

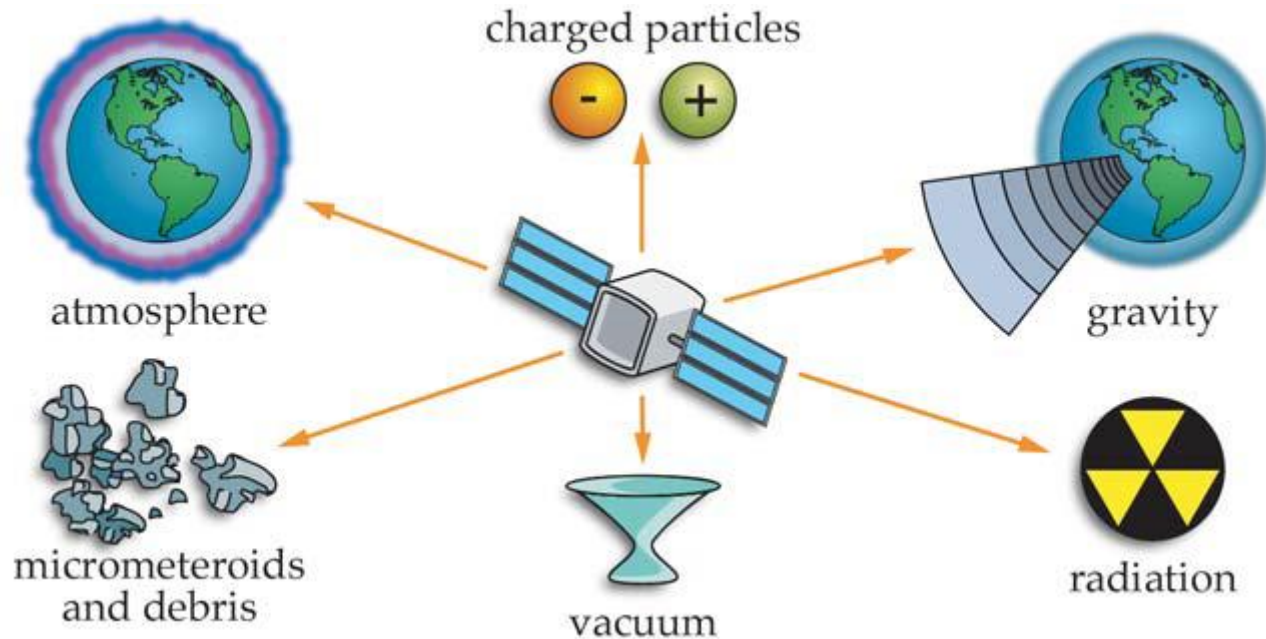


Environnement Spatial



ENVIRONNEMENT SPATIAL - INTRODUCTION

- Un environnement difficile...

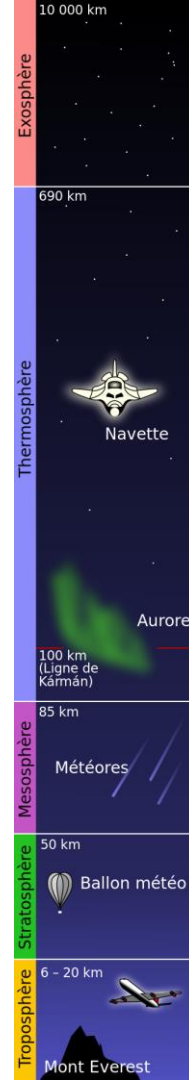


Les 6 challenges de l'environnement spatial
The Space Environment

ENVIRONNEMENT SPATIAL - **ATMOSPHÈRE**

Où commence l'espace ?

- Limites classiques de l'atmosphère
 - 100 km → Limite (ou ligne) de Karman
 - Limite théorique et conventionnelle de l'espace (83,6 km à la base)
- Autres limites
 - US Air Force: 93,6 km (57,5 mi) → Limite pour obtenir les « ailes » d'astronaute
 - 130km: Limite pour laquelle une orbite peut durer quelques jours
→ 1h de voiture par l'autoroute...
- En réalité l'atmosphère n'a pas de limite physique...
 - En mécanique spatiale, on enlève la traînée atmosphérique au-dessus de 700,1000 ou 2000 km (cela dépend des auteurs)



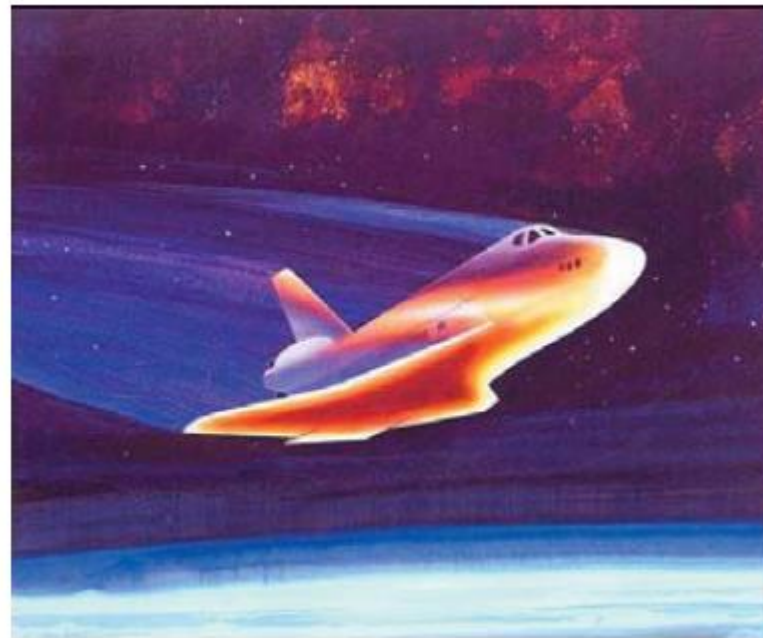
ENVIRONNEMENT SPATIAL - **ATMOSPHÈRE**

Effets de l'atmosphère

- Traînée
 - Diminue la durée de vie des satellites
 - Impose des manœuvres de maintien de l'altitude
 - « Brûle » les objets en rentrée atmosphérique
- Oxygène atomique (O)
 - Dégrade les surfaces des satellites (bien plus vite que O₂)

Modèles d'atmosphère

Physique / Chimie complexe à modéliser

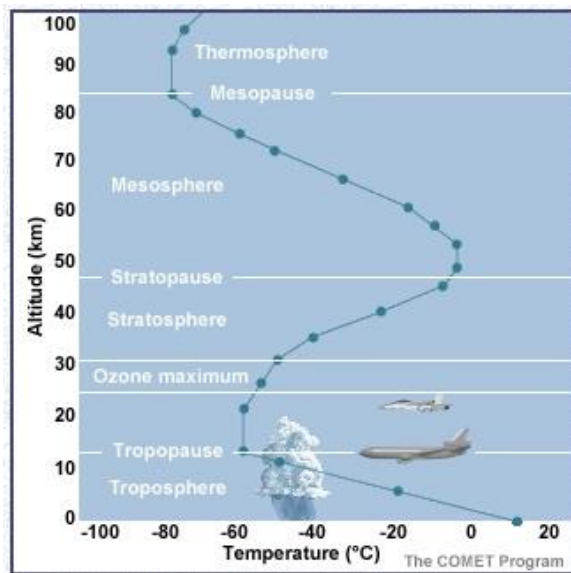


Shuttle Re-entry
NASA/Ames Research Center

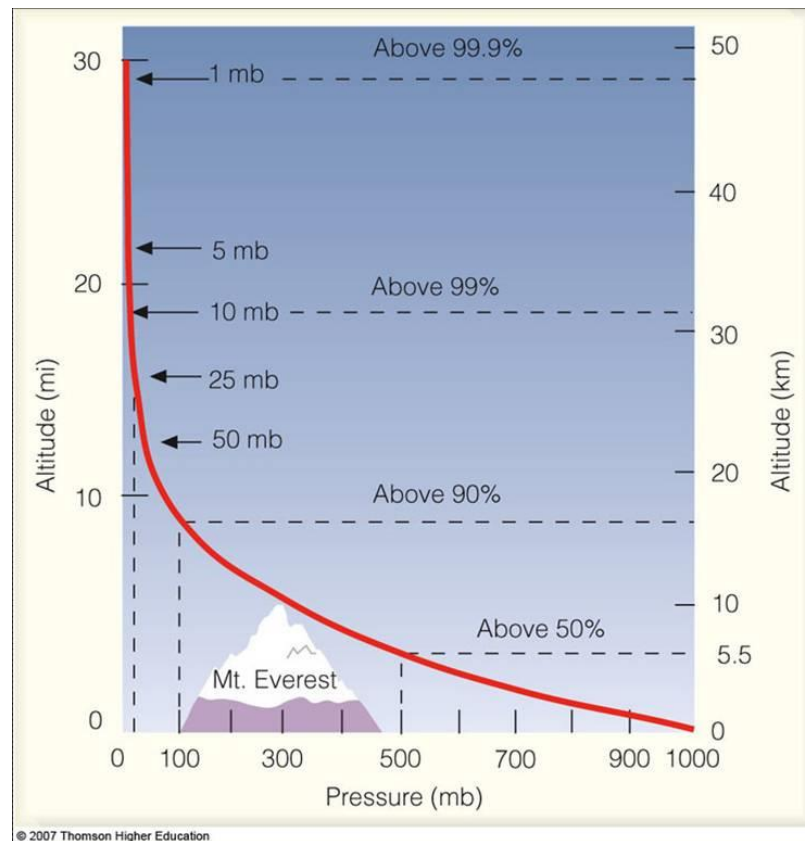
ENVIRONNEMENT SPATIAL - **ATMOSPHÈRE**

- **Modèles de base:**

- Statiques: exponentiel, US Standard Atmosphere 76
- Pas du tout fiables pour des calculs précis



Modèle de température type US SA 76



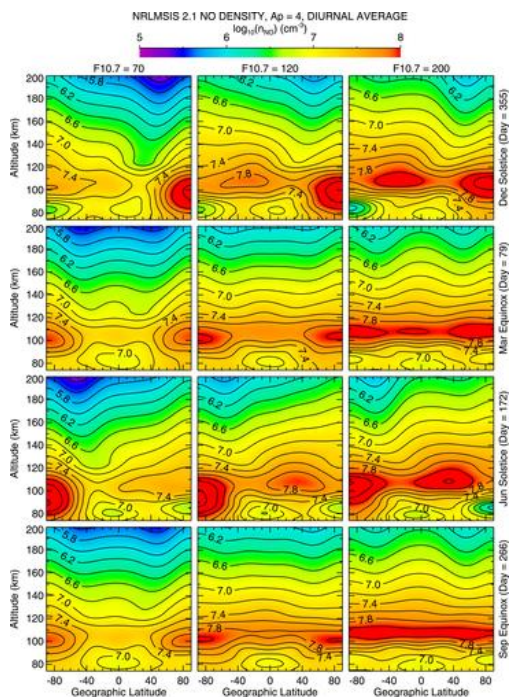
Modèle de pression exponentiel

ENVIRONNEMENT SPATIAL - **ATMOSPHERE**

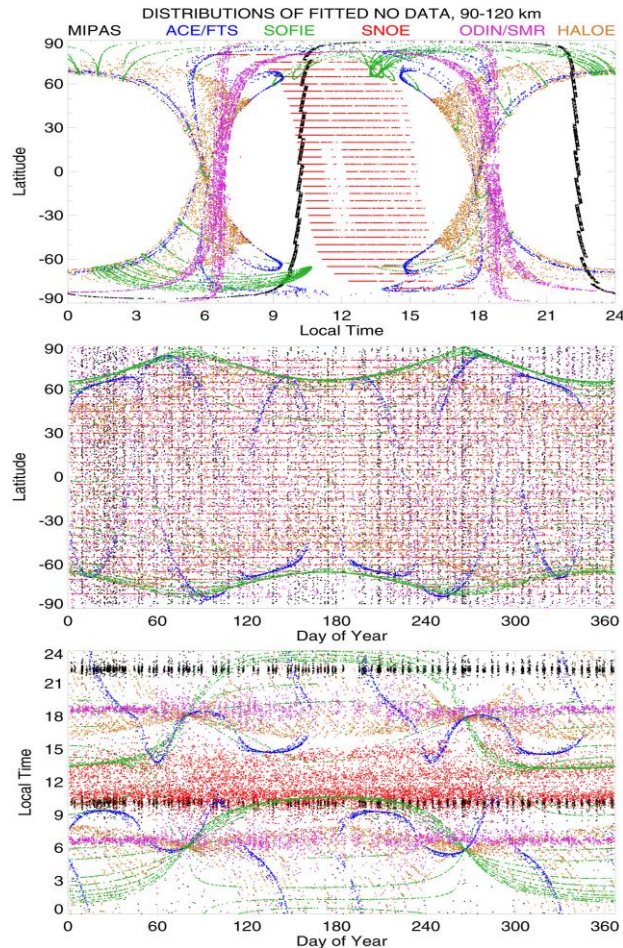
Modèles d'atmosphère opérationnels: Champ de recherche actif !

- Basés sur des observations de satellites LEO (CHAMP, GRACE, GOCE etc.)
 - Instruments dédiés à l'observation de la haute atmosphère
 - Modèlent la densité globale ainsi que les concentrations des différentes espèces
- Paramétrés par l'activité solaire et l'heure solaire locale
 - Gonflement de l'atmosphère côté jour
 - Entrées dépendantes de l'activité solaire:
 - Flux solaire moyen
 - Indice géomagnétique
- Exemples
 - Drag-Temperature Model (DTM (CNES – Sean Bruinsma) 2000 / 09 / 13 / [20...](#))
 - MSIS 90 / 2000 / [2.0](#) (2020) / [2.1](#) (2022)... (Naval Research Laboratory, US)
 - Jacchia-Bowman (US) 1971 / 2006 / 2008...
 - [MSAFE](#): modèle moyen mensuel avec prédiction

ENVIRONNEMENT SPATIAL - ATMOSPHÈRE



Densité d'oxyde nitrique NO NRL MSIS 2.1
[Emmert et al 2022](#)



Mesures NO modèle NRL MSIS 2.1
[Emmert et al 2022](#)

ENVIRONNEMENT SPATIAL – **VIDE SPATIAL**

- **Vide spatial** = Densité atmosphérique très faible
 - 80 km: 10 000 fois moins dense qu'au niveau de la mer
 - 1000 km: 10^{18} fois moins dense
- Effets sur les organismes
 - Problèmes neurologiques
 - Problèmes de circulation sanguine: création de vapeur par perte de pression sanguine
- Effets sur les matériaux
 - Dégazage voire sublimation
 - Augmentation de la friction entre les composants → « soudure à froid »
 - Absence de gaz qui joue habituellement le rôle de lubrifiant
 - Problème de transfert de chaleur
 - Transfert par radiation principalement
 - Par conduction au sein des matériaux (peu efficace)
 - Absence de convection (absence de gaz) autour du matériau

→ Choix compliqué de matériaux adéquats

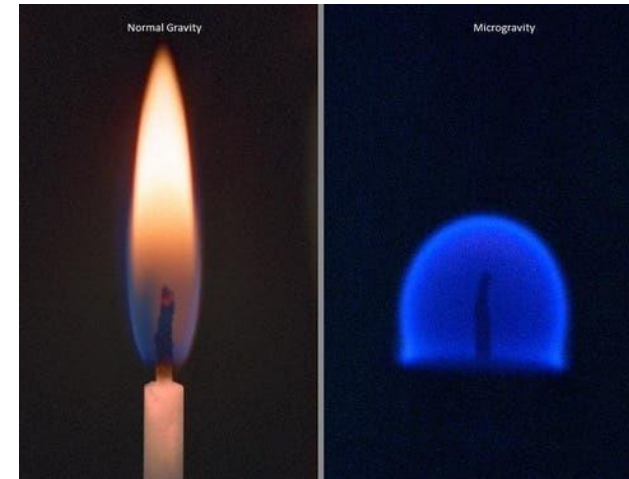
ENVIRONNEMENT SPATIAL – MICROGRAVITÉ

- **Microgravité – Définition:**

- Gravité apparente très faible: 10^{-4} - 10^{-8} g
- « Chute libre »

- **Effets immédiats**

- Perte de
 - Pression hydrostatique dans les liquides
 - Convection au sein des liquides
 - Stratification de liquides de densités différentes
 - Principe d'Archimède
- Augmentation de
 - La capillarité
 - La tension de surface



ENVIRONNEMENT SPATIAL – MICROGRAVITÉ

- Autres effets

- Sur les humains
 - Lévitiation d'objets
 - Altérations de la circulation sanguine: utilisée normalement pour combattre la gravité
→ Le corps a tendance à envoyer plus de sang à la tête
 - Décalcification osseuse
 - Atrophie musculaire (notamment cardiaque...)
 - Altération des fonctions vestibulaires: mal des transports
- Sur les réservoir liquides: comportement inhabituel (mélange gaz/liquide inhomogène)

- Bénéfices scientifiques:

- Pas de convection → mixtures homogènes (métaux, céramiques, verres...)
- Produits médicamenteux: encapsulation de molécules dans des microsphères
- ...

ENVIRONNEMENT SPATIAL – ENVIRONNEMENT CHIMIQUE

- Oxygène atomique (O)
 - Issu de la dégradation de O₂
 - Densité atmosphérique très faible en LEO ($\sim 10^{-8}$ - 10^{-9} atomes/cm³) → Très peu de collisions
 - Mais O est très réactif:
 - Oxydation des surfaces exposées
 - Réflexion des atomes → impact sur les surfaces non exposées
 - Emission de particules oxydées: érosion des surfaces et contaminations des surfaces proches
- Contamination
 - Création d'atmosphère locale raréfiée (dégazage de matériaux, gaz émis par la propulsion, fuite etc.)
 - Sédimentation sur les surfaces froides
 - Instruments optiques et senseurs stellaires → perte de performance et désorientation
 - Systèmes électroniques → phénomène de charge/décharge

→ Les matériaux et protections doivent être choisis avec attention

ENVIRONNEMENT SPATIAL – RAYONNEMENT

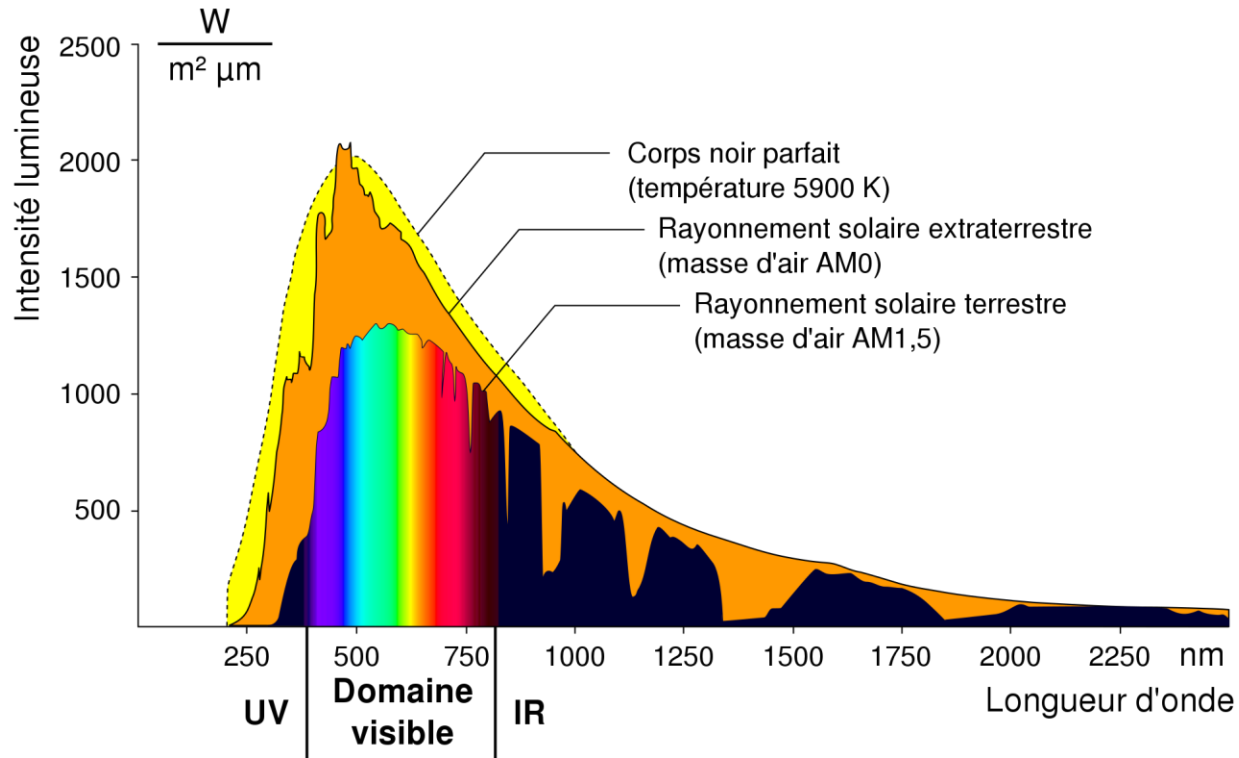
- **Rayonnement solaire**

- Photons éjectés sur tout le spectre électromagnétique, des ondes radios aux rayons X et γ
- Distribution spectrale similaire à l'émission d'un corps noir à 5900K
 - 42,4% dans le visible
 - 48,4% dans l'infrarouge
 - 9,2% dans l'ultra-violet proche
- Flux solaire ($\sim 1362 \text{ W/m}^2$ à la distance de la Terre)
 - Rayonnement électromagnétique solaire moyen par unité de surface, à une distance d'une UA

- **Le rayonnement solaire reçu par un satellite LEO est quasi-constant**

- Mais, orbite elliptique de la Terre \rightarrow variations de la distance Terre-Soleil au cours de l'année
- Périhélie autour du 3 janvier / Aphélie autour du 5 juillet
- Cycle principale de 413 000 ans avec des cycles secondaires de 100 000 ans (cf. « [Cycles de Milankovitch](#) »)
Excentricité $e \in [0,0034 ; 0,058]$. Actuellement $e = 0,0167$ et \searrow

ENVIRONNEMENT SPATIAL – RAYONNEMENT



Spectre Solaire

Wikipedia

Environnement Spatial | 13

ENVIRONNEMENT SPATIAL - RAYONNEMENT

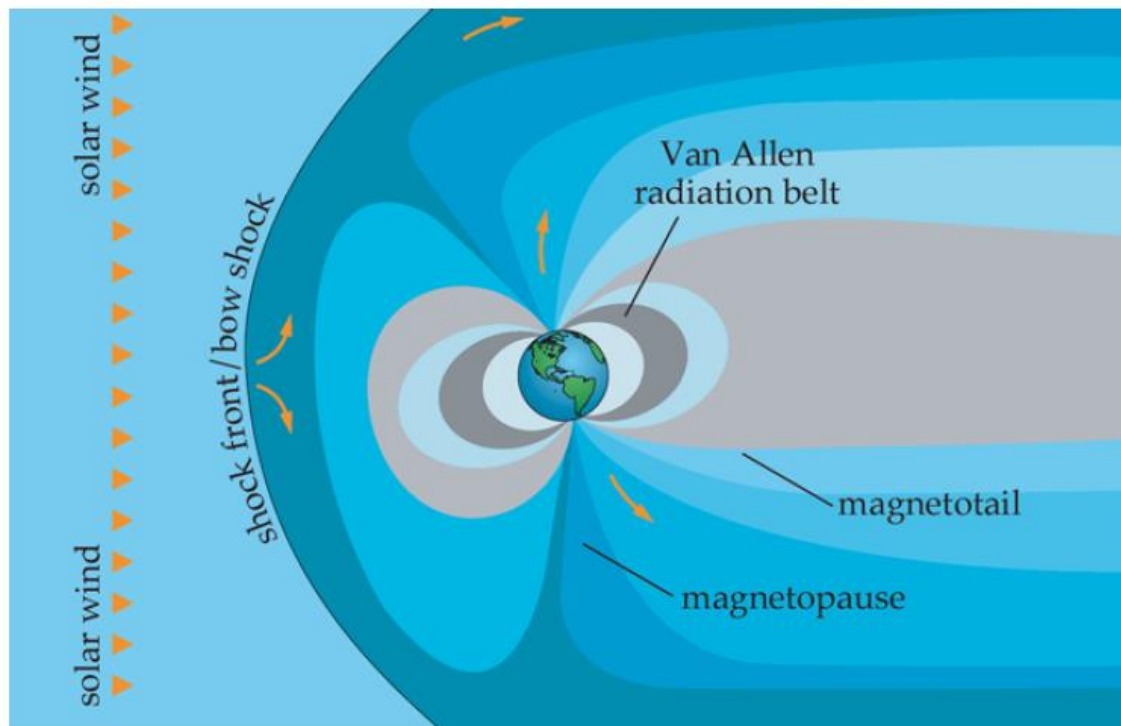
Effets sur les satellites

- **Panneaux solaires = énergie !**
 - Sans panneau solaire, pas de mission spatiale longue durée...
 - **Impact Thermique**
 - Haute température sur les faces illuminées / Basse température à l'ombre
 - Echange d'énergie (conduction + rayonnement) pour équilibrer les températures
 - Analyse (prédiction) de l'illumination et de l'évolution du flux thermique en fonction de l'orbite
- Choix de l'architecture satellite et des matériaux pour minimiser les variations de température durant la mission

Effets sur les satellites

- Perturbations dynamiques
 - Pression de radiation solaire direct et indirecte (albedo)
 - Création de forces et couples perturbateurs
 - Doivent être pris en compte dans le contrôle d'orbite et d'attitude
 - L'impact augmente avec le rapport surface / masse (en absolu) et l'altitude (en relatif p/r aux autres perturbations)
- Effet des UV (~8% de l'énergie totale)
 - Longueur d'onde courte → énergie élevée → impact important sur les matériaux
 - Dégradation des polymères (plastique, caoutchouc, peintures, colles etc.)
 - Dégradation des panneaux solaires → perte de puissance
 - Dégradation des instruments optiques

ENVIRONNEMENT ÉLECTROMAGNÉTIQUE – PARTICULES CHARGÉES



Solar Environment
The Space Environment

ENVIRONNEMENT ÉLECTROMAGNÉTIQUE – PARTICULES CHARGÉES

- Un des aspects les plus dangereux de l'environnement spatial
- Trois sources principales de particules chargées dans l'espace
 - Le **vent solaire** et les éruptions solaires
 - Le **rayonnement cosmique** (GCR: Galactic Cosmic Rays)
 - Vent stellaire d'étoiles distantes
 - Vestiges d'événements cosmiques (supernovas etc.)
 - Les **ceintures de Van Allen**
 - Zones de concentrations des particules
 - Deux ceintures principales proches de la Terre

ENVIRONNEMENT ÉLECTROMAGNÉTIQUE – VENT SOLAIRE

- Vent solaire

- Température de surface de la couronne solaire très haute ($\sim 10^6$ K)
 - Vitesse thermique des électrons > vitesse de libération
 - Les électrons embarquent des protons et d'autres ions positifs avec eux
- Vent solaire: **plasma** s'échappant en permanence du Soleil
 - Dans toutes les directions
 - Le long des lignes de champ magnétique solaire
 - ~ 400 km/s à l'équateur et 800 km/s aux pôles solaires
 - Eruption solaire, éjection de masse coronale \rightarrow vitesses > 1000 km/s

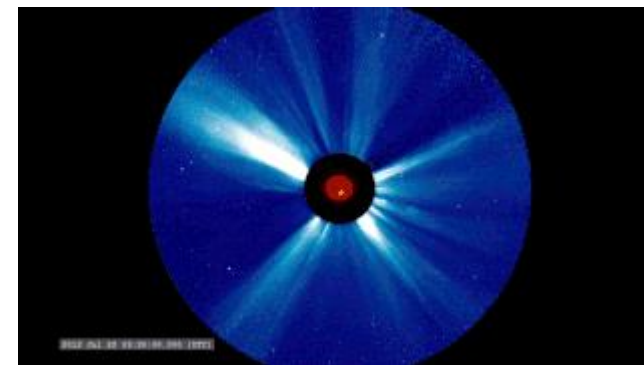
- Magnétopause

- Protège la Terre des vents solaires supersoniques
- 1% du vent solaire pénètre la magnétosphère terrestre



Coronal Mass Ejection 31/08/2012

NASA / GSFC / Solar Dynamics Observatory



Coronal Mass Ejection 23/07/2012

NASA / Solar Terrestrial Relations Observatory

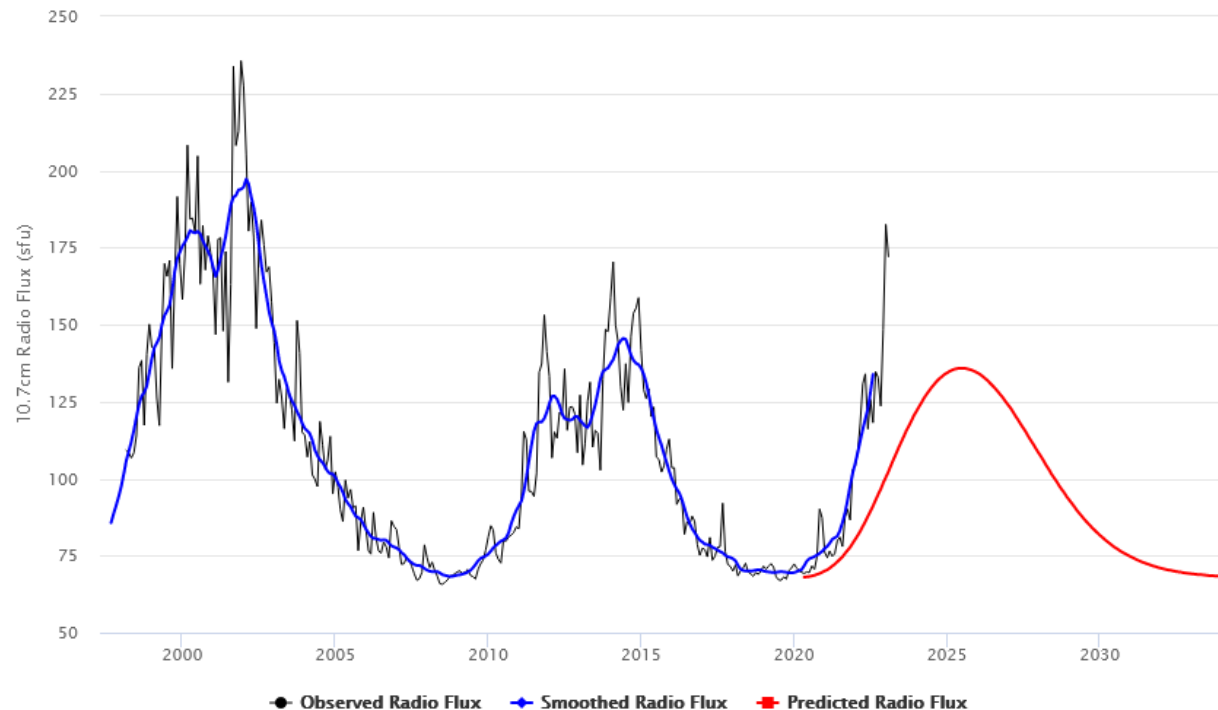
ENVIRONNEMENT ÉLECTROMAGNÉTIQUE – VENT SOLAIRE

WDC-SILSO, Royal Observatory of Belgium, Brussels

Activité Solaire

- Cycles de 11 ans
- Ou 22 selon les auteurs
- En ce moment
 - Activité Solaire forte
 - « Maximum Solaire »: 2025
- Se tenir au courant?
www.spaceweather.com

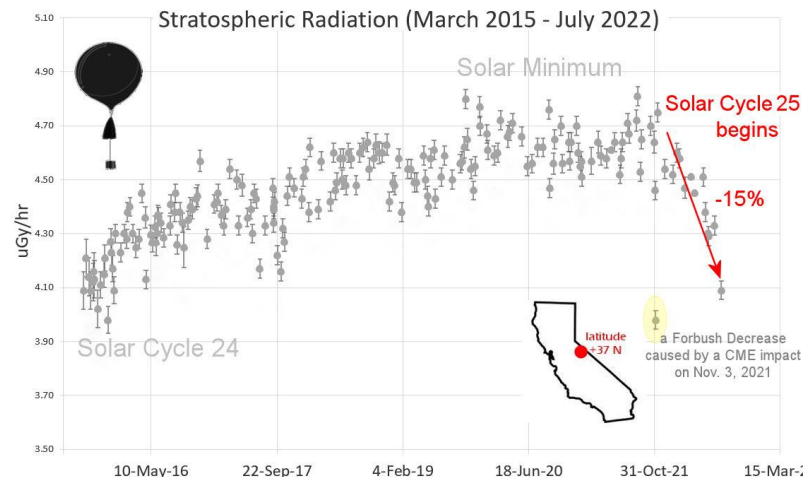
Solar Cycle progression – F10.7cm Radio Flux



ENVIRONNEMENT ÉLECTROMAGNÉTIQUE – RAYONNEMENT COSMIQUE

Rayonnement Cosmique Galactic Cosmic Rays (GCR)

- Flux de particules à haute énergie
 - De 10^9 à 10^{21} eV
 - Circulent dans le milieu interstellaire
 - Protons (88%), He (9%), électrons, antimatière
 - Spectre d'émission « non-thermique », ne résulte pas de l'émission d'un corps noir
- Origine
 - Source intra et extra galactiques
 - Vent stellaire, supernovas, noyau actif de galaxie, sursaut gamma, trous noirs...
 - Certaines particules de très haute énergie ($> 10^{20}$ eV) restent d'origine inconnue



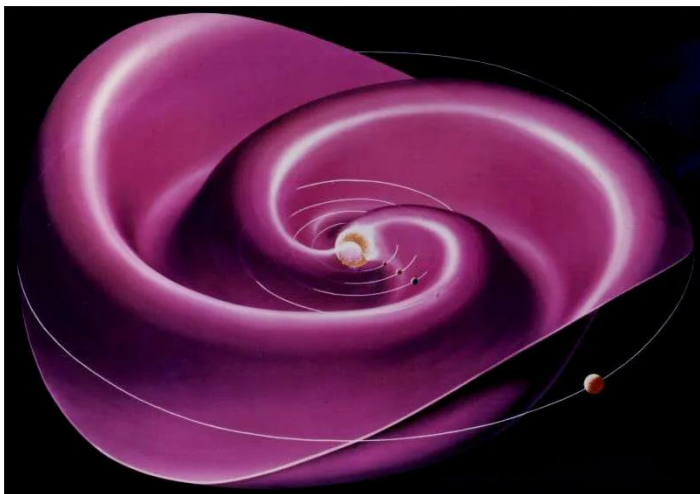
Mesures ballon du rayonnement cosmique stratosphérique

Earth to Sky Calculus / Spaceweather.com

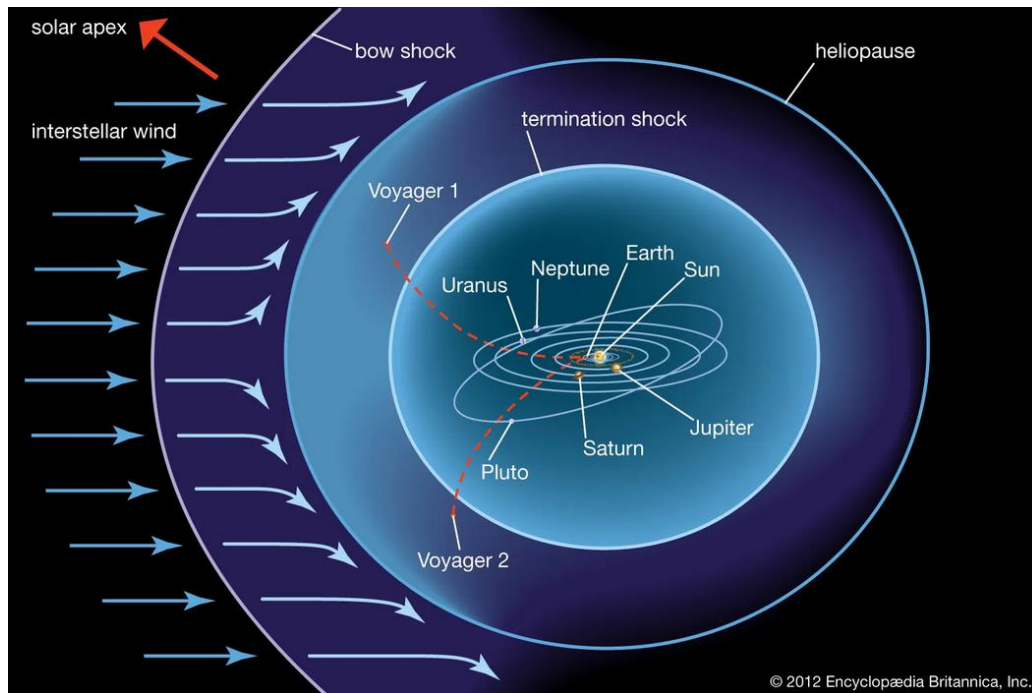
ENVIRONNEMENT ÉLECTROMAGNÉTIQUE – RAYONNEMENT COSMIQUE

L'héliosphère nous protège des GCRs

- Repousse et dévie les GCRs
- Maximum solaire = minimum de GCRs (et inversement)
- Effet Forbush: CME → GCRs ↓
- Héliopause ~ 123 UA (Neptune, 30 UA)



Heliospheric Current Sheet
Werner Heil/NASA



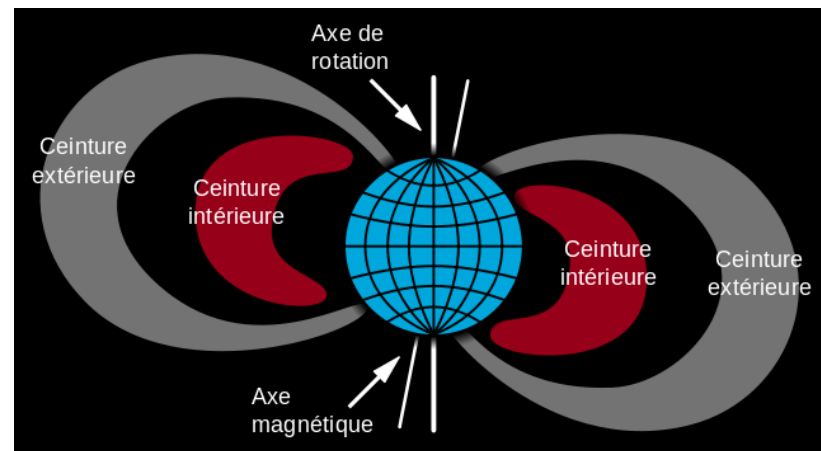
© 2012 Encyclopædia Britannica, Inc.

Vue d'artiste de l'héliosphère
Encyclopædia Britannica

ENVIRONNEMENT ÉLECTROMAGNÉTIQUE – CEINTURES DE VAN ALLEN

Ceintures de Van Allen

- **Magnétosphère terrestre**
 - Le plasma solaire et les GCRs suivent les lignes du champ magnétique terrestre
 - A l'origine des aurores polaires
 - Les particules s'accumulent dans deux ceintures principales
- **Ceinture interne (h ~ 3 000 km)**
 - En réalité de 700 à 10 000 km
 - Protons à haute énergie (plusieurs centaines de MeV)
- **Ceinture externe (h ~ 25 000 km)**
 - En réalité de 13 000 à 65 000 km
 - Electrons à haute énergie (> 5 MeV)
- **Autres ceintures transitoires**
 - Peuvent apparaître suite à des CMEs



Représentation schématique des ceintures de Van Allen

NASA / Wikipedia

- **Découverte**
 - 1958: compteurs Geiger embarqués dans les satellites Explorer 1 et 3
 - Van Allen: physicien et astronome à l'université de l'Iowa

ENVIRONNEMENT ÉLECTROMAGNÉTIQUE – PARTICULES CHARGÉES

• Effets sur les satellites

- Effets de charge → décharges pouvant endommager l'électronique
- "Mitrailage" des surfaces à haute vitesse → dégradation des surfaces et des senseurs
- SEP: Single-Event Phenomenon: une particule pénètre dans l'électronique
 - « Bitflip »: modification de l'état 0/1 d'un bit dans un processeur
 - Peut provoquer des comportement erratiques (ex. sonde Magellan autour de Venus)

→ Nécessite blindage et algorithmes de correction des SEPs

• Effets sur les humains: rayonnement et particules chargées ont un effet similaire

- Augmentation de la dose de radiation: vieillissement, augmentation du risque de cancer
- ISS: radiation x 30 par rapport au sol

→ Blindage + éviter les EVAs au passage de l'anomalie de l'Atlantique Sud

→ Abris de protection contre les éruption solaires (voyages interplanétaires)

→ Grosses difficultés à anticiper les GCRs qui pénètrent profondément les structures

Valentin Baral (CNES, M2 SUTS 2016)

Maxime Journot (CS Group)

Ingénieur Mécanique Spatiale
maxime.journot@csgroup.eu

The logo for CS GROUP, featuring the letters 'CS' in a stylized, white, serif font with horizontal lines through them, set against a dark blue circular background. The background of the entire slide is a space-themed image with a network of white lines and dots overlaid on a view of Earth from space.

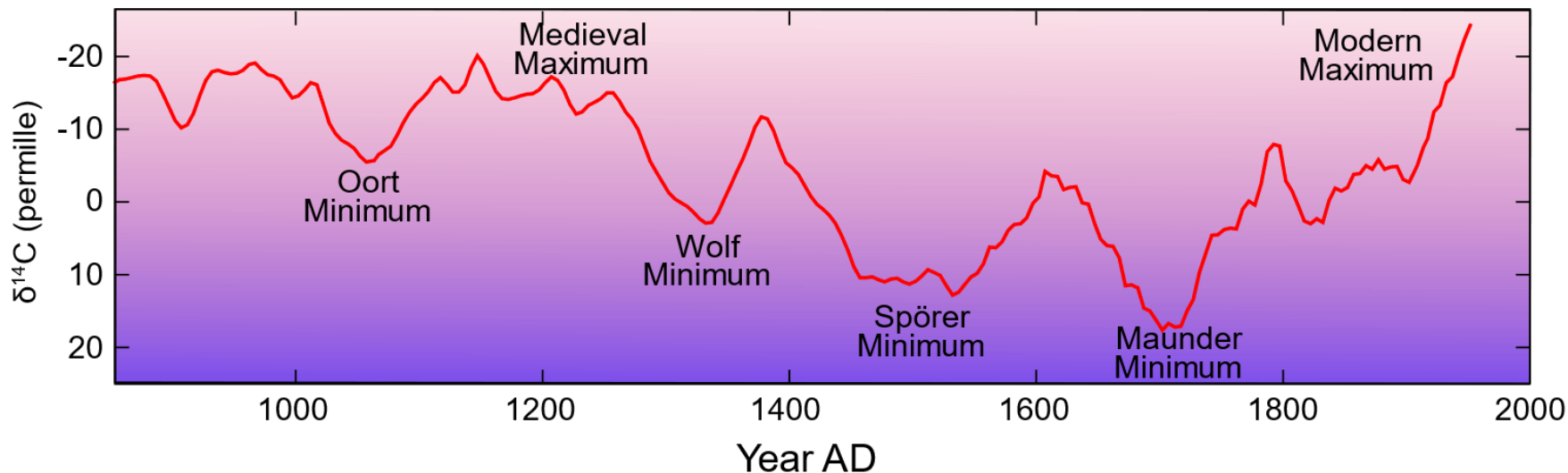
GROUP

maxime.journot.csgroup.eu

*Ce document est la propriété de CS GROUP et est confidentiel.
Il ne peut être ni reproduit, ni communiqué à un tiers sans autorisation écrite.*

Annexes

Solar Activity Events in ^{14}C



Activité Solaire enregistrée dans le carbone 14

Leland McInnes

ENVIRONNEMENT SPATIAL - RAYONNEMENT

• Albedo

- Part d'énergie renvoyée par la Terre vers l'espace (~30% flux solaire)
 - Réflexion par la surface terrestre (~6%)
 - Diffusion par atmosphère claire (~7%)
 - Diffusion par atmosphère nuageuse (~17%)
- Spectre proche de celui du Soleil

• Rayonnement Terrestre

- Pas de réchauffement ou refroidissement long terme

→ Bilan d'énergie nul

- La quantité d'énergie absorbée est réémise comme rayonnement thermique (IR) pur
- La Terre et son atmosphère rayonne comme un corps noir à 218 K – 288 K

