

Point commun ?



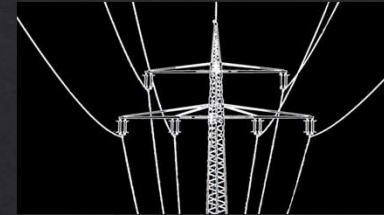
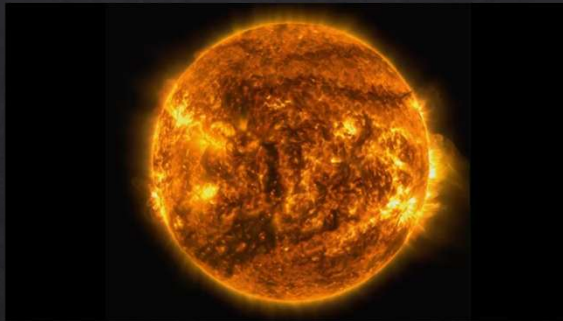
Panneau solaire endommagé



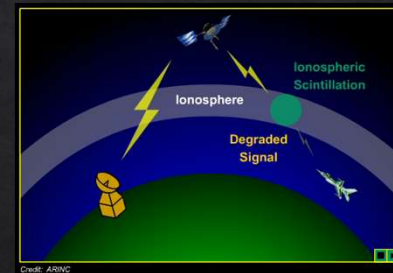
Une aurore boréale



Le SOLEIL !



Perturbations graves sur les
lignes électriques



Perturbations
des communications



Lionel BIREE
Ingénierie Conseil et Formation en SSA
Email : lionel.biree@elios.space
Internet : <http://elios.space>

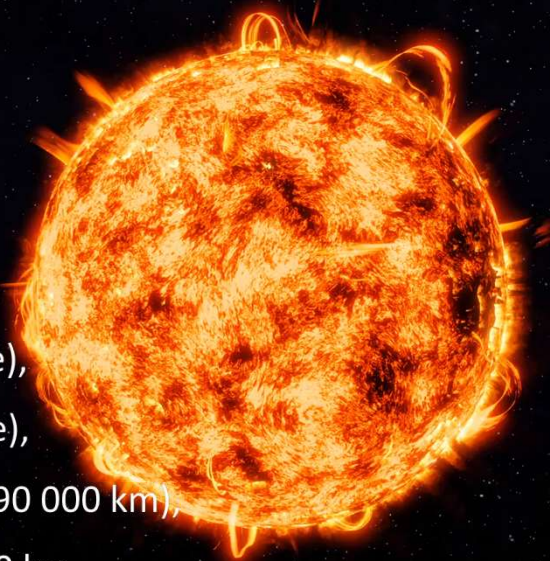


PLAN

- * LE SOLEIL
- * LA TERRE
- * LES INTERACTIONS SOLEIL – TERRE
- * IMPACTS OPÉRATIONNELS SUR L'ENVIRONNEMENT SPATIAL ET SUR TERRE

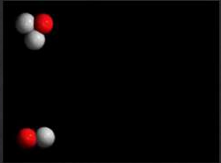
Le Soleil en quelques chiffres

- ◇ Âge : 4,6 milliards d'années
- ◇ Rotation différentielle :
 - 25 jours à l'équateur,
 - 35 jours aux pôles,
- ◇ Température :
 - 15 millions de degrés (centre),
 - 5 800 K soit 6 000° C (surface),
- ◇ Diamètre : 109 x la Terre ($\cong$ 1 390 000 km),
- ◇ Distance moyenne : 150 000 000 km,
- ◇ **L'énergie libérée en 1 seconde permet de couvrir les besoins de l'Europe pendant plus de 10 millions d'années.**



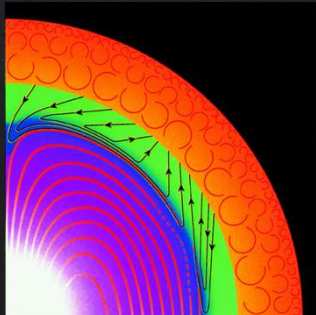
Les couches internes

Cœur



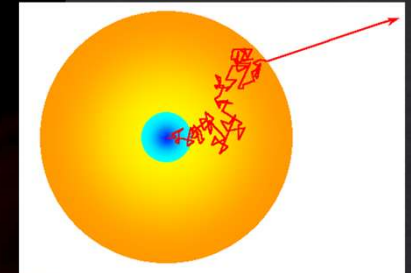
- Température : 15 millions K,
- Distance : 0 à 0,3 rayon solaire,
- Densité 150 g/cm³,
- Masse : 60% du Soleil,
- Sièges des réactions nucléaires par fusion.

Tachocline



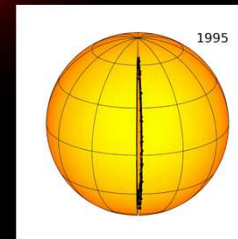
- Zone de transition entre la zone radiative et convective et de génération du champ magnétique solaire,
- Distance : 0,7 rayon solaire.

Zone radiative

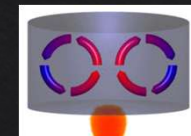


- Température : 8 à 1,3 millions K,
- Distance : 0,3 à 0,8 rayon solaire,
- Densité $1,4 \cdot 10^{31} \text{ m}^{-3}$ à $1,7 \cdot 10^{28} \text{ m}^{-3}$,
- Masse : 30% du Soleil,
- Transport de l'énergie par radiation électromagnétique (traversée du milieu en 1 million d'année).

Zone convective



- Température : décroissance jusqu'à 5 800 K,
- Distance : 0,9 à 1 rayon solaire,
- Transport de l'énergie par convection (traversée du milieu en 2 mois).



Les atmosphères



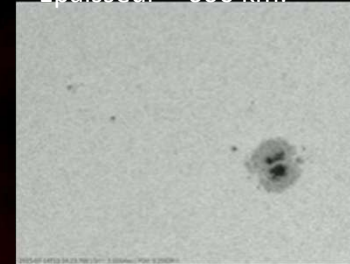
Couronne

Photosphère

« Sphère de lumière »



- 99 % de la lumière émise par le Soleil,
- T° : 5800 K,
- Rotation différentielle : 25 jours à l'équateur et 35 jours aux pôles,
- Epaisseur $\approx$ 600 km.



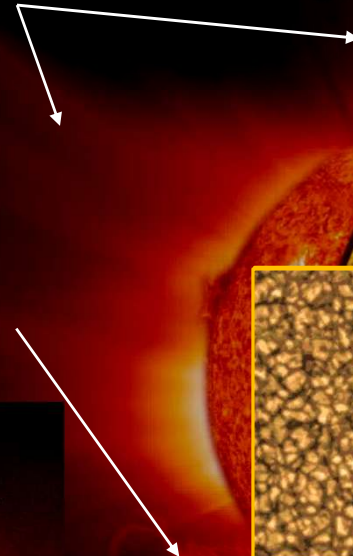
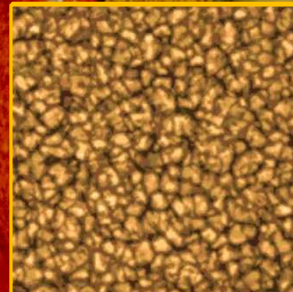
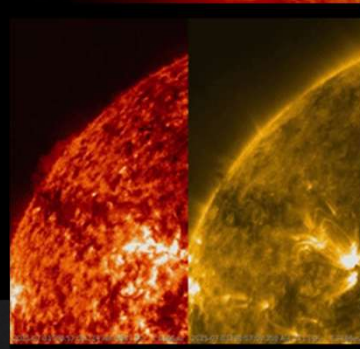
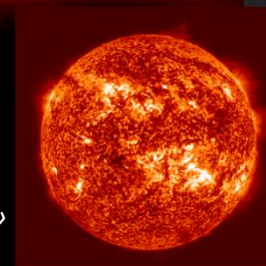
Taches solaires

- Manifestation du champ magnétique,
- Température $\approx$ 4 500 K,
- Emergence de tubes magnétiques.

- Fort rayonnement en $H\alpha$
- Température : élévation de 4 200K à 10 000 K
- Epaisseur $\approx$ 10 000 km

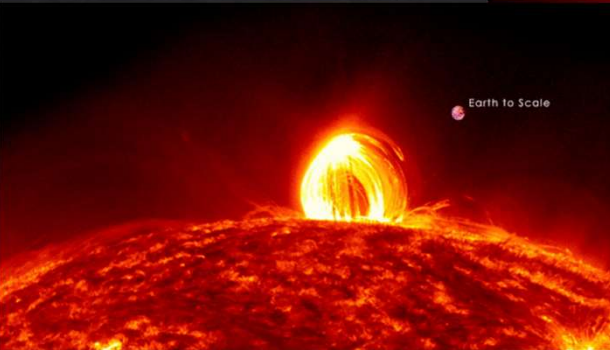
Chromosphère

« Sphère de couleur »



- Haute atmosphère du Soleil qui s'étend dans le milieu interplanétaire (100 UA),
- Température : 2 millions K,
- Densité : très tenue 10^{14} m^{-3} .

Protubérance / Filament

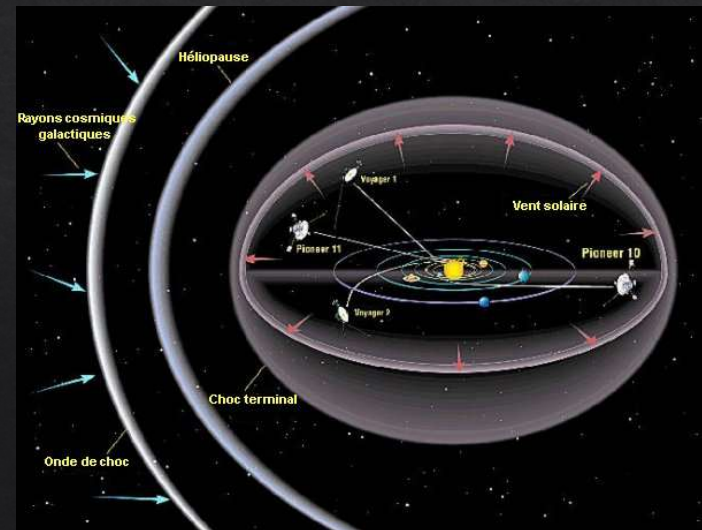
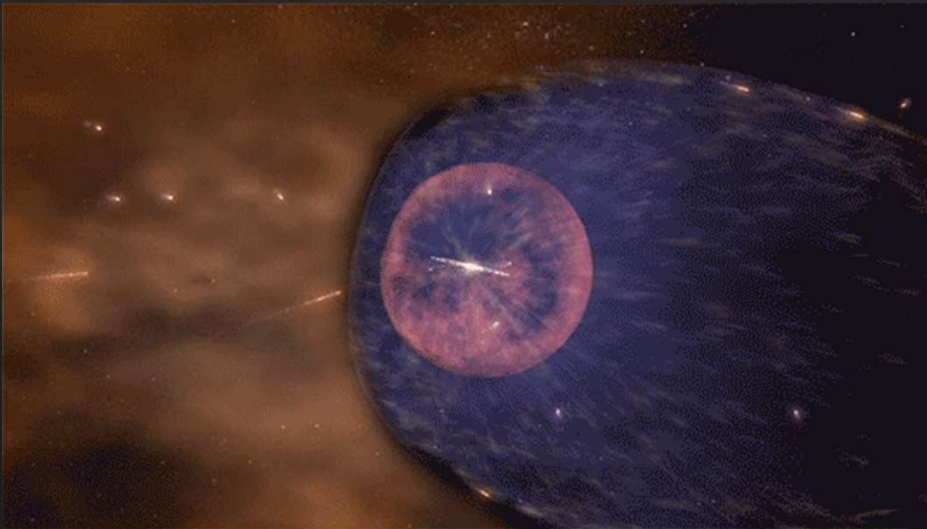


- Structures de matières en suspension au-dessus de la chromosphère,
- Plasma contenu dans des tubes magnétiques,
- Hauteur : entre 20 000 et 120 000 km.

Les atmosphères

L'héliosphère :

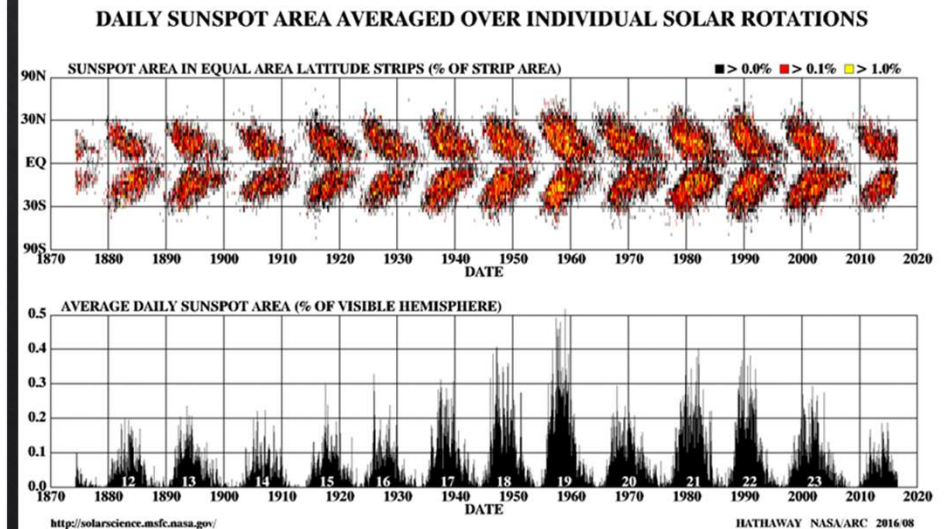
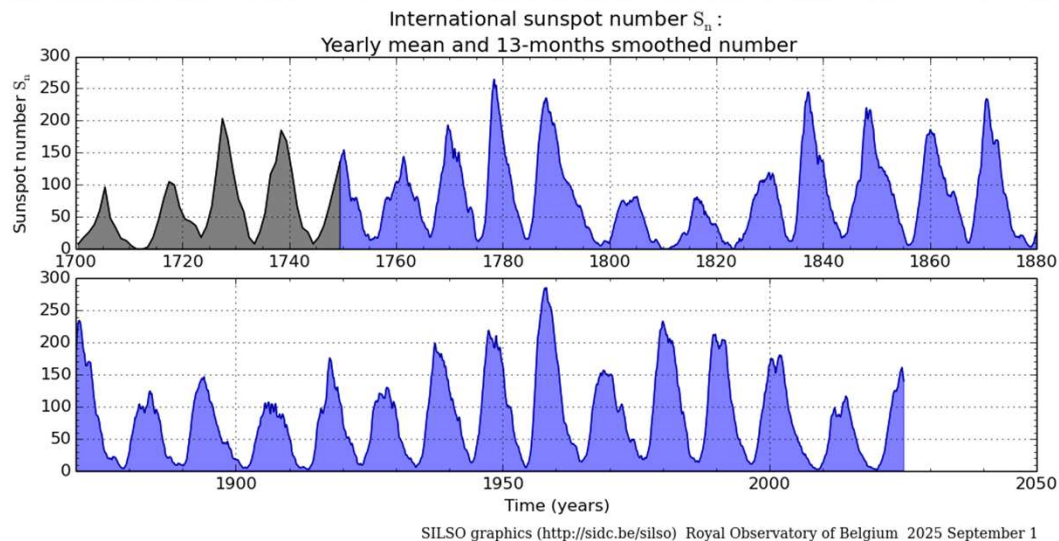
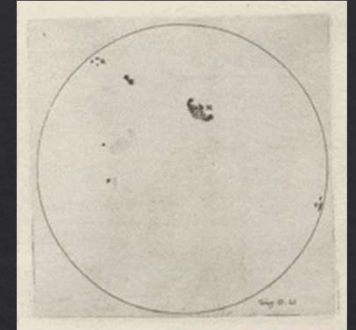
- 🔊 ◇ Enveloppe du milieu interplanétaire où se propage le vent solaire,
- 🔊 ◇ Limite : ≈ 100 UA à 150 UA.



Cycle solaire

Constat :

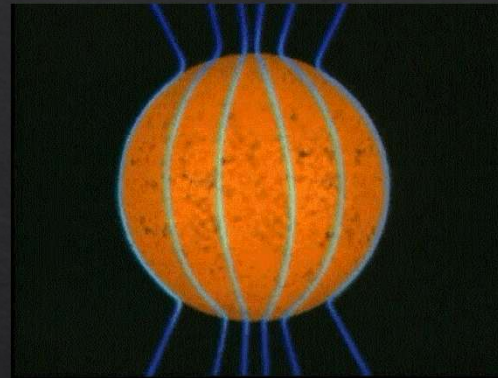
- ◇ Périodes au cours de laquelle les taches solaires apparaissent,
- ◇ Cycle de 11 ans environ (cycle de Schwabe),
- ◇ Déplacement des taches solaires des hautes latitudes vers l'équateur au cours d'un cycle.



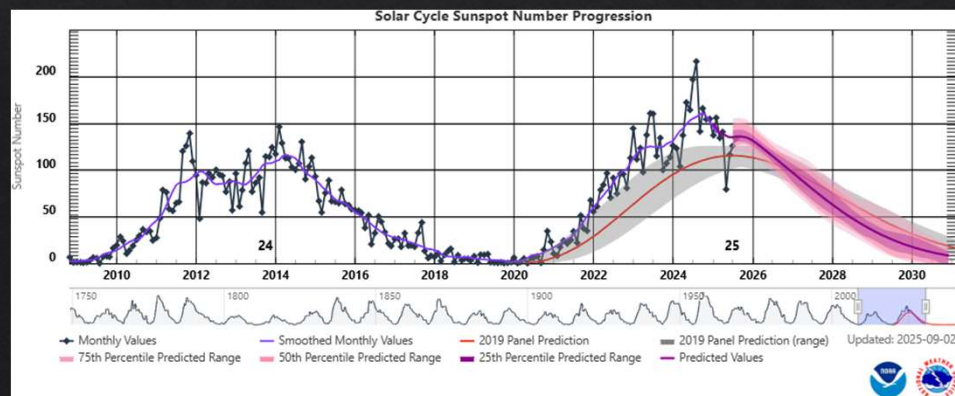
Cycle solaire

Dynamo solaire :

- ◆ Inversion des polarités,



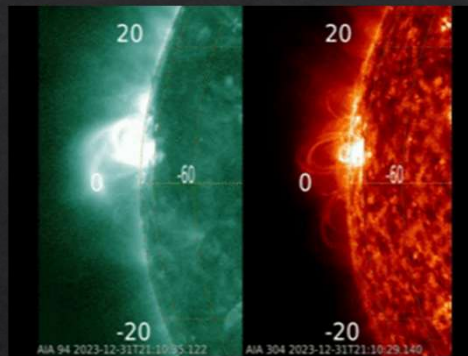
- ◆ Cycle de 22 ans (cycle de Halle).



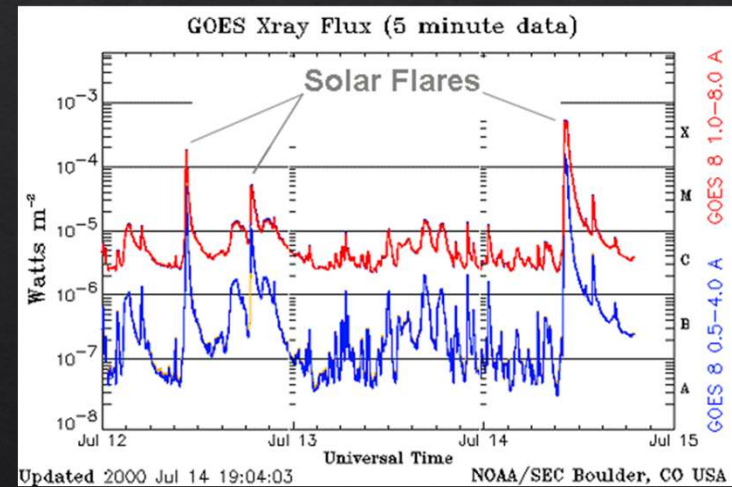
Les phénomènes solaires

Les flares

- ◇ Libération énergétique de particules en X-ray, UV et radio.



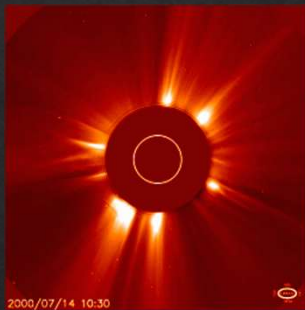
ARRIVEE: 8 min



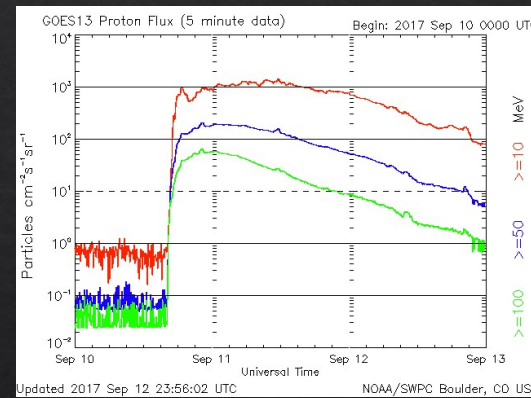
Les phénomènes solaires



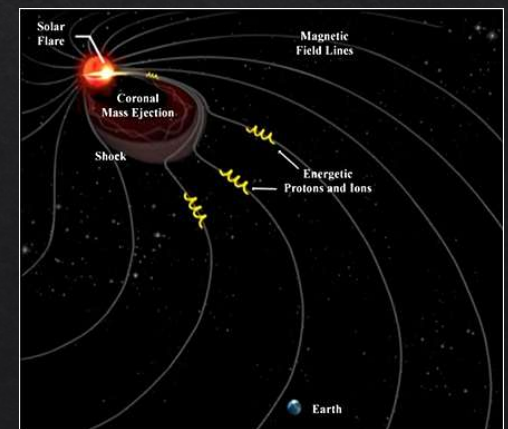
- ◇ Emission d'un flux très grand de P_+ suite à un évènement majeur (flare extrême...),



ARRIVEE: 40 mn en moyenne



- ◇ Déplacement des particules le long des lignes de champs magnétiques,

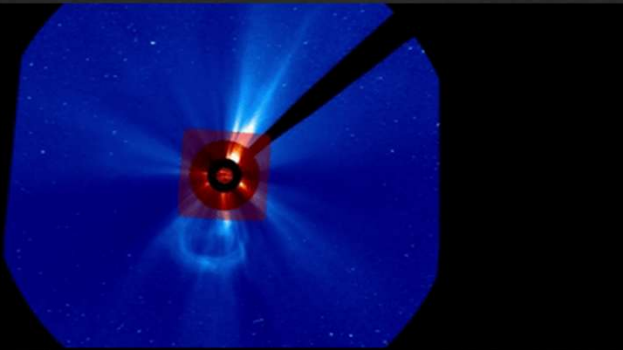


Les phénomènes solaires

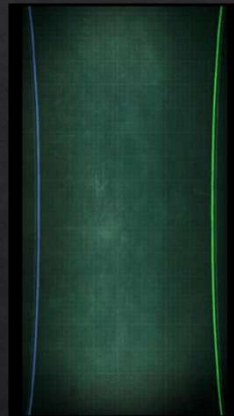


Les CME (Coronal Mass Ejection)

- ◇ Ejection de plasma et de champ magnétique de la couronne suite à une reconnexion magnétique,



ARRIVEE: 1-3 jours



- ◇ Vitesse de déplacement : variable entre 100 et 2000 Km s⁻¹.



Les phénomènes solaires

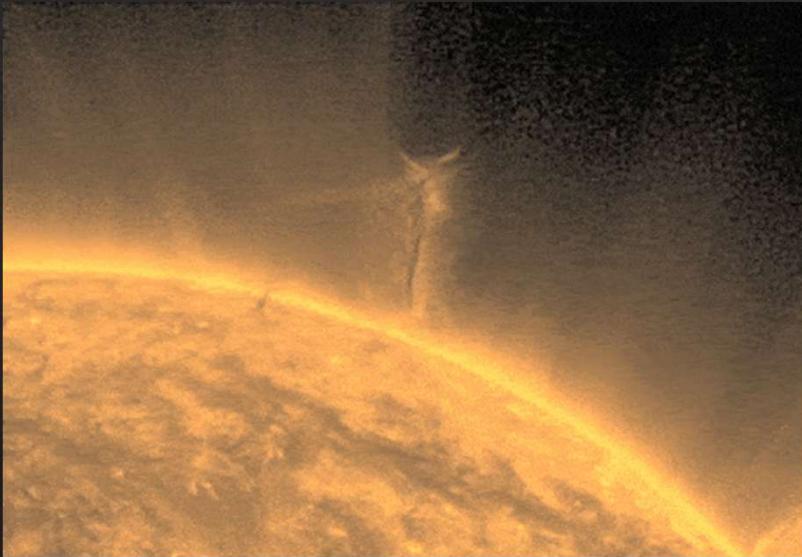
Les CME (Coronal Mass Ejection)



Passage 3 CME filmé depuis Solar PARKER Probe le 25 dec 2024
Crédit : NASA

Les phénomènes solaires

Phénomènes curieux : tsunamis et tourbillons... Solaire



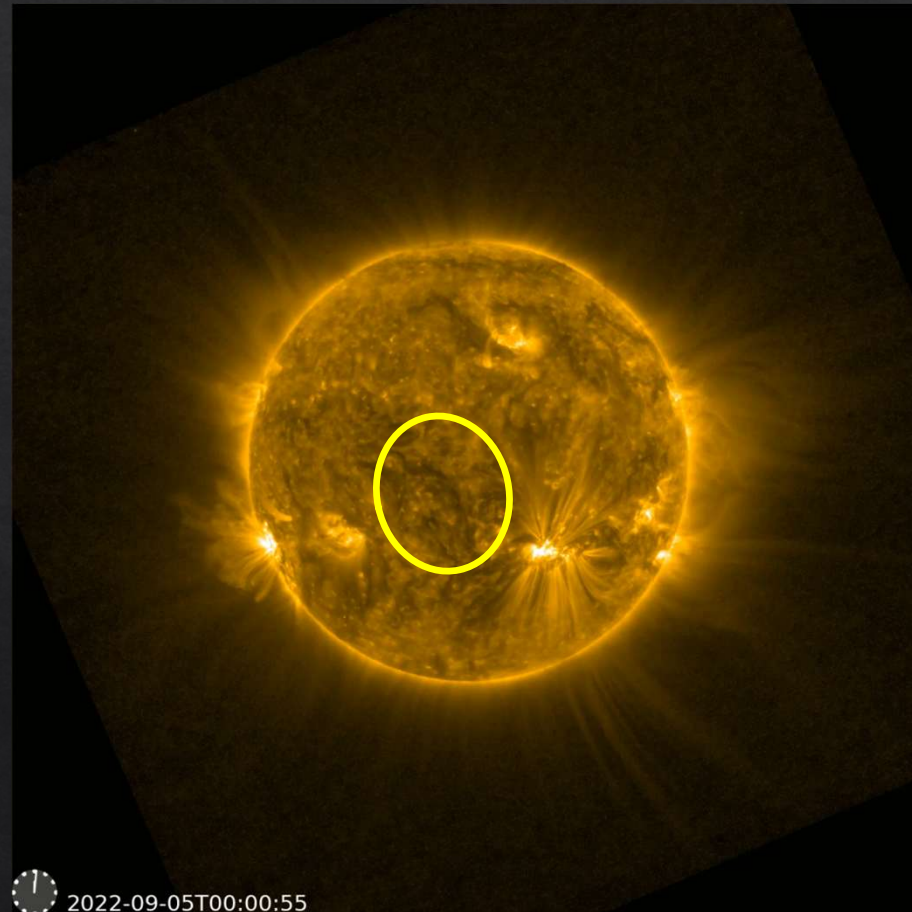
Tourbillon solaire le 18 mars 2023
Crédit : Lionel BIREE



Film d'animation d'une ondes de Moreton

Les phénomènes solaires

Des phénomènes curieux : et même un serpent...



Les phénomènes solaires



LA TERRE



Atmosphère



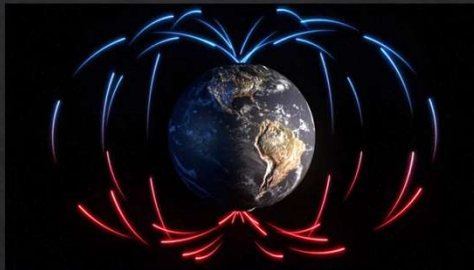
Ionosphère



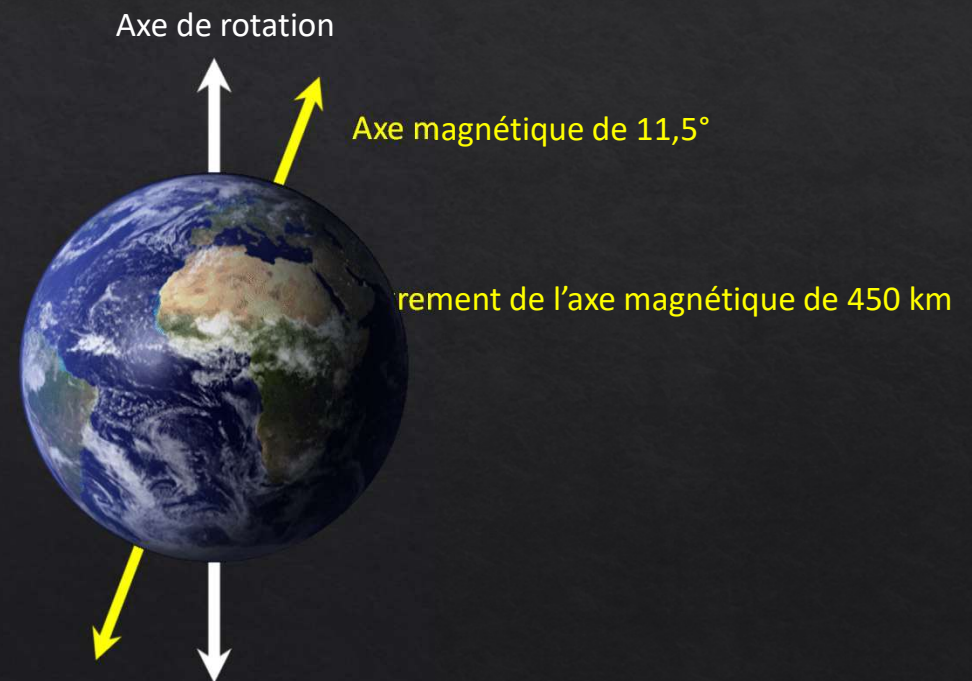
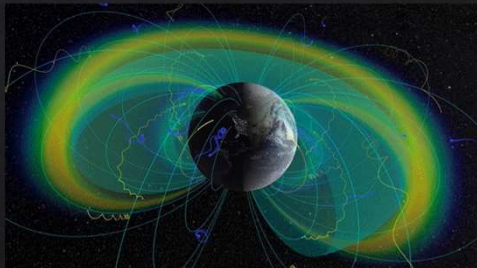
Magnétosphère

◇ Bouclier magnétique de la Terre composé :

- d'un champ magnétique,

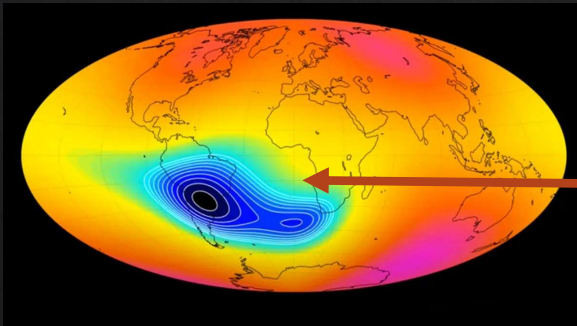
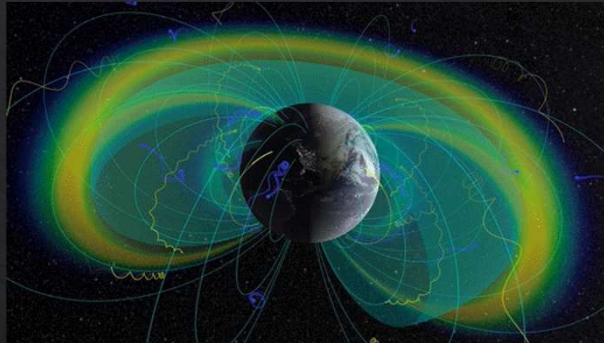


- De deux ceintures de radiation.

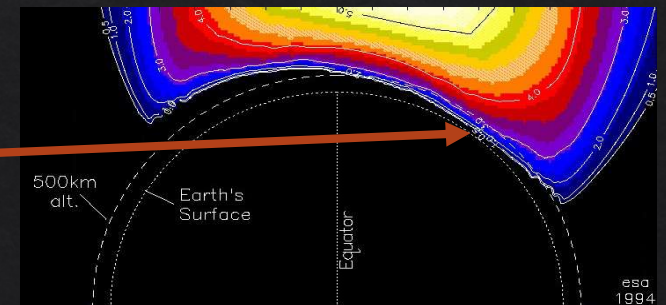


Magnétosphère

- ◆ La ceinture de radiation devient proche de la Terre dans l'Atlantique Sud (SAA : Anomalie Sud Atlantique) et distante dans le Pacifique Nord.



SAA



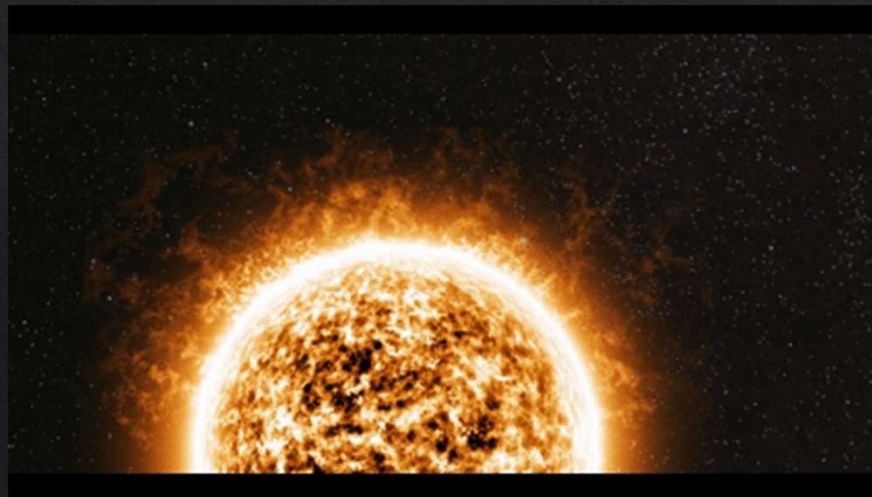
L'INTERACTION SOLEIL – TERRE



Le vent solaire

Le Soleil et le vent solaire

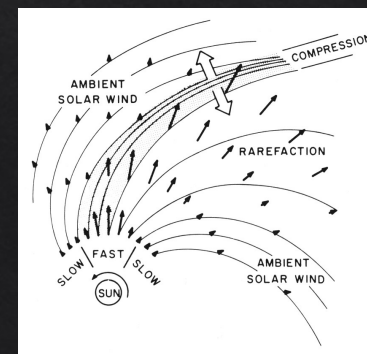
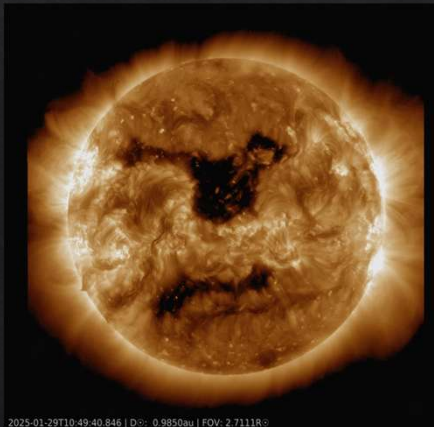
- ◇ Emission permanente de particules (P^+ , e^- ,...) de la couronne qui sont peu soumises à la gravité du Soleil,
- ◇ Température de 6000 K à 1 million K,
- ◇ Deux types de vent :
 - Vent solaire lent : 450 km s^{-1} ,



Le vent solaire

Le Soleil et le vent solaire

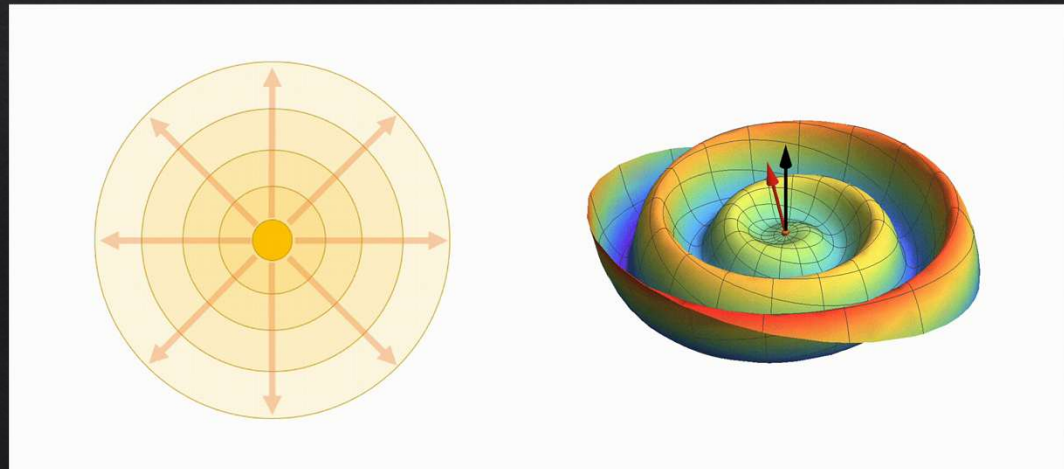
- ◇ Emission permanente de particules (P^+ , e^- ,...) de la couronne qui sont peu soumises à la gravité du Soleil,
- ◇ Température de 6000 K à 1 million K,
- ◇ Deux types de vent :
 - Vent solaire lent : 450 km s^{-1} ,
 - Vent solaire rapide : 800 km s^{-1} Champ magnétique ouvert vers le milieu interplanétaire appelé « trou coronal ».



Champ magnétique solaire

La spirale de Parker (Interplanetary Magnetic Field - IMF)

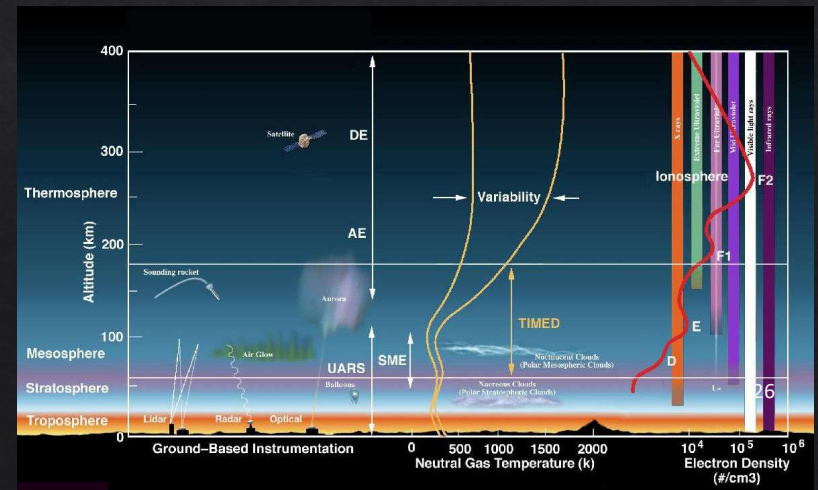
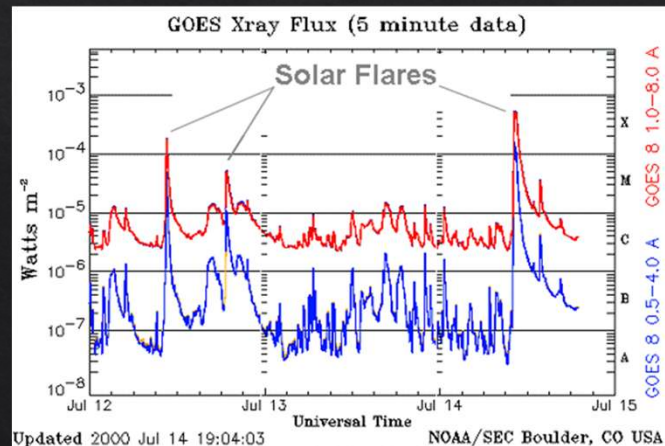
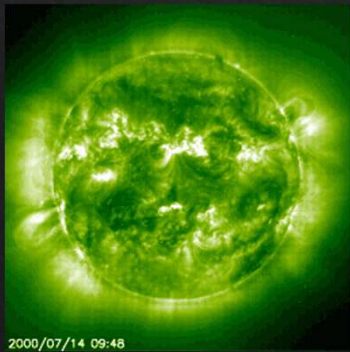
- ◇ Forme et déplacement du champ magnétique solaire,
- ◇ Résulte :
 - du mouvement radial des particules constituant le vent solaire,
 - de la rotation du Soleil sur lui-même.



Radiations électromagnétiques

Rayonnement solaire :

- ◇ Emission dans toutes les longueurs d'ondes,
- ◇ Filtrage de l'atmosphère laissant passer une partie des X-Ray, des Ultraviolets, des Infrarouge et la totalité du Visible,
- ◇ Forte interaction dans l'atmosphère neutre et l'ionosphère.

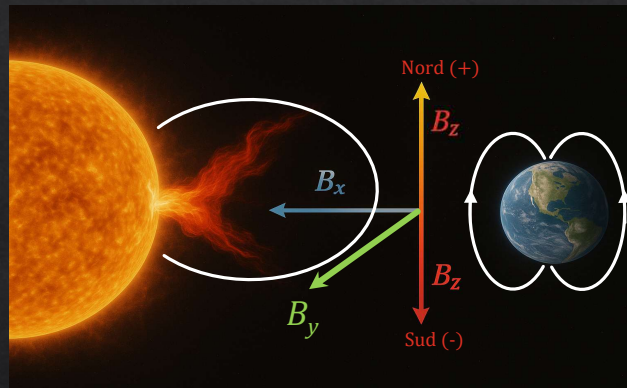


La reconnexion magnétique

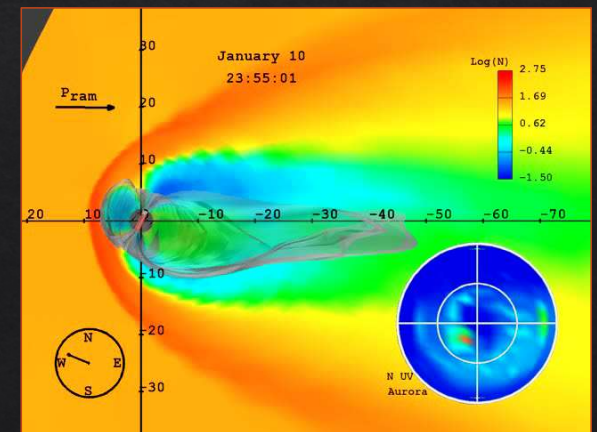
Champ magnétique solaire et magnétosphère:

- ◇ Les conséquences de l'interaction entre le champ magnétique solaire et la magnétosphère dépendent :

- Polarité (B_z),



- La vitesse du vent solaire (V_{vs}).



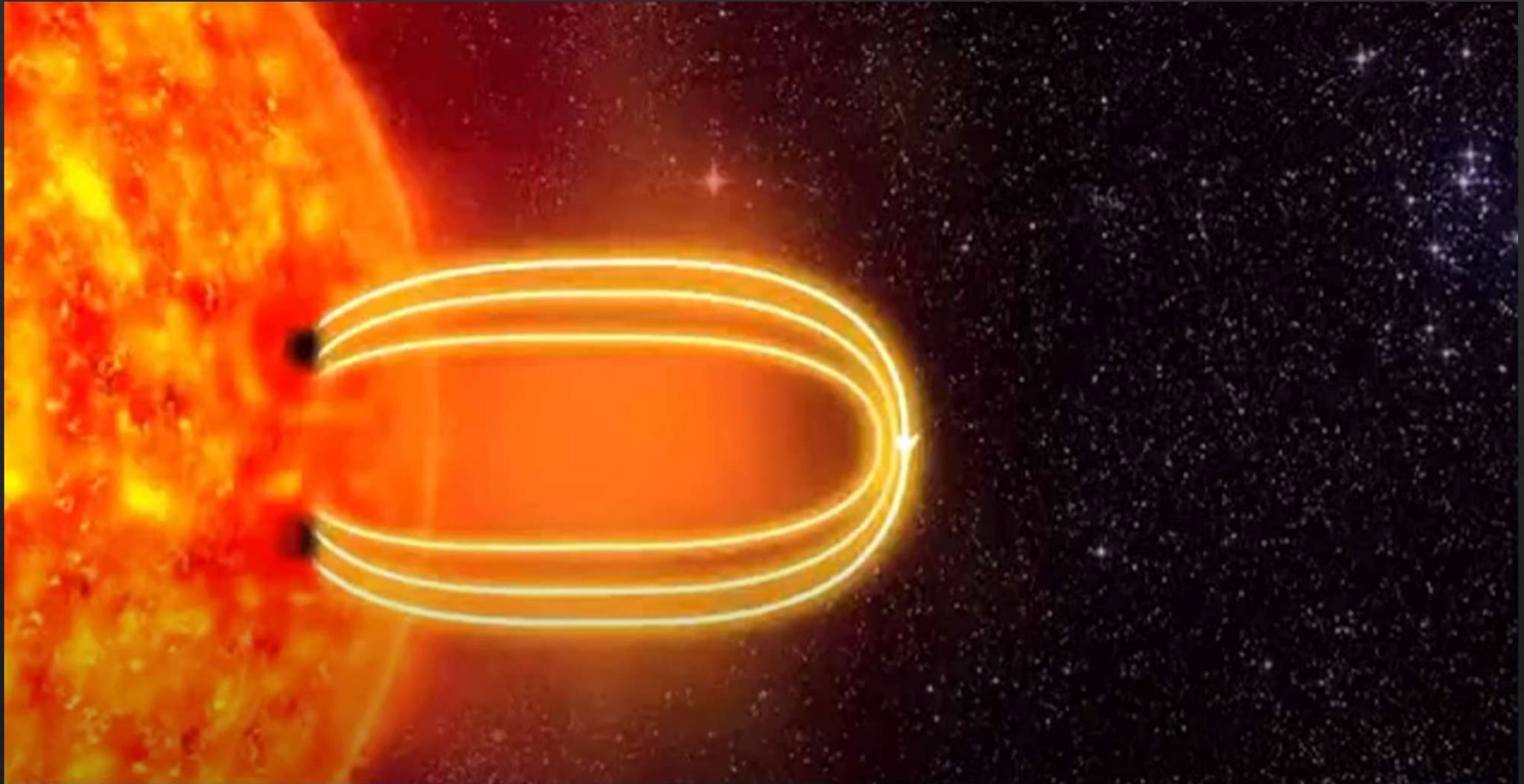
La reconnexion magnétique

Champ magnétique solaire et magnétosphère:

- ◇ Lors d'activités solaires importantes des orages et sous orages géomagnétiques sont produits,
- ◇ Responsable des aurores polaires.



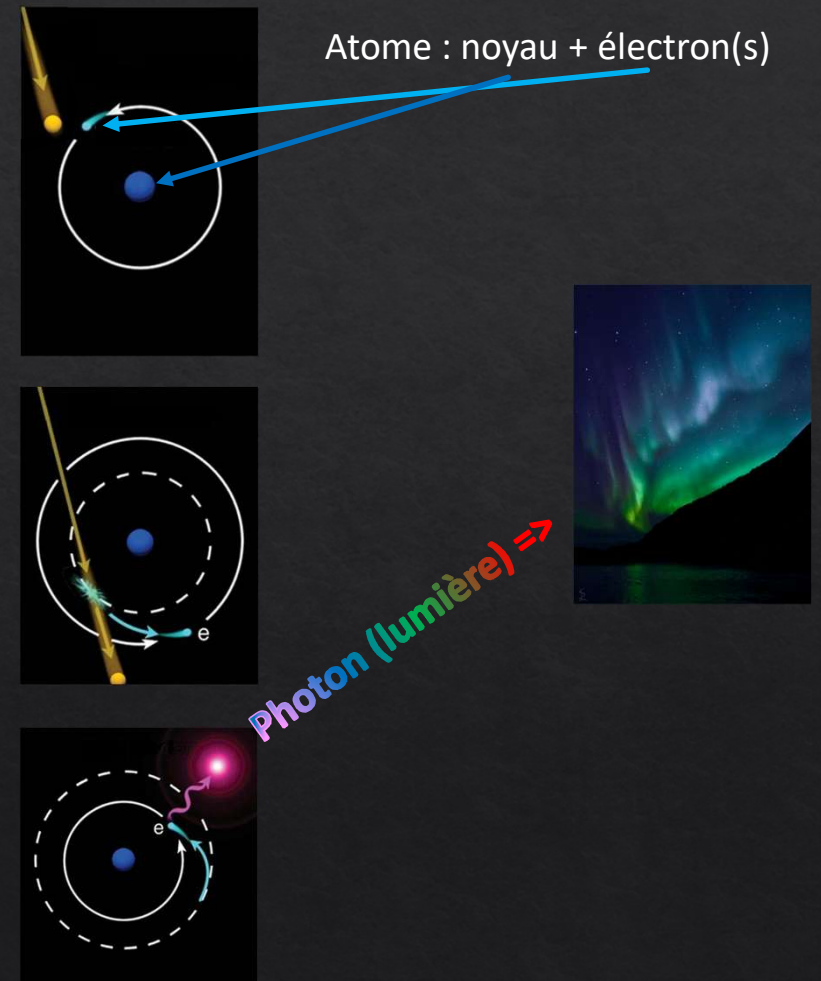
Les aurores boréales



Les aurores boréales

Les causes :

- ◇ Passage d'une particule chargée accélérée,
- ◇ Cette particule rentre en collision avec un électron et le projette à un niveau de révolution plus élevé,
- ◇ L'électron retombe à son niveau d'origine, et un photon est émis.



Les aurores boréales

Ovaux auroraux :

- ◆ Se forme entre les latitudes de 65° et 70° environ,
- ◆ Largeur comprise entre 500 et 1000 km.

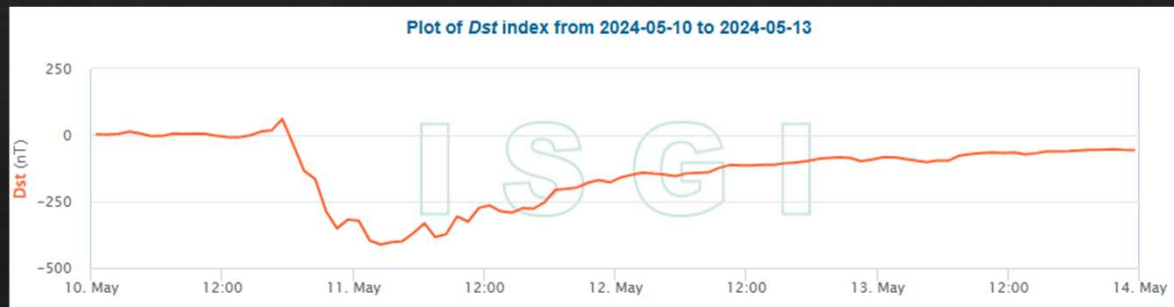
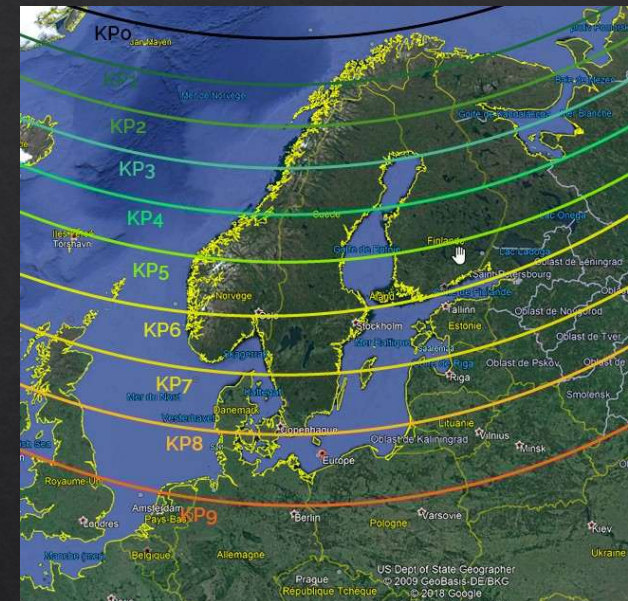


Gaz		Altitude
OXYGÈNE		Plus de 300 km
OXYGÈNE		De 100 à 300 km
HYDROGÈNE ET HÉLIUM		Plus de 100 km
HYDROGÈNE ET HÉLIUM		Plus de 100 km
AZOTE		Environ 100 km

Les aurores boréales

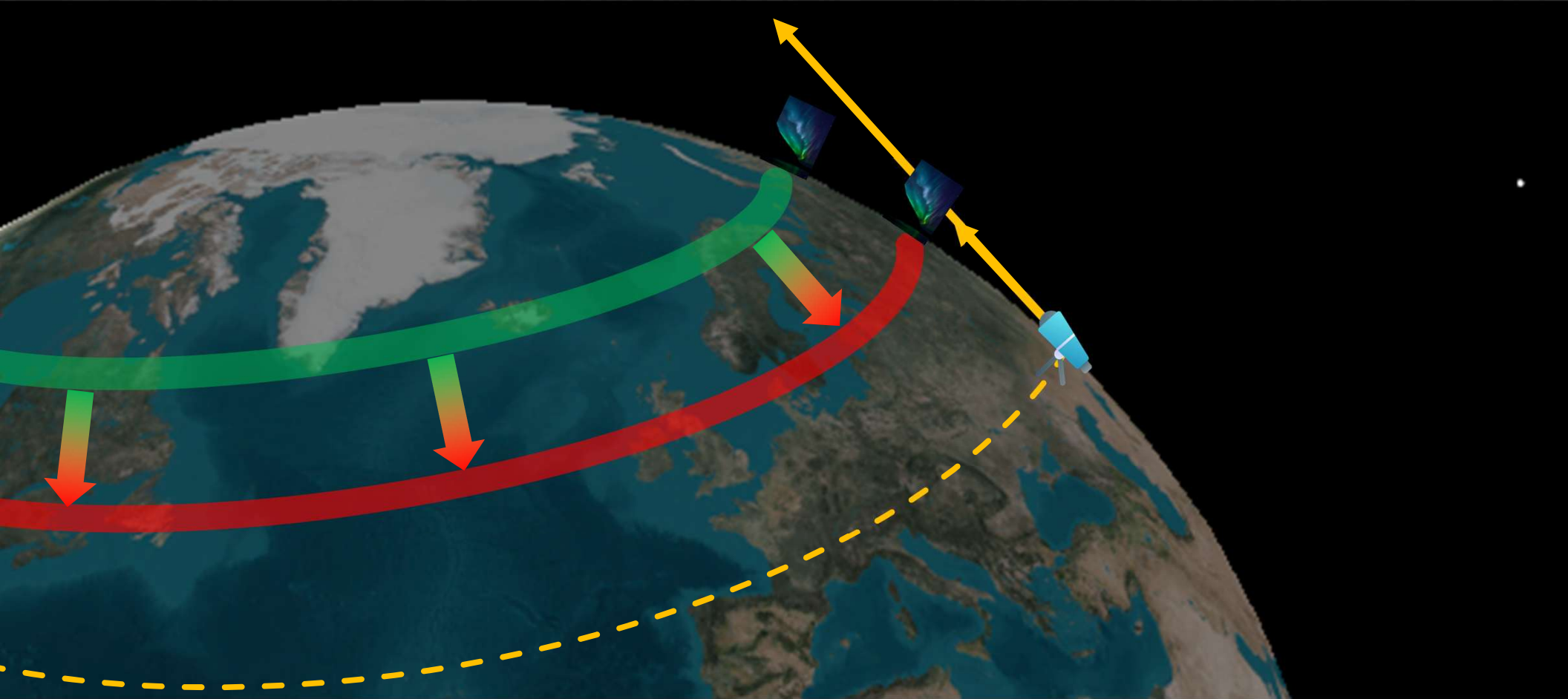
Ovales auroraux :

- ◆ Le mouvement dépend de l'intensité de la perturbation géomagnétique,
- ◆ Emploi des indices géomagnétiques :
 - Kp, Ap,
 - B_z, DST ...



Les aurores boréales

Ovales auroraux :



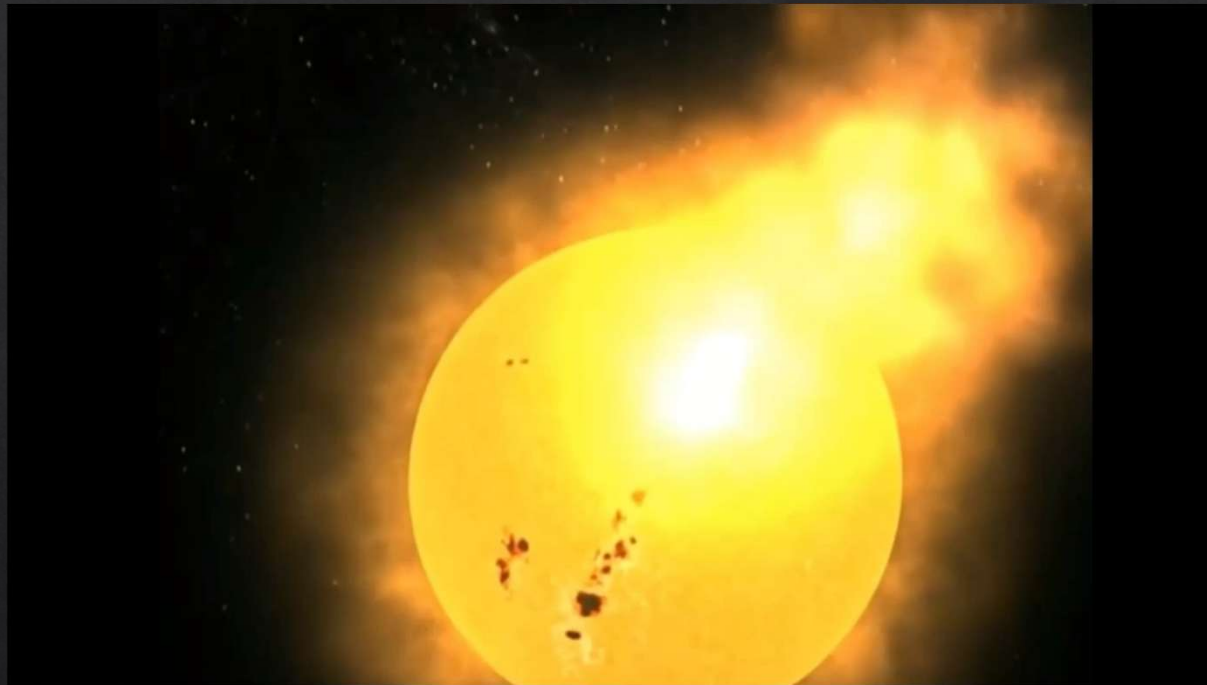


Les aurores boréales

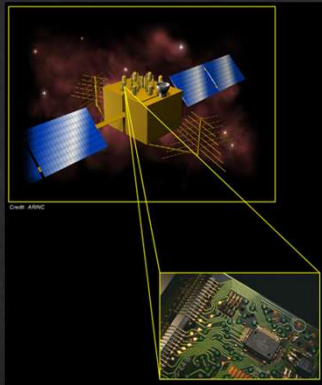


Crédit : Prescillia CORCIONE – Mont du Lyonnais Oct 2024

IMPACTS OPÉRATIONNELS SUR L'ENVIRONNEMENT SPATIAL ET SUR TERRE



Qui est impacté ?



Systèmes embarqués



Moyens de communications
et de navigation



Les vols habités et
Le personnel navigant



Réseaux d'infrastructures sols



Le climat

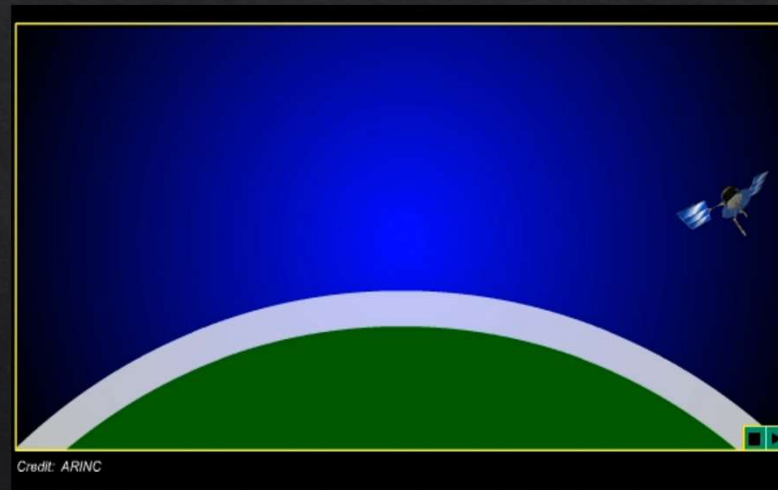


Les animaux migrants

Les satellites et les systèmes embarqués

Effets liés à l'atmosphère résiduelle :

- ◆ Freinage atmosphérique provoquant une usure de l'orbite : chutes des objets vers la Terre obligeant les opérateurs satellites à une remise à poste, ...).



Les satellites et les systèmes embarqués

Effets des particules

- ◆ Perturbation des mesures scientifiques embarquées, ...),
- ◆ Perturbation des systèmes informatiques,
- ◆ Détérioration des panneaux solaires,
- ◆ Détérioration des matériaux et des capteurs,
- ◆ Détérioration et destruction des composants électroniques,



Perturbations des opérations spatiales civiles et militaires !

Les satellites et les systèmes embarqués



Effets des météoroïdes et des débris spatiaux

◆ Effets des météoroïdes :

- Collision importante avec des vitesses élevées (~ 20 km/s et 72 km/s),
- Présence de plasma généré par l'impact endommageant l'électronique,



◆ Effets des débris spatiaux :

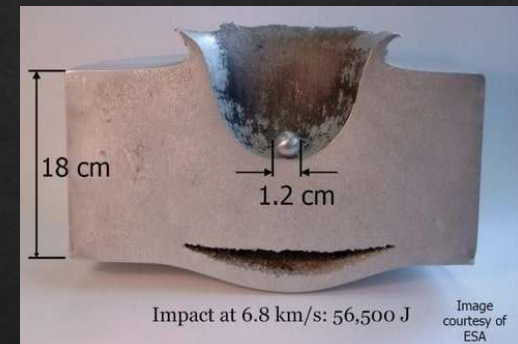
- Collision importante avec des vitesses élevées (entre 7 et 20 km/s).

Systèmes embarqués

Effets des météoroïdes et des débris spatiaux

◆ Effets des débris spatiaux :

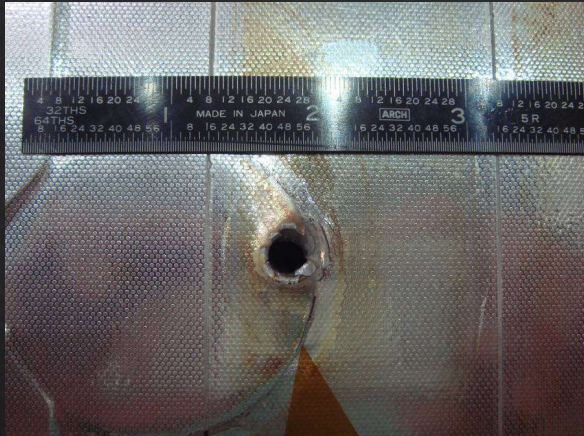
Taille des débris	Conséquences
< 0.01 cm	Érosion des surfaces
Entre 0.01 cm et 1 cm	Dommages significatifs Perforations Conséquences variables suivant l'équipement atteint
Entre 1 et 10 cm	Dommages très importants Risque de perte de la mission Aucun blindage ne résiste à des particules > 2 cm
> 10 cm	Conséquences catastrophiques Destruction du satellite Production de nombreux débris



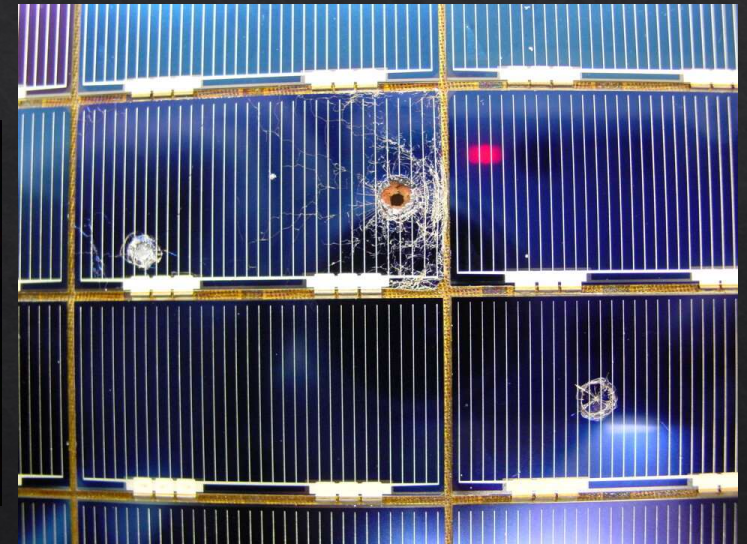
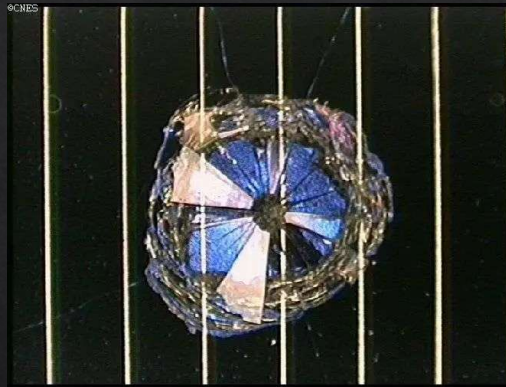
Systèmes embarqués

Effets des météoroïdes et des débris spatiaux

◆ Effets des débris spatiaux :



Trou dans le radiateur de la navette spatiale américaine Endeavour provoqué par un débris durant la mission ST-118. Le diamètre de l'orifice d'entrée est de 6,4 mm et celui de sortie est le double.



Impacts sur les panneaux solaires du télescope spatial Hubble

Systèmes embarqués

Aéronefs :

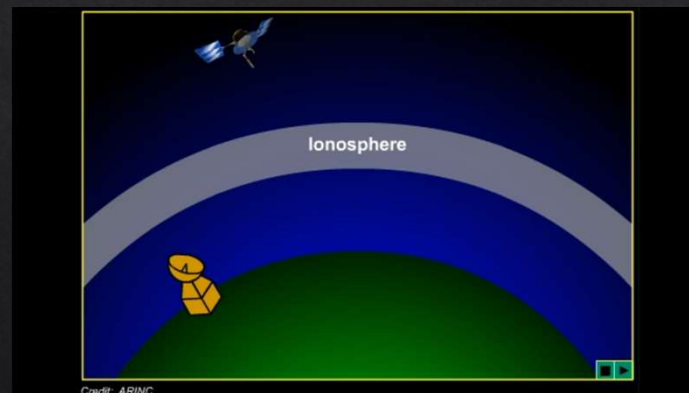
- ◆ Perturbations des systèmes embarqués dans les régions polaires et équatoriales (dysfonctionnement des calculateurs FMS, des systèmes d'anti-collision...),



Moyens de communications et de navigation

Perturbations :

- ◆ Des moyens de communications :
 - Dégradation et/ou perte des communications des aéronefs civils et militaires,
 - Dégradation et/ou perte des moyens de communication sol des liaisons satellites.

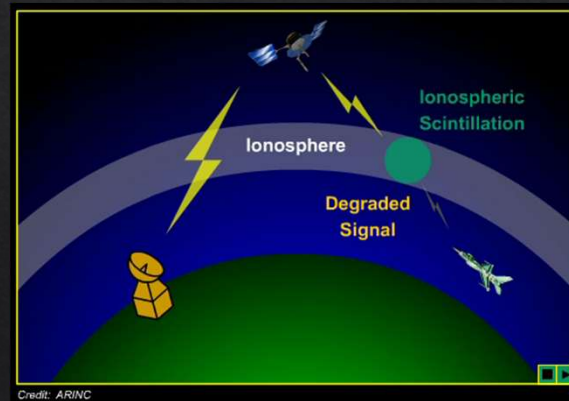


Moyens de communications et de navigation

Perturbations :

◆ Des moyens GNSS :

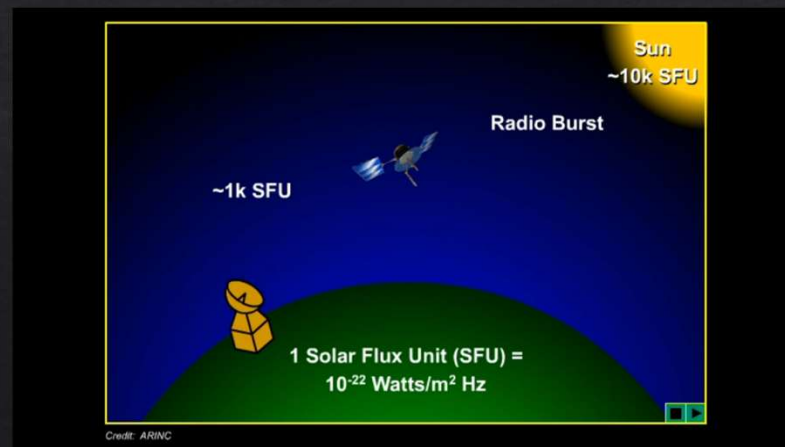
- Perte de la synchronisation du temps : dysfonctionnement de la gestion du temps sur les serveurs, perturbation serveurs boursiers et/ou bancaires, ...
- Dégradation ou perte de localisation : erreur de suivi des objets spatiaux, avions ...



Moyens de communications et de navigation

Perturbations :

- ◆ Des moyens de détection radar :
 - Perte de suivi des objets spatiaux et des aéronefs,
 - Création de fausses pistes ...



Le personnel navigant et les vols habités

Exposition aux particules de hautes énergies

- ◇ des spationautes : agression directe des particules,
- ◇ du personnel navigant durant les vols aux hautes latitudes (problèmes de santé en cas de fortes accumulations de doses).



Le personnel navigant et les vols habités

Exposition aux particules de hautes énergies :

- ◇ des spationautes : agression directe des particules,
- ◇ du personnel navigant durant les vols aux hautes latitudes (problèmes de santé en cas de fortes accumulations de doses).

Effets sur la santé humaine :

- ◇ Augmentation du risque de cancer,
- ◇ Effets neurologiques et cardiovasculaire,
- ◇ Dégradation du système immunitaire,
- ◇ Risque aigu de syndrome de radiation (en cas d'éruption solaire intense).

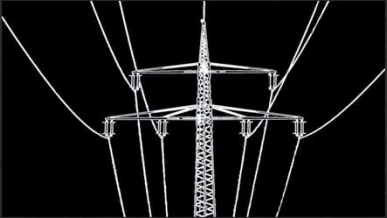
Le personnel navigant et les vols habités

Doses de radiation selon les missions :

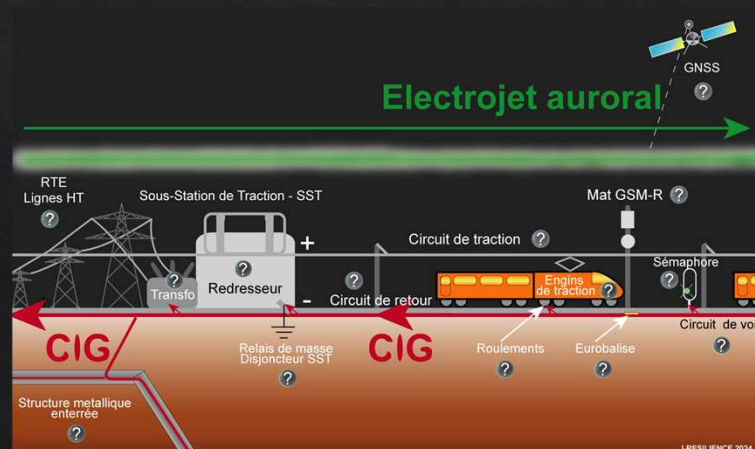
Mission	Durée	Dose typique	Comparaison terrestre
Vol commercial	8 h de vol	~0,03 mSv	Équivalent à 3 radios dentaires
Station spatiale ISS	6 mois	~80–160 mSv	Environ 50 à 100 fois une radiographie
Mission lunaire Apollo	~12 jours	~1,2 mSv	Relativement faible
Mission vers Mars	~900 jours (A/R)	~1000 mSv (1 Sv)	Près de la limite maximale de carrière

☢ 1 Sv (sievert) = dose importante, associée à un risque élevé de cancer si absorbée sur une courte durée.

Les infrastructures sols et sous-marines

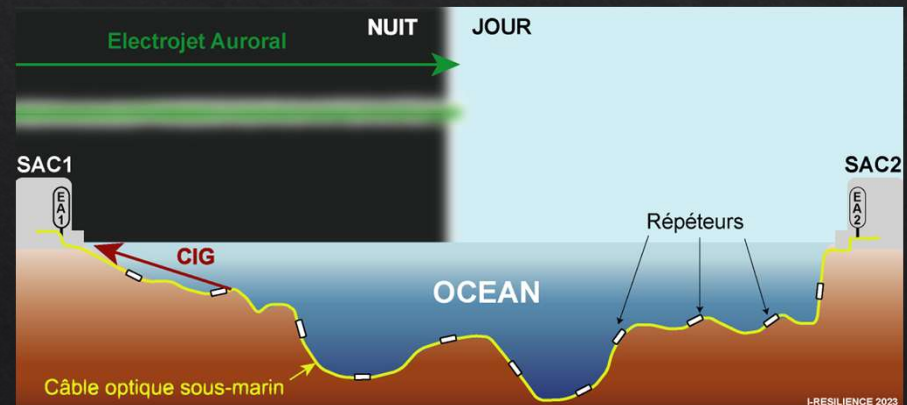
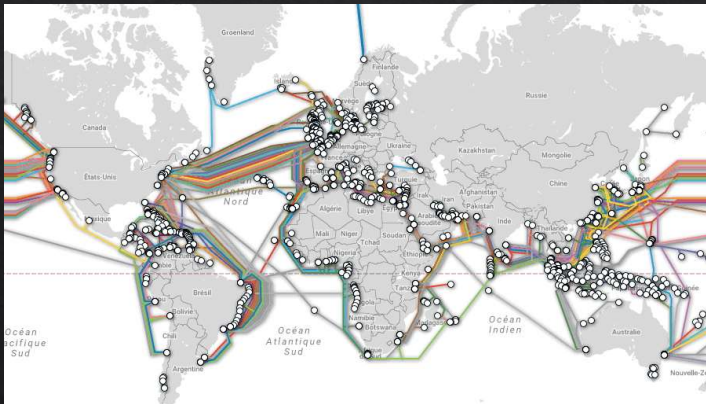


- ◆ Perturbations et coupures des réseaux électriques,
- ◆ Perturbations des moyens de forages,
- ◆ Perturbations du réseau ferroviaire,



Les infrastructures sols et sous-marines

- ◆ Erosions et risques de fuites des pipelines (pétrole, gaz, ...),
- ◆ Dégradations des câbles continentaux et sous-marins de communication et/ou interruptions de service, ...

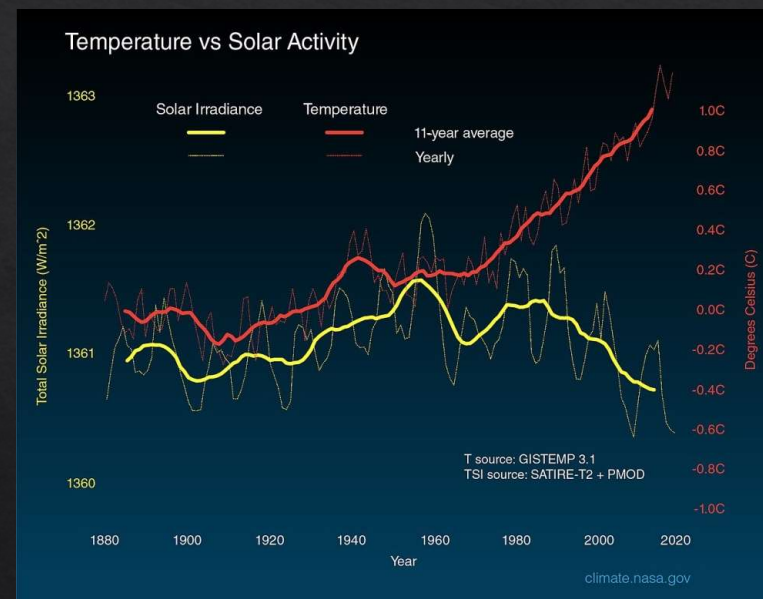


Risque fort au plan écologique et économique !



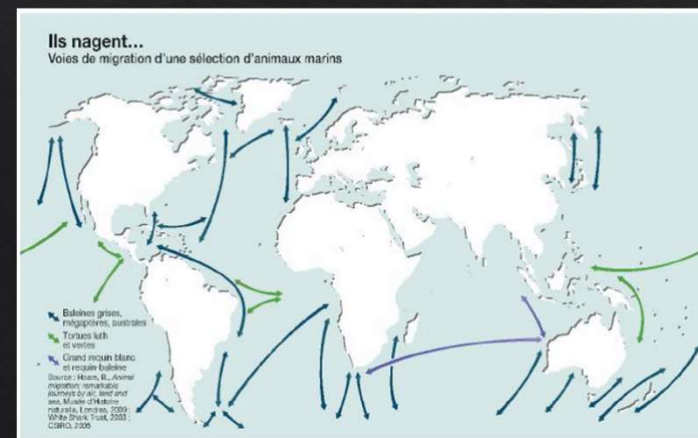
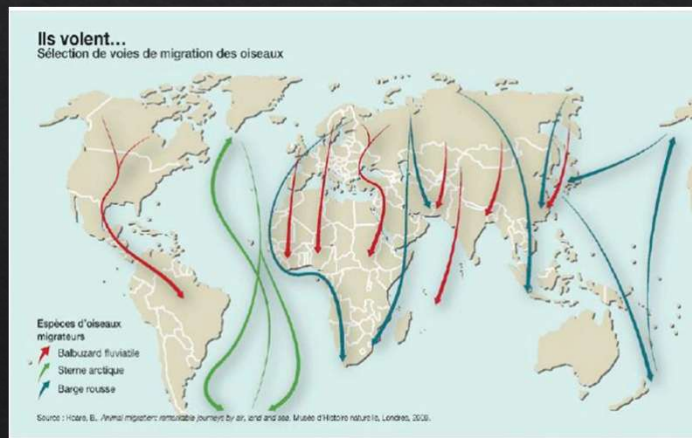
Le climat

- ◆ Le Soleil représente 99,99% de l'apport énergétique à notre environnement terrestre.
- ◆ Sa variation relative sur un cycle solaire de 11 ans ne dépasse guère 0.4 ‰ !
- ◆ La contribution à l'irradiance totale de rayonnement ultraviolet ne représente que 8 %, avec une variabilité qui peut facilement dépasser 10% sur un cycle solaire,
- ◆ **Amplitude thermique comprise entre 0,1 et 0,2°C par cycle !**



Les animaux migrateurs

- ◆ Impacts sur les circuits de migrations liés :
 - aux perturbations du champ magnétique terrestre,
 - au réchauffement climatique ...



Une coopération civilo-militaire



*Ludwig Klein (LESIA) – Arnaud Chulliat (IPGP) – Adj Lionel Birée
Séminaire d'astrophysique à Paris le 21 juin 2011*

***L'ARDEUR DU SOLEIL FAIT MIEUX
APPRÉCIER D'ÊTRE À L'OMBRE***

Proverbe indien



Lionel BIREE
Ingénierie Conseil et Formation en SSA
Email : lionel.biree@elios.space
Internet : <http://elios.space>

*Conférence « Météorologie de l'espace :
du scientifique à l'opérationnel »*

*Café des Sciences - Louv'Science
MJC de Louveciennes,
le 25 septembre 2025*

*Merci de votre attention,
à très bientôt...*