



Radioprotection sans frontière L'espace, milieu hostile.

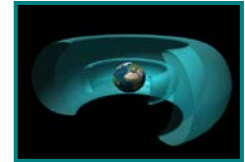
3emes Journées Techniques du RadioProtectionCirkus, Lyon 13/10/2017



Françoise BEZERRA
PCR CNES Toulouse

L'espace Milieu Hostile

1. Introduction



2. Les sources de rayonnements ionisants dans l'espace



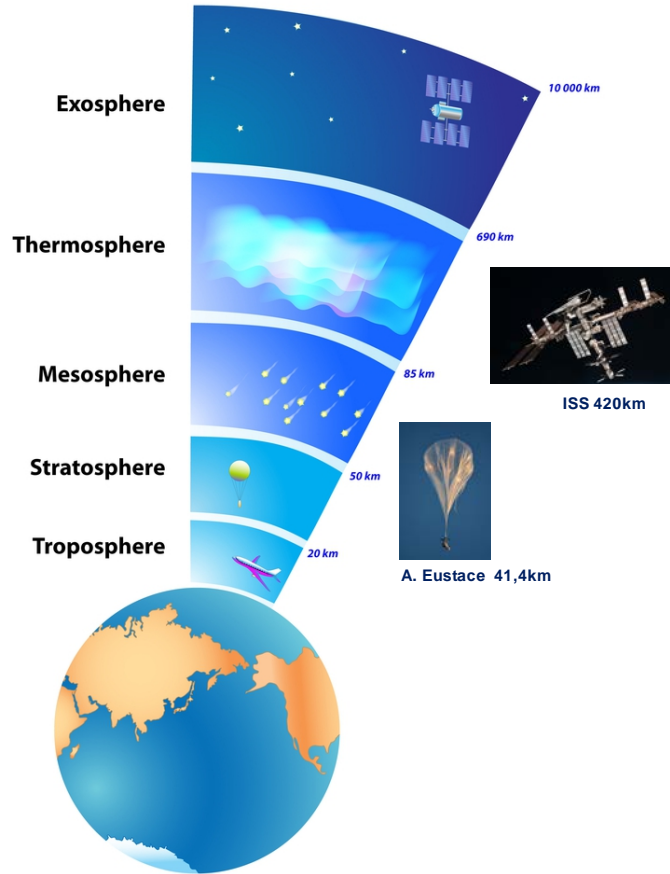
3. Prise en compte de leurs effets

4. Les vols habités

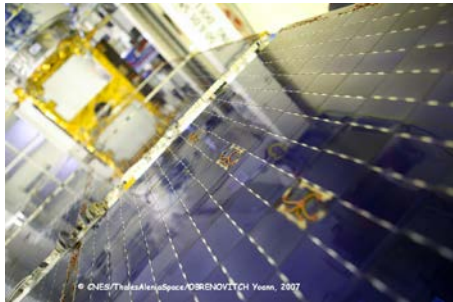
- ❖ Station Spatiale Internationale
- ❖ Missions lunaires
- ❖ A la conquête de mars
- ❖ Vers l'infini et au-delà...



L'espace milieu hostile



L'espace milieu hostile.

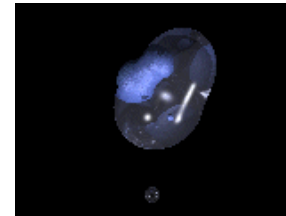


❖ Vide

- Dégazage => Contamination (optiques, panneaux solaires)
- Thermique: Absence de convection

❖ Microgravité

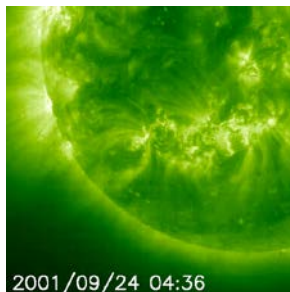
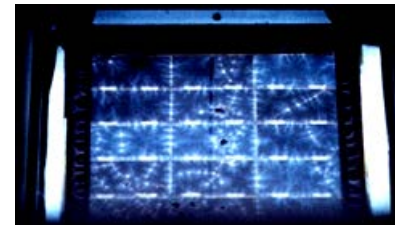
- Mouvements: mécanismes, fluides
- Sur l'humain: densité des os, masse musculaire, circulation sanguine.



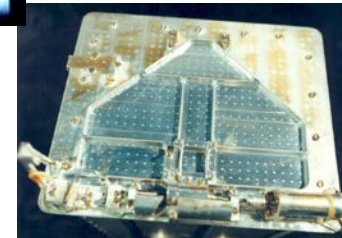
❖ Collision: Micrométéorite, débris

❖ Environnement radiatif:

- Charges de surface (ESD),
- Dégradation des revêtements de surface et optiques (UV)
- **Rayonnements ionisants: X, γ , p+, e-, ions, ...**



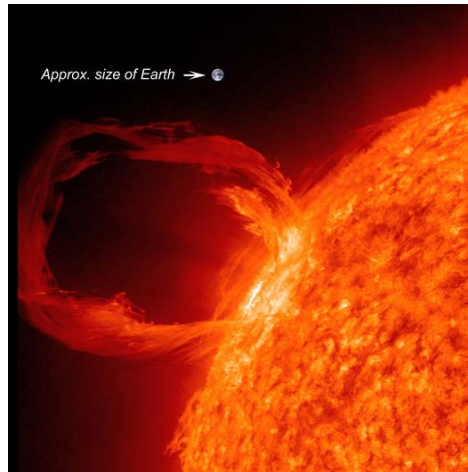
2001/09/24 04:36



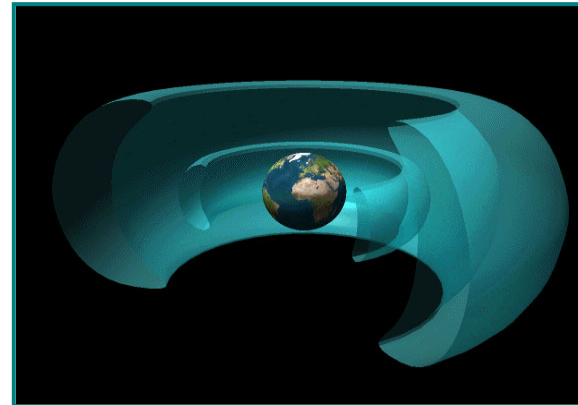
Les sources de rayonnements ionisants dans l'espace



❖ Rayons Cosmiques Galactiques



❖ Soleil



❖ Ceintures de Van Allen

Les rayons cosmiques galactiques



❖ **Particules très énergétiques**

❖ **Energie:**

➤ Max > 10 GeV/n

❖ **Abondance**

➤ Max ~ 300MeV/n

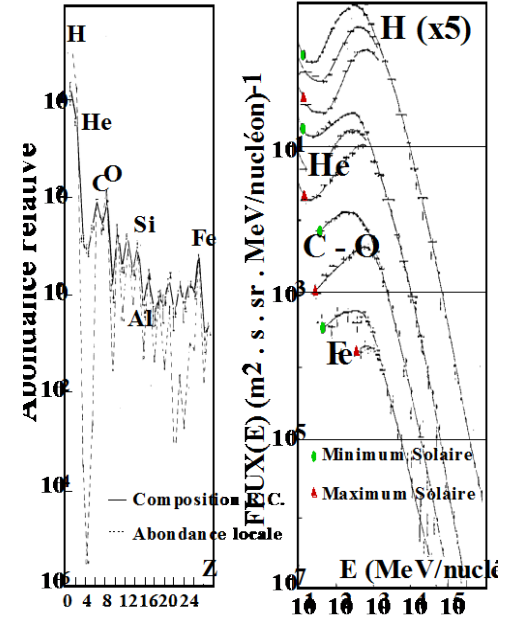
❖ **Origine: Au-delà de la voie lactée**

? Explosions de super Novæ,

? Environnement de trous noirs,

? Effondrement d'étoiles massives

? ...

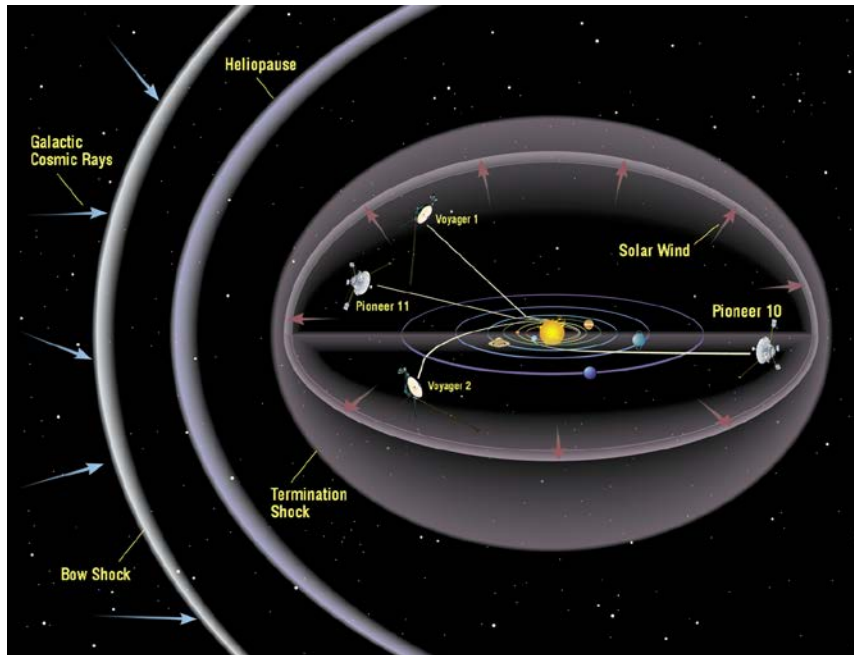


Une des 1600 cuves de l'observatoire Pierre-Auger en Argentine
© Marcel DALAISE/SUBATECH/CNRS Photothèque

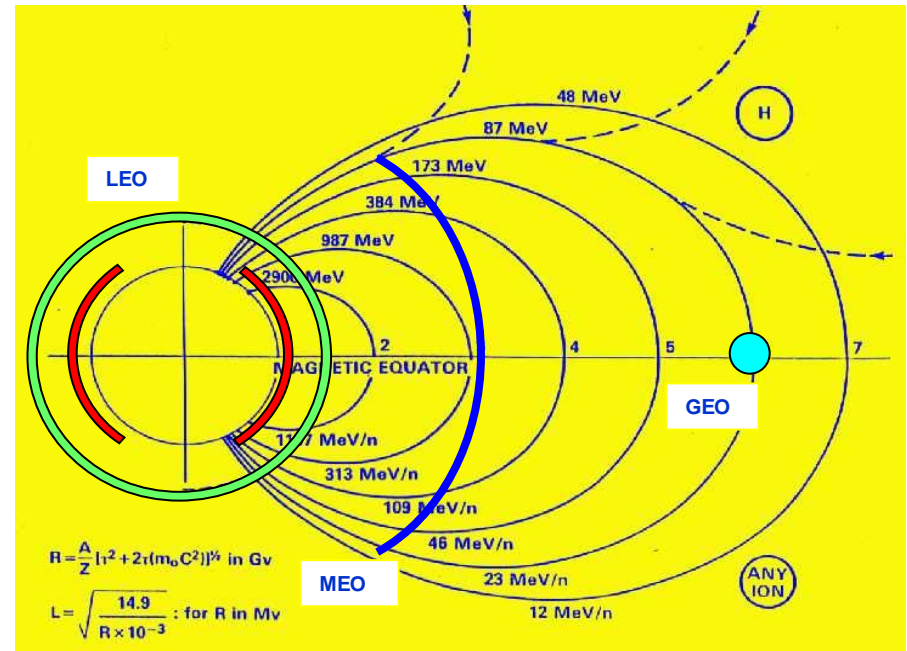
Les rayons cosmiques galactiques

❖ Particules chargées

- Modulation par le champ magnétique solaire
- Ecrantage par le champ magnétique terrestre



Distance Terre soleil = 150 Millions km = 1 Unité Astronomique (UA)
 Distance soleil héliopause = 100 UA

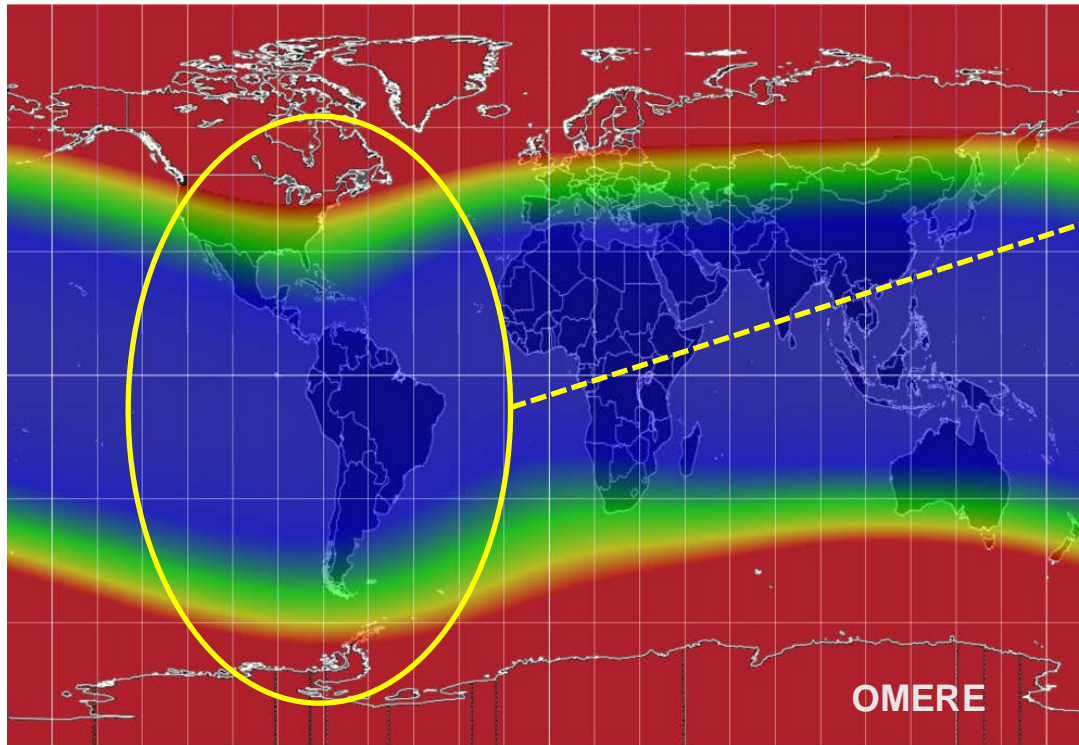


Rayon de la Terre = 6 371 km

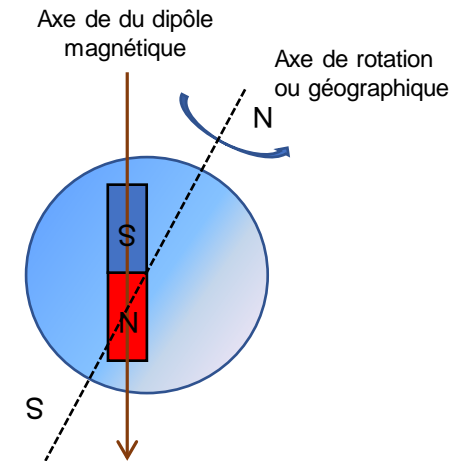
Les rayons cosmiques galactiques

❖ Exemple pour une orbite basse (800km)

➤ Pour une énergie donnée il y a beaucoup plus d'ions lourds sur les pôles.



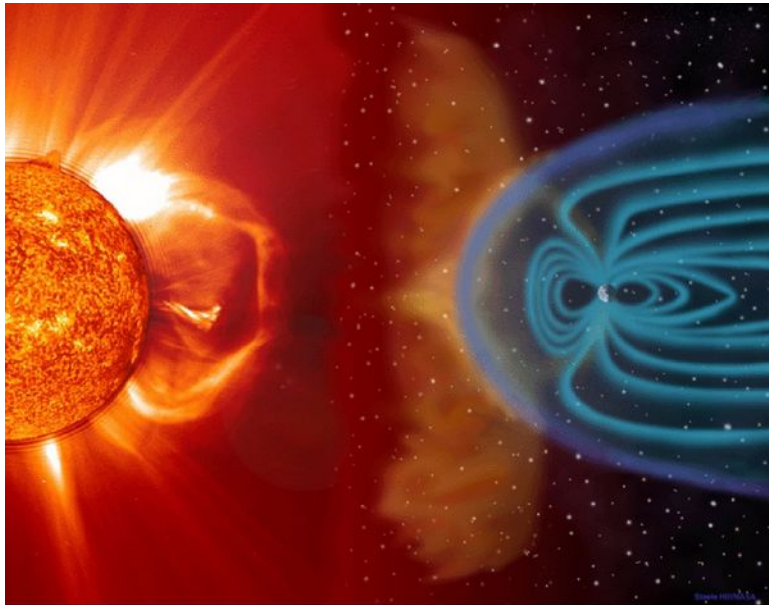
➤ Visualisation du décalage entre pôle magnétique et géographique.



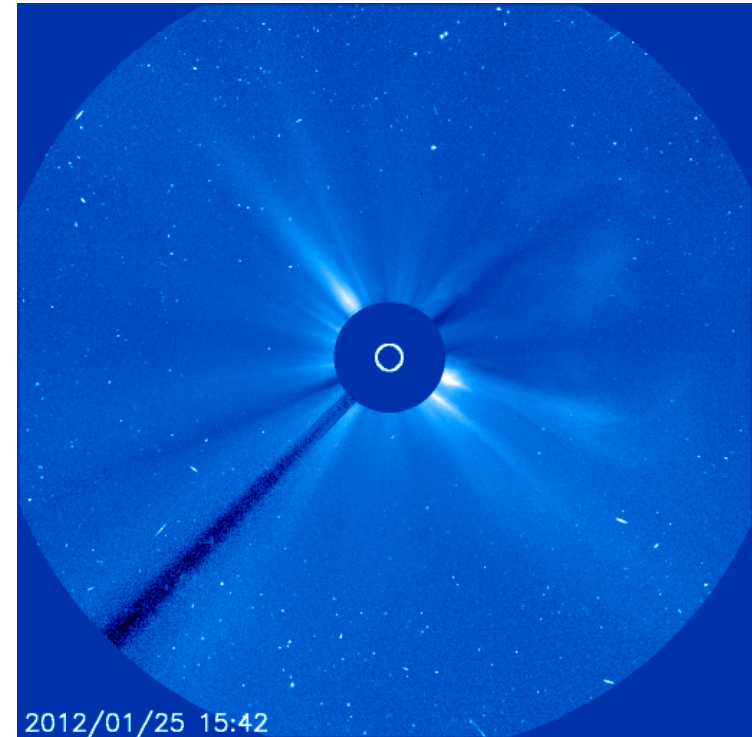
Le soleil: Source de rayonnements ionisants

❖ **Le vent solaire: émission continue**

❖ **Les éruptions solaires: émission sporadique**



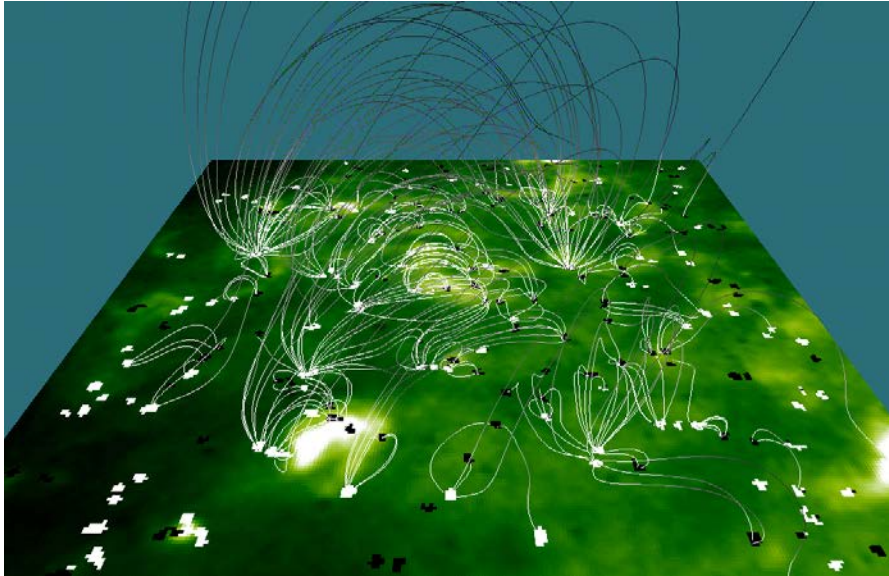
© SOHO/LASCO/EIT. NASA. ESA



2012/01/25 15:42

© SOHO/ESANASA

Le soleil: Source de rayonnements ionisants



© SDO/NASA



<https://www.youtube.com/watch?v=8MlmmQvqCSg>

❖ Surface du soleil

- Des milliers de dipôles
- Des lignes de champs
- Le tout en mouvement



Activité solaire

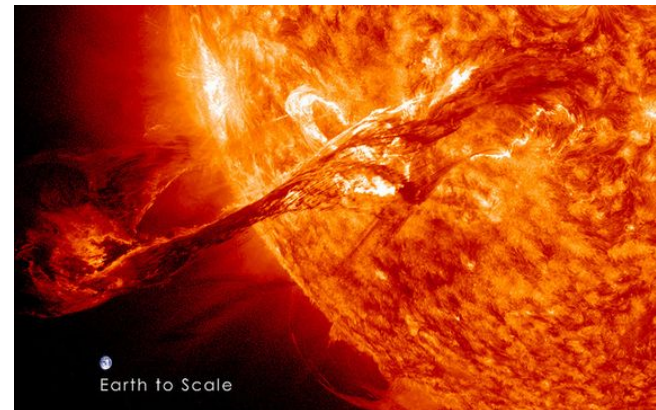
Le Soleil: Les différents signes d'activité.

❖ 1 – Les éjections de masse coronale (CME)

- Libération brutale d'énergie
- Nuage de particules chargées (ions et p+)
- Précédé d'une onde de choc
- Tempête magnétique
- Trajet Soleil-Terre: un à quelques jours



© SDO/NASA

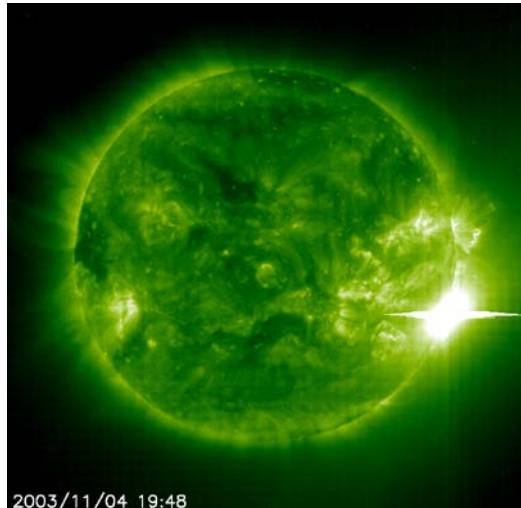


© SDO/NASA

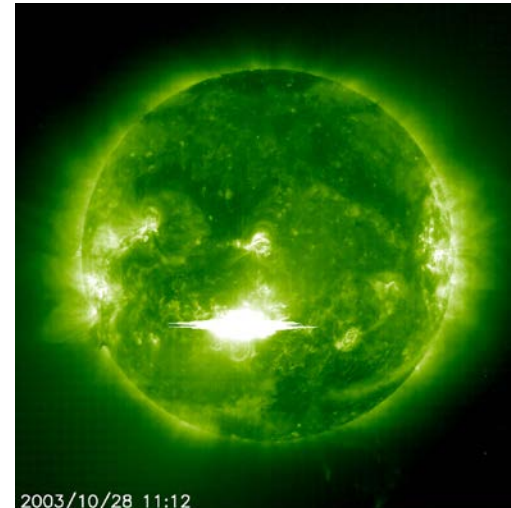
Le Soleil: Les différents signes d'activité.

❖ Eruptions a protons (SEP)

- Faisceau de protons rapides
- Parfois accompagnés d'ions
- Trajet Soleil-Terre en quelques minutes-heures.

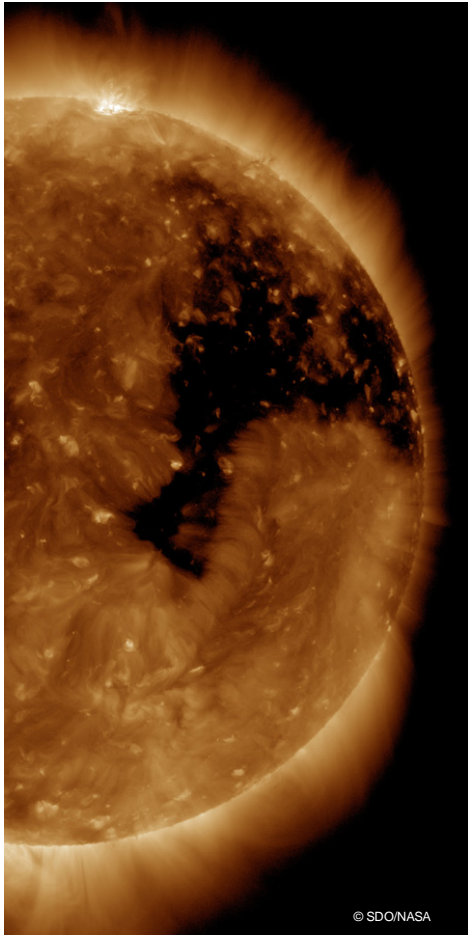


© SDONASA



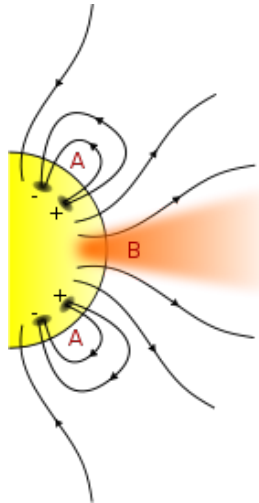
© SDONASA

Le Soleil: Les différents signes d'activité.

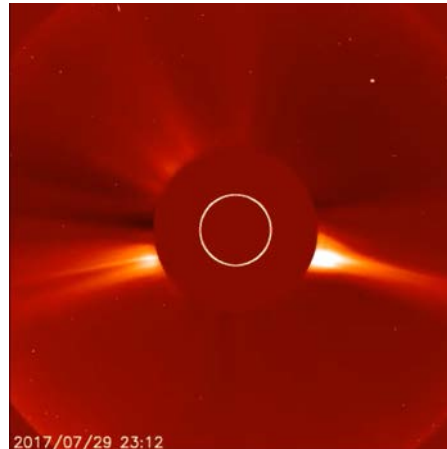


❖ Trous coronaux

- « Souffle » continu dans le vent solaire
- Durée variable jusqu'à plusieurs semaines
- Effet de balayage (période 27 jours)



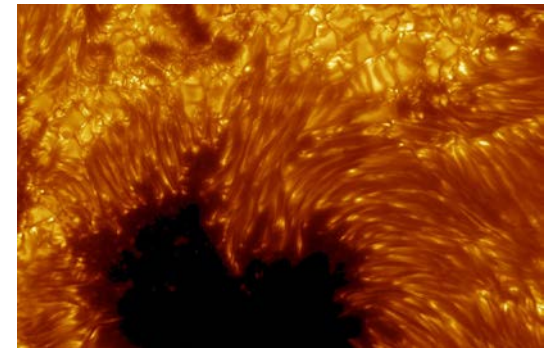
© Sebman81 - wikimedia



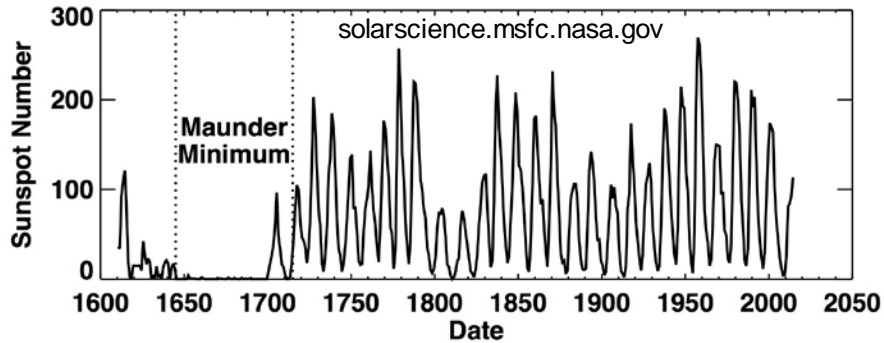
© SOHO/ESA/NASA



© SOHO/NASA

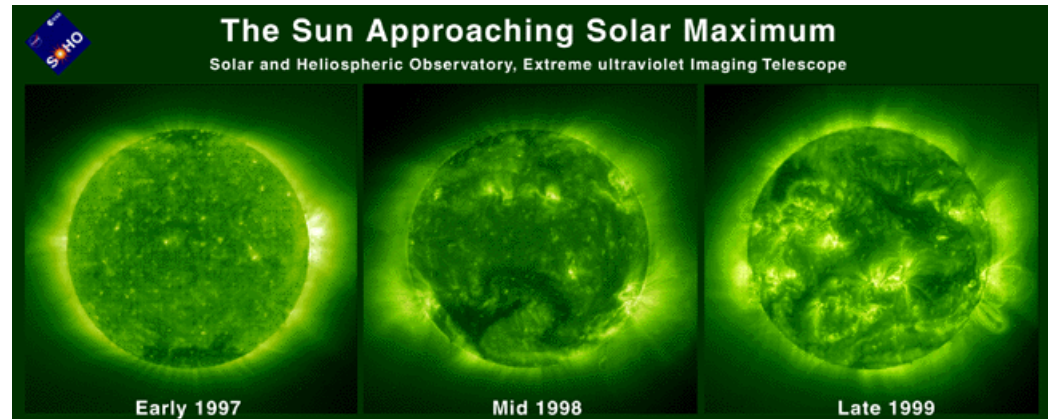
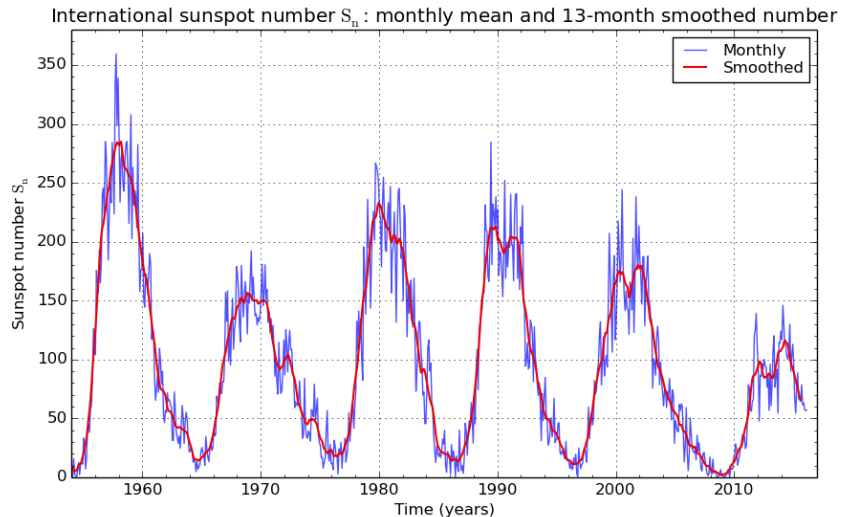


Le soleil: Source de rayonnements ionisants

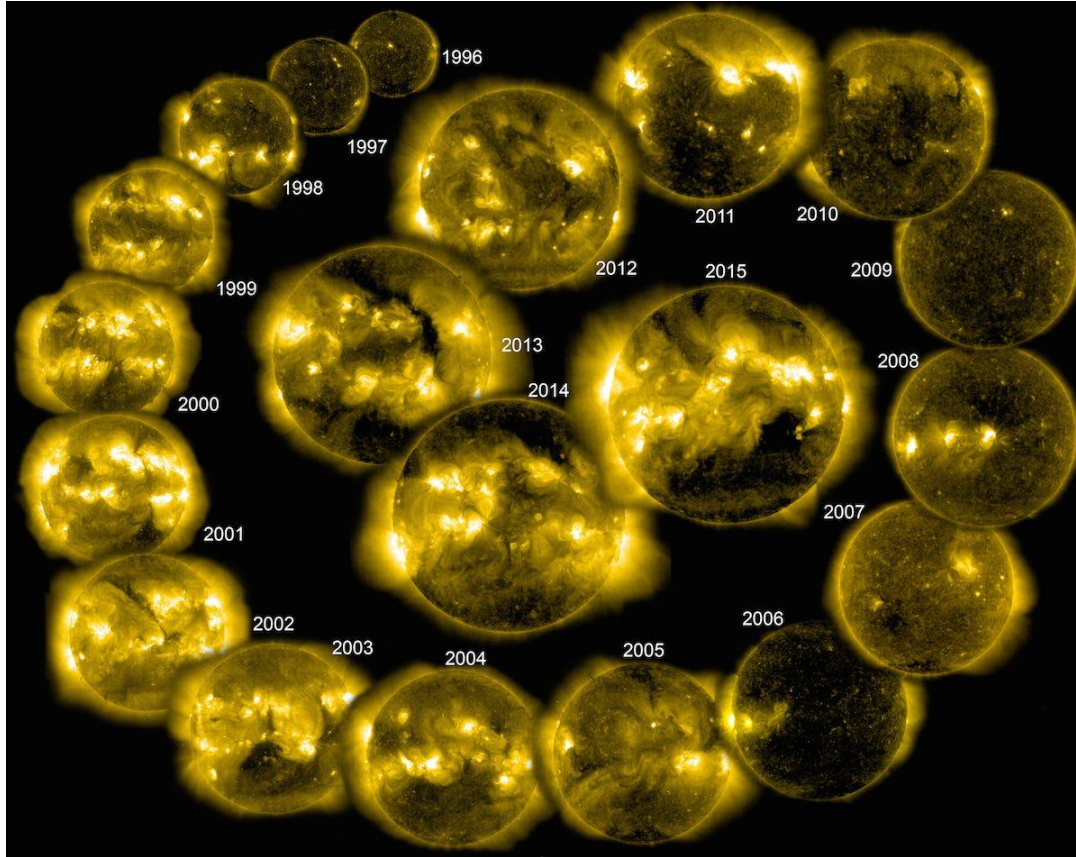


❖ Son activité fluctue

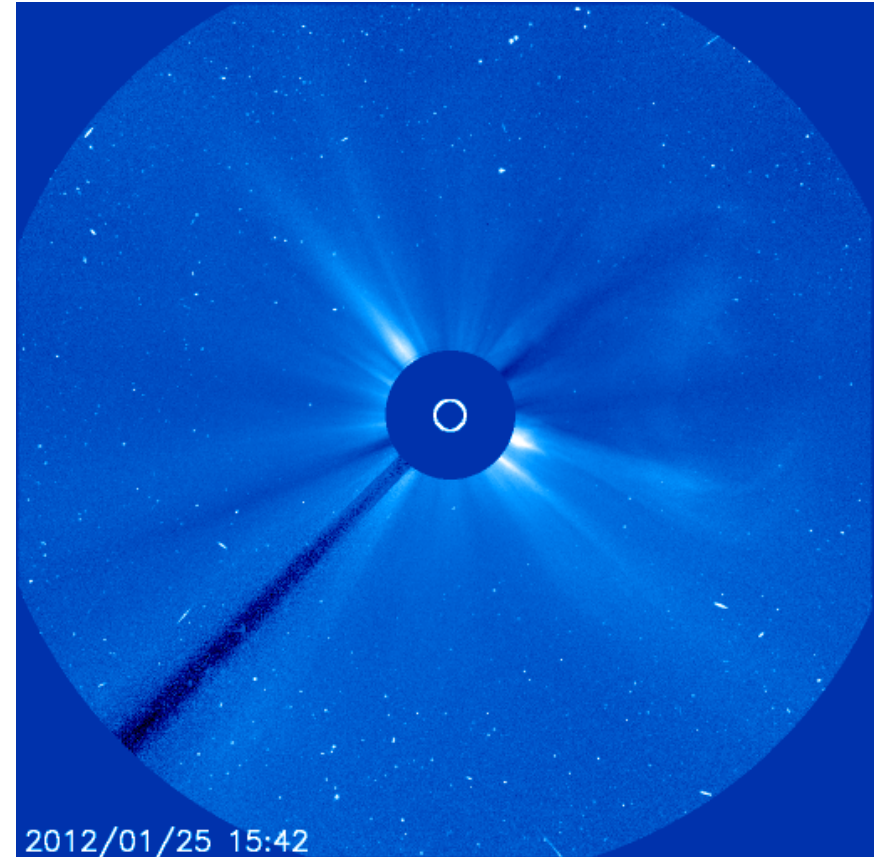
- Variation séculaire
- Cycle solaire de 11 ans
 - Maximum/minimum solaire (+/- d'éruptions)



Le soleil: en résumé



20 ans de mission SOHO couvrent 2 cycles solaires – Cité de l'espace – SOHO/ ESA/NASA

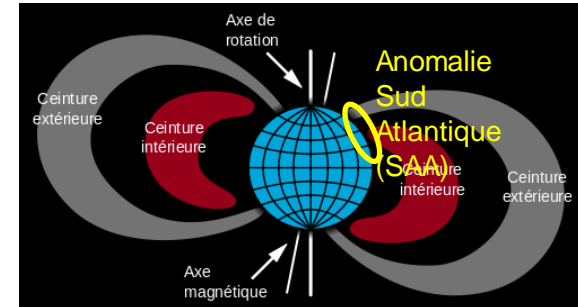
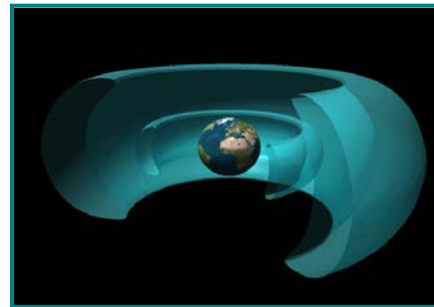
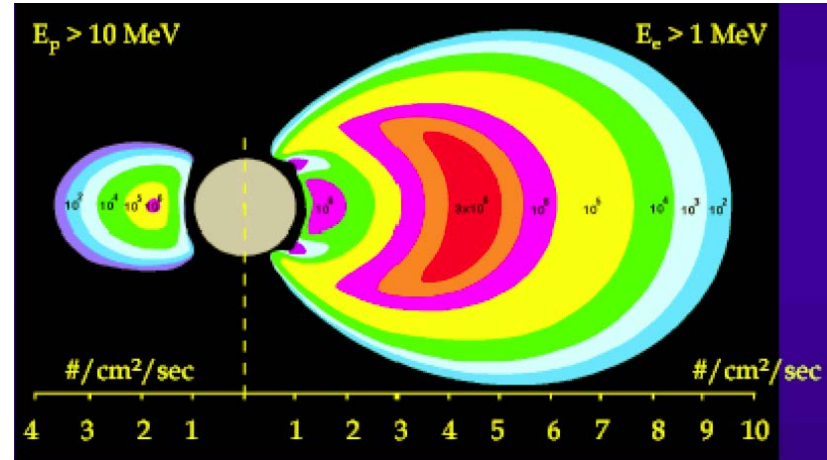
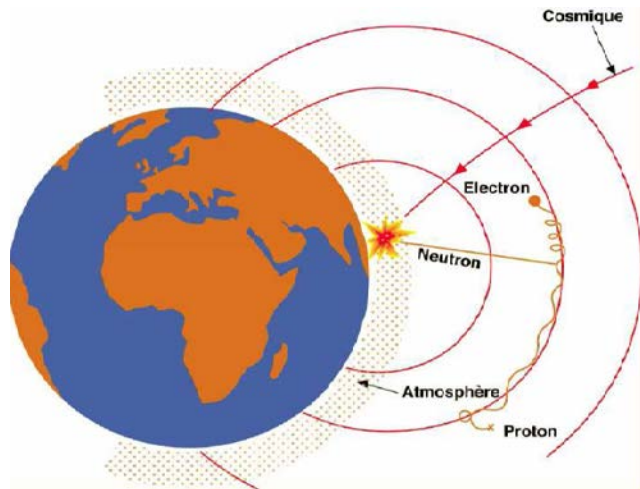


© SOHO/ESA/NASA

Les ceintures de Van Allen

❖ Particules légères piégées dans les lignes de champ magnétique terrestre.

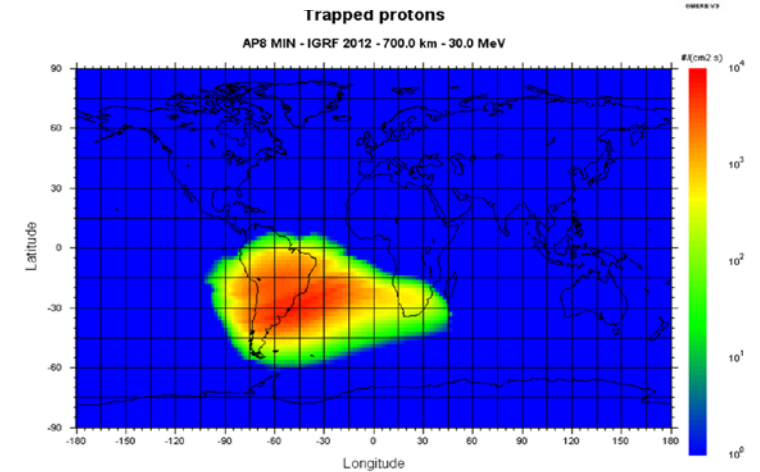
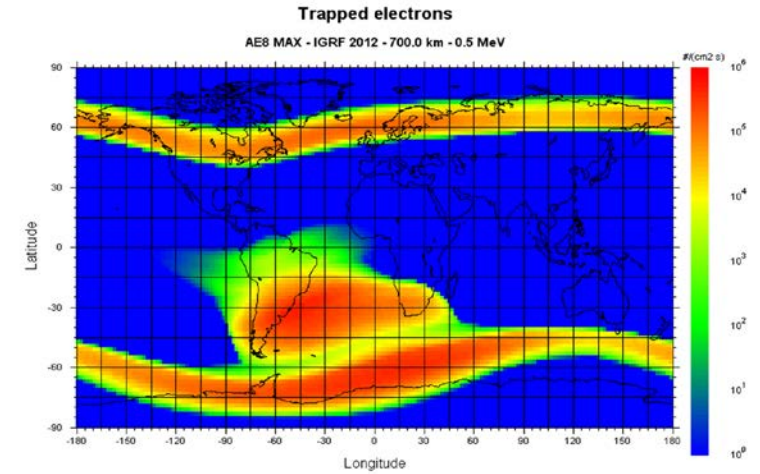
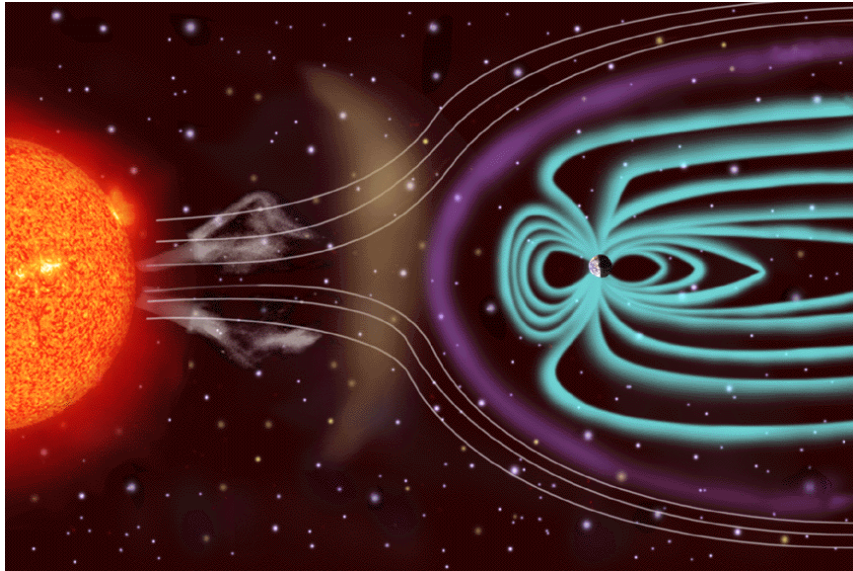
- Protons
- Electrons



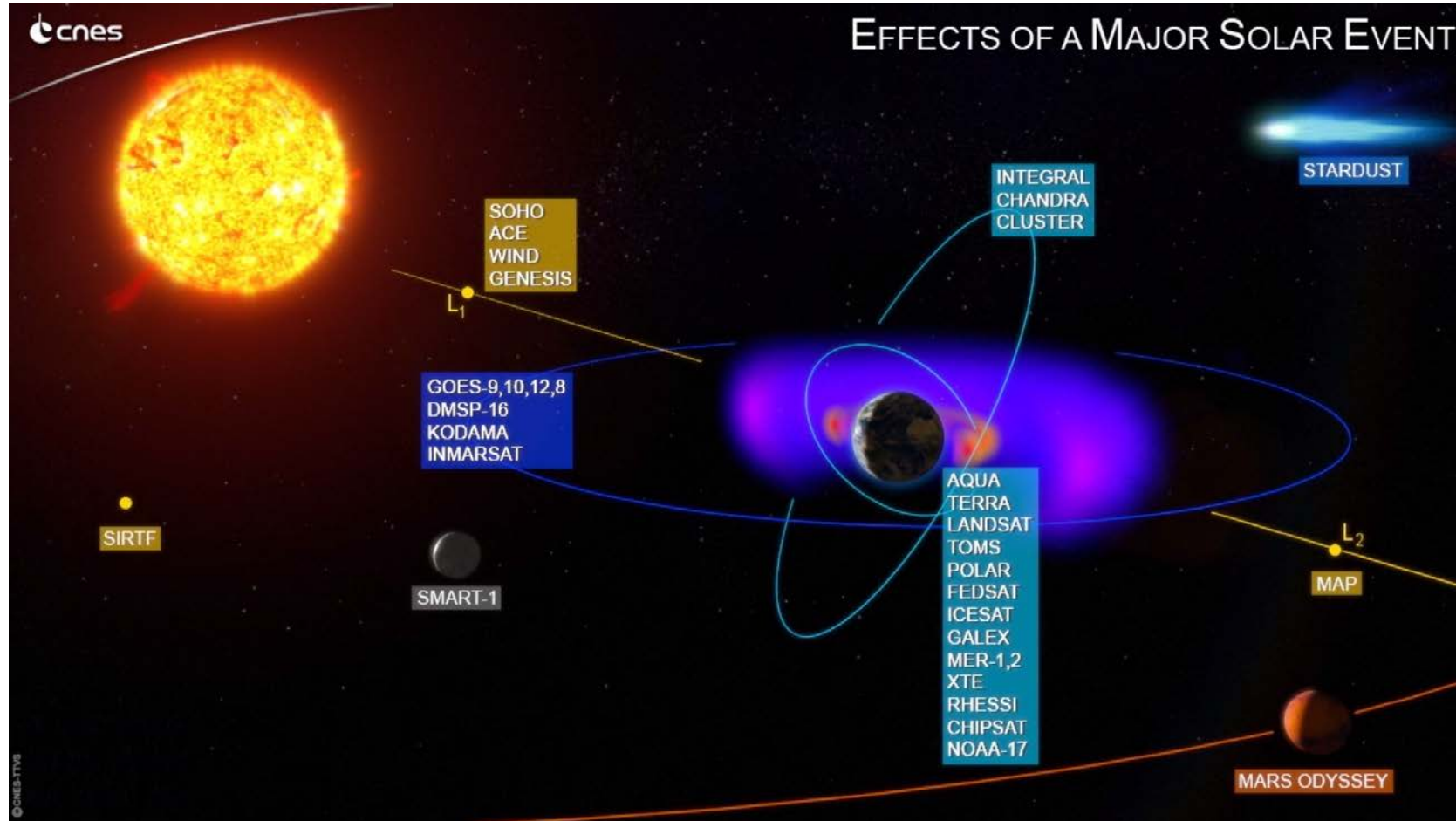
Les ceintures de Van Allen

❖ Dynamiques:

- Déformées sous la pression du vent solaire.
- Enrichies ou vidées lors des éruptions solaires



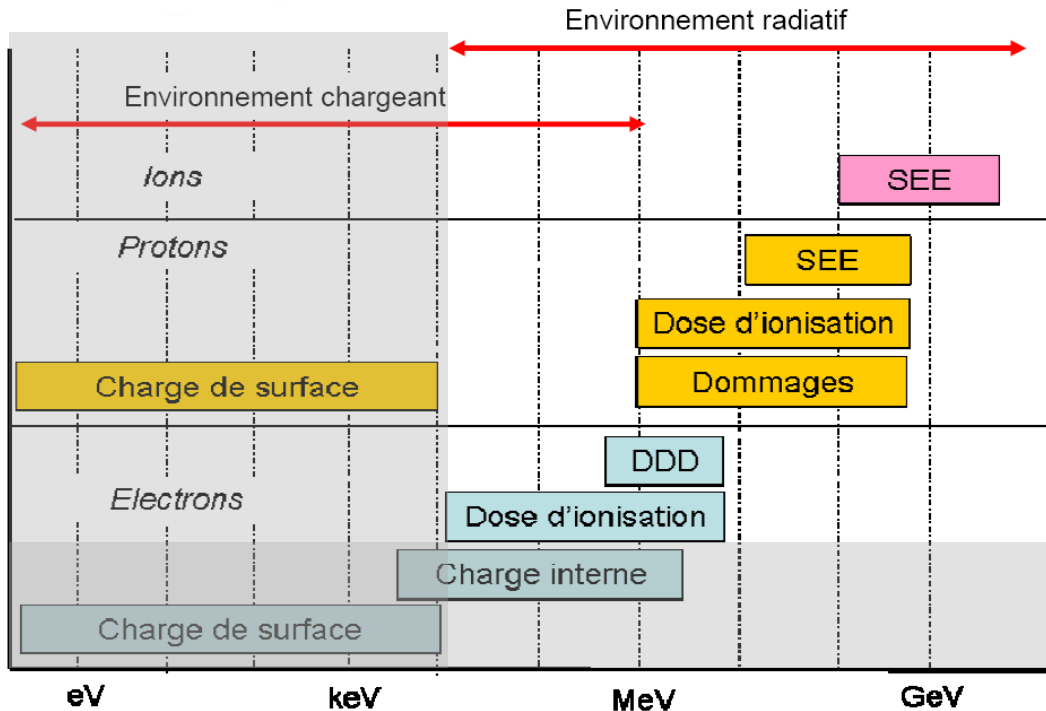
29/10 & 04/11/2003 «Halloween event»



➔ **Anomalies satellites**

Effets des Rayonnements Ionisants sur les engins spatiaux

❖ Effets sur l'électronique et /ou les matériaux en fonction de la nature et de l'énergie des particules reçues



❖ Effets singuliers

- Passage d'une seule particule

❖ Effets cumulatifs

- Vieillessement prématuré

➡ **Fort effet du blindage**

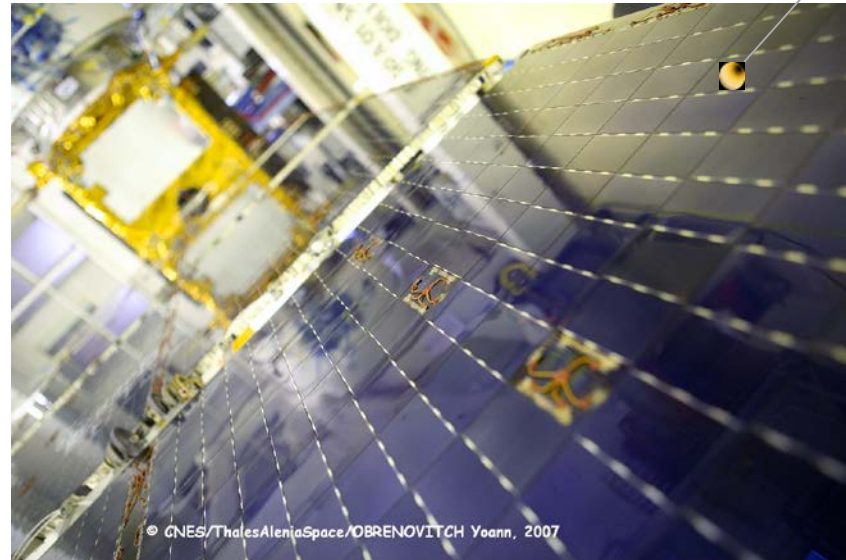


Effets des Rayonnements Ionisants sur les engins spatiaux

❖ A l'extérieur: Beaucoup de particules de faible énergie

- Panneaux solaires, éléments optiques, revêtements, câbles.
- Modification des propriétés:
 - Mécaniques
 - Electriques
 - Optiques

➔ **Très fort gradient de dose**

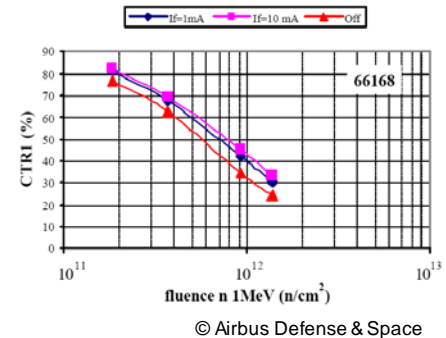
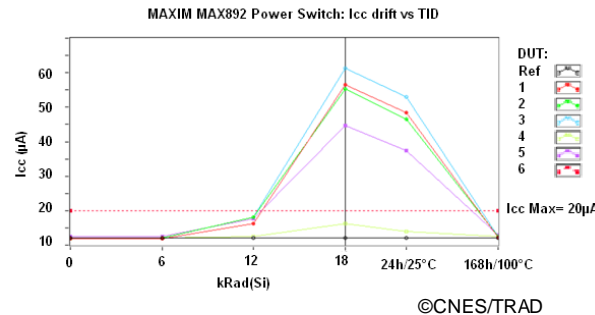
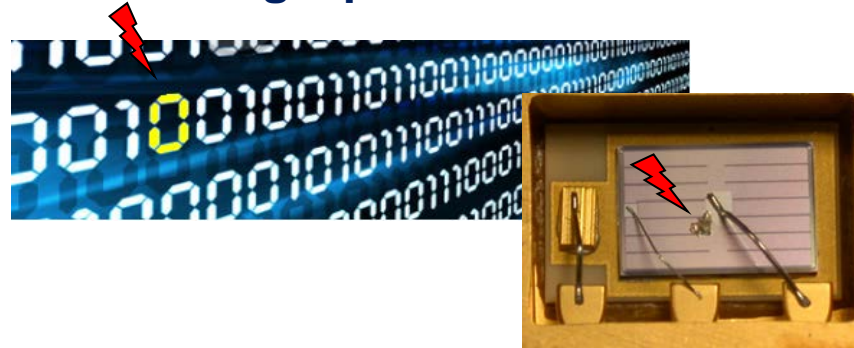


© CNES/ThalesAleniaSpace/OBRENOVITCH Yoann, 2007

Effets des Rayonnements Ionisants sur les engins spatiaux

❖ A l'intérieur: seules les particules de forte énergie pénètrent.

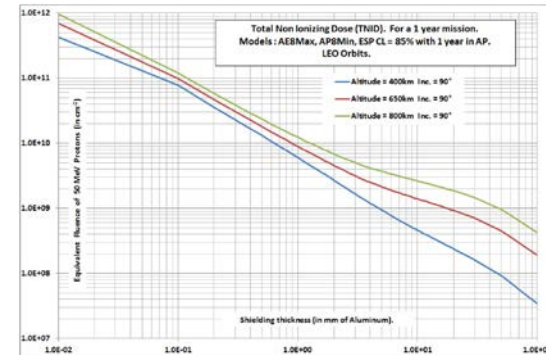
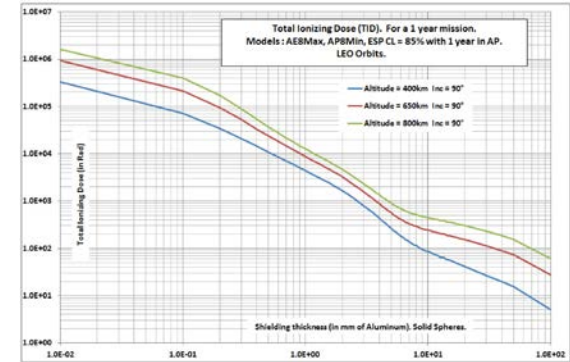
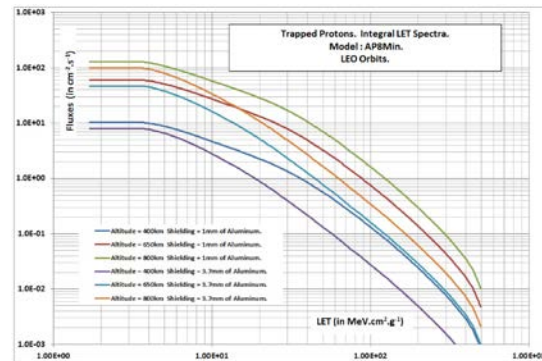
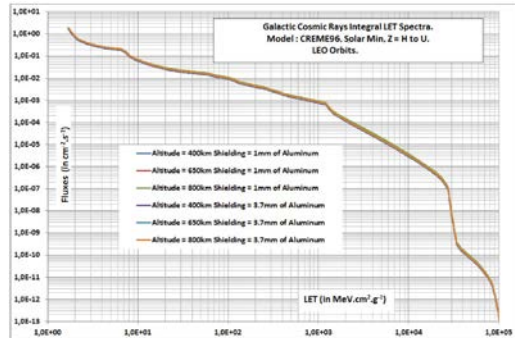
- Composants électroniques.
- Effets singuliers destructifs ou non
 - Pannes transitoires
 - Pannes définitives
- Vieillessement en dose ionisante ou non ionisante (défauts de déplacements atomiques)
 - Dérive paramétrique
 - Perte de fonctionnalité



Prise en compte de ces effets

1. Modélisation de l'environnement de la mission

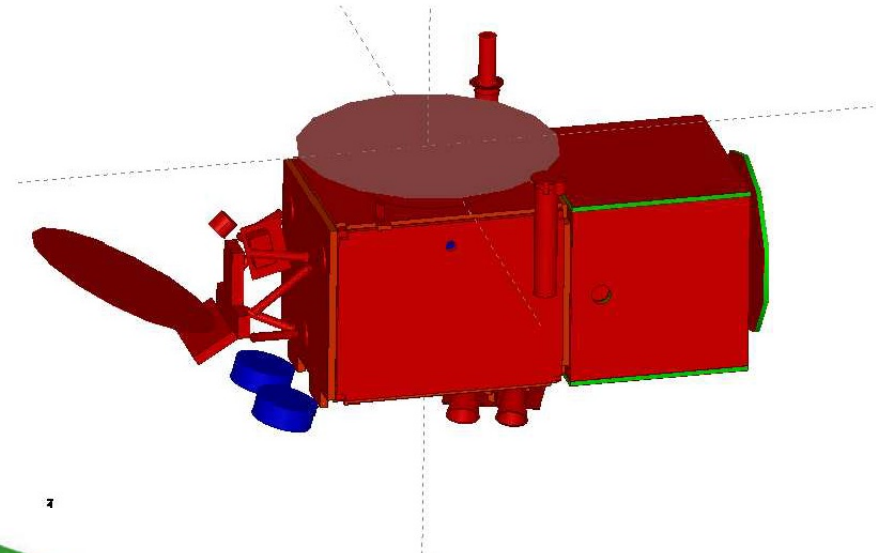
- Courbes de dose
- Spectres d'ions et protons



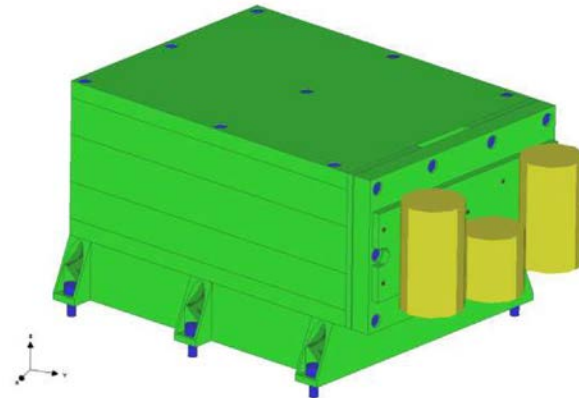
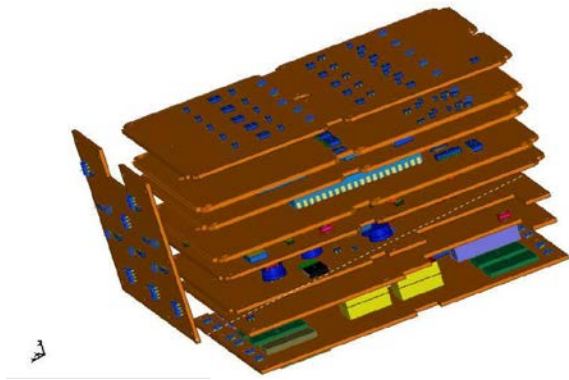
Prise en compte de ces effets

2. Modélisation du blindage

- Apporté par le satellite
- Apporté par l'équipement



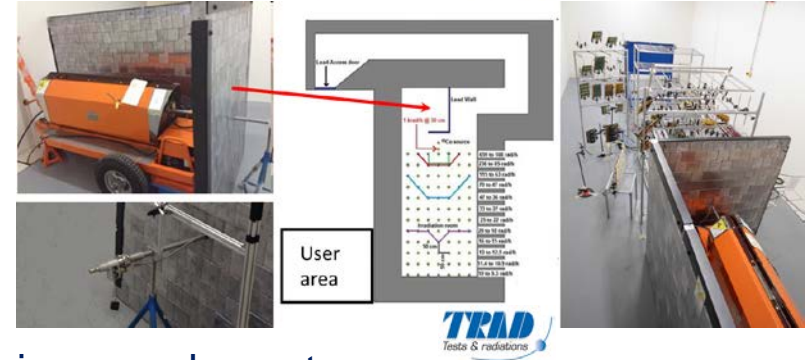
Vue du modèle radiation de JASON 2



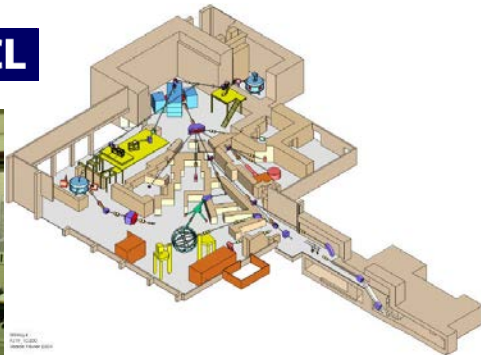
Prise en compte de ces effets

3. Caractérisations de composants

- En dose ionisante – Source Co60
- En dose de déplacement – Accélérateurs de protons, faisceaux de neutrons
- En effets singuliers – Accélérateurs d'ions lourds



UCL



KVI

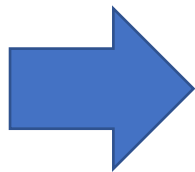


Prise en compte de ces effets

4. Assurance durcissement

- Sélection des composants les moins sensibles
- Conception tolérante aux fautes (vote, redondance, codes correcteurs, blindage...)

Objectif: Remplir la mission sans possibilité de réparation et avec une fiabilité optimale.



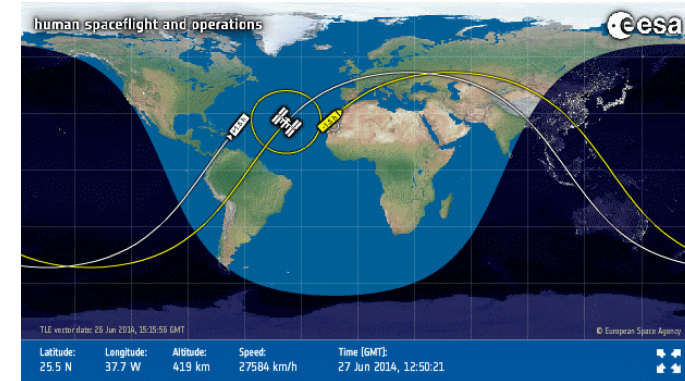
Pour les vols habités, les contraintes sont encore plus fortes.

Les vols habités: La Station Spatiale Internationale



❖ Le plus gros satellite artificiel

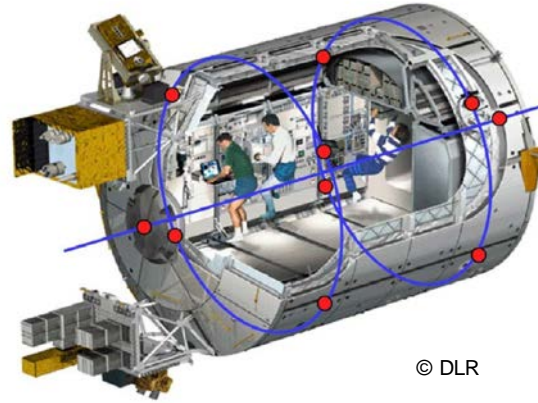
- 100 m
- 400 tonnes
- 120 000 W



Exemple de dosimétrie à bord de l'ISS

❖ DOSIS-3D: le dosimètre européen

- Depuis Mai 2012
- Développé par le DLR pour l'ESA
- **11 Dosimètres passifs**
 - PDP (Passive Detector Package)
 - Répartis dans module COLUMBUS
 - Remplacés tous les 6 mois.
- **2 Dosimètres actifs**
 - DOSTEL (DOSimetry TELescope)
 - Mesure des fluctuations dans le temps
 - Détecteurs PIPS de Camberra en coincidence
 - Données téléchargées tous les mois au CNES/CADMOS à Toulouse



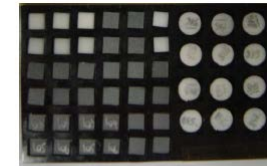
© DLR



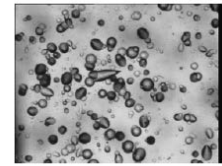
Quels types de dosimètres:

❖ DOSIS-3D: collaboration internationale => assortiment de dosimètres variés

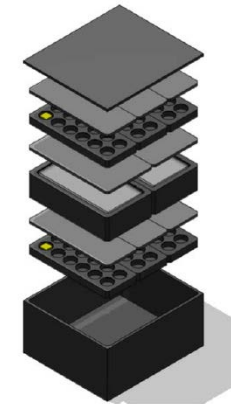
- $^6\text{LiF:Mg,Ti}$ (TL!!D-600)
 - $^7\text{LiF:Mg,Ti}$ (TLD-700)
 - $\text{CaF}_2:\text{Tm}$ (TLD-300)
 - NatLiF:Mg,Ti (TLD-100)
 - $^6\text{LiF:Mg,Ti}$ (MTS-6),
 - $^7\text{LiF:Mg,Ti}$ (MTS-7),
 - $^7\text{LiF:Mg,Cu,P}$ (MCP-7)
 - $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$
 - $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{C}$ (TLD-500 K)
 - ...
- } Thermo Fisher Scientific Inc.,
- } Nagase Landauer Ltd Japan
- } Institut de Physique Nucléaire (IFJ), Cracovie, Poland
- } Protecta Ltd
- } Université d'état de l'Oural



Thermoluminescence detectors (TLD)



Nuclear Track Etch Detectors (CR-39)



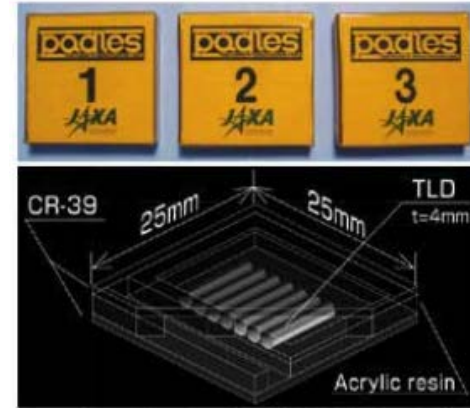
Autre exemple de dosimètre passif



© NASA/ESA/JAXA

❖ PADLES: la solution japonaise

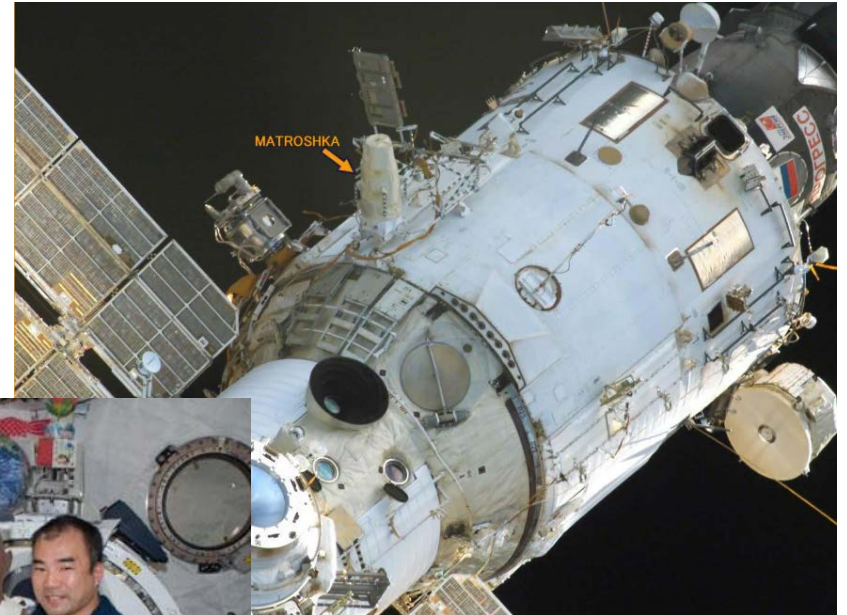
Detectors	Measurements	Particles/ Characteristics	LET range (keV/fém)
TLD MSO-S	Absorbed dose* ¹	Photons, Charged particles	0.2 - 10
CR-39	HARZLAS(TD-1/TNF-1)	LET spectrum	Charged particles 2 - 1000
	BARYOTRK/HARZLAS (TD-1)	particle tracking	HZE* ³ particles > 40 * ⁴
TLD MSO-S	Absorbed Dose	Photons, Charged particles	0.2 - 1000
CR-39	HARZLAS(TD-1/TNF-1)	Equivalent Dose* ¹	Photons, Charged particles
	Effective Quality Factor* ²	Photons, Charged particles	
Temperature	-80 - +40 deg. C		
Gas	1atm, the air		
Package Size	25mm ^w *25mm ^l *4mm ^t typical		
On Board Period	a standard period: 3 month (minimum:1 week - maximum :1 year)		



- Agence spatiale Japonaise: JAXA
- Dans les modules du laboratoire Kibo, en mai 2014.

Le projet MATROSHKA sur l'ISS

- Coopération internationale ESA/JAXA/ROSCOSMOS
- Fantôme fabriqué par le DLR (Agence allemande)
- ❖ **Utilisation à l'extérieur de l'ISS**
 - Installé à l'extérieur du module Zvezda
 - 1 an à partir de Février 2004
- ❖ **Utilisation à l'intérieur de l'ISS**
 - Réutilisation du fantôme
 - Installé à l'intérieur du module Kibo
 - Dosimètres de 18 organisations (9 pays).
 - 25 dosimètres PADLESS japonais
 - 11 mois (Avril 2010- Mars 2011)



Quelques relevés dosimétriques:

❖ Résultats DOSIS

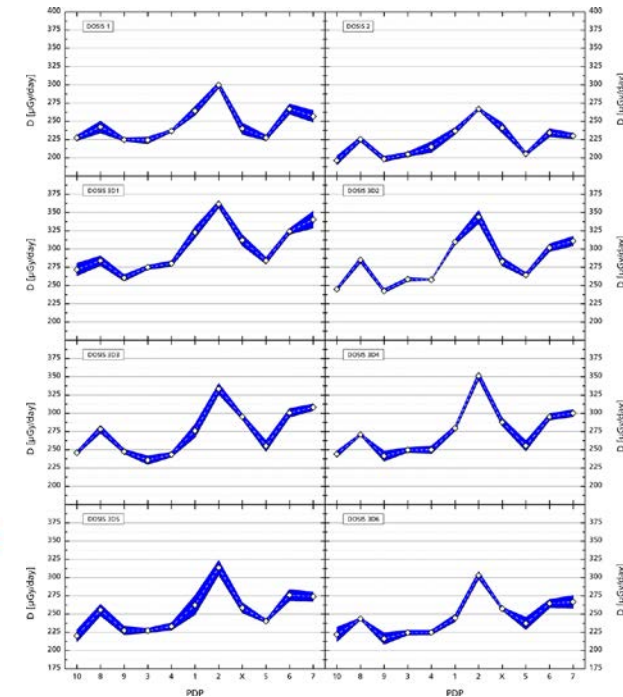
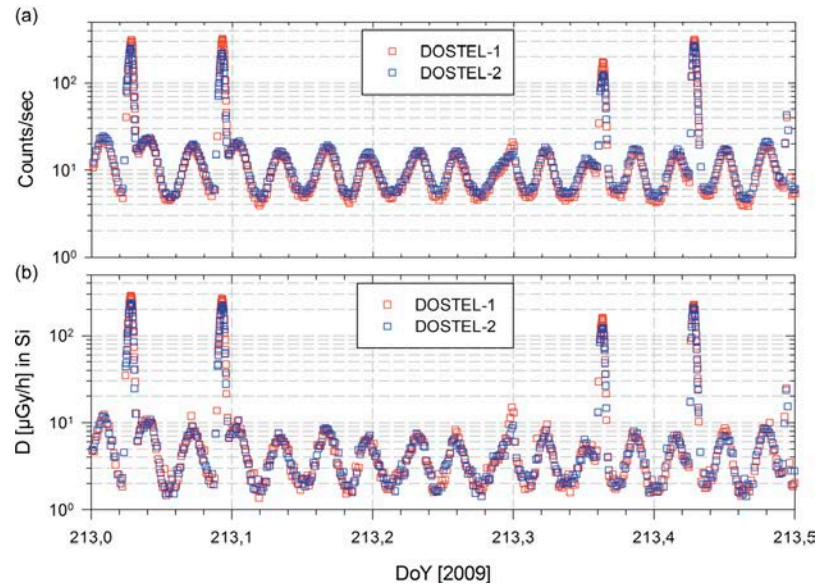
- Mesure 200 et 350 $\mu\text{Gy}/\text{jour}$
- $H^*10 = 647 \mu\text{Sv}/\text{jour}^*$

❖ Résultats DOSTEL:

- $H^*10 = 30 \mu\text{Sv}/\text{h}$
 $= 720 \mu\text{Sv}/\text{jour}$

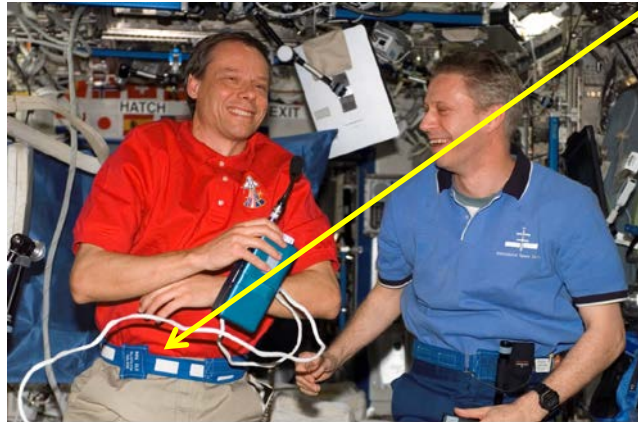
6 mois = 183j

Mission type:
 ~130mSv



*DOSIS & DOSIS 3D: radiation measurements with the DOSTEL instruments onboard the Columbus Laboratory of the ISS in the years 2009–2016 T. BERGER et al

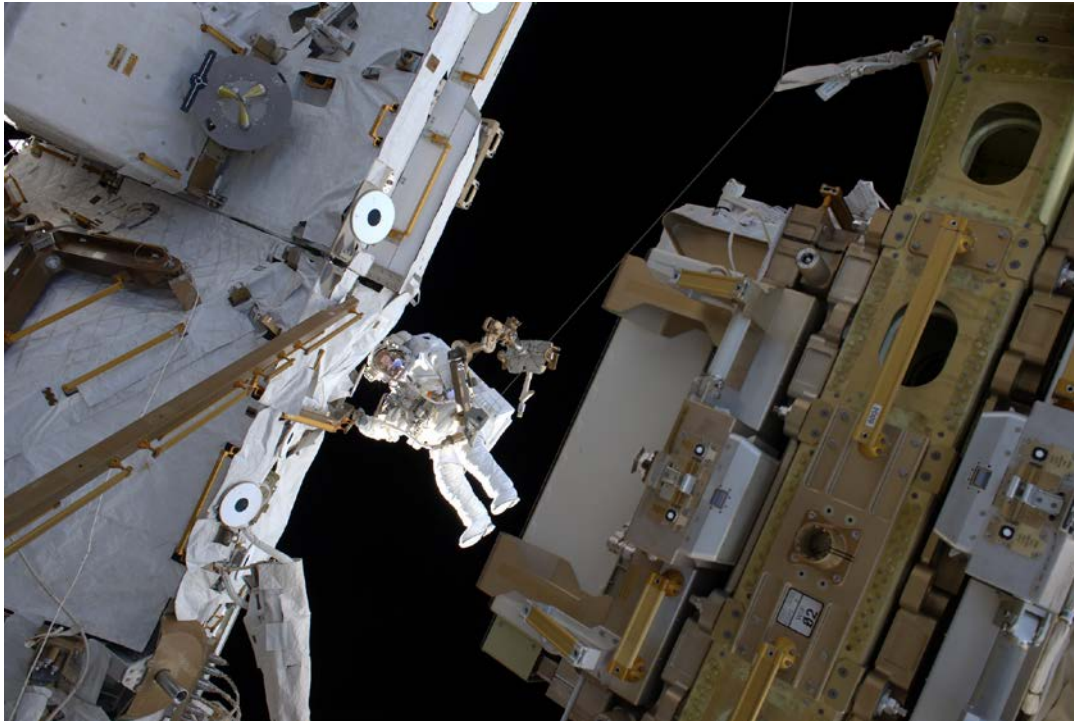
Le dosimètre opérationnel EUCPAD



0116E06402

Les sorties extra Véhiculaires

❖ Intérêt de la dosimétrie opérationnelle

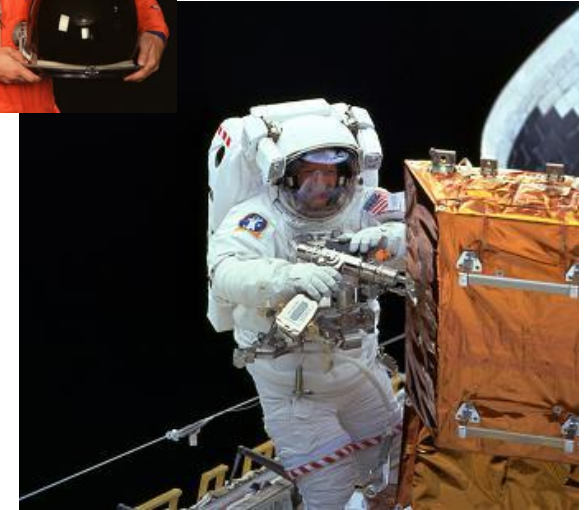


- Durée: quelques heures
- 1 à 2 EVA par astronaute et par mission
- Pas d'EVA si éruption solaire

Quelques anecdotes

❖ Je « voyais les ions lourds ». Claude Nicollier

- Astronaute suisse de l'ESA.
- 4 Missions avec la navette américaine
 - STS-46 en 1992
 - STS-61 en 1993 (Maintenance du télescope Hubble)
 - STS-75 en 1996
 - STS-103 en 1999 (Maintenance du télescope Hubble)
- Plus de 1000 heures dans l'espace (6 semaines)
- EVA de plus de 8 h en 1999 pour installer un nouvel équipement sur Hubble.



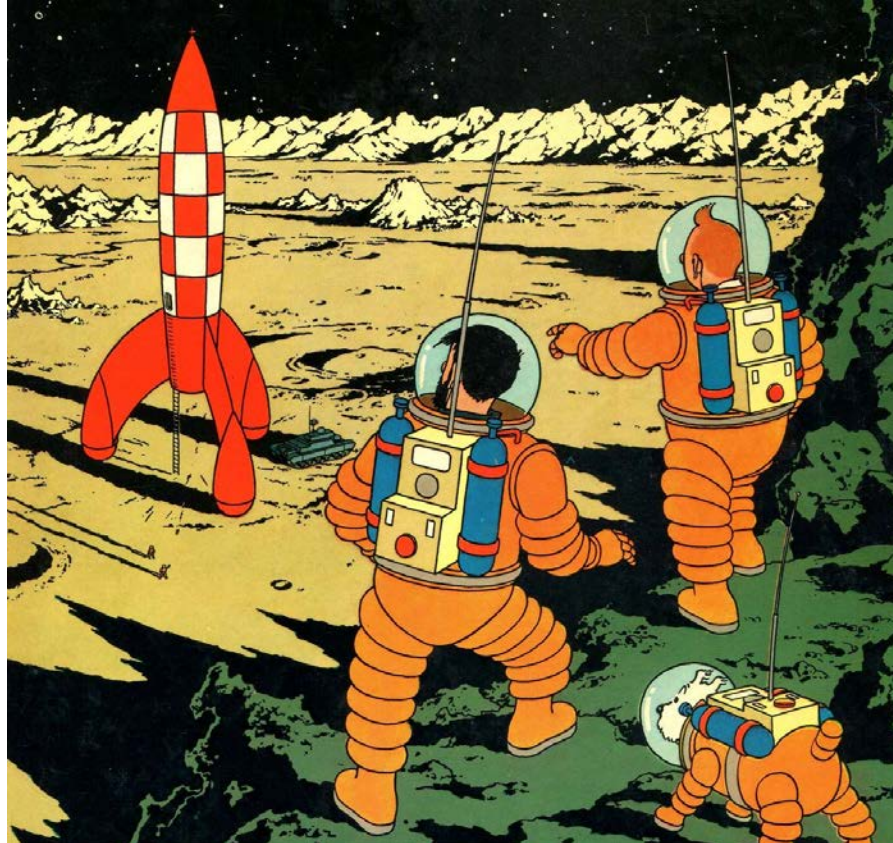
Quelques anecdotes

❖ En cas d'éruption solaire, on se replie dans notre « chambre ». Thomas Pesquet

- Astronaute Français pour l'ESA.
- Mission Proxima
- 6 mois dans l'espace
- 2 EVA pour un total de 16h hors de l'ISS.



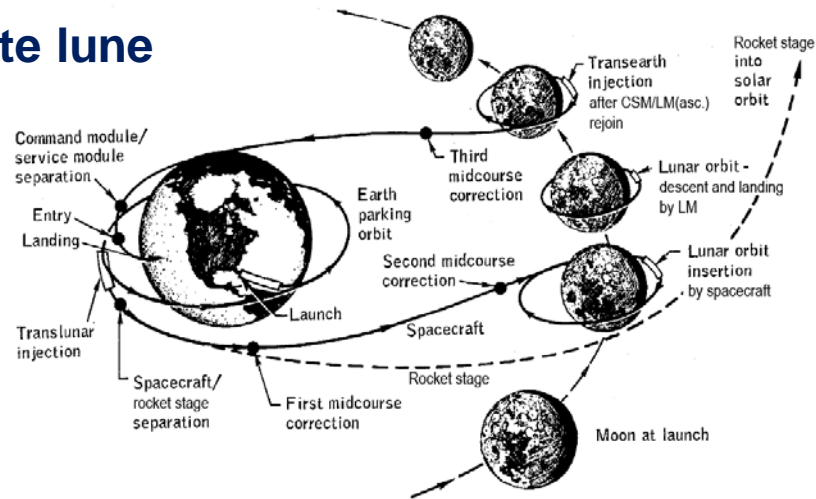
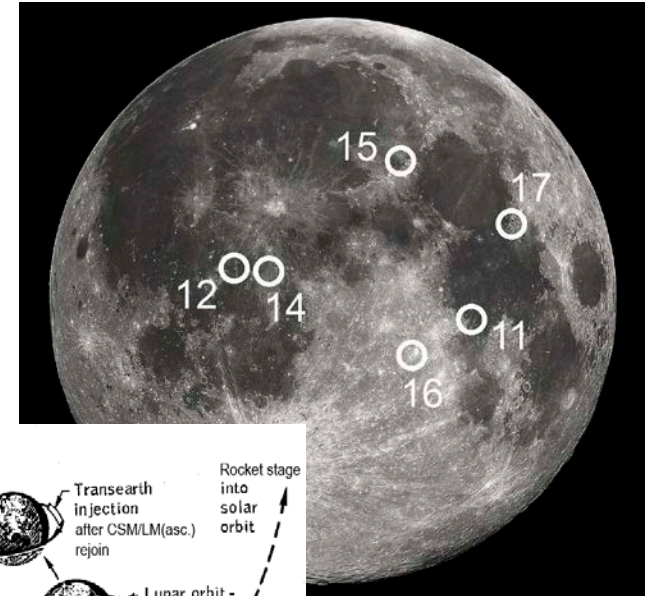
Prochaine destination: La lune?



H^*_{10} (surface) = 110 – 380 mSv/an
Essentiellement due aux GCR et SEP.
 $\Rightarrow H^*_{10} \sim 0,57\text{mSv/j}$

Les missions APOLLO: exemple Apollo XI

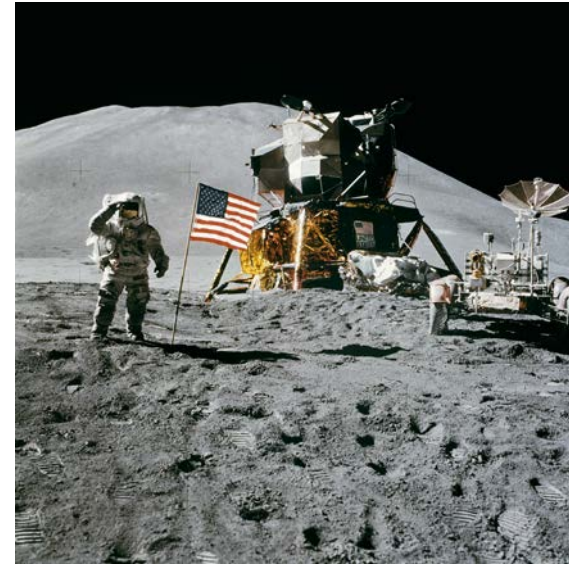
- ❖ Distance terre Lune: 384 402 km
- ❖ Durée transfert: 3 jours + 1 en orbite lune
- ❖ Durée sur la lune: 22 h
- ❖ EVA: 2h31
- ❖ Durée retour: 2 jours + 1 en orbite lune



Les missions APOLLO suivantes

- ❖ **Apollo 13:** 5j 22h 54 min dans l'espace
- ❖ **Apollo 15:** 12j 17h 12 min dont 18h18 EVA pour 1 astronaute
- ❖ **Apollo 17:** 12j 13h 52 min dont 21h31 EVA pour 1 astronaute

Durée courte!



L'homme colonisera t'il la lune ?

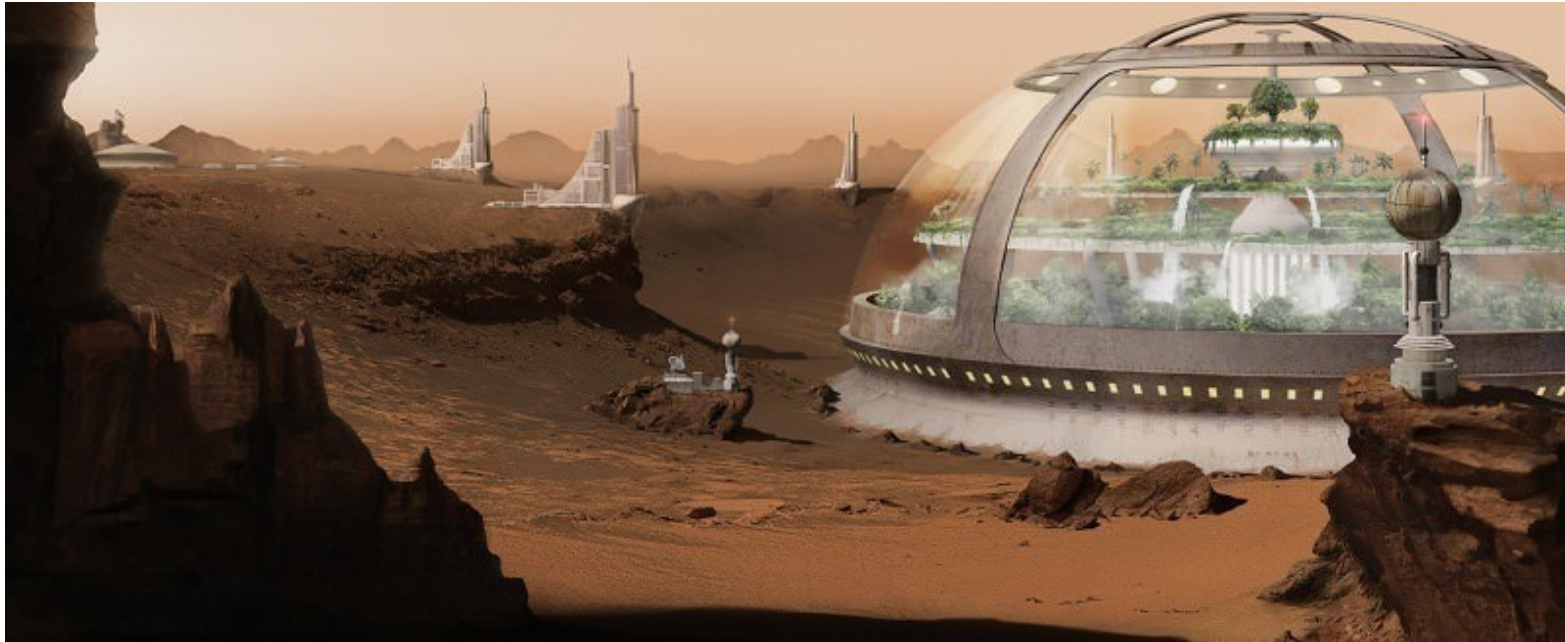


©ESA/Hubble/AFP/BERNARD FOING

- Projet Moon Village de l'ESA:
- 6 colons chercheurs en 2030
 - 100 personnes en 2040

Dose (surface) = 2Sv en 10 ans!!!

Mars ?



Vue d'artiste: le projet de ville martienne par Elon Musk (SPACEX)

H^*10 (surface) = 0,67mSv/j

H^*10 (transfert) = 1,8mSv/j

Due aux GCR et protons SEP.

Aller sur Mars:

- ❖ Distance terre Mars: 55 à 400 Millions de km
- ❖ Durée transfert: 6 à 12 mois.



© NASA

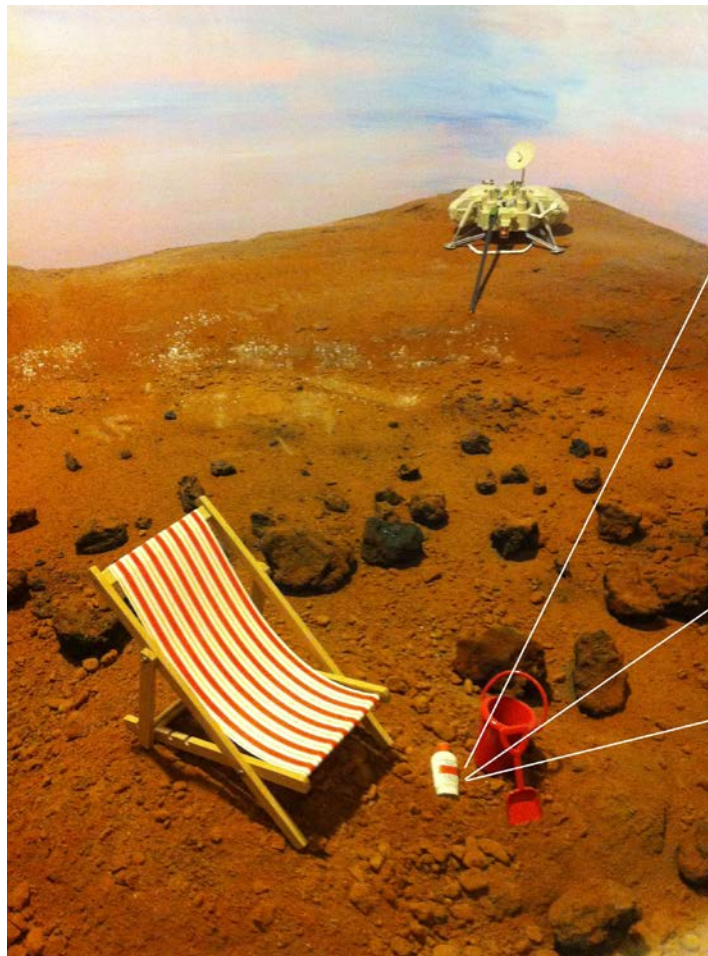
$H \cdot 10$ (transfert) = 0,3 à 0,65Sv

Dose (surface) = 2,44Sv en 10 ans!!!



© Martin Kormmesser (ESA/Hubble)

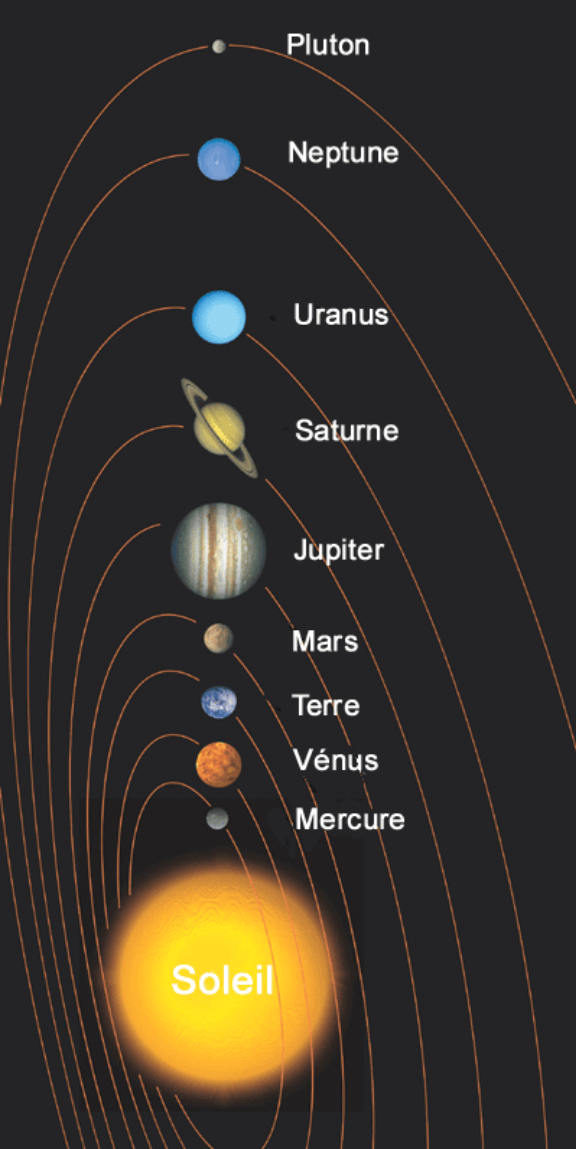
Aller sur Mars:



Vu au musée des sciences de Londres

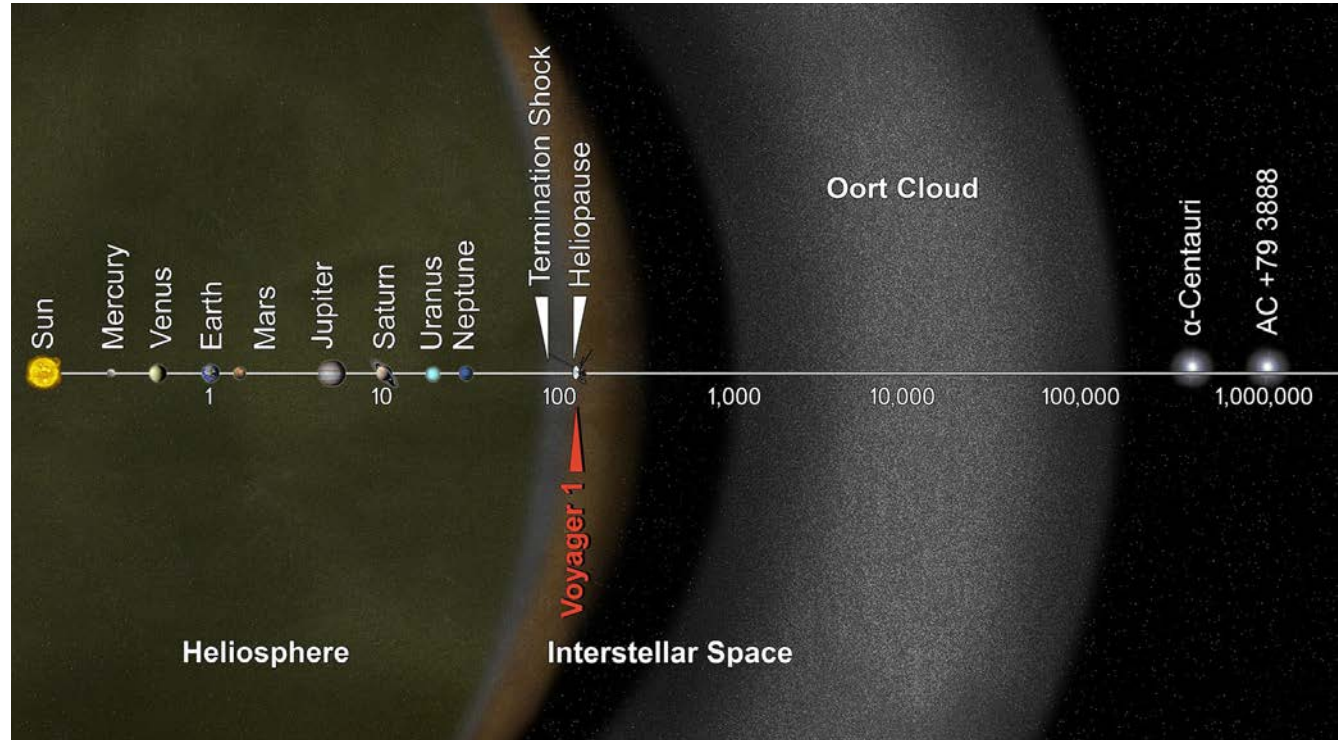


Explorer le système solaire?



- ❖ **Mars, 56 millions de km de la Terre au minimum**
- ❖ **Saturne, 1,2 milliards de km**
- ❖ **Neptune, 4,3 milliards de km**
- ❖ **L'exploration planétaire, en particulier celles du système solaire externe, pose le problème de la distance à parcourir, de l'énergie et de la durée du trajet.**

Au delà du système solaire?

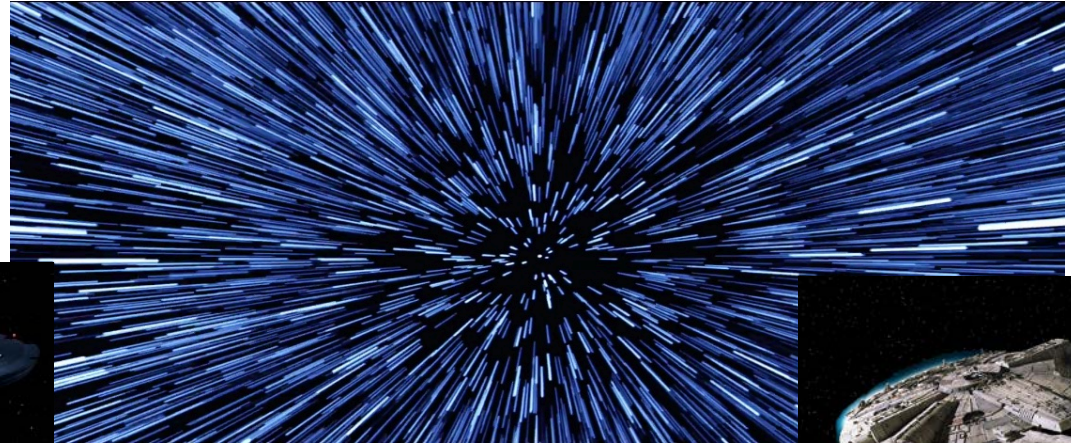


©By NASA/JPL-Caltech

Perspectives

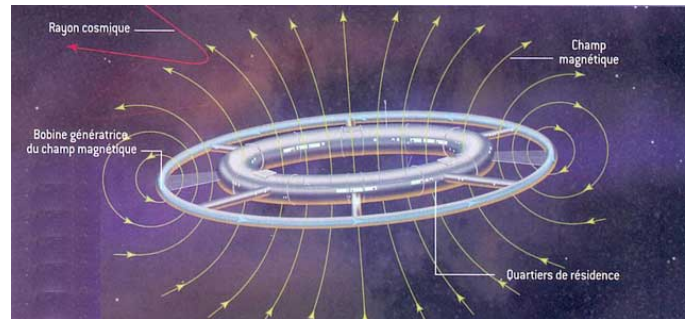
❖ Réduire la durée des trajets

- Inventer la propulsion de demain



❖ Réduire l'exposition en croisière et au sol.

- Inventer de nouveaux moyens d'écrantage

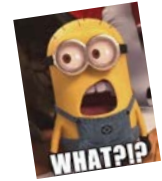


Ce qui est déjà dans les tiroirs:

❖ **Projet VASIMR AD Astra sponsorisé par la NASA**

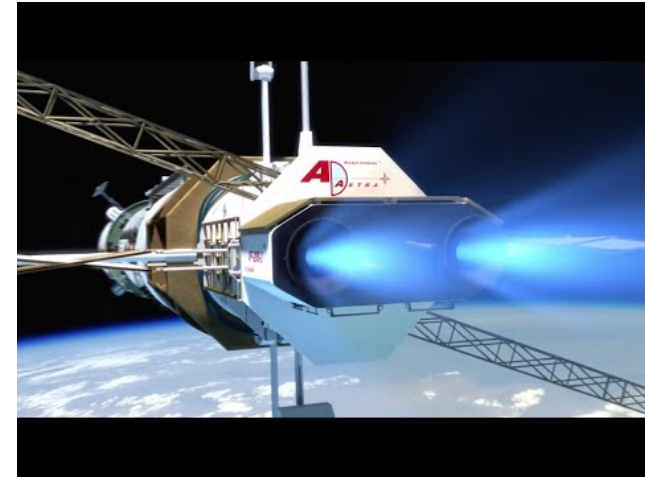
Fusée à propulsion magnéto plasmique à impulsion spécifique variable

➔ 39 jours de trajet seulement pour Mars.



❖ **Projet HRP Human Research Program**

- Parmi les thèmes de recherche: limiter l'exposition aux radiations en optimisant le blindage.



**MERCI
POUR VOTRE
ATTENTION. AVEZ
VOUS DES QUESTIONS?**