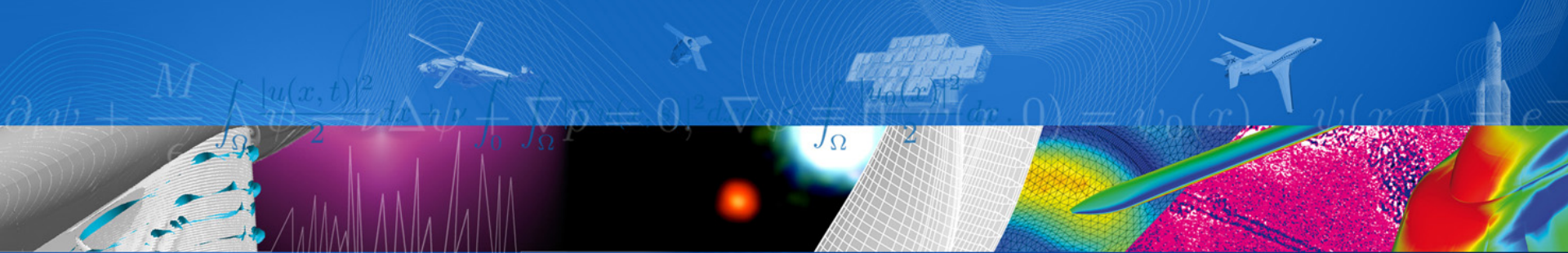


ONERA

THE FRENCH AEROSPACE LAB

retour sur innovation

www.onera.fr



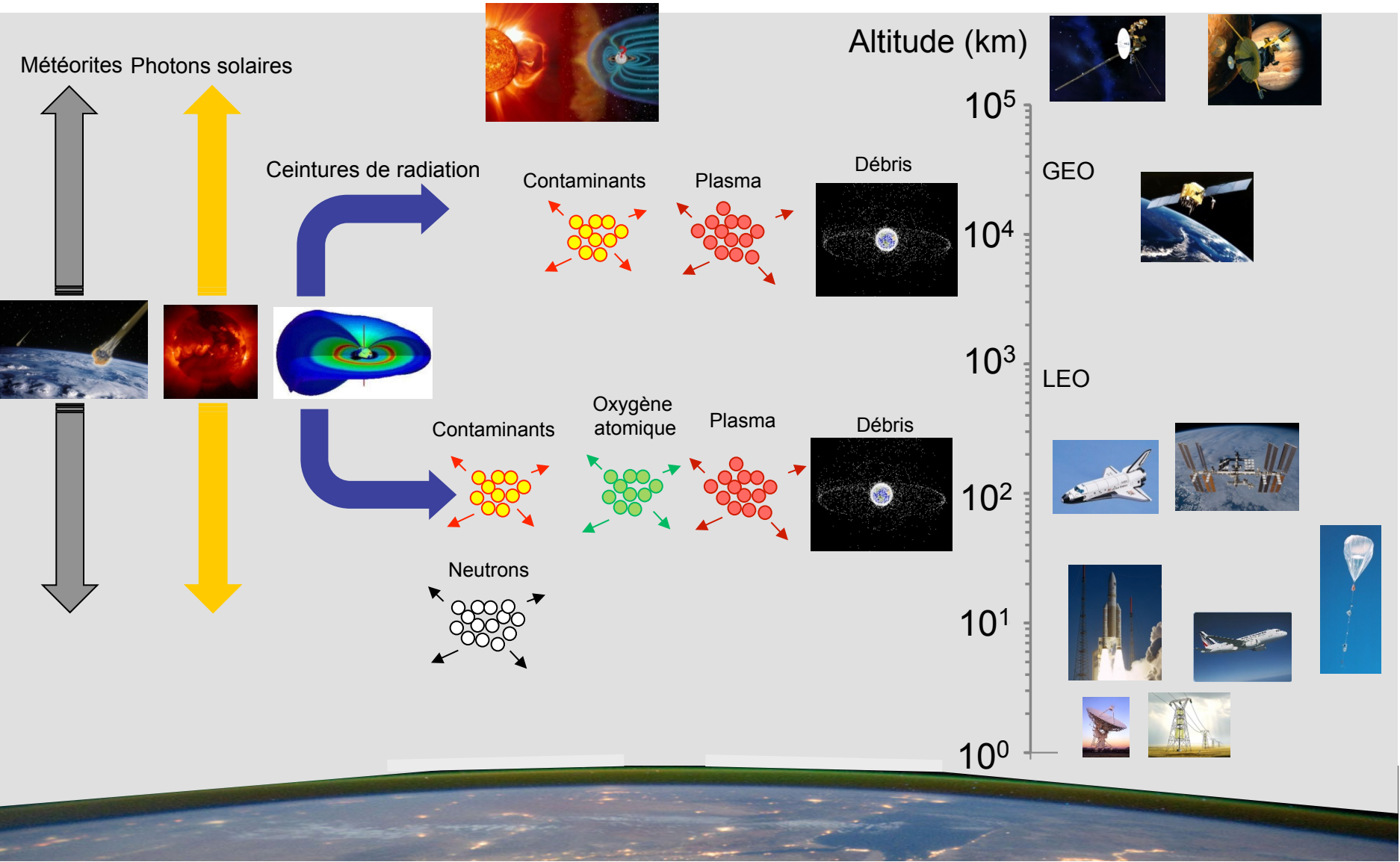
Les ceintures de radiation

A. Sicard-Piet (ONERA/DESP)



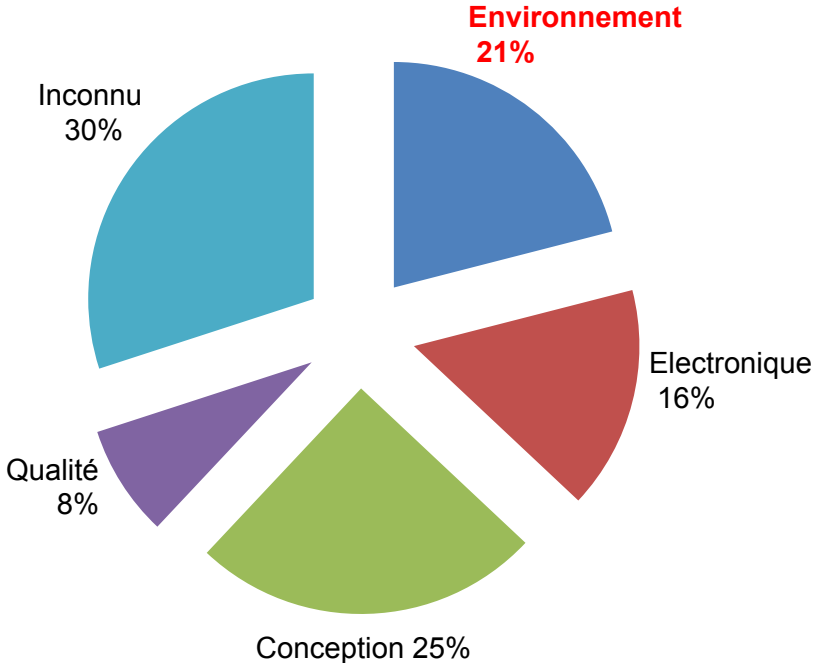
retour sur innovation

Environnement spatial: *un milieu hostile*

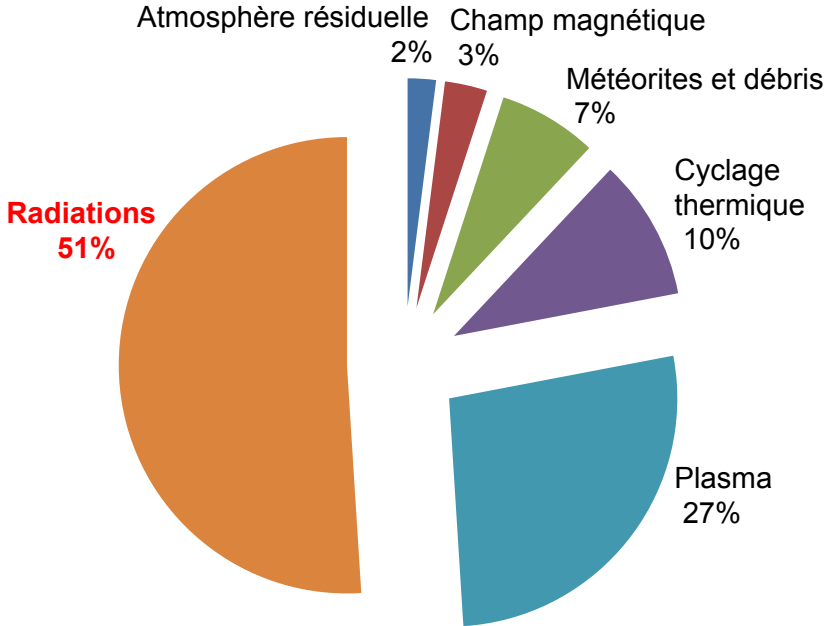


Environnement spatial: statistique des anomalies en orbite

Anomalies sur **USAF 1960-1964**



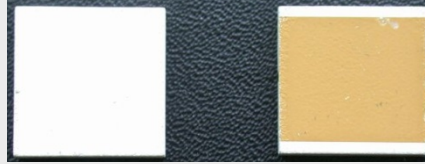
D'où viennent les anomalies dues à l'environnement ?



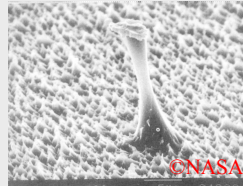
Environnement spatial: *les effets majeurs*

Effets cumulatifs

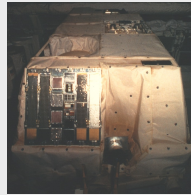
* **Vieillissements**
revêtements thermiques,
optiques, électroniques



* **Erosions**



* **Contaminations**



Effets sur les humains

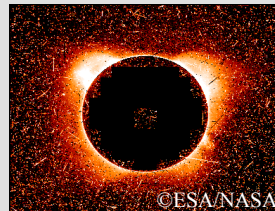
* **Proportionnels**

* **Stochastiques**
(retardés)

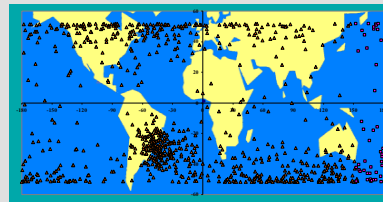


Effets sporadiques

* **Bruits**
détecteurs, optiques

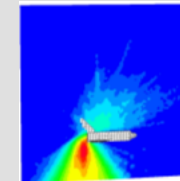


* **Evénements singuliers**
dans les circuits électroniques
à forte intégration

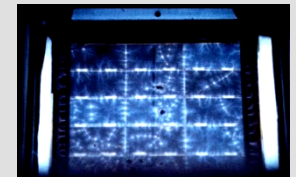
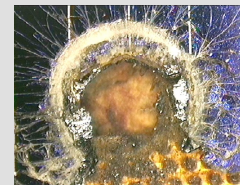


* **Décharges électrostatiques**

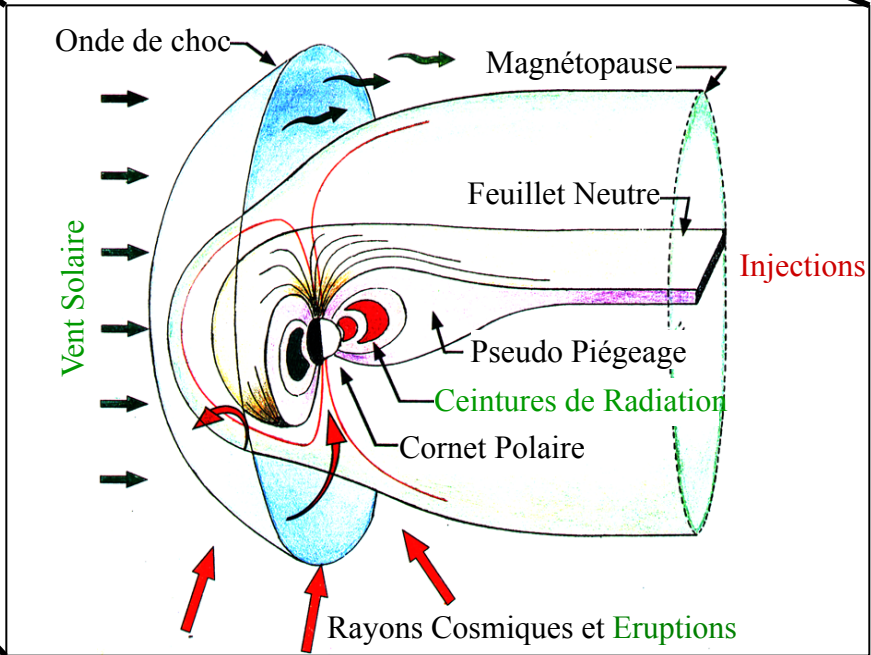
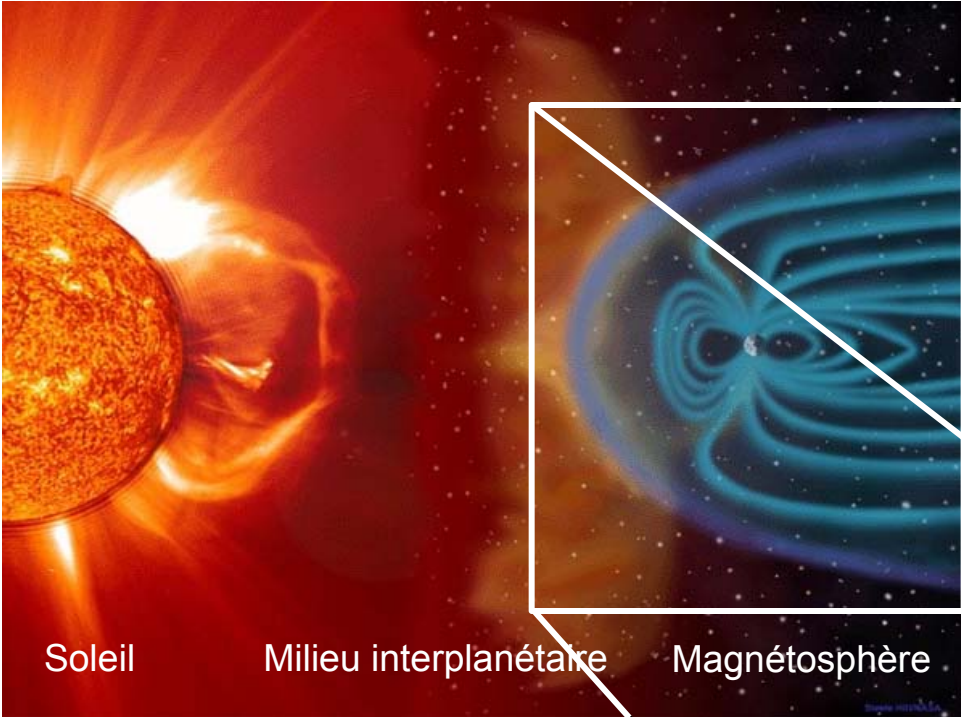
* **Biais de mesures**



* **Impacts**

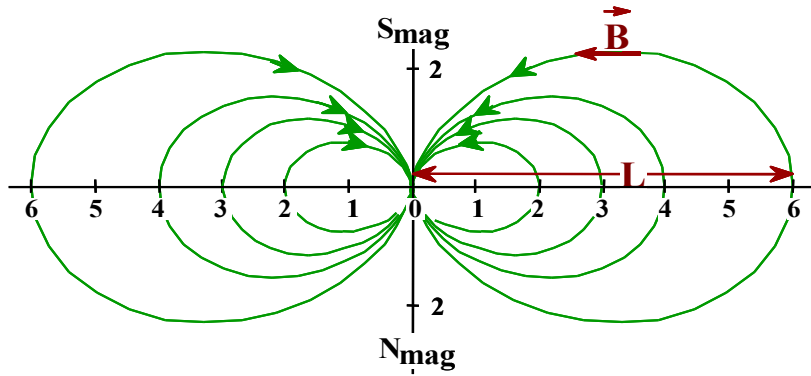


La magnétosphère: définition



La magnétosphère: le champ magnétique terrestre

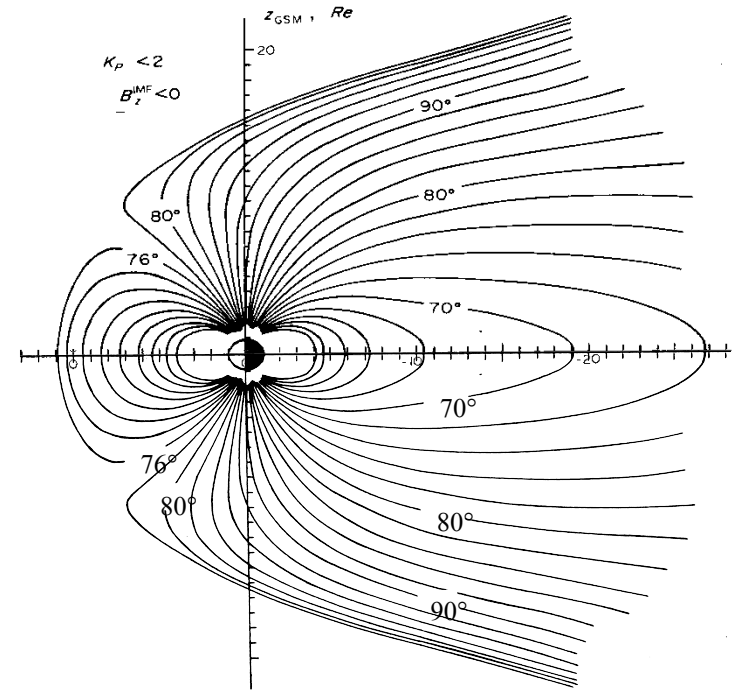
✓ Champ magnétique en première approximation:



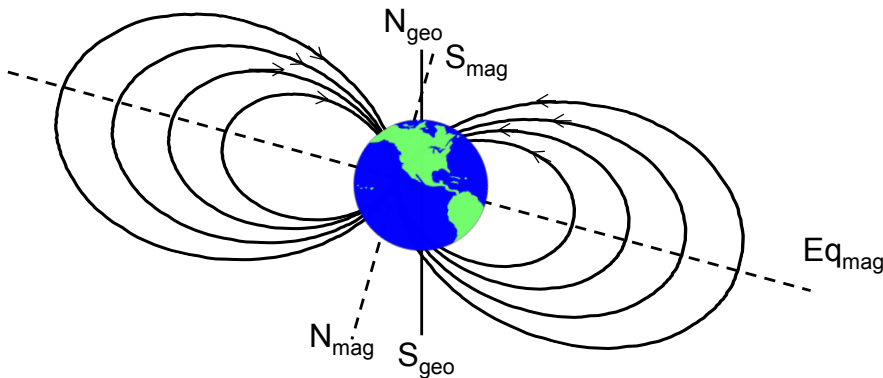
Champ magnétique dipolaire

✓ Champ magnétique réel:

Composante interne + composante externe



✓ Champ magnétique en deuxième approximation:



Champ magnétique dipolaire incliné et décentré

En l'an 2000 : Dipôle excentré de 500 km et incliné de 11°

Dérive séculaire du champ magnétique:

Décalage: 4 km/an

Inclinaison: moins de 1°/an

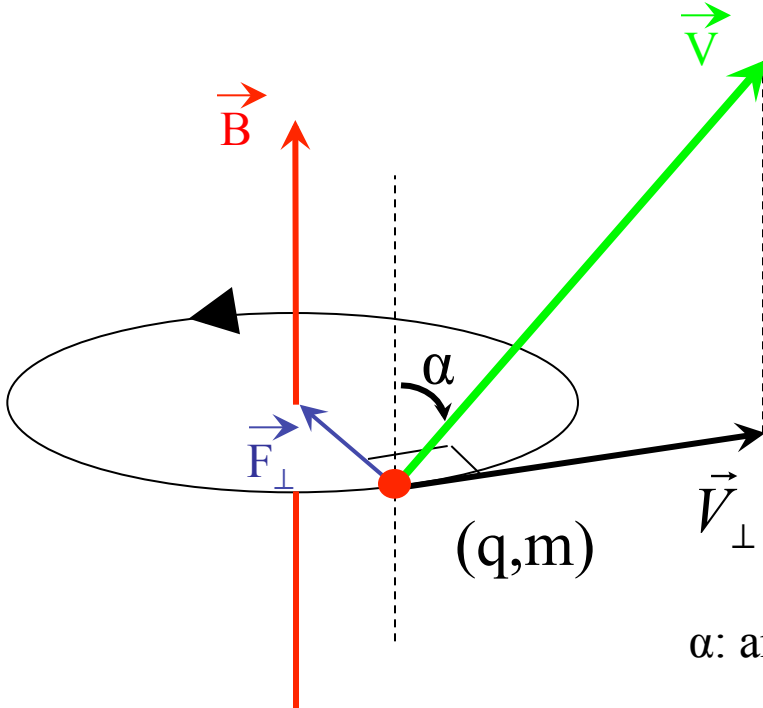
Module: - 27 nT/an

Les ceintures de radiation: *le mouvement des particules* (1/4)

✓ Force de Lorentz:

$$\vec{F} = q\vec{v} \wedge \vec{B} + q\vec{E}$$

✓ Giration autour du centre guide:



α : angle d'attaque

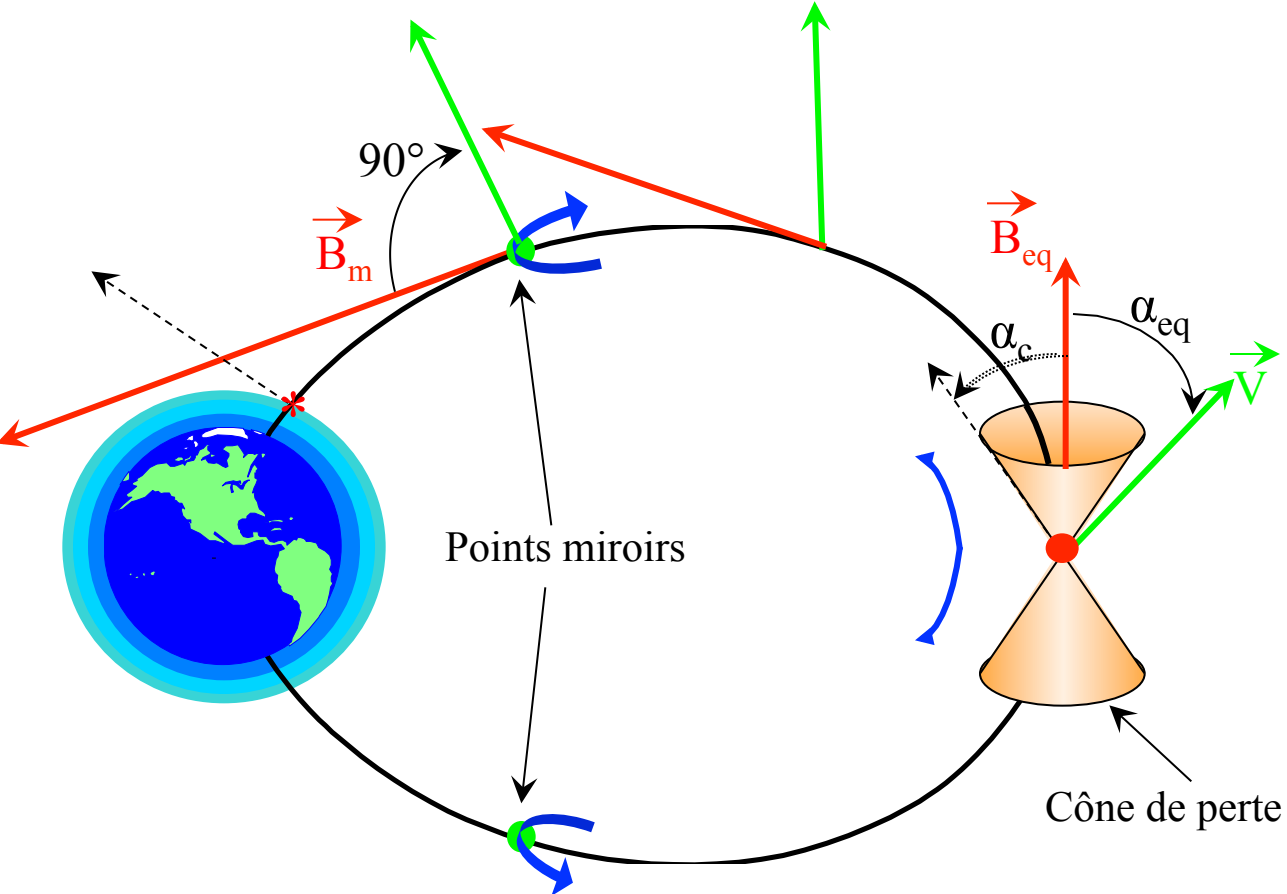
Rayon de Larmor: $r_L = \frac{mV_{\perp}}{qB}$

Période cyclotron: $T_g = \frac{2\pi m}{qB}$

Moment magnétique: $\mu = iS = \pi r_L^2 \frac{q}{T_g}$
 $\mu = \frac{mV_{\perp}^2}{2B} = cste$

Les ceintures de radiation: le mouvement des particules (2/4)

✓ Rebond entre les points miroirs:



$$\mu = \frac{mV_{\perp}^2}{2B} = cste$$

↓

$$\frac{mV^2 \sin^2 \alpha_{eq}}{2B_{eq}} = \frac{mV^2}{2B_m}$$

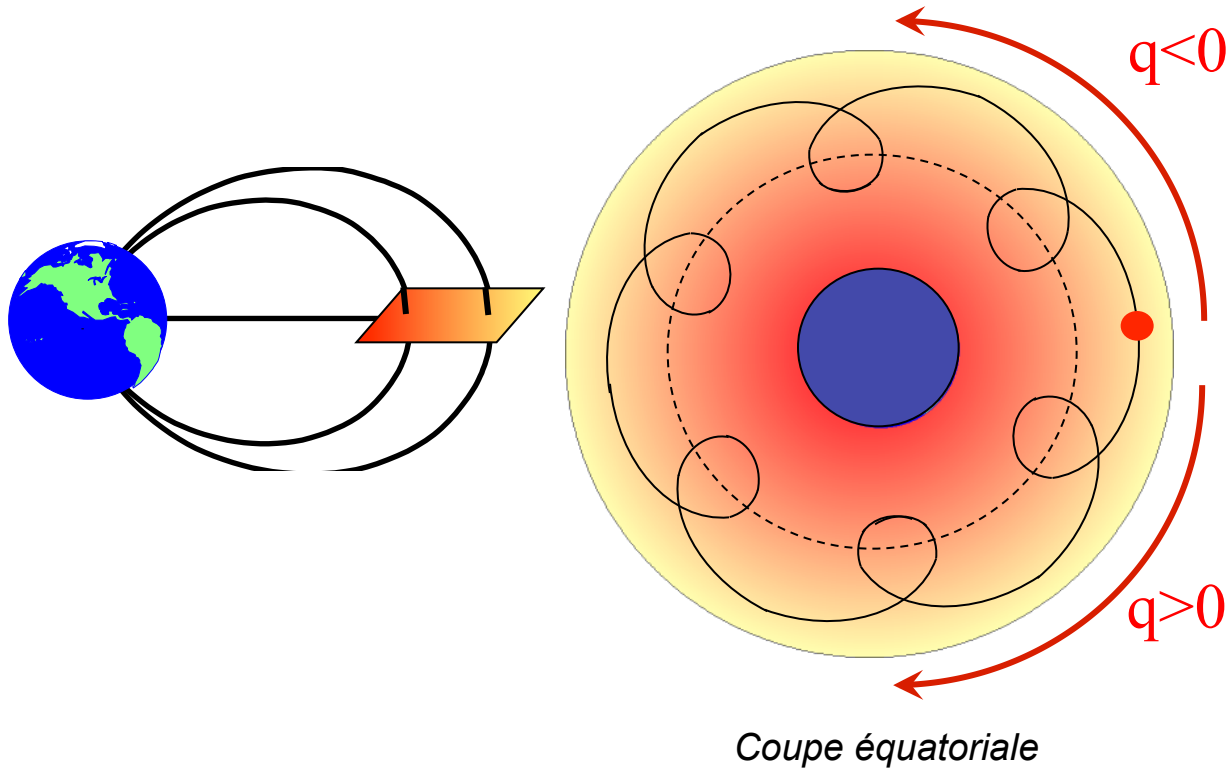
$$B_m = \frac{B_{eq}}{\sin^2 \alpha_{eq}}$$

Les ceintures de radiation: le mouvement des particules (3/4)

✓ Dérive autour de la planète:

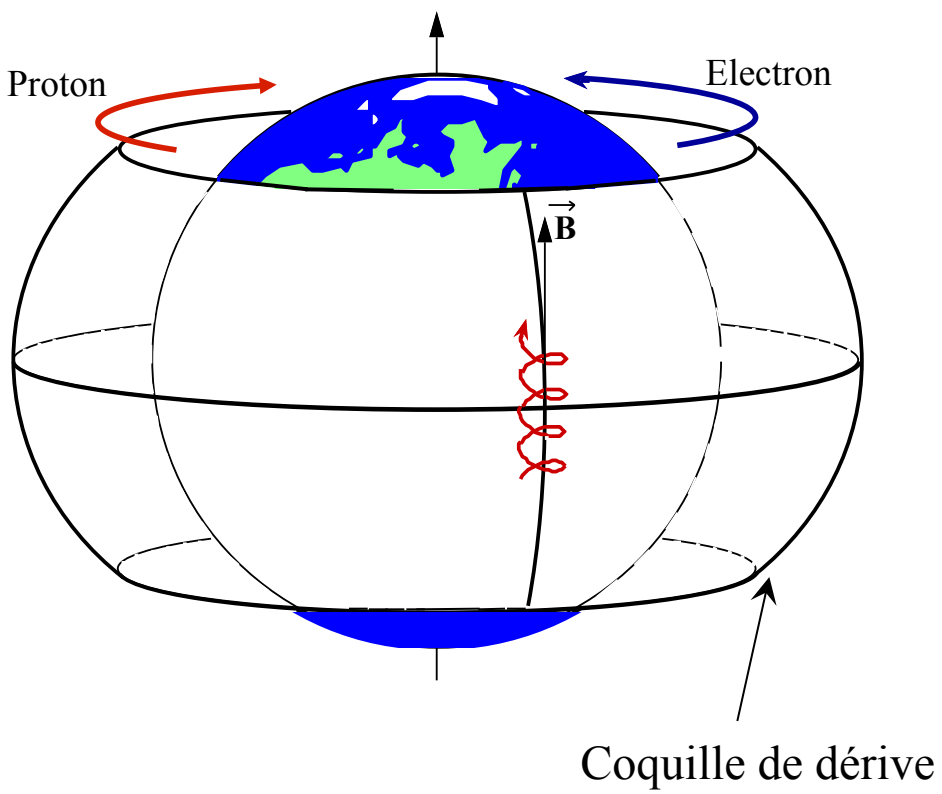
Origine principale: gradient radial du champ magnétique ($1/r^3$)

➡ Rayon de Larmor variable, $r_L = \frac{mV_{\perp}}{qB}$



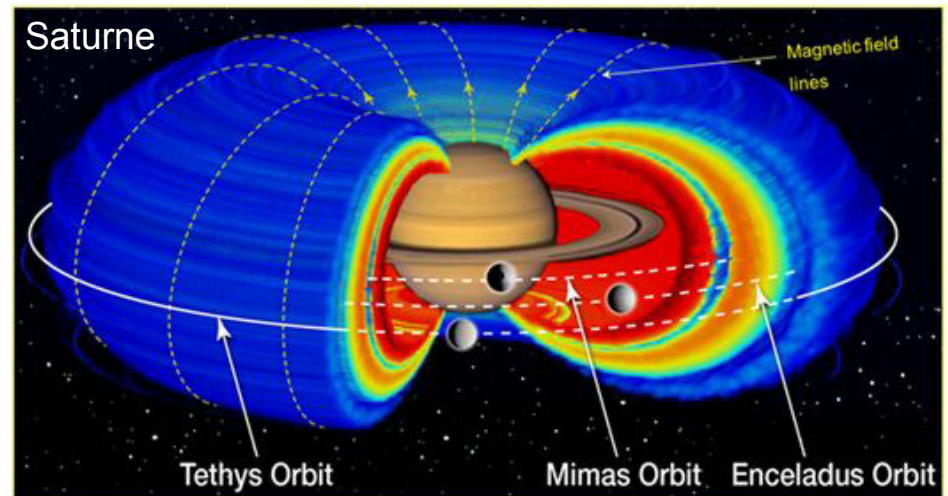
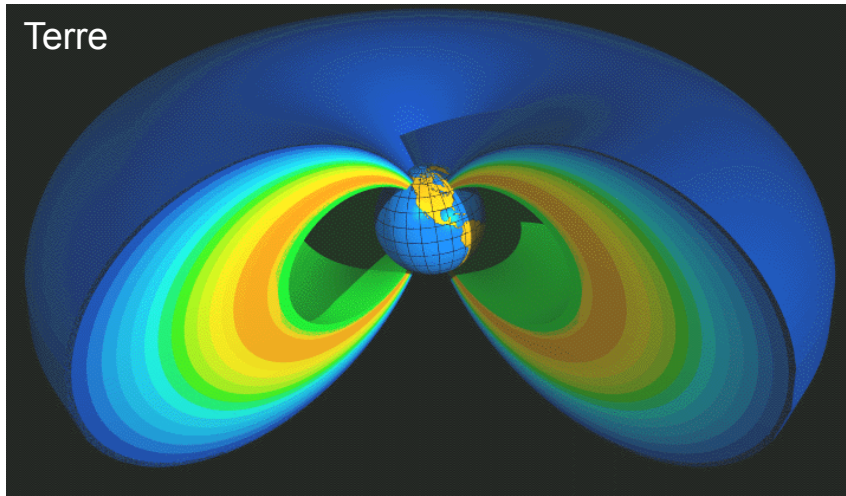
Les ceintures de radiation: *le mouvement des particules* (4/4)

✓ Mouvement global des particules:



Particule de 1 MeV à L=2		
	Période (Rayon de Larmor)	
	<i>Electron</i>	<i>Proton</i>
Giration	10^{-6} s (1 km)	10^{-2} s (25 km)
Rebond	0,1 s	1 s
Dérive	1000 s	1000 s

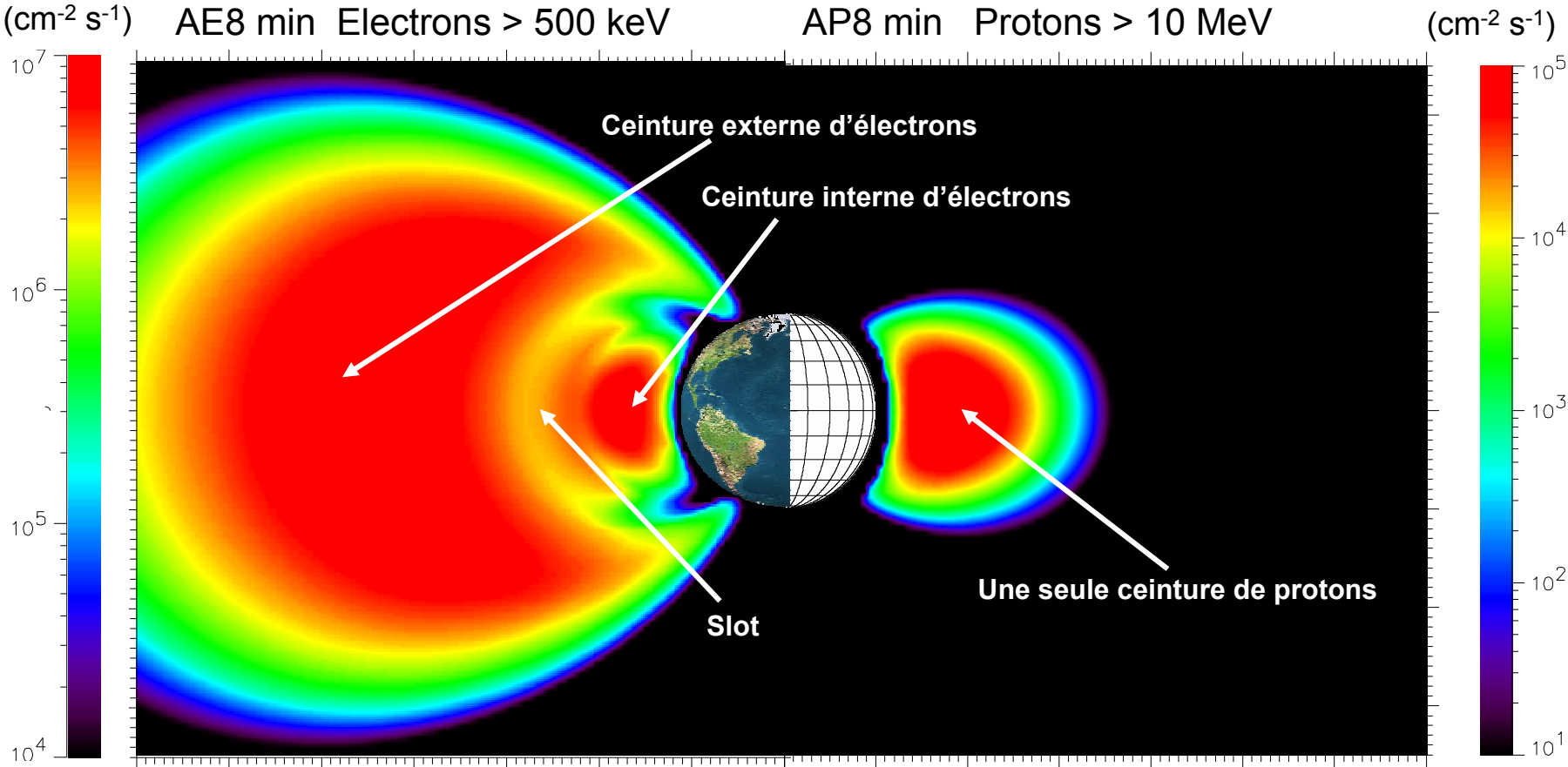
Les ceintures de radiation: *description(1/2)*



	Particule	Energie	Extension
Terre	e-	1keV-10 MeV	1-10 R _E
	p+	1 keV-100 MeV	1-7 R _E
Jupiter	e-	10 keV-100 MeV	1-30 R _J
	p+	10 keV-1GeV	1-30 R _J
Saturne	e-	1keV-10 MeV	1-10 R _S
	p+	1 keV-100 MeV	1-10 R _S

Les ceintures de radiation: *description(2/2)*

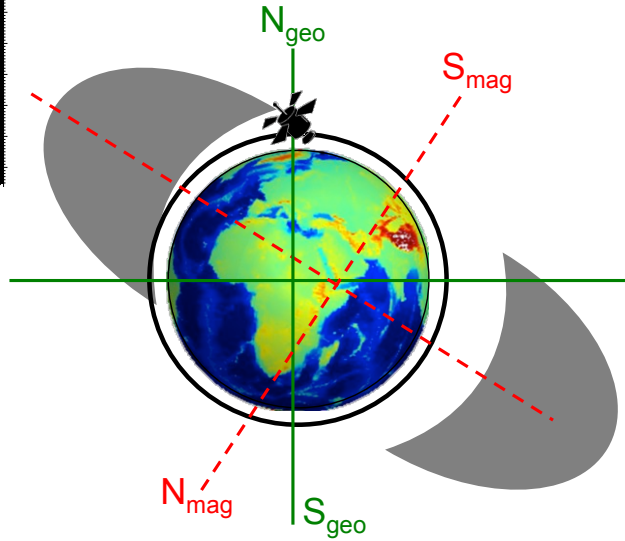
✓ Flux d'électrons et de protons dans les ceintures terrestres:



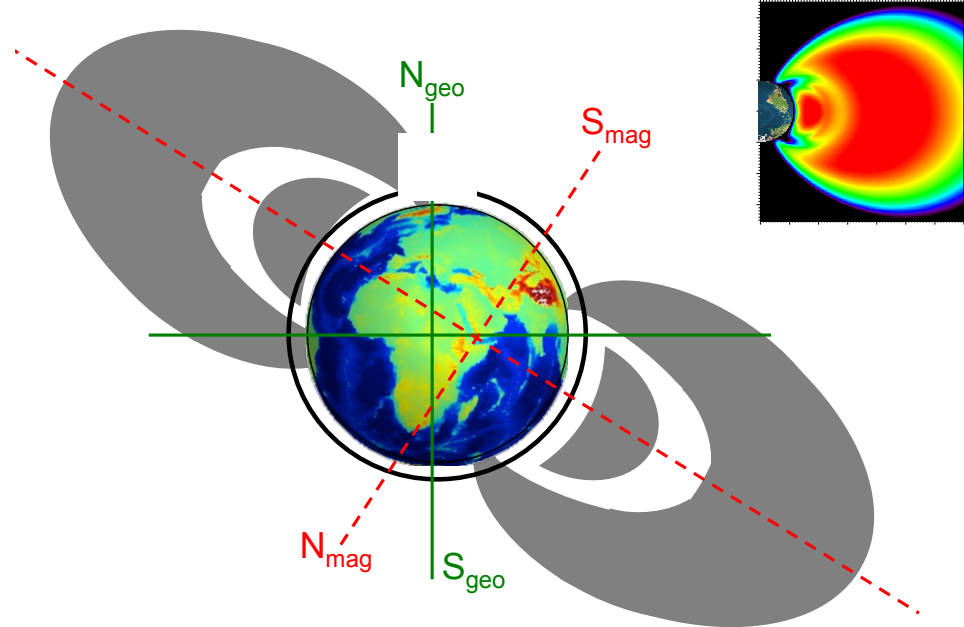
Coupe méridienne des ceintures de radiation de la Terre

Les ceintures de radiation: *anomalie de l'atlantique sud* (2/2)

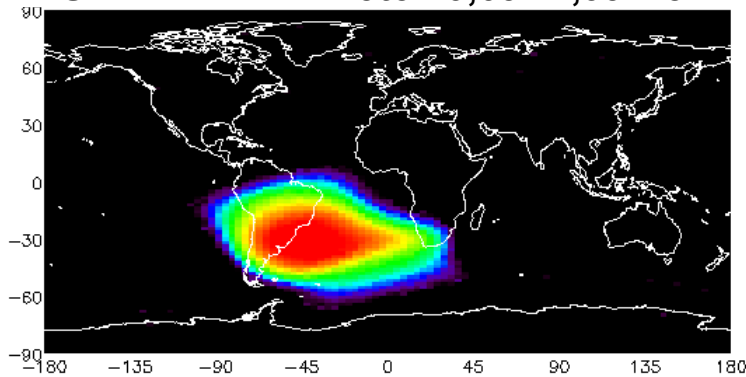
Protons



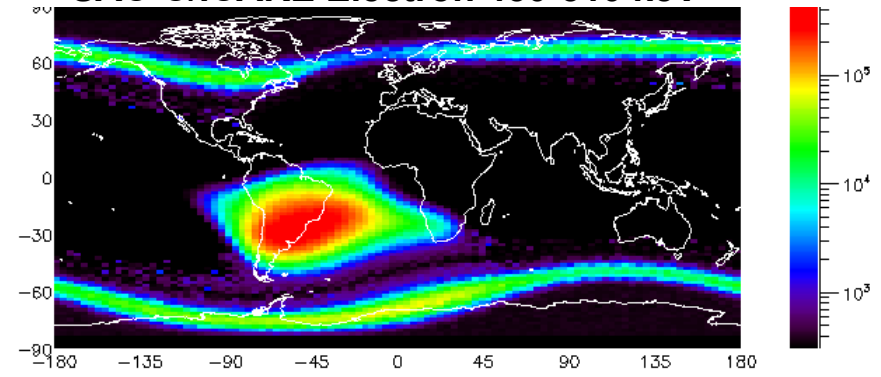
Electrons



SAC-C/ICARE Proton 9,65-11,35 MeV



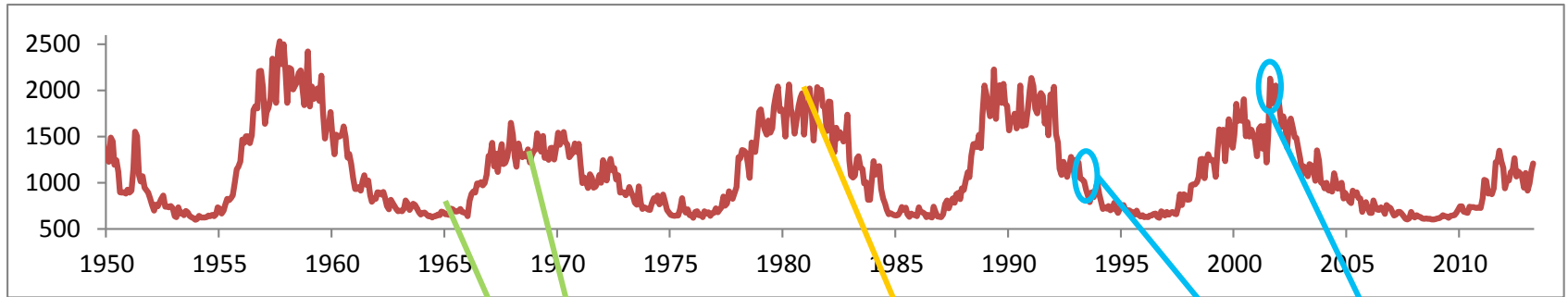
SAC-C/ICARE Electron 450-510 keV



Les ceintures de radiation: *la dynamique* (1/4)



Les ceintures de radiation: *la dynamique* (2/4)

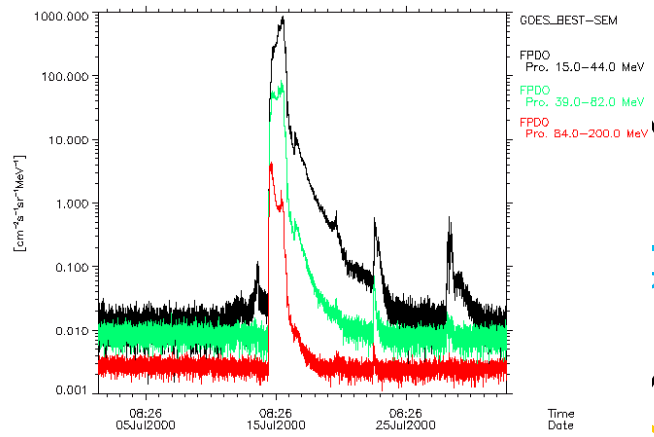
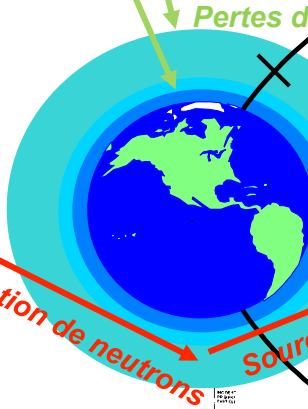


Chauffage de l'atmosphère

Éruptions solaires

Orages magnétiques

Rayonnement cosmique



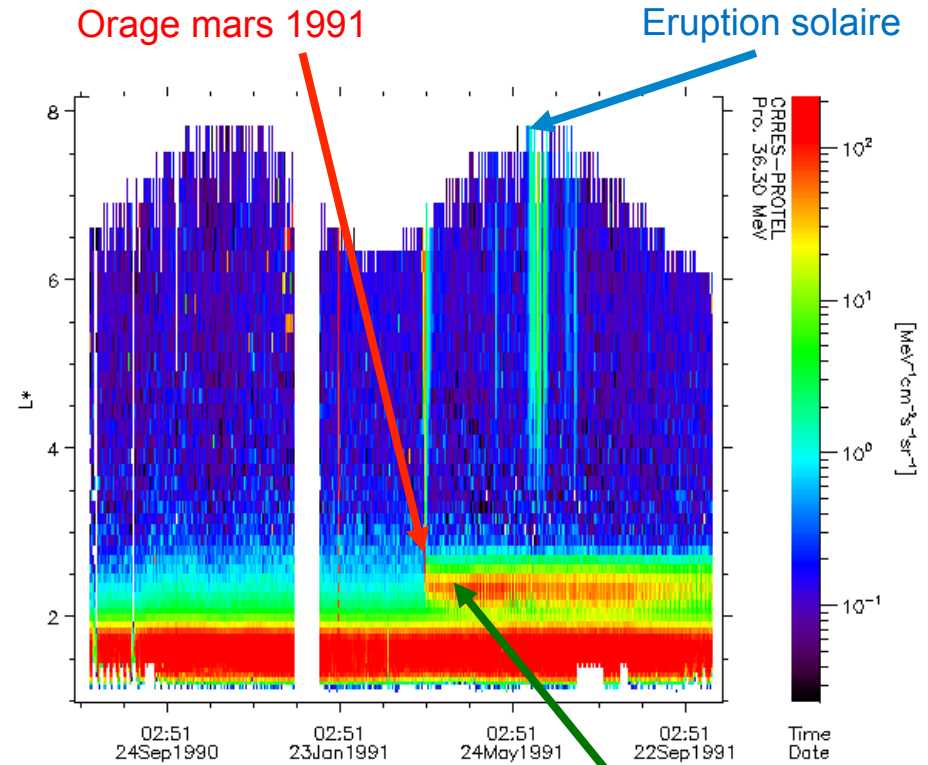
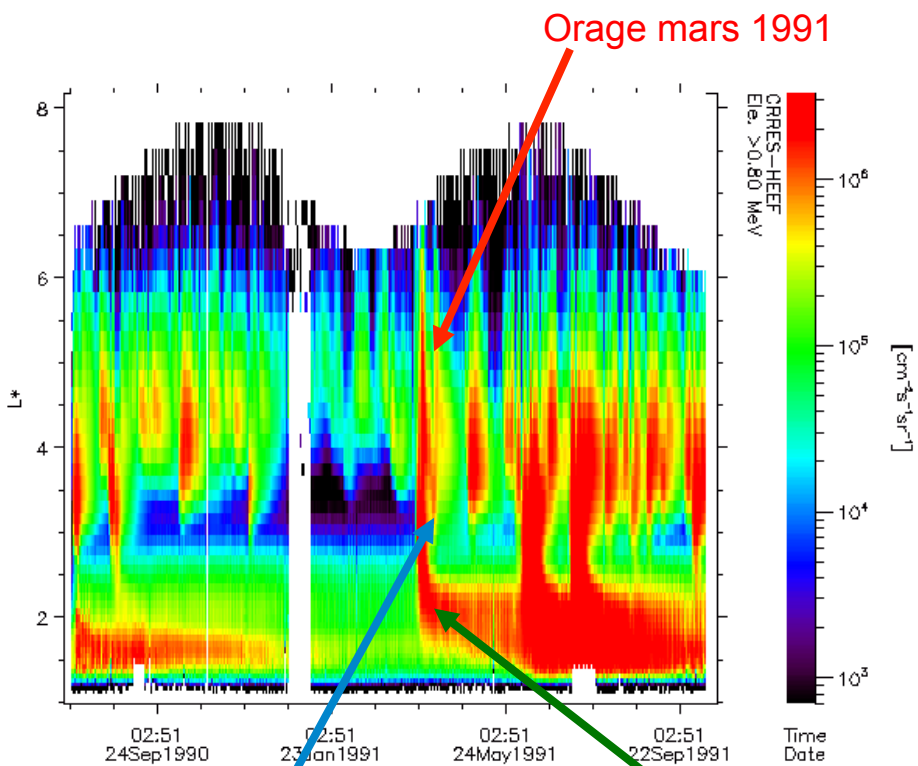
Injection de particules

Les ceintures de radiation: *la dynamique* (3/4)

✓ Dynamique à l'échelle de l'orage ou de l'éruption:

Electrons

Protons



Remplissage de la région du slot

Enrichissement de la ceinture interne

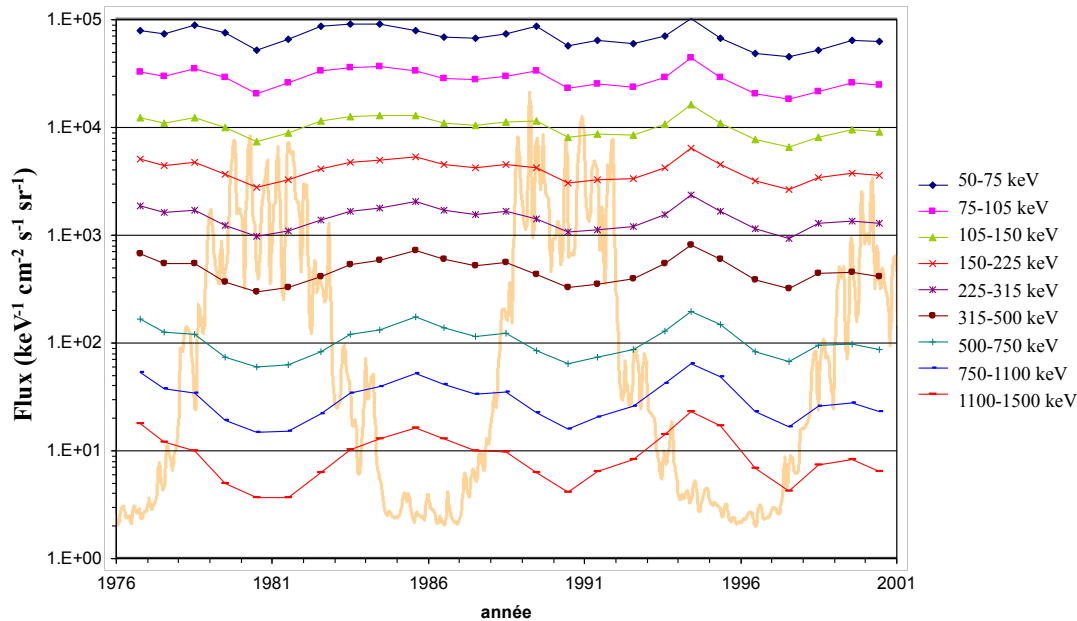
Création d'une deuxième ceinture

Les ceintures de radiation: *la dynamique* (4/4)

✓ Dynamique à l'échelle du cycle solaire:

Electrons

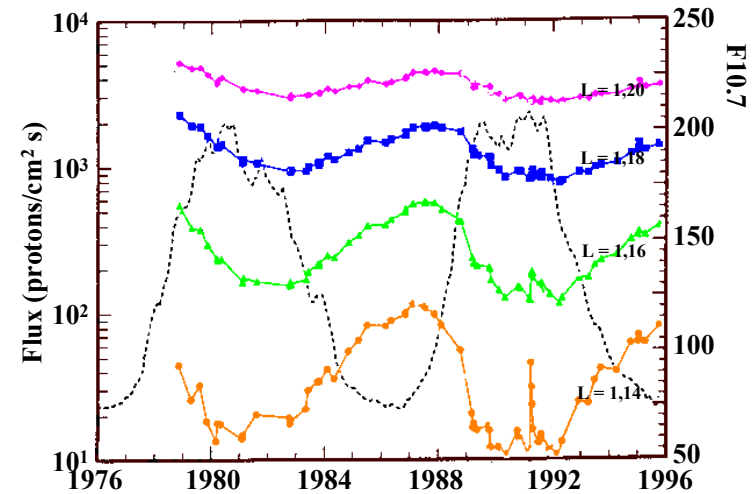
Flux d'électrons à l'orbite géostationnaire (L=6,6)



➔ **Augmentation** du flux d'électrons à l'orbite GEO en phase de **décroissance** du cycle solaire due aux orages magnétiques longs provenant des **trous coronaux**

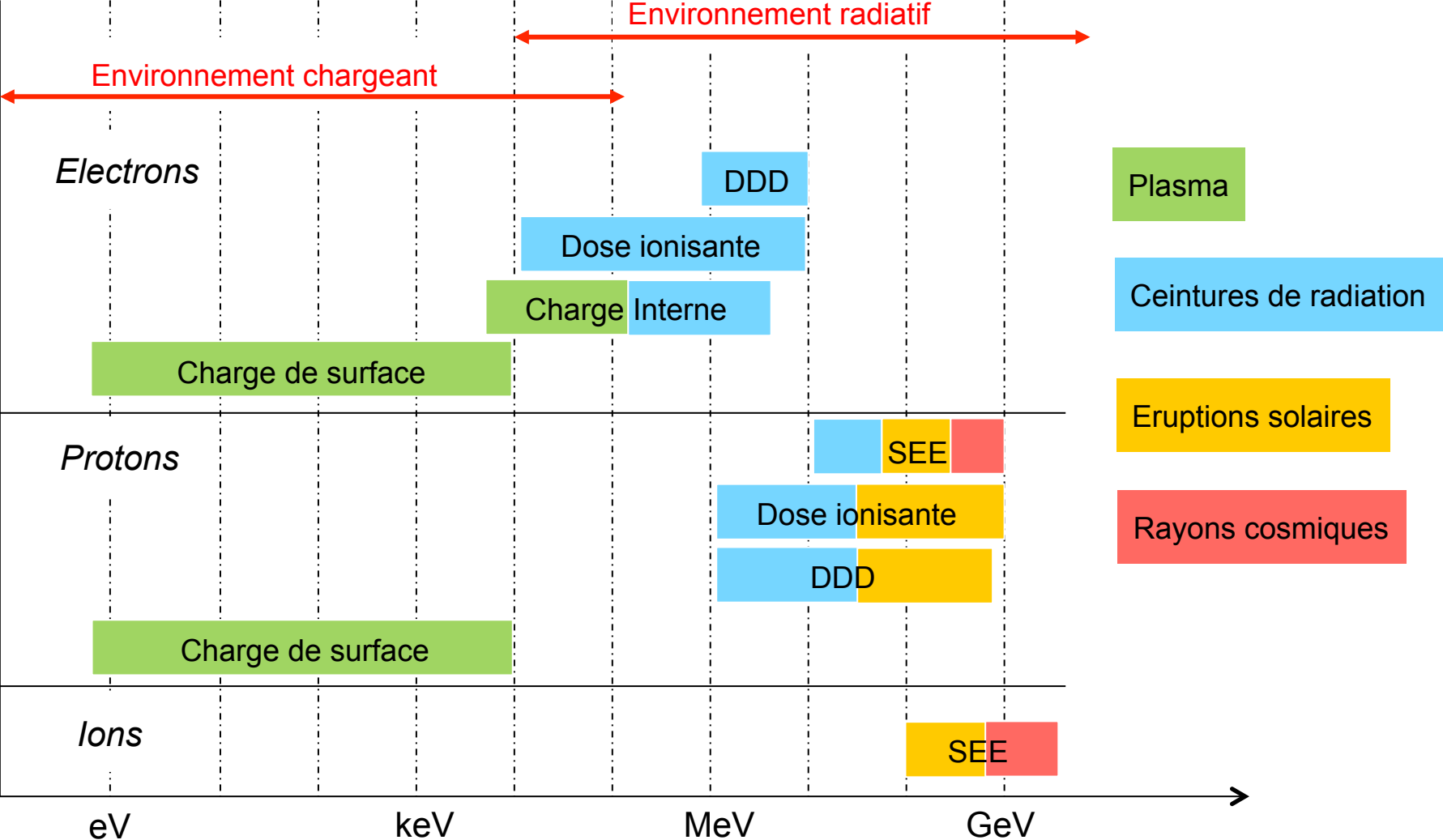
Protons

Flux de protons à faible L



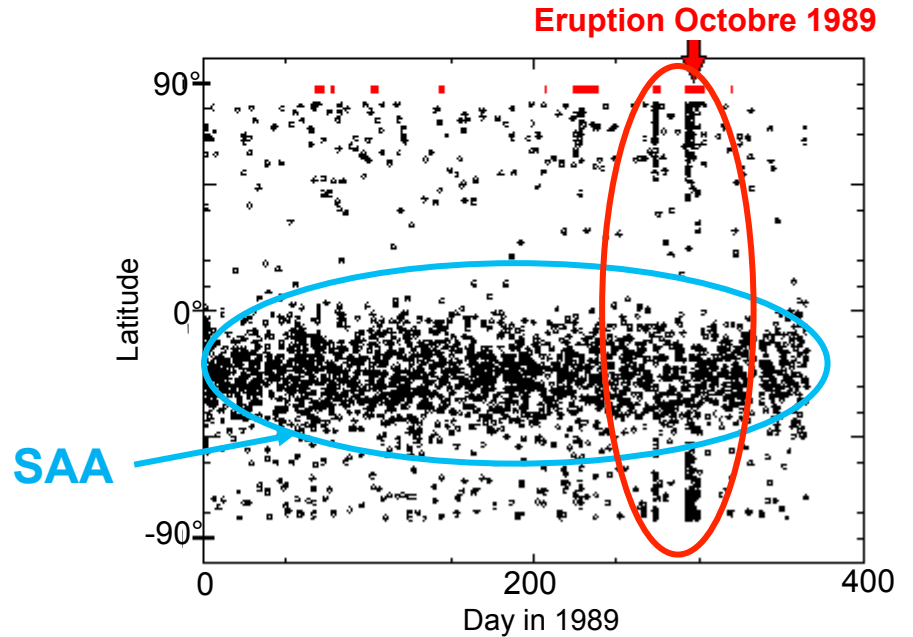
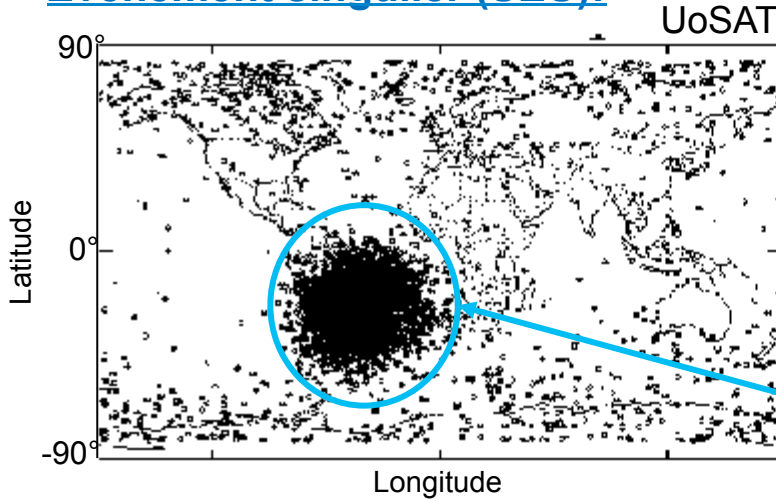
➔ **Augmentation** du flux de **protons** proche de la terre en **minimum de cycle** due aux **rayonnement cosmique** et **diminution** du flux de protons en **maximum de cycle** due au gonflement de l'**atmosphère**

Les effets sur l'environnement: *Définition*

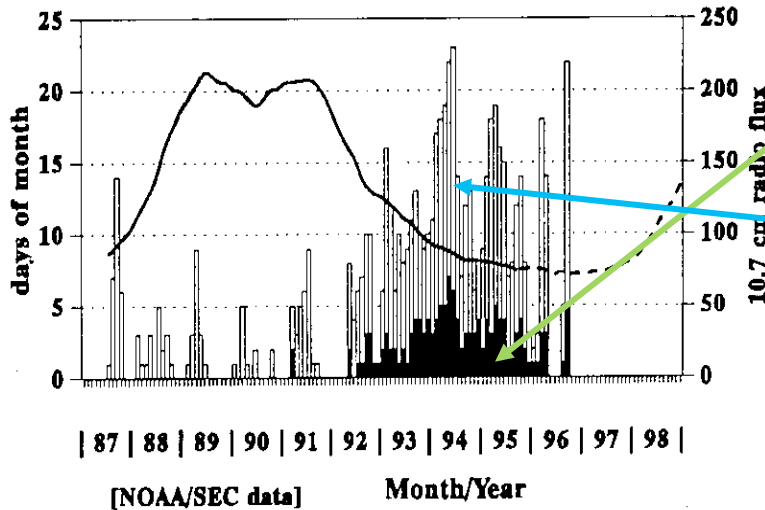


Les effets sur l'environnement: Exemples

✓ Événement singulier (SEU):



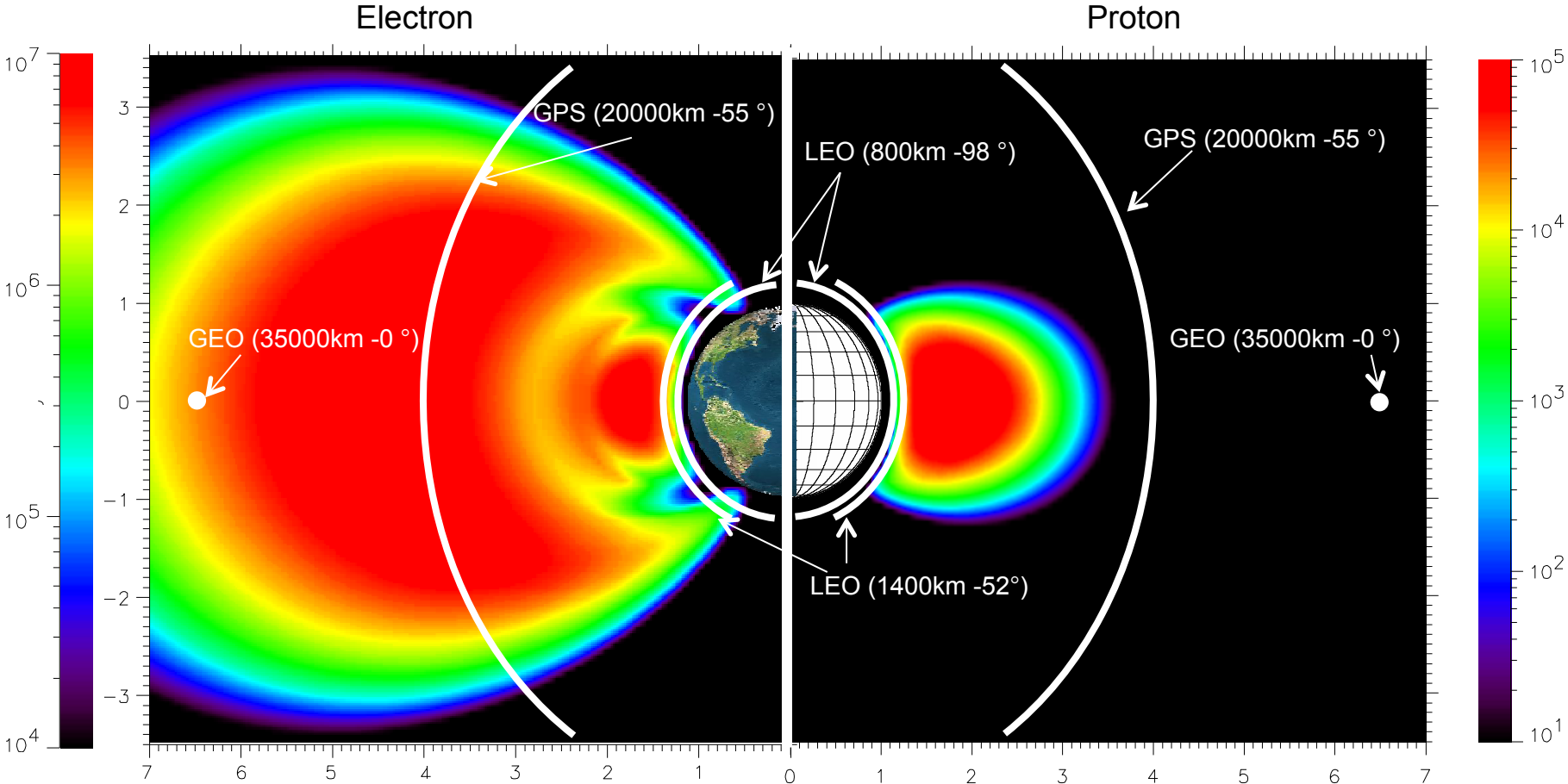
✓ Décharge électrostatique (ESD):



Nombre mensuel d'ESD

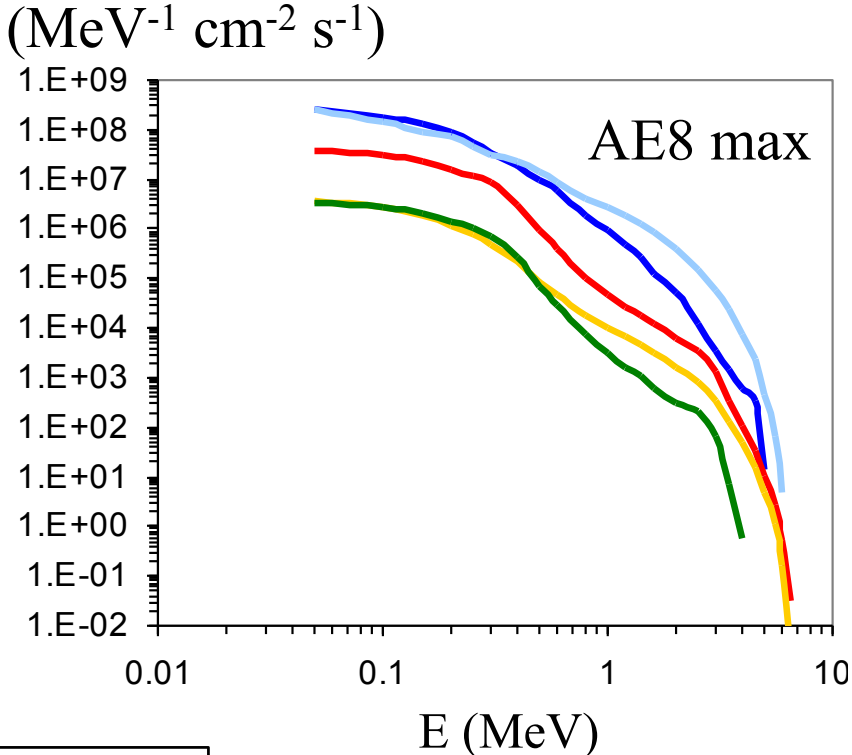
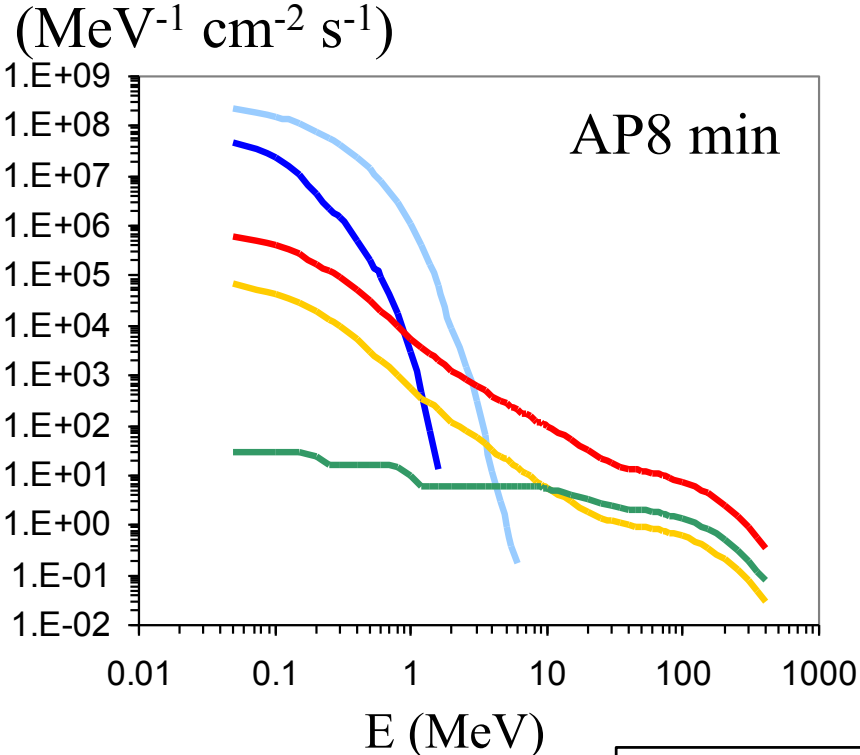
Nombre de jours par mois ayant un flux $>10^8 \text{ cm}^{-2} \text{ sr}^{-1}$ d'électrons $> 2 \text{ MeV}$

Sensibilité des orbites aux radiations (1/2)



Coupe méridienne des ceintures de radiation de la Terre

Sensibilité des orbites aux radiations (2/2)



- 35500 km - 0 deg
- 20000 km - 55 deg
- 1400 km - 52 deg
- 800 km - 98 deg
- 800 km - 30 deg

Conclusion (1/2)

- ✓ L'**environnement spatial** autour d'une planète magnétisée est constitué de particules chargées de faible énergie, le **plasma** froid, et de forte énergie, piégées par le champ magnétique dans les **ceintures de radiation**.
- ✓ L'**environnement spatial** est un milieu **hostile** pour toute mission mais les effets majeurs peuvent être différent selon l'orbite de la mission considérée:
 - Les orbites **LEO** sont sensibles aux **électrons et protons piégés dans la SAA**
 - Les orbites **MEO** et **GEO** sont sensibles aux **électrons piégés dans la ceinture externe** et aux **protons solaires**
- ✓ La **dynamique des particules** de la magnétosphère (plasma et particules des ceintures) est fortement liée au **cycle solaire** (orages magnétiques, interaction avec l'atmosphère)
- ✓ Les **particules hors magnétosphère** (éruptions solaires et rayons cosmiques) ont aussi une dynamique liée au **cycle solaire**

Conclusion (2/2)

- ✓ Les **effets** des particules chargées sur le satellite sont les suivants:
 - Plasma basse énergie (eV):
 - perte de puissance des générateurs solaires
 - perturbation des mesures scientifiques à bord
 - Electron moyenne énergie (keV):
 - problème de charge et d'émission secondaire (ESD)
 - Proton et électron de haute énergie (MeV):
 - charge interne et ESD
 - événements singulier (SEU, SEL, SEGR)
 - effets cumulatifs (dose ionisante, DDD)
 - Ion de très haute énergie (GeV):
 - dégradation de composants (SEL, SEGR)

- ✓ *Connaitre et prédire l'environnement spatial que va rencontrer le satellite tout au long de sa mission est donc essentiel afin d'éviter/diminuer au mieux les effets parfois irréversibles sur les équipements à bord.*