

I N S T I T U T D ' A E R O N O M I E S P A T I A L E D E B E L G I O U E

3 - Avenue Circulaire

B - 1180 BRUXELLES

AERONOMICA ACTA

A - N° 230 - 1981

La magnétosphère terrestre, laboratoire naturel
pour l'étude des plasmas

par

M. ROTH

B E L G I S C H I N S T I T U U T V O O R R U I M T E - A E R O N O M I E

3 - Ringlaan

B - 1180 BRUSSEL

AVANT-PROPOS

L'article "La magnétosphère terrestre, laboratoire naturel pour l'étude des plasmas" est le compte rendu de la conférence que l'auteur a donnée au Cercle Astronomique de Tournai, le 21 novembre 1980. Il sera publié dans la revue Albedo.

VOORWOORD

Het artikel : "La magnétosphère terrestre, laboratoire naturel pour l'étude des plasmas" is het verslag van een voordracht gegeven door de auteur op 21 november 1980, in de "Cercle Astronomique de Tournai". Het zal gepubliceerd worden in Albedo.

FOREWORD

The paper entitled "La magnétosphère terrestre, laboratoire naturel pour l'étude des plasmas" is the report of a lecture given by the author at the "Cercle Astronomique de Tournai", on November 21st, 1980. It will be published in Albedo.

VORWORT

Das Artikel : "La magnétosphère terrestre, laboratoire naturel pour l'étude des plasmas" ist der Text einen Vortrages der im "Cercle Astronomique de Tournai" am 21 November 1980 gegeben worden ist. Dieser Text wird in Albedo herausgegeben werden.

LA MAGNETOSPHERE TERRESTRE, LABORATOIRE NATUREL POUR
L'ETUDE DES PLASMAS

par

M. ROTH

Institut d'Aéronomie Spatiale de Belgique
3, Avenue Circulaire
B-1180 Bruxelles

Résumé

Les plasmas sont très répandus dans l'Univers. Ainsi, on les rencontre dans les étoiles, les espaces interstellaires et interplanétaires ou encore dans certaines atmosphères de planètes. Il en est ainsi du plasma de la magnétosphère terrestre, peuplé essentiellement d'électrons et de protons aux caractéristiques multiples. Au-delà des couches ionosphériques de la haute atmosphère d'où il est issu, cet immense plasma naturel est confiné dans cette partie de l'espace contrôlée entièrement par le champ géomagnétique.

Dans le milieu interplanétaire, la magnétosphère tout entière baigne dans le plasma du vent solaire, constituant pour ce dernier un obstacle presque impénétrable, empêchant ainsi l'entrée directe dans la haute atmosphère d'un flux de particules chargées, dont la température atteint quelques centaines de milliers de degrés.

Grâce au développement spectaculaire des techniques spatiales, la structure et les propriétés générales de la magnétosphère terrestre commencent maintenant à être connues. Ainsi, outre son intérêt purement géophysique, le plasma magnétosphérique offre-t-il un intérêt plus pragmatique, puisqu'il apparaît semblable aux plasmas qui permettront un jour de contrôler la fusion thermonucléaire.

Samenvatting

Plasma is zeer verspreid in het Heelal. Het is aanwezig in de sterren, in de atmosfeer van sommige planeten, en ook in de ruimten tussen de sterren en tussen de planeten. Zo is er ook een plasma aanwezig in de aardmagnetosfeer. Het bestaat voornamelijk uit elektronen en protonen en heeft talrijke bekende eigenschappen. Dit enorm natuurlijk plasma is afkomstig van de ionosferische lagen van de hogere atmosfeer en bevindt zich, onder de invloed van het magnetisch veld van de aarde, in een beperkt gebied van de ruimte.

In het interplanetair milieu, baadt de ganse magnetosfeer in het plasma van de zonnwind. Daar de magnetosfeer een bijna niet te doordringen hindernis betekent voor de zonnwind, wordt op die manier het binnendringen van een flux van geladen deeltjes, waarvan de temperatuur enkele honderdduizenden graden bedraagt, verhinderd.

Dank zij de spectaculaire ontwikkeling van de ruimtetechnologie, begint men nu de algemene eigenschappen van de aardmagnetosfeer te kennen. Buiten het louter geofysisch belang, heeft het magnetosferisch plasma ook een meer pragmatisch belang omdat het lijkt op het plasma dat ooit de thermonucleaire fusie zal controleren.

Abstract

Plasma is frequently encountered in the Universe. It is found in stars, in instellar and interplanetary spaces, but also in the atmosphere of certain planets, for instance, in the Earth's magnetosphere. This terrestrial plasma mainly contains electrons and protons with multiple characteristics. Beyond the ionospheric layers of the upper atmosphere from which it originates, this huge natural plasma is confined to that part of space which is entirely under the control of the geomagnetic field.

In the interplanetary medium, the whole magnetosphere bathes in the solar wind plasma. It then acts like a nearly impenetrable obstruction, thereby hindering the direct entry into the upper atmosphere of a flux of charged particles whose temperature reaches several hundredthousands of degrees.

Because of the spectacular development of space technics we start knowing more about the structure and the general properties of the terrestrial magnetosphere. Besides its purely geophysical aspect, the magnetospheric plasma also has a more pragmatic interest. Indeed, it has the same properties as those plasmas which in the future will allow the control of thermonuclear fusion.

Zusammenfassung

Plasmas sind zahlreich im Weltall. Man findet sie in die Sterne, im interstellaren und interplanetaren Weltraum sowie in verschiedene Planetenatmosphären. So ist es auch mit der Erdmagnetosphäre die mit Elektronen und Protonen gefüllt ist. Dieses magnetosphärisches Plasma ist in das Geomagnetische Feld eingeschlossen.

Die Magnetosphäre ist ganz in dem Sonnen Wind Plasma eingeschlossen.

Die Struktur und Eigenschaften der Erdmagnetosphäre sind nun einigermaßen bekannt. Ausserdem seine geophysikalische Interesse, hat das magnetospherische Plasma auch eine pragmatische Interesse für thermonucleare Fusion.

Aux portes de la magnétosphère se trouve d'abord l'ionosphère

Aux très hautes altitudes, l'atmosphère terrestre devient de plus en plus ionisée et forme autour de la Terre une couche concentrique, conductrice de l'électricité. A cause de sa forme plus ou moins sphérique, cette couche est connue sous le nom d'ionosphère. Cette ionisation de la haute atmosphère devient significative à partir d'une altitude d'environ 60 km. En effet, à partir de cette altitude, la raréfaction de l'air restreint de plus en plus le nombre de chocs entre les particules de l'atmosphère résiduel, empêchant ainsi la recombinaison des espèces ionisées, formées sous l'influence croissante du rayonnement solaire de courte longueur d'onde.

L'existence de cette région ionisée, conductrice de l'électricité, fut reconnue expérimentalement dès 1901 lorsque Marconi établit la première liaison radioélectrique entre Poldhu en Cornouailles et Saint-Jean de Terre-Neuve. Ce fut Appleton qui, en 1927, établit définitivement une théorie complète de la propagation des ondes électromagnétiques dans un milieu ionisé. Grâce à cette théorie, l'étude physique de l'ionosphère terrestre pouvait commencer, et l'on mis ainsi rapidement en évidence l'existence de couches ionosphériques distinctes : la couche D vers 80 km, la couche E vers 100 km et la couche F, à partir de 300 km. Ces différentes couches se caractérisent entre elles par une ionisation croissante, depuis 5000 électrons par cm^3 dans la couche D jusqu'à 1 000 000 d'électrons par cm^3 dans la couche F. Cependant, elles sont soumises à diverses variations liées à la distance zénithale du Soleil : variations journalière, saisonnière et géographique ou liées à l'activité undécennale solaire.

Le champ magnétique terrestre contrôle également l'état d'ionisation de la haute atmosphère. En effet, les couches supérieures de la région F présentent une distribution d'ionisation dépendant du lieu d'observation et liée aux variations spatiales du champ géomagnétique.

Le comportement de l'ionosphère supérieure ne peut en fait être expliqué dans le cadre habituel de la théorie cinétique des gaz, mais doit être envisagé dans le contexte d'une théorie plus générale tenant compte de la présence d'un champ magnétique au sein d'un ensemble de particules chargées où les chocs sont peu nombreux.

Ainsi, au-delà d'une certaine altitude critique, la fréquence des chocs entre les particules chargées de l'ionosphère est si faible que ces particules peuvent parcourir de grandes distances sans subir de nouvelles collisions. Les mouvements des particules sont alors déterminés uniquement par les champs gravifique et magnétique terrestres et éventuellement par la présence de champs électriques. Ce niveau critique au-delà duquel les collisions entre particules chargées sont négligeables, se situe à une altitude variant entre 2000 et 3000 km et constitue ce que l'on appelle l'exobase ionique.

L'exobase ionique délimite la frontière d'une nouvelle région de l'environnement terrestre : la magnétosphère

Comme le champ magnétique restreint les possibilités de mouvement des particules chargées issues de l'exobase en les contraignant à s'enrouler autour de ses lignes de force, on conçoit aisément que ces ions et ces électrons soient en quelque sorte piégés dans le champ magnétique terrestre et qu'ils soient ainsi capables de remplir l'espace contrôlé par ce champ. C'est en étudiant la propagation d'ondes radio-électriques de très basse fréquence que Storey montra, en 1953, que la concentration des électrons atteignait effectivement des valeurs élevées, de l'ordre de 500 particules par cm^3 , à des distances aussi éloignées du centre de la Terre que trois rayons terrestres, dans le plan équatorial. Ces valeurs s'avéraient supérieures à celles prévues par la loi de Pascal de l'équilibre barométrique pour laquelle la décroissance devait être

exponentielle au-delà du maximum d'ionisation, vers 300 km d'altitude. Ce résultat montrait, pour la première fois, l'existence d'une nouvelle région de l'environnement spatial de la Terre, à l'intérieur de laquelle les particules chargées issues de l'ionosphère n'obéissaient plus aux lois de la théorie classique des gaz soumis aux collisions, mais se comportaient essentiellement comme un plasma baignant au sein du champ géomagnétique. On désigne cette région sous le nom de magnétosphère. Elle correspond à l'espace entourant notre planète, dont la limite inférieure est l'exobase ionique et qui s'étend jusqu'au plus profond des zones contrôlées par le champ magnétique terrestre. Le plasma magnétosphérique est formé principalement d'hydrogène ionisé, d'origine ionosphérique.

L'état plasma est universellement répandu

Pour simplifier, un plasma est un milieu qui contient, outre des particules neutres, des particules chargées d'électricité, à l'état libre. A l'échelle macroscopique, un plasma est un ensemble électriquement neutre, puisque, dans un volume donné, la charge totale d'électricité négative compense exactement la charge totale d'électricité positive.

En astrophysique et en géophysique, l'état plasma est fréquemment rencontré. Que l'on pense par exemple aux plasmas cosmiques remplissant les espaces interplanétaires et interstellaires ou encore aux magnétosphères de certaines planètes. Même dans la vie courante, les plasmas sont présents. Ainsi, on observe leurs propriétés dans certains solides, comme les métaux et les semi-conducteurs ou même dans certains liquides, comme les électrolytes. Tous ces matériaux possèdent en effet des électrons à l'état libre. Cependant, c'est sous forme de gaz ionisés qu'ils se manifestent le plus spectaculairement à nos yeux : par exemple, dans les flammes, les éclairs atmosphériques ou encore les tubes fluorescents et les arcs électriques.

C'est d'ailleurs grâce à l'étude déjà ancienne des décharges électriques dans les gaz qu'on a obtenu les premiers plasmas de laboratoire. Ceux-ci étaient réalisés en bombardant les molécules d'un gaz par des électrons énergétiques, préalablement accélérés par un champ électrique. Dans ce cas, l'ionisation se produisait lors des chocs entre ces électrons et les molécules du gaz considéré.

Les mécanismes physiques d'apparition d'une aurore et d'une décharge lumineuse dans un gaz sont identiques

Le phénomène lumineux qui accompagne une décharge électrique dans un gaz est bien connu. En effet, lorsque des électrons énergétiques bombardent un gaz suffisamment dense, les molécules de ce gaz sont excitées, c'est-à-dire qu'elles sont portées à un niveau d'énergie supérieure. En revenant à leur état fondamental, ces molécules émettent une radiation lumineuse dont la fréquence est bien déterminée. D'après la loi de Planck, cette fréquence est en effet directement proportionnelle à la différence d'énergie entre l'état excité et l'état fondamental.

Mais l'Homme n'a cependant pas dû attendre l'ère de la physique moderne pour observer les décharges électriques dans les gaz. Il les observait depuis longtemps, sans en comprendre le mécanisme, lorsqu'il contemplait ses étranges lueurs se détachant sur le fond du ciel nocturne : les aurores polaires. La plus ancienne observation connue d'aurore remonte à 503 avant Jésus-Christ et y est décrite "analogue à des lances enflammées apparaissant dans un ciel de feu".

Le mécanisme physique lié à la naissance d'une aurore est en fait identique à celui de l'apparition du phénomène lumineux qui accompagne une décharge électrique dans un gaz. L'aurore se manifeste en effet dans la haute atmosphère polaire et la décharge électrique responsable de l'émission lumineuse est produite par des particules chargées issues du Soleil et "spiralant" le long des lignes de force du champ magnétique

terrestre. Le long de ces lignes de force, ces particules chargées, essentiellement des électrons, sont accélérées par d'intenses champs électriques et acquièrent suffisamment d'énergie pour ioniser et exciter les atomes ou les molécules de la haute atmosphère. A une altitude comprise entre 100 et 150 km, la coloration la plus fréquente des aurores correspond alors à la raie verte du spectre d'émission de l'atome d'oxygène, à une longueur d'onde égale à 5577 Å.

La distribution spatiale des aurores reflète la structure générale de la magnétosphère

A un instant donné de la rotation de la Terre sur elle-même, les maxima d'apparition des aurores se répartissent dans deux régions en forme d'anneaux entourant les pôles géomagnétiques Nord et Sud. Lorsque la Terre tourne sur elle-même, ces régions, que l'on appelle les ovales auroraux, restent fixes par rapport au plan passant par la ligne des pôles et par l'axe Terre-Soleil*. Les ovales, excentrés par rapport au pôle géomagnétique, ne restent donc pas fixes dans un système de coordonnées géographiques. Lorsque la Terre tourne sur elle-même, la latitude géomagnétique d'un point quelconque de l'ovale auroral varie continûment, depuis environ 75° du côté diurne, vers midi de temps local, jusqu'environ 67° du côté nocturne, vers minuit de temps local. De plus, les ovales auroraux se rapprochent des pôles magnétiques en période de faible activité solaire, mais, par contre, se déplacent vers l'équateur lorsque l'activité solaire est maximale (l'activité solaire est

* En première approximation, car, comme nous le verrons par la suite, la forme et la structure de la magnétosphère (et donc celles des ovales auroraux) dépendent aussi des propriétés du vent solaire (elles-mêmes contrôlées par l'activité du Soleil)

une fonction croissante du nombre de taches à la surface du Soleil). C'est pourquoi, en période de forte activité solaire, il est parfois possible d'observer des aurores à nos latitudes.

Il semble donc, d'après ce qui précède, qu'il existe une relation entre l'apparition des aurores et le magnétisme terrestre. Cette relation est connue depuis près de deux siècles. En effet, le physicien et astronome suédois Celsius, à qui l'on doit l'échelle thermométrique qui porte son nom, avait déjà noté, en 1741, que l'aiguille aimantée d'une boussole était soumise à des variations brusques qui coïncidaient avec l'apparition des aurores. Nous savons aujourd'hui que cette perturbation du champ magnétique terrestre est liée à l'existence de courants électriques très intenses, les électrojets auroraux, concentrés le long du bord externe de l'ovale auroral. Ces courants électriques, pouvant atteindre plusieurs millions d'ampères, ne circulent pas seulement dans l'ionosphère, mais également le long de lignes de force du champ magnétique terrestre formant transition entre deux régions distinctes de la magnétosphère terrestre. Celles-ci sont définies à la figure 1 : la première de ces régions correspond à la magnétosphère interne, où les lignes de force du champ géomagnétique se referment sur elles-mêmes, tandis que la seconde de ces régions représente la magnétosphère externe, où les lignes de force s'étendent très loin dans la direction antisolaire. L'ovale auroral a donc une signification précise : c'est la projection dans l'atmosphère de la zone de transition entre ces deux régions de la magnétosphère.

En fait, les aurores et les courants électriques qui les accompagnent sont le résultat de l'injection de particules chargées d'origine solaire à l'intérieur de la magnétosphère externe. La haute atmosphère sert donc en quelque sorte d'écran sur lequel ces particules chargées projettent l'image de ce qui se passe entre la Terre et le Soleil.

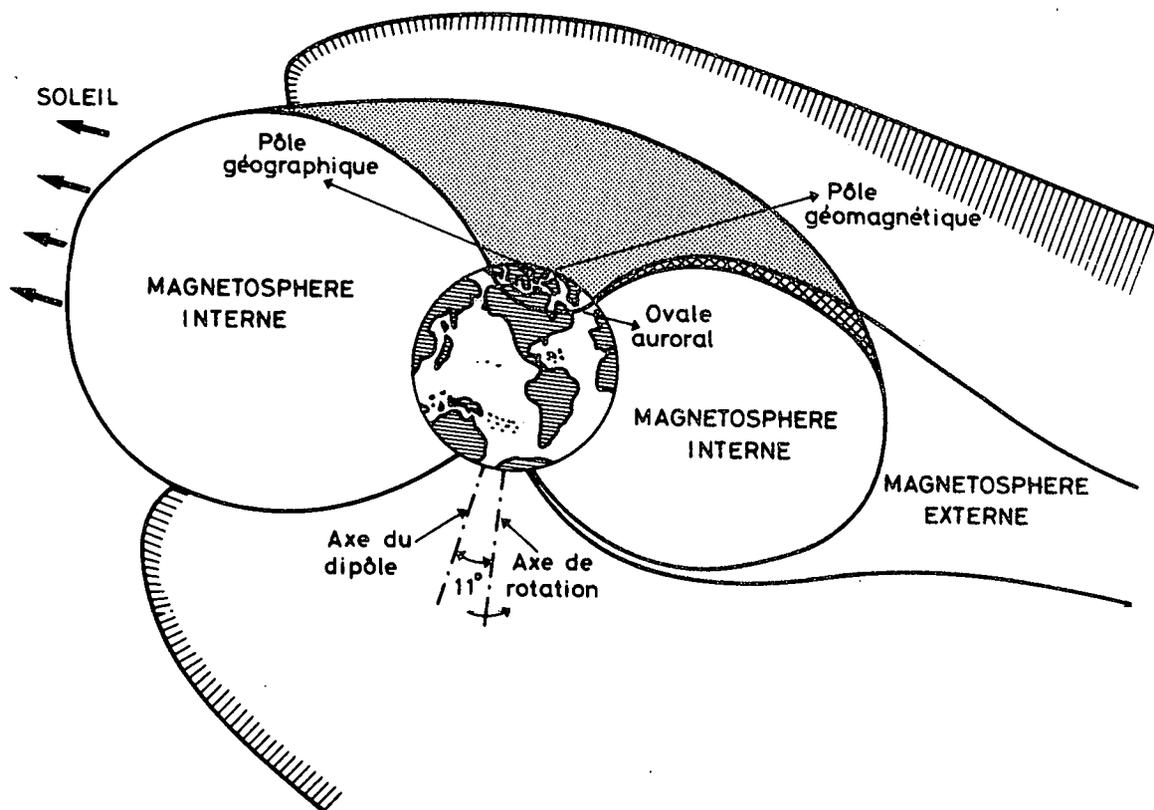


Fig. 1.- Dans chaque hémisphère, l'ovale auroral définit la distribution des aurores à un instant donné. Les ovales restent fixes par rapport au plan s'appuyant sur l'axe Terre-Soleil et sur l'axe du dipôle magnétique terrestre. Par contre, comme l'axe de rotation de la Terre est incliné de 11° par rapport à l'axe du dipôle, les ovales ne restent pas fixes dans un système de coordonnées géographiques, la latitude de leur position variant continûment au cours de la rotation terrestre. Les ovales auroraux sont les projections dans la haute atmosphère de la zone de transition entre deux régions distinctes de la magnétosphère : la première est la magnétosphère interne où le champ magnétique terrestre reste à peu près dipolaire jusqu'à des distances équatoriales de l'ordre de 4 à 6 rayons terrestres du centre de la Terre; la seconde est la magnétosphère externe où le champ magnétique s'écarte très fort d'une structure dipolaire. Dans la première région, les lignes de force sont fermées, tandis que dans la seconde région, elles s'étirent très loin dans la queue magnétosphérique, sur une distance supérieure à trois millions de kilomètres.

En réalité, l'énergie responsable de l'activité aurorale provient du vent solaire. Celui-ci est un plasma chaud, très peu dense, constitué essentiellement d'hydrogène ionisé. Il souffle radialement du Soleil, de façon continue, à une vitesse supersonique. Au niveau de l'orbite terrestre et en période de calme solaire, sa vitesse est proche de 325 km/s, sa température électronique, voisine de $1,5 \times 10^5$ K, et sa concentration (électronique ou ionique), de l'ordre de 10 particules par cm^3 . Une partie de l'énergie cinétique transportée par le vent solaire est toujours communiquée à la magnétosphère et entretient l'activité aurorale. L'ovale auroral est donc toujours soumis à un bombardement continu de particules chargées, même en période de faible activité géomagnétique (mesurée par les variations du champ magnétique au niveau du sol). Dans ce cas, la puissance du bombardement reste néanmoins trop faible pour provoquer l'apparition d'une aurore visible. L'activité aurorale ne s'intensifie que lorsque le vent solaire montre une propension plus grande à communiquer son énergie à la magnétosphère. Celle-ci subit alors de violentes perturbations (les orages magnétosphériques) responsables, entre autres, du déplacement des ovales auroraux.

La structure de la magnétosphère est contrôlée par l'interaction du vent solaire avec le champ géomagnétique

Le vent solaire joue donc un rôle important dans l'apparition d'une activité géomagnétique. Cette activité est liée à l'interaction du vent solaire avec le champ géomagnétique.

A l'échelle macroscopique, cette interaction revêt deux aspects fondamentaux. Il y a tout d'abord la présence de l'onde de choc, en amont de l'obstruction à l'écoulement du vent solaire, que représente le champ géomagnétique. Ce choc existe en permanence, car la vitesse du plasma est supérieure aux vitesses de propagation de deux ondes prin-

cipales : les ondes sonores et les ondes d'Alfvén (ondes caractéristiques du transport des signaux dans un plasma plongé dans un champ magnétique). Les importantes modifications dans l'état du plasma solaire, résultant du passage de ce dernier au travers de l'onde de choc, vont jouer un rôle important dans toutes les phases ultérieures de l'interaction. Le plasma solaire est, en effet, maintenant comprimé et chauffé au détriment de son énergie cinétique de mouvement. Dans la magnétogaine (voir figure 2), l'écoulement du plasma devient alors subsonique et turbulent avant de regagner progressivement de l'impulsion, lui permettant de devenir à nouveau supersonique et laminaire à distance suffisante du voisinage terrestre.

Le second aspect macroscopique que revêt l'interaction est le confinement du champ géomagnétique à l'intérieur d'une cavité à géométrie de comète, qui est justement la magnétosphère définie précédemment. Avec ce confinement, l'espace est divisé en deux régions distinctes : d'une part, le vent solaire, plasma issu du Soleil et baignant au sein du champ magnétique interplanétaire, et d'autre part, cette magnétosphère, contenant un plasma thermique, d'origine ionosphérique, piégé par les lignes de force, initialement dipolaires, du champ géomagnétique. Le confinement résulte alors d'un équilibre dynamique entre ces deux régions : la pression due à l'action combinée du plasma et du champ magnétique étant en effet identique de part et d'autre. L'usage a consacré sous le vocable de magnétopause la transition séparant ces deux régions adjacentes (la magnétosphère et la magnétogaine), par analogie avec les dénominations des couches supérieures de l'atmosphère terrestre. Le confinement du champ géomagnétique n'est possible qu'à cause de la présence de courants électriques d'écran (dits "courants de Chapman-Ferraro" en l'honneur de Chapman et Ferraro qui, dès 1930, avant qu'on ne soupçonna l'existence même du vent solaire, furent les premiers à étudier l'interaction entre le champ géomagnétique et des bouffées de plasma éjectées sporadiquement du Soleil par des centres actifs). Ces courants d'écran s'écoulent à l'intérieur de la magnéto-

pause, dont l'épaisseur n'est égale qu'à quelques centaines de kilomètres. Le champ magnétique produit par ces courants renforce alors l'intensité du champ magnétique terrestre à l'intérieur de la magnétosphère, mais l'affaiblit considérablement à l'extérieur, ce qui confère à la magnétosphère la forme particulière schématisée par les figures 1 et 2: les lignes de force sont comprimées dans la direction du Soleil et étirées du côté nuit, où elles se développent très loin, dans la queue magnétosphérique, sur une distance supérieure à trois millions de kilomètres. Le plasma magnétosphérique est lui-même réparti en régions distinctes, dont la plus importante en extension est le feuillet de plasma, composé principalement de particules énergétiques* (≥ 6 keV) en faible concentration (~ 1 particule par cm^3).

Une description détaillée de la structure de la magnétopause a longtemps été rendue impossible en raison du manque de résolution temporelle des instruments destinés à mesurer les propriétés du plasma. Seule, la présence de la magnétopause pouvait être détectée à partir de la mesure du champ magnétique. C'est ainsi que la première identification satisfaisante de cette couche frontière fut réalisée, dès 1963, à partir des données recueillies par le magnétomètre d'Explorer 12. Il faut

* L'électron-volt (eV) est l'unité d'énergie correspondant au travail qu'il faut fournir à 1 électron (charge = $1,602 \times 10^{-19}$ C) pour qu'il franchisse une différence de potentiel de 1 V. Donc $1 \text{ eV} = 1,602 \times 10^{-19}$ Joule. On rencontre encore le keV ($= 10^3$ eV), le MeV ($= 10^6$ eV), le GeV ($= 10^9$ eV),... L'électron-volt n'est utilisé que pour des particules atomiques et est généralement relatif à l'énergie cinétique de ces particules. Dans le cas d'un plasma au repos, l'énergie cinétique est l'énergie d'agitation thermique correspondant à une température moyenne. Ainsi, 1 eV correspond à une température de 11.600 K, et des particules de 6 keV dont l'énergie serait entièrement d'origine thermique auraient donc une température de 69,6 millions de degrés Kelvin.

cependant attendre 1972 pour, les techniques expérimentales s'améliorant, voir l'éclosion d'une série intensive d'observations détaillées du plasma, effectuées à bord de satellites artificiels. Ces observations ont ainsi démontré l'existence d'une couche de plasma adjacente à la magnétopause tout entière, à l'intérieur même de la magnétosphère. On désigne aujourd'hui cette région sous le terme générique de couche frontière magnétosphérique. Pour des raisons historiques, elle prend cependant des appellations différentes suivant sa localisation (voir figure 2). Ainsi, la couche frontière de haute latitude, enveloppant la queue magnétosphérique, est mieux connue sous la désignation, imaginée par Rosenbauer et ses collaborateurs, de manteau de plasma. Dans la région des cornets polaires, où le plasma solaire possède un accès direct à la magnétosphère en raison de la convergence des lignes de force magnétiques, on trouve encore la couche d'entrée. Quant à la première observation détaillée de la couche frontière de basse latitude, elle a été fournie par Eastman et ses collaborateurs, dès 1976, grâce aux mesures de plasma et de champ effectuées à bord de la sonde IMP6. La couche frontière magnétosphérique a une épaisseur atteignant plusieurs milliers de kilomètres. A l'intérieur de cette couche, la vitesse du plasma décroît progressivement à partir de la magnétopause. Simultanément, la densité diminue et l'énergie moyenne des particules augmente. Le spectre d'énergie des électrons γ est sensiblement le même que dans la magnétogaine. En effet, comme nous le verrons ultérieurement, cette couche frontière est la région où s'arrêtent les irrégularités du vent solaire qui peuvent pénétrer impulsivement dans la magnétosphère.

Dans la magnétosphère interne (voir figure 1), couvrant des distances géocentriques inférieures à 6 rayons terrestres environ, le champ magnétique a plus ou moins une structure dipolaire, analogue à celle d'un barreau aimanté. Dans ces régions, l'intensité du champ γ décroît approximativement comme le cube de la distance géocentrique, sa valeur à l'équateur étant égale à 0,31 gauss. Chaque point d'un héli-

sphère dont la latitude est inférieure à celle de l'ovale auroral possède un conjugué magnétique dans l'autre hémisphère. Ces points conjugués sont reliés par une même ligne de force auquel est tangente le champ magnétique local. Lorsque la latitude des points conjugués est supérieure aux latitudes de l'ovale auroral, les lignes de force s'étendent très loin dans la direction opposée au Soleil et recouvrent alors les régions de la magnétosphère externe (voir figure 1). Par rapport à un système de coordonnées géographiques, les régions de l'espace explorées par les lignes de force varient avec l'heure locale, car la Terre tourne sur elle-même à l'intérieur de la cavité magnétosphérique qui, dans l'hypothèse d'un vent solaire stationnaire et uniforme, reste fixe par rapport au plan passant par l'axe Terre-Soleil et par l'axe du dipôle magnétique.

La magnétosphère subit des variations journalière et saisonnière. En effet, l'axe du dipôle géomagnétique est incliné de 11° par rapport à l'axe de rotation de la Terre sur elle-même. Il n'est donc perpendiculaire ni au plan de l'équateur céleste ni au plan de l'écliptique. Ainsi, on conçoit aisément que la magnétosphère terrestre puisse se déformer périodiquement, au rythme des jours et des saisons.

La magnétosphère subit des modifications brusques et intenses liées aux orages magnétosphériques

Outre ces variations périodiques, liées à des causes astronomiques, la magnétosphère subit également des perturbations violentes qui modifient profondément sa structure. Ces perturbations sont appelées "orages magnétosphériques" et se manifestent, entre autres choses, par une succession de variations brusques et intenses du champ géomagnétique. Au niveau du sol, les mesures de ces variations ont un caractère mondial.

Les orages magnétosphériques sont liés aux éruptions solaires, car celles-ci modifient l'écoulement du vent solaire. Par exemple, une bouffée de plasma éjectée du Soleil lors d'éruptions intenses (ou "solar flares" en terminologie anglo-saxonne) provoque l'apparition d'une onde de choc dans le plasma interplanétaire. L'orage magnétosphérique commence alors lorsque cette onde de choc atteint la magnétosphère. Ainsi, la première manifestation de cet orage sera-t-elle une brusque compression de la cavité magnétosphérique. Cette compression est souvent suivie d'une série de processus intermittents, à caractère impulsif, pendant lesquels la magnétosphère subit de brusques restructurations. La durée de ces processus individuels est généralement de l'ordre de trois heures et est nettement inférieure à la durée de vie d'un orage magnétosphérique. Ces restructurations au sein de la magnétosphère constituent ce qu'on appelle les "sous-orages magnétosphériques".

La compression de la cavité magnétosphérique constitue la phase initiale de l'orage. Cette compression produit, au niveau des enregistrements au sol, une augmentation brusque de la composante horizontale du champ magnétique. Si les sous-orages magnétosphériques se succèdent ensuite à des intervalles de temps inférieurs à quelques heures, il se produit alors une diminution significative de l'intensité du champ géomagnétique dans les régions de basse latitude : c'est la phase principale de l'orage magnétosphérique. Durant cette phase, une dizaine de sous-orages peuvent habituellement se produire. Le développement et la décroissance de la phase principale dépend alors de la fréquence et de l'intensité des sous-orages. L'étude de la phase principale d'un orage magnétosphérique est donc réduite à l'étude d'un processus élémentaire et fondamental : le sous-orage magnétosphérique. Diverses manifestations accompagnent habituellement un sous-orage magnétosphérique. Le tableau de la figure 3 récapitule la plupart de ces manifestations, ainsi que les conséquences qu'elles entraînent. Ainsi, on observe :

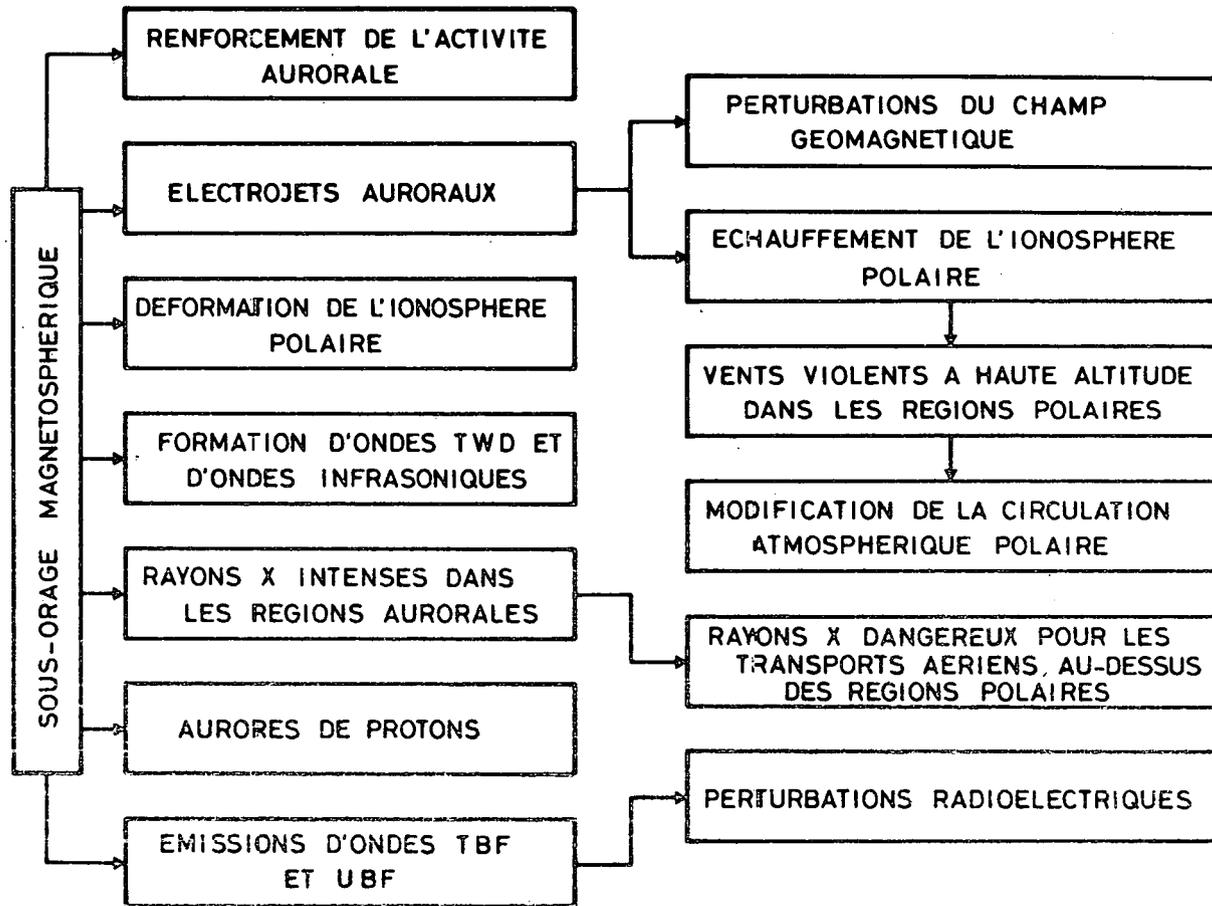


Fig. 3.- Les diverses manifestations d'un sous-orage magnétosphérique.

- 1) Un renforcement de l'activité aurorale qui va de pair avec le développement du sous-orage. Cette activité devient maximale au bout de 15 à 30 minutes après le début du sous-orage en question.
- 2) La formation d'intenses "electrojets" auroraux, qui provoquent ainsi de profondes perturbations du champ géomagnétique dans les régions aurorales et dans la magnétosphère tout entière.
- 3) Une absorption de l'intensité du bruit radio d'origine cosmique, due à une augmentation de l'ionisation au niveau des couches inférieures de l'ionosphère polaire. Cette déformation de l'ionosphère polaire est à rechercher dans la précipitation de particules énergétiques dans ces régions de haute latitude.
- 4) La formation d'ondes atmosphériques TWD (Travelling Wave Disturbance) engendrées dans les régions aurorales et se propageant vers l'équateur, ainsi que la formation d'ondes infrasoniques, se propageant parallèlement au mouvement de l'ovale auroral, lorsque celui-ci se déplace très rapidement à une vitesse supersonique.
- 5) L'émission de flux intenses de rayons X dans les régions aurorales. Ces rayons X proviennent du rayonnement de freinage (bremsstrahlung) des électrons énergétiques qui sont décélérés lors des chocs avec les atomes ou les molécules de l'atmosphère.
- 6) Une augmentation, au sein de la magnétosphère externe, de la population de protons d'énergie comprise entre 1 et 50 keV. Certains de ces protons précipitent dans les régions polaires et se manifestent ainsi par la formation d'aurores, dites "aurores de protons". Celles-ci ne se forment cependant pas aux latitudes des ovales auroraux, mais bien à des latitudes légèrement inférieures.
- 7) L'émission d'une multitude d'ondes radioélectriques de très basse fréquence (TBF, jusqu'à des valeurs aussi basses que 3 Hz) associée à une précipitation intense de particules chargées dans les régions des ovales auroraux, ainsi que l'émission de divers types d'ondes magnétohydrodynamiques d'ultra-basse fréquence (UBF, inférieure à 3Hz) dont certaines, observées au sol comme micro-pulsations, ont des fréquences comprises entre 2 mHz et 1 Hz.

Toutes ces ondes sont engendrées de façon naturelle au sein de la magnétosphère et se propagent dans le plasma magnétosphérique, le long des lignes de force du champ géomagnétique.

Ces diverses manifestations d'un sous-orage magnétosphérique ont des conséquences importantes (voir figure 3) qui peuvent avoir de fâcheuses implications pratiques. En effet, l'échauffement de certaines parties de l'atmosphère terrestre lors de la dissipation ohmique des courants ionosphériques (notamment les électrojets auroraux) peut entraîner l'installation d'un régime de vents violents à très haute altitude, au-dessus des régions polaires. Ces vents modifient ainsi la circulation générale de la haute atmosphère polaire. De plus, les rayons X engendrés dans les régions aurorales peuvent être dangereux pour les transports à haute altitude. Enfin, les communications radioélectriques sont très fortement perturbées dans les régions de haute latitude. Les détails de ces phénomènes ne sont pas encore tous connus et l'on conçoit bien l'intérêt qu'il y aurait à mieux les comprendre afin de contrôler éventuellement le déroulement des orages magnétosphériques. C'est pourquoi on pourrait se demander ce qui, dans le vent solaire, provoque l'apparition d'un orage magnétosphérique, et comment l'énergie de ce dernier est communiquée à toutes les parties de la magnétosphère.

Le faible champ magnétique interplanétaire contrôle le développement des orages magnétosphériques

On sait depuis longtemps, à partir d'études spectroscopiques effectuées au niveau du sol, qu'un champ magnétique existe à la surface du Soleil. Ce champ s'étend dans l'espace interplanétaire baigné par le vent solaire. Au niveau de l'orbite terrestre, il est cependant très faible. En effet, dans cette région, l'intensité du champ d'induction

magnétique est de l'ordre de 5 nT* (environ 10.000 fois moins intense que la valeur moyenne du champ géomagnétique à la surface de la Terre).

La direction de ce champ magnétique interplanétaire varie de façon aléatoire alors que la direction du vent solaire est pratiquement toujours radiale par rapport au Soleil. Le mouvement du vent solaire au travers du champ magnétique interplanétaire produit l'apparition de courants électriques induits. Ce phénomène d'induction est tout à fait similaire à celui créé par un conducteur se déplaçant dans un champ magnétique. Le champ électrique interplanétaire associé à ces courants induits a une très faible intensité, de l'ordre du millivolt par mètre, et est perpendiculaire, à la fois, à la direction du vent solaire et à celle du champ magnétique interplanétaire. Ce faible champ électrique interplanétaire fait néanmoins apparaître une différence de potentiel de l'ordre de 100.000 volts entre deux points séparés par des distances comparables aux dimensions caractéristiques de la magnétosphère.

Les variations de direction du champ électrique interplanétaire sont donc associées aux variations de direction du champ magnétique interplanétaire. Ainsi, lorsque ce dernier a une composante positive dans la direction Nord-Sud, parallèlement à l'axe du dipôle géomagnétique, le champ électrique interplanétaire est dirigé dans le sens du mouvement de la Terre autour du Soleil. On a observé que cette orientation du champ électrique interplanétaire est, en fait, la plus favorable au transfert d'énergie du vent solaire à la magnétosphère. Ce comportement

* 1 nT = 10^{-9} T (Tesla). [Le gamma (γ) est l'unité pratique pour désigner le nanotesla (nT)]. 1T = 1Wb m⁻² (Weber par mètre carré) = 10⁴ G (Gauss).

reste encore partiellement incompris à l'heure actuelle. Néanmoins, l'existence d'une composante sud du champ magnétique interplanétaire est à l'origine du développement de la phase principale d'un orage magnétosphérique. En effet, lorsque cette situation favorable se présente, on observe que le champ électrique interplanétaire pénètre à l'intérieur de la magnétosphère externe. Dès lors, il modifie l'énergie des particules situées dans la queue magnétosphérique. Ces particules sont ainsi accélérées vers les régions internes de la magnétosphère, le long des lignes de force du champ magnétique. Ce flot de plasma, d'énergie comprise entre 1 et 40 keV, se heurte alors au champ dipolaire pour former un courant électrique annulaire (le "ring current", en terminologie anglo-saxonne), situé à 5 ou 6 rayons terrestres du centre de la Terre, au voisinage du plan équatorial. Ce courant électrique est à l'origine de la dépression de la composante horizontale du champ magnétique que l'on observe au niveau du sol, dans les régions de basse latitude, au moment de la phase principale de l'orage.

Par contre, du fait des perturbations électriques et magnétiques, certaines de ces particules, issues de la magnétosphère externe, pénètrent plus profondément dans la magnétosphère interne, tout en devenant de plus en plus énergétiques. Elles viennent ainsi alimenter les ceintures de radiation de Van Allen, où plusieurs y restent piégées, tandis que les autres, sous l'effet des interactions ondes-particules, précipitent le long des lignes de force définissant les ovales auroraux (voir figure 1). Cette précipitation de particules énergétiques donne naissance à une série de courants électriques, alignés le long de ces mêmes lignes de force. Ces courants se referment dans l'ionosphère des régions aurorales, en donnant naissance aux fameux électrojets auroraux. Tout est alors en place pour précipiter de plus en plus de particules énergétiques dans les régions polaires, avec toutes les suites que cela comporte, notamment, la formation d'aurores et l'émission d'ondes radio de très (et d'ultra) basse fréquence. Ces suites et leurs conséquences pratiques ont été exposées au paragraphe précédent et schématisées à la figure 3.

Ainsi, pour qu'un orage magnétosphérique puisse se développer, il faut non seulement que des éléments de plasma du vent solaire, possédant un excès d'impulsion, atteignent la magnétosphère, mais encore que le champ magnétique interplanétaire ait une composante dirigée vers le Sud. Le caractère impulsif des sous-orages qui se succèdent après la phase initiale de compression du champ géomagnétique, est peut-être lié aux processus de pénétration impulsive d'irrégularités du vent solaire, suivant le modèle développé récemment par Lemaire et Roth. En effet, le plasma de la magnétosphère externe qui est responsable du développement de la phase principale de l'orage, est alimenté par le vent solaire, et la succession des sous-orages doit refléter la répartition de fréquence spatiale des irrégularités du vent solaire.

Lorsque le champ magnétique interplanétaire s'oriente vers le Nord, on assiste à la phase de recouvrement de l'orage magnétosphérique. Durant cette phase, l'intensité totale du courant annulaire décroît progressivement sur une période de deux à trois jours, et les zones proches de la magnétosphère se vident lentement des particules énergétiques provenant de la magnétosphère externe. Tout est alors prêt pour le déclenchement d'un nouvel orage magnétosphérique, qui surviendra lorsque le champ magnétique interplanétaire s'orientera à nouveau vers le Sud.

On voit ainsi le rôle important joué par les conditions physiques régnant dans le milieu interplanétaire (en particulier dans le vent solaire) sur l'apparition de perturbations de la haute atmosphère terrestre, dont certaines peuvent avoir des conséquences pratiques non négligeables. Ceci souligne une fois de plus l'importance des relations Terre-Soleil au niveau de phénomènes physiques dont l'origine, apparemment terrestre, est en fait intimement liée aux propriétés du vent solaire, elles-mêmes régies par l'activité du Soleil.

Les ceintures de radiation de Van Allen sont des pièges pour les particules chargées de la magnétosphère

Le courant annulaire de la Terre existe en fait en permanence. Il n'est que renforcé au cours d'un orage magnétosphérique. En conséquence, les particules chargées qui constituent ce courant doivent être piégées durant un temps suffisamment long au sein des lignes de force dipolaires du champ géomagnétique. Ces particules piégées font partie des ceintures de radiation, découvertes en 1959 par Van Allen grâce aux compteurs Geiger-Mueller installés à bord du satellite Explorer 1. Depuis lors, on a pu dresser des cartes de la répartition de ces ceintures en fonction de l'intensité des radiations.

Par exemple, la figure 4, dessinée dans le plan méridien midi-minuit, illustre les contours d'intensité constante du flux des électrons d'énergie supérieure à 0,5 MeV. Cette intensité constante est repérée de manière logarithmique par les nombres adjacents aux contours correspondants. Le flux dont il est question ici est relatif au nombre d'électrons d'énergie supérieure à 0,5 MeV traversant, par seconde, un détecteur sphérique de 1 cm^2 de surface. Les régions ombragées correspondent à des intensités supérieures à $10^6 \text{ électrons cm}^{-2} \text{ sec}^{-1}$. Dans l'espace à trois dimensions, ces régions où sont concentrés les électrons définissent une paire de tores, dont la géométrie est déterminée par les lignes de force dipolaires du champ magnétique terrestre. La zone externe, d'extension équatoriale comprise entre 4 et 6 rayons terrestres du centre de la Terre, est essentiellement peuplée d'électrons. Par contre, la zone interne, s'étendant jusqu'à deux rayons terrestres dans le plan équatorial, est avant tout peuplée de protons, d'énergie comprise entre 0,1 et 200 MeV. L'intensité des électrons de la zone interne illustrée à la figure 4 est exceptionnellement intense. Il s'agit d'électrons d'origine artificielle, introduits en 1962 lors d'une explosion thermonucléaire américaine à très haute altitude. Ces électrons

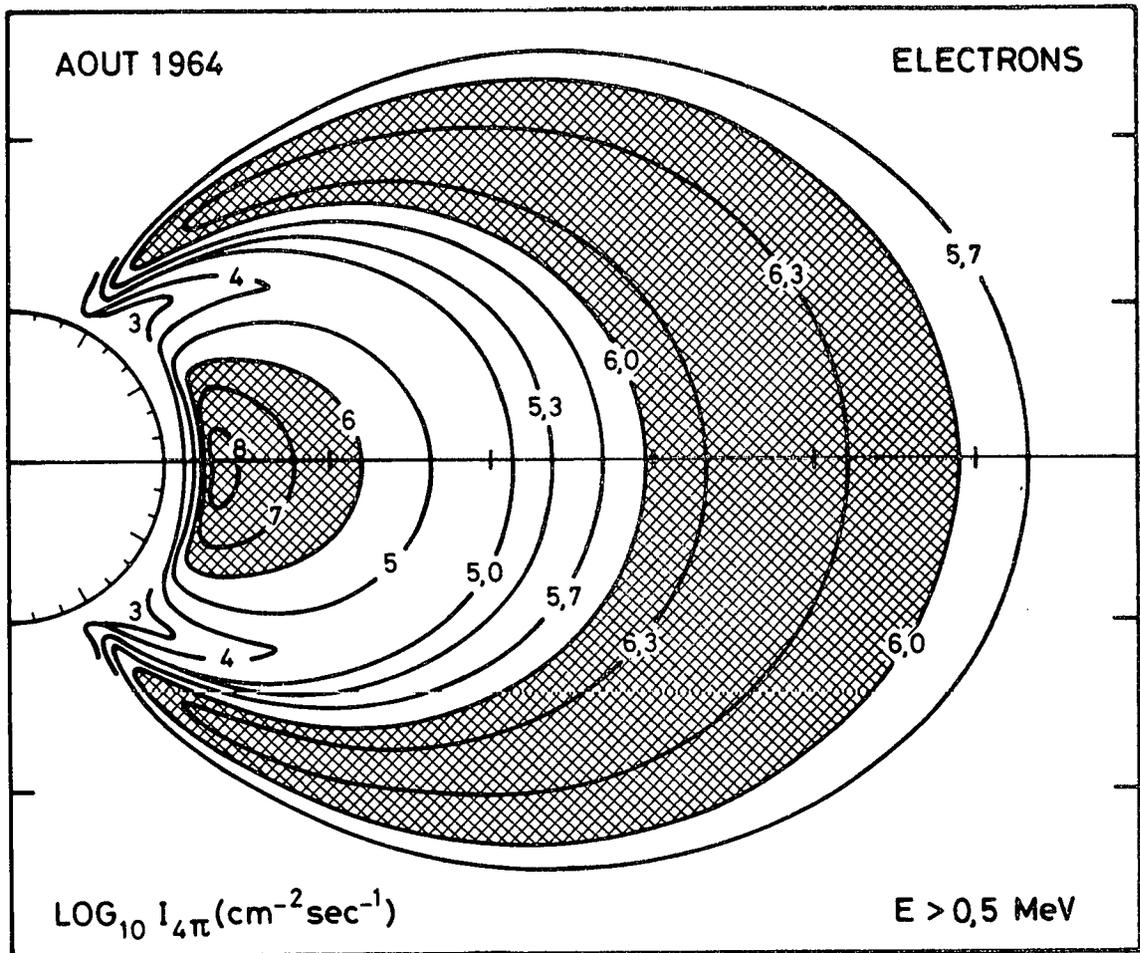


Fig. 4. - Les ceintures de radiation de Van Allen définissent une paire de tores, dont la géométrie est déterminée par les lignes de force dipolaires du champ magnétique terrestre. Elles sont peuplées essentiellement d'électrons et de protons énergétiques. Ces particules chargées restent piégées très longtemps à l'intérieur de ces régions, à cause de la structure particulière du champ magnétique. Cette figure illustre les contours d'intensité constante du flux des électrons d'énergie supérieure à 0,5 MeV. Ce flux est défini par le nombre d'électrons (d'énergie supérieure à 0,5 MeV) traversant, par seconde, un détecteur sphérique de 1 cm^2 de surface. Les nombres adjacents aux contours désignent les logarithmes de l'intensité du flux en question. Les régions ombragées correspondent aux deux zones de radiation (interne et externe) où les flux sont supérieurs à 10^6 . Cette carte de la répartition des radiations a été dessinée dans le plan méridien midi-minuit. (D'après M. Schulz and L.J. Lanzerotti, Particle Diffusion in the Radiation Belts, 215 p., Springer-Verlag, Berlin, 1974).

n'avaient pas encore entièrement disparu deux années plus tard, au moment où les mesures reportées ici avaient été effectuées. Cela souligne l'importance de la durée de vie des particules piégées dans la magnétosphère interne.

En réalité, les ceintures de radiation de Van Allen ont une extension qui dépend de l'énergie des particules qu'elles contiennent. Ainsi, elles se recouvrent entre elles lorsqu'on change les seuils d'énergie des particules que l'on considère. La majorité des protons de la zone interne proviennent des réactions nucléaires entre les noyaux de l'atmosphère terrestre et les rayons cosmiques de très haute énergie (supérieure à 100 MeV). Par contre, la principale source des particules de la zone externe est fournie par le plasma, d'origine solaire, qui diffuse de la queue magnétosphérique vers la Terre lors des orages magnétosphériques.

Les interactions ondes-particules régularisent l'évolution des ceintures de radiation

Les processus dynamiques qui gouvernent l'évolution des ceintures de radiation de Van Allen font intervenir des champs d'ondes électromagnétiques, dont l'effet final sera tantôt le peuplement, tantôt le dépeuplement des zones de radiation.

Pour comprendre ces mécanismes, il faut tout d'abord analyser la trajectoire d'une particule chargée au sein du champ magnétique dipolaire de la magnétosphère interne. Cette particule, de masse m et de charge q , a une trajectoire compliquée que l'on peut néanmoins séparer en trois mouvements simples, de périodicités distinctes.

Cette trajectoire, illustrée à la figure 5, se compose tout d'abord d'un mouvement de gyration très rapide autour d'une ligne de force du champ magnétique. Cette gyration n'a lieu que si la particule possède

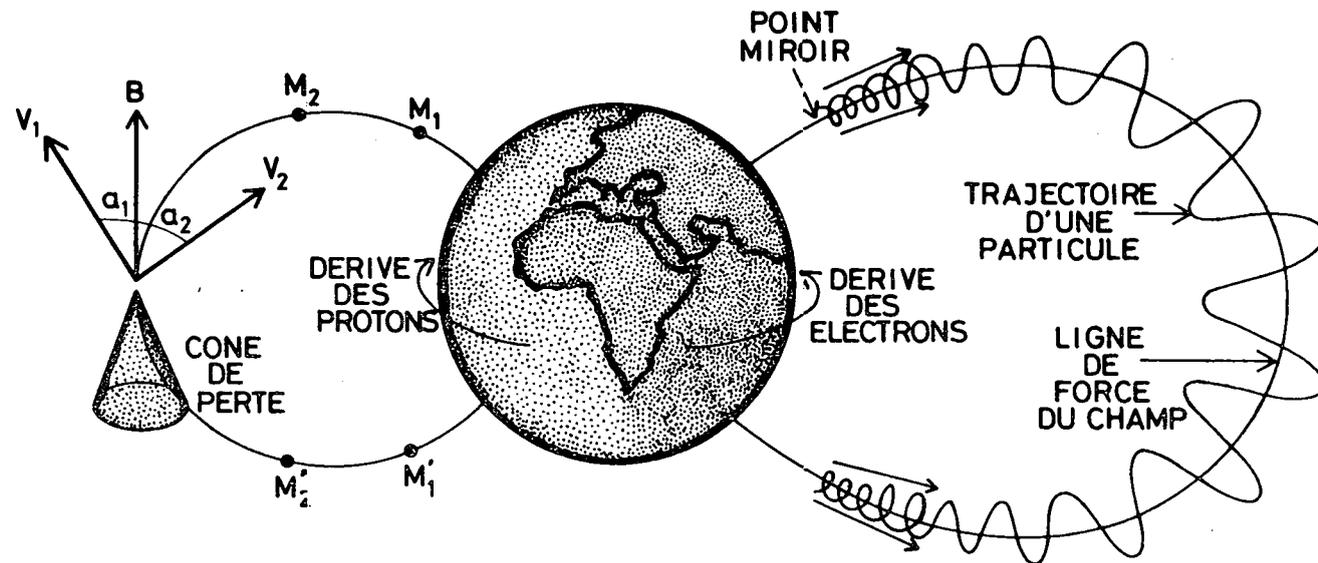


Fig. 5.- Les trois périodicités du mouvement d'une particule chargée dans le champ magnétique terrestre. La particule est animée d'un mouvement de gyration très rapide autour d'une ligne de force, d'un mouvement d'oscillation entre deux points miroirs et d'un lent mouvement de rotation autour de la Terre, qui entraîne les électrons vers l'est et les protons vers l'ouest. L'angle d'attaque d'une particule est l'angle que fait la vitesse de la particule avec la direction du champ magnétique. A l'équateur, plus cet angle d'attaque est faible, et plus les points miroirs de la particule sont proches des couches supérieures de l'atmosphère. Un cône de perte est ainsi défini à l'équateur. Son ouverture est égale à l'angle d'attaque limite d'une particule dont le point miroir serait situé à une altitude de 100 km. Toute particule dont l'angle d'attaque est situé à l'intérieur de ce cône est donc perdue par collision dans l'atmosphère terrestre (D'après R. Gendrin, La magnétosphère terrestre, La Recherche, 39 (4), 957, 1973).

une composante de vitesse dans la direction perpendiculaire au champ magnétique. Elle s'effectue en sens inverse pour des particules chargées de signe contraire. Pour des vitesses non relativistes, la fréquence (ou nombre de gyrations par seconde) ne dépend pas de l'énergie de la particule. Elle est donnée par la fréquence de Larmor (ν) :

$$\nu = \frac{qB}{2\pi m}$$

Celle-ci est directement proportionnelle à l'intensité du champ (B) et au rapport (q/m) de la charge à la masse. C'est pourquoi la fréquence de gyration d'un électron est supérieure à celle d'un proton. De plus, cette fréquence est la plus faible à l'équateur où le champ B est minimum.

Lorsque la particule chargée possède une composante de vitesse dans la direction parallèle au champ B, elle se déplace également le long de la ligne de force correspondante, entre deux points de réflexion, appelés points miroirs (voir figure 5). La période d'oscillation entre ces points dépend de l'angle d'attaque que fait, à l'équateur, la vitesse de la particule avec la direction du champ magnétique. Plus cet angle est faible, et plus les points miroirs seront éloignés de l'équateur, dans des régions de plus en plus proches de l'atmosphère terrestre, où la particule risque d'être absorbée. Il existe donc un angle d'attaque limite en deçà duquel les particules équatoriales ont des points miroirs situés à une altitude inférieure à 100 km. Cet angle d'attaque limite définit un cône de perte pour les particules équatoriales (voir figure 5). Toutes les particules équatoriales dont l'angle d'attaque est situé à l'intérieur de ce cône ont donc des points miroirs d'altitude trop basse. Ces particules subissent alors de nombreuses collisions avec des atomes ou des molécules de l'atmosphère et sont, à brève échéance, absorbées.

La trajectoire d'une particule chargée se décompose également en un troisième mouvement de lente dérive en longitude (voir figure 5). Ce

mouvement est imprimé par la force due à la décroissance radiale du champ magnétique et aussi par la force de dérive résultant de l'accélération centrifuge associée à l'oscillation en latitude. Cette dérive longitudinale s'effectue vers l'Ouest pour les protons et vers l'Est pour les électrons, avec la même période pour des énergies identiques. Le courant annulaire trouve ainsi son origine dans ces mouvements de dérive, en sens opposés pour des particules chargées de signe contraire.

Typiquement, un électron (proton) de 10 keV (10 MeV) traversant le plan de l'équateur à 4 rayons terrestres du centre de la Terre, et dont la latitude géomagnétique des points miroirs est égale à 60° , a une période de gyration équatoriale proche de 7×10^{-5} s (0,1 μ s), une période d'oscillation en latitude voisine de 2 s (3 s) et une période de dérive en longitude de l'ordre de 25h 30min (90 s).

La dérive en longitude autour de la Terre et le mouvement d'oscillation en latitude permettent à une particule d'être piégée dans les ceintures de radiation de Van Allen. Des mouvements de diffusion radiale au travers des lignes de force modifient la dérive en longitude et contribuent au peuplement de la zone externe par des particules venant de la queue magnétosphérique. Cette diffusion radiale est provoquée par les perturbations magnétiques et électriques associées aux orages magnétosphériques ou à des ondes de plasma. Elle joue également un rôle important dans la répartition des particules énergétiques de la zone interne, nées de la désintégration nucléaire de neutrons atmosphériques. Elle est aussi responsable du seuil élevé de radiations détecté dans la zone interne lors des explosions nucléaires de haute altitude produites au cours des années 1960.

Quant aux mécanismes de dépeuplement des ceintures de radiation, ils font appel à la diffusion des angles d'attaque à l'intérieur du cône de perte (voir figure 5). En effet, par suite de l'existence de ce cône

de perte, la distribution angulaire des particules est anisotrope. Une telle distribution est cependant instable et tend à engendrer un champ d'ondes électromagnétiques. Ces ondes entrent alors en interaction avec les particules de façon à diffuser leur angle d'attaque à l'intérieur du cône de perte. Tout se passe donc comme si la Nature voulait rétablir l'isotropie angulaire et supprimer ainsi la cause qui a donné naissance aux ondes. On explique ainsi les précipitations constantes de particules chargées dans la haute atmosphère. Ces précipitations dépeuplent les ceintures de radiation et sont généralement associées à l'émission naturelle d'ondes radioélectriques de très basse fréquence. Cette diffusion en angle d'attaque augmente avec la distance géocentrique. Ainsi, la durée moyenne de vie des électrons de 0,5 MeV est d'environ 300 jours dans la zone interne, mais de seulement 5 jours dans la zone externe.

Ces différents mécanismes de diffusion, nés des interactions ondes-particules, régissent donc l'évolution dynamique des ceintures de Van Allen. L'affaiblissement de l'intensité des radiations entre les ceintures interne et externe (voir figure 4) est à rechercher dans la prédominance de la diffusion en angle d'attaque (mécanisme de dépeuplement) sur la diffusion radiale (mécanisme de peuplement).

Des moyens d'investigation au sol à l'exploration spatiale

A partir de l'analyse des spectres de fréquence des ondes naturelles se propageant dans la magnétosphère, il est possible d'obtenir des informations extrêmement intéressantes sur la répartition du plasma thermique aux grandes distances géocentriques. Par plasma thermique, on entend des particules dont l'énergie est inférieure à 1 eV. Dans la magnétosphère, ce plasma est de loin le plus dense, puisque sa concentration atteint encore quelques centaines de particules par cm^3 à une distance géocentrique de trois rayons terrestres. En comparaison, les flux importants des particules des ceintures de Van Allen ne sont dus

qu'à la valeur élevée de leur vitesse, mais la concentration de ces particules énergétiques reste très faible (de l'ordre de 10^{-2} cm^{-3}). Ce plasma thermique, prédominant dans la magnétosphère, est issu de l'ionosphère supérieure d'où il s'échappe par diffusion le long des lignes de force du champ magnétique.

La première identification de ce plasma thermique a été réalisée par Storey, en 1953, grâce à l'étude des spectres de fréquence des sifflements. Ces derniers sont des ondes radioélectriques de très basse fréquence qui sont émises par temps orageux dans un éclair atmosphérique. Elles sont également émises au sein même de la magnétosphère, où elles résultent alors d'instabilités de plasma. Toutefois, quelle que soit leur origine, ces ondes se propagent pratiquement toujours le long des lignes de force du champ magnétique terrestre et sont réfléchies plusieurs fois entre les deux hémisphères opposés de la Terre où aboutissent ces lignes de force. Une particularité du plasma thermique est d'être très dispersif pour ce type d'ondes, les fréquences élevées se propageant le plus rapidement. Ainsi, lorsque ces ondes sont reçues au sol et rendues audibles par un dispositif approprié d'amplification, l'oreille perçoit un son qui ressemble à un sifflement. On trouve là l'origine de leur appellation particulière.

L'analyse spectrale des signaux reçus au sol, c'est-à-dire l'enregistrement de la fréquence de l'onde en fonction du temps, va permettre de déterminer les caractéristiques du plasma au sein duquel se propagent les sifflements. En effet, on connaît la loi de dispersion de ces ondes en fonction de la répartition du plasma le long des lignes de force du champ magnétique. De plus, on sait que les régions où le champ magnétique est faible (c'est-à-dire les régions du plan de l'équateur) sont responsables de la plus grande partie de la dispersion. C'est pourquoi cette méthode est si efficace pour obtenir la répartition équatoriale du plasma thermique en fonction de la distance géocentrique.

Ainsi, dès avant le début de l'exploration spatiale, on connaissait l'existence de la plasmasphère, cette région de la magnétosphère où est concentré le plasma thermique. La plasmasphère est en corotation avec la Terre et se termine de façon abrupte par une surface de discontinuité : la plasmopause. Dans le plan équatorial, cette discontinuité se situe à environ 4 ou 5 rayons terrestres du centre de la Terre.

Ces résultats remarquables, obtenus à peu de frais par une instrumentation au sol peu sophistiquée, ont été vérifiés depuis longtemps par des mesures "in situ", grâce au développement spectaculaire des techniques spatiales. Un exemple de ces mesures est illustré à la figure 6, où la concentration de différents constituants du plasma a été déterminée au cours d'une traversée de la plasmopause par le satellite OGO 5, le 3 décembre 1968, à une latitude géomagnétique de 45° . Les coordonnées spatiales du satellite le long de sa trajectoire sont indiquées en abscisse par la distance géocentrique (L) exprimée en rayons terrestres et par la longitude (TL) exprimée en temps local. On remarque, qu'au-delà de $L = 2,5$, la plasmasphère (située ici à des distances géocentriques inférieures à $L = 4,9$) est constituée d'environ 99% d'ions H^+ , d'environ 1% d'ions He^+ et de quelques traces d'ions O^+ . La position de la plasmopause est évidente à $L = 4,9$. En effet, sur une distance de l'ordre d'un demi-rayon terrestre, la concentration des protons décroît de presque deux ordres de grandeur, depuis environ 500 particules par cm^3 jusqu'à environ 10 particules par cm^3 .

La plasmopause est l'endroit où la force gravifique agissant sur le plasma est contrebalancée par la force centrifuge due à la corotation de la plasmasphère. Au-delà de la plasmopause, la force centrifuge devient donc prépondérante, et la moindre inhomogénéité de plasma, de densité supérieure à celle du milieu ambiant, aura tendance à se détacher de la plasmasphère et à s'en éloigner. Au niveau de l'ionosphère supérieure, la plasmopause se manifeste par une diminution de la concentration électronique vers 65° de latitude géomagnétique. En effet, au-delà de

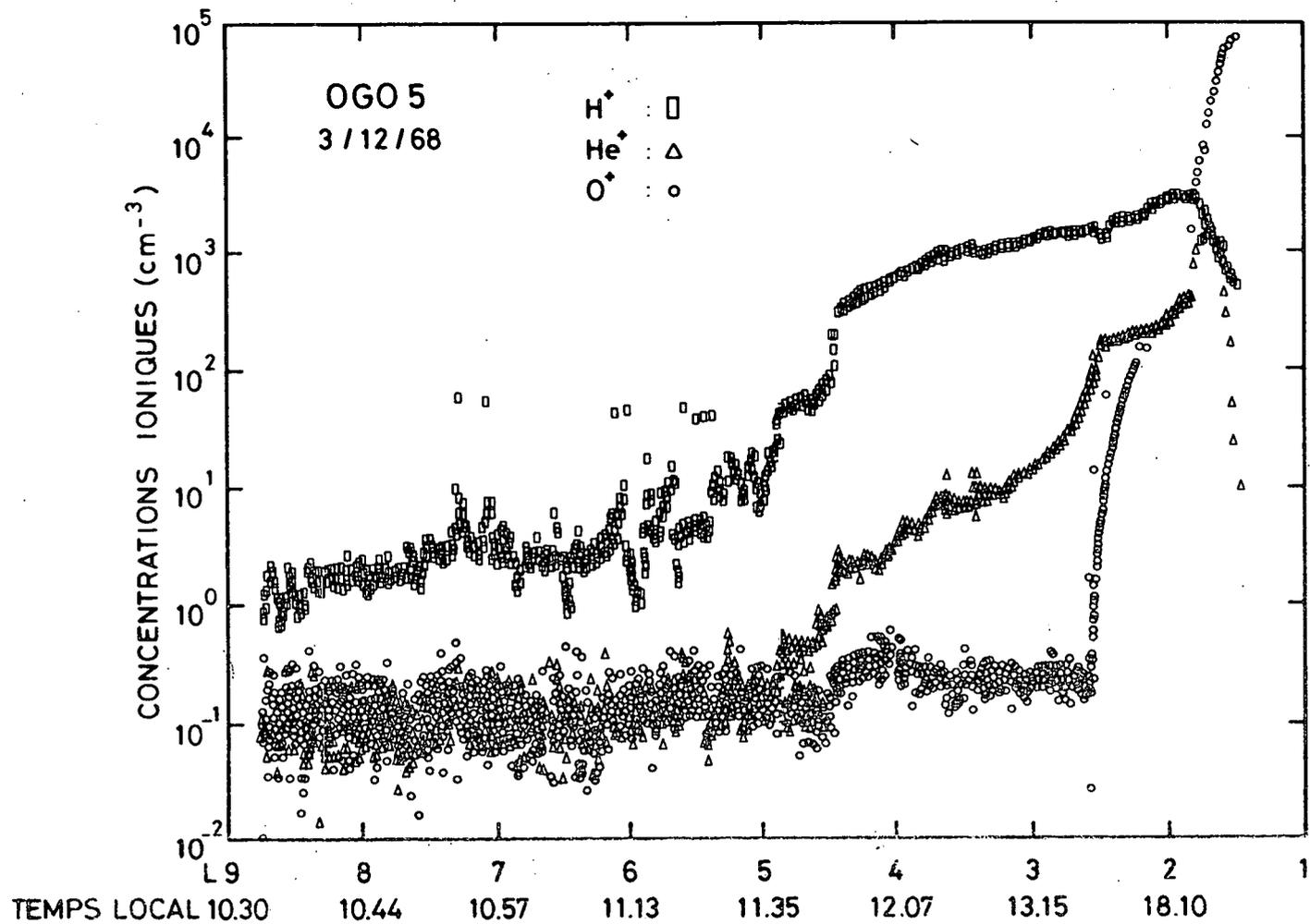


Fig. 6.- Une mesure des différentes concentrations d'ions lors d'une traversée de la plasmopause par la sonde OGO 5, le 3 décembre 1968. La position du satellite est indiquée en abscisse par la distance géocentrique (L), exprimée en rayons terrestres et par la longitude (TL), exprimée en temps local. La latitude géomagnétique de cette traversée est approximativement égale à 45° . La position de la plasmopause est localisée à $L = 4,9$. (D'après Chappell et al., J. Geophys. Res., 75, 50, 1970).

cette latitude, les lignes de force s'écartent d'une géométrie dipolaire et s'étirent longuement dans la queue magnétosphérique. C'est la raison pour laquelle, dans les régions de latitude élevée, l'ionosphère polaire se vide continuellement de son contenu d'hydrogène et d'hélium, formant ce qu'on appelle le vent polaire, par analogie avec le vent solaire.

Les phénomènes non stationnaires que l'on commence seulement à étudier nous révèlent une magnétosphère encore plus fascinante

De 1957 à nos jours, la magnétosphère a été sillonnée en tous sens par une multitude de satellites artificiels, comprenant de nombreux appareils de mesure de plus en plus performants. C'est ainsi qu'on peut actuellement déterminer l'entière des fonctions de distribution des vitesses de chaque constituant du plasma. Cela veut dire, qu'avec un seul instrument, il est possible de compter, dans chaque intervalle d'énergie, le nombre de particules venant de n'importe quelle direction. Cette mesure peut être réalisée en tout point de la trajectoire d'un satellite et pour chaque constituant du plasma. On peut ainsi déduire la concentration et la température de chacun des constituants, ainsi que la vitesse d'écoulement du plasma. Associées à des mesures de champ magnétique et électrique, ces observations permettent d'avoir une vue d'ensemble très générale de la structure de la magnétosphère.

En réalité, la magnétosphère n'est pas une structure statique et idéale, telle que celle représentée à la figure 2. Continuellement en interaction avec le vent solaire, elle se déforme d'une multitude de façons. Ainsi, la présence de la couche frontière magnétosphérique adjacente à la magnétopause résulte de processus non stationnaires. La formation de cette couche est en effet une des conséquences d'un processus de pénétration impulsive d'inhomogénéités de plasma solaire au sein de la magnétosphère. D'ailleurs, les recherches actuelles, tant expérimentales que théoriques, sont axées sur l'aspect non stationnaire des mécanismes physiques opérant au sein de la magnétosphère. Que

l'on pense, par exemple, à ces satellites jumeaux orbitant de concert autour de la Terre, par-delà la magnétosphère et le vent solaire, et dont les instruments de mesure ont pour mission de séparer les variations temporelles des variations spatiales, objectif irréalisable lorsque les mesures étaient effectuées par un seul satellite. Cette tâche est remplie par le programme ISEE (International Sun-Earth-Explorer), né de la collaboration entre la NASA et l'ESA. Il a débuté le 22 octobre 1977 par la mise en orbite des satellites ISEE-1, de conception américaine et ISEE-2, de conception européenne. Il s'est poursuivi le 12 août 1978 par le lancement du troisième satellite de cette série, ISEE-3, placé en orbite "de halo" autour d'un point de libration situé approximativement à 240 rayons terrestres de la Terre, entre celle-ci et le Soleil (voir figure 7). Une bouffée de plasma passant par ce point arrive environ 1 heure plus tard au niveau de l'orbite terrestre, où elle peut provoquer des perturbations qui peuvent être observées par les instruments d'ISEE-1 et d'ISEE-2.

Les premiers résultats qui commencent à être publiés nous montrent bien l'énorme diversité des phénomènes non stationnaires que, par ailleurs, les premières approches théoriques de Lemaire et Roth avaient déjà perçue dès 1976 en étudiant l'interaction d'un vent solaire inhomogène avec le champ géomagnétique. La région d'interaction (la magnétopause et la couche frontière magnétosphérique) présente alors d'énormes similitudes avec ces couches formant transition entre océan et atmosphère, mélanges à la fois d'air et d'eau. D'ailleurs, d'anciennes expériences de laboratoire, réalisées en 1956 par Bostik, avaient déjà montré comment des éléments de plasma (aussi appelés plasmoides) pouvaient pénétrer et se déplacer au travers des lignes de force d'un champ magnétique.

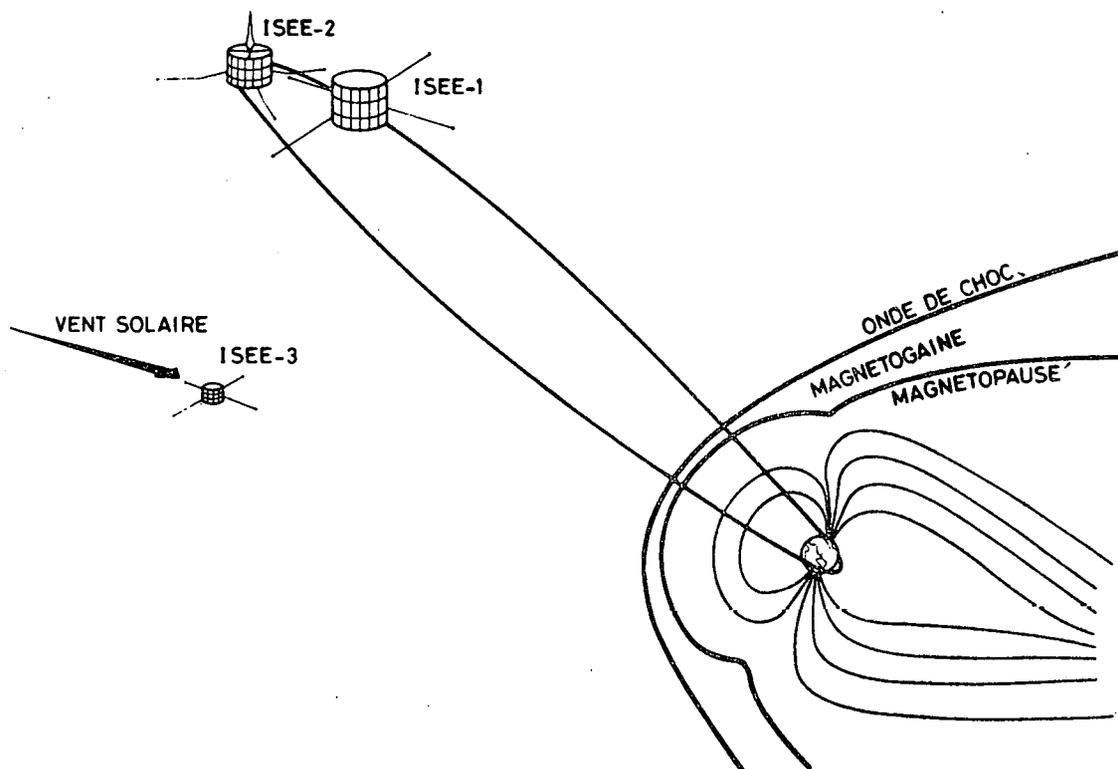


Fig. 7.- Une représentation schématique montrant les satellites ISEE-1 et ISEE-2 en orbite autour de la Terre. L'apogée de leur trajectoire commune est égale à 23 rayons terrestres, si bien que ces deux satellites pénètrent dans l'espace interplanétaire durant une portion de leur orbite. Séparés par une distance variable, ils peuvent donc résoudre l'ambiguïté spatio-temporelle associée aux mesures qu'effectuerait un seul satellite traversant ces minces couches frontières que sont la magnétopause et l'onde de choc. ISEE-3 est en orbite de "halo" autour d'un point de libration où la force gravifique due à la Terre est égale à celle due au Soleil. Ce point de libration est situé à environ 240 rayons terrestres de la Terre, sur l'axe Terre-Soleil. Environ 1 heure après qu'ISEE-3 ait enregistré le passage d'une bouffée de plasma, ISEE-1 et ISEE-2 sont en mesure d'observer les perturbations provoquées par cette bouffée au niveau de l'orbite terrestre.

Notre connaissance de la magnétosphère fait progresser un domaine important de la physique : celui des plasmas

On a longtemps considéré un plasma comme un fluide classique où les collisions entre particules constitutives sont fréquentes. On s'est cependant rapidement aperçu que cette analogie ne rendait pas compte d'une multitude de phénomènes que l'on pouvait observer, notamment, dans les plasmas de l'espace. Par exemple, la résistivité électrique de ces plasmas est tout à fait différente de celle que donnerait un calcul classique basé sur la théorie des collisions au sein d'un fluide. En réalité, non seulement le plasma de la magnétosphère, mais aussi tous les plasmas cosmiques ont la particularité d'offrir une gamme très étendue de paramètres, capable de décrire un vaste ensemble de plasmas fondamentalement différents, depuis les plasmas froids faiblement ionisés et soumis aux collisions jusqu'aux plasmas chauds complètement ionisés et dépourvus de collisions. La magnétosphère terrestre contient un plasma chaud et sans collisions et représente de ce fait une source précieuse d'informations sur les propriétés spécifiques et fondamentales de ce type de plasma.

A l'heure où l'obtention des plasmas chauds devient réalisable expérimentalement, ces informations recueillies dans l'espace complètent donc admirablement celles que l'on pourrait obtenir en laboratoire. Mais il y a mieux : le plasma de la magnétosphère est du même type que celui qui permettra un jour de contrôler la fusion thermonucléaire! En effet, dans le procédé par fusion, le combustible des réacteurs doit se trouver à l'état de plasma chaud et presque* sans collisions. De plus,

* Les plasmas de fusion doivent donc être suffisamment denses ($\sim 10^{12}$ cm^{-3}) pour produire les réactions nucléaires. Bien que peu denses dans l'absolu ($0,1 - 10^3$ cm^{-3}), les plasmas de l'espace sont néanmoins denses du point de vue de la physique des plasmas, car la fréquence de plasma (proportionnelle à la racine carrée du nombre de particules par cm^{-3}) est grande devant la fréquence de gyration (proportionnelle à l'intensité du champ magnétique).

les particules chargées qui constituent ce combustible doivent être piégées dans un champ magnétique puisqu'aucun matériau n'est capable de résister aux températures élevées auxquelles doivent se produire les réactions nucléaires. Ces plasmas de fusion sont encore difficiles à réaliser en laboratoire, mais, ainsi que nous venons de le voir, on peut facilement étudier leurs propriétés dans l'espace.

N'oublions pas que la production d'énergie par le procédé de fusion s'affranchirait des déchets radioactifs dangereux qui accompagnent inévitablement le procédé actuel de fission. De plus, les océans pourraient constituer des sources pratiquement inépuisables de combustible.

Ainsi, à l'heure où le prix de l'approvisionnement en énergie pèse de plus en plus lourdement sur l'économie mondiale, il n'est pas exagéré de dire que l'étude des plasmas de l'espace, tout en faisant progresser la science fondamentale, apporte une contribution indirecte à la solution d'un problème crucial pour l'humanité. C'est ce qu'a fort bien compris l'école suédoise conduite par Alfvén et Fälthammar, qui s'est toujours consacrée à l'étude comparative des plasmas cosmiques et des plasmas de laboratoire.

BIBLIOGRAPHIE

Les articles de synthèse et les publications concernant la magnétosphère sont extrêmement nombreux et paraissent dans des revues spécialisées, comme "Journal of Geophysical Research, Planetary and Space Science, Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics, Space Science Reviews, Reviews of Geophysics and Space Physics, les Annales de Géophysique,..." Comme il n'est pas possible de les citer tous, le lecteur intéressé se référera au catalogue bibliographique le plus récent. Quant au lecteur non spécialisé, il consultera avec profit les articles de revue suivants :

- Fälthammar, C.-G., Les aurores polaires, *la Recherche*, 24 (3), 537, 1972.
- Gendrin, R., La magnétosphère terrestre, *La Recherche*, 39 (4), 957, 1973.
- Roederer, J.G., The Earth's Magnetosphere, *Science*, 183 (4120), 37, 1974.

Parmi les ouvrages généraux traitant des phénomènes physiques au sein de la magnétosphère ou des plasmas de l'espace, citons, sans que cette liste soit exhaustive :

- Akasofu, S.-I., Polar and Magnetospheric Substorms, 280 p., D. Reidel Publishing Company, Dordrecht-Holland, 1968.
- Akasofu, S.-I., Physics of Magnetospheric Substorms, 599 p., D. Reidel Publishing Company, Dordrecht-Holland, 1976.
- Alfvén, H., Cosmic Plasma, D. Reidel Publ. Co., Dordrecht-Holland, 1980.
- Alfvén, H. and C.-G. Fälthammar, Cosmical Electrodynamics, 228p., Oxford at the Clarendon Press, 1963.

- Chapman, S., Solar Plasma, Geomagnetism and Aurora (Second Printing), 141 p., Gordon and Breach, Science Publishers, Inc., New York, 1964.
- Helliwell, R.A., Whistlers and Related Ionospheric Phenomena, Stanford University Press, Stanford, California, 1965.
- Hundhausen, A.J., Coronal Expansion and Solar Wind, 238 p., Springer-Verlag, Berlin, 1972.
- Jacobs, J.A., Geomagnetic Micropulsations, 179 p., Springer-Verlag, Berlin, 1970.
- Nishida, A., Geomagnetic Diagnosis of the Magnetosphere, 256 p., Springer-Verlag, New York, 1978.
- Parker, E.N., Cosmical magnetic fields. Their origin and their activity, 841 p., Clarendon Press, Oxford, 1979.
- Roederer, J.G., Dynamics of Geomagnetically Trapped Radiation, 166 p., Springer-Verlag, Berlin, 1970.
- Schulz, M. and L.J. Lanzerotti, Particle diffusion in the Radiation Belts, 215 p., Springer-Verlag, Berlin, 1973.
- Vallance Jones, A., Aurora, 301 p., D. Reidel Publishing Company, Dordrecht-Holland, 1974.

Parmi les ouvrages d'introduction à la physique des plasmas, relevons :

- Chen, F.F., Introduction to Plasma Physics (Second Printing), 329 p., Plenum Press, New York, 1976.
- Longmire, C.L., Elementary Plasma Physics, 278 p., Interscience Publishers, New York, 1963.
- Quemada, D., Ondes dans les plasmas, 382 p., Hermann, Paris, 1968.