



Relations TERRE SOLEIL METEOROLOGIE DE L'ESPACE approche historique

Christine Amoy-Mazaudier

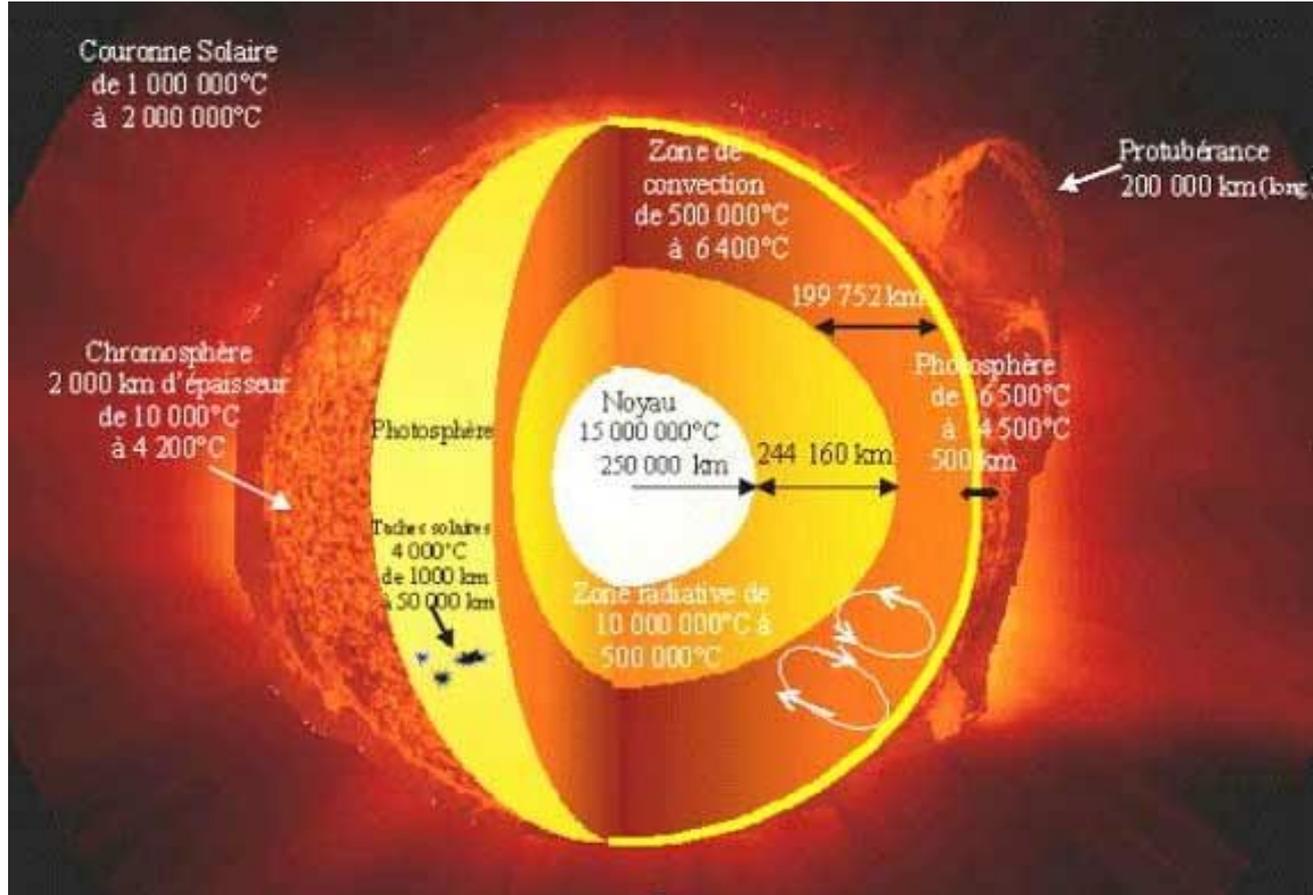
LPP, CNRS/Ecole Polytechnique/Sorbonne Université/Université Paris-Sud/Observatoire de Paris
christine.amory@lpp.polytechnique.fr

Atelier de travail GNSS, Rabat/Maroc 9-13 Mai 2022

- Plan

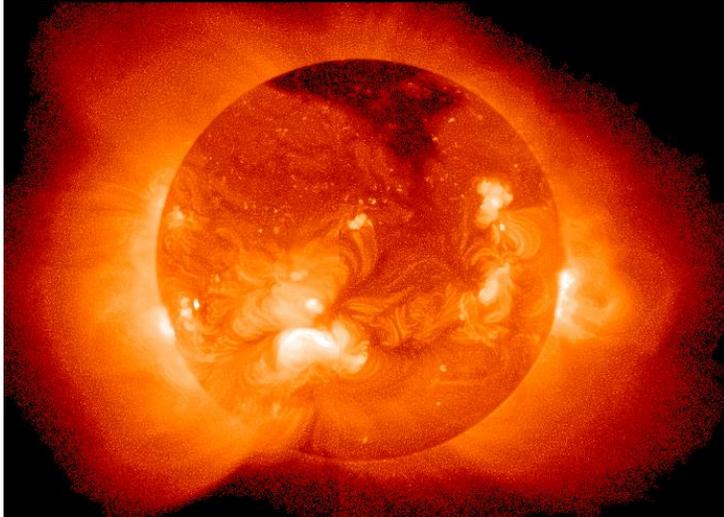
- Le soleil : corps magnétique en mouvement
- La terre: corps magnétique en mouvement
- Du soleil à la Terre
 - Émissions électromagnétiques
 - Régulières et perturbées
 - Vent solaire
 - Régulier
 - Perturbé par éjections de masse coronale ou vent solaire rapide issu des trous coronayx
- Vie de tous les jours

Notre étoile : Le soleil



L'énergie du Soleil est issue des réactions nucléaires qui se produisent au centre par fusion d'atomes d'hydrogène en hélium. La température moyenne de surface est de 5 770° K (Kelvin). Celle du coeur nucléaire est estimée à quinze millions de °K environ.

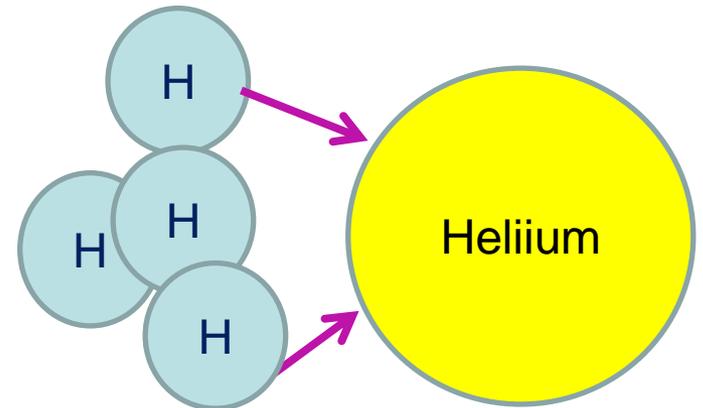
LE SOLEIL



C'est une gigantesque sphère de gaz chauds, principalement hydrogène et hélium, de 1 391994 Km de diamètre (soit près de 110 fois celui de la Terre) et d'une masse de $1,989 \cdot 10^{30}$ kg (soit 332 946 fois celle de la Terre).

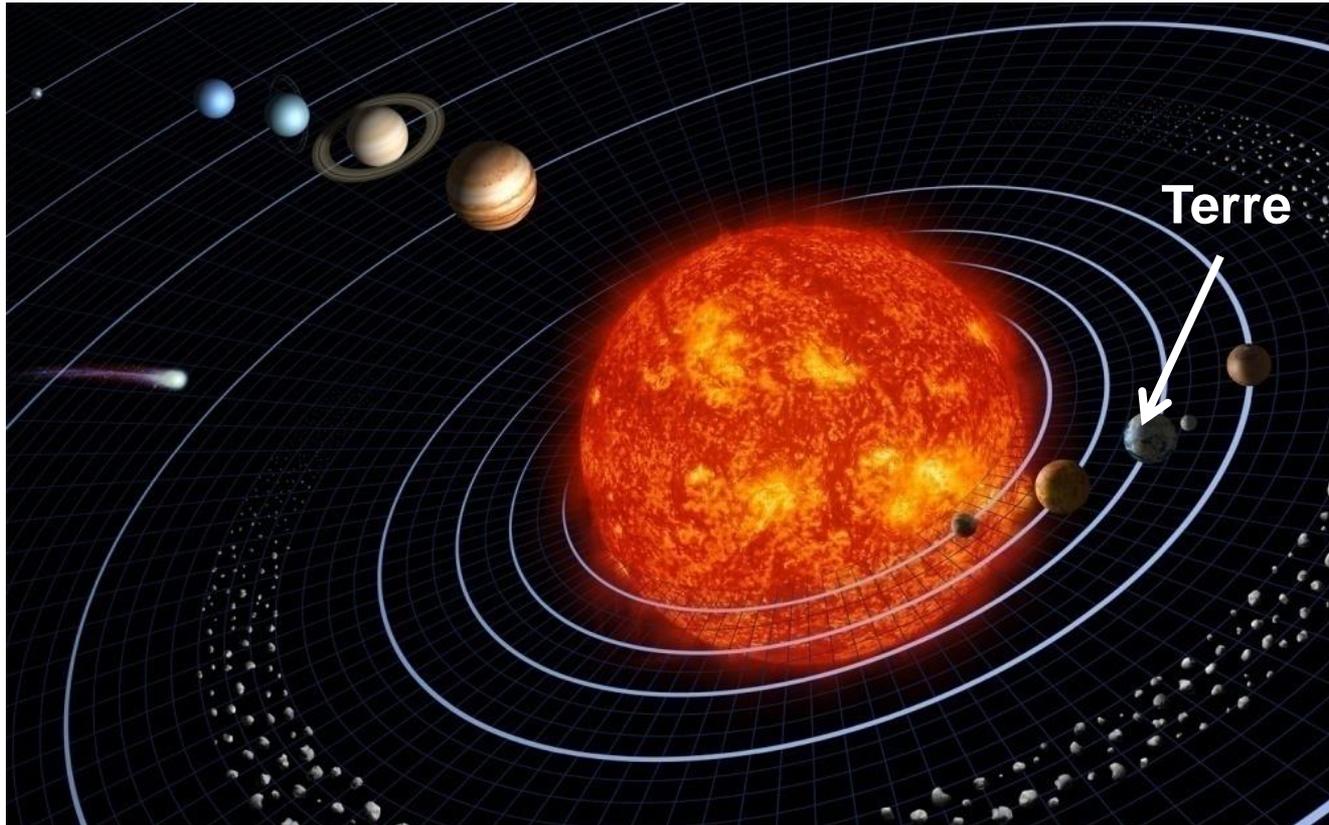
REACTION NUCLÉAIRE
Projet international ITER

Fusion # Fission



Fusion

Le soleil représente 99,85% de la masse du système solaire



Mercure, Venus, Terre, Mars, Jupiter, Saturne, Uranus, Neptune

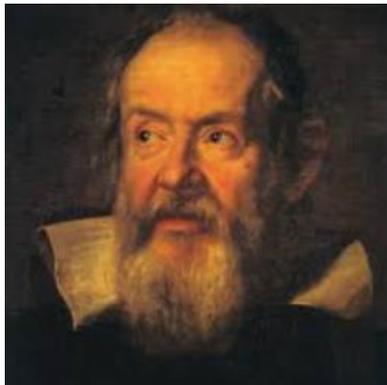
ASTRONOMIE

Lois de Kepler

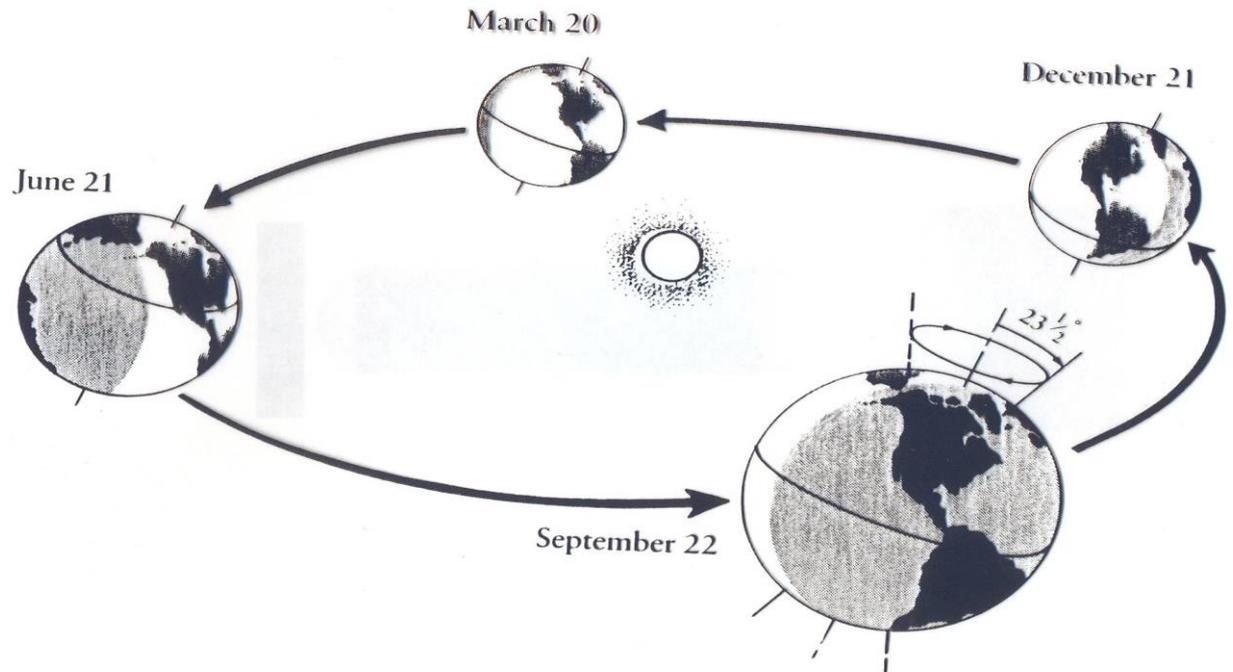
mouvements des planètes autour du soleil
Révolution /variabilité saisonnière



Johannes Kepler
[1571-1630]
Allemagne



Galileo
[1564-1642]
Italie



Mouvement de la planète sur elle-même
Rotation/variabilité diurne

Lois de Kepler/ force gravité

- Les lois de Kepler décrivent le mouvement des planètes autour du Soleil.
 - 1^{re} loi : Toute planète évolue autour du Soleil sur une orbite elliptique dont le centre du Soleil est l'un des foyers.
 - 2^e loi (« loi des aires ») : L'aire balayée par un segment joignant le Soleil et la planète étudiée est constante pendant une durée Δt donnée, indépendamment de la position de la planète sur son orbite.
 - 3^e loi (« loi des périodes ») : Le carré de la période T divisé par le cube du demi-grand axe de l'orbite a est une constante indépendante de la masse de la planète, et invariante d'une planète à l'autre.

Observation du soleil : les taches solaires



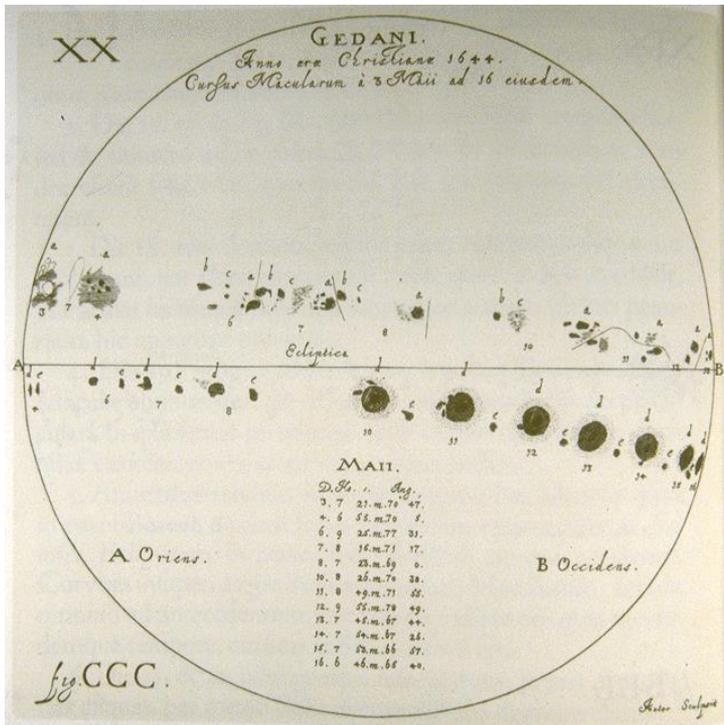
Hévelius
1642- 1644

- Observation du soleil par projection sur un écran de carton.
- Il disposait une lunette au travers d'une boule de bois insérée dans une ouverture circulaire pratiquée dans une persienne

(Machinae Celestis, 1673
Legrand et al., 1991)

Galileo
Premier télescope en 1609
Italie

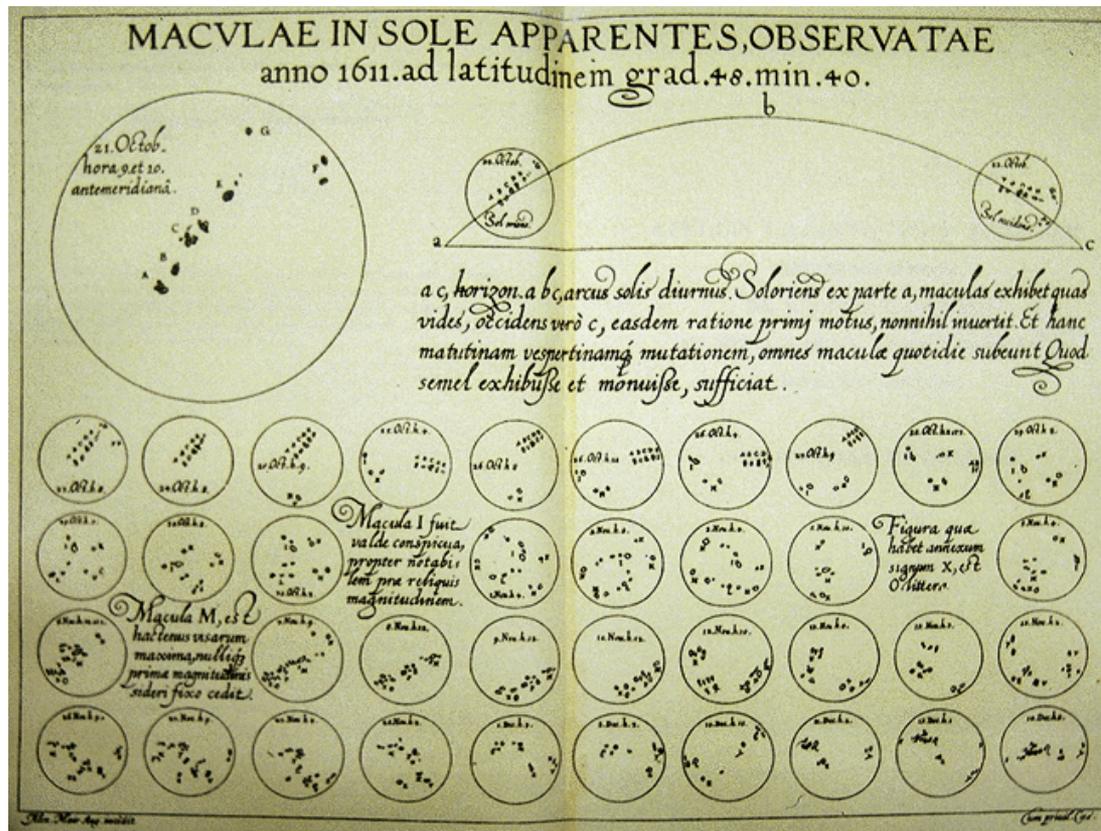
Observation du soleil : Dessin du Père Scheiner



Père Scheiner 1575-1650
Prêtre Jésuite qui travaillait à l'université
d'Ingolstadt Allemagne

Père Scheiner a été le premier à mettre en évidence la rotation du soleil et a remarqué que le soleil tournait plus vite à l'équateur qu'aux pôles. On considère que c'est lui qui a découvert la Vitesse différentielle du soleil ("Rosa Ursine sive solis", book 4, part 2, 1630)" wikipedia

Observation du soleil : cartes du Père Scheiner



Observations à la même époque par
Galileo, printemps 1611

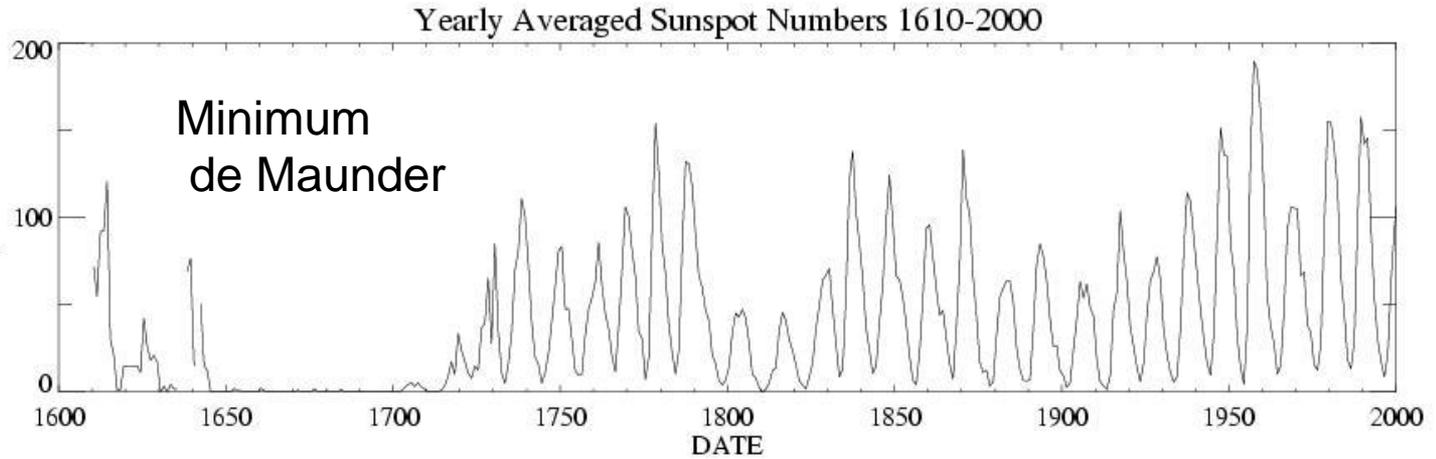
Christoph Scheiner, Octobre 1611

Johannes Fabricius première publication à l'automne 1611

SOLEIL : LE CYCLE DE TACHES



H.. Schwabe
[1789 -1875]
Allemagne

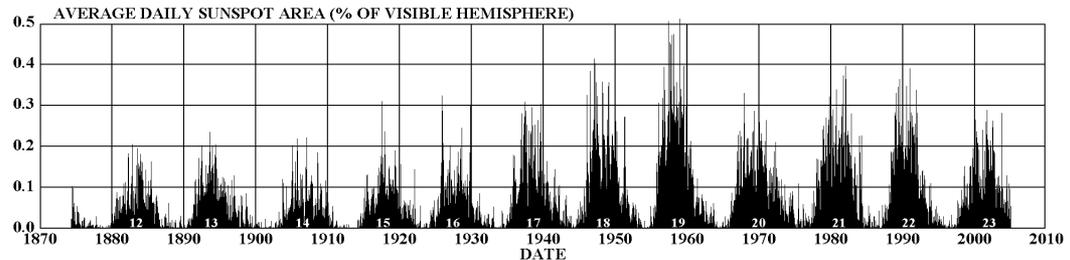
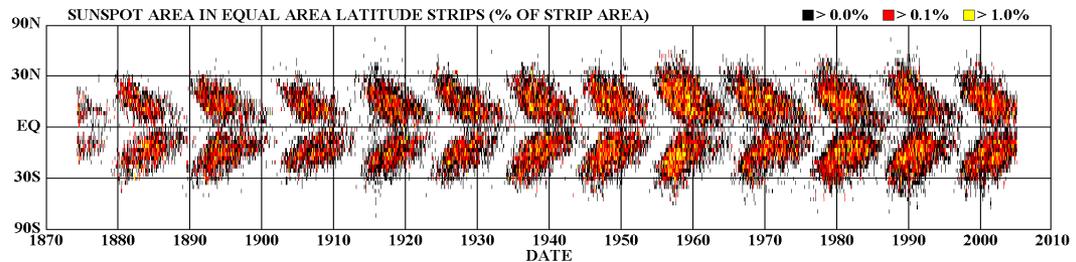


Cycle de Taches ~ 11 ans /H. Schwabe 1859



Photo du soleil
Satellite SOHO

DAILY SUNSPOT AREA AVERAGED OVER INDIVIDUAL SOLAR ROTATIONS



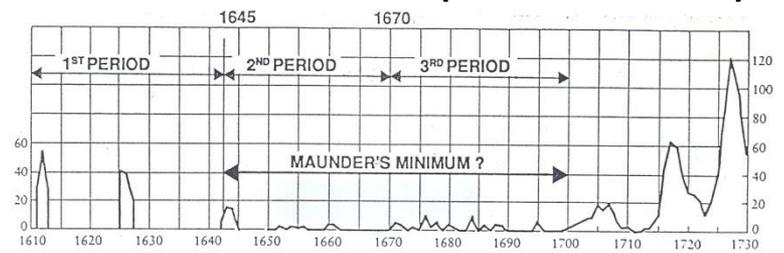
Evènement exceptionnel: petit âge glaciaire [Louis XIV] Taches solaires et climat

Les taches solaires suivent un cycle de 11 ans.
Au XVIIe siècle, de 1645 à 1715 (minimum de Maunder) il y avait très peu de taches solaires et la température a diminué de $\sim 1^\circ$



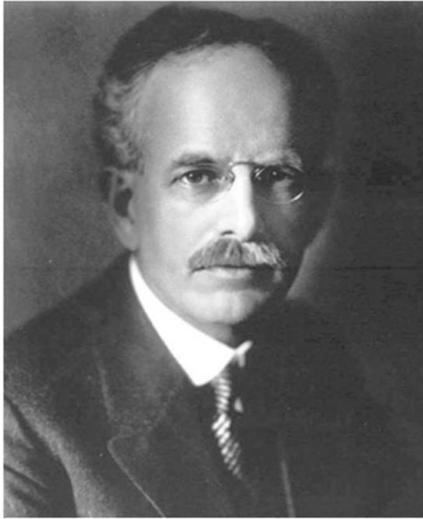
Louis Morin
(1635-1715)

Painting of Pieter Brueghel



Legrand J.P., M. Le Goff, C. Mazaudier, On the climatic changes and the sunspot activity during the XVIIth century, *Annales Geophysicae*, 8 (10), 637-644, 1990. [on Maunder Minimum]

Le Champ magnétique solaire



Georges Ellery HALE
[1868-1938]
USA

G. E. Hale a découvert qu'il y avait un champ magnétique dans les taches solaires.

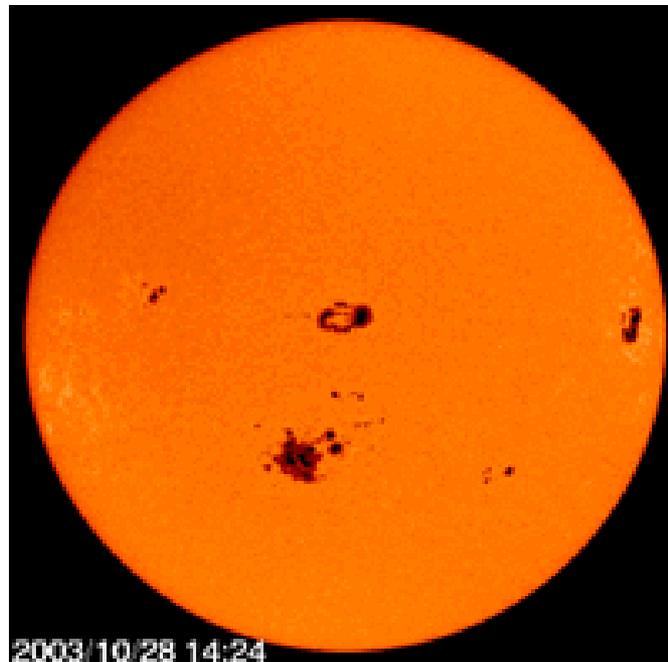
C'était la première détection d'un champ magnétique hors de la terre.

G. E a détecté ce champ magnétique grâce à l'effet Zeeman sur certaines raies spectrales du soleil.

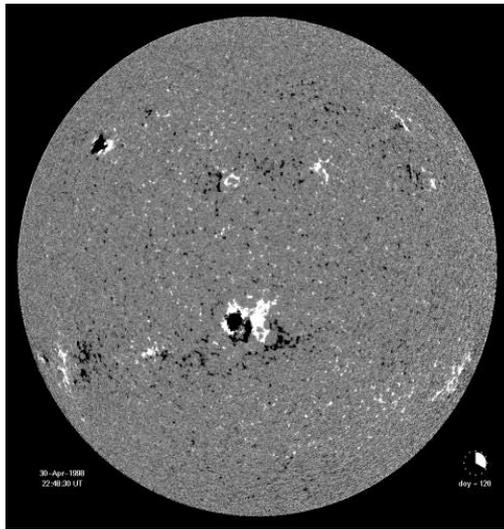
L'effet **Zeeman effect** est un **effect** qui sépare une raie spectrale du soleil en différentes composantes en présence d'un champ magnétique.

G. Hale et ses collègues ont aussi découvert que les taches solaires dans l'hémisphère nord et l'hémisphère sud changent de polarité toutes les 11 années => renversement du champ magnétique

Le Soleil tourne sur lui-même. La durée de rotation est d'environ 25,4 jours terriens. Cette rotation est différentielle, plus rapide à l'équateur (24,6 jours) qu'au voisinage des pôles (35 jours). Elle est en partie responsable du champ magnétique qui se dissipe en permanence à sa surface et produit les phénomènes d'activité solaire.



SOLEIL : Tache solaire?



Magnetogramme du soleil

Données satellite SOHO

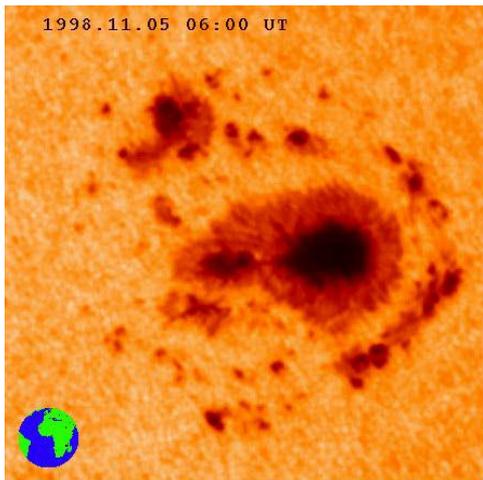
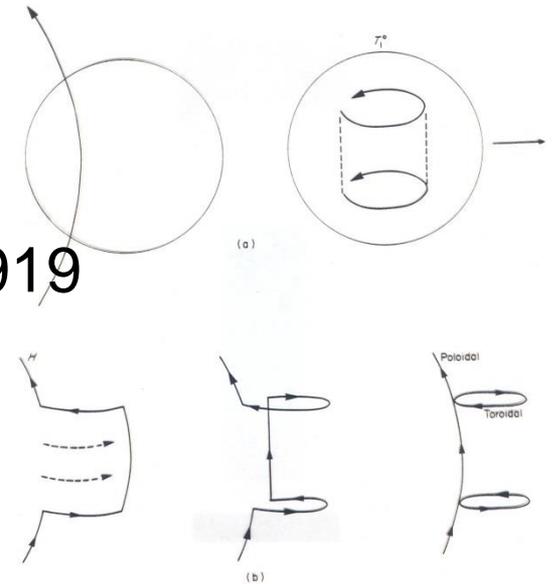


Figure de Friedman, 1987

Champ dipolaire
~ 10 G

Découvert par Hale 1919

Champ Toroïdal
Tache solaire
~ 3-5 kG



Processus physique : Dynamo

*Le soleil tourne sur lui-même.

**Sa vitesse de rotation est plus rapide à l'équateur qu'aux pôles (~ 25 jours contre ~ 35 jours).

***Cette rotation différentielle tord les lignes du champ magnétique poloidal et génère des boucles magnétiques appelées taches solaires

Une taches solaire ~ est un petit aimant

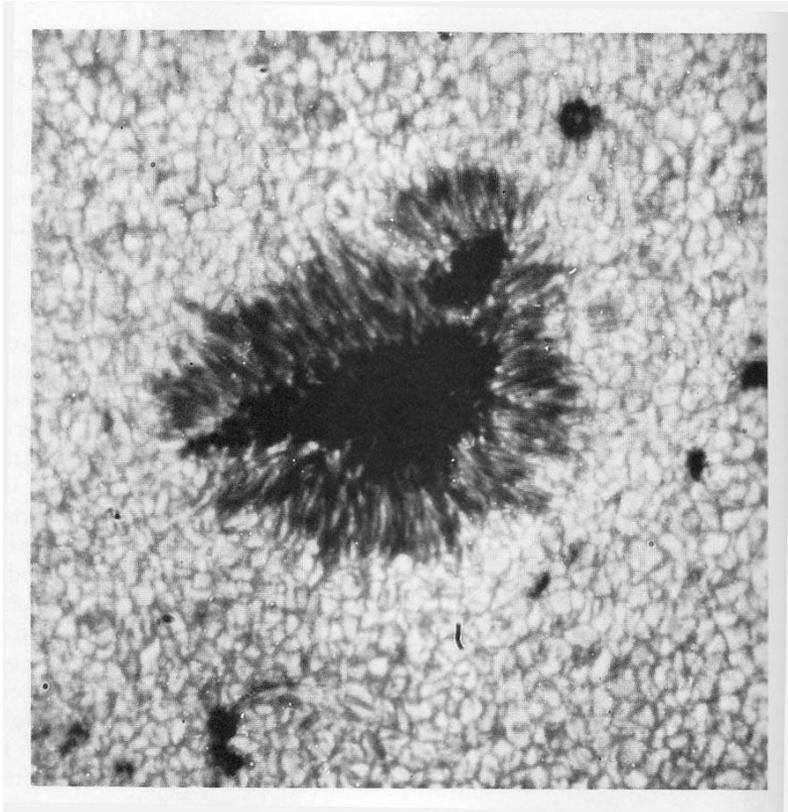
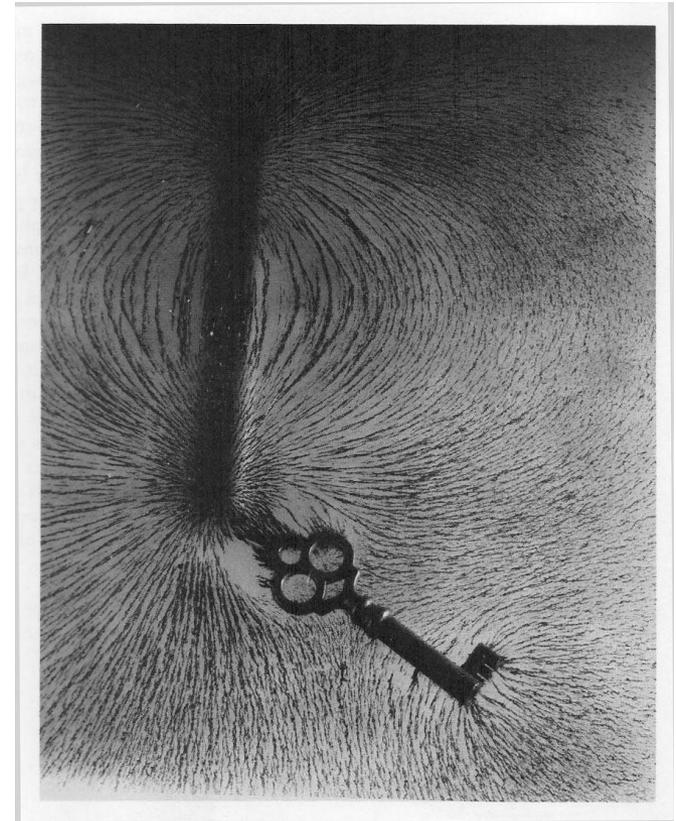


Photo d'une tache solaire
~ 3 fois ou plus la surface de la terre



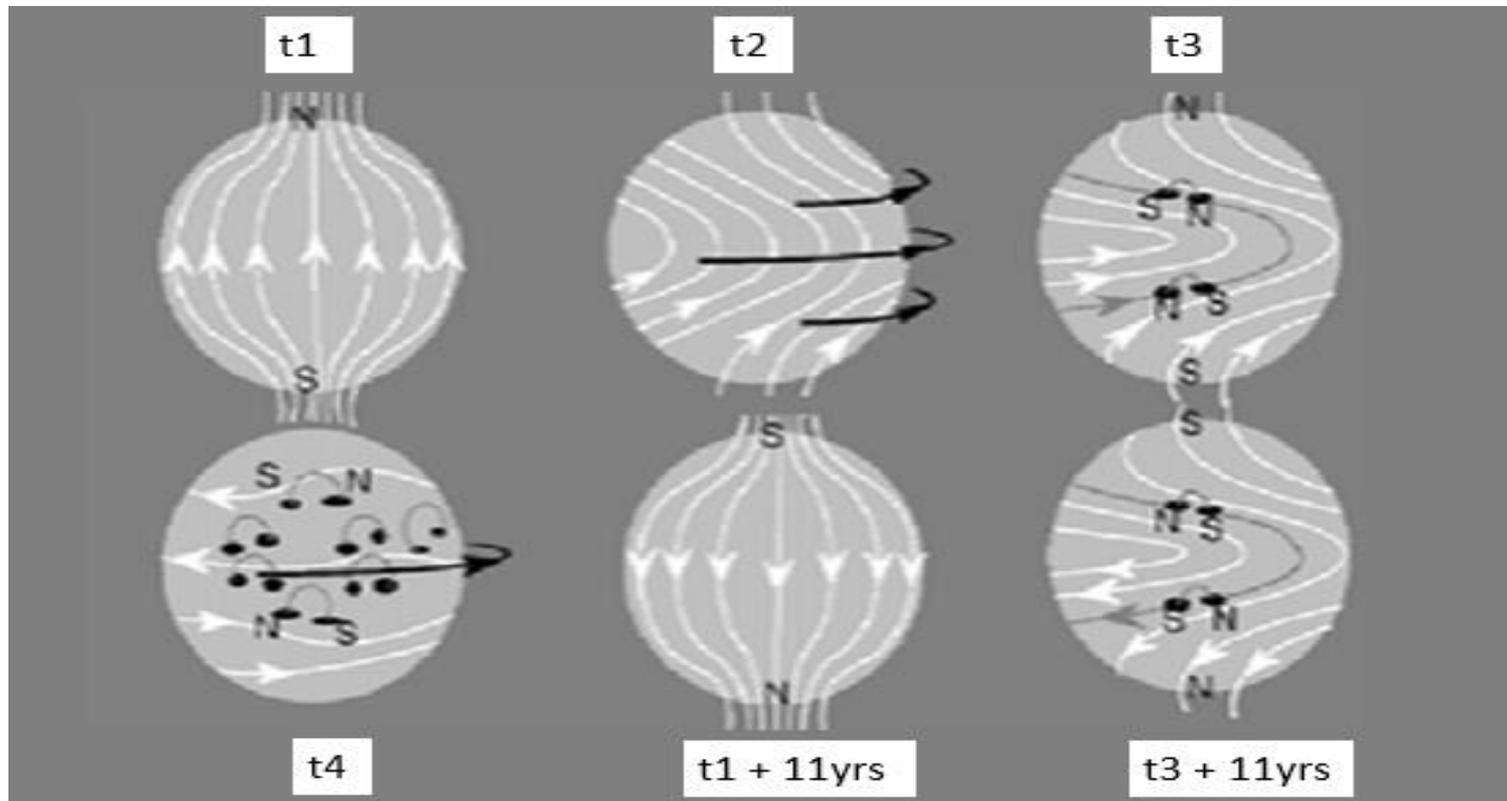
Clef en fer dans le champ d'un aimant

LE CYCLE SOLAIRE EST DE 22 ANS

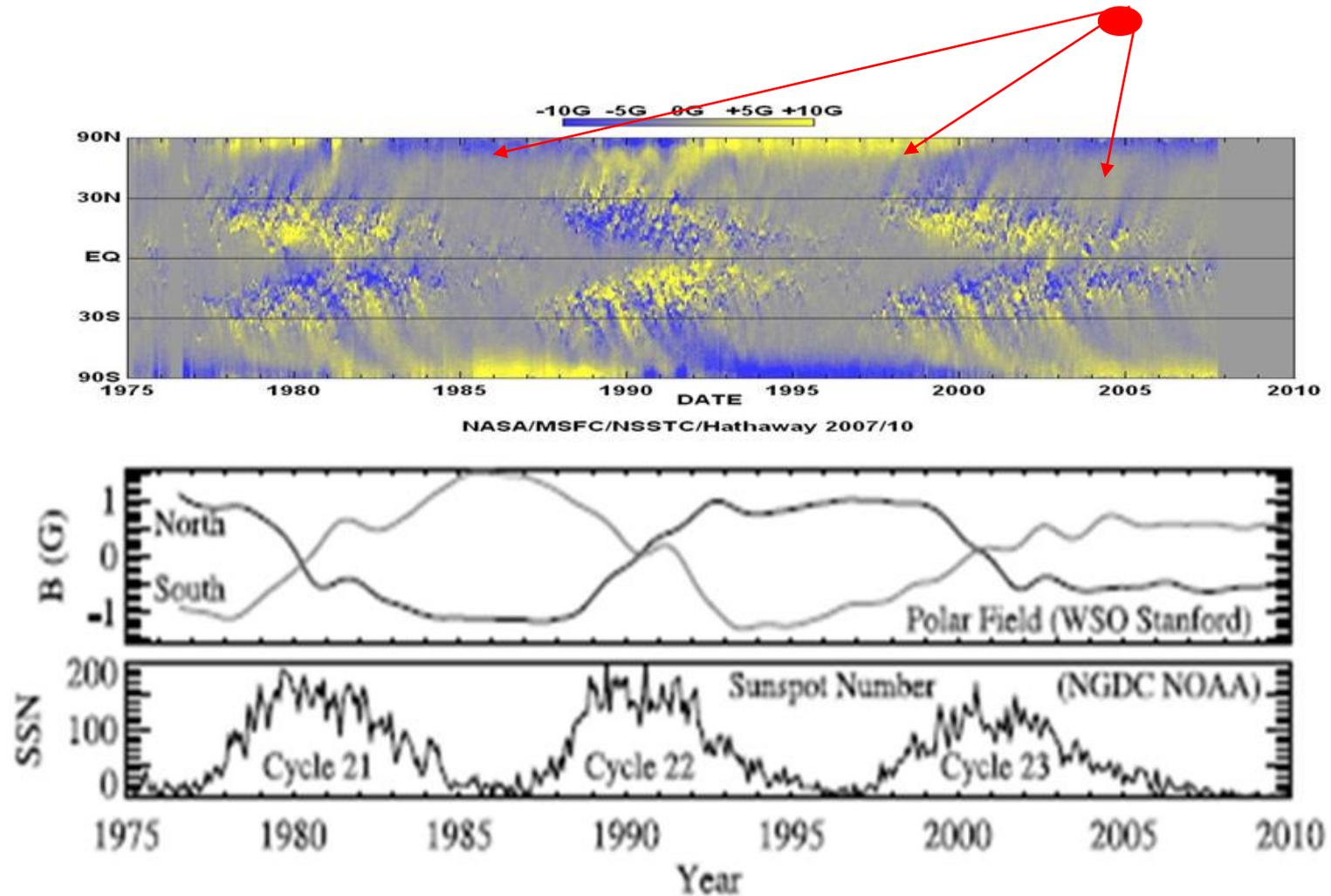
*Le champ magnétique polaire solaire s'inverse tous les 11 ans

**Le cycle du champ magnétique solaire toroïdal (tache solaire) est de 11 ans

***Les 2 composantes du cycle solaire magnétique sont anti corrélées



DYNAMO SOLAIRE: Observations

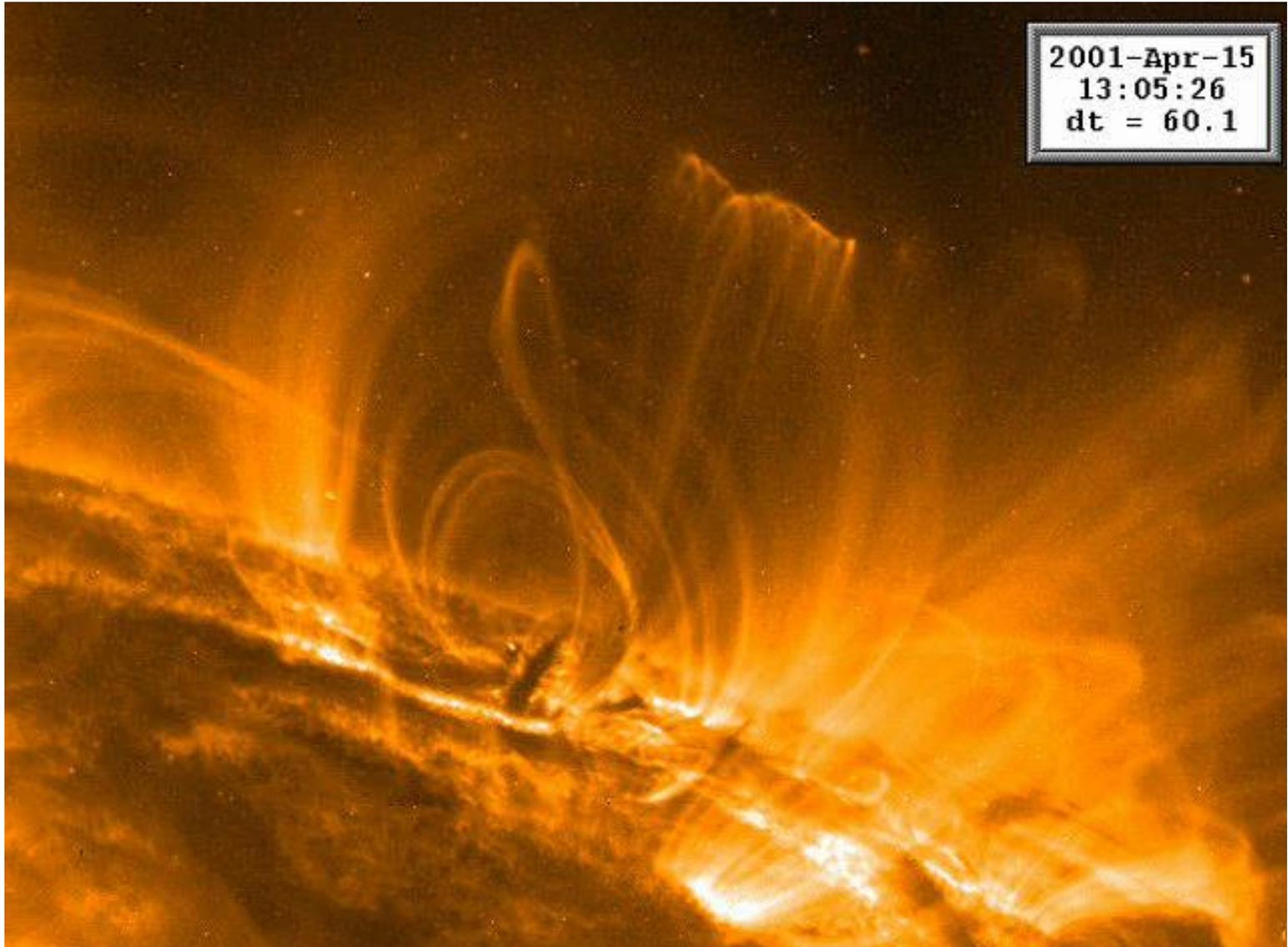


Variabilité ~ 11 and 22 years

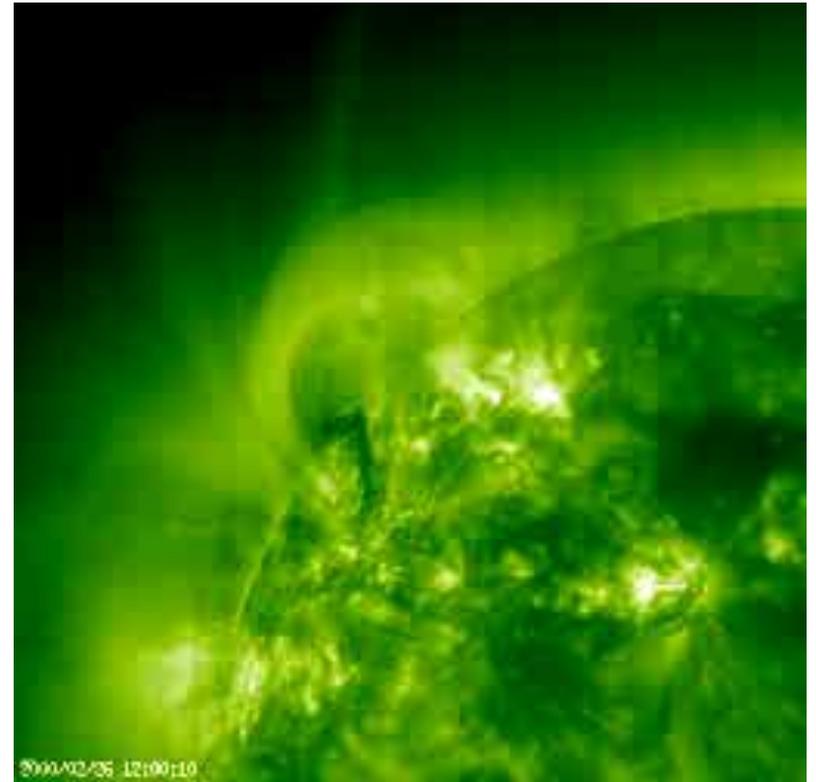
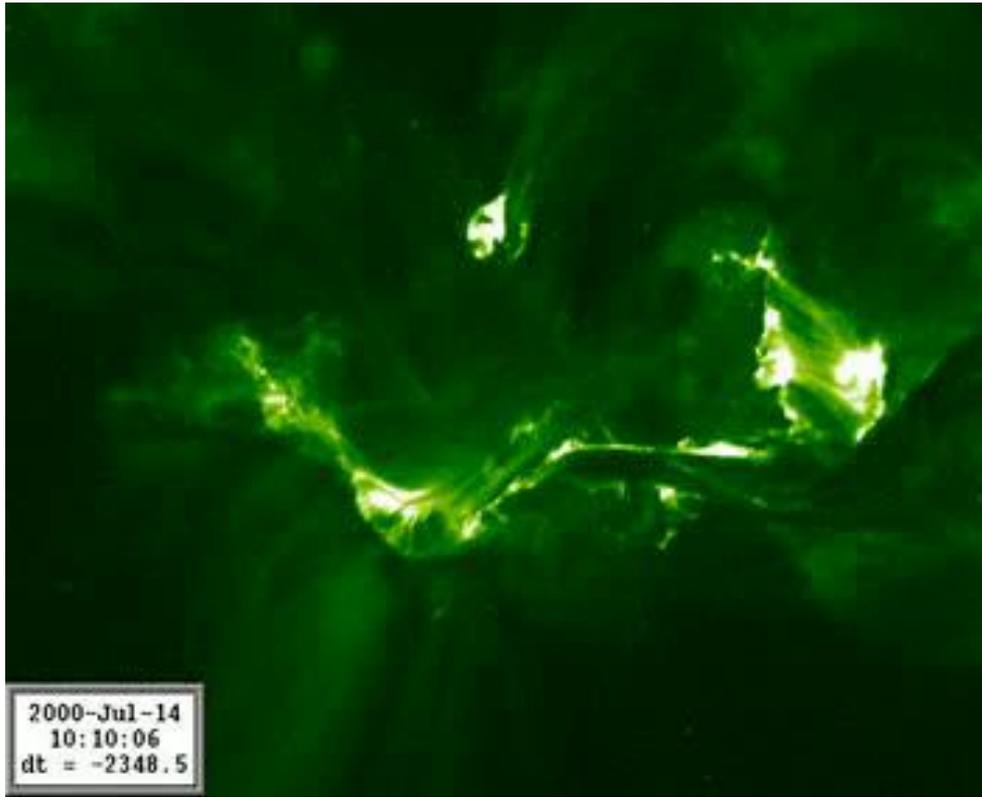
Liu et al., 2011

<http://solarscience.msf.nasa.gov/dynamo.shtml>

Protubérance solaire



Eruption solaire (Flare)



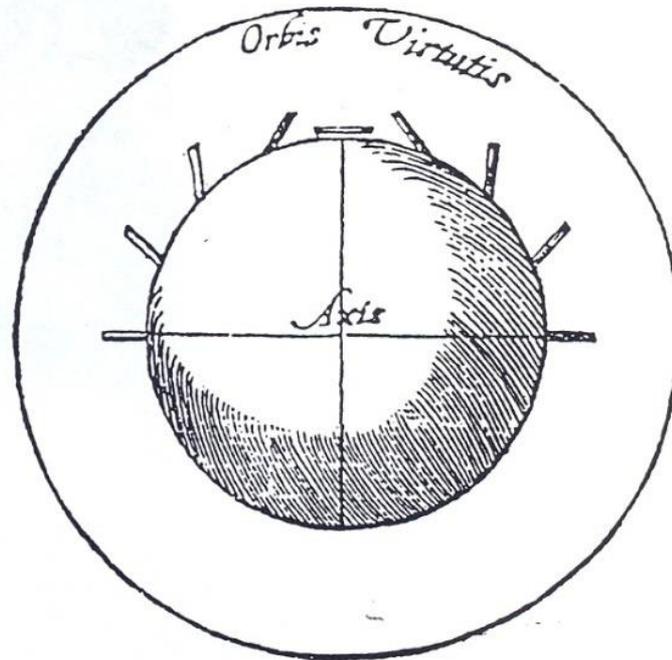
La Dynamo terrestre

CHAMP MAGNETIQUE TERRESTRE DYNAMO TERRESTRE

Le champ magnétique est connu depuis 2 millénaires (Chine)
Boussole des navigateurs

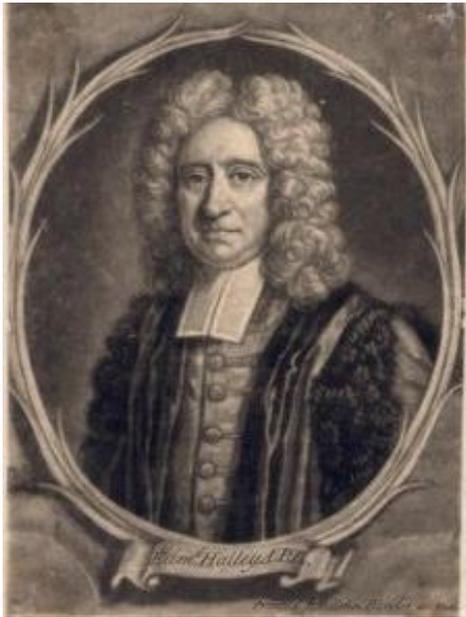


[1544–1603]
Angleterre

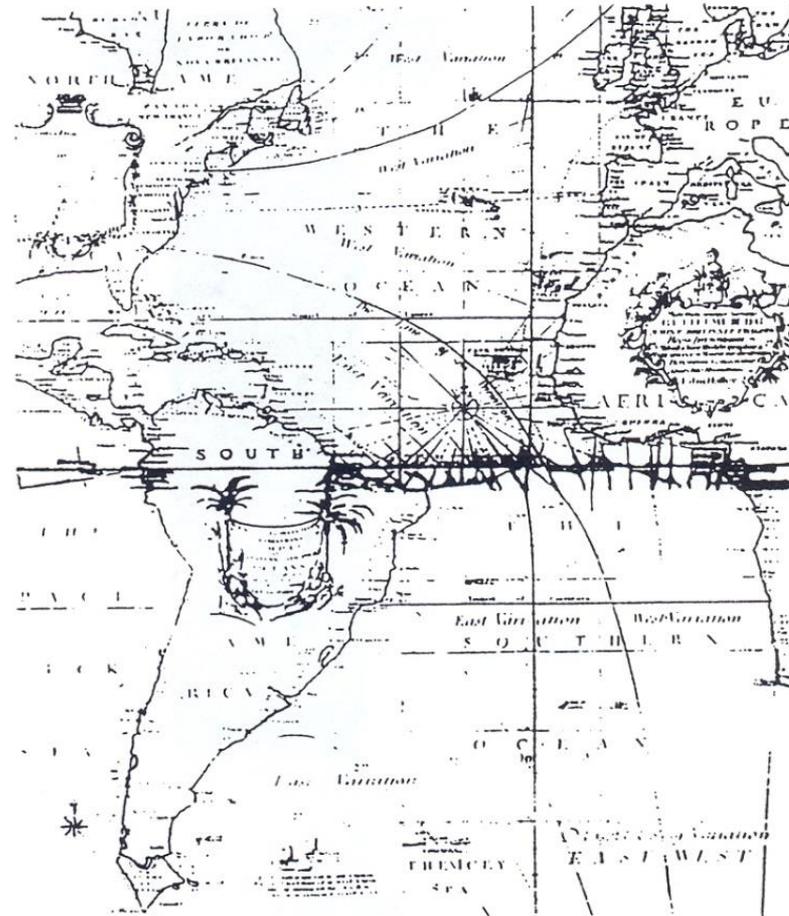


W. Gilbert, 1600
Concept d'un aimant au centre
de la terre

Première carte du champ magnétique terrestre par Halley en 1701

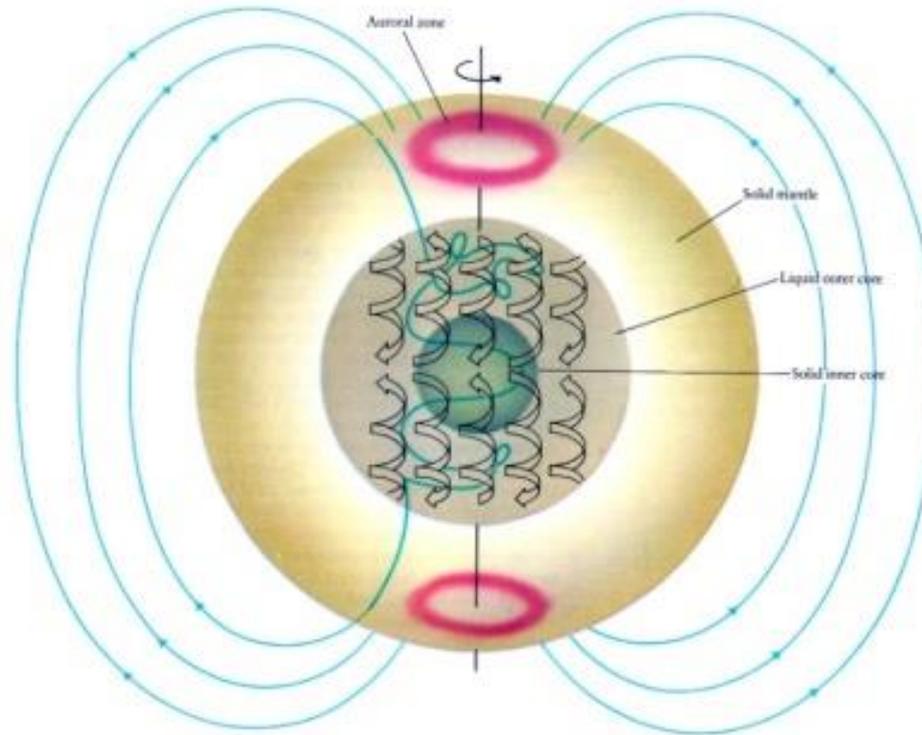


Halley
[1656- 1741]
Angleterre



La DYNAMO TERRESTRE

Champ principal dipolaire

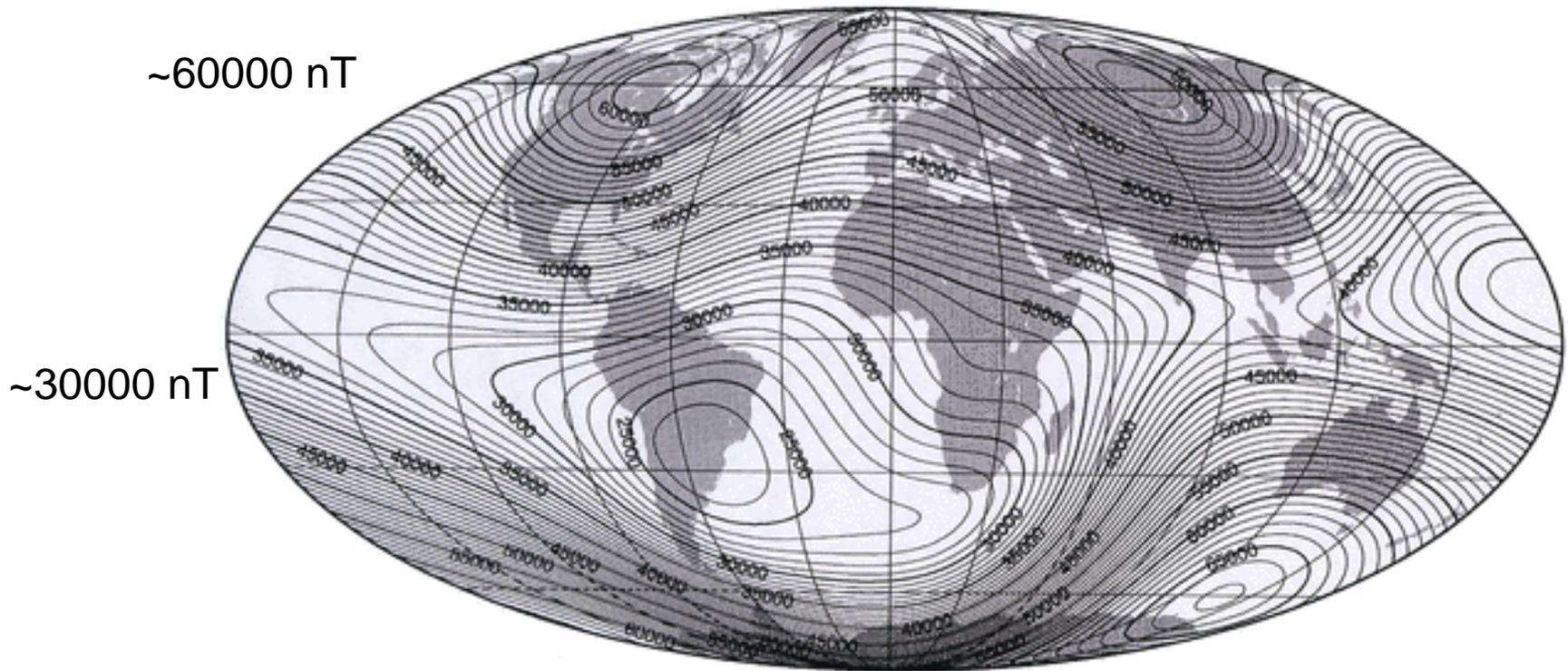


Production du champ magnétique par le mouvement du noyau au centre de la terre. (métal en fusion)

Carte de l'intensité du champ magnétique terrestre en Nano Tesla nT

IGRF : modèle de champ magnétique terrestre

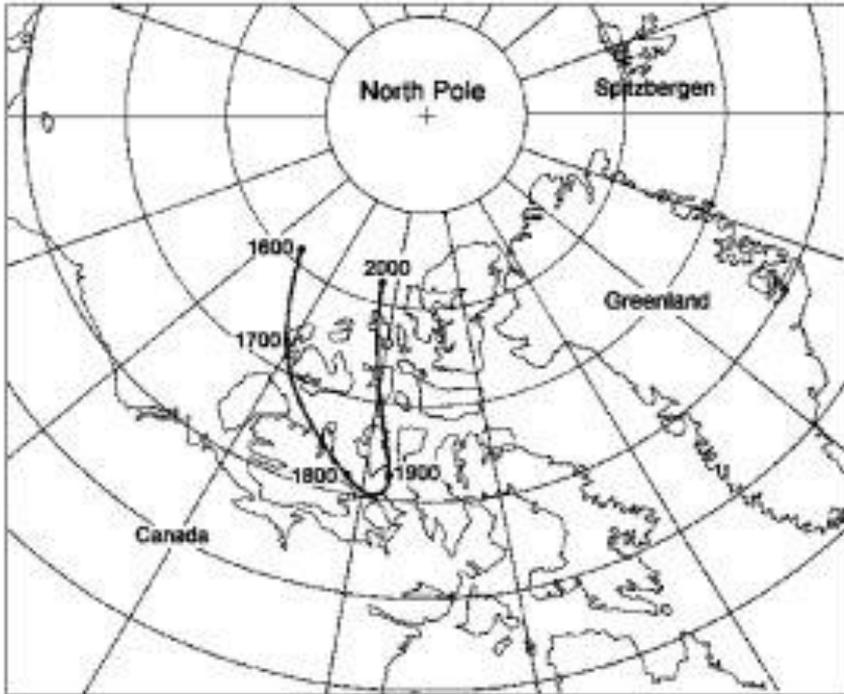
http://www.iugg.org/IAGA/iaga_pages/pubs_prods/igrf.htm



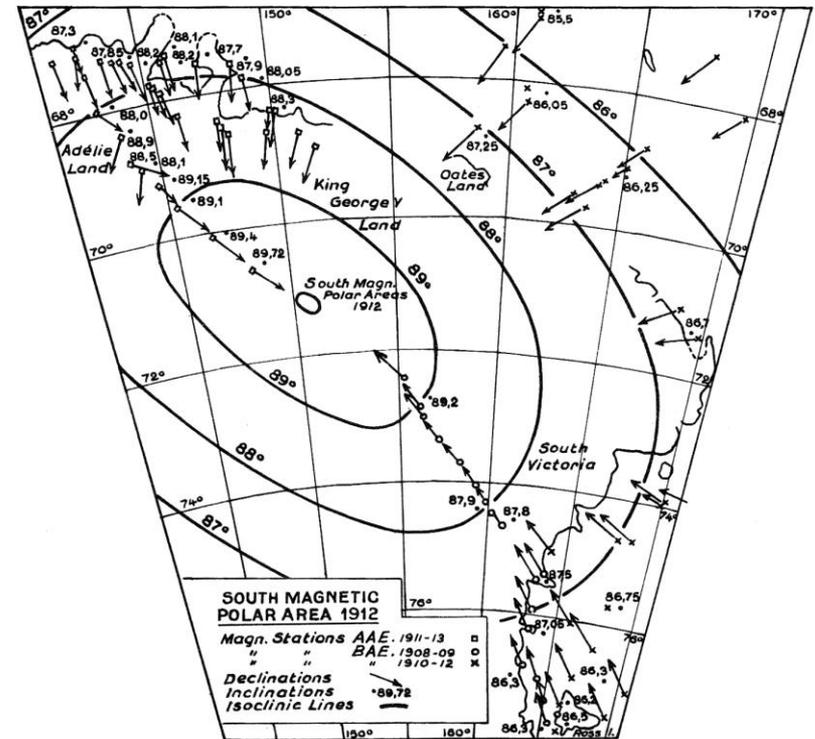
L'intensité ou les intensités horizontale ou verticale du champ magnétique sont exprimées en Teslas, en Gauss (1 Gauss = 10^{-4} Tesla) ou encore en gammas (1 gamma = 1 nano Tesla = 10^{-9} Tesla).

[Les composantes du champ magnétique - Musée de Sismologie et collections de Géophysique - Université de Strasbourg \(unistra.fr\)](http://www.unistra.fr/musee-sismologie/collections-geophysique)

Les pôles magnétiques se déplacent

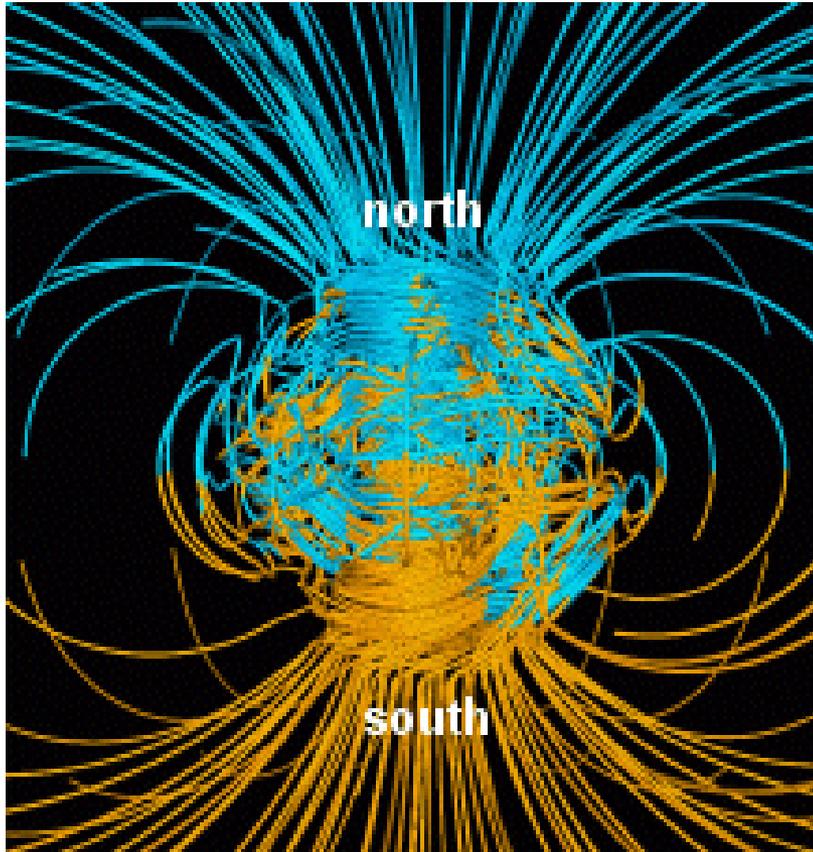


Mouvement du Pôle magnétique nord
Depuis 1600

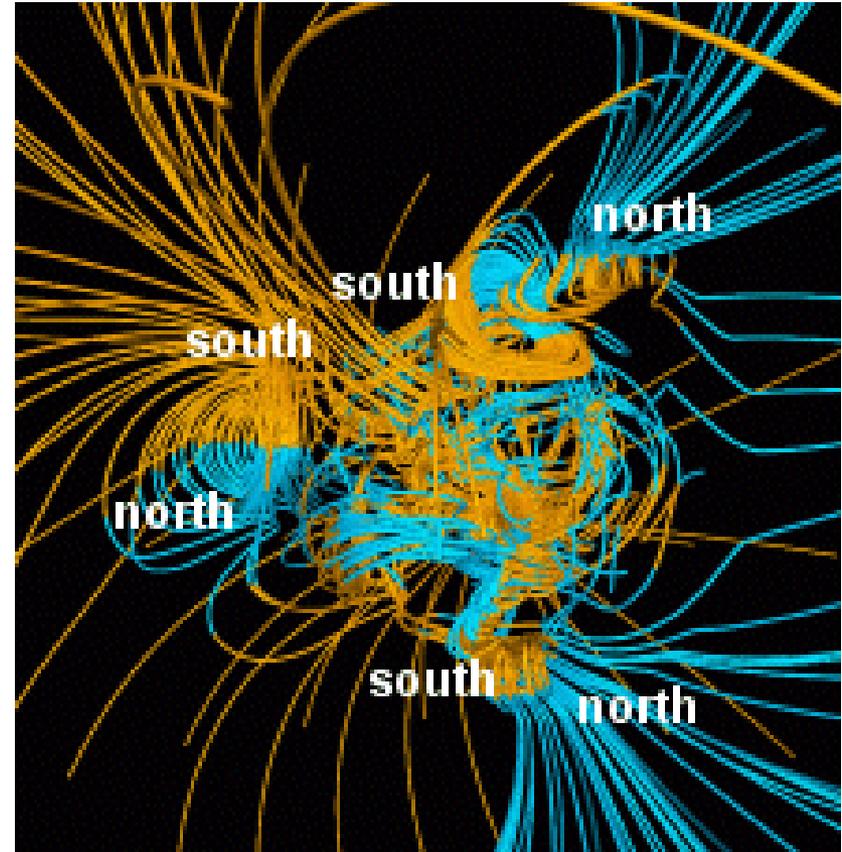


Pôle magnétique sud en 1912 (WEBB)

Le Champ magnétique terrestre renversement tous \sim qq 100 000 ans

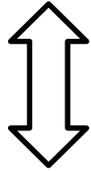


Entre deux renversements



durant un renversement

METEOROLOGIE DE L'ESPACE

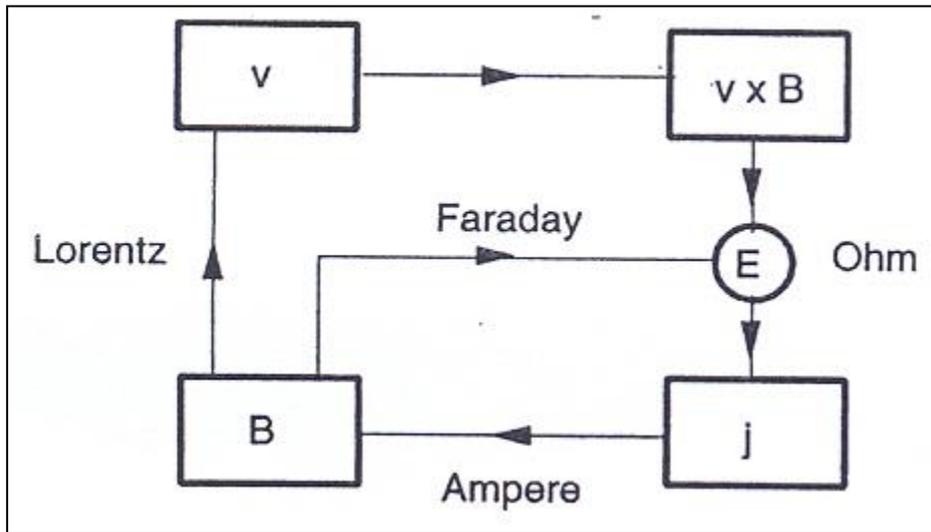
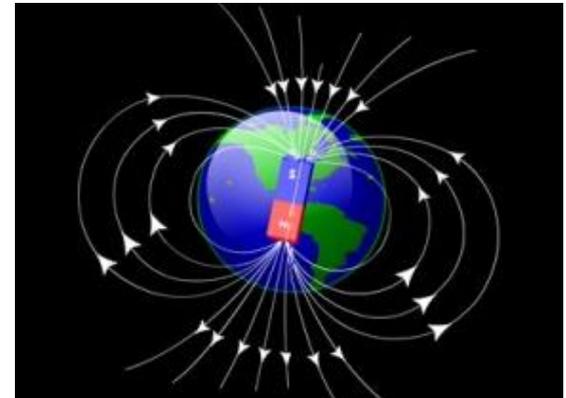


FORCE ELECTROMAGNETIQUE

Le soleil est un corps magnétique en mouvement

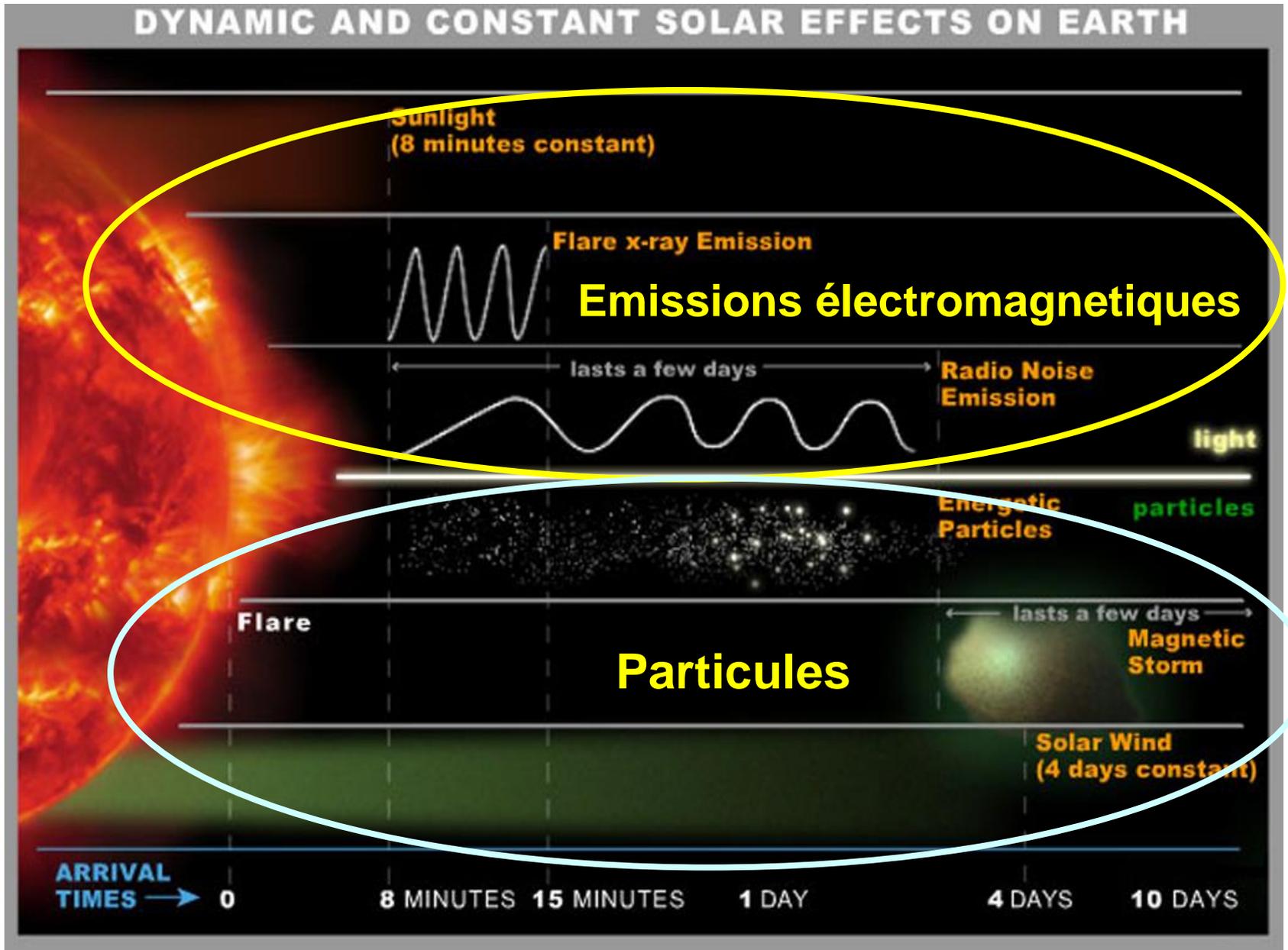


La Terre est un corps magnétique en mouvement



EQUATIONS

DU SOLEIL VERS LA TERRE



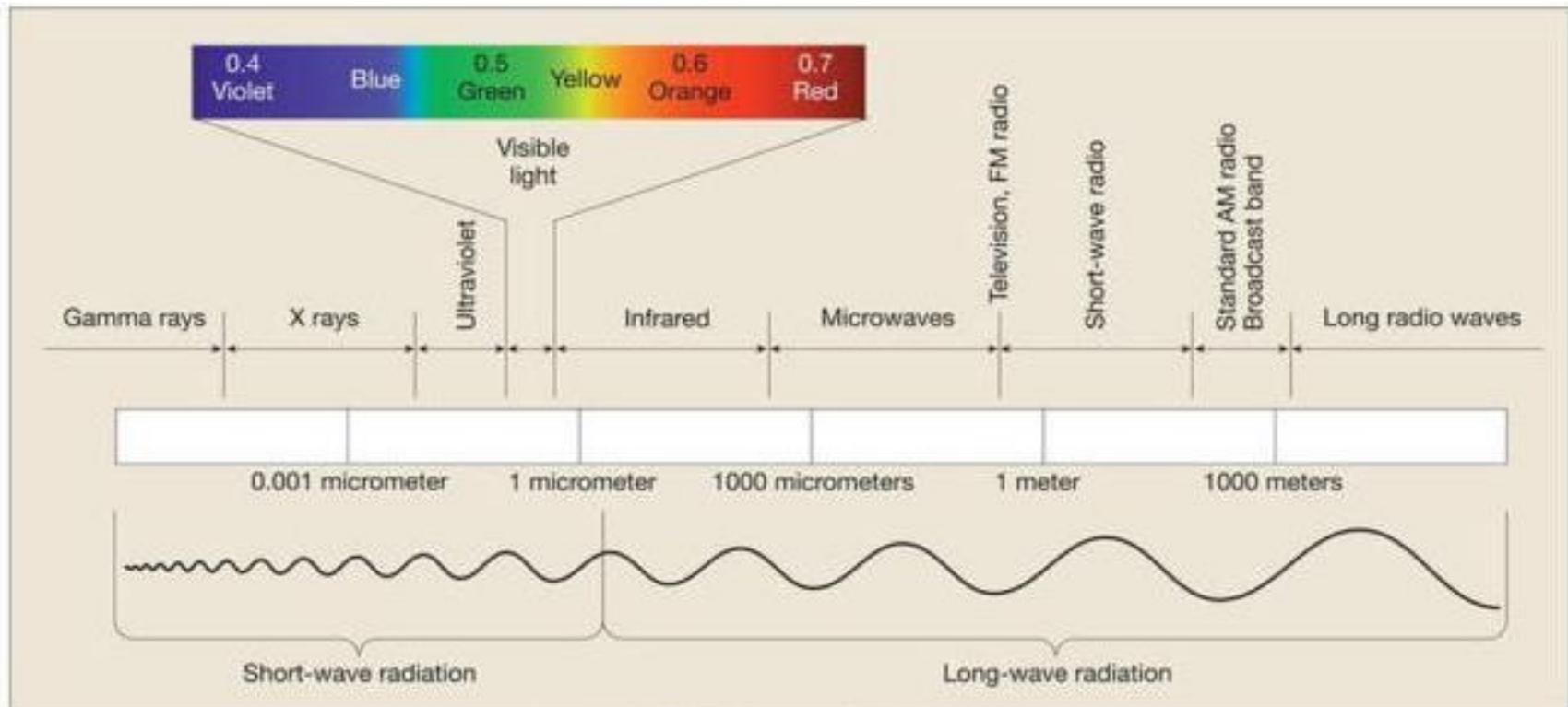
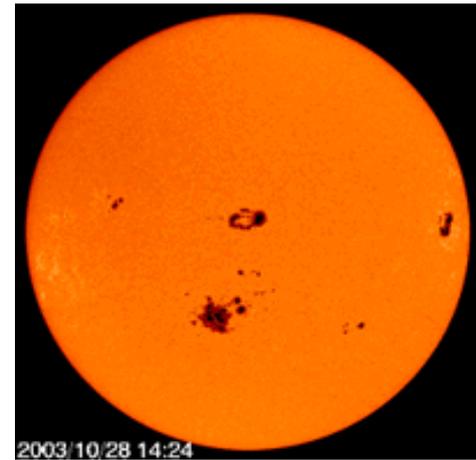
Emissions électromagnétiques [8']

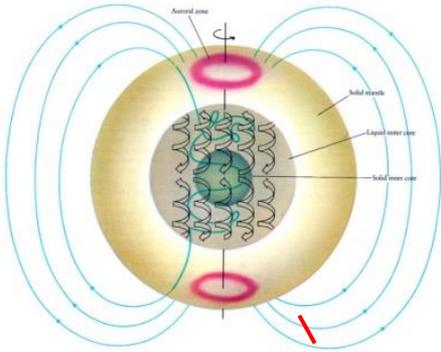
*Régulière

**perturbée

Éruption solaires: extra rayons X et EUV

Sursauts solaires : extra émission d'ondes radio





VENT SOLAIRE - PARTICULE [1-4 jours]

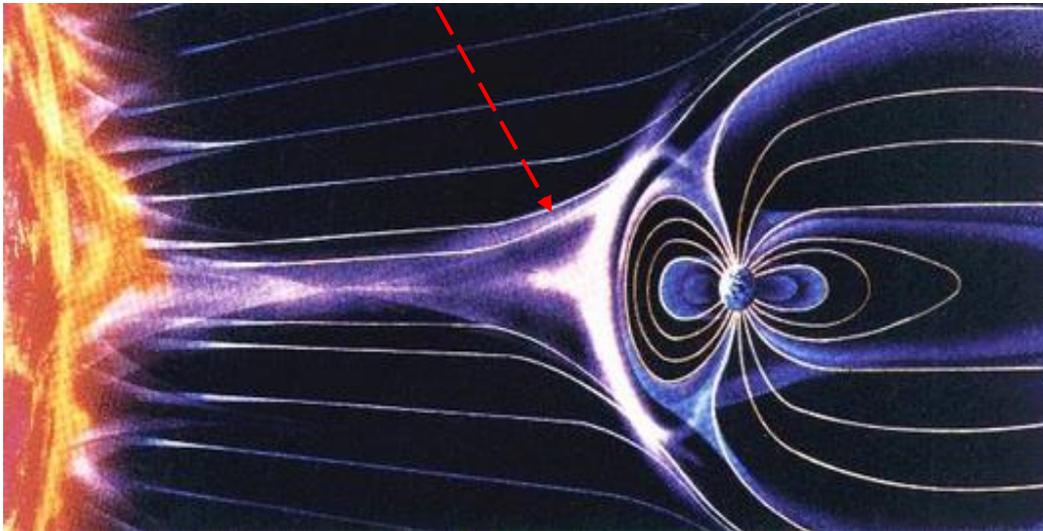
*Régulier

**Perturbé

Ejection de masse coronale

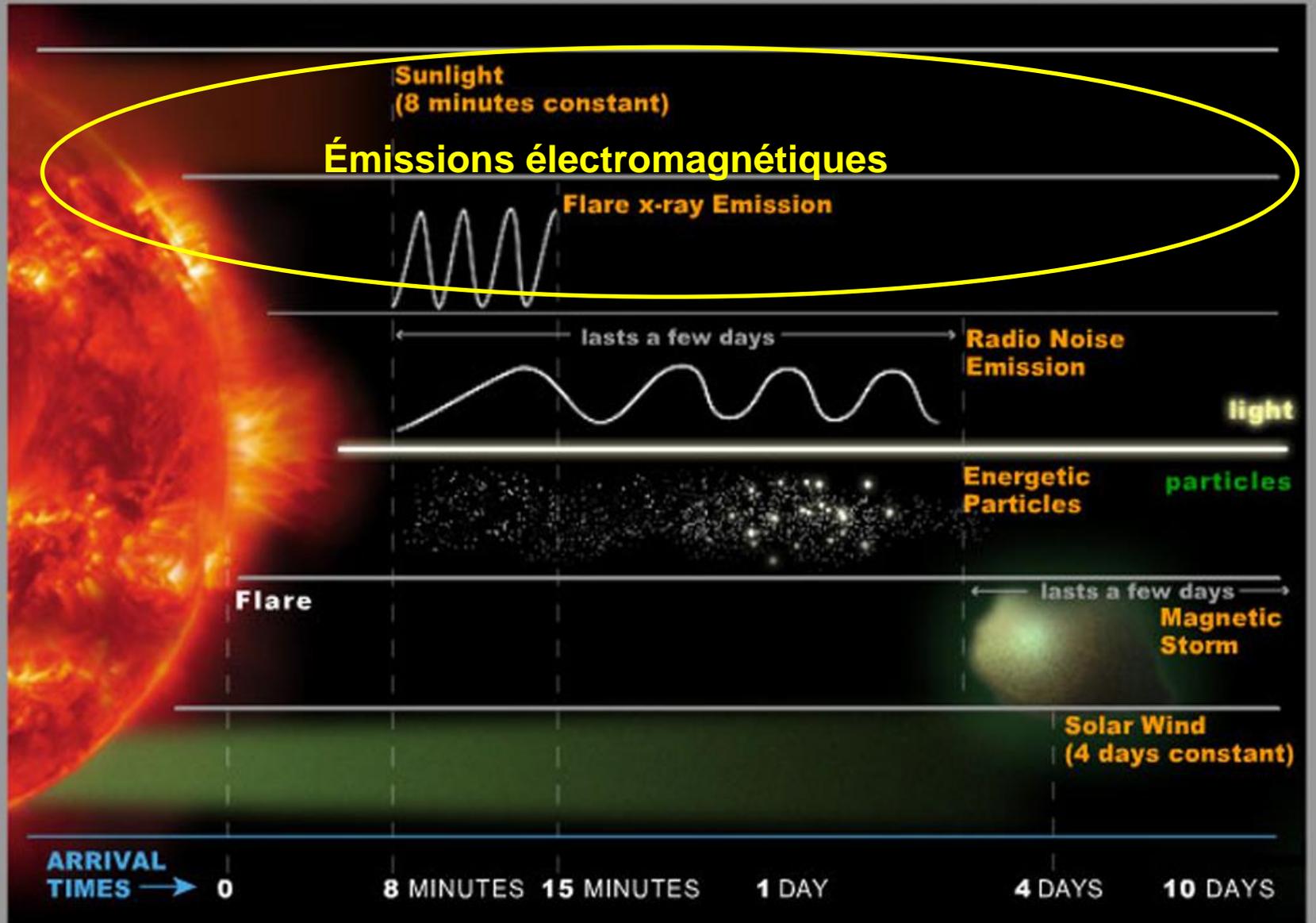
Vent rapide venant des trous coronaux

Le vent solaire est un flot de particules principalement des électrons et des protons et certains ions lourds . Vitesse 350 à plus de 1000 km/s . Le vent solaire comprime la Magnétosphère à l' avant et l' étire à l' arrière



La magnétosphère nous protège des particules énergétiques (vent solaire)

DYNAMIC AND CONSTANT SOLAR EFFECTS ON EARTH

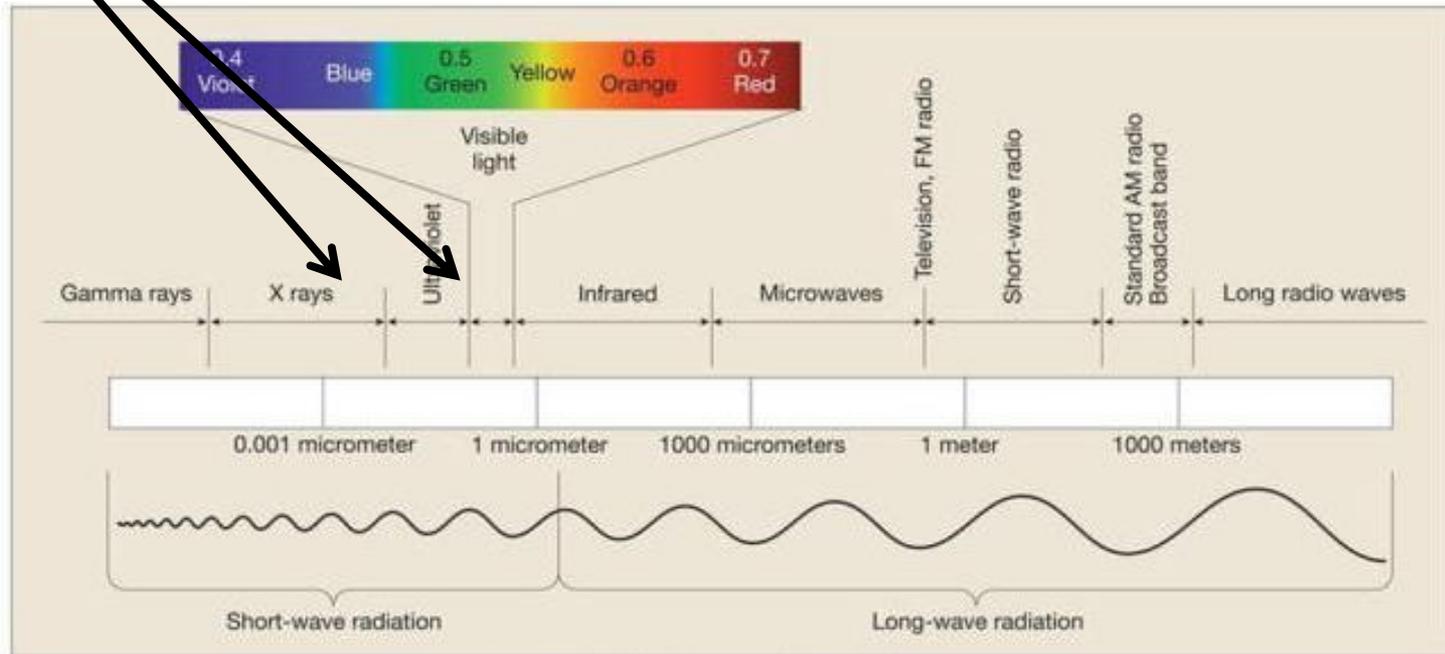


SOLEIL : Emissions électromagnétiques Régulières / vitesse de la lumière

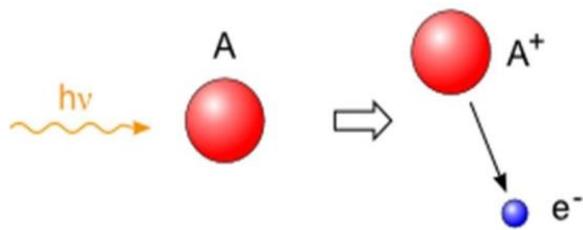
Autour des taches => émissions of EUV, UV, X rays



2003/10/28 14:24



Copyright © 2007 Pearson Prentice Hall, Inc.



SOLEIL-TERRE

Ionosphere ↔ émissions électromagnétiques régulières

Processus physique : La photo ionisation

L'ionosphère est créée par l'ionisation de l'atmosphère par les émissions UV, EUV and X radiations aux altitudes entre 50 km et au dessus ~800 km

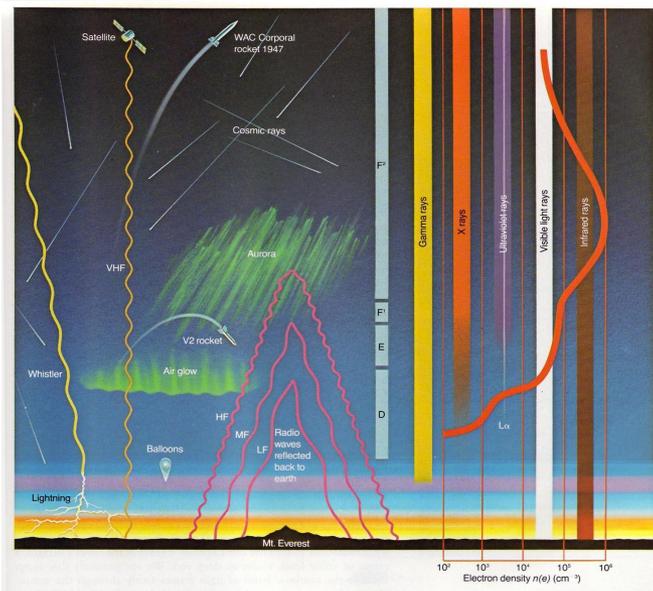
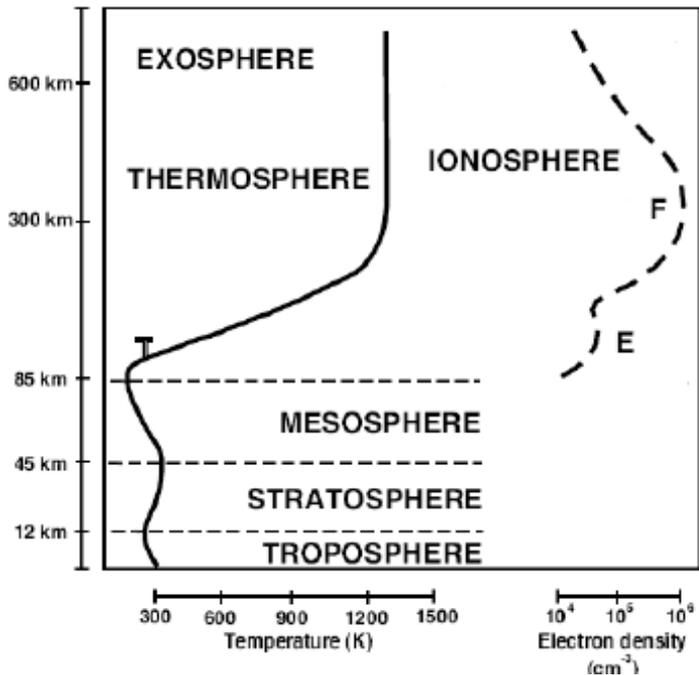


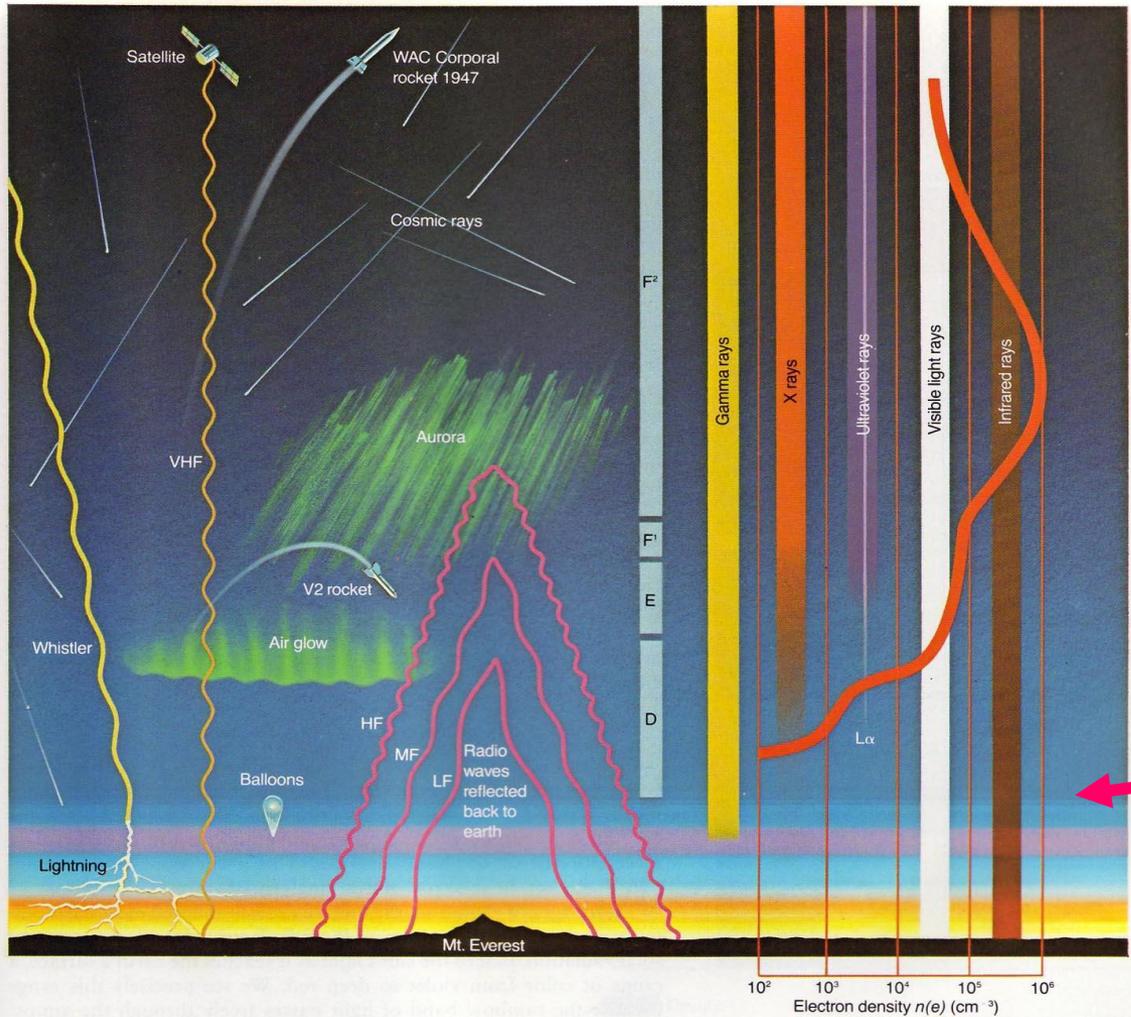
Figure de Friedman, 1987



L'ionosphère est la partie ionisée de l'atmosphère
1 atome parmi 1 000 000

Livres : Risbeth and Gariott, 1969
Friedman, 1987, Kelley, 2009

Les radiations solaires dangereuses sont absorbées par les couches atmosphériques

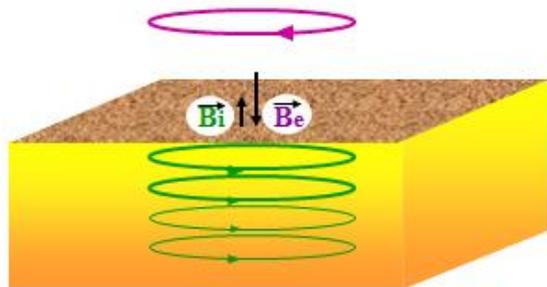


Les rayonnements UV et X ionisent l'atmosphère et créent l'ionosphère

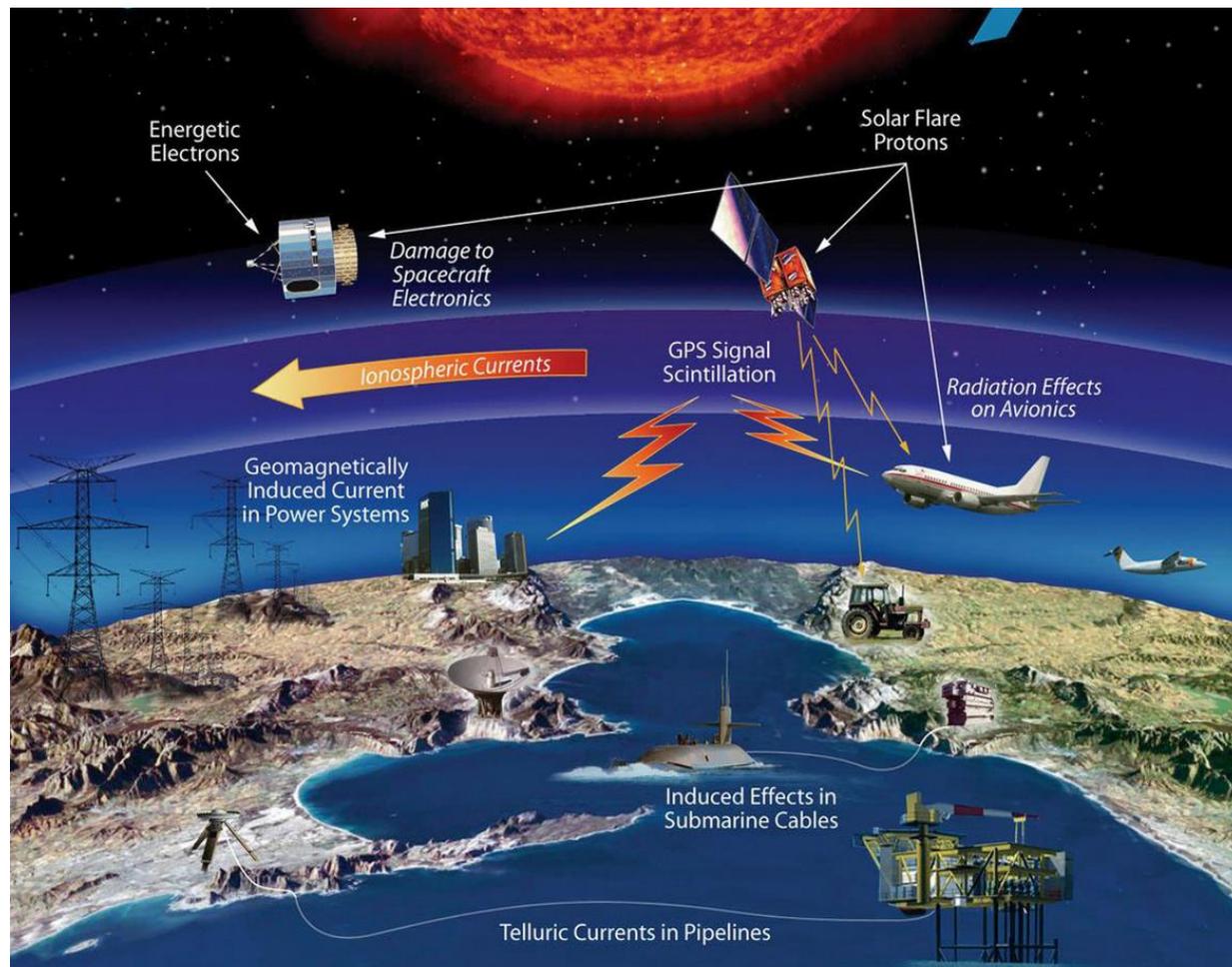
Absorption du rayonnement UV et X par la couche d'ozone (40-50 km)

Seuls les rayonnements visible et infra rouge arrivent au sol

L'ionosphère est aussi une dynamo, le mouvement de l'atmosphère neutre est converti en courant électrique qui produit des variations du champ magnétique terrestre et des courants induits dans le sol

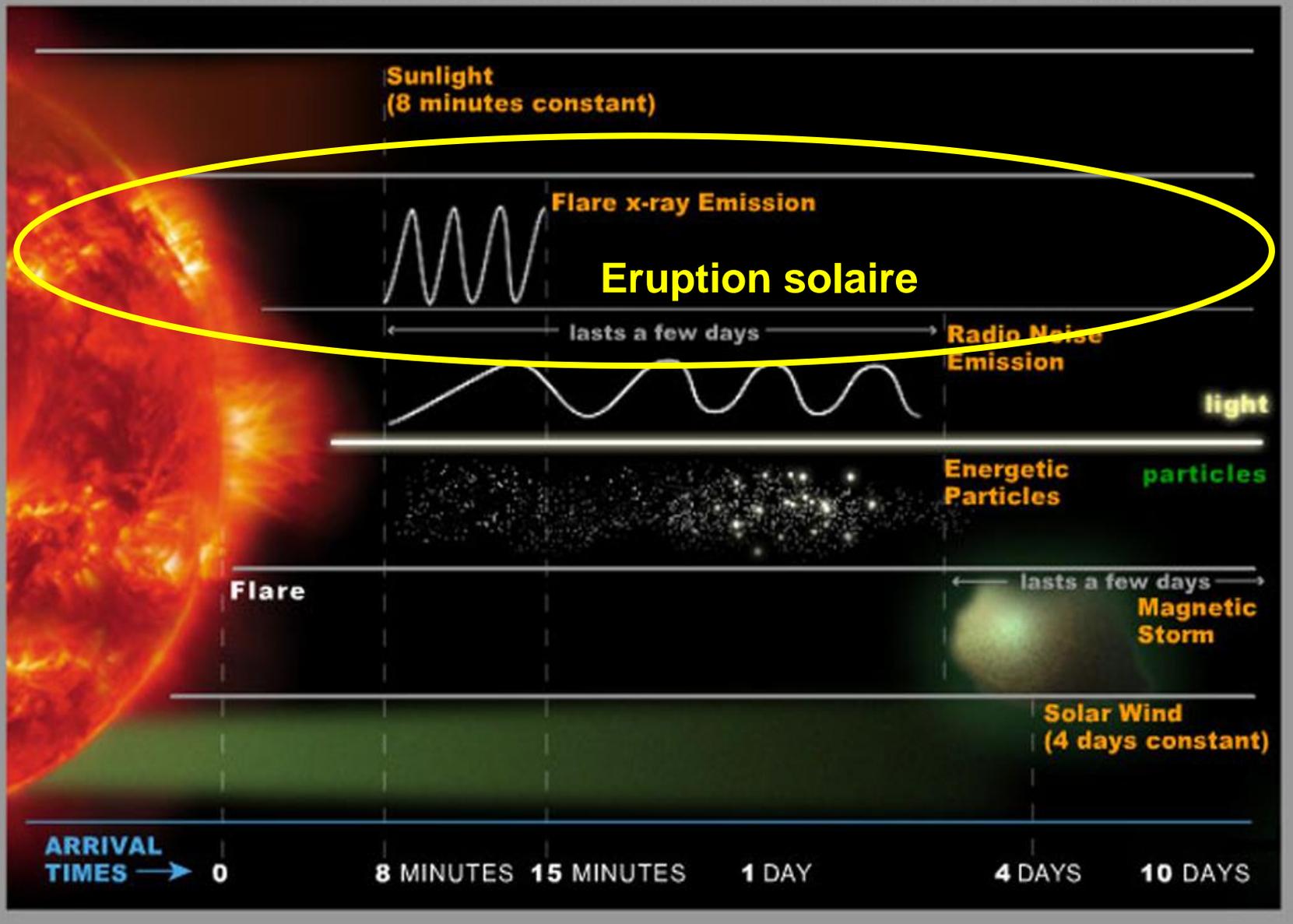


Balfour Stewart
[1828-1887]
Ecosse



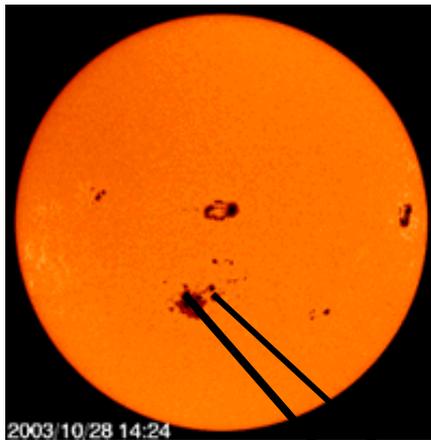
L'ionosphère est la plus grande source de perturbations pour les systèmes de navigation des satellites GNSS

DYNAMIC AND CONSTANT SOLAR EFFECTS ON EARTH

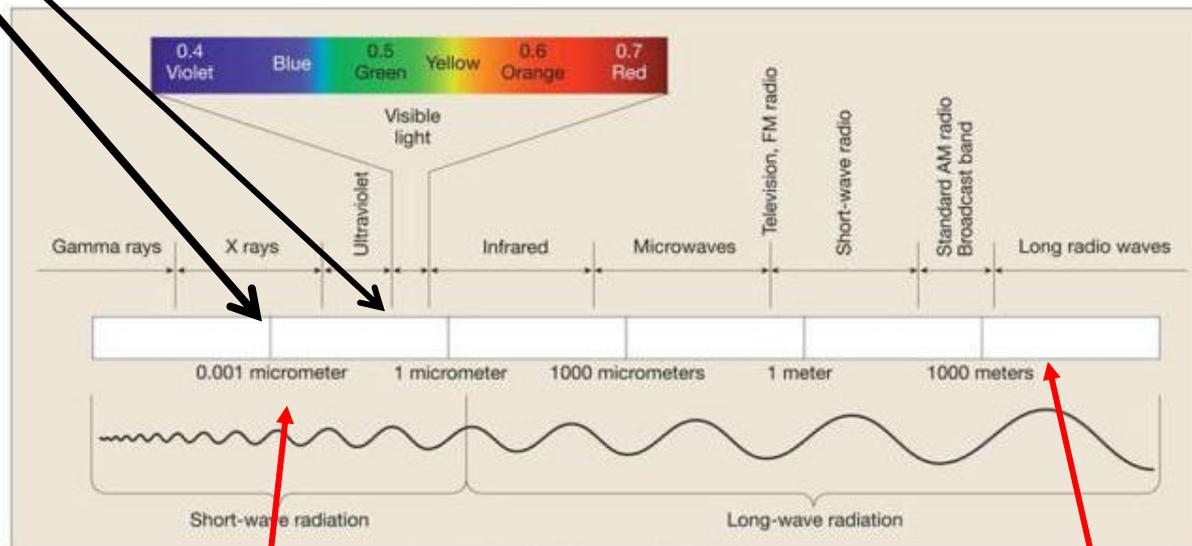


SOLEIL : perturbations

Autour des taches => émissions of EUV, UV, X rays



2003/10/28 14:24



Copyright © 2007 Pearson Prentice Hall, Inc.

ERUPTION SOLAIRE

Extra X rays, UV

SURSAUT SOLAIRE

Extra ondes Radio

Emissions électromagnétiques perturbées



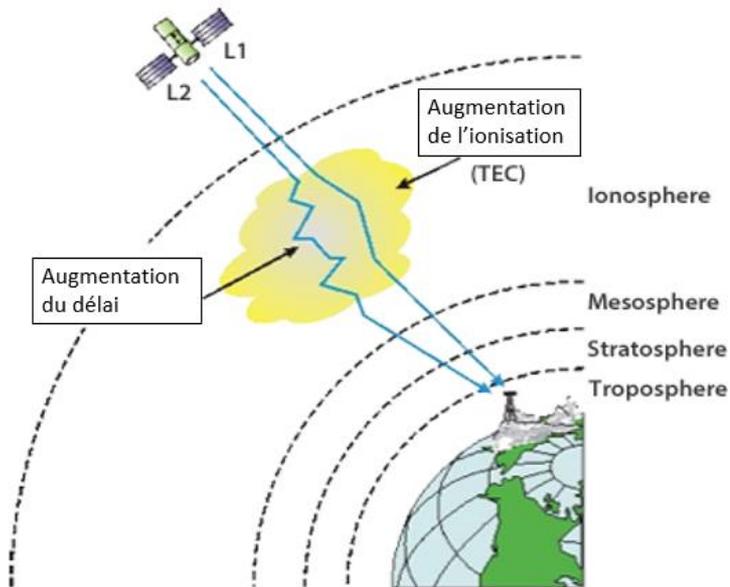
ERUPTION SOLAIRE(8')

PERTURBATION

Processus physique

extra solar émissions => extra photo ionisation

Les émissions UV et rayons X augmentent l'ionisation dans l'ionosphère et perturbent le signal du satellite

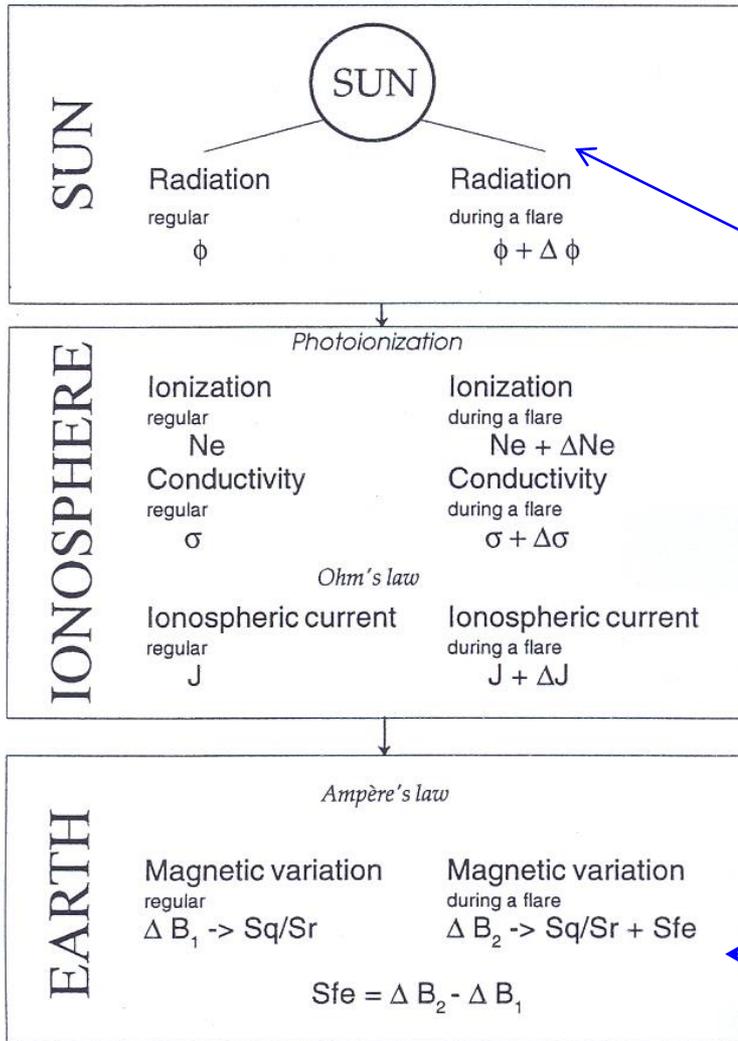


éruption solaire
de novembre 2003



Données satellite SOHO

SOLEIL-TERRE : perturbation du champ magnétique



Crochet magnétique due à une éruption solaire

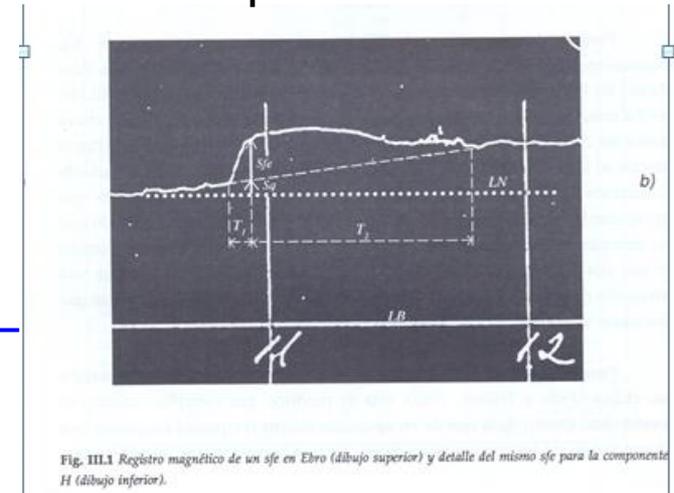
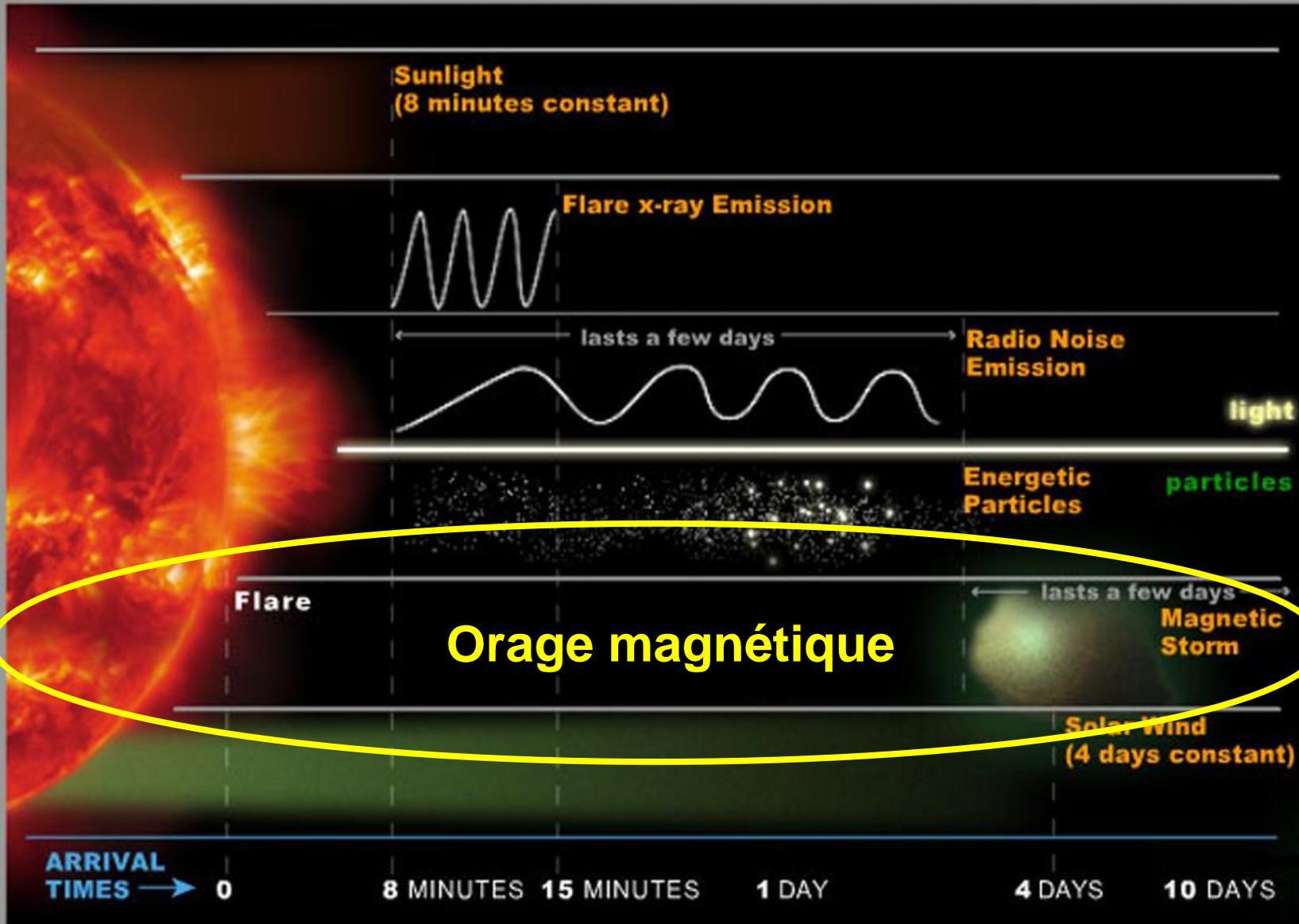


Fig. III.1 Registro magnético de un sfe en Ebre (dibujo superior) y detalle del mismo sfe para la componente H (dibujo inferior).

DYNAMIC AND CONSTANT SOLAR EFFECTS ON EARTH



Connections SOLEIL TERRE : Particules

Vent solaire régulier: $V \sim 350-400\text{km/s}$, Temps $\sim 2-3$ days

Le vent solaire transporte une partie du champ magnétique solaire vers la Terre :
champ magnétique interplanétaire, IMF



Le vent solaire est un flux constant de matière coronale solaire qui s'écoule du soleil. Il se compose principalement d'électrons, de protons et de particules alpha avec des énergies généralement comprises entre 1,5 et 10 keV

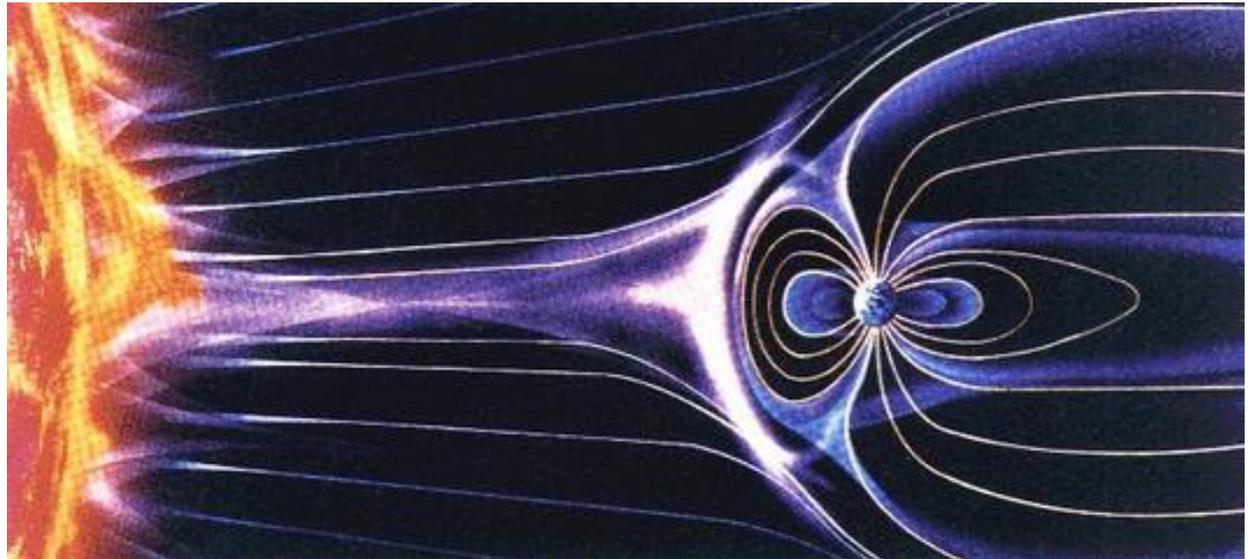
Le champ magnétique terrestre agit comme un bouclier pour les particules du vent solaire. Cependant, il existe des régions de l'ionosphère qui sont directement connectées au milieu interplanétaire et donc au flux du vent solaire

VENT SOLAIRE-MAGNETOSPHERE DYNAMO



En 1808 Alexander Von Kumbold a
introduit la notion d'une perturbation
magnétique globale:
ORAGE MAGNETIQUE

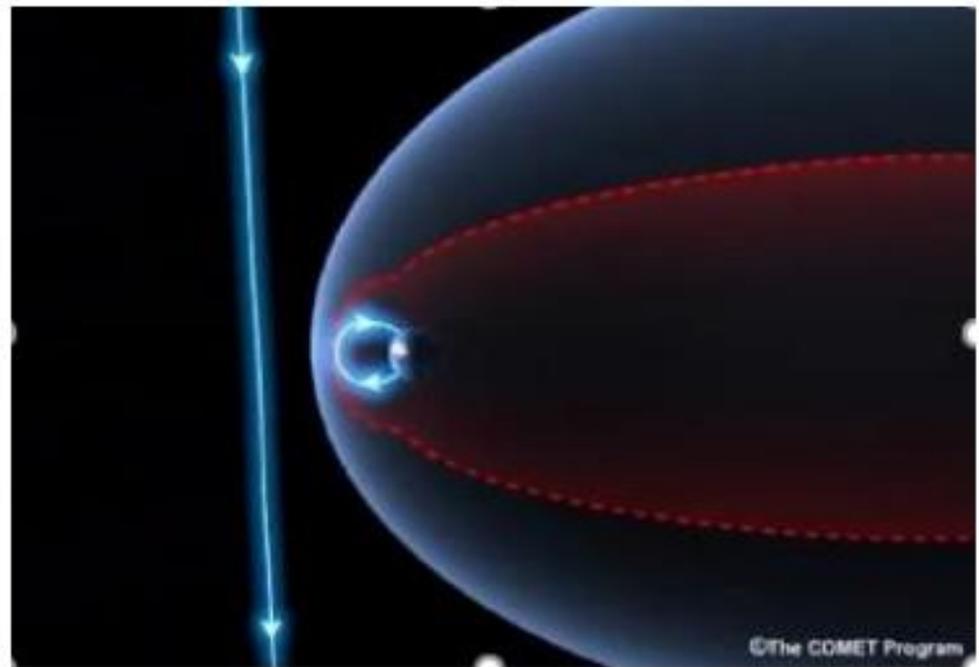
Alexander Von HUMBOLD
[1769-1859]
Allemagne



INTERACTION ENTRE LE VENT SOLAIRE et LA MAGNÉTOSPHERE (Reconnexion et Dynamo)

Si le champ magnétique interplanétaire IMF est opposé au champ magnétique terrestre, il y a un orage magnétique

Paramètres clés pour la météorologie de l'Espace
Bz IMF (transmis par le soleil)
Vs : vitesse du vent solaire



Dynamo vent solaire - magnétosphère
le mouvement du vent solaire est converti en énergie électrique

CORONAL MASS EJECTION

CME : billions tons of matter ejected from the sun

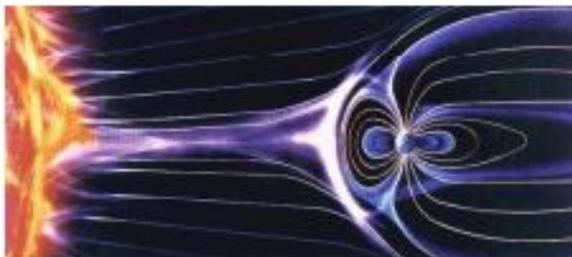
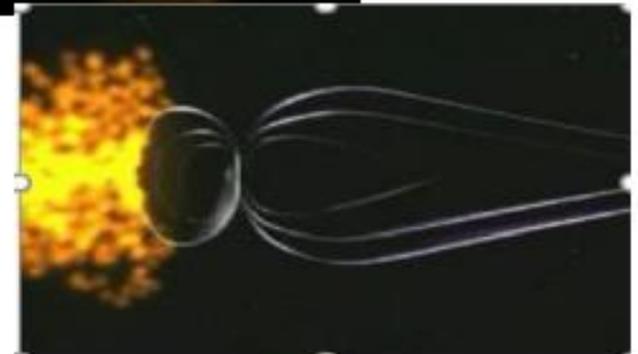
Near the sun

SOHO satellite data



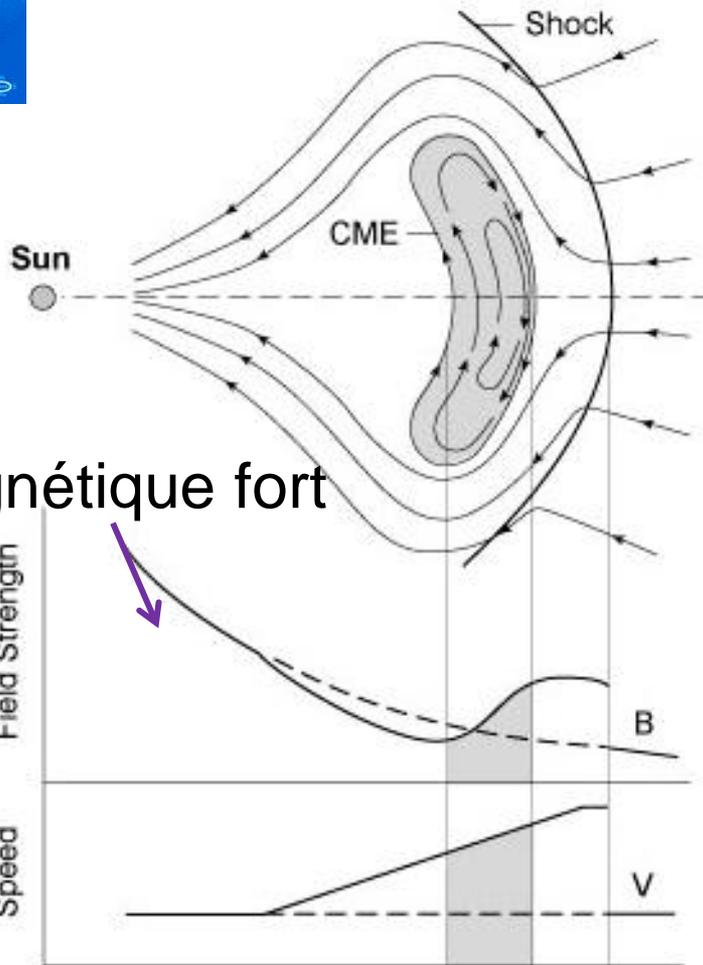
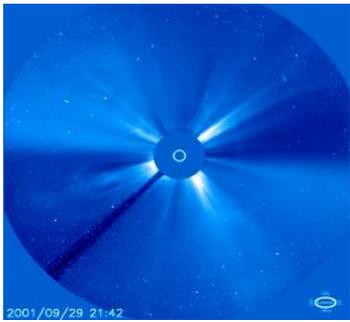
From the Sun to the Earth

Movie from the NASA



CME produce magnetic storms
if the IMF inside the CME is southward

CME interplanétaire : chocs

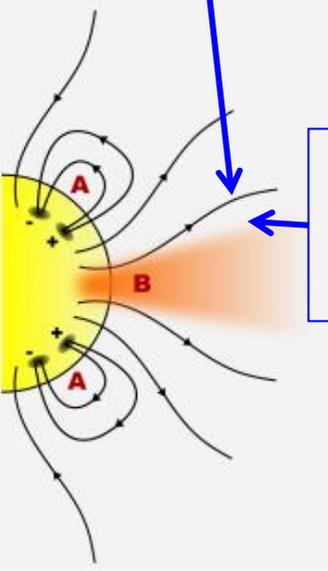
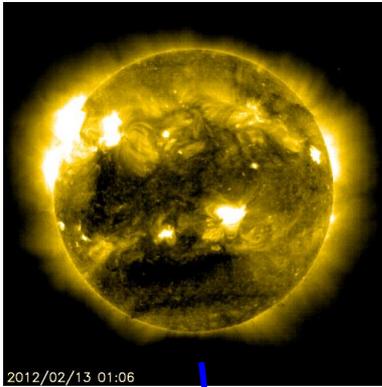


Une éjection de masse coronale rapide, CME pousse une onde de choc interplanétaire

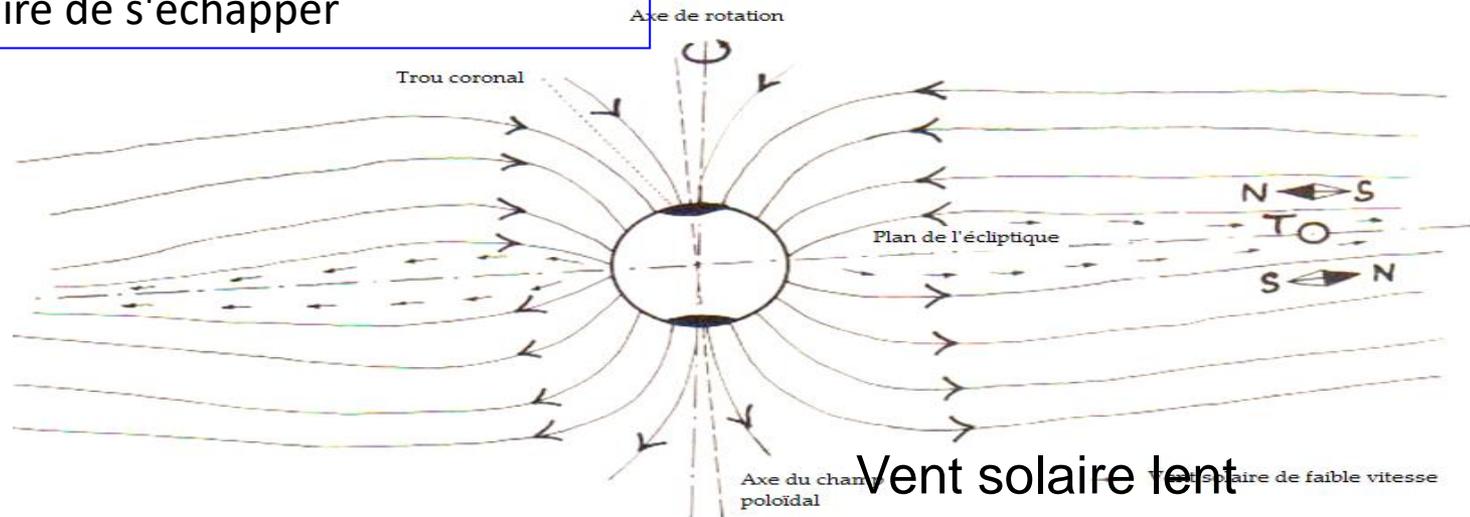
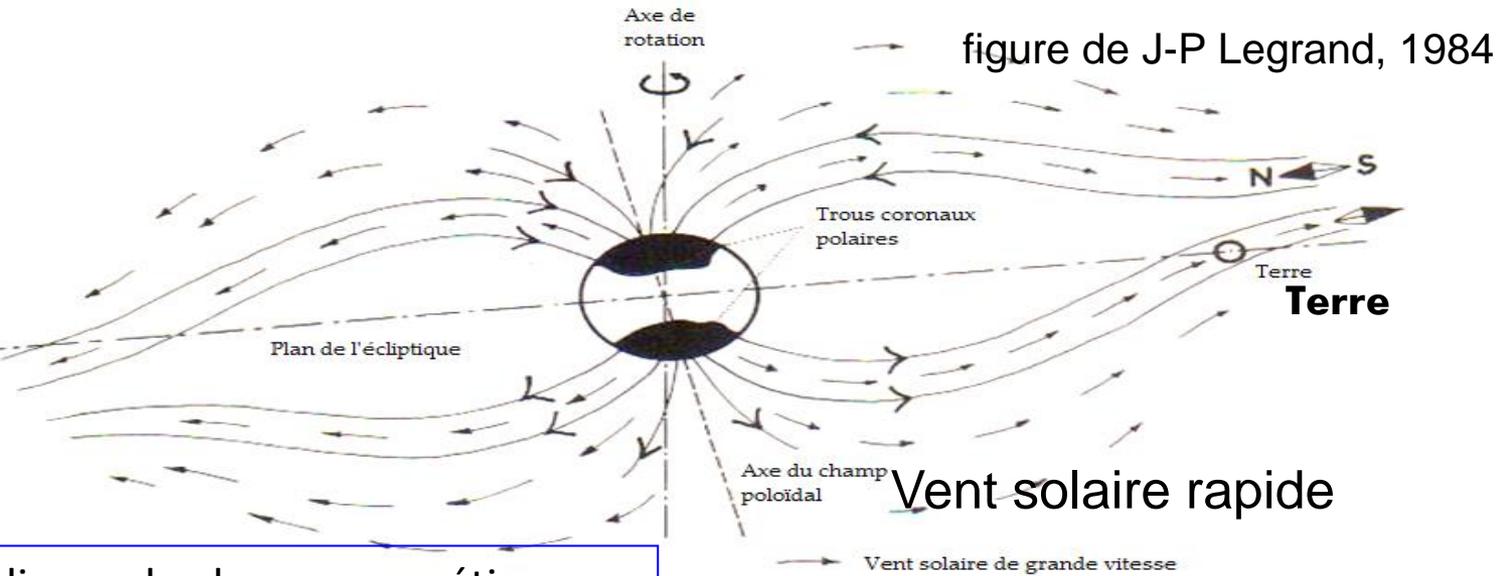
Il y a une augmentation de la vitesse du vent solaire V et de l'intensité du champ magnétique B par l'onde de choc interplanétaire devant le CME

Champ magnétique fort

TROUS CORONAUX : activité récurrente

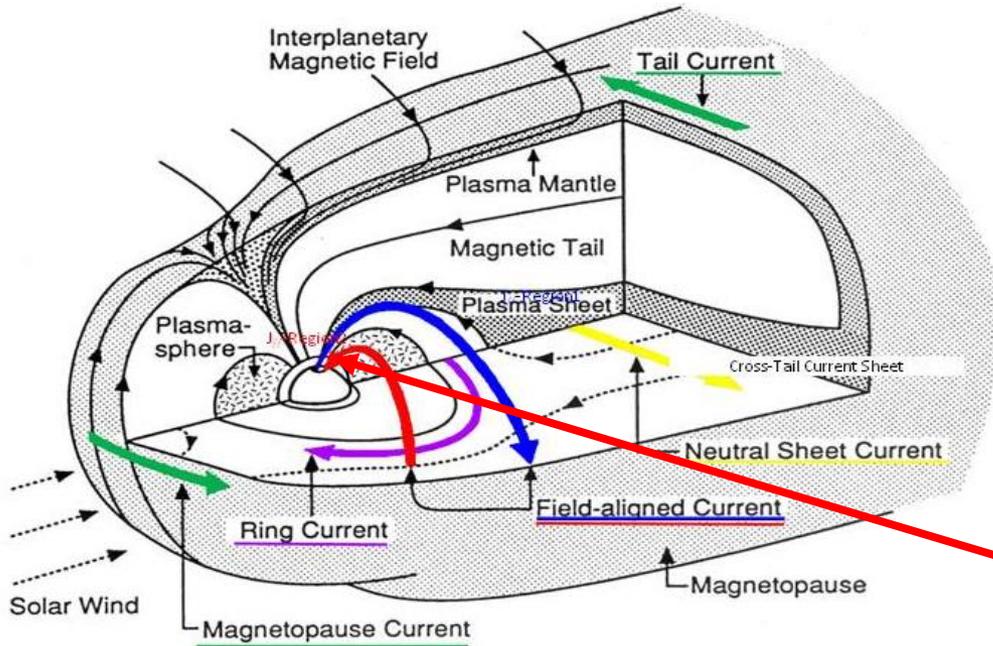


Les lignes du champ magnétique sont ouvertes. Cela permet au vent solaire de s'échapper



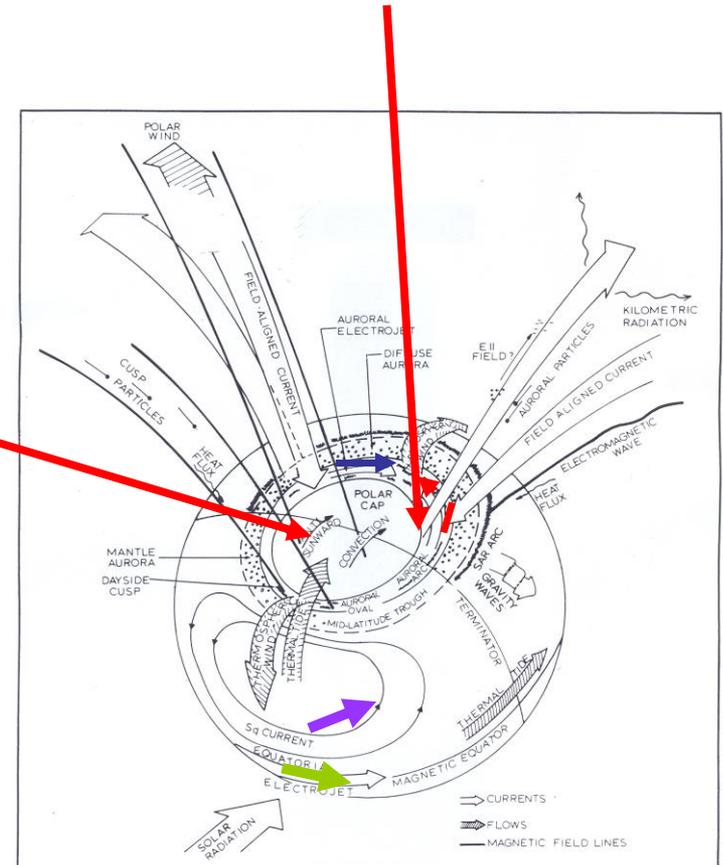
DYNAMO VENT SOLAIRE-MAGNETOSPHERE

Courants électriques



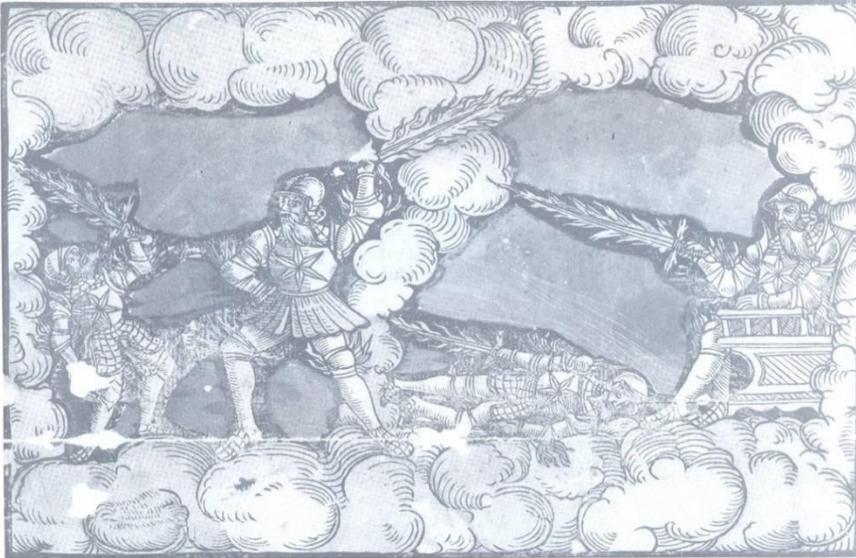
MAGNETOSPHERE

ZONE AURORALE



AURORE

Image des aurores de observées le 24 juin 1554 en Allemagne et en Suisse, Legrand et al. 1991 Les aurores sont à 100 km de hauteur



Lors de forts orages magnétiques, les effets des aurores peuvent être observés aux basses latitudes Aurore observée à Rouen (près de Paris /France), le 11 avril 2001

Tycho BRAHE
[1546-1601]
Danemark



Jean-Jacques Dortous de Mairan – 1733

Académicien



Jean Dortous de Mairan a expliqué les aurores comme étant dues à les particules venant du soleil qui précipiteraient dans la haute atmosphère et qui par collisions avec les atomes de la haute atmosphère produiraient les lumières dans le ciel : les aurores.

Ceci plus de deux siècles avant la découverte du vent solaire

Aurore boréale observée à Paris le 13 mai 1869, (L'Atmosphère, Flammarion)

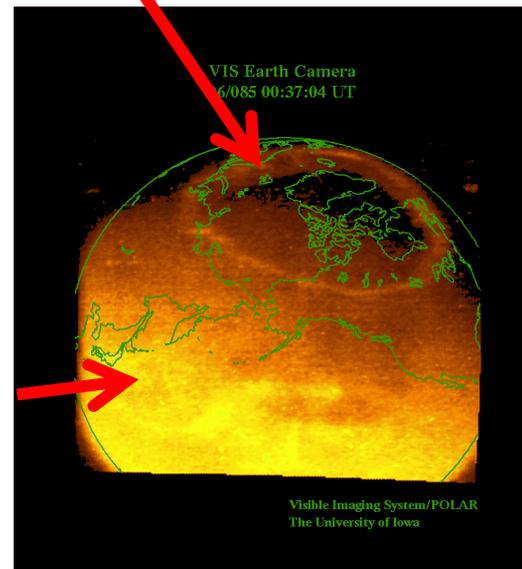
Legrand J-P., J.J. Dortous de Mairan à l'origine des aurores, CR. Acad. Sci., La Vie des Sciences, Tome 2, N°5, pp. 487-509, Septembre Octobre 1985



AURORE : le Phénomène de météorologie spatiale le plus spectaculaire

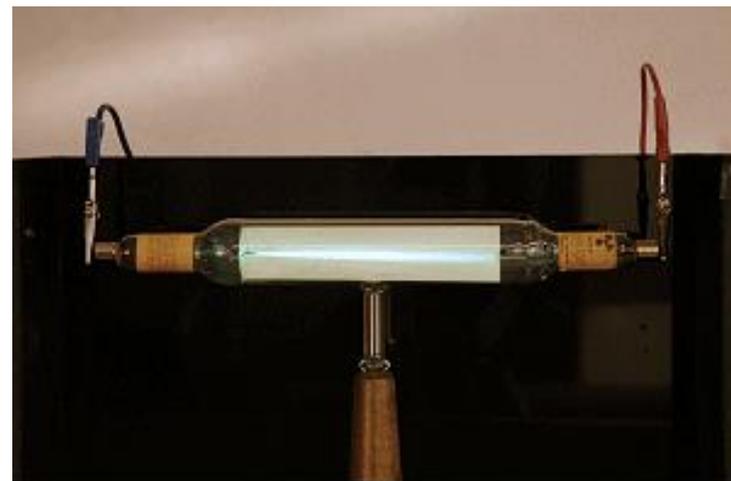


Oval auroral du aux
précipitations de particules



Radiations
solaires

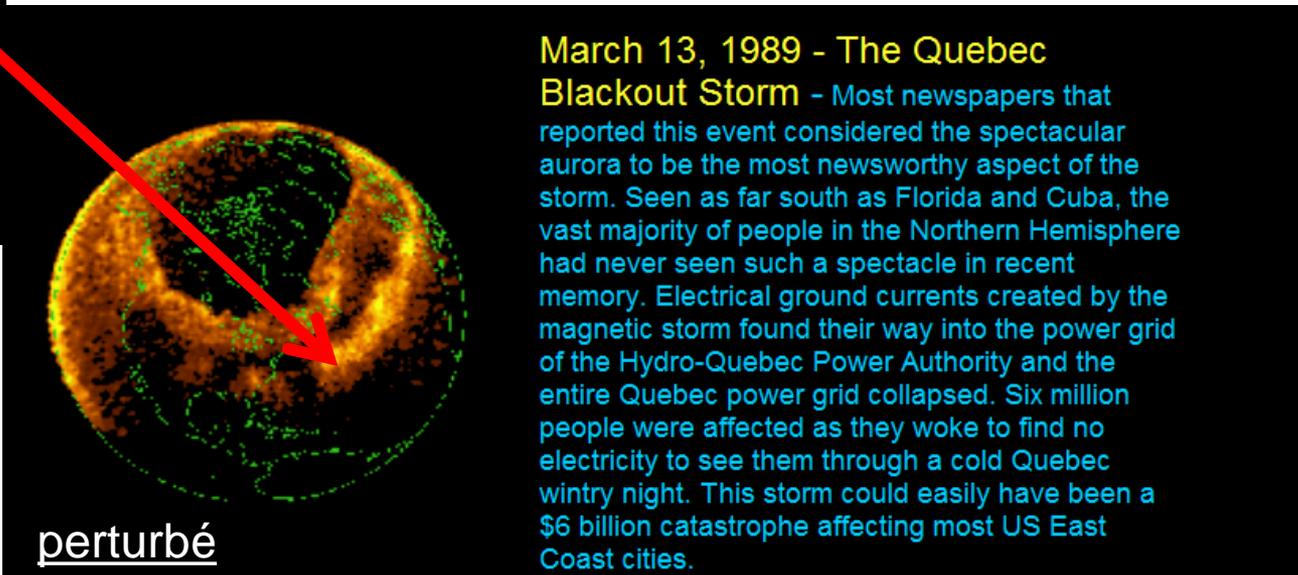
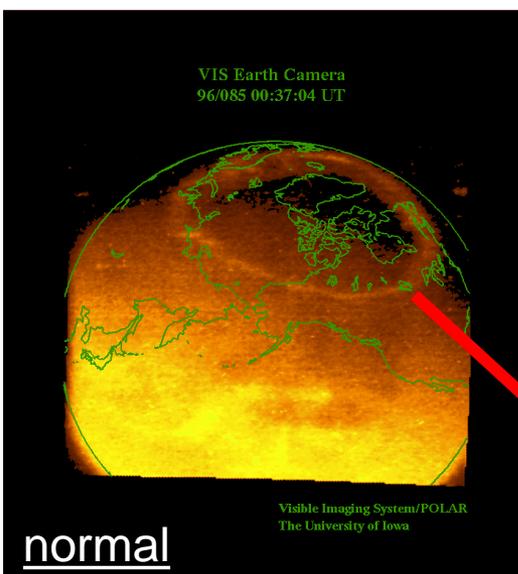
Processus physiques : précipitation
et ionisation, Les particules suivent
les lignes du champ magnétique
terrestre et se précipitent dans
l'atmosphère où elles ionisent
l'atmosphère



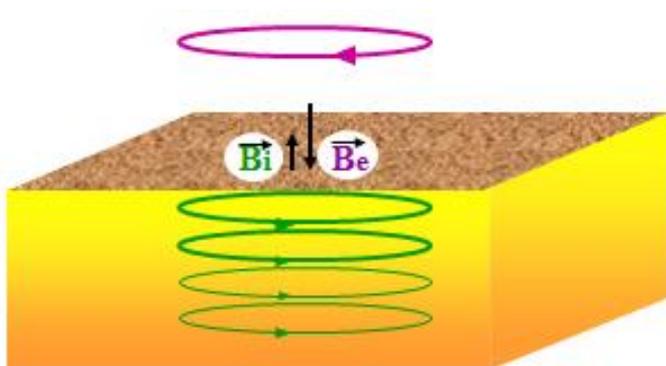
ORAGES MAGNETIQUES

Courants électriques ionosphériques

L'ovale auroral s'étend vers les latitudes moyennes les courants électriques ionosphériques auroraux affectent fortement les basses latitudes



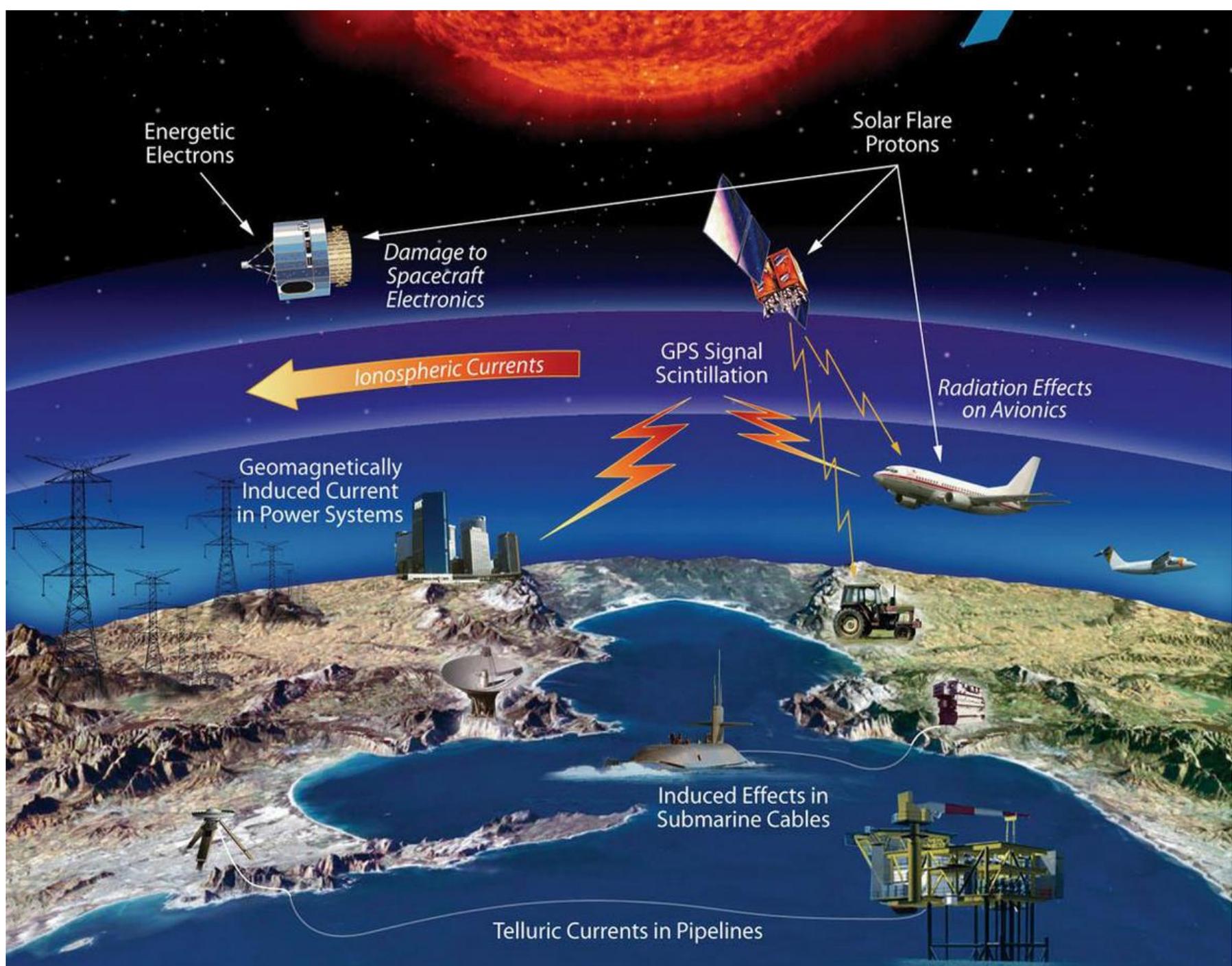
Les courants électriques ionosphériques induisent des courants telluriques

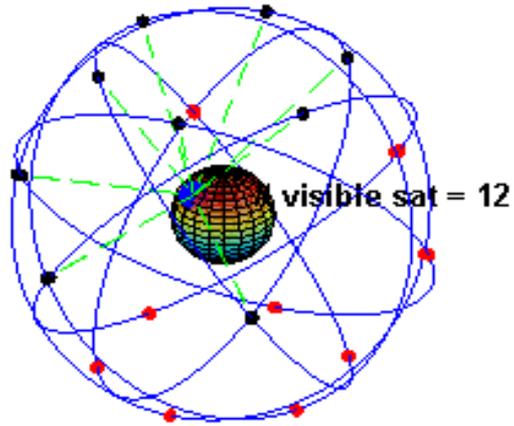


Court-circuit

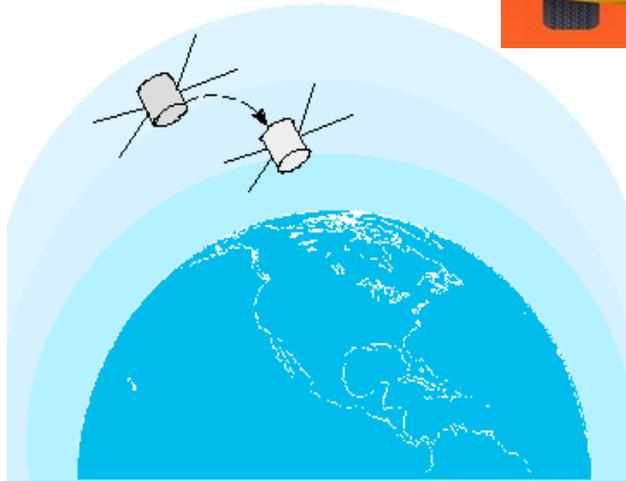


Domage des transformateurs

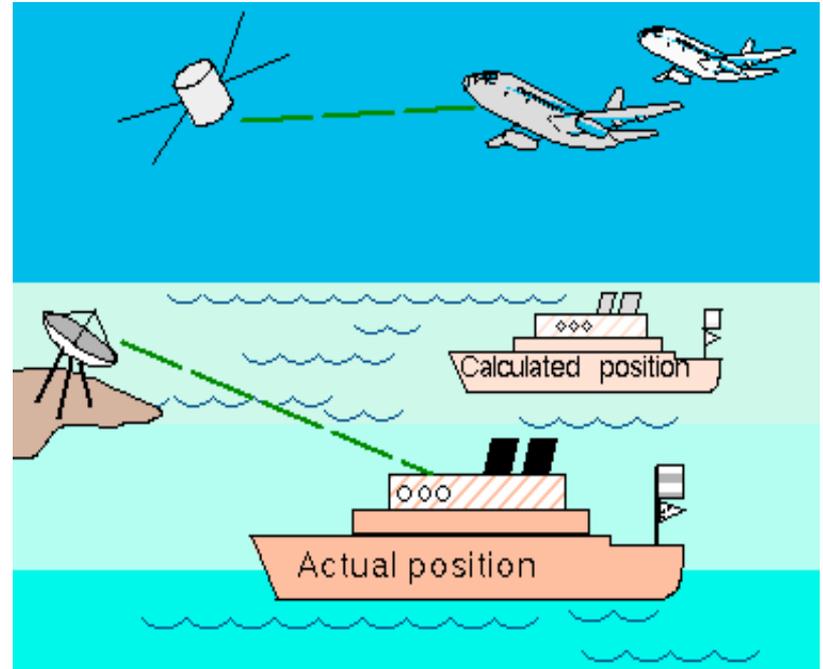




Vie de tous les jours, Le système GPS (GNSS) est affecté par les tempêtes magnétiques. L'onde transmise par le satellite vers la terre est déformée lors de sa traversée dans l'ionosphère



Changement des orbites des satellites



Signaux de navigation perturbés

Conclusion

Avec le développement de la société et l'utilisation des nouvelles technologies sensibles à l'environnement électromagnétique de la terre, La météorologie de l'Espace combine les connaissances passées du système Soleil-Terre et vise à prédire l'impact des événements solaires. sur les nouvelles technologies