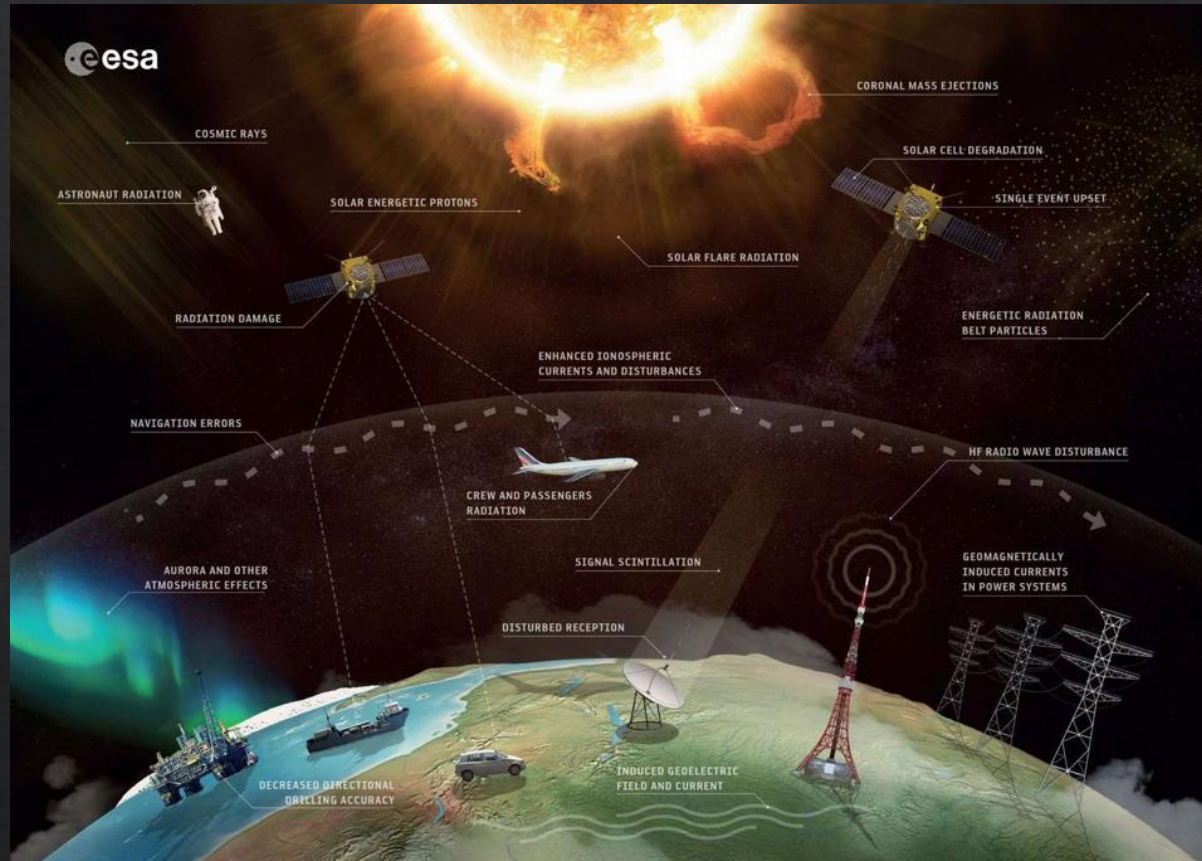


Météorologie de l'espace : « Du scientifique à l'opérationnel »



*Rencontres du Ciel et de l'Espace 2024,
le 10/11/2024*



Lionel BIREE
Ingénierie Consulting et Formation en SSA
Email : elios-space@outlook.fr
Internet : <http://elios.space>

Point commun ?



Panneau solaire endommagé



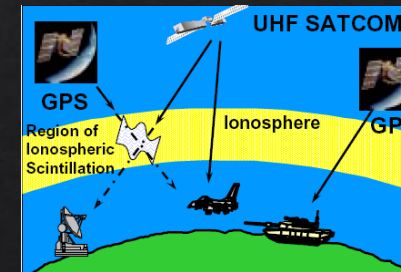
Une aurore boréale



La vie sur Terre



Un transformateur détruit



Certaines perturbations dans les communications

Plan

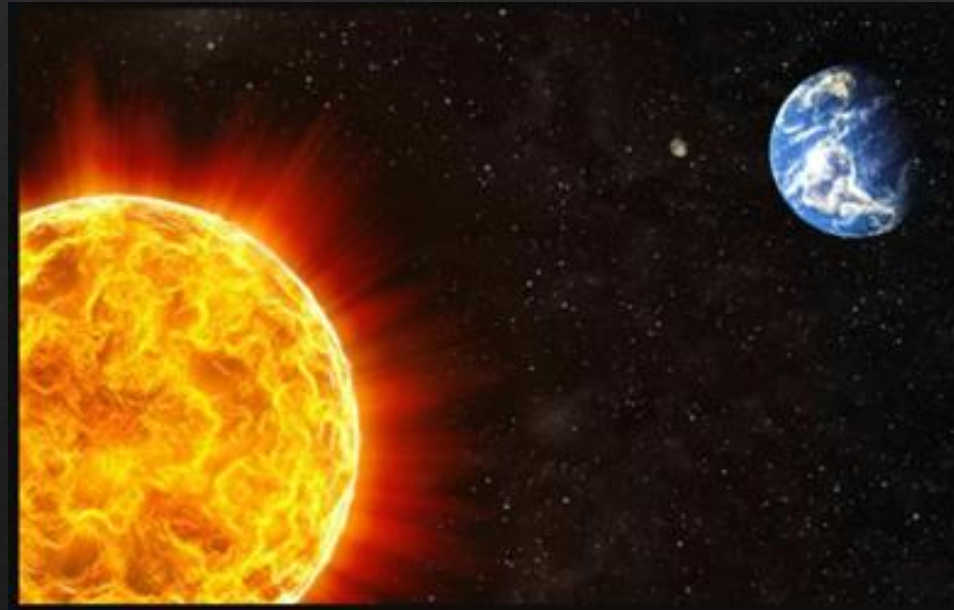
1 – Le Soleil

2 – La Terre

3 – Les interactions Soleil – Terre

4 – Impacts opérationnels sur l'environnement spatial et sur Terre

1 - Le Soleil



Carte d'identité

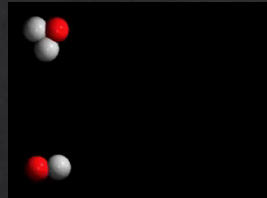
Quelques chiffres :

- ◇ Âge : 4,5 milliards d'années
- ◇ Rotation différentielle : 25 jours à l'équateur et 35 jours aux pôles
- ◇ Température : 15 millions de degrés (centre) à 5800 K (surface)
- ◇ Taille : 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.



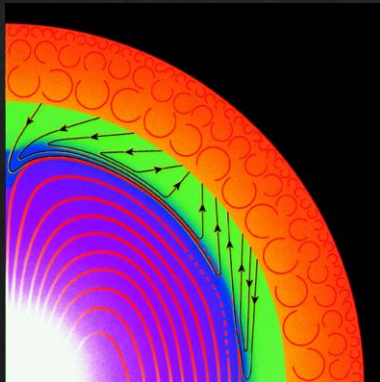
Les couches internes

Cœur



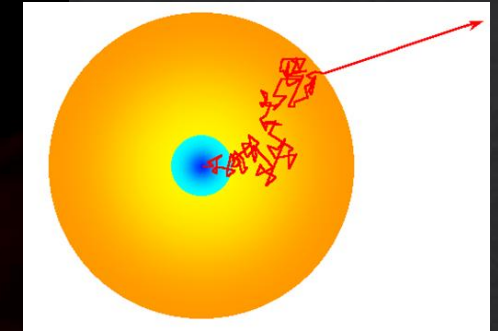
- Température : 15 millions K
- Distance : 0 à 0,3 rayon solaire
- Densité 150 g/cm³
- Masse : 60% du Soleil
- Siège des réactions nucléaires par fusion

Tachocline



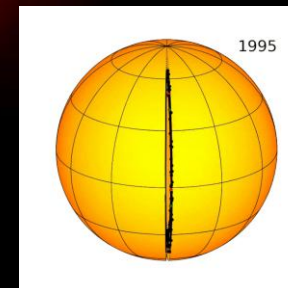
- Zone de transition entre la zone radiative et convective et de génération du champ magnétique solaire
- Distance : 0,7 rayon solaire

Zone radiative

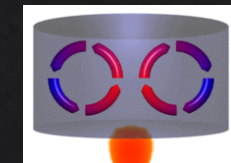


- Température : 8 à 1,3 millions K
- Distance : 0,3 à 0,8 rayon solaire
- Densité $1,4 \cdot 10^{31} \text{ m}^{-3}$ à $1,7 \cdot 10^{28} \text{ m}^{-3}$
- Masse : 30% du Soleil
- Transport de l'énergie par radiation électromagnétique (traversée du milieu en 1 million d'année)

Zone convective



- Température : décroissance de 2.106 K à 5800 K
- Distance : 0,9 à 1 rayon solaire
- Transport de l'énergie par convection (traversée du milieu en 2 mois)



Les atmosphères



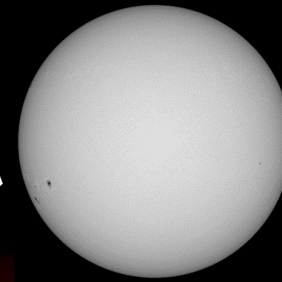
- Haute atmosphère du Soleil qui s'étend dans le milieu interplanétaire (100 UA)
- Température : 2 millions K
- Densité : très tenue 10^{14} m^{-3}

Couronne



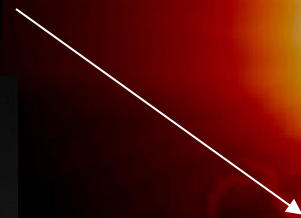
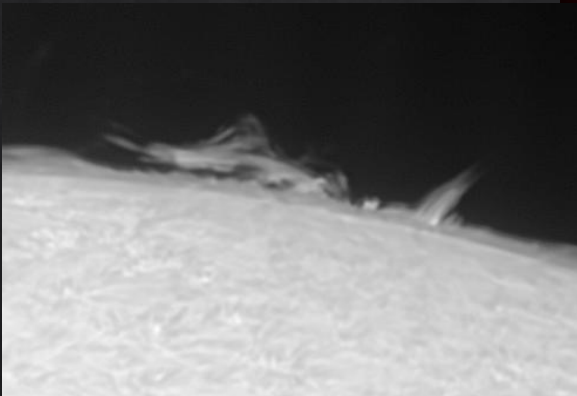
Photosphère

« Sphère de lumière »

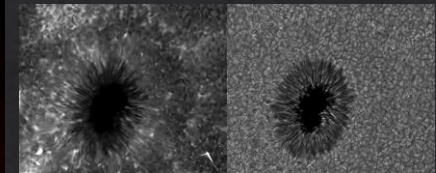


- 99 % de la lumière émise par le Soleil
- T° : 5800 K
- Rotation différentielle : 25 jours à l'équateur et 35 jours aux pôles
- Epaisseur \approx 600 km

Protubérance / Filament



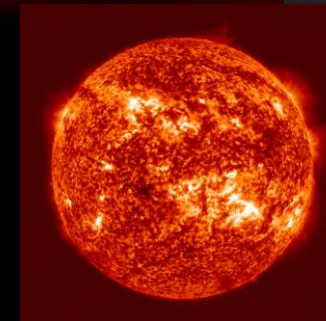
Taches solaires



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

Chromosphère

« Sphère de couleur »



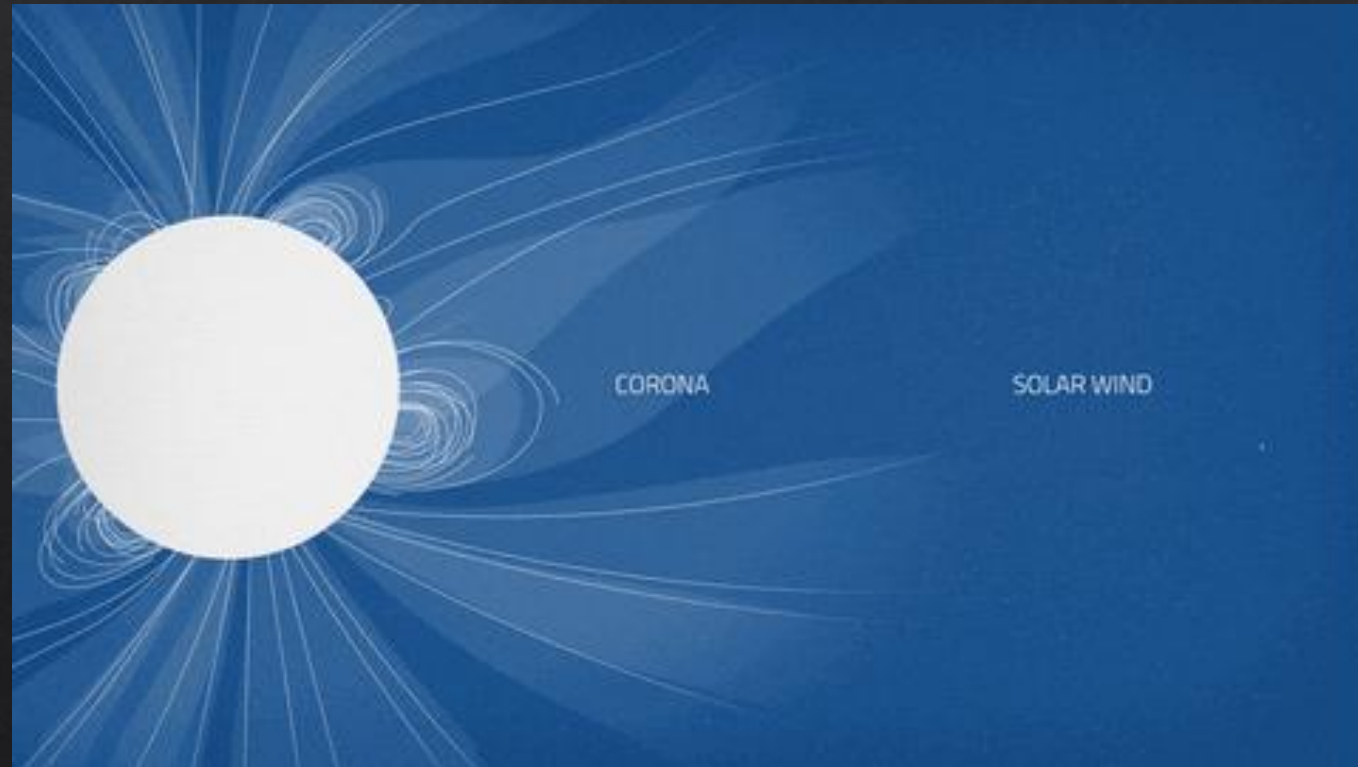
- Fort rayonnement en Ha
- Température : élévation de 4 200K à 10 000 K
- Epaisseur \approx 10 000 km

- 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

La couronne :

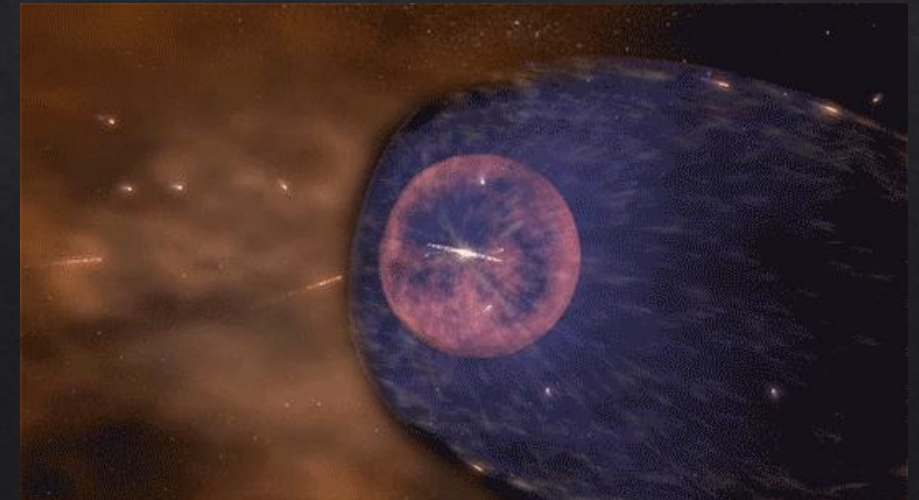
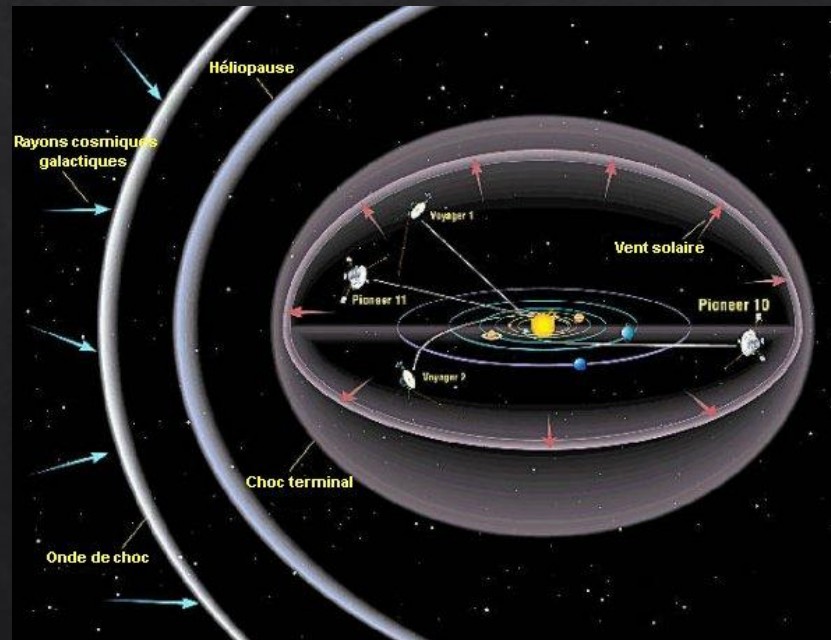
- ◇ Dualité entre le champ magnétique et le plasma



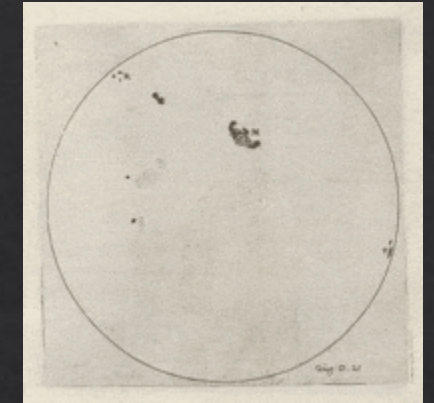
Les atmosphères

L'héliosphère :

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

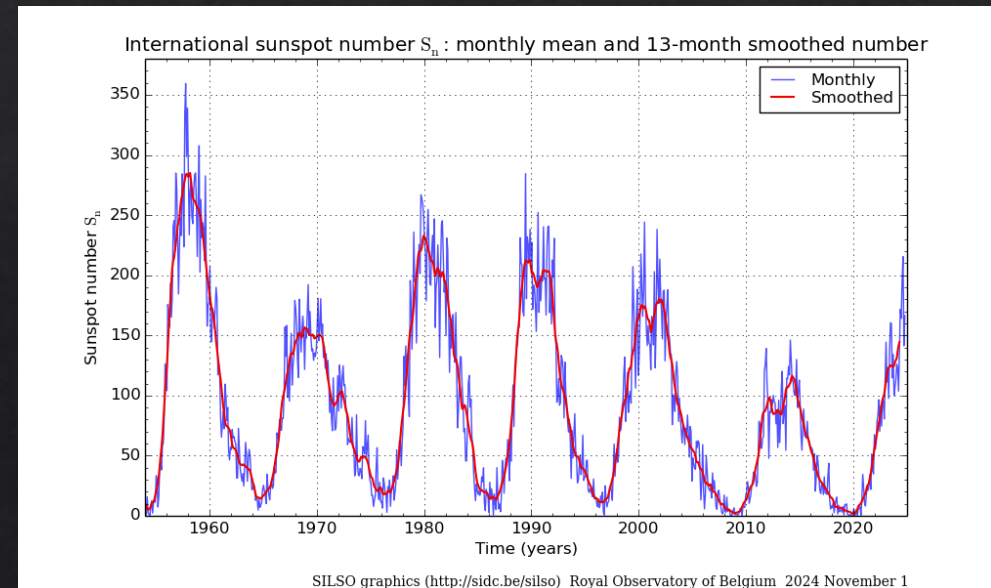
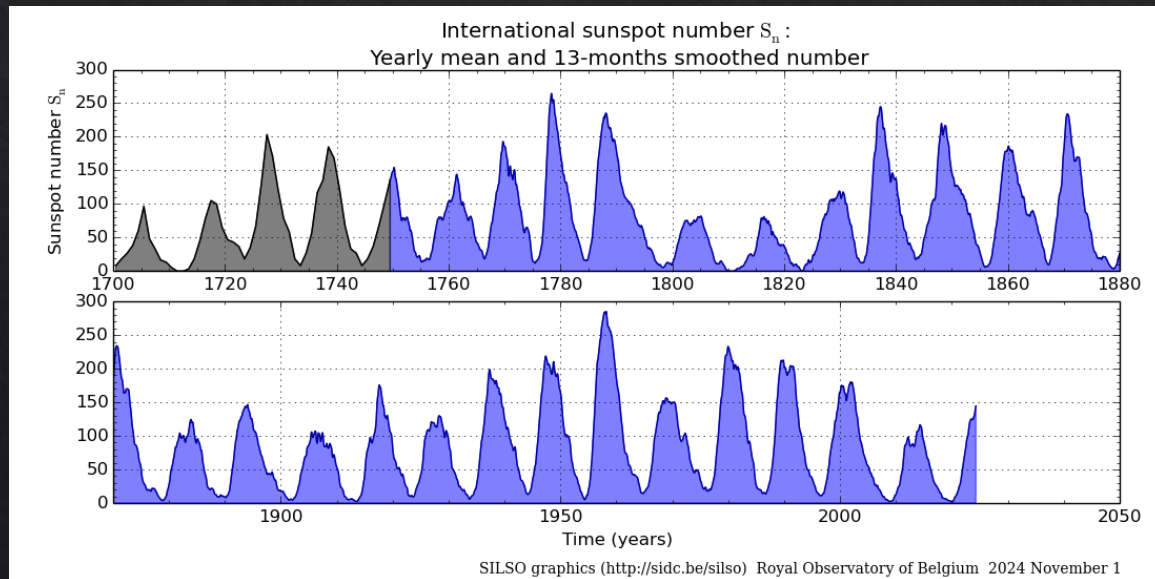


Cycle solaire



Constat :

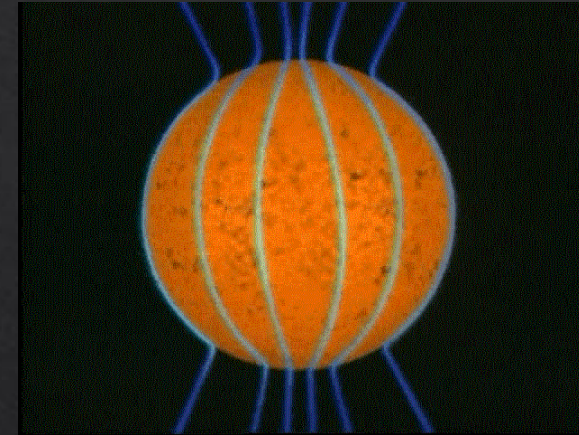
- ◇ Périodes au cours de laquelle les taches solaires apparaissent,
- ◇ Cycle de 11 ans environ (cycle de Schwabe),
- ◇ Déplacement des taches solaires des hautes latitudes vers l'équateur au cours d'un cycle.



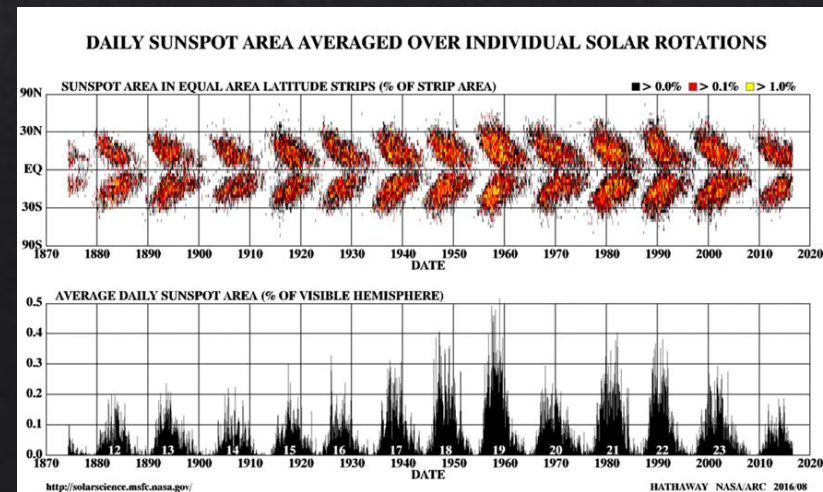
Cycle solaire

Dynamo solaire :

◇ Inversion des polarités,



◇ Cycle de 22 ans (cycle de Halle).



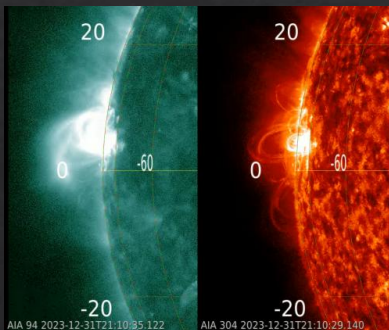
Les phénomènes solaires

Les flares

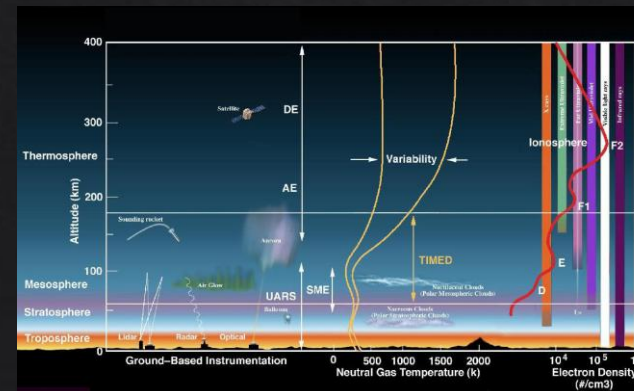
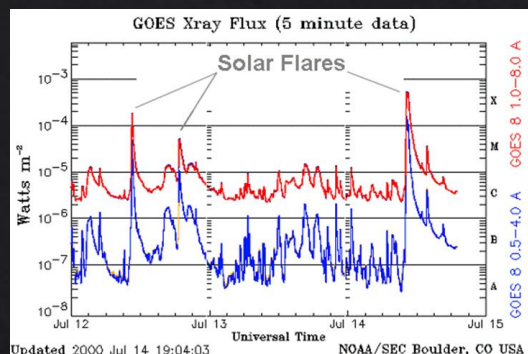
- ◇ Libération énergétique de particules en X-ray, UV et radio,

Rayonnement solaire :

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



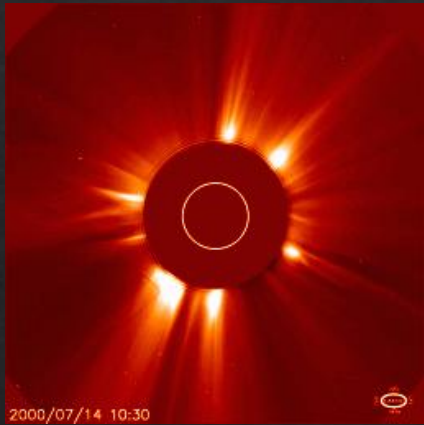
ARRIVEE: 8 min
DUREE: 1-2 heures



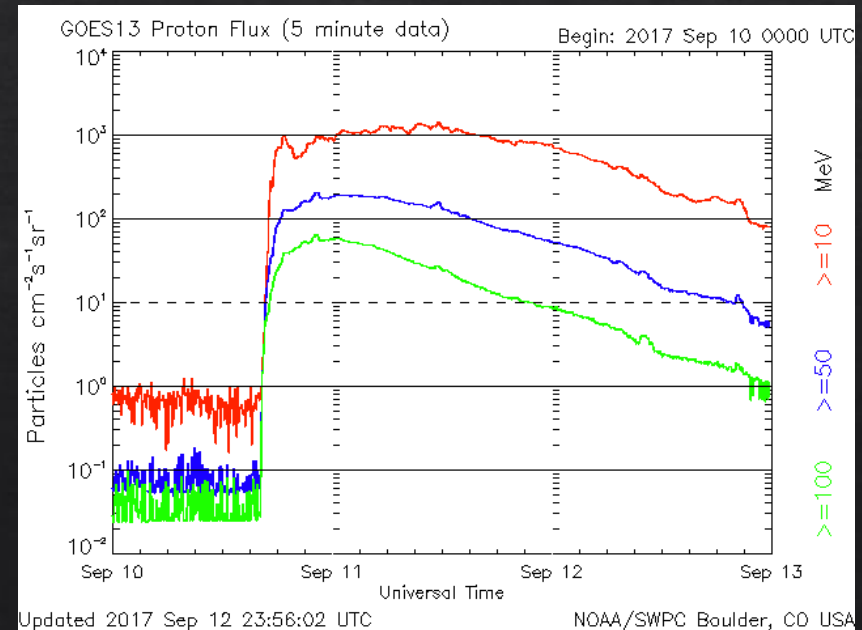
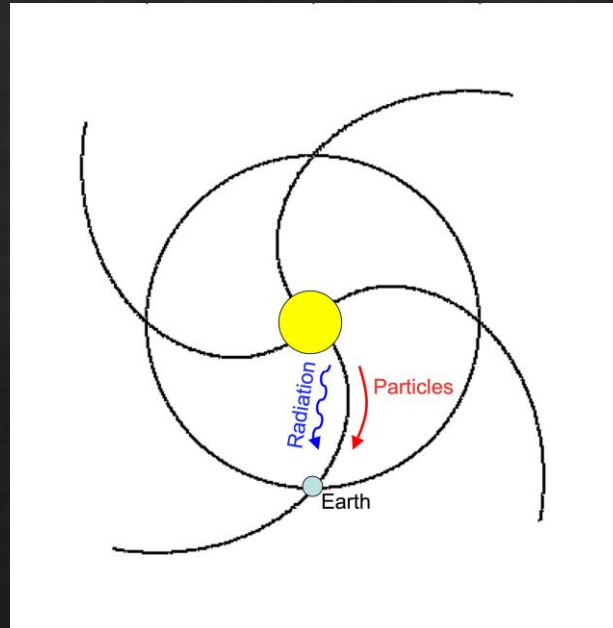
Evènements à particules

SEP :

- ◇ Emission d'un flux très grand de P_+ suite à un évènement majeur (flare extrême...),
- ◇ Déplacement des particules le long des lignes de champs magnétique,

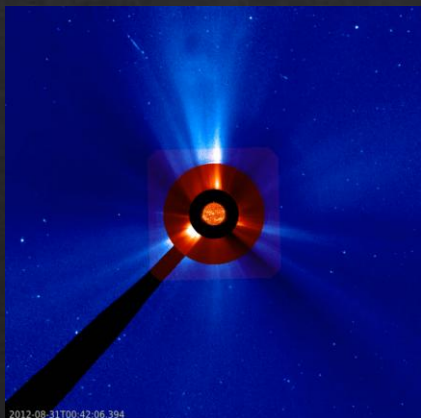


ARRIVEE: 40 mn en moyenne
DUREE: plusieurs jours



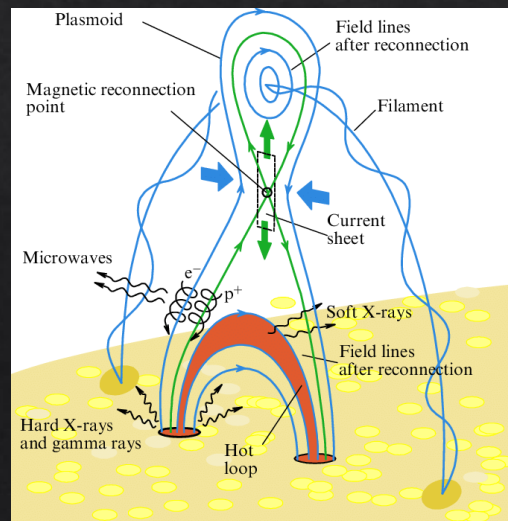
Les phénomènes solaires

Les CME (Coronal Mass Ejection)

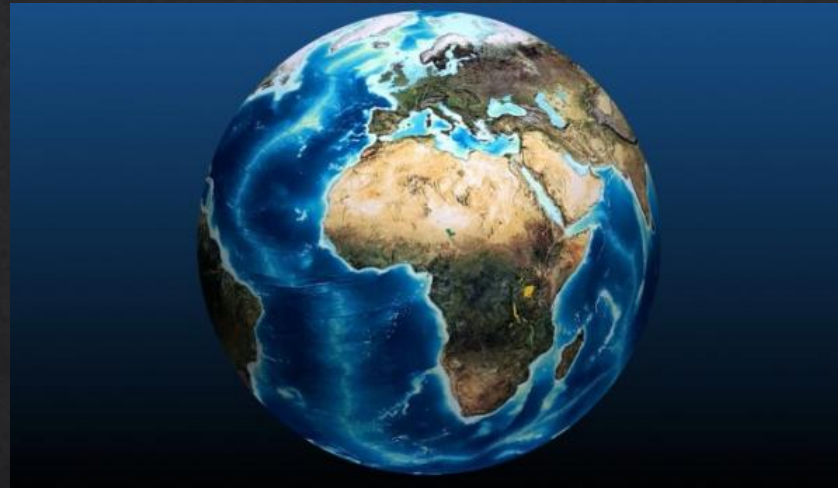


- ◇ Ejection de plasma et de champ magnétique de la couronne suite à une reconnexion magnétique,
- ◇ Vitesse de déplacement : variable entre 100 et 2000 Km s⁻¹.

ARRIVEE: 1-3 jours
DUREE: plusieurs jours



2 - La Terre



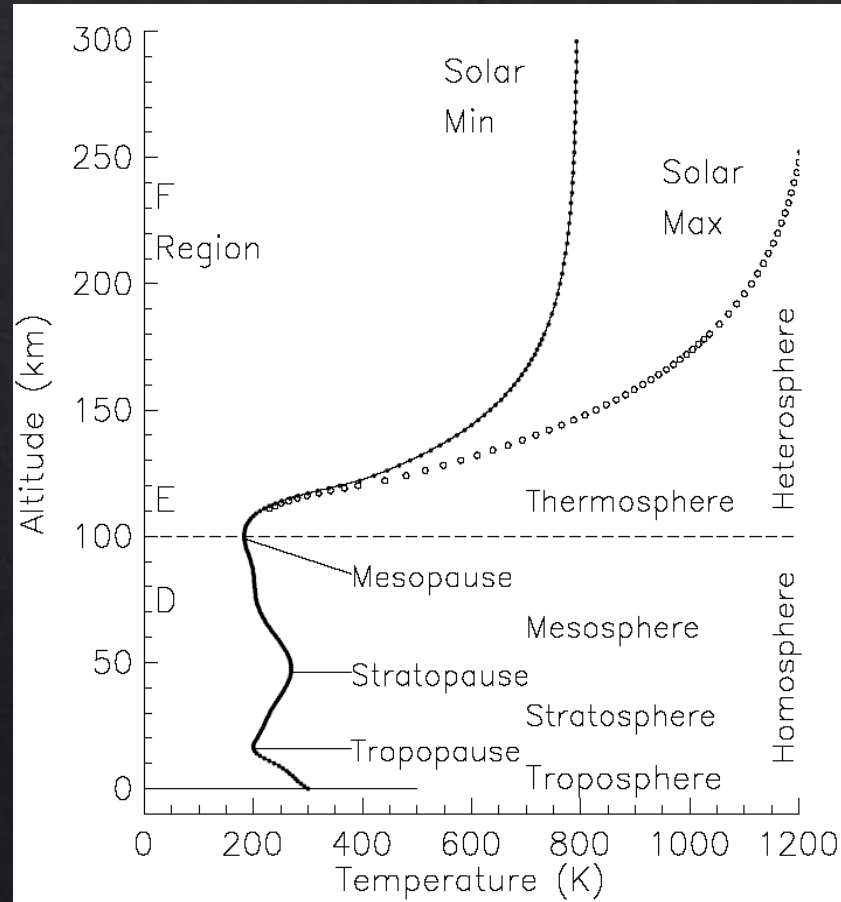
Atmosphère

Homosphère

- ◇ Troposphère
- ◇ Stratosphère
- ◇ Mésosphère

Hétérosphère

- ◇ Thermosphère
- ◇ Exosphère



Ionosphère

Couche D

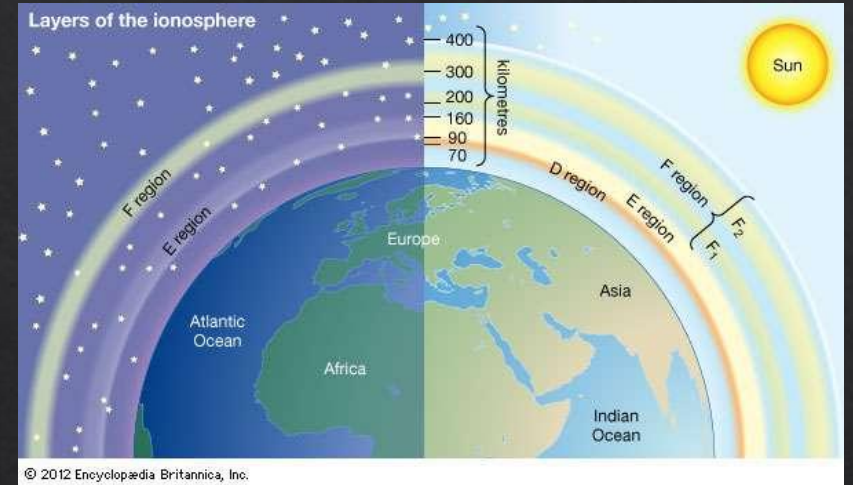
- ◇ Situé entre 75 et 95 km d'altitude,
- ◇ Concentration électronique importante,
- ◇ Sensible au rayon X.

Couche E

- ◇ Situé entre 95 et 150 km,
- ◇ Sa concentration dépend de la distance zénithale du Soleil,
- ◇ Sensible au rayon X et UV.

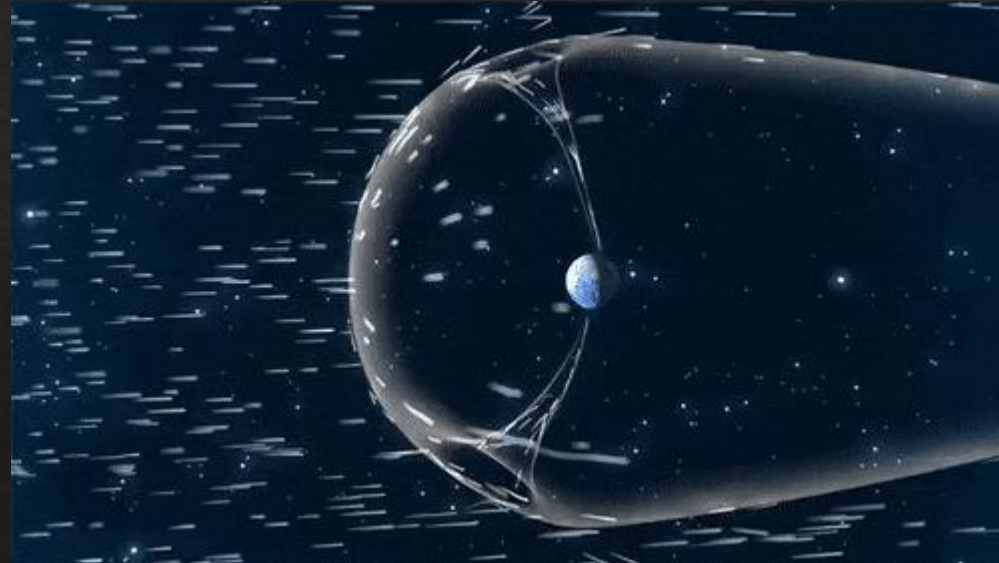
Couche F

- ◇ Situé entre 150 et 1200 km,
- ◇ Deux couches F1 et F2 le jour, réduite en une seule la nuit,
- ◇ Sensible aux UV.

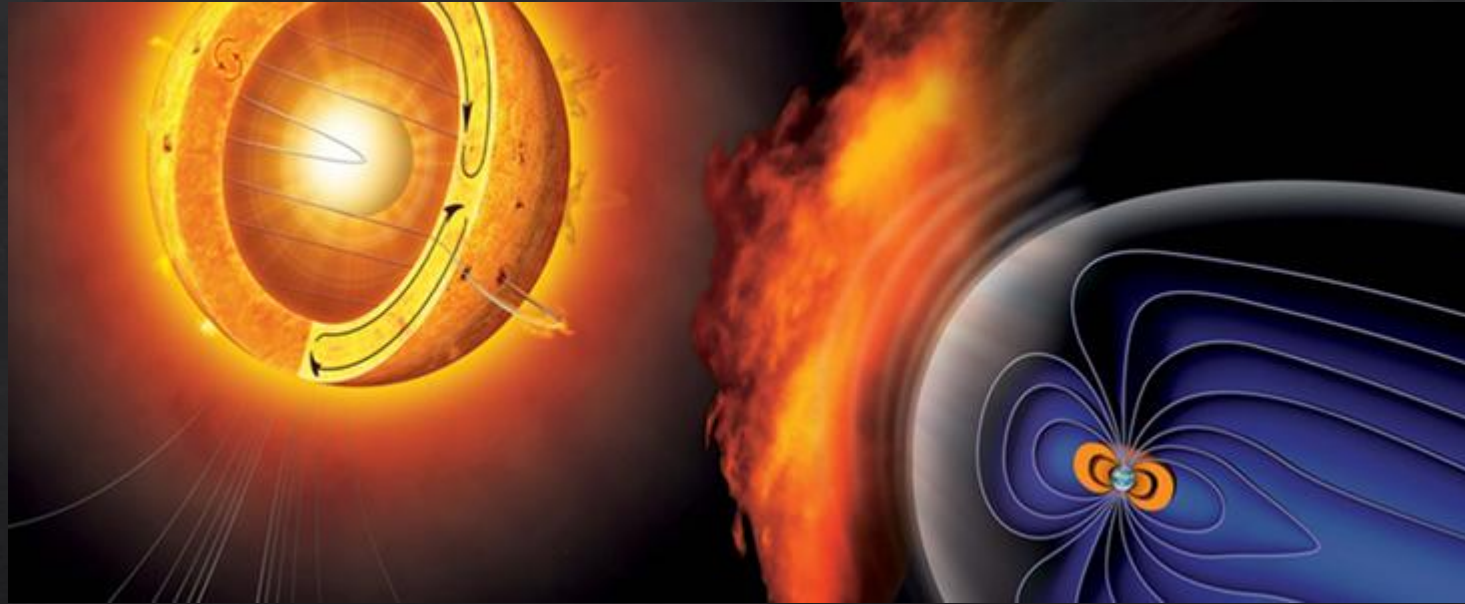


Magnétosphère

- ◆ Bouclier terrestre formé par le champ magnétique terrestre,
- ◆ Situé à environ 11 rayons terrestres, il dévie le vent solaire et protège en partie la Terre des effets du champ magnétique interplanétaire du Soleil.

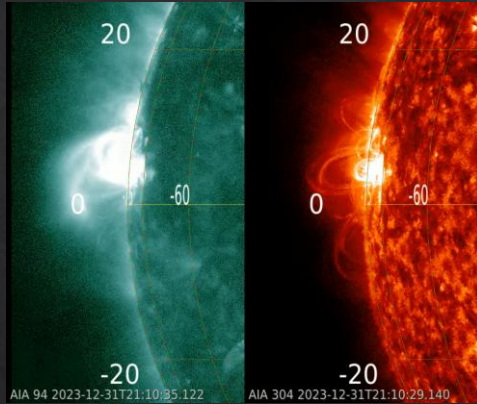


3 - L'interaction Soleil – Terre

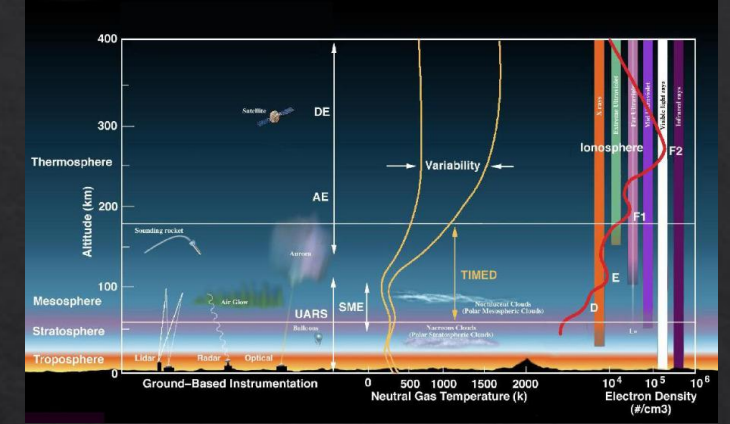


Interaction Soleil - Terre

Flare



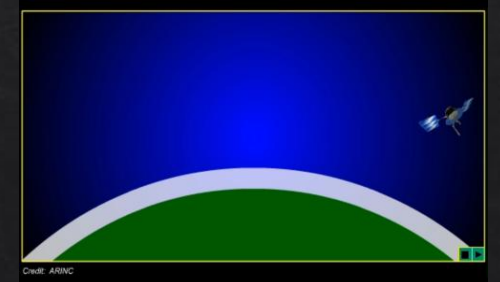
Atmosphère normale



Augmentation du rayonnement
X et UV

Perturbations ionosphériques

Chauffage atmosphérique

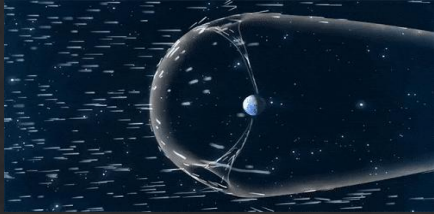


Flux total

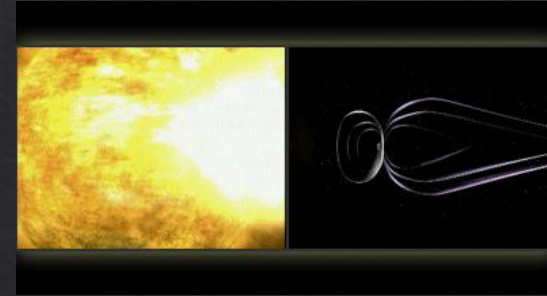
Climat

Interaction Soleil - Terre

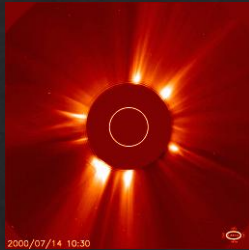
Vent solaire / IMF



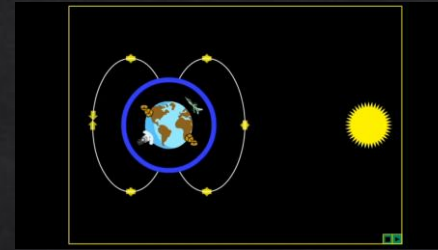
Activité géomagnétique



Particules énergétiques solaires



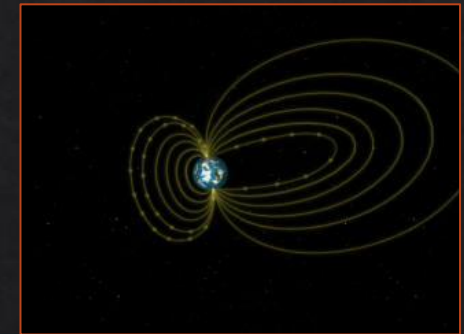
Evènement à protons



CME



Orages géomagnétiques sporadiques



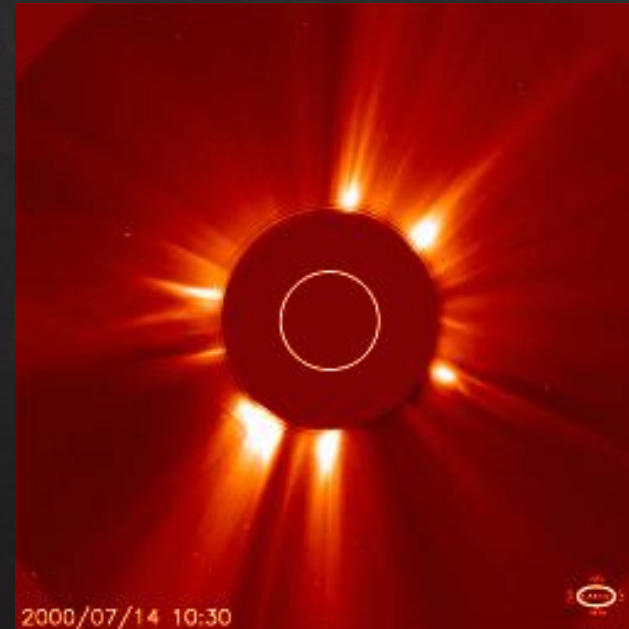
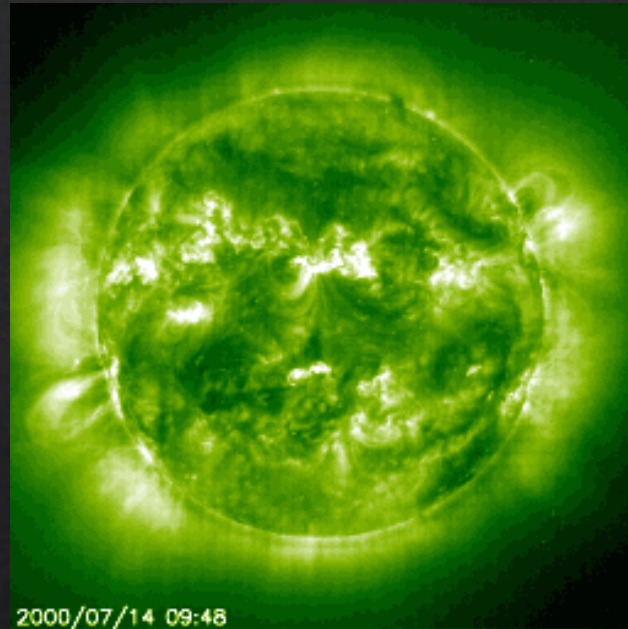
4 - Impacts opérationnels sur l'environnement spatial et sur Terre



Un exemple : le 14 juillet 2000

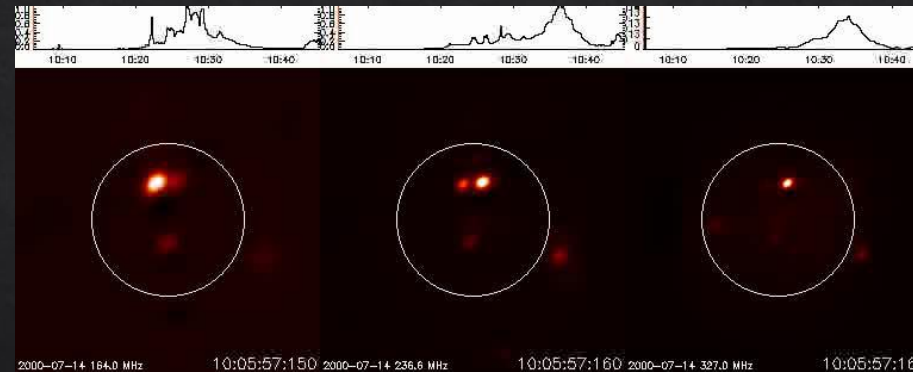
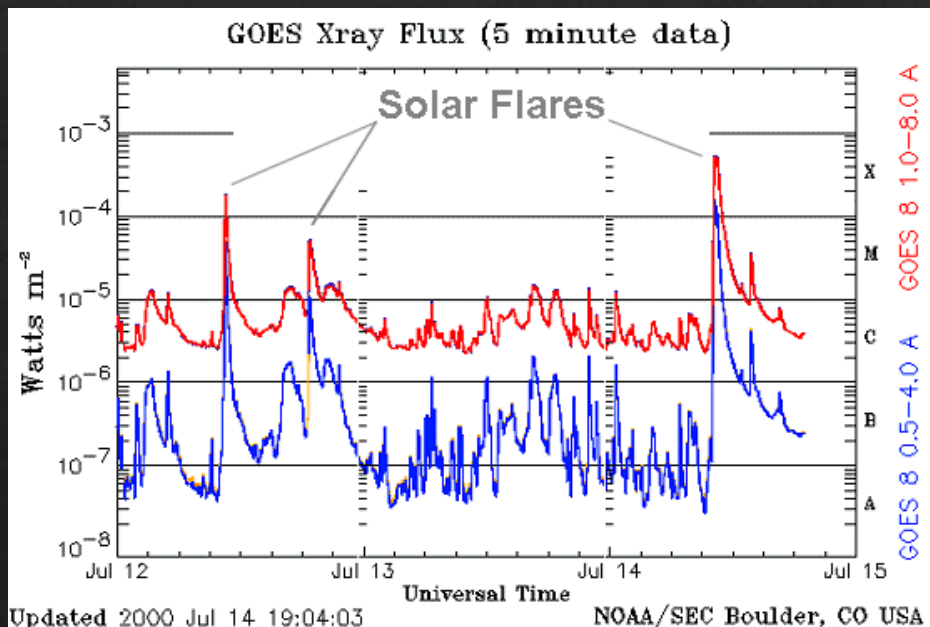
Un exemple : le 14 juillet 2000

- ◇ **Heure H** : en quelques minutes, 150 milliards de tonnes de matière sont éjectées dans l'espace (éjection coronale de masse),



Un exemple : le 14 juillet 2000

- ◇ Heure H + 8 mn : un intense rayonnement radio atteint la Terre, perturbant fortement les transmissions radio (ondes courtes surtout),



Un exemple : le 14 juillet 2000

- ◇ Heure H+50 min : l'environnement terrestre est soumis à un intense flux de particules énergétiques,

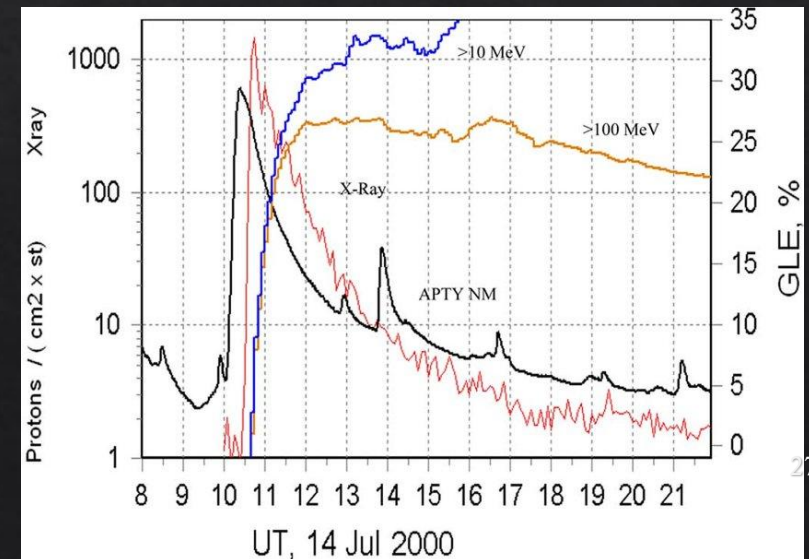


- ◇ Heure H+60 min : une partie du flux de particules énergétiques atteint le sol dans les régions aurorales,
 - exposition des êtres humains

Un exemple : le 14 juillet 2000

- ◇ Premières conséquences de cette éruption :
 - 1 satellite de télécommunications détruit,
 - Plusieurs satellites atteints (dysfonctionnements dans l'électronique de bord),
 - Interruption des transmissions radio (ondes courtes),
 - Exposition des êtres humains dans les vols passant à haute latitude (Par exemple Paris - Montréal)

**La dose aurait été mortelle
pour un astronaute sur la Lune!**

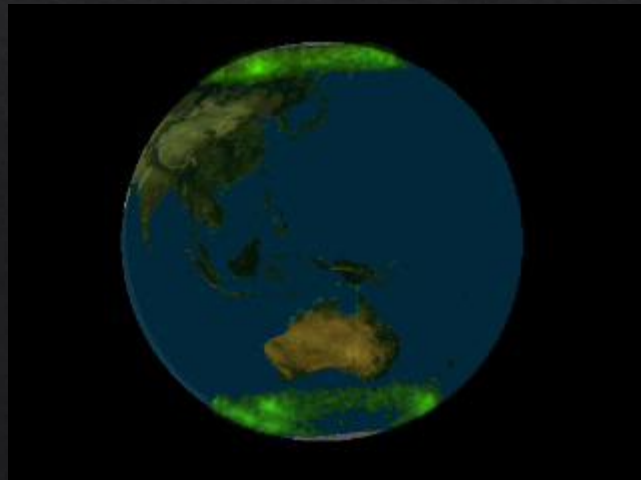


Un exemple : le 14 juillet 2000

- ◆ Heure H+1.5 jour : l'éjection de matière coronale atteint la Terre, perturbant son champ magnétique («orage magnétique»)...

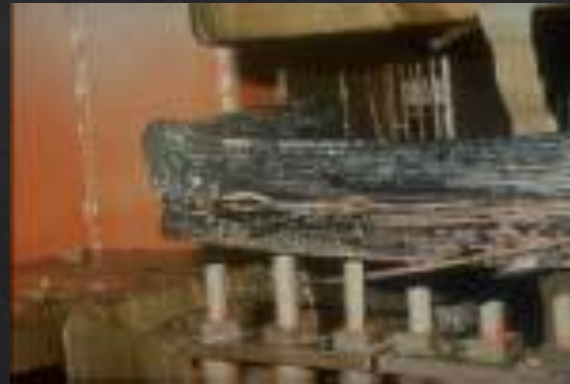


- ◆ Des aurores boréales sont visibles jusqu'à basse latitude...



Un exemple : le 14 juillet 2000

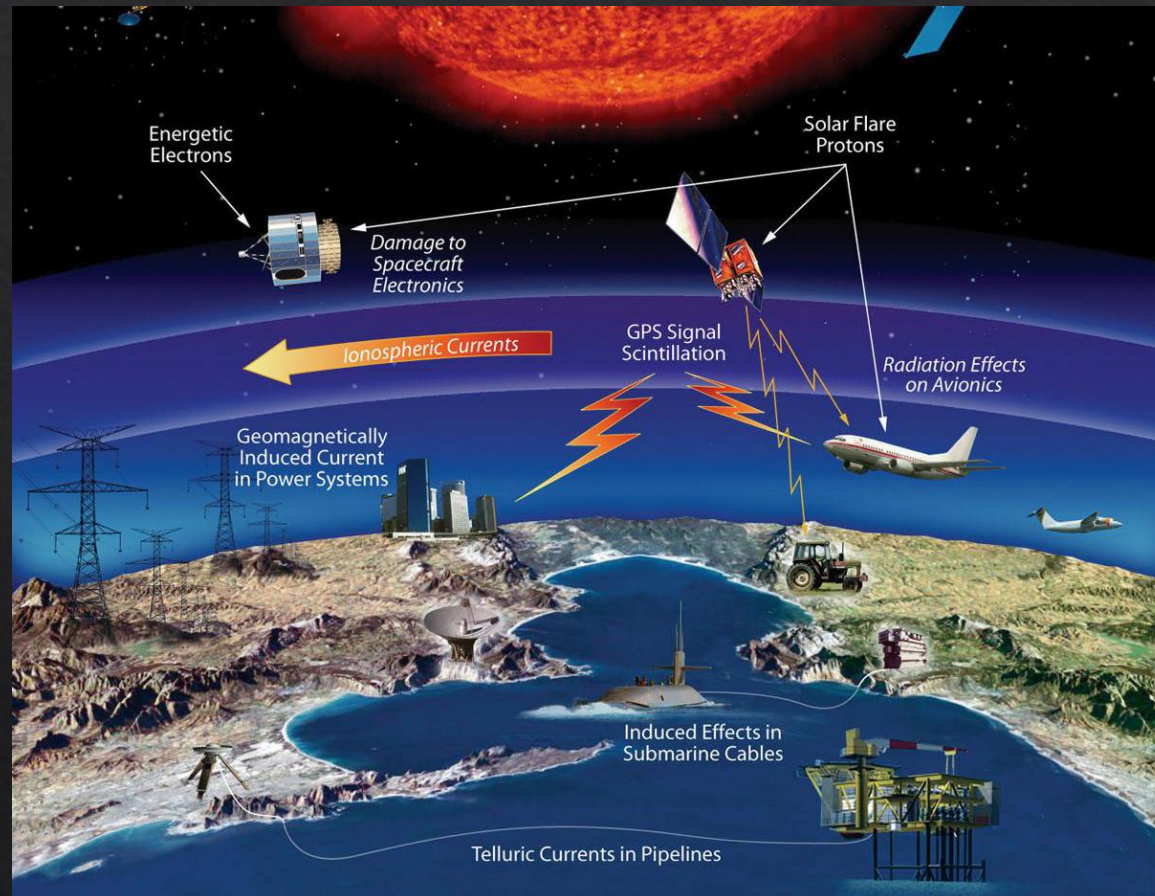
- ◆ Et toujours dans la même période, l'orage magnétique génère des courants dans l'écorce terrestre, provoquant des brusques chutes de tension dans les pays nordiques (Scandinavie, Canada, USA).



Transformateurs détruit

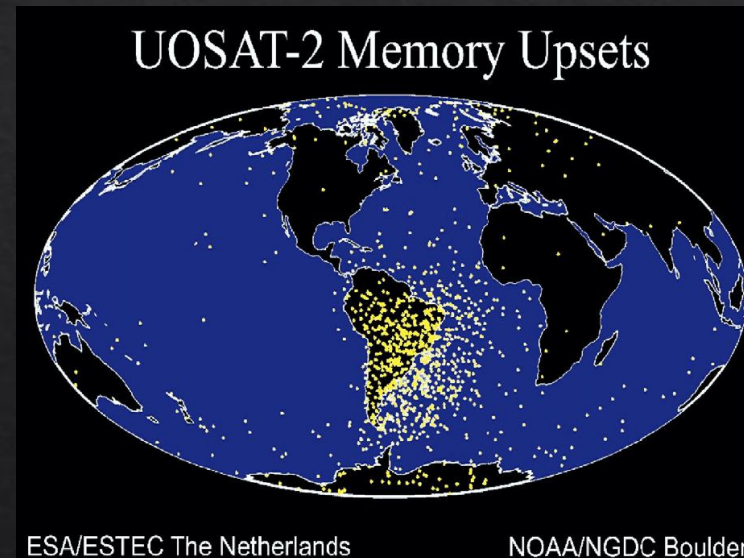
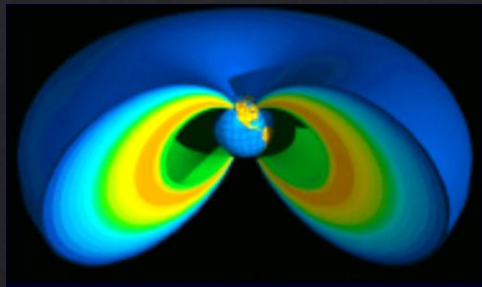
Un exemple : le 14 juillet 2000

- ◆ Heure H+2 jours : La modification des caractéristiques de l'environnement terrestre affecte les télécommunications.



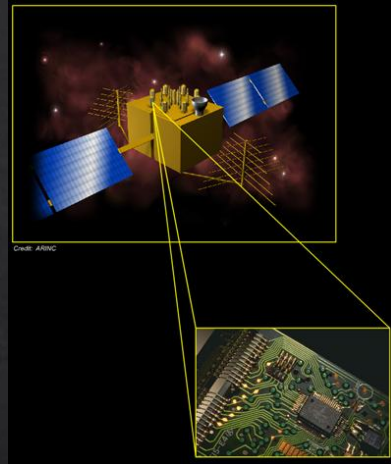
Un exemple : le 14 juillet 2000

- ◆ Heure H+2.5 jours : des populations de particules énergétiques (protons, électrons) apparaissent dans l'environnement terrestre, provoquant dégâts et pannes informatiques dans les satellites.



Chaque point = 1 panne informatique recensée

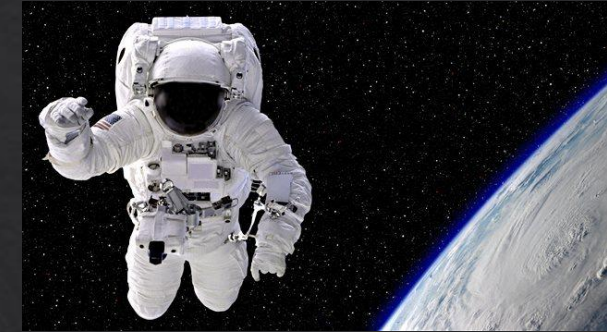
Qui est impacté ?



Systemes embarqués



Moyens de communications
et de navigation



Personnel navigant
et les vol habités



Réseaux d'infrastructure sols

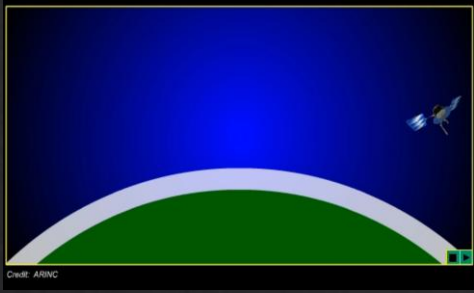


Le climat



Les animaux migrateurs

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, ...),

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

Aéronefs

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



Moyens de communications et de navigation

Perturbations

◆ Des moyens de communications :

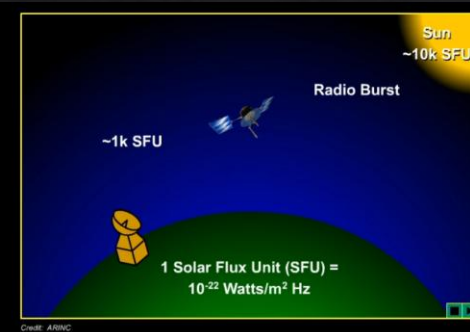
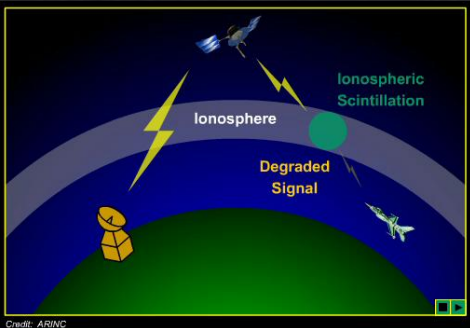
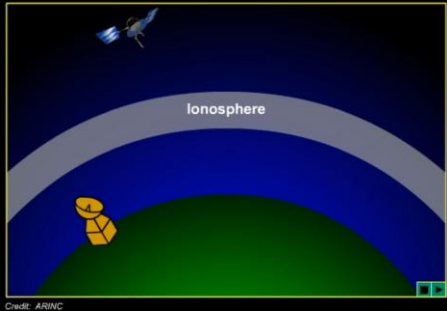
- Dégradation et/ou perte des communications des avions civils et militaires,
- Dégradation et/ou perte des moyens de communication sol des liaisons satellites,

◆ Des moyens GNSS :

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

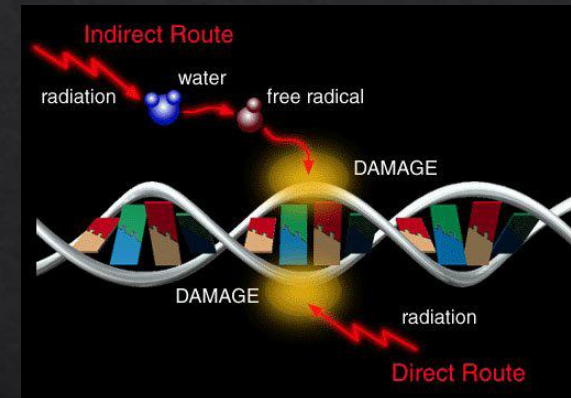
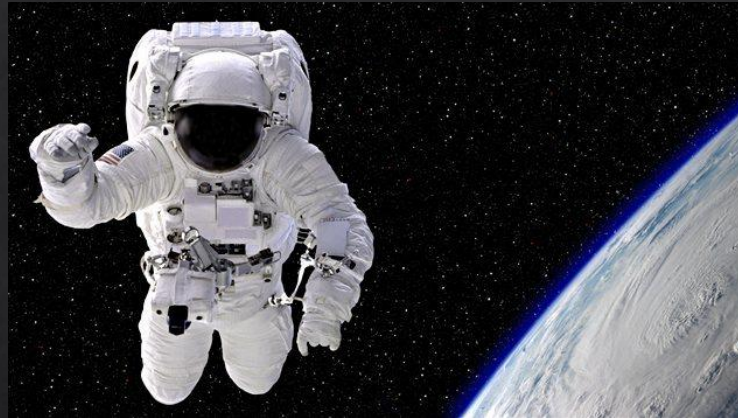
◆ Des moyens de détection radar :

- perte de suivi des objets spatiaux et des avions,
- création de fausses pistes, ...



Le personnel navigant et les vols habités

- ◇ Exposition des spationautes et du personnel navigant aux particules de hautes énergies durant les sorties extra-véhiculaires et les vols aux hautes latitudes,



Problèmes de santé graves en cas de fortes accumulation de doses pouvant aller jusqu'au décès !

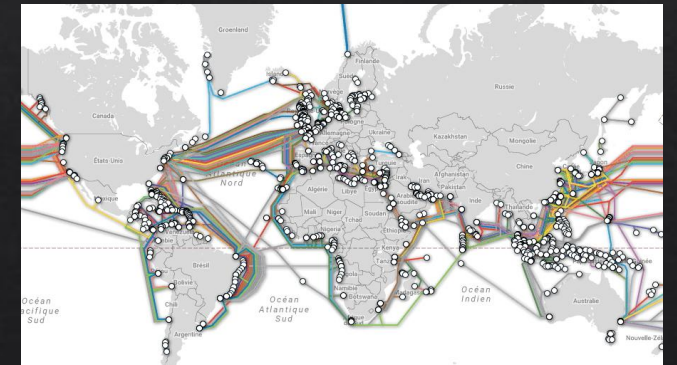
Les infrastructures sols et sous-marines



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



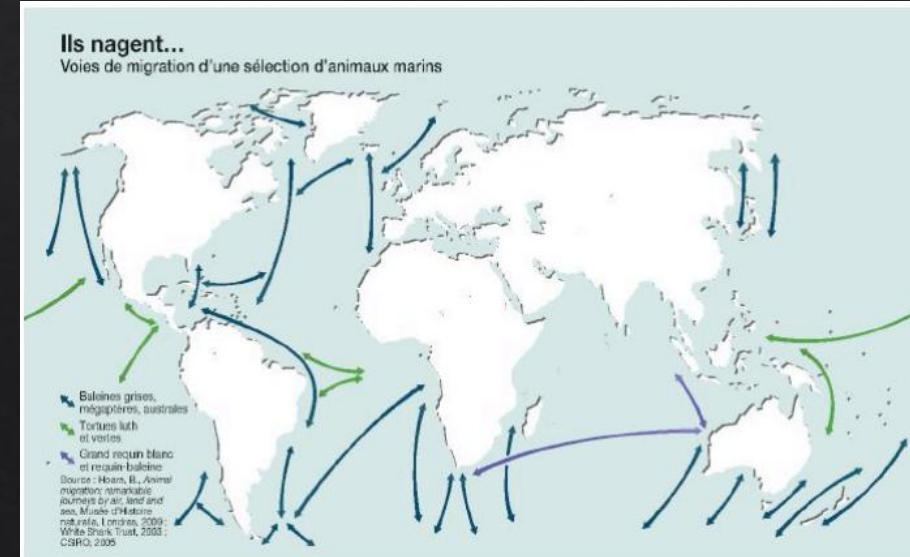
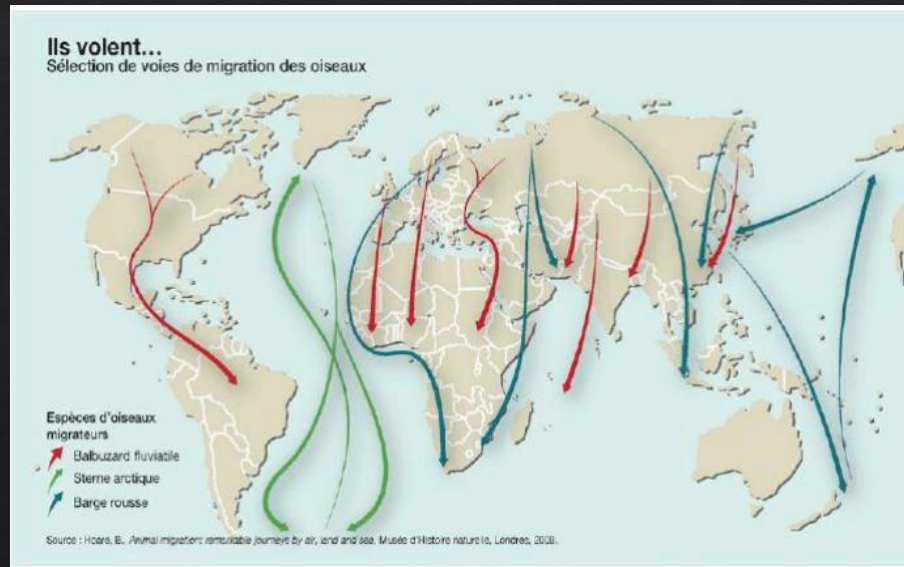
- ◆ Perturbations du réseau ferroviaire,
- ◆ Erosions et risques de fuite des pipelines (pétrole, gaz, ...),
- ◆ Dégradations des câbles continentaux et sous-marins de communication et/ou interruptions de service, ...



Risque fort au plan écologique et économique !

Les animaux migrateurs

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



Merci de votre attention

*« L'ardeur du Soleil fait mieux apprécier
d'être à l'ombre »*

Proverbe indien



Lionel BIREE
Ingénierie Consulting et Formation en SSA
Email : elios-space@outlook.fr
Internet : <http://elios.space>