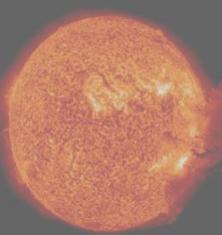




Variabilité de l'irradiance solaire et stellaire & environnements planétaires

Gaël Cessateur

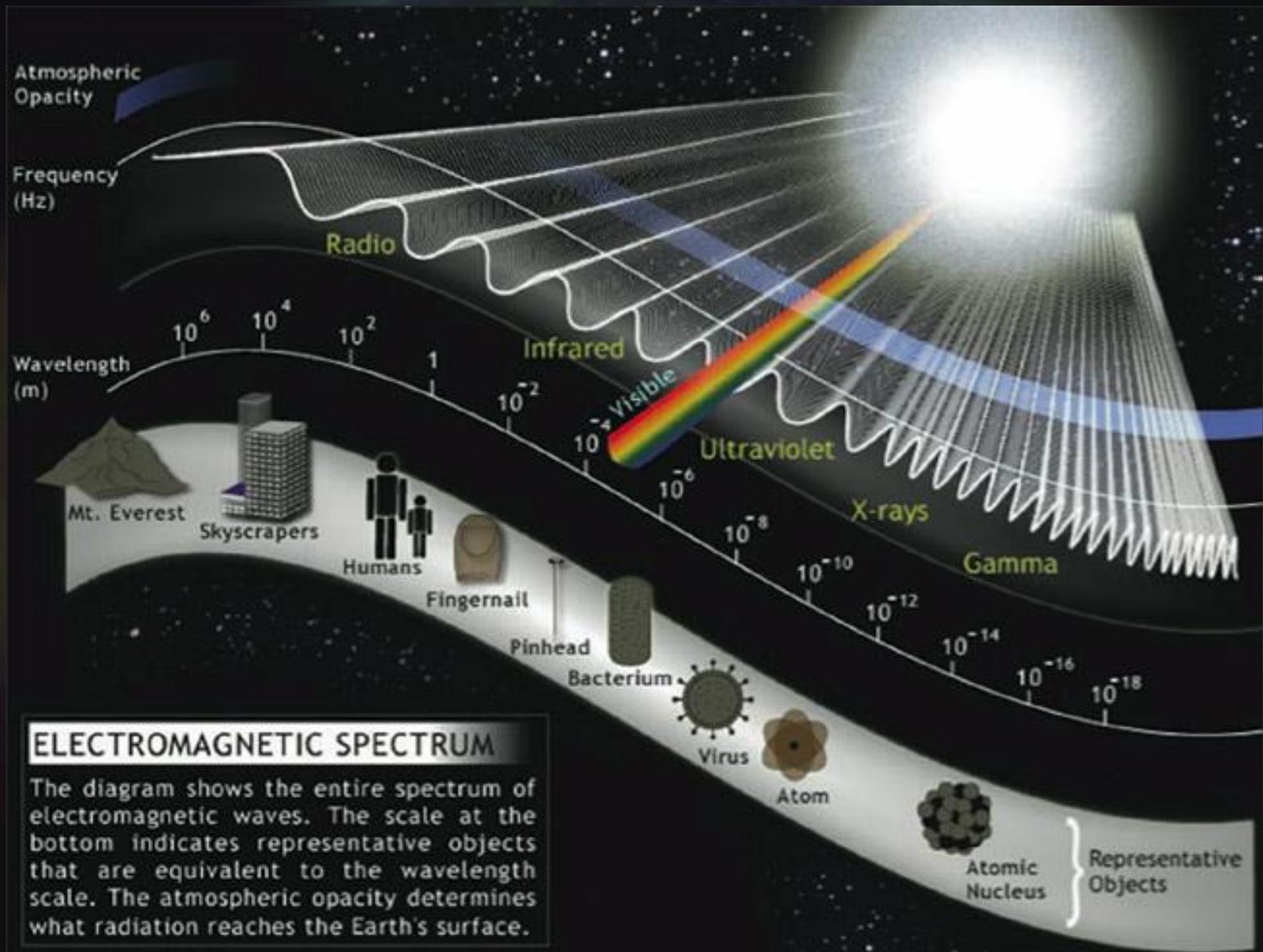




Sommaire

- ✓ *Le Soleil en quelques mots*
- ✓ *Irradiance; Mécanismes d'émission*
- ✓ *Le Soleil: une étoile variable*
- ✓ *Introduction à la météorologie de l'espace*
- ✓ *UV et atmosphères planétaires*

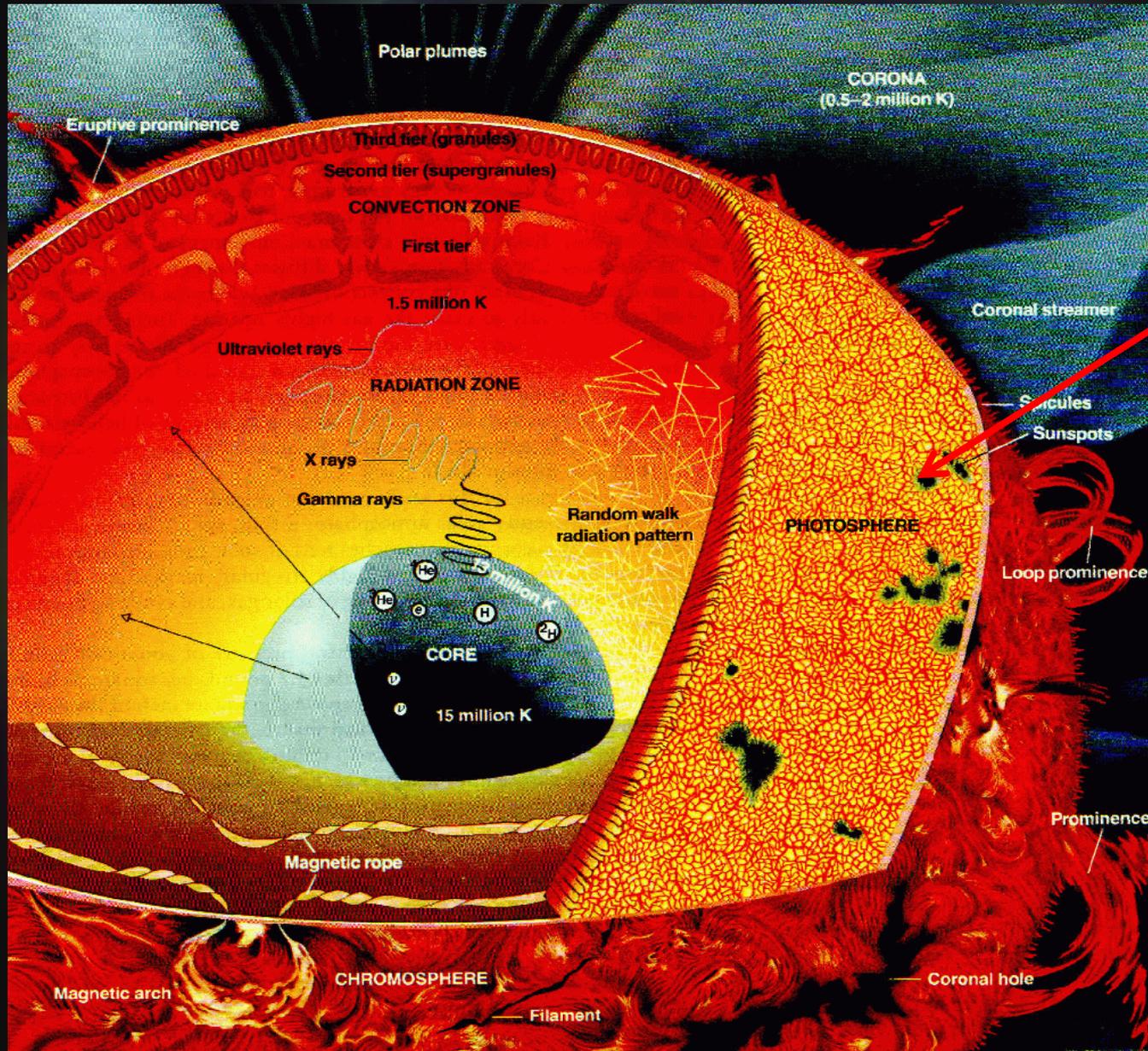
Quelques Rappels



Le Soleil en quelques chiffres

- Masse = $1.99 \cdot 10^{30}$ kg (= $1 M_{\odot}$) (330000 masse de la terre, 1000 celle de Jupiter)
- Temperature effective = 5777 K (G2 V)
- Temperature du noyau = $15 \cdot 10^6$ K
- Acceleration de surface $g = 274 \text{ m/s}^2$
- Age = $4.55 \cdot 10^9$ years (à partir des isotopes météoritiques)
- Rayon = $6.96 \cdot 10^5$ km, i.e. 700 000 km (110 radius celui de la terre, 10 celui de Jupiter)
- Distance = 1 AU = 150 Mio km
- Période = 27 jours à l'équateur
- Luminosité $\approx 4 \cdot 10^{26}$ W = $4 \cdot 10^{33}$ erg/s 40 millions d'années pour brûler la masse de la terre

Structure du Soleil en quelques mots...



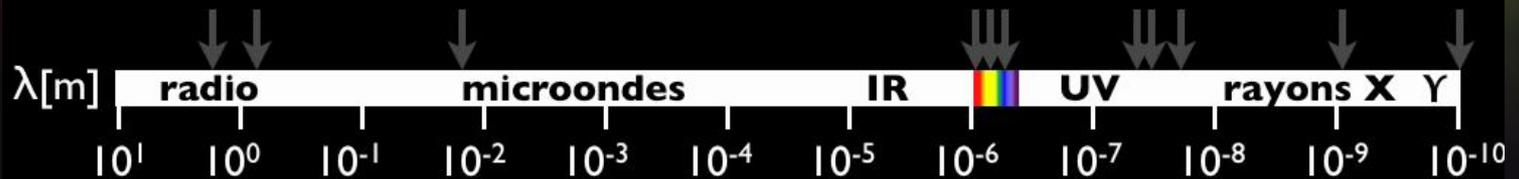
"Surface"

Le Soleil sous plusieurs longueurs d'onde

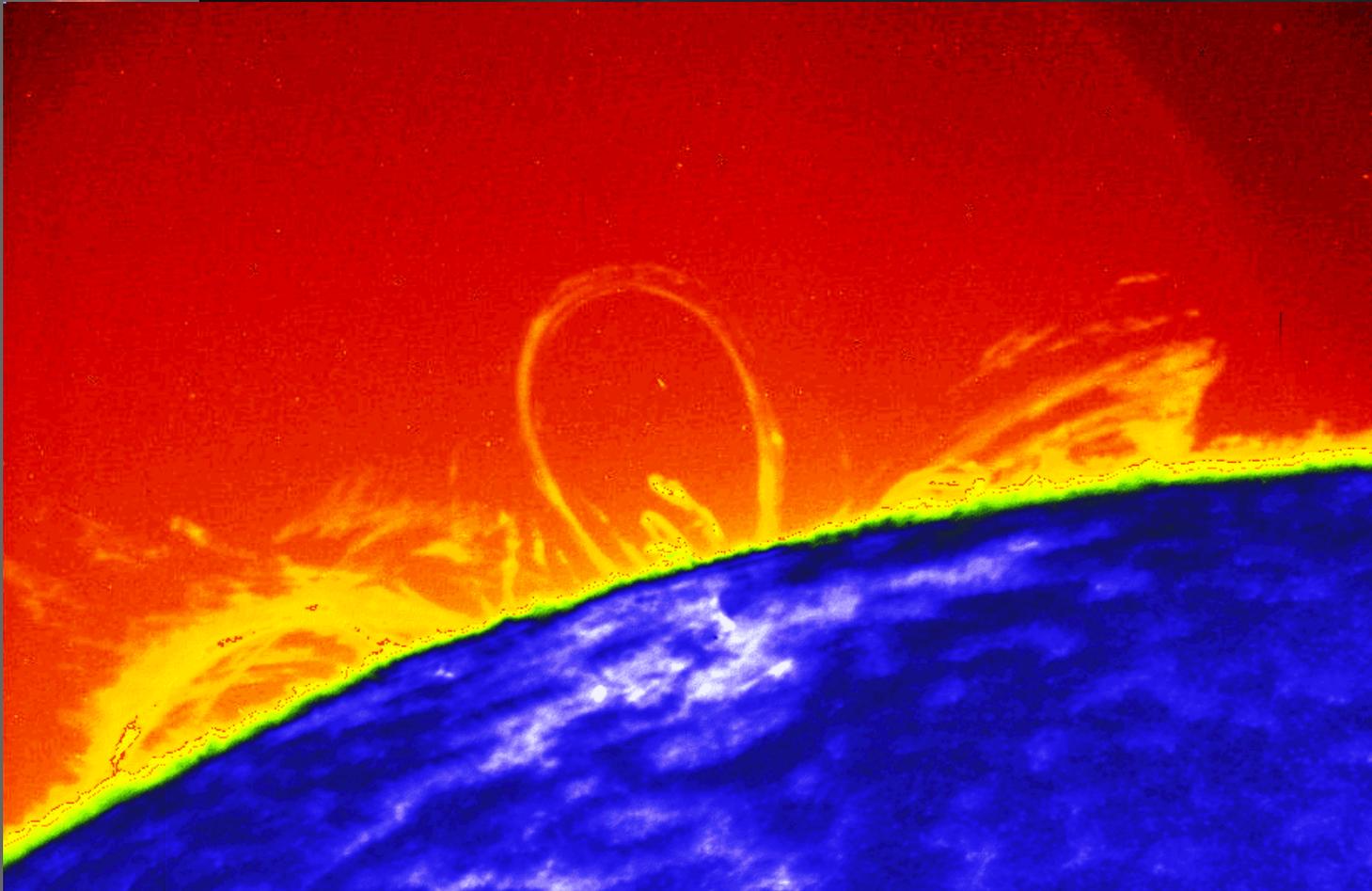
T. Dudok de Wit
LPC2E 

Le Soleil

vu dans différentes longueurs d'onde,
le 11 décembre 2007



L'atmosphère du Soleil en quelques mots...



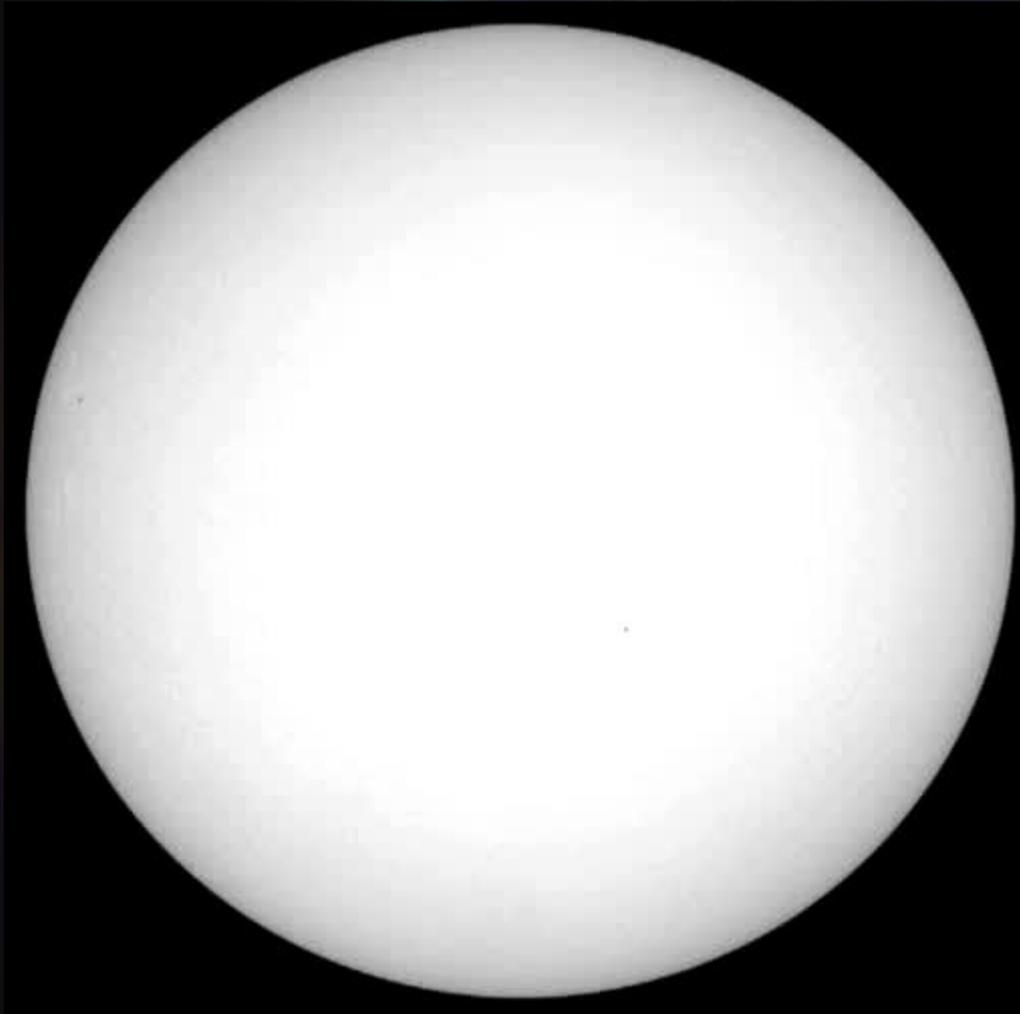
Corona
T~ few Mio°C

**Transition
Region**
T~10000 K –
Mio K

Chromosphere
T~6000 K

Photosphere
T~5800 K

L'atmosphère du Soleil en quelques mots...



1. Sunspots observed in visible light

2. Extrem ultraviolet
1. Helium 30.4 nm

3. Flares in extrem ultraviolet, 17.1 nm
October 28, 2003

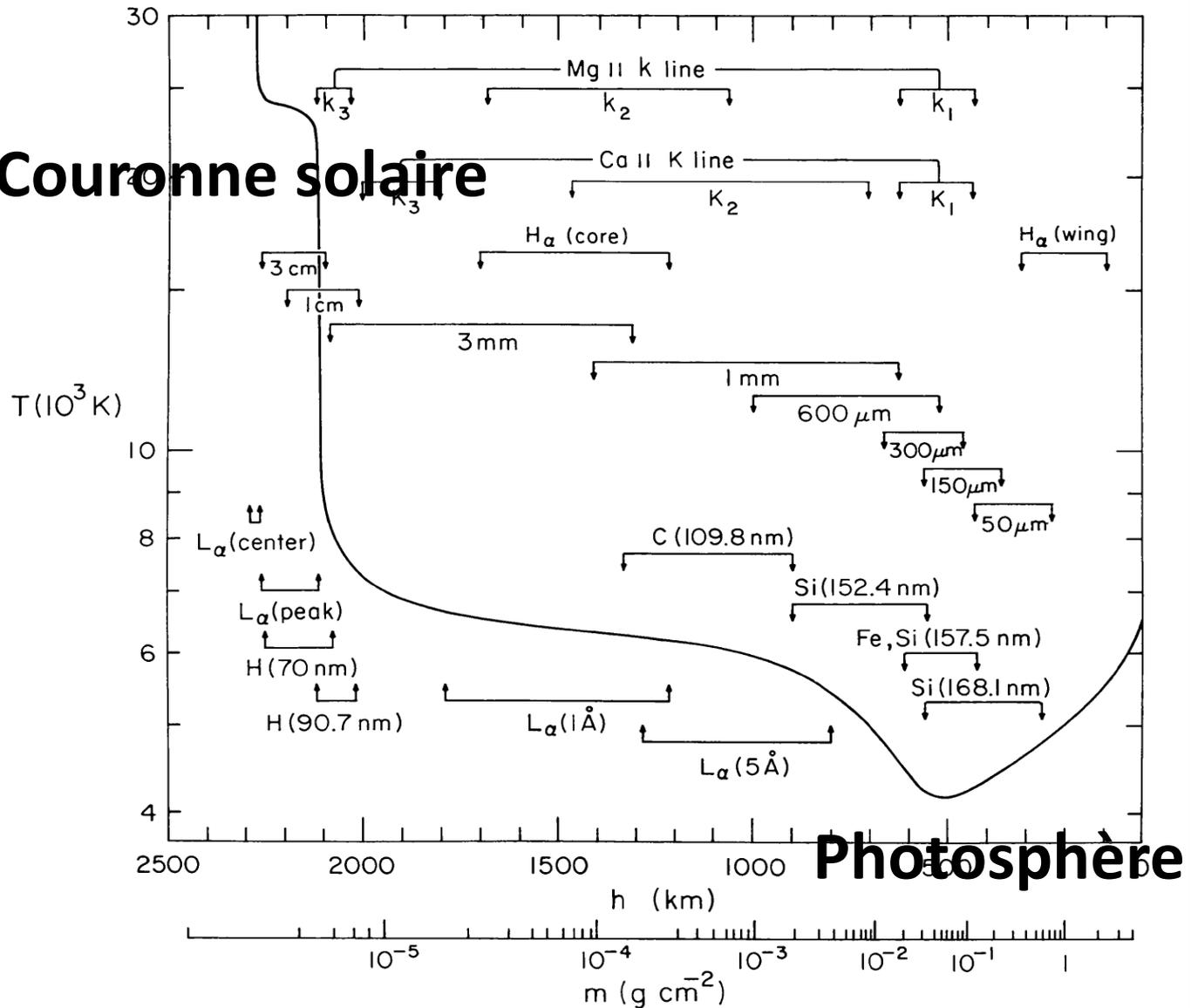
4. Coronal mass ejections (CMEs)

5. Coronal Mass ejections observed with LASCO/SOHO

Il y a différents types de régions actives pour chaque couche de l'atmosphère solaire, toutes conditionnées par le champ magnétique

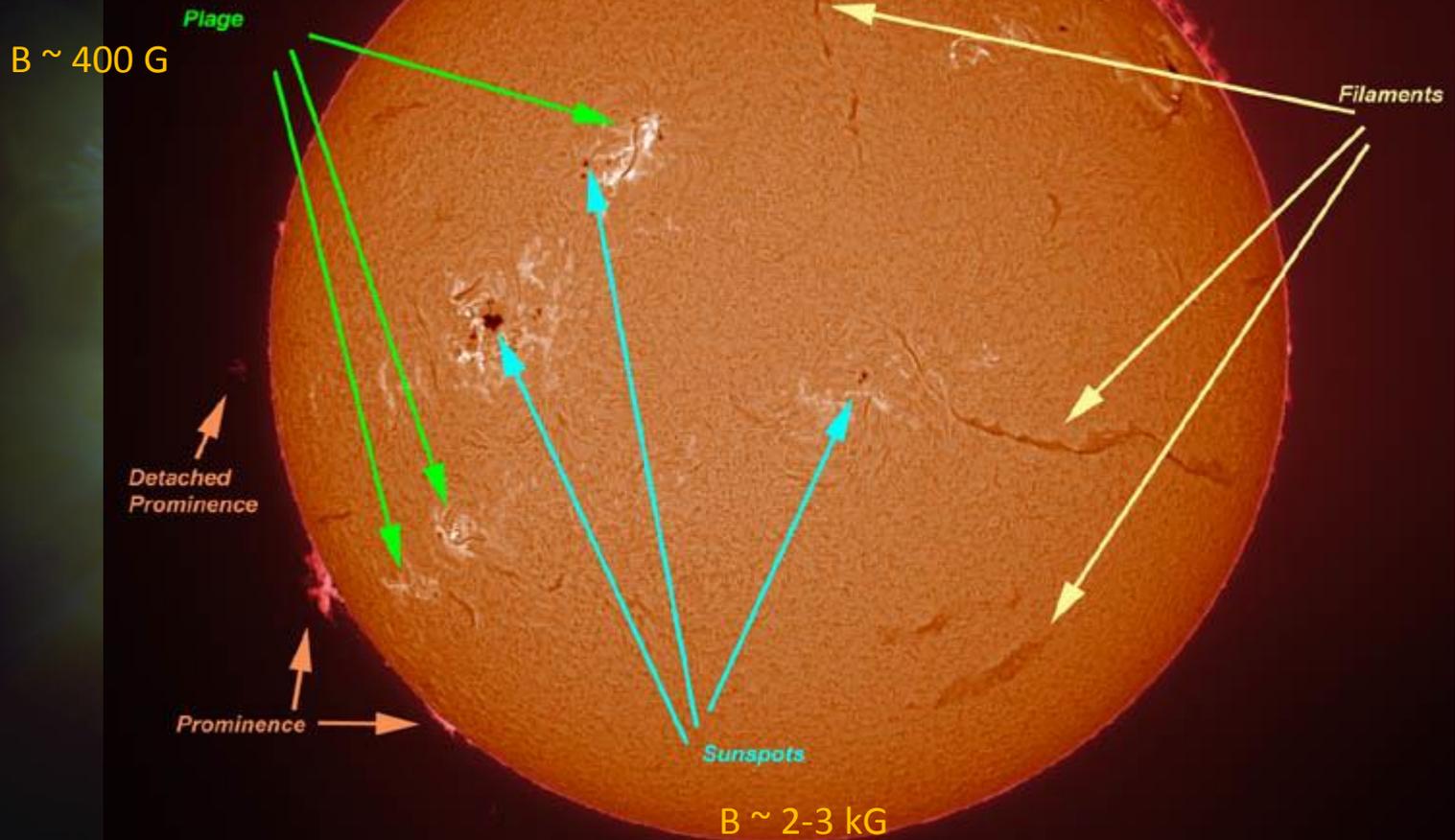
L'atmosphère du Soleil en quelques mots...

Couronne solaire



Photosphère

Types de structures à la surface du Soleil ?



Types de structures à la surface du Soleil ?



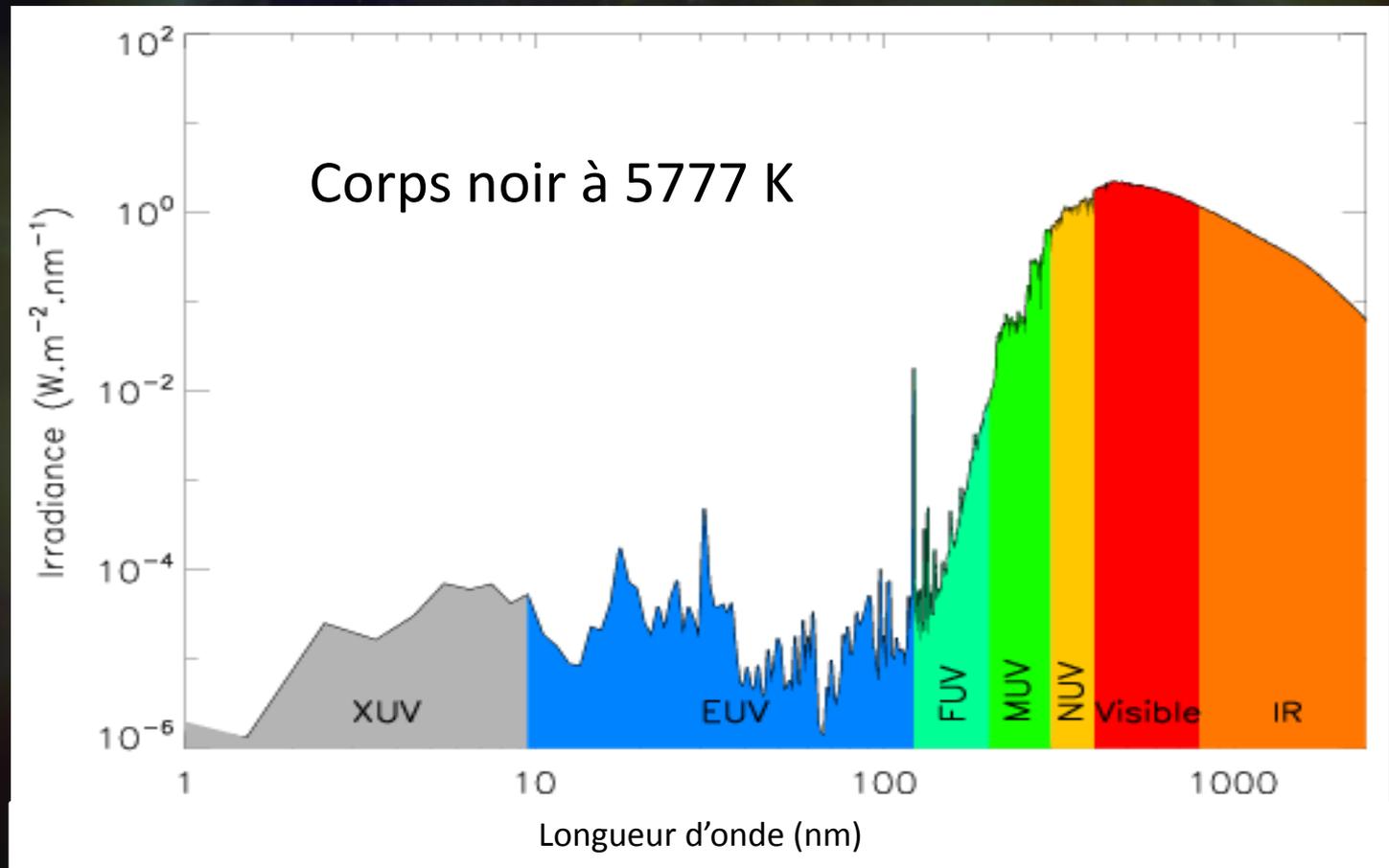


Sommaire

- ✓ *Le Soleil en quelques mots*
- ✓ *Irradiance; Mécanismes d'émission*
- ✓ *Le Soleil: une étoile variable*
- ✓ *Introduction à la météorologie de l'espace*
- ✓ *UV et atmosphères planétaires*

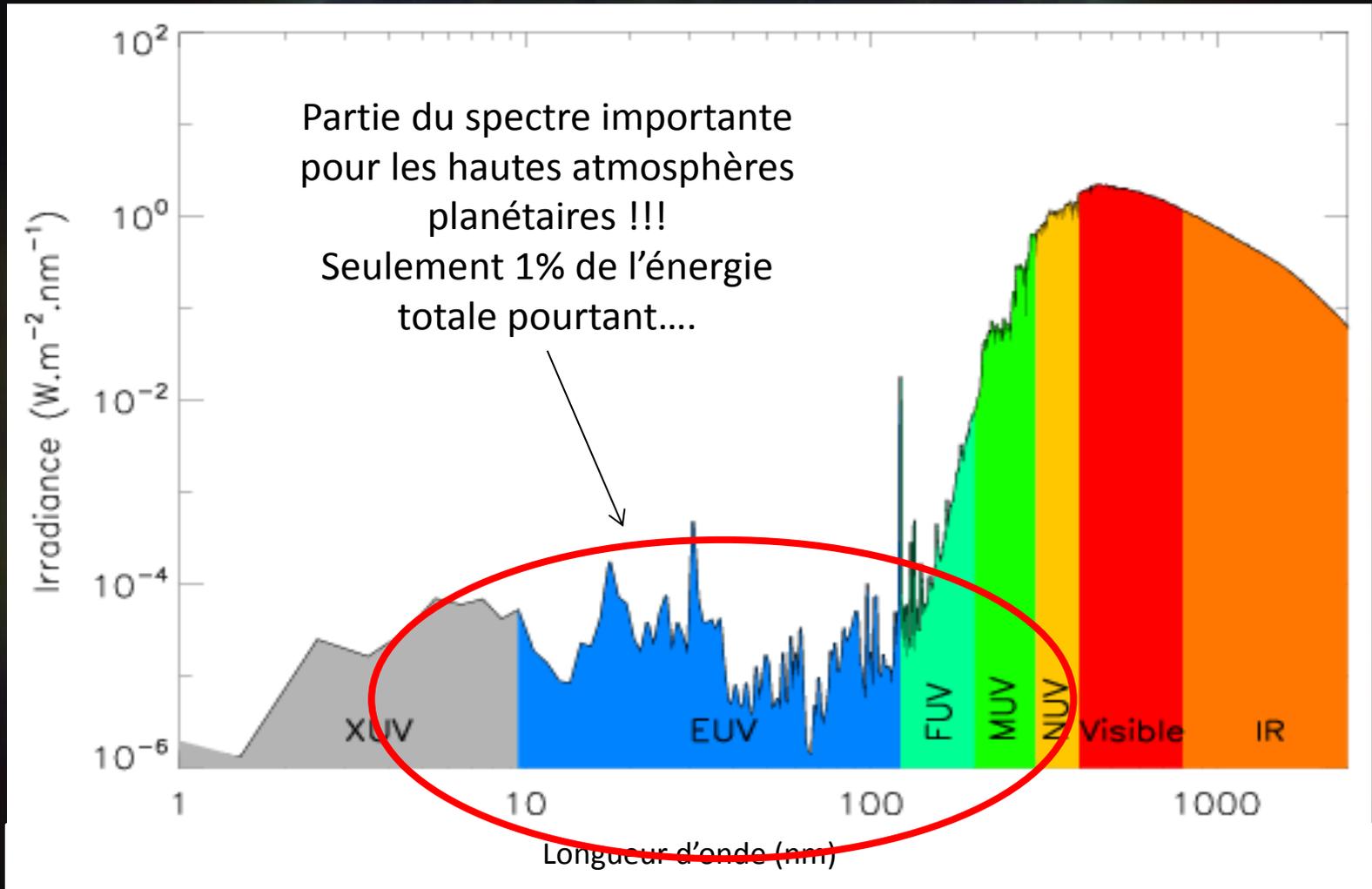
L'irradiance solaire = le spectre solaire

Spectre électromagnétique émis par le Soleil



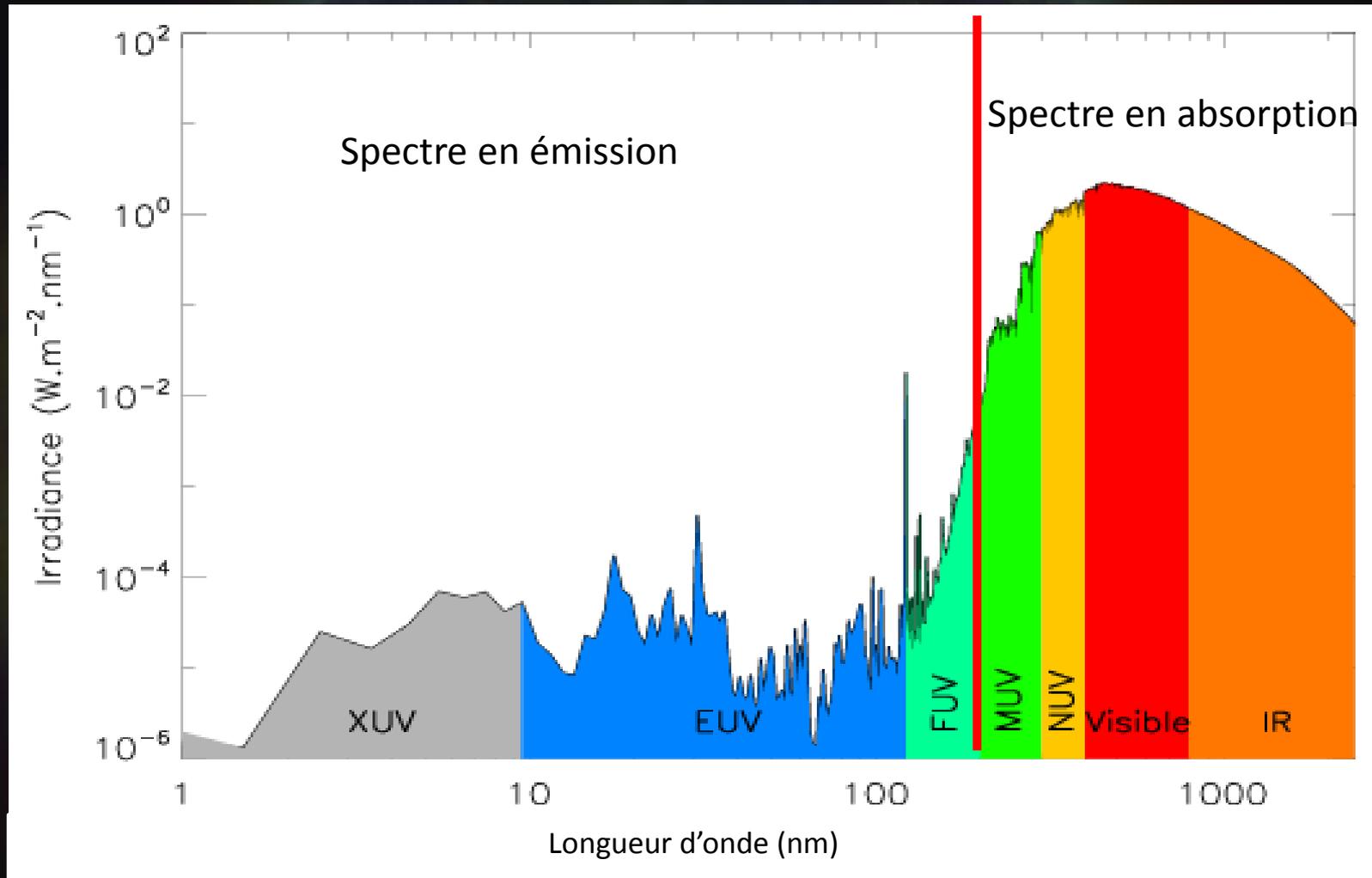
(Mais le Soleil a une atmosphère !!!)

L'irradiance solaire = le spectre solaire



Lien avec la météorologie de l'espace
(un peu plus tard.... :-D)

L'irradiance solaire = le spectre solaire





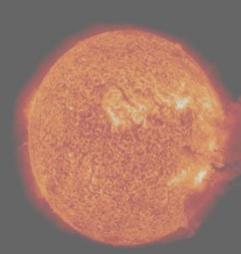
Comment modéliser l'irradiance solaire spectrale ?

1. Approche théorique/physique

2. Modélisation empirique et semi-physique

Et pourquoi ?

Entres autres pour la météorologie de l'espace...



Le Spectre Solaire

Loi de Rayleigh-Jeans (XIX^e)

$$I(\lambda) = \frac{2k_B c T}{\lambda^4}$$

Mais "Catastrophe Ultraviolette"

Loi de Planck (1900)

$$U(\lambda) = \frac{2hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{e^{\frac{hc}{\lambda k_B T}} - 1}$$

Valable au premier ordre mais....

....ne peut expliquer les bandes d'azotes ionisés dans la haute atmosphère terrestre (Saha, 1937)....

Déficit de 10^6 photons dans l'EUV

Le Spectre Solaire

Fin des années 30: Observation de raies spectrales interdites dans la couronne solaire

(Fe X à 637.5 nm, Fe XIV à 520.6 nm)

La haute atmosphère solaire est beaucoup plus chaude que la photosphère (à 5777 K)

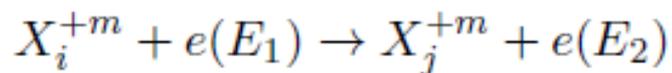
Couronne solaire est très chaude et peu dense, composée d'éléments ionisés et excités !



??? Processus d'émission ???

Éléments excités ?

Collisions inélastiques (énergie cinétique non conservée)



$i < j$: processus d'excitation

$i > j$: processus de désexcitation

L'ion prend l'énergie nécessaire à l'électron (=énergie cinétique) pour passer du niveau i au niveau j , donc

$$E_1 \geq E_j - E_i.$$

??? Coefficient de réaction ???

Formation du spectre solaire

Population d'électrons, dont la vitesse est dans l'intervalle $v, v+dv$

$$N_e(v, v + dv) = N_e f(v) 4\pi v^2 dv$$

avec N_e la densité d'électrons, et $f(v)$ la distribution en vitesse des électrons.

$$f(v) = \left(\frac{m}{2\pi k_B T} \right)^{\frac{3}{2}} \exp \left(-\frac{mv^2}{2k_B T} \right)$$

Distribution de
Maxwell-Boltzmann

Nombre total de collisions pour la transition $j \rightarrow i$

$$N_{coll}^{ji} = N_e \int_0^{\infty} f(v) \sigma_{ij}(v) v 4\pi v^2 dv$$

Formation du spectre solaire

En divisant par N_e , on obtient le coefficient de réaction de désexcitation par collisions. Par le même raisonnement, on obtient le coefficient de réaction d'excitation.

$$C_{ji}^d = \int_0^{\infty} f(v) \sigma_{ij}(v) v 4\pi v^2 dv, \text{ en cm}^3 \text{s}^{-1}$$

avec σ la section efficace de collision, dépendant de la nature de l'élément.

Autre processus de perte, celui de décroissance radiative, avec comme coefficient de réaction, A_{ij}



Formation du spectre solaire

Etat d'équilibre ? (**Principe du bilan détaillé**)

1. Processus d'excitation: collisions par électrons
2. Processus de désexcitation: collisions et radiation

Modèle simplifié à deux niveaux (**très (trop) simplifié...**)

$$N_e N_g C_{gi}^e = N_i (N_e C_{ig}^d + A_{ig})$$

Approximation coronale, milieu très peu dense



$$N_e N_g C_{gi}^e = N_i A_{ig}$$

Tout est, au final, proportionnel à la densité électronique

Formation du spectre solaire

Raisonnement valable uniquement pour la couronne !!!!

Pour la photosphère et la chromosphère, densité plus forte, et donc on doit prendre en compte le transfert radiatif !!!

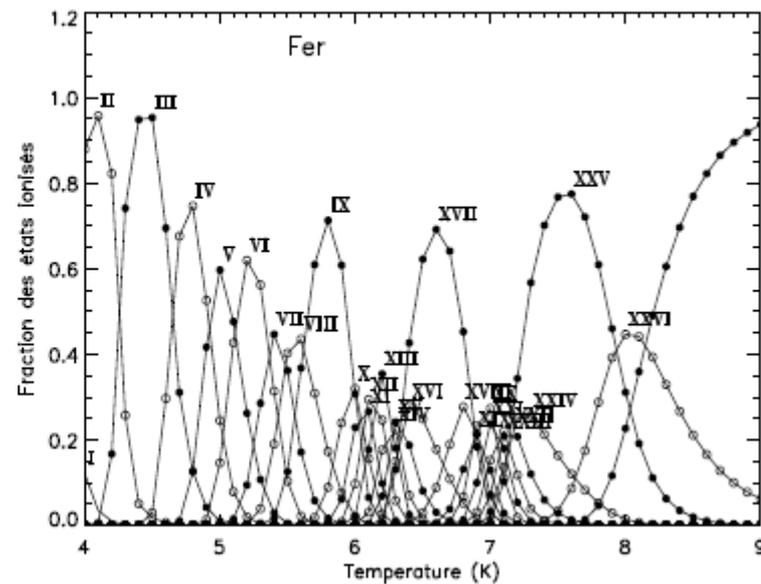
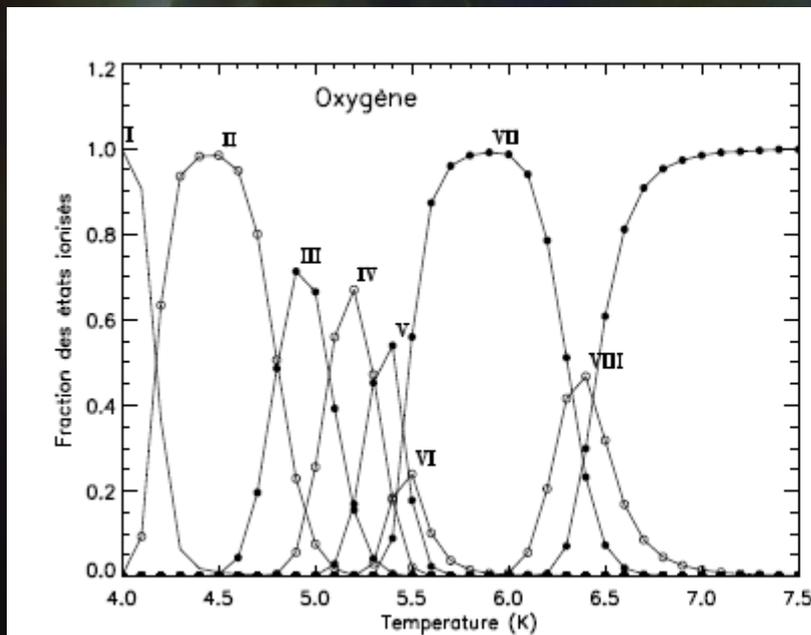


Mais dans ce cas là, spectre en absorption !

Formation du spectre solaire

Éléments ionisés ?

Approche très similaire de celle pour les éléments excités



Mazotta et al, 1998

Formation du spectre solaire

Règle de Wien $\lambda_{max} \propto 1/T$ et loi de Stefan-Boltzmann $L \propto R^2 T^4$

Plus la température est élevée, plus la longueur d'onde de la radiation est courte

Ex: log (T) vs log (L) pour les étoiles
on le plus

Observation de la structure interne du Soleil fournit des informations sur la structure à une altitude donnée !

2003/08/12 13:00

Formation du spectre solaire

Comment quantifier l'irradiance à présent ???

Puissance émise via le processus de radiation

Milieu optiquement mince ! (pas de réabsorption dans la couronne)

$$P_{ij} = N_j(X^{+m}) A_{ji} \Delta E_{ij} \quad \text{erg} \cdot \text{cm}^{-3} \cdot \text{s}^{-1}$$



Calcul de l'intensité spécifique (=irradiance), en haut de l'atmosphère solaire

$$I = \frac{1}{4\pi} \int P_{ij} ds$$

Ligne de visée

Formation du spectre solaire

Cherchons encore plus loin des paramètres connus

$$N_j(X^{+m}) = \frac{N_j(X^{+m})}{N(X^{+m})} \frac{N(X^{+m})}{N(X)} \frac{N(X)}{N(H)} \frac{N(H)}{N_e} N_e$$

Ratios obtenues par
les bilans d'équilibre

Couronne
Solaire ≈ 0.83

Modèle d'abondance des
éléments (nature de l'étoile);
Paramètre clé pour le spectre
en absorption !

Formation du spectre solaire

$$P_{ij} = N_j(X^{+m}) A_{ji} \Delta E_{ij} \quad \text{erg} \cdot \text{cm}^{-3} \cdot \text{s}^{-1}$$

+

$$G(T, N_e) = \frac{N_j(X^{+m})}{N(X^{+m})} \frac{N(X^{+m})}{N(X)} \frac{N(X)}{N(H)} \frac{N(H)}{N_e} \frac{A_{ji}}{N_e} \Delta E_{ij}$$

↓

$$I = \frac{1}{4\pi} \int G(T, N_e) N_e^2 ds$$

Paramètre physique de
la transition

Paramètre physique
du milieu

Formation du spectre solaire

Encore un effort c'est presque fini...

La densité électronique évolue en fonction de l'altitude, et donc de la température. On définit alors la mesure d'émission différentielle (DEM)

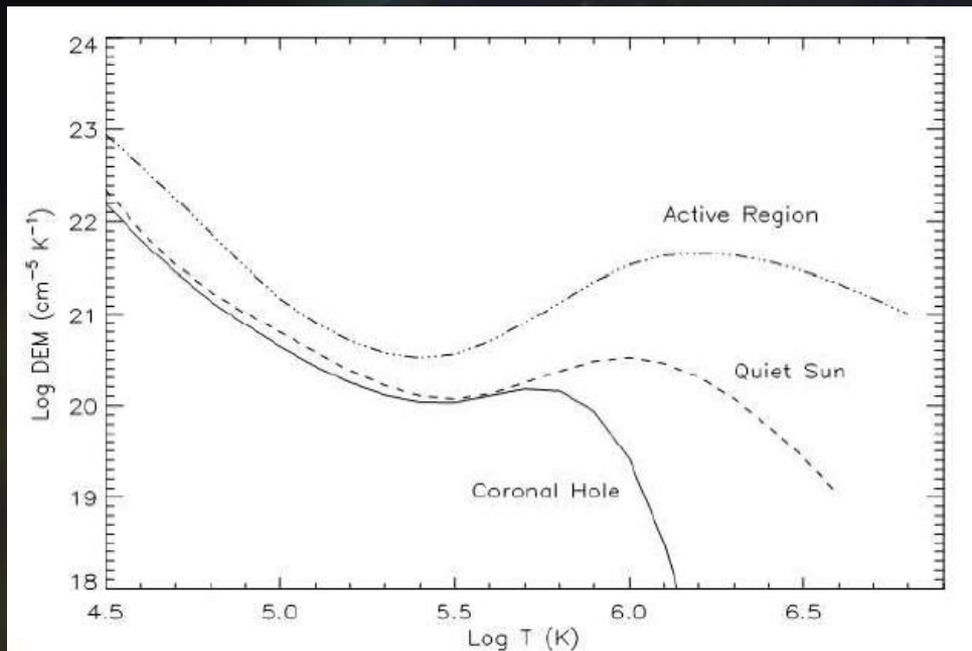
$$\xi(T) = N_e^2 \frac{ds}{dT}$$



$$I = \frac{1}{4\pi} \int G(T, N_e) \xi(T) dT$$

Chaque structure avec une DEM propre (=densité électronique) a une radiance propre

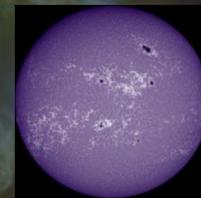
Formation du spectre solaire



Philips et al, 2008

A partir des DEM typiques pour chaque structure, on peut à priori retrouver l'irradiance !

Mais méthode peu précise....



“Filling Factors”
déterminées avec des
images dans l’EUV

Warren et al, 1998, 2001;
Kretzschmar et al, 2006

Formation du spectre solaire

Et il reste le continuum....

$$(i) \quad e^-(E_1) + X^{+m} \rightleftharpoons X^{+m} + h\nu + e^-(E_2)$$

$$(ii) \quad e^- + X^{+m} \rightleftharpoons X^{+m+1} + h\nu$$

(i) Emission libre-libre: Bremsstrahlung

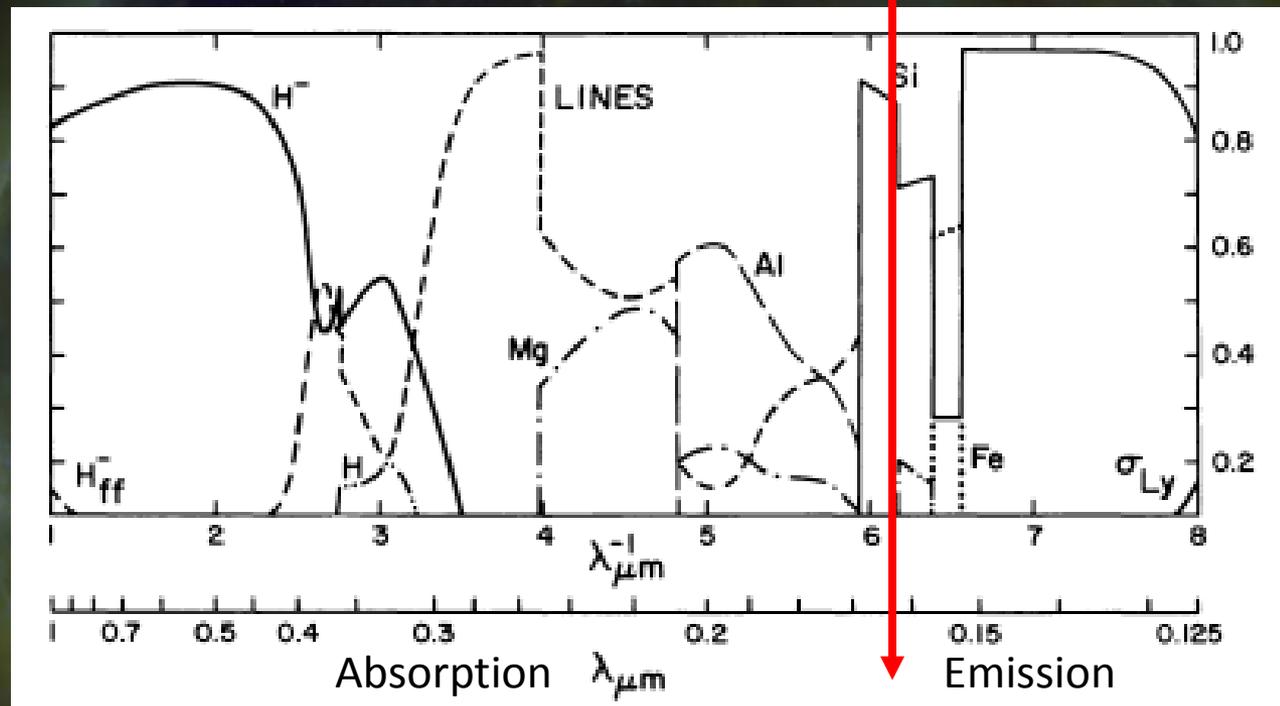
(ii) Emission libre-lié

L'énergie des photos ne peuvent descendre une certaine limite, i.e., le seuil d'ionisation de l'élément considéré, E_I

$$h\nu_c = E_I - E_i$$

Formation du spectre solaire

Seuil caractéristique pour chaque élément

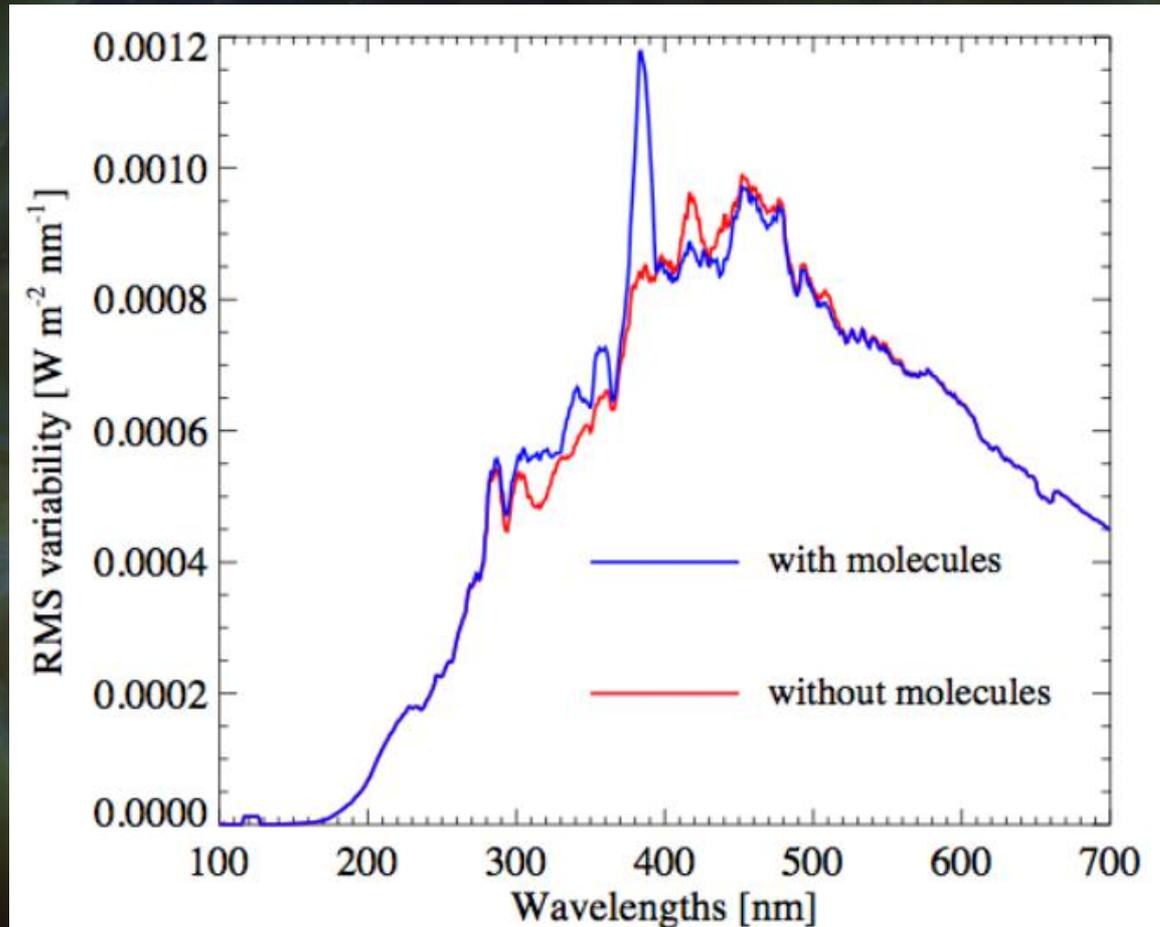


Vernazza et al, 1976

H^- est au final l'élément le plus important pour le spectre solaire, absorption la plus efficace, et non H

Formation du spectre solaire

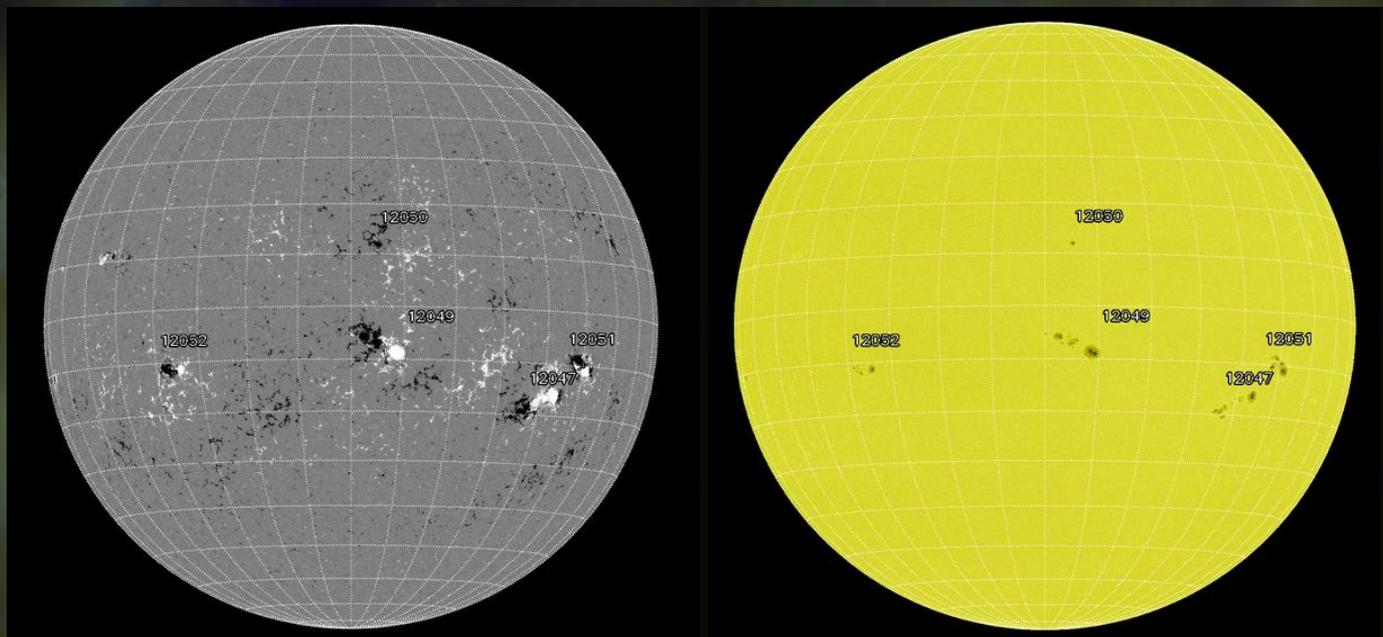
Et les molécules dans tout ça ?



Système CN important pour le proche UV

Méthode empirique pour retrouver l'irradiance solaire

Les variations de l'irradiance solaire sont directement liées à l'évolution du champ magnétique en surface



Sunspot umbrae (U)
Sunspot Penumbrae (P)
Faculae (F)
Network (AN)
Quiet Sun (QS)

$$F(\lambda, t) = \sum_k (\alpha_{QS}(\mu_k, t) I_{QS}(\lambda, \mu_k) + \alpha_U(\mu_k, t) I_U(\lambda, \mu_k) + \alpha_P(\mu_k, t) I_P(\lambda, \mu_k) + \alpha_{AN}(\mu_k, t) I_{AN}(\lambda, \mu_k) + \alpha_F(\mu_k, t) I_F(\lambda, \mu_k)),$$

Méthode empirique pour retrouver l'irradiance solaire

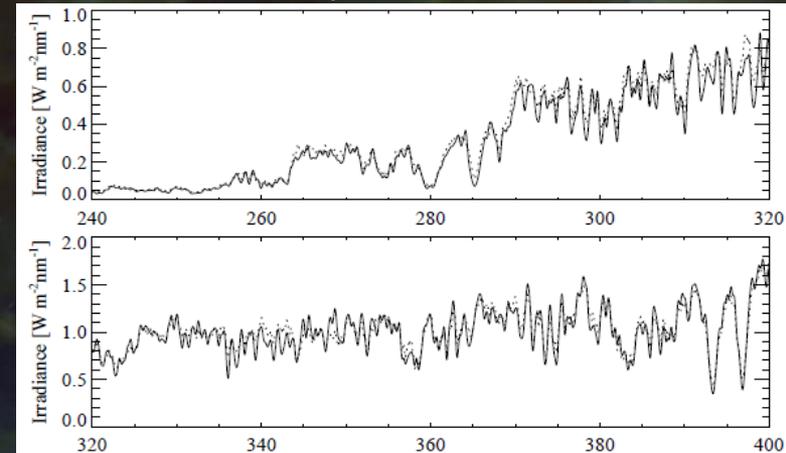
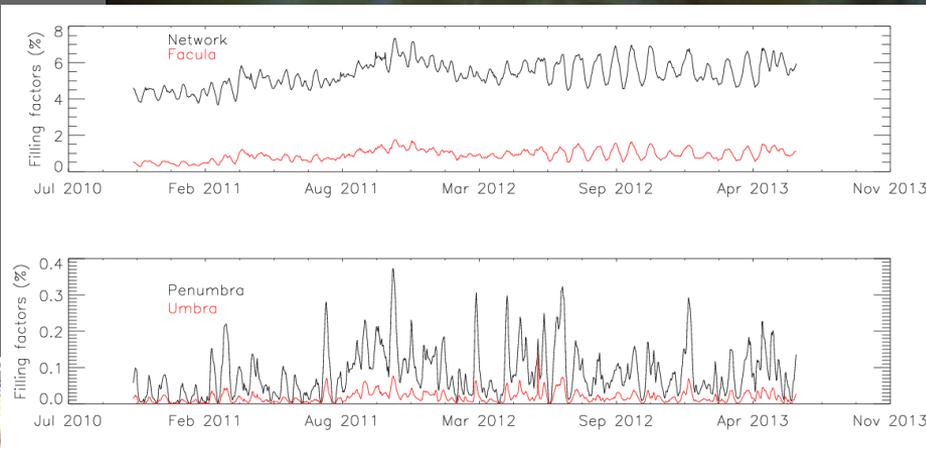
COSIR: Code Of Solar Irradiance Reconstruction

(Cessateur et al, 2014)

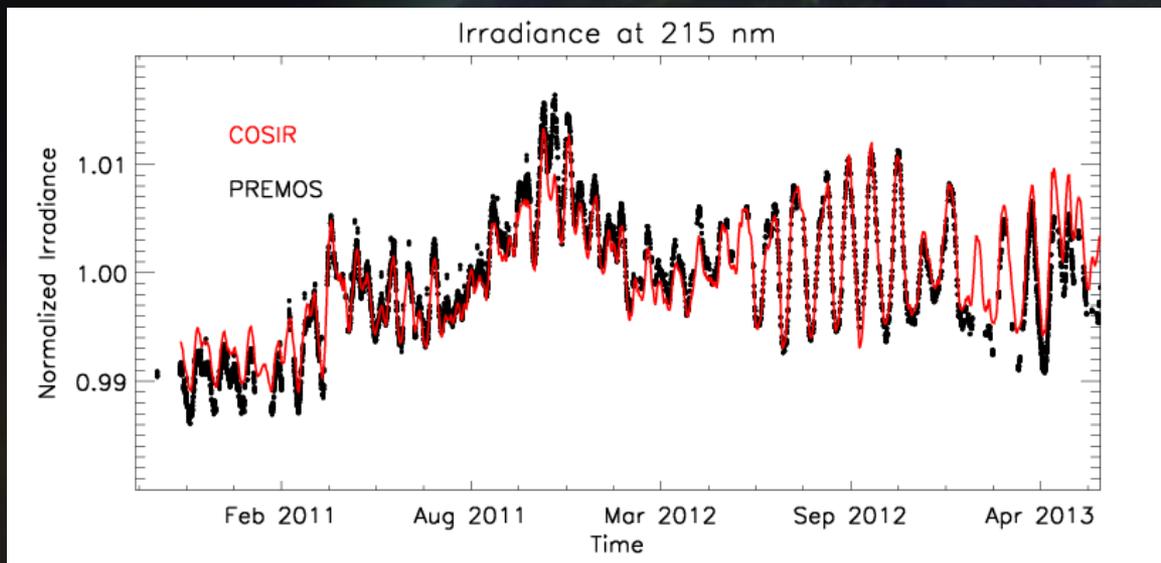
$$F(\lambda, t) = \sum_k (\alpha_{QS}(\mu_k, t) I_{QS}(\lambda, \mu_k) + \alpha_U(\mu_k, t) I_U(\lambda, \mu_k) + \alpha_P(\mu_k, t) I_P(\lambda, \mu_k) + \alpha_{AN}(\mu_k, t) I_{AN}(\lambda, \mu_k) + \alpha_F(\mu_k, t) I_F(\lambda, \mu_k)),$$

Données de l'instrument HMI/SDO pour déterminer les "filling factors" (Yeo et al, 2013)

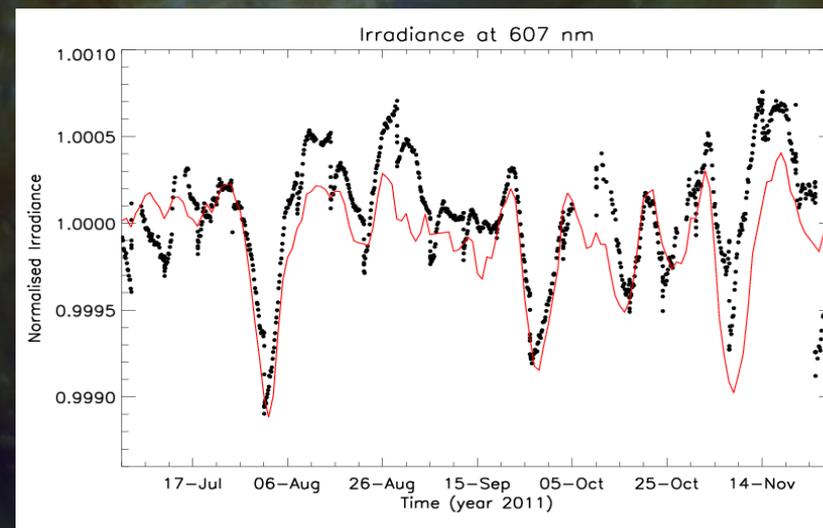
Code COSI pour le calcul de la radiance pour chaque structure (modèle non-LTE) (Shapiro et al, 2010)



Méthode empirique pour retrouver l'irradiance solaire

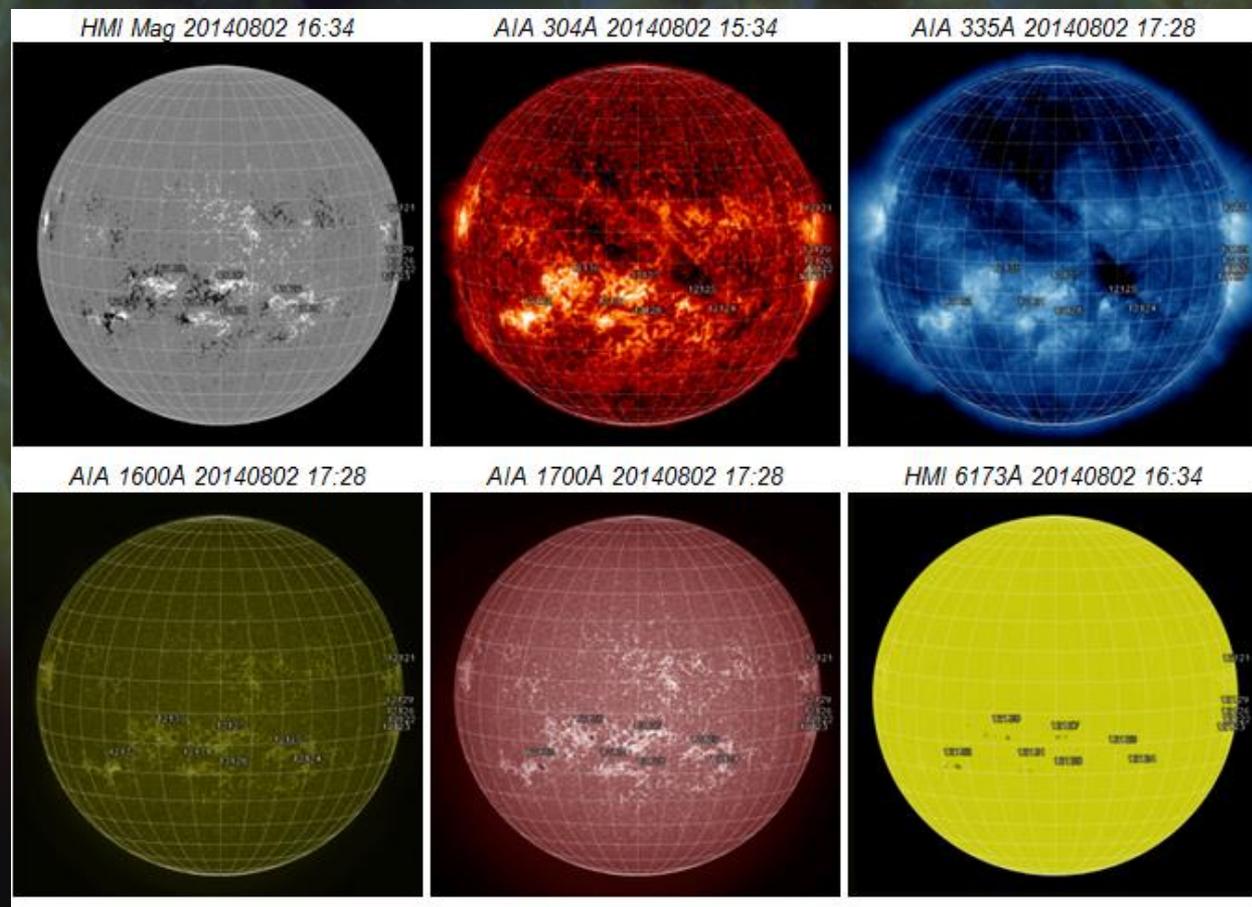


Excellente corrélation entre les données d'irradiance et nos modèles pour l'UV et le visible

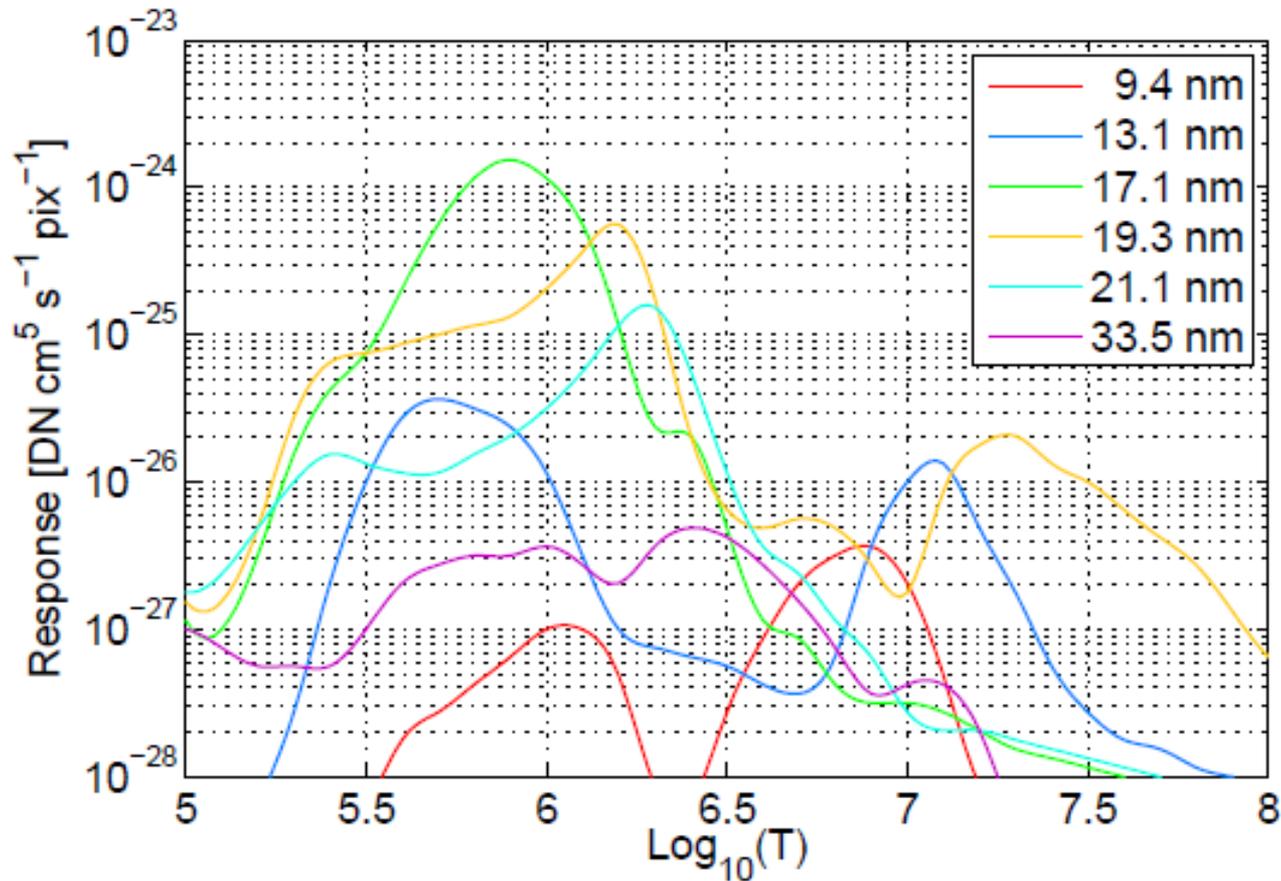


! Message clé de cette partie !

Observation à une longueur d'onde précise permet d'accéder à une certaine altitude dans l'atmosphère solaire, avec des paramètres T et N_e particuliers !



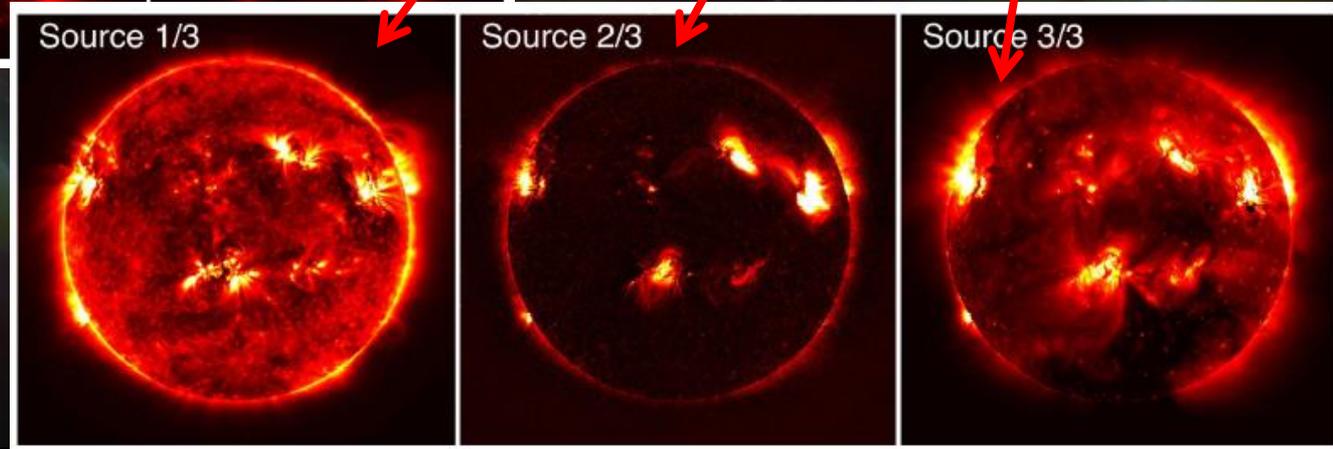
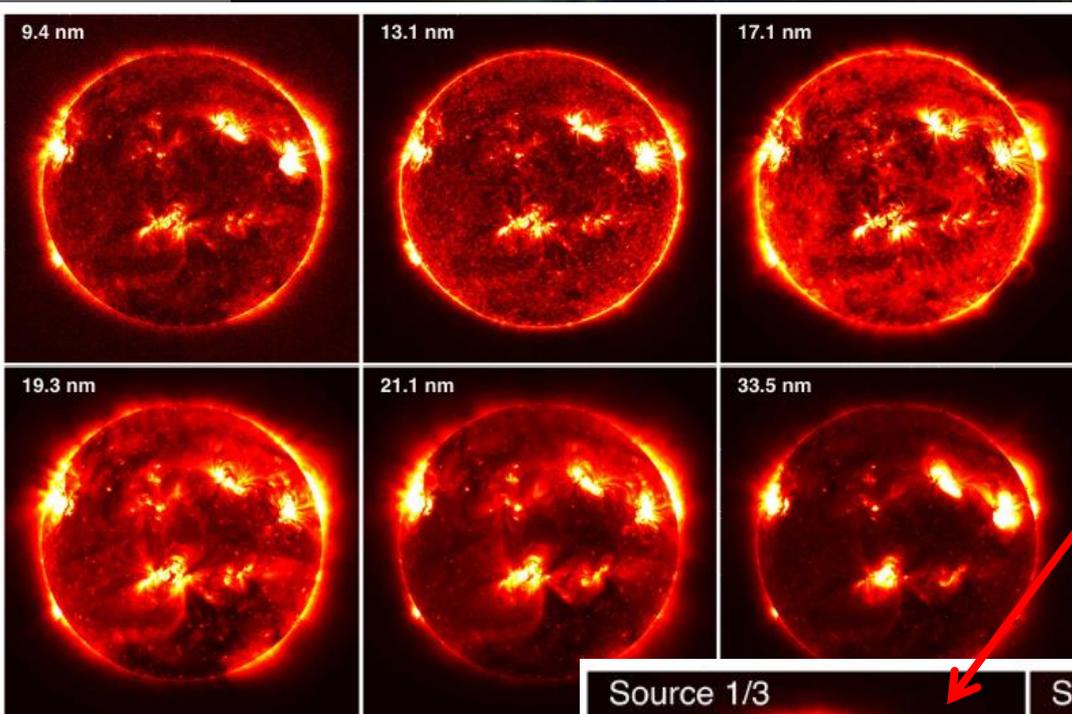
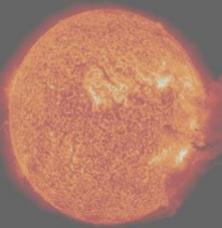
Observations actuelles dans l'EUV: AIA/SDO

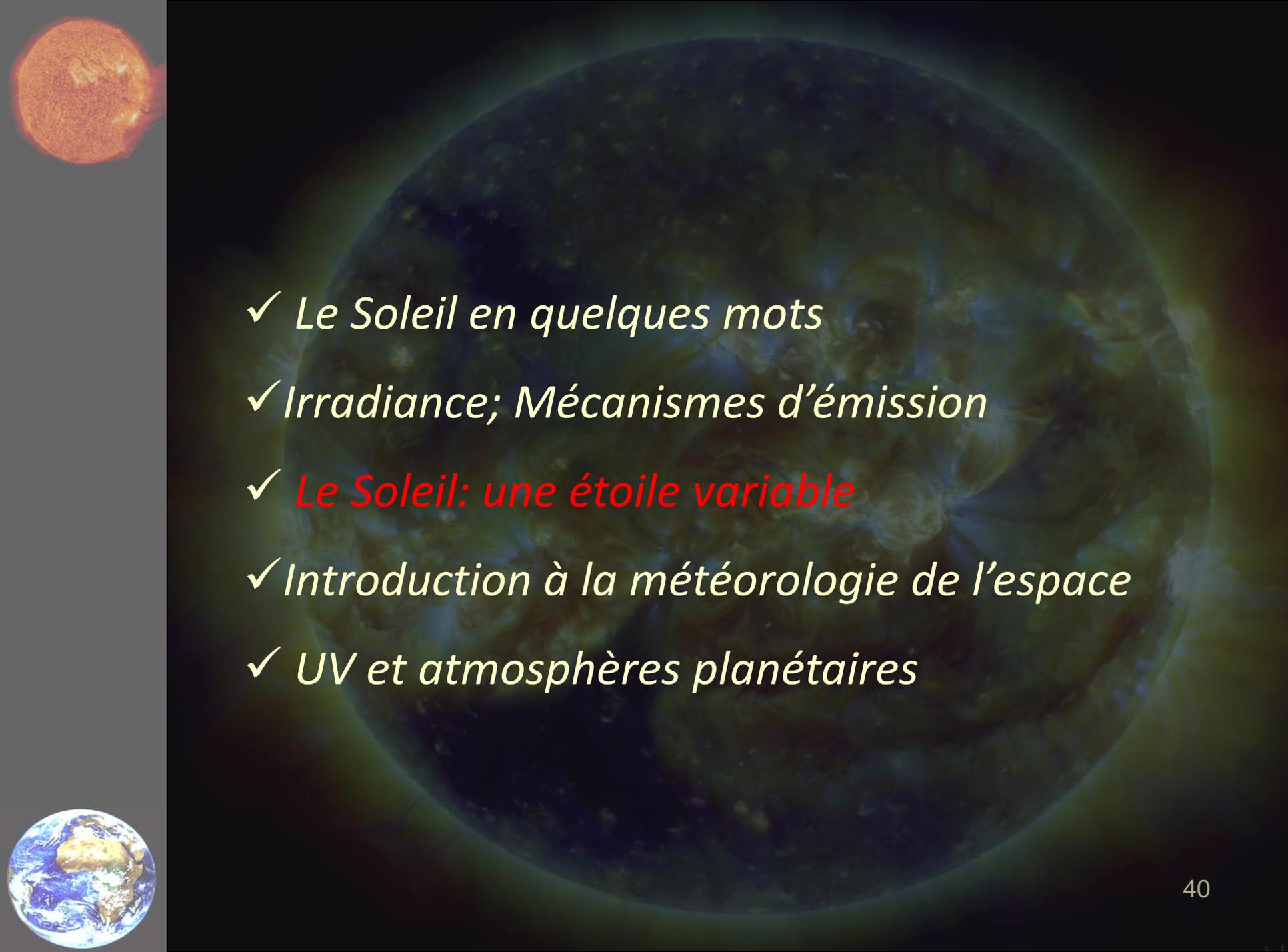


Filtres des imageurs beaucoup trop larges... On mélange des composantes de différentes altitudes....

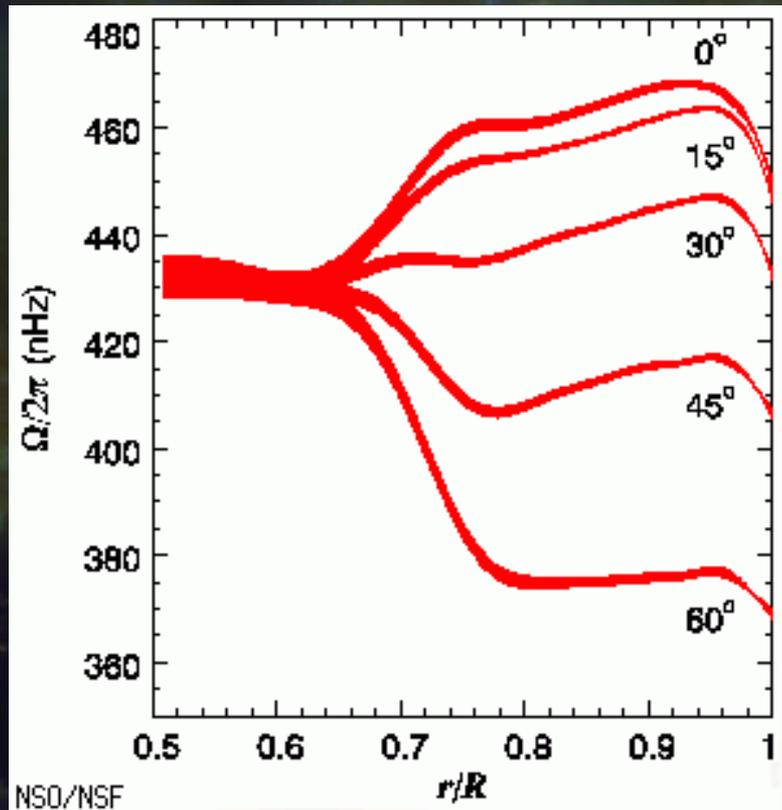
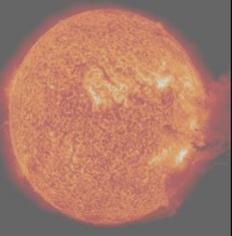
Observations actuelles dans l'EUV: AIA/SDO

Utilisation de méthodes statistiques: méthodes dites de séparations de sources (SVD, méthodes bayésiennes,...)



- 
- ✓ *Le Soleil en quelques mots*
 - ✓ *Irradiance; Mécanismes d'émission*
 - ✓ *Le Soleil: une étoile variable*
 - ✓ *Introduction à la météorologie de l'espace*
 - ✓ *UV et atmosphères planétaires*

Cycle liée à l'activité magnétique



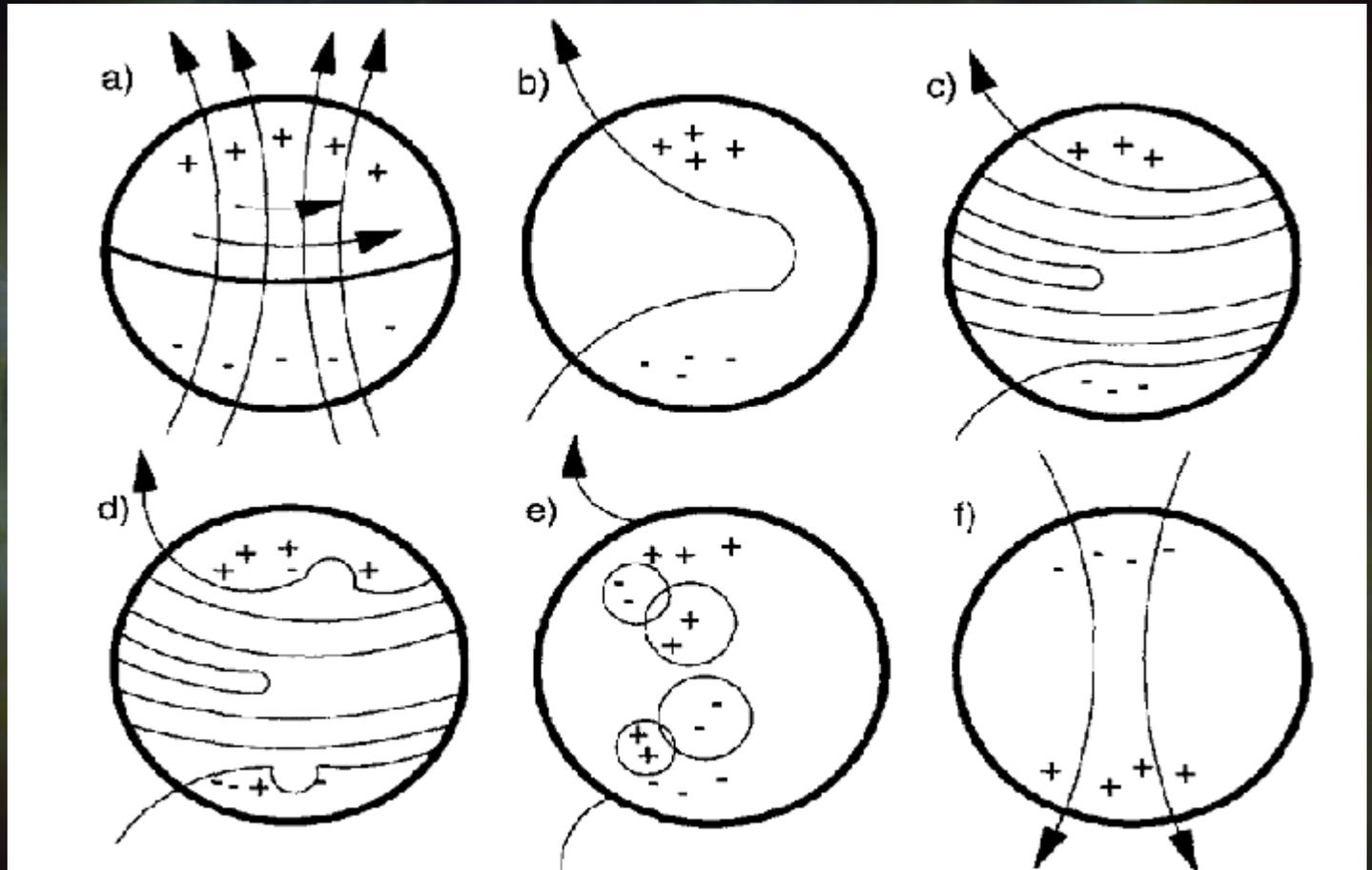
25.6 jours

30.9 jours

Régions polaires - 36 jours



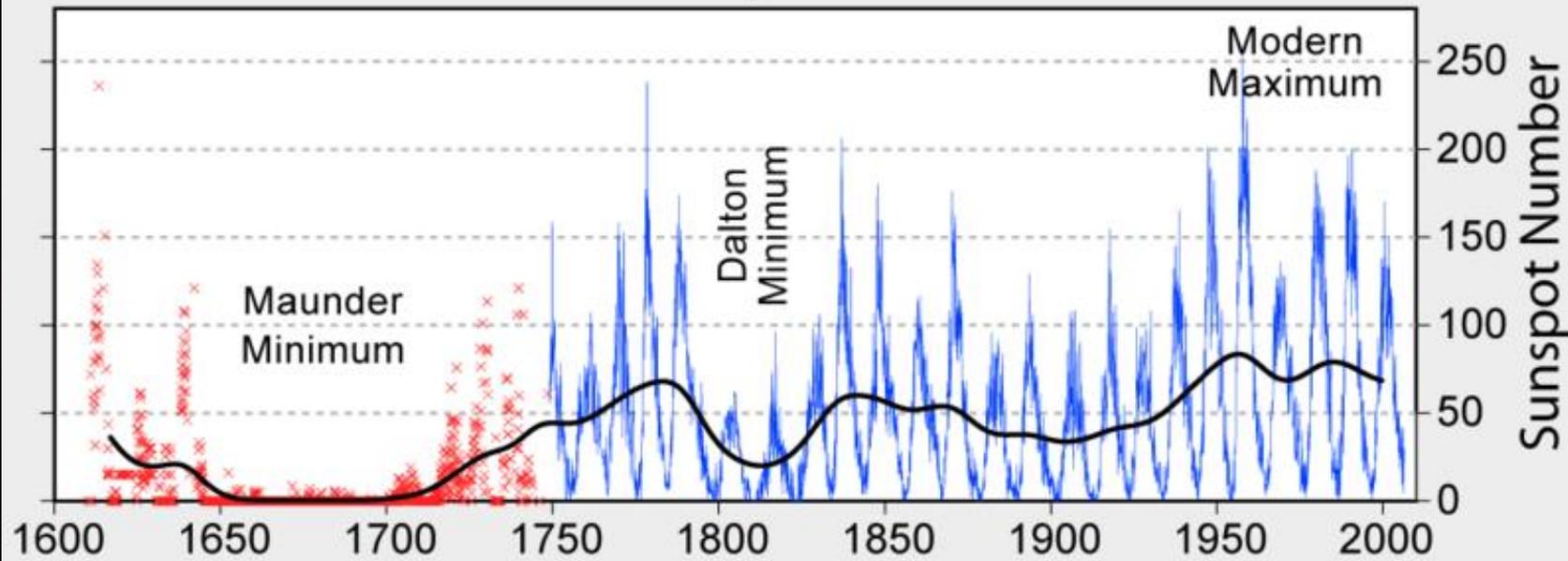
Cycle liée à l'activité magnétique



Cycle magnétique complet tous les 22 ans....

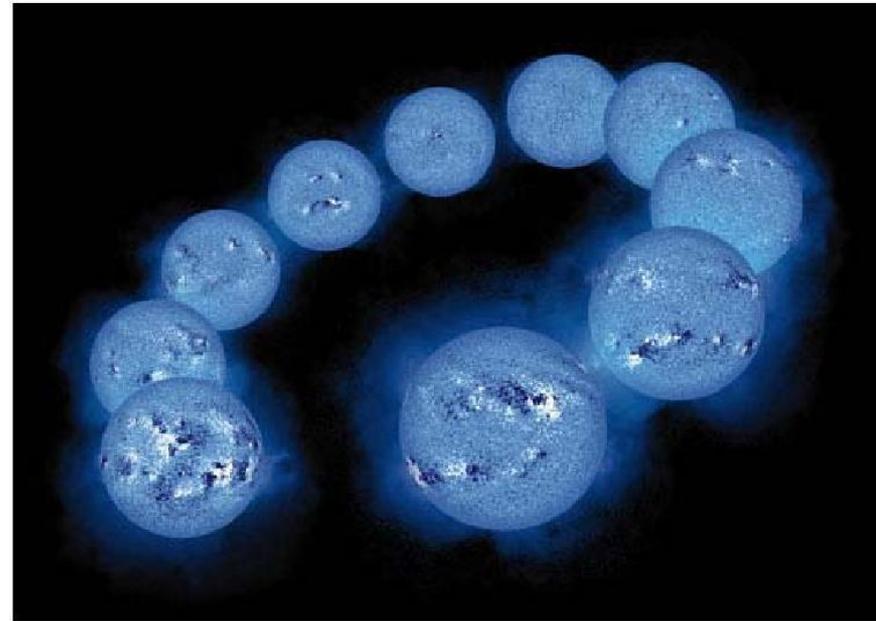
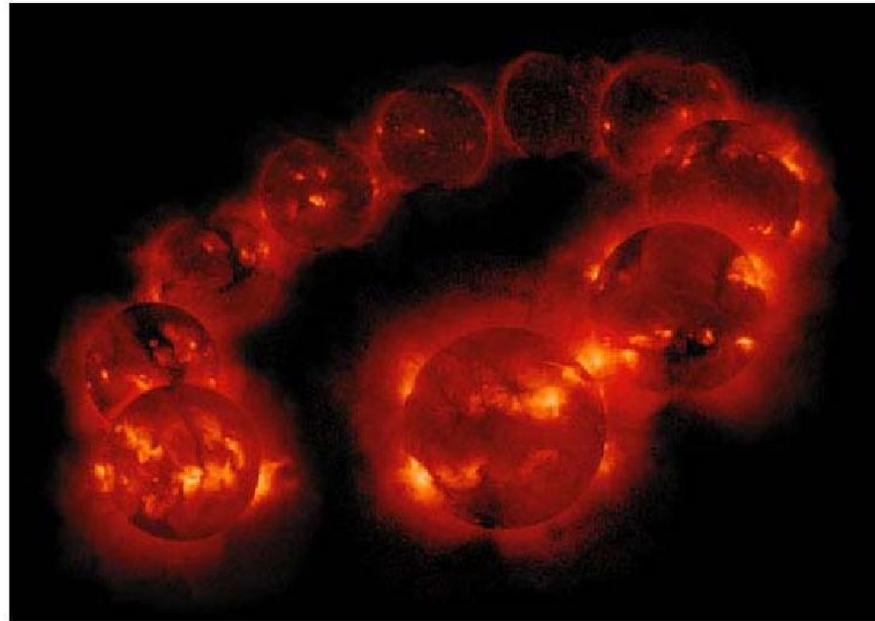
Cycle liée à l'activité magnétique

400 Years of Sunspot Observations

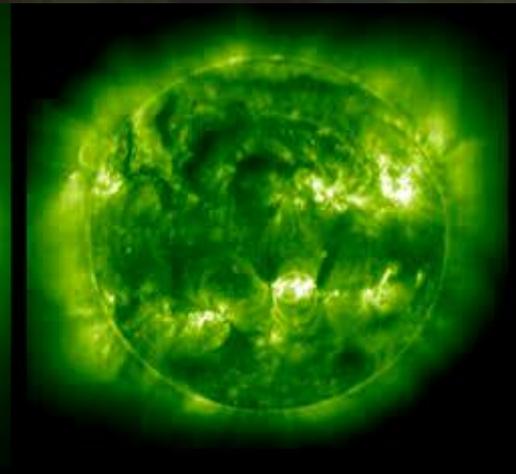


Tache solaire: directement liée à l'activité magnétique !

Cycle liée à l'activité magnétique



Yokoh – soft X
Emission of t



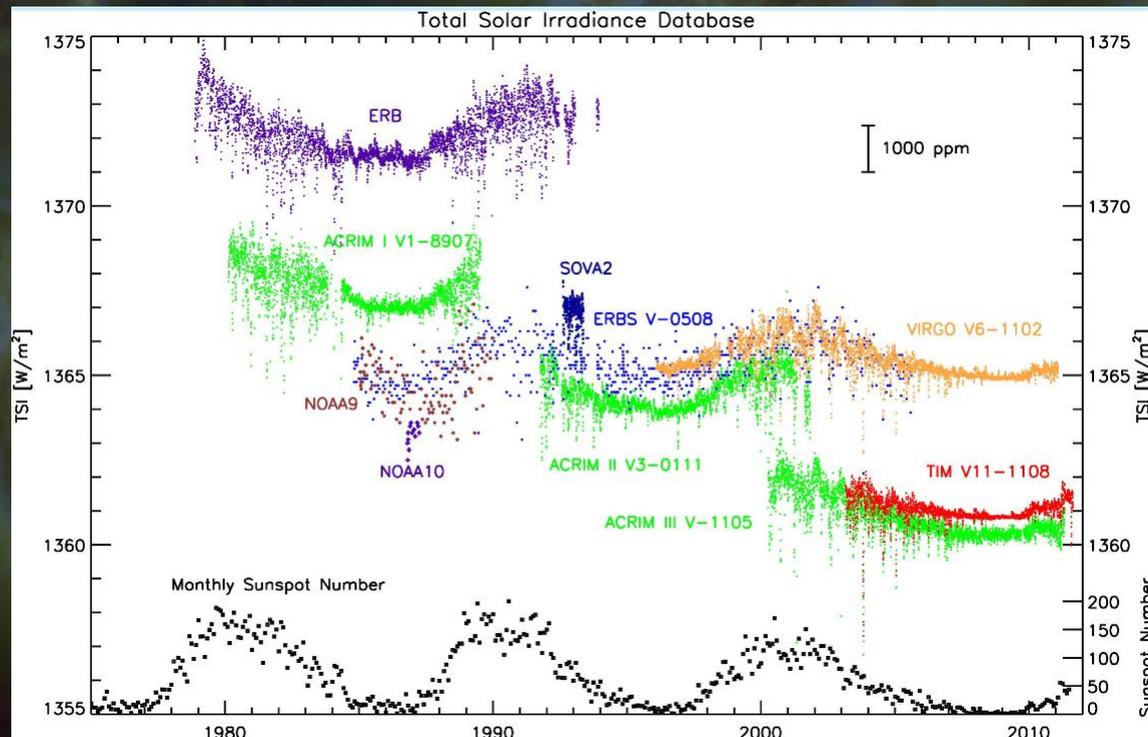
onboard SOHO



L'irradiance solaire Totale

$$\text{TSI} = \int_0^{\infty} P(\lambda) d\lambda$$

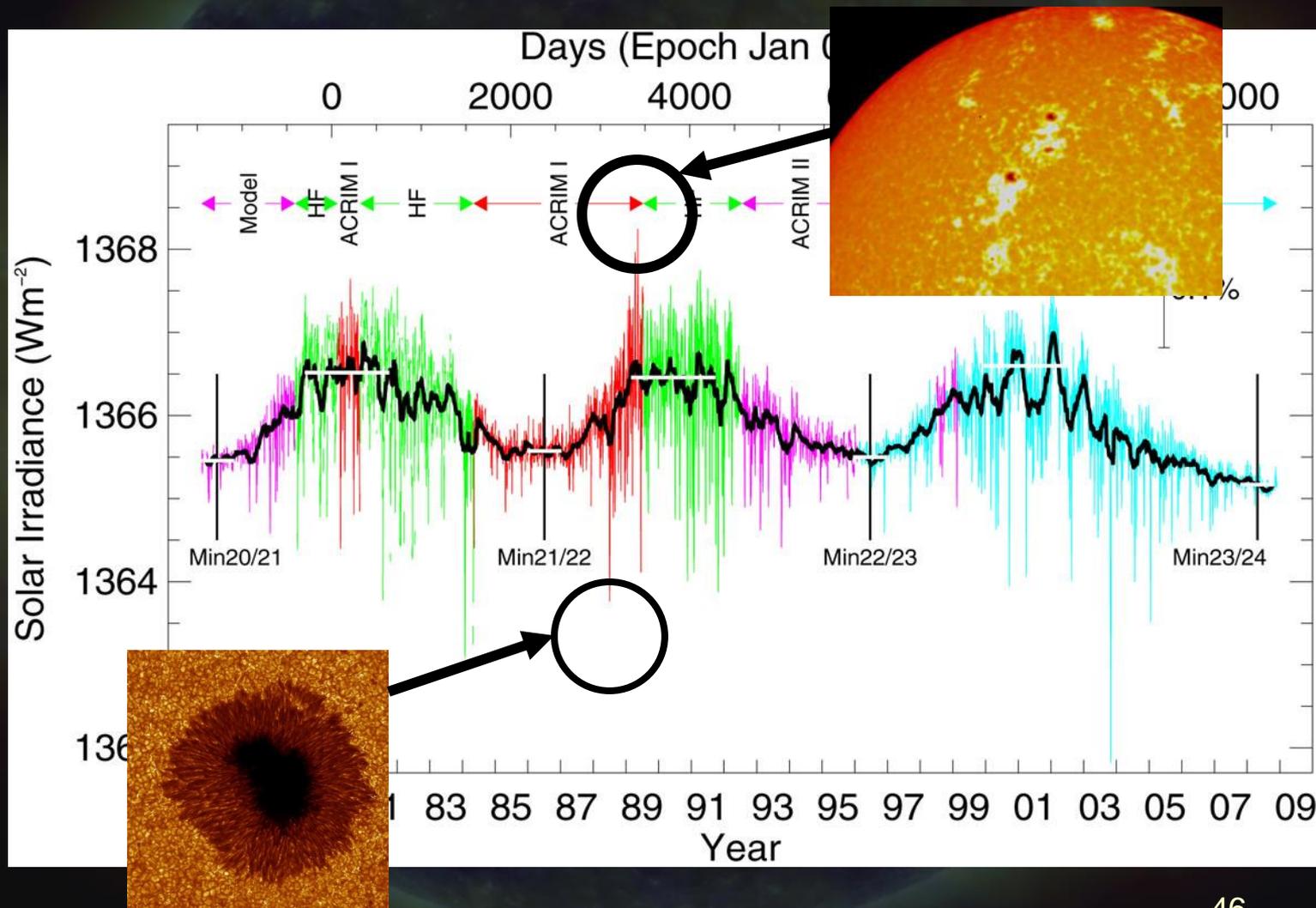
C'est l'énergie émise par le Soleil, mesurée à 1 U.A. intégrée sur l'ensemble des longueurs d'onde



Excellent indicateur de la variabilité solaire

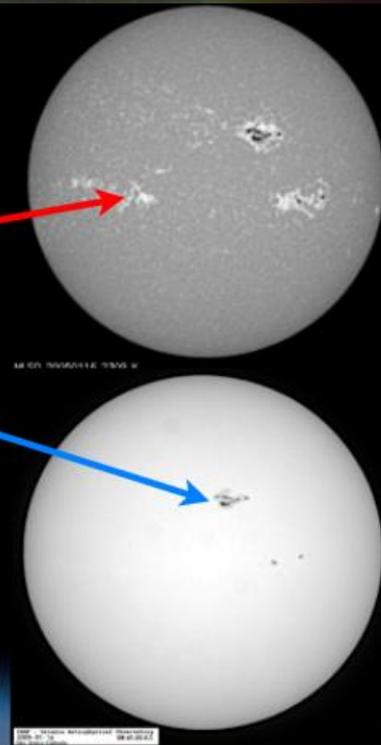
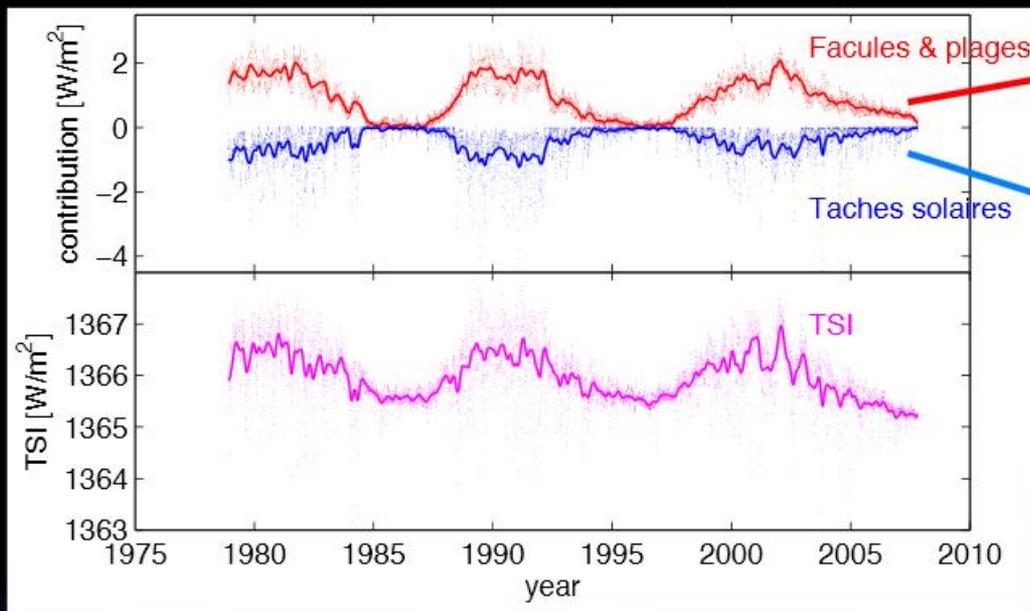
L'irradiance solaire Totale

La constante solaire n'est pas...constante !!!



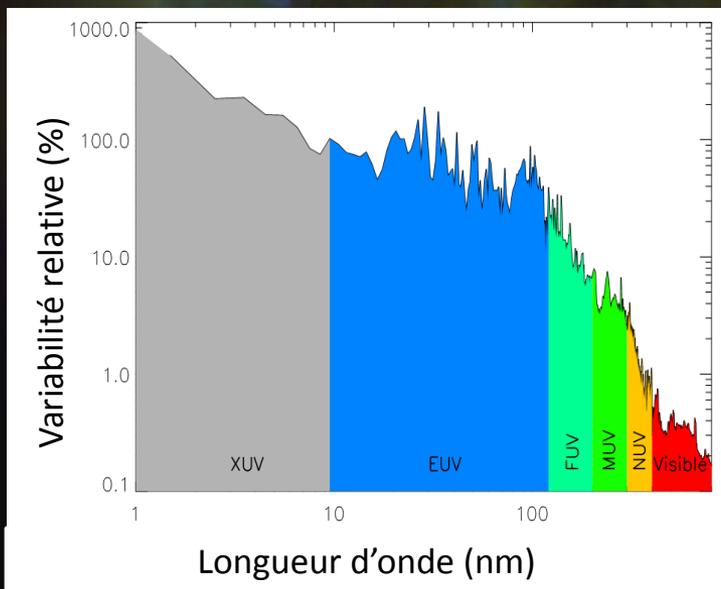
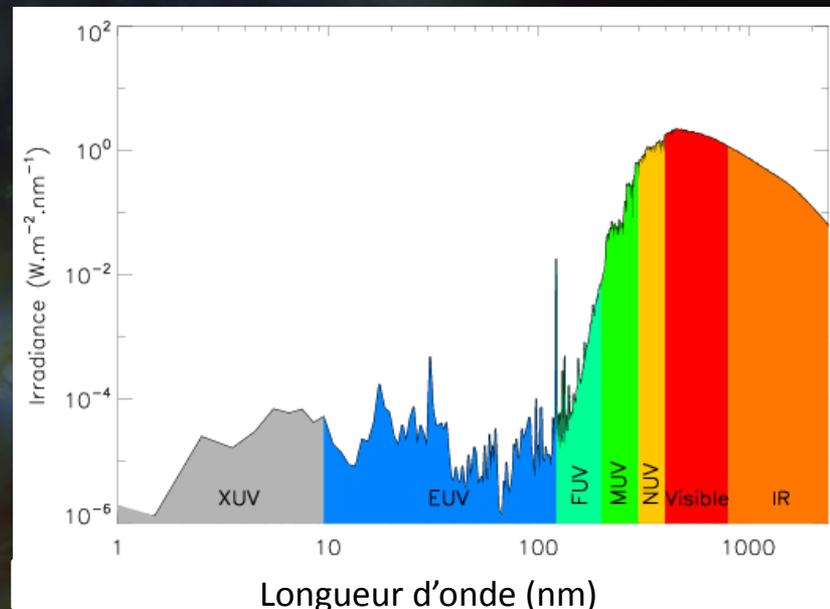
L'irradiance solaire Totale

Le Soleil est une étoile dominée par la contribution des plages !



MAIS la TSI ne fait pas tout... Irradiance solaire spectrale !!!

Le spectre solaire



- ✓ Plusieurs échelles de temps

Rotation solaire 27-jours, 13.5-jours

Cycle de Schwabe (10-12 ans)

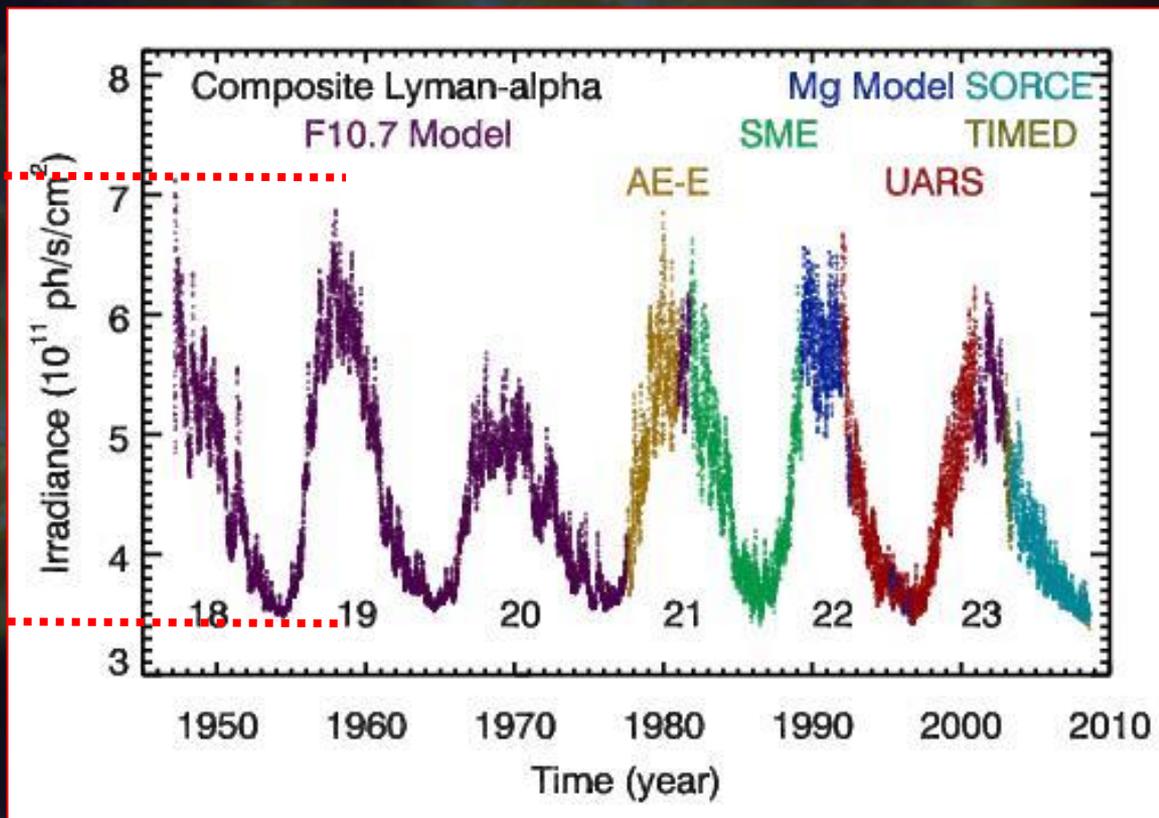
Evènements transitoires (i.e. éruptions solaires)

- ✓ Fonction de la longueur d'onde

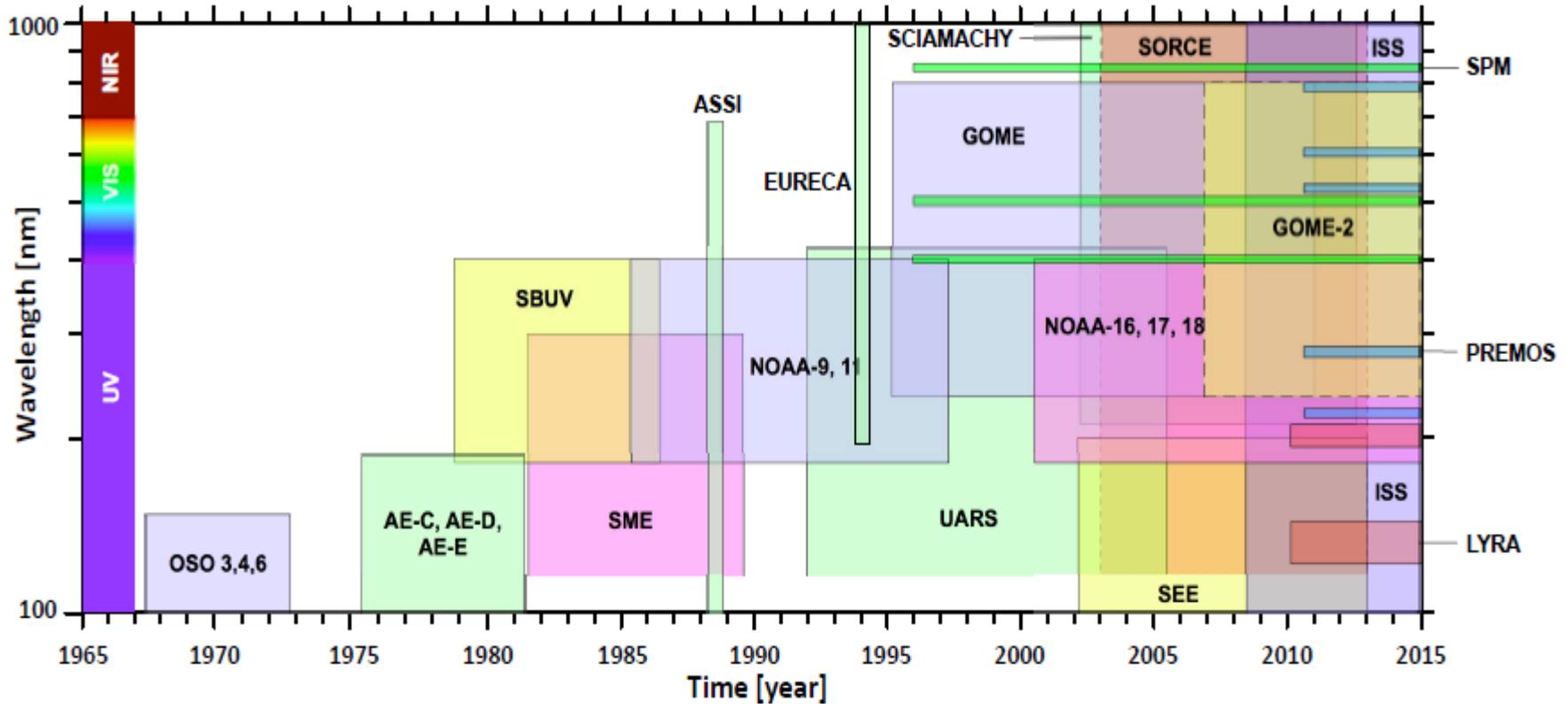
MAIS la TSI ne fait pas tout... Irradiance solaire spectrale !!!

Variations d'irradiance pour lyman α

The radiation varies by a factor of ~ 2 over the solar cycle



Mesure de la SSI



Ermolli et al, 2013

Mesure très très très compliqué.... Lourds problèmes instrumentaux....

Notre compréhension de la variabilité solaire

Cycle Rotationnel
Variation à 27 jours



~500 cycles

Cycle de 11 ans



~3 cycles

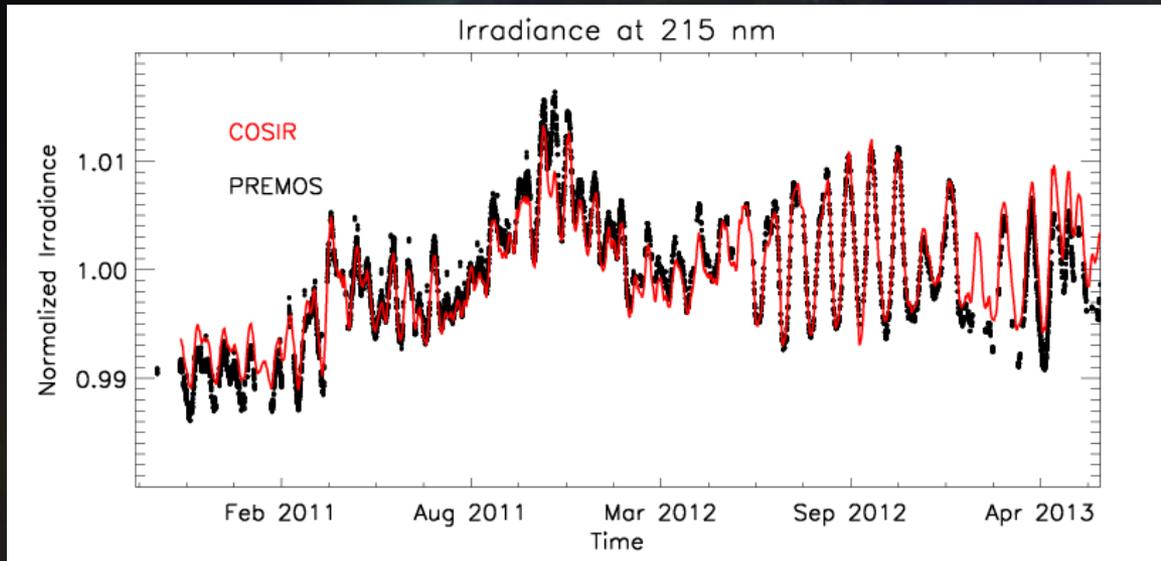
Tendance à long terme



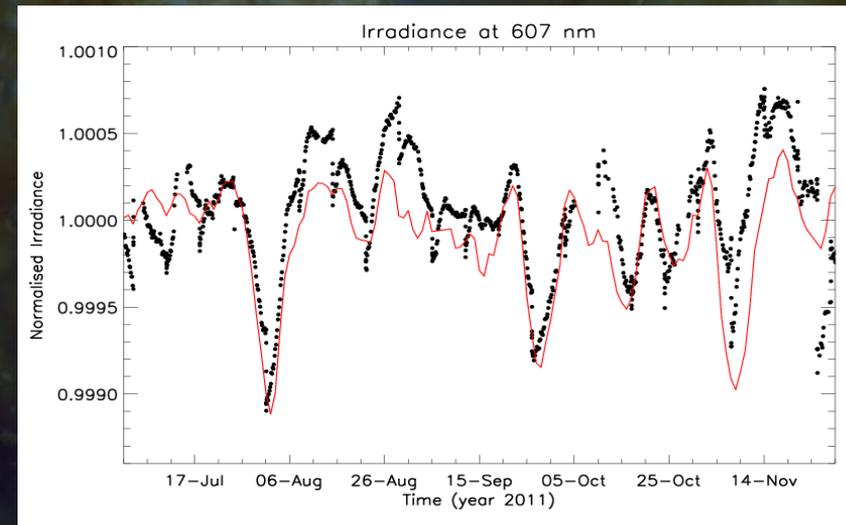
Trop difficile à détecter !!!
(Ermolli et al. 2012)

Nous mesurons la TSI et la SSI que depuis 30 ans.....

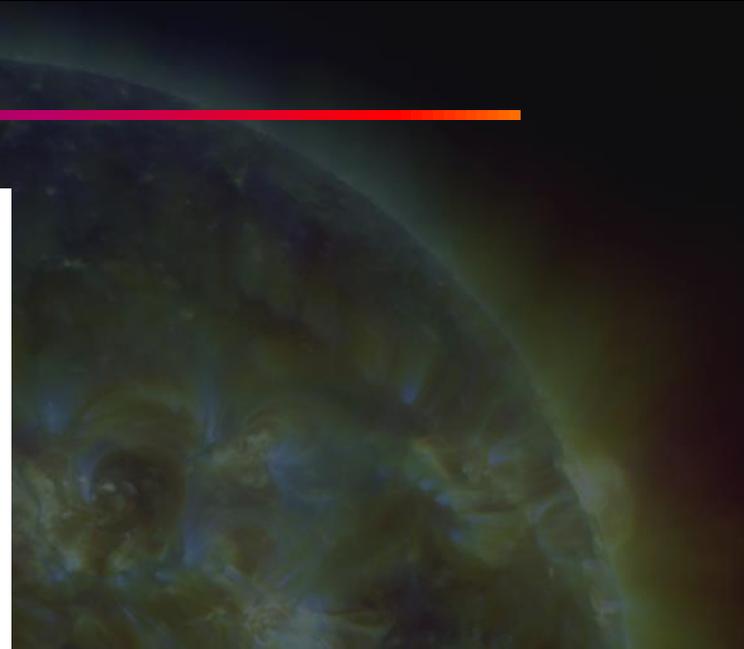
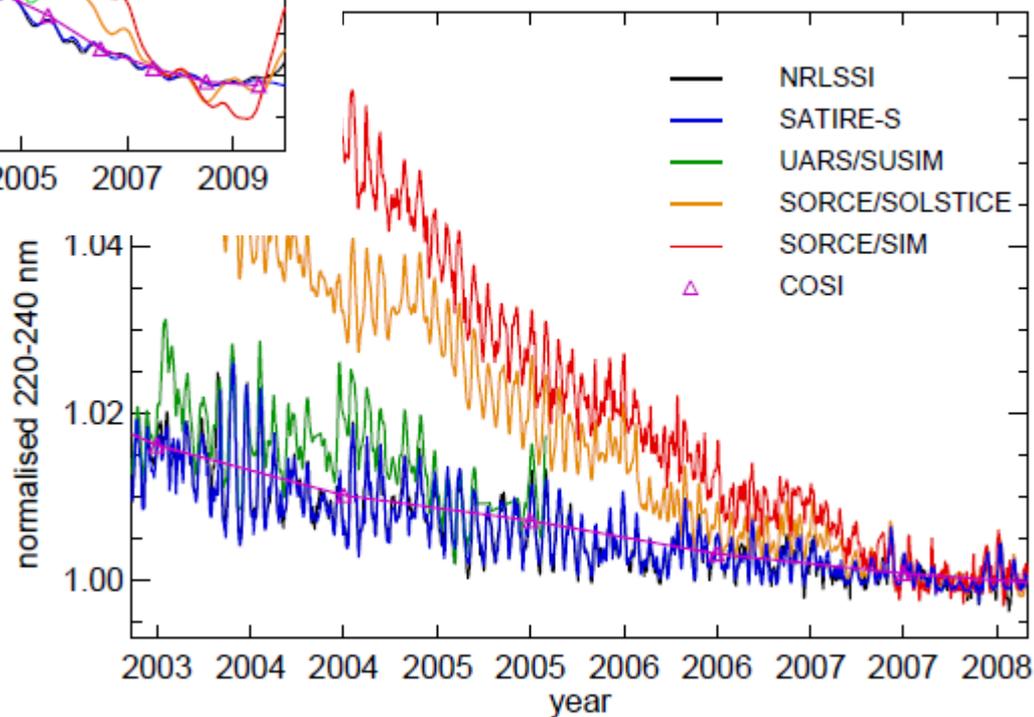
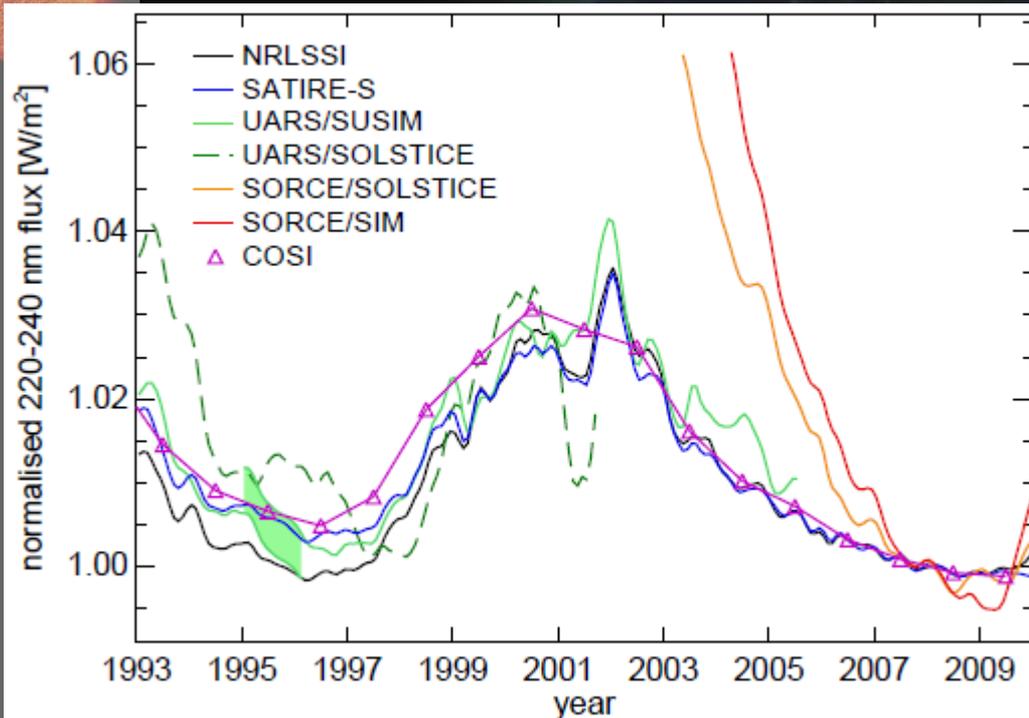
Cycle rotationnel



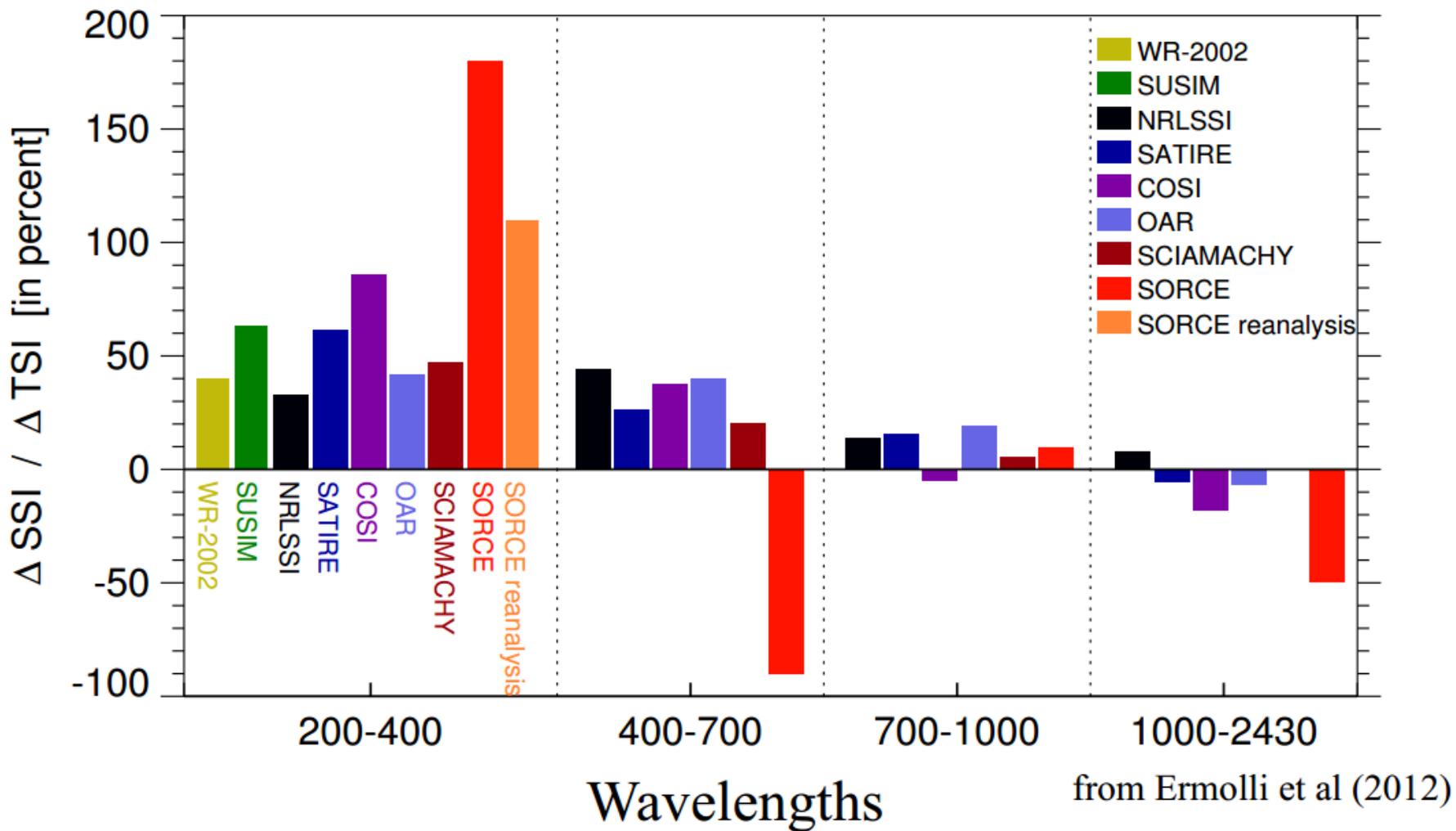
Excellente corrélation entre les données d'irradiance et nos modèles pour l'UV et le visible



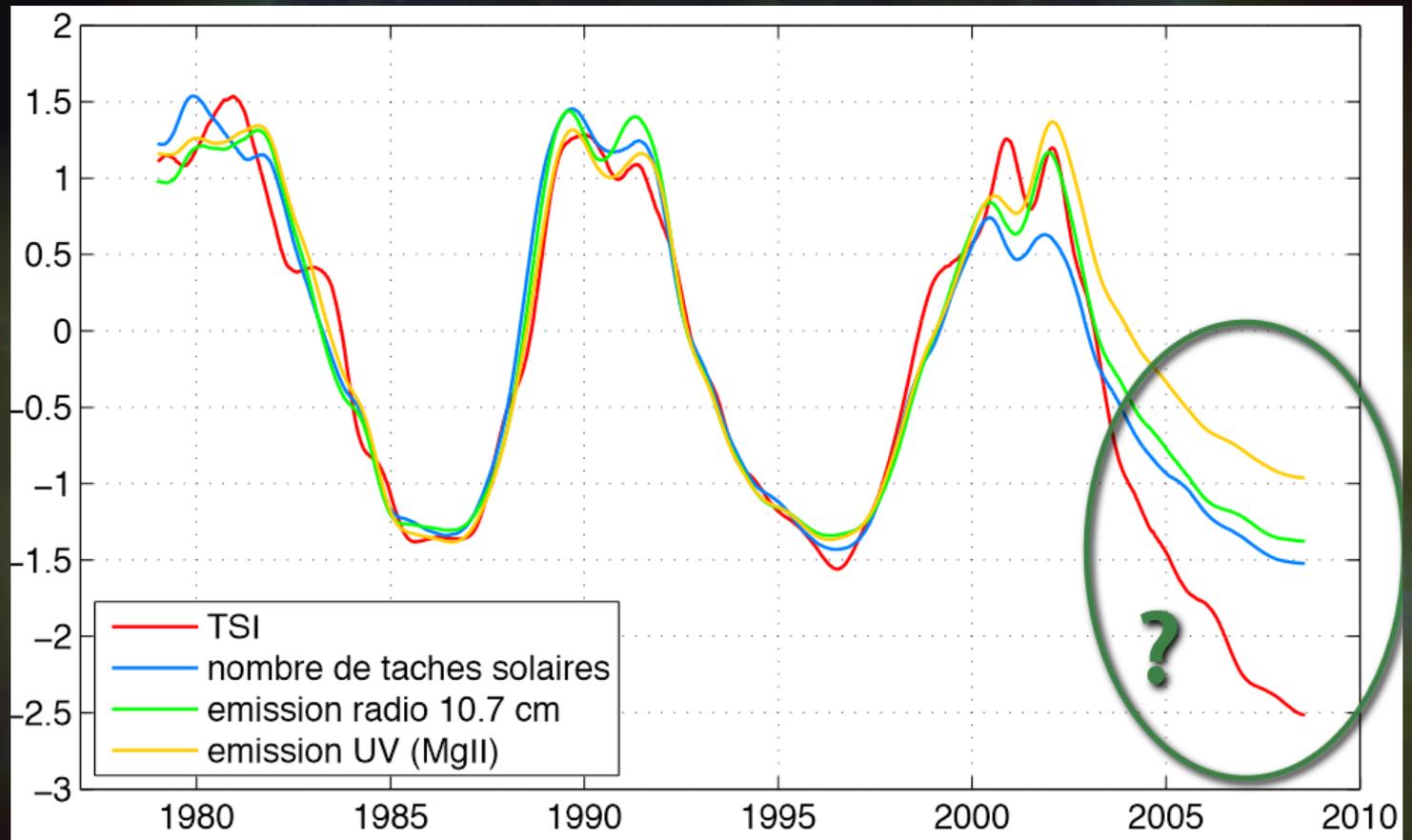
Cycle à 11 ans



Cycle à 11 ans



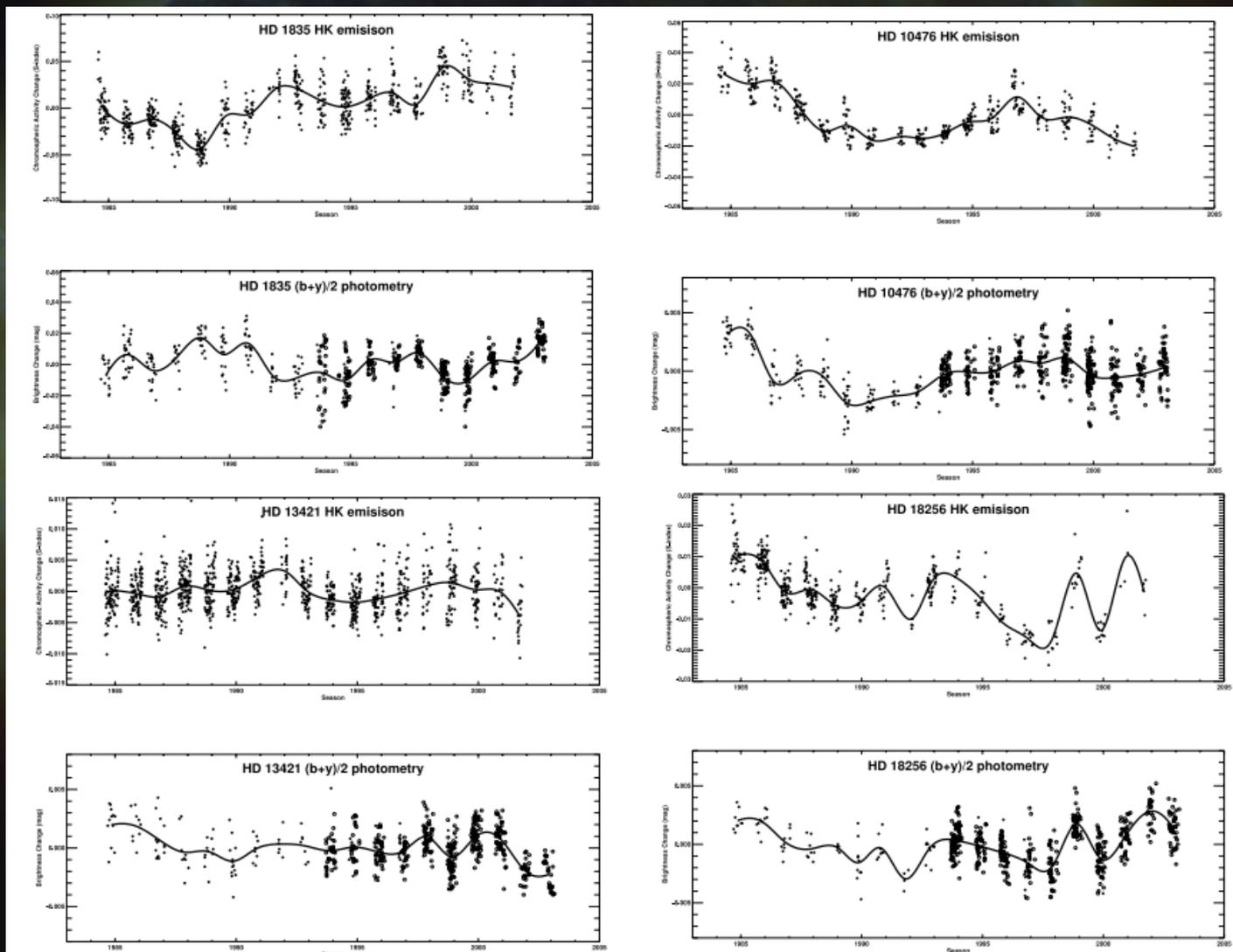
Cycle à 11 ans



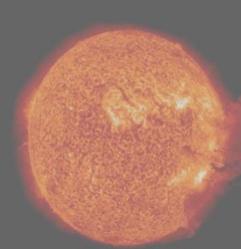
Le minimum de 2008 constitue toujours un mystère....

Quelles autres solutions pour la variabilité sur le long terme

- ✓ Irradiance stellaire ?

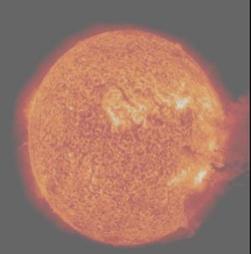
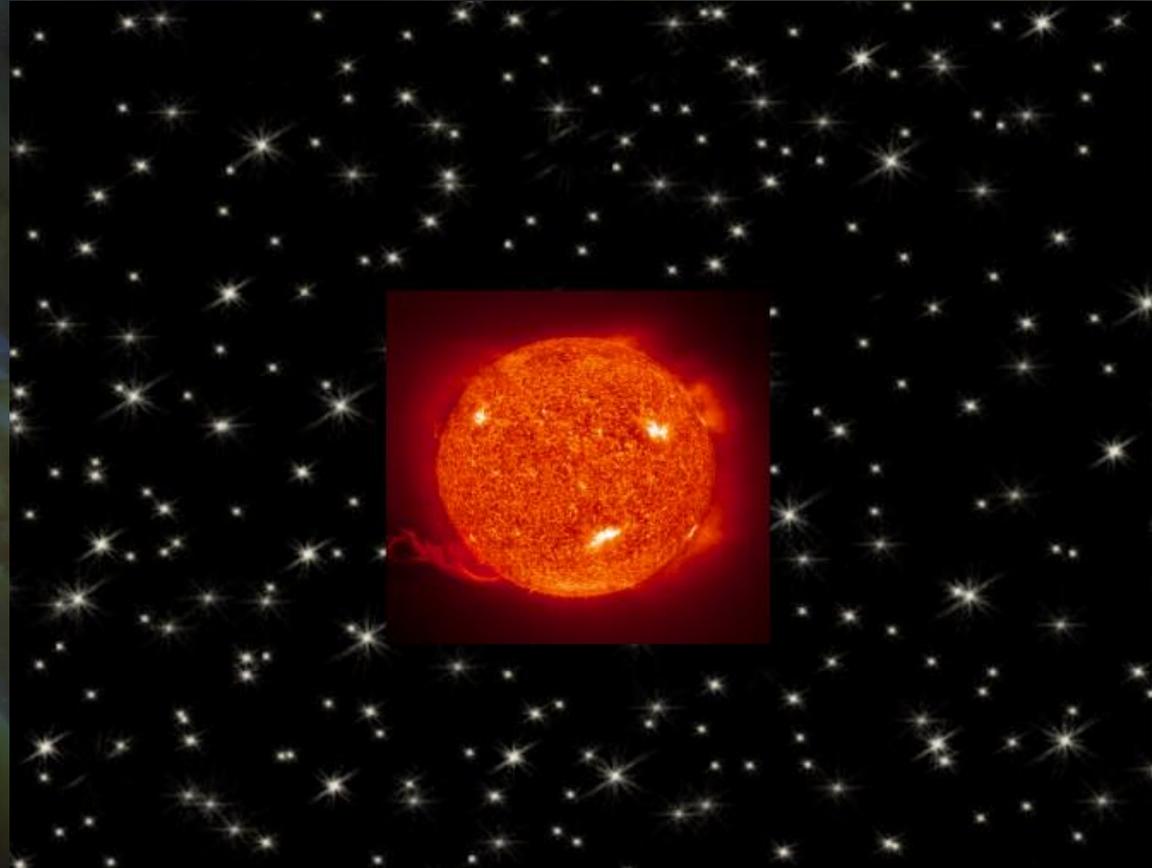


From Lockwood et al, 2007



Quelles autres solutions pour la variabilité sur le long terme

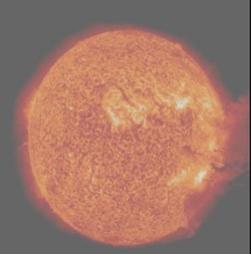
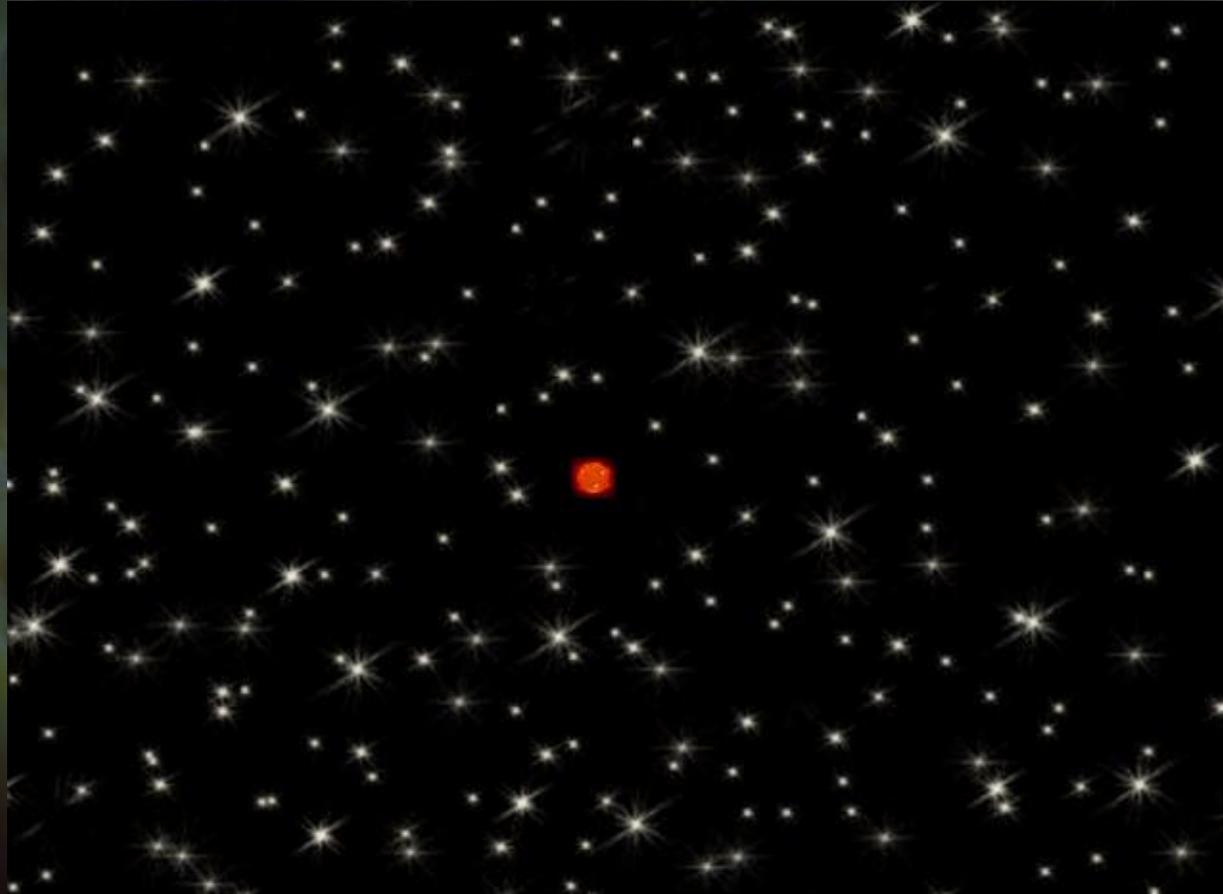
Le Soleil: 30 ans d'observations
25 analogues solaires * 25 ans d'observations: 500 ans !



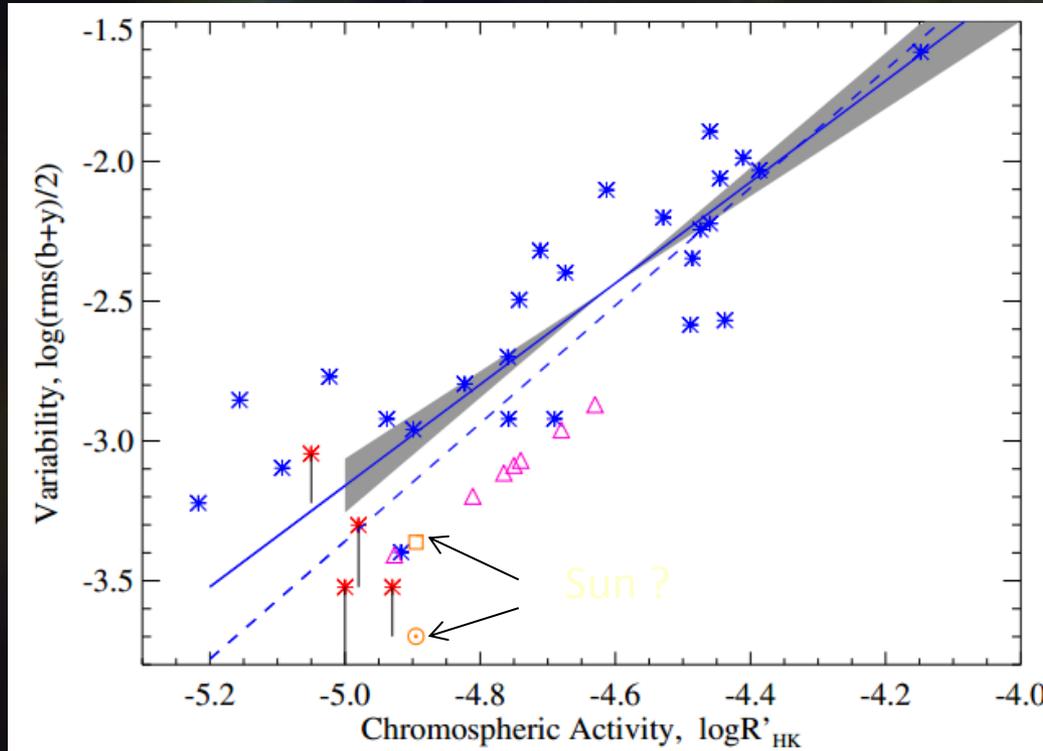
Quelles autres solutions pour la variabilité sur le long terme

Le Soleil: 30 ans d'observations

25 analogues solaires * 25 ans d'observations: 500 ans !



Le Soleil parmi les étoiles



- ✓ Position du Soleil ???
- ✓ Plusieurs possibilités selon le jeu de données choisies (SIM, SATIRE, ...)
- ✓ Position unique au cours du temps ?

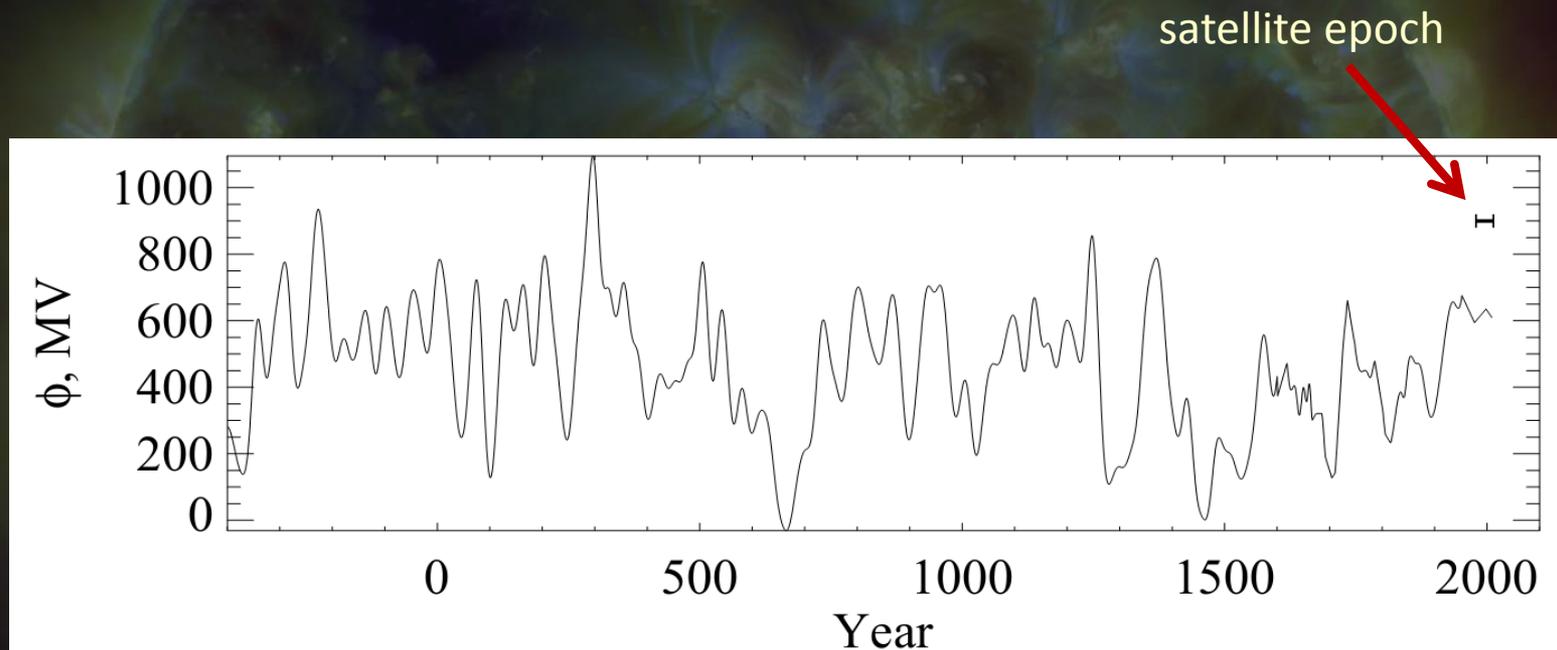
Variabilité photométrique (Visible) VS
variabilité chromosphérique (Ca II K)



Le Soleil parmi les étoiles

Le Soleil occupe une place particulière aujourd'hui

Courbe de modulation du potentiel = niveau de champ magnétique global du Soleil



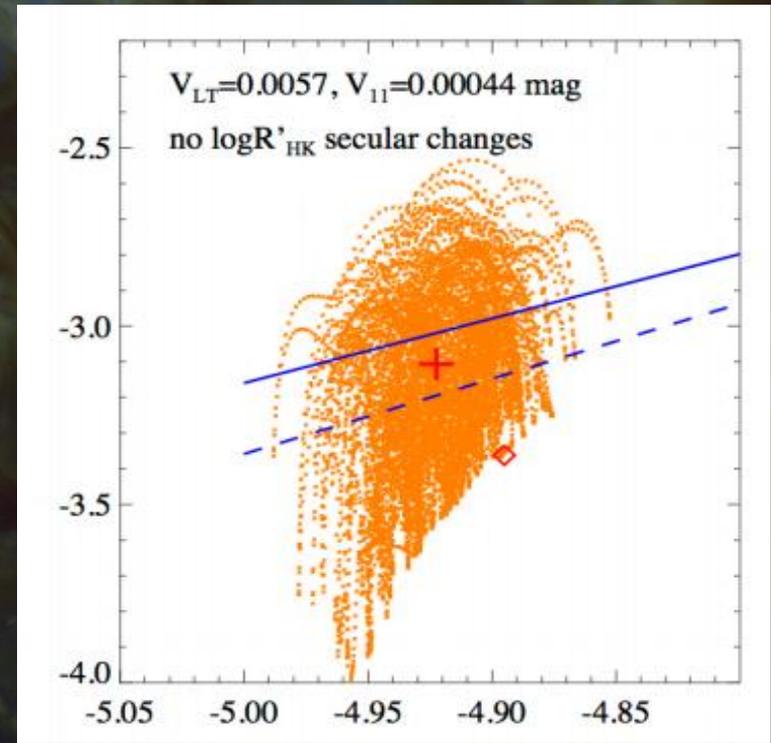
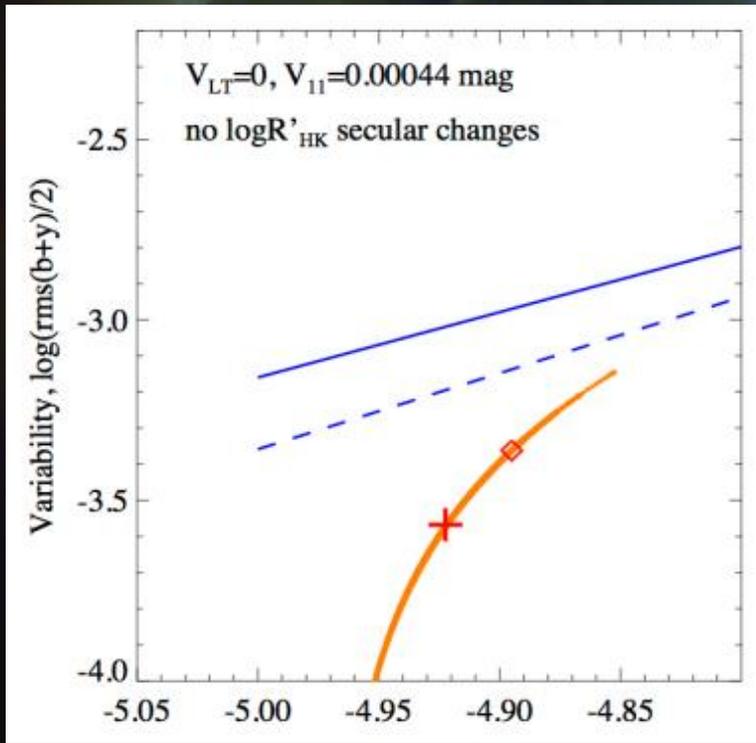
L'activité moyenne solaire sur les 2500 dernières années est deux fois moins importantes comparée à la valeur actuelle.....

Le Soleil parmi les étoiles

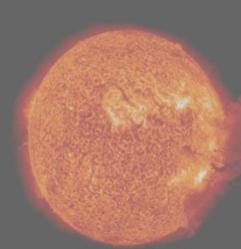
Deux paramètres libres

V_{11} : Amplitude du cycle de 11 ans

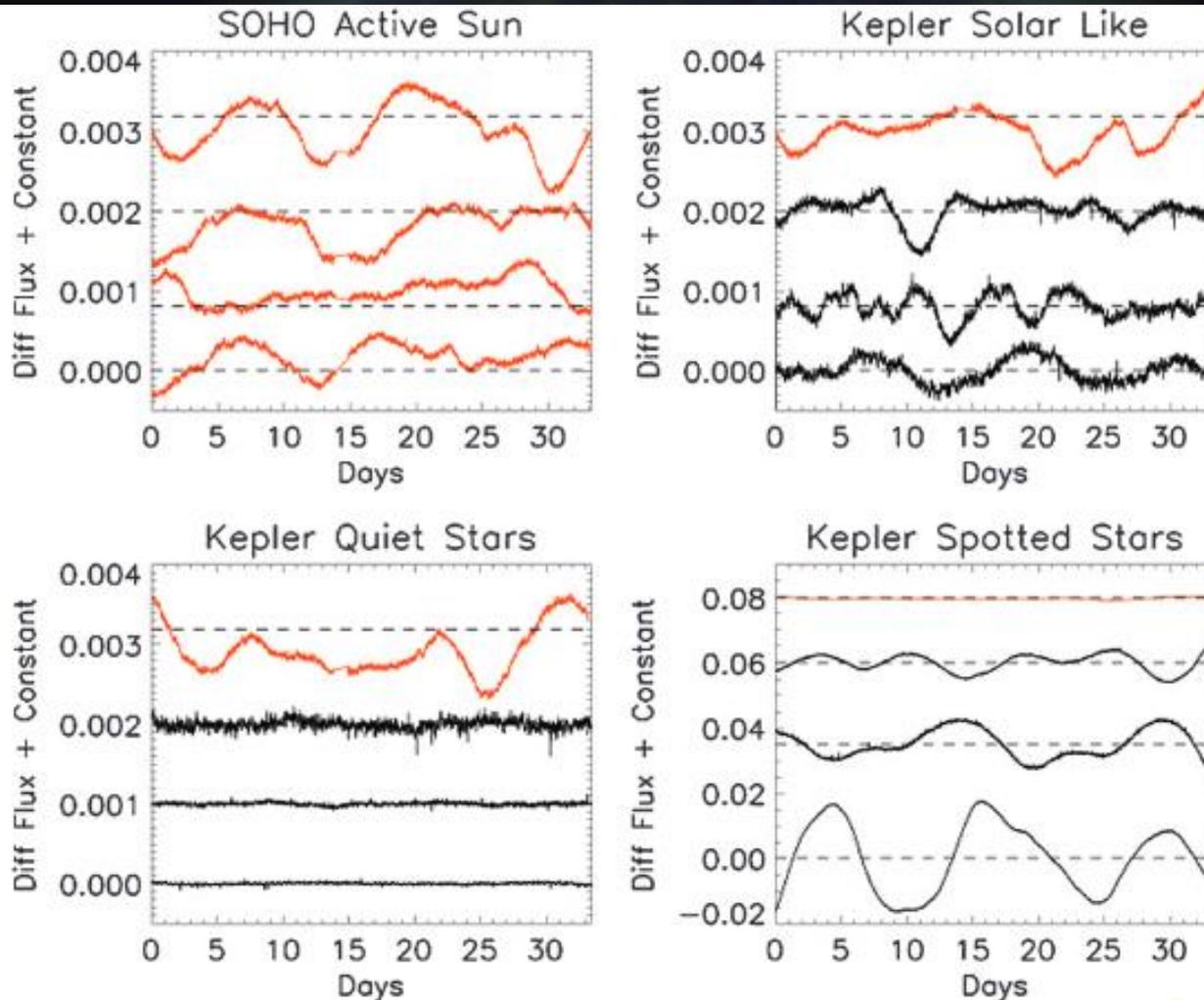
V_{LT} : Amplitude du cycle à long terme (300 ans)



Shapiro et al, 2013



Le Soleil parmi les étoiles: KEPLER et COROT ?



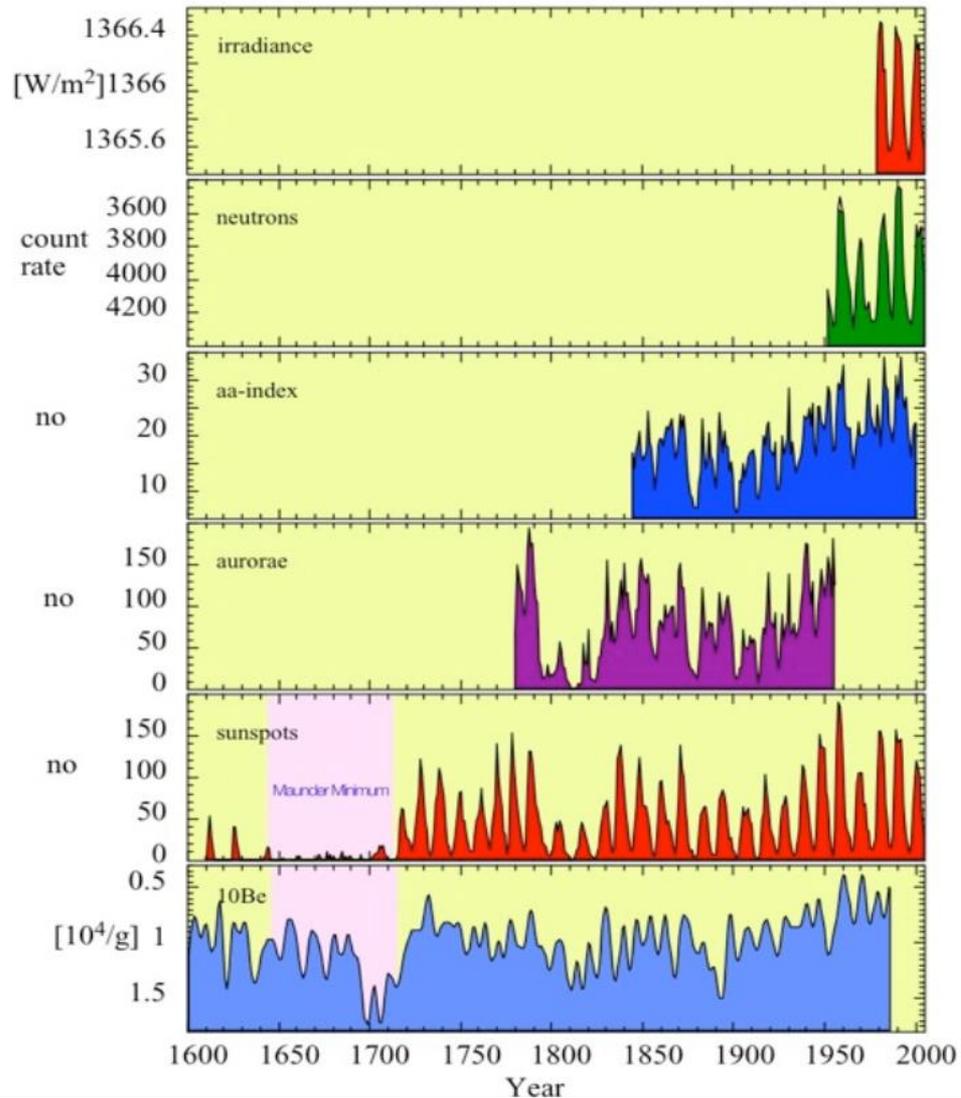
Basri et al, 2010

Travail en cours...



Une autre solution: remonter dans le temps

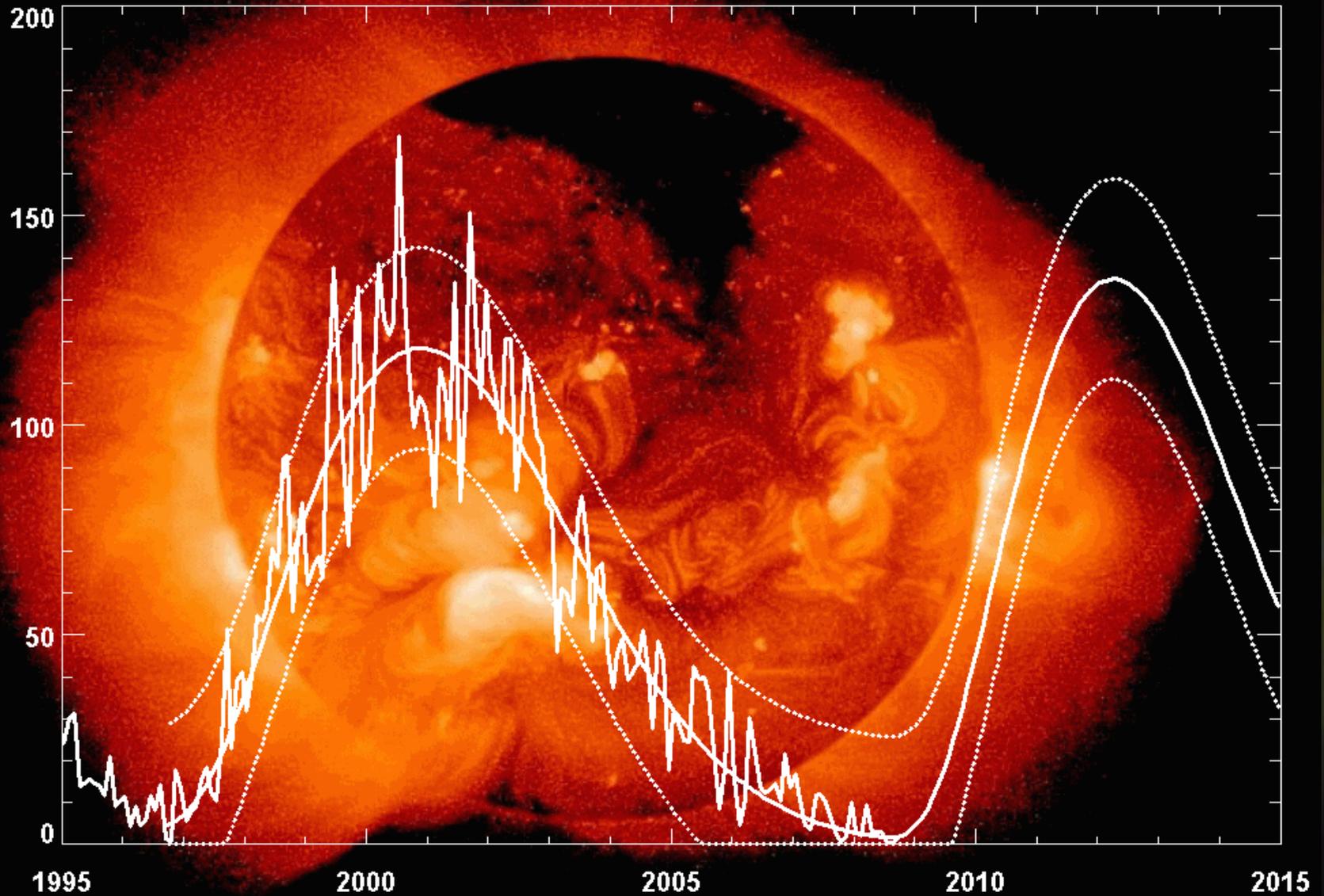
SOLAR VARIABILITY OVER THE PAST SEVERAL MILLENNIA



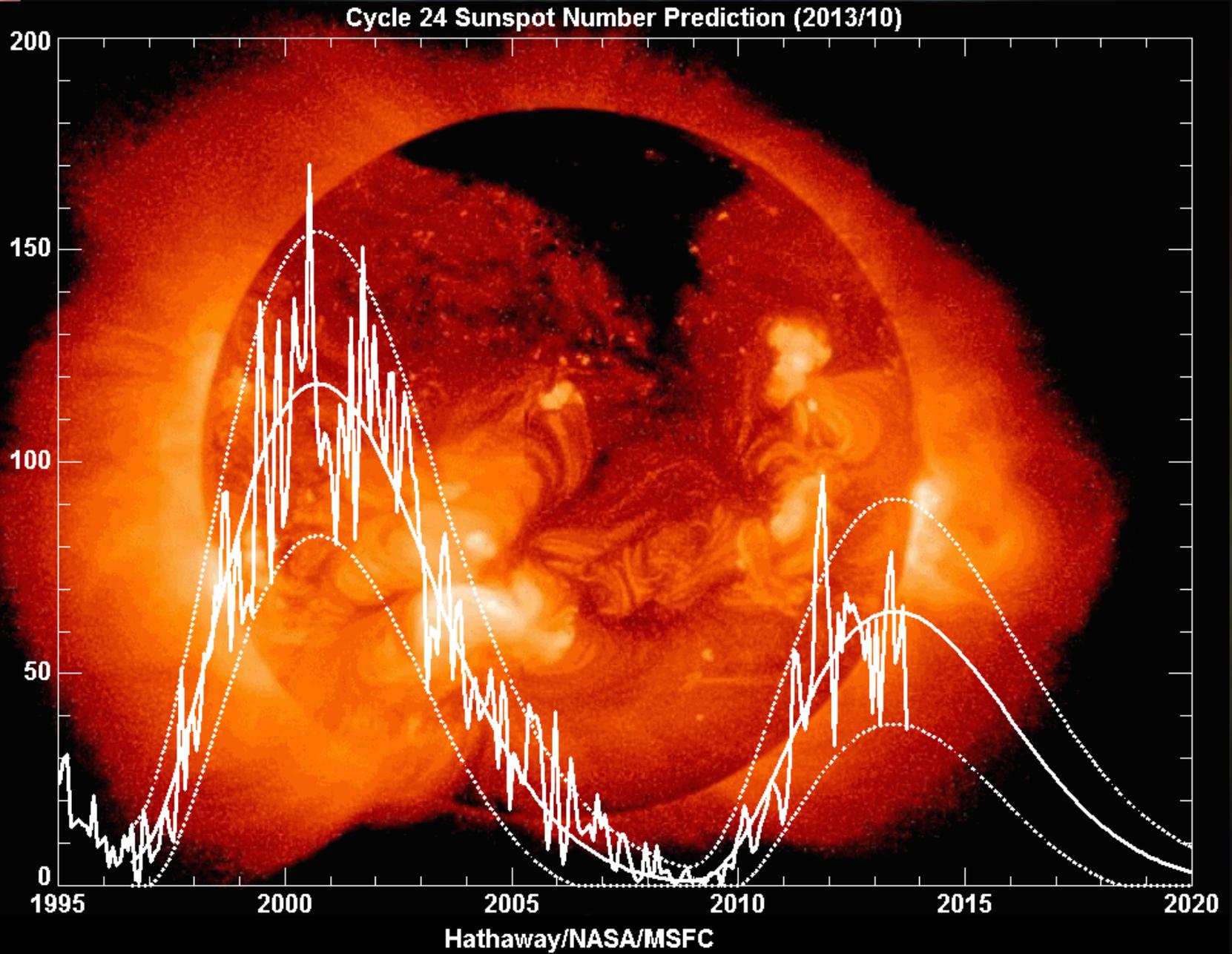
Mais trop peu de paramètres, donc il faut faire très attention.....

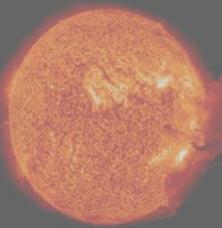
Méthodes basées sur la MHD ?

Cycle 23-24 Sunspot Number Prediction (October 2008)



Méthodes basées sur la MHD ?

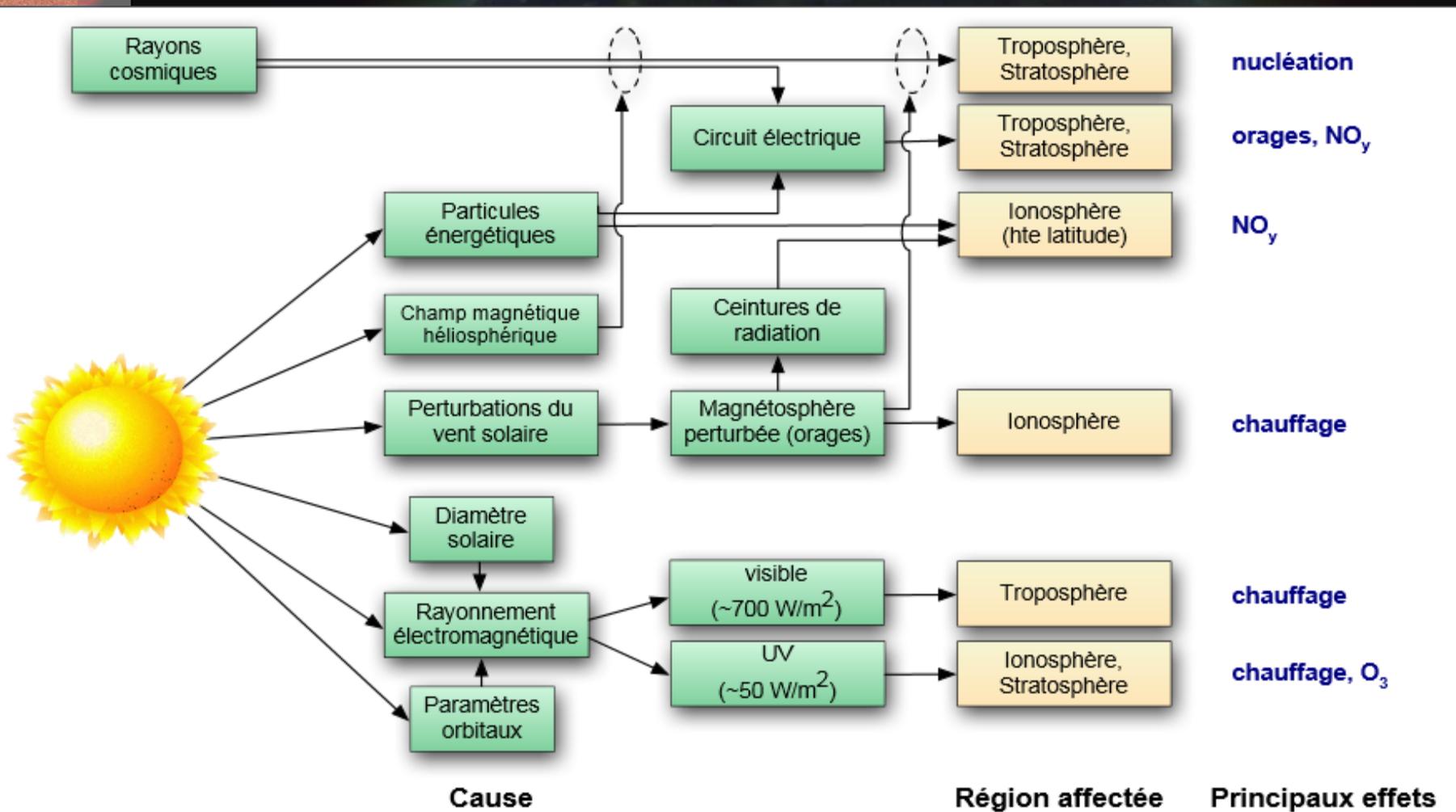


- 
- 
- 
- ✓ *Le Soleil en quelques mots*
 - ✓ *Irradiance; Mécanismes d'émission*
 - ✓ *Le Soleil: une étoile variable*
 - ✓ *Introduction à la météorologie de l'espace*
 - ✓ *UV et atmosphères planétaires*

Définition

La météorologie de l'espace est la discipline qui traite de l'état physique et phénoménologique des environnements spatiaux naturels. Au moyen de l'observation, la surveillance, l'analyse et la modélisation, elle vise plusieurs objectifs : d'une part, comprendre et prévoir l'état du Soleil et des environnements interplanétaire ou planétaire, ainsi que les perturbations qui les affectent, qu'elles soient d'origine solaire ou non ; d'autre part, analyser en temps réel ou prévoir d'éventuels effets sur les systèmes biologiques et technologiques

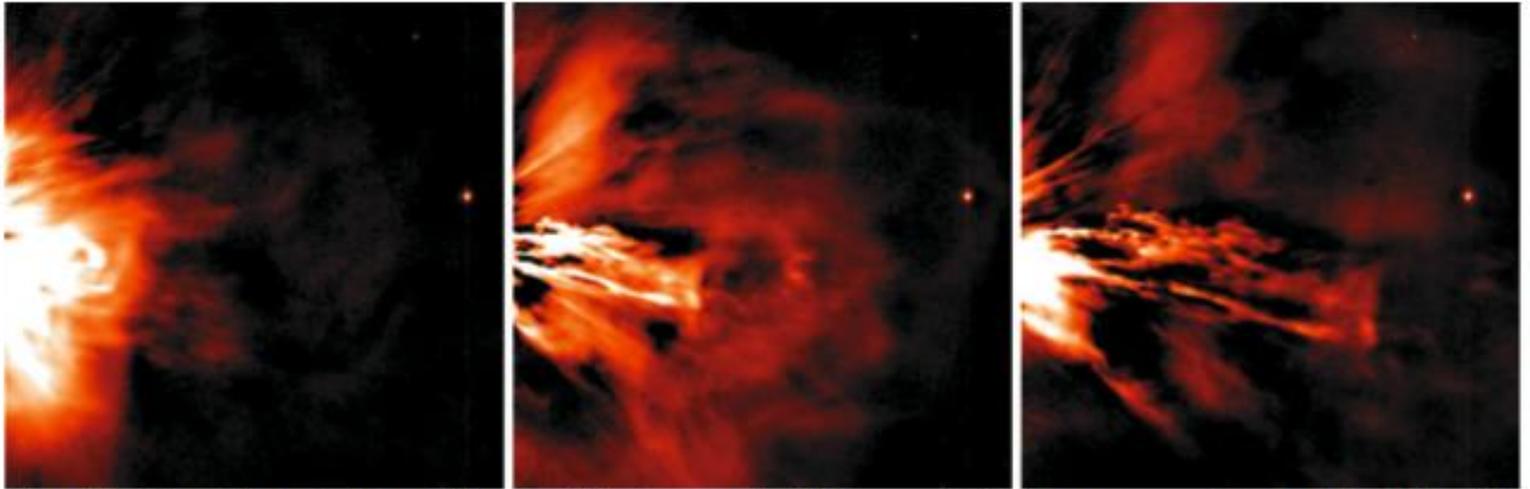
Vision globale des relations Soleil - Terre



T. Dudok de Wit, 2009

Des dangers ?

J. DAVIES, STFC/RAL, SPACE



This eruption of plasma from the Sun in June 2011, captured by instruments on the STEREO spacecraft, didn't cause a space weather storm on Earth. Others will.

Prepare for the coming space weather storm

We need to improve estimates of geomagnetic storm size, says **Mike Hapgood**, so we can be ready for huge disruptions to electrical systems.

Nature, 19 APRIL 2012 | VOL 484

Quels types de risques ?

Le ciel va-t-il nous tomber sur la tête ?

- Court terme:
 - Pertes de satellites.
 - Courants induits, problèmes de réseaux électriques
 - Radiations
 - Positionnement GPS
- Long terme
 - Réchauffement?
 - Echappement atmosphérique

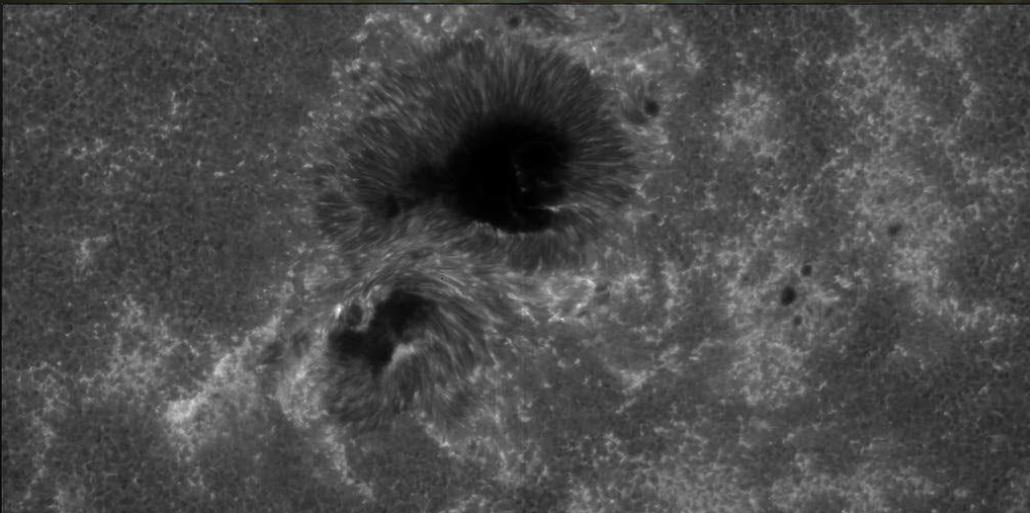
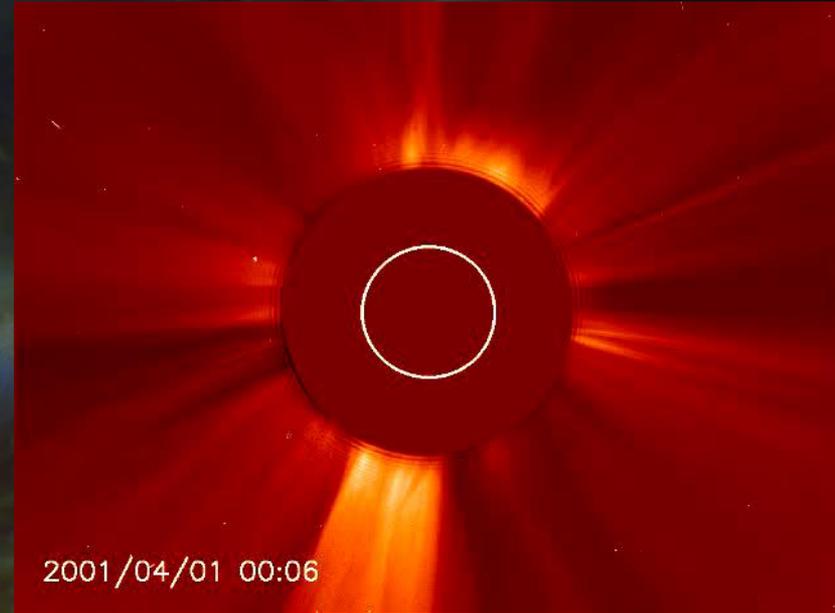


Aurore polaire depuis l'ISS
(ESA/NASA).

Le vent solaire...et les éruptions solaires

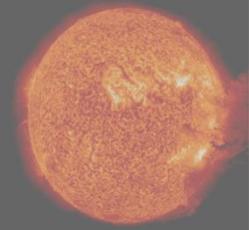
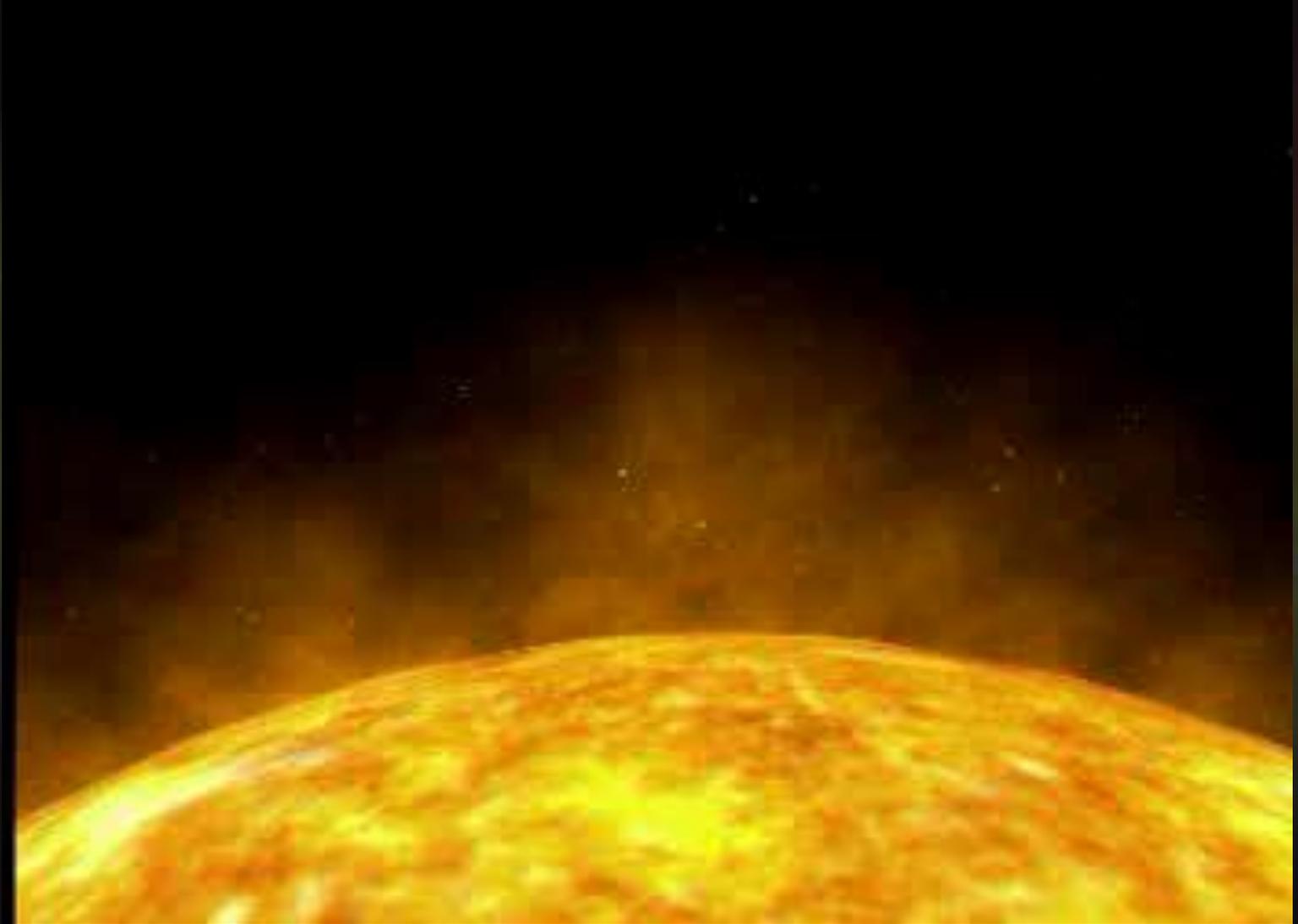
Le Soleil perd environ 10^9 kg de plasma par seconde....

C'est le vent solaire, émis depuis les zones où les lignes de champ magnétique sont ouvertes. En occultant le soleil, on peut l'observer (LASCO/SoHO)



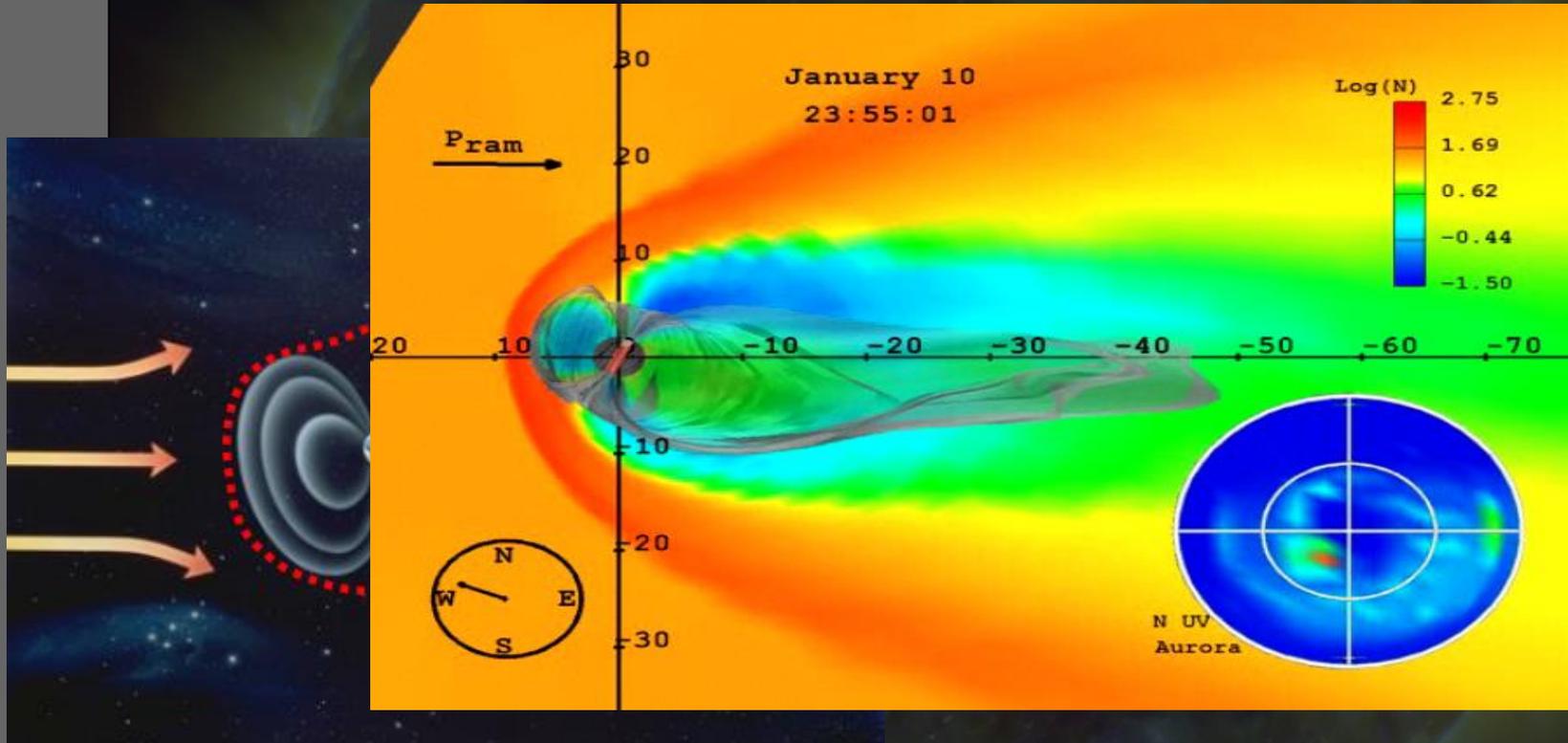
Et les éruptions solaires !
Apport massif de particules
si c'est géo-effectif !

Interaction Vent solaire – Magnétosphère



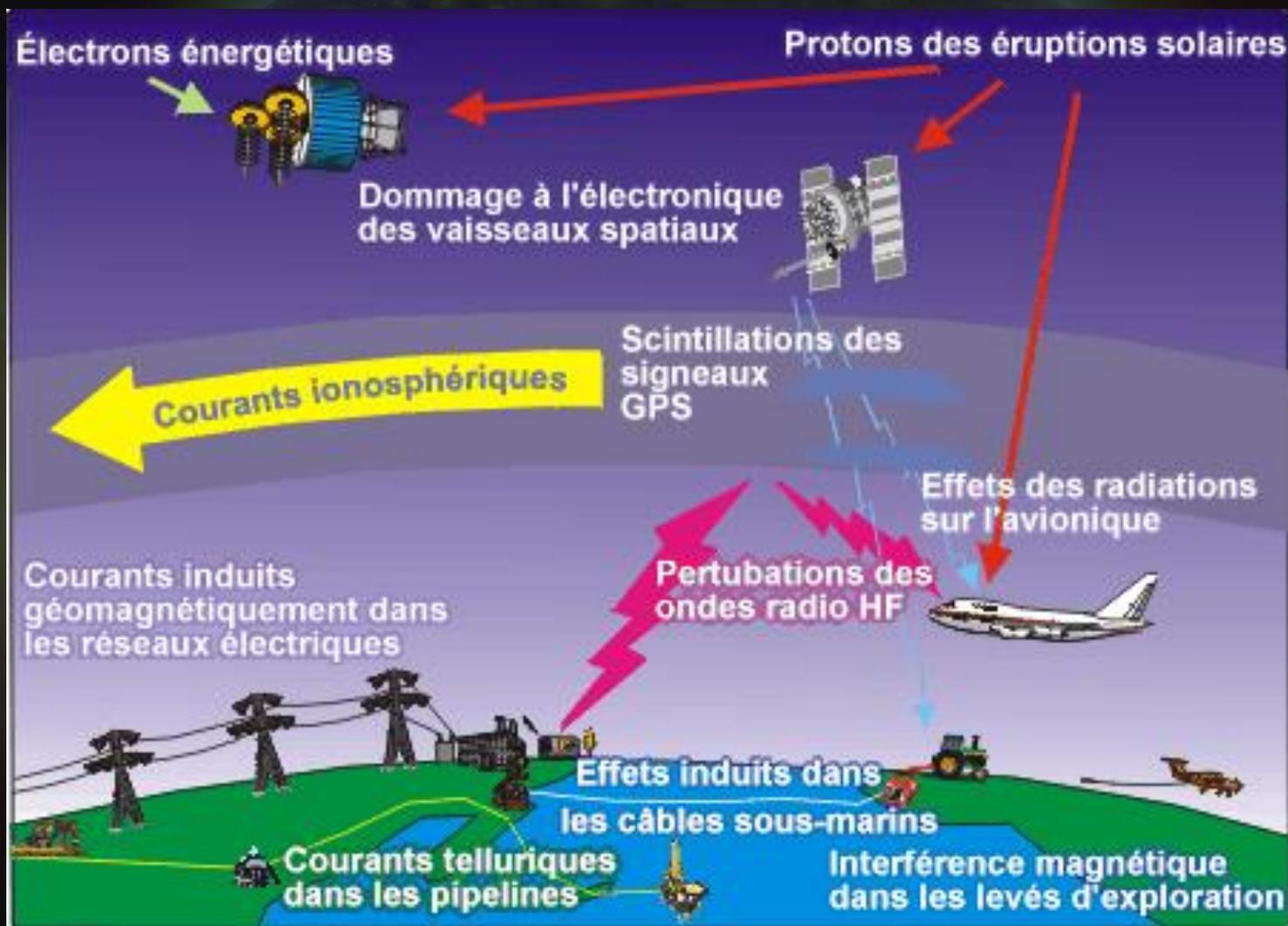
Interaction Vent solaire – Magnétosphère

La magnétosphère résulte d'un équilibre entre le vent solaire et le champ magnétique terrestre



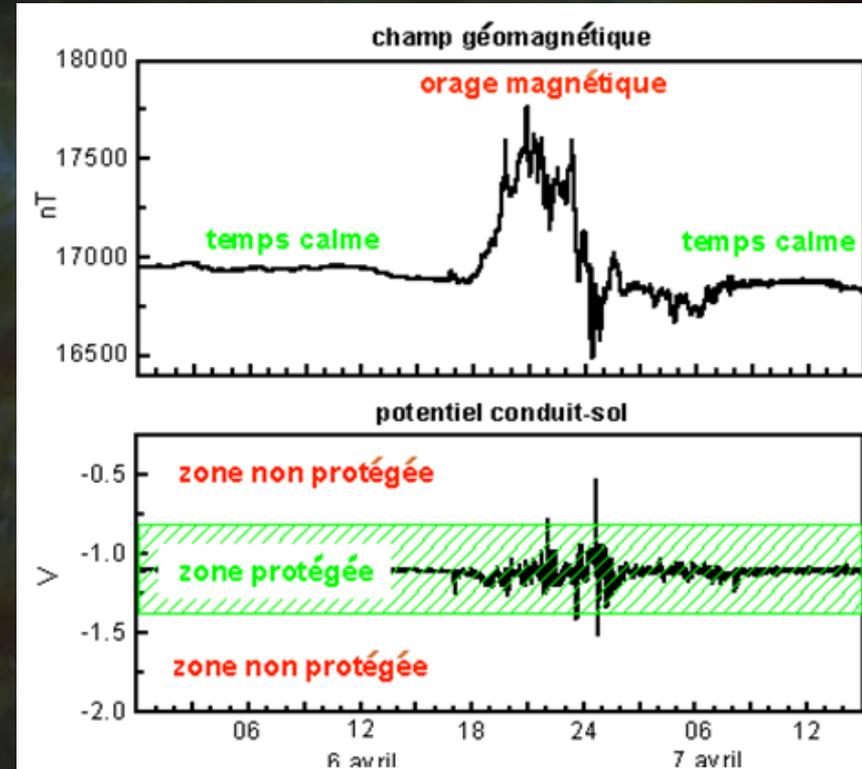
Quelques particules de hautes énergies vont précipiter dans l'atmosphère terrestre en suivant les lignes de champs magnétique pour donner des aurores

Impacts sur nos technologies.....



Impacts sur nos technologies.....

- Courants induits sur les pipelines

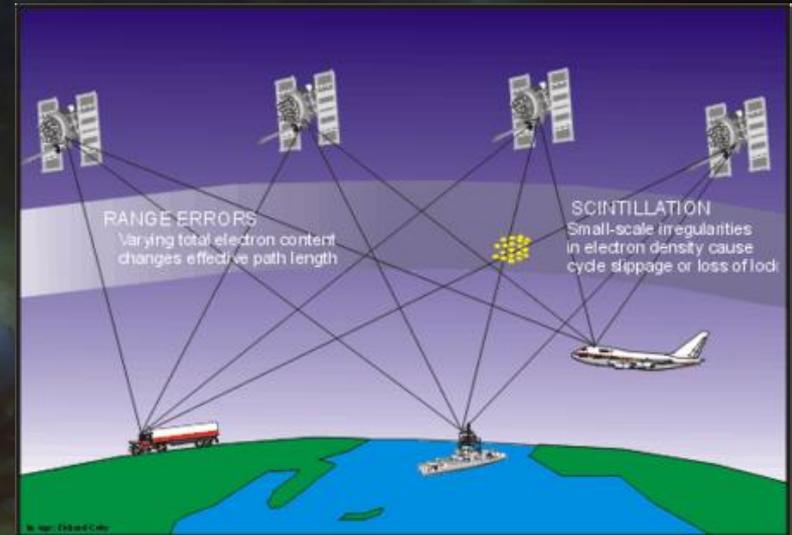


Impacts sur nos technologies.....

- Positionnement GPS

Augmentation locale de la quantité d'électrons ionosphériques

Modification de la vitesse de propagation des ondes GPS



- Satellite en orbite basse

Flux UV chauffe la thermosphère



Dilatation de l'atmosphère, densité des neutres peut doubler à 400 km.....

$$R = \frac{1}{2} \rho v^2 A C_d$$

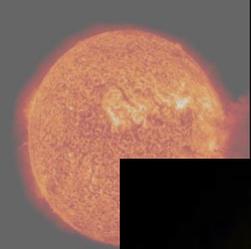
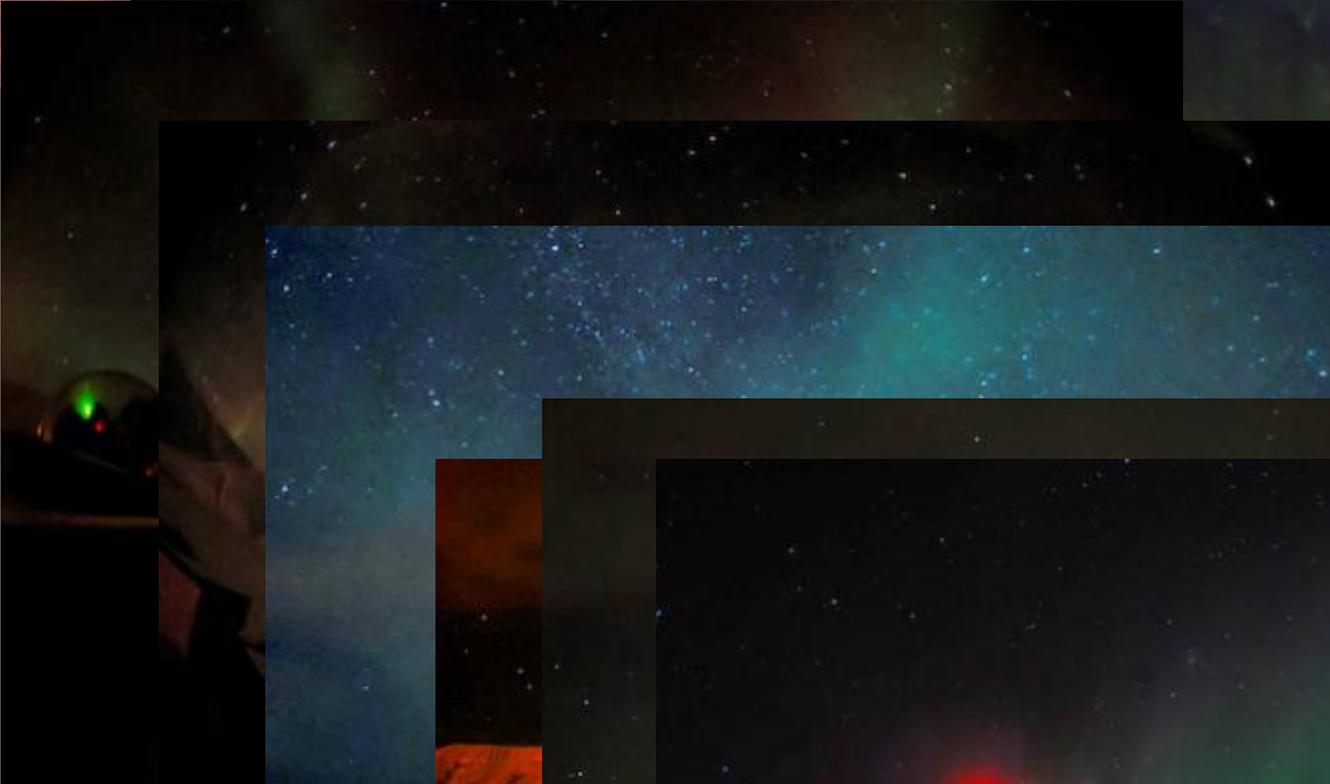
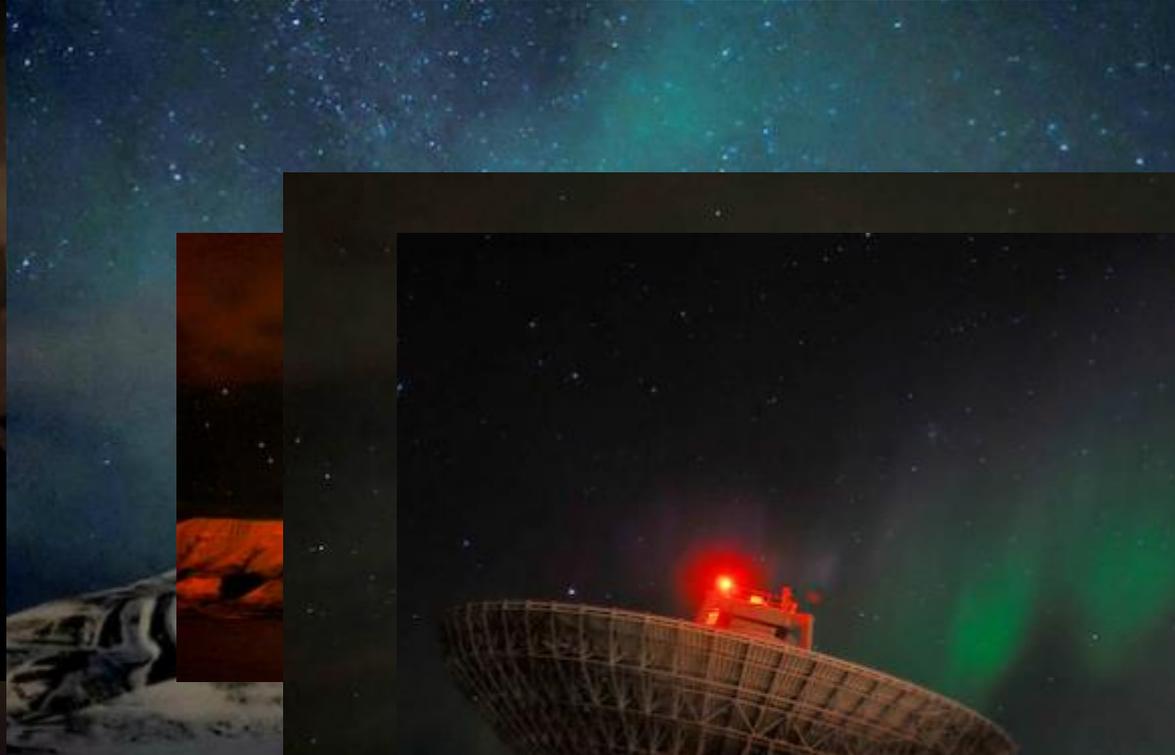
Impacts sur nos technologies.....

Spacecraft	Time	Comment	Reference
DSP		Anomalies associated with >1.2 MeV electrons	Vampola, 1994
SCATHA		Internal discharges associated with outer radiation belt	Garrett and Whittlesey, 1996
ATS 5 and ATS 6		Charged to 10 kV in eclipse at GEO	SMASS Report
NOAA spacecraft	from 1971	Contains 2779 events from 1971 to 1988	Wilkinson, 1994
Goddard spacecraft	1993-1995	More than 400 anomalies	Remez and McLeod, 1996; Walter, 1995
Voyager 1		Power-on resets	Leung et al., 1986
Pioneer		Severe space weather near Jupiter	SMASS Report
GPS		Clock shift, false commands	James et al., 1994
Intelsat 3 and 4		Spin up	James et al., 1994
GOES 2			Lauriente et al., , 1996, 1998
GOES 3		Upsets	
GOES 4	Nov 26, 1982	Instrument failed on arrival of 110-500 MeV protons	Vampola 1994
Intelsat K	Jan 20 1994	Loss of attitude control in GEO	Baker et al. 1994
ANIK E1 and ANIK E2	Jan 20-21 1994	Loss of attitude control due to high energy electrons	Baker et al. 1996
ANIK E1	Mar 26 1996	Array of solar power panels disconnected	ISTP Newsletter, Vol 6, no 2, 1996.
DRA-delta		Phantom commands	Wrenn and Sims, 1996
CTS		Short circuit	James et al., 1994
DSCS II		Spin up, amplifier gain	James et al., 1994
DMSP 7		Charged to 300 V in less than a second- associated with a sharp drop in ion density	Stevens and Jones, 1995
GOES 5	July 22 1984	Failure during high energetic electron fluxes	Baker
DMSP F13		Problems while passing through an aurora	Anderson and Koons, 1996
Hispasat 1A and 1B	Sep 1992 and July 1993		Selding, 1998
Telstar 401	Jan 11 1997	Failure probably due to coronal mass ejection	Anselmo, 1997
Telstar 402		Spacecraft charging	Lanzerotti et al., 1996
Topex/Poseidon		Failures due to electrostatic discharges and SEUs caused by high energy protons	Lauriente and Vampola 1996
Intelsat 511	Oct 7 1995	Lost Earth lock	http://www.astro.l u.se/~henrik/space w4b.html
GOES 8	Feb 14 1995	Attitude control difficulty	http://www.astro.l u.se/~henrik/space w4b.html
TDRSS 1	1988-1991	SEUs anticorrelated with solar cycle	Wilkinson 1994
CRRES	1990	674 reported anomalies	Violet & Frederickson 1993
Tempo 2	11 Apr 1997	Temporary power fluctuations.	http://www.seds.org/spaceviews/970515/tech.html
Olympus	11/12 Aug 1993	Affected by the 1993 Perseid meteor shower?	See 2.1.5 above

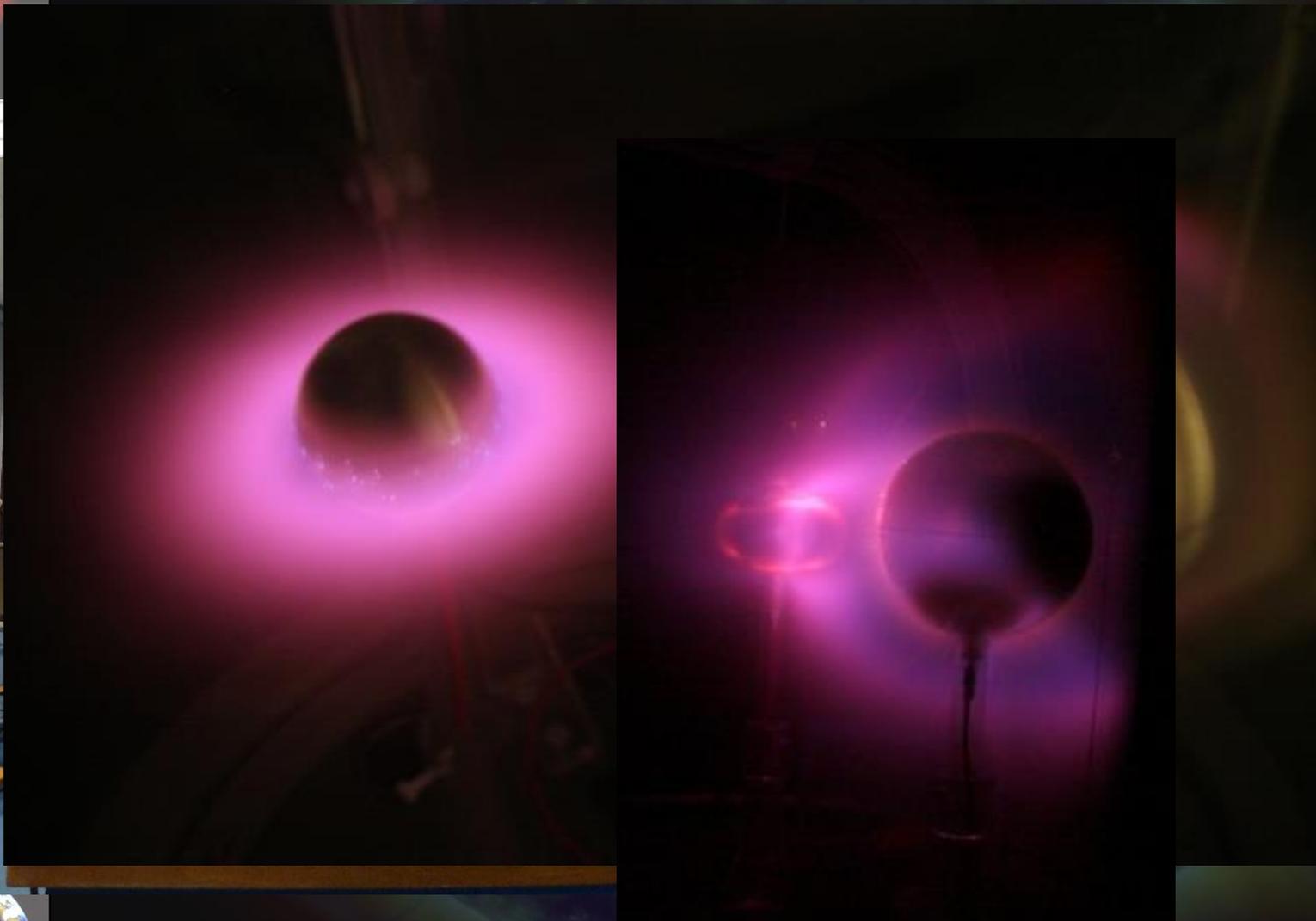
Mais aussi des événements spectaculaires



Crédit: Cyril Simon
planeterrella.obs.ujf-grenoble.fr

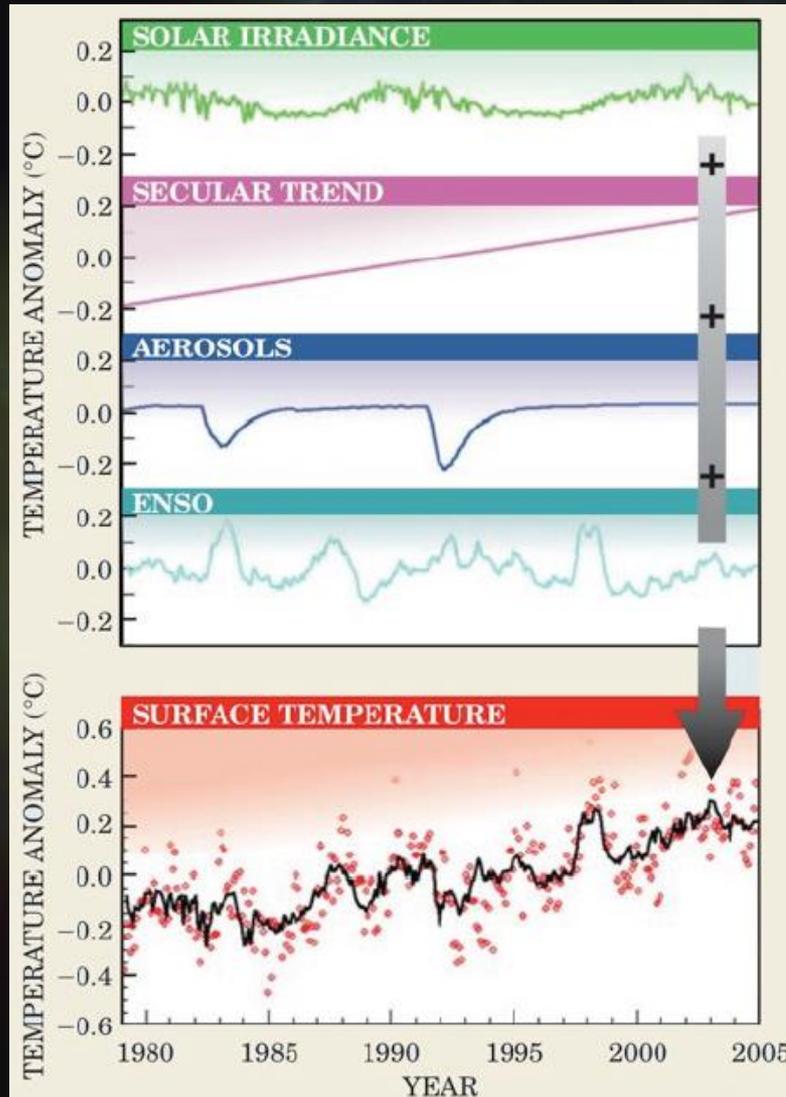


Recréer des aurores en laboratoires ?



Informations disponible sur planeterrella.obs.ujf-grenoble.fr

Un tout petit mot sur le réchauffement climatique...



Effet de l'irradiance

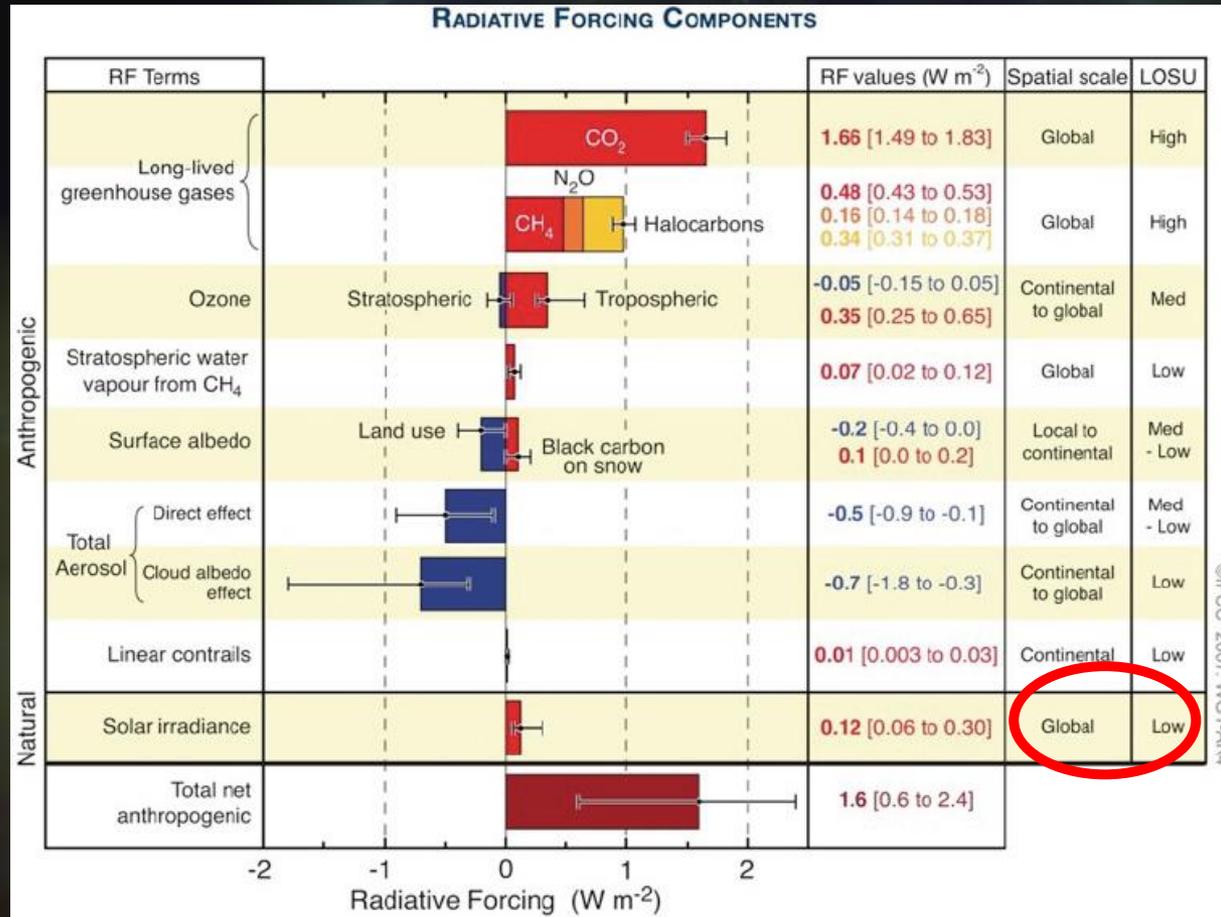
Gaz à effet de serre

Aérosols (dont volcanisme)

El Nino

Variations observée de la température

Un tout petit mot sur le réchauffement climatique...



Si réel impact, 10% uniquement...

Action COST ES1005 TOSCA:

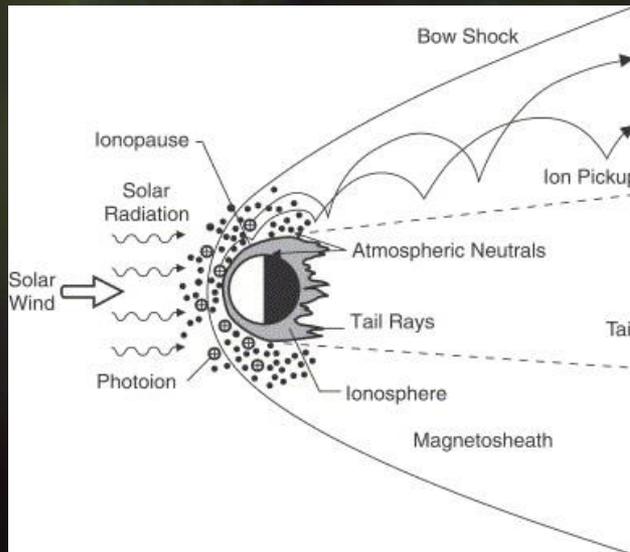
“Towards a more complete assessment of the impact of solar variability on the Earth’s climate”.

Chair: Thierry Dudok de Wit (LPCEE). Représentant Français: Jean Lilensten.

Un autre risque à long terme: l'échappement ?

Evolutions des atmosphères des planètes.

- Quels liens avec l'activité solaire?
- Rôle important du champ magnétique



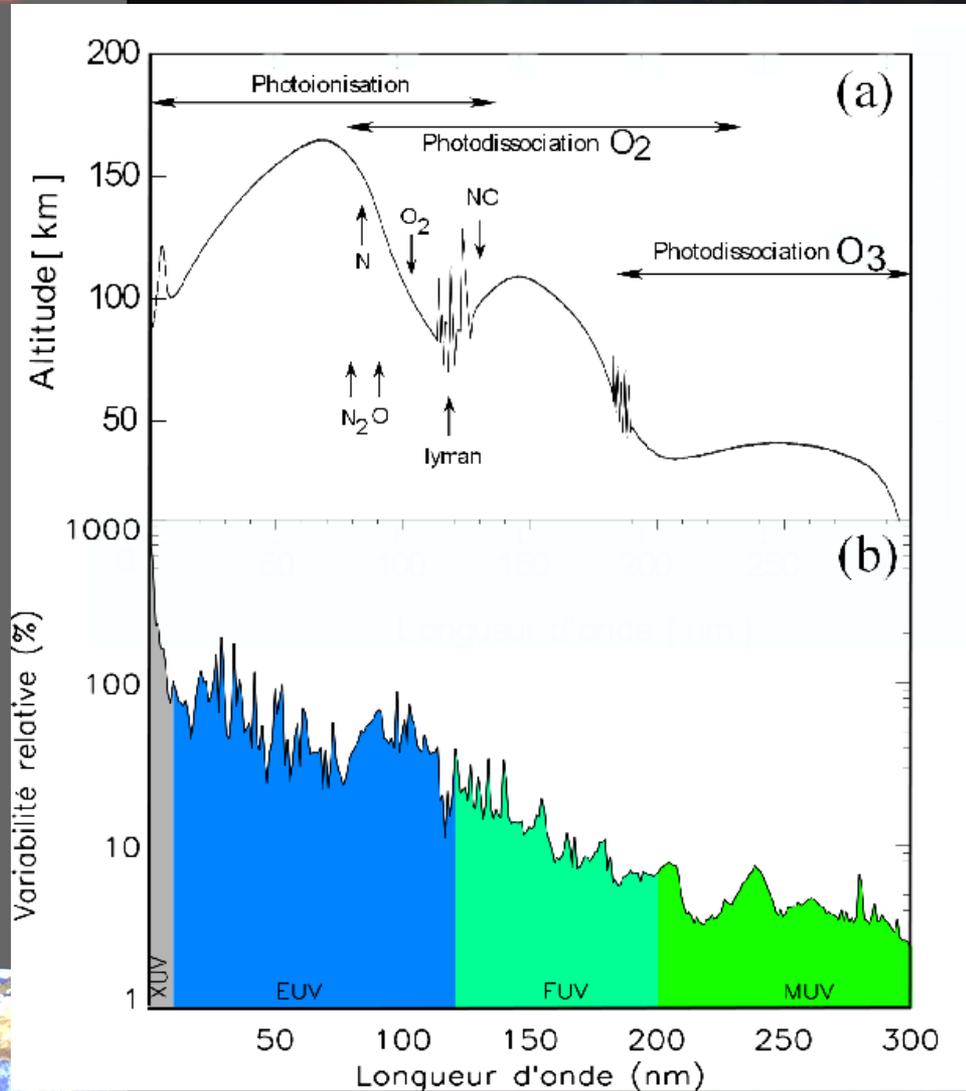
Dans tous les cas les échelles de temps sont très longues (~1GY)

MAIS cela explique en partie l'échappement martien !

Interactions du vent solaire avec Venus

- 
- ✓ *Le Soleil en quelques mots*
 - ✓ *Irradiance; Mécanismes d'émission*
 - ✓ *Le Soleil: une étoile variable*
 - ✓ *Introduction à la météorologie de l'espace*
 - ✓ *UV et atmosphères planétaires*

Atmosphères planétaires et UV: comment modéliser ?



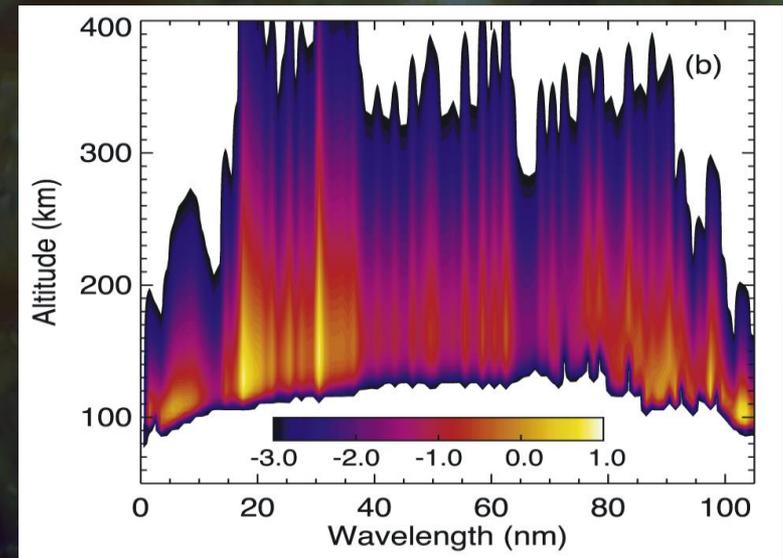
Alors qu'une majorité du rayonnement dans le visible et l'infrarouge chauffe le sol, les océans, et la partie basse de l'atmosphère, l'impact du UV est beaucoup plus complexe...

Atmosphères planétaires et UV

La partie UV est donc critique pour les atmosphères planétaires...

- Partie EUV contrôle l'ionosphère.
- 1-300 nm: contrôle la chimie et la dynamique des atmosphères... dont celle de l'ozone et de l'oxygène....
- 200-350 nm: principale source de chaleur pour la mésosphère et la stratosphère.

La composante UV est fondamentale pour les modèles globaux du climat....

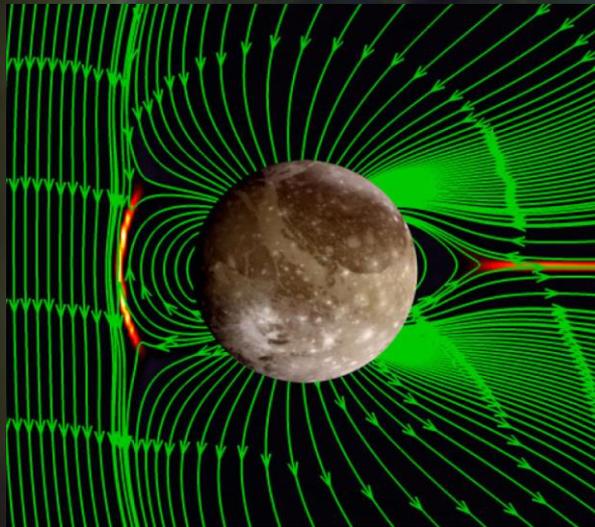


From Solomon and Qian 2005

Impact direct sur les atmosphère planétaires

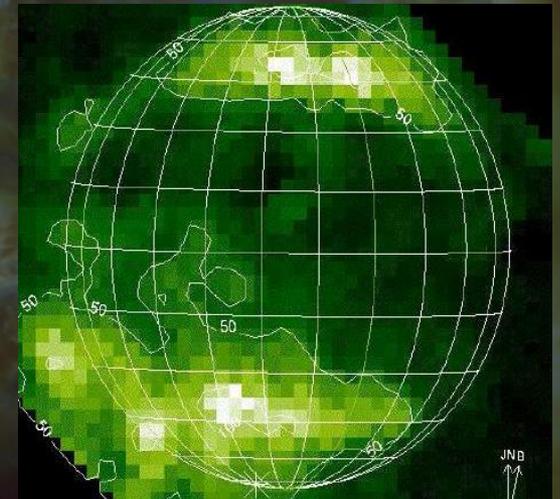
Ganymede: Object planétaire

Dipolar magnetic field and mini-magnetosphere



Magnetifc field illustation

Strong coupling with Jupiter's magnetosphere

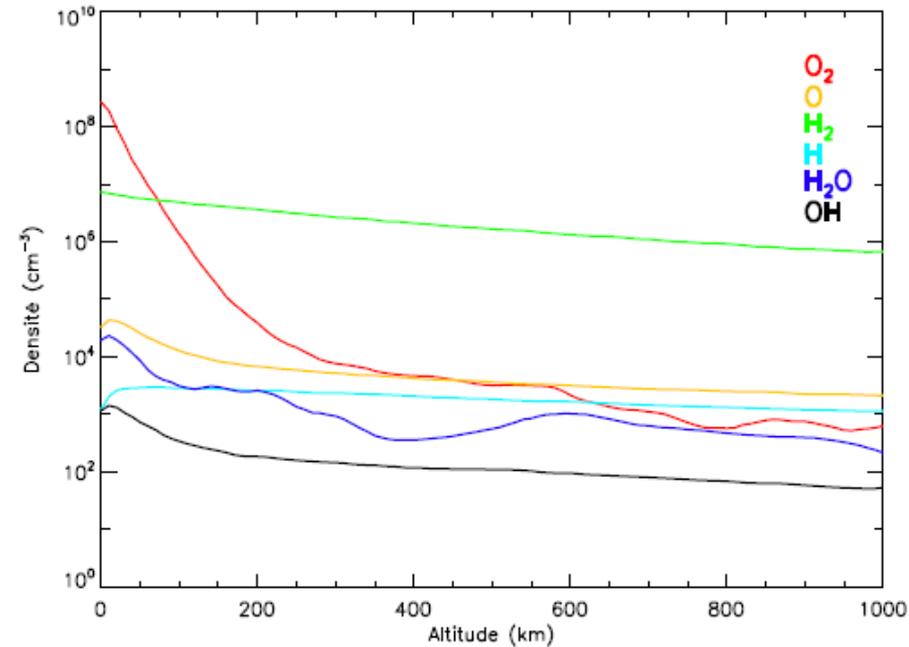
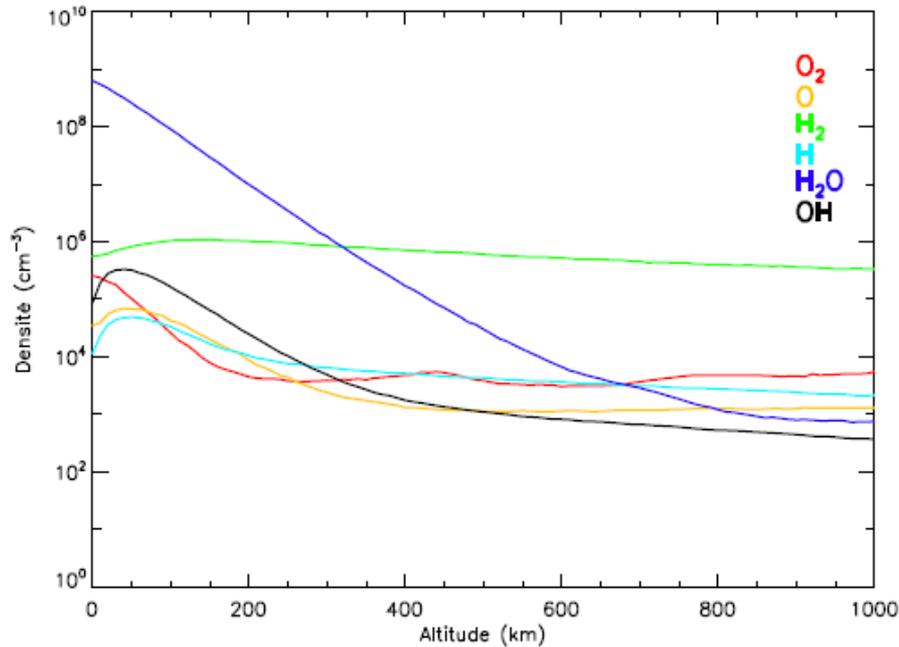


Oxygen line emission @ 130.4 nm (Feldman et al , 2000)

- ✓ Etude de Ganymède importante pour la préparation de la mission JUICE.....

UV solaire et Ganymède

Modèle d'atmosphère planétaire

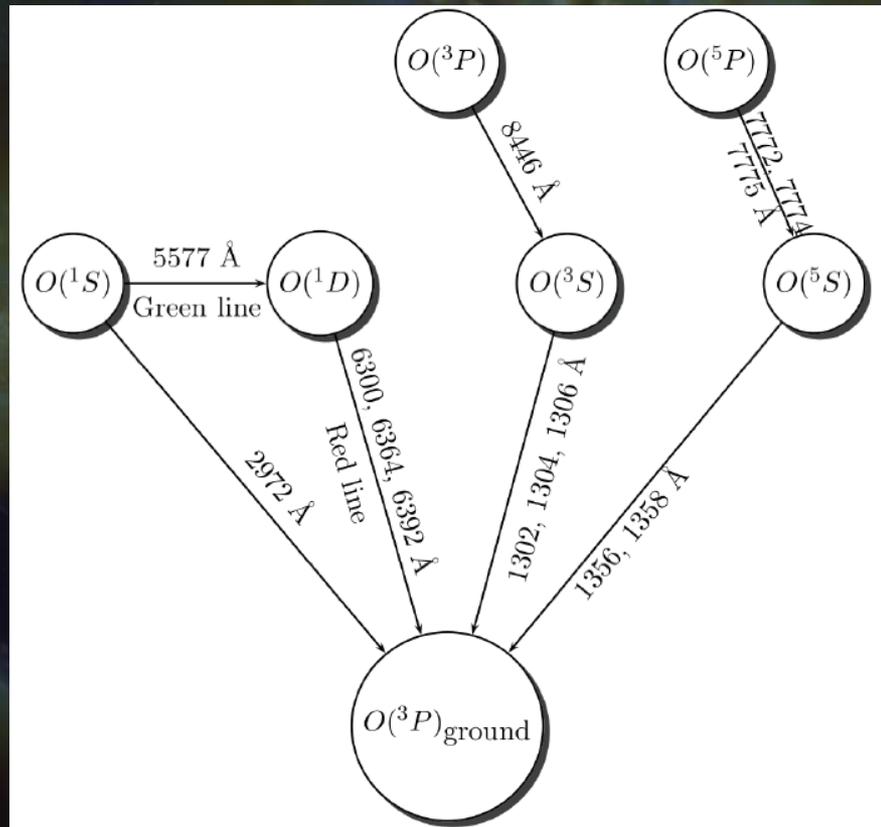
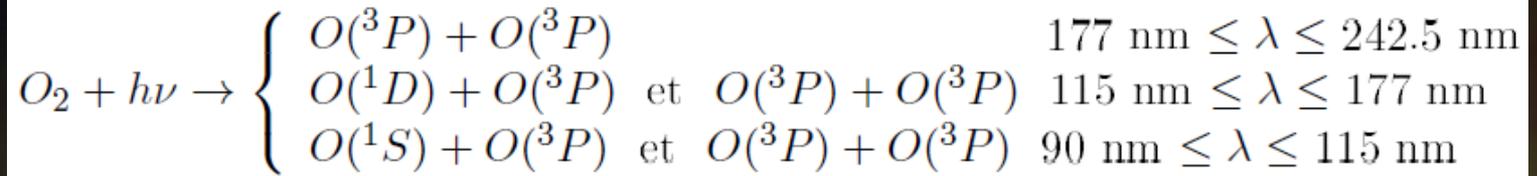


Région équatoriale
Sublimation de la glace d'eau

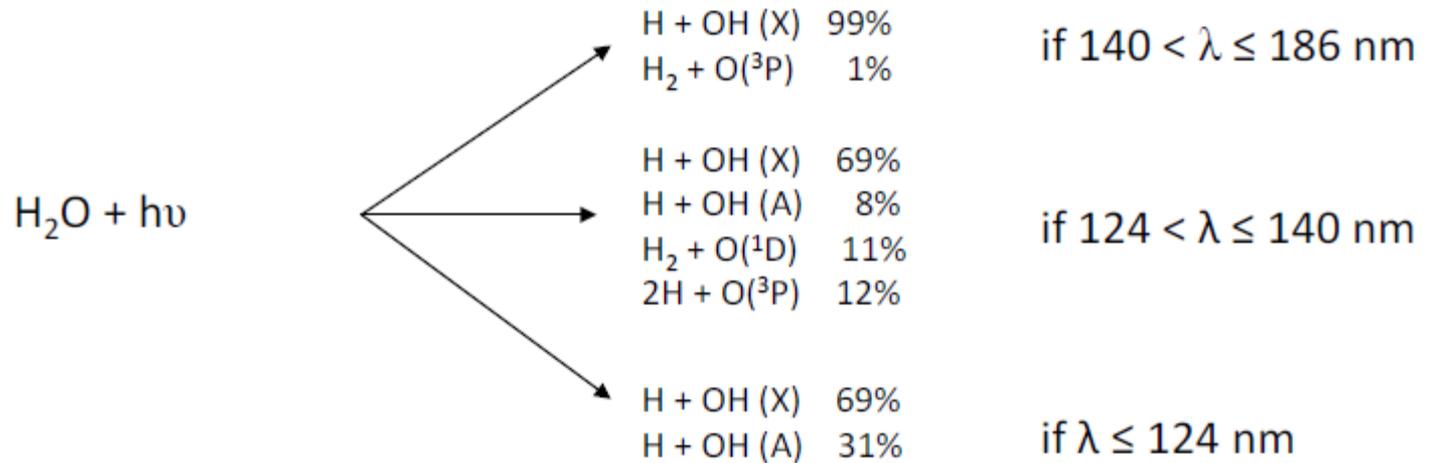
Région polaire
Erosion de la surface par des ions lourds (O^{n+} , S^{n+})

UV solaire et Ganymède

Photoionisation de l'oxygène



Photoionisation de l'eau

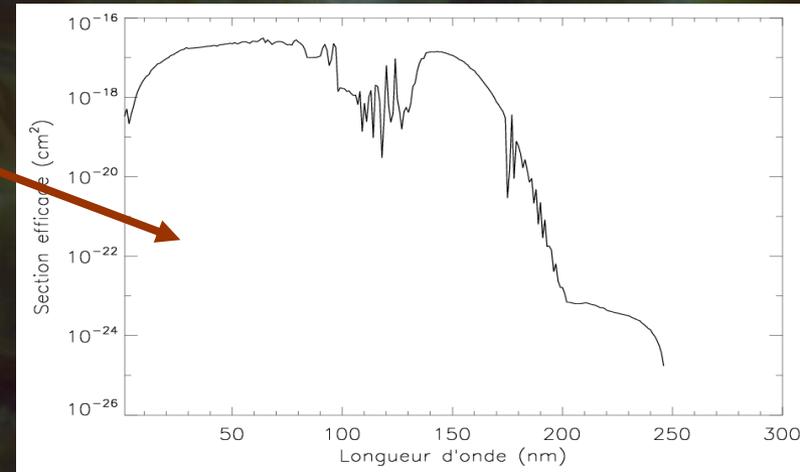
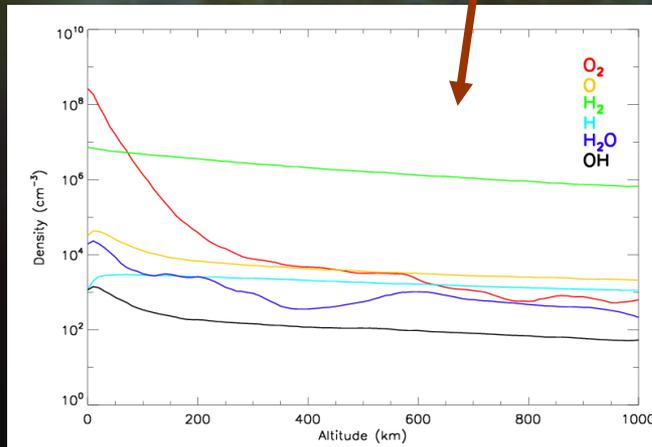
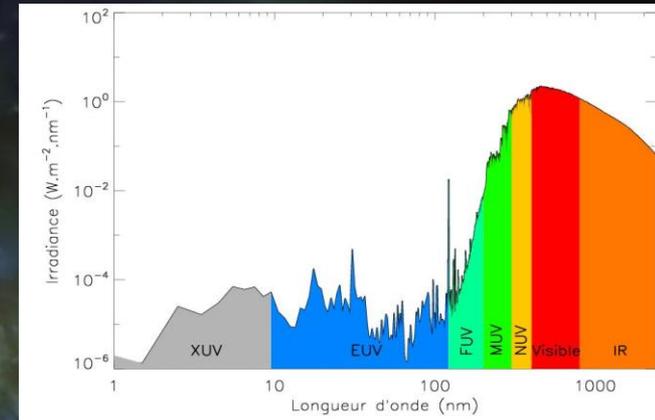


Comment modéliser l'impact du flux UV ?

UV solaire et Ganymède

Loi de Beer-Lambert

$$F(z, \lambda) = F_{\infty} \exp\left[-\int_z^{\infty} n_k(s) \sigma_k ds\right]$$



Flux UV pour chaque altitude dans l'atmosphère...

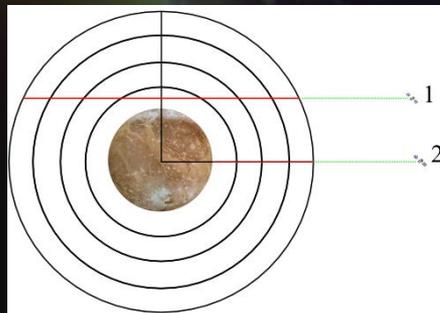
UV solaire et Ganymède

Taux de production d'un élément dans un état a d'excitation donnée (ex O(¹D))

$$P_k^a(z) = \int_{\lambda} n_k(z) \sigma_a^k(\lambda) F(\lambda, z) d\lambda$$

L'élément dans l'état a, se dé-excite par radiation, ce qui donne les émissions atmosphériques !

Régions	Radical OH (260-410 nm)	Raie rouge (630 nm)	Raie verte (557 nm)
1	0.1	501	7
2	139	30	1.5



In Rayleigh
(1R = 10¹⁰ photons.m⁻².s⁻¹)

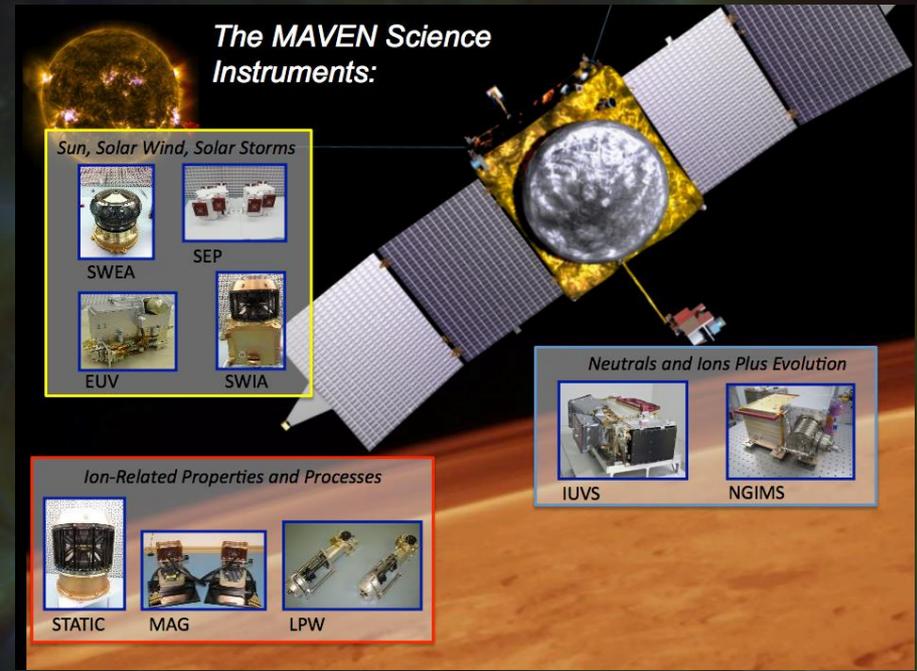
UV solaire et Ganymède

- Approche simple mais en accord avec les observations de Galileo (Gurnett et al, 1996)
- Et les précipitations électroniques ? Même principe de modélisation.... Mais on peut avoir accès aux raies de l'oxygène dans l'UV.
- Mais Ganymède a une atmosphère très tenue ! Approche non valide pour les planètes dont l'atmosphère est plus dense....
On doit considérer l'ionisation secondaire et prendre en compte les équations de transports (Boltzmann)

Quelques mots sur les futures missions

Missions Planétaires

MAVEN: Mars Atmosphere and Volatile Evolution



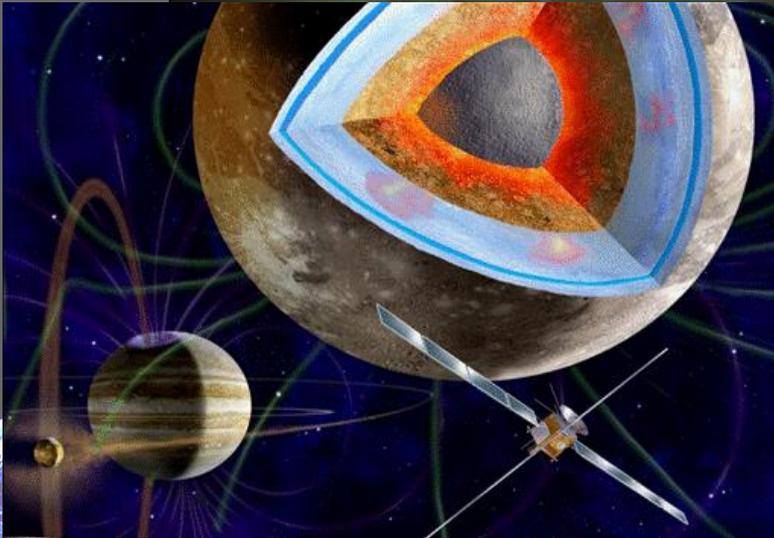
Résoudre le problème de l'échappement martien, le flux EUV une composante capitale...

Quelques mots sur les futures missions

Missions Planétaires

JUICE
ou comment explorer
l'émergence de mondes
habitables autour de
géantes gazeuses !

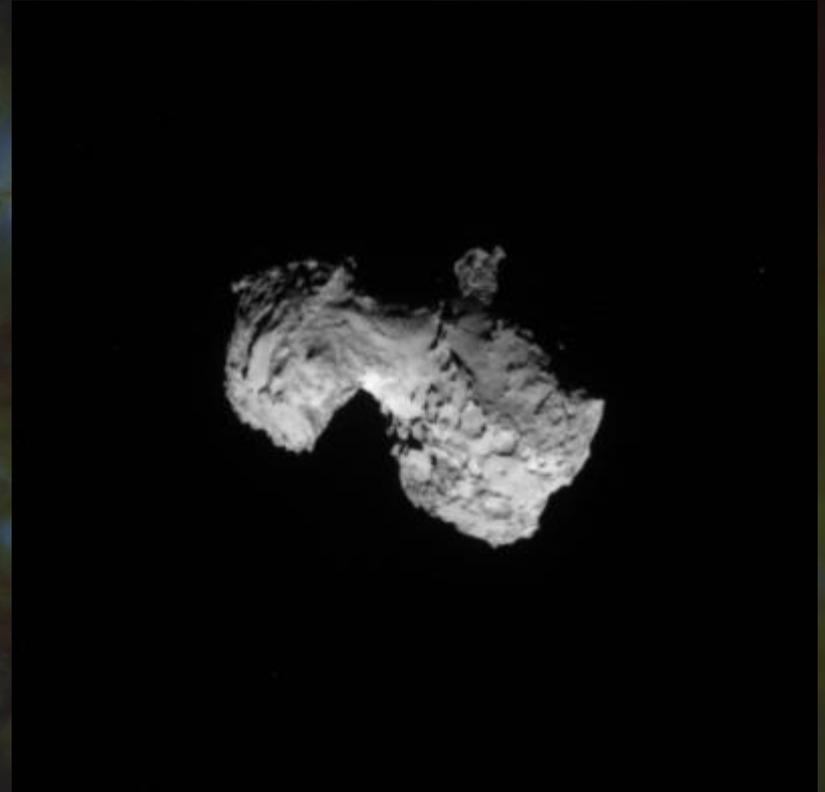
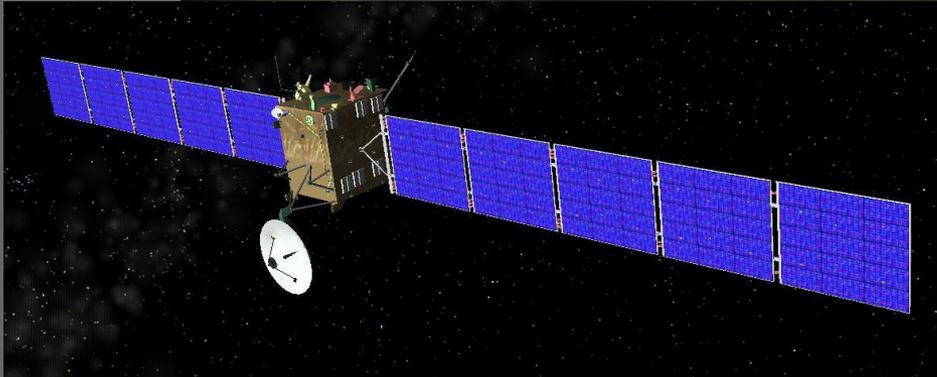
Launch	June 2022
Interplanetary transfer (Earth-Venus-Earth_Earth)	7.6 years
Jupiter orbit insertion and apocentre reduction with Ganymede gravity assists	11 months
2 Europa flybys	36 days
Reduction of v_{inf} (Ganymede, Callisto)	60 days
Increase inclination with 10 Callisto gravity assists	200 days
Callisto to Ganymede	11 months
Ganymede (polar) 10,000x200 km & 5000 km 500 km circular 200 km circular	150 days 102 days 30 days
Total mission at Jupiter	3 years



Quelques mots sur les futures missions

Missions Planétaires

ROSETTA: étude de la
comète Tchourioumov-
Guerassimenko

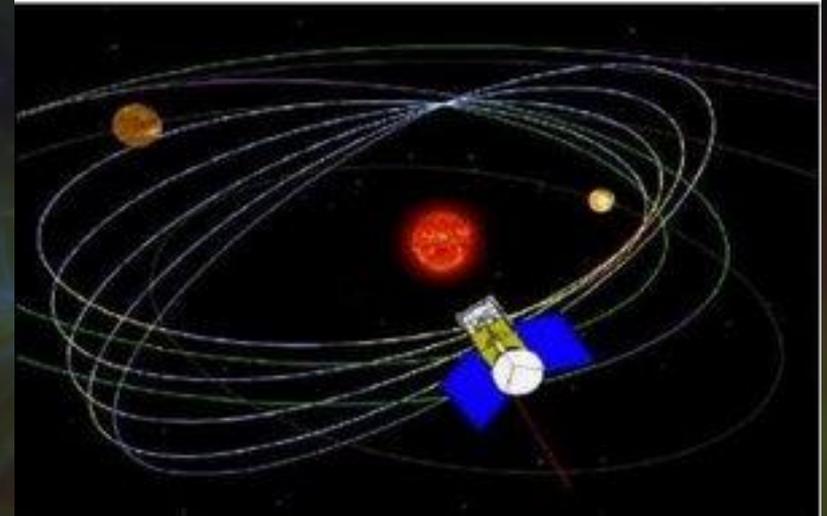


Comète vue le 3 aout 2014

Quelques mots sur les futures missions

Mission Solaire

Solar Orbiter



- Déterminer in-situ les propriétés et la dynamique du plasma, des champs et des particules dans l'héliosphère proche du Soleil
- Étudier les caractéristiques à faible échelle de l'atmosphère magnétisée du Soleil
- Identifier les corrélations entre l'activité à la surface du Soleil et l'évolution de la couronne et de l'héliosphère interne. À cet effet le satellite effectuera des passages en co-rotation avec le Soleil
- Observer et caractériser les régions polaires et la couronne équatoriale du Soleil depuis les hautes latitudes

Quelques mots pour conclure

- Le Soleil est une étoile variable, régi par l'activité magnétique !
- L'irradiance solaire est une composante importante qui doit être caractérisée à la fois pour la physique solaire pour aussi pour la météorologie de l'espace....
- Discipline récente qui caractérise les relations Etoiles-Planètes au sens large
- La composante UV solaire est capitale et doit être caractérisée pour toutes missions planétaires !