

Évaluation des flux d'électrons dans la magnétosphère

■ D. MOURENAS - J.-F. RIPOLL / CEA-DAM Île-de-France

Les satellites sont constamment soumis aux électrons énergétiques en provenance du soleil qui sont piégés par le champ magnétique terrestre dans des ceintures de radiations. Les doses reçues par l'électronique dépendent fortement de l'activité solaire et de la dynamique de la magnétosphère, en particulier des ondes électromagnétiques qui transportent les électrons d'une ligne de champ à une autre ou les précipitent dans l'atmosphère. L'objet de ce travail est le calcul analytique du temps de vie de ces électrons, nécessaire aux calculs de dose et utilisable dans des modèles globaux de prévision de météorologie spatiale. Leur utilisation pourrait à terme accélérer ces modèles et aider à estimer leur fiabilité.

La Terre est soumise en permanence au vent solaire, un flux de particules chargées éjecté de la haute atmosphère du soleil, et à des éjections de masse en provenance de ce même astre. Le champ géomagnétique sert de bouclier à la Terre, la protégeant de ces flux de particules dont il infléchit la trajectoire comme une étrave, protégeant en partie les satellites (figure 1). En période de forte activité solaire, la pression du vent solaire devient telle que ce bouclier magnétique est repoussé plus près de la Terre : c'est ce qu'on appelle des orages magnétiques ou encore des tempêtes solaires. Alors, les satellites qui traversent les ceintures de radiations de Van Allen (figure 2) sont moins protégés.

L'électronique des satellites est très sensible aux flux d'électrons d'énergie E supérieure à 1 MeV [1]. Récemment, plusieurs satellites ont

ainsi été rendus inopérants suite à des tempêtes solaires. Étant donné le coût élevé des satellites et leur importance croissante pour la défense et les échanges économiques, il est souhaitable de disposer d'une météorologie spatiale, c'est-à-dire de moyens de surveillance et de prévision des risques pour les satellites en fonction des conditions naturelles très variables induites par l'activité solaire [1].

Des satellites de surveillance sont d'ores et déjà positionnés pour mesurer les fluctuations du vent solaire. Des codes de magnétohydrodynamique (MHD) et particuliers sont aussi développés pour rendre compte de la déformation des ceintures de Van Allen au cours des orages et des variations des flux d'électrons sur les orbites des satellites. L'objectif est de calculer la dose totale D de radiations (en rads) reçue par un satellite en

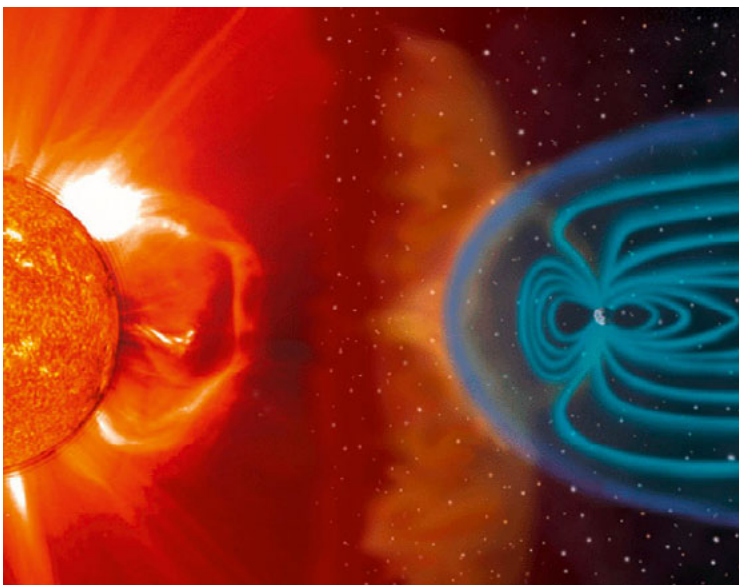


Figure 1. Illustration d'une éruption solaire, du vent solaire et du champ géomagnétique qui entoure et protège la Terre. Lors d'orages magnétiques, le flux de particules peut devenir suffisamment important pour endommager l'électronique des satellites en orbite (© NASA).

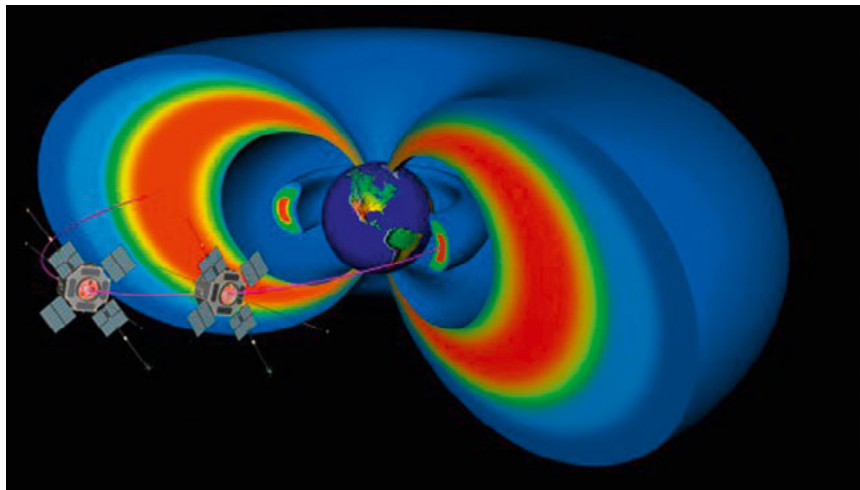


Figure 2. Les deux ceintures de radiations qui entourent la Terre et les satellites en orbite qui les traversent. Découvertes en 1958 par Van Allen, elles sont constituées d'une population d'électrons énergétiques piégés sur les lignes de champ magnétique terrestre (© JH-APL).

quelques mois: $D \sim 10^{-8} F \times \tau$, avec F le flux omnidirectionnel initial d'électrons énergétiques (en $e/cm^2/s$). Mais pour ce faire, les codes globaux doivent disposer d'évaluations des temps de vie τ des électrons piégés, habituellement effectuées avec d'autres codes de type Fokker-Planck, très coûteux en temps de calcul. Cela limite actuellement l'utilisation des temps de vie dans les codes de *météorologie spatiale* à des valeurs tabulées pour des conditions naturelles fixées, réduisant par conséquent la précision des simulations. En outre, cela empêche de déterminer la sensibilité des résultats des simulations globales des ceintures de radiations aux conditions naturelles.

Un modèle analytique approché du temps de vie τ des électrons a été développé au CEA - DAM Île-de-France, permettant de décrire leur précipitation dans l'ionosphère par les ondes électromagnétiques naturelles de très basse fréquence de type «sifflement», sur des orbites relativement proches de la Terre [2]. Ce modèle est basé sur différentes simplifications idoines du calcul de τ , dont la formulation exacte contient cinq intégrales imbriquées, en angle d'attaque des particules, latitude géomagnétique, fréquence et angle des ondes et harmoniques cyclotroniques. Les approximations employées permettent des intégrations analytiques par parties et conduisent *in fine* à une expression analytique de τ en fonction de la fréquence moyenne et de la largeur de la distribution en angle des ondes, de leur intensité, et des paramètres de la magnétosphère.

Les formules analytiques obtenues ont été validées par comparaison à des simulations numériques complètes réalisées avec le code Fokker-Planck du CEA - DAM Île-de-France (figure 3). Ce modèle a ensuite été amélioré en collaboration avec le CNRS (LPC2E) en étendant son domaine d'utilisation jusqu'aux orbites GPS et géostationnaires [3]. Son utilisation pourrait à terme accélérer les prévisions de *météorologie spatiale*, mais aussi aider à estimer leur fiabilité. Ce modèle pourrait

surtout permettre de déterminer les paramètres (plasma/ondes) que devraient mesurer en priorité les satellites de surveillance, et les processus les plus critiques pour une évaluation précise de l'évolution des flux d'électrons dans la magnétosphère.

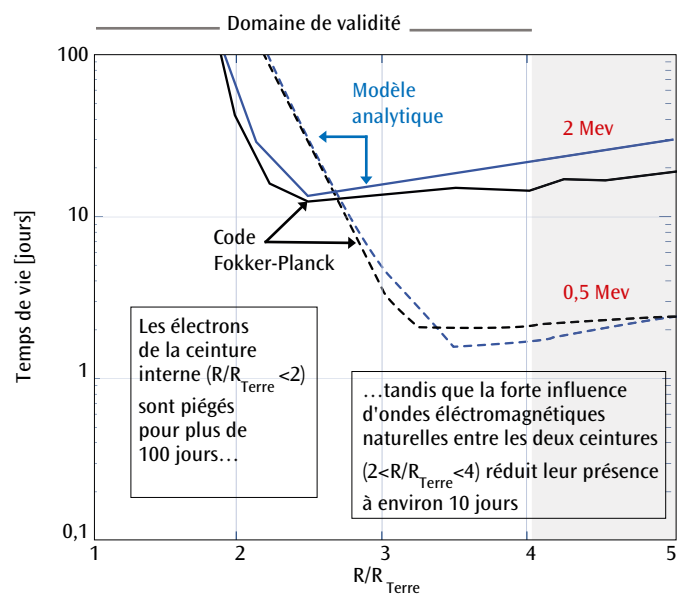


Figure 3. Temps de vie des électrons en jours dans les ceintures de Van Allen en fonction de la distance à la Terre au niveau de l'équateur. Comparaisons entre le modèle analytique et les résultats d'un code Fokker-Planck.

Références

- [1] N. IUCCI, *et al.*, "Space weather conditions and spacecraft anomalies in different orbits", *Space Weather*, 3, S01001 (2005).
- [2] D. MOURENAS, J.-F. RIPOLL, "Analytical estimates of quasi-linear diffusion coefficients and electron lifetimes in the inner radiation belt", *J. Geophys. Res.*, 117, A01204 (2012).
- [3] D. MOURENAS, A. ARTEMYEV, J.-F. RIPOLL, O. AGAPITOV, V. KRASNOSELSKIKH, "Timescales for electron quasi-linear diffusion by parallel and oblique lower-band chorus waves", *J. Geophys. Res.*, 117, A06234 (2012).