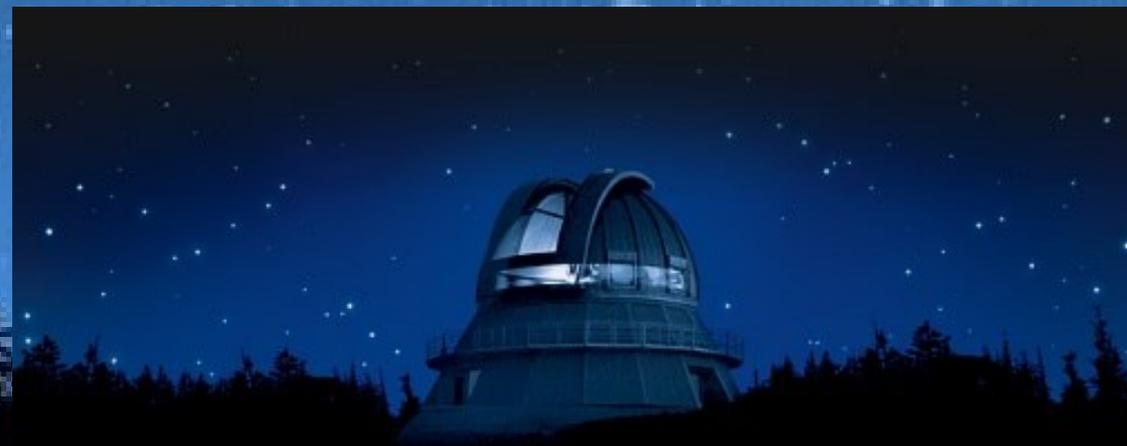


# Petite intro à l'Astronomie

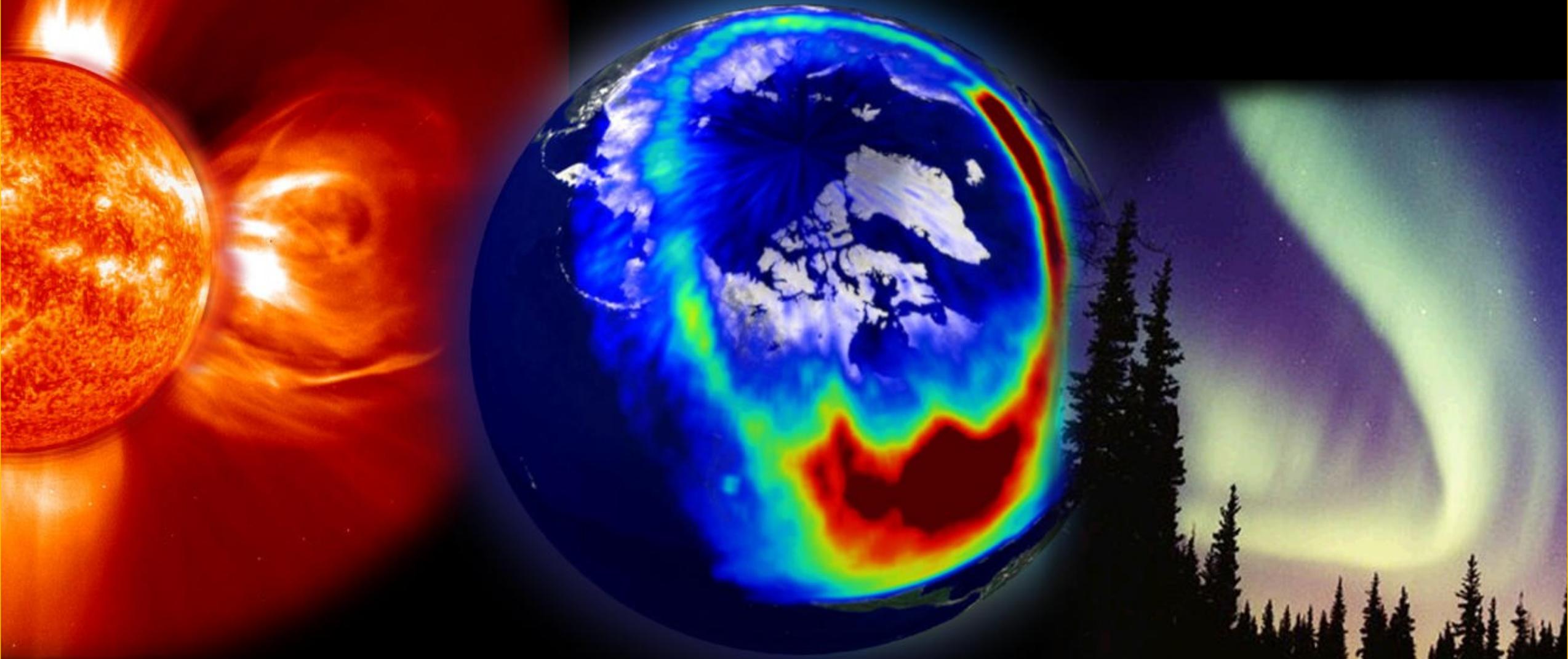
Université de Picardie Jules Verne  
UFR des Sciences, Amiens

Pierre Barroy  
Dpt de Physique

- L'astronomie est la science de l'observation et mesure des astres
- L'astronomie cherche à expliquer l'origine, l'évolution, ainsi que les propriétés physiques et chimiques des astres
- Avec + de 5 000 ans d'histoire, les origines de l'astronomie remontent au-delà de l'Antiquité dans les pratiques religieuses préhistoriques...
- L'astronomie est l'une des rares sciences où les amateurs jouent encore un rôle actif. Elle est pratiquée à titre de loisir par un large public d'astronomes dits amateurs ou bénévoles

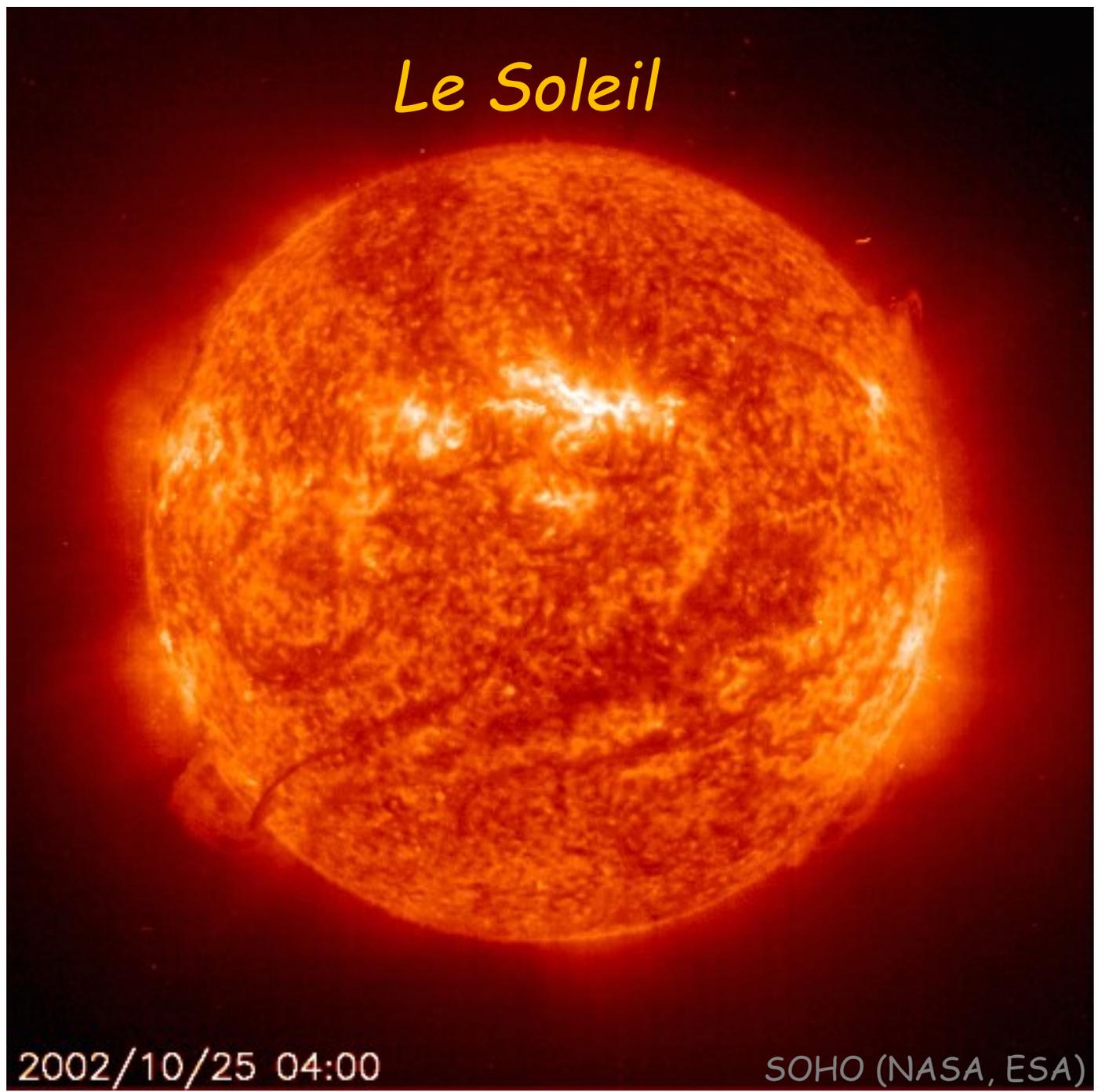


# Du Soleil à la Terre





# Le Soleil



2002/10/25 04:00

SOHO (NASA, ESA)

# Notre étoile, le Soleil



- Une étoile comme beaucoup d'autres étoiles ...
- Une énorme boule de plasma
- Transforme de l'Hydrogène en Hélium
- Né en même temps que la Terre, il y a ~ 4,5 Milliards d'années
- En milieu de vie
- Source de vie et mort !

# Le Soleil, comme beaucoup d'autres étoiles ... dans une galaxie



Anglo-Australian Observatory/David Malin Images

notre galaxie = ?

Sur cette image de la galaxie spirale NGC 2997 est indiquée la position d'une étoile correspondant à celle que le Soleil occupe dans la Voie lactée, une galaxie du même type.

# Le Soleil, comme beaucoup d'autres étoiles ... dans une galaxie



Anglo-Australian Observatory/David Malin Images

notre galaxie = la **Voie Lactée**

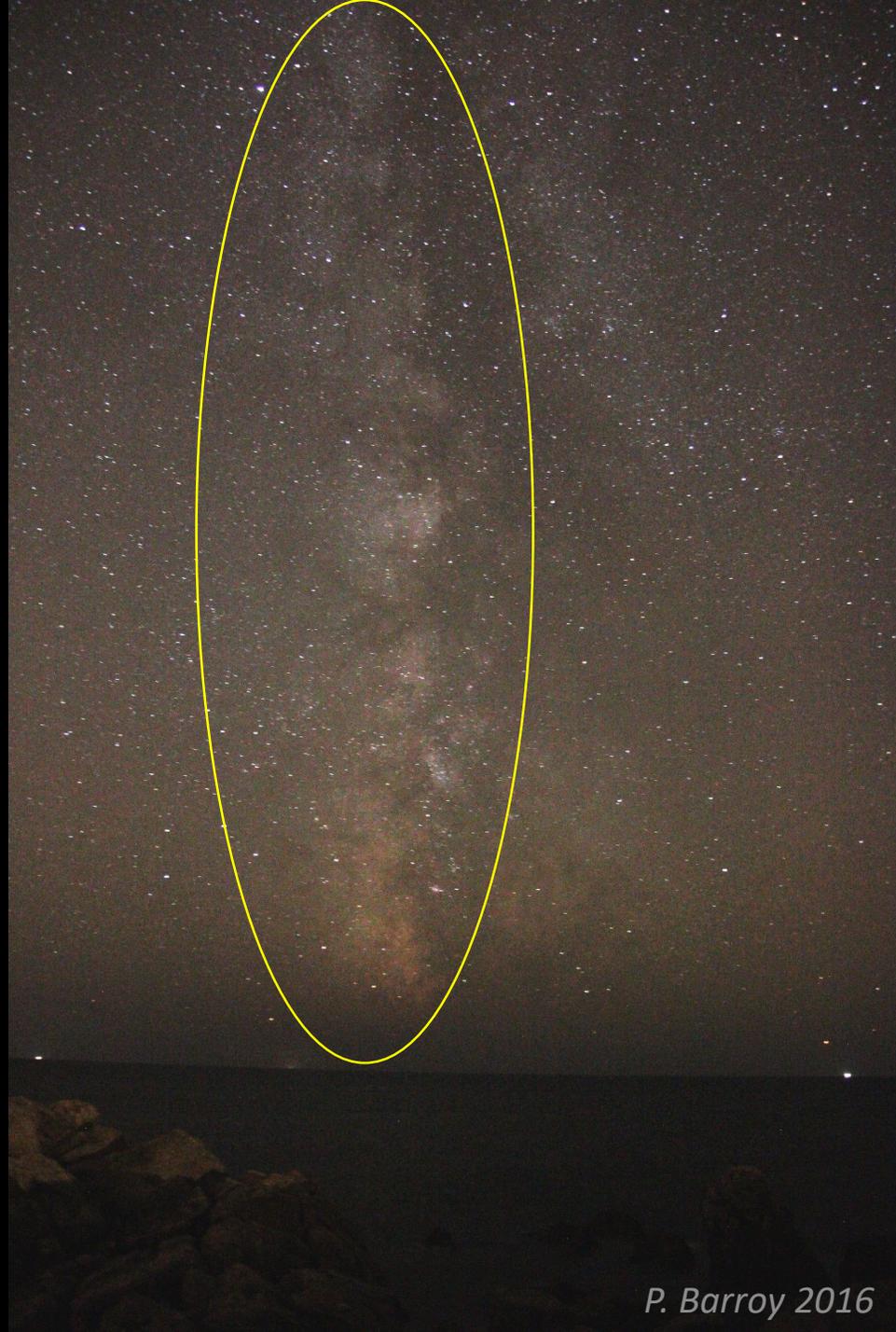
Sur cette image de la galaxie spirale NGC 2997 est indiquée la position d'une étoile correspondant à celle que le Soleil occupe dans la Voie lactée, une galaxie du même type.

Vue du sol...

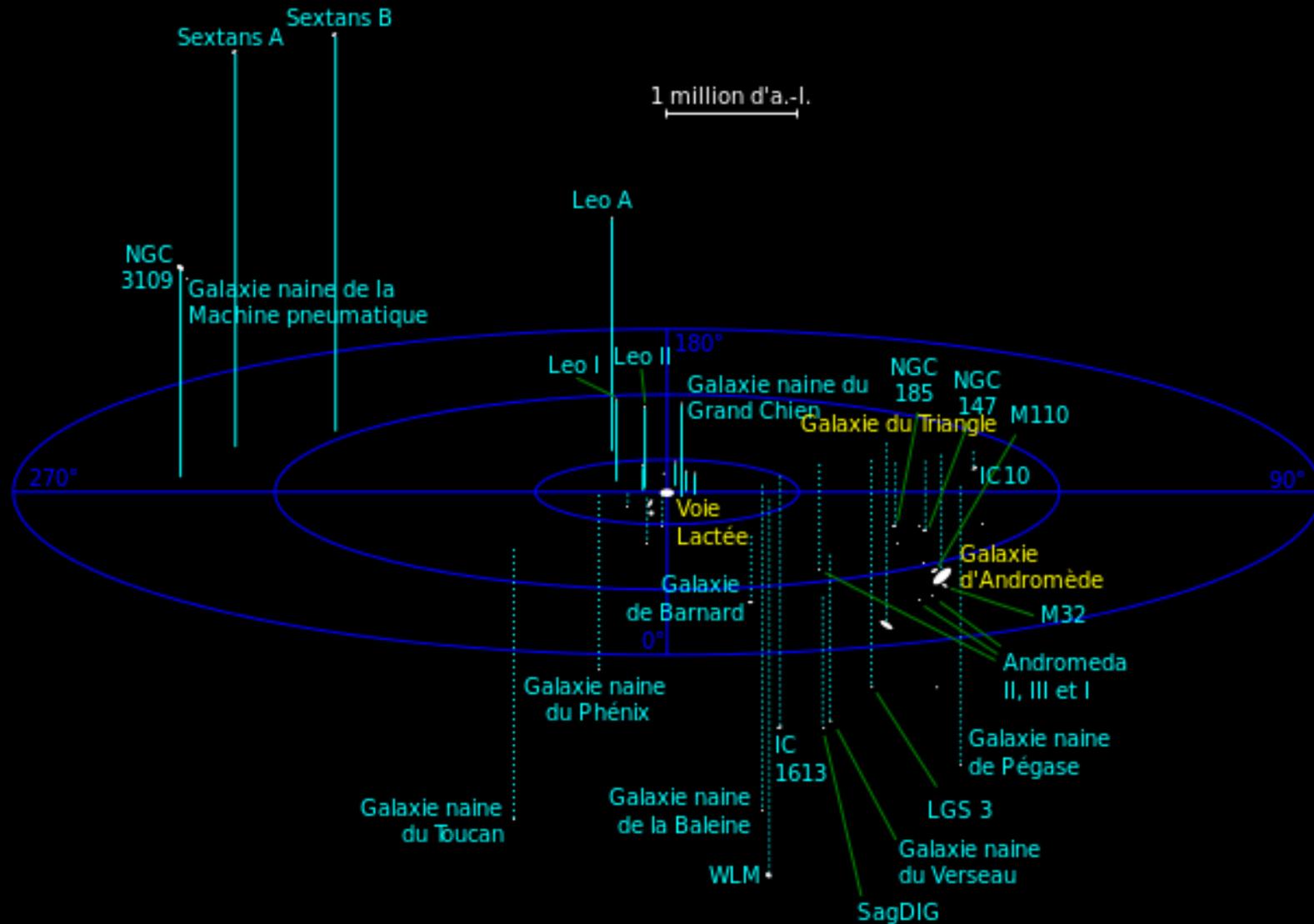


*P. Barroy 2016*

Vue du sol,  
notre galaxie,  
la Voie Lactée !



# Une galaxie comme d'autres galaxies... dans un amas de galaxies



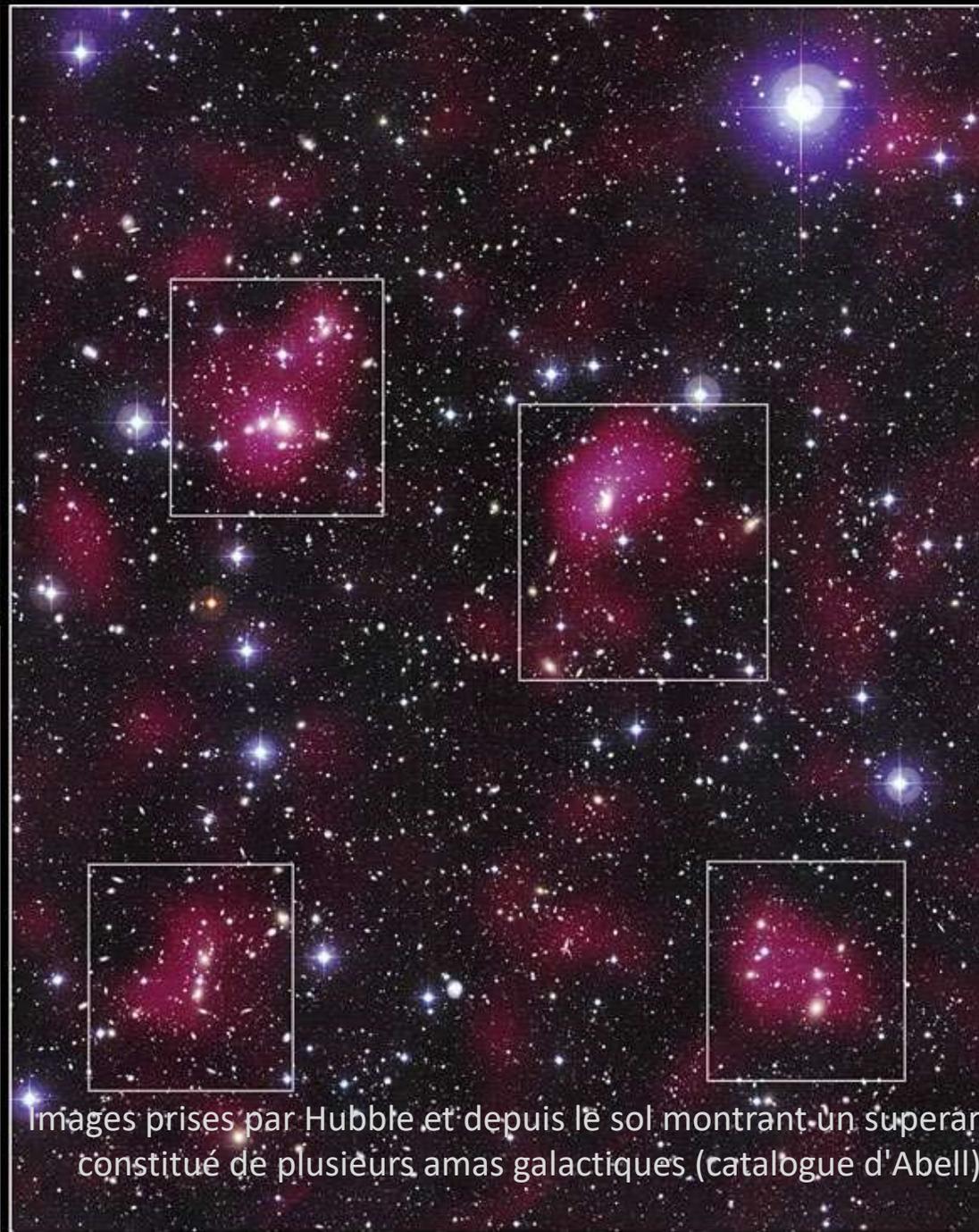
Notre Amas  
= le **Groupe Local**

Des amas...

Abell 901a



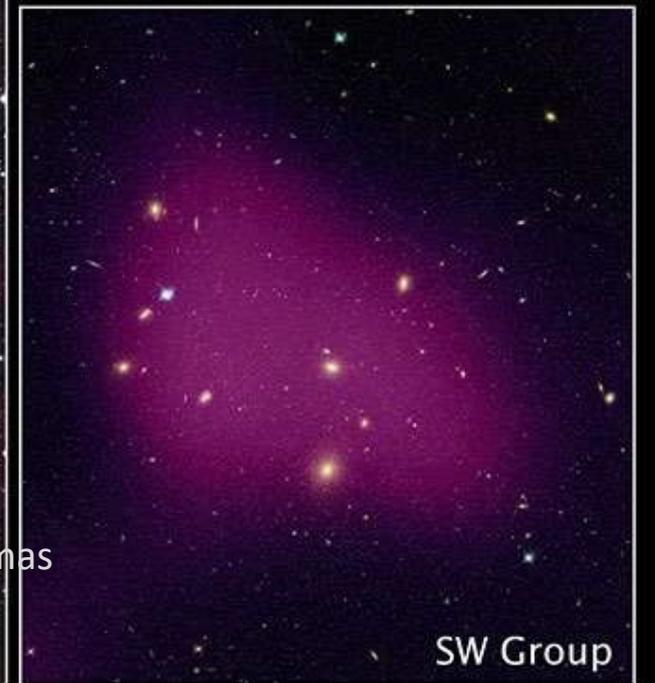
Abell 902



Images prises par Hubble et depuis le sol montrant un superamas  
constitué de plusieurs amas galactiques (catalogue d'Abell)

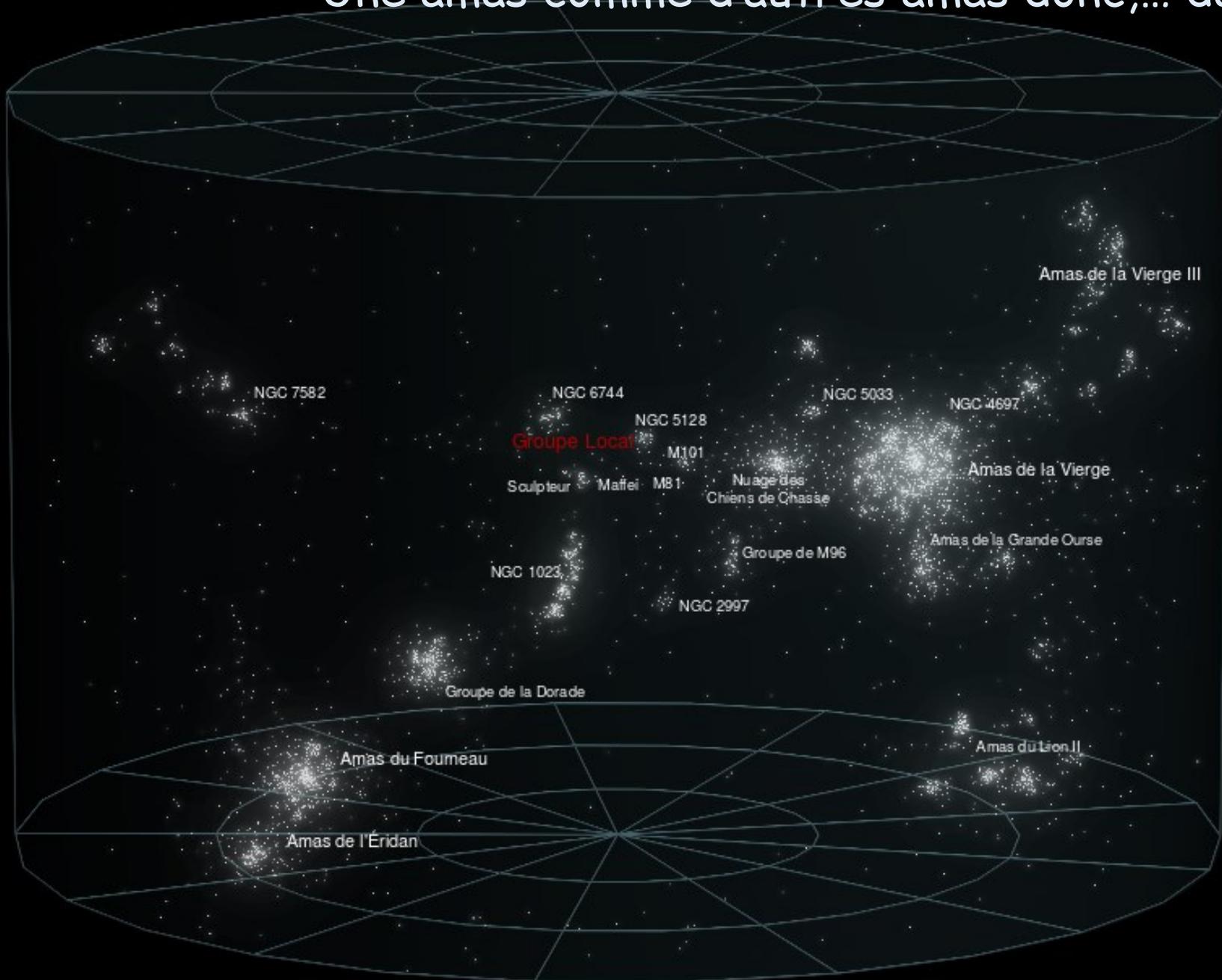


Abell 901b



SW Group

# Une amas comme d'autres amas donc,... dans un Superamas



Notre SuperAmas ?

notre Superamas = le Superamas local (ou Superamas de la Vierge)

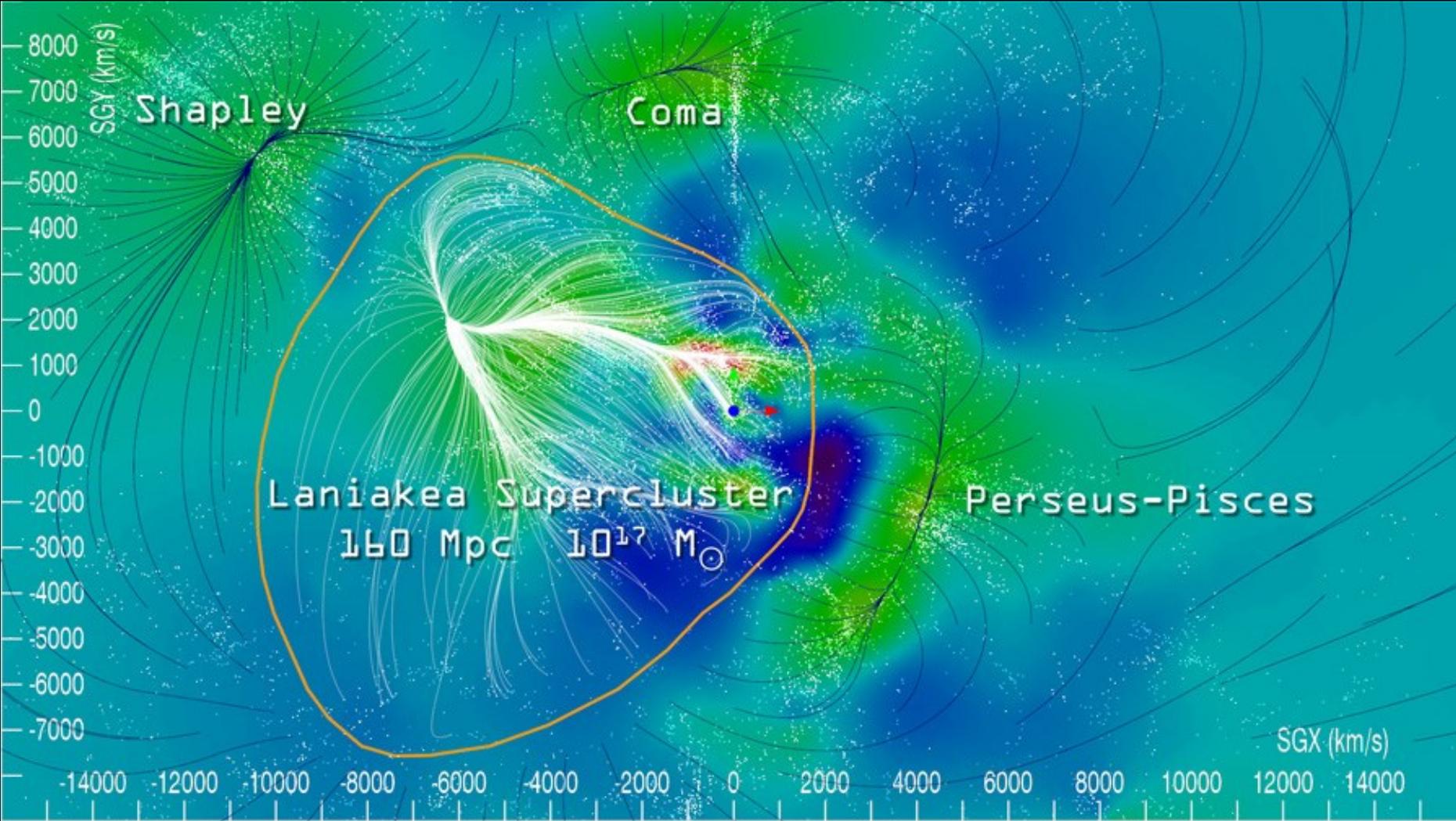
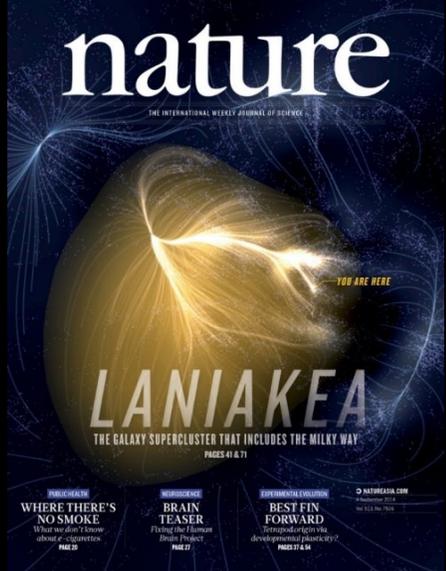


# Notre SuperAmas dans?

## LANIAKEA

contient (en + de notre superamas Local de la Vierge), les superamas du Centaure (Centaurus), et superamas du Paon (Pavo Indus)

-découverte récente (2014)



Une tranche du Superamas Laniakea dans le plan équatorial supergalactique

<http://sciencespourtous.univ-lyon1.fr/vous-etes-ici-super-continent-galaxies-laniakea/>

Pierre Barroy,

## Ordres de grandeurs de vitesses



- La Terre autour du Soleil : **30 km/s**
- Le Soleil autour du centre de la Voie lactée : **200 km/s**
- Le Groupe Local se précipite vers une concentration de masse dans la direction de la Constellation du Centaure : **600 km/s**
  
- La *galaxie d'Andromède* qui se trouve à 2,5 millions d'années-lumière vient à la rencontre de la *Voie Lactée* à une vitesse propre de 110 km/s.  
=> rencontre prévue dans ~4 milliards d'années=>formera une galaxie elliptique

## ***Mais nous nous éloignons, revenons à notre Soleil...***

### ***Quelques chiffres...***

**Volume : 1.3 millions de fois le volume de la Terre**

**Masse : 333000 fois la masse de la Terre**

**Pesanteur  $g_s$  à la surface :  $273,95 \text{ m/s}^2$  (Terre :  $9.81 \text{ m/s}^2$ )**

**Composition (masse): Hydrogène ~78 % Hélium ~20 %  
+ Oxygène 0,8 %, Carbone 0,3 % ...**

**Densité moyenne :  $1.4 \text{ g/cm}^3$  (Terre :  $5.5 \text{ g/cm}^3$ )**

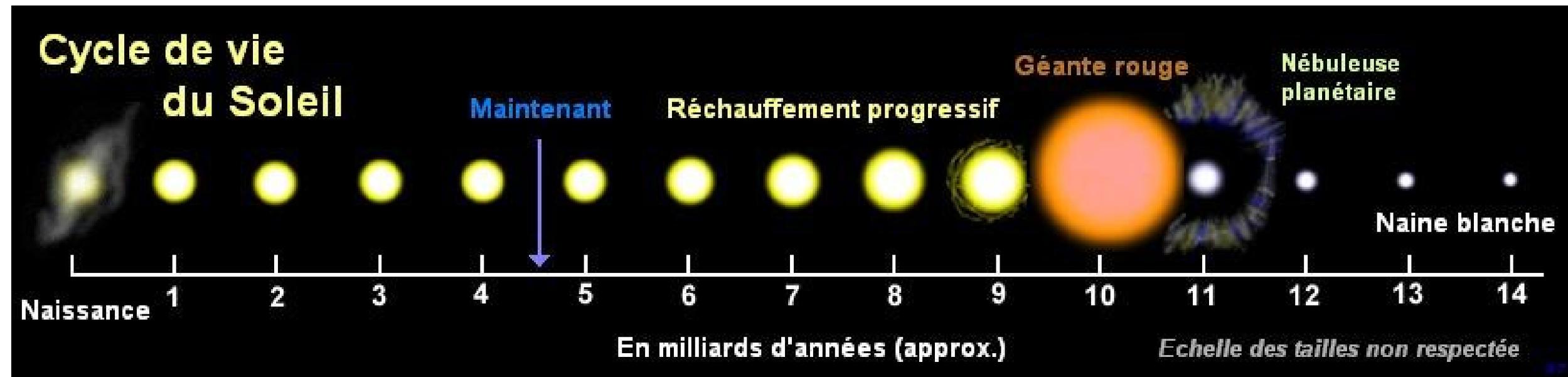
**Densité au cœur :  $150 \text{ g/cm}^3$**

**Température proche de la surface ( photosphère ) = 5800 K**

**Température au cœur : 15 millions de K**

Le Soleil est une étoile de type **Naine Jaune**

Quel âge a-t-il ?



Comment est-il né?

Naissance du  
**Soleil**

et du **Système Solaire**

**Système Solaire**

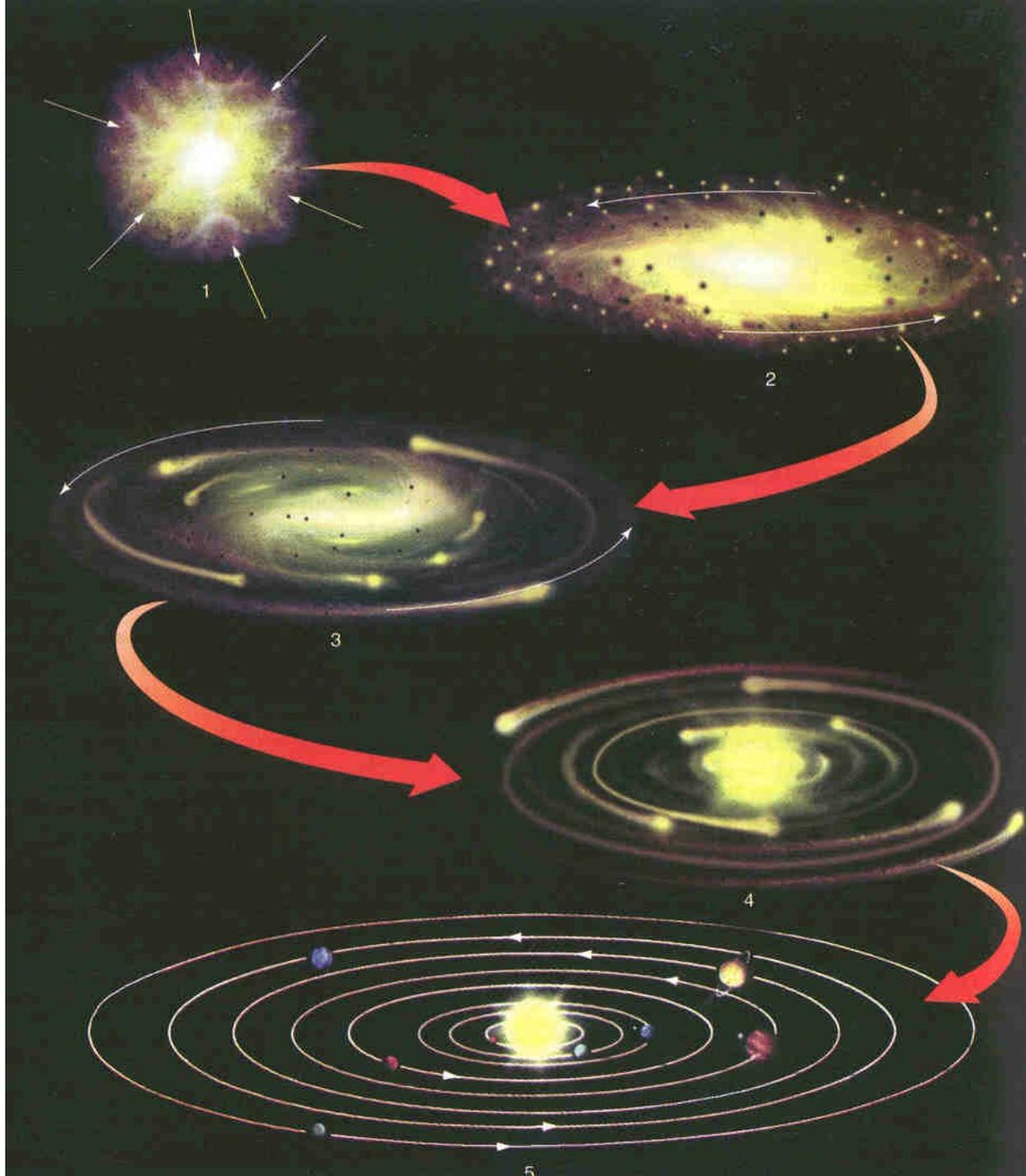
= **Soleil**

+ **Planètes**

+ **Satellites**

+ **Planètes Naines**

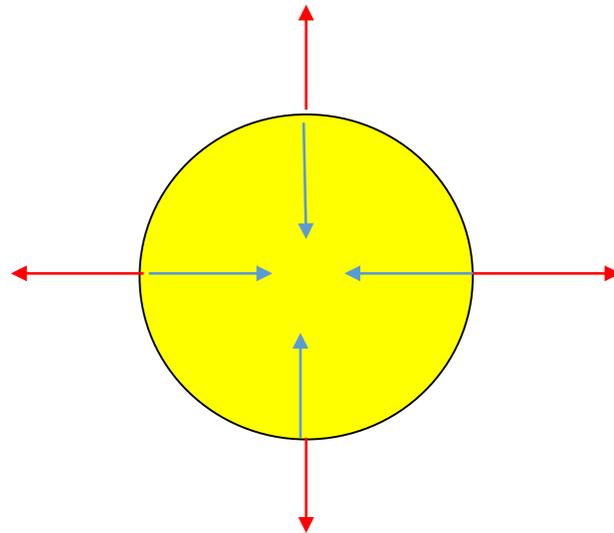
+ **Petits Corps**



# Mais au fait, qu'est-ce qu'une **étoile** par rapport aux autres Corps du Système Solaire ?

Une étoile est un corps fluide qui **rayonne sa propre lumière** par réactions de fusion nucléaire (ou des corps qui ont été dans cet état à un stade de leur cycle de vie, comme les naines blanches ou les étoiles à neutrons)

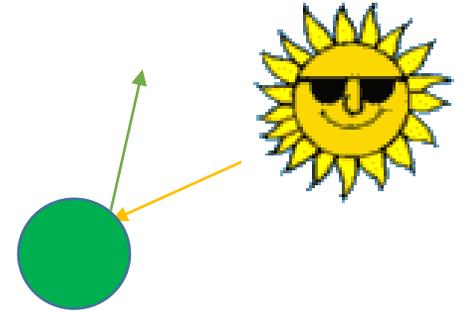
- ⇒ Il faut une **masse minimale** pour que température et pression dans le cœur (région centrale) amorcent et maintiennent les réactions nucléaires ...
- ⇒ Les masses possibles des étoiles s'étendent de 0,085 masse solaire à une 100<sup>aine</sup> de masses solaires
- ⇒ La masse détermine **température** et **luminosité** de l'étoile



# Et une planète, une planète naine ou un «Petit Corps du Système Solaire»?

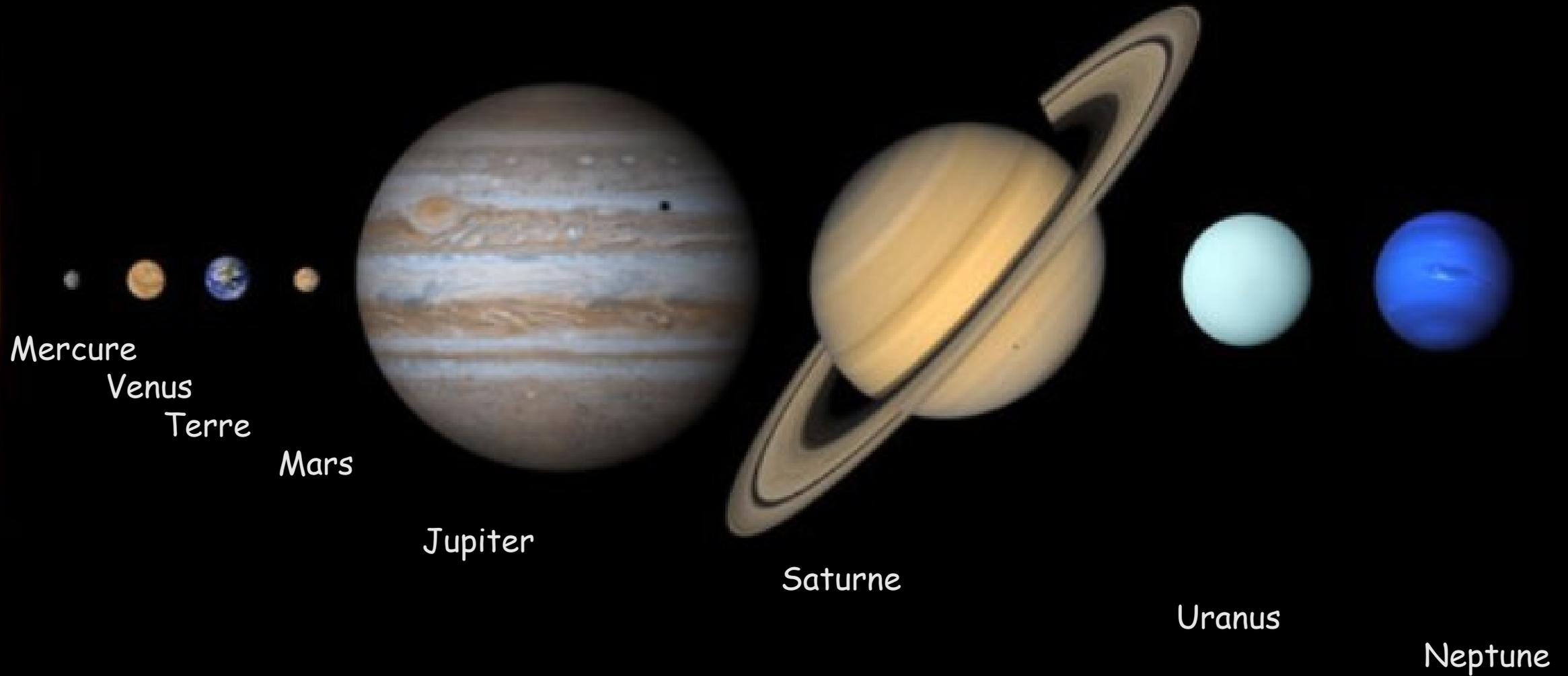
Tous ces corps n'émettent pas de lumière, il ne font que la REFLETER

L'Union Astronomique Internationale nomme:



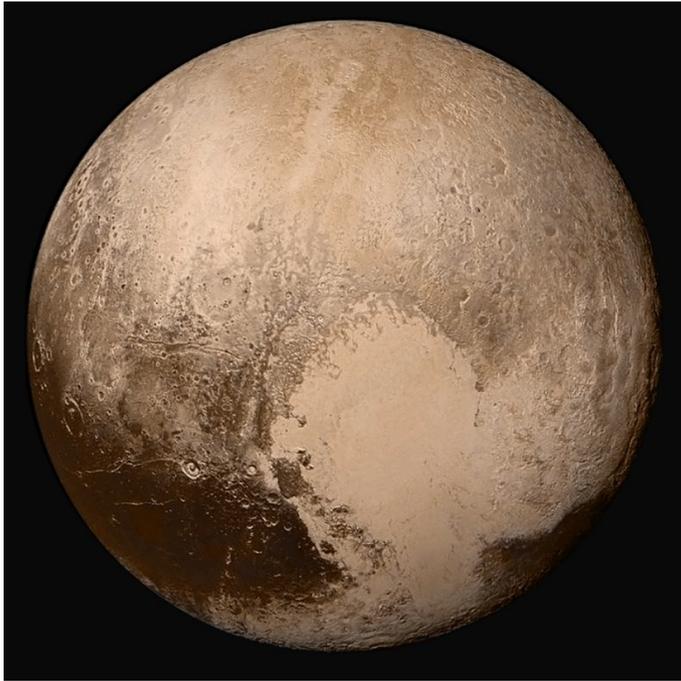
- (1) **Planète** un corps céleste qui
  - (a) est en orbite autour du Soleil,
  - (b) a une **masse suffisante** pour que sa gravité propre vainque les forces de cohésion interne de façon qu'il parvienne à une forme (presque ronde) en équilibre hydrostatique,
  - (c) et a **éliminé les objets au voisinage autour de son orbite**
  
- (2) **Planète naine** un corps céleste qui
  - (a) est en orbite autour du Soleil,
  - (b) a une **masse suffisante** pour que sa gravité propre vainque les forces de cohésion interne de façon qu'il parvienne à une forme (presque ronde) en équilibre hydrostatique,
  - (c) **n'a pas éliminé le voisinage** autour de son orbite
  - (d) **n'est pas un satellite ...**
  
- (3) Tous les autres objets, à l'exception des satellites, en orbite autour du Soleil seront désignés collectivement comme « **Petits corps du Système solaire** »

Seuls 8 objets sont reconnus comme *planètes* par l'UAI

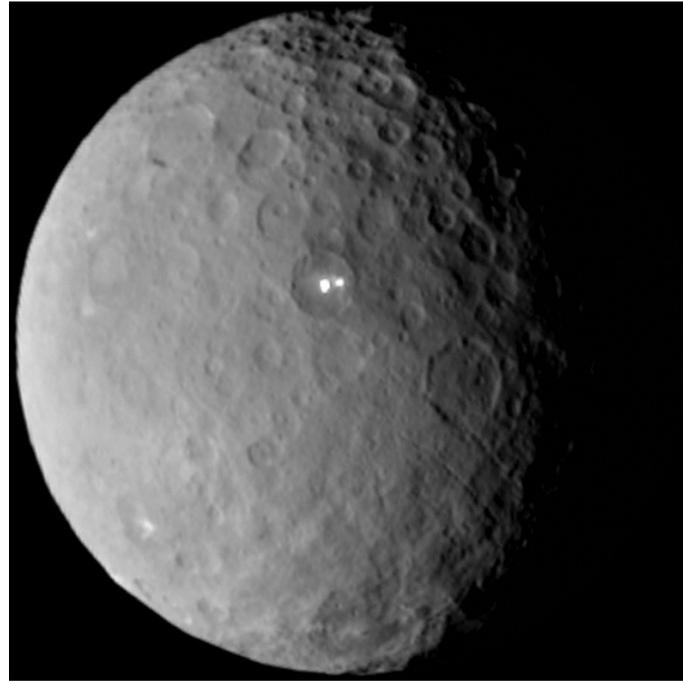


+ 5 objets reconnus comme **planètes naines** par l'UAI (2017) :

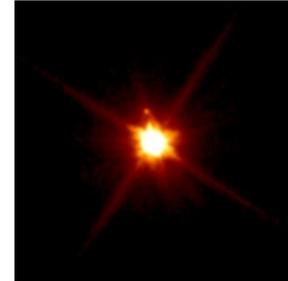
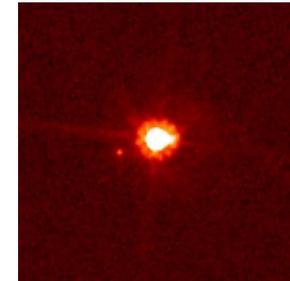
Pluton \*,



Cérès \*\*,



+ Hauméa, Makémaké et Éris



+ certains débattus:

2007 OR<sub>10</sub>, Charon, Quaoar, Sedna, Orcus, Varuna, 2002 MS<sub>4</sub>, Salacie ...

\* Mission **New Horizons 2015** [https://www.nasa.gov/mission\\_pages/newhorizons/main/index.html](https://www.nasa.gov/mission_pages/newhorizons/main/index.html)

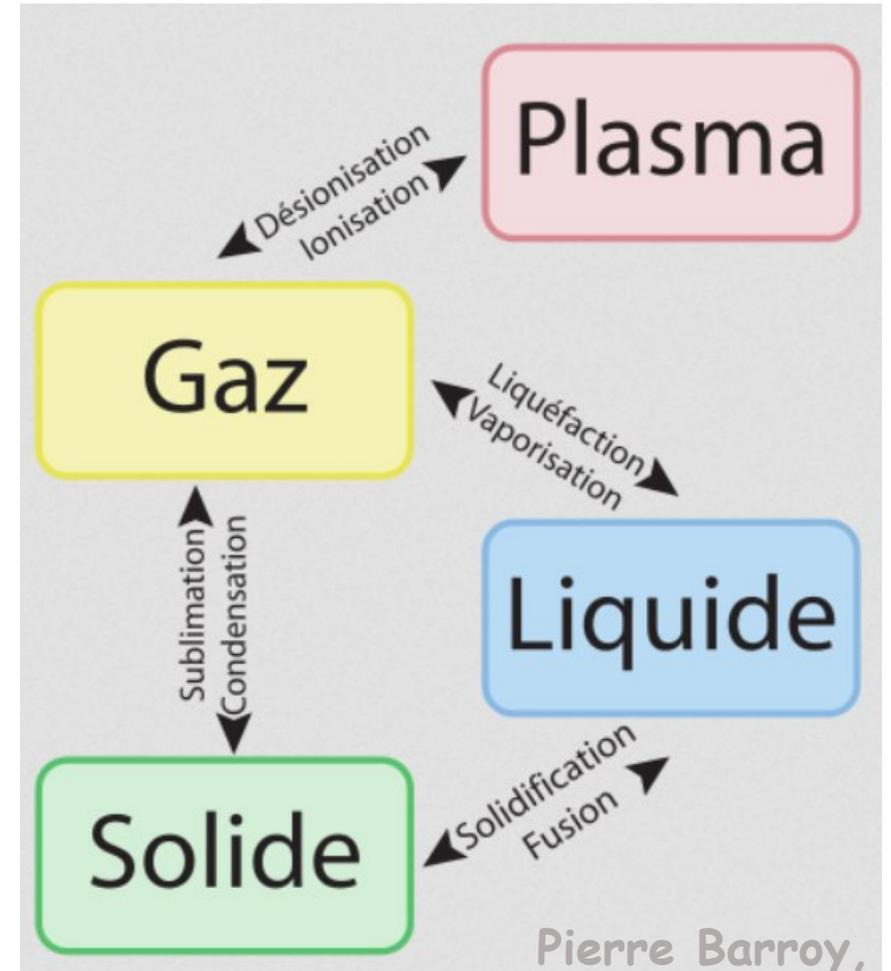
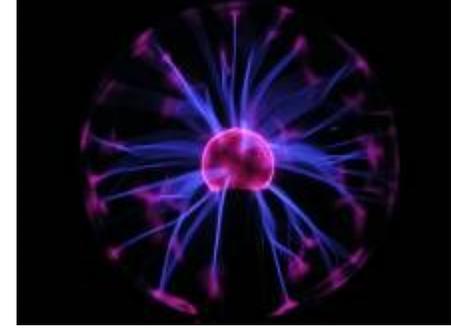
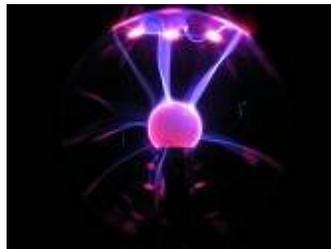
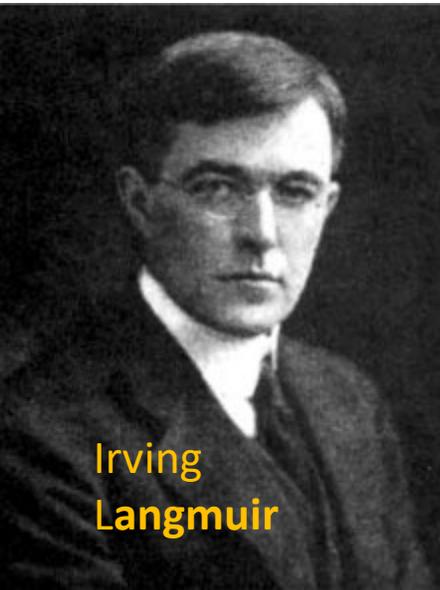
\*\* Mission **Dawn 2015-2018** [https://www.nasa.gov/mission\\_pages/dawn/main/](https://www.nasa.gov/mission_pages/dawn/main/)

*Revenons au Soleil :  
c'est une boule de plasma en fusion thermonucléaire ...*



# Mais qu'est-ce qu'un plasma en physique/chimie ?

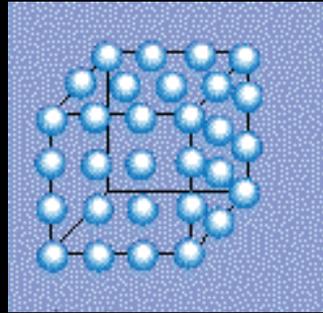
- C'est un état de la matière, aux propriétés proches mais différentes de celles d'un gaz ...
- Compris par Irving Langmuir (USA) en 1928



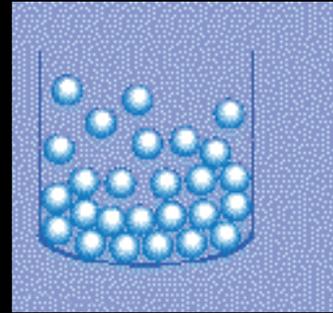
# Etats de la matière & état Plasma

exemple avec H<sub>2</sub>O

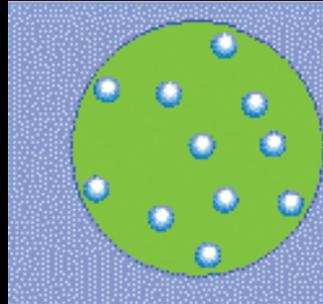
> Solide (glace)



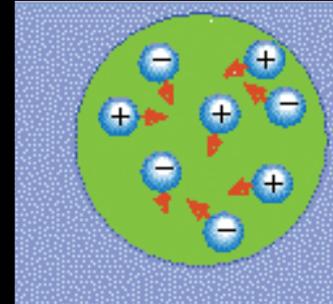
> Liquide (eau)



> Gaz (vapeur)



> Plasma  
(ions & électrons)

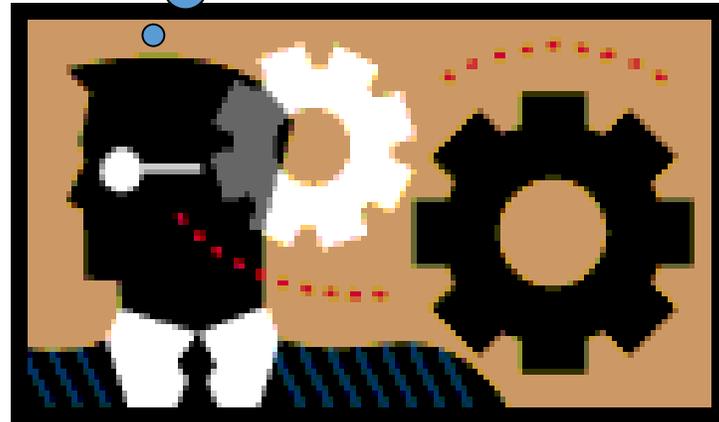


**PLASMA** = état dilué globalement neutre électriquement MAIS dans lequel on trouve des particules chargées électriques

≡ **FLUIDE DILUE IONISE**

# Plasmas & diversité

Mais est-ce que la matière est souvent dans cet état Plasma ???



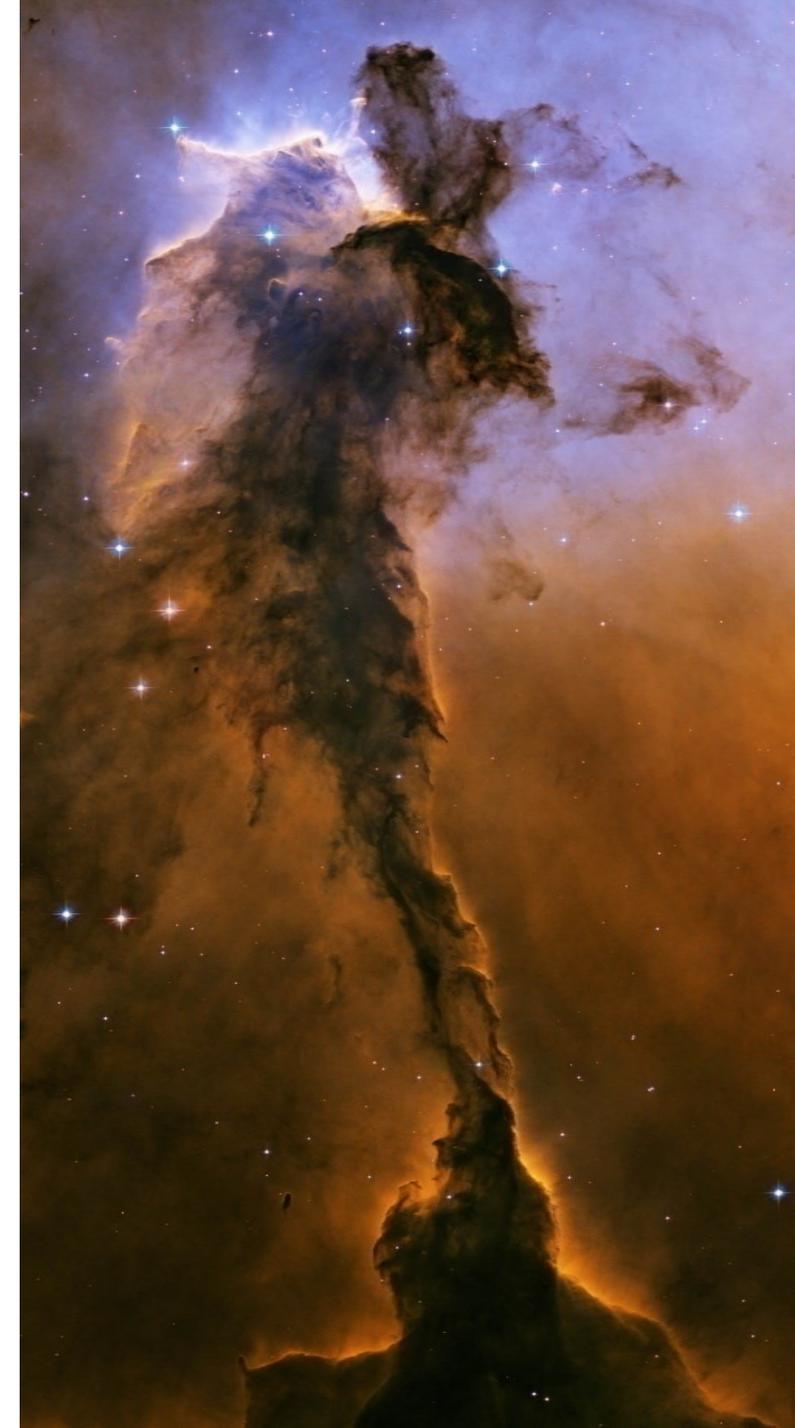
# PLASMA $\approx$ 95% de l'Univers !!!

## Plasmas « naturels »

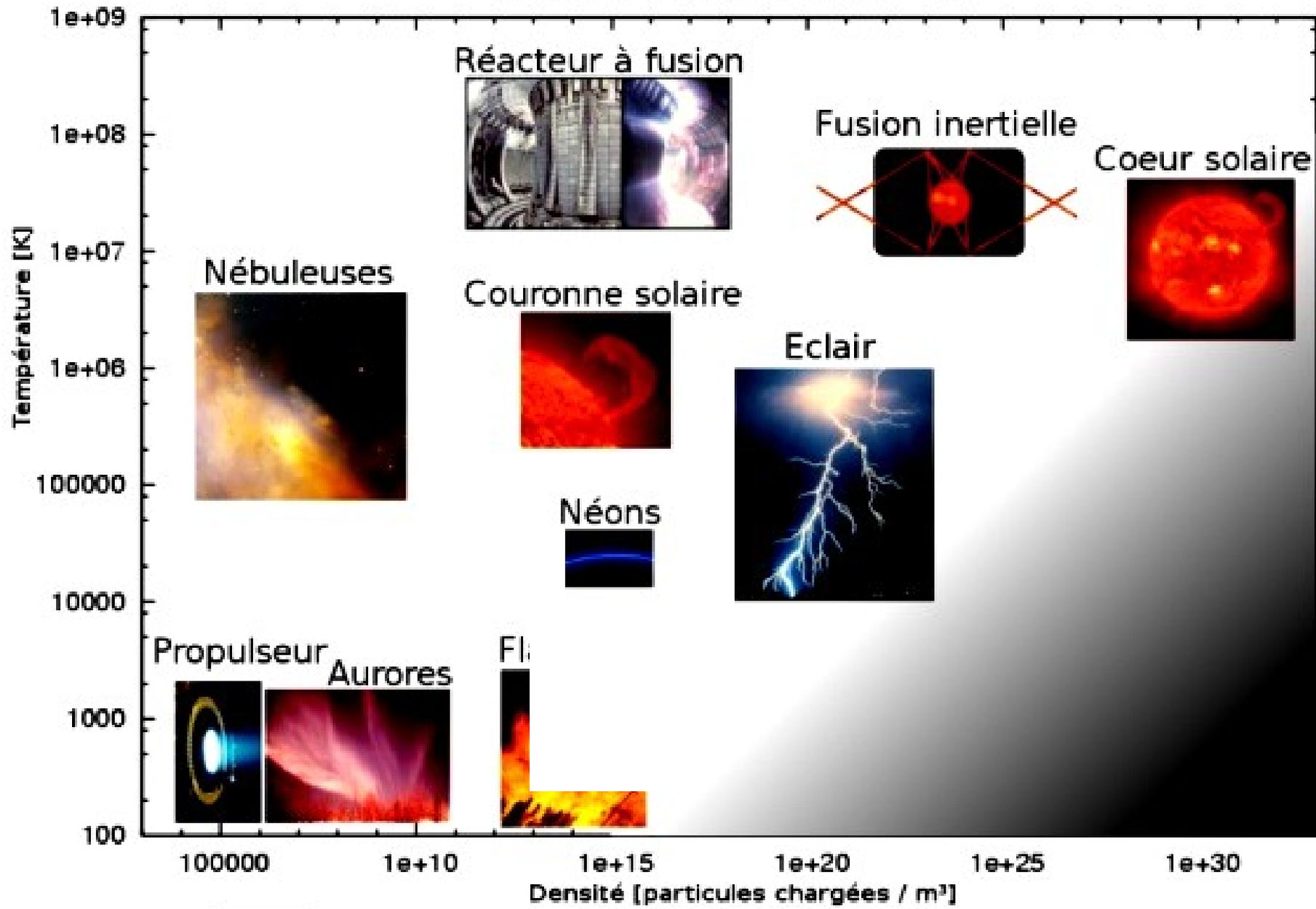
- Etoiles
- Nébuleuses
- Vent solaire
- Ionosphère
- Aurores boréales
- Eclairs ...

## + il existe des plasmas « technologiques »

- disjoncteurs, lampes ...
- plasmas de traitement de surfaces, pour le dépôt, la gravure, le dopage- de couches minces (ordinateurs, carrosseries ...)
- écrans à Plasma
- Propulseurs de satellites par plasmas
- fusion nucléaire (tokamak, inertiel, Z-Pinch ...)
- stérilisations (lampes UV, ioniseurs, ...)
- + nombreuses autres applications encore en laboratoires



# Caractérisation des différents plasmas



 Zone solide, liquide, gazeuse pour laquelle aucun plasma classique n'existe.

# Plasmas



NEBULEUSE  
1 million °C



AURORE 1000 °C

ECLAIR 30.000 °C



NEON 10 000 °C



8000 °C



Tokamak  
450 Millions °C

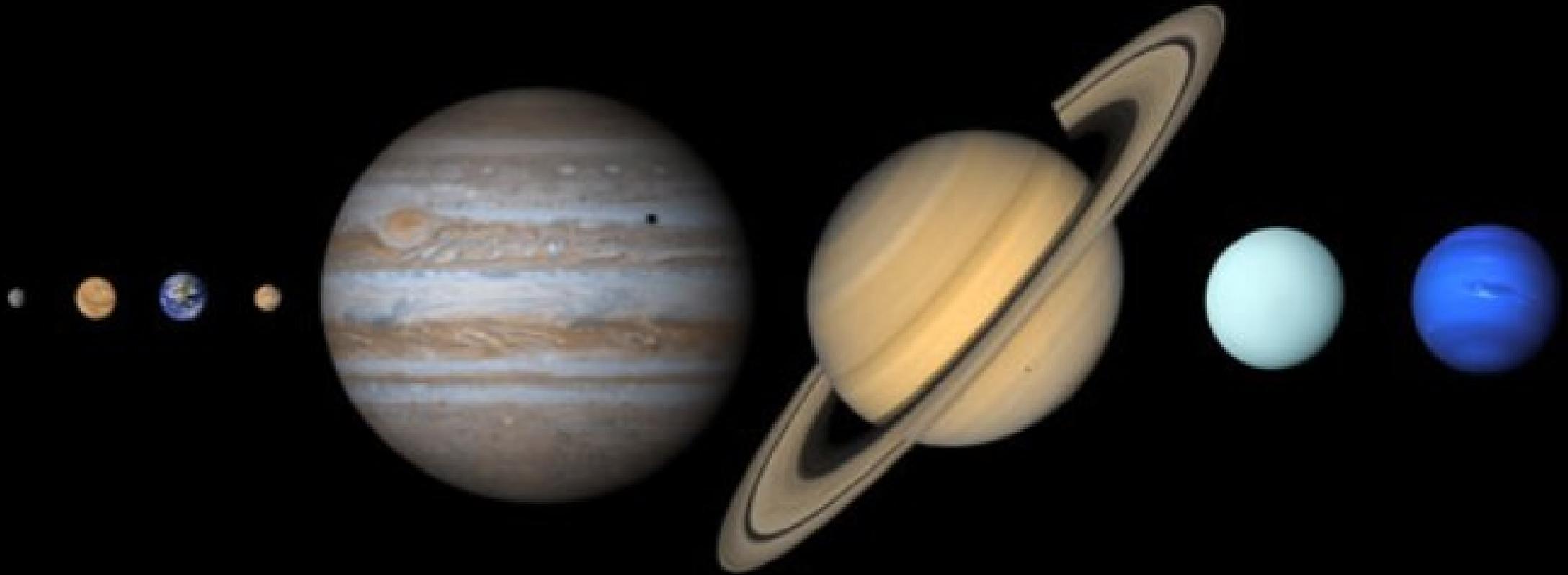
SOLEIL  
15 millions / 5.800 °C

*Revenons au Soleil, cette boule de plasma  
en fusion thermonucléaire ...*



## Quelques faits

1) Le Soleil est environ 109 + gros que la Terre



(Tailles comparées planètes... échelle des distances non-respectée )

Le Soleil est bien + gros que toutes les Planètes

Le Soleil est environ 109 + gros que la Terre

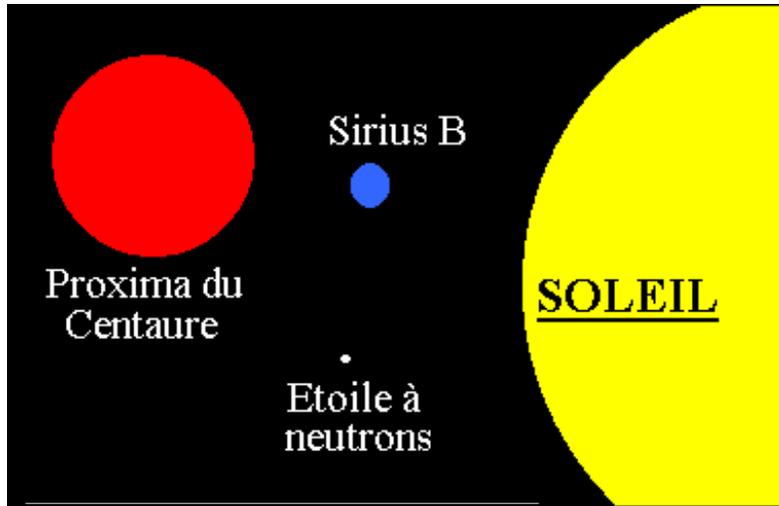
⇒ Les rayons qui proviennent du Soleil sont quasi-parallèles quand ils arrivent sur Terre



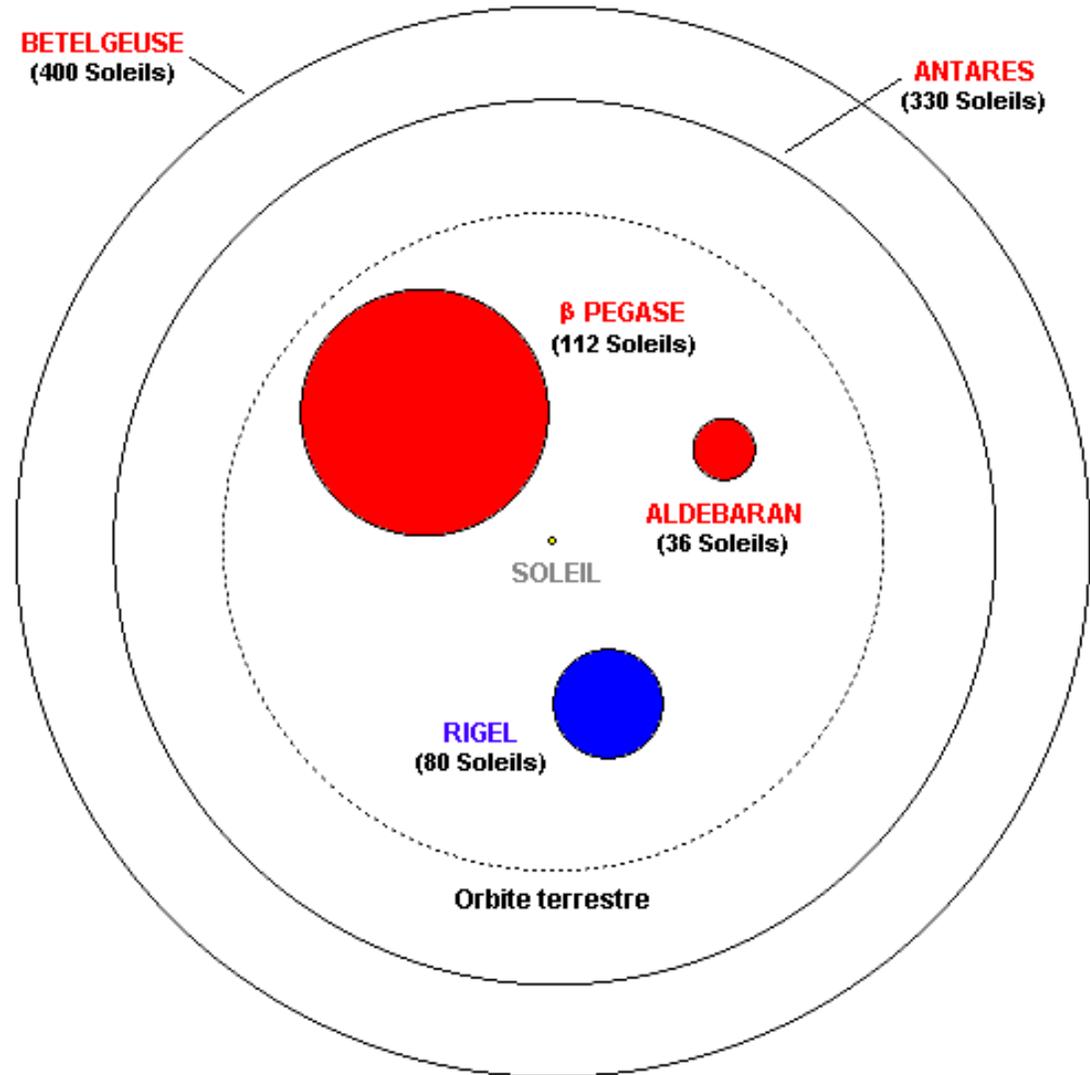
Hors de l'atmosphère terrestre, le rayonnement solaire reçu est quasi-constant qu'on soit au Nord ou au Sud !

(nous en reparlerons...)

# Comparaison de taille Soleil - étoiles

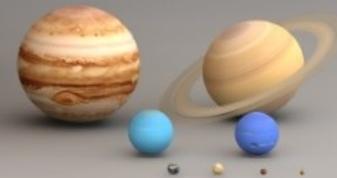
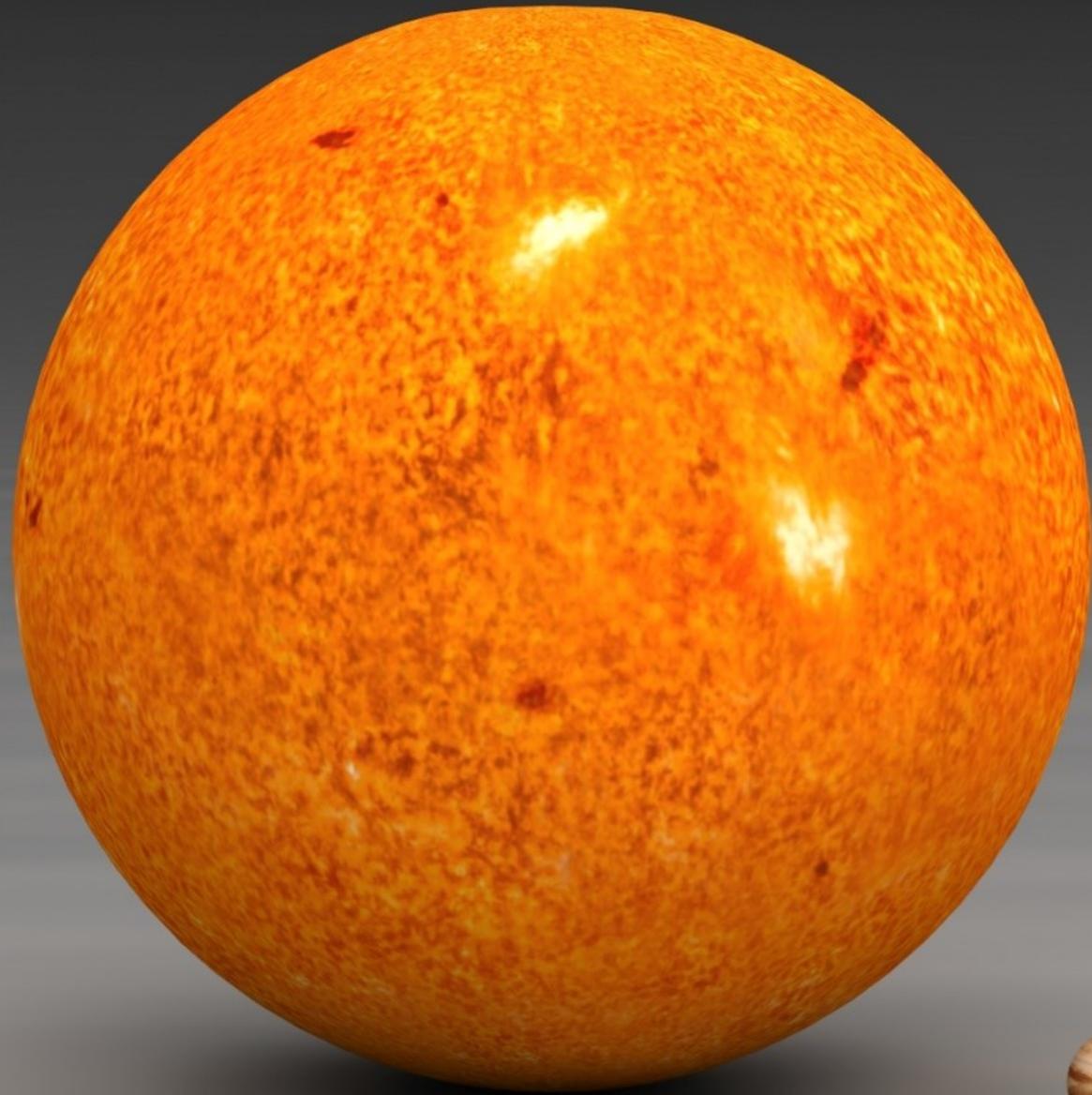


*Etoiles plus petites que le Soleil*

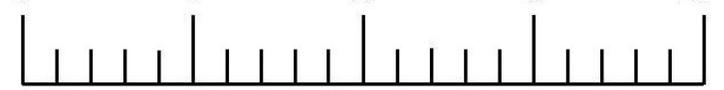


*Etoiles plus grandes que le Soleil*

À lui seul, le  
Soleil représente  
99,86 % de la  
masse totale du  
système solaire !

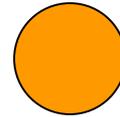
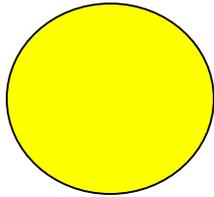


## Distances



### 2) Le Soleil est à environ 8 min. Lumière

Terre-Soleil = 1 Unité Astronomique (UA) = 150 000 000 km  
(~8 min lumière)



Soleil-Jupiter = 5.2 UA



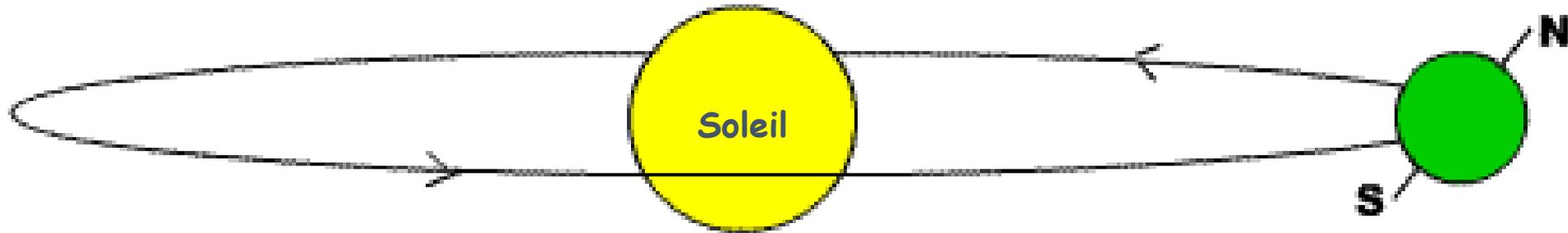
Soleil-Pluton = 40 UA



Prochaine Étoile... Alpha Centauri = 300 000 UA = 4.3 A.L.

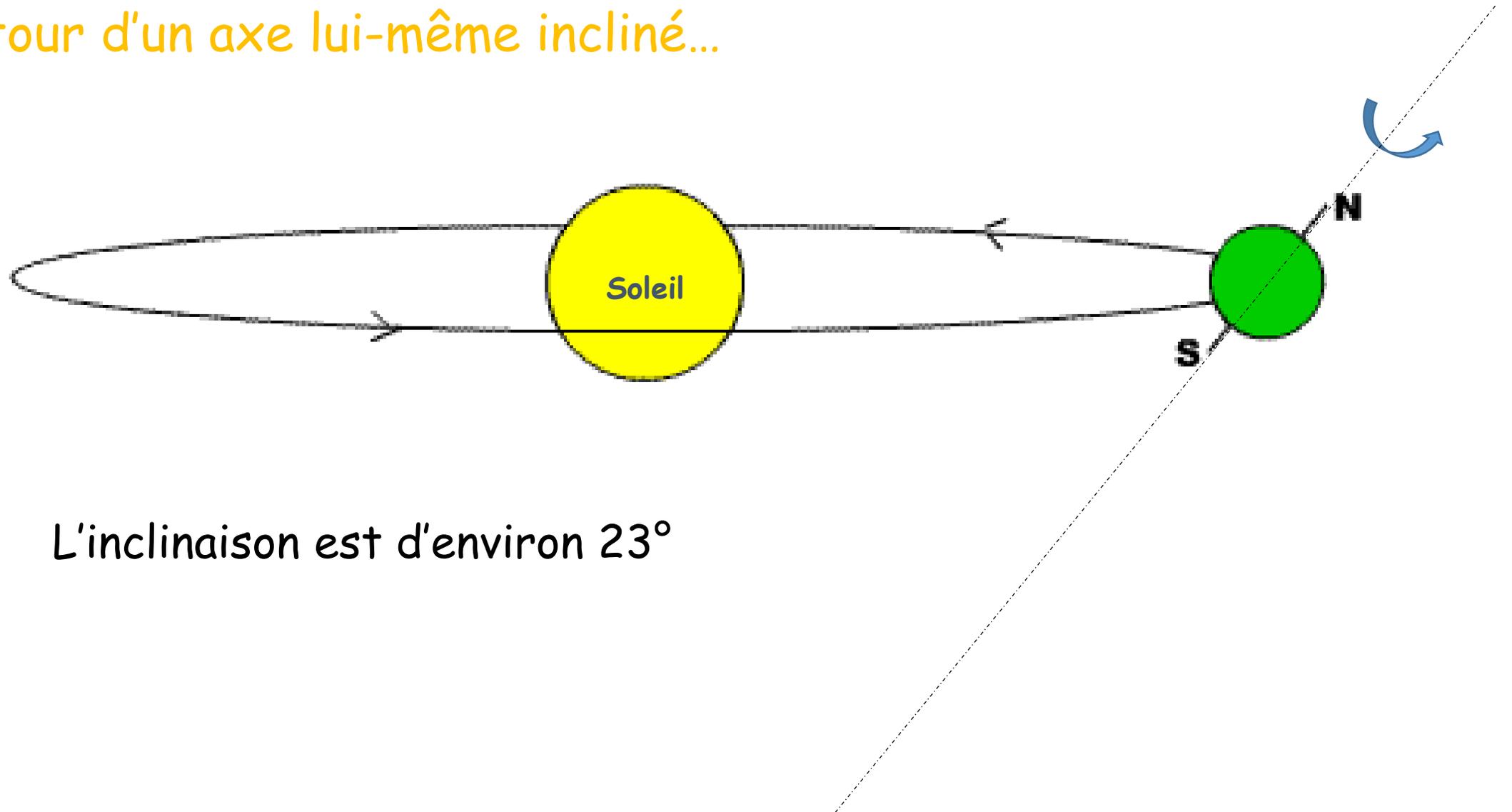
### 3) La Terre tourne autour du Soleil ...

On parle de la Révolution de la Terre autour du Soleil



Le plan de révolution est appelé **Ecliptique**

3) La Terre tourne sur elle-même...  
autour d'un axe lui-même incliné...



L'inclinaison est d'environ 23°

Le Soleil est ~ 109 fois + gros que la Terre



Donc les rayons qui proviennent du Soleil sont quasi-parallèles quand ils arrivent sur Terre



Hors de l'atmosphère, le rayonnement solaire reçu est quasi-constant

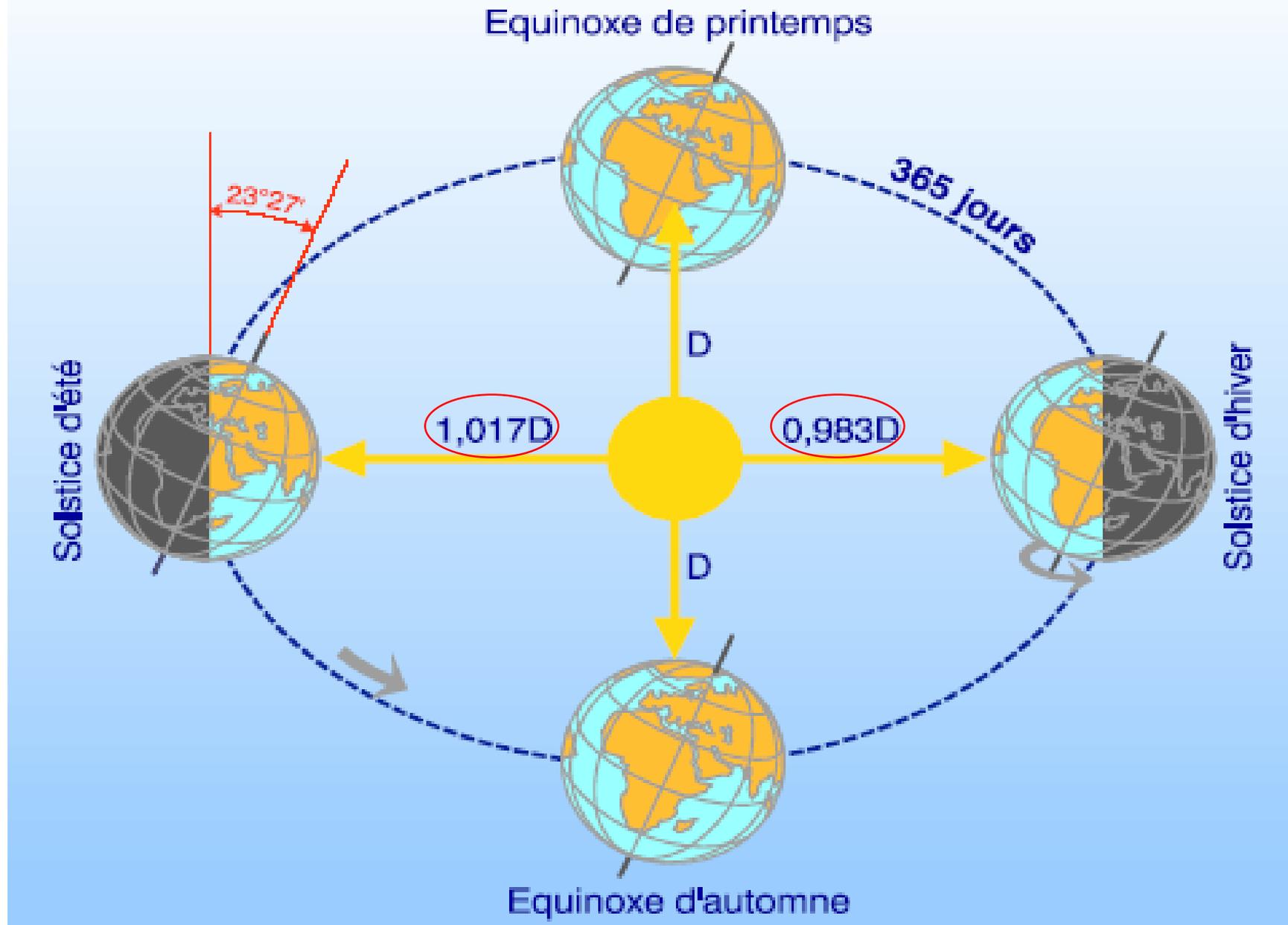
Donc les rayons qui proviennent du Soleil sont quasi-parallèles quand ils arrivent sur Terre



Hors de l'atmosphère, le rayonnement solaire reçu est quasi-constant de puissance par unité de surface  $\sim 1362 \text{ W.m}^{-2}$

Alors pourquoi des saisons ?

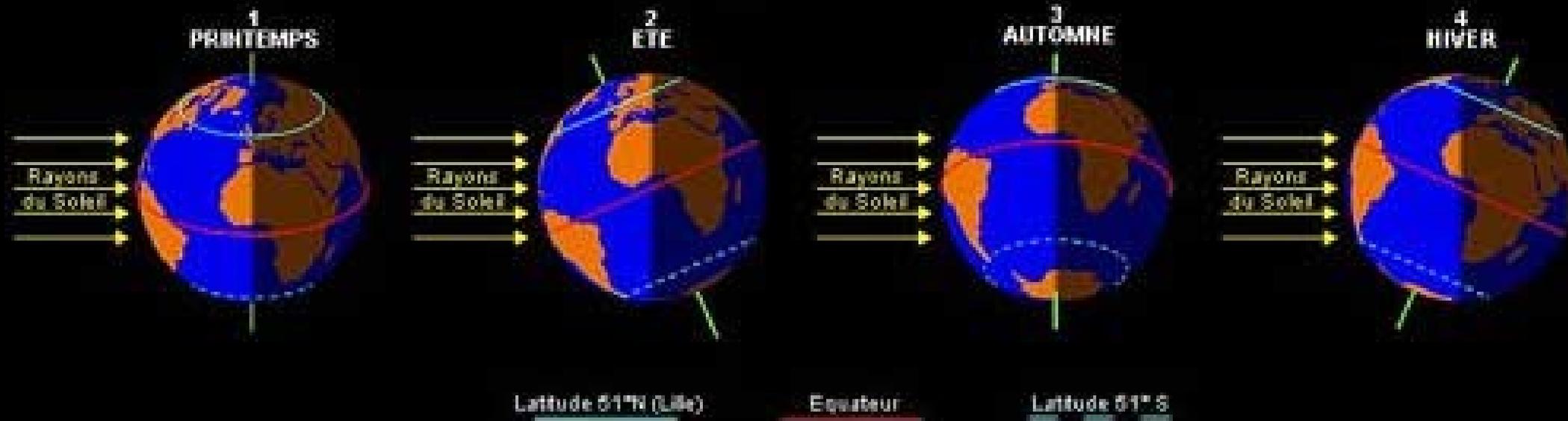
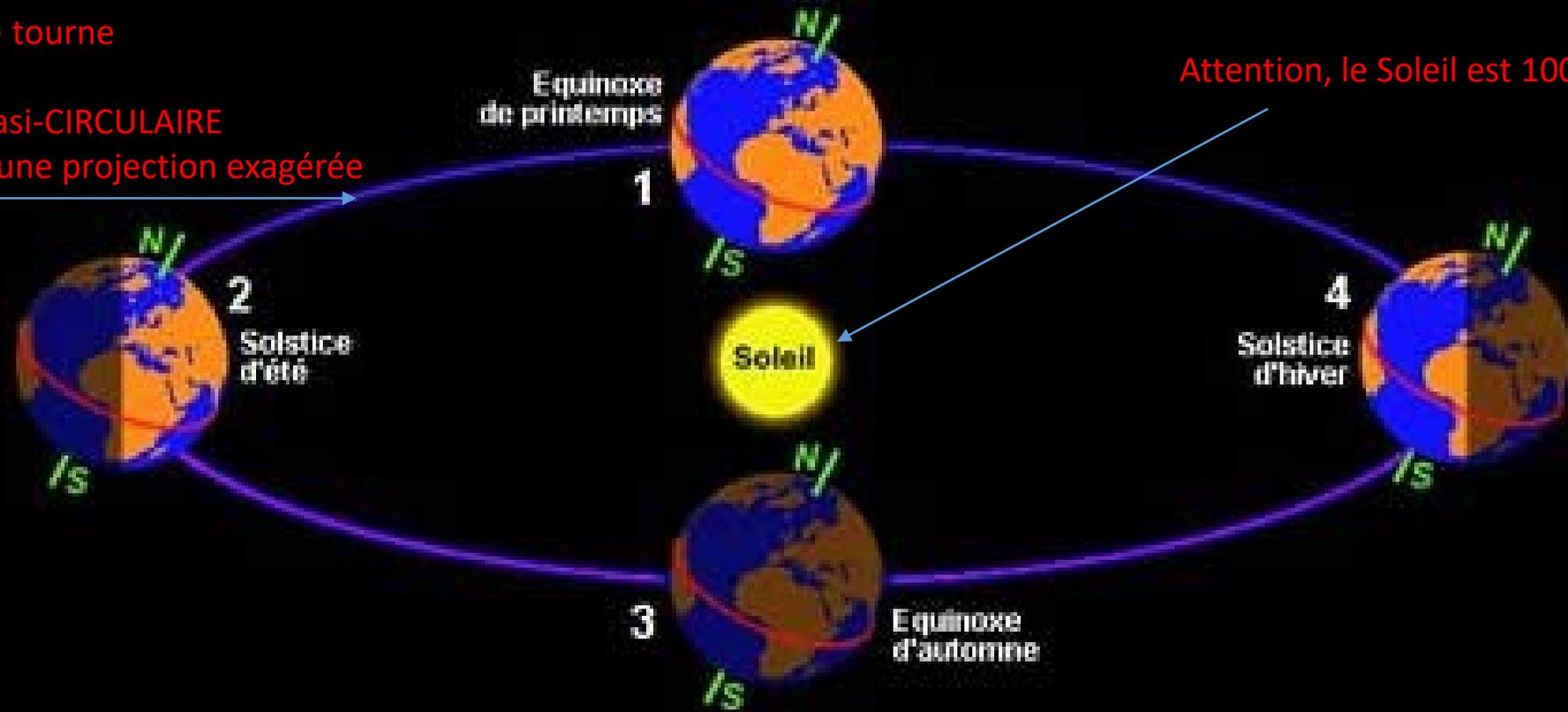
## Rappel

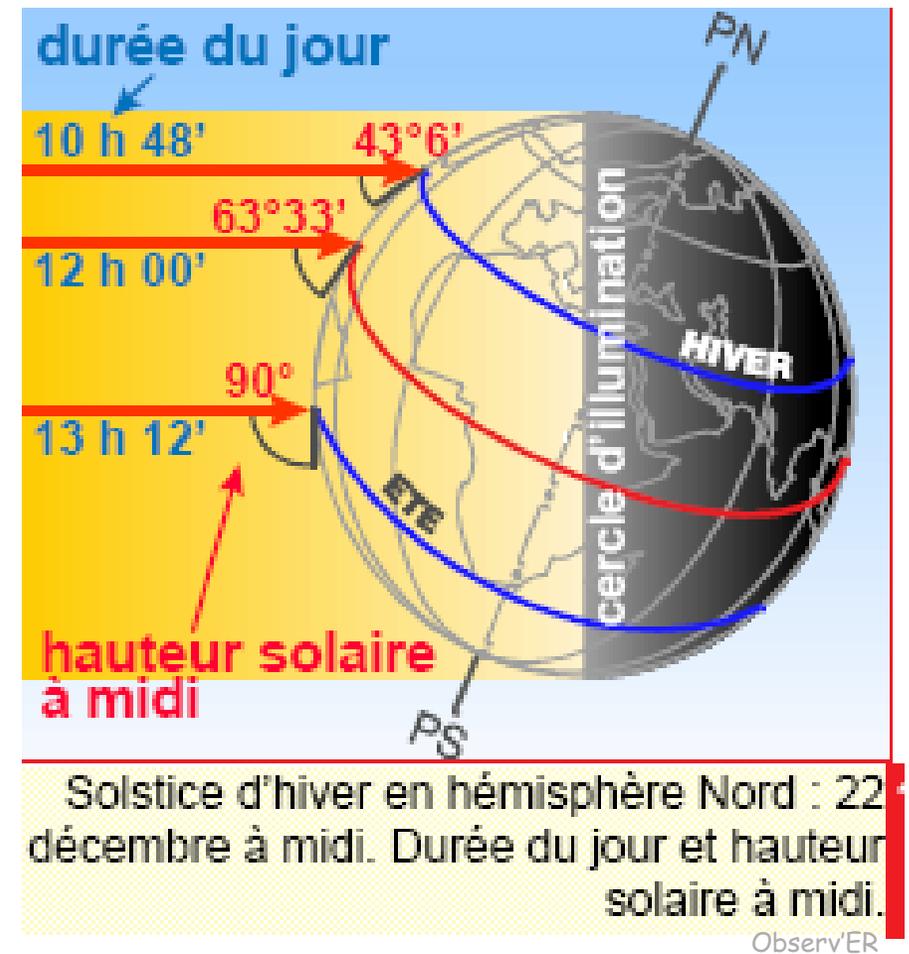
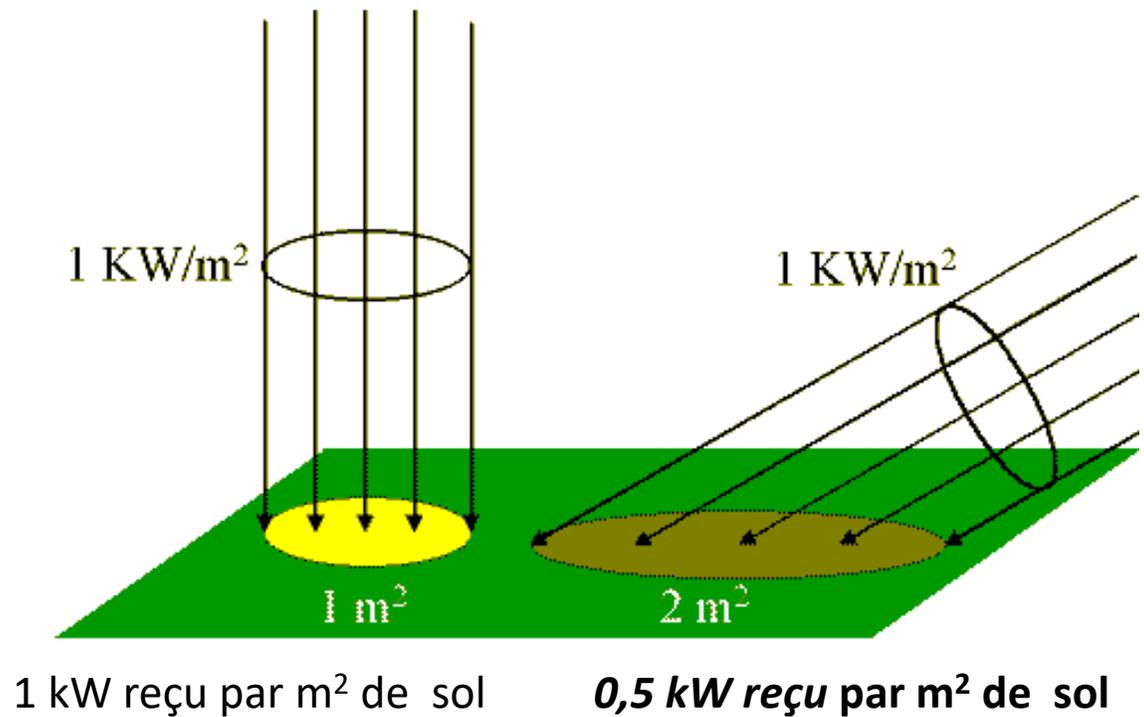


la révolution de la Terre autour du Soleil se fait sur une orbite quasi-circulaire  
( En fait, la Terre est très légèrement + proche du Soleil pendant l'Hiver Français ! )

Attention, la Terre tourne  
autour du Soleil  
sur une orbite quasi-CIRCULAIRE  
Ici, le schéma est une projection exagérée

Attention, le Soleil est 100~+ gros que la Terre!



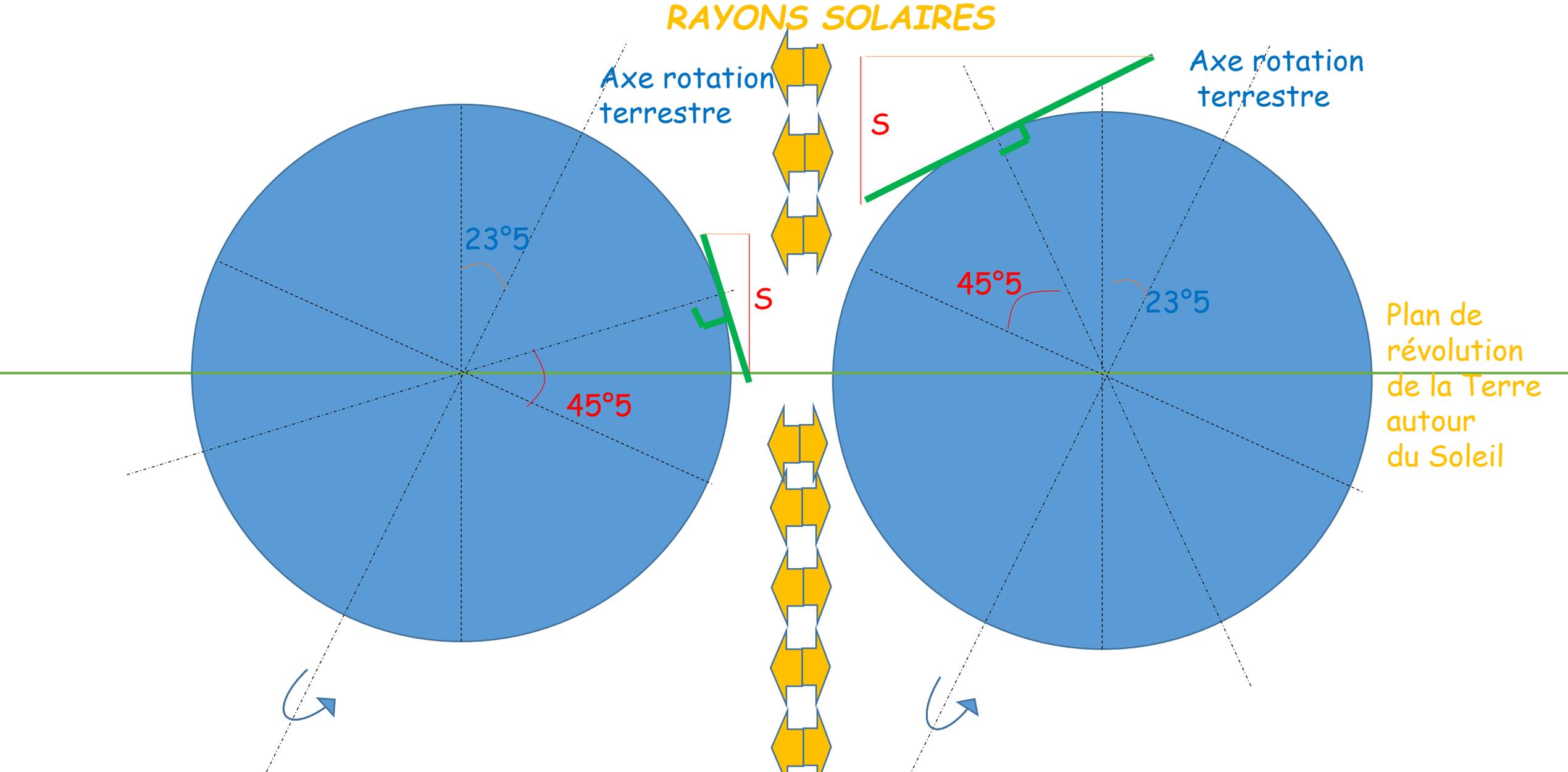


⇒ Causes du froid l'hiver en France:

- 1) l'inclinaison des rayons solaires diminue la PUISSANCE par Unité de Surface Terrestre
- 2) la durée locale du jour qui diminue: on chauffe l'atmosphère moins longtemps

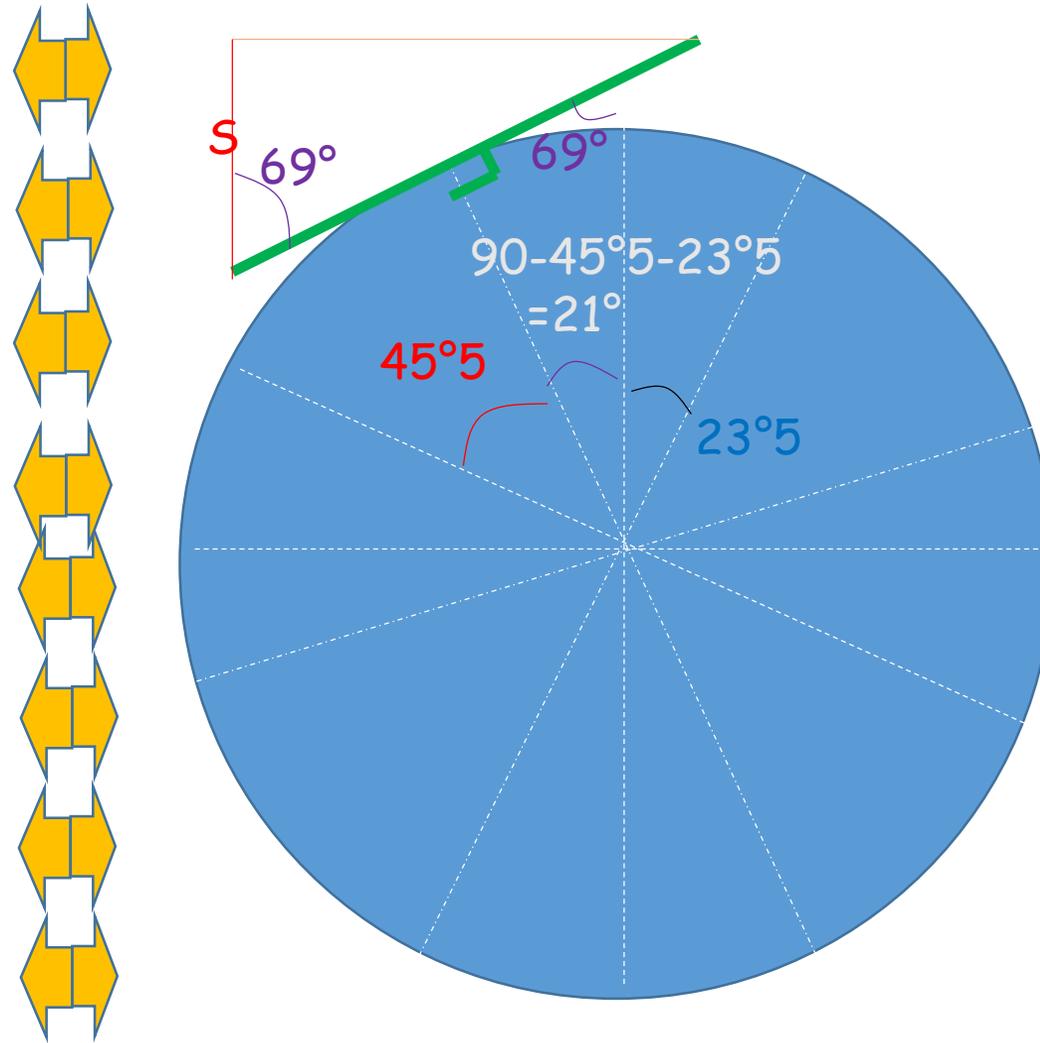
# Midi Solaire

2 extrêmes différents dans l'année: quand est-ce l'Hiver / l'Eté à Amiens ?



$$P/S = 1362 \text{ W.m}^{-2}$$

$$P_1/S_1 = 1362 \cos 69^\circ \sim 490 \text{ W.m}^{-2}$$

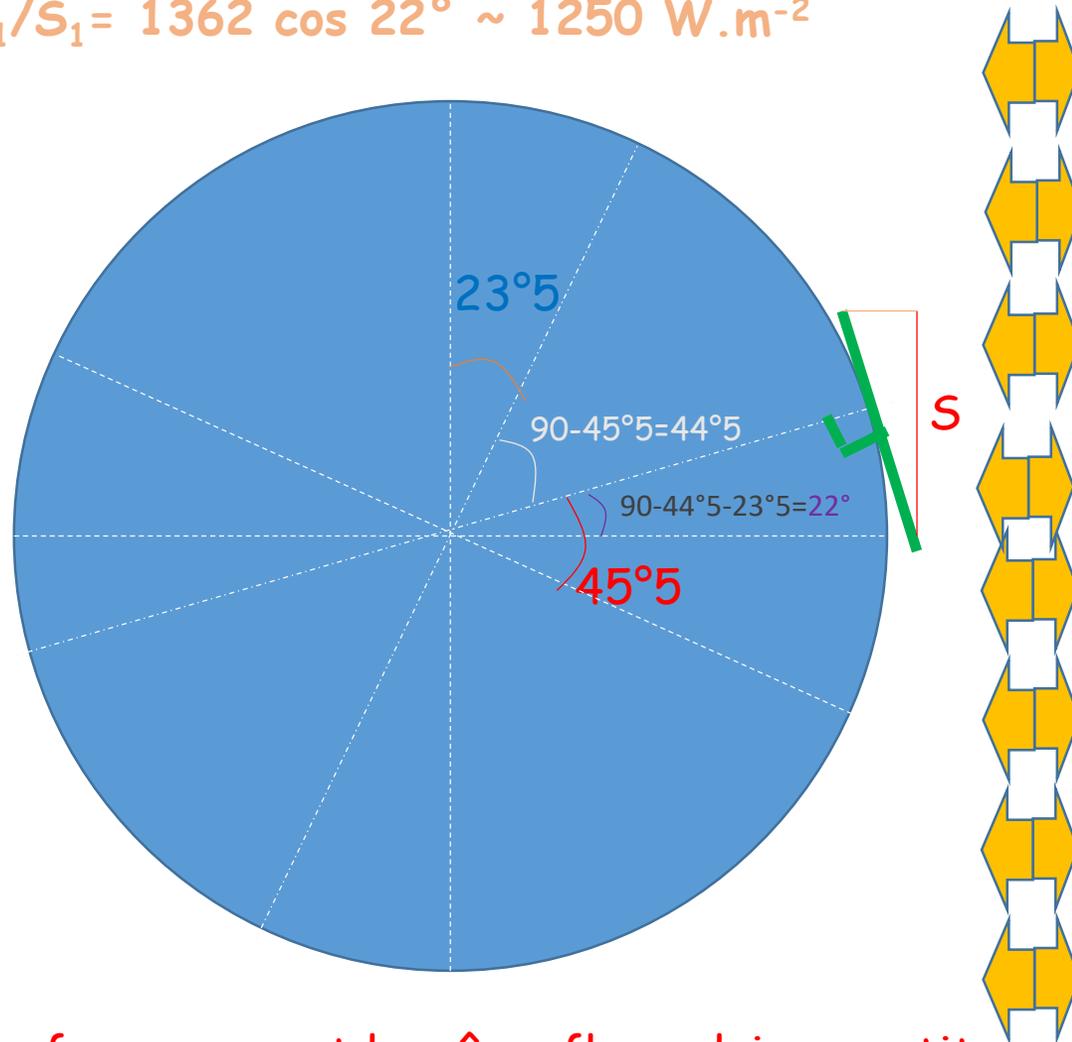


⇒ Surface recevant le même flux solaire + grande

⇒ HIVER Puissance par unité de Surface bien plus petite

$$P/S = 1362 \text{ W.m}^{-2}$$

$$P_1/S_1 = 1362 \cos 22^\circ \sim 1250 \text{ W.m}^{-2}$$



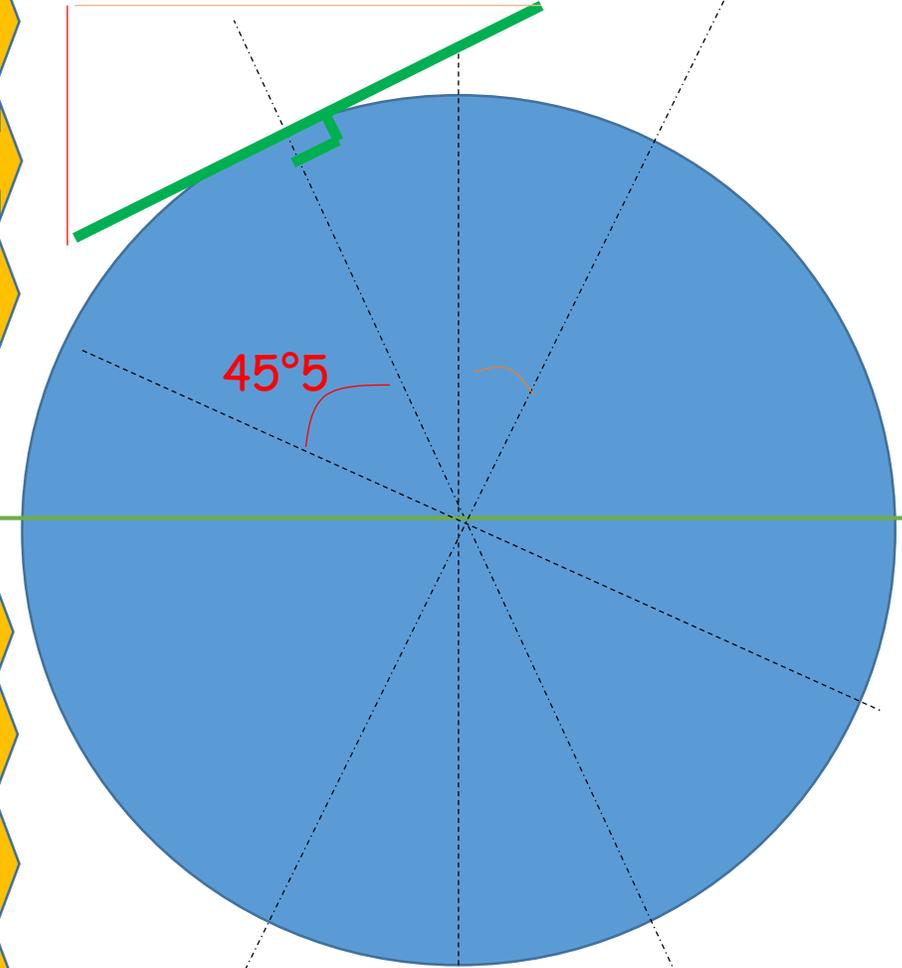
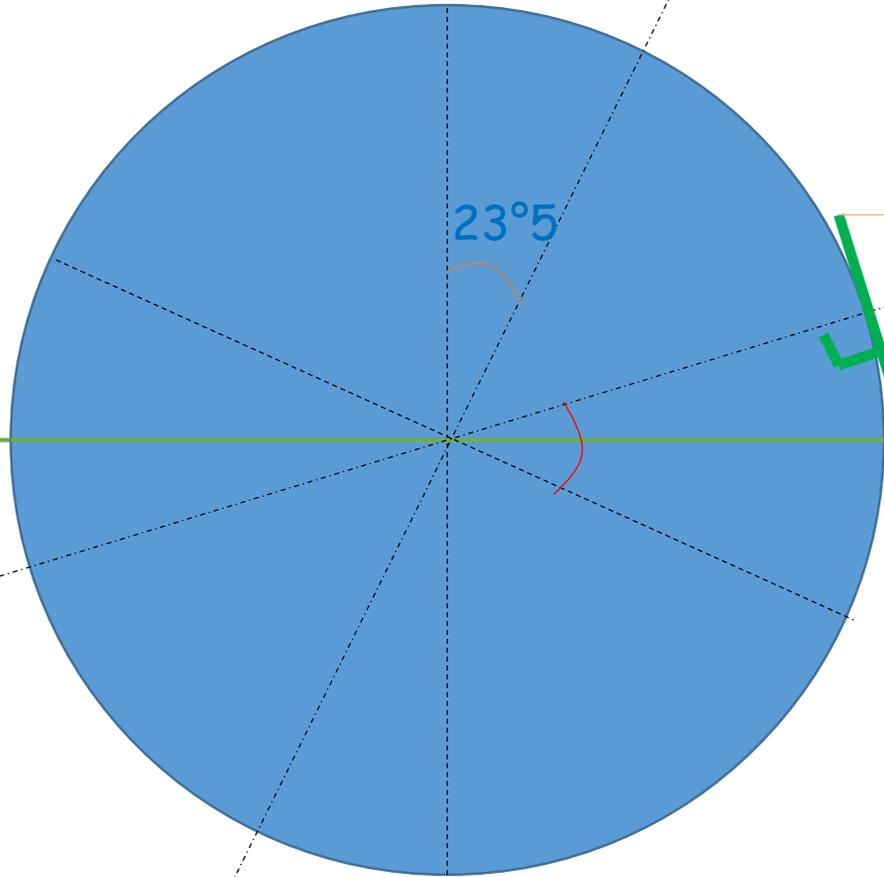
- ⇒ Surface recevant le même flux solaire + petite
- ⇒ Été : Puissance par unité de Surface + grande

Eté

Midi Solaire /

Hiver

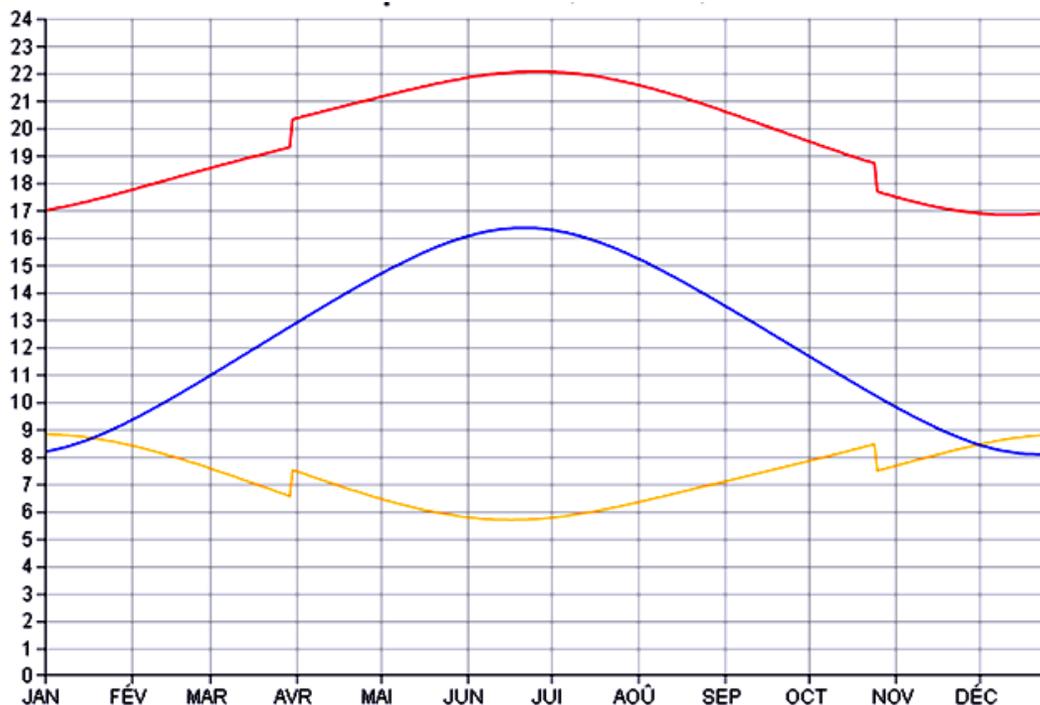
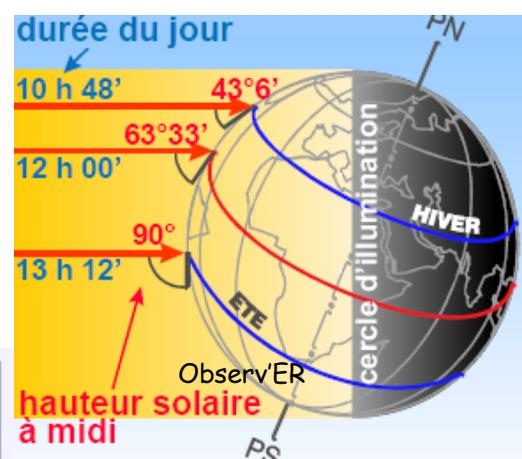
RAYONS SOLAIRES



« Et pourtant, elle tourne ! »\*

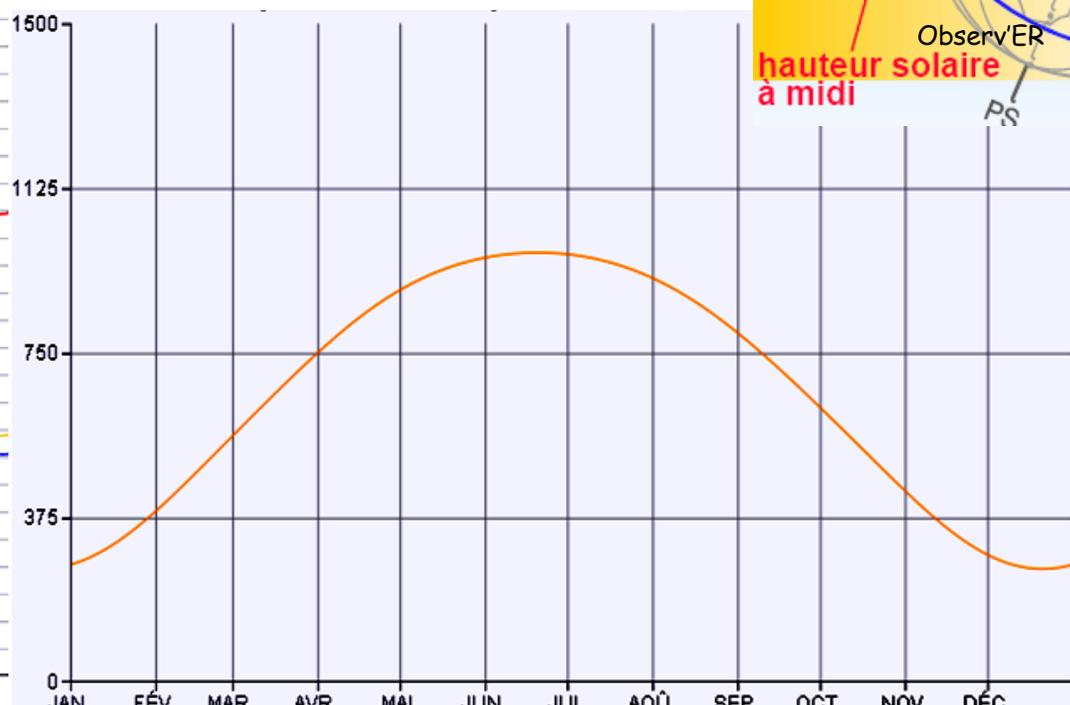
### Variation de l'inclinaison

- ⇒ Variation du flux solaire local
- ⇒ Variation de la durée locale du jour



Amiens, Somme, France 🇫🇷  
Coordonnées: 49°54'00"N 02°16'00"E  
Fuseau horaire: 1.0 UTC  
■ Lever du soleil (Aujourd'hui : 07:24)  
■ Coucher du soleil (Aujourd'hui : 20:09)  
■ Durée d'éclairage (Aujourd'hui : 12:45)

Lever, Coucher du Soleil et Durée du jour  
à Amiens, Somme, Picardie, France



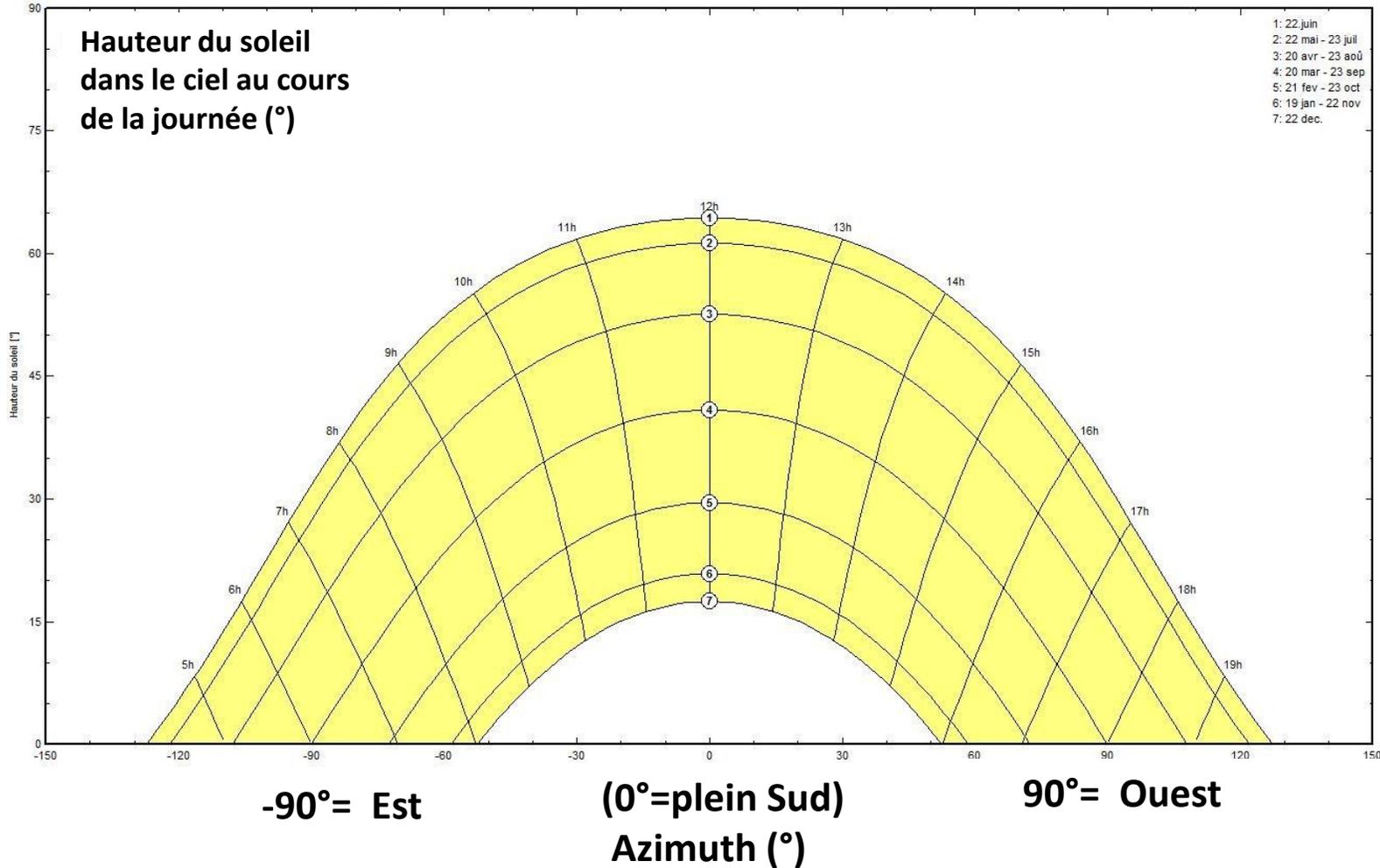
Amiens, Somme, France 🇫🇷  
Coordonnées: 49°54'00"N 02°16'00"E  
Fuseau horaire: 1.0 UTC  
■ Flux solaire (Aujourd'hui : 728.7 W/m²)

Flux solaire maximal à Amiens (W.m<sup>-2</sup>)

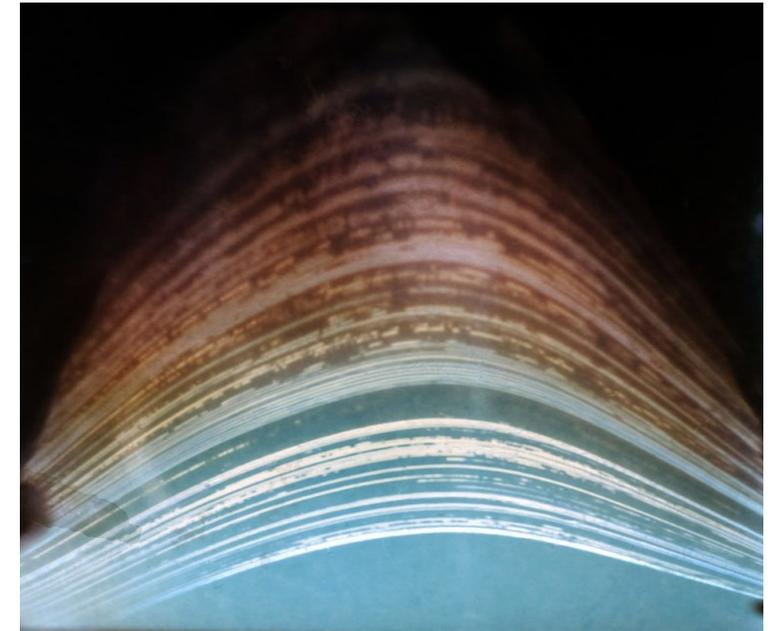
\* 'Epur si muove', Galileo Galilei ...

# Le Soleil vu du Sol Terrestre, au cours d'une journée... selon la date !

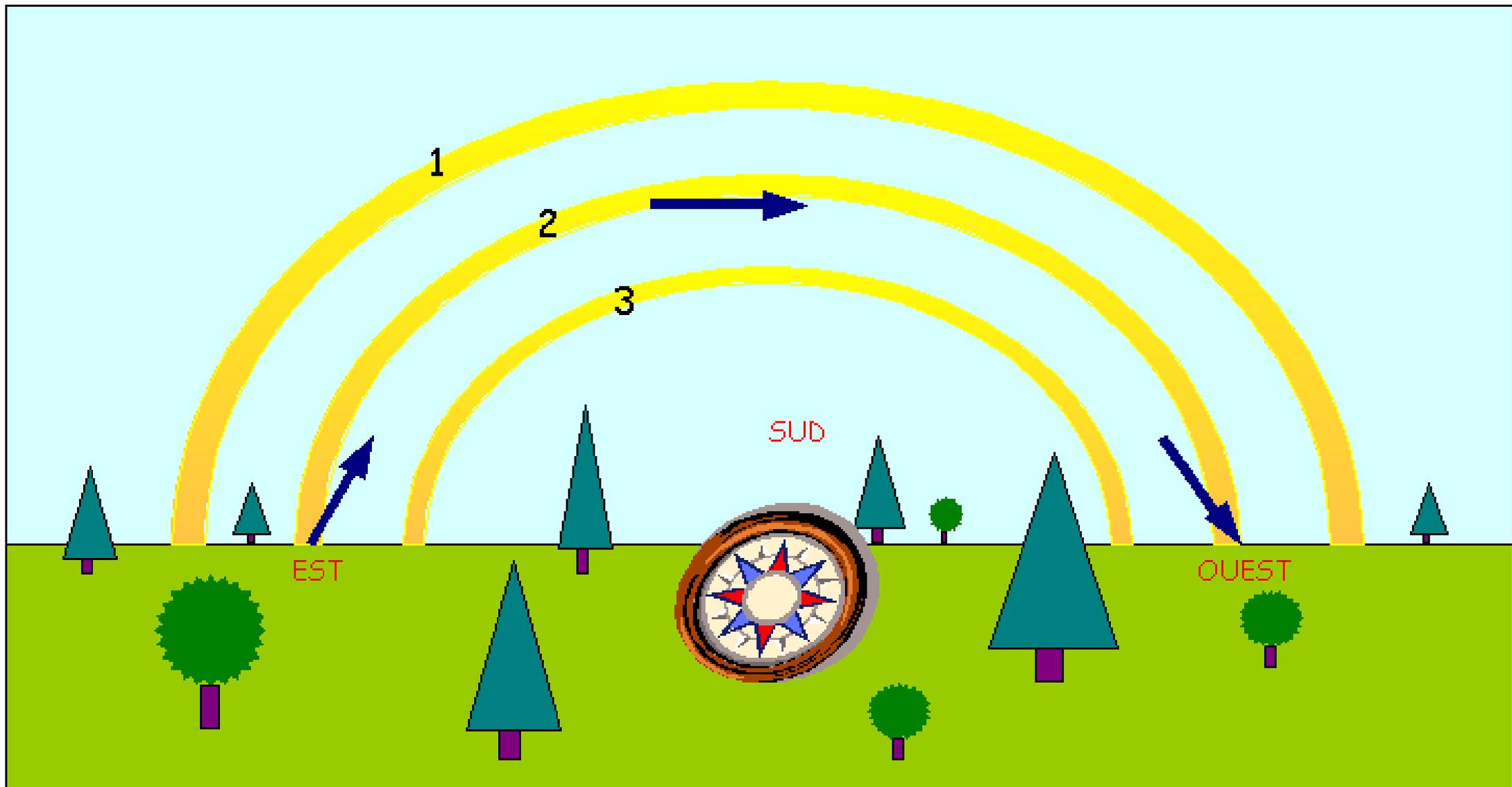
Course du soleil dans le ciel pour différentes époques de l'année  
(exemple à Paris)



**Solargraphie**  
( film photographique exposé pendant 6 mois dans un sténopé )

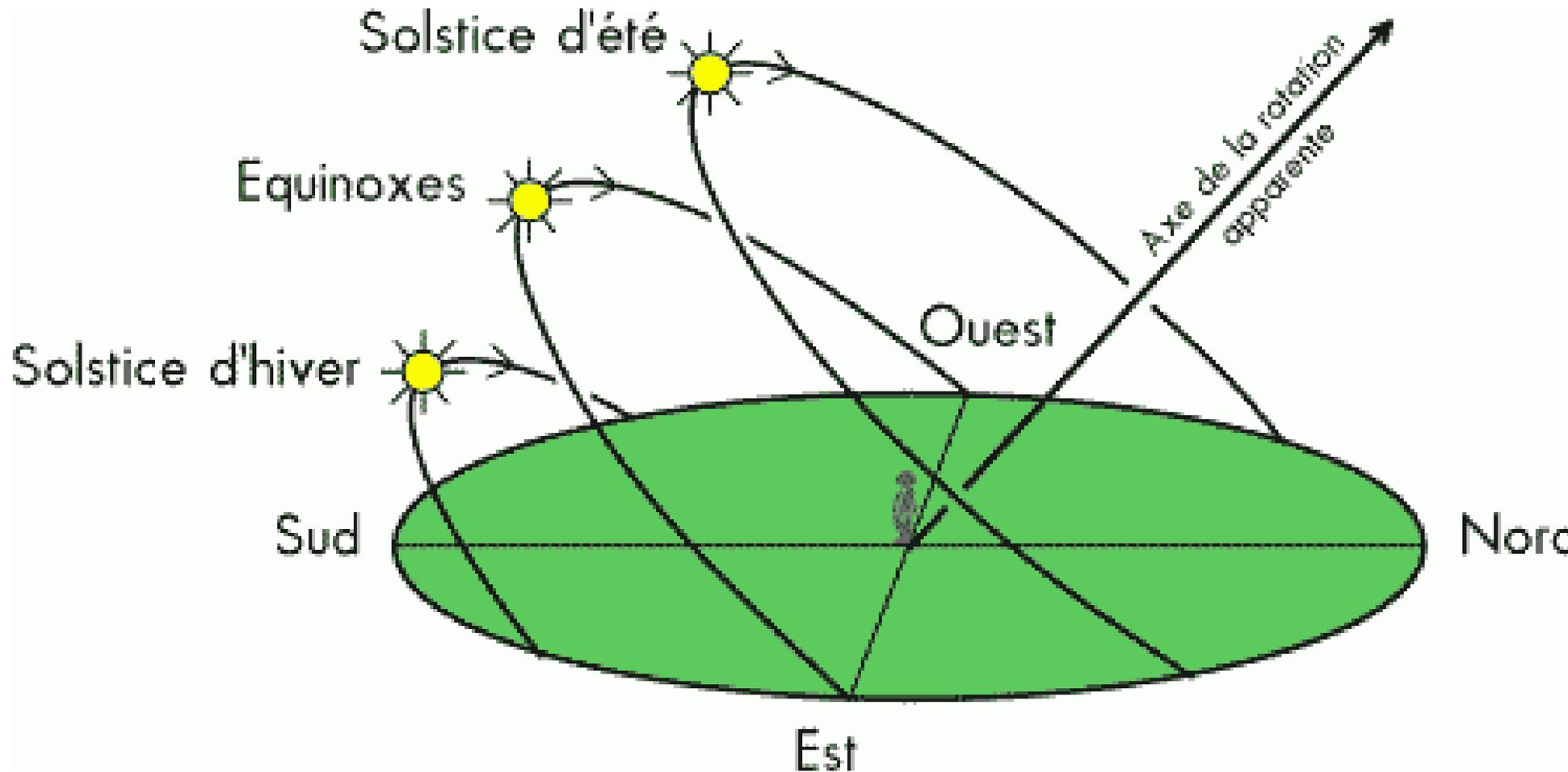


Jean-Marie Malherbe



- 1 Eté
- 2 Equinoxe (printemps/automne)
- 3 Hiver

Le passage du Soleil  
selon les époques de l'année



# Quelle est la source de l'énergie solaire ?

Hypothèses jusqu'au début du 20<sup>ème</sup> siècle

- **Origine chimique ?** (par ex. charbon brûlant dans de l'oxygène pur)  
⇒ mais la durée de vie du Soleil (compte tenu de sa masse connue) serait: **6000 ans**
- **Bombardement de matière ?** e.g. objets de masse terrestre percutant le Soleil en dissipant l'énergie cinétique  
⇒ mais on n'observe pas de perturbations des orbites planétaires
- **Contraction gravitationnelle ?** (Helmholtz : contraction de 76 m par an)  
⇒ mais la durée de vie du Soleil compte tenu de son rayon serait: **5 millions d'années**  
  
⇒ Or, on sait que le Soleil a au moins 4,5 Milliards d'années (géologie, datation isotopique...)

Explication 1930 : réactions thermonucléaires : nucléosynthèse stellaire

Réaction exothermique :

$$\text{Si } [m(A) + m(B)] c^2 > [m(C) + m(D)] c^2$$

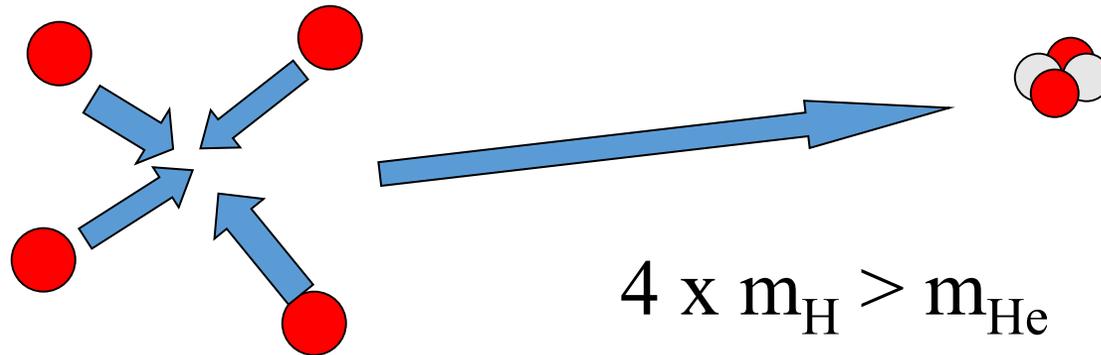


## La réaction de fusion thermonucléaire ?

Au départ, avant toute étoile, on trouve un gaz principalement composé d'Hydrogène

Mais au cœur de l'étoile, les conditions de température et de pression sont devenues telles que le gaz est passé à l'état plasma et l'Hydrogène est transformé en Hélium

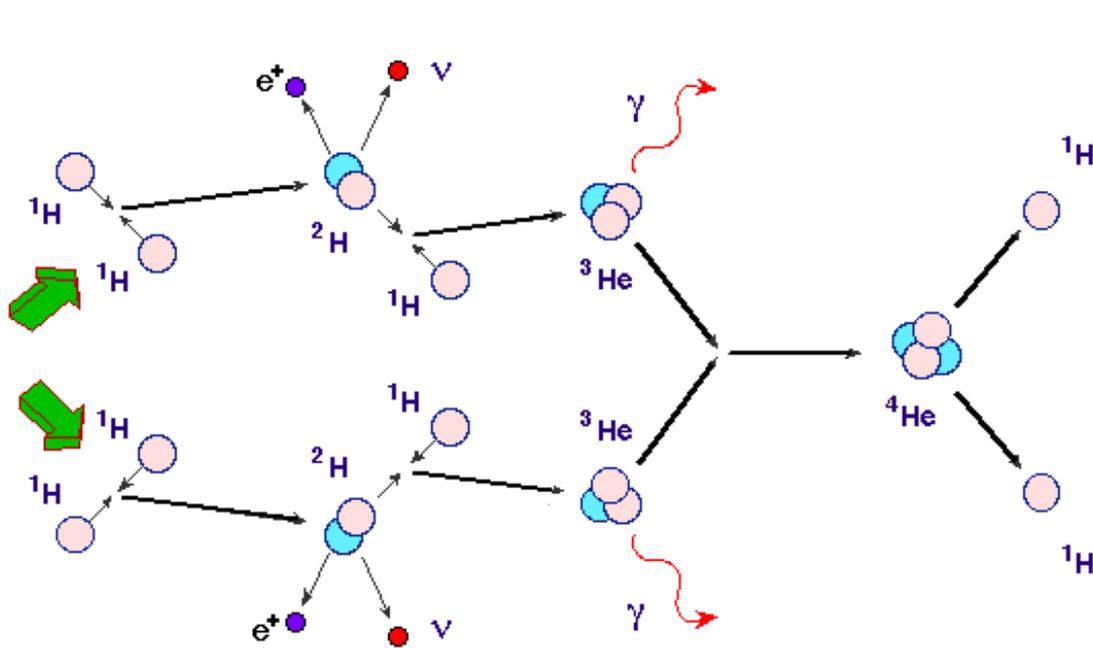
Cette réaction libère beaucoup d'énergie



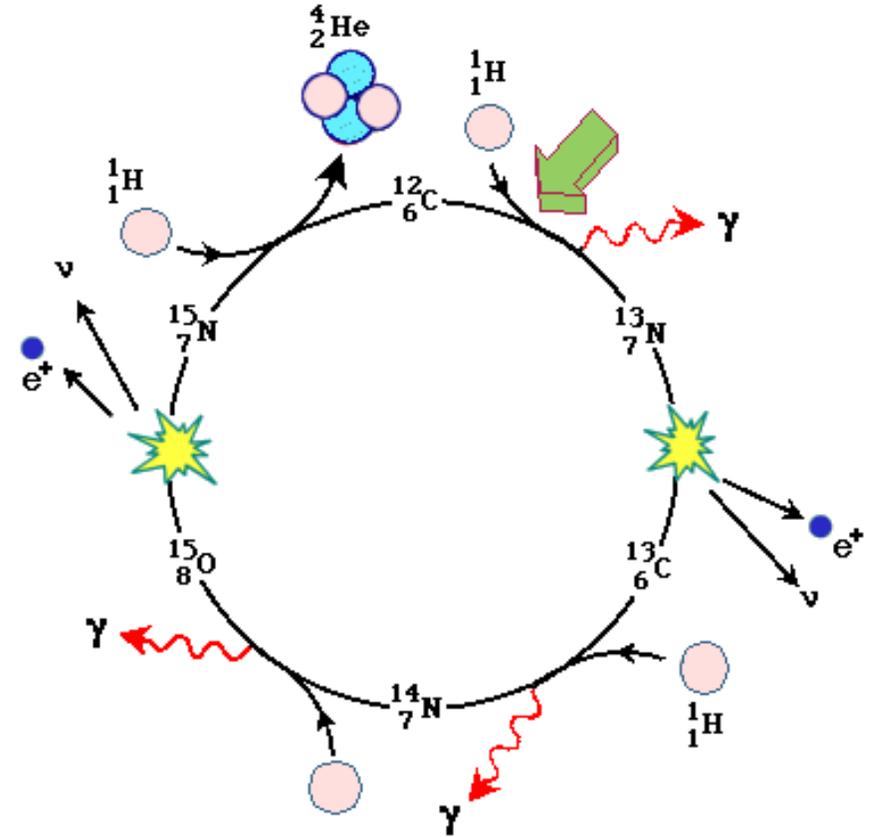
La différence s'est libérée  
sous forme d'énergie, entre  
autres en rayonnement

# Chaîne p-p et cycle CNO

Le soleil transforme l'Hydrogène en Hélium : l'énergie libérée lors de cette réaction produit des particules (neutrinos, positrons) et des rayons  $\gamma$  (gamma)



Chaîne p-p



cycle CNO

Soleil :  
réaction pp > 90 %  
cycle CNO < 10 %

# Energie nucléaire : différence entre

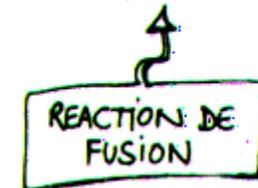
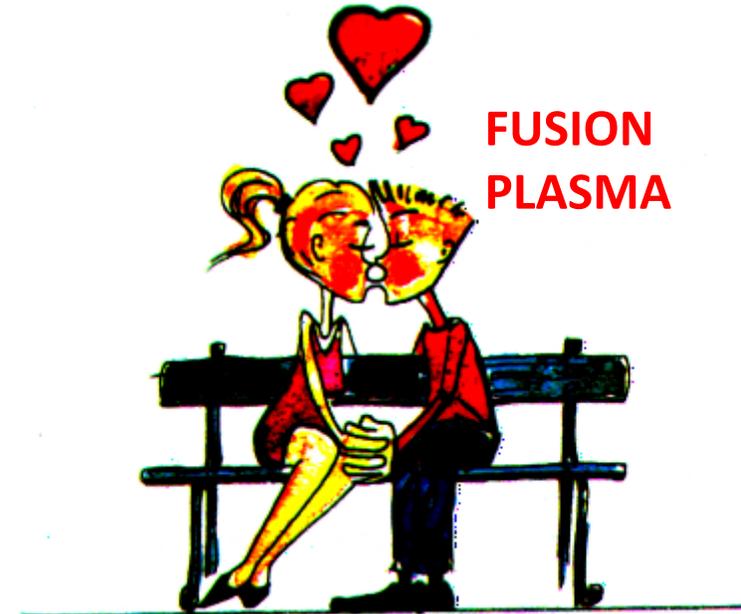
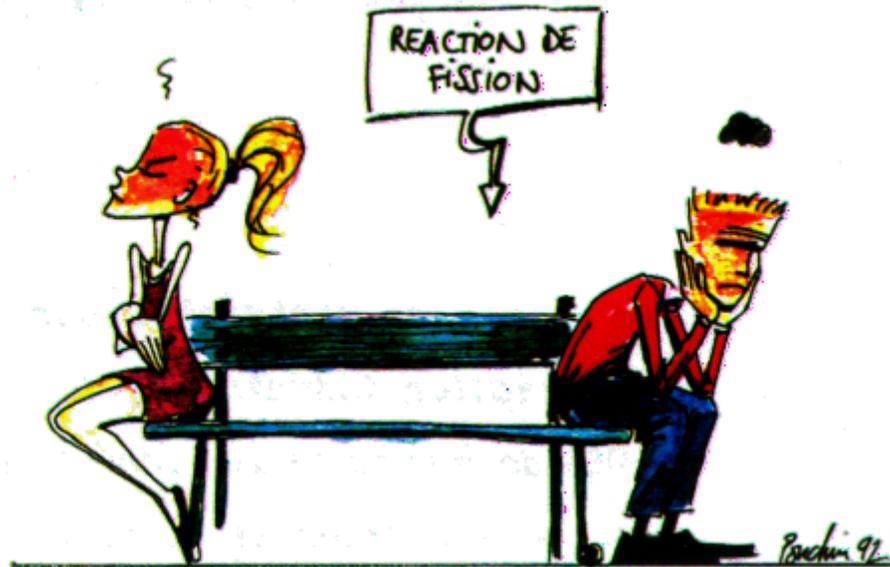
Fission

et

Fusion

## Fission

(réacteurs nucléaires actuels) réactions en chaîne,  
il faut éviter la divergence,  
qui est un phénomène destructeur ...

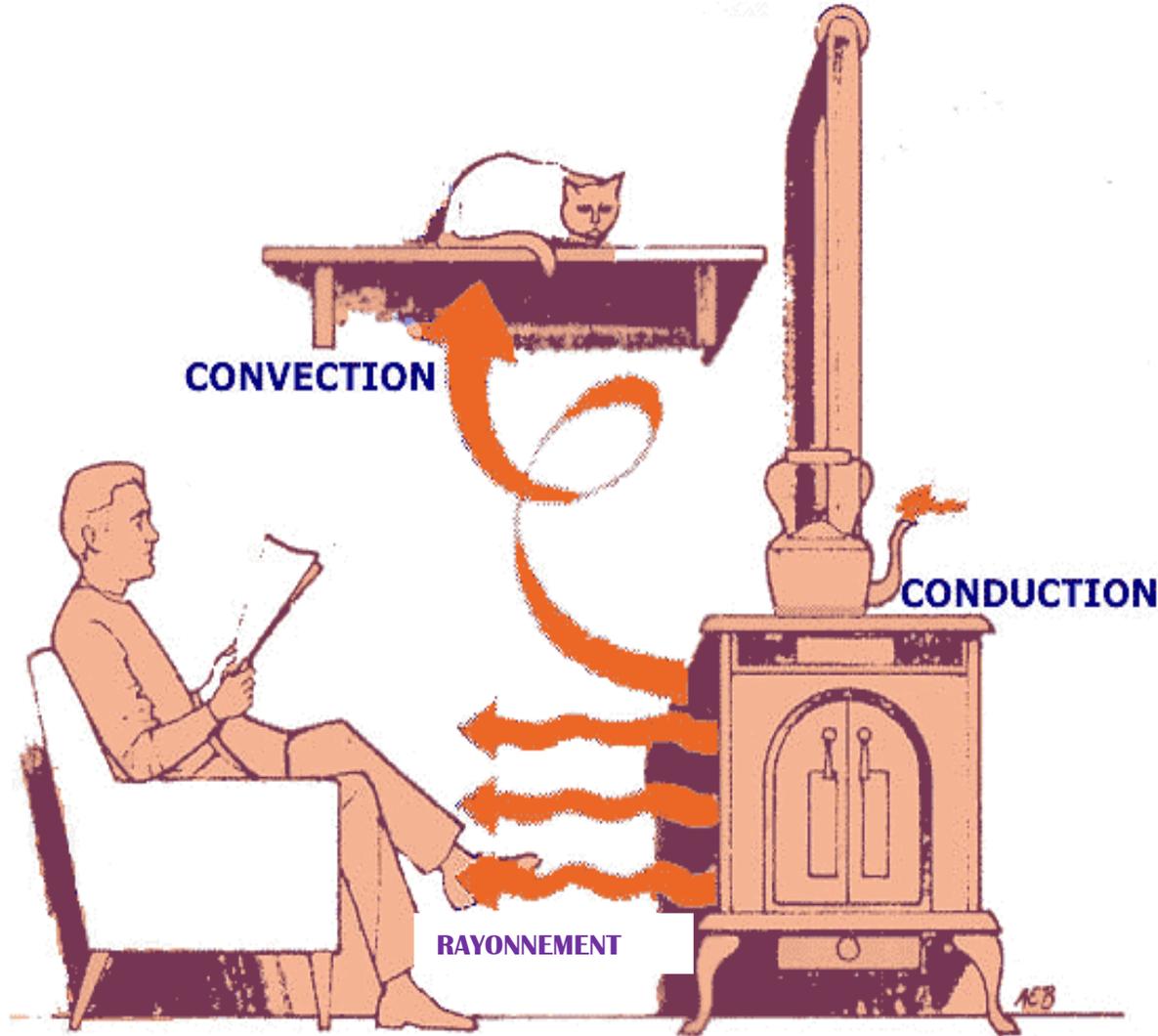


Fusion (Soleil, projet ITER...)  
chaud, très chaud, fragile,  
ça a tendance à refroidir,  
s'arrête à la moindre perturbation...

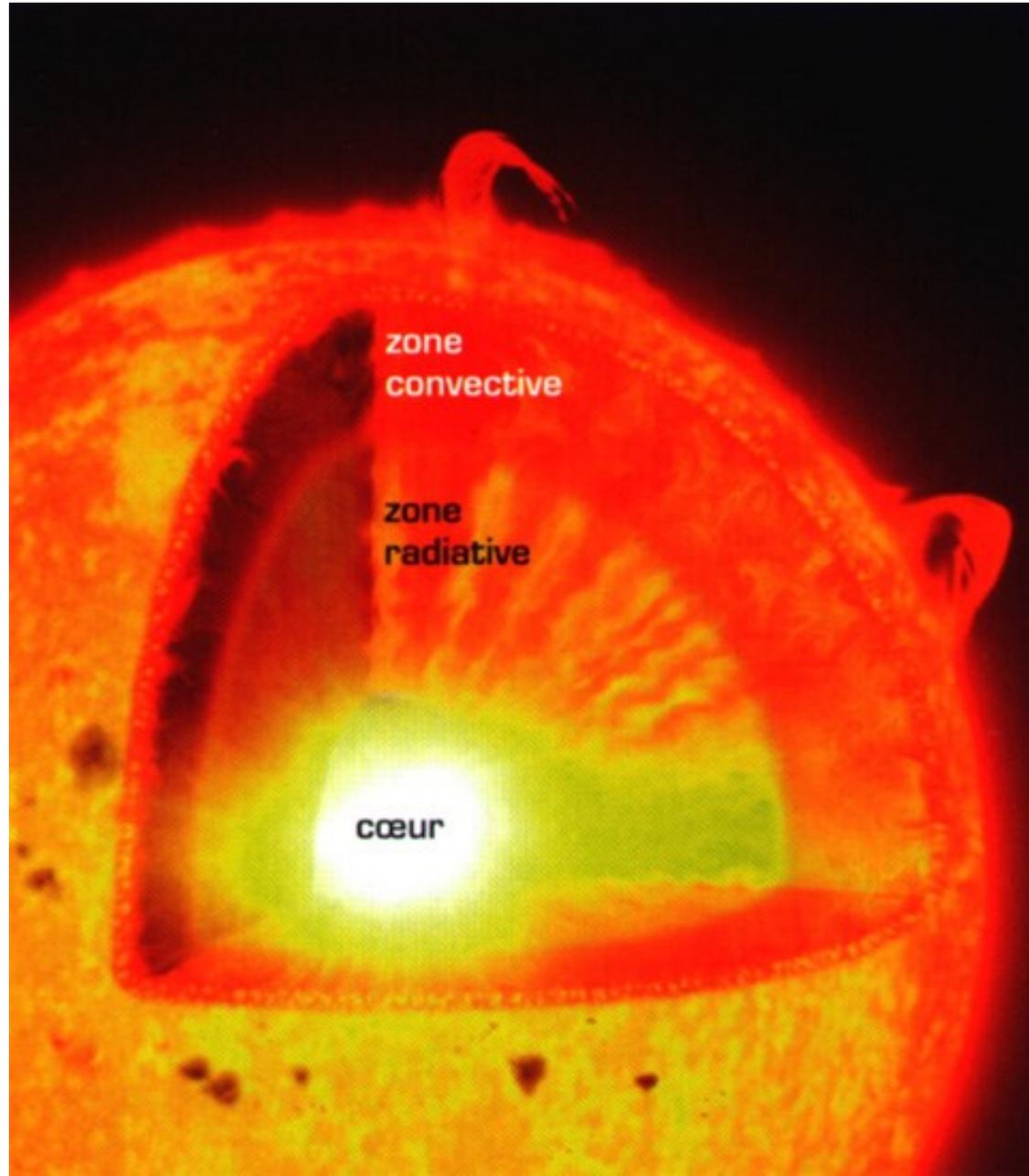
'Rappel'

*3 modes de transfert direct de la chaleur*

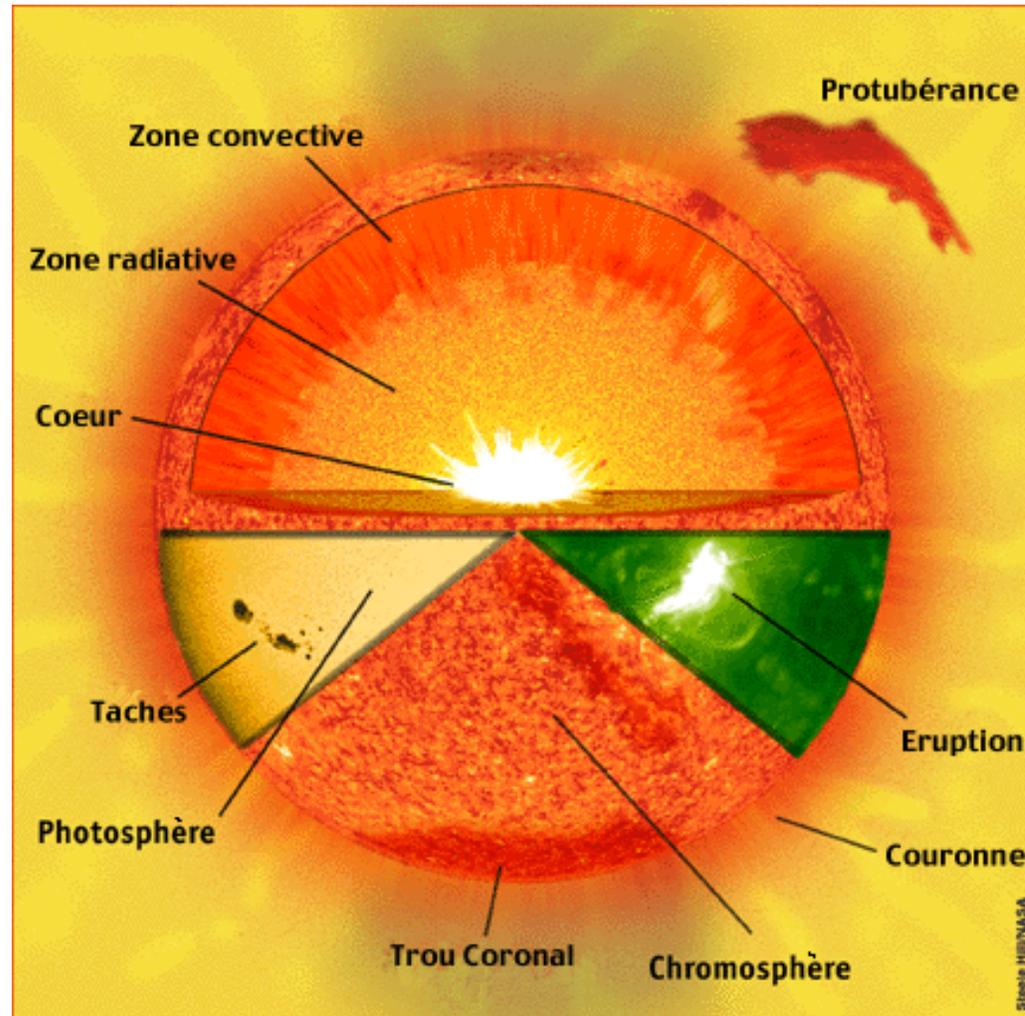
Conduction, Convection, Rayonnement



# Structure simplifiée du Soleil



# Structure du Soleil



**Cœur** (0- 0.15  $R_S$ )  
*siège des réactions thermonucléaires*

**Zone radiative** (0.15 - 0.7  $R_S$ )  
*zone très dense de transfert radiatif  
émission et réabsorption des photons sur des  
distances de l'ordre du cm  
⇒ durée du transfert d'énergie: millions d'années!*

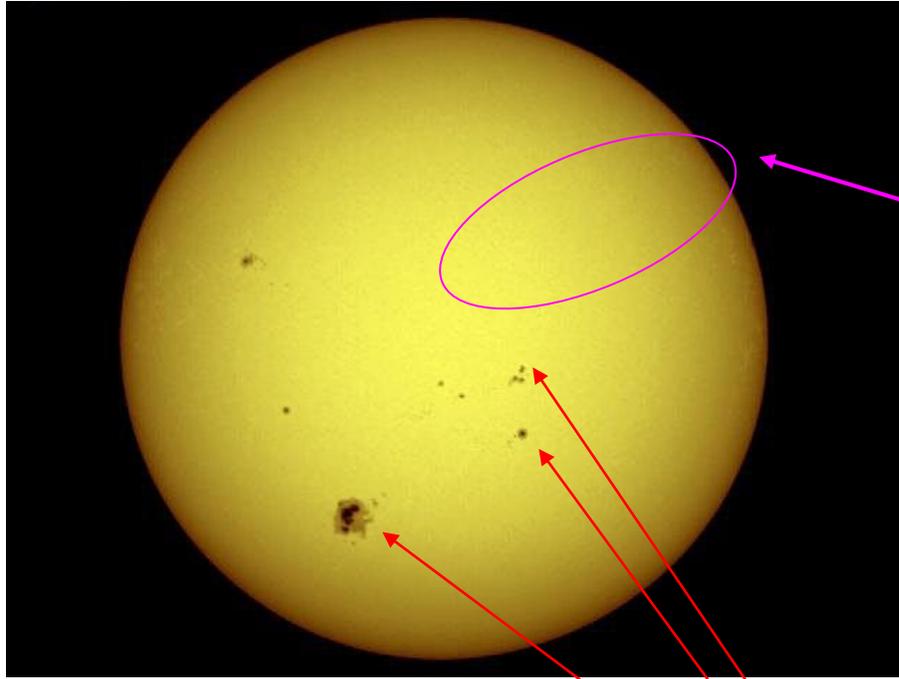
**Zone convective** (0.7 - 0.9  $R_S$ )  
*mouvements tourbillonnaires évacuant la  
chaleur vers l'extérieur  
⇒ granulation de la surface solaire*

**Photosphère** (épaisseur ~500 km)  
*couche superficielle dont provient l'essentiel du  
rayonnement électromagnétique visible*

**Chromosphère** (au-dessus de la photosphère : épaisseur variable qqs 1000km) :  
*sculptée par le champ magnétique en différentes structures*

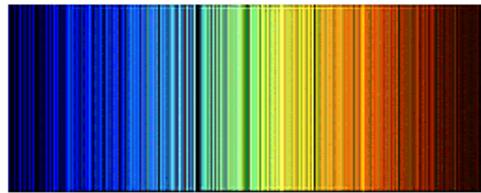
**Couronne** : atmosphère extérieure du Soleil

# Photosphère et granulation



**Assombrissement du bord du disque :**  
au bord on observe uniquement le rayonnement provenant des couches les + hautes (moins chaudes) de la photosphère.

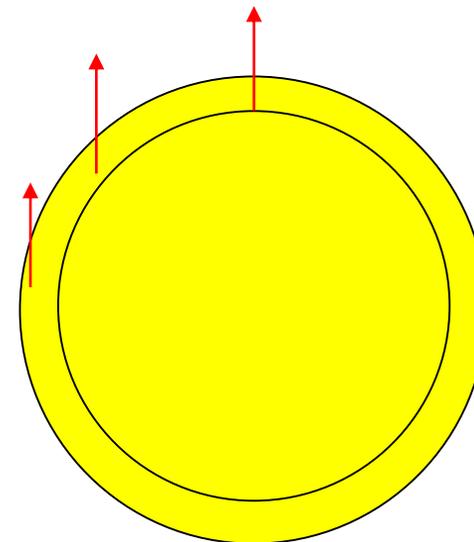
**Spectre continu d'émission et raies d'absorption**



signature de 61 éléments chimiques

Taches

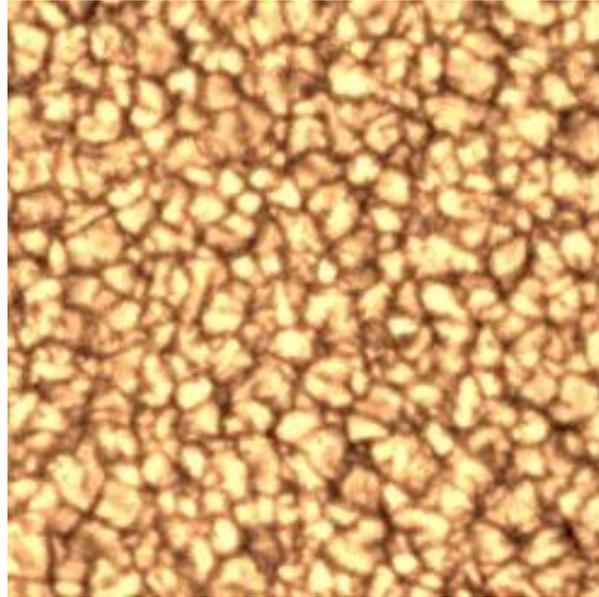
↑ "vers la Terre"



# Granulation de la surface du Soleil

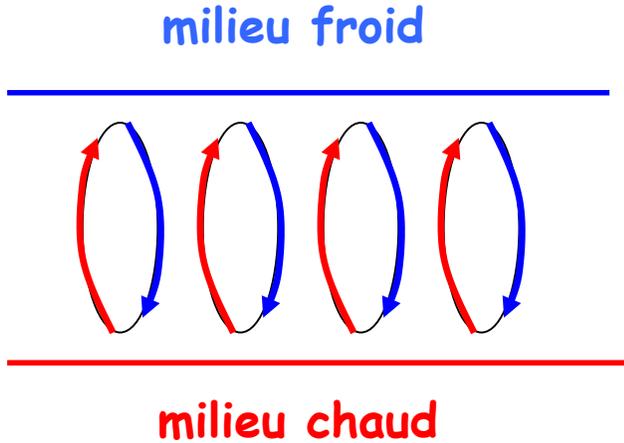
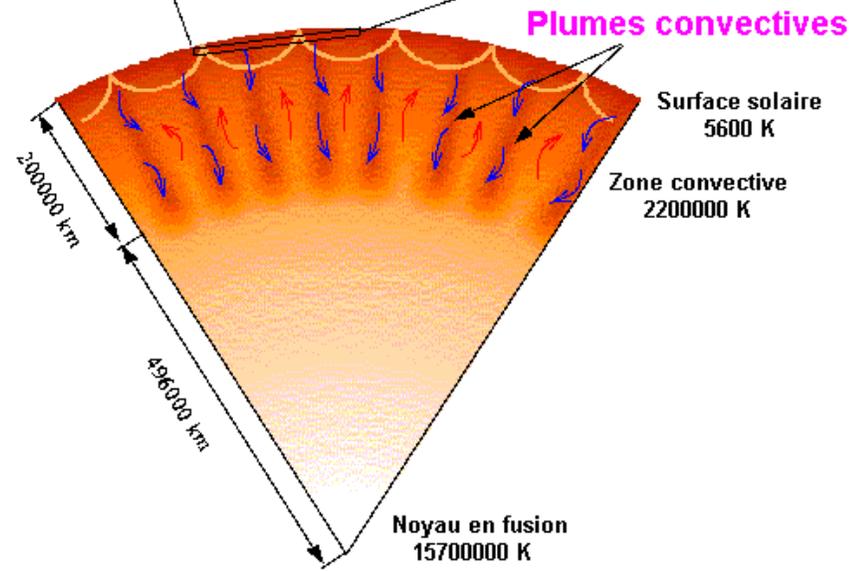
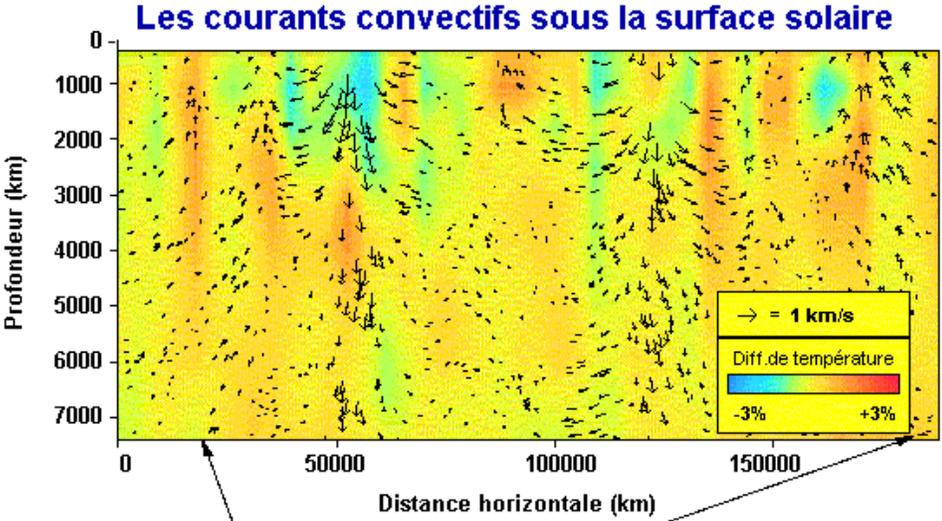
Texture de la surface en "grains de riz"

Echelle



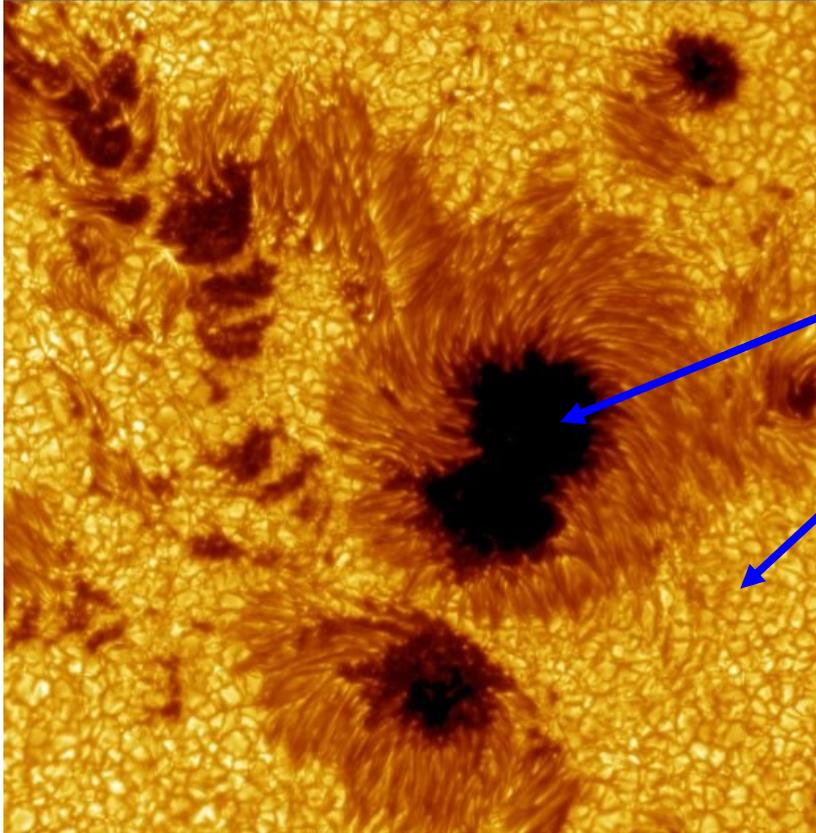
Granulation  
variable dans le temps (qqs mins)

# Courants thermiques convectifs



( <http://www.astrosurf.com/luxorion/menu-soleil.htm> )

# Taches solaires



régions relativement froides de la photosphère

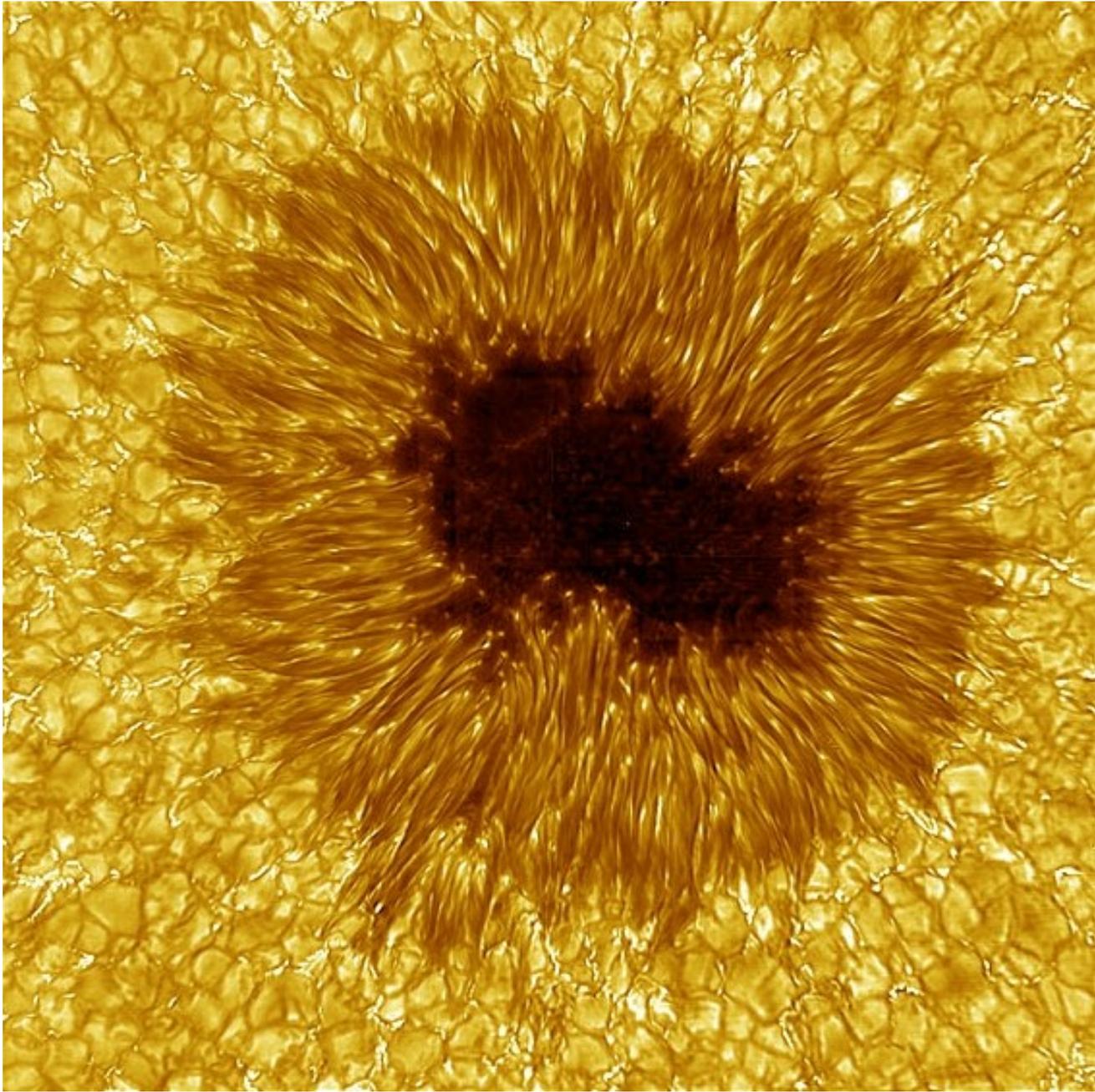
3700 K

5800 K

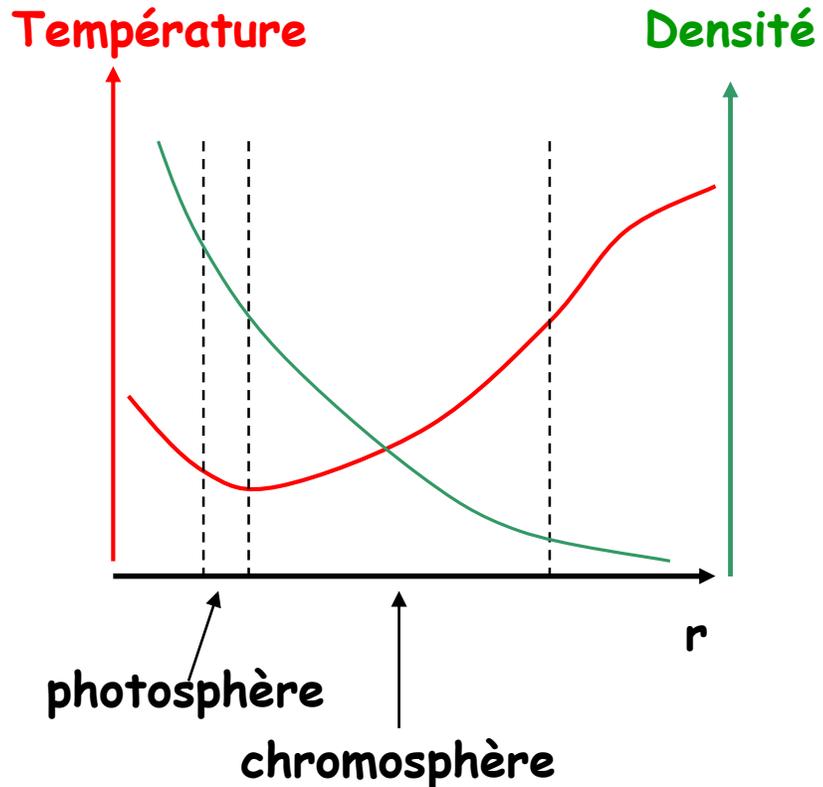
durées d'existence très diverses :  
de quelques heures à quelques mois

tailles variées : jusqu'à plusieurs  
diamètres terrestres

Nombre variable (fonction du cycle d'activité du Soleil)



# La chromosphère



Température plus élevée mais densité beaucoup plus faible

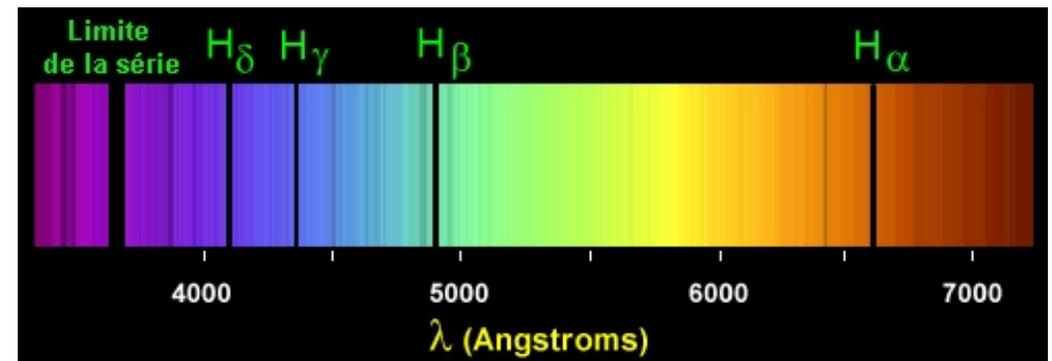
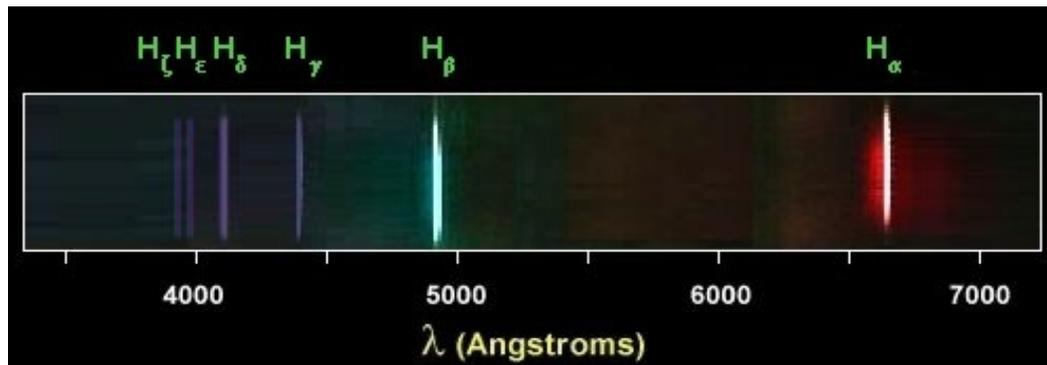
⇒ très faible émission de la chromosphère

⇒ observation de la chromosphère difficile

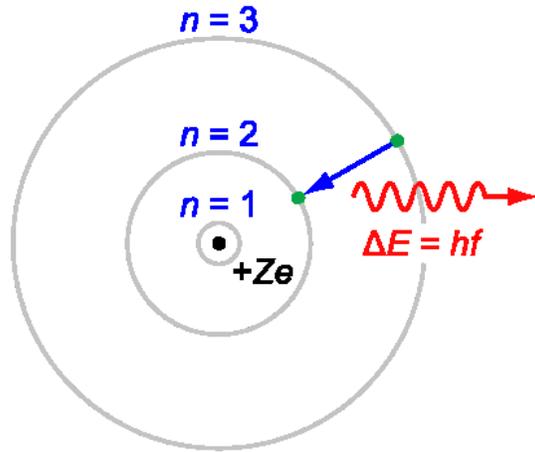
2 possibilités :

- lors de certaines éclipses solaires (sur le bord du disque lunaire pendant quelques instants (spectre éclair))

- observer des raies d'émission spécifiques ( $H_\alpha$ , K-Ca)



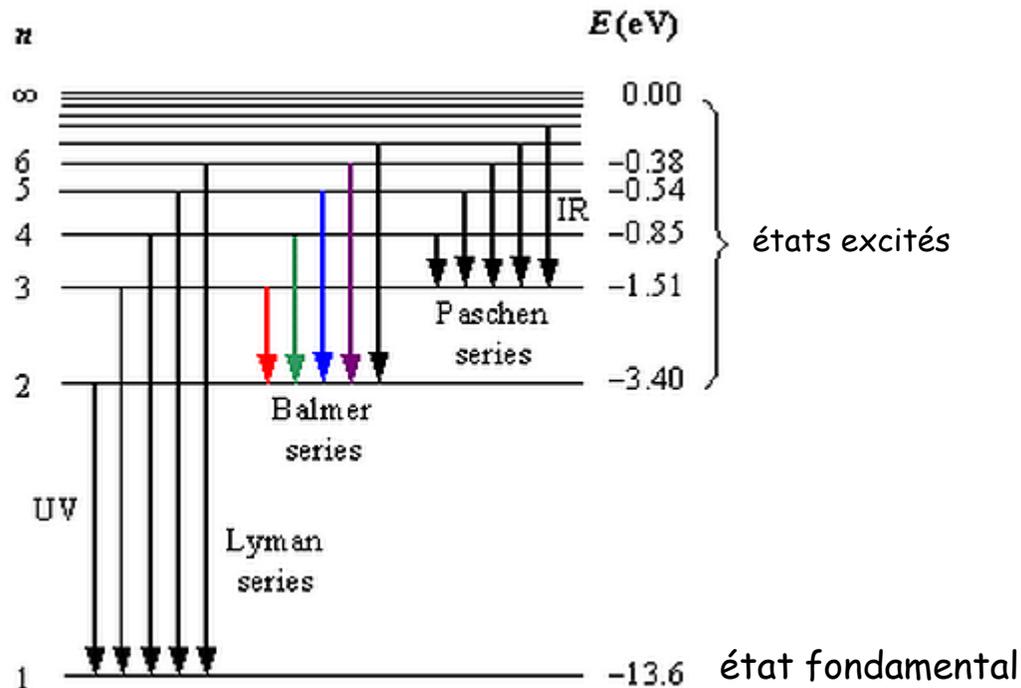
# L'émission Ha (H alpha)



*Cette transition électronique provient d'un atome H déjà ionisé auparavant*

Energie du photon émis : **1,89 eV \***

Longueur d'onde correspondante (vide) : **656,3 nm**



Energie nécessaire pour ioniser un atome H :

**13,6 eV**



**Cela demande une énergie thermique élevée !**

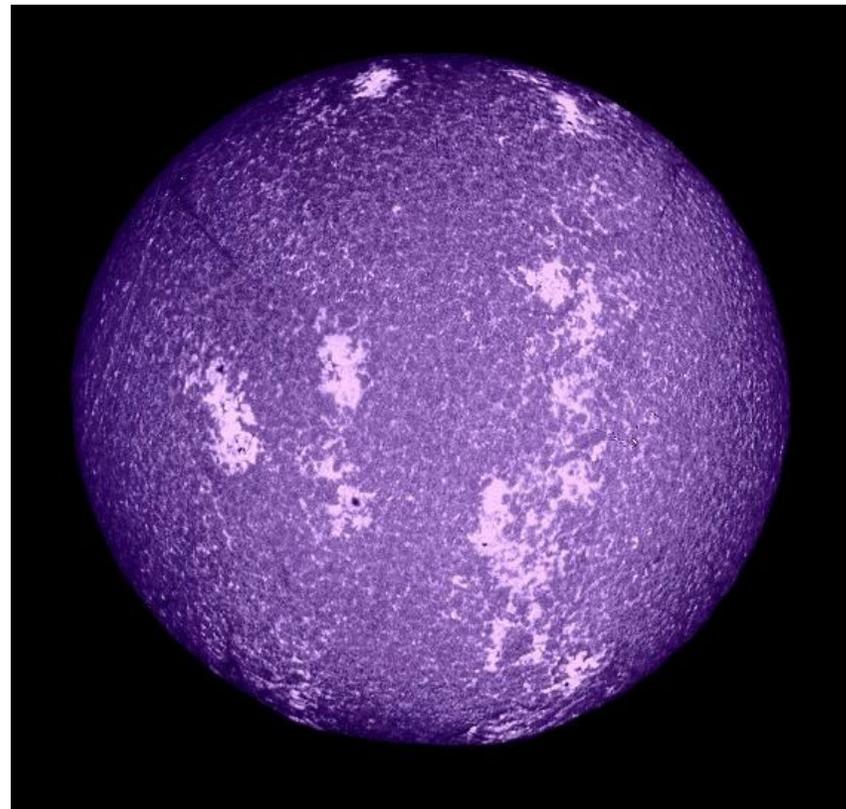
\*  $1 \text{ eV} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J}$

(Les atomes à  $T_{\text{ambiante}} = 27^\circ\text{C} = 300\text{K}$  ont pour énergie  $\sim 40 \text{ meV}$  !)

# La chromosphère



**raie de l'hydrogène Ha à 656.28 nm**  
(nécessite une température supérieure  
à celle de la photosphère)

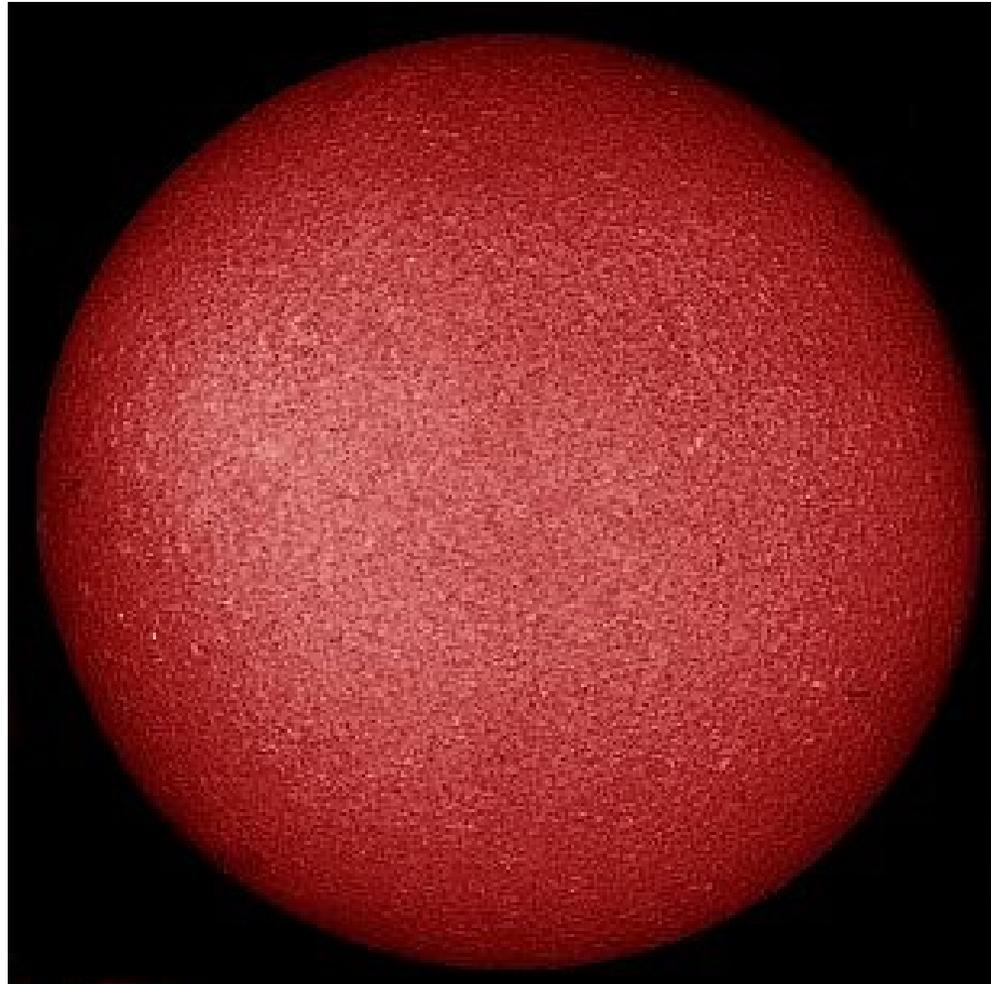


**raie du Calcium II K à 383.38 nm**  
(absorbé par la photosphère, ne  
peut donc provenir que de  
l'atmosphère haute du Soleil)

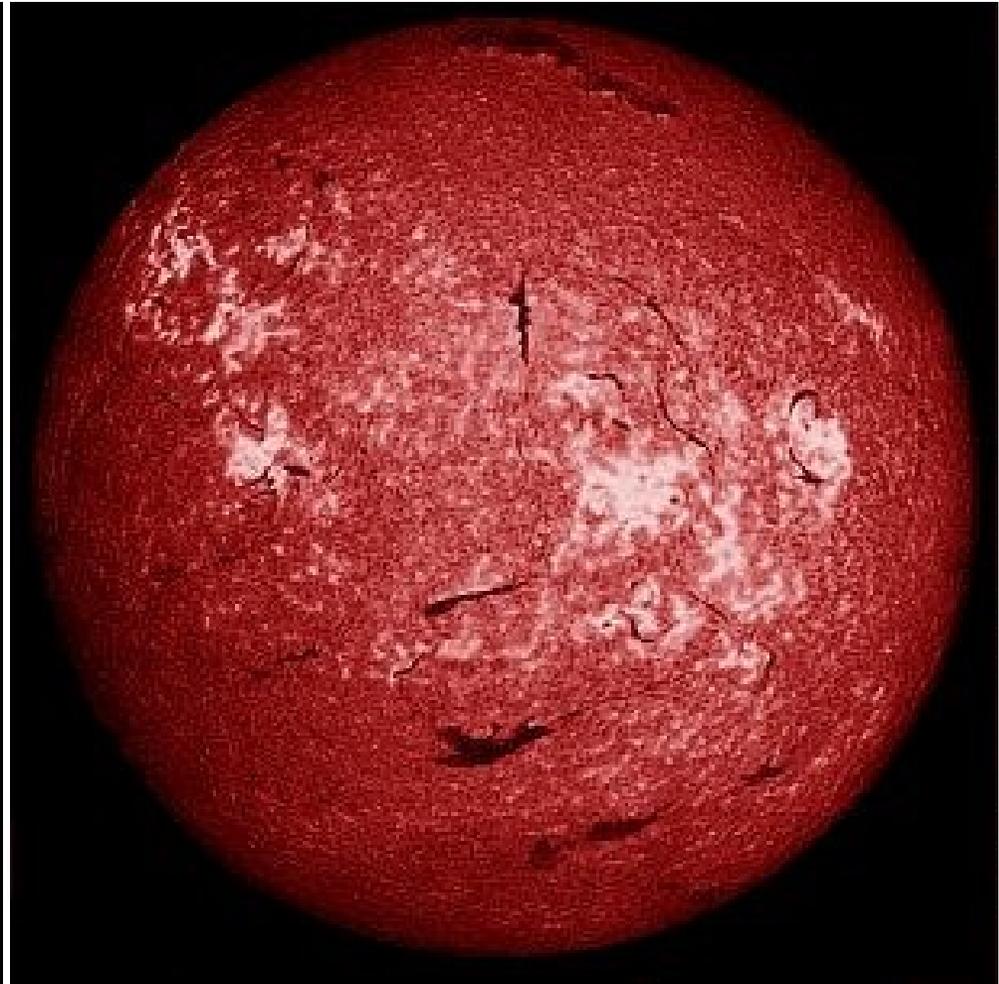
**surface structurée : présence de spicules et filaments**  
*et de supergranules (origine : champ magnétique et non la convection)*

# Activité de la chromosphère

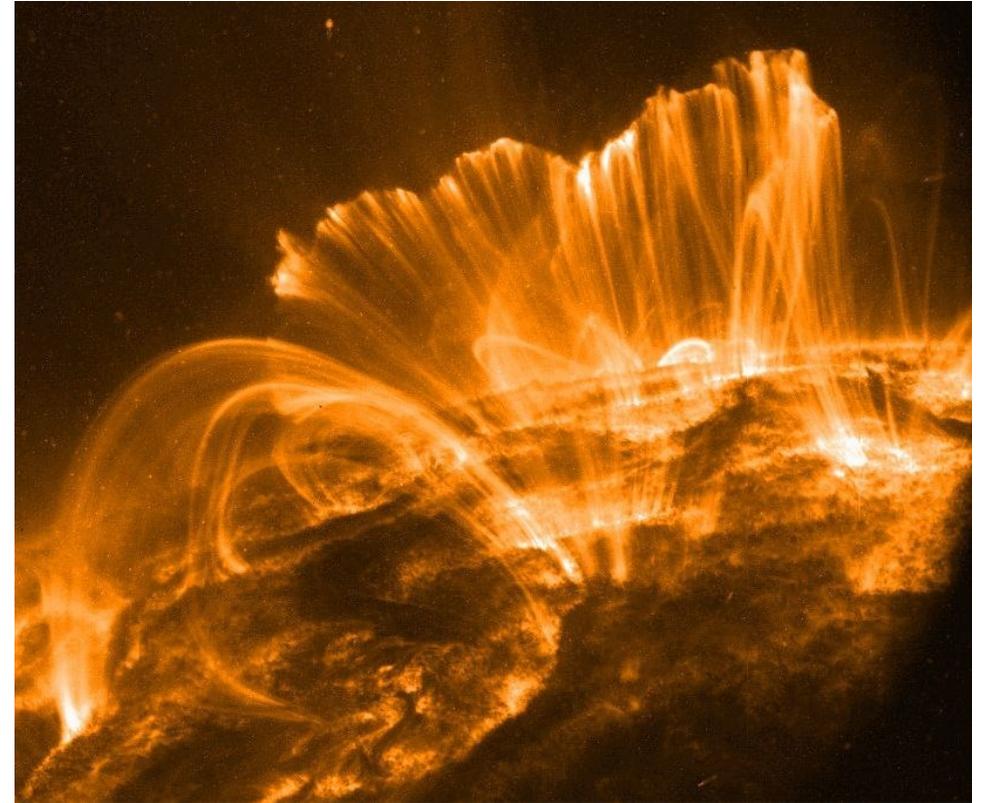
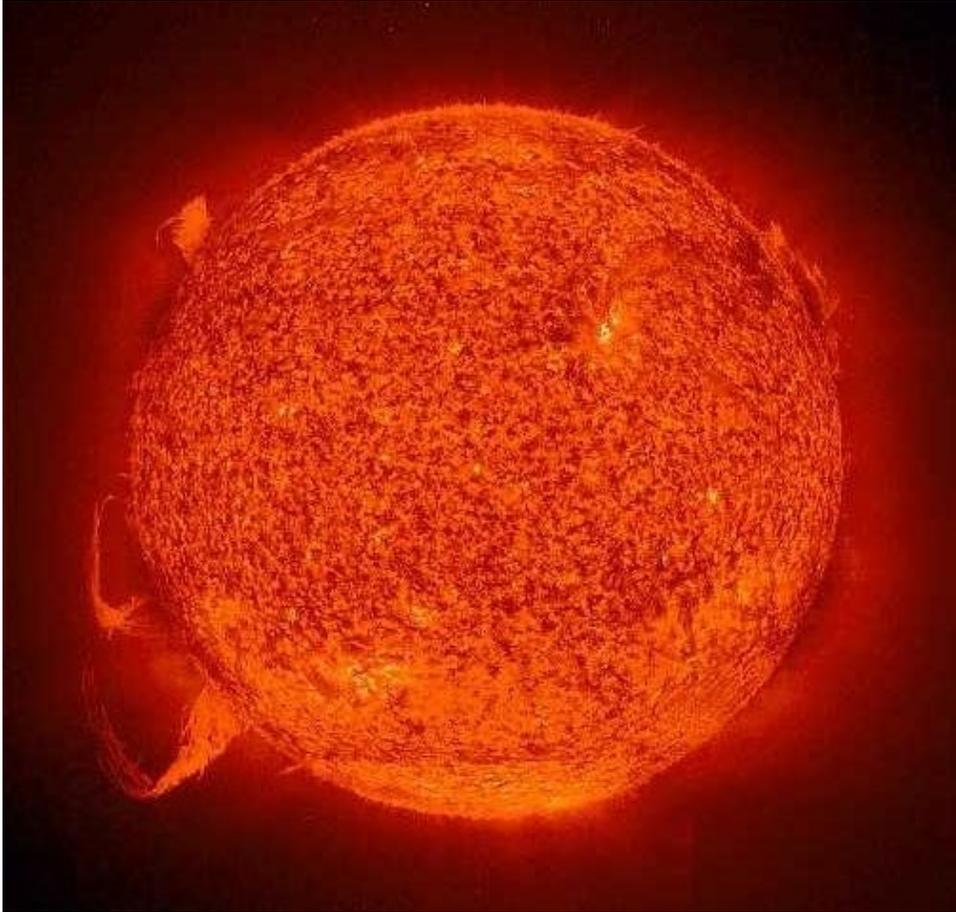
Minimum



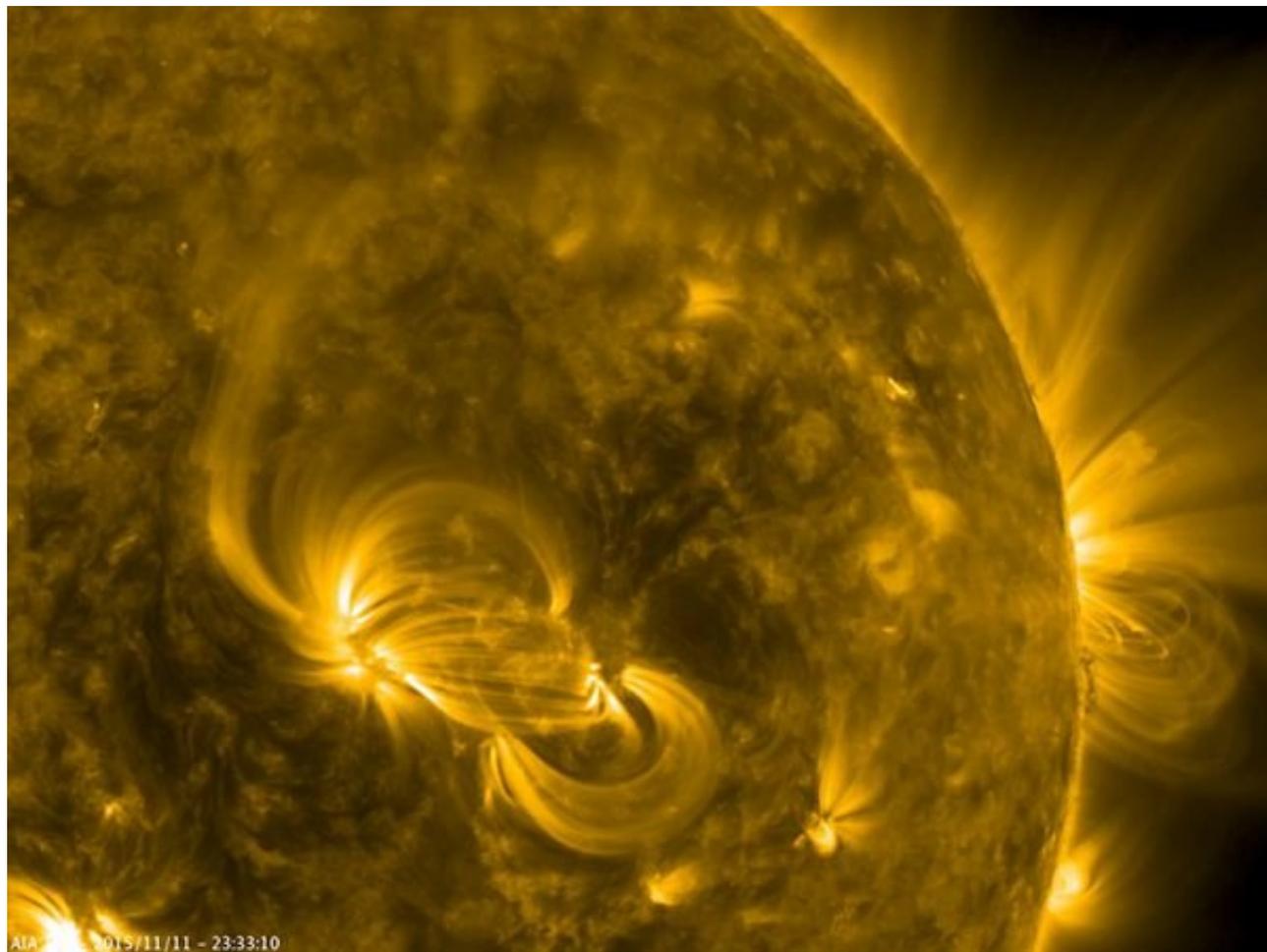
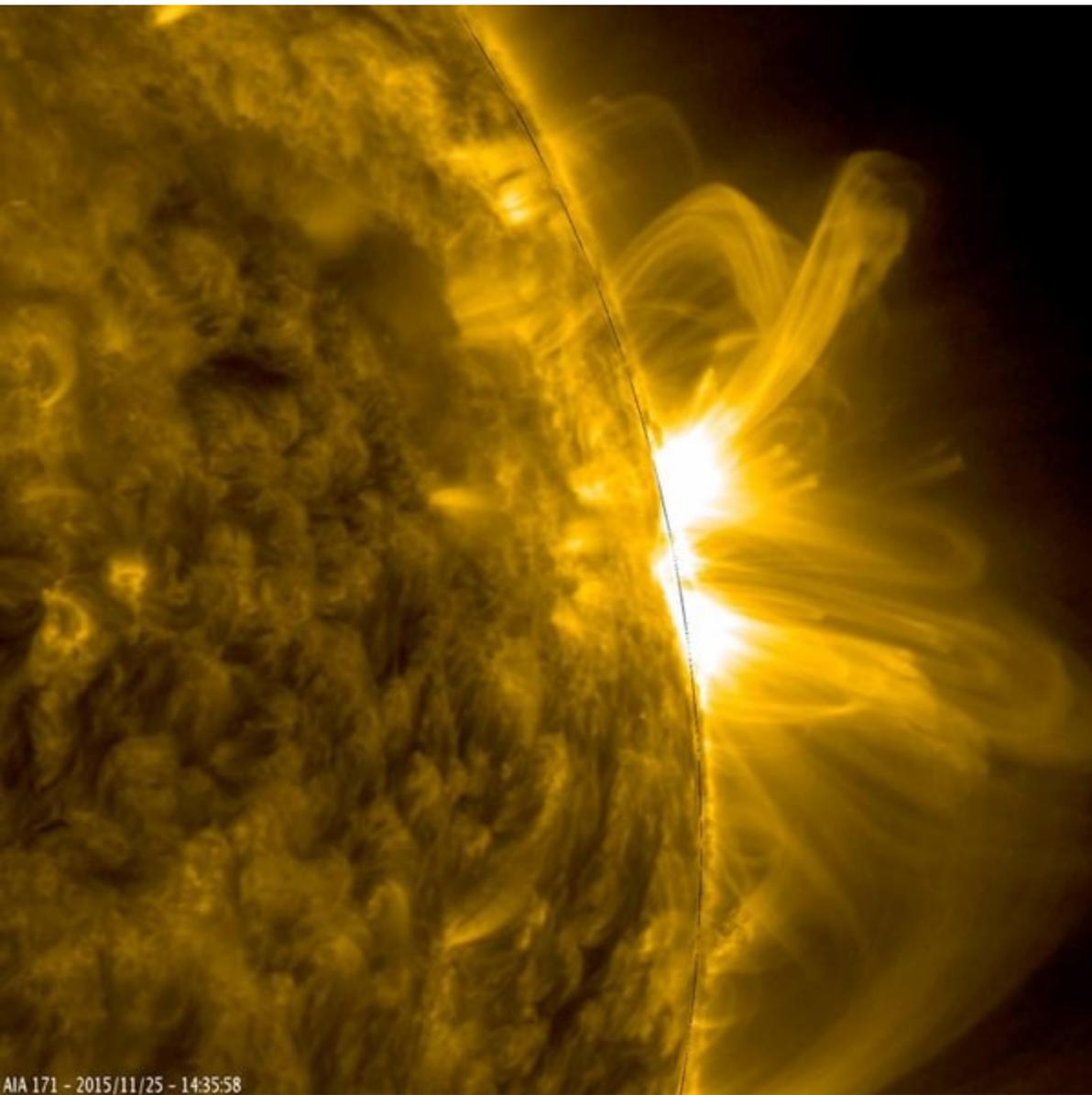
Maximum



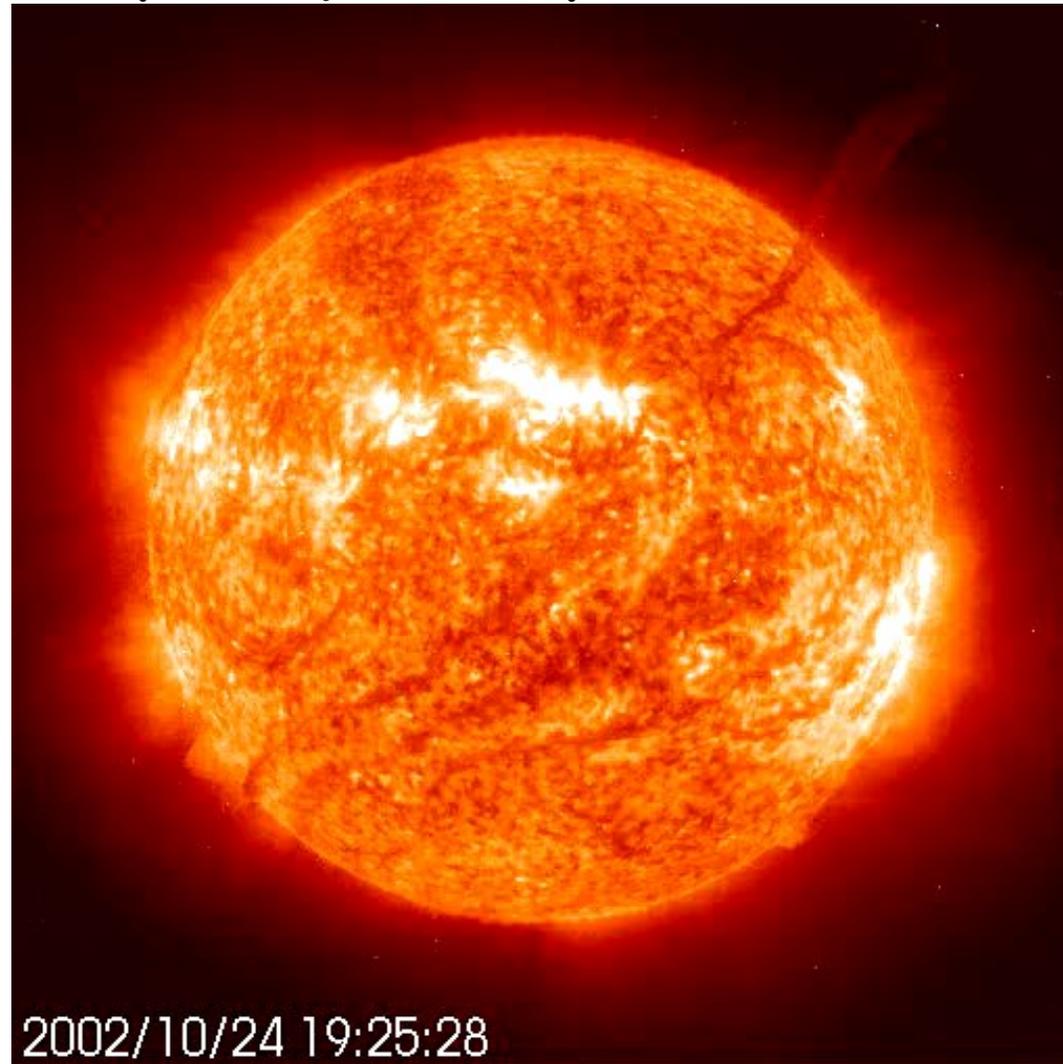
## Eruptions et protubérances



Accumulation de matière par courants de convection sur la photosphère :  
éjection violente de gaz hors de la surface à des vitesses relativistes (  $c/2$  !)



# Dynamique des protubérances



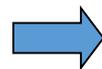
SOHO, NASA

# La couronne

Haute atmosphère du soleil : forme variable selon activité



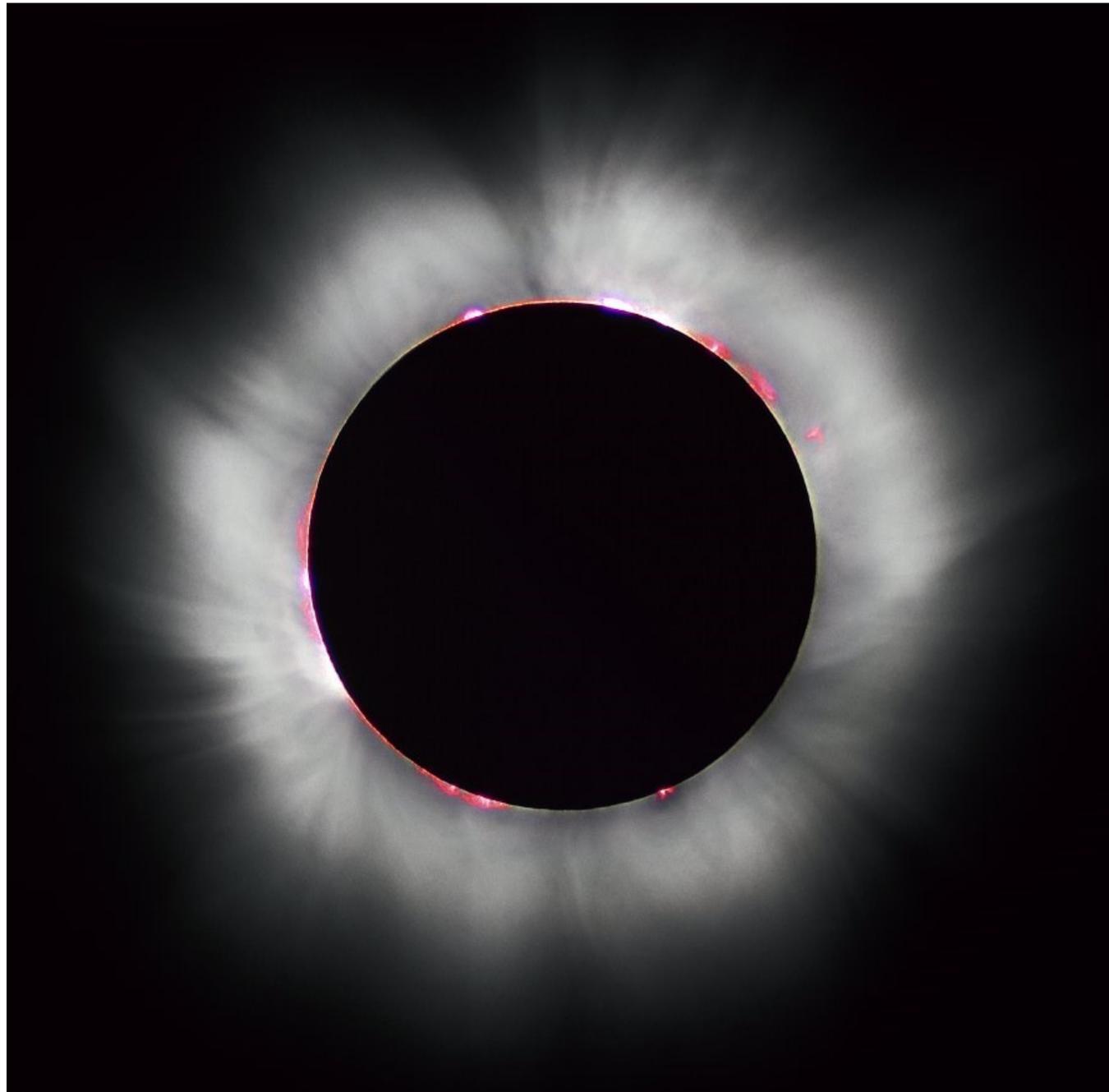
Raies d'émission d'atomes très ionisés  
(le Fer perd jusqu'à 15 électrons !),  
très caractéristiques dans l'UV



températures élevées  
(jusqu'à 1 million de K)

Températures élevées dues à la dissipation de l'énergie provenant du champ magnétique

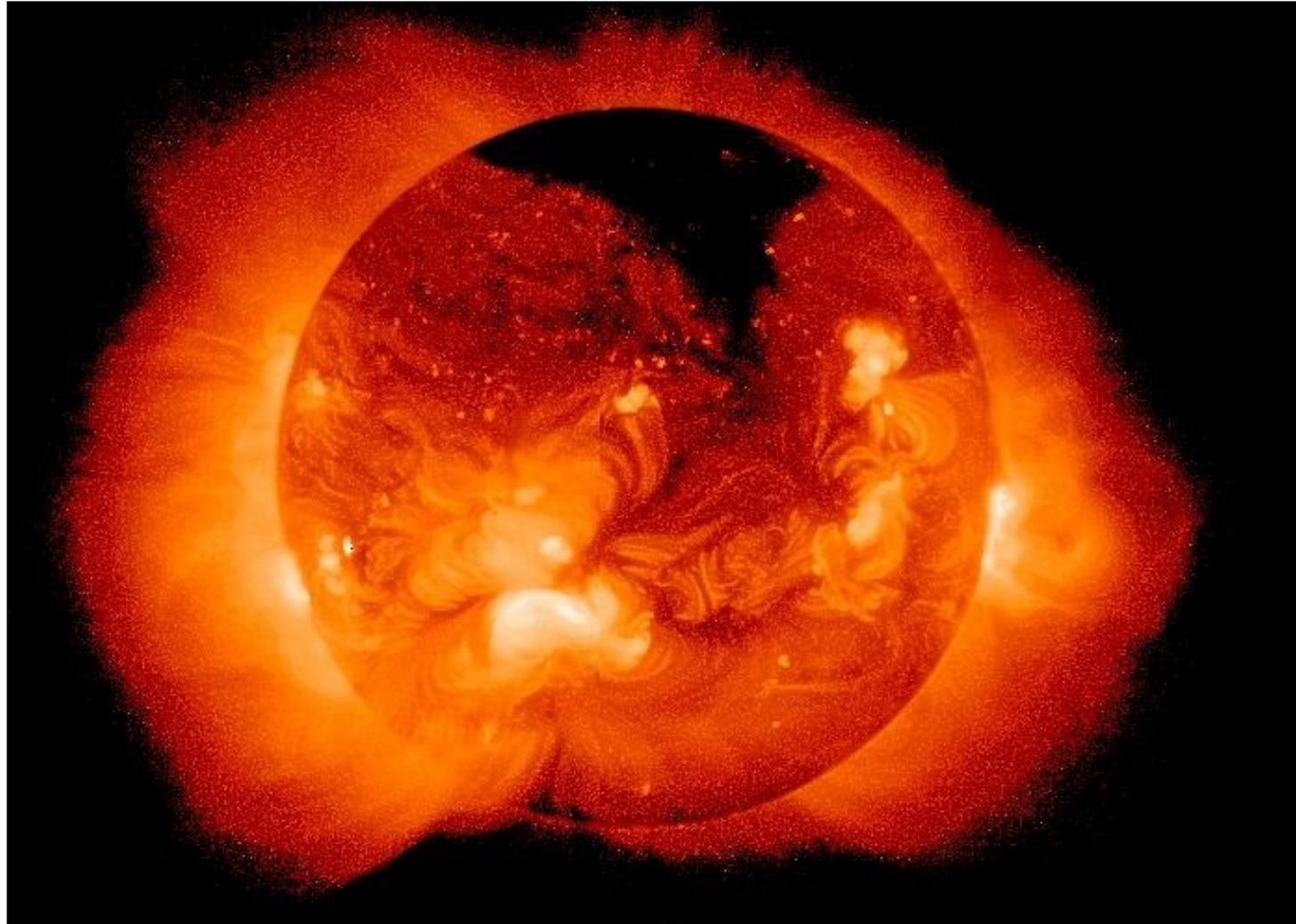
Observation  
de la  
couronne  
pendant les  
éclipses



Eclipse 1999  
Luc Viatour

# Trous coronaux

zones de faible densité révélées par rayons X



# Le champ magnétique du Soleil

champ global faible mais des champs locaux jusqu'à 5000 fois supérieurs à celui de la Terre

**Observation** par analyse des raies d'émission atomiques  
(effet Zeeman : les électrons peuvent occuper plus d'états électroniques en présence d'un champ) :

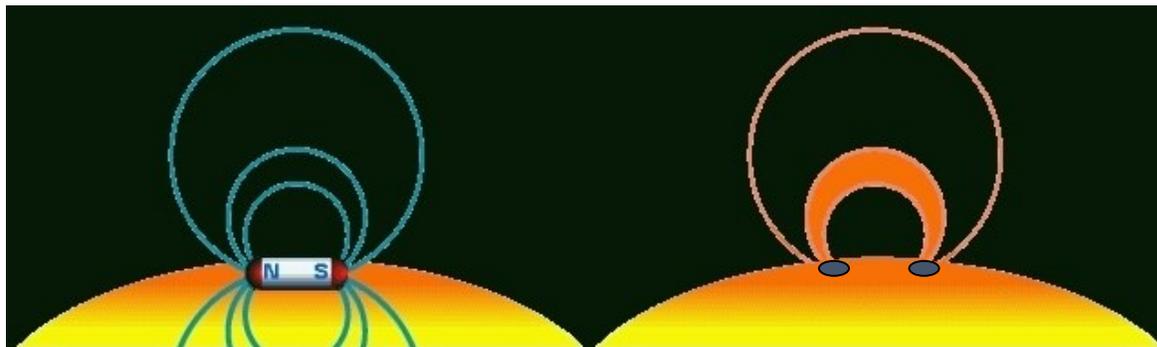


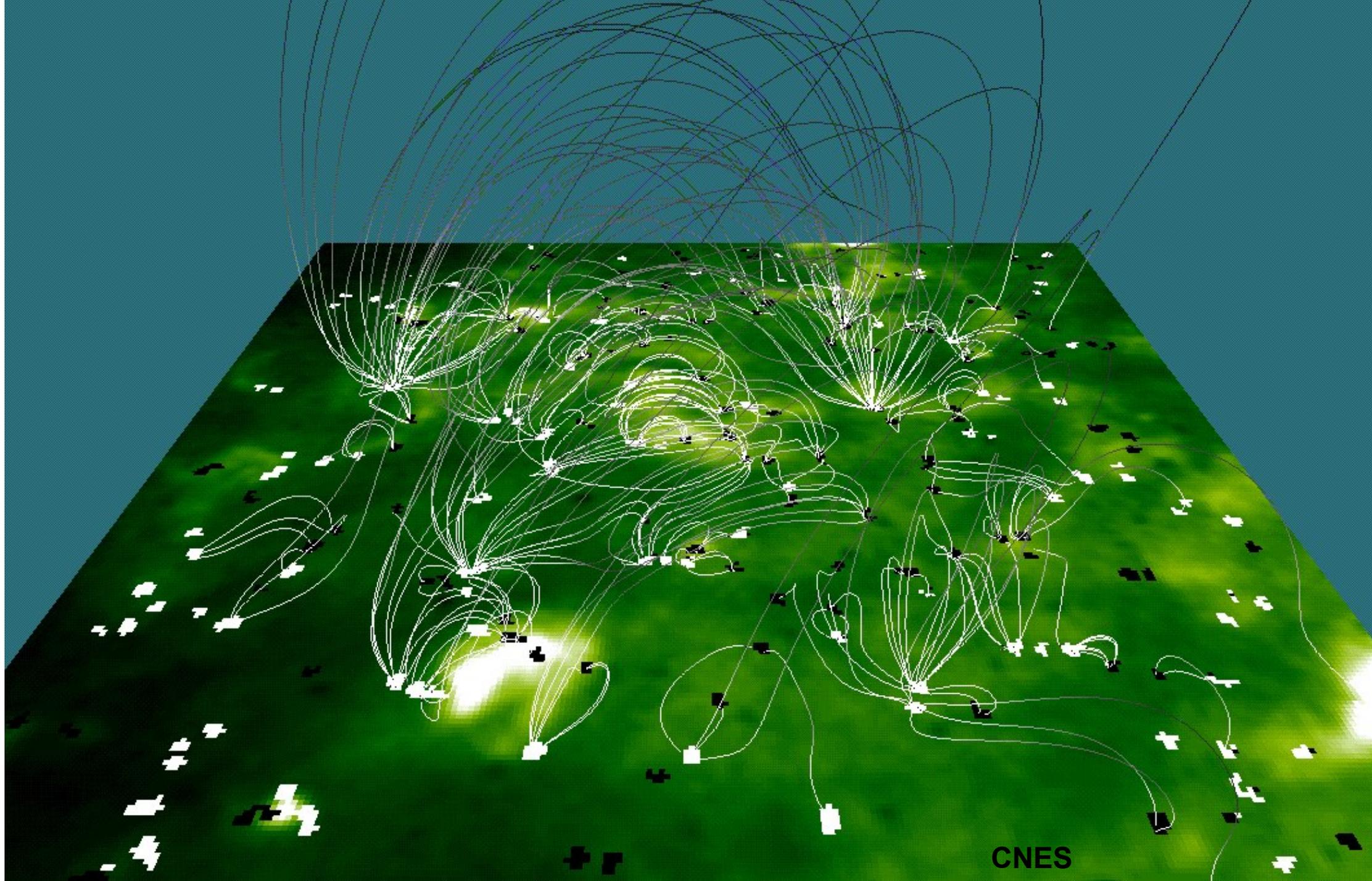
**Origine** du champ solaire : déplacement de particules chargées tels les électrons et les ions entre les zone radiative et convective

Le champ magnétique...

...donne la forme aux protubérances,

...forme les taches sombres là où il perce la surface solaire

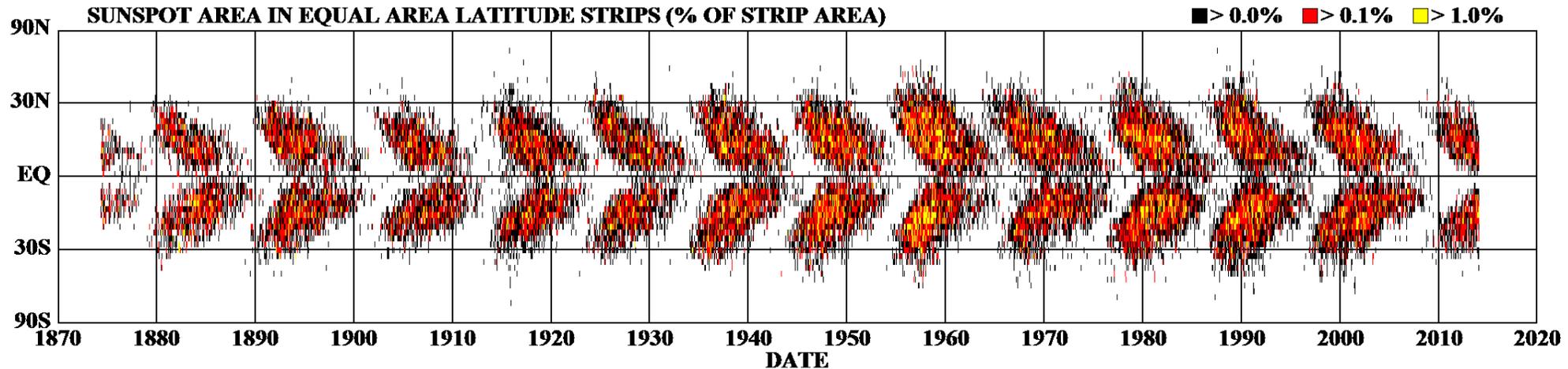




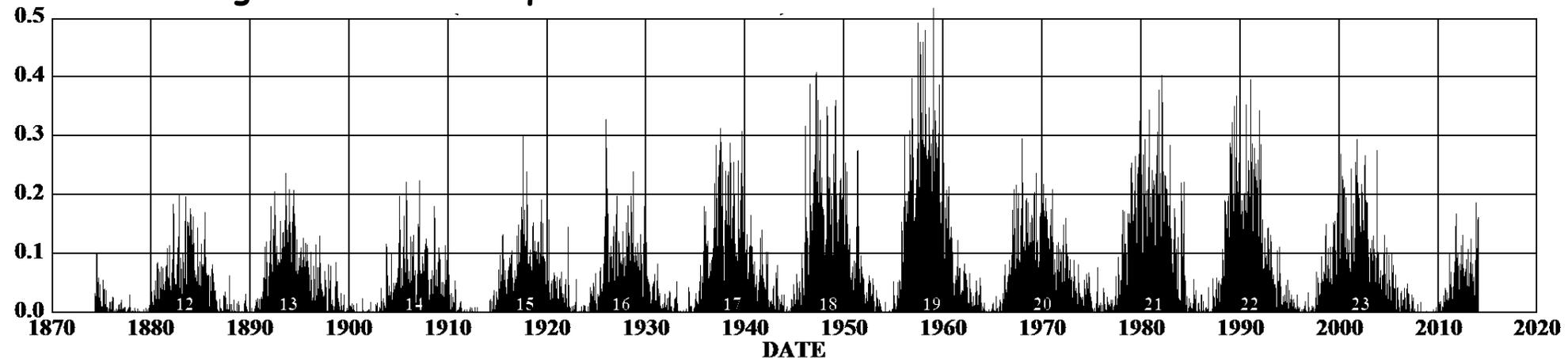
# Cycle d'activité solaire : Cycle d'environ 2×11 ans

## Activité cyclique dans la photosphère : taches solaires

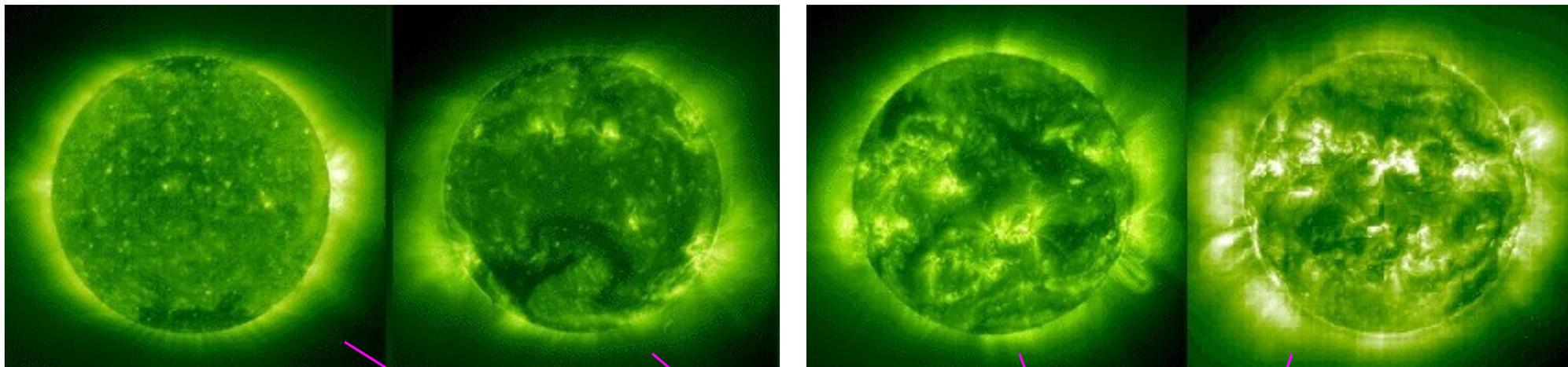
### DAILY SUNSPOT AREA AVERAGED OVER INDIVIDUAL SOLAR ROTATIONS



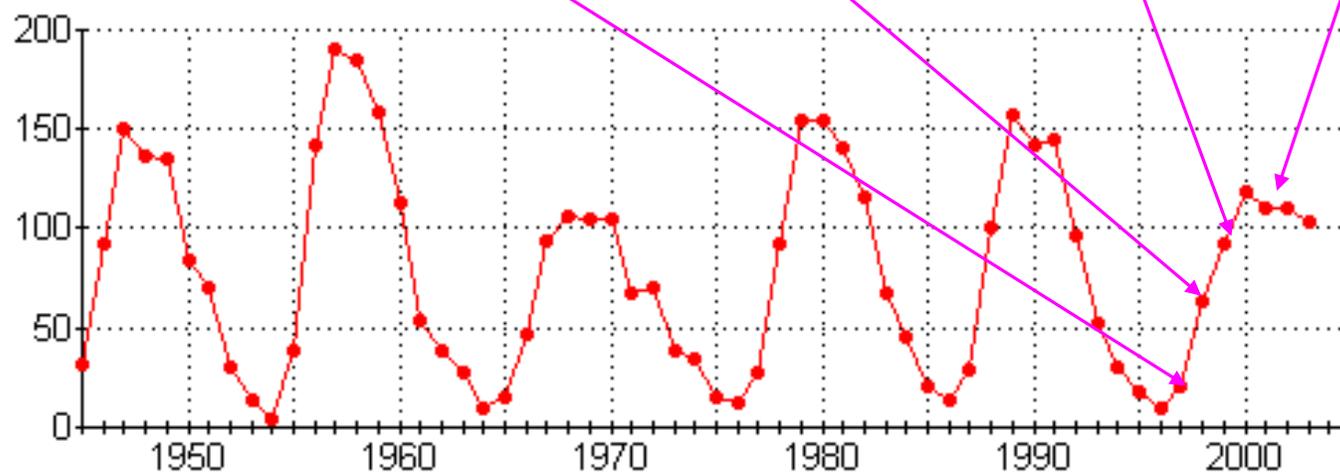
### Pourcentage couvert du disque solaire



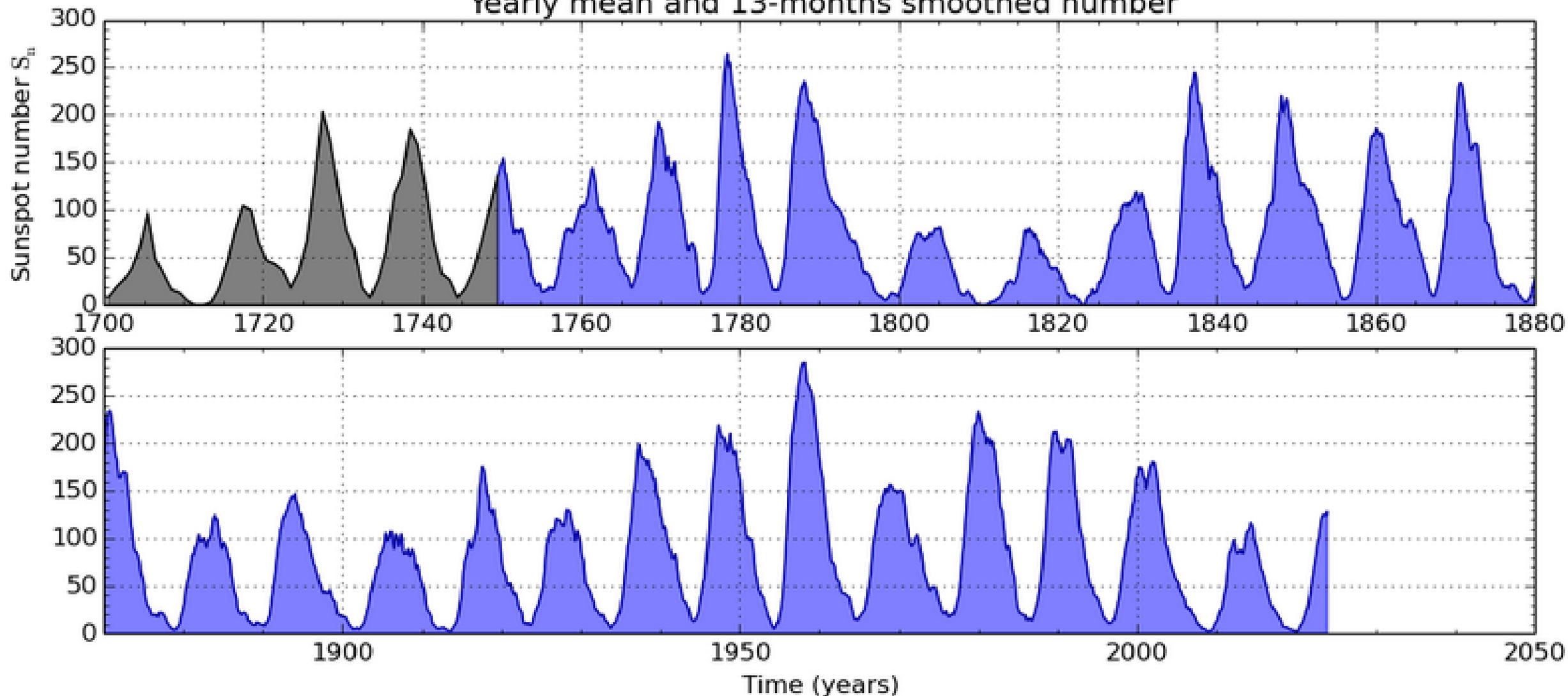
# Activité cyclique de la couronne



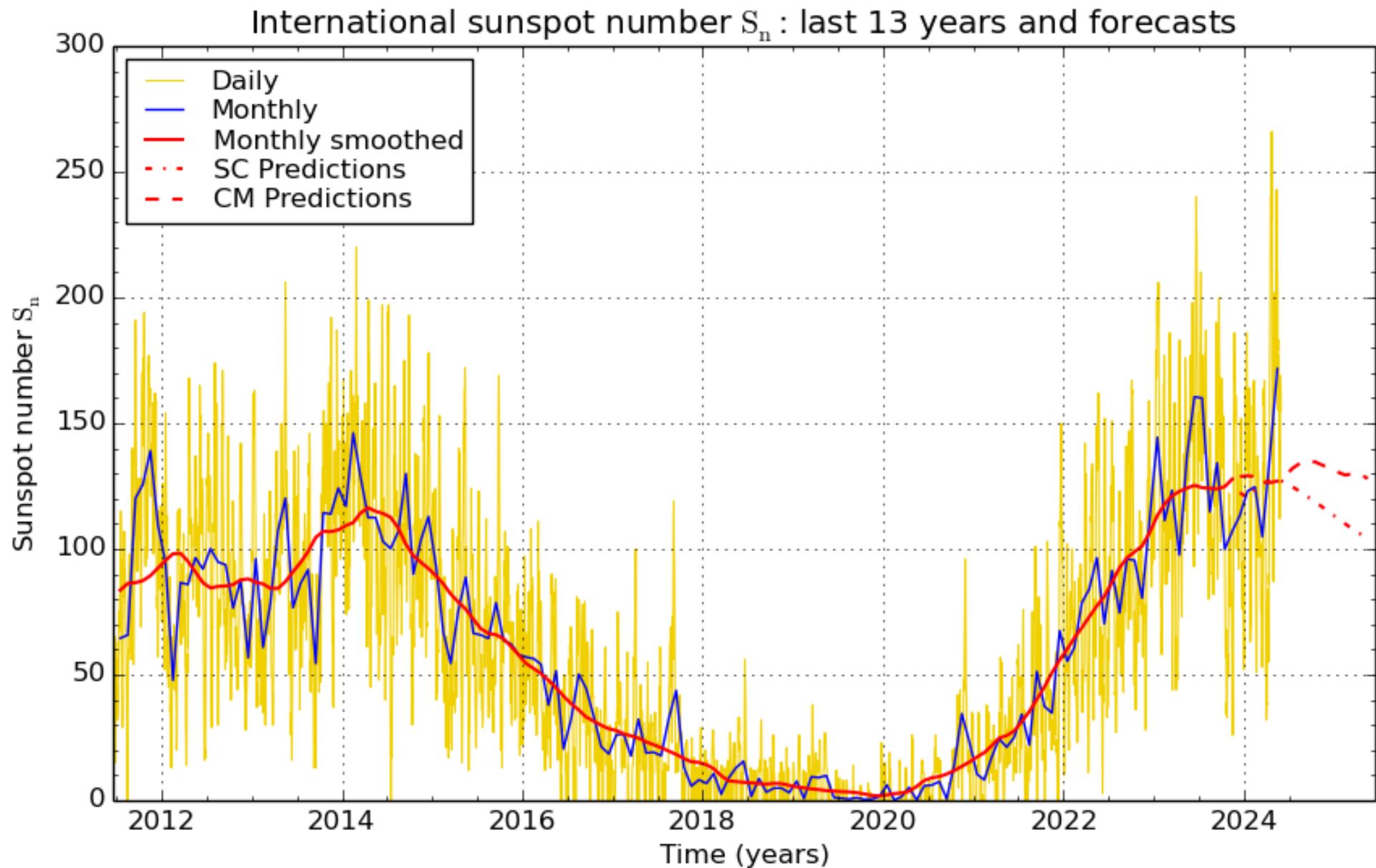
Nombre de Wolf annuel depuis 1945



International sunspot number  $S_n$  :  
Yearly mean and 13-months smoothed number

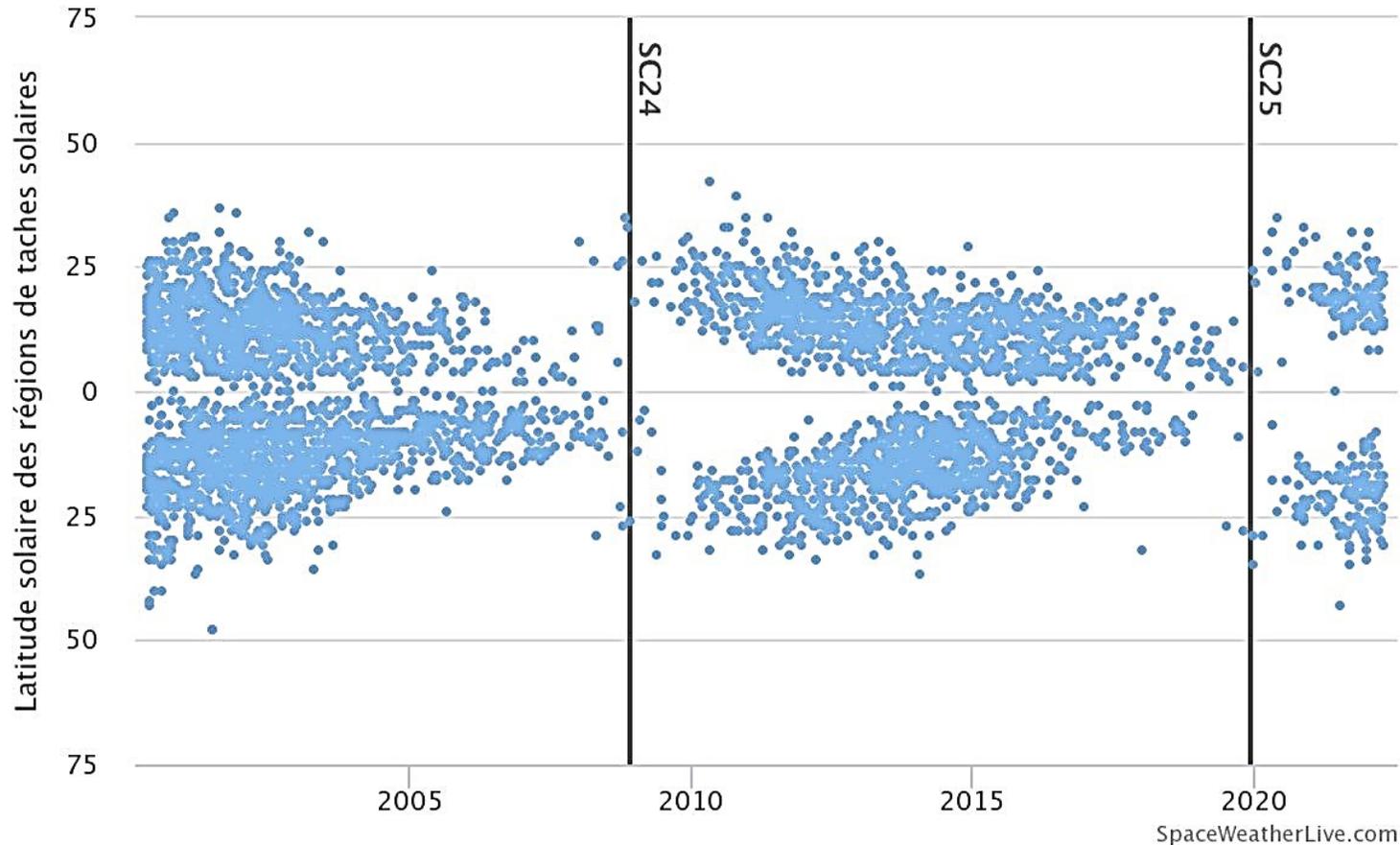


# Nous sommes dans le début du cycle 25



## Variation au cours du cycle solaire de la latitude des régions de taches solaires

Diagramme papillon



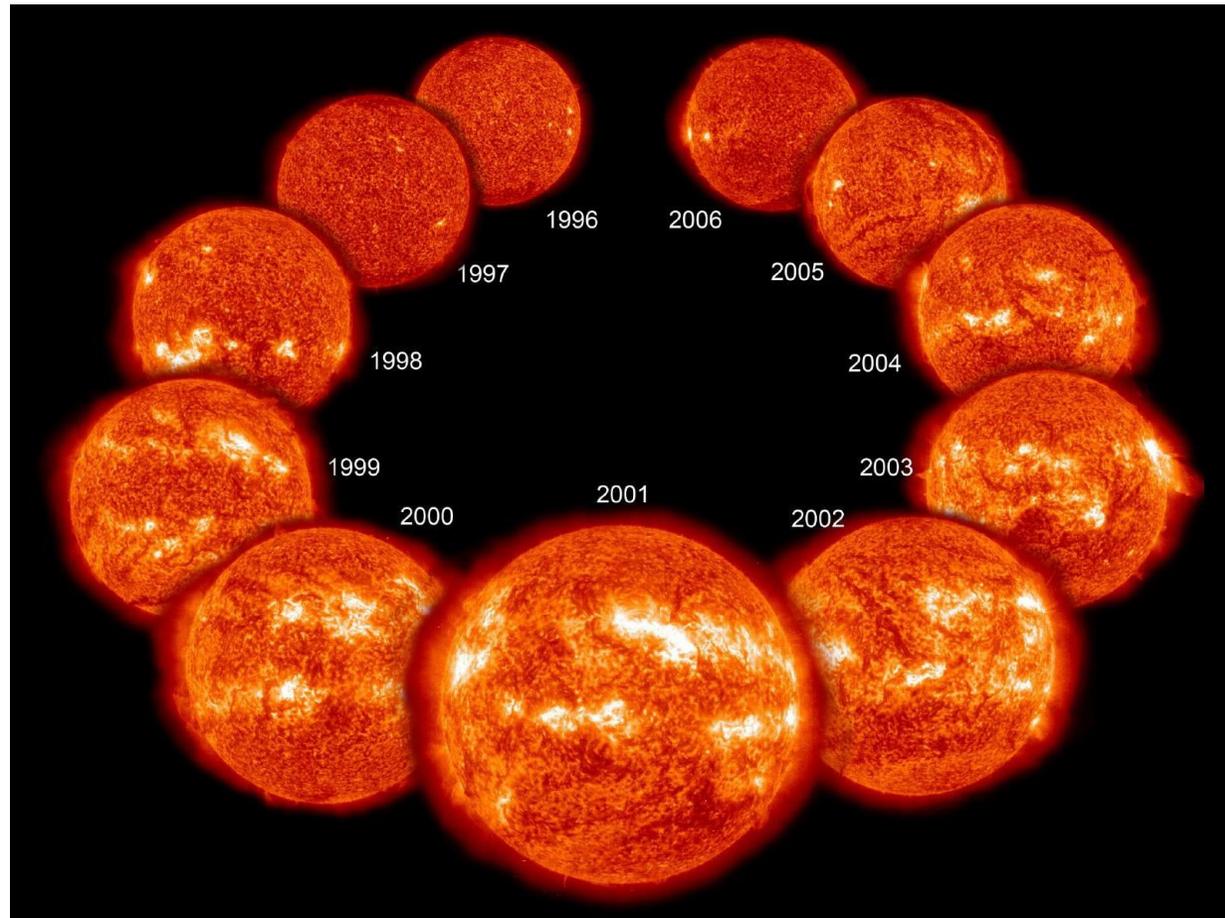
Les taches solaires sont généralement confinées entre  $-35^\circ$  de latitude sud et  $+35^\circ$  de latitude nord.

Au début d'un nouveau cycle solaire, les régions de taches solaires se forment à des latitudes plus élevées, mais à mesure que le cycle progresse vers le maximum, les régions de taches solaires se forment progressivement à des latitudes plus basses.

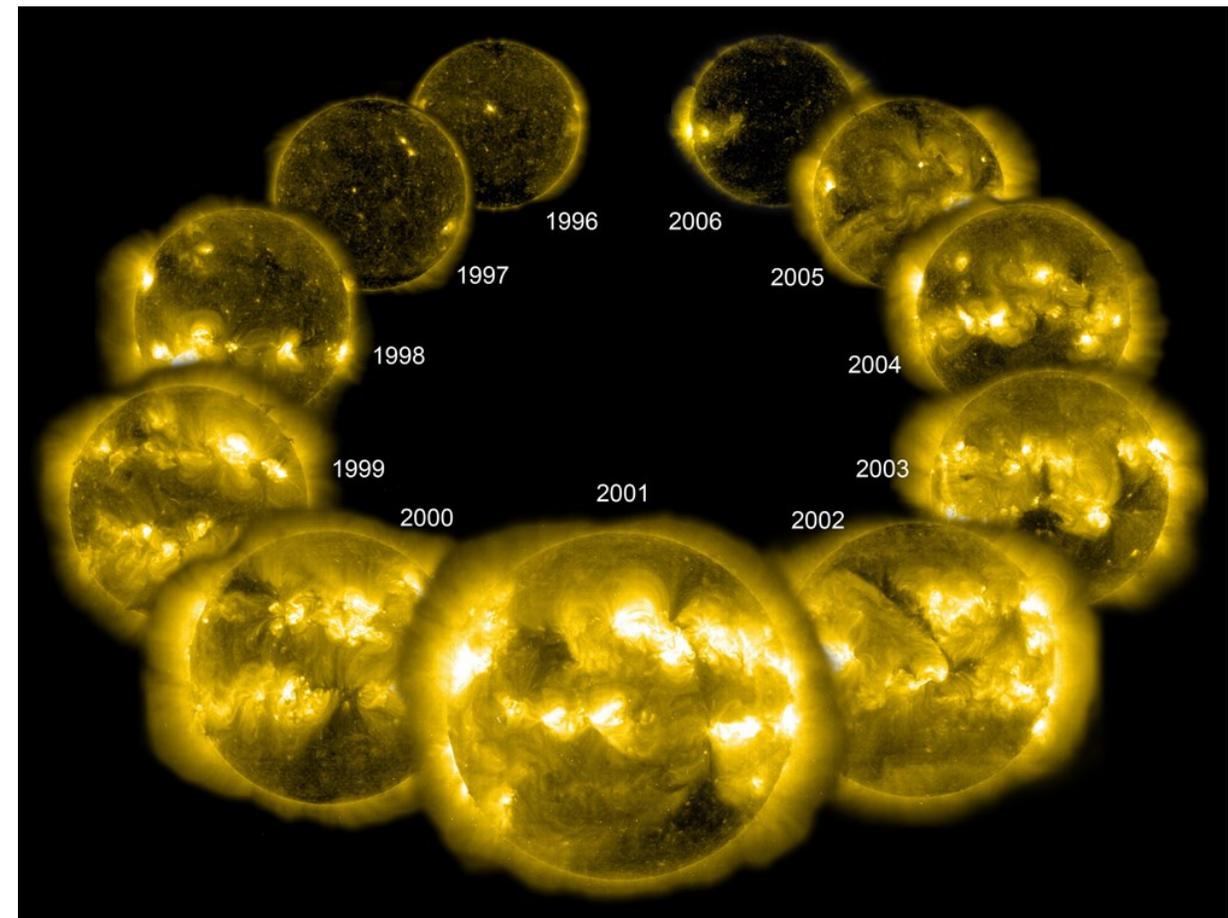
À l'approche du minimum solaire, les régions de taches solaires apparaissent autour de l'équateur solaire et lorsqu'un nouveau cycle recommence, les taches solaires du nouveau cycle commencent à émerger à une latitude élevée.

Ce comportement récurrent des taches solaires donne lieu au modèle "papillon". Il a été découvert par Edward **Maunder** en 1904.

# Les cycles solaires vues sous différents aspects



**Basse couronne solaire**



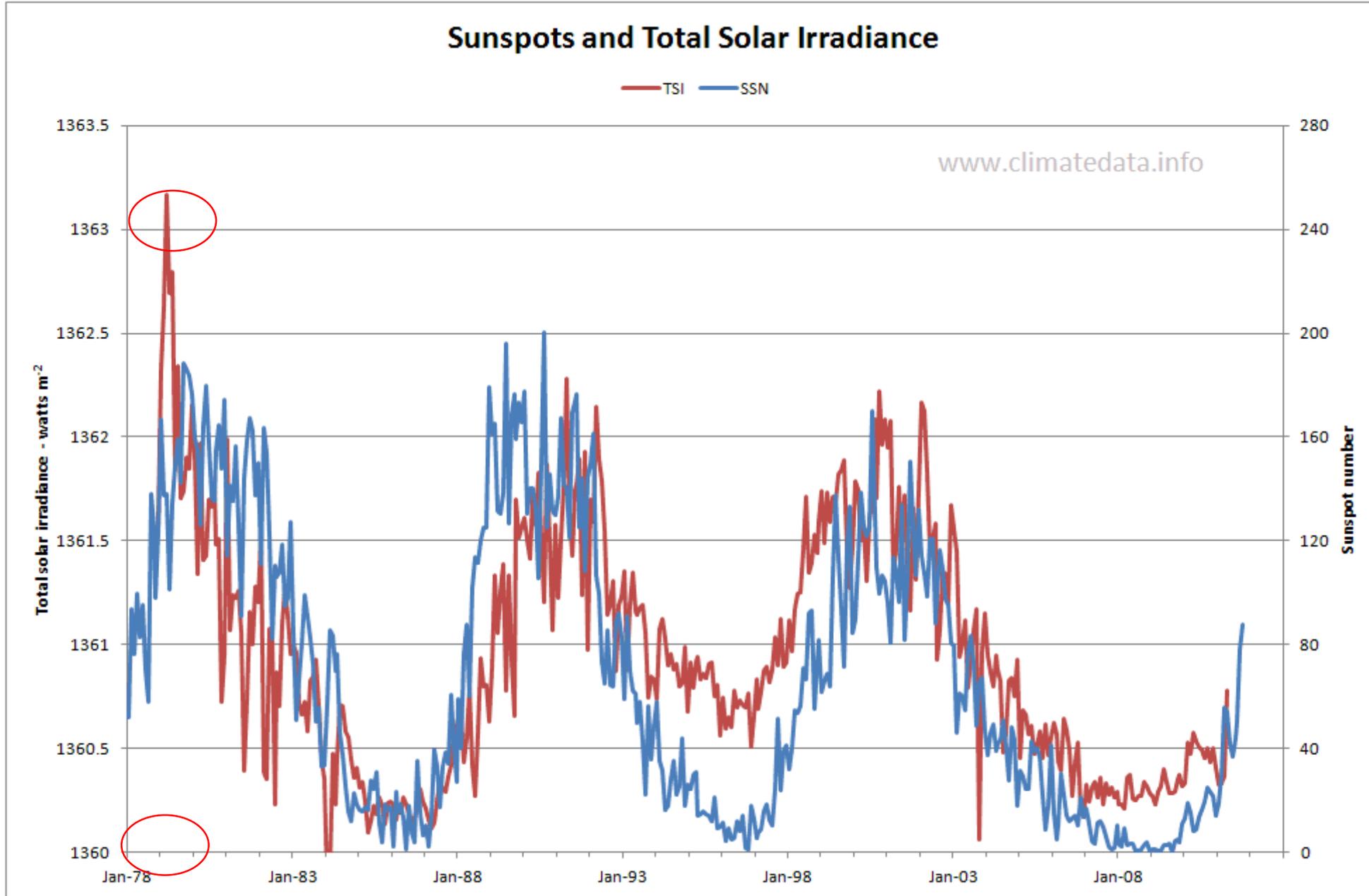
**UV extrême**

SOHO, ESA, NASA <http://apod.nasa.gov/apod/ap071203.html>

( article très complet sur les cycles solaires:

<http://solarphysics.livingreviews.org/Articles/lrsp-2010-1/download/lrsp-2010-1Color.pdf> )

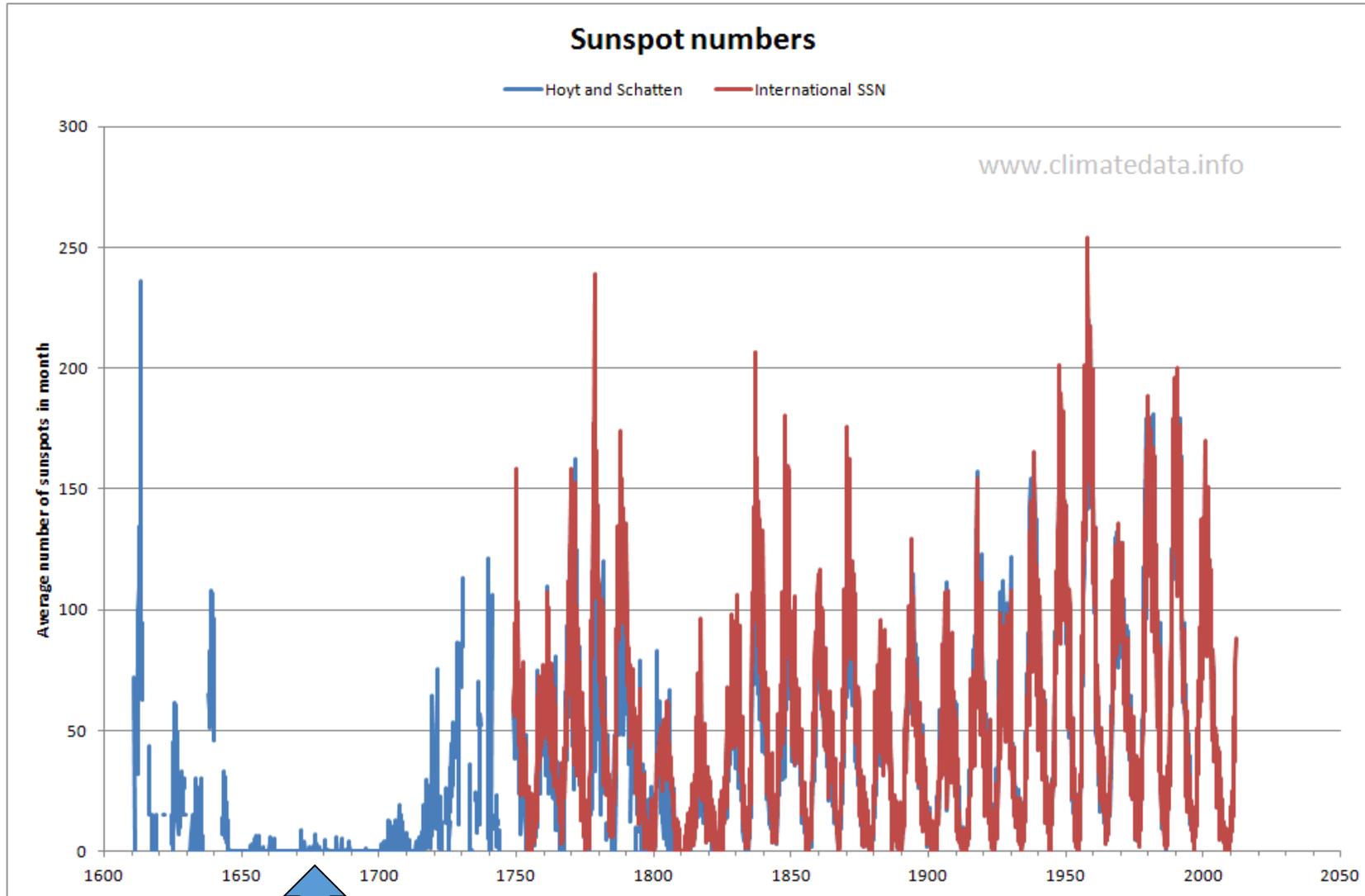
# Effet du nombre de taches sur le flux reçus sur Terre ('constante solaire') ?



*A priori NON*

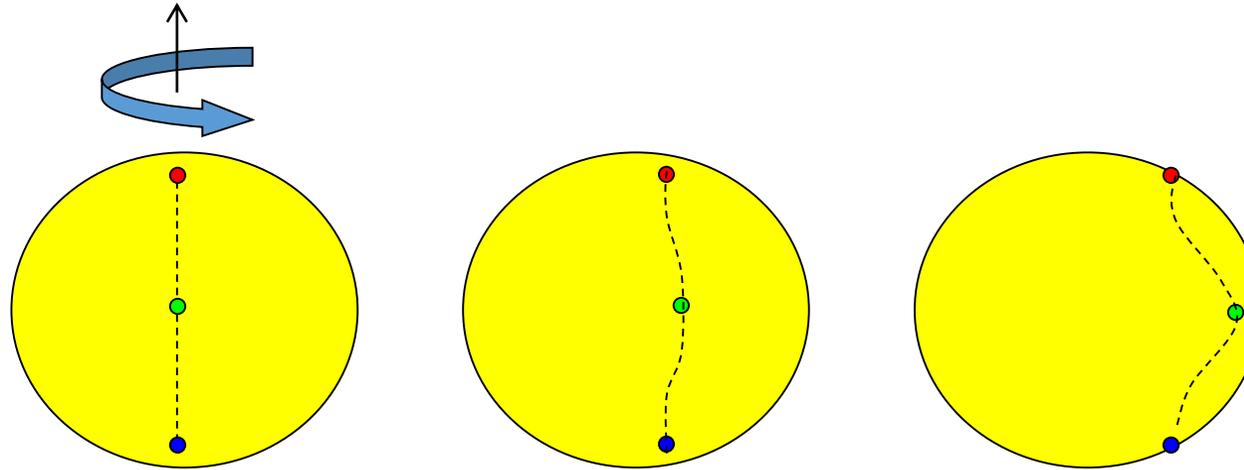
*C'est moins  
de 2 millièmes  
du flux qui varie!*

# Les cycles des taches solaires dans l'Histoire



"minimum de" Maunder : petit âge glaciaire, lien, coincidence ou problème d'archivage données ?

## Rotation différentielle

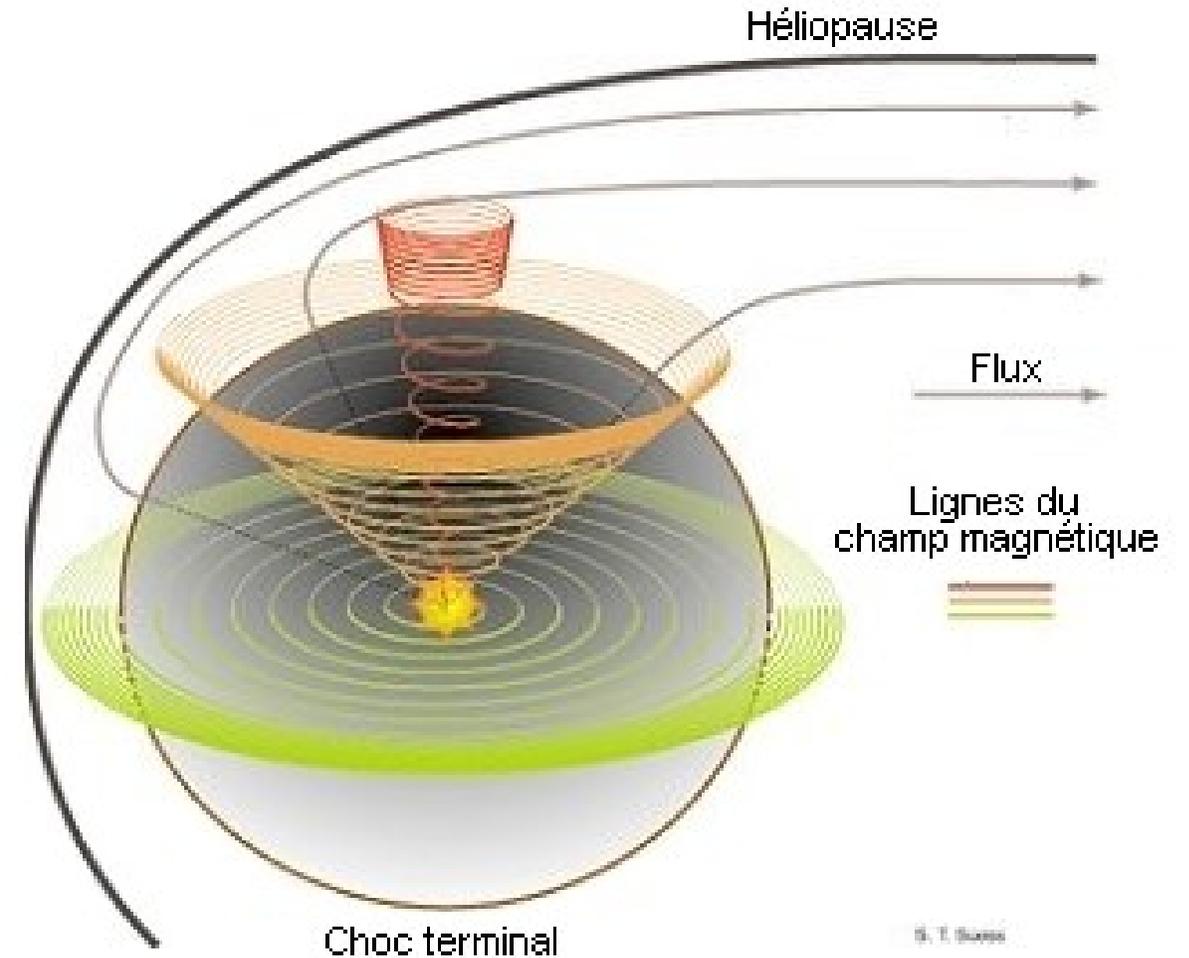
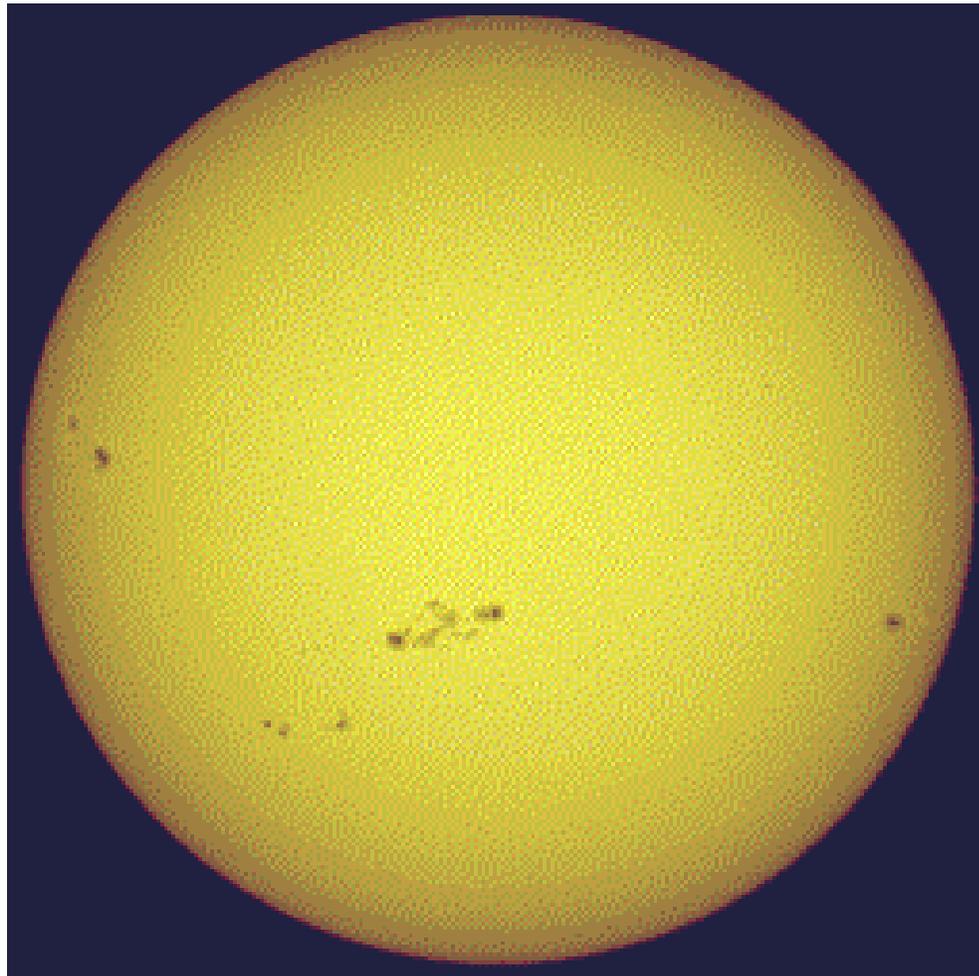


- Le Soleil tourne plus vite à l'équateur qu'aux pôles
- Cette rotation différentielle entraîne une déformation des lignes du champ magnétique qui provoque l'inversion du champ magnétique

Périodes de révolution :

25.4 jours à l'équateur

36 jours aux pôles

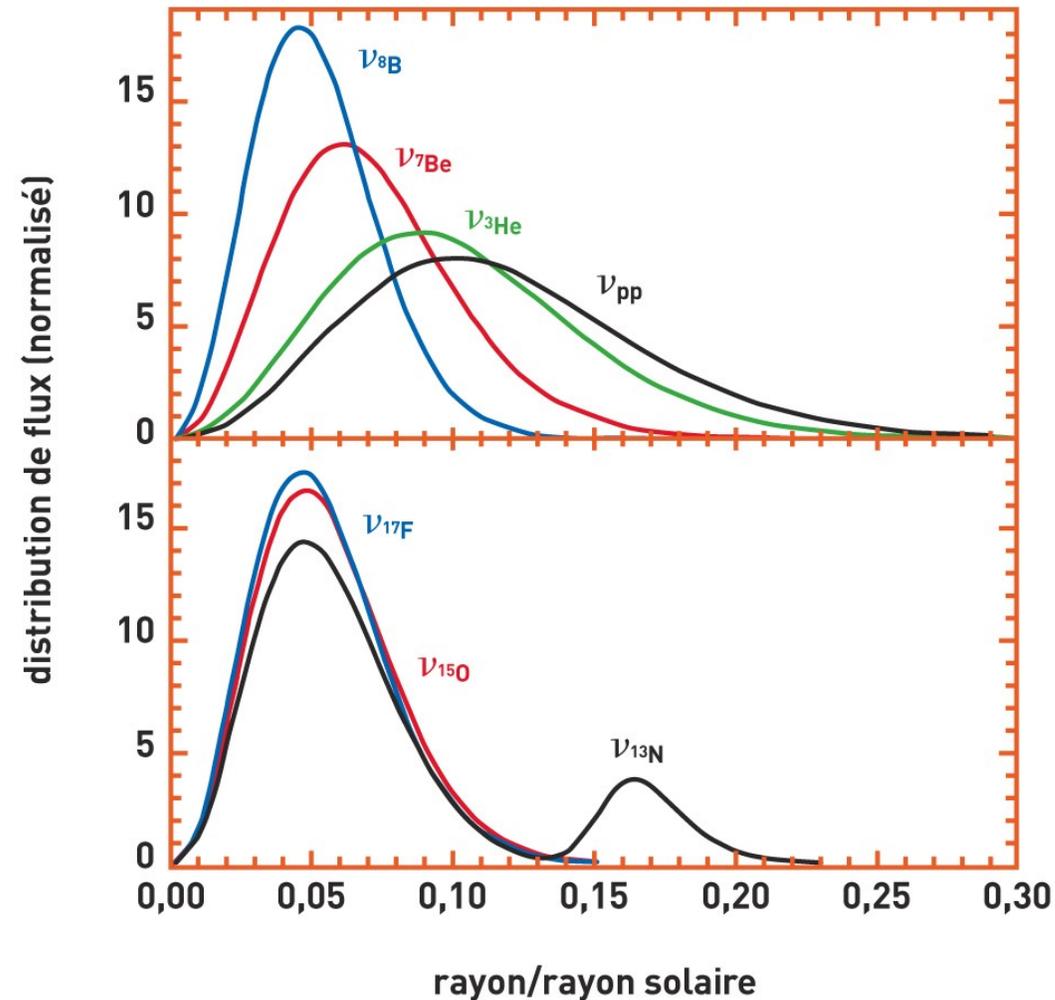


**Période synodique moyenne (référentiel Terre) : 27.25 jours**  
**Période sidérale moyenne (référentiel étoiles) : 25.35 jours**

# Problème: Comment obtenir des informations sur la structure interne ?

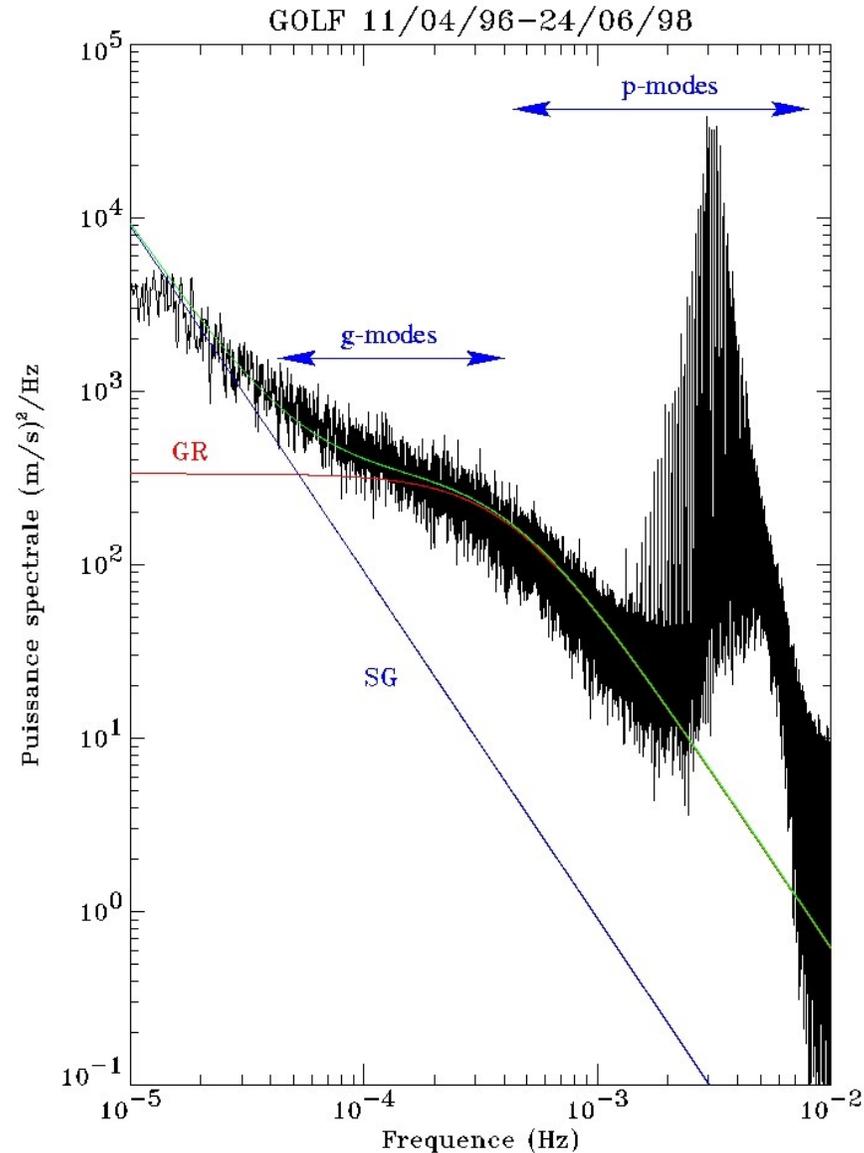
La structure interne du Soleil n'est pas observable par le rayonnement visible...

Mais par le Flux de neutrinos provenant du noyau !



# L'héliosismologie

Observation: la sphère Solaire est animée de mouvements ondulatoires d'une période moyenne de 5 min



ondes de gravité ( $\neq$  onde gravitationnelle)  
(modes g)

ondes acoustiques (modes p)

(variation d'une dizaine de km par rapport à la hauteur moyenne)

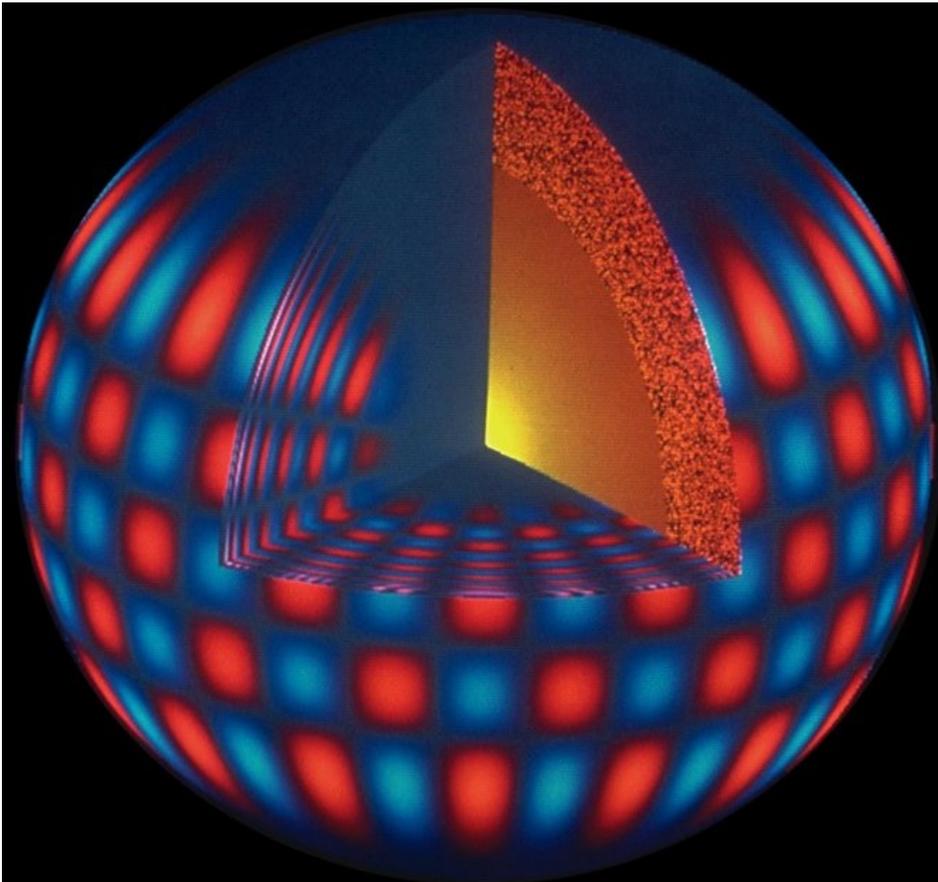
Origines: ondes de chocs provoquées par des impacts électroniques avec le plasma dans la zone de convection ?

## *Héliosismologie*

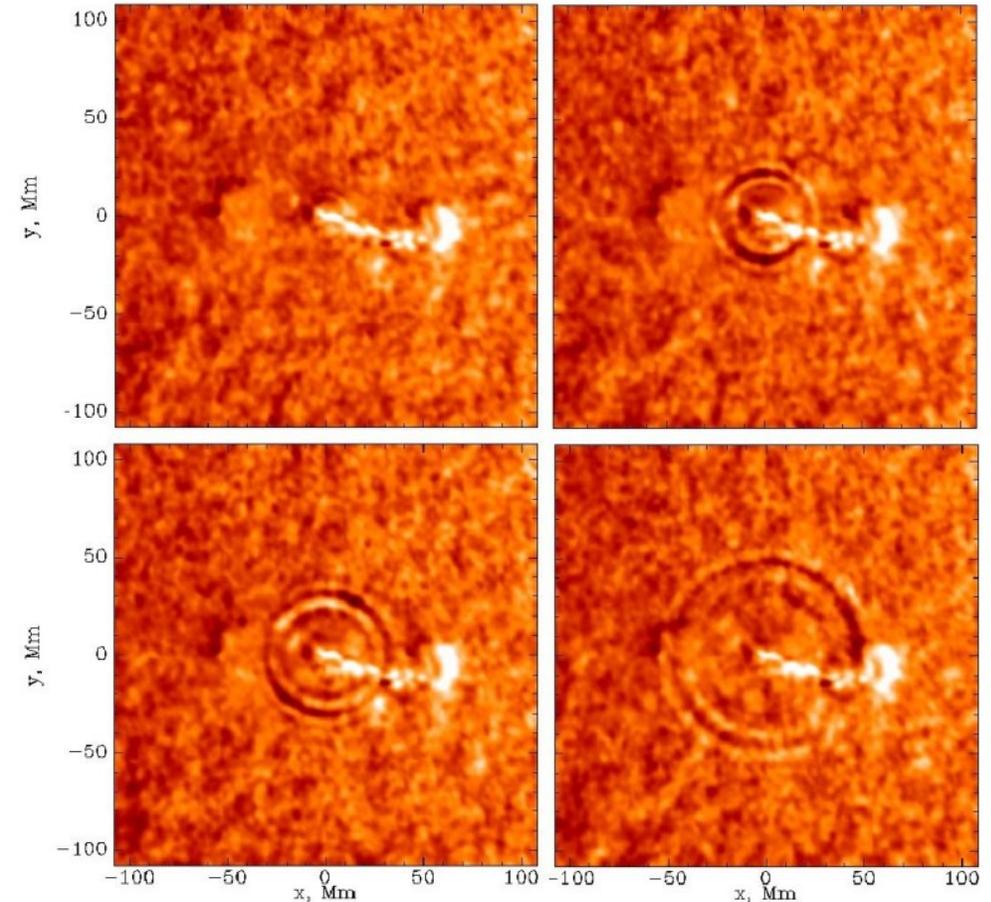
*= étude de la propagation du son en fonction de la densité du milieu et de sa température*

⇒ la période des oscillations solaires est liée à la température et la densité du plasma

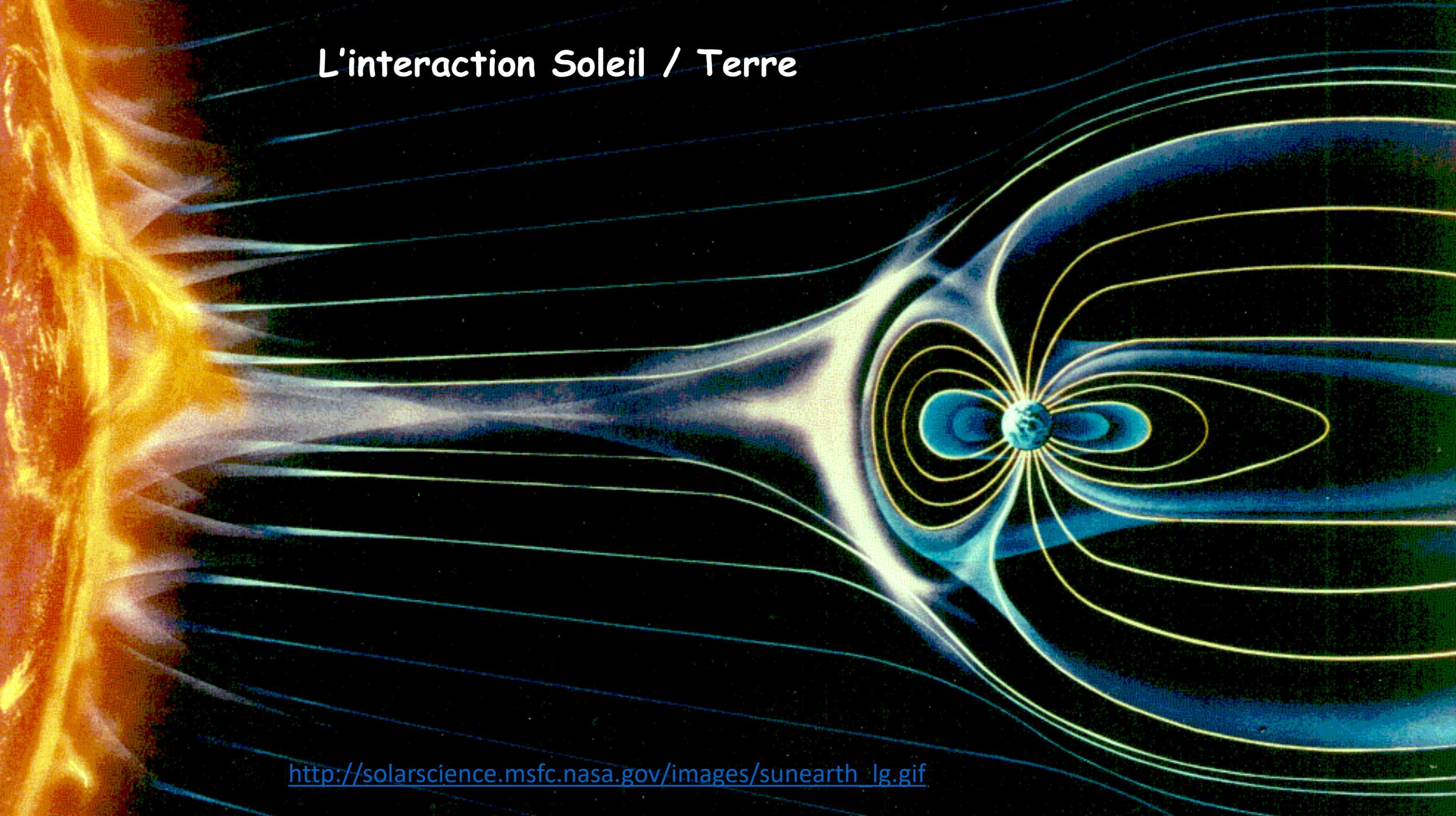
⇒ l'analyse de la propagation radiale des oscillations et de leur durée d'amortissement permet d'élaborer des modèles de la structure interne du Soleil et de les comparer aux observations

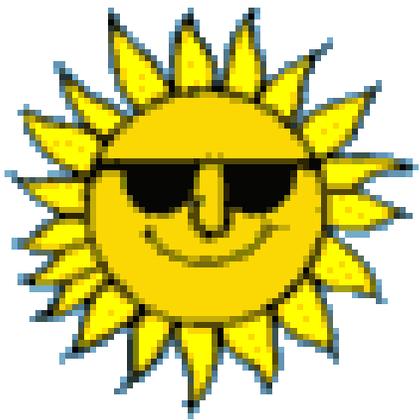


<http://gong.nso.edu/>



# L'interaction Soleil / Terre





Rayonnement solaire

Precipitation

Evaporation

Ocean

Photosynthèse

Gaz Carbonique

Eau

Gaz Carbonique

Oxygen

Rappel **Soleil**

= Notre Source d'Energie & de Vie

Photons Solaires

Gaz carbonique

Eau

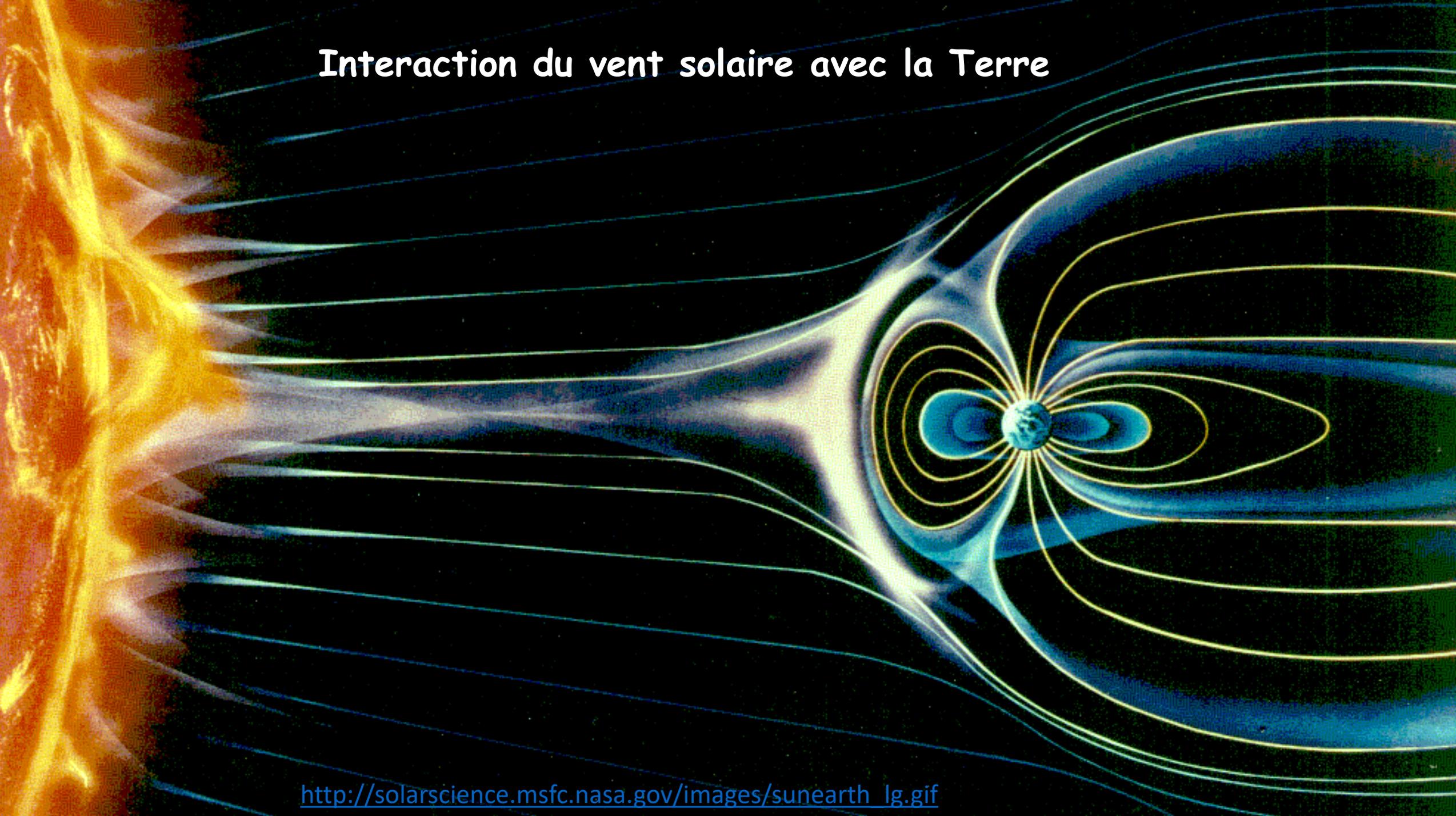
Oxygène

Sucres

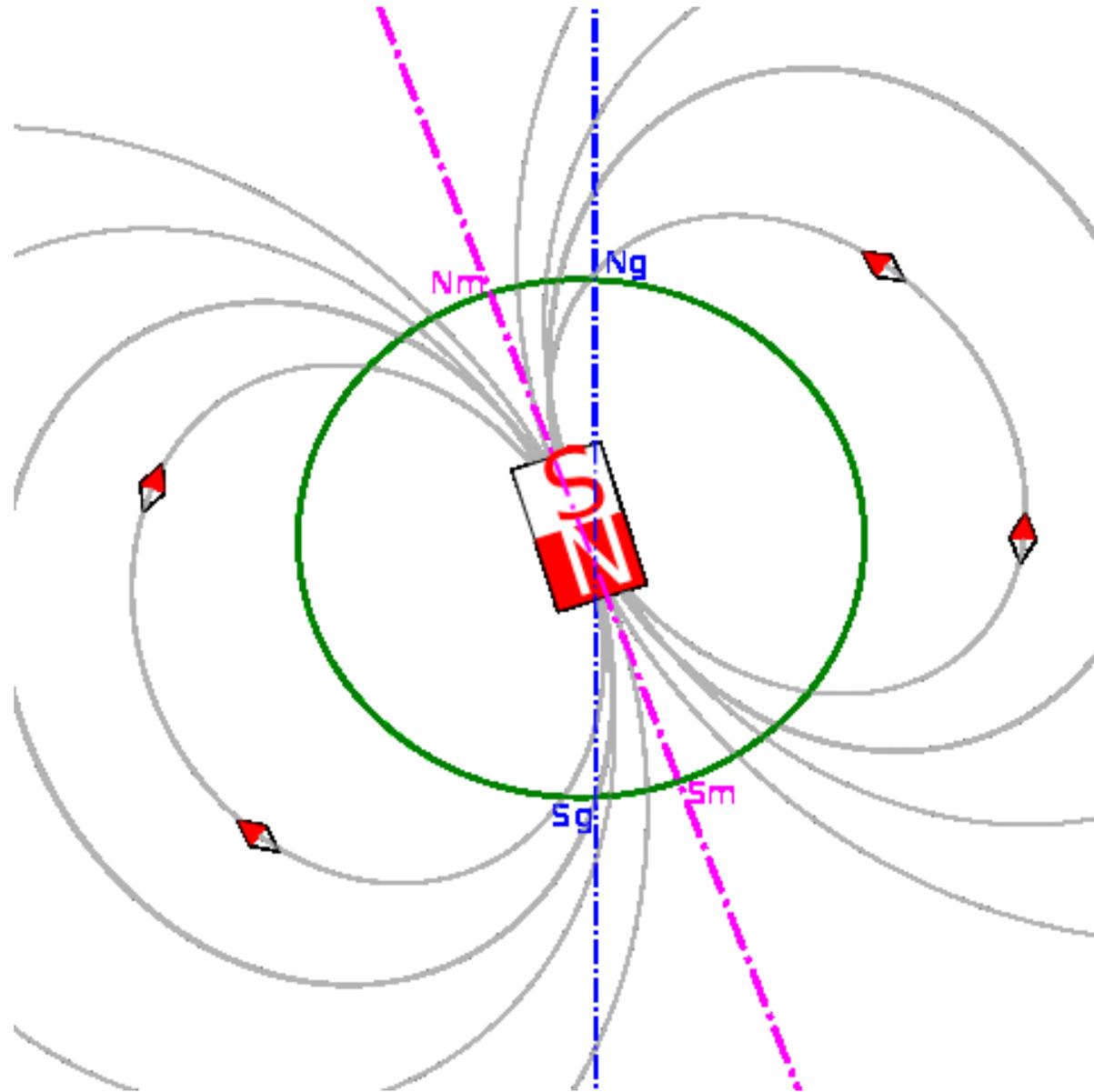
**Impact principal**  
= le rayonnement lumineux!

**Mais ce n'est pas le seul impact**

# Interaction du vent solaire avec la Terre

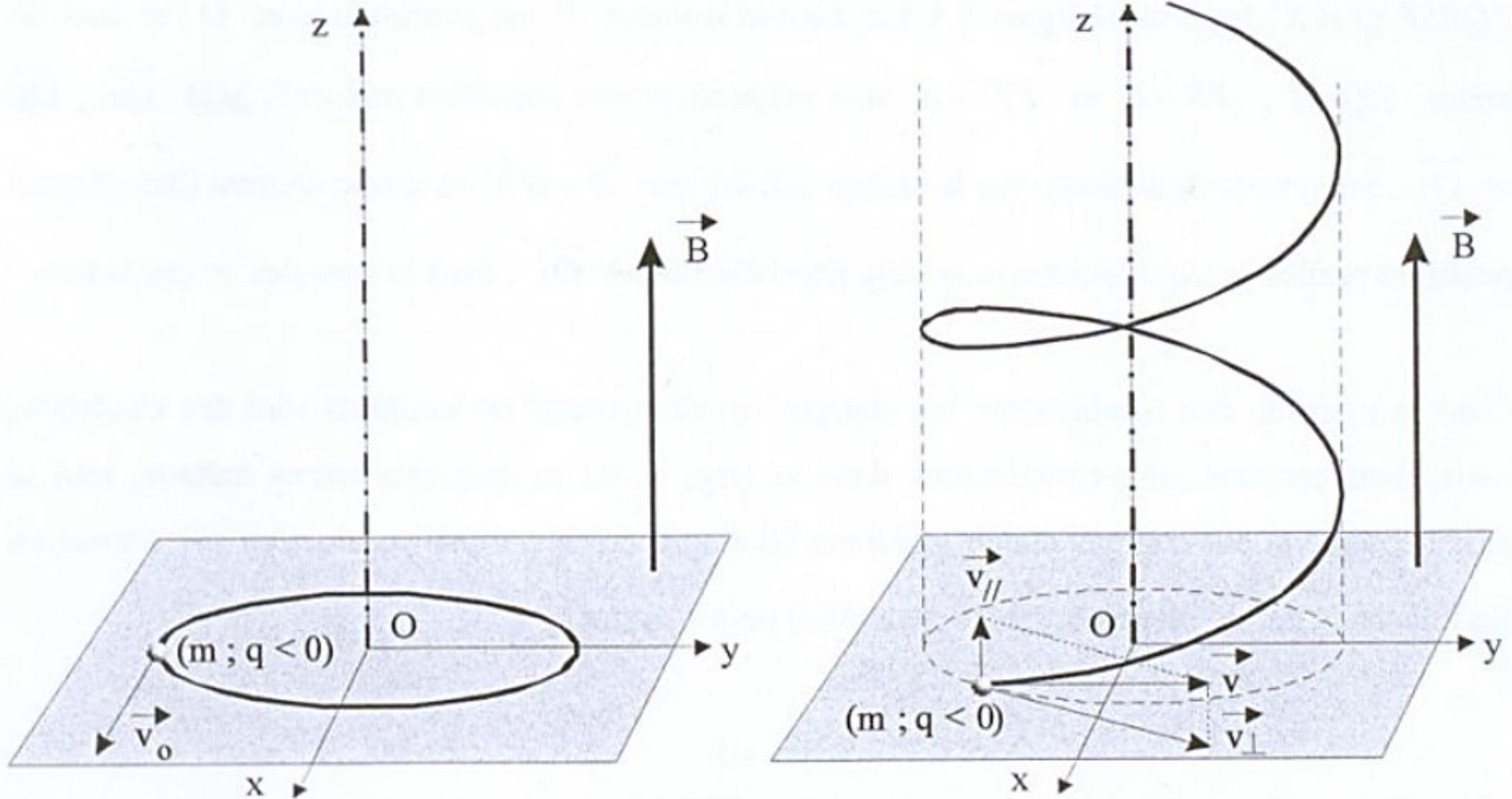


# Champ Magnétique Terrestre

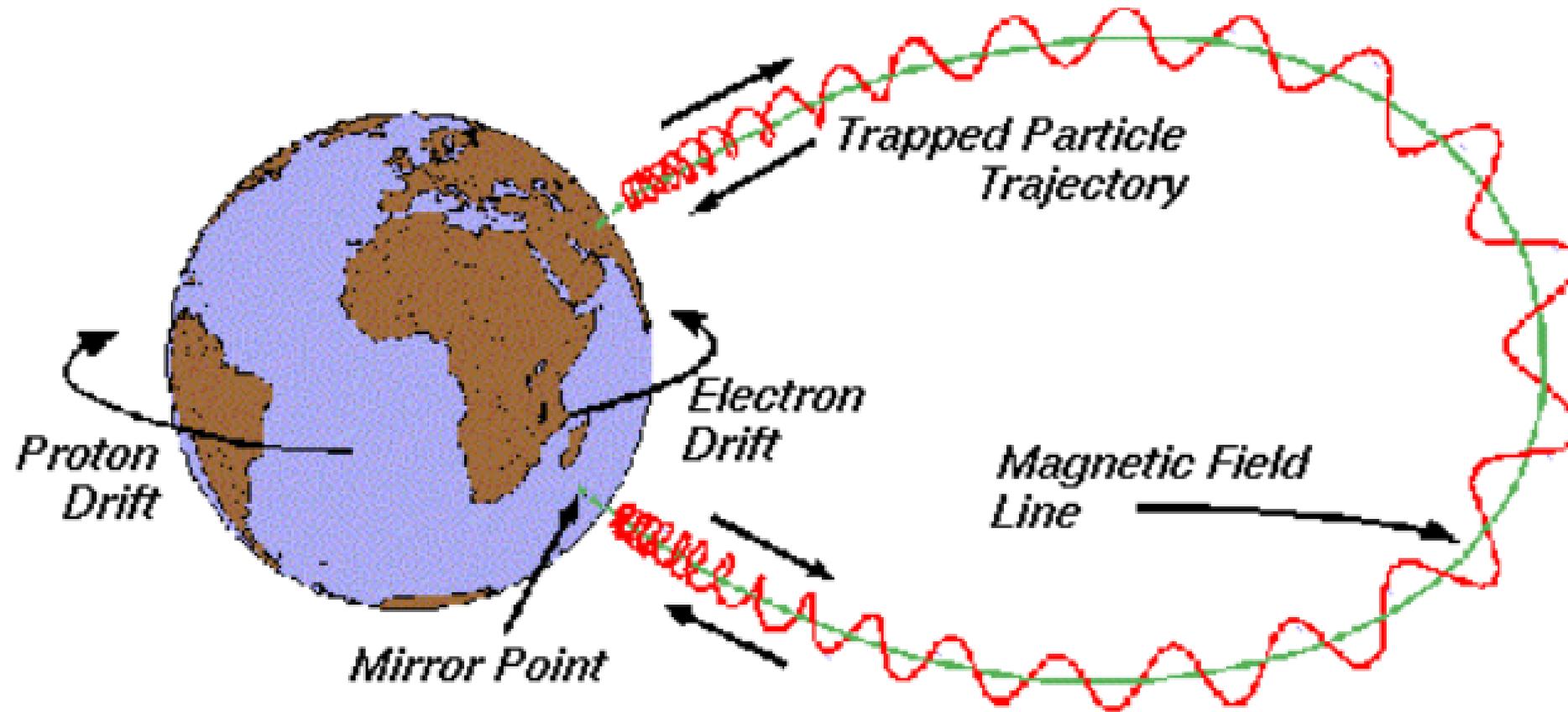


# 'Rappel' la Force de Laplace

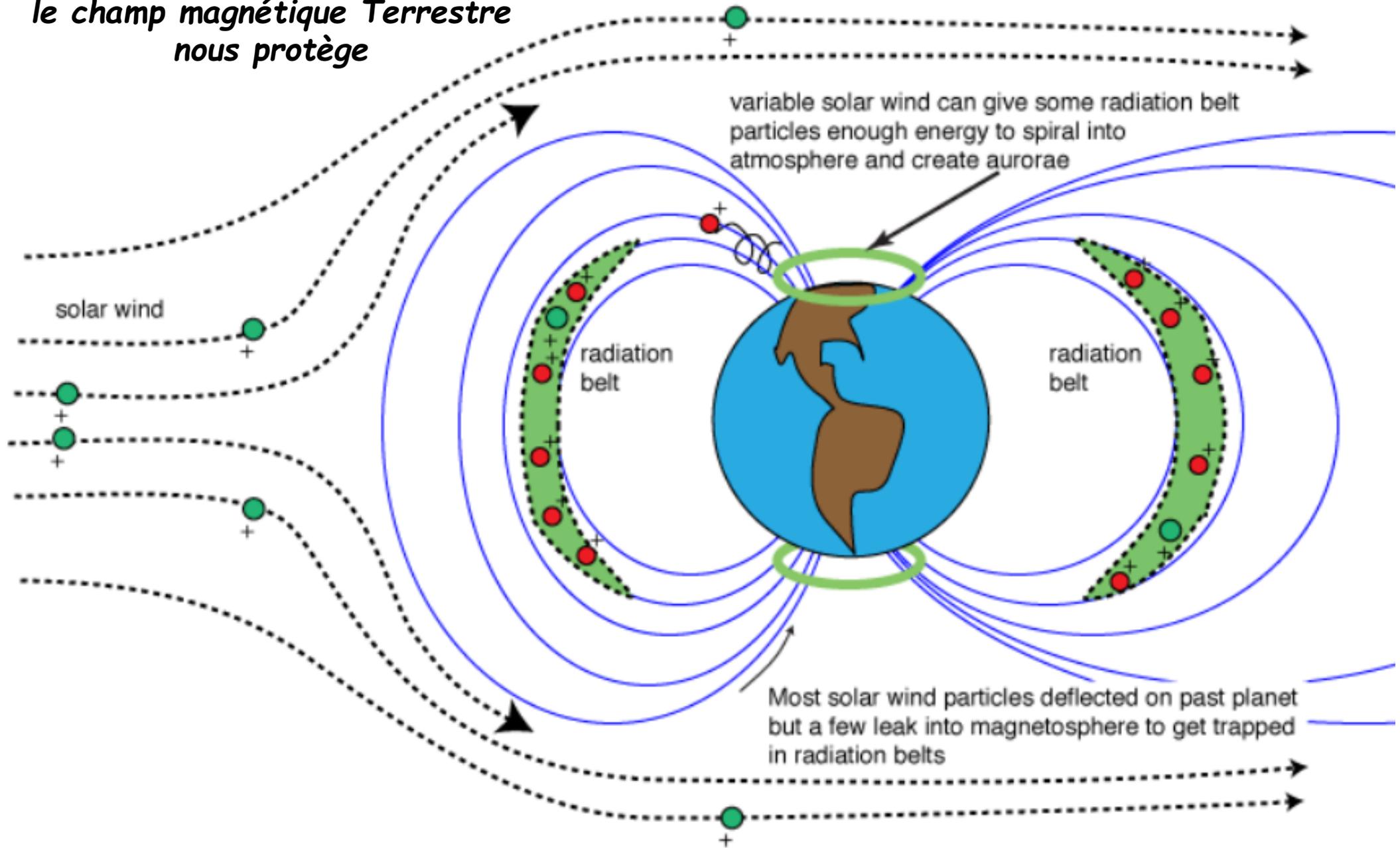
s'exerce sur des particules électriquement chargées de charge  $q$  et vitesse  $v$  placées dans un champ magnétique  $B$



*Le champ magnétique Terrestre  
piège les particules chargées du vent solaire*



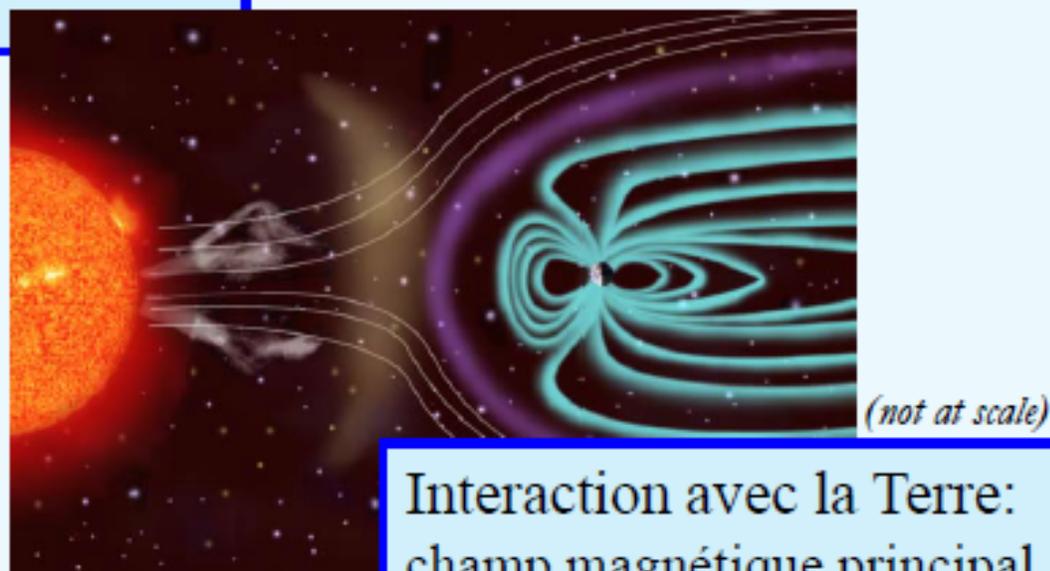
*En piégeant les particules chargées du vent solaire,  
le champ magnétique Terrestre  
nous protège*



## Plasma avec champ magnétique gelé

Sources:  
Soleil calme  
trous coronaux  
CMEs

Observations:  
in situ, à L1



(SOHO, ESA & NASA)

Interaction avec la Terre:  
champ magnétique principal  
↳ magnétosphère

**Vent solaire**

## Radiations

UV, EUV, X

Sources:  
émissions  
particulaires dans la  
couronne solaire

Observations:  
au sol et  
par satellites

Interaction avec la Terre :  
atmosphère  
↳ photo-ionisation

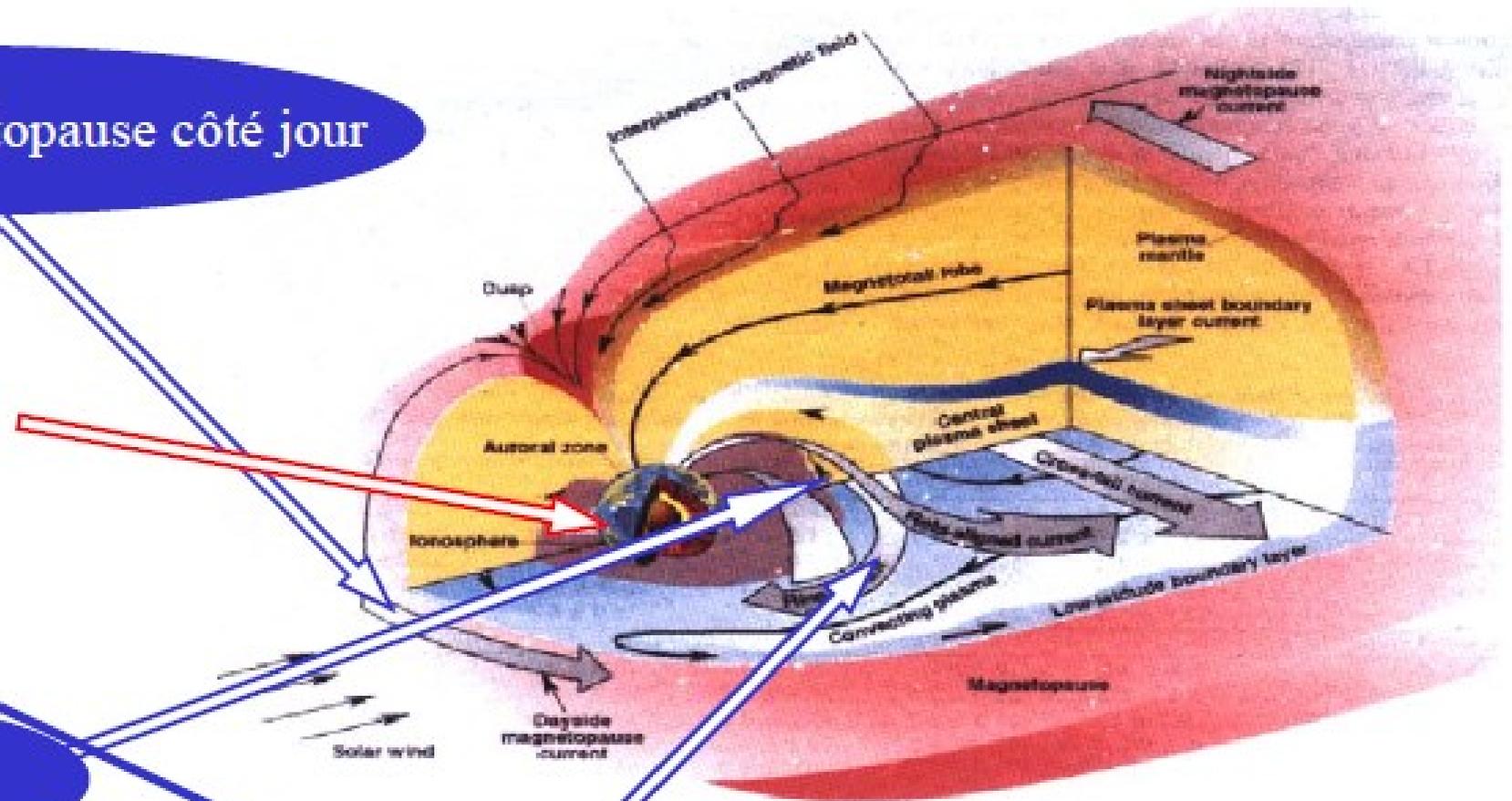
# Courants dans la magnétosphère terrestre

Courants de Magnétopause côté jour

Signature Magnétique  
à la surface de la Terre

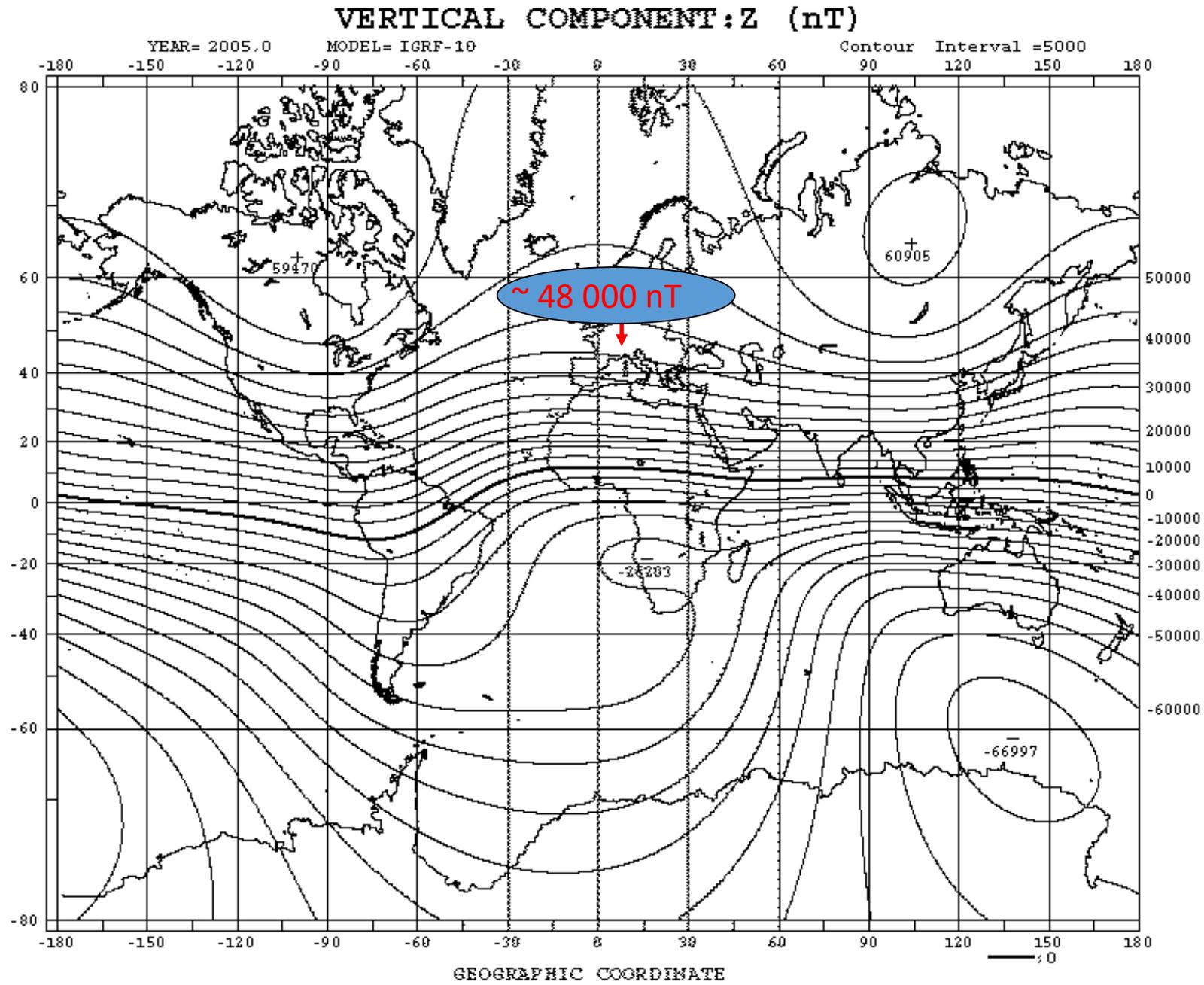
Courants alignés

Anneau de courant



NASA

# Champ Magnétique Terrestre: champ moyen & fluctuations

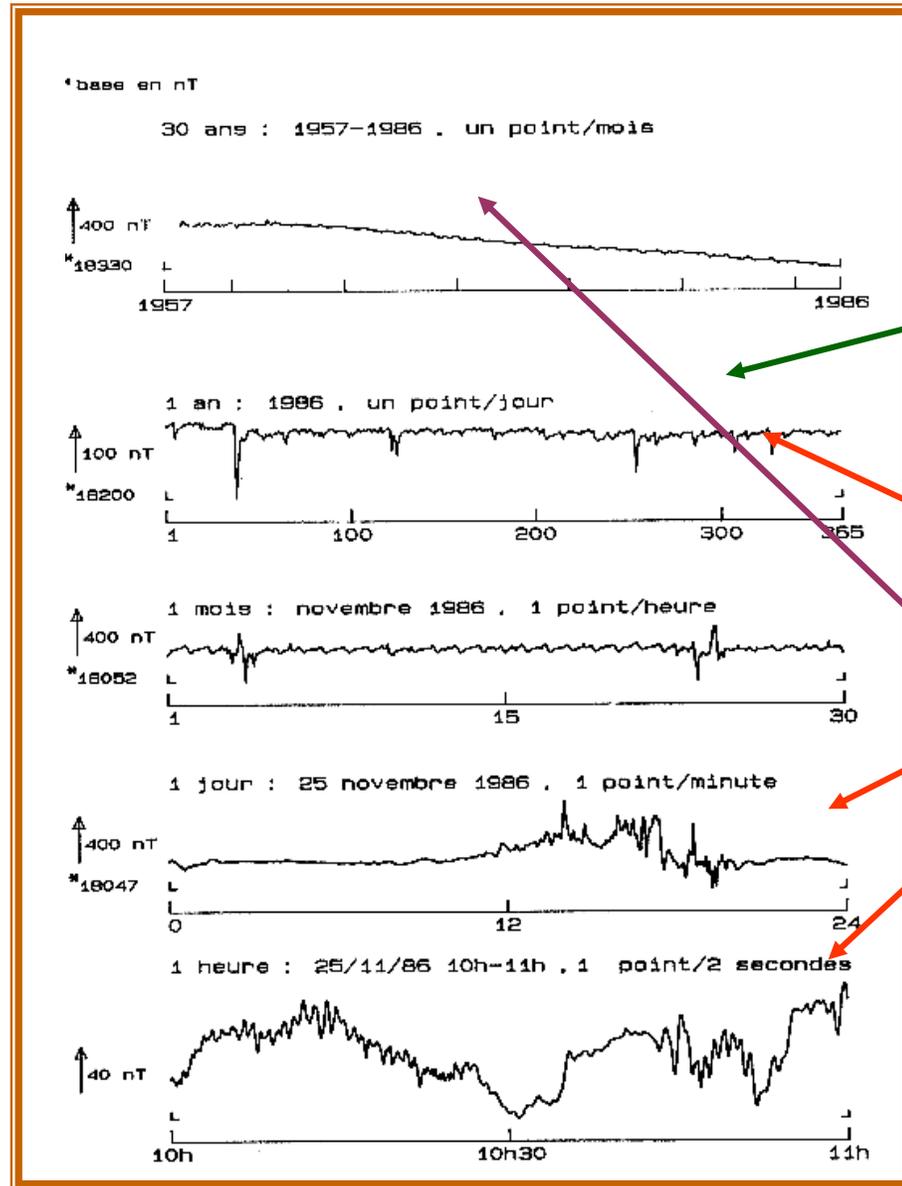


INTERMAGNET

IGRF 2011

# Champ Magnétique Terrestre = champ moyen + **Fluctuations**

## Fluctuations d'origines interne et externe

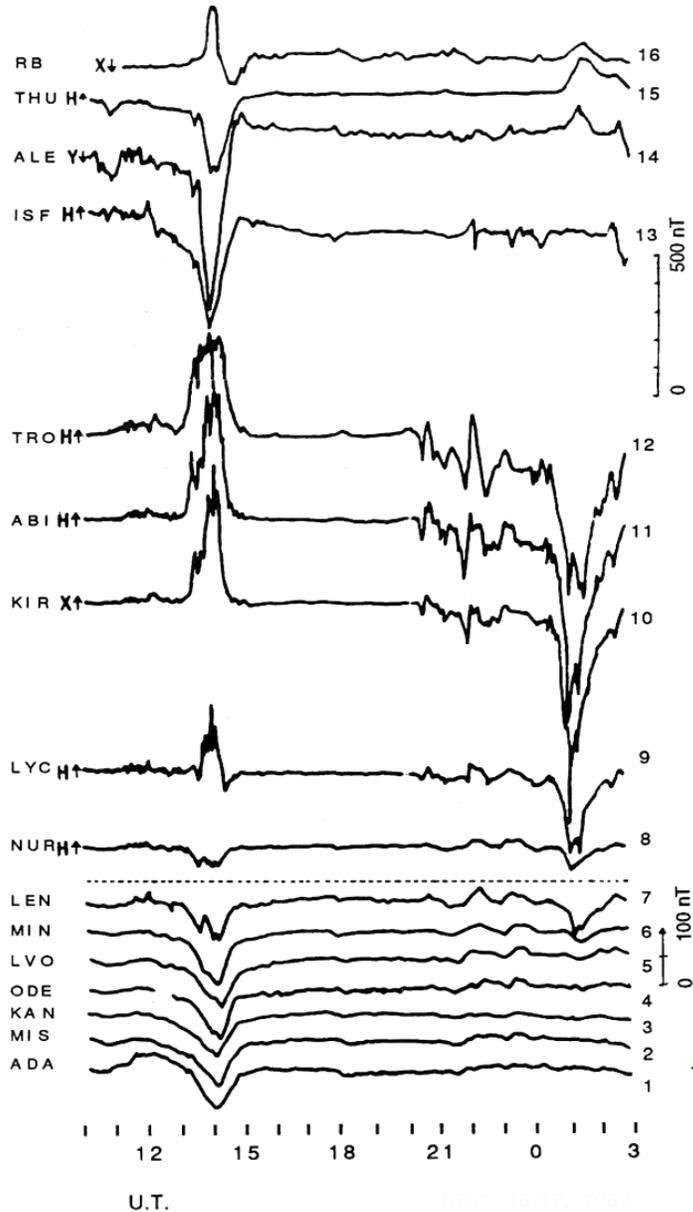


**Champ principal, interne**  
variation séculaire :  $T > \sim 2$  ans

**Champ d'origine externe**  
Sources ionosphériques et  
magnétosphériques  
( $T > \text{quelques secondes}$ )  
modulées par  
le cycle du soleil ( $T \sim 11$  ans)

*Observations de l'observatoire magnétique de  
Port aux français (archipel de Kerguelen)*

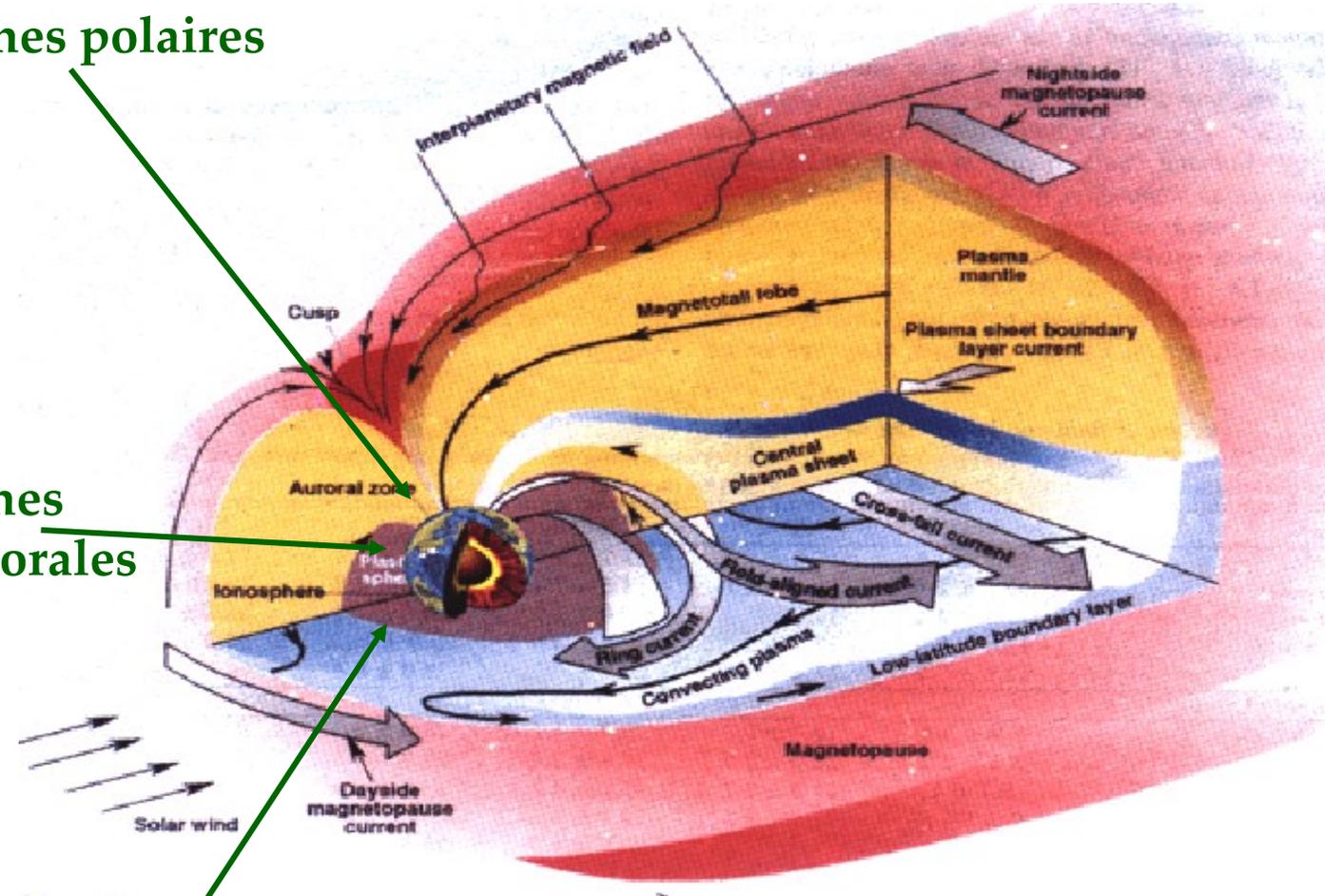
# Variations du champ géomagnétique en Latitude



Zones polaires

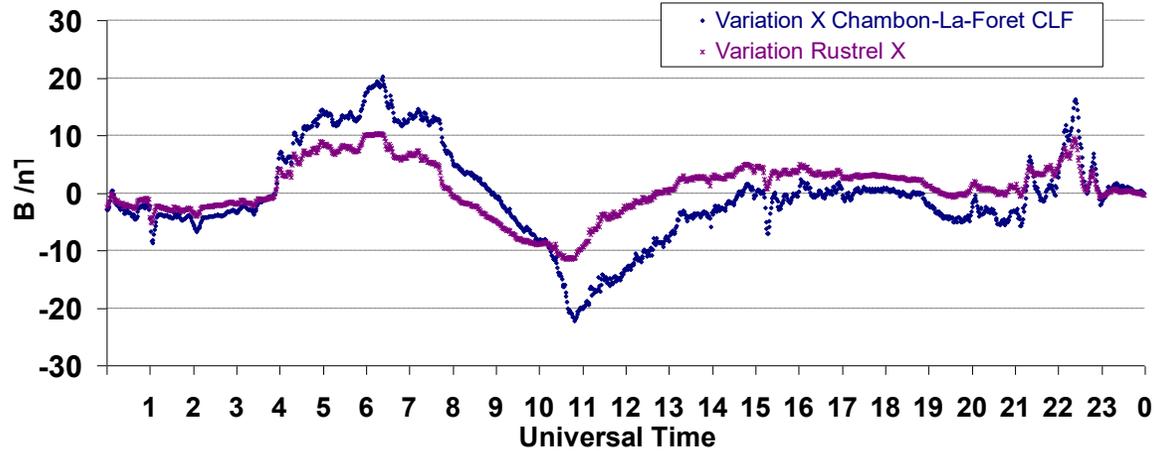
Zones aurorales

Équateur magnétique

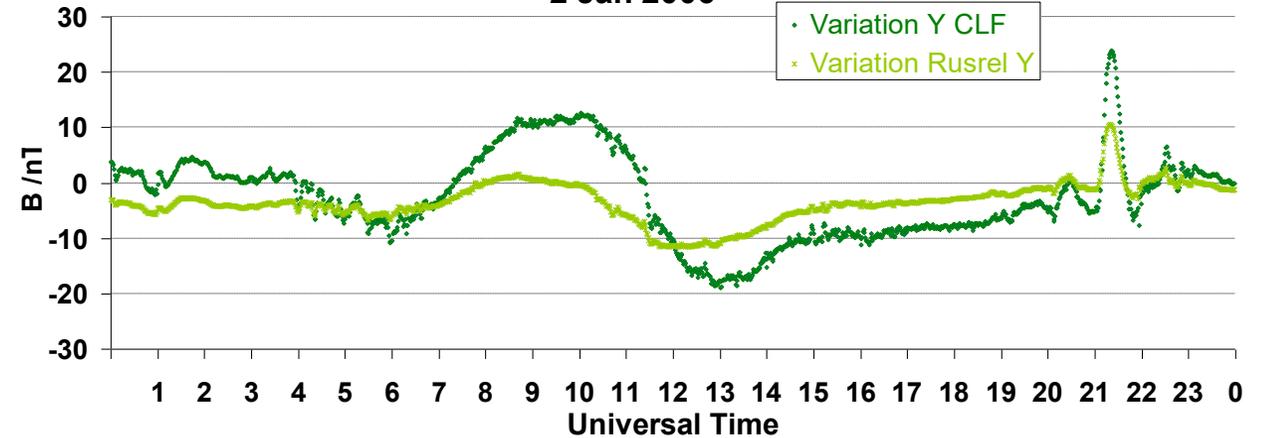


# Variations journalières du champ géomagnétique en 2 observatoires géomagnétiques Français (un jour calme en météo de l'Espace...)

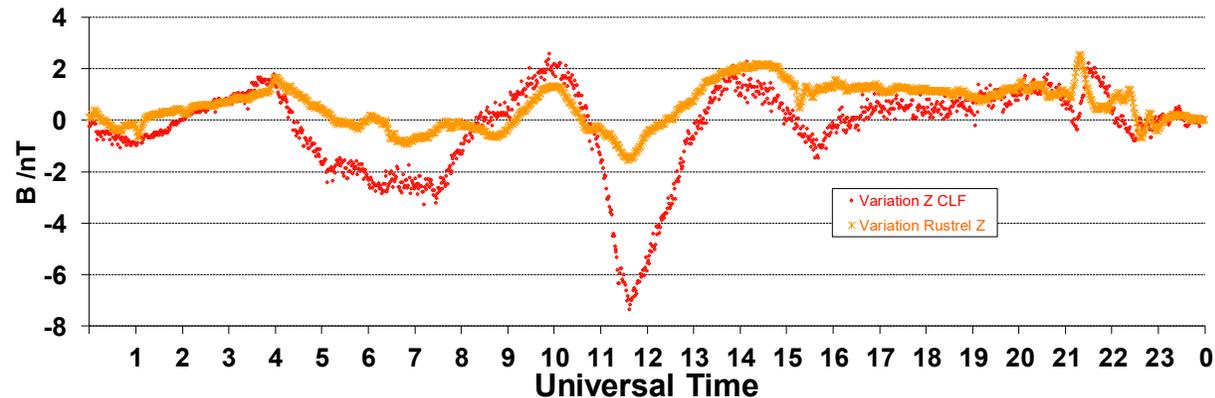
Variations X Chambon-La-Forêt versus Rustrel  
2 Jan 2006



Variations Y Chambon-La-Forêt versus Rustrel  
2 Jan 2006

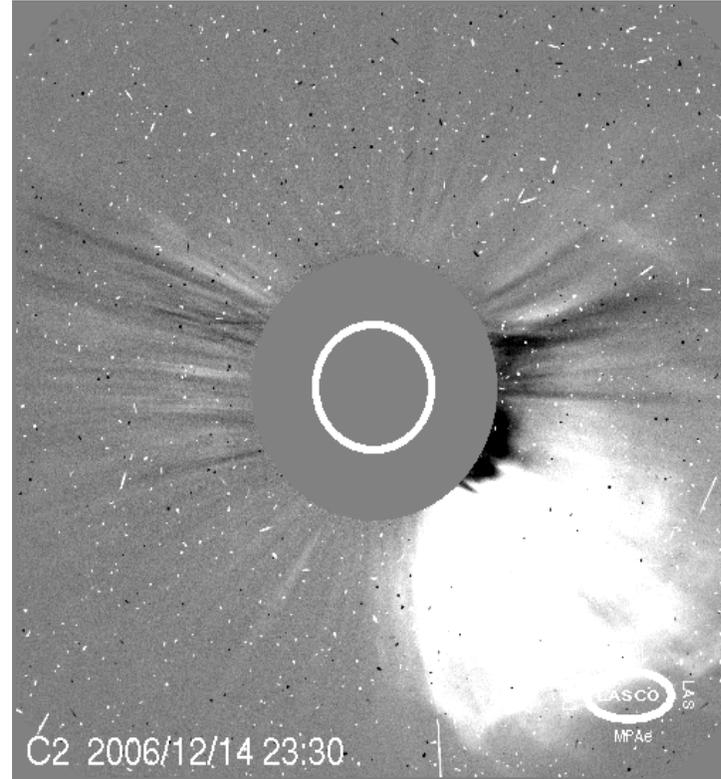
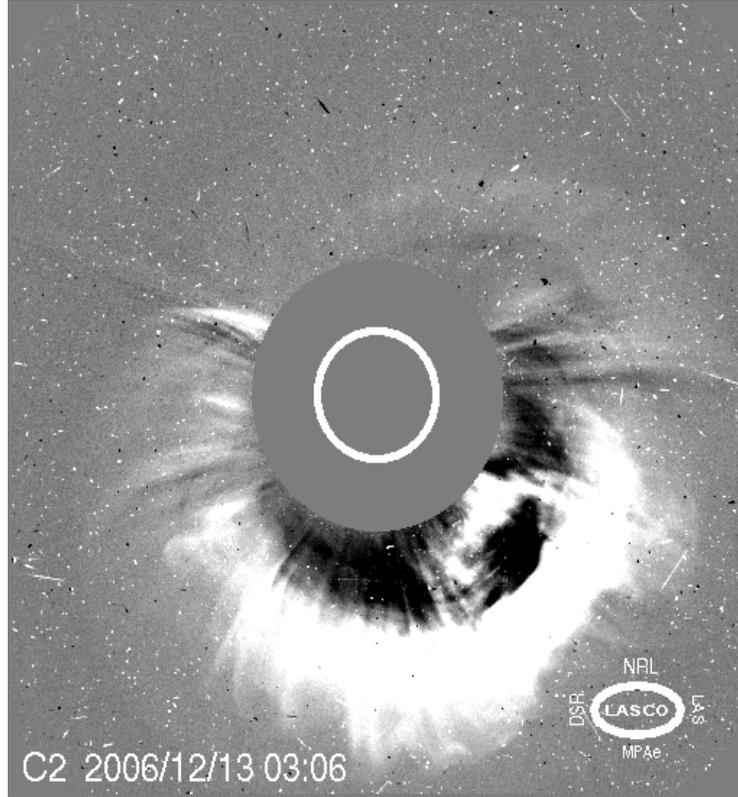


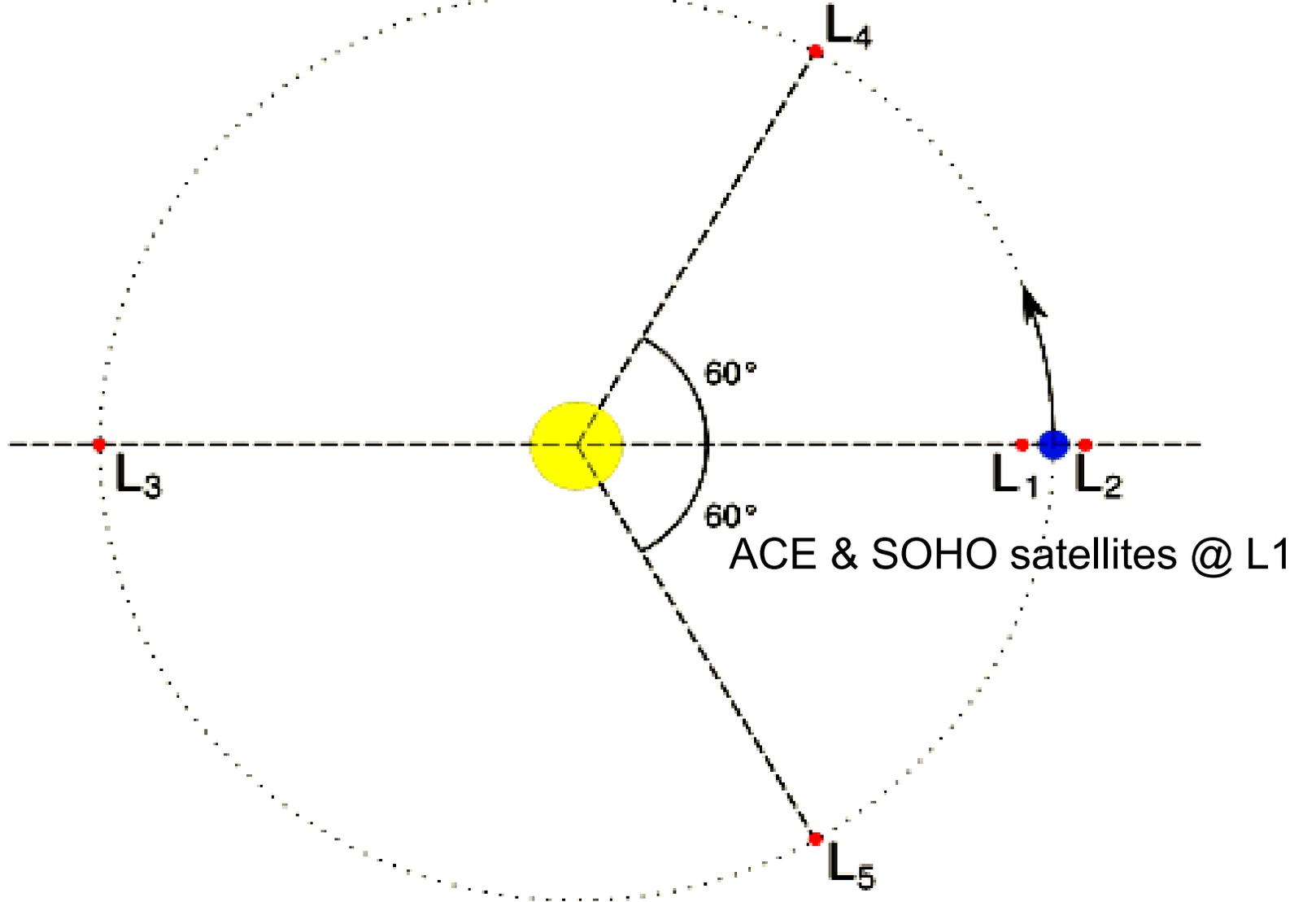
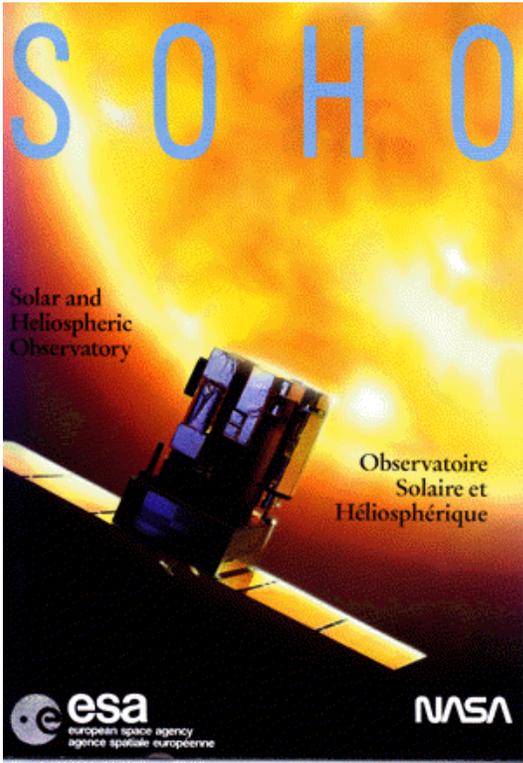
Variations Z Chambon-La-Forêt versus Rustrel  
02 Jan 2006



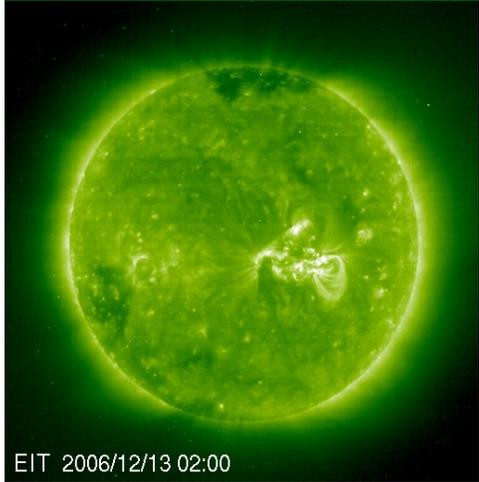
# Et quand le Soleil « s'agite » ( éruptions solaires violentes... ) ?

exemple: une mi-décembre 2006 agitée pour le Soleil ...  
Et même une grosse colère !!!!

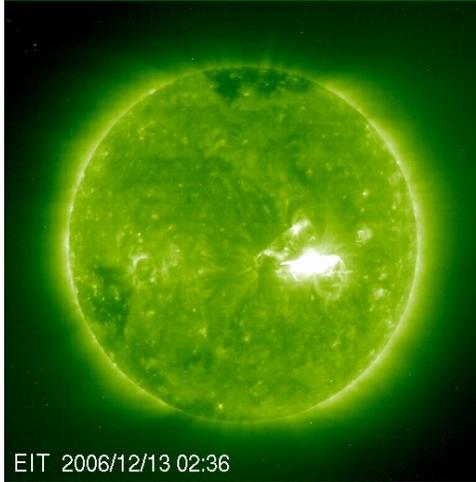




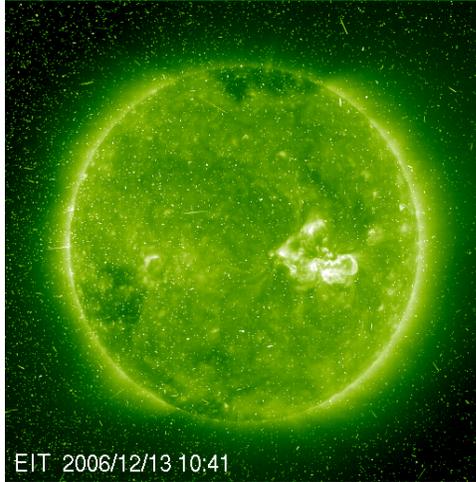
Positions des satellites d'observation près des points de Lagrange L1



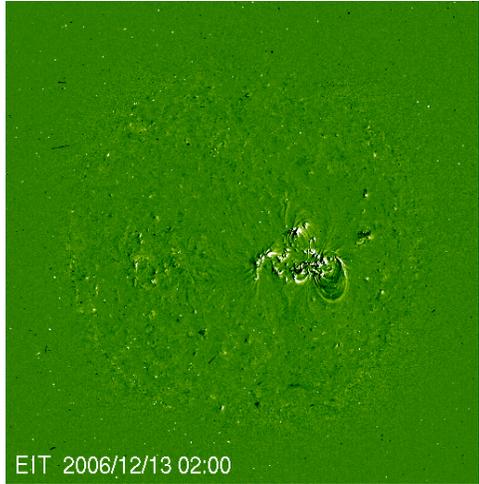
EIT 2006/12/13 02:00



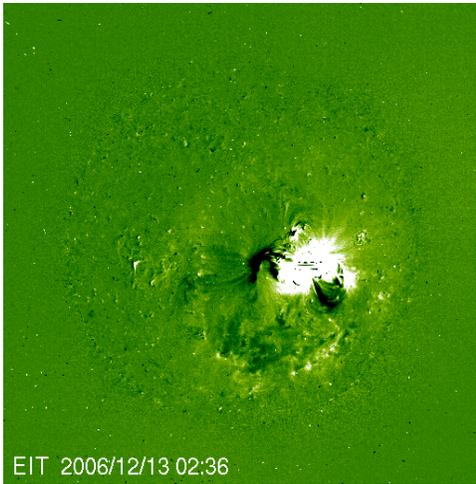
EIT 2006/12/13 02:36



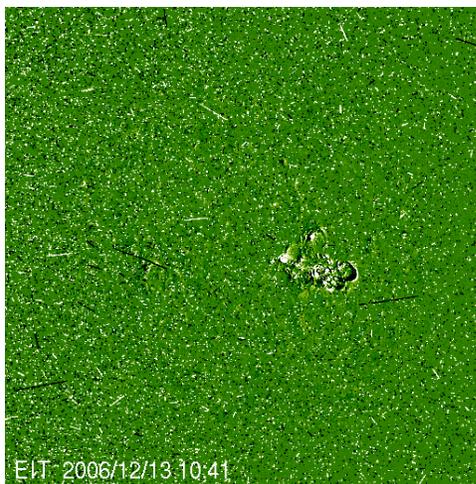
EIT 2006/12/13 10:41



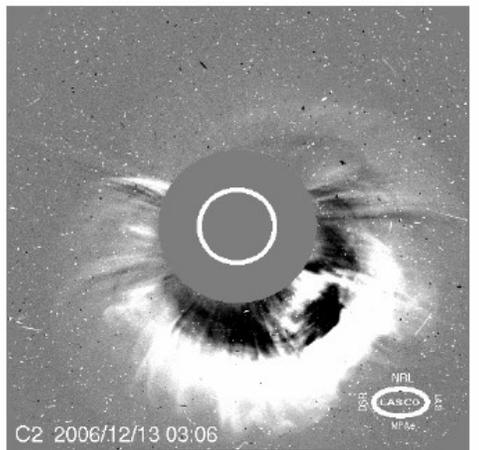
EIT 2006/12/13 02:00



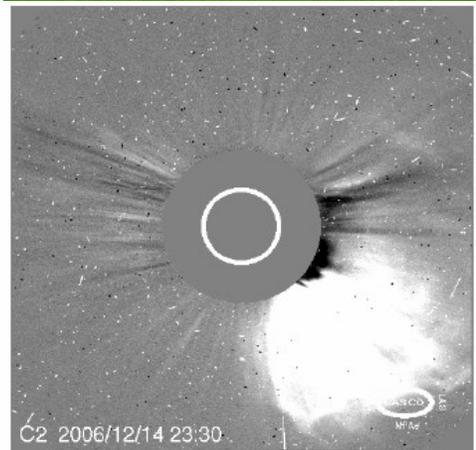
EIT 2006/12/13 02:36



EIT 2006/12/13 10:41



C2 2006/12/13 03:06

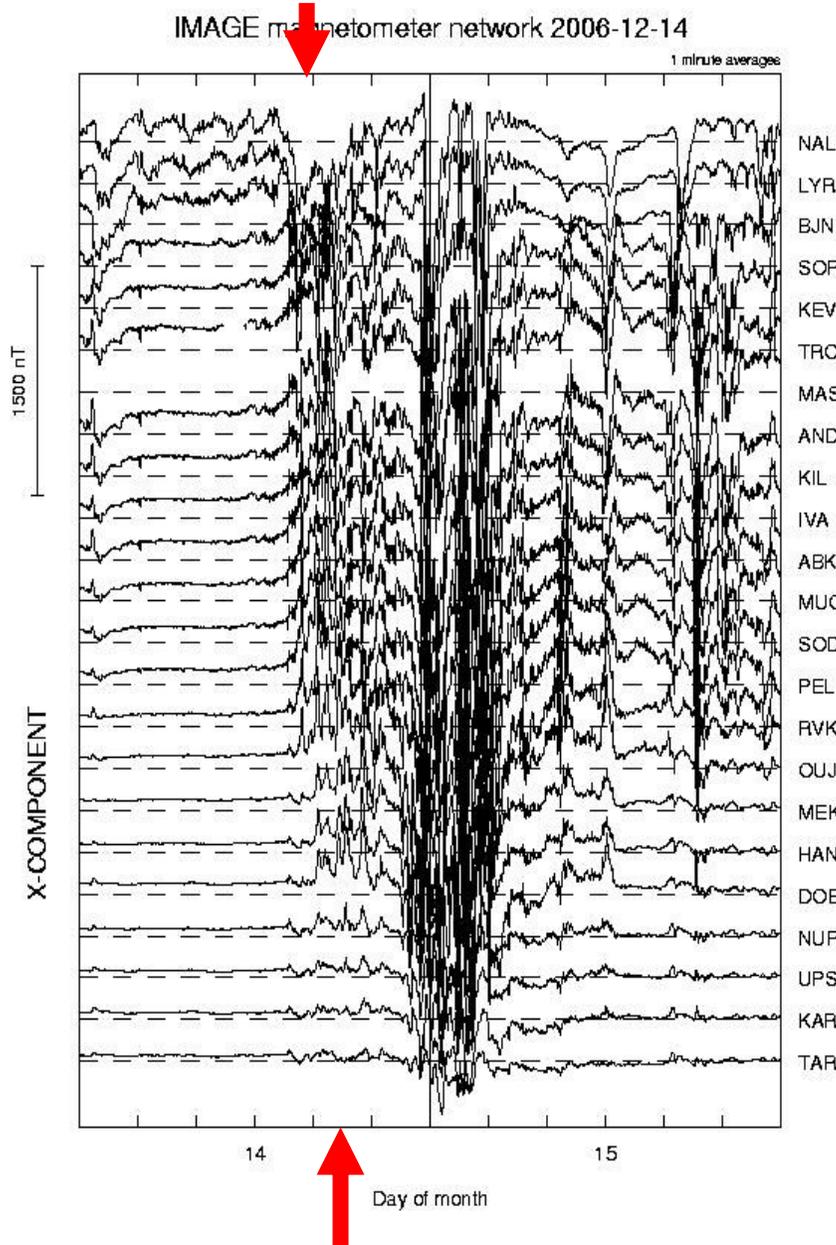


C2 2006/12/14 23:30

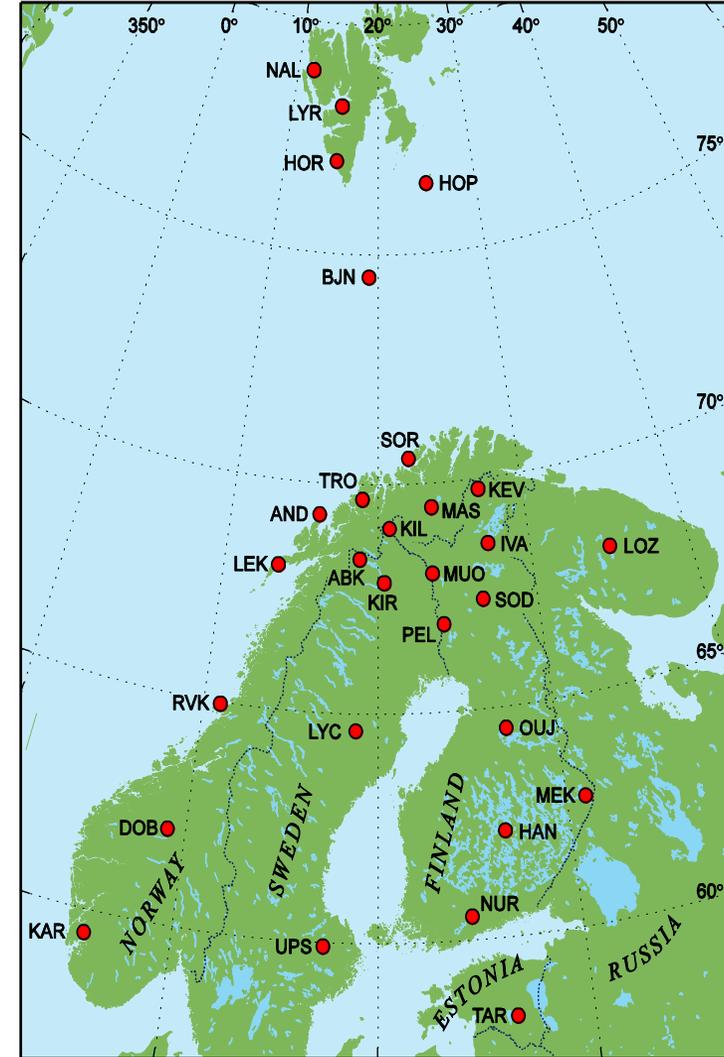


C3 2006/12/14 23:42

# On voit les Perturbations dans les différents observatoires géomagnétiques !



## IMAGE Magnetometer Network



*PRJ Barroy, EP di Borgo, R Blancon, G Waysand*

**EUROPHYSICS CONFERENCE ABSTRACTS ECA 30 (G), 79, Conference 2006**

*Conséquences des orages géomagnétiques ! Aurores = conséquences sympathiques !*

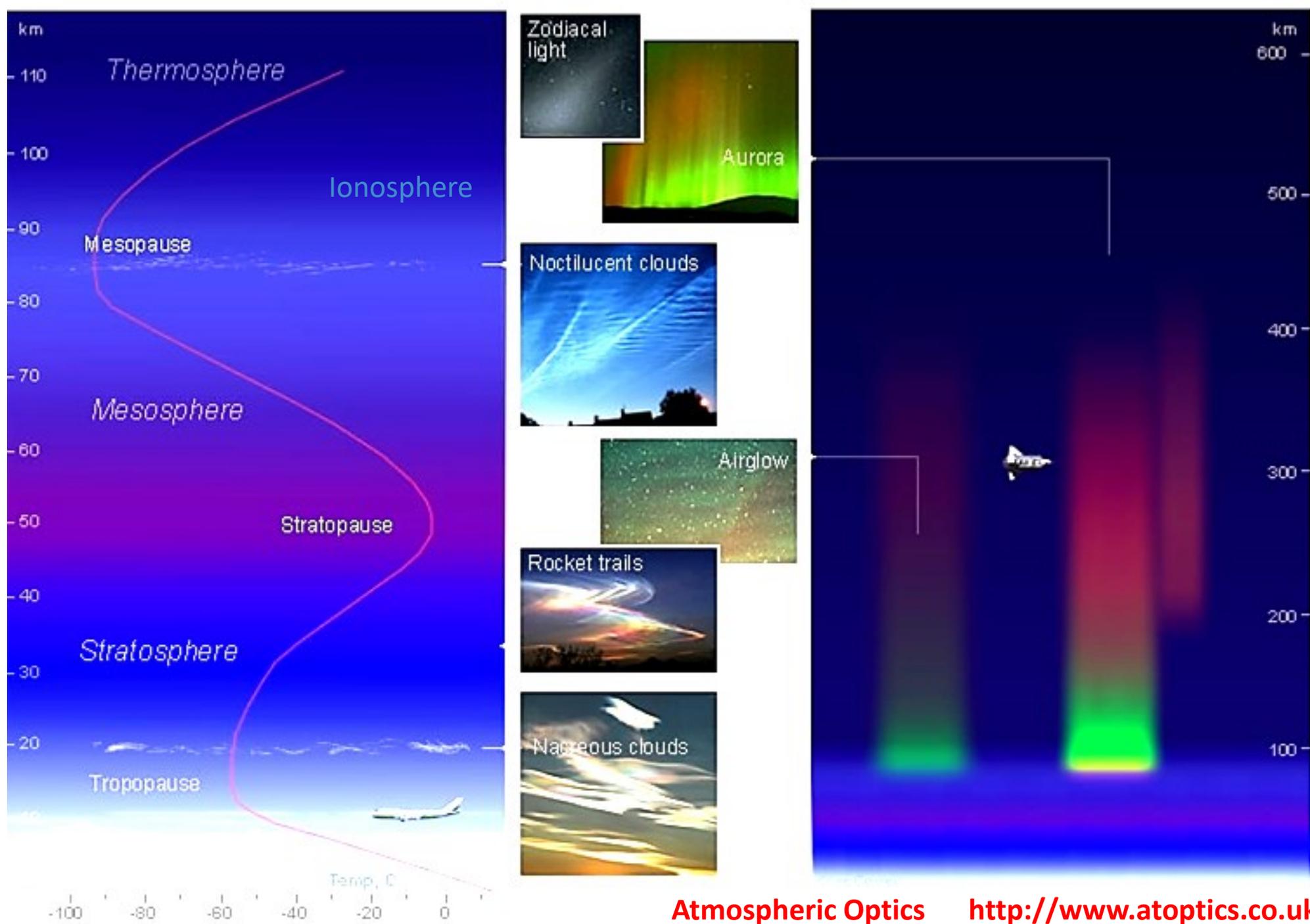


[Jeff Hapeman](#),

Cross Plains, Wisconsin, USA

Dec. 14, 2006

[http://spaceweather.com/aurora/gallery\\_01dec06\\_page2.htm](http://spaceweather.com/aurora/gallery_01dec06_page2.htm)



# Mais il y a des effets potentiellement dévastateurs des orages géomagnétiques...

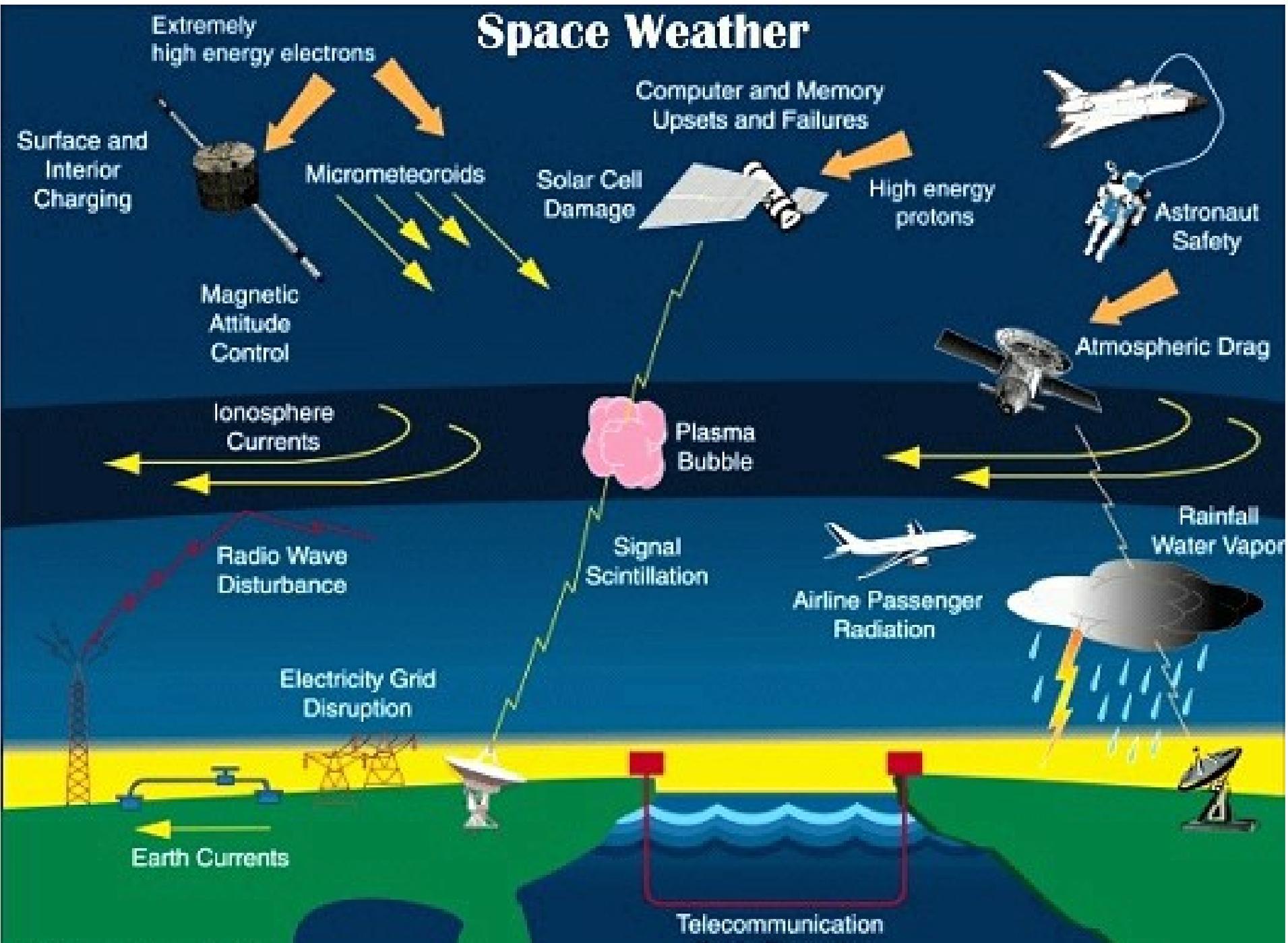
Premières observations d'effets sur l'activité humaine \*:

- Perturbations des **radio-communications** dès début XX<sup>e</sup> siècle
- 1979, ré-entrée dans l'atmosphère de la station **spatiale** Skylab plus d'un an avant la date prévue
- Mars 1989 : **coupure de courant** au Québec (6 millions de Québécois sans électricité pendant 9 heures)
- Décembre 2006 : **pertes des récepteurs GPS** sur toute la face illuminée de la Terre . Notamment plusieurs **avions...**
- Novembre 2011, **crash ordinateur** HSBC affecte des millions de personnes en GB



⇒ Une nouvelle discipline a émergé ces dernières années: la **Météo de l'Espace** ...

# Space Weather





# spaceweather.com

News and information about the Sun-Earth environment

Subscribe to Spacewea

- AURORA ALERTS
- SUBMIT YOUR PHOTOS
- CONTACT US
- SUBSCRIBE
- FLYBYS

## Current Conditions

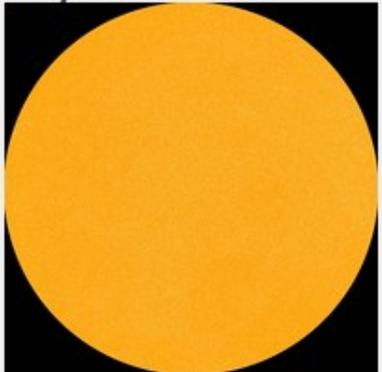
### Solar wind

speed: **486.2** km/sec  
density: **6.8** protons/cm<sup>3</sup>  
more data: [ACE](#), [DSCOVR](#)  
Updated: Today at 1433 UT

### X-ray Solar Flares

6-hr max: **A4** 0848 UT Jan15  
24-hr: **A4** 0538 UT Jan15  
[explanation](#) | [more data](#)  
Updated: Today at: 1400 UT

### Daily Sun: 15 Jan 18



The sun is blank--no sunspots. Credit: SDO/HMI

## What's up in space

Monday, Jan. 15, :

Lights Over Lapland is excited to announce that we now have TWO aurora webcams covering nearly a 200° view of Abisko National Park in Sweden! Watch the auroras dance live, all season long [here](#).



**CO-ROTATING INTERACTION REGION:** A solar wind stream engulfed Earth on Jan. 14th. Just before it arrived, a CIR (co-rotating interaction region) hit our planet's magnetic field. [Marianne Bergli](#) witnessed the resulting explosion of auroras over Kvaløy, Norway:



**Sunspot number: 0**

[What is the sunspot number?](#)

Updated 15 Jan 2018

### Spotless Days

Current Stretch: 3 days

2018 total: 7 days (47%)

2017 total: 104 days (28%)

2016 total: 32 days (9%)

2015 total: 0 days (0%)

2014 total: 1 day (<1%)

2013 total: 0 days (0%)

2012 total: 0 days (0%)

2011 total: 2 days (<1%)

2010 total: 51 days (14%)

2009 total: 260 days (71%)

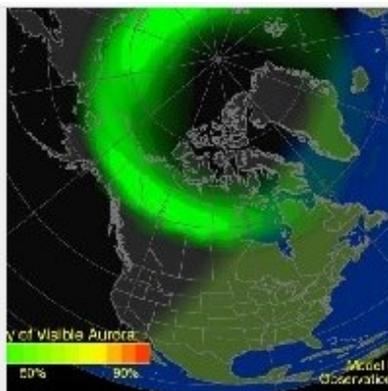
Updated 15 Jan 2018

### The Radio Sun

10.7 cm flux: **68** sfu

[explanation](#) | [more data](#)

Updated 15 Jan 2018



Switch to: [Europe](#), [USA](#), [New Zealand](#), [Antarctica](#)

Credit: NOAA/Ovation

### Planetary K-index

Now: **Kp= 2** quiet

24-hr max: **Kp= 4** unsettled

[explanation](#) | [more data](#)

### Interplanetary Mag. Field

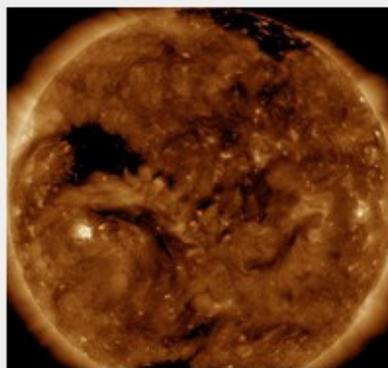
$B_{total}$ : **3.8** nT

$B_z$ : **1.6** nT north

more data: [ACE](#), [DSCOVR](#)

Updated: Today at 1432 UT

### Coronal Holes: 15 Jan 18



SPACE WEATHER

## NOAA Forecasts



Updated at: 2018 Jan 14 2200

UTC

| FLARE   | 0-24 hr | 24-48 hr |
|---------|---------|----------|
| CLASS M | 01 %    | 01 %     |
| CLASS X | 01 %    | 01 %     |

### Geomagnetic Storms:

Probabilities for significant disturbances in Earth's magnetic field are given for three activity levels: [active](#), [minor storm](#), [severe storm](#)

Updated at: 2018 Jan 14 2200

UTC

#### Mid-latitudes

|        | 0-24 hr | 24-48 hr |
|--------|---------|----------|
| ACTIVE | 15 %    | 10 %     |
| MINOR  | 05 %    | 01 %     |
| SEVERE | 01 %    | 01 %     |

#### High latitudes

|        | 0-24 hr | 24-48 hr |
|--------|---------|----------|
| ACTIVE | 15 %    | 15 %     |
| MINOR  | 25 %    | 15 %     |
| SEVERE | 20 %    | 10 %     |



About SWE

- What is Space Weather
- SSA Space Weather Activities
- Current Space Weather
- Contact

Service Domains

- Spacecraft Design
- Spacecraft Operation
- Human Space Flight
- Launch Operation
- Transionospheric Radio Link
- Space Surveillance and Tracking
- Power Systems Operation
- Airlines
- Resource Exploitation System Operation
- Pipeline Operation
- Auroral Tourism Sector
- General Data Service

Expert Service Centres

- ESC Solar Weather
- ESC Space Radiation
- ESC Ionospheric Weather
- ESC Geomagnetic Conditions
- ESC Heliospheric Weather

Other Resources

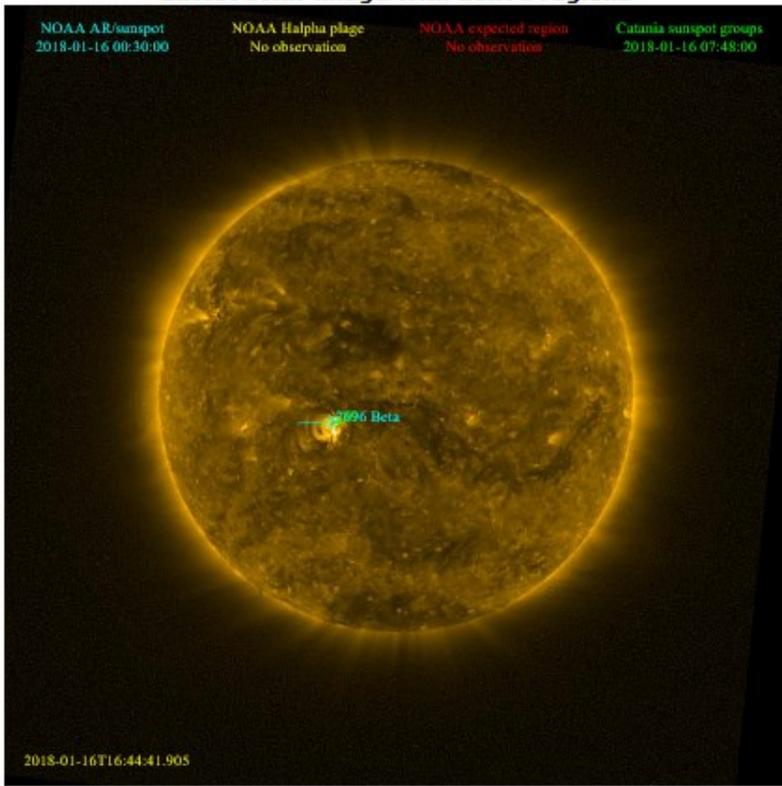
- Documents
- SWWT

### Welcome to the SSA Space Weather Service Network

Please note that all SSA-SWE Services are under review/construction

ed 10CM Flux: 70, Predicted Ap index: 5 ---

#### Latest solar image with active regions



*L'interaction Soleil-Terre est au cœur de notre environnement,  
c'est notre 1ère source d'énergie sur Terre*

*Il y a les effets visibles mais bien d'autres encore !  
Pour les découvrir, la Physique est au cœur de l'exploration*

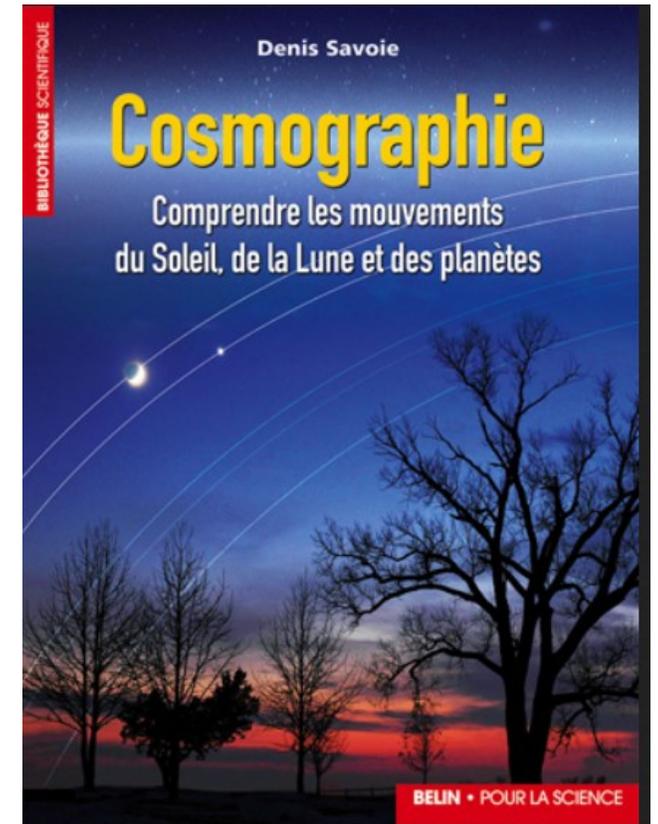
**Pierre Barroy**

Pour toute Proposition, question, commentaire, merci de me contacter à :

[pierre.barroy@u-picardie.fr](mailto:pierre.barroy@u-picardie.fr)

## Quelques références & remerciements

- **SAVOIE Denis, Cosmographie, Ed. Belin**
- **Site de la communauté amateur ASTROSURF** <http://www.astrosurf.com/>
- **Stellarium, logiciel planétarium gratuit** : <http://www.stellarium.org>
- association **PLANETE SCIENCES, *Une Aventure pour les Jeunes*** <http://www.planete-sciences.org/astro/>
- Elisabeth Pozzo Di Borgo, Georges Waysand, Rémi Blancon LSBB
- Arturo Ariste Perez, Bertrand Gelly, Didier Laforgue, THEMIS, CNRS
- David Neel, Les Observateurs Associés, Pic du Midi, CLIMSO
- *Site de Thierry Lombry « Luxorion »* <http://www.astrosurf.com/luxorion/menu-soleil.htm>
- *Site météo de l'espace (en anglais) à jour*: <http://www.spaceweather.com>
- Revues, **CIEL Et ESPACE (AFA)** , L'ASTRONOMIE (SAF), ASTROSURF Magazine
- Jean-Marc Ané « *Clef CEA* », notamment « *Comprendre le Soleil* »
- **Association Française d'Astronomie** <http://www.afa.org/>
- **Comité de Liaison Enseignants-Astronomes (CLEA)**: <http://www.clea.fr>
- *Institut de Mécanique Céleste & Calcul d'Ephémérides*:  
<http://www.imcce.fr/langues/fr/grandpublic/systeme/promenade/index.html>
- *Mission SOHO*: <http://sohowww.nascom.nasa.gov/data/realtime-images.html>
- *Mission SDO*: <http://sdo.gsfc.nasa.gov/data/>





Serpente

Serpent

Couronne boréale

Bouvier

Arcturus

Chiens de chasse

Grande Ourse

Balance

Vierge

Chevelure de Bérénice

Petit Lion

Lynx

Capella

Cocher

Lion

Cancer

Corbeau

Sextant

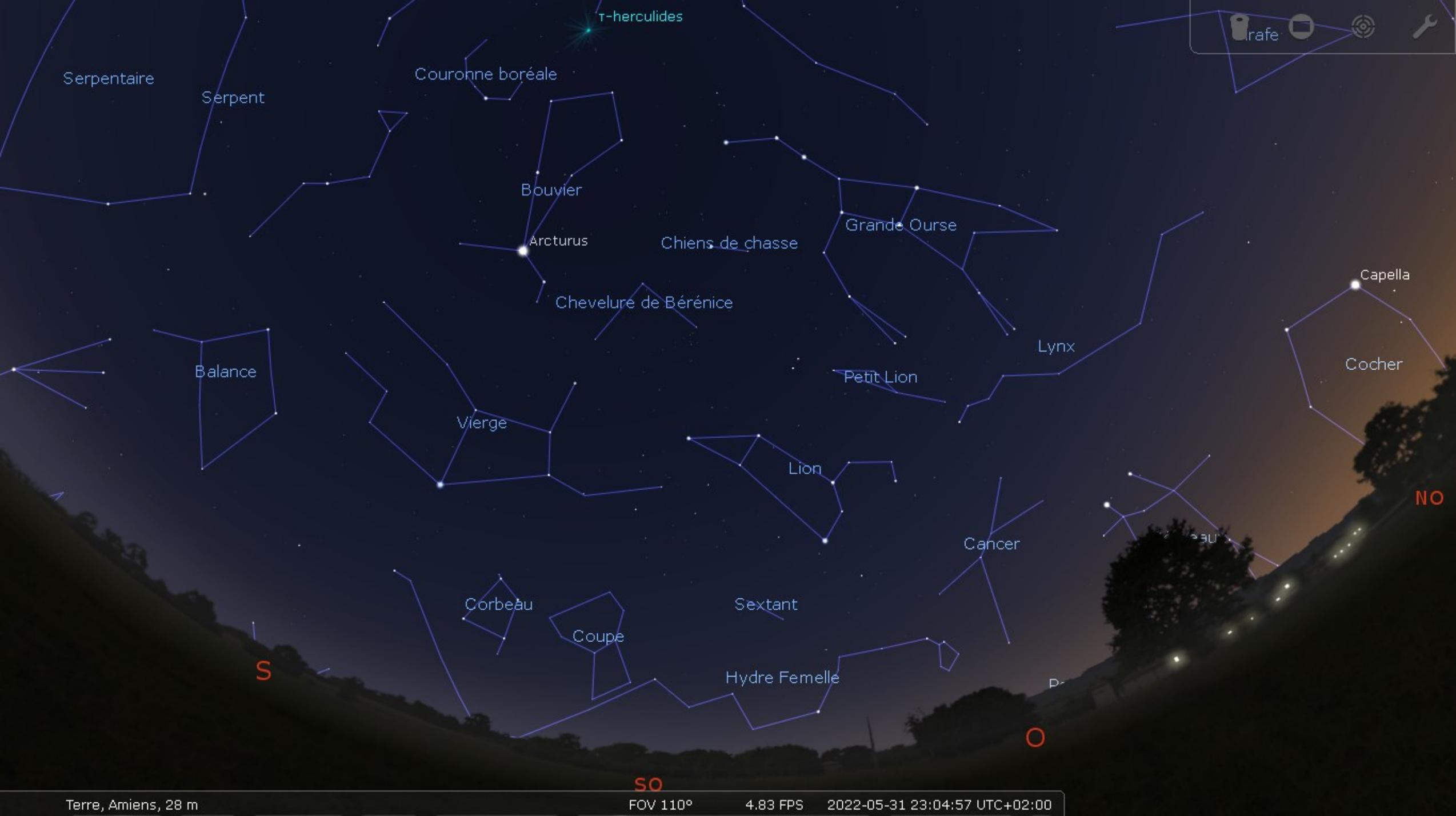
Coupe

Hydre Femelle

S

O

SO



Serpente

Serpent

Couronne boréale

$\tau$ -herculides

Bouvier

Arcturus

Chiens de chasse

Grande Ourse

Chevelure de Bérénice

Lynx

Capella

Cocher

Balance

Vierge

Petit Lion

Lion

NO

Cancer

Corbeau

Sextant

Coupe

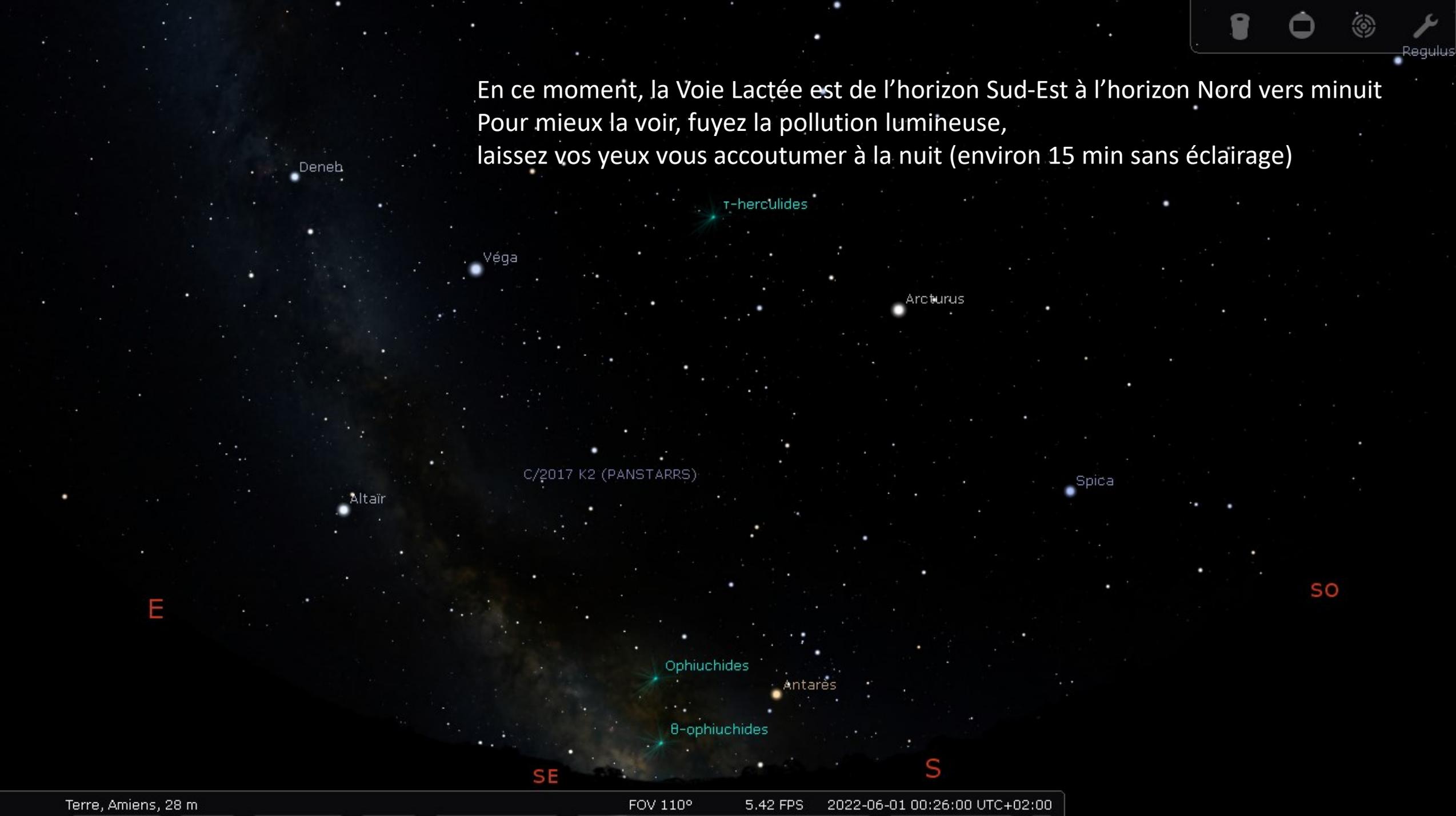
Hydre Femelle

S

O

SO

En ce moment, la Voie Lactée est de l'horizon Sud-Est à l'horizon Nord vers minuit  
Pour mieux la voir, fuyez la pollution lumineuse,  
laissez vos yeux vous accoutumer à la nuit (environ 15 min sans éclairage)





In 2016 the December Solstice is December 21, at 10:44UT, the first day of winter in the north and summer in the south.

To celebrate, an amazing timelapse video tracing the Sun's apparent movement over an entire year from Hungary.

During the year, a fixed video camera captured an image every minute. In total, 116,000 exposures follow the Sun's position across the field of view, starting from the 2015 June 21 solstice through the 2016 June 20 solstice.

The intervening 2015 December 22 solstice is at the bottom of the frame.

The timelapse sequences constructed show the Sun's movement over one day to begin with, followed by traces of the Sun's position during the days of one year, solstice to solstice.

Gaps in the daily curves are due to cloud cover.

The video ends with stunning animation sequences of analemmas, those figure-8 curves you get by photographing the Sun at the same time each day throughout a year, stepping across planet Earth's sky.

« 2018 sera l'année bleue », une année à 13 pleines Lunes dont deux seront 'bleues'

Faut-il comprendre que nous pourrions voir la Lune prendre une couleur anormalement bleue ?

Il n'en sera rien. L'expression « lune bleue » nous vient des anglo-saxons, encore eux ... Elle semble remonter au XVI<sup>e</sup> siècle où son premier sens renvoyait alors à l'absurdité d'un propos tenu : il est tout aussi absurde de dire que la Lune est bleue que de dire que le noir est blanc. Depuis, son sens a évolué. Elle est passée de nos jours dans la langue anglaise sous la forme familière « once in a blue moon » dont l'équivalent en Français est « chaque 36 du mois », expression utilisée pour désigner un fait rarissime.

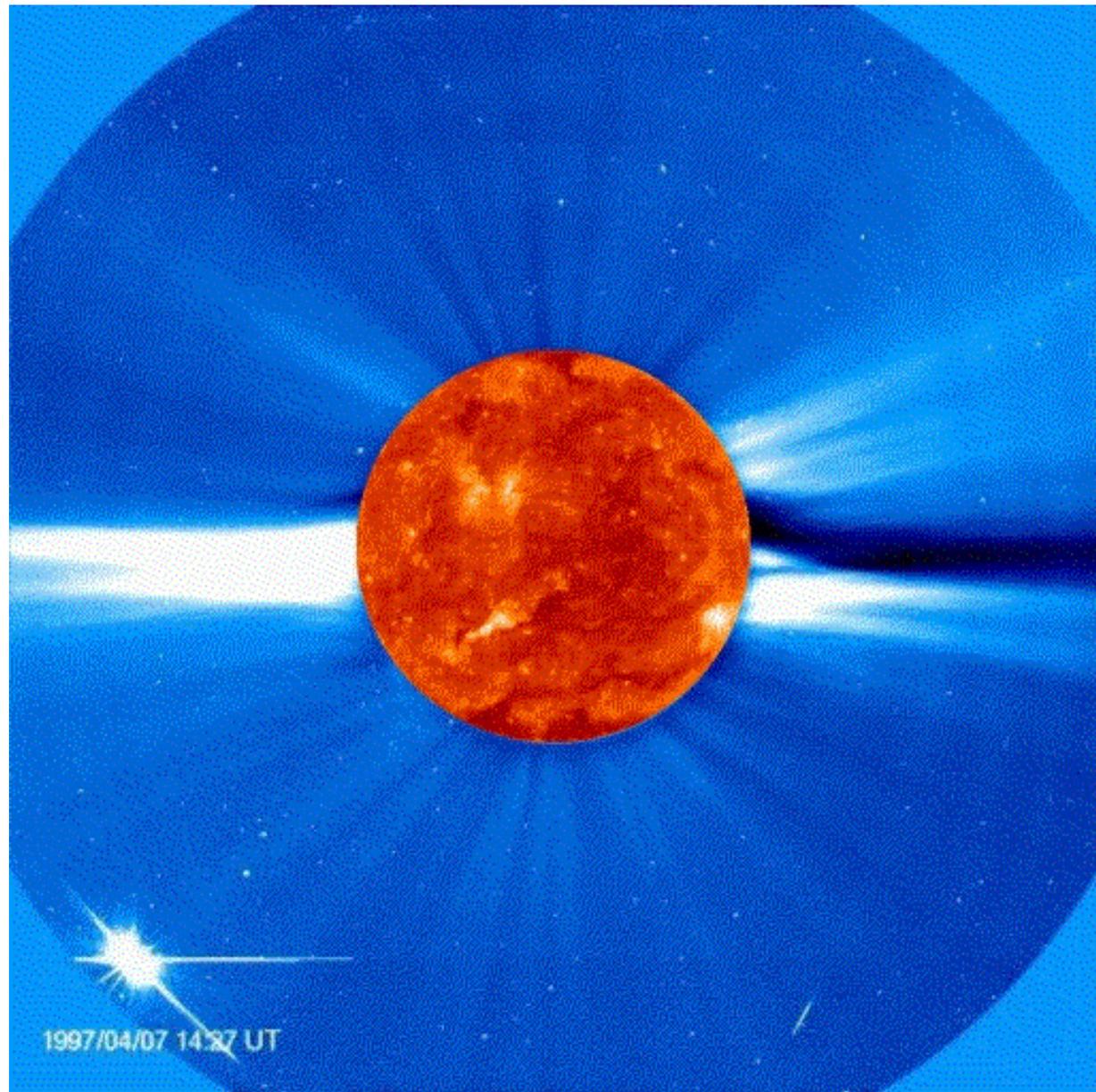
En fait, la 'Lune bleue' désigne la seconde pleine Lune pouvant survenir dans un même mois. C'est une mauvaise traduction d'une expression Anglaise « Once in a Blue Moon » qui signifie « Un événement si rare qu'il est impossible ».

Mais en janvier et en mars 2018, il y aura bien 2 Pleine Lune dans le même mois. C'est un phénomène suffisamment rare pour que l'on ait eu cette idée bien saugrenue de désigner cette pleine Lune de Lune bleue... Dans le cas présent, elle sera d'autant plus saugrenue que la Lune bleue du 31 janvier 2018 sera en fait une Lune rouge-cuivrée car elle sera alors en éclipse totale ! À quoi tient cette rareté ? Il existe un cycle lunaire connu sous le nom de « **cycle de Méton** » qui stipule que tous les 19 ans une même phase lunaire se reproduit à une même date. Or en 19 années, on dénombre 228 mois calendaires et 235 pleines lunes. Il y a donc 7 pleines lunes en surnombre, ce qui revient à dire que 7 mois sur ces 228 mois se verront obligés d'accueillir une pleine Lune supplémentaire. Ainsi, tous les 32,57 mois (228/7), soit tous les 2,71 ans en moyenne un mois sera doté de deux pleines Lunes. En 2018, la situation est rendue exceptionnelle du fait que le mois de février ne comporte que 28 jours. Ainsi quand une Lune bleue survient en janvier, nécessairement une seconde lune bleue vient en mars et le mois de février se retrouve dépourvu de pleine Lune. C'est le seul cas pour lequel une année puisse être une année à deux Lunes bleues. La prochaine occurrence se renouvellera exactement dans 19 ans, selon le cycle de Méton, donc en 2037.

Voici les PL du début d'année 2018 :

Pleine Lune : 02/01/ 2018 02h24m UTC / Pleine Lune : 31/01/ 2018 13h27m UTC (Lune bleue)

Pleine Lune : 02/03/ 2018 00h51m UTC / Pleine Lune : 31/03/ 2018 12h37m UTC (Lune bleue)





Le Groupe de support Technique du télescope Jean-Marc Salomon  
vous souhaite  
une excellente année 2018

