



Météorologie de l'Espace : du Soleil à la Terre

CRASTE-LF/ Janvier 2017

Christine Amory-Mazaudier

christine.amory@lpp.polytechnique.fr

Staff Associate –ICTP and Collaborator UPMC



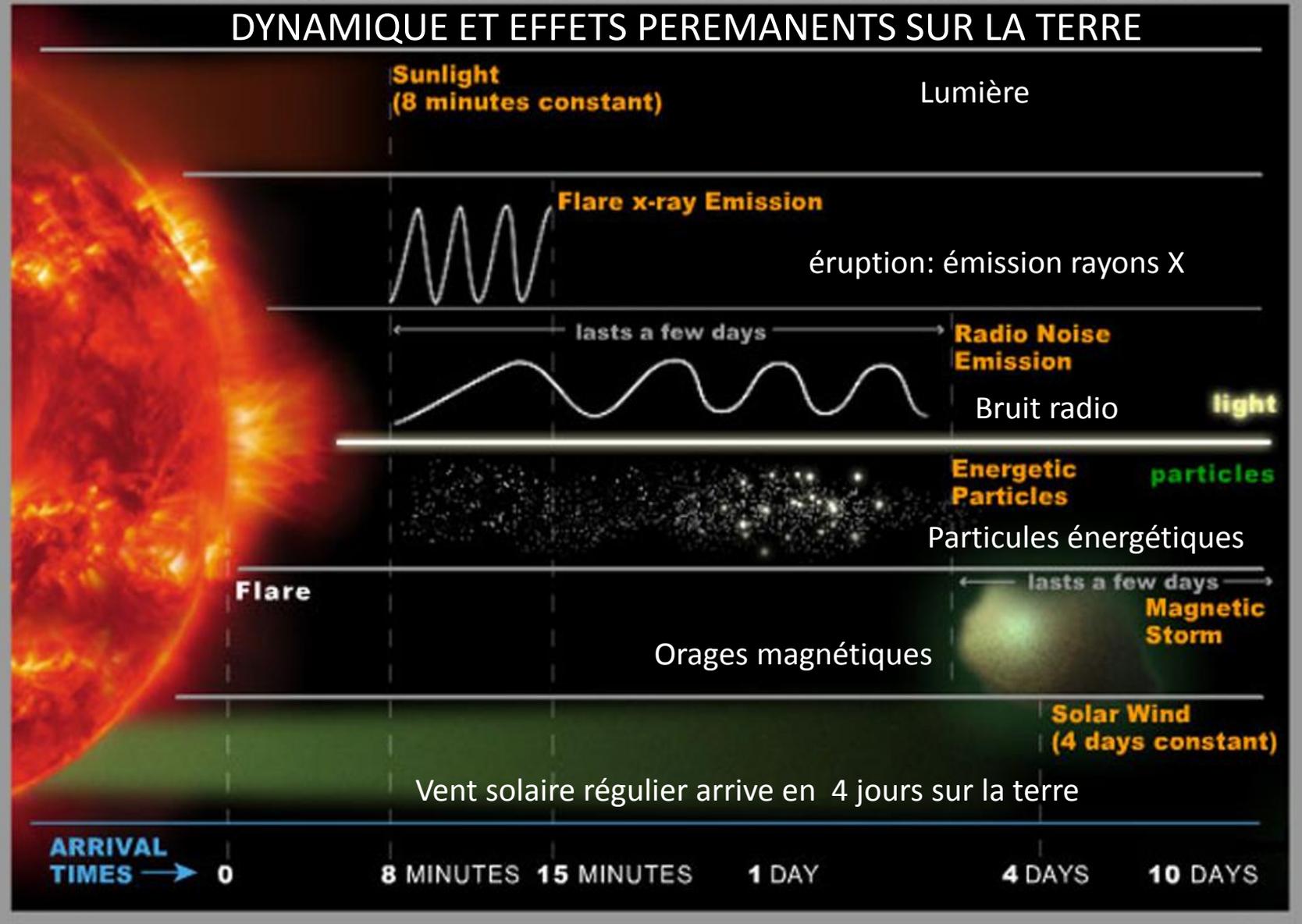
PLAN

- Emissions du Soleil
- Pourquoi la Météorologie de l'Espace ?
- LE SOLEIL
- LA TERRE
- L'IONOSPHERE
 - L'ionosphère aurorale et le phénomène des aurores
- Du Soleil vers la Terre / perturbations des systèmes GNSS et radar
 - Extra radiations : Solar Flare (Radiation X), Solar bursts (Ondes radio)
 - CME , chocs, Vents solaires rapides,
- Orages magnétiques
- Scintillations du signal GNSS
- Le réseau ISWI

EMISSIONS DU SOLEIL

DYNAMIC AND CONSTANT SOLAR EFFECTS ON EARTH

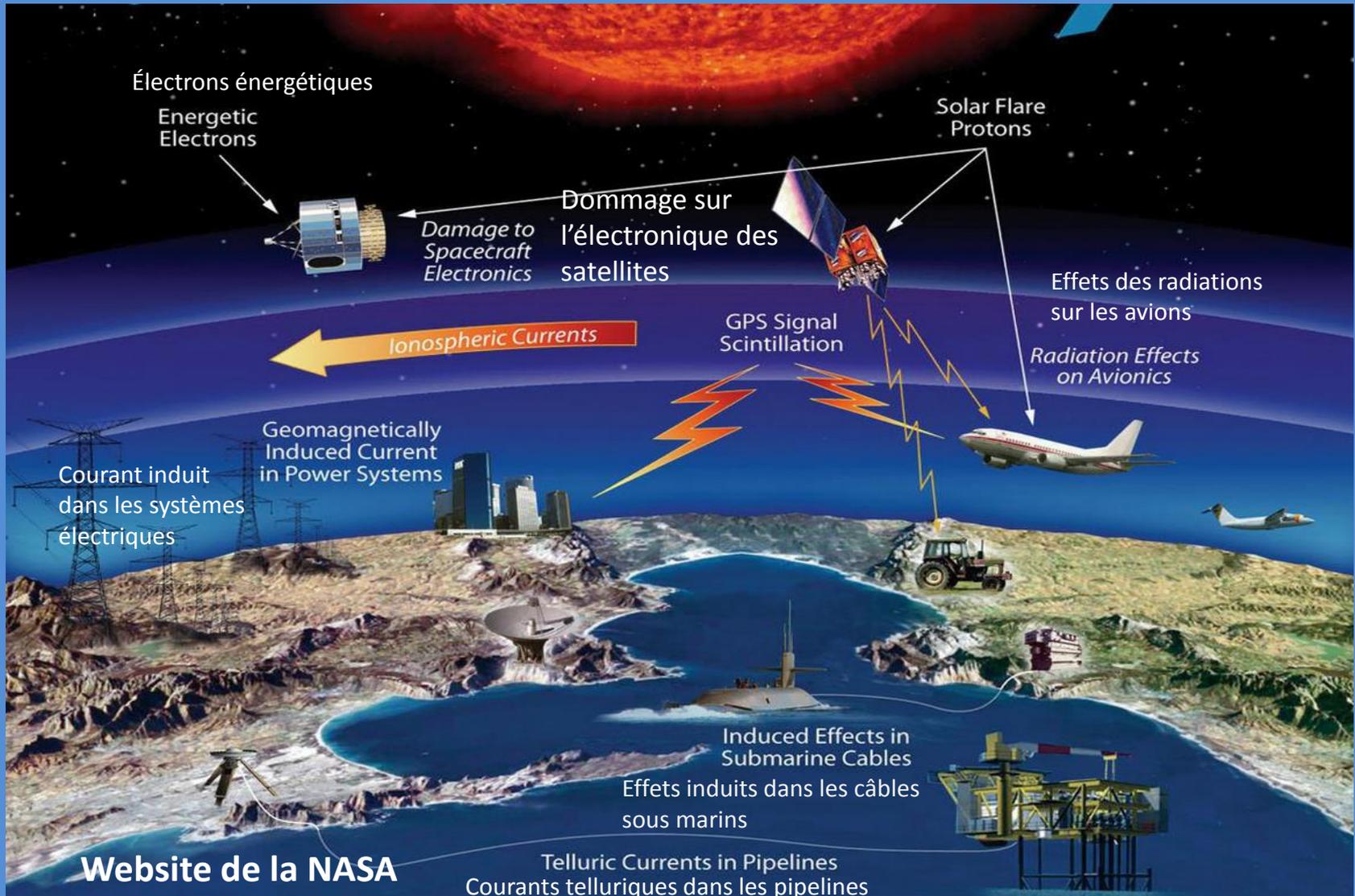
DYNAMIQUE ET EFFETS PERMANENTS SUR LA TERRE



Entre le Soleil et la Terre: L'IONOSPHERE

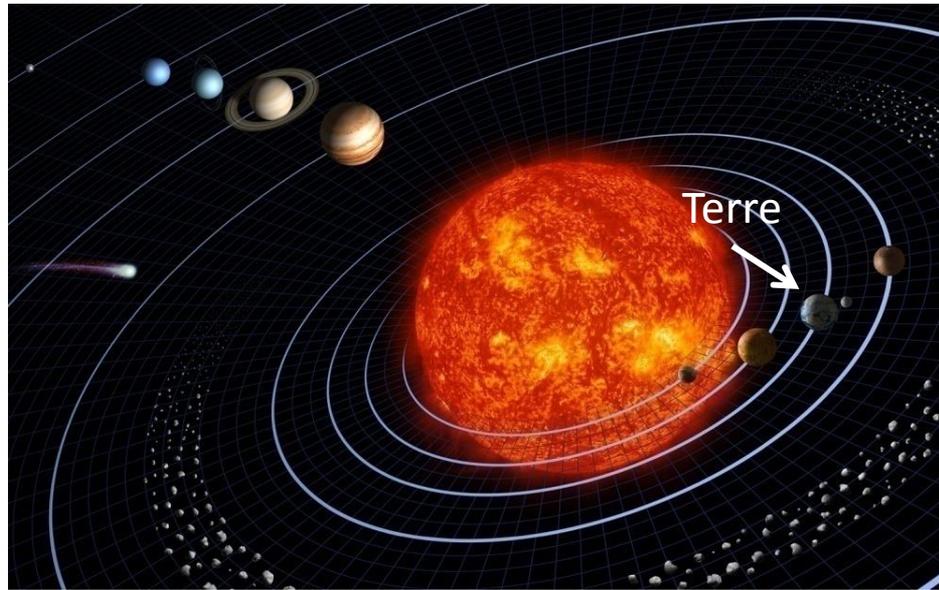
L'ionosphère est une couche ionisée de l'atmosphère (de ~ 50 km à ~ 800 km)

L'ionosphère est la source majeure de perturbation du signal GNSS



Plan

- Emissions du Soleil
- Pourquoi la Météorologie de l'Espace ?
- **LE SOLEIL**
- LA TERRE
- L'IONOSPHERE
 - L'ionosphère aurorale et le phénomène des aurores
- Du Soleil vers la Terre / perturbations des systèmes GNSS et radar
 - Extra radiations : Solar Flare (Radiation X), Solar bursts (Ondes radio)
 - CME , chocs, Vents solaires rapides,
- Orages magnétiques
- Scintillations du signal GNSS
- Le réseau ISWI



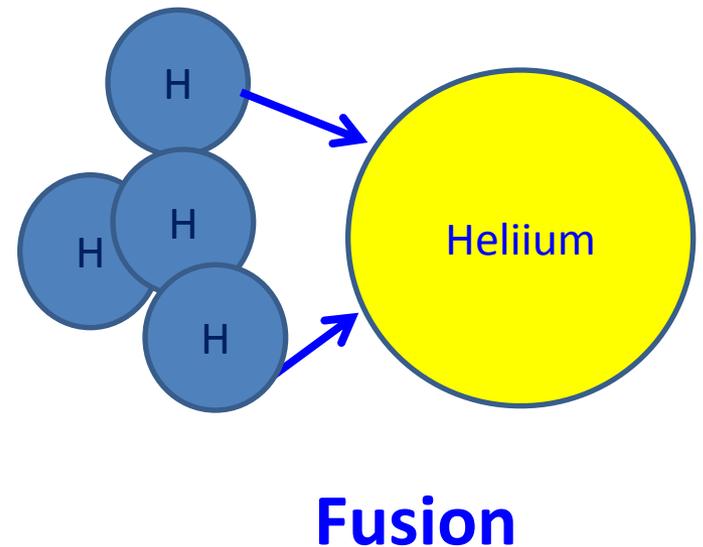
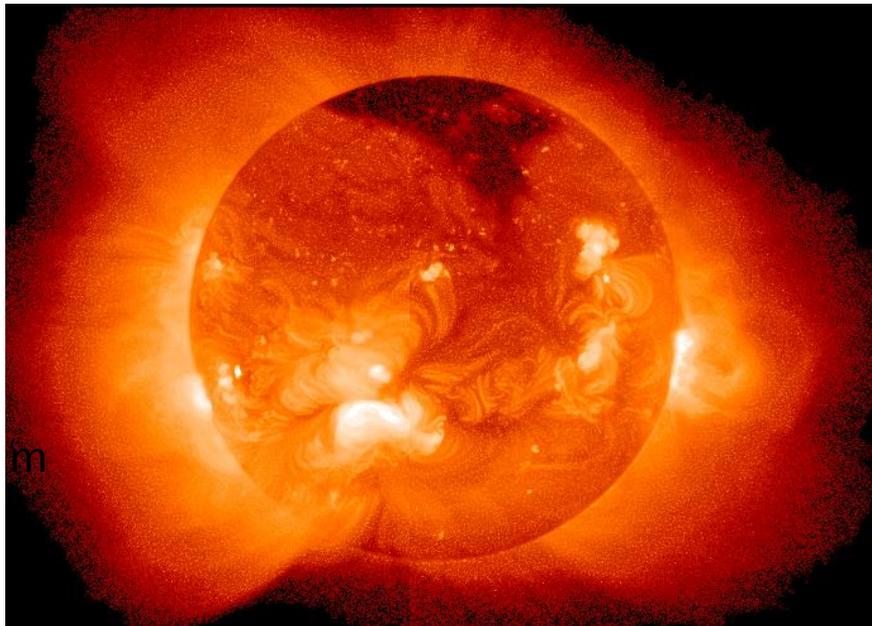
LE SOLEIL : Un corps magnétique en mouvement

Le Soleil est une étoile, il est né, il y a 4,7 milliards d'années, de l'effondrement d'un immense nuage de gaz interstellaire.

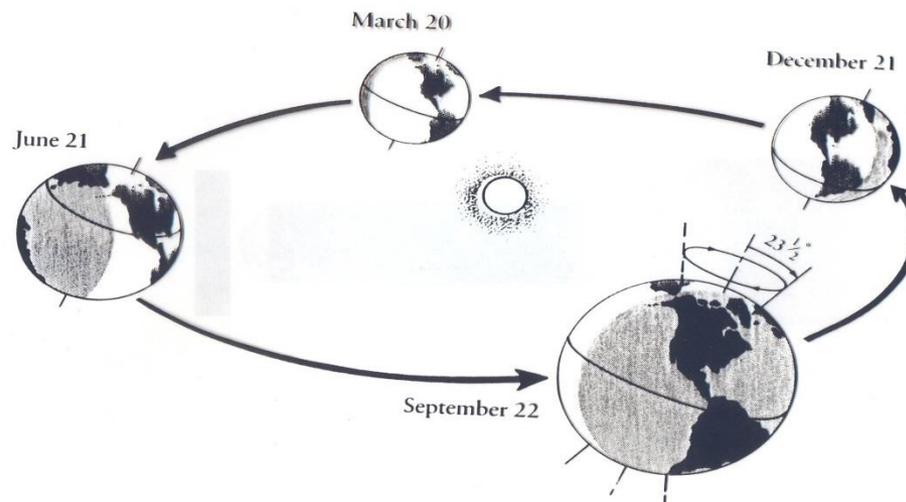
C'est une gigantesque sphère de gaz chauds, principalement hydrogène et hélium, de 1 391994 Km de diamètre (soit près de 110 fois celui de la Terre) et d'une masse de $1,989 \cdot 10^{30}$ kg (soit 332 946 fois celle de la Terre).

Sa densité moyenne, très faible, de $1,41 \text{ g/cm}^3$ (celle de la Terre vaut $5,52 \text{ g/cm}^3$) montre l'abondance d'éléments légers.

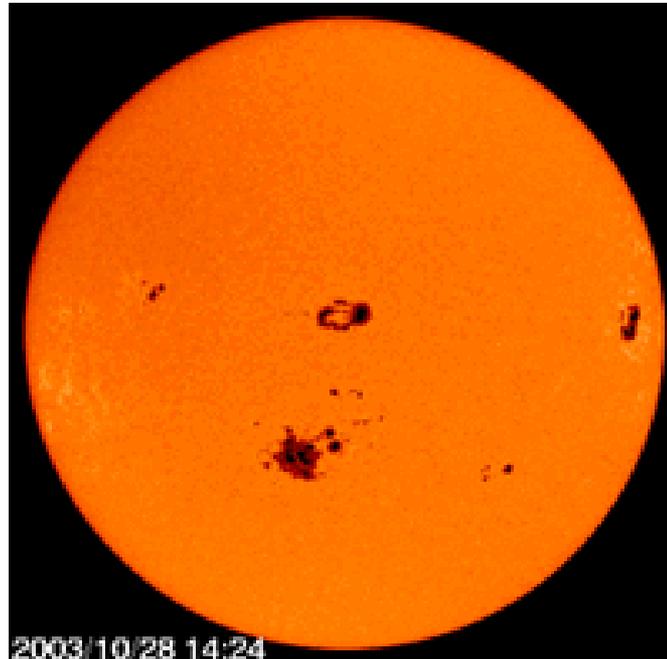
L'énergie du Soleil est issue des réactions nucléaires qui se produisent au centre par fusion d'atomes d'hydrogène en hélium. La température moyenne de surface est de 5 770 K (Kelvin). Celle du coeur nucléaire est estimée à quinze millions de K environ, peut-être un peu plus.

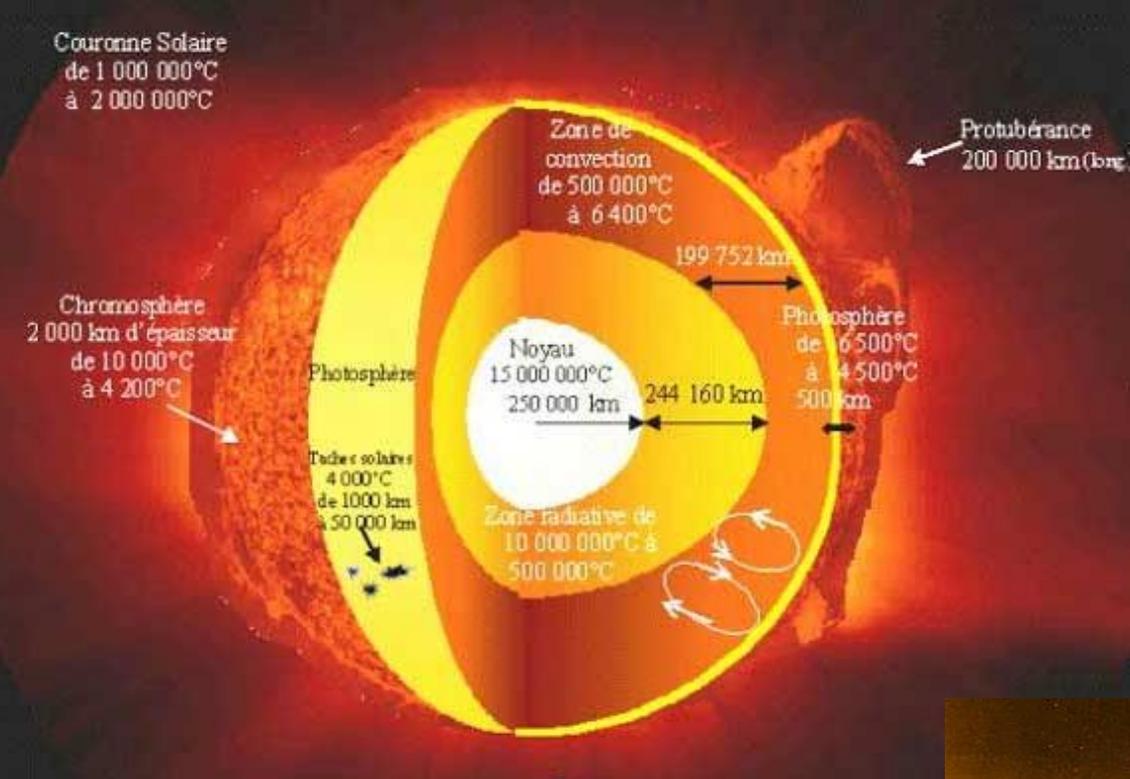


La distance Terre-Soleil varie de 147,1 millions de kilomètres en janvier à 152,1 millions de kilomètres en juillet. La Terre se situe alors, en janvier, en un point de l'orbite terrestre appelé périhélie, et en juillet, en un point de cette orbite appelé aphélie. La distance Terre-Soleil moyenne sert de référence et est nommée unité astronomique (1 UA = 149 597 900 Kms).

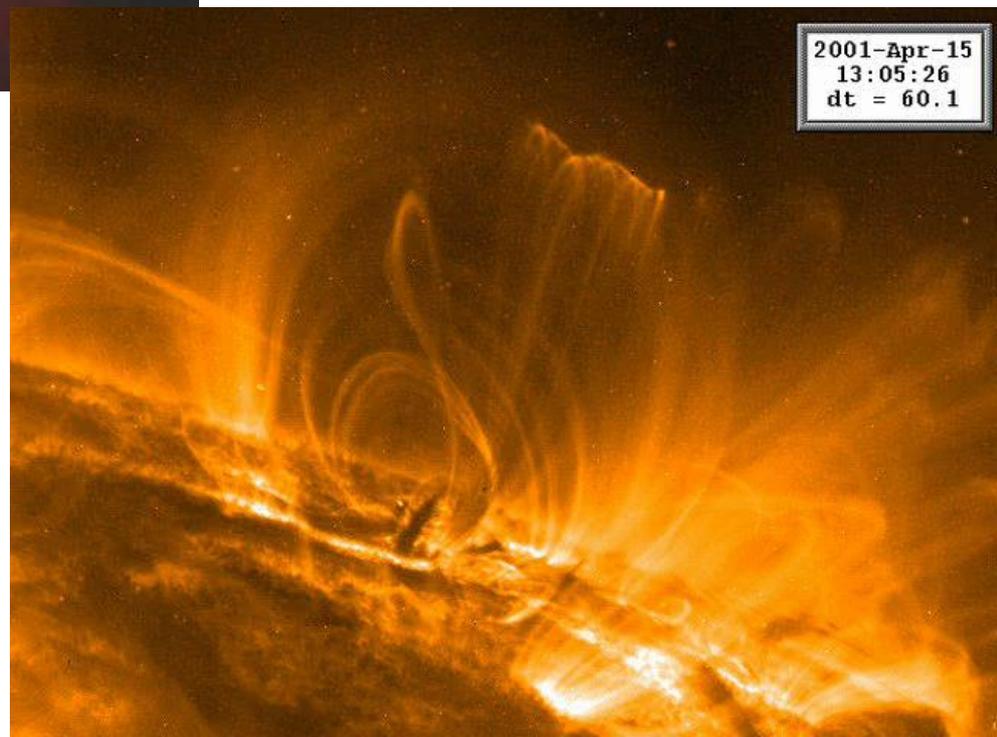


Le Soleil tourne sur lui-même. La durée de rotation est d'environ 25,4 jours terriens. Cette rotation est différentielle, plus rapide à l'équateur (24,6 jours) qu'au voisinage des pôles (35 jours). Elle est en partie responsable du champ magnétique qui se dissipe en permanence à sa surface et produit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

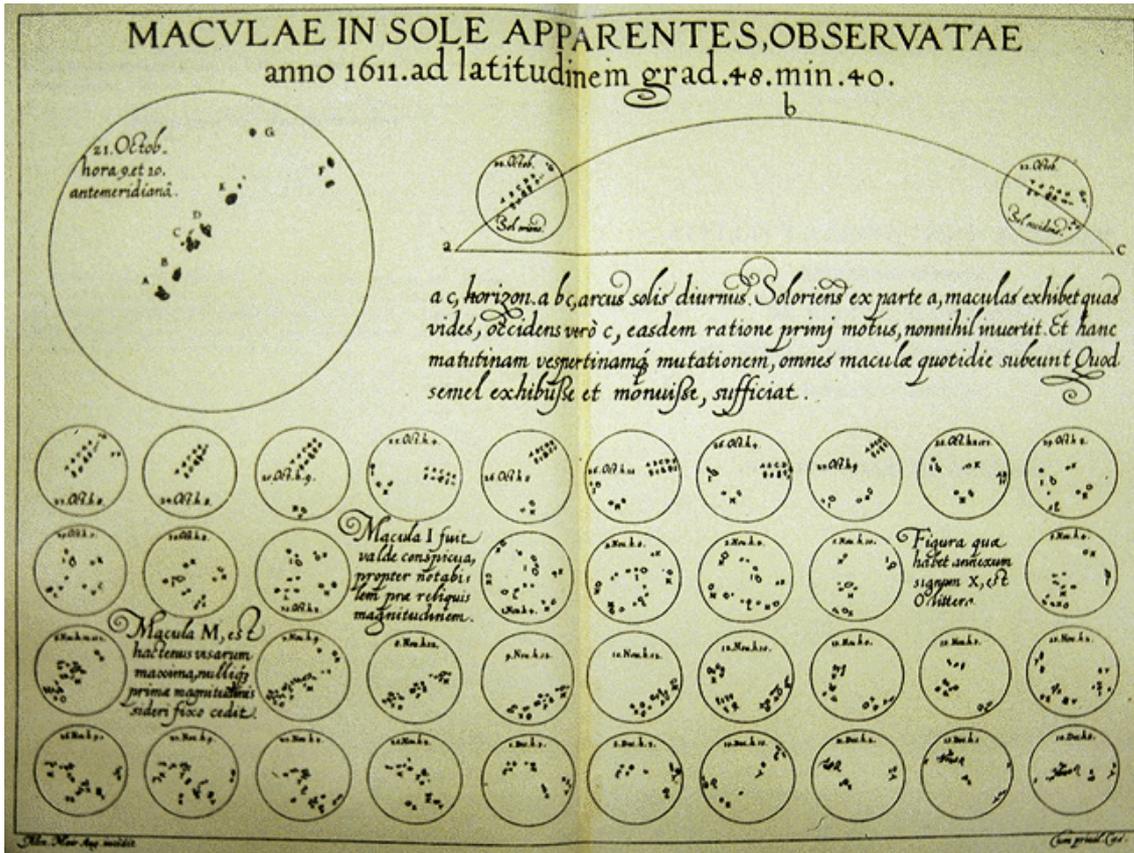




Protubérance solaire



Histoire : observation du soleil : les taches solaires



Galileo

Printemps 1611

Christophe Scheiner

Octobre 1611

Johannes Fabricius

Première publication

Automne 1611

Histoire : observation du soleil : les taches solaires



Hévélius

1642- 1644

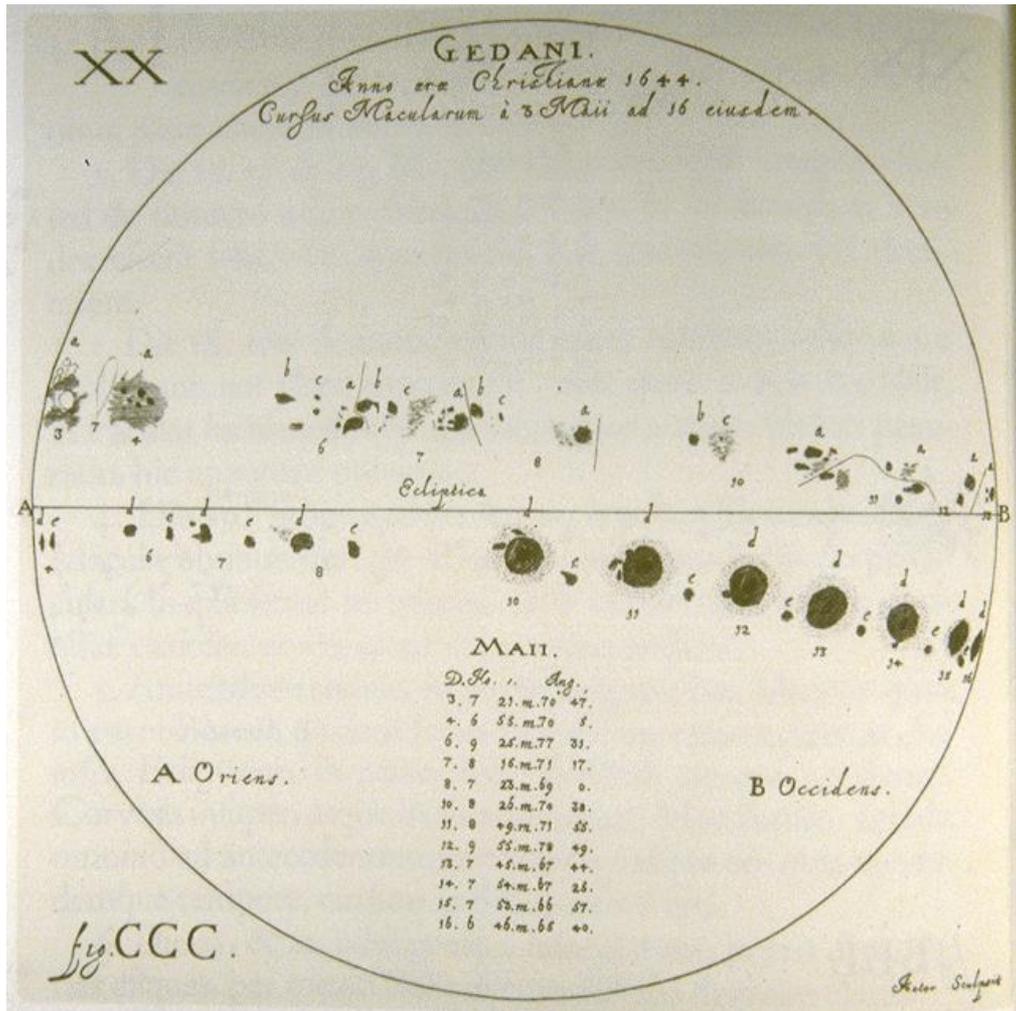
**Observation du soleil par
projection sur un écran de
carton.**

**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)

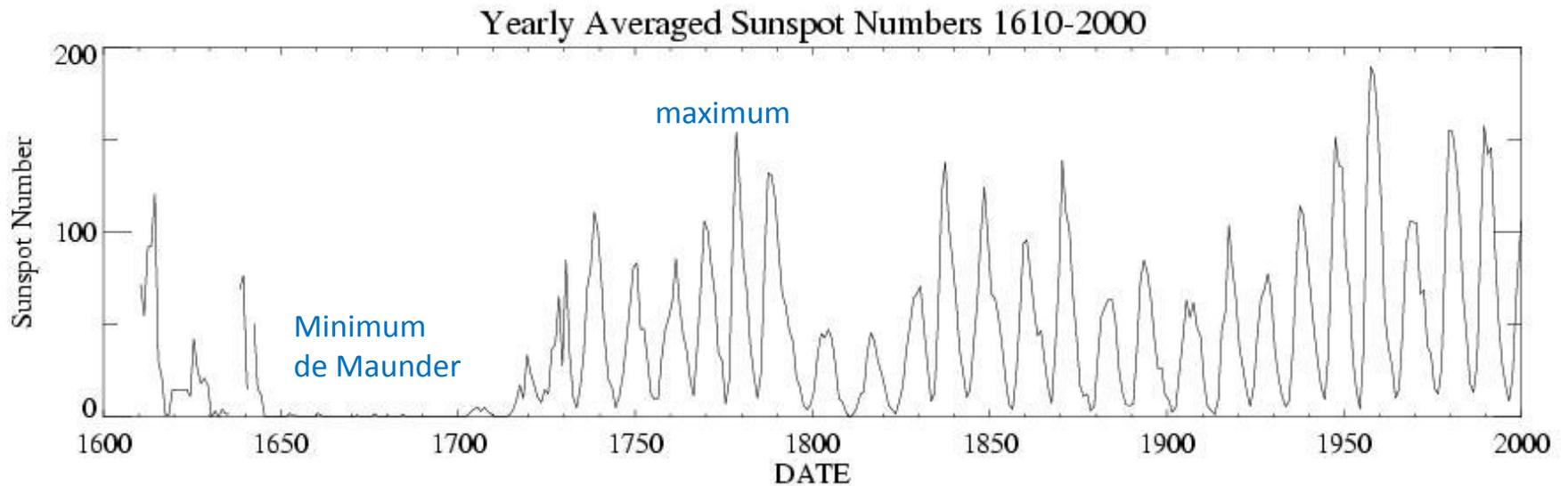
Histoire : observation du soleil : taches solaires



Dessin du père Scheiner
Mouvement des taches

Scheiner, Père Jésuite
mathématicien
travaillant à l'Université
de Ingolstadt
(près de Augsburg)

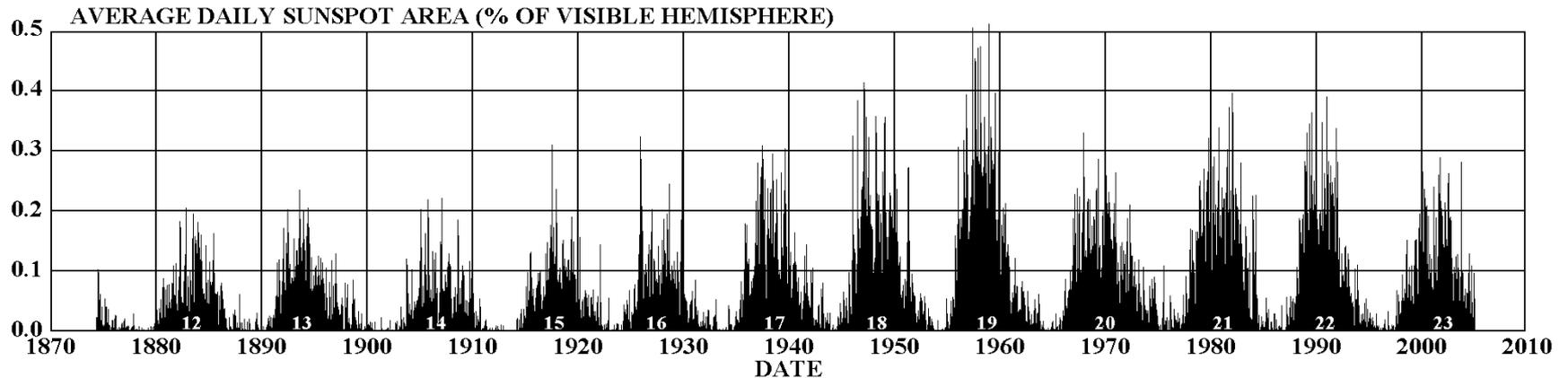
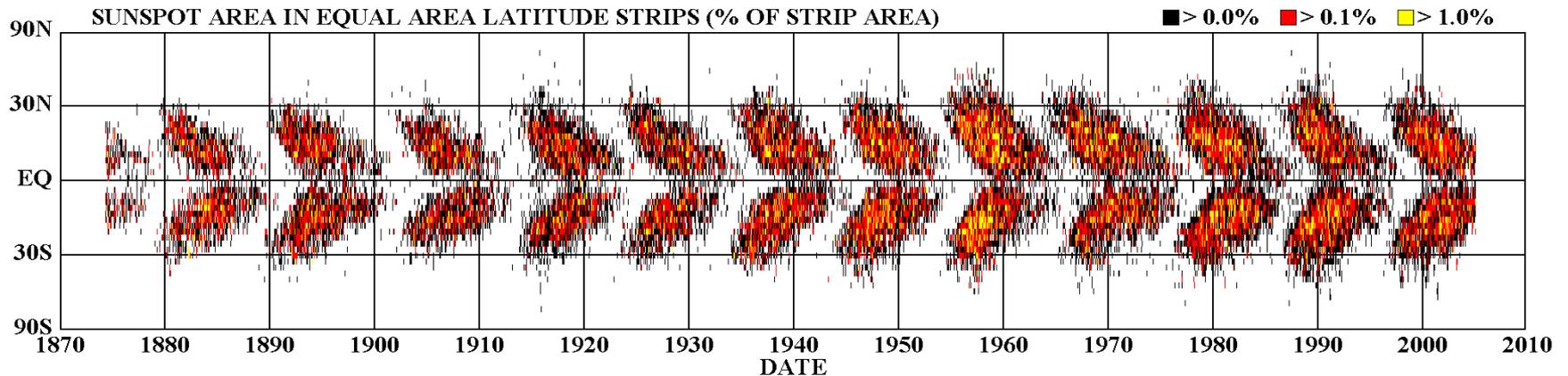
Cycle solaire de 11 ans des taches Heinrich Schwabe 1859



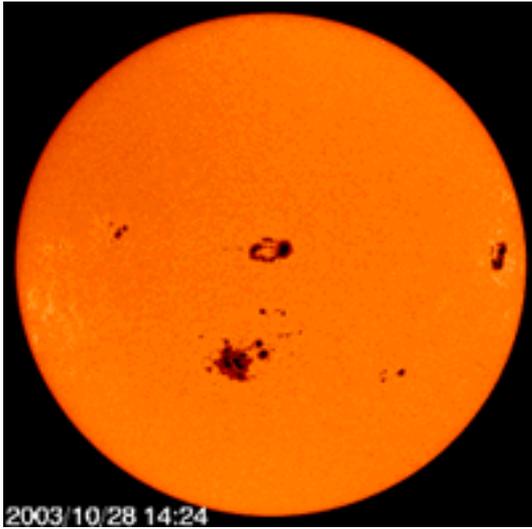
Variation annuelle des taches solaires 1610-2000

observation du soleil : taches solaires

Migration des taches des moyennes latitudes vers l'Equateur



LE SOLEIL : un corps magnétique en mouvement qu'est qu'une tache solaire ?



Données du satellite
SOHO

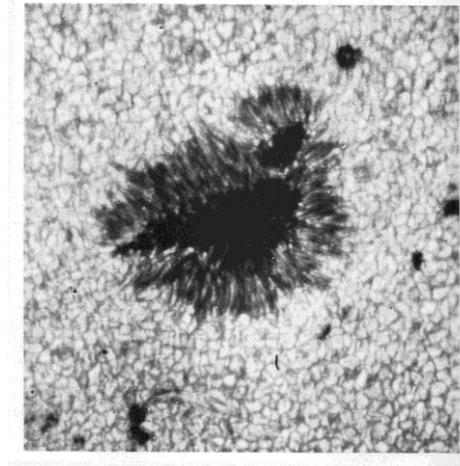
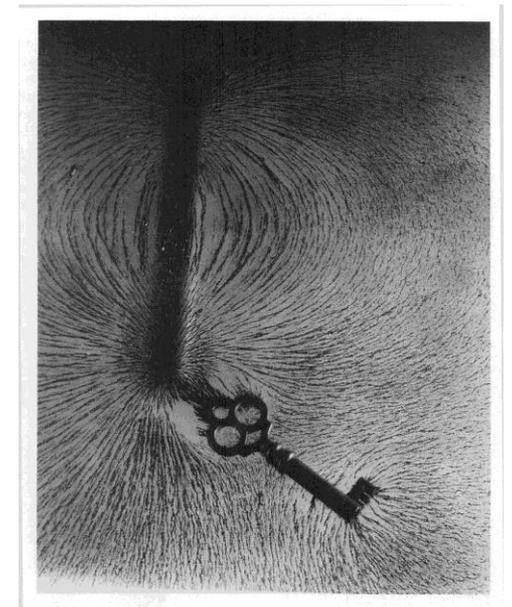
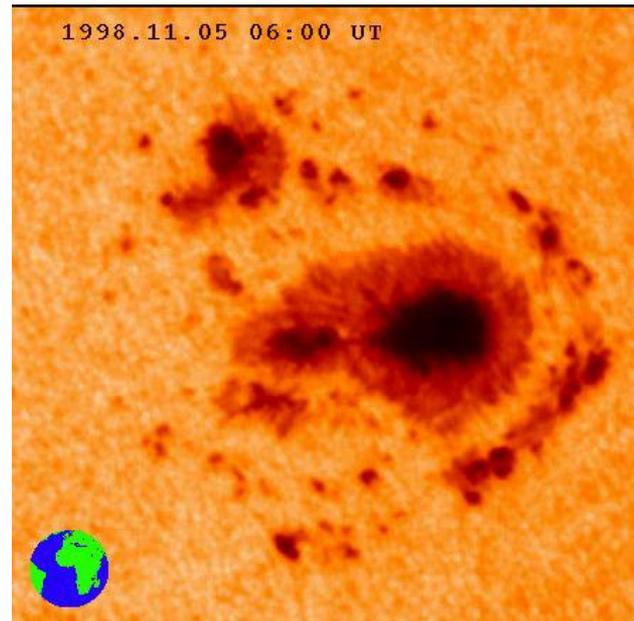


Photo d'une tache solaire



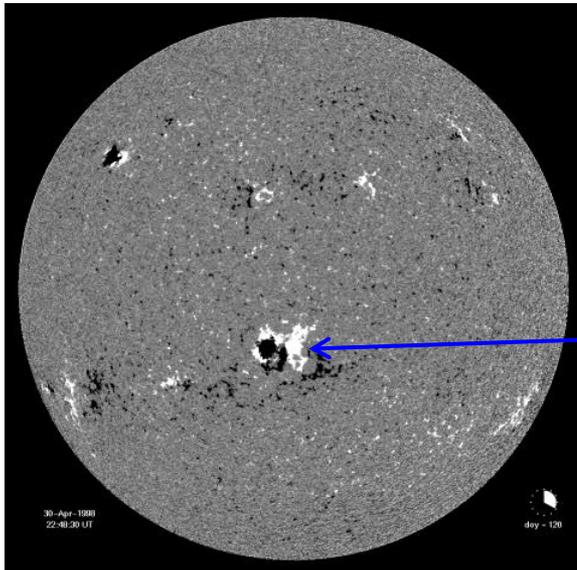
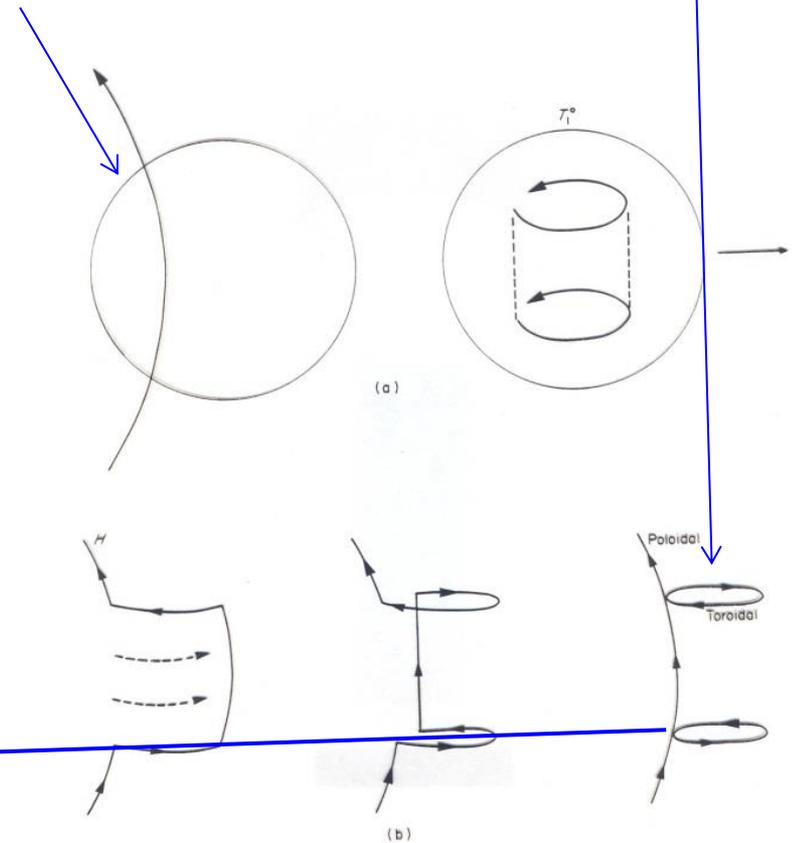
SOLEIL : Formation d'une tache solaire

Processus physique : Dynamo

- *Le soleil tourne sur lui-même.
- **Il tourne plus vite à l'équateur qu'aux poles (~ 27 jours contre ~ 31 days).
- ***La vitesse différentielle tord les lignes du champ magnétique poloïdal et créé des boucles magnétiques appelées taches solaires.

Composante poloïdale
~ 10 G

Composante toroïdale
Taches solaires ~ 3-5 kG



Magnétogramme du soleil
Données du satellite SOHO

Figure de Friedman, 1987

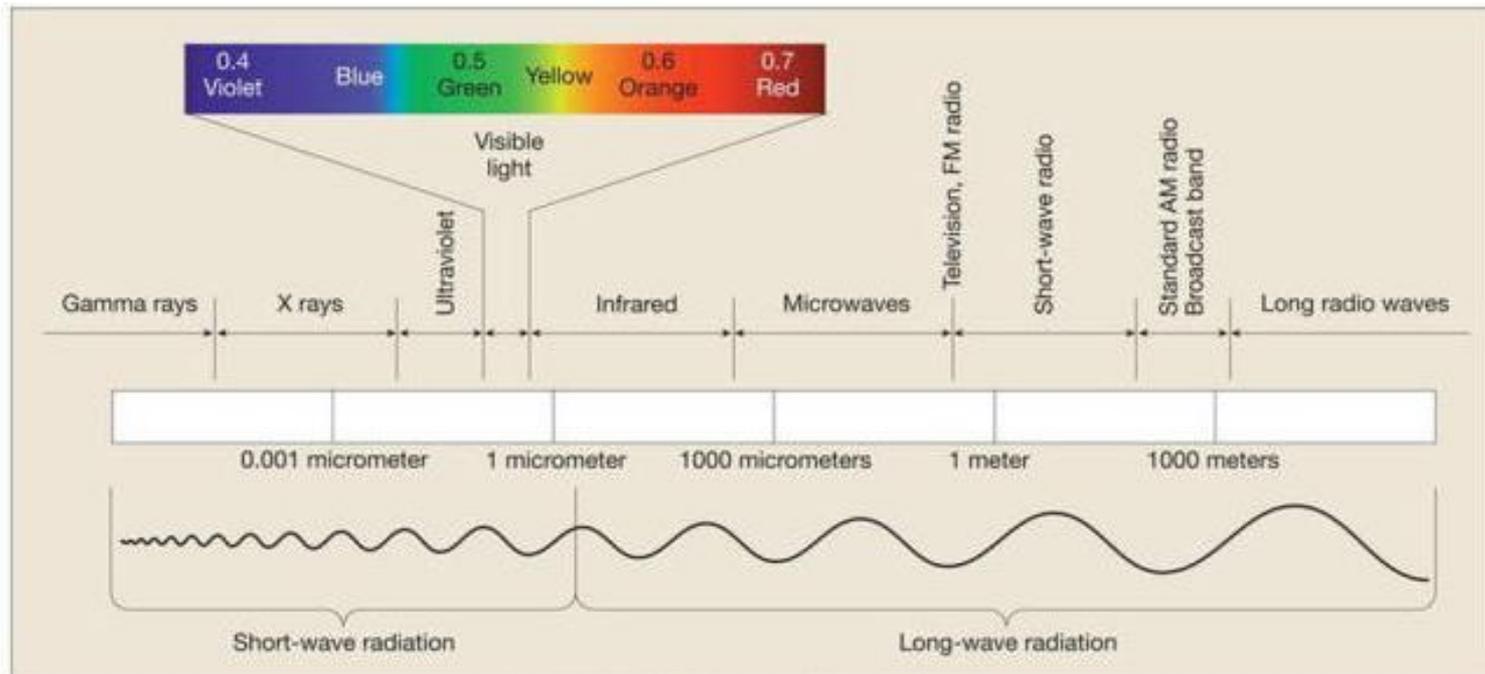
SOLEIL – TERRE : Canal 1: lié au taches solaires / champ toroïdal RADIATIONS (Lumière 8' pour arriver sur la terre)

*Régulière

**Perturbée

Solar flare: émission de rayons X en plus

Solar burst: émission radio en plus



Copyright © 2007 Pearson Prentice Hall, Inc.

SOLEIL-TERRE Canal 2 : lié au champ poloïdal VENT SOLAIRE- PARTICULES [1-4 jours]

*Régulier

**Perturbé par

Les éjections de masse coronale

Les vents solaires rapides issus des trous coronaux



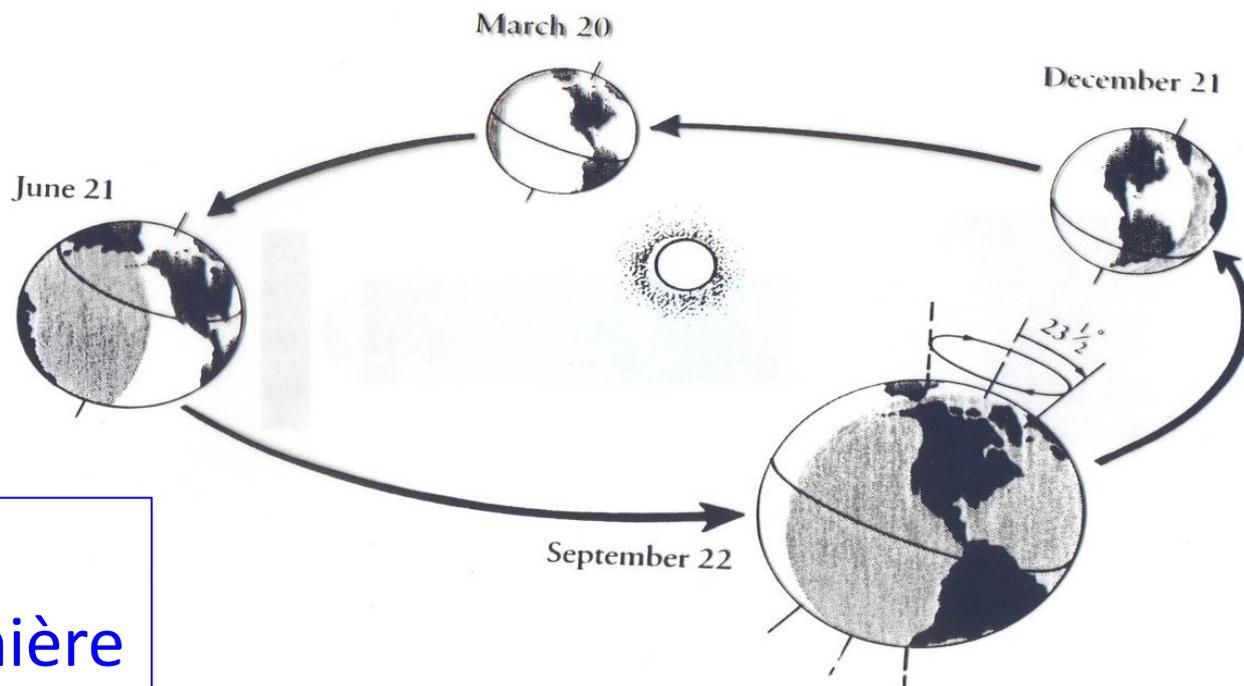
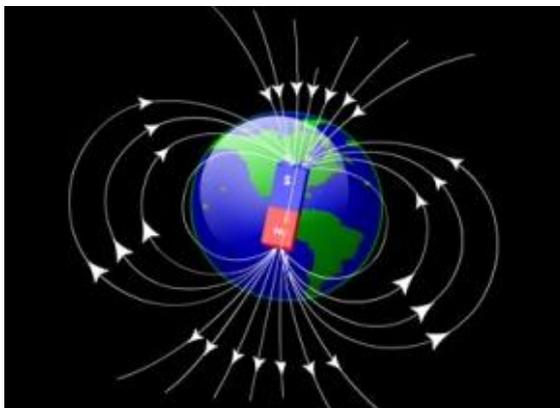
Le Vent solaire est un jet de particules qui s'échappe constamment du soleil. Il est constitué principalement par des électrons, des protons et des particules alpha ayant des énergies entre 1.5 and 10 keV
[Vitesses de 250 km/s à plus de 1000km/s]

Le Champ magnétique terrestre agit comme un bouclier par rapport aux particules solaires . Cependant, il y a des régions de l'ionosphère qui sont directement liés au milieu interplanétaire et donc au flux du vent solaire.

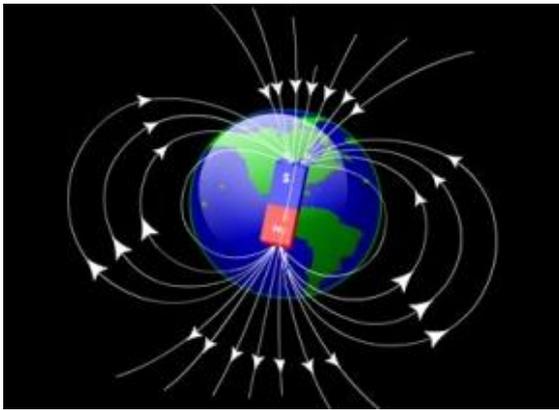
Plan

- Emissions du Soleil
- Pourquoi la Météorologie de l'Espace ?
- LE SOLEIL
- LA TERRE
- L'IONOSPHERE
 - L'ionosphère aurorale et le phénomène des aurores
- Du Soleil vers la Terre / perturbations des systèmes GNSS et radar
 - Extra radiations : Solar Flare (Radiation X), Solar bursts (Ondes radio)
 - CME , chocs, Vents solaires rapides,
- Orages magnétiques
- Scintillations du signal GNSS
- Le réseau ISWI

LA TERRE : un corps magnétique en mouvement

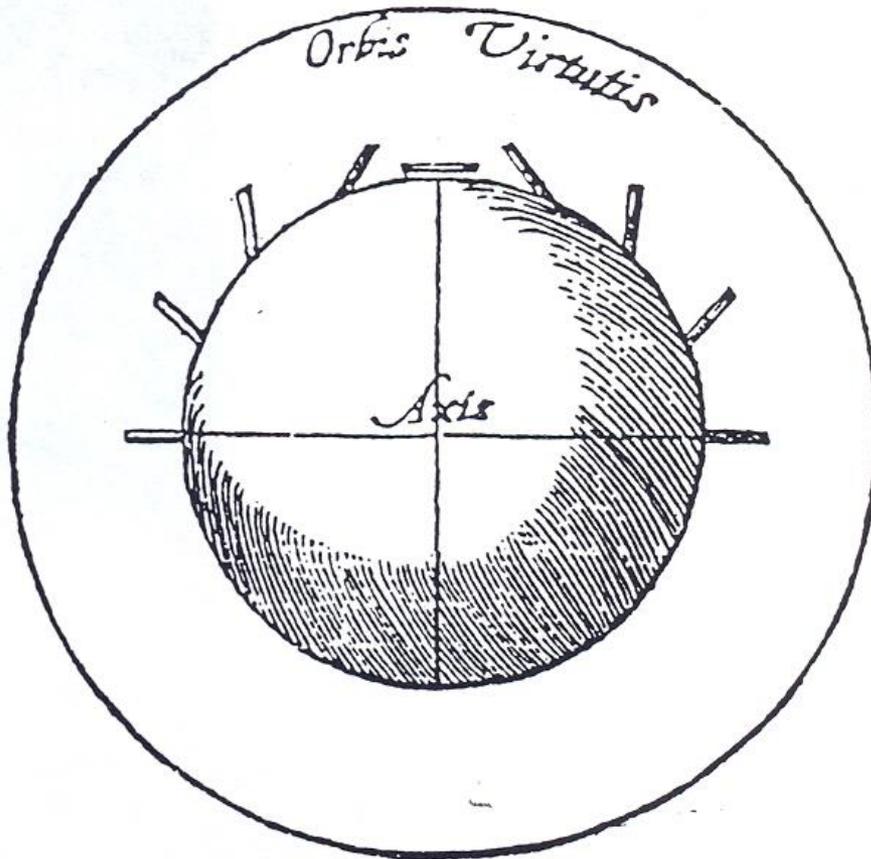


Variation diurne
Variation saisonnière



Le Champ magnétique terrestre

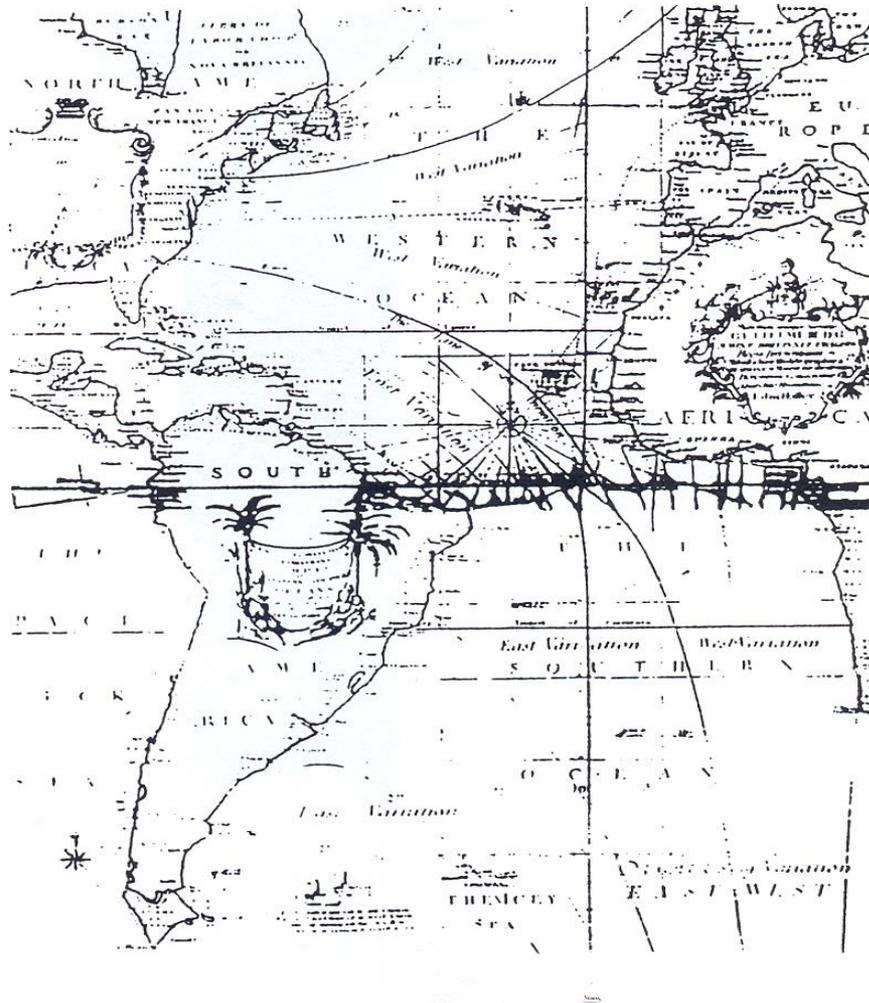
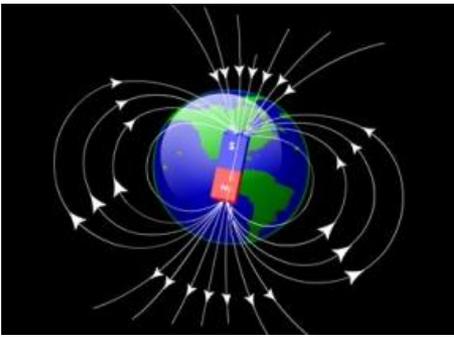
Connu depuis des millénaires
Concept de l'aimant terrestre



Gilbert 1600



Le Champ magnétique terrestre



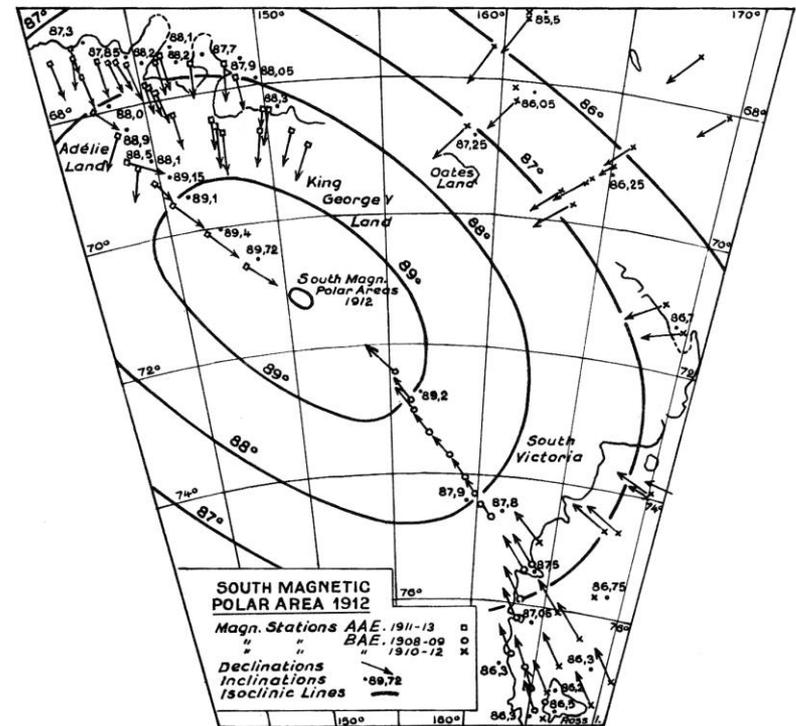
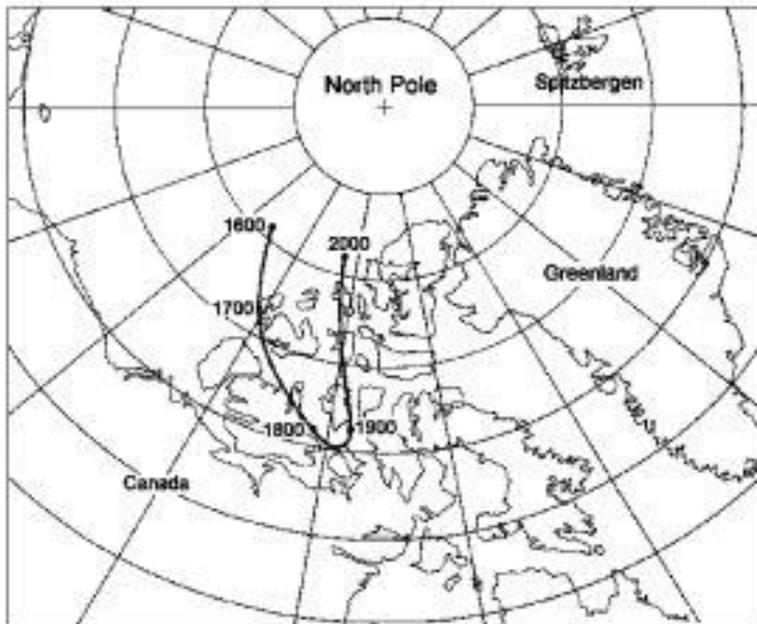
Première carte du
Champ magnétique
terrestre

Halley , 1701

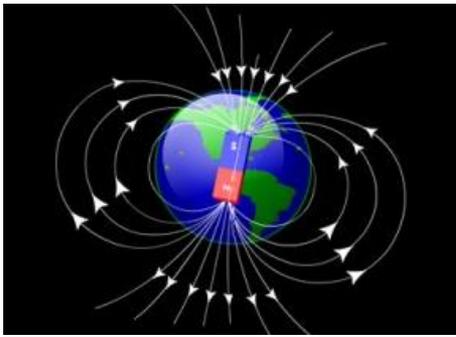
Le Champ magnétique terrestre

boussole + chiens de traineaux

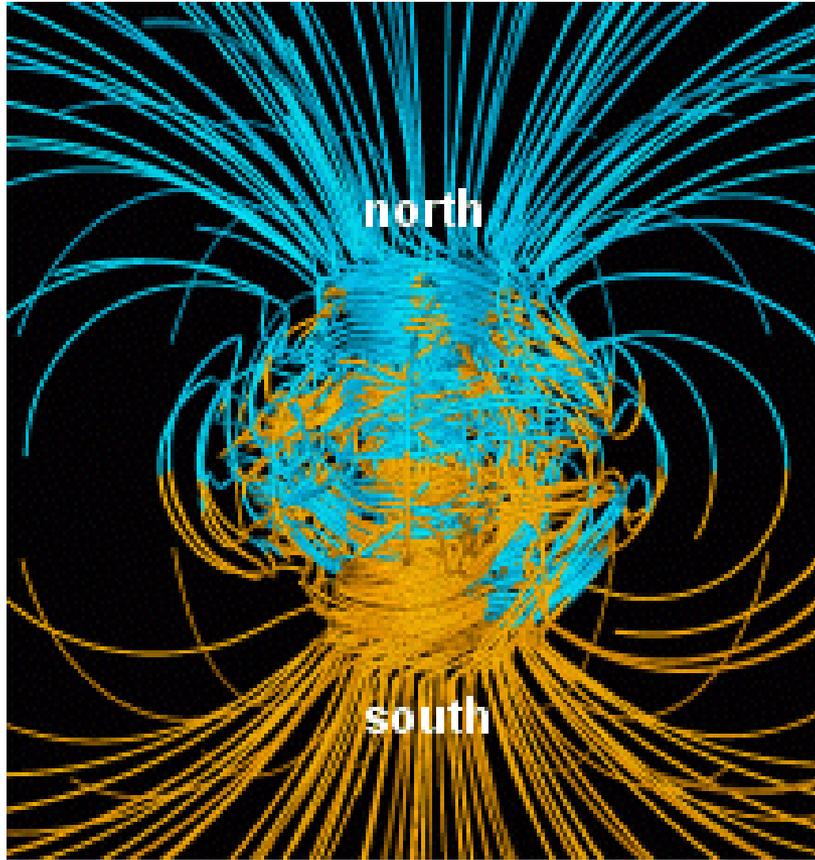
Mouvement du Pôle magnétique nord depuis 1600



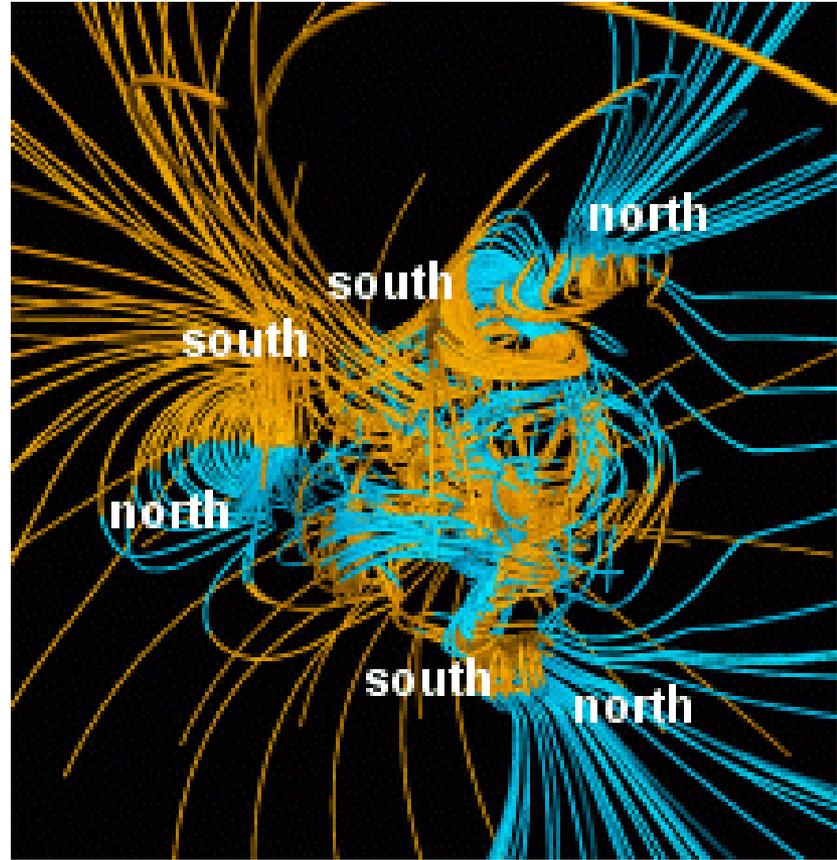
Pôle magnétique sud en 1912, WEBB



Le Champ magnétique terrestre renversement tous $\sim 250\ 000$ ans



Entre deux renversements



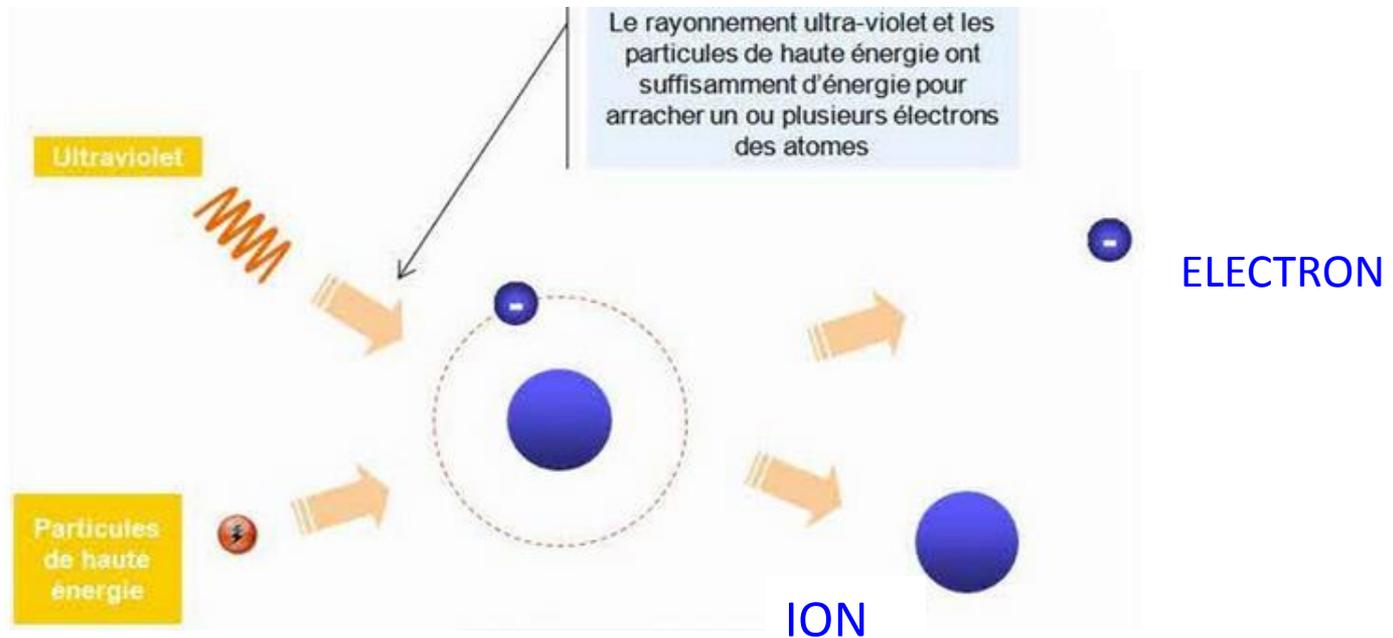
durant un renversement

Plan

- Emissions du Soleil
- Pourquoi la Météorologie de l'Espace ?
- LE SOLEIL
- LA TERRE
- L'IONOSPHERE
 - L'ionosphère aurorale et le phénomène des aurores
- Du Soleil vers la Terre / perturbations des systèmes GNSS et radar
 - Extra radiations : Solar Flare (Radiation X), Solar bursts (Ondes radio)
 - CME , chocs, Vents solaires rapides,
- Orages magnétiques
- Scintillations du signal GNSS
- Le réseau ISWI

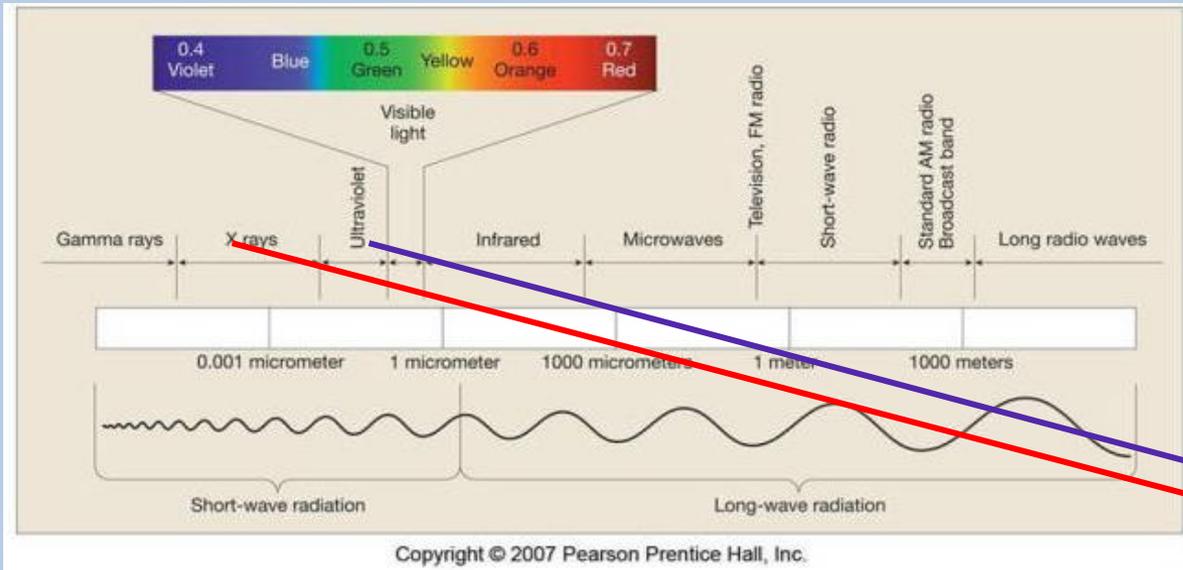
L'ionosphère

couche ionisée ~ 50 à plus de 800km



la photo ionisation

RADIATIONS REGULIERES



Processus physique : Photo ionisation

L'ionosphère est créée par ionisation de l'atmosphère par les radiations UV, EUV and X du soleil, aux les altitudes comprises entre 50 km et plus de ~800 km

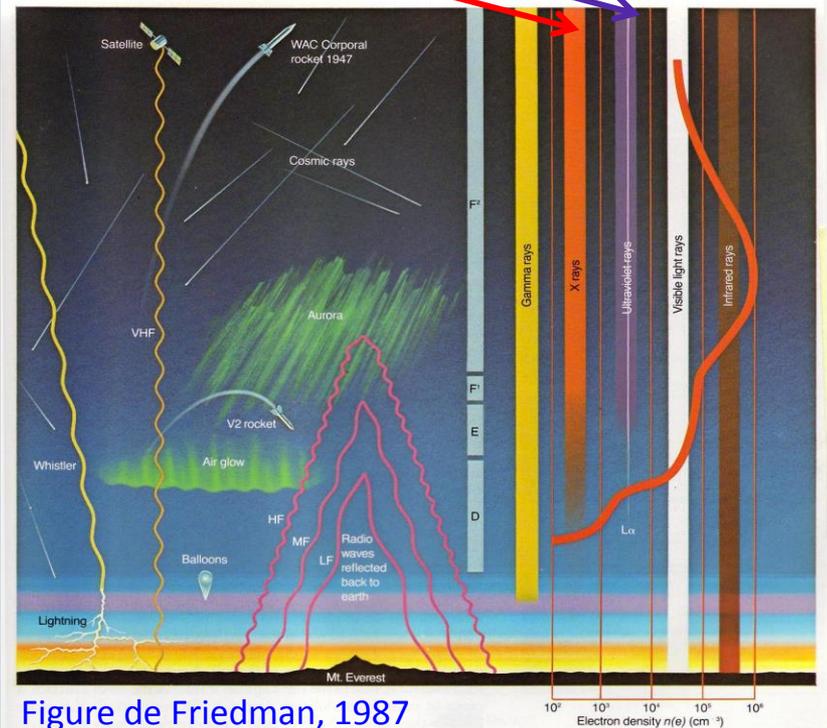
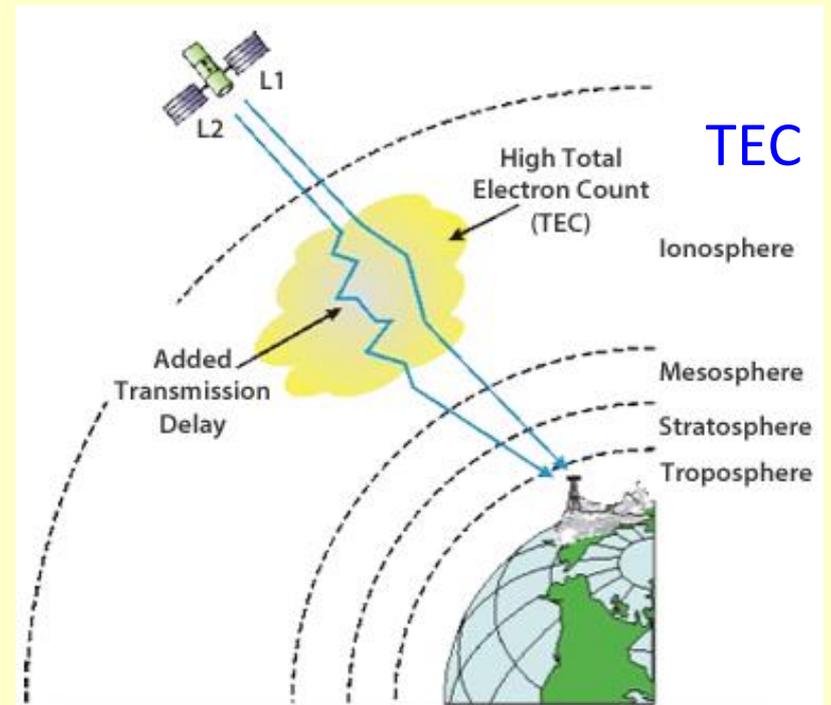
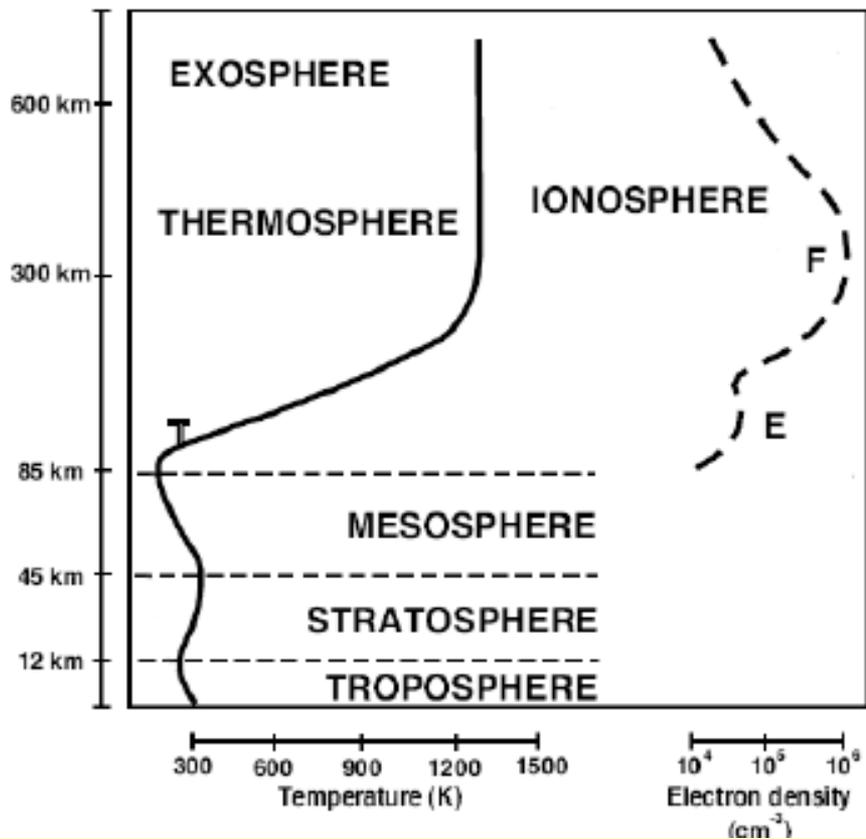


Figure de Friedman, 1987

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

L'ionosphère est le plus grand perturbateur du signal GNSS voir TP Rolland



La troposphère perturbe aussi le signal GNSS

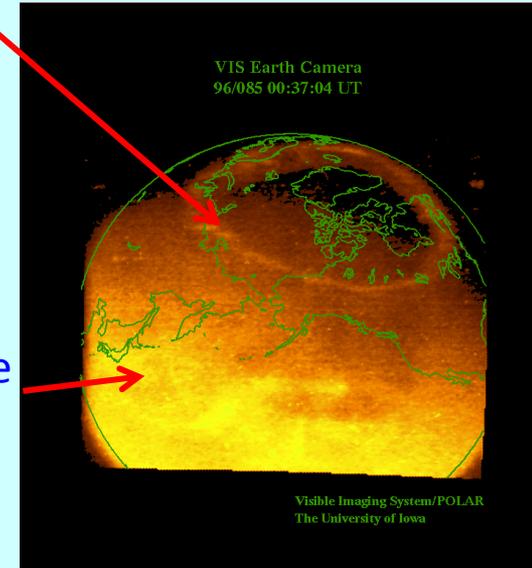
IONOSPHERE AURORALE (Photo ionisation + précipitation)

AURORE : Le Phénomène de météorologie de l'Espace le plus spectaculaire

Ovale auroral due aux précipitations des particules du vent solaire

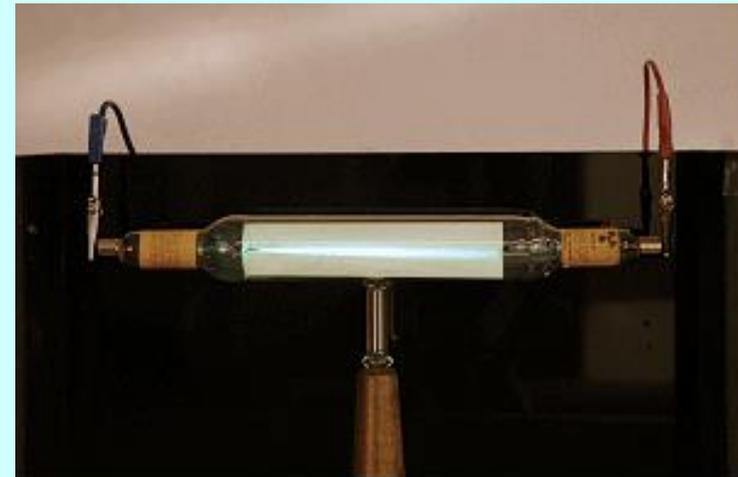


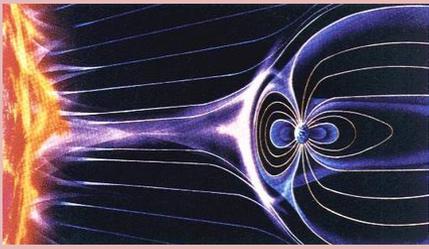
Côté jour
Radiation régulière
du soleil
photo ionisation



Processus physiques: précipitation et ionisation

Les particules suivent les lignes du champ magnétique terrestre et précipitent dans l'atmosphère qu'elles ionisent. Il y a un accroissement de la densité électronique et donc du TEC



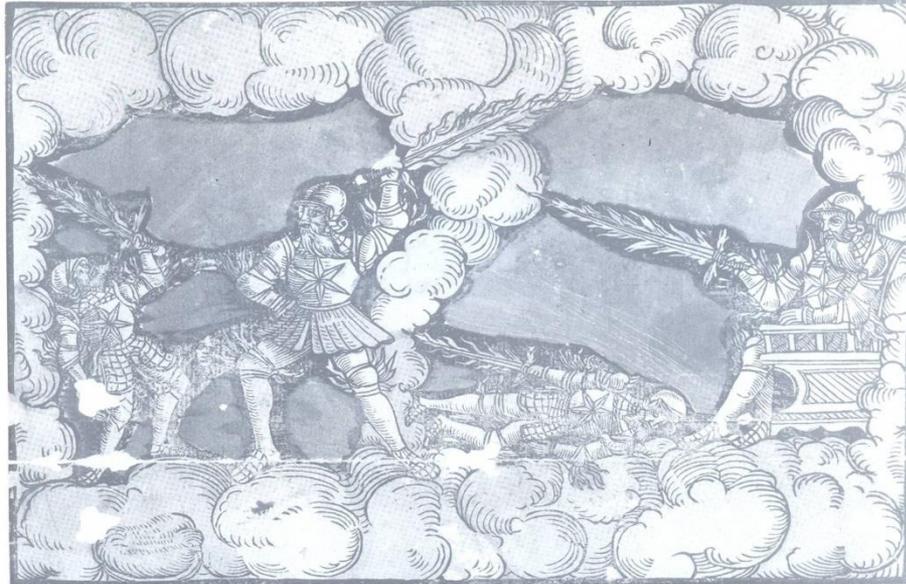


Tempêtes magnétiques : la zone aurorale s'étend vers les basses latitudes

Représentation de la grande aurore du 24 juillet 1554 observée en Allemagne, en Suisse (Bibliothèque particulière)

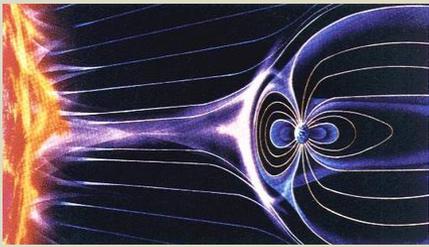
Legrand et al. 1991

L'Aurore se situe à haute altitude 100 km



Aurore observée à Rouen
Le 11 avril 2001. Les fortes tempêtes magnétiques affectent la Terre jusqu'à l'équateur

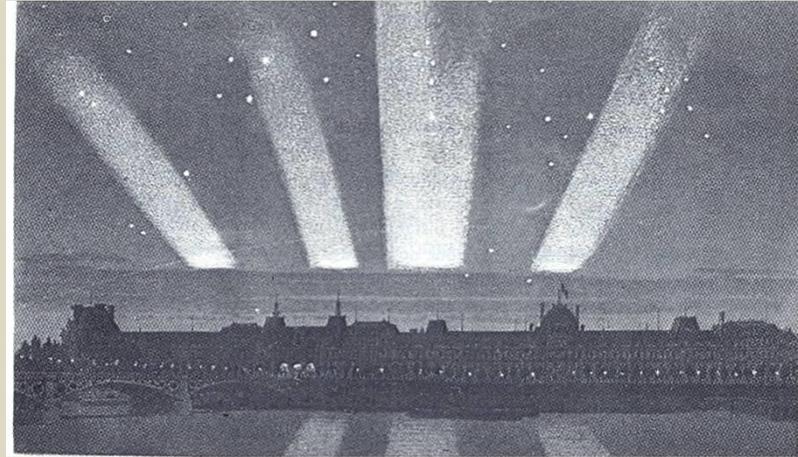




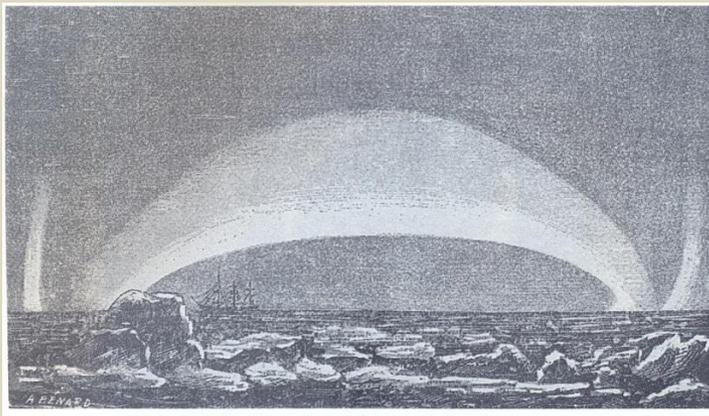
Jean-Jacques Dortous de Mairan – 1733
Académicien sous Louis XIV



**a expliqué
les aurores**

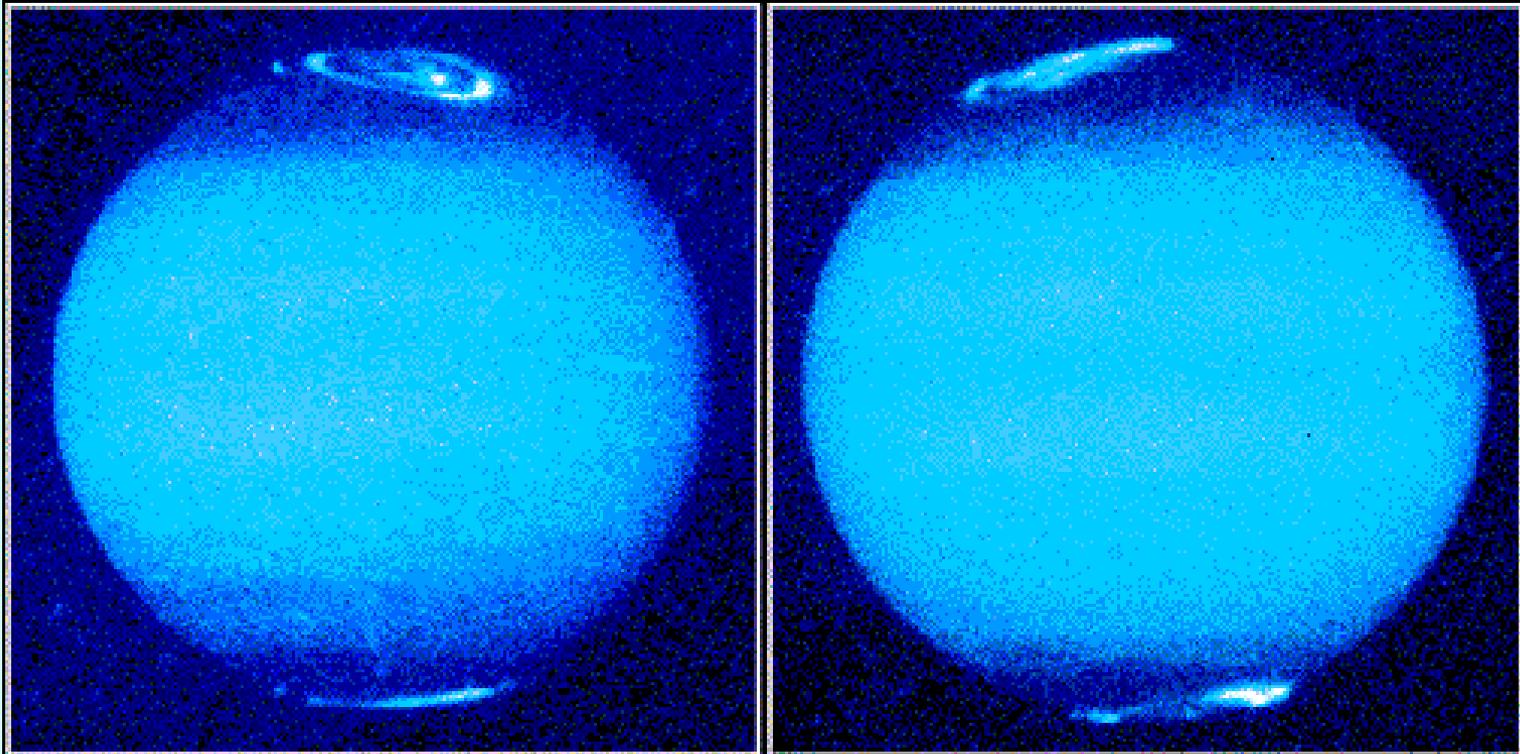


Aurore boréale observée à Paris le 13 mai 1869,
(L'Atmosphère, Flammarion)



Arc Auroral observé par A.E.
Nordenskiöld durant son hivernage
près du détroit de Behring le 21
mars 1879
(les aurores polaires, Angot Paris
1895)

Aurores sur la planète Jupiter



On peut observer de aurores sur toutes les planètes du système solaire qui ont un champ magnétique :

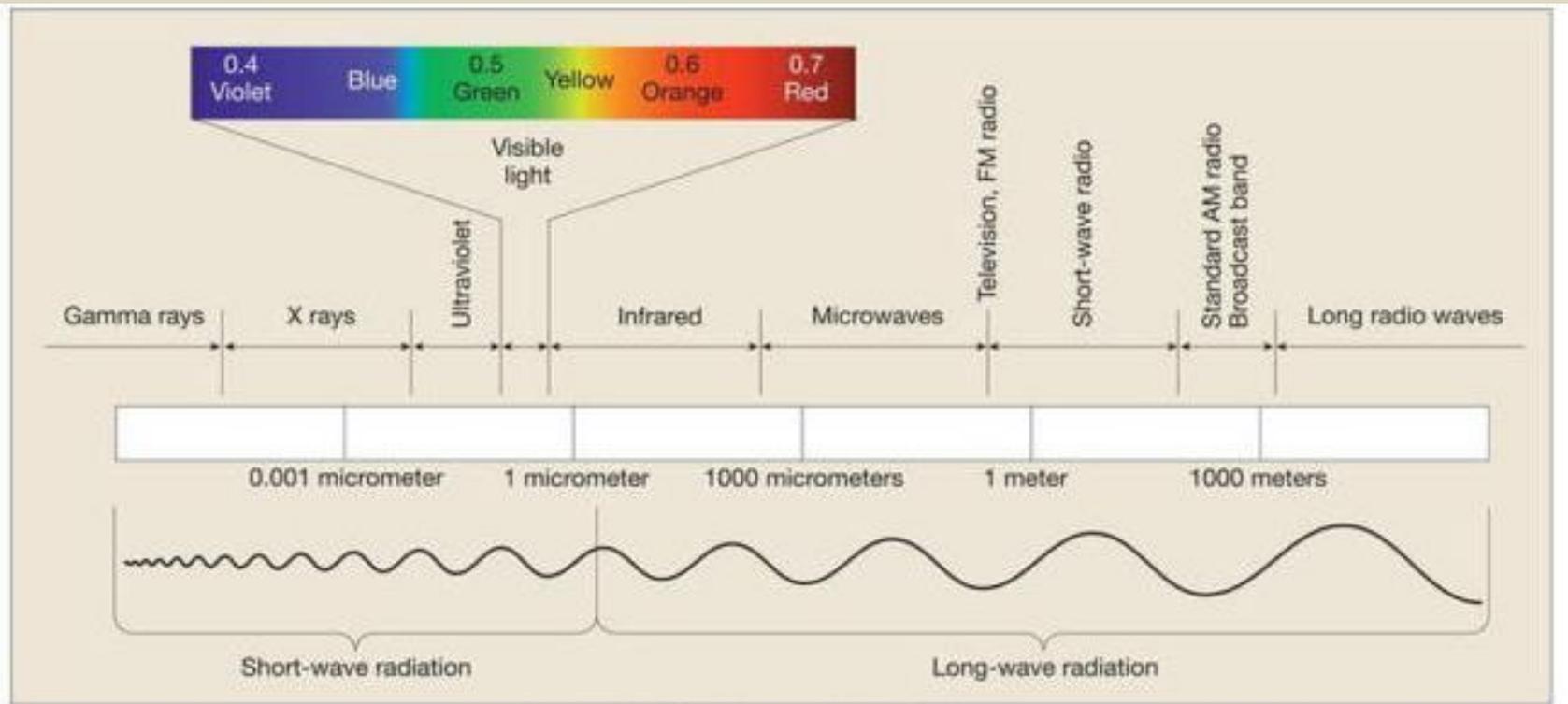
Mercure, Jupiter, Saturne, Uranus, Neptune

La vie sur Terre est elle liée à la présence d'un champ magnétique ?

Plan

- Emissions du Soleil
- Pourquoi la Météorologie de l'Espace ?
- LE SOLEIL
- LA TERRE
- L'IONOSPHERE
 - L'ionosphère aurorale et le phénomène des aurores
- Du Soleil vers la Terre / perturbations des systèmes GNSS et radar
 - Extra radiations : Solar Flare (Radiation X), Solar bursts (Ondes radio)
 - CME , chocs, Vents solaires rapides,
- Orages magnétiques
- Scintillations du signal GNSS
- Le réseau ISWI

CANAL 1 : RADIATIONS IRREGULIERES [8']



Copyright © 2007 Pearson Prentice Hall, Inc.

SOLAR FLARE

Rayons X supplémentaires

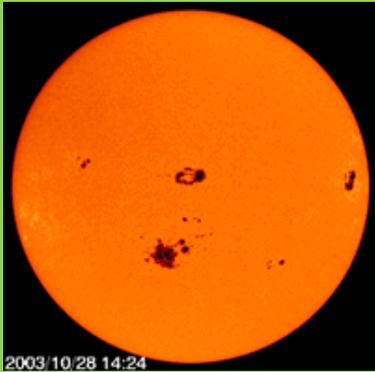
SOLAR BURST

Ondes radio supplémentaires

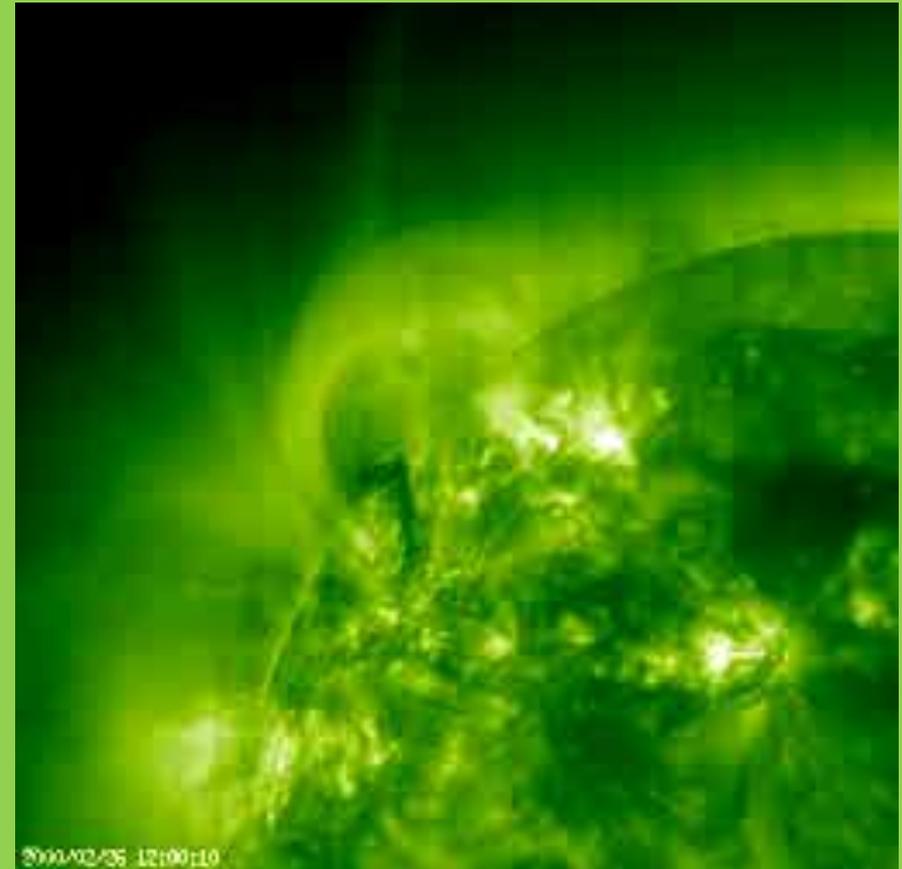
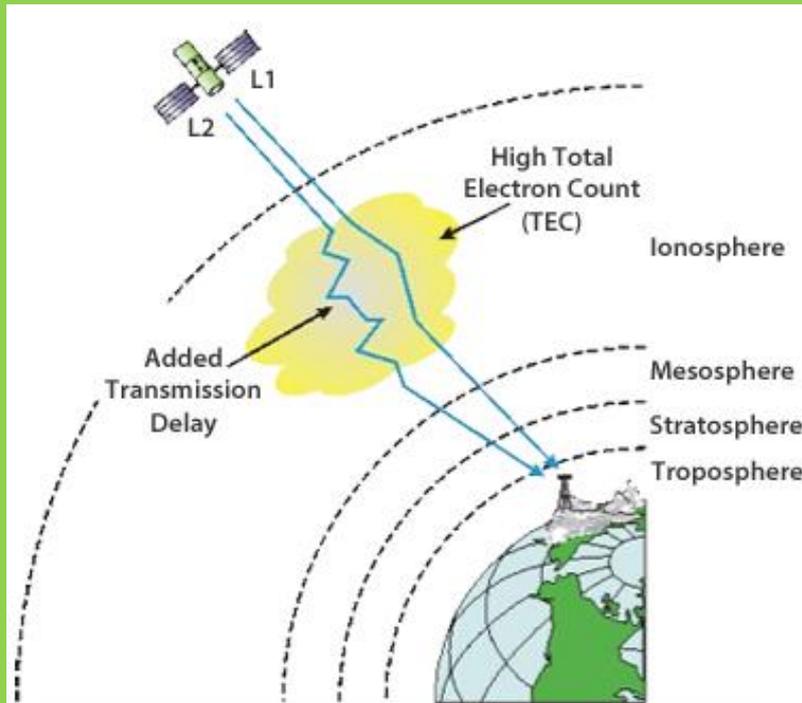
SOLAR FLARE (8')

Processus physique

Radiation solaire supplémentaire => Photo ionisation



Les radiations X supplémentaires émises par le soleil ionisent directement l'atmosphère et accroissent la densité électronique et donc le TEC.

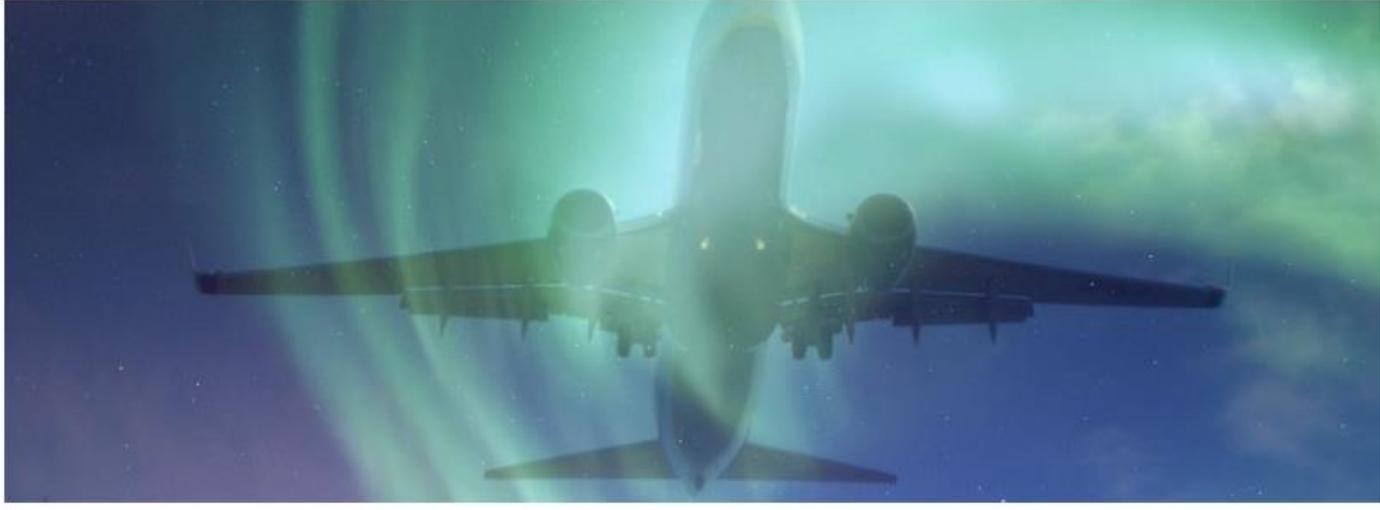


Données du satellite SOHO

The Sweden Case: Airplanes disappear from radars due to "solar storm"

Posted by Adonai on November 05, 2015 in categories Featured articles, Geomagnetic storms, Solar activity

[Follow @TheWatchers_](#)



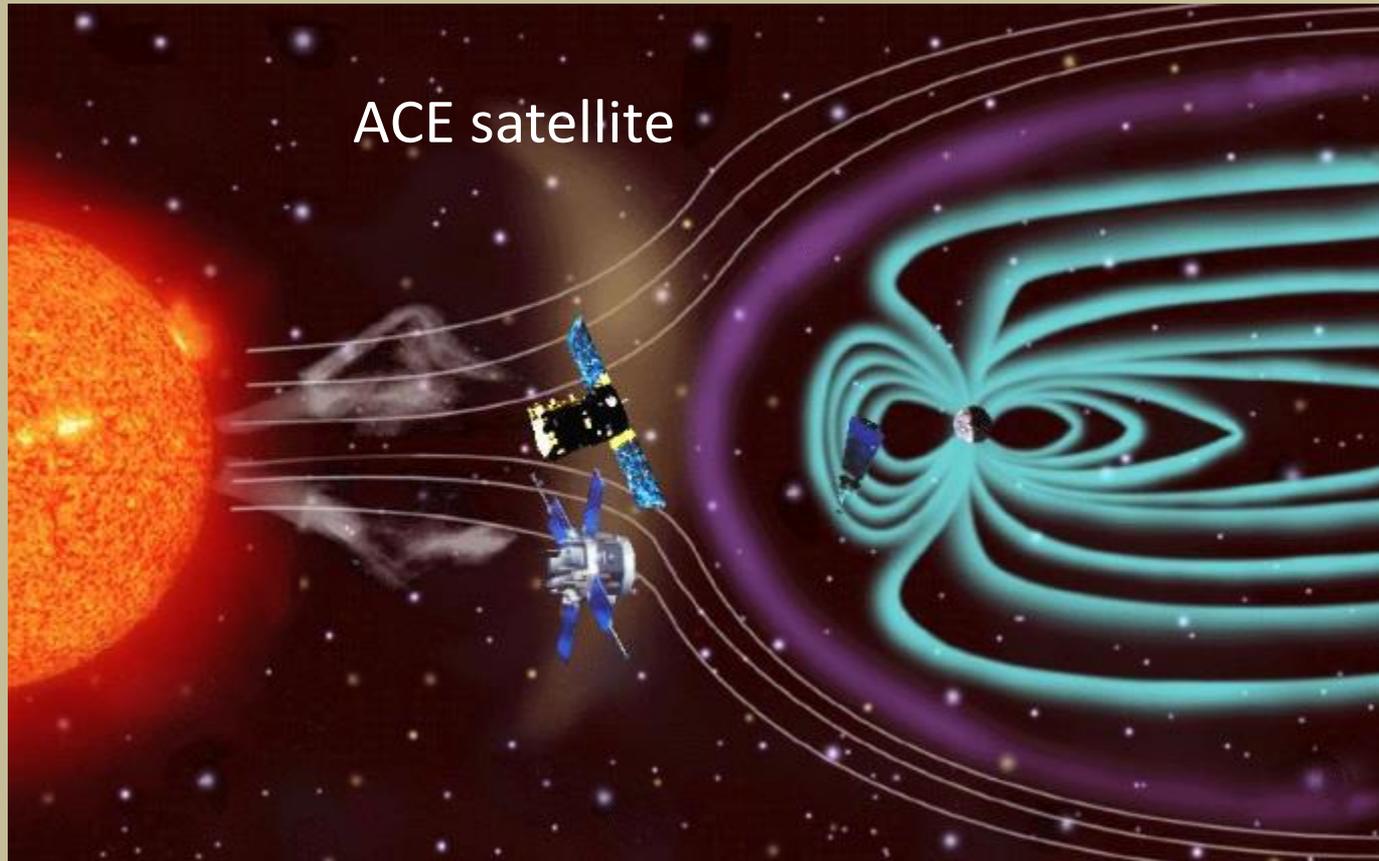
Radio Bursts : extra radio emission + Solar Flare: extra radiation X

“Le 4 novembre **2015**, il y a eu un ‘burst’ radio de [**15.30 to 16.30 LT**] excédant tout les évènements précédents. L’évènement était si fort que tous les systèmes GPS et radar ne fonctionnaient plus normalement. Tous les récepteurs étaient saturés par des émissions radio solaires très fortes et donc aveugles. “

de Christian Monstein

DU SOLEIL A LA TERRE

CANAL 2 : VENT SOLAIRE /PARTICULES[1-4 jours]



Le vent solaire transporte une partie du champ magnétique solaire vers la terre : le Champ magnétique interplanétaire, IMF.

INTERACTION ENTRE LE VENT SOLAIRE ET LA MAGNETOSPHERE

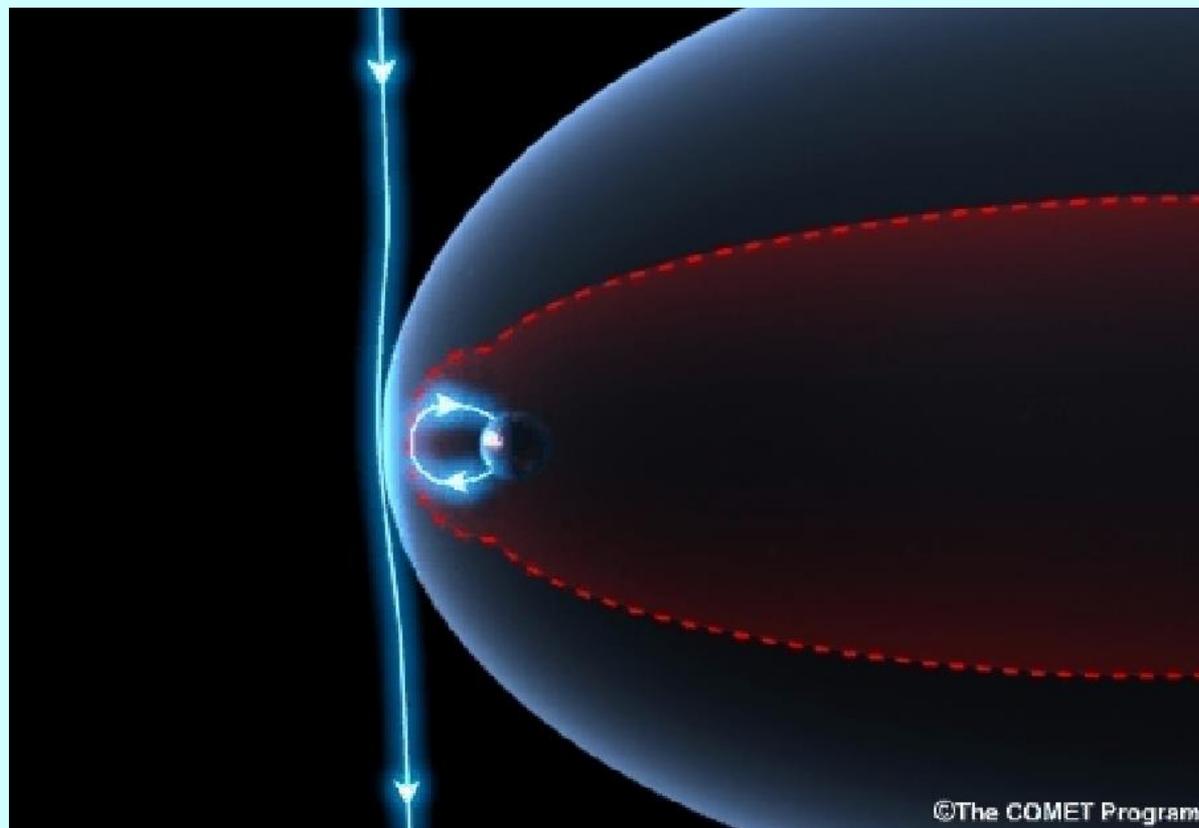
Processus physiques : Reconnection et Dynamo

Si la direction du champ magnétique interplanétaire IMF est opposée à la direction du champ magnétique terrestre, il y a reconnection entre le champ magnétique IMF et le champ magnétique terrestre : Il y a un orage magnétique.

Paramètres clefs
de la météo de l'Espace

Bz : composante de IMF

Vs : Vitesse du vent
solaire



Dynamo Vent solaire– Magnetosphere

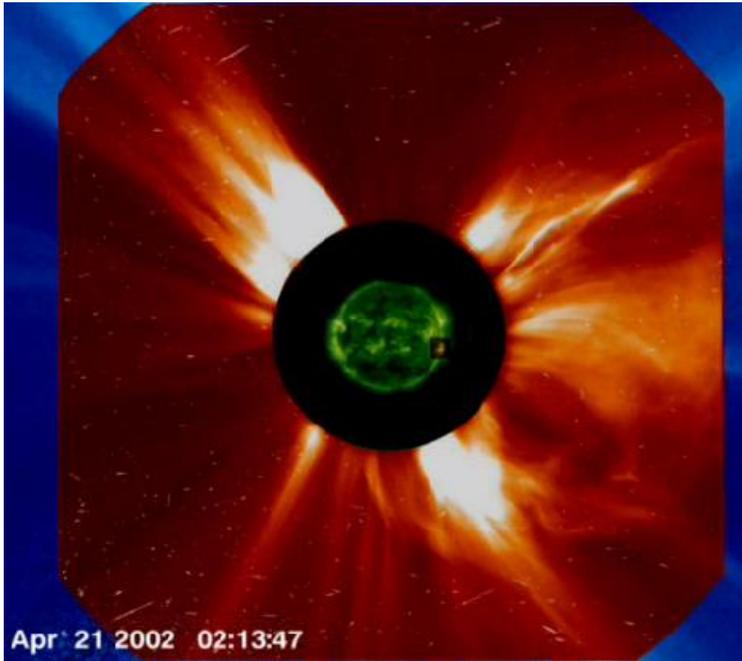
Le mouvement du vent solaire est converti en énergie électrique

EJECTION DE MASSE CORONALE

CME: des millions de tonnes de matière sont éjectées du soleil

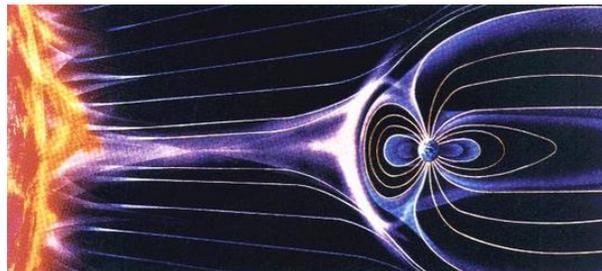
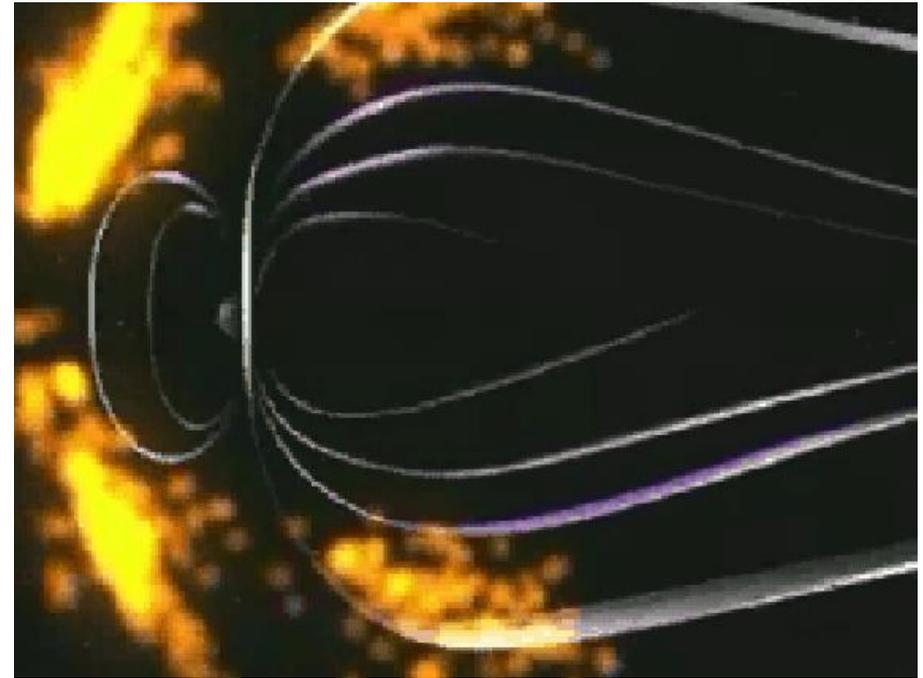
Près du soleil

Données satellite

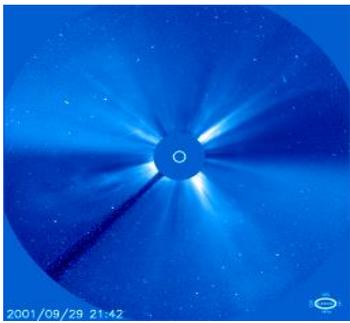


Du soleil à la terre

Film de la NASA

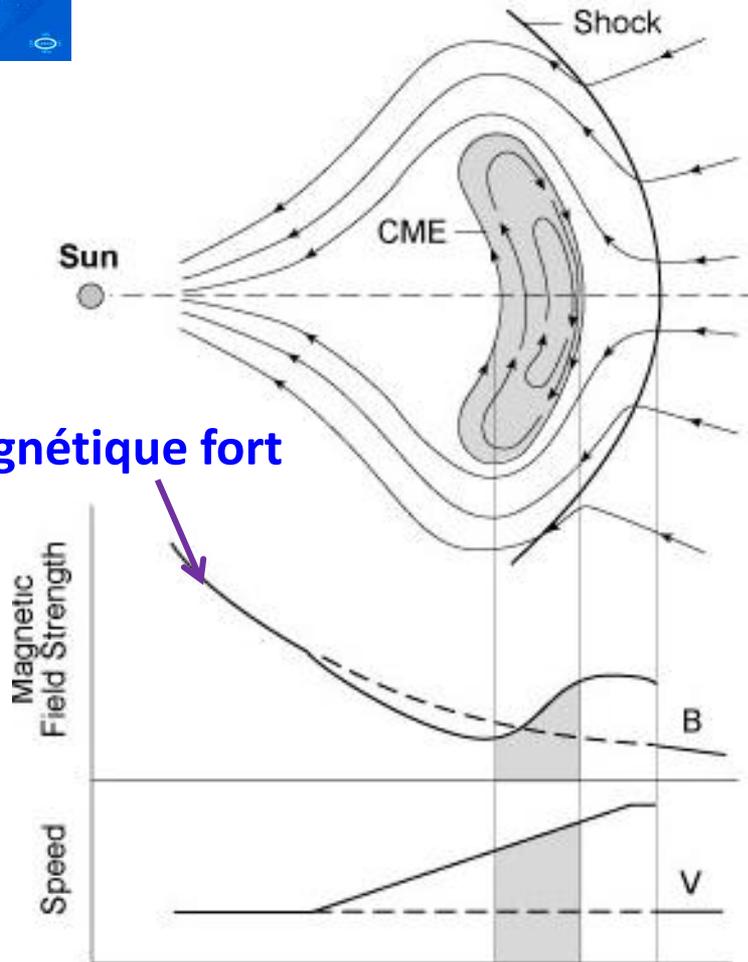


Les CME produisent des orages magnétiques
Si le champ magnétique transporté par la CME est
dirigé vers le sud



CME interplanétaire chocs

<http://ase.tufts.edu/cosmos/pictures/sept09/>



Champ magnétique fort

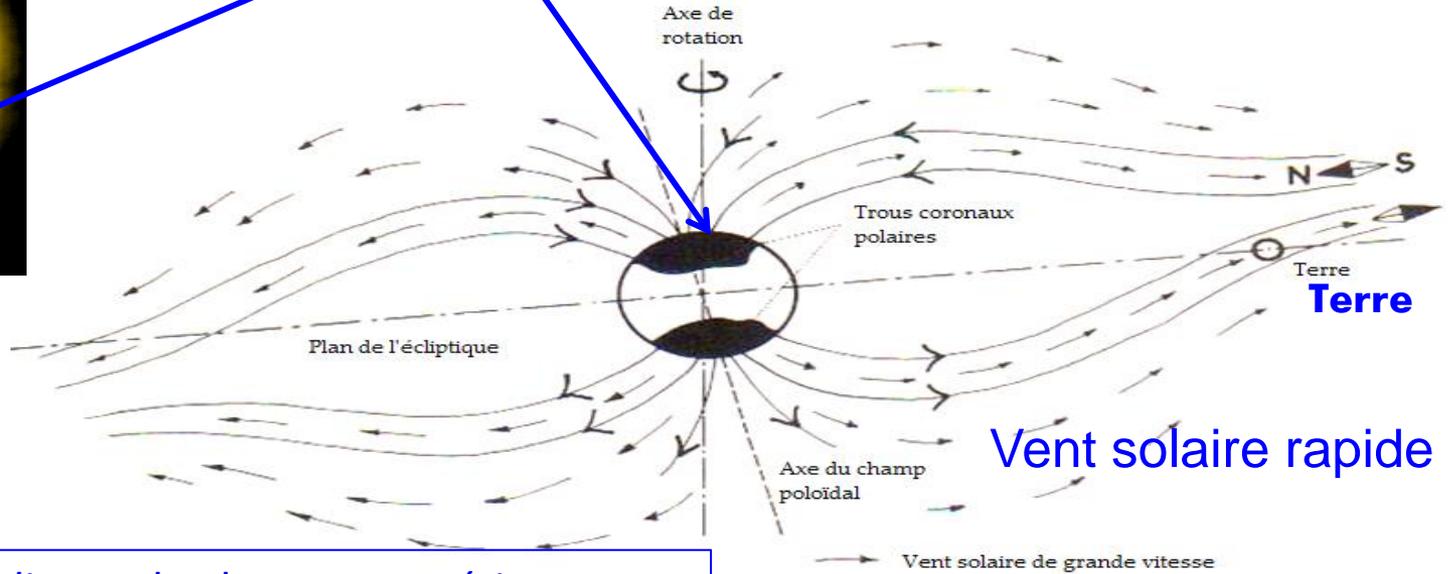
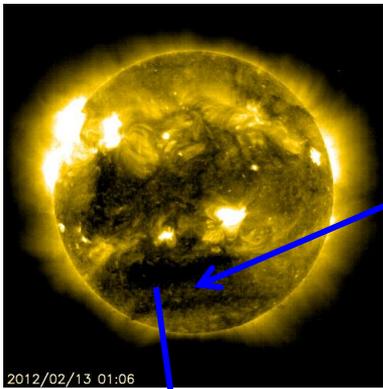
Une masse d'éjection coronale CME pousse un choc interplanétaire

Accroissement de la vitesse du vent solaire V et de la force du champ magnétique B par le choc interplanétaire précédent la CME.

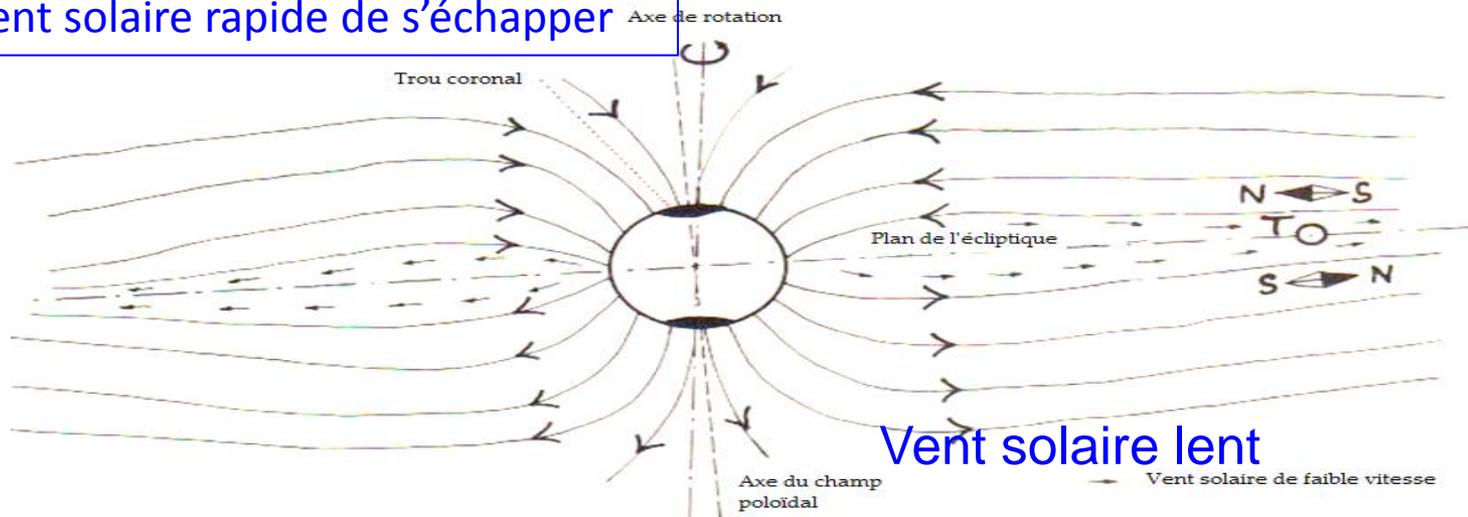
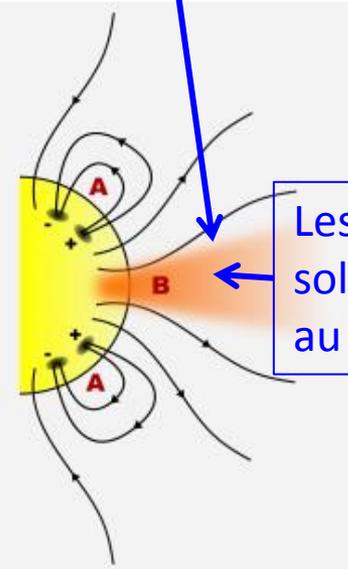
Il y a une occurrence maximum des CME au maximum du cycle de taches solaires

Trou coronal solaire

Figure de J-P Legrand, 1984



Les lignes du champ magnétique solaire sont ouvertes et permettent au vent solaire rapide de s'échapper



Maximum d'occurrence des vents solaires rapides au minimum du cycles de taches

Plan

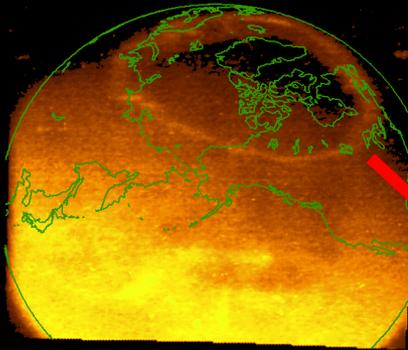
- Emissions du Soleil
- Pourquoi la Météorologie de l'Espace ?
- LE SOLEIL
- LA TERRE
- L'IONOSPHERE
 - L'ionosphère aurorale et le phénomène des aurores
- Du Soleil vers la Terre / perturbations des systèmes GNSS et radar
 - Extra radiations : Solar Flare (Radiation X), Solar bursts (Ondes radio)
 - CME , chocs, Vents solaires rapides,
- Orages magnétiques
- Scintillations du signal GNSS
- Le réseau ISWI

Orage magnétique/Courants électriques ionosphériques

L'oval auroral s'étend vers les moyennes latitudes

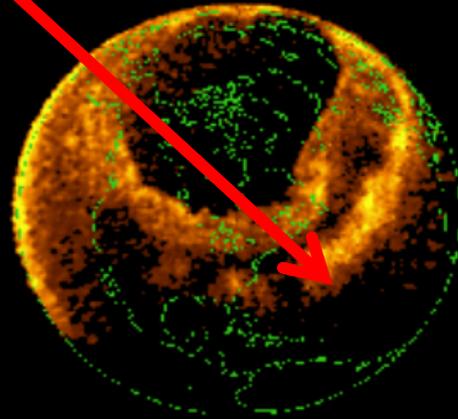
Les courants électriques ionosphériques affectent les moyennes latitudes

VIS Earth Camera
96/085 00:37:04 UT



Visible Imaging System/POLAR
The University of Iowa

régulier

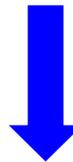
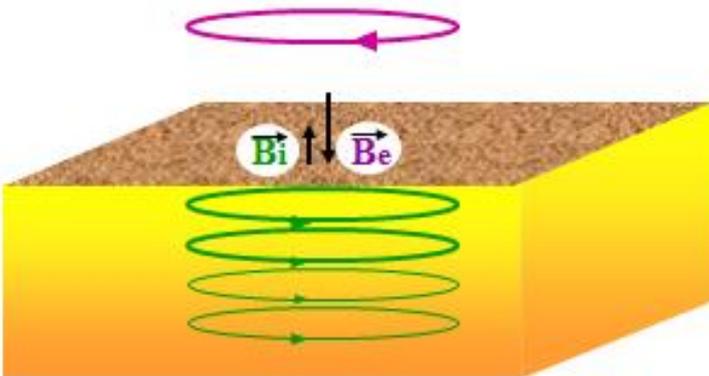


perturbé

March 13, 1989 - The Quebec Blackout Storm

Most newspapers that reported this event considered the spectacular aurora to be the most newsworthy aspect of the storm. Seen as far south as Florida and Cuba, the vast majority of people in the Northern Hemisphere had never seen such a spectacle in recent memory. Electrical ground currents created by the magnetic storm found their way into the power grid of the Hydro-Quebec Power Authority and the entire Quebec power grid collapsed. Six million people were affected as they woke to find no electricity to see them through a cold Quebec wintry night. This storm could easily have been a \$6 billion catastrophe affecting most US East Coast cities.

Les courants électriques ionosphériques induisent des courants telluriques



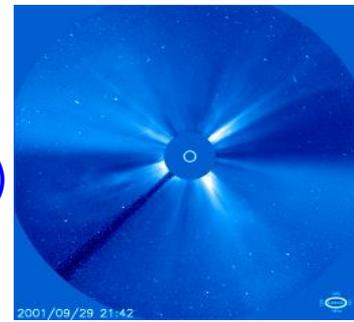
Court circuit dans les transformateurs



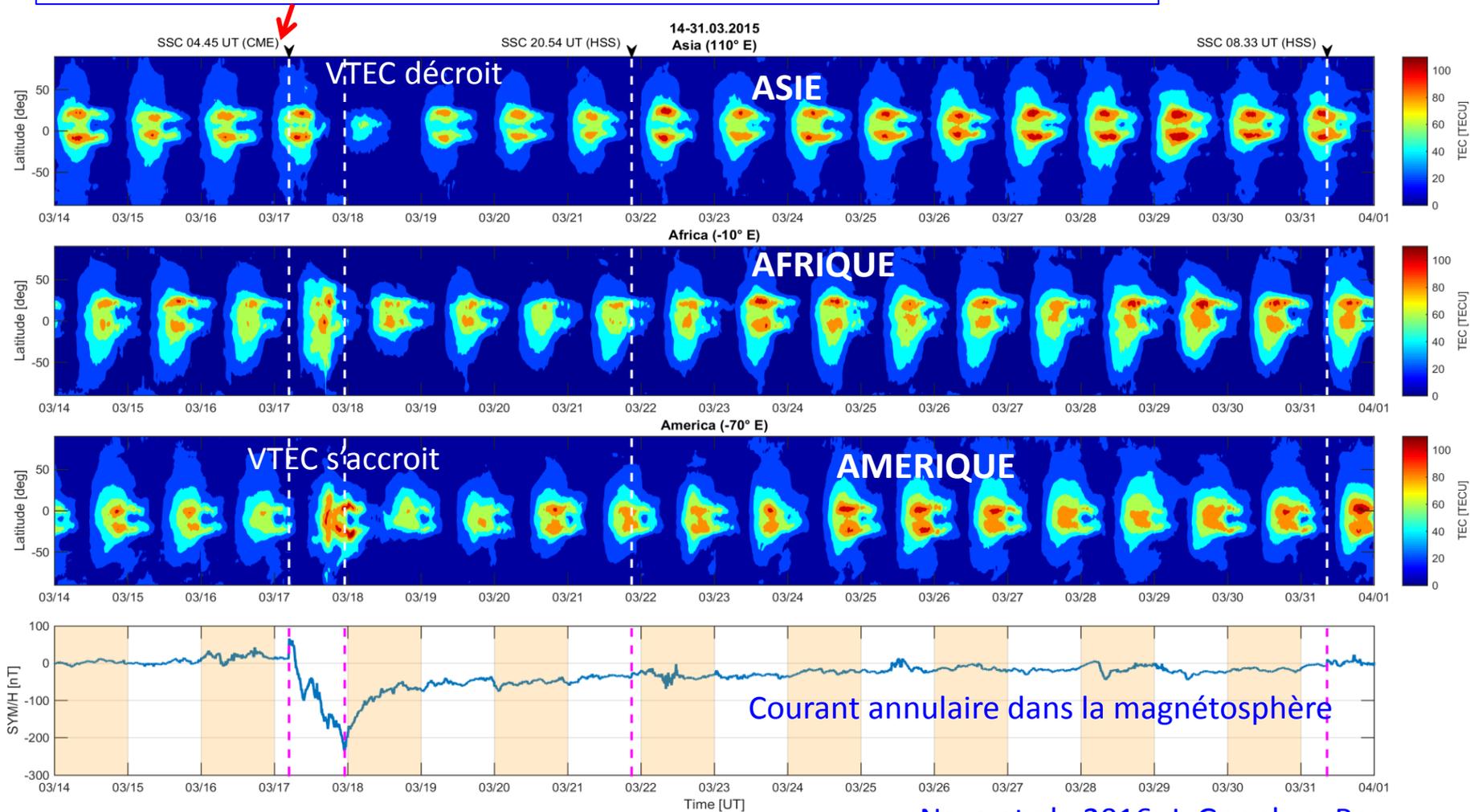
Dompage sur un transformateur

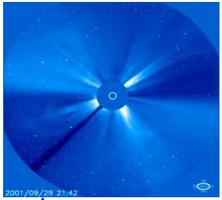
ORAGE MAGNETIQUE St PATRICK : CARTES de VTEC

Variations près de l'équateur magnétique due à une CME (~200 GPS stations)



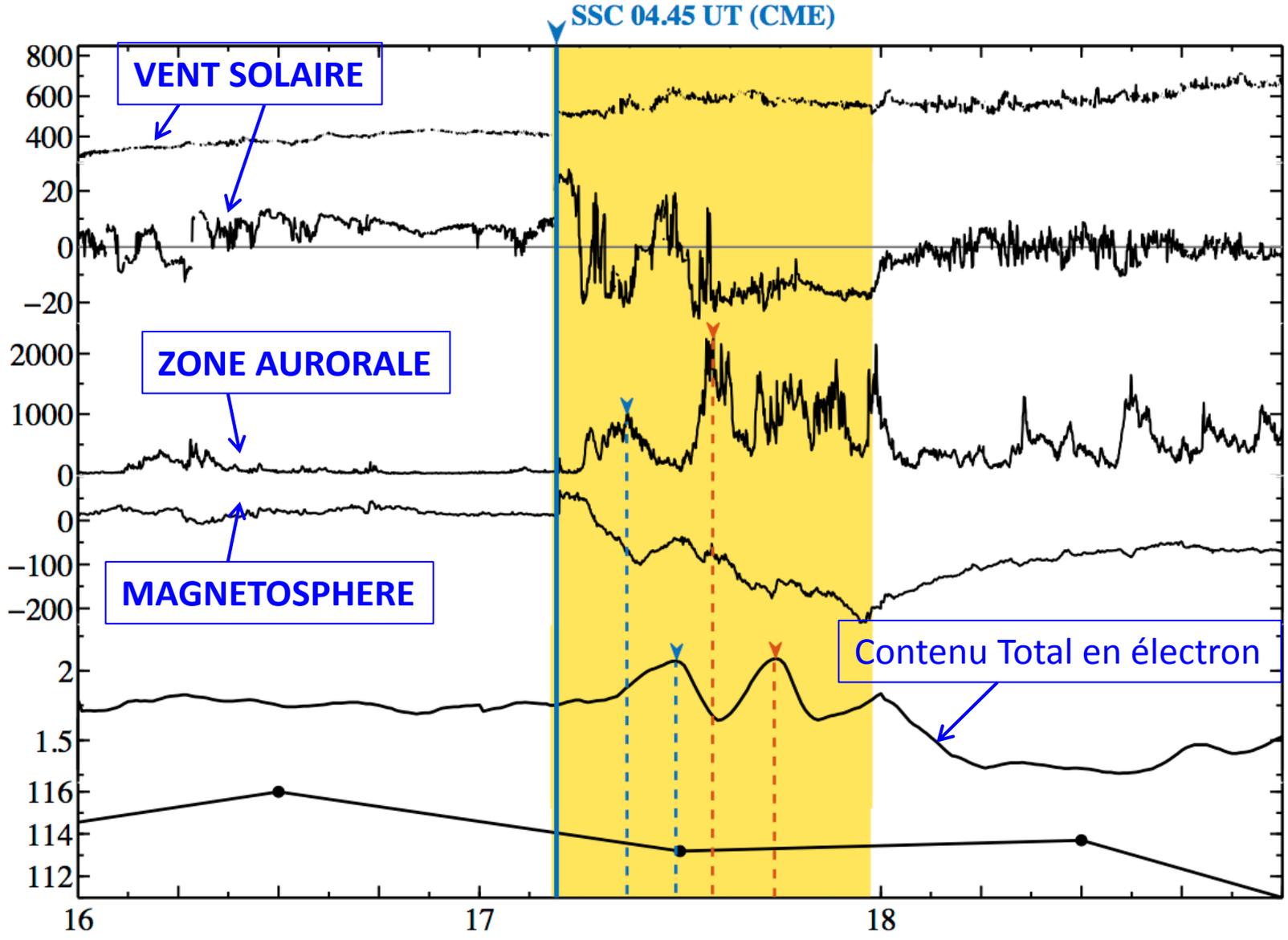
Impacte de la CME (évènement solaire , 15 Mars ~ 00.45 - 02.00UT)





CONTEXT GLOBAL DE L'ORAGE MAGNETIQUE St PATRICK'

SOLEIL



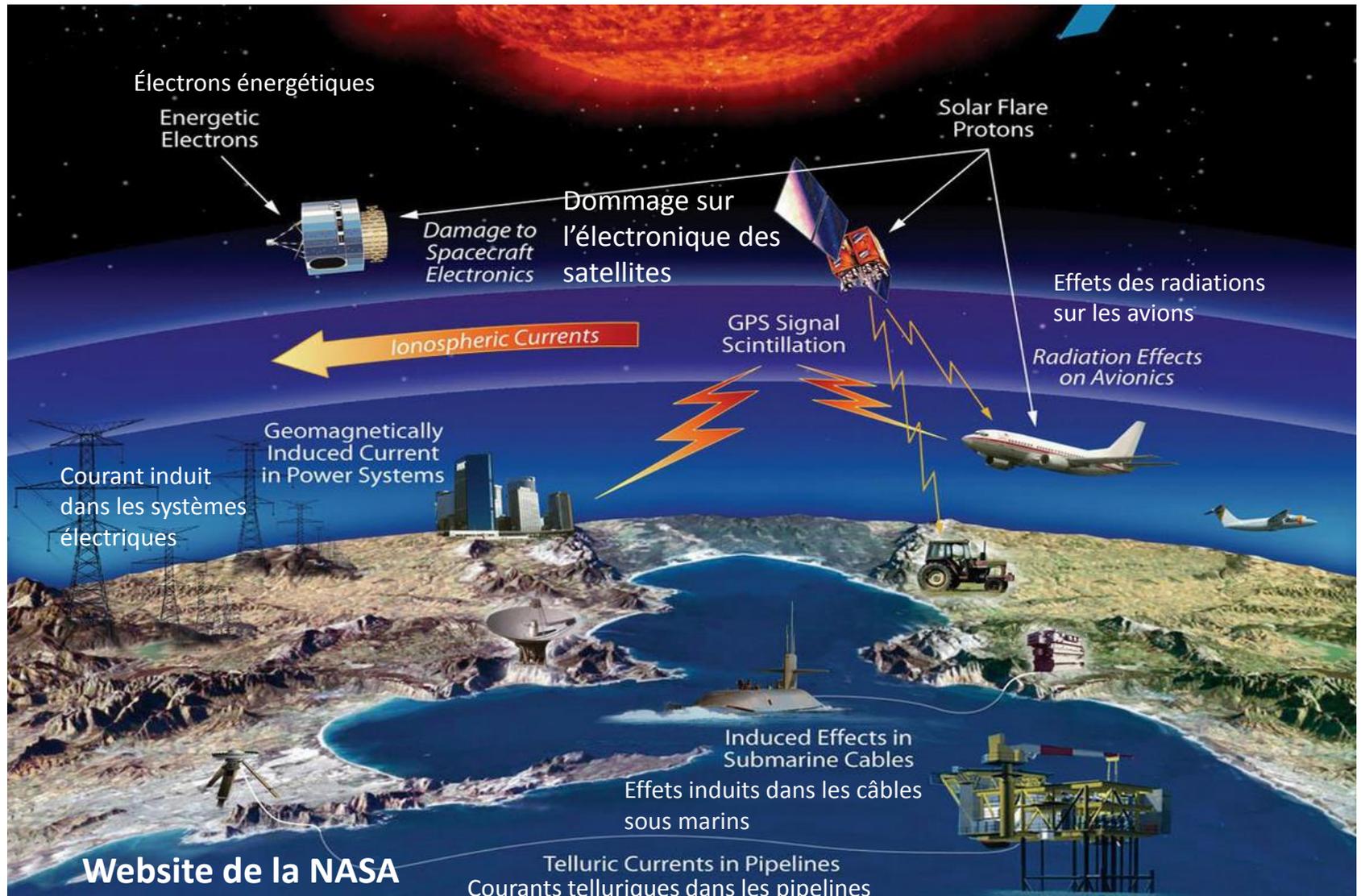
Plan

- Emissions du Soleil
- Pourquoi la Météorologie de l'Espace ?
- LE SOLEIL
- LA TERRE
- L'IONOSPHERE
 - L'ionosphère aurorale et le phénomène des aurores
- Du Soleil vers la Terre / perturbations des systèmes GNSS et radar
 - Extra radiations : Solar Flare (Radiation X), Solar bursts (Ondes radio)
 - CME , chocs, Vents solaires rapides,
- Orages magnétiques
- Scintillations du signal GNSS
- Le réseau ISWI

Entre le Soleil et la Terre: L'IONOSPHERE

L'ionosphère est une couche ionisée de l'atmosphère (de ~ 50 km à ~ 800 km)

L'ionosphère est la source majeure de perturbation du signal GNSS



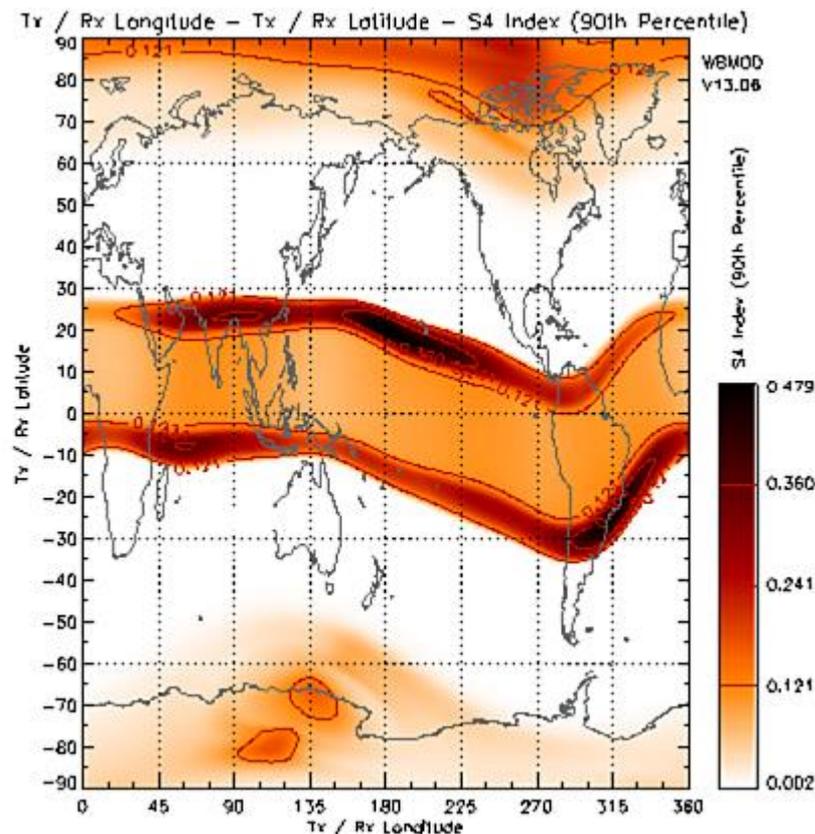
Scintillations : un phénomène régulier

Les scintillations ionosphériques sont des modifications rapides des ondes radios causées par les petites structures ionosphériques.

Processus physiques: Instabilités de Plasma

Indice de scintillation

$$s4 = \sqrt{\frac{\langle I^2 \rangle - \langle I \rangle^2}{\langle I \rangle^2}}$$



“Les scintillations ionosphériques existent principalement en zone équatoriale et aux hautes latitudes. Les scintillations peuvent aussi exister aux autres latitudes mais avec une intensité plus faible.

Les scintillations ionosphériques ont des maximum aux crêtes de l’anomalie équatoriale, localisés aux environs $\sim 15^\circ$ de chaque côté de l’équateur magnétique.”

Index de scintillation à GPS L1 (1575.42 MHz)

en assumant un temps local 23.00 à toutes les longitudes

(site <http://www.sws.bom.gov.au>)

Plan

Emissions du Soleil

Pourquoi la Météorologie de l'Espace ?

LE SOLEIL

LA TERRE

L'IONOSPHERE

L'ionosphère aurorale et le phénomène des aurores

Du Soleil vers la Terre / perturbations des systèmes GNSS et radar

Extra radiations : Solar Flare (Radiation X), Solar bursts (Ondes radio)

CME , chocs, Vents solaires rapides,

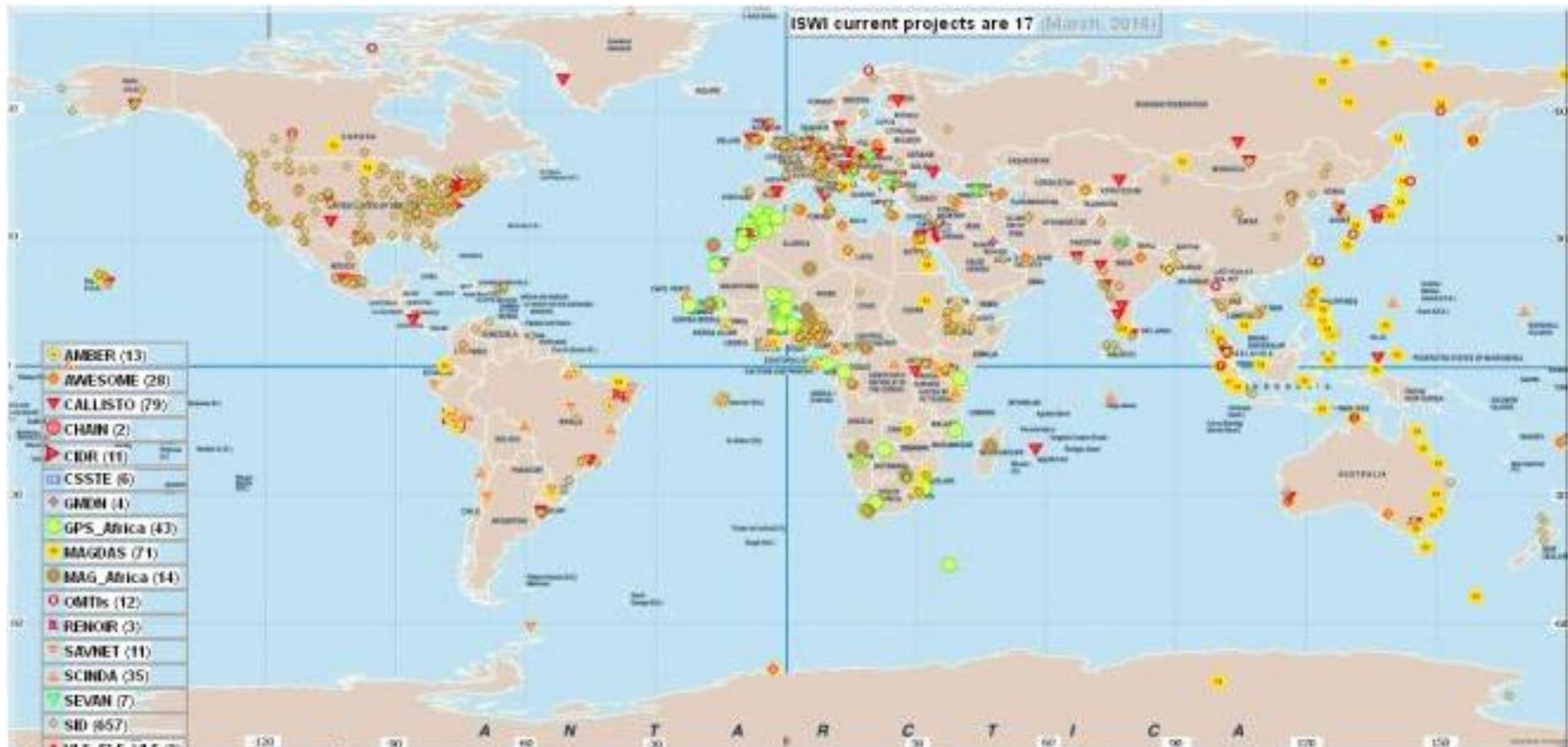
Orages magnétiques

Scintillations du signal GNSS

Le réseau ISWI

Projet ISWI => Réseau scientifique ISWI

<http://www.iswi-secretariat.org>



1. Distribution d'instruments scientifiques
2. Formation sur le GNSS et la physique du système Terre Soleil
3. Thèses => les étudiants ont un poste dans leur pays
4. Coursus dans les universités