



FP7 Soteria

Variabilité solaire et forçage climatique

Thierry Dudok de Wit

Observatoire des Sciences de l'Univers en région Centre (OSUC)

*avec la collaboration de : J. Abouadarham, P.-O. Amblard, F. Auchère, E. Bard,
G. Cessateur, M. Kretzschmar, J. Liliensten, L. Vieira*

Débat scientifique ?



Science du Climat : Est-elle, de nos jours, apte à répondre aux questions ?

Science du Climat :
Est-elle de nos jours, apte à répondre aux questions ?¹

d S. Lindzen
mme Atmosphère, Océans et Cl
hachusetts Institute of T

Nature, Not Human Activity, Rules the Climate

© 2008, Science and Environmental Policy Project / S. Fred Singer

Published by THE HEARTLAND INSTITUTE
19 South LaSalle Street #903
Chicago, Illinois 60603 U.S.A.
phone 312/377-4000
fax 312/377-5000

re Courtillot rebondit. Polémique à l'Académie des
es, menace de procès en diffamation... tout ça pour
on scientifique qui aurait pu rester confinée dans les
savantes. Quel rôle le Soleil a-t-il joué ?

Le Monde
Dimanche 28 février - Lundi 1^{er} mars 2010

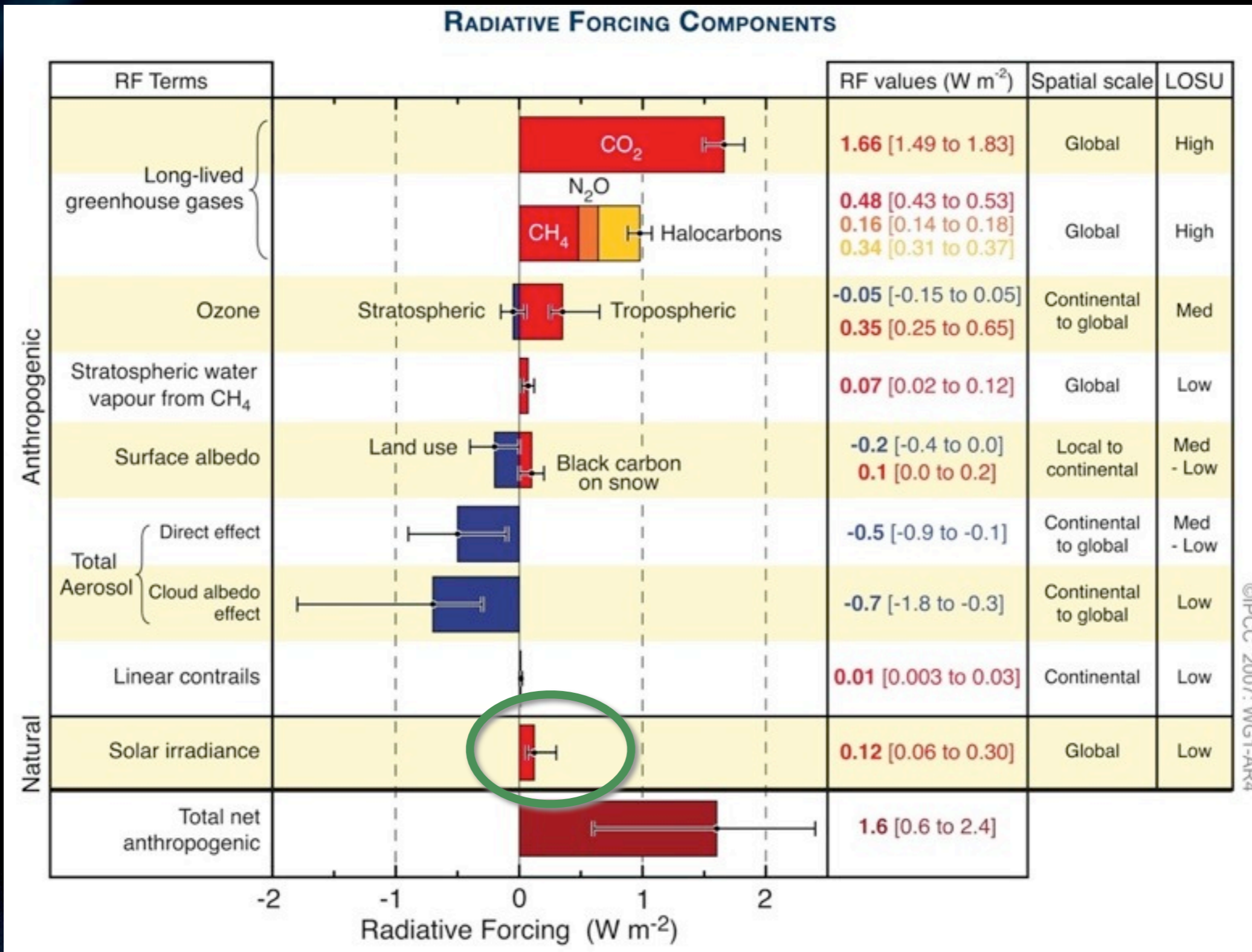
Dans son dernier ouvrage, « L'Imposture climatique »,
dénonce avec force la climatologie. Un réquisitoire

Le cent-fautes de Claude



Quelle est la contribution du Soleil ?

IPCC (2007)



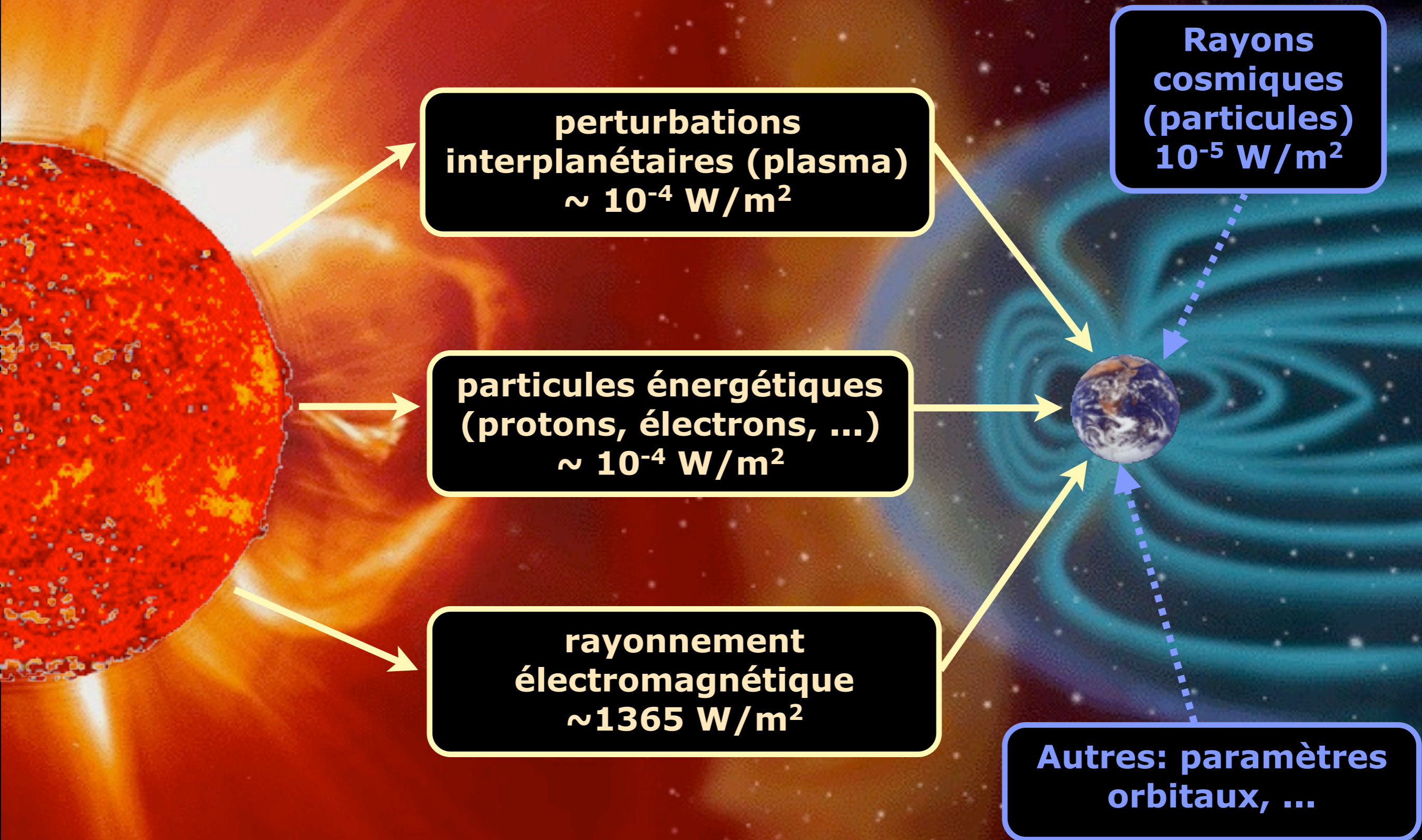
Quelques faits

- Le Soleil joue-t-il un rôle dans le réchauffement climatique ?
OUI
- Ce rôle est-il majeur face à celui des gaz à effet de serre ?
TRES PROBABLEMENT NON
- Les mécanismes sont-ils bien compris ?
EN PARTIE SEULEMENT
- Le dernier cycle solaire était-il particulier ?
OUI

Pourquoi c'est si compliqué

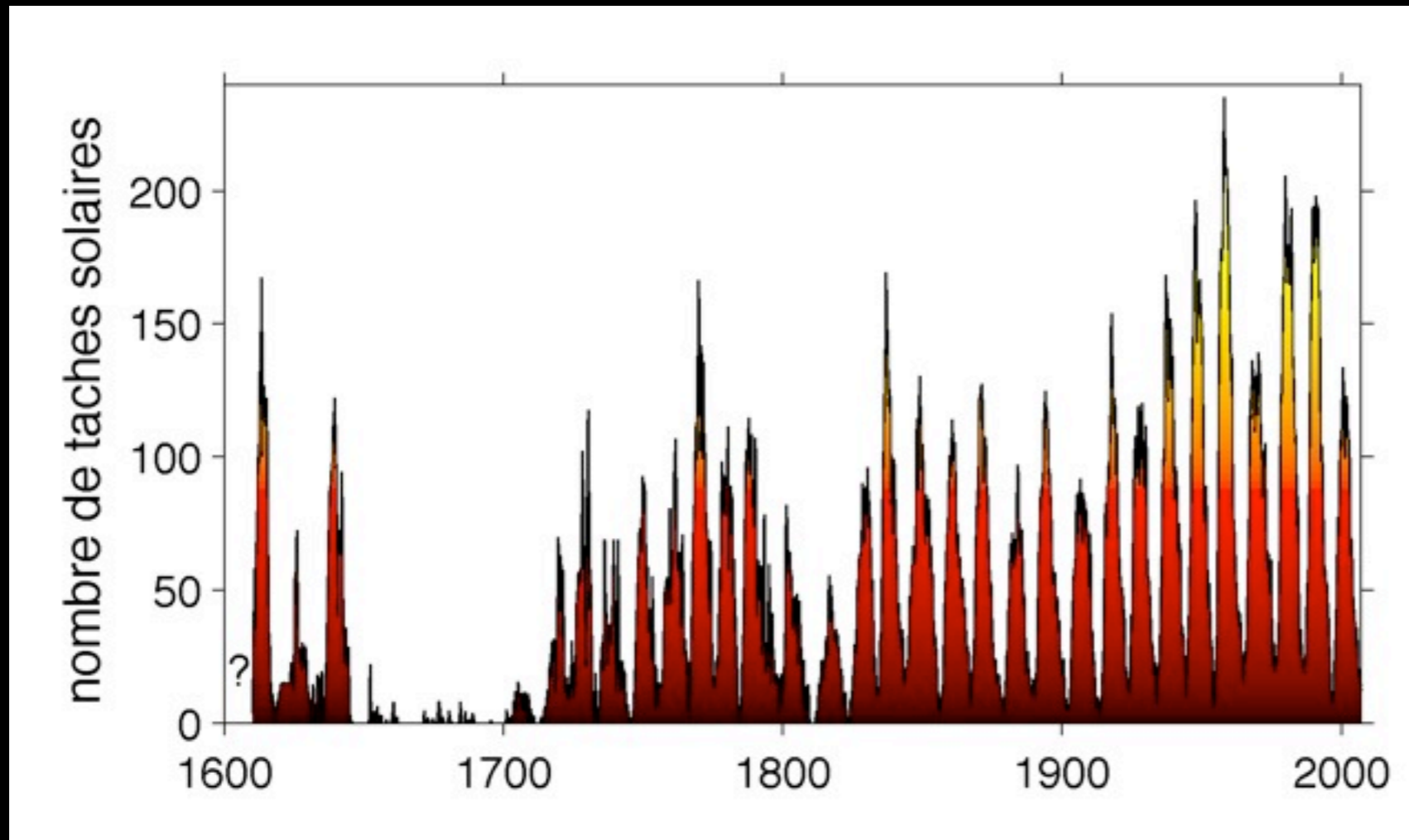
- **Les mécanismes : nombreux, couplés et non-linéaires**
- **Les échelles de temps : de 1 à 10^{16} sec**
- **Les données : faute d'observations directes, il faut aller à la pêche aux indices**

les principaux mécanismes des relations Soleil-Terre



Le cycle solaire

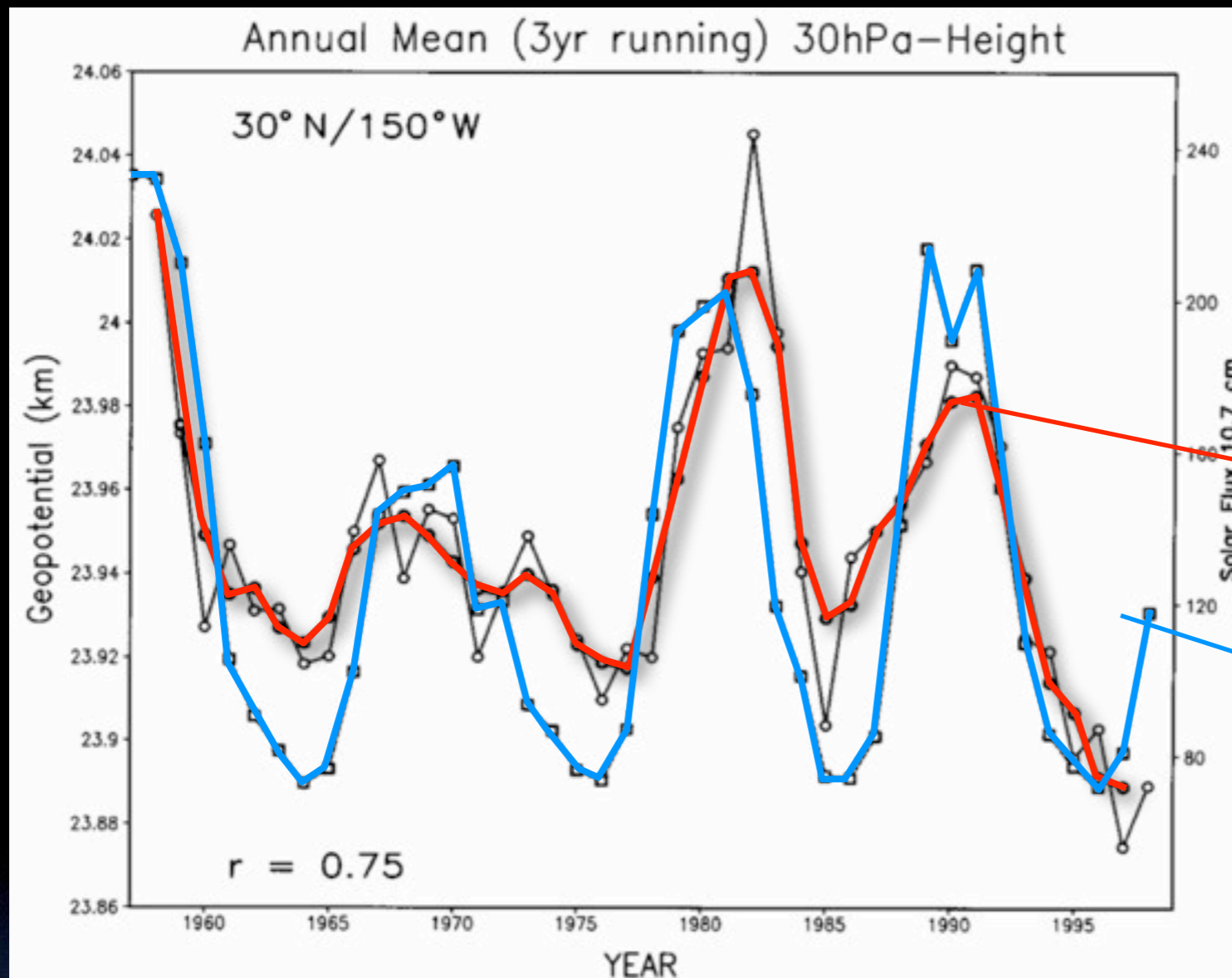
La variabilité (à moyen terme) se manifeste par le **cycle solaire de 11 ans** qui a son origine dans la dynamo solaire



2005/08/22 21:28
Champ magnétique
photosphérique
(SOHO/MDI)

Le Soleil influence le climat

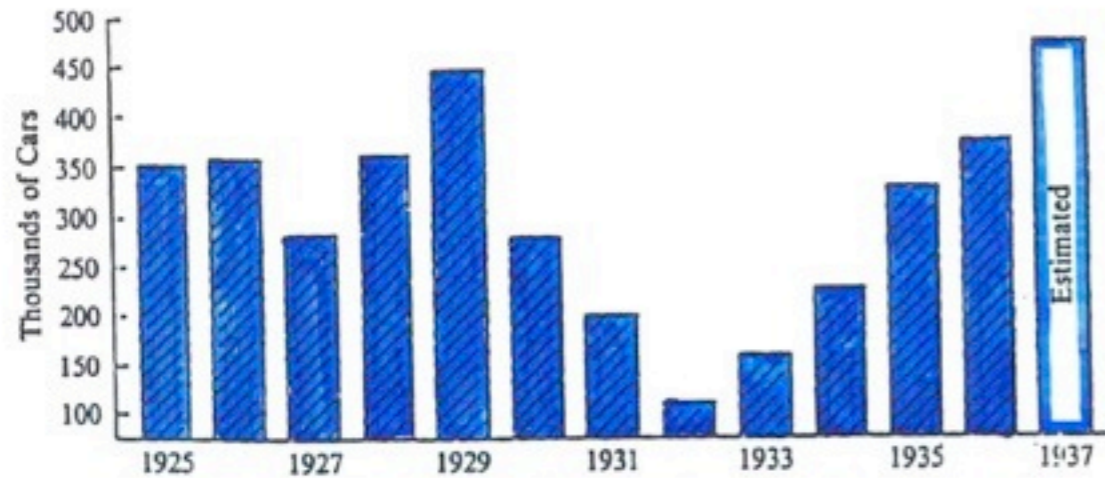
La signature du cycle solaire est omniprésente dans les données climatiques



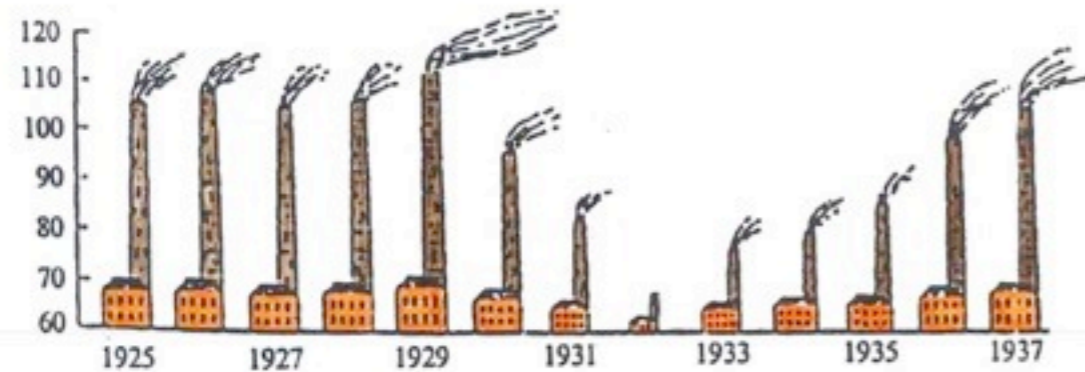
Altitude géopotentielle moyenne de 30 hPa

Activité solaire (émission à 10.7 cm)

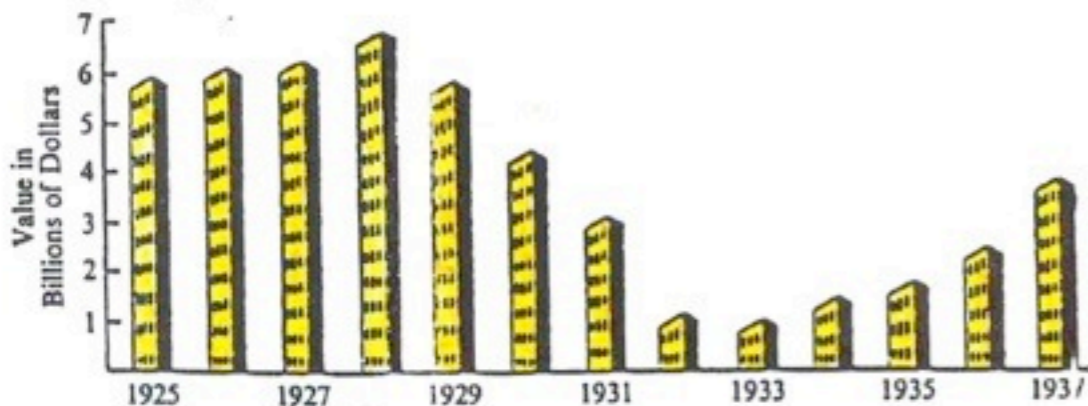
Des cycles de 11 ans partout !



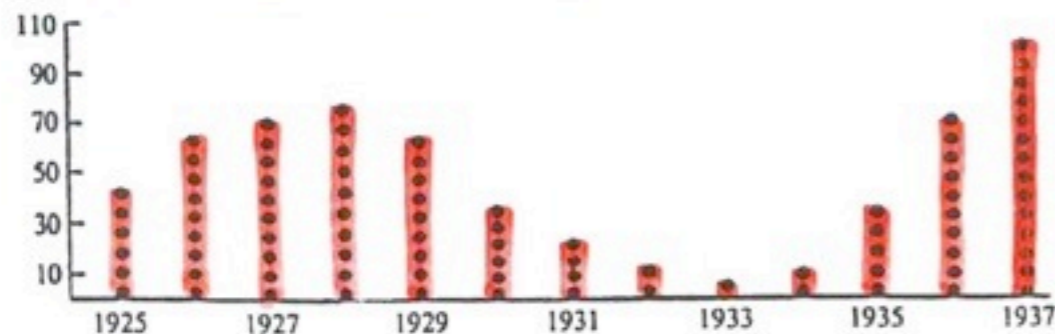
Production de l'industrie automobile



Production de l'industrie lourde



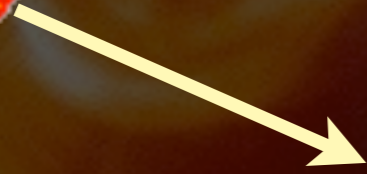
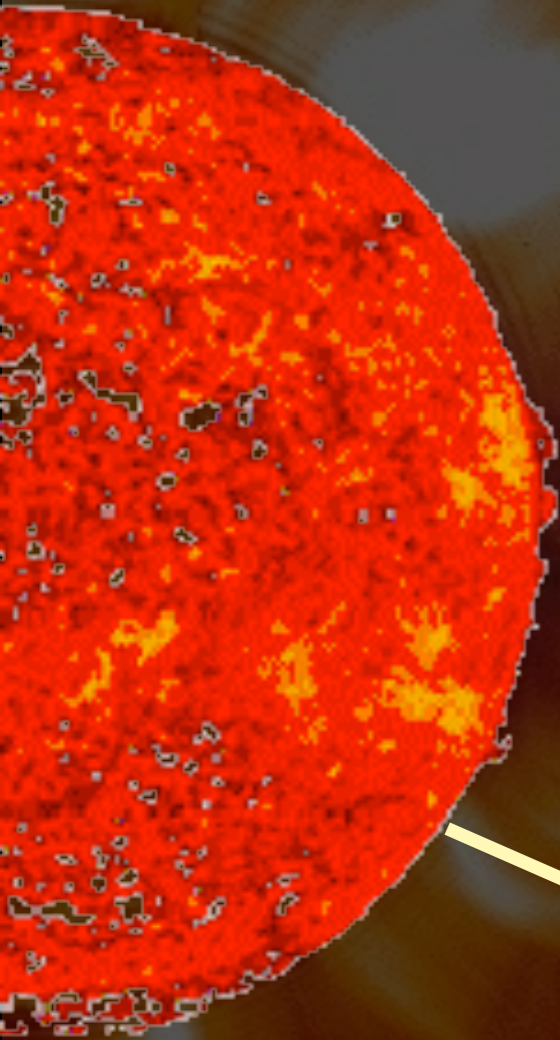
Production de l'industrie du bâtiment



Nombre de taches solaires

Corrélation \neq causalité

les principaux mécanismes des relations Soleil-Terre



**rayonnement
électromagnétique
 $\sim 1365 \text{ W/m}^2$
"La constante solaire"**



Irradiance totale

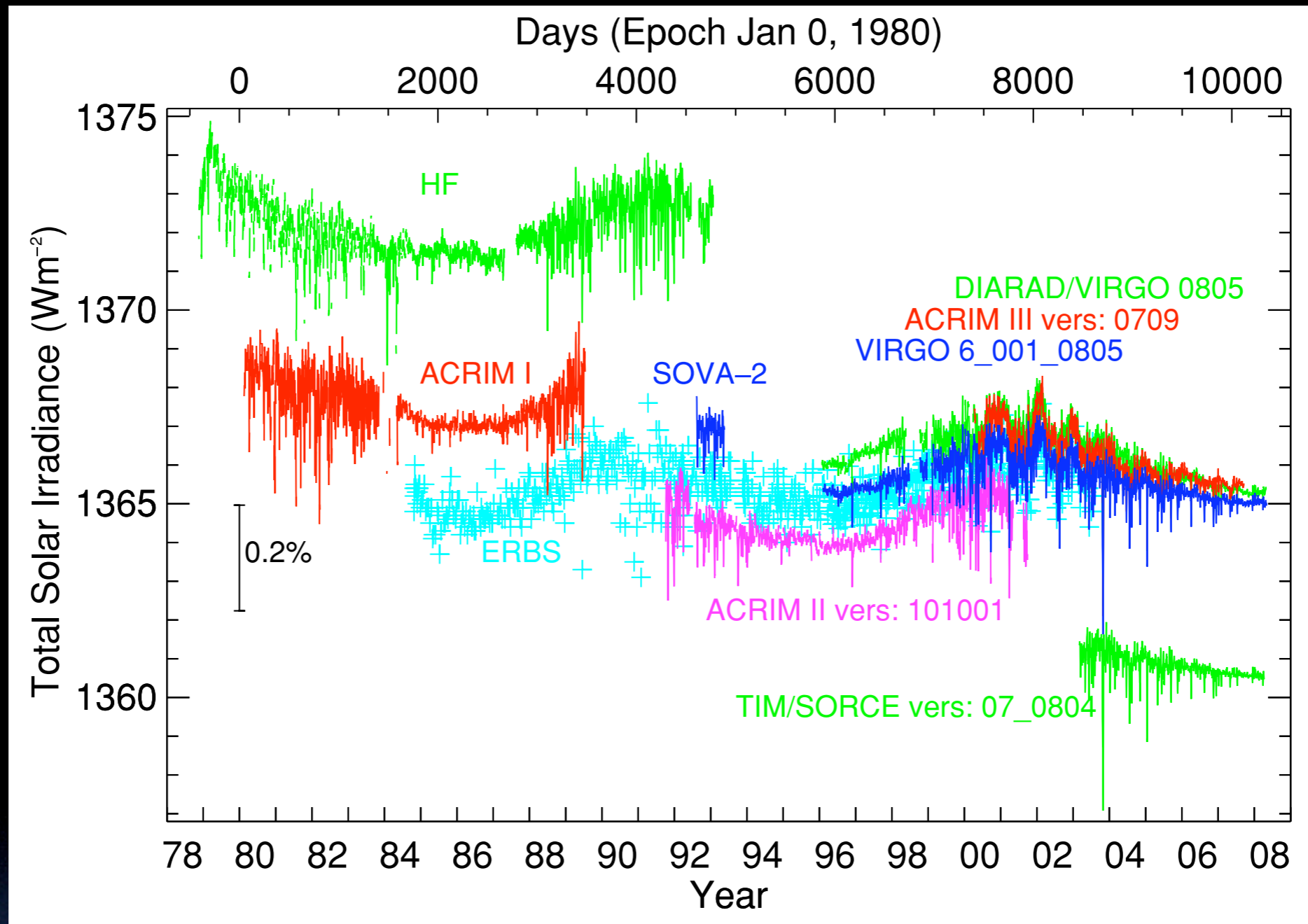
- La constante solaire (TSI) a reçu beaucoup d'attention

$$\text{TSI} = \int_0^{+\infty} P(\lambda) d\lambda \approx 1365 [W m^{-2}]$$

- Or cette quantité n'est mesurée que depuis 1978
- Sa mesure est très délicate et sujette à caution

Irradiance totale

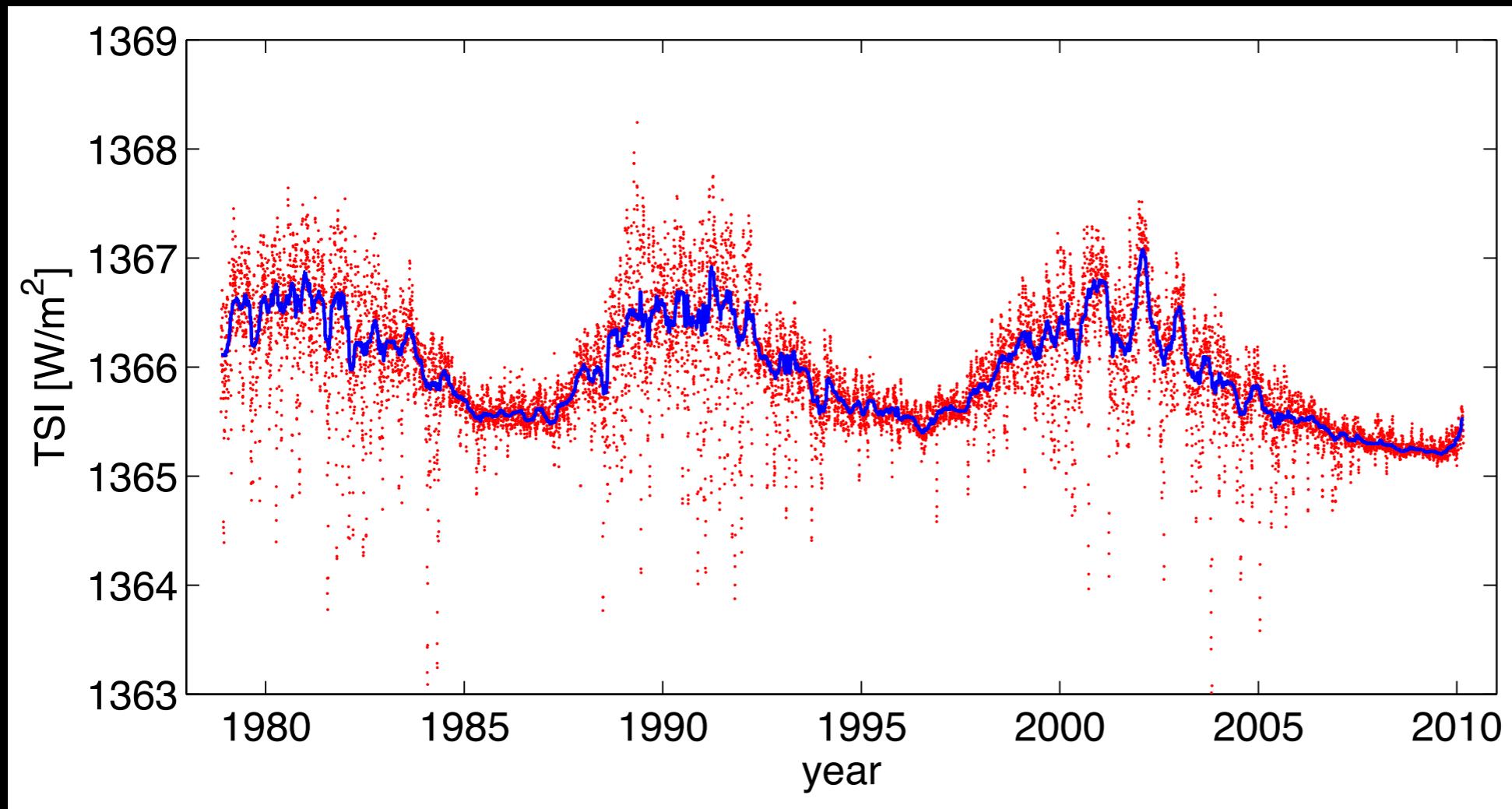
- La calibration absolue des radiomètres est un gros problème



Fröhlich [2009]

Irradiance totale

- La variation relative de l'irradiance est trop faible pour expliquer les variations de température sur Terre

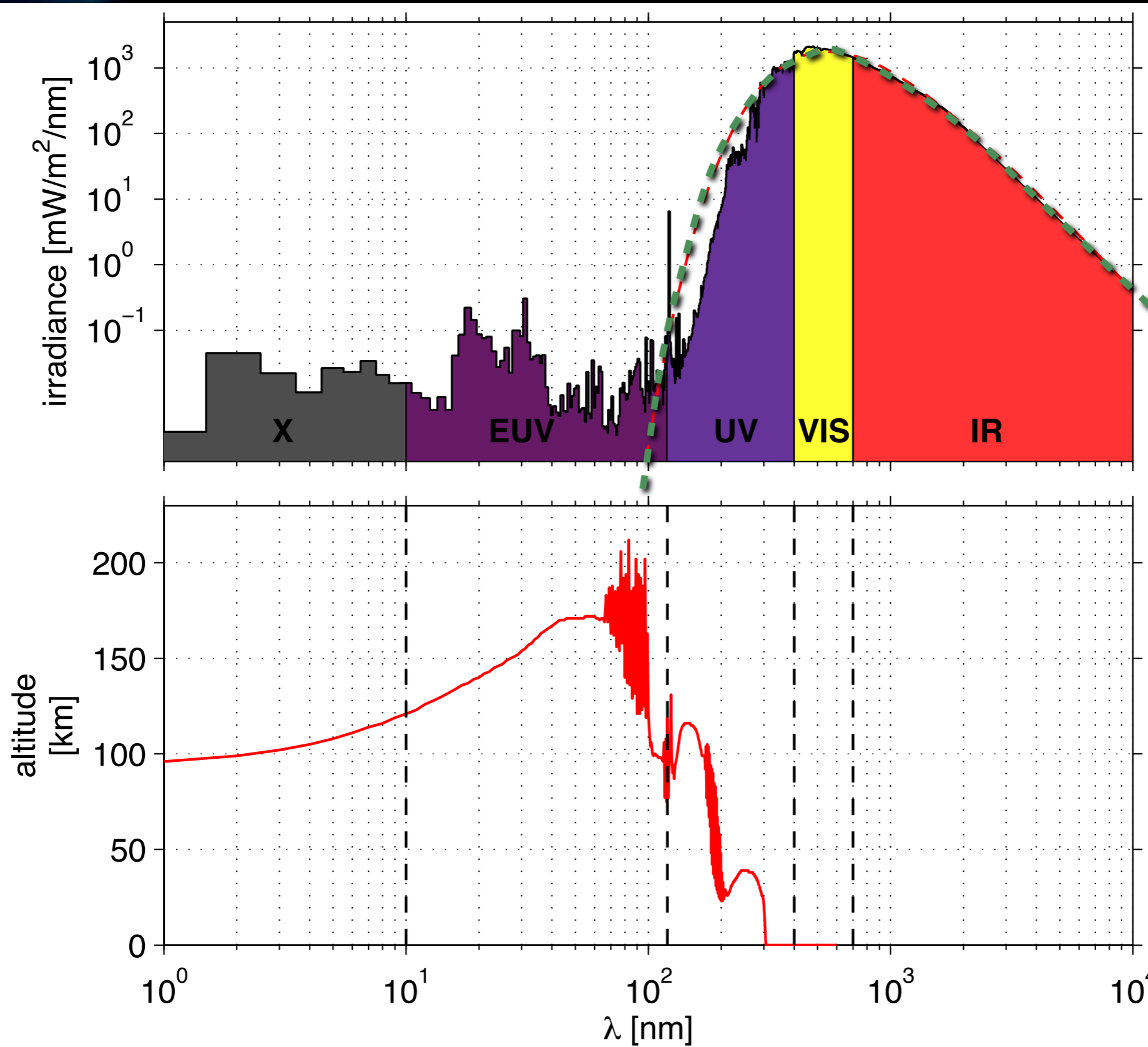


↑
↓
 $1 Wm^{-2} = 0.1 \%$

Il faudrait une amplitude 2-4 plus importante pour expliquer les variations observées sur Terre

C'est trop simpliste de réduire tout le forçage radiatif à un seul paramètre (TSI)

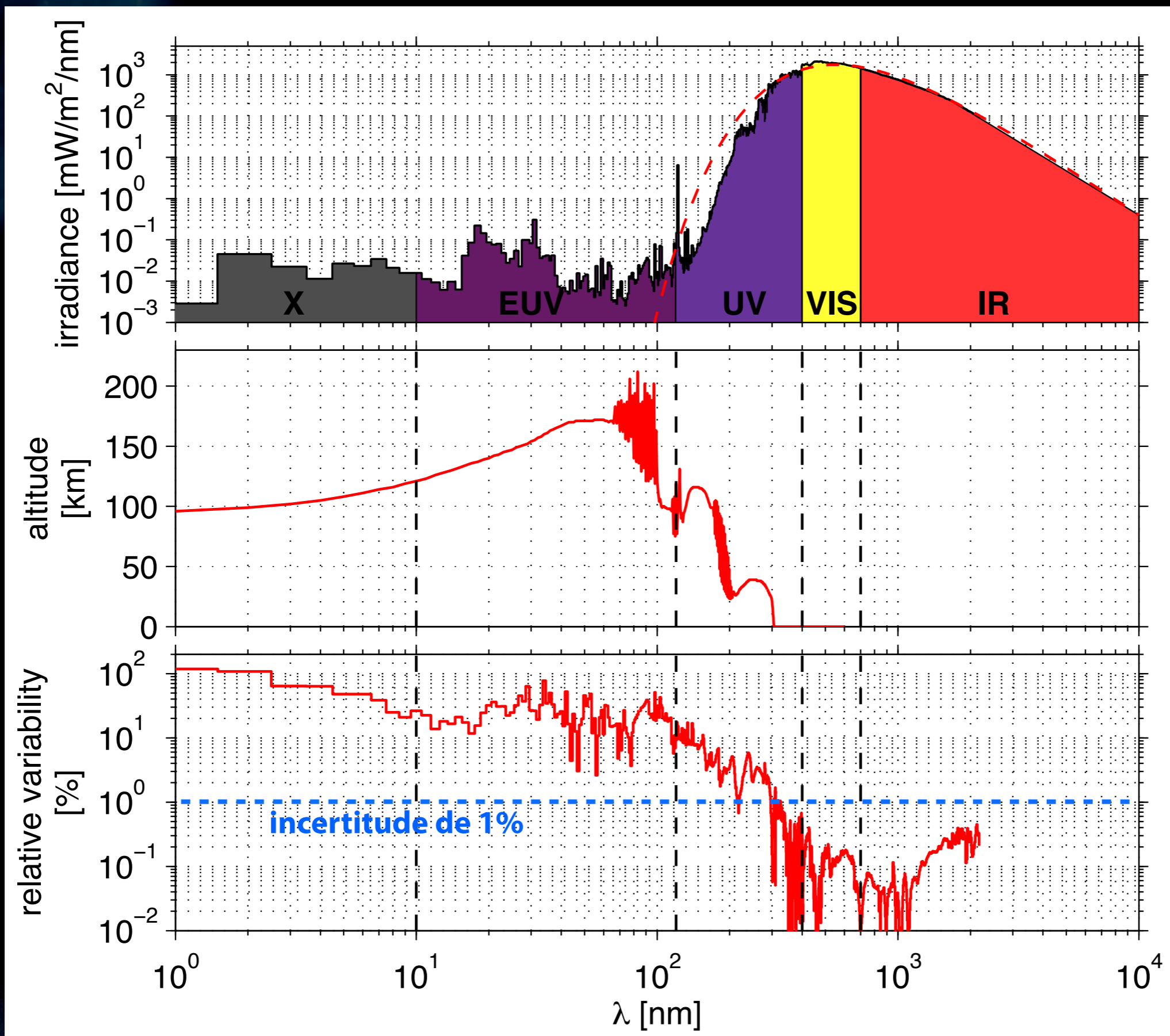
Le spectre solaire



**spectre
solaire**

**corps noir
à 5770°**

**altitude
d'absorption**



**spectre
solaire**

**altitude
d'absorption**

**variabilité
relative sur
11 ans**

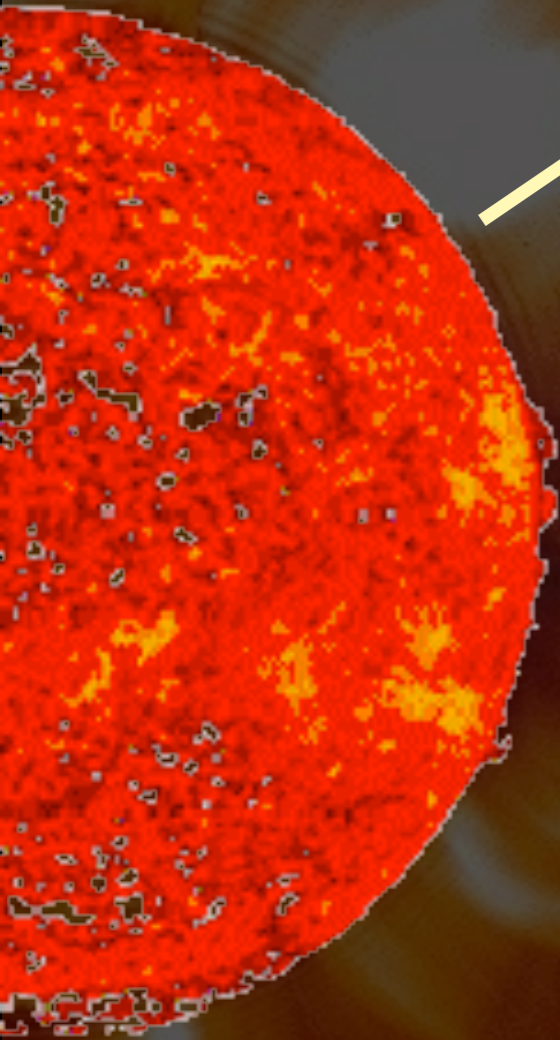
SORCE & TIMED (2003-2010)

Bilan

- La composante UV, bien que faible, pourrait servir de levier
- Mais comment un effet à haute altitude peut-il affecter la troposphère ?
 - modulation du taux d'O₃ → modification du bilan radiatif ?
 - réchauffement → gradients → ondes planétaires → circulation générale ?

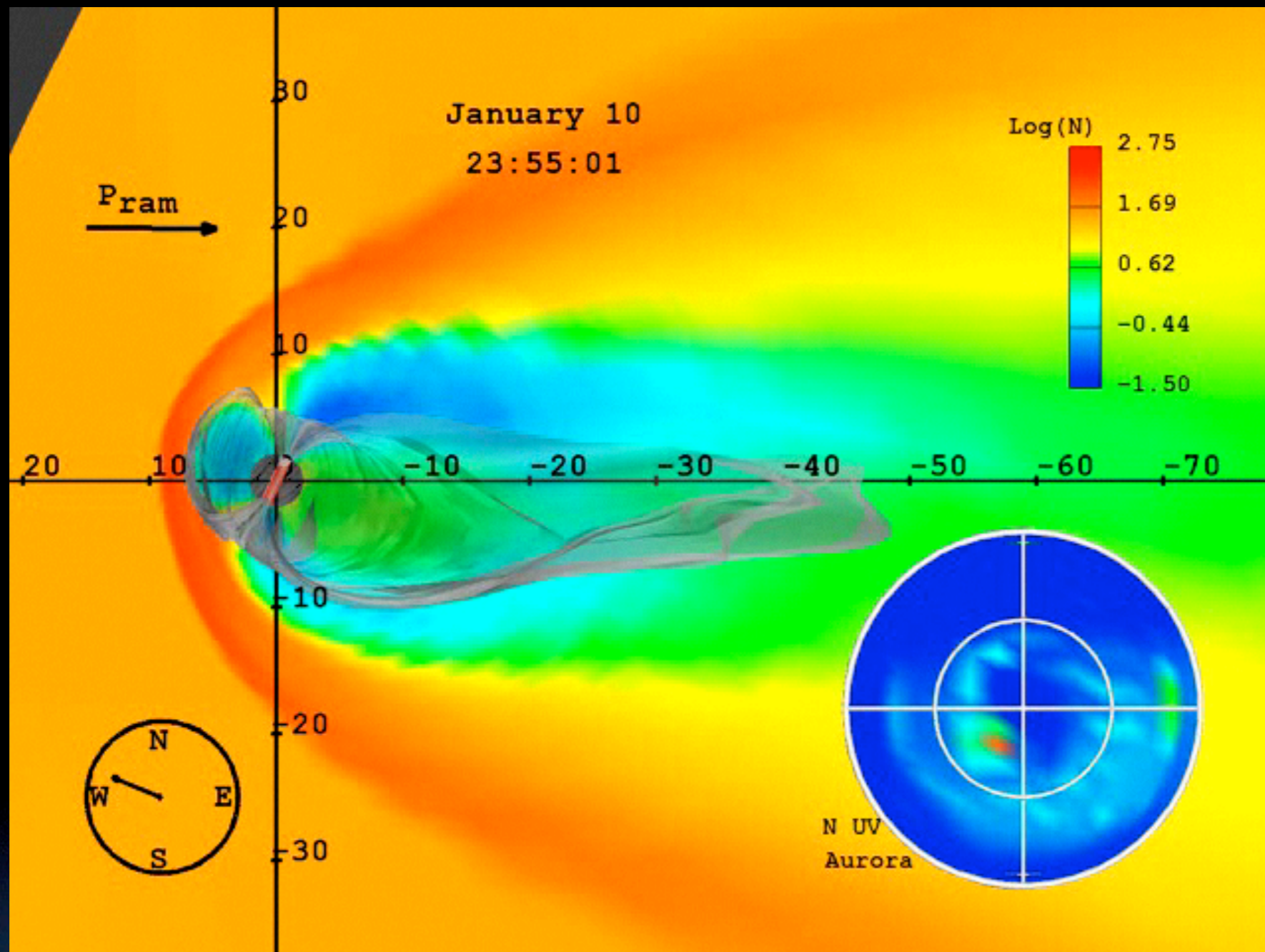
les principaux mécanismes des relations Soleil-Terre

**perturbations
interplanétaires (plasma)
 $\sim 10^{-4} \text{ W/m}^2$**



Perturbations interplanétaires

La magnétosphère résulte d'un **équilibre dynamique** entre le champ géomagnétique et le vent solaire



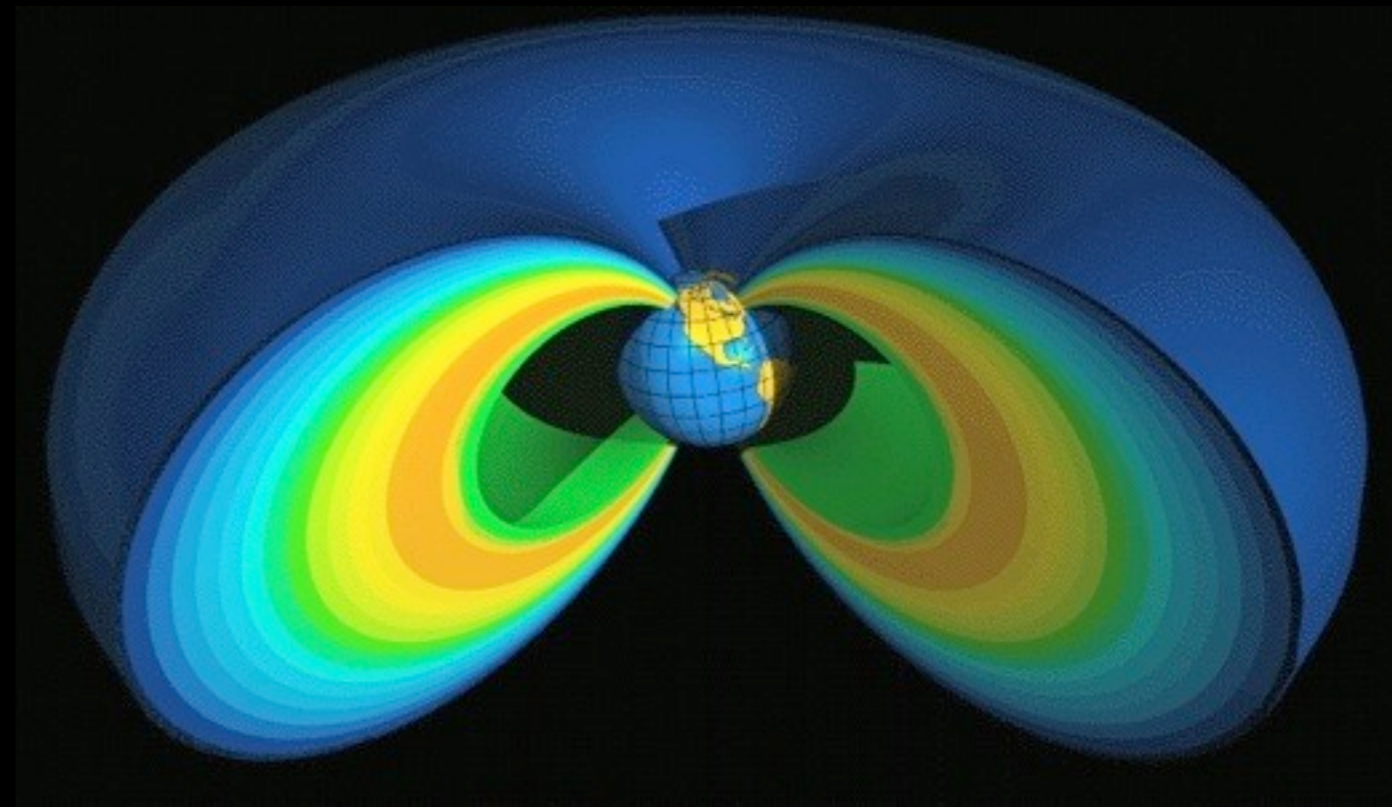
animation:
simulation de la
cavité
magnétosphérique
(Rice University)

Perturbation du champ géomagnétique

Ces perturbations viennent peupler les **ceintures de radiation** de particules de haute énergie (e^- , p^+ , ...)

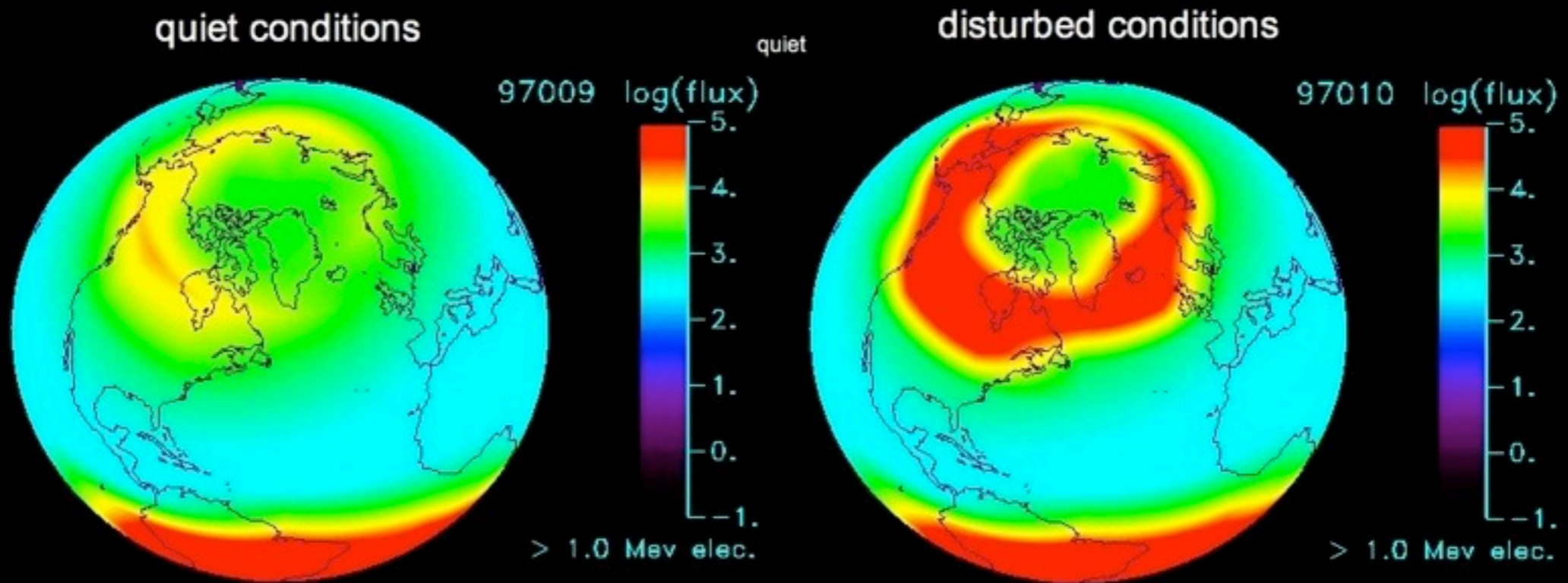
Ces particules peuvent ensuite y rester des mois

Une partie vient se précipiter dans la haute atmosphère, à haute latitude.



Perturbations interplanétaires

Dans les jours qui suivent l'orage magnétique, des particules énergétiques se précipitent, provoquant des réactions chimiques (NOx)

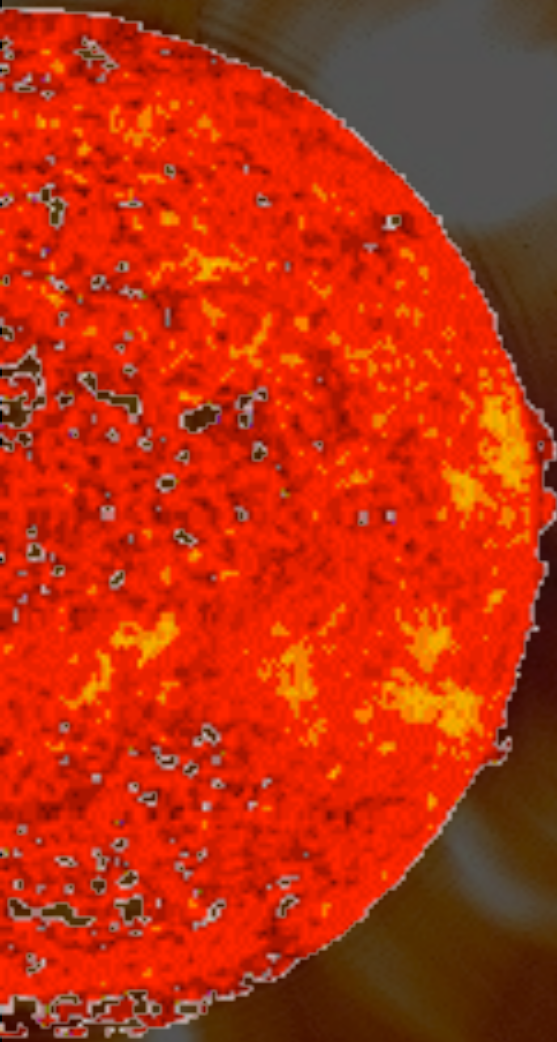


Flux d'électrons avant/après un orage géomagnétique (SAMPEX)

Bilan

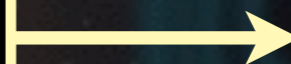
- Les perturbations du vent solaire affectent l'environnement terrestre d'une multitude de façons.
- Mais
 - L'ionosphère se "reform" toutes les 24h (peu de mémoire)
 - Effets surtout à haute altitude/latitude

les principaux mécanismes des relations Soleil-Terre



**particules énergétiques
(protons, électrons, ...)
 $\sim 10^{-4} \text{ W/m}^2$**

100 keV - 100 MeV



**Rayons
cosmiques
(particules)
 10^{-5} W/m^2**

MeV - TeV

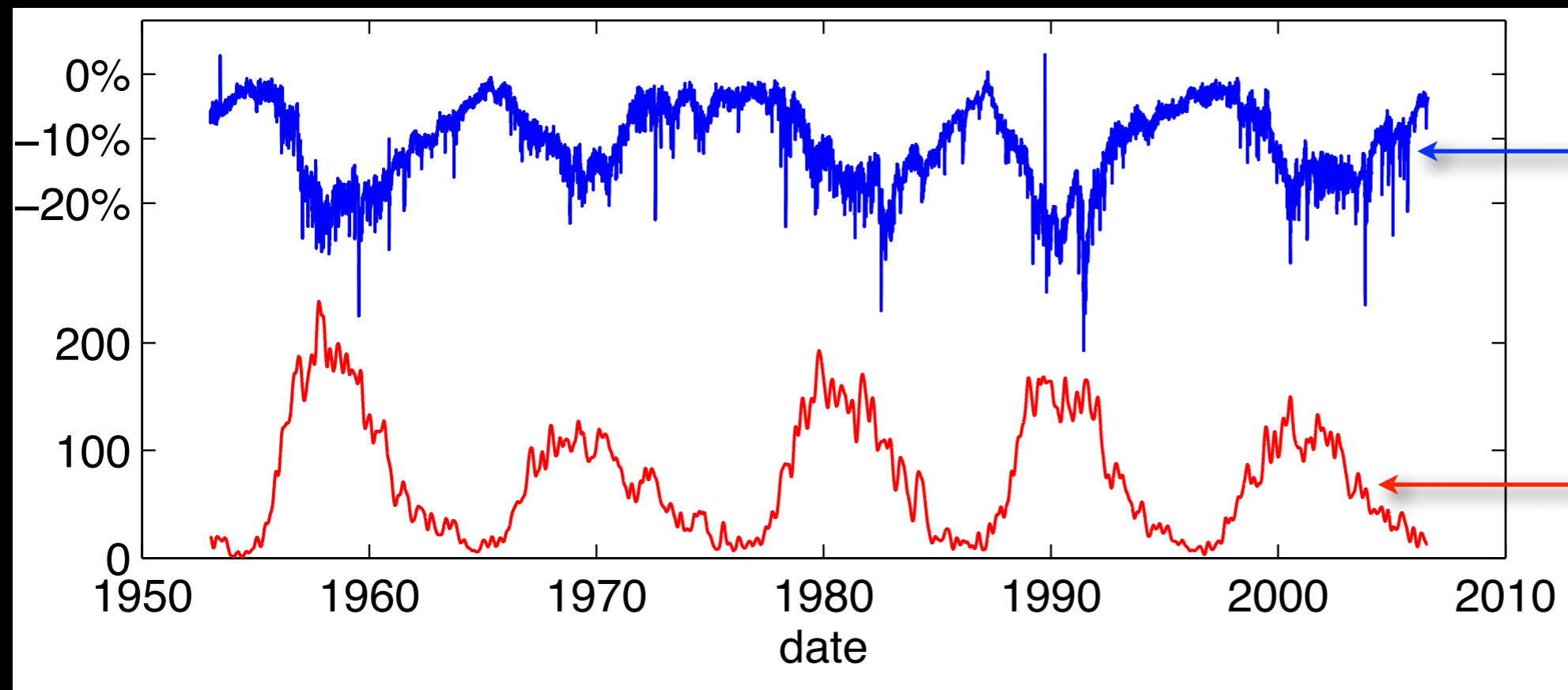


Rayonnement cosmique

Un mécanisme très simple :

Soleil actif

- ▣▣▣▣➔ champ magnétique plus intense et plus turbulent
- ▣▣▣▣➔ rayonnement cosmique réduit sur Terre



Variation relative
du flux de
neutrons (Climax)

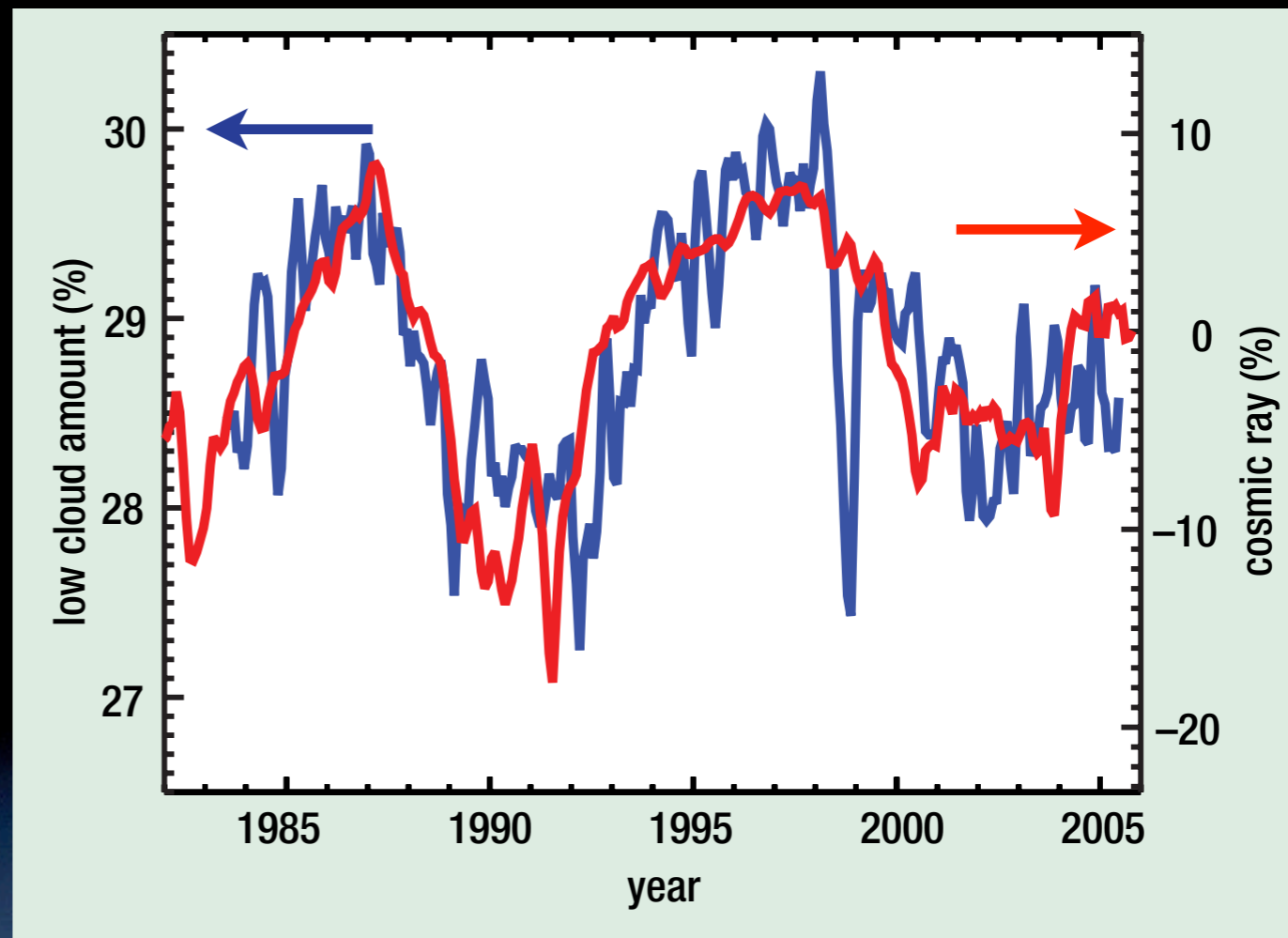
nombre de
taches solaires

Cosmoclimatologie

Le rayonnement cosmique pourrait affecter la nébulosité :

rayonnement cosmique \rightarrow noyaux de condensation \rightarrow nébulosité

Corrélation entre la nébulosité à basse altitude et le flux de rayons cosmiques



Svensmark (2007)

Bilan

- **Particules énergétiques solaires : impact négligeable**
- **La théorie de la cosmoclimatologie à été contredite par de nombreuses observations** [Erlykin et al. 2010, Usoskin 2009]
- **Mais il reste des incertitudes**
 - microphysique des nuages (expérience CLOUD)
 - impact sur le circuit électrique (projet TARANIS)
 - impact sur les aérosols



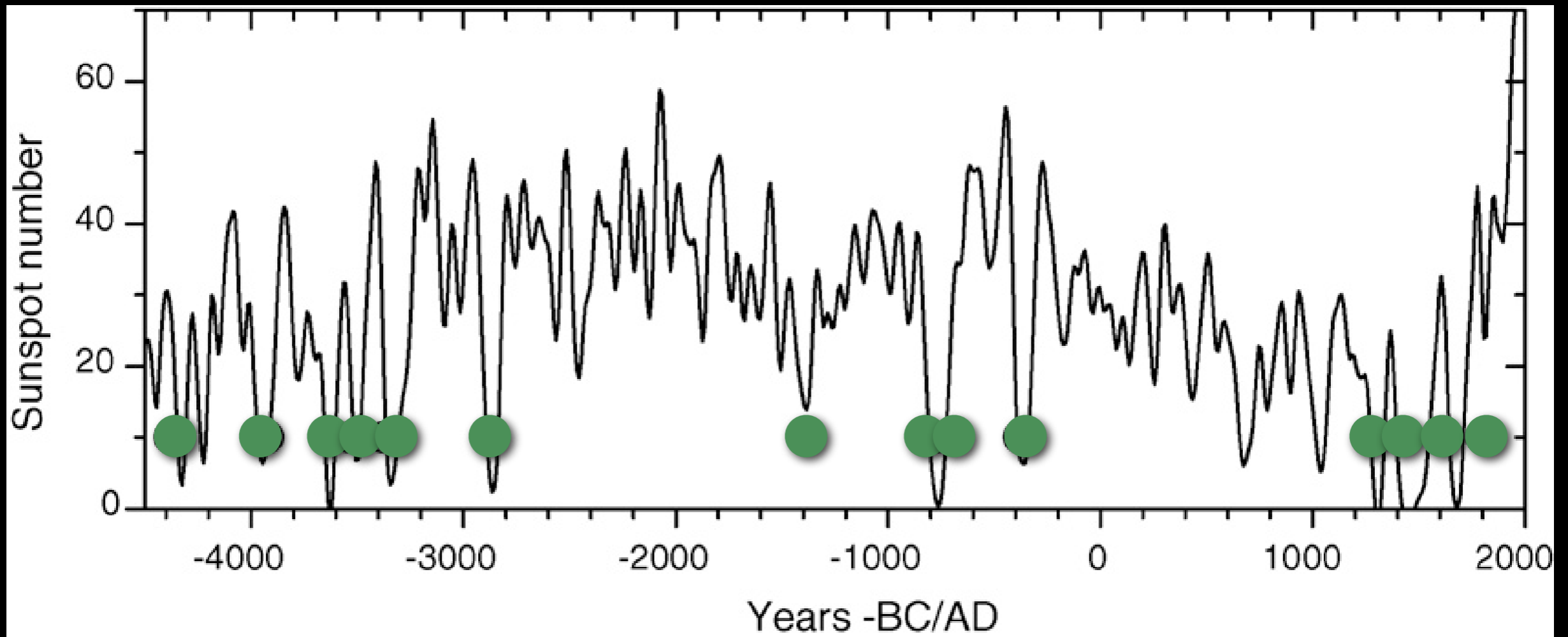
Comment progresser ?

Comment progresser ?

- **Reconstruire l'activité solaire dans le passé à partir d'indicateurs**
- **Comparer le Soleil à d'autres étoiles (analogues solaires)**
- **Comprendre ce qui s'est passé lors du minimum de Maunder (1645-1715)**
- **Interagir avec les climatologues...**

Le rayonnement cosmique en tant que diagnostic

Nombre de taches solaires reconstruit à partir de la concentration en isotopes cosmogéniques (^{14}C , ^{10}Be , ...)

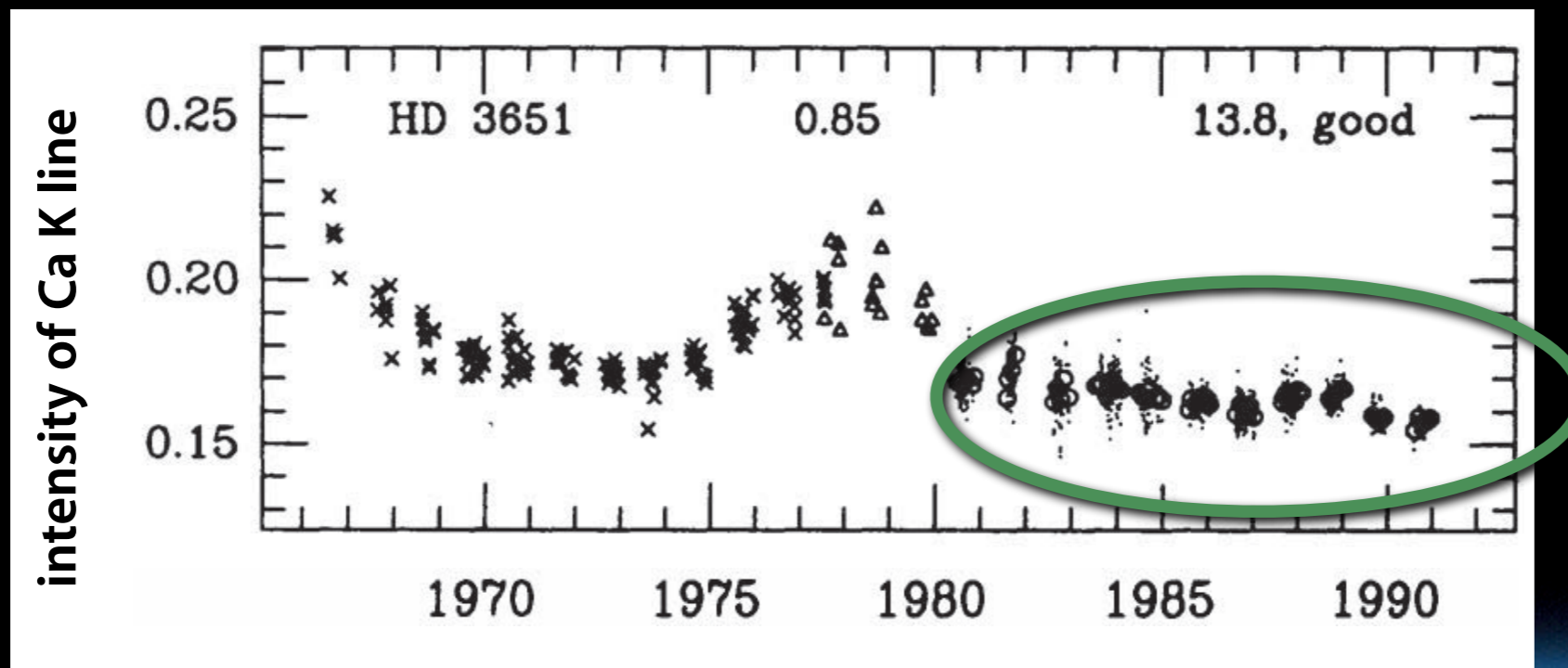


Usoskin [2008]

Corrélation entre faible activité solaire et changement de régime des pluies

Sun-as-a-star

- La plupart des analogues solaires ont aussi un cycle solaire régulier de quelques années [Hall, 2008]
- Mais certaines sont dans un **état de léthargie** = équivalent du minimum de Maunder ?



[Baliunas et al. 1998]

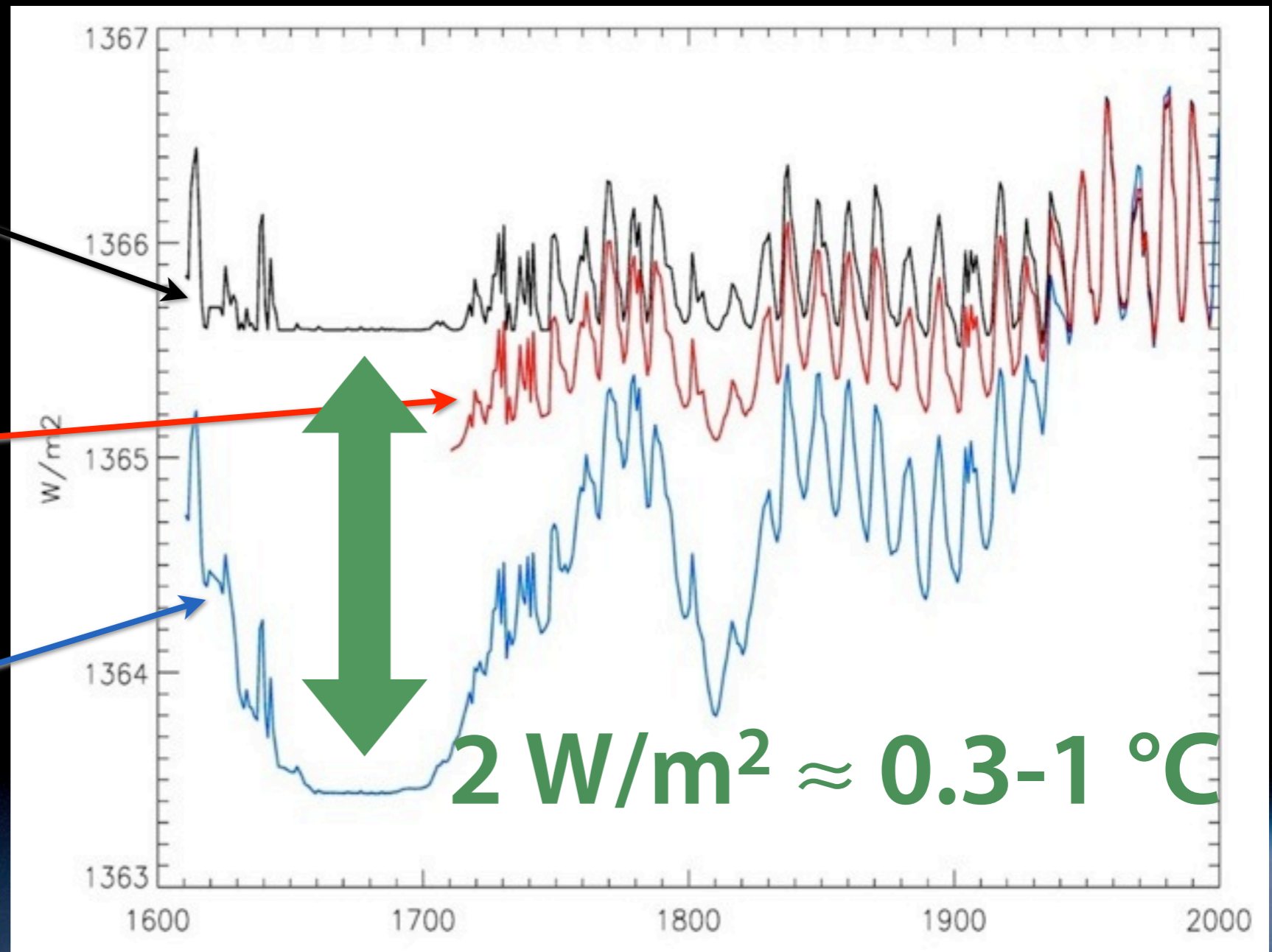
Reconstruction de l'irradiance totale

Différentes hypothèses conduisent à différentes reconstructions

Extrapolation à partir
du nombre de taches
solaires

idem + correction du
champ magnétique
photosphérique

idem + prise en
compte de données
d'étoiles similaires

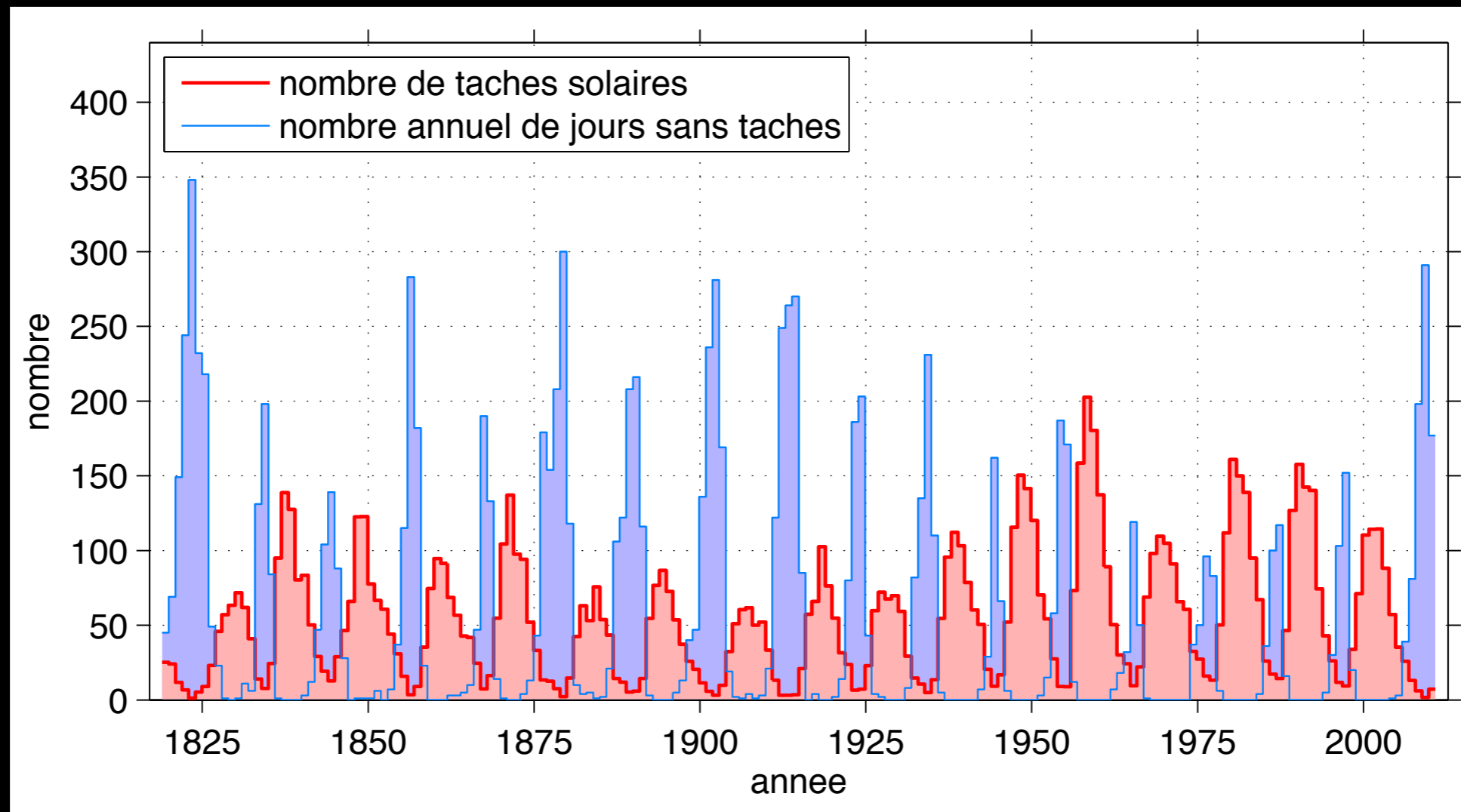




**Le dernier cycle était-il
particulier ?**

Un long cycle solaire

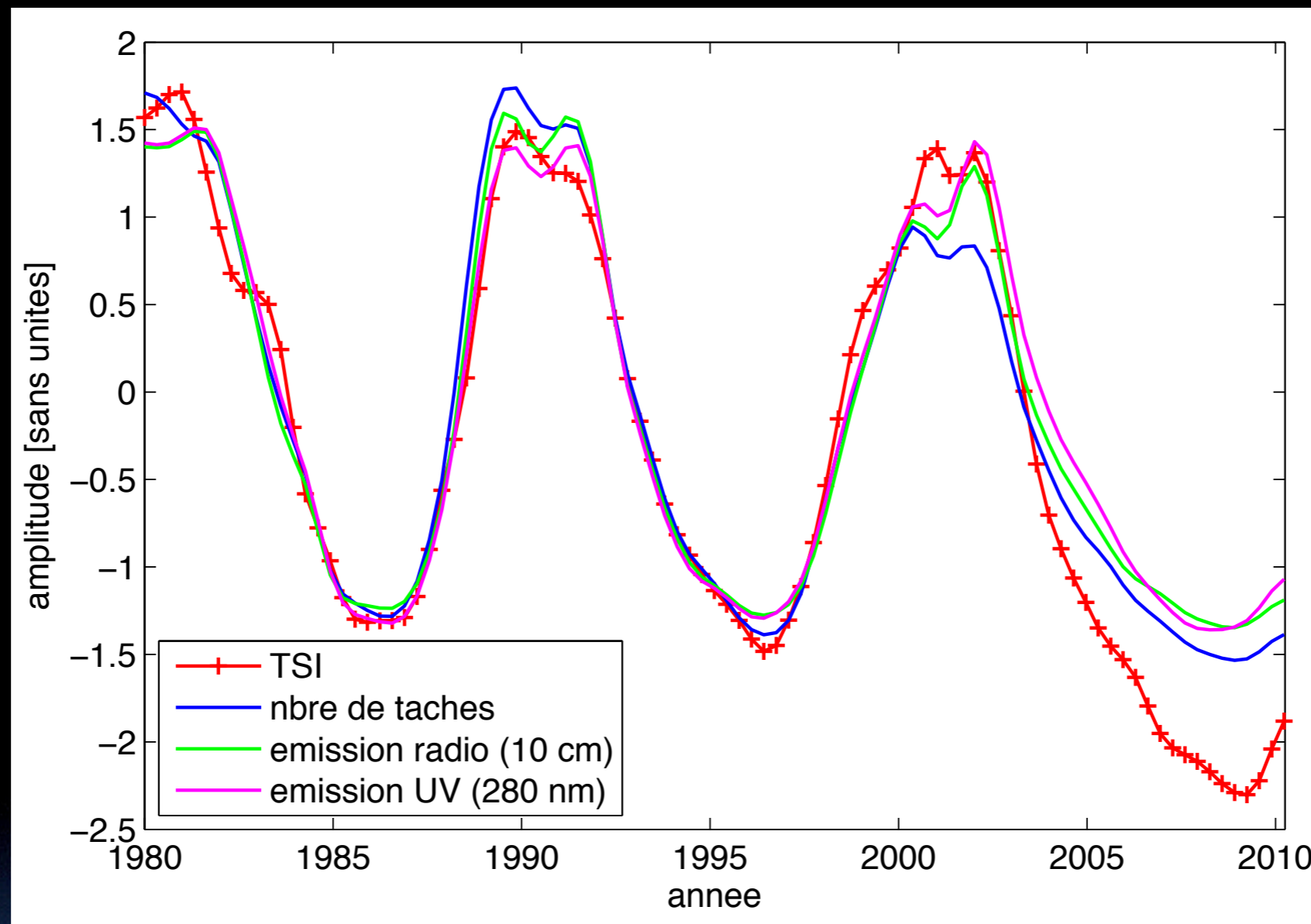
- Le cycle solaire qui s'est achevé en 2009 fut exceptionnellement long (13 ans) après 50 ans de forte activité



**Le Soleil est-il en train de
changer de régime ?**

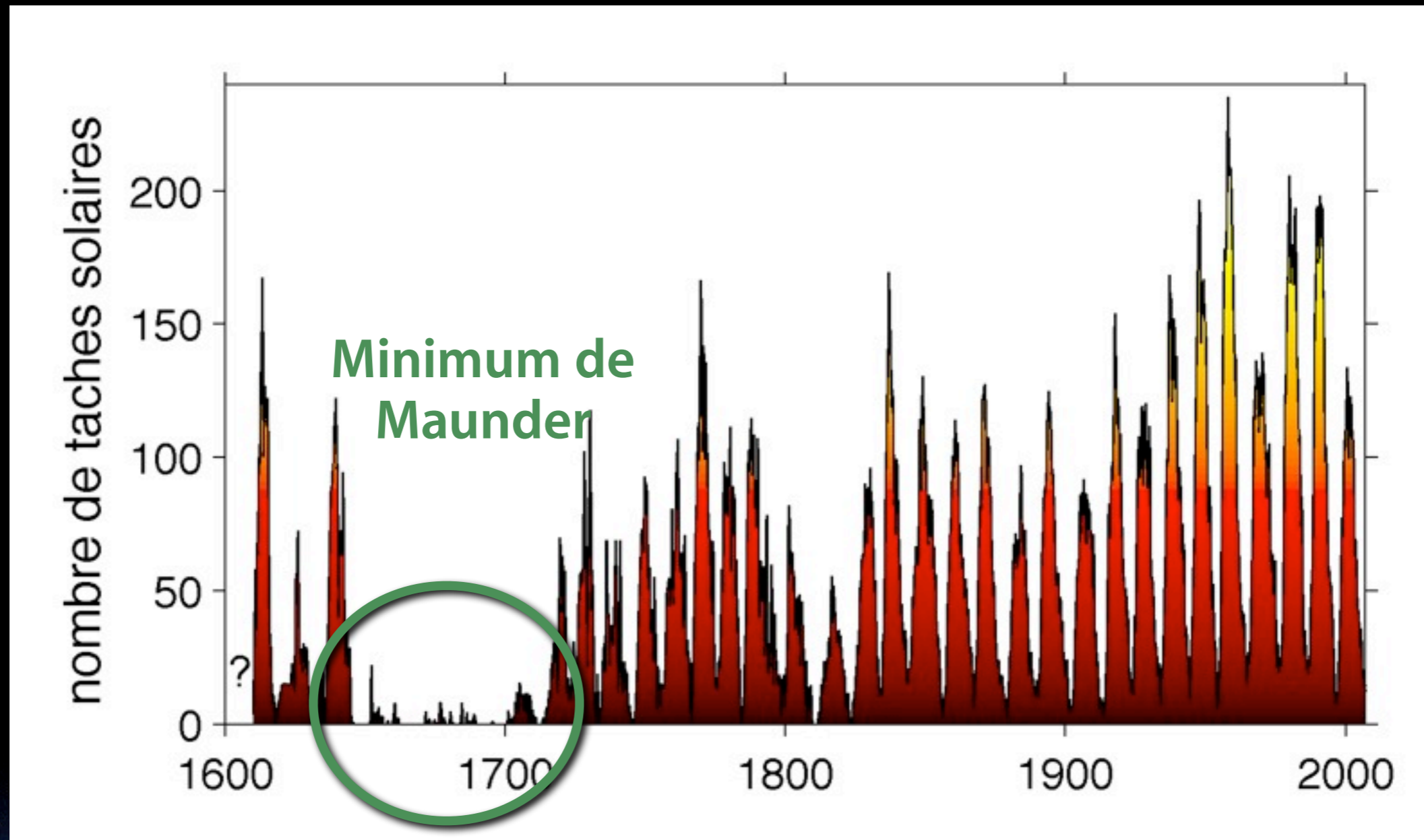
Un long cycle solaire

- Divers indicateurs d'activité solaire montrent que la fin du dernier cycle fut anormale



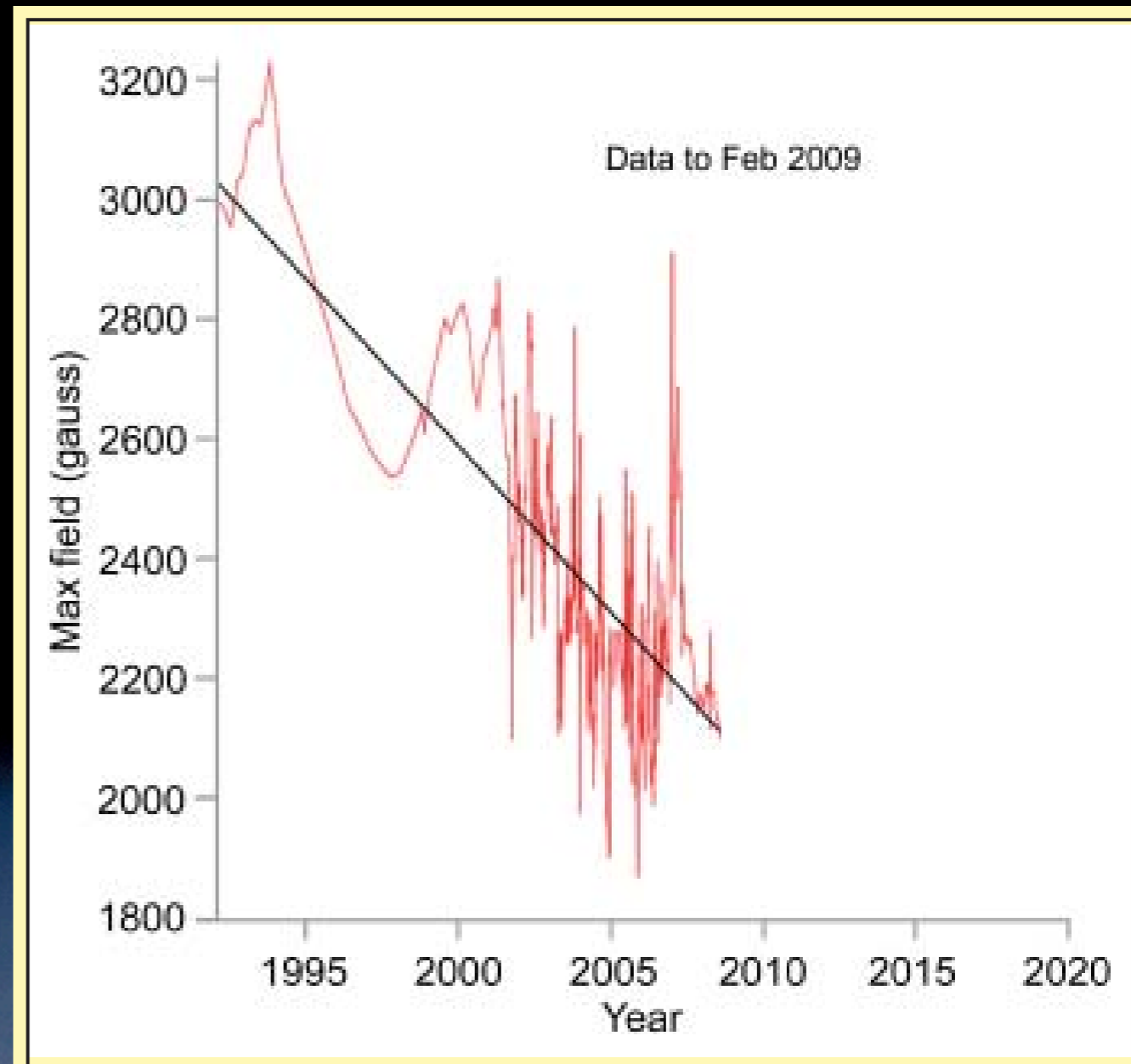
Un long cycle solaire

- Le Soleil pourrait-il connaître un nouveau minimum de Maunder ?



Un long cycle solaire

- Les observations montrent que le champ magnétique dans les taches solaires faiblit lentement
- Champ des taches plus faible
 - ▣ taches moins froides
 - ▣ taches moins contrastées
 - ▣ cycle solaire moins prononcé dans la TSI



Conclusion : de gros défis !

- **Nous manquons de recul**
 - 30 ans de recul seulement = il faut recourir à d'autres indices (^{10}Be , ...)
 - mais des nouvelles données de qualité sont là : PICARD, SDO, ...
- **Le système est fortement couplé**
 - la variabilité naturelle de l'atmosphère terrestre est forte
 - un périodicité de 11 ans n'implique pas forcément un forçage solaire !
 - corrélation \neq causalité
- **Le système est fortement non-linéaire**
 - rétroactions positives : gare à la linéarisation