décalée par effet Doppler. A cause du mouvement relatif des électrons qui se déplacent dans une direction et des ondes du mode des sifflements se déplaçant dans la direction opposée le long des lignes de force du champ géomagnétique, les électrons "voient" les fréquences d'ondes décalées vers le haut (par effet Doppler), vers la fréquence cyclotron, et ils abandonnent une partie de leur énergie pour amplifier les ondes. Le processus inverse peut se produire : une fois que les ondes existent, elles peuvent provoquer une précipitation d'électrons dans l'atmosphère pour produire une aurore. On pense que le chuintement auroral est produit par l'émission Cerenkov d'électrons précipités de faible énergie, et les "soucoupes" TBF indiquées dans la figure 8 peuvent avoir une explication analogue.

- iv) La fréquence hybride basse f_{LHR} est la fréquence en dessous de laquelle les sifflements d'électrons peuvent se propager quelle que soit la direction de la normale à l'onde par rapport au champ magnétique. Le bruit constaté aux fréquences LHR dans les régions aurorales peut donc être dû en partie aux ondes, réfléchies et dispersées, du mode des sifflements d'électrons se propageant perpendiculairement au champ magnétique. A des fréquences bien plus faibles, les ondes électron-cyclotron coexistent avec les ondes ion-cyclotron; toutes deux deviennent naturellement des ondes d'Alfvén à des fréquences encore plus faibles.
- v) Comme les sifflements fournissent quantité d'informations sur la plasmasphère éloignée, des émetteurs installés au sol, par exemple à la station Siple dans l'Antarctique, et fonctionnant sur des fréquences du mode des sifflements, ont été utilisés pour des expériences contrôlées. On a trouvé que les signaux artificiels ainsi émis peuvent stimuler des émissions similaires aux choeurs, et l'on s'est beaucoup intéressé à la possibilité que même le rayonnement émis par les lignes de transport d'électricité à 50 et 60 Hz des régions industrialisées provoquent une stimulation des ondes et une précipitation de particules chargées à partir de la magnétosphère.

c) Rayonnements d'évasion : On ne connaît actuellement que deux types de rayonnements qui s'échappent de la magnétosphère terrestre et qui soient observables à de grandes distances. Ce sont le rayonnement terrestre du continu non thermique ou myriamétrique (TMR) et le rayonnement terrestre ou auroral

kilométrique (TKR ou AKR); les mots myriamétrique et kilométrique s'appliquent aux longueurs d'onde dans l'espace libre (10^4 m et 10^3 m, respectivement) auxquelles les rayonnements sont surtout observés.

- i) TMR. Ce rayonnement, dont les fréquences s'échelonnent de 100 Hz à 100 kHz, a été surtout observé dans le mode magnétoionique ordinaire (O). Il semble qu'il ait sa source dans les ondes intenses UHR observées dans la plasmopause du côté éclairé, et des données provenant des satellites GEOS et ISEE s'accumulent pour démontrer qu'il est chassé de l'équateur magnétique d'une manière compatible avec le couplage de mode des ondes du mode Z aux ondes du mode O à la fréquence $f = f_{pe}$. Les ondes de fréquences inférieures aux fréquences de plasma du vent solaire et de la magnétogaine sont piégées dans la dépression plasmique représentée sur la figure 8; les fréquences les plus élevées sont les seules qui peuvent s'échapper.
- ii) TKR. C'est un rayonnement très intense dans la gamme de fréquences de 50 à 500 kHz, ayant sa source dans les zones aurorales. Il est associé à la précipitation d'électrons et aux arcs auroraux, mais il n'existe actuellement aucune théorie acceptée sur la façon dont il est produit. Une certaine controverse entoure son mode de propagation, la plupart des résultats permettant de supposer qu'elle se produit dans le mode magnétoionique extraordinaire (X). Toutefois, les observations récentes faites par le satellite EXOS-B indiquent que ce rayonnement se propage dans le mode O. A cause de sa similarité avec le rayonnement décimétrique de Jupiter, la connaissance de son mécanisme de formation est importante pour la radioastronomie planétaire en général.

C. Population du plasma magnétosphérique

1. Plasma de faible énergie

89. Jusqu'à une date très récente, on estimait en général que le plasma entourant la Terre était constitué essentiellement de deux populations de particules chargées, celles d'origine solaire et celles d'origine terrestre. Mais depuis quelques années, on soupçonne qu'il existe une troisième population de plasma qui, d'après sa composition, doit avoir son origine dans l'ionosphère terrestre, mais dont l'énergie est très supérieure à ce qu'on attendrait d'une source proche de la Terre. On rencontre dans toute la magnétosphère cette population de plasma hybride qui présente des énergies comprises entre quelques dizaines et quelques dizaines de milliers d'électronvolts.

90. Au cours des années 60 et au début des années 70, les mesures de sifflements effectuées au sol et associées à des mesures directes par satellite ont fourni une représentation assez complète de la répartition par densité de la population de plasma froid dans la magnétosphère terrestre. Des compilations de ces mesures ont permis de comprendre en général la morphologie de la plasmasphère et ont fourni des renseignements sur la dynamique du plasma liée à la corotation et à des dérives convectives variables du champ électrique. Mais on n'a pas mesuré directement de façon détaillée, pour le plasma de faible énergie, les distributions de température, d'angle d'attaque ou de densité le long des lignes de force du champ magnétique. Il n'a donc pas été possible de répondre à de nombreuses questions concernant la mécanique des échanges de plasma entre ionosphère et plasmasphère.

91. En conséquence, les spéculations théoriques ont occupé la première place. Par exemple, en ce qui concerne le remplissage de la plasmasphère, on a émis l'idée, en 1971, qu'un écoulement de vent polaire supersonique depuis des régions ionosphériques conjuguées pourrait remplir les tubes de flux magnétique. Etant donné la forte influence exercée par cet écoulement vers l'extérieur sur le profil de densité du dessus de l'ionosphère, la nature de ce processus de remplissage constitue également un élément essentiel du rapport physique entre la position du gradient de densité très marqué de la plasmopause dans la magnétosphère et les gradients de densité de la dépression plasmique à ions légers de l'ionosphère supérieure. Pour vérifier ce modèle, on devrait rechercher la présence d'écoulements de vent polaire à l'intérieur de la plasmopause; on devrait aussi s'attendre à trouver des fronts de choc présentant des variations de densité et de température le long des lignes de force du champ magnétique, et des régions de densité accrue près des zones équatoriales des tubes de flux magnétique dans la plasmasphère externe. On a aussi étudié, en observant des sifflements, les vitesses de remplissage des tubes de flux magnétique par le plasma.

92. Des températures de plasma de 5 à 10 eV ont été observées dans la plasmasphère externe avec le satellite OGO-5 et également dans la dépression plasmique subsolaire au moyen d'IMP-6. Le satellite ATS-6, placé sur orbite géosynchrone en 1974, transportait un instrument qui permettait d'étudier les répartitions différentielles angulaires et énergétiques du plasma entre 1 eV et 80 keV. Les observations concernant la répartition temporelle locale des passages d'ATS-6 dans

des zones de plasma de 1 à 30 eV, et de densité comprise entre 10^6 et 10^7 ions/m³, présentant un maximum dans le secteur après-midi-crêpuscule, ont démontré qu'il y avait remplissage de la dépression plasmique du côté exposé au Soleil, tout en précisant l'emplacement du renflement de la plasmasphère, conformément aux prévisions. De même, en accord avec les modèles antérieurs de convection, les données fournies par ATS-6 font apparaître une région prédominante d'écoulement orienté vers l'est sur le côté aube de la magnétosphère, tandis que l'écoulement autour de la zone crépusculaire est surtout orienté vers l'ouest. De nouveaux renseignements inattendus ont été obtenus sur les températures plasmiques pour les énergies comprises entre 10 et 25 eV (entre 100 000 et 300 000 K environ).

93. Des instruments spécialement conçus pour l'étude des plasmas de faible énergie ont récemment été lancés à bord des satellites GEOS-1 et 2 et ISEE-1. Les satellites GEOS-1 et 2 sont porteurs de deux expériences de ce type, l'une sur la composition ionique et l'autre qui fera appel à des analyseurs de plasma suprathermique. Les premières mesures effectuées à l'occasion de l'expérience sur la composition ionique confirment les observations d'ATS-6 sur les répartitions magnétiques alignées sur le champ et coniques (avec des maximums à 20° de la ligne du champ géomagnétique). En accord général avec les résultats antérieurs obtenus par le satellite OGO, on a constaté que les ions prédominants étaient H⁺, He⁺ et O⁺. Mais on a aussi constaté l'existence d'une quantité inattendue de D⁺ ou ⁴He⁺⁺ (avec un rapport masse atomique/charge M/Q de 2) et de ¹⁶O⁺⁺ (M/Q = 8). Ces ions à multiples de charge d'énergie comprise entre 2 et 100 eV sont inattendus dans le plasma thermique et paraissent indiquer l'existence de phénomènes physiques nouveaux.

94. Les nouveaux phénomènes observés par ATS-6 et GEOS-1 et 2 ont été confirmés par un instrument embarqué à bord d'ISEE-1. Les spectres d'énergie ionique révèlent souvent l'existence simultanée de plasmas à des températures de, par exemple, 1/2, 6 et 12 eV. A mesure que le satellite se rapproche de la Terre, la proportion des composants les plus chauds décroît au profit d'un plasma plus froid. Des ions d'énergie inférieure ou égale à 100 eV ont été mesurés par ISEE-1 dans toute la magnétosphère, c'est-à-dire dans la plasmasphère, la dépression plasmique, la couche d'entrée et la magnétoqueue, avec diverses répartitions d'angles d'attaque et d'énergies.

95. Des mesures récentes montrent que l'on doit rechercher les mécanismes d'énergétisation qui paraissent agir sur le plasma ionosphérique lorsqu'il est transporté dans la magnétosphère. Les proportions relatives des répartitions de plasmas de faible énergie alignés sur le champ, coniques et piégés et leur influence sur l'apparition de phénomènes d'ondes résonnantes sont importantes à cet égard. L'étude du régime du plasma hybride et de ses rapports avec le plasma ionosphérique froid et les plasmas magnétosphériques chauds exigera des mesures différentielles directes du spectre énergétique, de l'angle d'attaque et de la composition ionique à partir d'un engin spatial présentant des caractéristiques de potentiel et de surface soigneusement contrôlées. Il est prévu de construire un dispositif de ce type pour la mission consacrée à l'origine des plasmas au voisinage de la Terre (OPEN).

2. Plasma de haute énergie

96. Pour l'essentiel, les transferts de masse, de moment et d'énergie du vent solaire à la magnétosphère s'effectuent par l'intermédiaire de plasmas chauds (c'est-à-dire de haute énergie) de quelques dizaines d'eV à 100 keV. Bien que des observations de la magnétosphère terrestre aient été effectuées in situ pendant plus de 20 ans, plusieurs régions importantes de la magnétosphère n'ont été découvertes que lorsqu'on a disposé de sondes pour l'exploration de l'espace lointain, munies d'instruments de mesure perfectionnés. On peut notamment citer (avec l'année de leur découverte) le feuillet plasmique (1967), le cornet (1971), la couche limite magnétosphérique (1972) et la couche limite du feuillet plasmique (1976) (voir figure 8). Ce n'est pas avant le lancement des satellites ISEE à la fin de 1977 que l'on a pu faire des mesures quantitatives des répartitions tridimensionnelles de la vitesse des particules chargées et des longueurs d'échelle de gradients. Plusieurs travaux de recherche en cours ont pour objet de vérifier les prévisions de la théorie des plasmas sans collisions au moyen de répartitions détaillées des vitesses et de données sur l'onde plasmique et le champ magnétique. Ces études pourraient avoir une importance décisive pour les progrès futurs des recherches sur la fusion et dans d'autres domaines de la physique des plasmas pure et appliquée.

97. La couche limite du feuillet plasmique et la couche limite magnétosphérique, récemment découvertes, sont des couches de transition entre des régions de topologie ouverte ou fermée du champ magnétique. Ce sont les régions à travers lesquelles s'effectue un transfert des régions d'origine du plasma aux régions d'accumulation d'énergie. Le transport de masse, de moment ou d'énergie entre ces diverses régions a été défini surtout en analysant des données relatives au plasma chaud.

98. La région des latitudes élevées de la couche limite diffère des autres régions en ceci qu'elle ne sépare pas une région à lignes de champ ouvertes d'une région à lignes de champ fermées. Mais cette topologie magnétique diffère aussi des autres en ceci qu'elle sépare les lignes de force prenant appui sur la Terre des lignes de force purement interplanétaires. La principale source du feuillet plasmique pourrait être la couche limite des basses latitudes qui transporte directement du plasma de la magnétogaine dans le feuillet plasmique, et non pas le mécanisme de transport indirect qui fait intervenir la couche limite des hautes latitudes. Mais en période d'activité géomagnétique accrue, le feuillet plasmique pourrait recevoir un apport de plasma beaucoup plus important de la couche limite des hautes latitudes.

99. On a découvert une fonction de couplage magnétosphère-vent solaire étroitement liée au rythme de consommation totale d'énergie par la magnétosphère. Cette fonction de couplage a été interprétée de différentes façons, comme l'énergie fournie par la dynamo MHD constituée par le vent solaire et la magnétosphère, ou comme la portion du flux d'énergie électromagnétique du vent solaire qui pénètre dans la magnétosphère. On a également constaté qu'il y avait corrélation entre l'activité dans l'ionosphère aurorale et cette fonction de couplage. Ainsi, une portion importante de l'énergie transférée par le vent solaire s'écoule directement en direction de la Terre sans être emmagasinée dans la magnétoquue.

100. On sait qu'il existe une corrélation entre l'énergétisation de la magnétosphère et un changement d'orientation du champ magnétique interplanétaire du nord vers le sud. On admet généralement que cette corrélation est la preuve qu'il se produit un phénomène de confluence magnétique dans lequel les lignes de force noyées dans le plasma du vent solaire sont comprimées contre la magnétopause et fusionnent avec le champ géomagnétique terrestre. Les lignes de force fusionnées sont ensuite renvoyées par-dessus la calotte polaire dans les lobes de la queue. Dans ce modèle, le flux magnétique se trouve "croisé" du côté exposé au Soleil et s'accumule dans les lobes de la queue. Cette énergie magnétique accumulée dans la magnétoqueue peut être libérée de façon explosive : il y a l'énergétisation du plasma chaud avec début de reconnection sur les lignes neutres de la queue, et production d'un sous-orage. On s'attend dans les modèles de fusion à ce qu'il y ait énergétisation des particules près de la limite magnétosphérique du côté du Soleil. Ce phénomène n'a été observé qu'à une date très récente; les cas évidents d'énergétisation ne sont observés que rarement. Compte tenu de ce petit nombre de cas isolés, on estime généralement que le fusionnement du côté jour (s'il se produit) doit intervenir dans des zones de fusionnement très variables dans le temps et dans l'espace.

101. Les régions constituant des sources de plasma ont des densités plus élevées et des températures plus faibles que les régions d'accumulation, tandis que les régions où s'effectue le transfert ont habituellement des densités et des températures intermédiaires. Mais les régions de transfert présentent des structures caractéristiques de dimensions plus faibles dans l'espace et dans le temps, et les plasmas chauds y présentent souvent des anisotropies et des gradients. Exception faite des lobes de queue, les régions de transfert sont toutes des couches limites (ou des prolongements de ces couches) et l'on y observe toujours un renforcement des émissions d'ondes électrostatiques et des courants électriques. En fait, cette constatation vaut pour toutes les zones de transfert si l'on considère les lobes de la queue comme des régions où le flux magnétique s'accumule.

102. La densité, la température et la vitesse offrent des exemples de paramètres du plasma calculés en sommant des fonctions de répartition des particules chargées. Mais la relation la plus directe avec la théorie des plasmas consiste à évaluer les spectres d'énergie et les répartitions de vitesse. Ces répartitions peuvent être calculées à partir de données brutes collectées par les analyseurs électrostatiques tridimensionnels embarqués à bord du satellite ISEE. Des spectrogrammes énergie-temps à codification colorée ont été établis, qui résument rapidement et efficacement les données relatives au plasma et permettent d'identifier rapidement le régime du plasma, les spectres d'énergie et le comportement du flux. Etant donné que divers groupes d'analyses mettent au point et utilisent ces nouveaux modes de présentation de types de données précédemment non disponibles (par exemple des ensembles de données tridimensionnels avec résolution temporelle poussée ou composition ionique détaillée), les possibilités de découvertes nouvelles (et inattendues) sont pratiquement illimitées.

3. Particules énergétiques chargées

103. On constate que des électrons et des ions d'énergie supérieure à 100 keV sont piégés de façon stable dans la magnétosphère terrestre, en même temps que des particules d'énergie plus faible, beaucoup plus abondantes. La densité de ces particules de haute énergie est extrêmement faible, mais elles présentent une importance technologique considérable en raison des dégâts par rayonnements qu'elles occasionnent. L'étude des populations de particules chargées de haute énergie doit faire partie intégrante de chaque plan de mission ou étude technique de satellite pour permettre à l'engin de fonctionner de façon satisfaisante et d'avoir la durée de vie prévue.

104. Il existe deux sources principales de particules énergétiques chargées dans la magnétosphère.

a) Particules accélérées in situ : La majorité des particules énergétiques de la magnétosphère représente la queue, fortement énergétisée, des répartitions énergétiques d'ions et d'électrons accélérés in situ par des processus magnétosphériques. Compte tenu de l'abondance, déjà mentionnée dans la section précédente, du plasma chaud (avec des énergies inférieures à 100 keV) dans la magnétosphère, on s'attend à ce que certaines des particules soient accélérées jusqu'à un niveau d'énergie élevé, sur la base des principes généraux de la physique des plasmas qui paraissent s'appliquer aux plasmas quelle qu'en soit l'échelle physique. Ainsi, en définitive, la question de la source de ces particules de haute énergie devient celle de la source du plasma thermique (keV). L'accélération in situ est responsable de la présence des particules énergétiques de la zone externe et des particules de la zone interne possédant une énergie inférieure à environ 1 MeV pour les électrons et inférieure à environ 10 MeV pour les protons. Ces particules sont transportées vers la Terre dans toute la magnétosphère par un processus connu sous le nom de diffusion radiale.

b) Protons et électrons de désintégration des neutrons d'albedo des rayons cosmiques (CRAND) : La haute atmosphère terrestre est bombardée continuellement par des rayons cosmiques galactiques d'énergie comprise entre des centaines de MeV et un nombre élevé de GeV. L'interaction d'un rayon cosmique avec un atome d'azote ou d'oxygène peut y provoquer la précipitation d'un neutron énergétique dans la magnétosphère terrestre. Le neutron libre est radioactif et se désintègre en un électron, un proton et un anti-neutrino dont la période est d'environ 10 minutes. Si cette désintégration se produit à l'intérieur de la magnétosphère, il y a piégeage de l'électron et du proton. La nature de la désintégration neutronique est telle que le proton reçoit presque toute l'énergie cinétique du neutron qui lui donne naissance. En conséquence, cette source CRAND (Cosmic-Ray Albedo Neutron Decay) produit des électrons d'énergie inférieure à environ 1 MeV et des protons d'énergie comprise entre 10 MeV et au moins 1 000 MeV. La possibilité pour le champ magnétique terrestre de contenir des protons d'énergie aussi élevée est limitée et cette considération restreint le piégeage stable aux régions équatoriales de la magnétosphère situées à environ un rayon terrestre de la surface de la Terre. Cette source CRAND ne présente d'importance que pour la zone interne. Il convient de noter que la limite énergétique supérieure de ce piégeage n'a pas été déterminée expérimentalement, du fait que les intensités des particules aux énergies les plus élevées sont très faibles.

c) Sources de moindre importance : Certaines données indiquent que d'autres sources fournissent en quantité infinitésimale des particules de haute énergie à la magnétosphère terrestre. Parmi ces sources figure la capture directe d'ions et d'électrons énergétiques, énergétisés dans la magnétosphère de Jupiter ou par des événements solaires mettant en jeu des particules chargées, qui s'échappent respectivement de la magnétosphère de Jupiter ou du Soleil et atteignent le voisinage de la Terre. Un très faible pourcentage de ces particules peut alors être piégé dans la magnétosphère terrestre. En outre, les "rayons cosmiques galactiques anomaux", que l'on suppose être des ions à charge simple, peuvent être piégés dans la magnétosphère lorsqu'ils sont dépouillés de leurs électrons atomiques par des collisions avec l'atmosphère résiduelle.

105. La composition des ions énergétiques est importante, car elle peut révéler la ou les sources ultimes de ces particules. On sait que la plupart des ions de la ceinture de rayonnement énergétique sont des protons, et que l'abondance des ions hélium varie entre quelques centièmes et quelques dix millièmes. L'abondance relative est plus élevée à proximité de l'équateur et après des perturbations géomagnétiques importantes. Il n'a été signalé qu'une seule mesure distinguant parmi les éléments lourds le carbone, l'azote, l'oxygène et des noyaux de masse encore plus élevés. On a constaté que la somme des abondances du carbone, de l'azote et de l'oxygène était de quelques pour cent de l'abondance de l'hélium, l'abondance relative de chacun de ces trois éléments étant comparable à ce qu'elle est dans le Soleil. Cette observation donne à penser que ces ions énergétiques proviennent initialement du vent solaire et qu'ils ont été ensuite énergétisés par des processus magnétosphériques.

106. Les abondances de ces particules de haute énergie connaissent des variations dans le temps à des échelles comprises entre des secondes et des siècles. Les protons de très haute énergie découverts dans la zone interne ont des durées de vie qui s'expriment en milliers d'années. Dans la zone externe, des changements brusques paraissent être le résultat d'orages magnétiques puissants, tandis que des variations lentes se produisent pendant un intervalle qui se mesure en mois entre diverses impulsions d'activité magnétique. Près des limites externes de la zone extérieure, les modifications interviennent généralement à des échelles de temps inférieures à la journée. On peut relever ici une certaine analogie avec la dynamique océanique : les régions extérieures de la magnétosphère sont fortement influencées par les perturbations extérieures, de même que la surface de l'océan, tandis que le centre de la zone intérieure est bien protégé, de même que les profondeurs océaniques.

D. Le vent solaire

Introduction

107. En 1951, Biermann, se fondant sur des observations des queues de comètes, en a déduit que des ions et des électrons s'échappent en permanence du Soleil. Cette conjecture a suscité un vif intérêt pour l'étude expérimentale de l'espace interplanétaire. En conséquence, les tout premiers satellites scientifiques placés sur des orbites à apogée élevée ont été équipés d'instruments appropriés

pour observer un milieu interplanétaire encore hypothétique. En 1960, Gringauz a signalé qu'il avait découvert avec un instrument monté sur LOUNIK-2 des flux d'ions présentant à peu près les propriétés attendues. Un peu plus tard, en 1963, des mesures beaucoup plus élaborées, qui fournirent des détails quantitatifs tels que la densité, la température et la vitesse du flux de particules chargées, furent effectuées à bord de MARINER-2. Depuis lors, pratiquement tous les satellites scientifiques placés sur une orbite terrestre fortement excentrique et toutes les sondes spatiales ont été équipés d'instruments pour étudier ce phénomène, baptisé "vent solaire" par Parker en 1958.

1. Propriétés

108. Nous savons maintenant que le vent solaire est un gaz fortement ionisé, ce que l'on appelle un plasma, qui consiste surtout en protons et en électrons. On observe généralement aussi un peu d'hélium complètement ionisé ("particules α "), avec une densité numérique relative pouvant atteindre 20 p. 100. Les ions lourds du vent solaire, qui représentent moins de 1 p. 100 en densité, ne sont pas totalement ionisés, à la différence des ions légers.

109. Près de l'orbite de la Terre, on observe que ce plasma s'écoule en provenance du Soleil de façon à peu près radiale, avec des vitesses comprises entre environ 200 et 800 km/s, la densité étant de l'ordre de 10^7 particules/m³. Si la température plasmique, comprise entre 10^3 et 10^6 K, peut paraître élevée, la vitesse thermique des particules est toujours plus faible que la vitesse globale du plasma. Cela signifie que l'écoulement du plasma est supersonique. Ce fait est important chaque fois que le plasma réagit sur des obstacles tels que des planètes et leur champ magnétique. Dans ces cas, il se forme des ondes de choc comparables à celles auxquelles les avions supersoniques donnent naissance.

110. Le plasma entraîne avec lui un champ magnétique à peu près égal au dix millième de celui qu'on observe près de la surface de la Terre. On pense que ce champ est "gelé" sur le plasma, la conductivité électrique du plasma étant si élevée que les courants (qui sont en fin de compte la source du champ magnétique) continuent de s'écouler sans pratiquement s'affaiblir pendant de très longues périodes. Le champ magnétique joue un rôle très important en déterminant la propagation des particules de haute énergie dans le plasma; il peut aussi apparaître des modes d'ondes et des instabilités qui n'existent pas ordinairement dans les gaz ou les fluides.

2. Explication

111. Même s'il n'est pas possible de procéder à des mesures in situ dans la région où le flux du plasma supersonique prend naissance à proximité du Soleil, on a probablement compris aujourd'hui les principes de base de l'accélération du plasma, qui paraissaient d'abord mystérieux. Le plasma est accéléré à des vitesses supersoniques en opposition aux forces gravitationnelles du Soleil du fait de la température élevée de la couronne solaire, si l'on suppose qu'il y a dans ce plasma un transport radial d'énergie suffisamment important. L'accélération du gaz décrite par cette théorie ressemble beaucoup aux phénomènes qui se produisent dans la tuyère d'un moteur de fusée, où l'énergie thermique d'un gaz chaud est transformée en mouvement global supersonique.

112. Etant donné que l'on connaît les propriétés du vent solaire moyen à environ une unité astronomique (UA), c'est-à-dire la distance Terre-Soleil, et que l'on comprend pour l'essentiel les raisons de l'accélération du plasma dans la couronne solaire extérieure, il semblerait que la plupart des problèmes ont été résolus dans ce domaine de la recherche spatiale. Malheureusement, ce n'est pas encore le cas pour plusieurs raisons :

a) Le vent solaire remplit très probablement la totalité de l'héliosphère à une distance radiale d'au moins 100 UA. Seule une très petite fraction de cet espace est actuellement accessible à la recherche in situ. En particulier, la région importante de l'accélération du plasma à proximité du Soleil et les processus qui se poursuivent à de grandes distances du Soleil, là où le vent solaire doit interagir d'une façon ou d'une autre avec le milieu interstellaire, n'ont pas encore été explorés. Au-delà du plan de l'écliptique (au-dessus d'environ 15° de latitude), on n'a pas encore fait de mesures in situ à une distance quelconque du Soleil.

b) Le vent solaire est un milieu très variable, ce qui s'explique en partie par des phénomènes non stationnaires à proximité du Soleil et en partie par des interactions entre des courants de plasma de vitesses différentes dans l'espace interplanétaire. Il faut donc prendre en considération les processus dynamiques à grande échelle et les écarts par rapport à la symétrie sphérique, qui n'ont pas été envisagés dans les théories fondamentales. Des courants de vent solaire rapides persistant au-delà de plusieurs rotations solaires sont inclus dans un plasma s'écoulant à des vitesses plus lentes. Les courants rapides interagissent avec le vent solaire lent principalement en créant des régions comprimées et échauffées sur leurs bords d'attaque. Pour comprendre ces processus dynamiques, il faudrait de nombreuses sondes spatiales réparties dans l'immense volume de l'héliosphère et équipées d'instruments appropriés effectuant des mesures simultanées. Si l'on compare l'état des recherches sur le vent solaire à celui de la météorologie, par exemple, on peut dire que la connaissance du vent solaire est aujourd'hui aussi avancée que l'était la météorologie immédiatement après l'invention du thermomètre et du baromètre.

c) A côté de ces processus à grande échelle, les caractéristiques à petite échelle du plasma sont importantes mais encore insuffisamment comprises. La répartition des vitesses des protons mesurées à différentes distances du Soleil dans le même flux de plasma par les deux sondes spatiales HELIOS montre que l'explication du comportement thermique du vent solaire uniquement par les températures est très souvent insuffisante. Les écarts constatés par rapport aux répartitions de Maxwell sont considérés comme le résultat d'un déséquilibre thermique et d'interactions ondes-particules qui jouent probablement un rôle essentiel dans le transport d'énergie réalisé dans le vent solaire, ce qui est important, mais n'a pas été précisé dans la théorie de Parker.

d) Des moyens plus perfectionnés sont nécessaires pour établir un diagnostic. Par exemple, le rythme de diminution du moment angulaire du Soleil, qui est important pour les théories de la formation et du développement des étoiles, ne peut encore être mesuré parce que la précision des instruments de mesure du vent solaire actuellement disponibles est limitée. La situation est semblable en ce qui concerne

d'autres mesures importantes pour l'astrophysique, par exemple la composition de masse du vent solaire. Jusqu'ici, on n'a pu effectuer de telles mesures que dans des conditions particulières d'écoulement, ce qui ne permet pas d'en tirer des conclusions générales. D'autres limitations, par exemple dans la détermination, avec une résolution élevée dans le temps, des répartitions exactes de vitesses, qui sont indispensables pour résoudre quelques questions encore sans réponse de la physique des plasmas, tiennent aux limites des instruments de mesure actuels et aussi à la lenteur des transmissions de données entre les engins spatiaux et la Terre. Grâce aux efforts accomplis par une vaste communauté scientifique pour améliorer les instruments, et aussi aux progrès de la technique des engins spatiaux, on peut espérer qu'un grand nombre de ces problèmes trouveront une solution dans un proche avenir.

e) Les difficultés des recherches sont encore accrues, et nos connaissances limitées à proportion, en ce qui concerne l'interaction d'un vent solaire encore mal connu avec le système complexe d'une atmosphère ou d'une magnétosphère planétaire. Outre le fait que les planètes extérieures (au-delà de Saturne) n'ont encore été atteintes par aucune sonde spatiale et que des types spectaculaires d'interaction, tels que ceux qui se produisent entre le vent solaire et les comètes, demeurent inexplorés, il faut reconnaître que l'on est encore loin de comprendre même les relations Soleil-Terre, telles qu'elles sont modulées par le vent solaire.

3. Champ magnétique interplanétaire à grande échelle

113. Les lignes de force du champ magnétique interplanétaire sont reliées au Soleil à une extrémité et leur forme est déterminée surtout par les mouvements du vent solaire et la rotation du Soleil. Le vent solaire entraîne en effet avec lui les lignes de force du champ magnétique au fur et à mesure qu'il s'éloigne radialement du Soleil, tandis que celui-ci fait décrire à la base de chaque ligne de force un cercle au cours de sa rotation. Il en résulte que les lignes de force du champ magnétique sont des spirales; cette géométrie a été confirmée par des mesures directes effectuées par plusieurs sondes entre 0,3 UA et 10 UA. Le champ magnétique interplanétaire est plus complexe que celui de la Terre, parce qu'il est lié au champ magnétique du Soleil, qui est complexe et très variable. Le champ magnétique interplanétaire est en fait plus simple que le champ photosphérique, parce que la plupart des lignes de force du champ magnétique solaire ne s'éloignent qu'assez peu (environ 2 rayons solaires) du Soleil, puis y retournent. On pense que le champ interplanétaire est la manifestation d'un champ magnétique solaire "à grande échelle". Les mesures in situ du champ magnétique interplanétaire peuvent donc fournir une description du champ magnétique global du Soleil, lequel est à son tour lié au fonctionnement de la machine dynamo-électrique qui fournit l'énergie nécessaire à l'activité solaire.

114. Si le champ magnétique principal du Soleil était un simple dipôle, comme celui que forme un barreau aimanté, et si l'axe de ce dipôle était perpendiculaire au plan de l'écliptique, la direction du champ magnétique interplanétaire serait, pendant le dernier cycle solaire, "à l'opposé du Soleil" (polarité positive) au nord du plan de l'écliptique et "vers le Soleil" au sud de ce plan, la surface de transition du nord au sud étant un plan (en fait un feuillet de courant) coïncidant avec le plan de l'écliptique. Si l'axe du dipôle magnétique solaire

était légèrement incliné (par exemple de 10°), le feuillet de courant serait incliné de 10° par rapport au plan de l'écliptique, et ce plan tournerait avec le Soleil autour de l'axe de rotation solaire. Ainsi, un observateur placé dans le plan de l'écliptique pourrait voir les lignes de force s'éloigner du Soleil pendant la moitié de la période de rotation solaire et revenir vers le Soleil pendant l'autre moitié. On observe souvent une configuration de ce type, à deux secteurs (secteur positif et secteur négatif). Une configuration à deux secteurs pourrait aussi être produite par un dipôle magnétique solaire fortement incliné, par exemple un dipôle dont l'axe se trouverait dans le plan équatorial solaire, auquel cas le feuillet de courant (limite de secteur ou feuillet neutre) serait perpendiculaire au plan de l'écliptique. Le problème de savoir si ce feuillet occupe ou non une position voisine du plan de l'écliptique pourrait être résolu en envoyant un satellite très loin au-dessus du plan de l'écliptique.

115. La configuration par secteur ne demeure pas constante dans le temps. Par exemple, on observe parfois quatre secteurs. Cela pourrait être dû à un "gauchissement" ou à une "ondulation" de la surface associé à un dipôle légèrement incliné. Ou bien la raison pourrait en être un champ solaire beaucoup plus compliqué. On sait peu de choses sur les variations de la configuration tridimensionnelle de la surface limite des secteurs. Lorsque l'activité solaire augmente, la configuration par secteur est perturbée, probablement par les éjecta des régions actives. On sait relativement peu de choses sur les configurations de polarité complexes mesurées au cours de ces périodes.

116. Même en l'absence d'éjecta de courte durée, il existe souvent des courants distincts de plasma rapide. Certains de ces courants persistent pendant un grand nombre de rotations du Soleil. La polarité du champ magnétique est d'ordinaire constante tout le long d'un courant et les limites de secteurs se situent toujours dans des flux lents entre courants. La plupart des grands courants en corotation prennent naissance dans des trous coronaux, c'est-à-dire dans des régions de la haute atmosphère du Soleil (la couronne) qui, contrairement au reste de la couronne, n'émettent pas de rayons X. La polarité des champs magnétiques dans les courants est liée à celle des trous coronaux. Des modèles de champ magnétique coronal indiquent que la plupart des lignes de force du champ magnétique dans les trous coronaux sont "ouvertes", c'est-à-dire qu'elles s'en vont très loin du Soleil dans le milieu interplanétaire. Il existe des données indiquant que le plasma rapide pourrait parfois prendre naissance dans des régions de champ magnétique ouvert, non associées aux trous coronaux.

117. Lorsque le plasma rapide des courants tournant avec le Soleil pénètre dans le plasma lent situé devant lui, il y a interaction entre les deux. Le champ magnétique et le plasma sont comprimés; il y a échauffement du plasma dans cette région d'interaction. Les effets de ces interactions se propagent par ondes sonores magnétohydrodynamiques dans le flux lent comme dans le flux rapide. A de grandes distances du Soleil (2 UA), ces ondes se tendent et se transforment en ondes de choc.

118. Dans les courants tournant avec le Soleil, il se produit des fluctuations d'un type différent; il s'agit des ondes d'Alfvén, qui se propagent du fait de l'existence d'une tension réelle dans les lignes de force du champ magnétique. On

/...

constate que ces ondes s'éloignent du Soleil. On a émis l'hypothèse qu'elles prennent naissance dans des régions d'interaction entre courants, mais il existe aussi des données indiquant qu'elles pourraient être produites sur le Soleil lui-même. L'hypothèse de l'origine solaire s'appuie sur des observations de l'amplitude des ondes effectuées par HELIOS à 0,3 UA et par d'autres engins spatiaux à des distances de plusieurs UA.

119. La forme géométrique des ondes d'Alfvén n'est pas pleinement expliquée. Pour simplifier, les théories actuelles supposent qu'il existe des ondes planes ou des structures d'ondes simples telles que celles produites à la surface de l'eau par un bateau en mouvement ou par la chute d'une pierre, et la plupart des observations sont interprétées au moyen de ces théories. Mais des observations récentes paraissent indiquer que ces ondes ressembleraient plutôt à la houle en pleine mer, et qu'une description statistique pourrait être plus appropriée. Ce domaine devrait être activement étudié au cours des 10 prochaines années.

120. Des mesures du champ magnétique interplanétaire sont effectuées aujourd'hui avec une résolution temporelle très élevée, correspondant à une échelle spatiale de l'ordre de 15 km, c'est-à-dire 10^{-7} UA. La plupart des phénomènes observés à cette échelle sont importants pour la compréhension des processus fondamentaux qui se déroulent dans le plasma. Le vent solaire est un plasma magnétisé particulièrement simple, qui ne présente pas les effets de limite ni les contaminations qui compliquent l'analyse des plasmas au laboratoire. En outre, le plasma interplanétaire et le champ magnétique peuvent être mesurés avec une grande précision et de façon très détaillée. Le champ solaire représente donc, par certains de ces aspects, un laboratoire dans lequel on peut étudier in situ les processus plasmiques.

121. L'étude de la structure des chocs interplanétaires est une vaste question qui commence seulement à être explorée. De très nombreuses structures sont possibles, en fonction des paramètres locaux au moment de l'observation d'un choc. Il existe un ensemble tout aussi complexe de processus physiques liés aux divers types de choc et de structures de choc.

E. Magnétosphères planétaires

Introduction

122. On a découvert des magnétosphères autour d'autres planètes, notamment Mercure (dont la magnétosphère a été découverte par MARINER-10 en 1971), Jupiter (dont la magnétosphère a été découverte d'abord par ses émissions d'ondes radioélectriques, puis par des mesures directes in situ à bord de PIONEER-10 en 1972), et Saturne (dont la magnétosphère a été découverte en 1980 par PIONEER-11). Il semble clair que Vénus n'a aucun champ magnétique important d'origine interne, donc aucune magnétosphère, alors que la situation sur Mars reste incertaine, sauf que s'il existe une magnétosphère, elle ne peut être que très réduite. On s'attend également à trouver des magnétosphères dans les cas d'Uranus et de Neptune, mais cette supposition ne sera confirmée (ou infirmée) que lorsque VOYAGER-2 survolera ces planètes, en 1986 et en 1989 respectivement. Le concept a aussi été élargi pour comprendre les "magnétosphères" des étoiles à neutrons (pulsars) et certaines sources de rayons X dans lesquelles des champs magnétiques intenses et les phénomènes associés d'accélération des particules ont une grande importance.

1. La magnétosphère de Jupiter

123. Jupiter n'est pas une planète ordinaire. C'est la plus grande planète du système solaire. Sa masse est plus du double de la masse combinée de toutes les autres. Jupiter rayonne sensiblement plus d'énergie thermique qu'il n'en reçoit du Soleil; donc, si l'on en juge par son bilan énergétique, c'est une étoile faible plutôt qu'une planète. Il y a presque 30 ans, on a découvert que Jupiter était un émetteur puissant de bruits radioélectriques et la radiosource la plus brillante du ciel. Cette émission radioélectrique provient de la partie interne d'une magnétosphère grande et active, une magnétosphère tellement énorme que, si on la voyait, elle nous apparaîtrait comme l'objet le plus grand dans le ciel, d'un diamètre de deux à presque quatre fois le diamètre lunaire (ou solaire). Par comparaison, le diamètre de la magnétosphère terrestre n'est que légèrement supérieur à la taille de Jupiter. Donc, si l'on regardait la magnétosphère terrestre depuis Jupiter, elle ne serait pas plus grande dans le ciel que celle de Jupiter vue de la Terre, tout juste un point dans le ciel. On trouve en orbite autour de Jupiter le plus grand nombre (16 ont été recensées à ce jour) et la collection la plus intéressante de lunes (satellites) de toutes les planètes. Par exemple, parmi les quatre satellites découverts par Galilée, le plus proche de Jupiter, Io, paraît être l'objet le plus volcanique connu dans le système solaire. Pendant les passages de VOYAGER à proximité de Jupiter en 1979, huit volcans ont été observés sur Io, tous en éruption simultanément. Jupiter, ses satellites et sa magnétosphère font également l'objet d'études parce qu'ils forment un système solaire en miniature qui fournit des indications sur l'origine et l'évolution d'un système solaire grandeur nature.

124. A moins d'une vingtaine de rayons joviens (R_J), le champ magnétique est à peu près celui d'un dipôle (donc analogue au champ produit par un barreau magnétique), sauf au voisinage de la surface de Jupiter, où la structure du champ est plus complexe et comporte des anomalies magnétiques. Au-delà de $20 R_J$, le champ magnétique est de plus en plus étiré; cet étirement est surtout visible du côté non éclairé de Jupiter (voir figure 10), où la pression du vent solaire ne s'oppose pas

aux forces d'étirement. L'étirement est dû à un feuillet chaud relativement mince de gaz ionisé (plasma), généralement appelé magnétodisque. Des courants électriques s'écoulent à l'intérieur du plasma du magnétodisque et provoquent l'étirement du champ, qui serait sans cela semblable à celui d'un dipôle.

125. Quelle est donc la source d'énergie responsable de la grande variété des phénomènes magnétosphériques de Jupiter? D'où provient le plasma du magnétodisque et des autres régions de la magnétosphère? Bien que ce ne soit pas encore définitivement établi, il semble que l'énergie provienne de l'énergie rotationnelle de la planète. Cela veut dire que la rotation rapide de Jupiter (sa vitesse actuelle est un tour en un peu moins de 10 heures) subit un ralentissement imperceptible par son interaction avec sa magnétosphère. Un fait encore plus remarquable est que le satellite Io est la source primaire du plasma contenu dans la magnétosphère et le magnétodisque. C'est également la source primaire des particules qui forment l'énorme ceinture de rayonnement de Jupiter. L'évolution et la dynamique de la magnétosphère de Jupiter sont donc entièrement différentes de celles de la magnétosphère et de la ceinture de rayonnement de la Terre, pour lesquelles le vent solaire fournit une grande partie du plasma et toute l'énergie. Il semble que sur Jupiter, le vent solaire ne fournit ni le plasma ni l'énergie.

126. La théorie de l'origine et de la répartition du plasma dans le système magnétosphérique Jupiter/Io est relativement simple. A cause de ses volcans, Io est recouverte de matière volcanique condensée, principalement un givre de dioxyde de soufre (SO₂). Un bombardement de particules énergétiques arrache à Io une certaine quantité de cette matière, qui s'en détache avec une vitesse suffisante pour échapper à l'attraction du satellite. En s'éloignant, cette matière est ionisée par un bombardement supplémentaire de particules, de sorte qu'il se forme un tore de plasma au voisinage de l'orbite d'Io. En termes de plasma magnétosphérique, ce tore est grand et relativement massif. Environ une tonne par seconde de matière (surtout SO₂) est arrachée à Io et est injectée dans le tore de plasma. Le tore d'Io contient environ un million de tonnes de débris de SO₂, plus d'autres matières telles que du sodium et du potassium. Par comparaison, le plasma de la magnétosphère terrestre, au-dessus de 1 000 km d'altitude environ, ne pèse qu'une dizaine de tonnes, soit le cent millième de la masse du tore d'Io. Ce plasma est transporté dans toute la magnétosphère de Jupiter et accéléré pour créer la ceinture de rayonnement la plus grande et la plus énergétique que l'on ait trouvée jusqu'ici à l'intérieur du système solaire.

127. Les scientifiques sont à peu près d'accord sur la description ci-dessus de l'origine et de la répartition du plasma de la magnétosphère de Jupiter. Mais il n'en va pas de même en ce qui concerne la cause et l'effet des phénomènes qui interviennent entre le tore de plasma d'Io et ce que l'on observe du magnétodisque et de la ceinture de rayonnement. Notre connaissance de la magnétosphère de Jupiter en est encore à ses débuts; nous pouvons nous attendre, d'ici une dizaine d'années, à des progrès significatifs qui modifieront pour le moins nos idées théoriques actuelles dans ce domaine. La description théorique ci-après devrait être lue en ayant cette mise en garde présente à l'esprit.

128. Le tore fournit l'énergie motrice d'une convection magnétosphérique à grande échelle, qui transporte le plasma du tore à travers la magnétosphère tout en accélérant une petite fraction de ce plasma pour former la ceinture de rayonnement énergétique de Jupiter. Le tore peut provoquer le mouvement convectif parce qu'il est bien plus lourd d'un côté que de l'autre. On appelle cette portion lourde du tore le secteur actif, qui est lié à une anomalie magnétique étendue dans l'hémisphère nord de Jupiter. A cause de son association à une anomalie magnétique, ce modèle théorique est appelé "modèle à anomalie magnétique".

129. La région entre le tore et l'ionosphère de Jupiter contient assez de plasma pour former entre eux un bon conducteur électrique. La rotation de Jupiter fait circuler des courants qui, comme dans un moteur électrique, exercent sur le tore des forces qui ont tendance à le faire tourner en liaison rigide avec Jupiter. La vitesse de rotation du tore ne diffère que de quelques pour cent de celle de Jupiter. A cause de sa rotation rapide, le tore est soumis à une force centrifuge qui a tendance à le projeter vers l'extérieur. La contrainte centrifuge qui s'exerce sur lui est maximale dans le secteur actif, parce que le tore est plus lourd en cet endroit, ce qui fait que le plasma dans ce secteur s'écarte de Jupiter. Toutefois, le tore fait partie d'un circuit électrique complexe, et le mouvement d'une section du tore provoque un mouvement de ses autres parties ainsi que du reste du plasma dans toute la magnétosphère. Le déplacement vers l'extérieur du secteur actif du tore crée une configuration de courant électrique, et cela cause une circulation à grande échelle du plasma à travers la magnétosphère, qui prend la forme d'une configuration convective à deux cellules tournant avec Jupiter.

130. Le tore est si massif que son mouvement de convection dans le champ de force centrifuge libère environ 10^{14} watts d'énergie dans l'ensemble de la magnétosphère. L'émission radioélectrique de Jupiter a une variation dans le temps qui est manifestement liée à la période de rotation de la planète (10 heures). Aucun modèle magnétosphérique du type terrestre n'a encore été proposé pour expliquer, même qualitativement, les périodicités de 10 heures observées. Cependant, comme nous connaissons en détail la magnétosphère terrestre, il serait peut-être naturel de chercher à utiliser cet acquis pour étudier la magnétosphère de Jupiter. Mais si cette planète a une magnétosphère du type pulsar, une grande partie de la physique de la magnétosphère terrestre n'est pas applicable à celle de Jupiter. Jusqu'ici, le modèle à anomalie magnétique représente la seule explication des phénomènes de la magnétosphère de Jupiter qui apparente celle-ci à une magnétosphère de pulsar.

131. On peut constater deux différences entre les modèles de la magnétosphère de Jupiter et d'un pulsar : le champ magnétique à la surface de Jupiter est sensiblement plus faible que celui que l'on prête aux pulsars, et la période de pulsation de Jupiter est sensiblement plus longue que celle des pulsars observés. Si l'on peut tenir compte de ces différences, nous pourrions étudier, à l'intérieur de notre système solaire, les paramètres physiques d'un corps qui manifeste un comportement faible mais franc du type pulsar, et utiliser les connaissances tirées de cette étude pour comprendre les principes physiques auxquels obéissent les pulsars astrophysiques.

132. Les enseignements tirés du passage à côté de Jupiter des deux sondes PIONEER et des deux sondes VOYAGER, et les découvertes qu'il a permis de faire, particulièrement celle de volcans sur Io et celle du tore de plasma d'Io, ont ouvert un

nouveau domaine de recherche en physique de la magnétosphère. Le temps qui s'écoulera entre aujourd'hui et le moment où les données fournies par l'engin spatial GALILEO (que l'on prévoit de mettre en orbite autour de Jupiter avant la fin de la décennie) auront été assimilées devrait servir à développer et à perfectionner les théories et à préparer leur vérification. Avec sa gamme remarquable de propriétés nouvellement découvertes et les services qu'elle peut rendre aux astrophysiciens, la magnétosphère de Jupiter sera un domaine passionnant de recherche.

2. La magnétosphère de Mercure

133. Avant le voyage historique de MARINER-10, on connaissait si peu de choses sur Mercure que la mission a été pratiquement le premier regard de l'homme sur la planète du système solaire la plus proche du Soleil. MARINER-10 a effectué trois survols rapprochés de la planète les 29 mars et 21 septembre 1974 et le 16 mars 1975. Lors de son premier passage à proximité de Mercure, MARINER-10 a découvert, contre toute attente, un champ magnétique intrinsèque global et une magnétosphère de petites dimensions. La trajectoire du premier survol se trouvait du côté obscur, près de l'équateur, à une distance minimale d'approche de 703 km de la surface. La deuxième rencontre avait été calculée de façon à optimiser la couverture image des régions polaires méridionales, et la sonde est passée trop loin de Mercure (50 000 km) pour permettre une observation directe de sa magnétosphère. Le troisième passage était similaire au premier, consistant en une approche très près de la planète du côté obscur, mais soigneusement modifiée pour survoler la région polaire septentrionale à une distance de seulement 327 km de la surface.

134. Les données d'observation sur la magnétosphère de Mercure ont été obtenues par trois instruments scientifiques placés sur MARINER-10, un magnétomètre, un spectromètre à plasma et un télescope à particules chargées. Mercure, qui est la plus petite des planètes, à l'exception peut-être de Pluton, a un rayon équatorial de 2 439 km (contre 6 378 km pour celui de la Terre). Il présente une onde de choc bien détachée, une magnétopause et un feuillet de courant dans la queue très semblables à ceux de la Terre. Les données fournies par la traversée de la magnétopause indiquent que la taille de la magnétosphère de Mercure est très faible. Proportionnellement, Mercure occupe une partie bien plus grande de sa magnétosphère que ne le fait la Terre. Il n'y a aucune preuve de l'existence permanente d'une ceinture de rayonnement de particules chargées piégées. Les données d'observation fournies par MARINER-10 ont servi à faire des études quantitatives de la magnétosphère de Mercure. Il est difficile de déterminer les caractéristiques du champ magnétique planétaire intrinsèque, parce que le champ magnétique magnétosphérique de Mercure comprend une contribution substantielle qui peut être attribuée à des sources de champ extérieures. Même pendant le survol le plus proche de la planète, les observations du champ magnétique ont été faites dans des régions qui ne sont pas très éloignées des effets des courants électriques qui circulent dans la magnétopause et le feuillet de courant de la queue. Une représentation appropriée du champ extérieur devient donc très importante pour le succès d'un modèle quantitatif de la magnétosphère de Mercure. Le résultat le plus récent est un modèle tridimensionnel de la magnétosphère qui comprend un feuillet de courant de queue et le confinement de toutes les lignes de force du champ planétaire à l'intérieur d'une magnétosphère de petite taille. La taille de la magnétosphère est conforme aux traversées de la magnétopause directement observées par MARINER-10.

135. Selon ce modèle, fondé sur toutes les données relatives au champ magnétique fournies par MARINER-10, la planète a un moment dipolaire qui est 3 400 fois plus faible que celui du dipôle terrestre, incliné de $2,3^\circ$ par rapport à la normale au plan de l'orbite planétaire. Sa polarité est identique à celle de la Terre. Toutefois, le champ planétaire intrinsèque de Mercure est très déformé par rapport à celui d'un simple dipôle centré. Cela veut dire que le rayon moyen des courants qui circulent à l'intérieur de la planète est une fraction importante du rayon planétaire. Ce résultat est conforme à nos idées actuelles sur la structure interne de Mercure, notamment que la planète comporte un grand noyau solide dense dont le rayon est d'environ les trois quarts du rayon planétaire.

136. Les résultats fournis par le premier passage de MARINER-10 indiquent que la distance jusqu'à la magnétopause est de $1,32 R_H$ (rayon de Mercure) ou plus. Cette distance peut varier de ± 10 p. 100 à cause des variations de la pression dynamique du vent solaire. En traversant le feuillet de courant de queue, le champ magnétique magnétosphérique subit un brusque changement de direction.

137. Dans la magnétosphère de Mercure, les caractéristiques du plasma interne sont similaires à celles de la magnétosphère terrestre. Le long des lignes de force du champ magnétique aboutissant à la région de la calotte polaire de Mercure, le flux d'électrons de basse énergie est très faible. Des électrons chauds d'une énergie de l'ordre du keV ont été observés le long des lignes de force connectées au bord interne du feuillet de courant de queue. On a observé que le reste de la région des lignes de force ouvertes contenait des électrons d'une énergie de 100 à 200 eV. Les observations par le télescope à particules chargées ont montré des bouffées transitoires intenses d'électrons énergétiques le long des lignes de force raccordées au bord intérieur du feuillet de courant de queue. Cela indique qu'un processus local d'accélération doit être actif dans la queue de la magnétosphère.

138. Le champ magnétique extérieur, qui représente une fraction importante du champ magnétique magnétosphérique de Mercure, est induit par des courants électriques circulant dans le feuillet de courant de queue et la magnétopause. L'emplacement des deux surfaces d'origine et l'intensité des courants de ces sources varient constamment, réagissant à l'instabilité du vent solaire. Il en résulte que les caractéristiques du vent solaire ont un effet temporel direct sur le champ magnétique magnétosphérique de Mercure. Dans la région où le gradient du champ extérieur est élevé, MARINER-10 a observé des fluctuations relativement grandes du champ magnétique.

3. Les magnétosphères de Vénus et de Mars

139. Contrairement aux planètes décrites précédemment, ni Mars ni Vénus n'ont de champ magnétique intrinsèque, bien que l'une et l'autre aient une enveloppe de gaz ionisé bien développée (ionosphère). C'est pourquoi la cavité ionisée entourant chacune de ces planètes est parfois appelée pseudo-magnétosphère. On peut éviter l'usage de ce terme en recourant à une définition élargie de la magnétosphère, considérée alors comme la région limitée de l'espace où la présence de la planète modifie la direction et la valeur du champ magnétique interplanétaire en aval de l'onde de choc. Une définition aussi générale est ensuite applicable à toutes les planètes connues, même à celles qui ne possèdent pas de champ magnétique intrinsèque.

140. Comme le nombre d'engins spatiaux affectés à l'étude de la magnétosphère est moins élevé pour les autres planètes que pour la Terre, il est clair que subsistent, en physique des magnétosphères non terrestres, de nombreux problèmes non résolus. Les recherches sur la magnétosphère de Vénus en sont aujourd'hui au point où en étaient les recherches sur la magnétosphère terrestre il y a 15 ans. Notre connaissance de la magnétosphère martienne en est même à un stade moins avancé.

141. Des mesures du champ magnétique et du plasma au voisinage de Vénus ont été effectuées pour la première fois par VENERA-4 le 17 octobre 1967, à une hauteur de 200 km au-dessus de la surface de la planète; MARINER-5 s'est approché de la planète le jour suivant, à une distance minimale de 300 km, alors que MARINER-10 est passé à plusieurs milliers de kilomètres. VENERA-9 et 10 ont exploré Vénus en 1975-1976, et PIONEER Venus Orbiter le fait depuis le début de 1978. Les premières mesures du champ magnétique ont été effectuées par Dolginov et ses collègues, à l'aide de VENERA-4. Les résultats qu'ils ont obtenus montrent que le champ magnétique intrinsèque de Vénus est faible - moins de 10 nT (ou gamma) - et qu'il ne peut constituer un obstacle au vent solaire comme le fait le champ géomagnétique.

142. L'interaction du vent solaire avec l'ionosphère de Vénus produit une onde de choc qui est relativement plus proche de la planète que dans le cas de la Terre. La différence tient au fait que l'obstacle créant l'onde de choc est non pas le champ magnétique intrinsèque de Vénus, mais le petit champ magnétique produit par des courants induits dans l'ionosphère par le flux de vent solaire lui-même. Le champ magnétique interplanétaire se déplaçant avec le plasma du vent solaire ne peut pénétrer dans l'ionosphère conductrice de l'électricité et s'accumule face à la planète pour former une barrière magnétique (obstacle magnétique) au vent solaire.

143. Le profil de la densité d'électrons observé dans l'ionosphère diurne de Vénus présente une limite supérieure bien marquée, où cette densité diminue rapidement. Il s'agit de l'ionopause, située à une hauteur de 260 km. C'est là une caractéristique de l'ionosphère de Vénus observée par les engins spatiaux tant américains que soviétiques. Jusqu'en 1979, on pensait généralement que les courants électriques créant la barrière magnétique étaient répartis dans l'ensemble de l'ionosphère diurne de Vénus. Mais à partir de mesures du champ magnétique effectuées par PIONEER Venus Orbiter, Russell et ses collègues ont montré que ces courants sont surtout confinés dans une couche relativement étroite (environ 90 km) de l'ionosphère supérieure de Vénus. Ils se referment dans le vent solaire en aval de l'onde de choc, dans une couche de transition. Leur direction dépend de celle de la composante du champ magnétique interplanétaire perpendiculaire à l'axe Soleil-Vénus. La pression dynamique du vent solaire est généralement équilibrée par la pression du champ magnétique dans la barrière magnétique; dans l'ionopause de Vénus, elle est équilibrée par la pression cinétique du plasma ionosphérique.

144. Des mesures du champ magnétique et du plasma effectuées à bord de VENERA-9 et 10 montrent la présence, au voisinage de Vénus, d'une longue queue plasma-magnétique (figure 11) analogue à la magnétoqueue de la Terre. Son diamètre est légèrement plus grand que celui de la planète. La magnétoqueue de Vénus est composée de deux faisceaux de lignes de force de direction opposée; l'orientation de la couche séparant ces faisceaux dépend de la direction du champ magnétique interplanétaire. Immédiatement derrière l'ionosphère nocturne se trouve une région C

d'ombre corpusculaire en forme de cône où les flux d'ions sont nettement plus faibles que dans la couche de transition en aval de l'onde de choc. Le sommet de ce cône se trouve à une distance d'environ cinq rayons vénusiens. Des flux d'électrons dont l'énergie peut aller d'une dizaine à quelques centaines d'eV sont enregistrés à l'intérieur de l'ombre corpusculaire de Vénus. Ils sont variables dans le temps et constituent l'origine principale des flux observés dans l'ionosphère nocturne de Vénus.

145. La figure 12 présente une vue générale de la magnétosphère de Vénus et de l'onde de choc qui est située au-delà. On observe une augmentation rapide de l'intensité du champ magnétique et une diminution des flux de plasma dans la zone de séparation entre la couche de transition et la couche limite magnétosphérique de Vénus, un peu comme pour la magnétosphère terrestre. La figure 12 montre également un système de courants simplifié qui peut produire une répartition du champ magnétique analogue à celle qui est mesurée du côté diurne et du côté nocturne de Vénus.

146. L'existence d'une onde de choc face à la planète Mars a été découverte pour la première fois grâce à des mesures du champ magnétique effectuées par MARINER-4 en 1964. D'autres informations sur la magnétosphère de Mars ont été fournies par MARS-2 et MARS-3 en 1971-1972 et par MARS-5 en 1974. Ces trois engins étaient équipés de magnétomètres et d'instruments de mesure du plasma; aucun d'eux ne s'est approché à moins de 1 100 km de la planète. En outre, les instruments de mesure du plasma et du champ magnétique n'étaient pas branchés à chaque passage au voisinage de la planète et ne fonctionnaient que par intermittence, ce qui limitait la résolution des données dans le temps et dans l'espace. Voilà pourquoi un nombre assez important de problèmes relatifs à la magnétosphère martienne ne sont pas encore résolus.

147. Néanmoins, la limite magnétosphérique de Mars peut être déterminée de la même manière que pour les autres planètes, y compris la Terre, à partir de l'augmentation de l'intensité du champ magnétique et de la diminution des flux de plasma lorsque l'engin spatial pénètre de la couche de transition (en aval de l'onde de choc) dans la magnétosphère elle-même. D'après toutes les traversées enregistrées, on peut conclure que la magnétosphère de Mars a une forme qui ressemble beaucoup à celle de la magnétosphère de la Terre. On peut déduire de la distribution en altitude de la densité d'électrons qu'il n'y a habituellement pas d'ionopause dans l'ionosphère diurne de Mars. Cela donne à penser que l'interaction du vent solaire et de Mars diffère de celle que l'on observe pour Vénus; en effet, l'ionosphère martienne est protégée du vent solaire par le champ magnétique intrinsèque de Mars. La présence d'un tel champ magnétique est confirmée par le fait que le diamètre de la magnétoqueue martienne est de $3,2 R_0$ (3,2 fois le rayon de Mars), soit plus grand que celui de l'ombre optique planétaire ($2 R_0$). Par comparaison, la magnétoqueue de Vénus a un diamètre de $2,2 R_V$.

148. La constatation de la présence de champs magnétiques au voisinage d'une planète ne permet pas de conclure à l'existence d'un champ magnétique planétaire intrinsèque. En effet, dans le cas de Vénus, une structure ressemblant à une magnétosphère se forme avec une magnétoqueue sous l'effet de la circulation de courants dans l'ionosphère entourant la planète. De récentes observations effectuées dans le

cadre de la mission en cours de PIONEER Venus Orbiter nous aideront à comprendre de façon beaucoup plus détaillée l'interaction entre l'ionosphère de Vénus et le vent solaire. On ne connaît pas encore le degré d'ionisation des ions piégés dans l'atmosphère vénusienne; des mesures seront nécessaires pour déterminer l'énergie ainsi que la masse des ions. Plusieurs processus intervenant dans la magnétosphère martienne ne sont pas connus. Un spectromètre mesurant l'énergie et la masse des ions et embarqué à bord d'un engin spatial traversant la magnétoqueue fournirait de nouvelles informations sur l'interaction du vent solaire et de Mars. Pour déterminer avec précision le moment magnétique de Mars, il faut disposer d'un satellite en orbite à basse altitude autour de cette planète et équipé d'un magnétomètre sensible.

4. La magnétosphère de Saturne

149. En septembre 1979, PIONEER-11 a découvert la magnétosphère de Saturne et y a pénétré. Avec son rayon de $60\ 000 \pm 500$ km, Saturne est, pour la taille, la deuxième planète du système solaire. Sa période de rotation est de 10 heures et 14 minutes, et elle tourne autour du Soleil en 29,46 ans. PIONEER Saturn a pris des mesures photométriques et de polarisation de quatre lunes saturniennes (Iapetus, Rhea, Dione et Tethys), et est passé à 356 000 km de Titan. Il a peut-être aussi découvert une lune de Saturne jusque-là inconnue. La Lune de la Terre est située bien au-delà de la magnétosphère terrestre, sur laquelle elle n'a aucun effet. En revanche, de nombreuses lunes de Saturne se trouvent à l'intérieur de la zone de rayonnement piégé; elles absorbent fortement les particules piégées chargées de haute énergie. Ces phénomènes seront étudiés plus avant à partir des observations faites en novembre 1980 par VOYAGER-1.

150. Avant la mission de PIONEER, cinq anneaux de Saturne étaient provisoirement identifiés. C'étaient, en partant de la planète, les anneaux D, C, B, A, et E. PIONEER a découvert deux nouveaux anneaux. L'un d'eux, appelé anneau F, se trouve juste à l'extérieur de l'anneau A. L'espace entre l'anneau F et l'anneau A porte provisoirement le nom de division Pioneer. L'autre nouvel anneau est désigné par la lettre G et se trouve bien au-delà de l'anneau F.

151. Le moment magnétique de Saturne est 530 fois supérieur au moment dipolaire de la Terre. La polarité du champ est l'inverse de celle du champ terrestre. Il s'agit d'un champ largement dipolaire, qui présente un degré étonnamment élevé de symétrie axiale, l'axe dipolaire du champ s'écartant de moins de 1° de l'axe de rotation de Saturne. L'écartement du centre magnétique par rapport au centre de Saturne ne dépasse pas $0,04 R_S$, principalement dans la direction polaire.

152. Le champ magnétique de Saturne a créé une magnétosphère de dimensions intermédiaires entre la magnétosphère de la Terre et celle de Jupiter, avec des intensités de particules piégées comparables à celles de la magnétosphère de la Terre. Saturne a une onde de choc séparée et une magnétopause tout à fait similaires à celles de la Terre. La forme générale de sa magnétosphère est simple et compacte. Ses dimensions sont très sensibles aux changements de la pression dynamique du vent solaire. La magnétosphère extérieure, jusqu'à la magnétopause, à $7,5 R_S$, contient un plasma de faible énergie; son écoulement permet de penser qu'il tourne avec le champ magnétique de Saturne. Les espèces d'ions mesurés dans cette région excluent que le vent solaire ou l'ionosphère saturnienne soit la principale source du plasma

magnétosphérique de Saturne. L'identification provisoire de O^+ et de OH^+ comme étant les ions prédominants indique que les particules de faible énergie sont probablement produites par photodissociation de la glace sur les anneaux ou les lunes de Saturne. Les flux de particules piégées dans la magnétosphère extérieure et leurs distributions angulaires dépendent beaucoup des variations du vent solaire avec le temps.

153. Des anneaux de matière particulaire ainsi que plusieurs petites lunes proches des anneaux influent fortement sur le rayonnement piégé de Saturne. L'atmosphère extérieure est nettement délimitée par une brusque chute des flux tant de protons que d'électrons dans une zone située entre 6,5 et 4 R_S . Cette réduction du flux de particules chargées est attribuée à l'absorption effective de particules par Dione, Tethys, Encelade et l'anneau E. La région intérieure, à moins de 4 R_S , contient des particules de plus haute énergie; les flux de particules et les énergies augmentent en allant vers l'intérieur et le spectre devient beaucoup plus dur et plus complexe. Des données sur l'absorption de particules au voisinage de 2,5 R_S et des images obtenues à l'aide d'un photopolarimètre indiquent l'existence d'une petite lune de Saturne d'un diamètre d'environ 200 km. A une distance inférieure à 2,3 R_S , correspondant au bord extérieur de l'anneau A, on observe une brusque disparition de toute espèce de particule piégée. Une absence presque complète de particules de la ceinture de rayonnement dans les tubes de flux magnétique interceptés par les anneaux de Saturne laisse une région protégée près de la planète. C'est cette protection qui empêche la formation d'intensités d'électrons à plus basse altitude, dont la présence aurait fait de Saturne une puissante radiosource observable de la Terre.

154. Les observations de l'occultation des ondes radio en provenance de Saturne indiquent que cette planète a une ionosphère composée, dans ses régions supérieures, d'hydrogène atomique ionisé dont la température est d'environ 1 250 K. Cette ionosphère présente deux pics de densité d'électrons, l'un à 2 800 km et l'autre à 2 200 km.

155. Après sa rencontre avec Saturne, PIONEER Saturn a quitté le système solaire, en prenant la direction dans laquelle ce système se déplace par rapport aux étoiles les plus proches situées dans notre galaxie. D'autres engins spatiaux suivent la voie tracée par PIONEER Saturn. VOYAGER-1 est passé près de Jupiter en mars 1979 et de Saturne en novembre 1980. VOYAGER-2 est aussi passé au voisinage de Jupiter et survolera Saturne en août 1981, pour poursuivre éventuellement son voyage vers Uranus, qu'il devrait atteindre en 1986.

F. Perspectives et projets

Introduction

156. Les paragraphes qui précèdent présentent, tant pour l'environnement plasmique de la Terre que pour le système solaire, une image remarquablement différente de celle qui aurait été donnée il y a moins d'un quart de siècle. Alors que l'on imaginait que l'espace extra-atmosphérique était vide, on constate aujourd'hui que l'ensemble du système solaire est rempli d'une atmosphère raréfiée de gaz entièrement ionisé (plasma) s'éloignant du Soleil à des vitesses pouvant atteindre

plusieurs centaines de km/s; il s'agit du vent solaire, omniprésent. En outre, l'interaction du plasma du vent solaire avec les environnements planétaires produit pour chaque planète un mélange unique de plasma turbulent et de particules énergétiques : une magnétosphère. Les dimensions respectives des magnétosphères planétaires connues sont illustrées sur la figure 13. L'évolution formidable de notre perception des environnements planétaires apparaît sur la figure 13, où l'on peut constater, par exemple, que la magnétosphère de Jupiter a bien 10 fois la taille du Soleil.

157. La prise de conscience qu'il existe partout dans l'univers des environnements plasmiques analogues et que le gros de la matière présente dans l'univers est à l'état de plasma a eu pour conséquence directe que les travaux sur le plasma du système solaire pouvaient désormais servir à élucider les mystères du cosmos et de la place de l'homme dans celui-ci. La figure 13 montre aussi deux exemples d'objets cosmiques auxquels l'on a appliqué des concepts magnétosphériques pour expliquer certaines de leurs caractéristiques observables.

158. Au cours des 23 années qui se sont écoulées depuis le début de l'ère spatiale, le domaine des plasmas du système solaire a évolué : on est passé d'une période de découverte et d'exploration à la création d'une importante branche de la science, consacrée à l'étude de problèmes scientifiques fondamentaux dans des domaines allant de la physique de laboratoire à l'astrophysique à grande échelle. Que va-t-on faire maintenant? Y a-t-il des avantages pratiques à poursuivre les recherches dans ces domaines? Le meilleur moyen d'illustrer les réponses à ces questions consiste à examiner un sous-ensemble des travaux sur les plasmas du système solaire, à savoir l'étude des relations entre le Soleil et la Terre. C'est dans le domaine de ces relations que l'on peut envisager des retombées pour la société, alors que les résultats des recherches s'appliquent aux plasmas du système solaire en général.

1. Physique des relations Soleil-Terre

159. Le flux d'énergie contenu dans le vent solaire calme, d'une densité de 5×10^6 particules/m³ et d'une vitesse de 300 km/s, est assez faible (seulement 0,1 mW/m²). Cette valeur augmente très fortement pour les courants solaires rapides, pour lesquels on peut enregistrer jusqu'à 3 mW/m². Une des propriétés intéressantes de ce flux d'énergie est qu'il illumine une région beaucoup plus vaste que la superficie de la Terre, puisque la taille de la cavité magnétosphérique, vue du Soleil, est de l'ordre de 200 fois celle d'une section terrestre. Manifestement, l'énergie du vent solaire reçue n'est pas entièrement transférée à la magnétosphère de la Terre; le facteur de transmission est même assez faible (quelques pour cent au plus) et, en fait, mal connu. Toutefois, deux facteurs jouent un rôle important dans l'amplification des effets de cette petite quantité d'énergie captée par la Terre.

a) Comme l'énergie s'accumule pendant un certain temps (quelques heures) dans la queue de la magnétosphère avant d'être brusquement libérée en un temps relatif court (une fraction d'heure), la quantité d'énergie disponible dans l'atmosphère est plus grande qu'elle ne le serait autrement.

b) La libération d'énergie est concentrée principalement dans des régions étroites, en latitude, de la surface terrestre : les zones aurorales, dont la superficie est de l'ordre de 1 p. 100 de la superficie totale de la Terre.

160. En conséquence, le flux d'énergie peut prendre des valeurs non négligeables (de 10 à 100 mW/m², soit environ 10⁻⁵ à 10⁻⁴ de la constante solaire, qui est de 1,37 kW/m²). Comme les aurores se produisent du côté nocturne de la Terre, où il n'y a pas d'apport d'énergie fournie par le rayonnement solaire, cette arrivée brusque et localisée d'énergie dans l'atmosphère pendant des sous-orages magnétosphériques provoque un fort réchauffement de l'atmosphère à une altitude d'environ 100 km dans les hautes latitudes. Des événements de ce genre prennent de l'ampleur environ deux à trois jours après les perturbations solaires qui les provoquent, car la durée de propagation entre le Soleil et la Terre est de trois jours pour des particules se déplaçant à environ 500 km/s. En liaison avec la précipitation de particules chargées prend naissance un système de forts courants ionosphériques, circulant à des altitudes situées entre 100 et 150 km. C'est l'électrojet auroral, dont l'intensité peut atteindre des millions d'ampères. Ces courants produisent de fortes perturbations magnétiques, facilement décelables au sol, principalement à des latitudes élevées. Par induction, il se crée dans la croûte terrestre, compte tenu de sa résistivité, de fortes différences de potentiel (jusqu'à 5 V/km). Cela peut avoir de dangereuses conséquences pour les systèmes conducteurs artificiels de grande dimension, comme les pipelines, les lignes à haute tension et les câbles téléphoniques, et peut perturber les relevés géologiques. Les effets des orages géomagnétiques sur les réseaux de distribution d'électricité sont très spectaculaires. Des orages violents (mars 1940, février 1958, mai 1969, août 1972) ont endommagé des postes de transformation et ont causé des pannes d'électricité dans le nord-est des Etats-Unis. Comme les transformateurs de puissance sont mis à la terre, des courants continus de très forte intensité (jusqu'à 100 ampères) peuvent circuler dans les enroulements et induire ainsi, dans les noyaux, une saturation sur une demi-période, ce qui entraîne une chute de tension (pouvant aller jusqu'à 50 p. 100). Un échauffement, suivi de la destruction des isolateurs, peut aussi amener à déconnecter des transformateurs du réseau d'alimentation. Tous ces effets ont été évalués scientifiquement et techniquement. Il semble que des améliorations technologiques, une bonne formation des opérateurs et une surveillance géomagnétique continue devraient permettre de résoudre ces problèmes.

161. On multiplie les relevés géologiques magnétiques (à partir du sol, d'aéronefs ou de navires) pour découvrir les anomalies magnétiques des roches sous-jacentes, indiquant la présence de pétrole et de minerai. Comme les courants induits dans la Terre influent sur ces relevés, et que ceux-ci coûtent cher, il est indispensable de bien comprendre les conditions géomagnétiques ambiantes lorsqu'une campagne de relevés est en cours. Pour des travaux de ce genre, il importe d'améliorer les prévisions de l'activité magnétique.

2. Expériences contrôlées et pollution de l'environnement

162. Pour mieux comprendre les processus d'échange de masse, d'énergie et de quantité de mouvement entre les différentes régions de l'environnement terrestre, on procède de plus en plus fréquemment à des expériences "contrôlées" ou "actives". Ces expériences consistent à injecter dans des régions précises de la magnétosphère

un stimulus connu, dont les caractéristiques peuvent varier et dont les effets sont soigneusement enregistrés. Les stimuli peuvent être des ondes envoyées par de puissants émetteurs radio au sol ou spatiaux. Ces émetteurs peuvent être très puissants (jusqu'à 2 MW au sol et 15 kW dans l'espace) et leur fréquence peut aller des très basses fréquences (3 à 30 kHz) aux hautes fréquences (3 à 30 MHz).

163. Des faisceaux d'électrons ou d'ions (d'une intensité allant jusqu'à un ampère, avec une différence de potentiel allant jusqu'à environ 40 kV) peuvent être injectés dans la magnétosphère à l'aide de canons à particules chargées embarqués à bord de fusées ou de satellites. On peut aussi injecter dans l'ionosphère ou dans la magnétosphère de grandes quantités de constituants naturels, comme l'eau, ou d'espèces "exotiques" telles que le baryum, le lithium ou le xénon. Bon nombre des expériences effectuées dans ce domaine ont apporté des renseignements intéressants sur les processus de base se déroulant dans l'environnement terrestre. Un groupe d'étude a été créé sous les auspices du COSPAR pour étudier les conséquences d'activités spatiales pouvant avoir des effets nuisibles sur l'environnement (PEDAS).

164. Il importe de prendre conscience que, en produisant et en libérant de grandes quantités d'énergie électrique, nous perturbons déjà, involontairement, notre environnement magnétosphérique. Des harmoniques - pouvant atteindre 3 à 5 kHz - d'ondes de 50 ou 60 Hz rayonnées par des lignes à haute tension peuvent être décelées dans l'ensemble de la magnétosphère, et en particulier dans les lignes de force du champ géomagnétique connectées aux pays les plus industrialisés. Ce genre de rayonnement peut contribuer à déclencher des émissions de très basse fréquence et à causer la précipitation de particules chargées, et donc aussi à modifier le contenu de la ceinture de rayonnement. Il est urgent d'examiner sérieusement quels sont les effets à court et à long terme des activités humaines dans les domaines scientifique et industriel, sans parler du domaine militaire, sur notre environnement.

3. L'activité solaire et le temps

165. Diverses observations semblent indiquer qu'il existe un lien entre le vent solaire et la troposphère, même si de nombreux scientifiques doutent que ce soit le cas. Par exemple, un certain nombre de paramètres liés aux conditions météorologiques et au climat présenteraient une périodicité de 11 ou 22 ans, ce qui fait penser au cycle solaire. A des échelles temporelles plus courtes, des études statistiques ont révélé une réduction de 10 p. 100 de l'indice de tourbillon régional, ce qui témoigne d'une activité cyclonique bien développée dans la troposphère un jour après le franchissement par la Terre d'une limite de secteur, lorsque l'orientation, vers le Soleil ou dans le sens opposé, de la composante radiale du champ magnétique interplanétaire s'inverse. L'exactitude des prévisions météorologiques, dans lesquelles il n'est pas tenu compte de cette variation du tourbillon, semble moindre après le franchissement d'une limite de secteur. En outre, on a constaté que le champ électrique vertical et le courant air-terre traversant l'atmosphère, mesurés sur une montagne à 3 km au-dessus du niveau de la mer, augmentaient de plus de 20 p. 100 pendant les deux jours qui suivent le franchissement d'une limite de secteur de vent solaire par la Terre.

166. On ne sait pas s'il y a vraiment un lien entre les événements se produisant sur le Soleil et le climat de la Terre, ni si un tel lien, en admettant qu'il existe, est le fait du rayonnement électromagnétique solaire, du vent solaire, des rayons cosmiques galactiques ou de l'électricité atmosphérique. Le rythme des travaux menés dans ce domaine s'est accéléré ces dernières années, vu l'intérêt croissant attaché à la recherche climatologique. Une période de recherche multidisciplinaire coordonnée, en physique solaire et dans les sciences de la magnétosphère, de l'ionosphère et de l'atmosphère, est nécessaire pour approfondir les connaissances dans ce domaine. Il faut aussi chercher à trouver des mécanismes physiques quantitativement satisfaisants.

4. Avenir de la physique du système Soleil-Terre

167. Certains des processus qui interviennent dans les modifications du système Soleil-Terre et qui peuvent avoir une incidence non négligeable sur l'environnement immédiat de l'homme ont été mentionnés précédemment. En fait, il est heureux que la physique du système Soleil-Terre constitue désormais un champ de recherche bien développé, portant à la fois sur le Soleil, l'espace interplanétaire, la magnétosphère, l'ionosphère et l'atmosphère. Les recherches sur les diverses composantes du système Soleil-Terre font apparaître une étroite interdépendance entre ces composantes et montrent que la compréhension de l'ensemble du système exige un programme coordonné d'observations et d'études théoriques portant simultanément sur chacun des éléments clefs de cet ensemble. Cette constatation a permis non seulement de déterminer les principales questions à élucider pour comprendre le comportement du système Soleil-Terre, mais aussi d'identifier les domaines dans lesquels on peut prévoir des applications directement profitables à des systèmes utilisés par la société.

168. Jusqu'à une date récente, l'environnement Soleil-Terre avait été exploré et étudié en tant que système composé de parties indépendantes - le Soleil, la région interplanétaire, la magnétosphère, l'ionosphère et l'atmosphère supérieure. On sait maintenant que cet environnement est un système complexe formé de parties étroitement interdépendantes dont le comportement global diffère nettement de ce que donnerait simplement la somme linéaire des comportements de chacune de ces parties. Alors que les programmes précédents ont fait progresser la connaissance de chacune d'elles, il faut, pour comprendre l'environnement Soleil-Terre dans son ensemble, arrêter un programme d'observations simultanées et d'études théoriques visant à évaluer globalement la production, le transfert, le stockage et la dissipation d'énergie dans ce système. C'est la connaissance que l'on a acquise des diverses composantes du système Soleil-Terre, ainsi que le fait tant attendu de disposer des instruments nécessaires, qui ont permis de définir et de planifier une étude détaillée et quantitative de l'environnement Soleil-Terre.

169. L'objectif final du programme de recherches sur le système Soleil-Terre est de construire des modèles physiques de ce système permettant de prévoir les relations de cause à effet. Les premiers objectifs de ce programme sont les suivants :

a) Suivre le flux de matière et d'énergie à travers le système depuis le Soleil jusqu'au dépôt dans l'atmosphère;

b) Comprendre comment s'articulent les diverses parties du système Soleil-Terre, étroitement couplé et très variable dans le temps;

c) Comprendre les processus physiques déterminant les origines, l'entrée, le transport, le stockage, l'accélération et la perte de plasma dans le système Soleil-Terre;

d) Evaluer l'importance qu'ont, pour l'environnement terrestre, des variations du dépôt d'énergie dans l'atmosphère provoquées par des processus plasmiques du système Soleil-Terre.

170. Parmi les éléments clefs pour comprendre le système Soleil-Terre figurent l'observation et l'étude simultanées de ses diverses composantes. Cela nécessite un programme coordonné d'observations au sol et in situ, en liaison étroite avec des recherches théoriques et un travail de modélisation. Puisque de nombreux pays mettent actuellement au point leurs programmes d'études du système Soleil-Terre pour la période 1985-1995, il est nécessaire de poursuivre l'excellente coopération internationale qui s'est établie dans ce domaine, en vue d'atteindre les objectifs fixés, qui, bien qu'ambitieux, sont à notre portée.

171. Aujourd'hui, des systèmes sociaux technologiquement complexes forcent l'homme à élargir son horizon environnemental, qui ne se situe plus dans la basse atmosphère terrestre, mais atteint la surface du Soleil. Les vents et les orages qui se déchaînent dans les plasmas et les champs magnétiques présents du sommet de notre atmosphère jusqu'à la surface du Soleil ont sur l'homme des effets qui, à eux seuls, peuvent être aussi dangereux que les orages atmosphériques terrestres.

172. La vaste gamme des variations du système Soleil-Terre peut produire des effets dans toute une série de domaines, notamment les communications, les transports, l'énergie, les systèmes spatiaux, l'exploration géophysique, la navigation et, même, le temps et le climat. Des orages magnétiques ont provoqué d'importantes pannes de courant dans des villes et des régions des Etats-Unis et du Canada. Ces mêmes orages magnétiques peuvent raccourcir la durée de vie prévue des transformateurs alimentant en énergie les villes et les usines. L'exploration géophysique est entravée pendant ces orages. Des liaisons radio vitales sont détruites par des orages solaires ou magnétosphériques. De fortes éruptions solaires peuvent créer des risques notables d'irradiation tant pour les astronautes que pour les passagers des avions commerciaux. Pendant les éruptions solaires d'août 1972, l'équipage et les passagers d'un vol polaire pourraient avoir reçu une dose supérieure au niveau minimum fixé par la réglementation américaine et à celui qui aurait été atteint lors de l'accident du réacteur nucléaire de Three Mile Island. L'activité solaire a aussi une incidence directe sur notre haute atmosphère; non seulement elle affecte les missions spatiales et les télécommunications, mais elle peut aussi avoir des effets sur le temps et le climat de la Terre.

173. On ne connaît pas les incidences des relations Soleil-Terre sur les futurs systèmes terrestres. On ne sait pas non plus si les indices du système Soleil-Terre peuvent être utilisés pour améliorer les prévisions météorologiques et climatiques. Il faut donc mieux connaître la physique de ce système. Un programme international d'étude visant à mieux comprendre l'environnement Soleil-Terre apportera aux services relevant de cet environnement d'importantes améliorations, qui devraient être très bénéfiques pour l'homme, où qu'il se trouve.