

Mise en évidence d'une énergie manquante dans les ceintures de radiation de la Terre

D. MOURENAS / CEA – DAM Île-de-France

A. V. ARTEMYEV / University of California, Los Angeles

O. V. AGAPITOV / University of California, Berkeley

V. KRASNOSELSKIKH / Laboratoire de physique et chimie de l'atmosphère et de l'espace (LPC2E), Unité mixte de recherche 7328 CNRS – Université d'Orléans

Les satellites sont constamment mis en danger par des électrons énergétiques issus du Soleil et piégés par le champ magnétique terrestre dans les ceintures de radiation. Des ondes électromagnétiques naturelles permettent de précipiter ces électrons dans l'atmosphère, limitant les risques pour les satellites et produisant des aurores boréales. Une analyse de dix ans de mesures d'ondes par les satellites européens *Cluster* a permis de révéler que 50 % de l'énergie totale était concentrée dans des ondes très obliques auparavant négligées. Ces dernières apparaissent à présent comme un élément crucial dans la redistribution de l'énergie au sein des ceintures de radiation en fonction de l'activité solaire [1].

Les satellites en orbite sont bombardés en permanence par des électrons relativistes qui risquent d'endommager gravement leur électronique. Parmi les ondes naturelles susceptibles de précipiter ces particules dans l'atmosphère et donc de réduire les doses de radiation sur les satellites, les plus efficaces sont les ondes électromagnétiques de type sifflement, générées par des éclairs atmosphériques ou des injections de particules provenant du Soleil. Ces ondes sont omniprésentes entre 6 000 et 40 000 km d'altitude dans les ceintures de radiation de Van Allen entourant la Terre, où elles régulent les forts flux d'électrons énergétiques. Par le passé, diverses limitations des mesures par satellite ont conduit à penser que ces ondes étaient très majoritairement parallèles au champ magnétique terrestre. Les modèles de météorologie spatiale décrivant l'évolution spatio-temporelle des flux d'électrons reposaient jusqu'ici sur cette hypothèse et éprouvaient de nombreuses difficultés à restituer les variations de flux observées.

En 2015, une analyse de dix ans de données des satellites *Cluster* a été conduite en collaboration avec le CNRS et l'université de Californie dans le but d'évaluer pour la première fois avec précision la distribution de l'énergie totale W de ces ondes de sifflement, qui dépend des composantes magnétiques et électriques des ondes et de l'indice de réfraction. La **figure 1** montre cette distribution d'énergie des ondes, pour deux latitudes λ , en

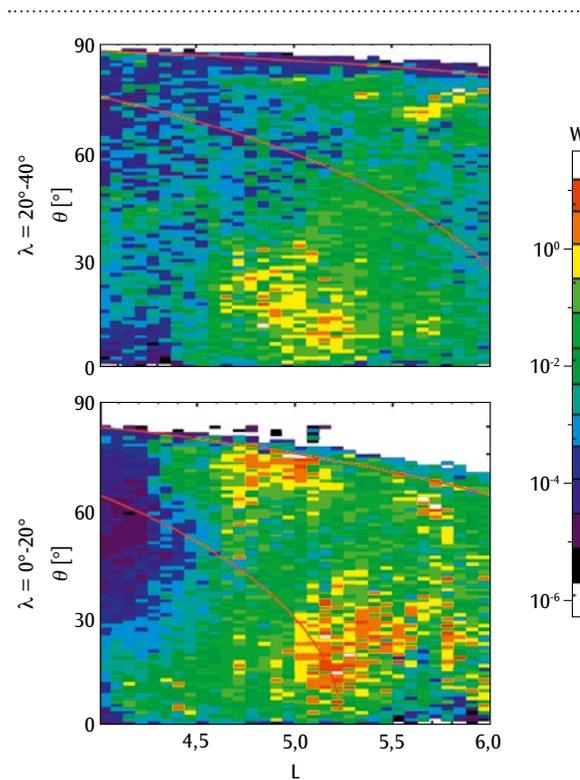


Figure 1. Distribution, issue de mesures par satellite, de l'énergie totale W (en mV^2/m^2) des ondes de sifflement, à deux latitudes $\lambda = 0^\circ\text{-}20^\circ$ et $\lambda = 20^\circ\text{-}40^\circ$, en fonction d'une part de la distance relative L à la Terre, d'autre part de l'obliquité θ des ondes par rapport à celle du champ magnétique terrestre (adapté de [1]). Les courbes en rouge délimitent les zones de forte obliquité. La présence d'ondes obliques était inattendue. Toutes latitudes confondues, 50 % de l'énergie totale est contenue dans ces ondes obliques.

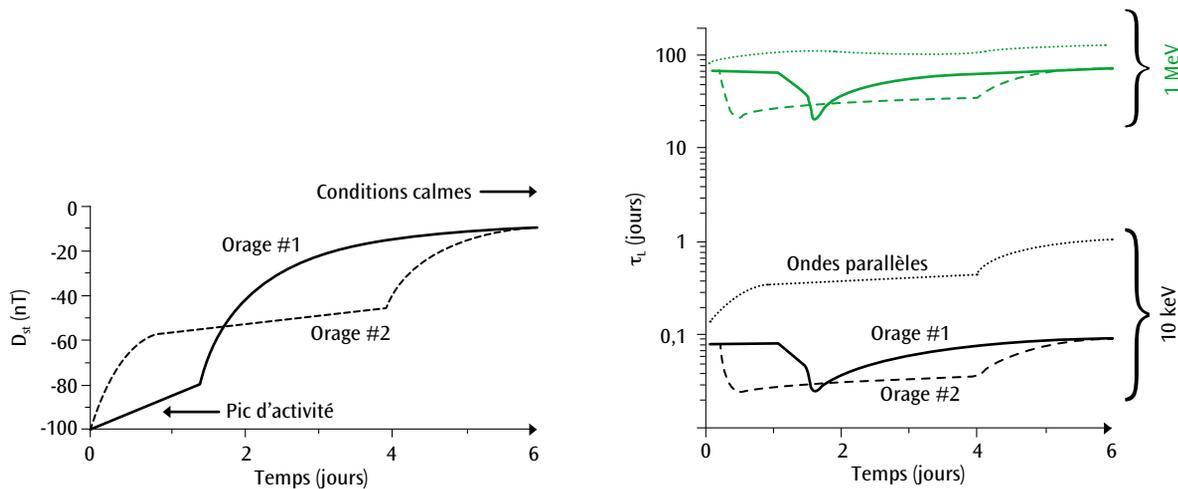


Figure 2.

Variation des temps de vie τ_e d'électrons de 10 keV et de 1 MeV lors de deux orages magnétiques. (À gauche) Profil temporel de l'indice D_{st} d'activité magnétique pour les deux orages #1 et #2. (À droite) Les pointillés correspondent aux résultats de simulation des ondes parallèles pour l'orage #2; ils sont similaires pour l'orage #1. Les courbes continues (orage #1) et tirets (orage #2) correspondent aux résultats de simulation employant une distribution réaliste de l'obliquité θ provenant de mesures par satellite (adapté de [1]). Deux orages de même intensité peuvent conduire à des temps de vie et donc à des flux d'électrons très différents.

fonction de leur obliquité θ par rapport au champ magnétique et de la distance L au centre de la Terre (normalisée au rayon terrestre) à l'équateur. Elle révèle la présence inattendue d'une proportion importante d'ondes très obliques à $\theta = 60^\circ$ à 90° . L'énergie des ondes obliques apparaît en général similaire ou même parfois supérieure à celle des ondes quasi parallèles à $L = 3-6$ dans des conditions d'activité géomagnétique (ou solaire) relativement modérée, particulièrement à moyenne et haute latitude. Une large portion manquante de l'énergie des ondes de sifflement est en fait stockée dans ces ondes obliques sous une forme électrostatique – pratiquement invisible pour les antennes magnétiques des premiers satellites.

Les conséquences sont multiples. Tout d'abord, il a été démontré par des simulations numériques et des mesures conjuguées de satellites en orbite haute et basse que ces ondes, à des latitudes de 10° à 40° , sont beaucoup plus efficaces que les ondes parallèles pour précipiter les électrons dans l'atmosphère [2]. Leur effet sur les temps de vie (avant précipitation) des électrons dans les ceintures de radiation a été évalué: les ondes obliques réduisent fortement les temps de vie des électrons entre 100 eV et 1 MeV par rapport aux ondes quasi parallèles (figure 2). Pour deux orages magnétiques d'intensité similaire, la variation de la proportion d'ondes obliques peut conduire à davantage de précipitations au cours d'un des deux orages, offrant une explication plausible à la grande variabilité des comportements observés lors des orages [1,2]. Enfin, en modulant le taux de précipitation d'électrons dans la haute atmosphère, les ondes obliques peuvent modifier la conductivité et la composition chimique locales, affectant indirectement les équilibres globaux de l'environnement terrestre [1].

Les ondes obliques apparaissent comme un élément crucial pour une restitution fidèle de la dynamique des ceintures de radiation, et sont maintenant prises en compte dans les modèles du CEA. Des travaux théoriques ont aussi permis de commencer à évaluer l'importance des effets non linéaires des ondes obliques les plus intenses par rapport aux ondes parallèles [3]. Des mesures des *Van Allen Probes*, une mission spatiale de la Nasa lancée en 2012, ont ainsi permis de mettre en évidence des phénomènes d'accélération non linéaire d'électrons jusqu'à 250 keV par les ondes obliques, persistant 6 heures durant au sein d'une vaste région proche de l'orbite géostationnaire [4]. Les études se poursuivent pour mieux évaluer ces différents phénomènes et leurs conséquences sur les satellites en orbite.

Références

- [1] O. V. AGAPITOV, A. V. ARTEMYEV, D. MOURENAS, V. KRASNOSELSKIKH, F. S. MOZER, "Wave energy budget analysis in the Earth's radiation belts uncovers a missing energy", *Nature Commun.*, **6**, p. 8143 (2015).
- [2] W. LI, D. MOURENAS, A. V. ARTEMYEV *et al.*, "Evidence of stronger pitch-angle scattering loss caused by oblique whistler-mode waves as compared with quasi-parallel waves", *Geophys. Research Lett.*, **41**, p. 6063 (2014).
- [3] A. V. ARTEMYEV, A. A. VASILIEV, D. MOURENAS, A. I. NEISHTADT, O. V. AGAPITOV, V. KRASNOSELSKIKH, "Probability of relativistic electron trapping by parallel and oblique whistler-mode waves in Earth's radiation belts", *Phys. Plasmas*, **22**, 112903 (2015).
- [4] O. V. AGAPITOV, A. V. ARTEMYEV, D. MOURENAS, F. S. MOZER, V. KRASNOSELSKIKH, "Nonlinear local parallel acceleration of electrons through Landau trapping by oblique whistler-mode waves in the outer radiation belt", *Geophys. Res. Lett.*, **42**, p. 10140-10149 (2015).