



Accélération et rayonnement dans les aurores boréales

L'accélération des particules chargées – ainsi que les rayonnements électromagnétiques engendrés à la suite de cette accélération – constituent une chaîne de processus universels qu'il est possible d'étudier « in situ » dans le laboratoire naturel formé par les plasmas des régions aurorales de la magnétosphère terrestre. De tels processus sont engendrés au voisinage de tout objet astrophysique possédant une atmosphère et un champ magnétique intrinsèque. L'étude approfondie des mécanismes physiques donnant naissance aux aurores dans l'espace circumterrestre a un impact certain sur nos connaissances actuelles concernant la Physique de l'Univers.

Depuis les temps les plus reculés, l'homme a été conscient du rôle prépondérant joué par l'activité solaire dans la détermination des conditions de son environnement immédiat. Paradoxalement, ce n'est qu'au début de l'ère spatiale (~1960) que les satellites d'exploration ont révélé que l'environnement circumterrestre était en permanence bombardé par un flux de particules énergétiques d'origine solaire. La couronne solaire est en effet la source d'un plasma, gaz complètement ionisé composé essentiellement d'électrons et de protons. Des électrons et des ions (95 % d'hydrogène et 5 % d'hélium) échappent continuellement à l'attraction solaire et forment ainsi un flux permanent appelé « vent solaire » qui se propage dans tout l'espace interplanétaire. La très forte conductivité du plasma implique la conservation du flux magnétique à travers tout circuit entraîné à la vitesse du plasma : on dit que le champ magnétique du soleil est « gelé » dans le plasma et est transporté par le vent solaire. Dans l'espace interplanétaire les particules sont ainsi astreintes à suivre les lignes de ce champ d'origine solaire. Au niveau de l'orbite terrestre, le vent solaire est caractérisé par des vitesses

s'étageant de 300 à 1000 km/s, et par des densités variant grossièrement entre 5 et 50 particules par cm^3 . La Terre ne constitue pas une exception, tous les corps du système solaire (planètes, comètes, satellites...) sont plongés dans le vent solaire avec lequel ils interagissent. Cette interaction est différente suivant que ces corps possèdent (ou non) une atmosphère, et qu'ils aient (ou non) un champ magnétique intrinsèque.

Dans le cas de la Terre, le champ magnétique interne joue un rôle essentiel. Exception faite de régions très localisées de l'espace, les lignes du champ magnétique interplanétaire d'origine solaire qui guident les particules du vent solaire, ne peuvent se connecter aux lignes du champ magnétique terrestre. Par ailleurs, l'énergie cinétique moyenne des ions du vent solaire, autour du kilo électron Volt (keV), est trop faible pour que ces derniers puissent traverser l'écran que constitue pour eux le champ magnétique terrestre. Les particules chargées du vent solaire sont donc majoritairement déviées par le champ magnétique terrestre qui est intrinsèquement dipolaire. La pression cinétique de ce vent déforme la partie extérieure du champ dipolaire terrestre : les lignes de champ sont comprimées dans la direction solaire et très étirées dans la direction opposée au soleil. Cette interaction conduit à la création d'une cavité, appelée magnétosphère. Il se forme ainsi une

queue magnétique s'étendant sur plusieurs centaines de rayons terrestres, analogue à celle des comètes. Seule une très faible fraction des particules du vent solaire (quelques %) parvient à pénétrer dans la magnétosphère. Outre sa source externe, le vent solaire, la magnétosphère est également alimentée par une source interne située à basse altitude (100-600 km) : l'ionosphère dont les températures sont de l'ordre de l'électron Volt (eV).

LES ZONES AURORALES

L'impact du vent solaire sur notre planète a des conséquences extrêmement spectaculaires au niveau des régions aurorales. Ainsi que l'illustre l'encadré 1, dans ces régions de hautes latitudes le champ magnétique terrestre connecte la basse ionosphère, reliée par friction à l'atmosphère, et la magnétosphère externe reliée dynamiquement au vent solaire (un tel couplage est absent à nos latitudes car les lignes de champ magnétique ne s'étirent pas assez loin dans l'espace et restent confinées à la magnétosphère interne). Par suite de ce couplage, des électrons du vent solaire sont guidés le long des lignes de champ aurorales depuis les confins de la magnétosphère externe jusqu'aux basses altitudes, tout en étant accélérés jusqu'à des énergies de l'ordre de 10 keV par divers mécanismes qui ne sont pas encore totalement

– Centre d'étude des environnements terrestre et planétaire, CETP, UMR 8639 CNRS, Université de Versailles, 4 av. de Neptune, 94107 Saint-Maur-des-Fossés.

élucidés. L'accélération des électrons se traduit par l'émission d'un rayonnement radio intense, baptisé rayonnement kilométrique terrestre (RKT), et par la précipitation dans la haute atmosphère des électrons ainsi accélérés. Ces électrons énergétiques entrent alors en collision avec les constituants majoritaires de l'atmosphère terrestre, et transfèrent aux atomes d'oxygène et d'azote leur énergie, qui est ensuite rayonnée sous forme d'émissions lumineuses. Ces émissions lumineuses sont connues sous le nom d'aurores (boréales dans l'hémisphère Nord, australes dans l'hémisphère Sud). Les régions aurorales jouent donc un rôle particulier en raison de leur

connexion aux frontières externes de la magnétosphère (voir encadré 1). La figure 1, prise à l'aide d'une caméra ultra violette embarquée sur le satellite Dynamic Explorer, montre que les aurores se produisent sur une ceinture étroite en latitude (quelques degrés) ayant la forme d'un ovale entourant chacun des pôles magnétiques. Ces régions baptisées « ovale auroral » constituent, au niveau de la basse ionosphère aurorale, les pieds des lignes de champ provenant de la surface externe de la magnétosphère.

Une autre conséquence directe de l'impact du vent solaire sur la Terre concerne l'extraction des ions de la basse ionosphère au niveau des

régions aurorales. Les ions ionosphériques sont tout d'abord accélérés perpendiculairement au champ magnétique ambiant, la décroissance de ce champ avec l'altitude induit un mouvement ascendant des ions qui échappent ainsi à l'attraction terrestre. Par ce processus, la Terre perd en moyenne ~ 4 kg/s d'atomes d'oxygène, ce qui peut affecter la composition de notre atmosphère sur des échelles de temps géologiques. Une partie de l'énergie transmise par le vent solaire à l'ionosphère est ainsi recyclée vers les hautes altitudes. L'ionosphère aurorale contribue donc de manière significative au peuplement de la magnétosphère.

Encadré 1

LA MAGNÉTOSPHÈRE ET SES FRONTIÈRES NATURELLES

Le vent solaire confine le champ magnétique terrestre dans une cavité, la magnétosphère, en forme de comète dont la queue s'étend à grande distance (plusieurs centaines de rayons terrestres) dans la direction opposée au Soleil (voir figure 1). L'équilibre entre la pression cinétique du vent solaire et la pression du champ magnétique terrestre détermine la frontière externe de cette cavité, appelée magnétopause. Dans la direction du Soleil, cette frontière est située à une distance de l'ordre de 10 rayons terrestres. Il se forme en amont de la magnétopause, à une distance d'environ 14 rayons terrestres de la Terre, une onde de choc qui fait passer le vent solaire d'un régime supersonique à un régime subsonique. Entre le choc et la magnétopause, existe une région de transition, appelée magnétogaine. Une faible partie du plasma provenant du vent solaire (quelques %) parvient à traverser la magnétopause et est transportée vers le plan équatorial de la queue où elle s'accumule pour former la couche de plasma. Une partie du plasma de la magnétosphère provient aussi d'une source interne située à basse altitude (100-600 km), dont la température est de l'ordre de l'électron-Volt, l'ionosphère. On distingue deux sortes de lignes de champ : d'une part, celles qui se referment sur les deux hémisphères (pieds situés aux latitudes géomagnétiques inférieures à $\sim 70-75^\circ$), d'autre part, celles qui ont un pied sur la surface terrestre et sont ouvertes sur le milieu interplanétaire (régions de la calotte polaire à basse altitude et lobes de la queue magnétique). Les régions aurorales sont situées à la frontière entre les lignes de force ouvertes et fermées ; elles jouent un rôle particulier en raison de leur connexion aux régions frontières externes de la

magnétosphère. Au niveau de la basse ionosphère, les pieds des lignes de force aurorales sont situés sur une ceinture étroite en latitude (quelques degrés) ayant la forme d'un ovale entourant chacun des pôles magnétiques : c'est dans ces régions que se produisent les aurores, d'où leur appellation d'ovale auroral (voir figure 1). Du côté jour, les lignes de force du champ magnétique relient les régions aurorales aux cornets polaires et à la couche limite de basse latitude, et du côté nuit à la couche de plasma.

La configuration de la magnétosphère dépend beaucoup des paramètres caractéristiques du vent solaire (densité, vitesse, et champ magnétique interplanétaire). Ces paramètres variant considérablement dans le temps, il s'ensuit que la magnétosphère est rarement en équilibre statique. En particulier, lorsque les variations sont trop brutales (une ou plusieurs fois par jour), la configuration magnétique de la queue peut devenir instable. Il se produit alors un sous-orage magnétique, au cours duquel la topologie des lignes de champ dans la queue est modifiée profondément. Une partie du plasma peuplant la couche de plasma se trouve alors précipitée avec des énergies de l'ordre de la dizaine de kilo électron Volts vers le bord polaire de l'ovale auroral. L'énergie emmagasinée dans la queue se trouve transférée vers les basses altitudes et dissipée sous différentes formes, aurores, rayonnement kilométrique, chauffage de l'ionosphère basse altitude aux latitudes aurorales. Bien que se produisant sur un domaine restreint en latitude, ces phénomènes induisent aussi des effets importants sur l'atmosphère neutre à toute latitude.

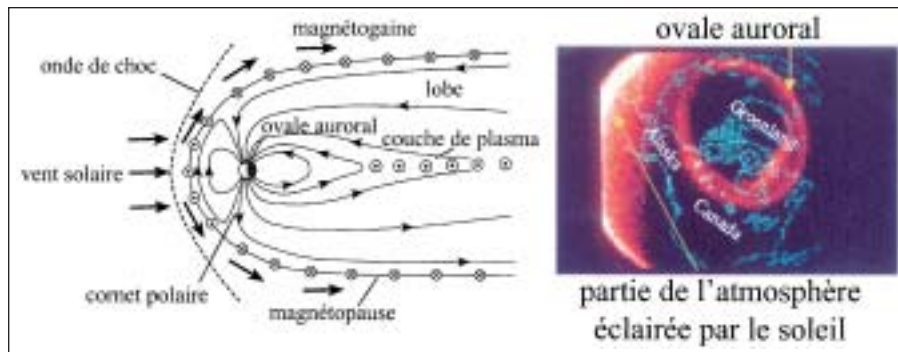


Figure 1 - Partie gauche : coupe schématique de la magnétosphère dans le plan méridien contenant la direction Soleil-Terre et l'axe du dipôle magnétique terrestre. Partie droite : vue de l'ovale auroral prise à l'aide d'une caméra UV par le satellite Dynamics Explorer.

OBSERVATIONS « IN SITU »

Dans le cadre du Programme international sur les relations Soleil-Terre (ISTP), l'exploration des zones aurorales a bénéficié d'une heureuse conjoncture, car trois satellites polaires ont été lancés récemment avec succès soit par l'agence spatiale américaine (NASA) : Polar et FAST, soit par l'agence spatiale russe (RKA) : Interball Auroral. Ces satellites sont équipés d'un ensemble complet d'instruments mesurant les champs électriques et magnétiques continus et fluctuants, et les fonctions de distributions des diverses particules du plasma. Pour ce faire, des magnétomètres statique et alternatif embarqués mesurent respectivement les trois composantes du champ magnétique terrestre ainsi que leurs fluctuations. Les valeurs du champ électrique statique et de ses fluctuations sont déterminées au moyen de systèmes d'antennes orthogonales tri-axes (dont les longueurs typiques avoisinent 100 m) déployées dans le plasma. Les fonctions de distribution en énergie des électrons et des ions sont mesurées à l'aide de spectromètres à haute résolution temporelle. La communauté scientifique française est activement associée à ces différentes expériences spatiales internationales.

Les données expérimentales acquises par ces satellites ont révélé que les processus élémentaires conduisant à l'accélération des particules,

et à la génération d'un rayonnement électromagnétique intense, sont caractérisés par des structures de petite échelle. Afin d'appréhender la faible durée de vie et (ou) la petite étendue spatiale de ces structures, il est indispensable de bénéficier d'expériences à haute résolution temporelle, ce qui entraîne de pouvoir disposer d'une capacité élevée d'enregistrement des informations à bord. Les expériences embarquées sont donc le fruit d'une haute technologie. A titre d'exemple, le satellite FAST mesure la fonction de distribution en énergie des électrons en 2 ms pour des énergies comprises entre 1 eV et 35 keV. Compte tenu de la vitesse orbitale du satellite (~6 km/s), la résolution spatiale est de 12 m ! Par ailleurs, les champs électriques et magnétiques sont mesurés à une cadence de 0.5 ms, afin d'avoir accès à la forme d'onde du RKT. De par sa résolution temporelle inégalée jusqu'alors, cette expérience a permis de montrer le rôle essentiel joué par les processus à petite échelle dans le bilan des transferts de matière et d'énergie qui s'établit à grande échelle entre la magnétosphère, l'ionosphère et l'atmosphère.

La figure 2 donne un aperçu schématique global des manifestations à grande échelle et à petite échelle se produisant sur le pourtour de l'ovale auroral terrestre. La partie centrale de cette figure illustre les principaux phénomènes physiques identifiés grâce aux mesures effectuées à

bord de satellites traversant ces régions de l'espace circumterrestre.

ÉCHAPPEMENT ET ACCÉLÉRATION DES IONS DANS LES RÉGIONS FRONTIÈRES

Lors de ses passages à haute altitude (10 000 à 20 000 km) au-dessus des régions polaires, le satellite Interball Auroral observe des ions qui s'échappent de l'ionosphère terrestre en présentant une dispersion latitude-énergie caractéristique (figure 2A1). Cette signature s'interprète par un modèle simple dans lequel les ions sont tout d'abord accélérés transversalement aux lignes de champ dans une région étroite en latitude (hachures rouges sur la partie gauche du schéma central de la figure 2). Ils sont ensuite transportés dans la direction opposée au soleil sous l'effet de la convection à grande échelle résultant de l'interaction entre la magnétosphère et le vent solaire (les flèches vertes, dont l'amplitude est proportionnelle à l'énergie des ions, représentent les trajectoires suivies par ces derniers). Un satellite se déplaçant vers les hautes latitudes détectera d'abord les ions de plus hautes énergies, puis ceux d'énergies de plus en plus basses. La magnétosphère joue ainsi le rôle d'un spectromètre, qui sépare les ions selon leur vitesse, et donc selon leur masse et leur énergie.

Les mesures à haute résolution temporelle du satellite FAST ont permis de mettre en évidence de nouveaux processus physiques à la base de l'échappement des ions décrit dans le paragraphe précédent. Un exemple de l'un de ces processus est illustré sur les figures 2A2 et 2A3 qui présentent respectivement les spectrogrammes temps-énergie des ions et temps-fréquence des ondes mesurés pendant 30 s. L'accélération perpendiculaire des ions apparaît comme un processus très localisé, associée à une turbulence électrostatique intense prenant la forme d'émissions de bruit électrostatique à large bande (BELB) s'étendant entre

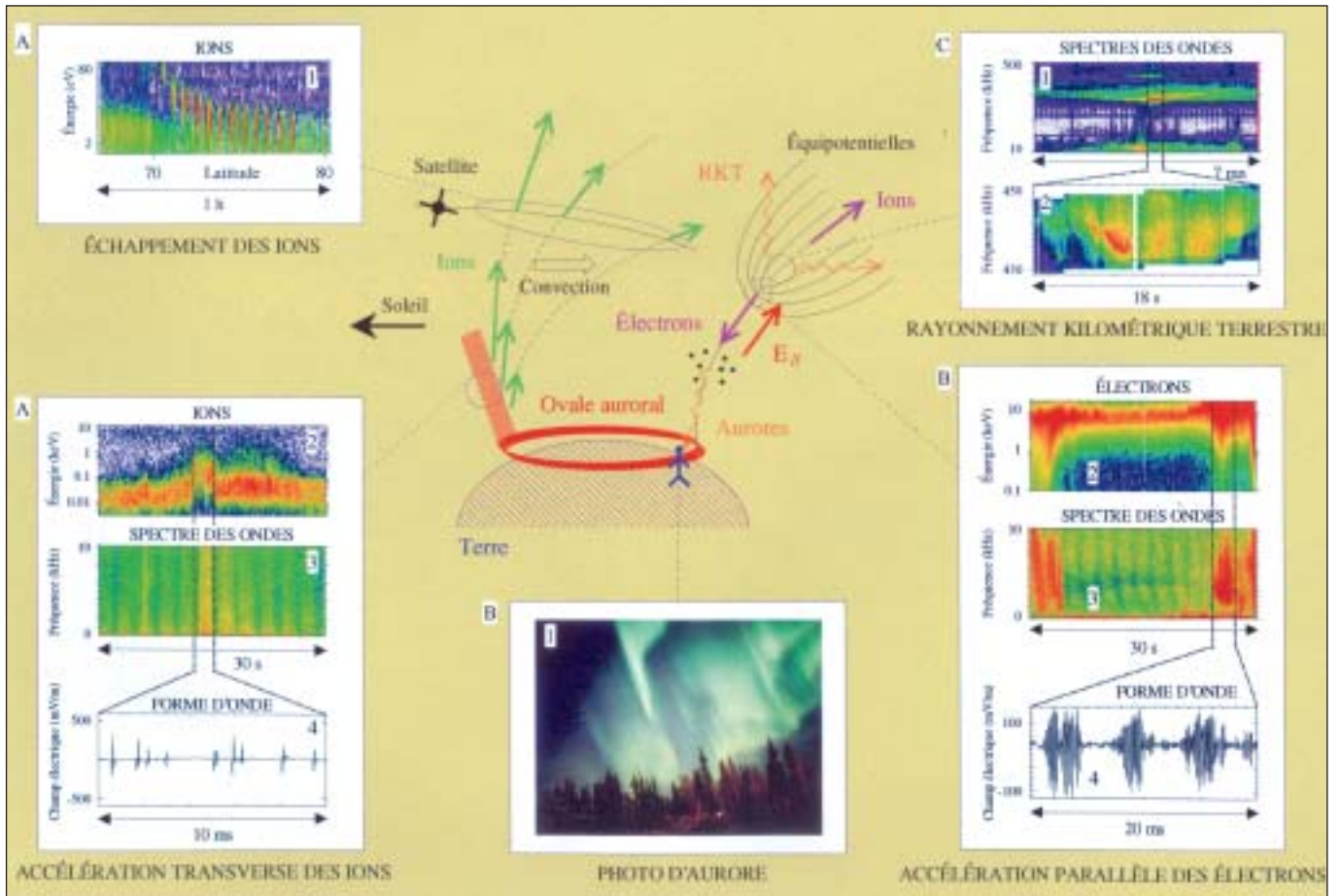


Figure 2 - Aperçu global des manifestations à grande échelle et à petite échelle se produisant sur le pourtour de l'ovale auroral terrestre. Le codage couleur des grandeurs physiques représentées (spectre de particules, spectre d'ondes) est tel que l'intensité de ces grandeurs croît du violet vers le rouge. La partie centrale de la figure schématise les processus d'accélération des particules :

- L'échappement des ions ionosphériques est illustré sur la partie gauche du schéma central. Les ions sont accélérés perpendiculairement au champ magnétique dans une région étroite en latitude située sur l'ovale auroral (hachures rouges), puis transportés dans la direction opposée au soleil (l'amplitude des flèches vertes est proportionnelle à l'énergie) sous l'effet de la convection à grande échelle. La figure 2A1 représente le flux des ions mesuré par un satellite passant au-dessus des régions d'accélération. Les figures 2A2, 2A3 et 2A4 illustrent les observations (flux d'ions, spectre et forme d'onde) effectuées au cœur de ces régions d'accélération.
- Les processus d'accélération parallèle des électrons (figure 2B2) donnant naissance aux aurores (figure 2B1) sont représentés sur la partie droite du schéma central. Localement, les lignes de champ magnétique ne sont plus équipotentielles. Un champ électrique parallèle aux lignes de champ magnétique, dirigé dans une direction opposée à la Terre, se développe. Ce champ apparaît supporté par des structures non linéaires très localisées (figure 2B4) engendrant une turbulence intense (figure 2B3).
- Illustration du rayonnement kilométrique terrestre, conséquence directe des processus d'accélération parallèle des électrons. A grande échelle, on note la forme en V aplati du spectre du rayonnement (figure 2C1) ; le minimum du V coïncide avec la fréquence cyclotron locale des électrons au niveau de la région source. A haute résolution temporelle, le spectre apparaît composé d'un grand nombre de structures fines dérivant en fréquence (figure 2C2).

une centaine de Hertz (Hz) et quelques dizaines de kiloHertz (kHz). La durée typique de ces émissions est de quelques secondes, leur amplitude pouvant atteindre plusieurs volts par mètre. Associées à ces émissions, des structures solitaires – représentées sur la figure 2A4 – sont détectées par les antennes électriques du satellite. Elles ont des dimensions transversales et longitudinales de l'ordre du kilomètre, et se propagent à gran-

de vitesse ($\sim 5000 \text{ km s}^{-1}$) le long des lignes du champ magnétique. Chacune de ces structures est mesurée durant un temps caractéristique $\sim 100 \mu\text{s}$.

Les structures solitaires (solitons) observées résultent de l'évolution non linéaire d'une onde faiblement dispersive ; elles sont hautement « non linéaires » car la densité d'énergie électrostatique contenue

dans chacune d'elles peut atteindre une valeur comparable à la densité d'énergie thermique du plasma local. Elles sont pratiquement isotropes et possèdent des champs électriques intenses (de l'ordre du Volt par mètre) dans les directions parallèle et perpendiculaire au champ magnétique terrestre. Une étude détaillée révèle qu'elles sont engendrées par l'interaction des électrons énergétiques avec le plasma environ-

nant. Elles transfèrent ensuite aux ions, dans une direction perpendiculaire au champ magnétique, une partie de l'énergie qu'elles ont prélevée sur le mouvement parallèle des électrons. Le spectre des impulsions de BELB (figure 2A3) peut être interprété comme étant dû au passage d'un grand nombre de structures localisées le long de la trajectoire du satellite.

LES AURORES ET L'ACCÉLÉRATION DES ÉLECTRONS

Les aurores représentent la manifestation « grande échelle » de l'accélération des électrons. Par suite du couplage imposé par le champ magnétique terrestre, la magnétosphère et l'ionosphère réagissent simultanément, mais différemment, aux perturbations véhiculées par le vent solaire :

- Le long de certaines lignes de champ, les électrons énergétiques en provenance de la surface externe de la magnétosphère sont accélérés vers la Terre jusqu'à des énergies ~ 10 keV. Ces électrons entrent en collision avec les constituants majoritaires de l'atmosphère terrestre, et transfèrent ainsi aux atomes d'oxygène et d'azote leur énergie, qui est ensuite rayonnée sous forme d'émissions lumineuses. Plus les électrons précipitants sont énergétiques et plus ils pénètrent profondément dans l'atmosphère. La composition de l'atmosphère variant avec l'altitude, certaines couleurs sont préférentiellement émises à une altitude donnée, leur diversité produit le magnifique spectacle d'illumination totale du ciel (voir figure 2B1).

- Le plasma devant rester globalement neutre, l'ionosphère doit réagir à cet apport de charges négatives en provenance de la magnétosphère. Le long d'autres lignes de champ, adjacentes aux précédentes, les électrons ionosphériques sont eux accélérés vers les confins de la magnétosphère afin de compenser le surcroît de

charges négatives. Ces régions sont caractérisées par l'absence d'émissions lumineuses et apparaissent comme des franges sombres dans les aurores (voir figure 2B1).

Les théories élémentaires montrent que dans le plasma de la magnétosphère où les collisions binaires sont absentes, la conductivité devrait être infinie le long du champ magnétique. En d'autres termes, ne pouvant être soutenu par des collisions, le champ électrique parallèle devrait être nul, or les données expérimentales montrent qu'il n'en est rien. Elles établissent clairement que l'accélération des électrons a lieu dans une région où les lignes de champ magnétique cessent d'être des équipotentielles ; un champ électrique parallèle aux lignes de champ $E_{//}$ dirigé dans la direction opposée à la Terre se développe. Comme le suggère la partie droite du schéma central de la figure 2, localement, les équipotentielles ont grossièrement la forme de U emboîtés. Dans ces régions les électrons sont accélérés parallèlement vers la Terre, tandis que les ions sont accélérés parallèlement vers les confins de la magnétosphère. Ce modèle simple a l'avantage de décrire correctement les observations. Cette simplicité apparente cache un épineux problème : comment, en l'absence de collisions, peut-on maintenir un champ électrique parallèle susceptible de rendre compte de l'accélération observée ? Comme le montrent les données des figures 2B, les mesures à haute résolution temporelle effectuées récemment dans les régions d'accélération semblent apporter un premier élément de réponse : la turbulence atteint un niveau d'amplitude élevé et elle s'organise en structures à petite échelle. Un champ électrique parallèle, non supporté par des collisions classiques mais par des interactions ondes-particules à l'intérieur de structures non linéaires localisées, peut ainsi émerger de cette turbulence.

Les figures 2B2, B3, B4 représentent respectivement les spectro-

grammes énergie-temps des électrons et fréquence-temps des ondes mesurés durant 30 s dans les régions d'accélération parallèle, ainsi qu'un « zoom » de 20 ms mettant en évidence les structures non linéaires détectées par FAST. Localement, l'accélération parallèle des électrons est caractérisée par des bruits électrostatiques intenses à large bande (BELB) s'étendant d'une centaine de Hertz à quelques dizaines de kiloHertz. La durée typique de ces émissions est de l'ordre de la seconde, leurs amplitudes pouvant atteindre plusieurs centaines de millivolts par mètre. La figure 2B4 révèle que dans ces régions de turbulence intense, le champ électrique est dominé par une série de paquets d'ondes de grandes amplitudes, fortement modulés. Les structures de champ électrique ont une période ~ 3 ms ; elles ont des dimensions longitudinales de l'ordre du kilomètre et se propagent avec une vitesse modérée (~ 100 km/s) le long du champ magnétique terrestre. Les champs électriques parallèles supportés par de telles structures peuvent permettre d'accélérer les électrons vers la Terre, il faut néanmoins souligner que l'on doit cumuler les effets de quelques milliers de ces microstructures pour créer la différence de potentiel mesurée (~ 10 keV). Les structures non linéaires de ce type sont dénommées « solitons enveloppes », elles résultent de l'interaction non linéaire de deux ondes de fréquences différentes, l'onde de plus basse fréquence modulant l'onde de plus haute fréquence. Ces ondes sont engendrées par l'interaction du plasma ambiant avec les courants intenses montant le long des lignes de force aurorales.

LA RADIOSOURCE « TERRE »

L'émission de rayonnements électromagnétiques est une conséquence directe de l'accélération parallèle des électrons, et apparaît comme un

mécanisme universel, puisque des processus analogues se produisent dans les plasmas les plus reculés de notre univers. On sait maintenant que les environnements ionisés de tous les objets magnétisés du système solaire (y compris le Soleil) possédant une atmosphère dense émettent des rayonnements électromagnétiques intenses. La Terre n'échappe pas à cette règle : vue de l'espace interplanétaire, notre planète se comporte comme une radio-source qui émet une puissance de 10 à 100 Mégawatts dans le domaine des ondes kilométriques (fréquences centrées autour de 300 kHz). Ce rayonnement se propage à des distances de plusieurs unités astronomiques (1 ua ~ 150 millions de kilomètres) de la Terre et constitue, en quelque sorte, le « messenger » des processus d'accélération se produisant autour de notre planète. Son existence a été ignorée jusqu'en 1965 car il est engendré à haute altitude et ne peut traverser les couches denses de l'ionosphère. De fait, il a fallu disposer de satellites opérant très au-dessus de l'ionosphère pour

découvrir que la Terre était une puissante radio-source.

Le rayonnement kilométrique terrestre (RKT) est engendré le long des lignes de champ aurorales à des altitudes comprises entre 3000 et 15000 km. Il prend sa source à l'intérieur de cavités où la densité des particules du plasma est très faible ($\leq 1 \text{ cm}^{-3}$) ; les tailles de ces cavités sont typiquement de l'ordre de quelques dizaines de kilomètres dans la direction transversale par rapport au champ magnétique. La figure 2C1 montre un spectre dynamique fréquence-temps des fluctuations d'une composante électrique du RKT mesurées par le satellite Viking (lancé en 1986 par la fusée Ariane). Ce satellite a permis d'effectuer les premières mesures « *in situ* » des processus physiques se produisant dans les régions sources. Ces régions sont en fait celles décrites précédemment où se produit l'accélération parallèle des électrons vers la Terre. Le RKT forme la partie haute fréquence du spectrogramme, on observe que l'émission la plus intense a grossièrement la

forme d'un V aplati. L'intensité du rayonnement atteint son maximum lorsque la fréquence minimum (pointe du V) coïncide avec la fréquence cyclotron locale des électrons. Cette dernière est la fréquence naturelle de rotation des électrons autour du champ magnétique terrestre ; elle est indiquée par une ligne noire sur la figure 2C1.

Le RKT apparaît comme une instabilité électromagnétique engendrée à une fréquence naturelle du plasma. Approximativement 1 % de l'énergie cinétique des électrons énergétiques précipitants est ainsi convertie en énergie électro-magnétique. Le mécanisme le plus souvent évoqué pour rendre compte d'un tel rendement énergétique est le « maser-cyclotron » (voir encadré 2). L'existence d'un champ électrique parallèle, dirigé vers le haut, empêche les électrons de basse énergie, d'origine ionosphérique, de pénétrer dans la source. L'absence d'électrons thermiques favorise ainsi l'amplification d'ondes électromagnétiques par les électrons de haute énergie à des fréquences proches de la fréquence cyclotron

Encadré 2

LE MÉCANISME MASER-CYCLOTRON

Le principe de base du maser-cyclotron réside dans l'interaction résonnante entre une onde se propageant dans le plasma et les électrons énergétiques qui effectuent un mouvement de spirale autour du champ magnétique. L'amplification des ondes de polarisation droite, possédant un champ électrique tournant dans le même sens que les électrons autour du champ magnétique, est favorisée. Le mécanisme trouve sa pleine efficacité lorsque la phase relative entre l'onde amplifiée et l'électron varie peu. La condition de phase stationnaire s'écrit :

$$\omega - k_{\parallel} u_{\parallel} - \Omega_e / \Gamma = 0.$$

où ω est la pulsation de l'onde, k_{\parallel} son vecteur d'onde parallèle au champ magnétique et Ω_e la pulsation cyclotron des électrons. Le facteur de Lorentz $\Gamma = [1 - (u_{\parallel}^2 + u_{\perp}^2)/c^2]^{-1/2}$ s'exprime en fonction de la vitesse de la lumière c , ainsi que de u_{\parallel} et u_{\perp} les composantes respectivement parallèle et perpendiculaire de la vitesse des électrons.

Le facteur de correction relativiste Γ étant une fonction de u_{\perp} , la condition de phase stationnaire permet de coupler l'onde à l'énergie libre contenue dans la fonction de distribution des électrons dans la direction perpendiculaire au champ magnétique. L'échange d'énergie s'effectue au bénéfice de l'onde si la fonction de distribution des électrons énergétiques présente une pente positive dans la direction perpendiculaire au champ magnétique ($df/du_{\perp} > 0$) ; l'onde se trouve alors amplifiée dans cette direction. Ainsi que l'illustre la figure 3, une telle pente positive est naturellement formée à la suite de l'accélération parallèle des électrons dans le dipôle magnétique terrestre. La vitesse parallèle u_{\parallel} des électrons est tout d'abord accrue par la présence d'un champ électrique localisé, puis ces derniers se propagent vers la Terre dans un champ magnétique croissant voient leur composante perpendiculaire u_{\perp} croître au dépend de leur composante parallèle (conservation du premier invariant adiabatique). Il se forme ainsi une fonction de distribution des particules énergétiques en « fer à cheval » telle que $df/du_{\perp} > 0$.

électronique. Comme l'illustre la figure 3, la génération du RKT apparaît comme une conséquence directe de l'accélération parallèle des électrons vers la Terre.

Le satellite FAST a permis de mettre en évidence d'importantes variations temporelles et/ou spatiales dans les régions source du RKT. Des sursauts électromagnétiques de durée typique 1s apparaissent clairement sur le spectrogramme de la figure 2C2. Le RKT ne remplit pas uniformément la cavité où il est produit, les émissions électromagnétiques les plus intenses sont généralement confinées sur les bords de cette cavité. Par ailleurs, le spectre en fréquence du rayonnement n'est pas continu, ce qui prouve que les processus d'accélération parallèle des électrons sont intermittents. Le spectre apparaît composé d'un grand nombre de structures fines dérivant en fréquence. Ces dérives sont difficiles à interpréter si l'on se restreint à un modèle statique. Les observations semblent indiquer que les régions sources sont en fait composées d'une multitude de sources ponctuelles montant et descendant le long des lignes de champ magnétique.

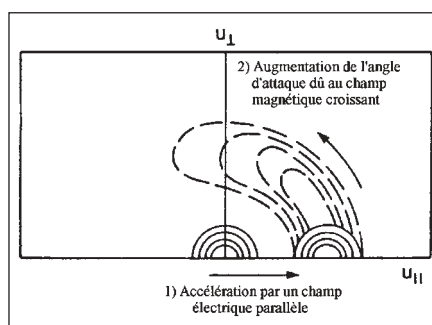


Figure 3 - Schéma représentant l'évolution des lignes de niveau de la fonction de distribution des électrons dans l'espace des vitesses u_{\parallel} , u_{\perp} et illustrant les processus de développement d'une fonction de distribution instable dans les régions sources du RKT. Les électrons sont tout d'abord accélérés le long des lignes de force aurorales (accroissement de leur composante de vitesse u_{\parallel}). Une fois accélérés, ils se propagent vers la Terre dans un champ magnétique croissant et voient leur composante perpendiculaire de vitesse croître au dépend de leur composante parallèle.

Les vitesses apparentes de ces sources ponctuelles peuvent varier de plusieurs centaines à quelques milliers de km/s. Les dérives en fréquence observées pourraient être engendrées par la présence de structures microscopiques très localisées, hautement non linéaires, qui joueraient ainsi le rôle d'antennes naturelles plongées dans le plasma.

CONCLUSION

Les plasmas circumterrestres des régions aurorales constituent un laboratoire privilégié « aisément accessible » pour aborder *in situ* l'étude de la chaîne complexe de mécanismes conduisant à l'accélération des particules chargées et à l'émission d'un intense rayonnement électromagnétique cohérent. L'universalité de ces mécanismes les rend transposables à l'étude des radio-sources lointaines, baignant dans des vents stellaires, qui sont et resteront inaccessibles à la mesure directe.

Bien que les aurores aient été mentionnées dans des textes datant de plusieurs milliers d'années et que les mécanismes physiques leur donnant naissance aient pu être étudiés récemment par des expériences embarquées à bord de véhicules spatiaux, elles gardent encore beaucoup de leurs mystères. Elles représentent de fait la manifestation visuelle des interactions turbulentes entre particules et champs électriques statiques et fluctuants. Ces interactions se produisent sur des échelles spatiales caractéristiques très diverses, variant de quelques centaines de mètres à plusieurs milliers de kilomètres, d'où la difficulté de les quantifier avec le seul point d'observation que constitue un satellite dans l'espace. Cependant, les données expérimentales récemment acquises par les expériences à haute résolution temporelle ont clairement mis en évidence le rôle essentiel joué par les processus à petite échelle dans le bilan des transferts de matière, de quantité de mouvement, et d'énergie qui s'établit à grande échelle entre la

magnétosphère, l'ionosphère et l'atmosphère. La présence de fines draperies lumineuses dans les aurores (dimensions transversales de l'ordre de quelques dizaines de mètres !) pourrait refléter – au niveau de la basse ionosphère – l'image de ces interactions à petite échelle. De même, la présence de structures fines dérivant en fréquence dans le spectre du RKT semble également plaider pour de telles interactions.

Les missions précédentes ont également démontré les limites de l'analyse des mesures fournies par un satellite unique. Dans une telle configuration, il est en effet extrêmement difficile de déterminer si les variations des différents paramètres mesurés correspondent à l'évolution temporelle du milieu ou bien au déplacement du satellite à travers des structures inhomogènes. De plus, les microstructures mesurées sont-elles un épiphénomène, superposées à des structures à plus grande échelle porteuses de différences de potentiel de quelques kV, ou bien au contraire doit-on cumuler les effets de quelques milliers de ces microstructures pour créer la différence de potentiel requise ? La présence de plusieurs satellites convenablement coordonnés permettrait de lever cette incertitude. Le dispositif expérimental doit être conçu de telle manière qu'il soit possible – pour des satellites situés à différentes altitudes – de réaliser des « rendez-vous » le long d'une même ligne de champ magnétique. Une telle mission internationale est actuellement à l'étude et devrait permettre, dans un proche avenir, une description plus approfondie des processus décrits dans cet article.

POUR EN SAVOIR PLUS

Dubouloz (N.), Pottlette (R.), Treumann (R.A.), Malingre (M.), « Turbulence Generated by a Gas of Electron Acoustic Solitons », *J. Geophys. Res.*, vol 98, A10, 17415-17422, 1993.

Dubouloz (N.), Delcourt (D.), Malingre (M.), Berthelier (J.J.), Chuginin (D.), « Remote analysis of cleft ion acceleration using thermal plasma measurements from Interbal Auroral Probe », *Geophys. Res. Lett.*, vol 25, n° 15, 1998.

The Fast Auroral Snapshot : (FAST), Selected papers ; *Geophys. Res. Lett.*, vol 25, n° 12, 1998.

Louarn (P.), Roux (A.), de Féraudy (H.), Le Quéau (D.), « Trapped electrons as a free energy source for the auroral kilometric radiation », *J. Geophys. Res.*, vol 95, A5, 5983-5995, 1990.
Pottelette (R.), Treumann (R.A.), Holmgren (G.), Dubouloz (N.), Malingre (M), « Acceleration and radiation from auroral cavitons », *AGU Monograph « Auroral Dynamics on the Chapman Conference »*, 253-265, 1994.

Pottelette (R.), Ergun (R.E.), Treumann (R.A.), Berthomier (M.), Carlson (C.W.), McFadden (J.P.), Roth (I.), « Modulated electron-acoustic waves in auroral density cavities: FAST observation », vol 26, n° 16, *Geophys. Res. Lett.*, 2629-2632, 1999.

Roux (A.), « Étude *in situ* de la plus proche des radiosources : la Terre », *Images de la Physique*, 62-67, 1989.

Article proposé par :
R. Pottelette, N. Dubouloz, M. Malingre, tél. 01 45 11 42 63,
Fax 01 48 89 44 33, Raymond.POTTELETTE@cetp.ipsl.fr