

# Les ceintures de radiation de Van Allen

V. Pierrard et D. Heynderickx

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

## Introduction

Les ceintures de radiation de Van Allen furent découvertes au début de l'ère spatiale et furent immédiatement reconnues comme étant d'une importance considérable pour les missions spatiales. Il s'agit de régions toroïdales formées par des particules chargées électriquement, très énergétiques, qui sont piégées dans le champ magnétique terrestre. Le champ magnétique trouve son origine dans le noyau terrestre où les mouvements du magma riche en métaux conducteurs transforment la Terre en un immense aimant. La région de l'espace où le champ magnétique terrestre est dominant par rapport au champ magnétique interplanétaire est appelée la magnétosphère de la Terre; elle est représentée sur la figure 1.

La structure géométrique du champ magnétique terrestre est quasi-dipolaire, c'est-à-dire similaire à celle d'un barreau aimanté. Mais à grande distance, le vent solaire comprime le champ du côté du Soleil et étend les lignes de champ en une longue queue de plusieurs centaines de rayons terrestres du côté opposé au Soleil. Dans la direction du Soleil, la magnétosphère ne s'étend que jusqu'à 10 rayons terrestres environ.

Les particules des ceintures de Van Allen, principalement des électrons, des protons et quelques ions plus lourds, possèdent des énergies cinétiques supérieures à 30 keV. Bien que ces particules ne contribuent pas significativement à la densité magnétosphérique (principalement due aux particules d'énergies entre 10 eV et 30 keV), ces particules de haute énergie constituent une popu-

lation importante car elles peuvent endommager les composants électroniques et les cellules photoélectriques des satellites. De plus, ces particules énergétiques peuvent affecter les mesures effectuées dans l'espace, charger électriquement la surface du satellite, abîmer les composants optiques, sans compter qu'elles constituent un danger pour les équipages spatiaux. Pour les protéger, des écrans doivent être placés. C'est pourquoi des modèles empiriques et physiques de cet environnement énergétique de la Terre ont été élaborés.

## Description des ceintures

Les ceintures de radiation terrestres ont été découvertes en 1958 par James Van Allen, grâce au compteur Geiger qu'il avait embarqué à bord du premier satellite américain Explorer I. On sait que d'autres

planètes possèdent également des ceintures de radiation. Celles de Jupiter ou Saturne ont été étudiées de façon assez détaillée. Pour que de telles ceintures existent, il faut que le dipôle magnétique de la planète soit suffisamment important de sorte que le vent solaire soit arrêté bien au-dessus de l'atmosphère et de la surface de la planète.

Pour la Terre, on distingue deux ceintures différentes: la ceinture intérieure et la ceinture extérieure.

La ceinture intérieure s'étend jusqu'à environ 4 rayons terrestres dans le plan équatorial. Elle contient des protons qui ont des énergies comprises entre 100 keV<sup>1</sup> et plusieurs

<sup>1</sup> L'électron-volt (eV) est l'unité d'énergie utilisée pour les particules atomiques et correspond à l'énergie cinétique acquise par un électron accéléré par une différence de potentiel de 1 Volt. Un proton de 100 KeV se déplace à la vitesse de 4.400 km/s.

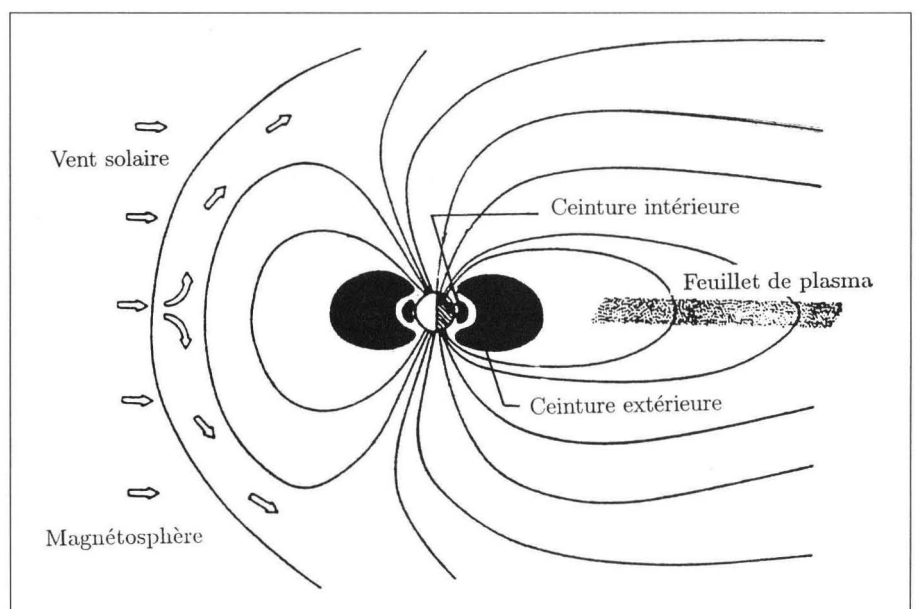


Figure 1. Illustration schématique de la magnétosphère dans le méridien midi-minuit. Le Soleil est sur la gauche de la figure. Le vent solaire déforme les lignes de force du champ magnétique terrestre qui sont comprimées du côté jour et étirées du côté nuit.

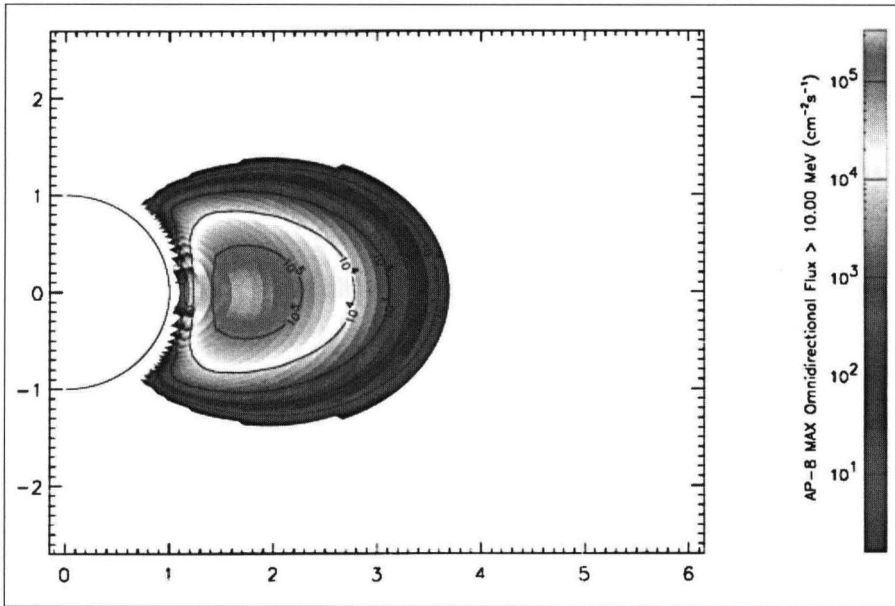


Figure 2. Carte représentant les flux intégraux des protons  $>10$  MeV donnés par le modèle empirique AP-8 au maximum d'activité solaire. Le modèle AP-8 donne le flux moyen mesuré en chaque endroit par différents satellites. Le demi cercle représente la surface terrestre et les distances sont exprimées en rayons terrestres.

centaines de MeV et des électrons qui ont des énergies entre quelques dizaines de keV et 10 MeV.

La population de protons très énergétiques ( $>10$  MeV) est confinée aux altitudes inférieures à 20000 km. La figure 2 montre la distribution des protons d'énergies  $>10$  MeV en coordonnées invariantes, telle que prédite par le modèle NASA AP-8 MAX.

Dans cette zone, les protons et électrons de haute énergie sont produits par désintégration de neutrons. En effet, lorsque des rayons cosmiques (CRAND) ou lorsque des protons très énergétiques d'origine solaire (SPAND) heurtent des atomes d'azote ou d'oxygène de l'atmosphère, cela produit une réaction nucléaire au cours de laquelle un neutron est créé. Environ 10 % de ces neutrons s'échappent vers l'espace et se décomposent rapidement en protons et électrons. Ces derniers sont captés par le champ magnétique.

La ceinture extérieure est principalement composée d'électrons énergétiques de quelques MeV. Elle s'étend jusqu'à 10 rayons terrestres dans le plan équatorial. La figure 3 montre la population d'électrons de plus de 1 MeV donnée par le modèle NASA AE8-MAX.

Entre la ceinture intérieure et la ceinture extérieure apparaît une région de "faille" où le flux d'électrons diminue avant de remonter dans la zone externe. La localisation et l'étendue de la ceinture intérieure, de la faille et de la zone extérieure dépendent de l'énergie des électrons, les électrons les plus énergétiques étant confinés dans la ceinture intérieure. Aux hautes latitudes, la ceinture extérieure des électrons atteint de très basses altitudes. La popu-

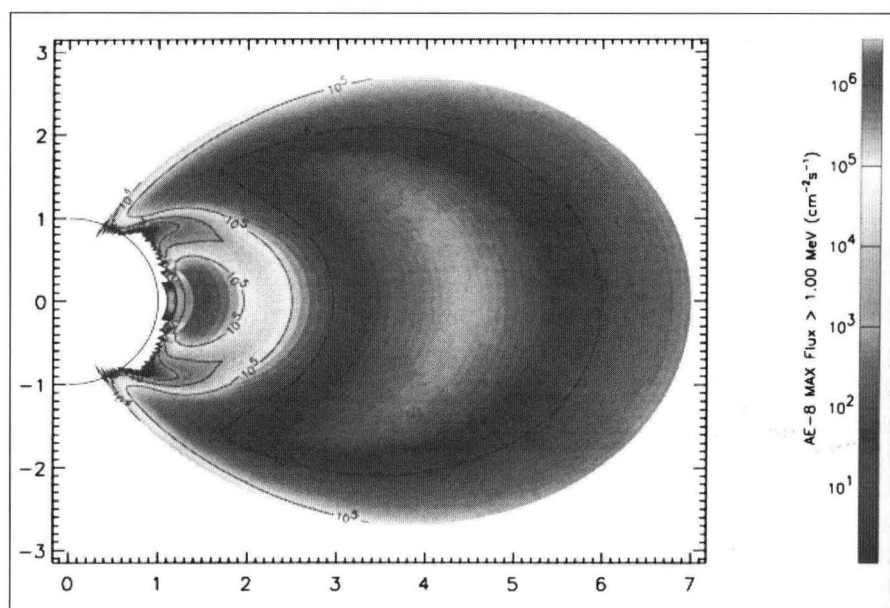


Figure 3. Carte représentant les flux intégraux des électrons  $>1$  MeV donnés par le modèle AE-8 au maximum d'activité solaire (cf figure 2).

lation électronique de la zone extérieure varie beaucoup plus rapidement au cours du temps que dans la ceinture intérieure. Les sources principales de particules dans la ceinture extérieure sont le vent solaire et l'ionosphère.

Les particules piégées peuvent être perdues par collisions avec l'atmosphère terrestre. En particulier, les protons qui descendent trop bas dans l'atmosphère ont tendance à perdre leur charge. En dessous de 400 km environ, l'intensité des ceintures de radiation est basse car les particules subissent beaucoup de collisions. Par contre, à une distance radiale de 8000 km, les particules peuvent rester piégées dans le champ magnétique durant plusieurs années. L'intensité des flux dépend considérablement de l'altitude et également du temps dans la zone externe. Le flux de protons de très hautes énergies rencontrés dans la zone interne sont les plus dommageables pour les satellites.

### *Mouvement des particules dans les ceintures*

En première approximation, on peut considérer que les électrons et les protons des ceintures se déplacent indépendamment les uns des autres en un mouvement que l'on peut

décomposer en trois mouvements superposés:

- Un mouvement de giration le long des lignes du champ magnétique.
- Un mouvement d'oscillation entre deux points miroirs, situés dans chaque hémisphère (mouvement du centre guide).
- Un lent mouvement de dérive en longitude vers l'ouest pour les protons et les ions, et vers l'est pour les électrons.

Aux points de réflexion (point miroir), l'angle d'attaque entre le vecteur vitesse et le champ magnétique devient égal à 90 degrés en arrivant dans des régions où l'intensité du champ magnétique est plus élevée et la particule repart dans l'autre sens.

Les trois composantes du mouvement, qui sont représentées sur la figure 4, ont généralement des périodes très différentes: typiquement, quelques millisecondes pour le mouvement de giration autour de la ligne de champ, quelques secondes pour les oscillations en latitudes et quelques heures pour la dérive en longitude. Cependant, lorsque l'énergie des particules est très élevée, les trajectoires des particules deviennent beaucoup plus complexes.

L'ensemble de ces mouvements explique la forme toroïdale des ceintures. L'axe de symétrie des ceintures coïncide avec l'axe du dipôle magnétique terrestre. Celui-ci est incliné de 11 degrés par rapport à l'axe de rotation de la Terre. De plus, le centre du dipôle est décentré de plus de 500 km dans la direction du Pacifique Nord par rapport au centre de gravité de la planète. A cause de ce décentrage, les protons énergétiques pénètrent plus profondément dans l'atmosphère de la Terre au-dessus de l'Atlantique Sud. Cette région est appelée l'Anomalie Sud Atlantique (SAA). La figure 5 représente une carte du monde des protons >10 MeV piégés à 500 km d'altitude. La région de la SAA y est clairement visible, les flux de protons étant négligeables en dehors de cette zone à cette altitude.

Le mouvement azimuthal des ions et des électrons dans des directions opposées produit une gigantesque spire de courant qui est responsable de la décroissance de l'intensité de la composant horizontale du champ magnétique durant les orages magnétiques.

Du fait du mouvement des particules, les flux des ceintures de radiation sont cartographiés dans un système de coordonnées géomagnétique (B,L) introduit par McIlwain en

1961. B est l'intensité du champ magnétique au point de mesure et L est un paramètre donnant la distance radiale à l'équateur (en rayons terrestres) de la coquille magnétique d'une particule piégée dont l'angle d'attaque est 90 degrés au point d'observation. Pour des particules qui ont un point miroir en ce point, B et L sont des invariants du mouvement.

### *Dynamique des particules piégées*

Dès leur découverte, les ceintures de radiation furent considérées comme un danger potentiel pour les missions spatiales. Par conséquent, des modèles des populations de protons et d'électrons piégés furent élaborés dès les années 60 par la NASA: en particulier, les modèles empiriques AP-8 pour les protons et AE-8 pour les électrons furent utilisés comme standard dans les années septantes pour évaluer les distributions moyennes de particules dans les ceintures. Ces modèles sont basés sur des moyennes des flux mesurés en diverses régions de l'espace par différents satellites. Néanmoins, la mission CRRES des années nonantes a démontré que d'importantes variations spatiales et temporelles affectent les ceintures et requièrent des modèles plus complexes que les

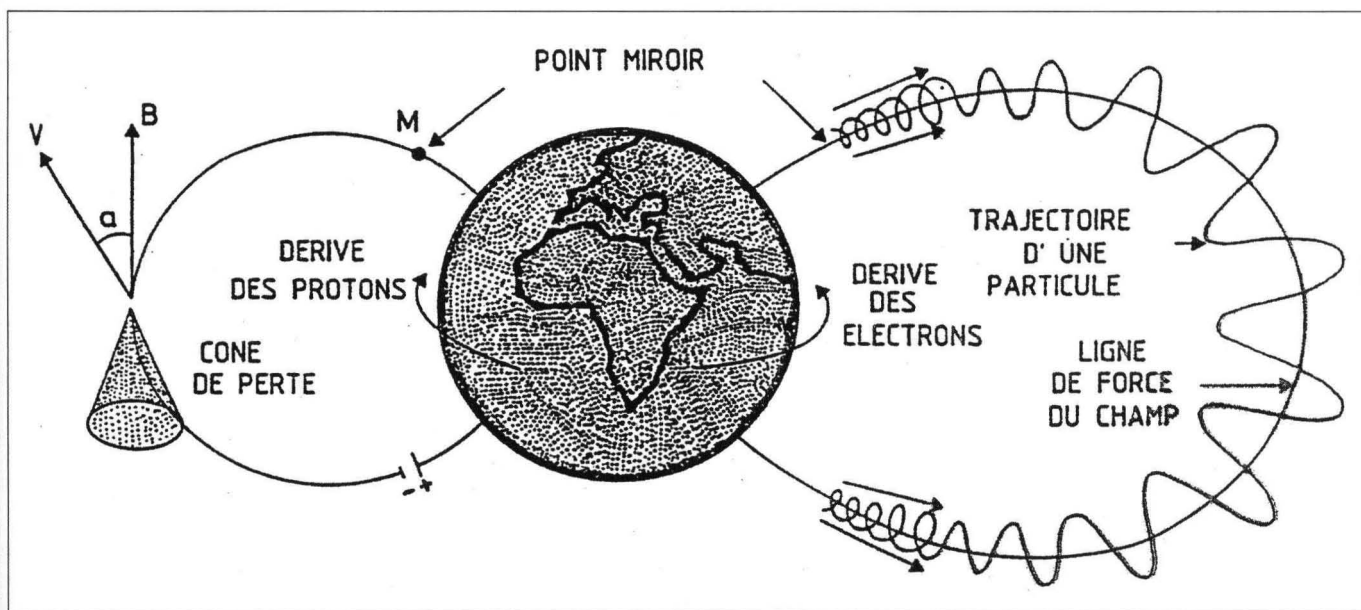


Figure 4. Mouvement des particules dans les ceintures de radiation.

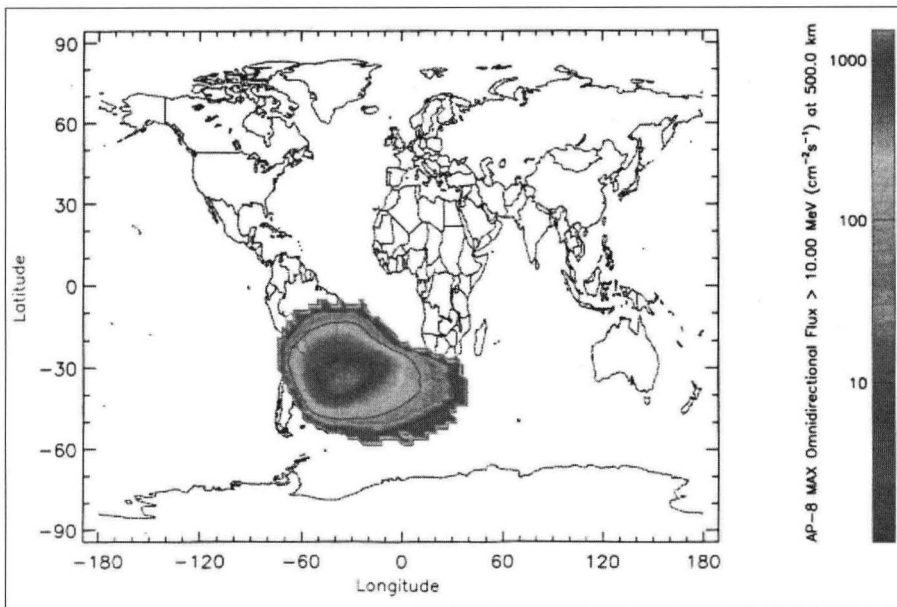


Figure 5. Carte du monde des flux intégraux de protons >10 MeV de AP-8 MAX à 500 km d'altitude: l'Anomalie Sud Atlantique.

modèles statiques utilisés précédemment.

La population de particules piégées est dynamique sur différentes échelles de temps.

**Effet du cycle solaire :** La variation du cycle solaire avec une périodicité de 11 ans induit une périodicité des flux d'électrons et de protons piégés. En effet, durant le maximum d'activité solaire, l'atmosphère neutre de la Terre s'étend plus que durant le minimum, de sorte que les bords inférieurs (à basse altitude) des ceintures sont érodés par les interactions accrues avec les constituants de l'atmosphère neutre.

**Mouvement séculaire du champ magnétique :** La localisation du centre du dipôle géomagnétique dérive de 2.5 km par an par rapport au centre de la Terre. La séparation excède actuellement 500 km. En outre, le moment magnétique diminue avec le temps. Il en résulte un lent mouvement de dérive des ceintures vers les régions internes ainsi qu'un mouvement de dérive d'environ 0.3 degré par an de l'Anomalie Sud Atlantique vers l'Ouest.

**L'anisotropie des protons de basse altitude :** A basse altitude (typiquement en-dessous de 2000 km), les particules piégées interagissent avec l'atmosphère neutre. Le rayon de giration des protons

piégés qui ont des énergies supérieures à 1 MeV est comparable à la hauteur d'échelle de l'atmosphère, ce qui signifie que durant leur mouvement de giration, ils rencontrent différentes densités. Du coup, les flux de protons dépendent de la direction dans le plan perpendiculaire au vecteur du champ magnétique local. L'anisotropie qui en résulte est appelée l'effet Est-Ouest et peut causer des différences d'un facteur trois ou plus dans les flux provenant de différentes directions.

**Conditions magnétosphériques :** En plus des termes de variations à longue échelle de temps, des variations beaucoup plus rapides se produisent dans les ceintures de radiation. En particulier, la zone extérieure des électrons peut varier en intensité de plusieurs ordres de magnitudes sur une période de quelques heures. Les orages magnétiques influencent également la population de protons. Ainsi, l'orage magnétique de mars 1991, observé par le satellite CRRES, créa l'apparition d'une seconde ceinture de protons. Cette nouvelle ceinture mit plusieurs mois avant de disparaître.

L'Institut d'Aéronomie Spatiale de Belgique (IASB-BIRA) a développé pour l'Agence Spatiale Européenne (ESA) un système qui permet de modéliser les flux de particules dans l'environnement spatial ainsi que

leurs effets sur les systèmes et les satellites. Ce système appelé Space ENVironment Information System (SPENVIS) est accessible sur la toile à l'adresse:

<http://www.spennis.oma.be/spennis/>

Il permet d'analyser et de cartographier les flux de particules mesurés par de nombreux satellites dans les ceintures. Il est également possible d'évaluer les flux qui seront rencontrés par un satellite en introduisant les paramètres de son orbite. Des calculs de doses de radiation sont fournis. L'influence de l'activité solaire et le mouvement séculaire du centre du dipôle terrestre ont également été modélisés. Ce système permet d'améliorer la prédiction des spectres d'énergie et des doses de radiation accumulées par un véhicule spatial se déplaçant dans la magnétosphère. Ils sont utiles afin de calculer le temps de vie et de détérioration des cellules photo-électriques, des panneaux solaires et d'autres équipements électroniques, ainsi que les protections à envisager pour les missions habitées.

## Références

- HEYNDERICKX, D., Overview of radiation belt modelling, *Journ. British Interplan. Soc.*, 53, 3/4, 74, 2000.
- LEMAIRE, J., The Earth radiation belts: new models, *N. S. T.*, 13, 2, 191, 1995.
- PIERRARD V., Ajustements des spectres du modèle AE-8 des ceintures de radiation de Van Allen, *Rapport de DEA*, 1993. UCL. ■

