



La fin d'un long cycle solaire

et le climat alors ?

Thierry Dudok de Wit

Laboratoire de Physique et Chimie de l'Environnement et de l'Espace

Observatoire des Sciences de l'Univers en région Centre

Une fabuleuse source d'énergie

Quelques chiffres

- La puissance rayonnée par le Soleil est de 4×10^{23} kW
- 1 seconde de cette puissance permettrait de couvrir ~ 840 ans des besoins énergétiques mondiaux actuels
- 99.99% de l'énergie reçue par la Terre nous parvient sous forme de rayonnement solaire

Enfonçons des portes ouvertes

- Le Soleil est le coupable désigné pour expliquer les variations climatiques terrestres
- Mais n'est-il pas immuable ?



Quel est le PIB du Soleil ?

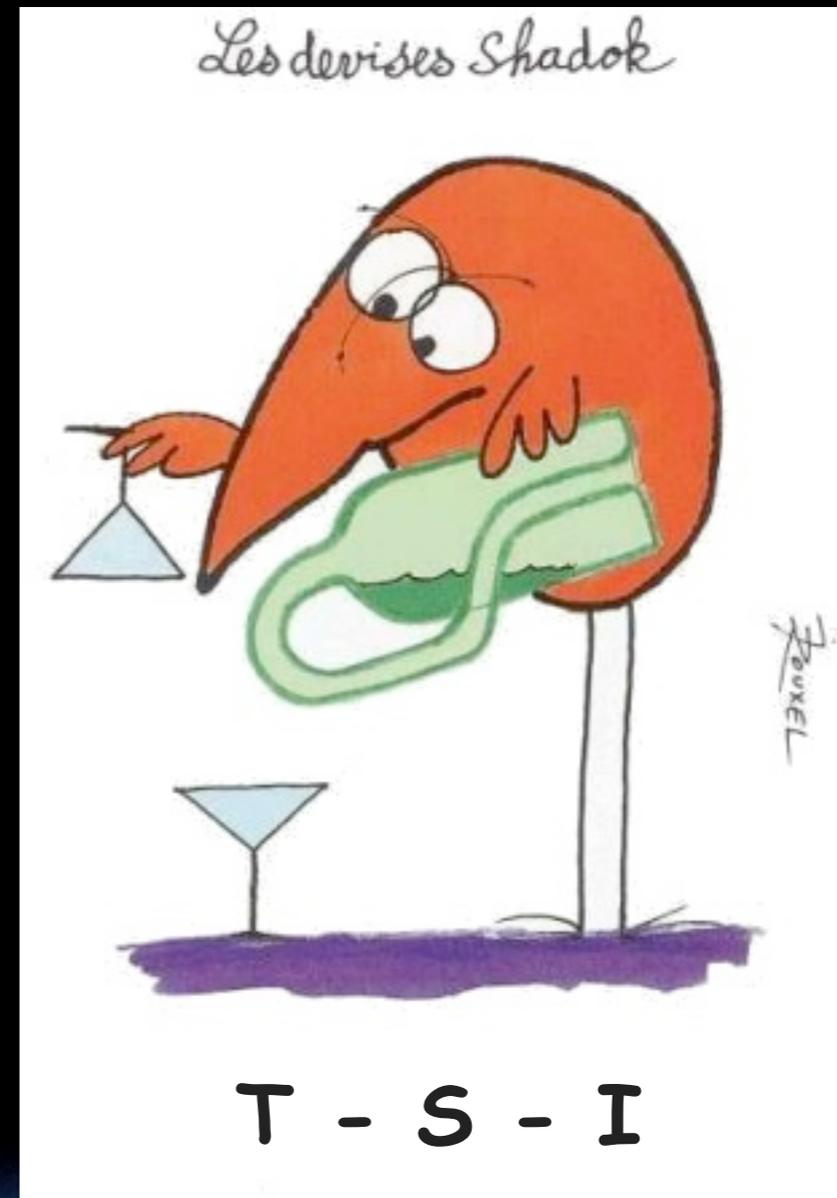
Rapport de la Commission sur la mesure des performances économiques et du progrès social

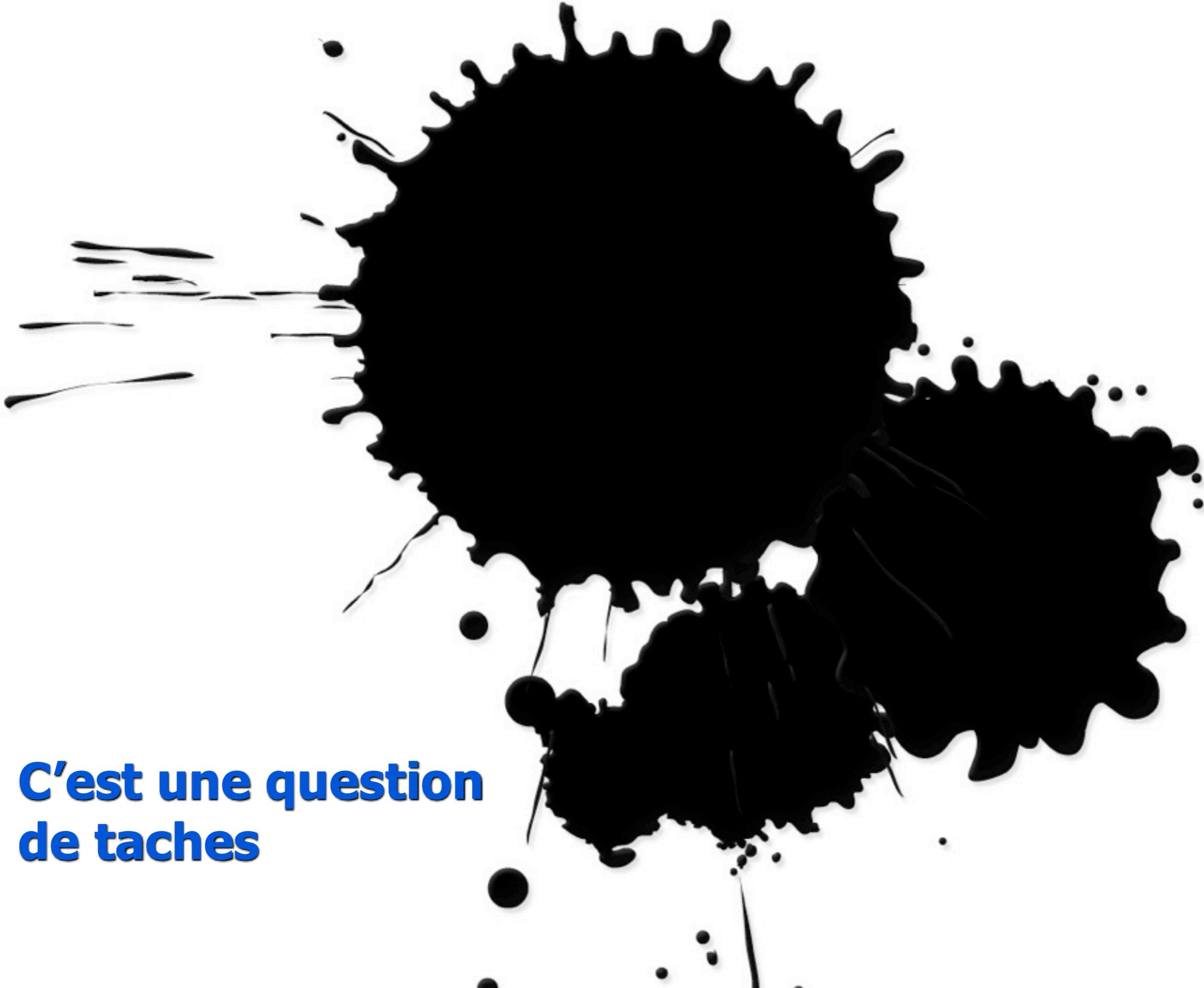
Professeur Joseph E. STIGLITZ,
Président de la Commission, Columbia University

Professeur Amartya SEN,
Conseiller de la Commission, Harvard University

Professeur Jean-Paul FITOUSSI,
Coordinateur de la Commission, IEP

Notre PIB sera la TSI





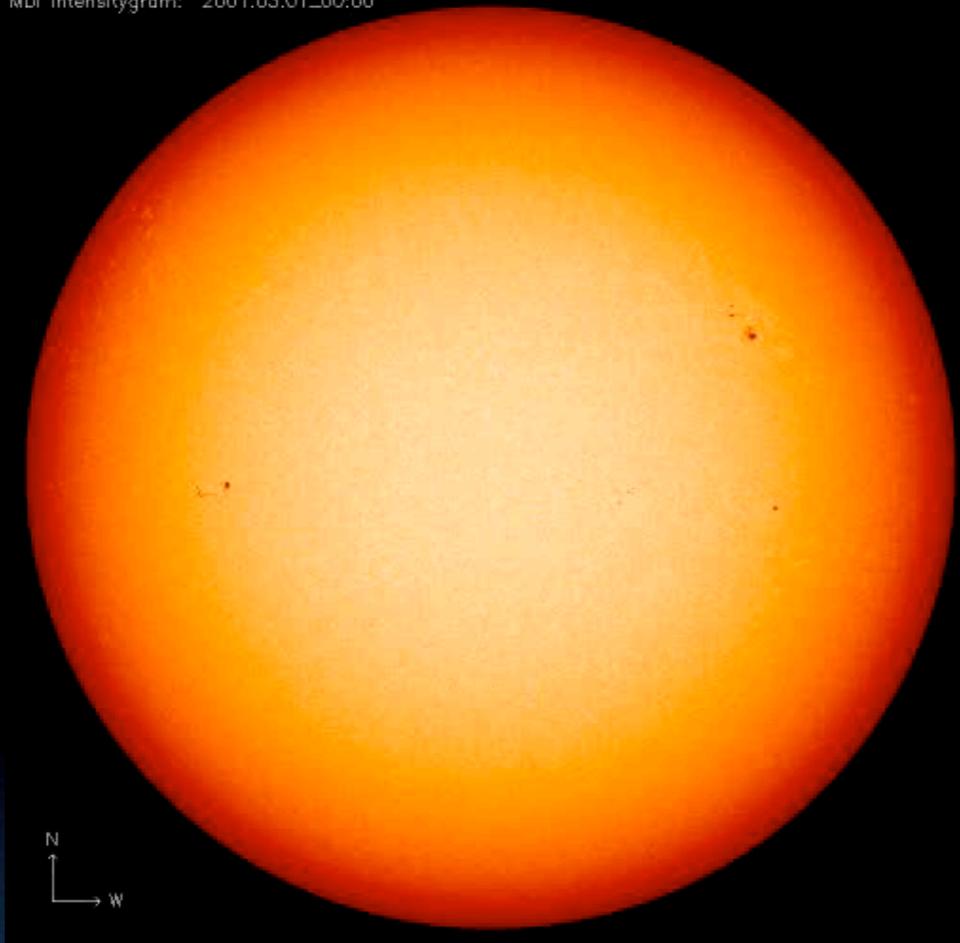
**C'est une question
de taches**

Les taches solaires

La variabilité solaire se manifeste d'abord par la présence variable du nombre de **taches solaires**

Le Soleil il y a 6 ans
(SOHO/MDI)

MDI Intensitygram: 2001.03.01_00:00



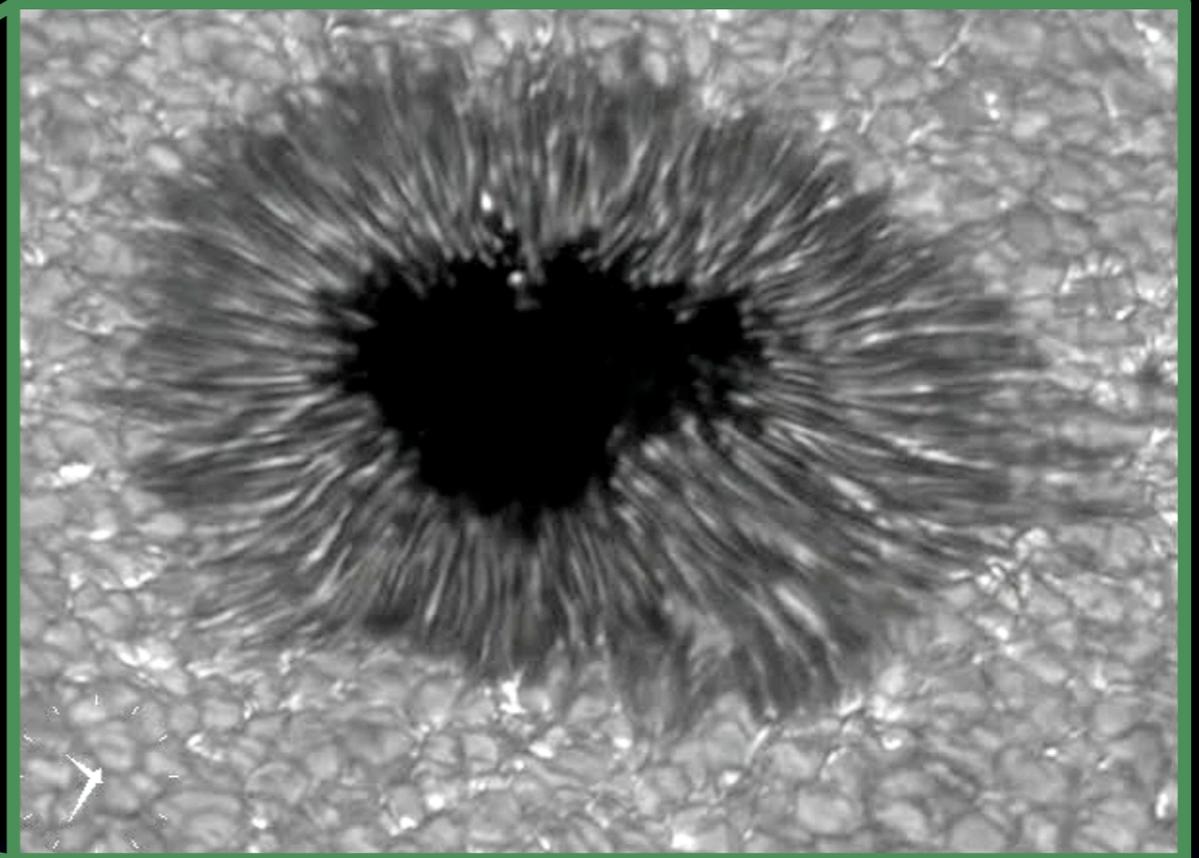
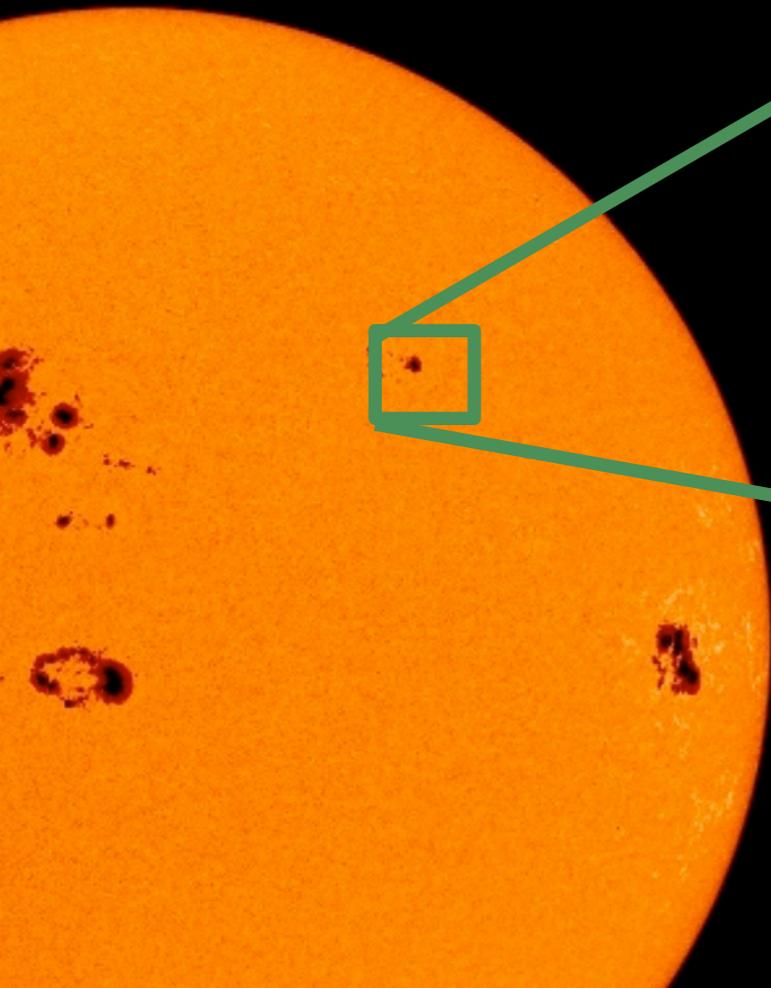
Le Soleil ce matin
(SOHO/MDI)

2009/11/22 00:00



Les taches solaires

- Les taches solaires sont des régions où la surface du Soleil est moins chaude (5000° au lieu de 6000°)



Les taches solaires

Intensité de la lumière visible

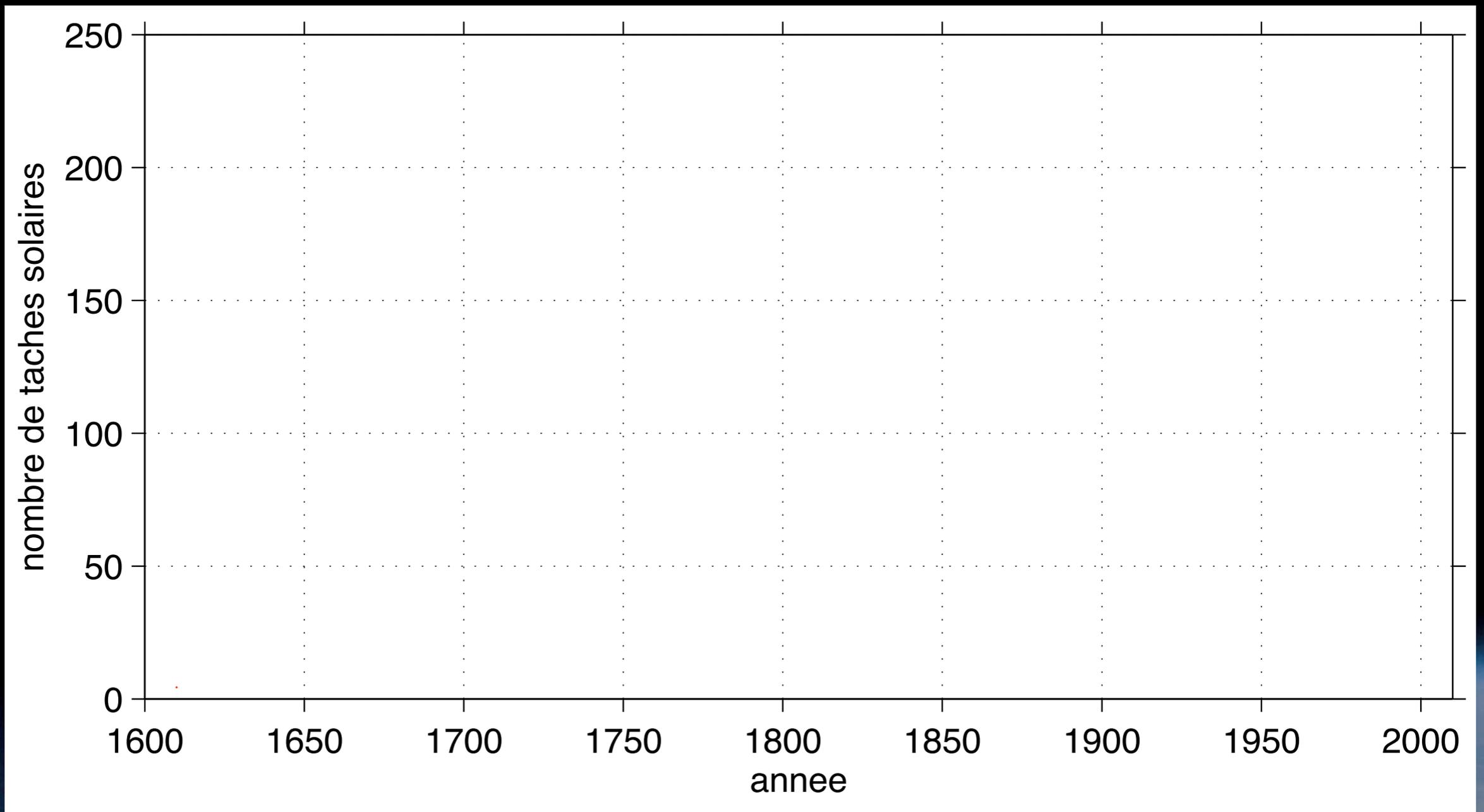
Le **magnétisme solaire** est à l'origine de ces taches solaires



2005/08/22 20:48

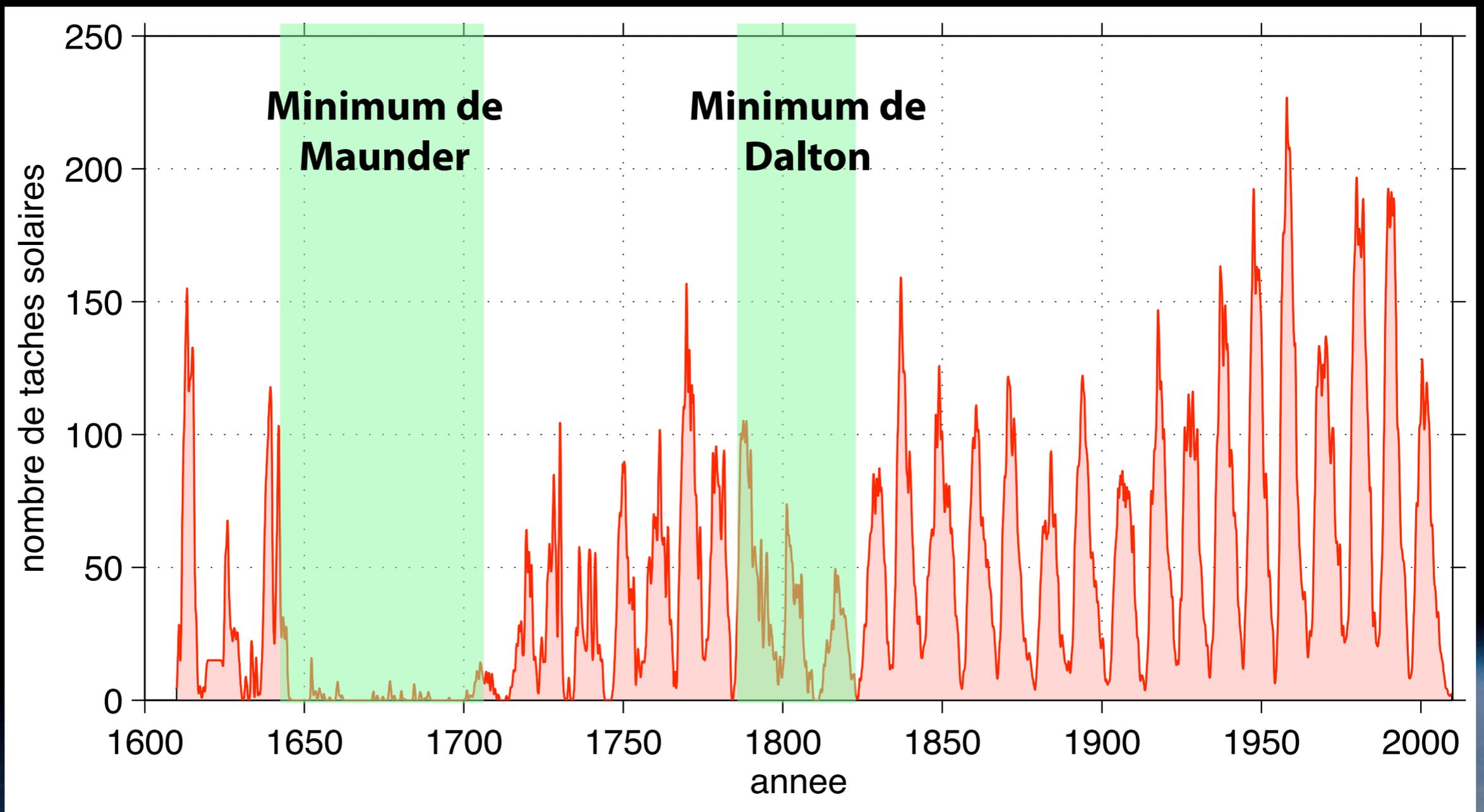
Le cycle solaire

Le nombre de taches solaires varie avec un cycle de ~ 11 ans



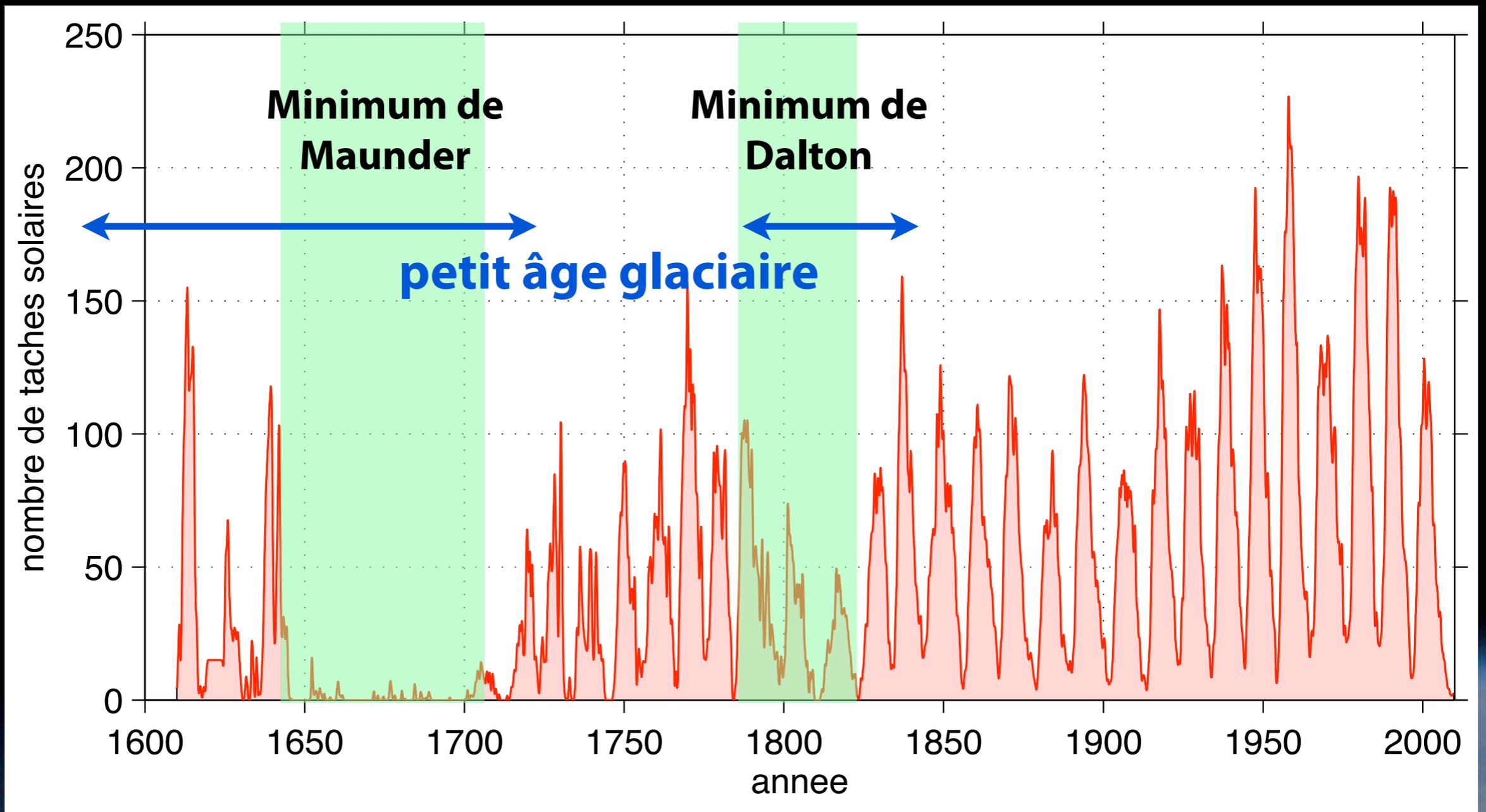
Le cycle solaire

Il y a une coïncidence troublante entre les périodes de faible activité solaire et celles où **le climat fut plus froid**



Le cycle solaire

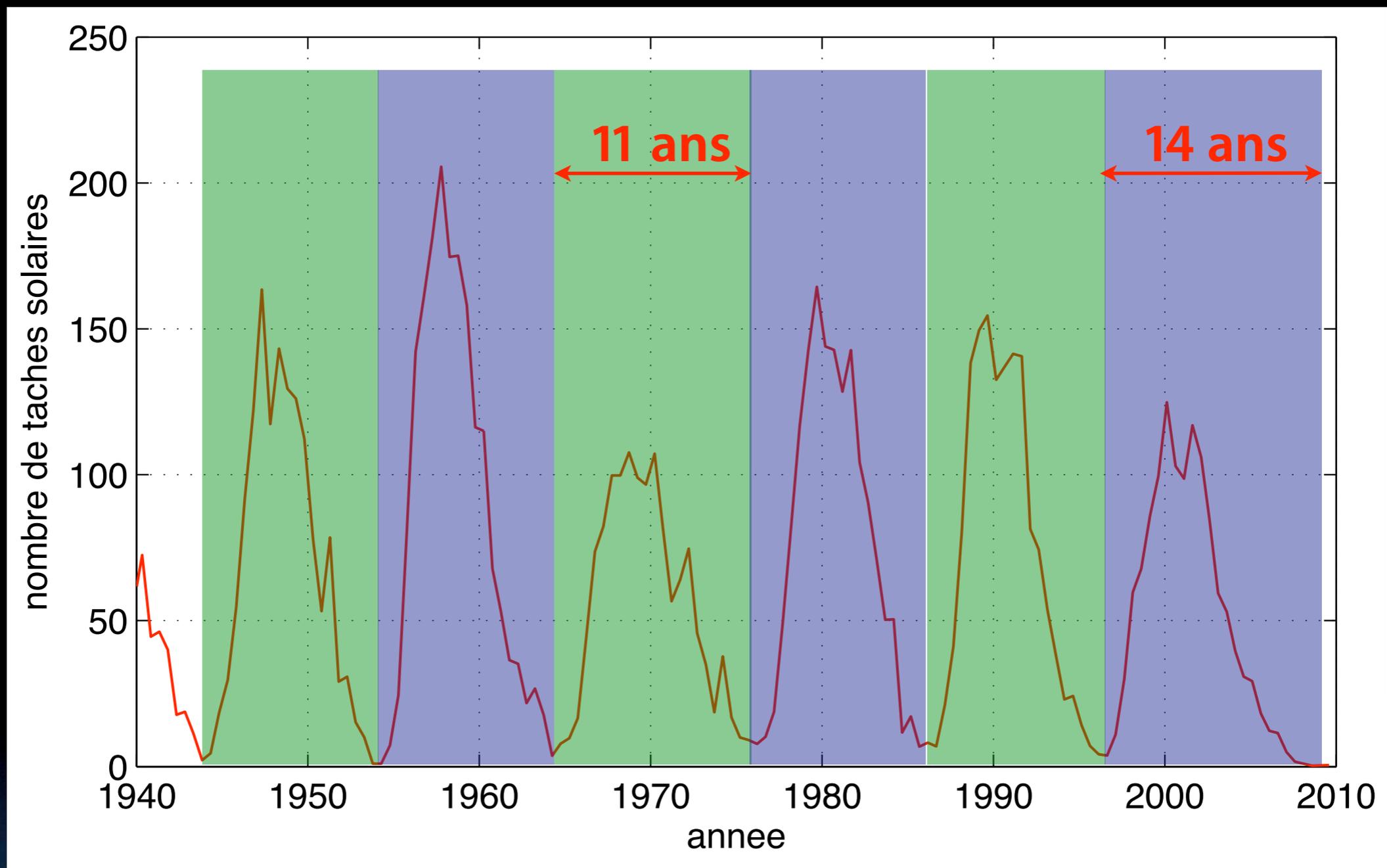
Il y a une coïncidence troublante entre les périodes de faible activité solaire et celles où **le climat fut plus froid**



En quoi le dernier cycle fut-il si particulier ?

Un cycle long

- Le cycle solaire dure normalement ~ 11 ans
- Le dernier a duré plus de 14 ans...

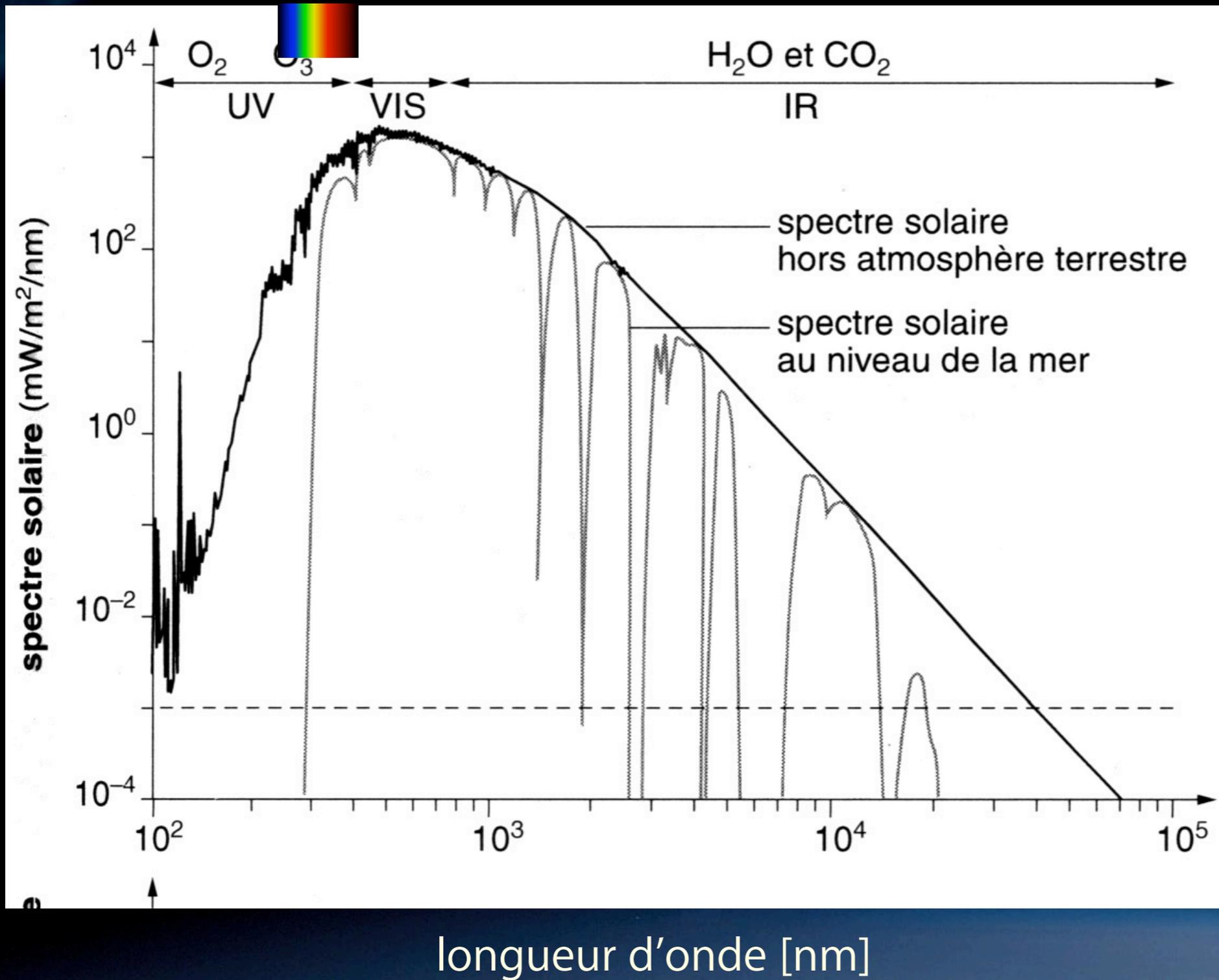


Le Soleil

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



Le spectre solaire



Nesme-Ribes & Thuillier (2000)

Lean & Rind (1998)

Journées académiques 1/4/2010

Bilan

- Différentes **bandes du spectre** solaire (UV, visible, ...) correspondent à des processus physiques fort différents
- Et ces différentes bandes ne vont pas agir de la même façon sur notre environnement terrestre...

La TSI

■ TSI = Total Solar Irradiance

= puissance totale rayonnée par le Soleil au niveau de la Terre (hors atmosphère)

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

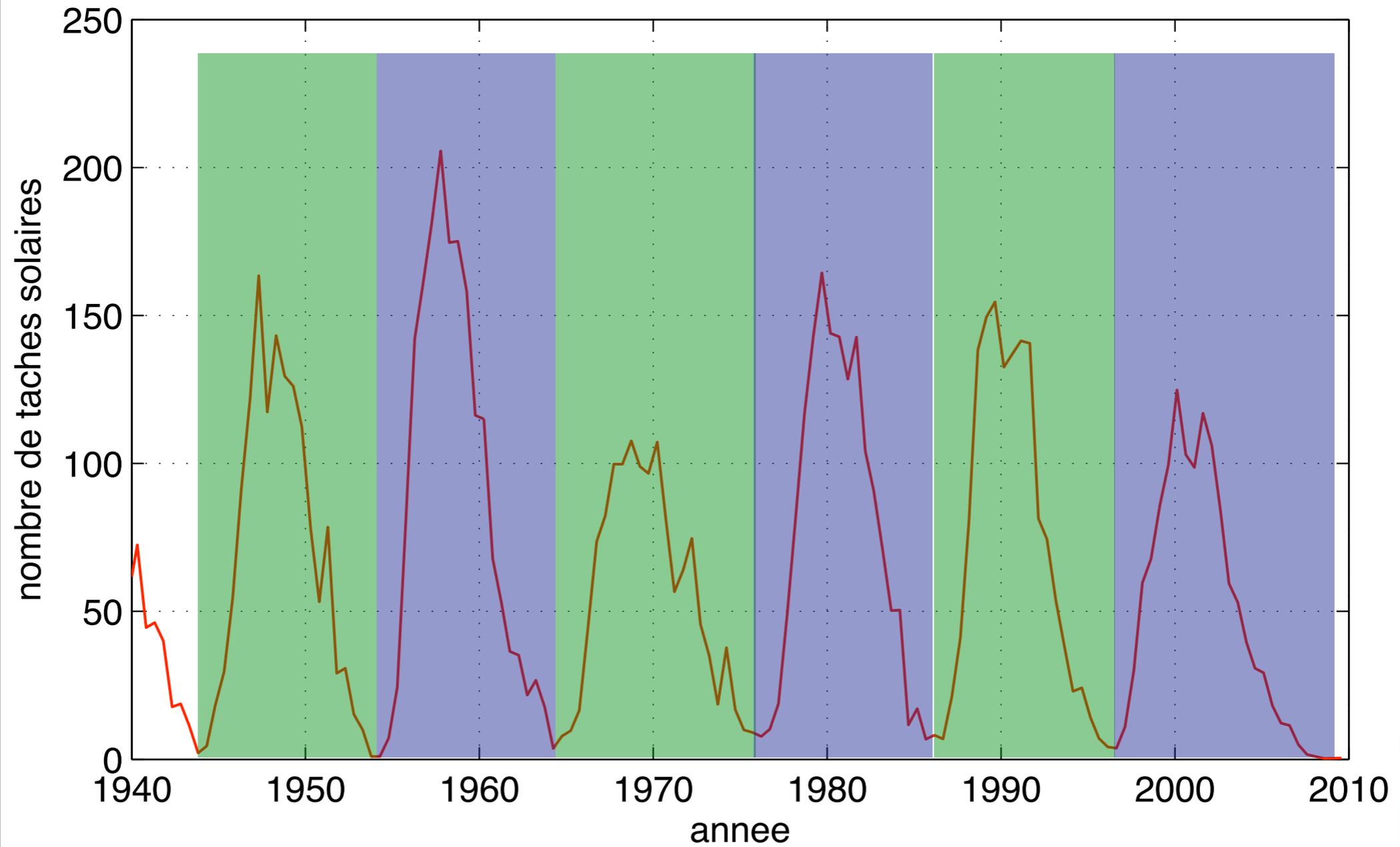
P : puissance rayonnée

λ : longueur d'onde

■ Elle n'est mesurée que depuis 1978

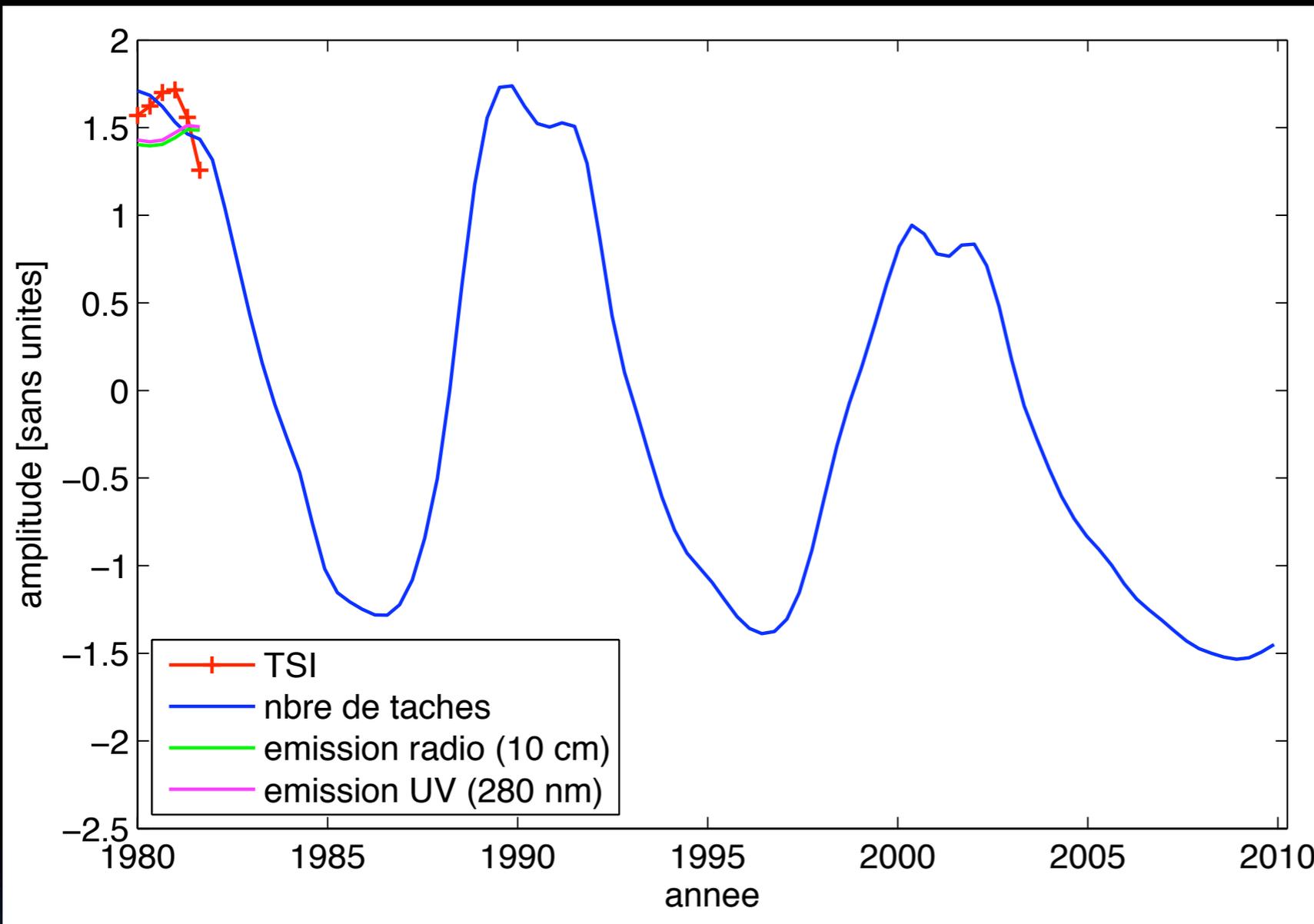
■ Sa mesure est très délicate et sujette à caution

En quoi le dernier cycle fut-il anormal ?



Un cycle anormal

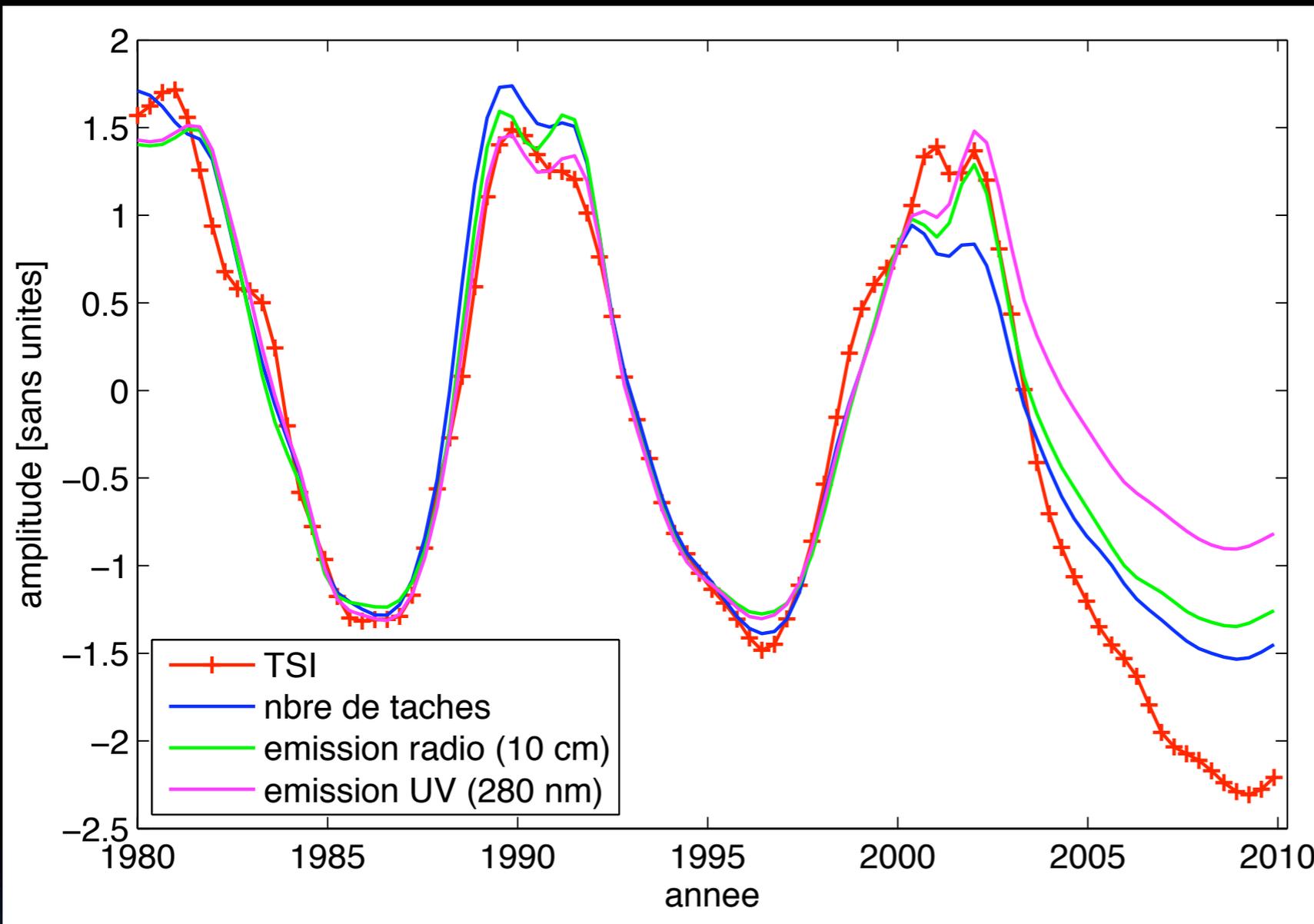
- L'intensité émises dans différentes bandes n'a pas évolué de la même façon d'un cycle à l'autre



radiohéliographe de Nançay

Un cycle anormal

- L'intensité émises dans différentes bandes n'a pas évolué de la même façon d'un cycle à l'autre

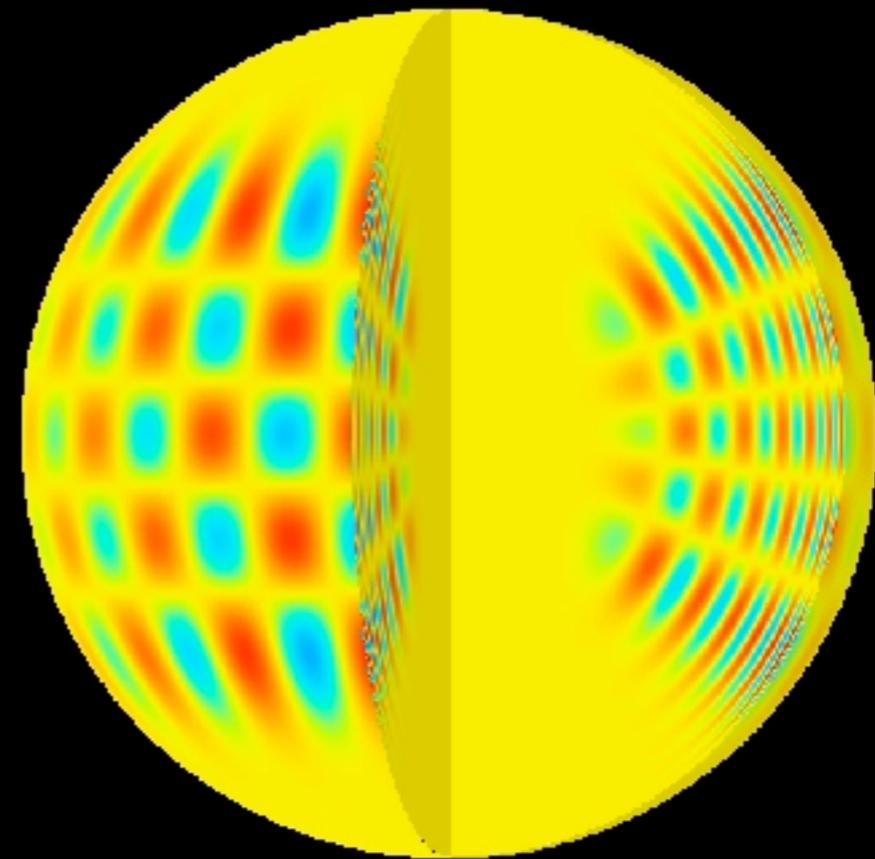


radiohéliographe de Nançay

Le Soleil va-t-il tomber en panne ?

Une panne du Soleil ?

- **Non**, divers indices montrent que le prochain cycle solaire va démarrer d'ici quelques mois



- Pour cela il faut faire de l'**héliosismologie** = étudier les séismes qui se produisent à l'intérieur du Soleil

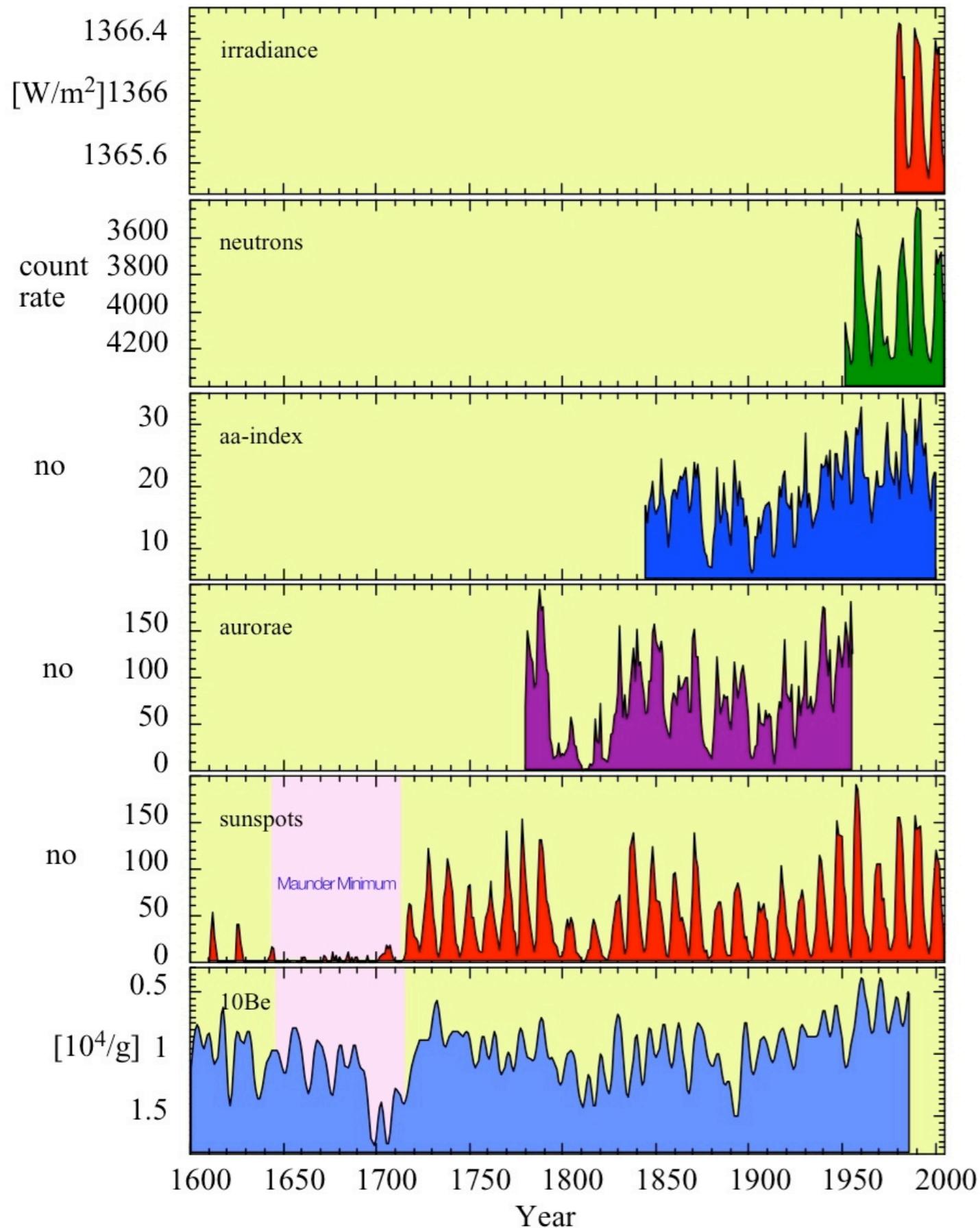
Comment progresser ?

Pour mieux comprendre le caractère exceptionnel du dernier cycle, on peut

- Comparer le Soleil à d'autres étoiles
- Etudier l'histoire passée du climat
- Comparer différents indicateurs indirects d'activités solaire

Reconstruction de la variabilité solaire à partir de divers indices

SOLAR VARIABILITY OVER THE PAST SEVERAL MILLENNIA



irradiance totale
(depuis 1978)

rayonnement
cosmique

fluctuations du champ
magnétique terrestre

fréquences des
aurores

nombre de
taches solaires

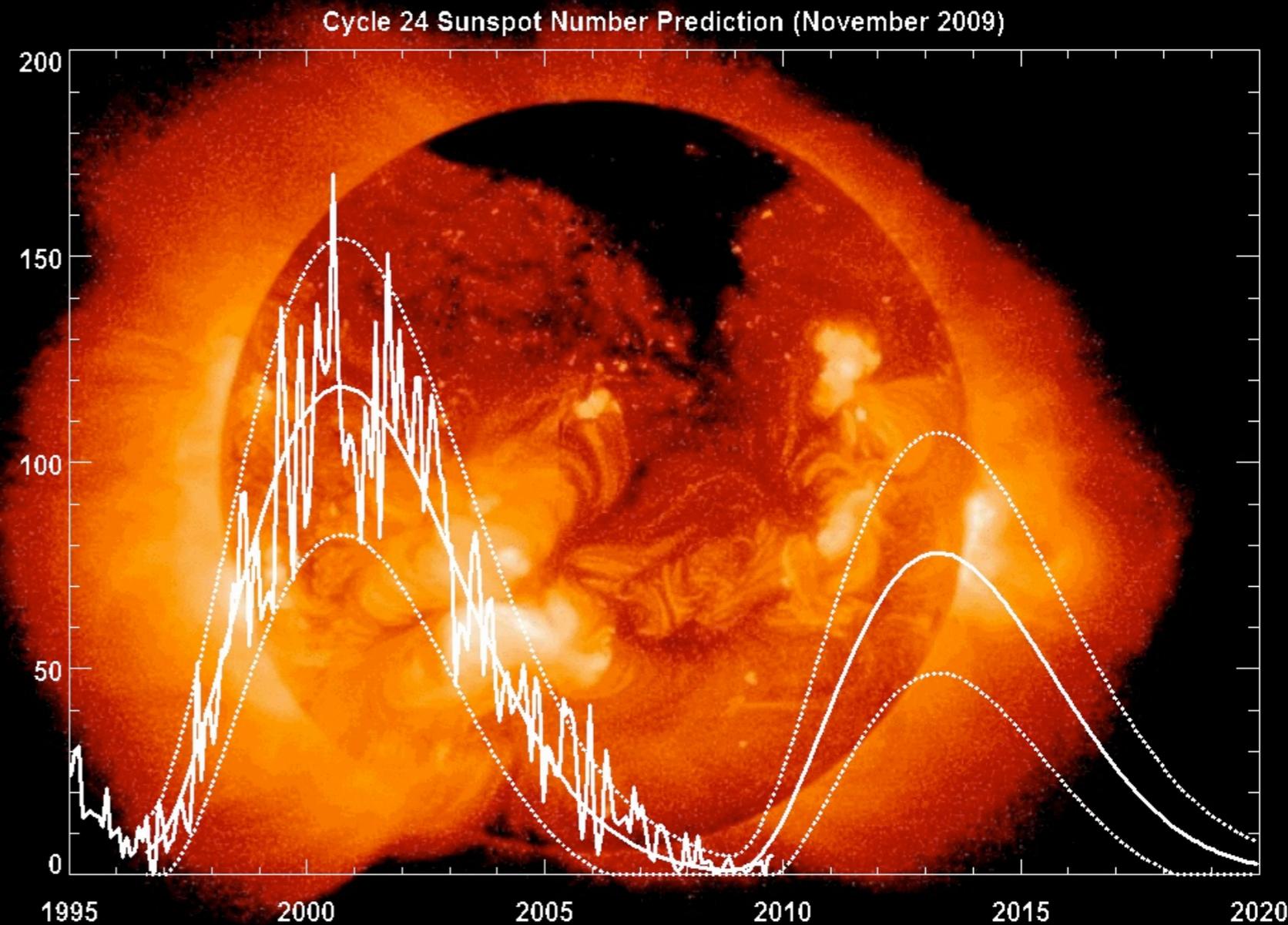
concentration en
béryllium (¹⁰Be)

J. Beer (2008)

Journées académiques 1/4/2010

Bilan

- La récente baisse d'activité solaire est particulière... mais n'a rien d'exceptionnel
- Le prochain cycle sera faible
- Et après ?



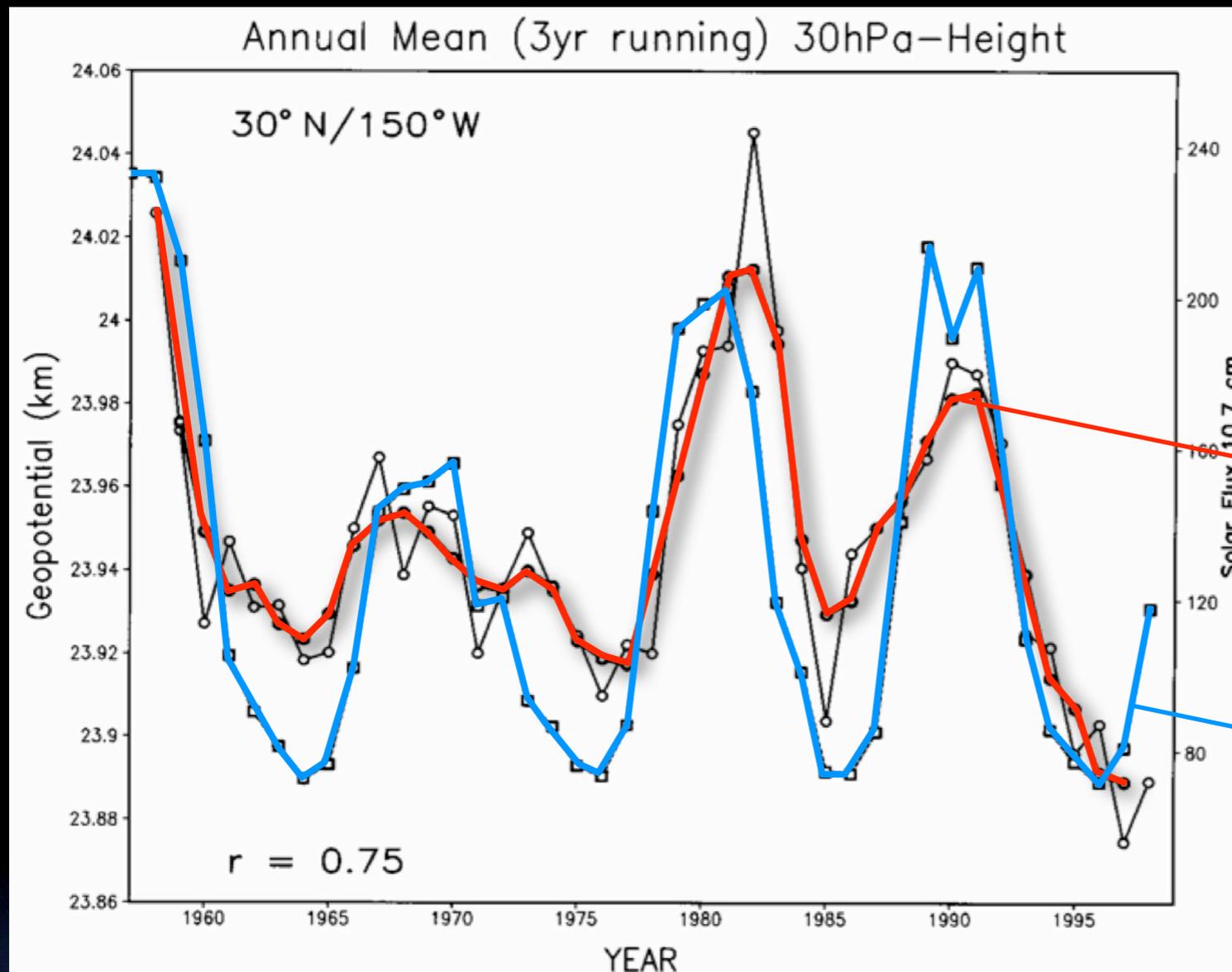
Hathaway (2009)



Un impact sur le climat ?

Une certitude : le Soleil influence le climat

De très nombreuses observations révèlent un cycle de 11 ans en phase avec celui du Soleil



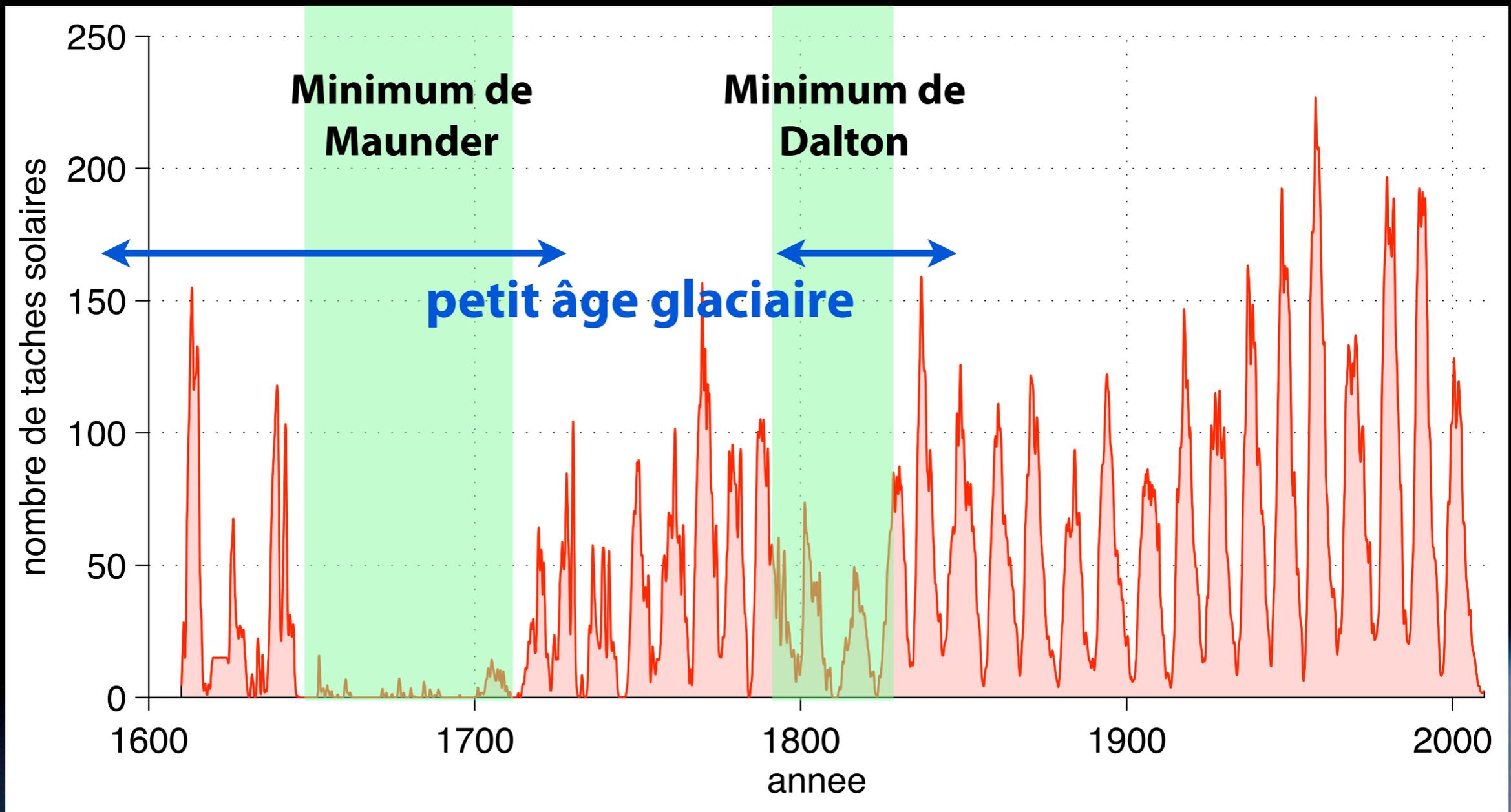
Altitude géopotentielle moyenne de 30 hPa (~25 km)

Activité solaire (émission à 10.7 cm)

(Labitzke & van Loon, 1998)

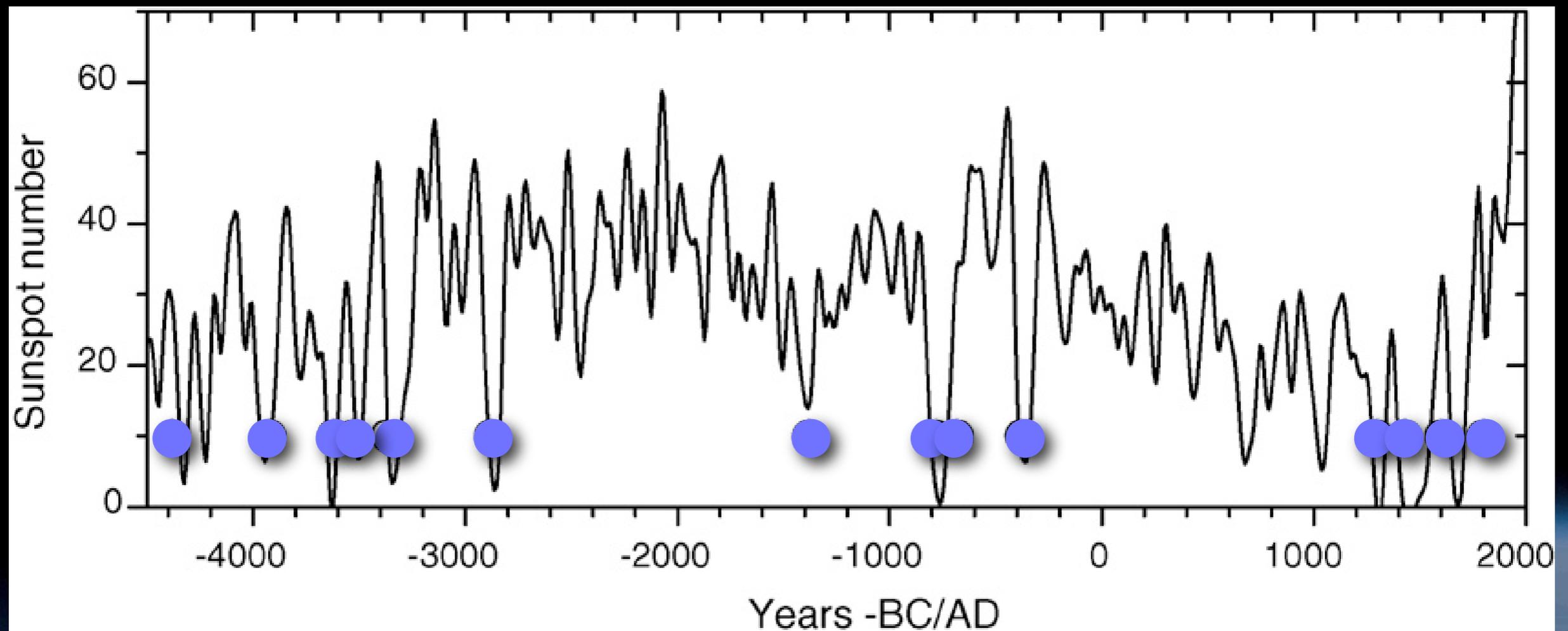
Le cycle solaire

Les périodes de faible activité solaire coïncident avec un refroidissement dans l'hémisphère nord

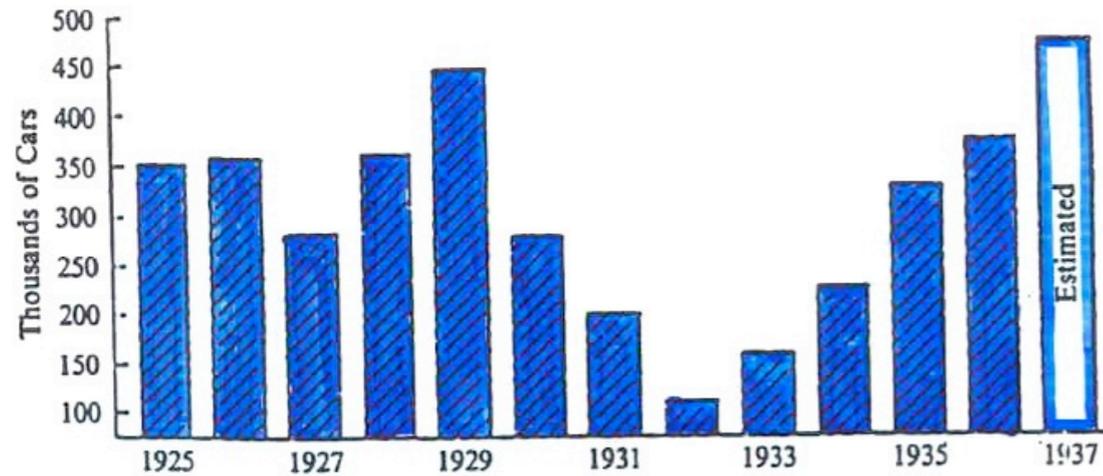


L'activité solaire des derniers millénaires

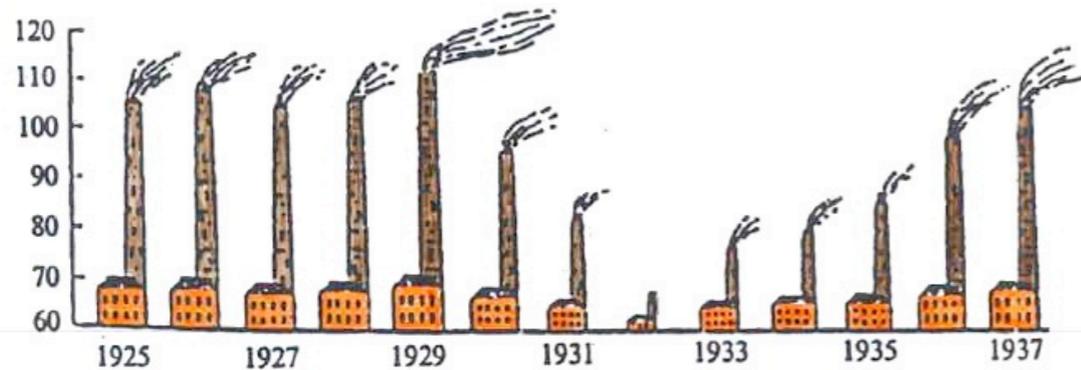
Reconstruction du nombre de taches solaires : elle est corrélée avec les **changements de régime climatique** sec/humide (●)



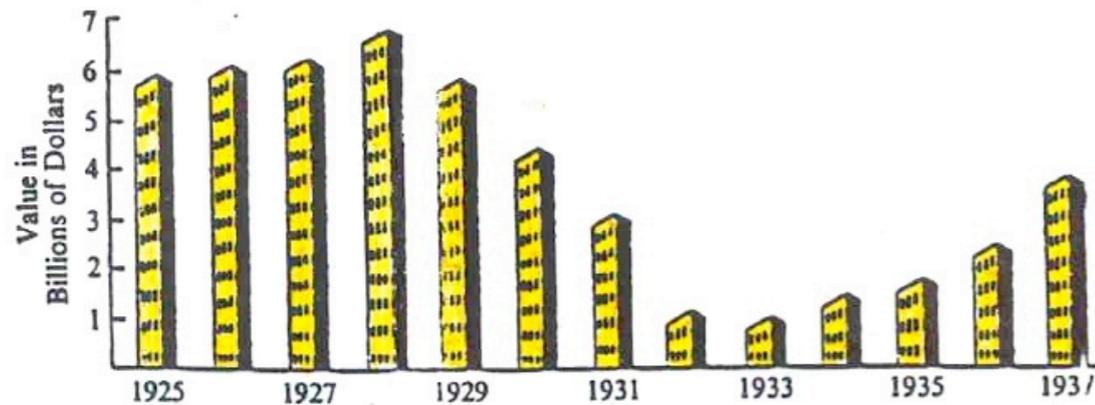
Mais il existe des corrélations fortuites...



Production de l'industrie automobile

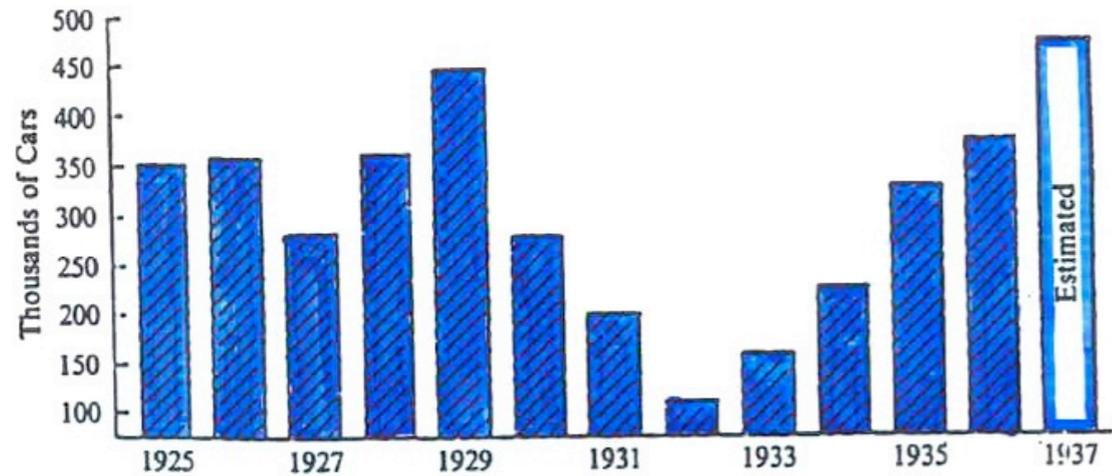


Production de l'industrie lourde

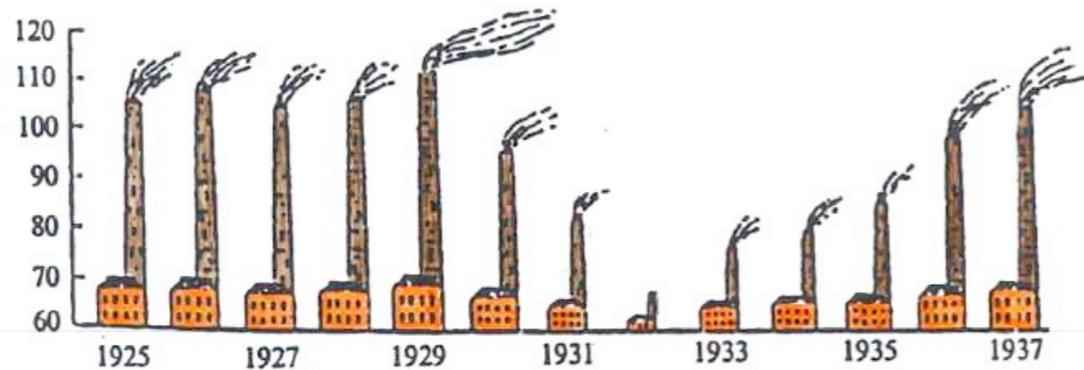


Production de l'industrie du bâtiment

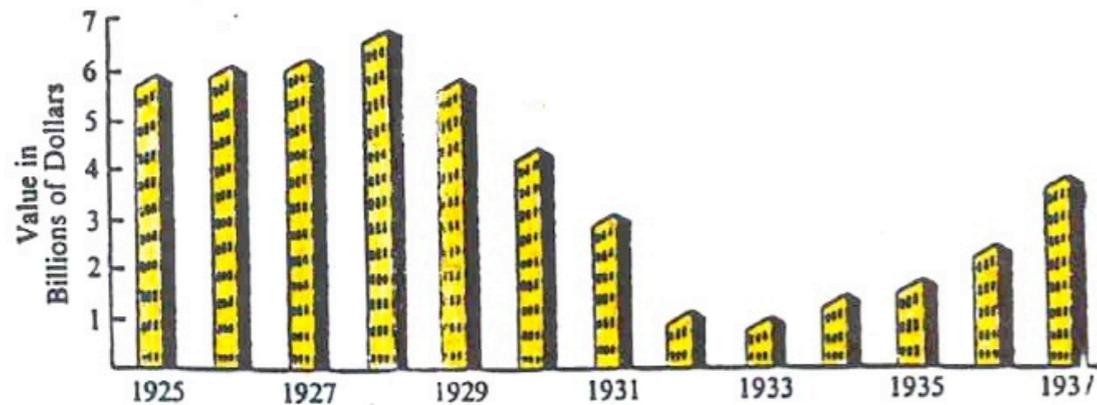
Mais il existe des corrélations fortuites...



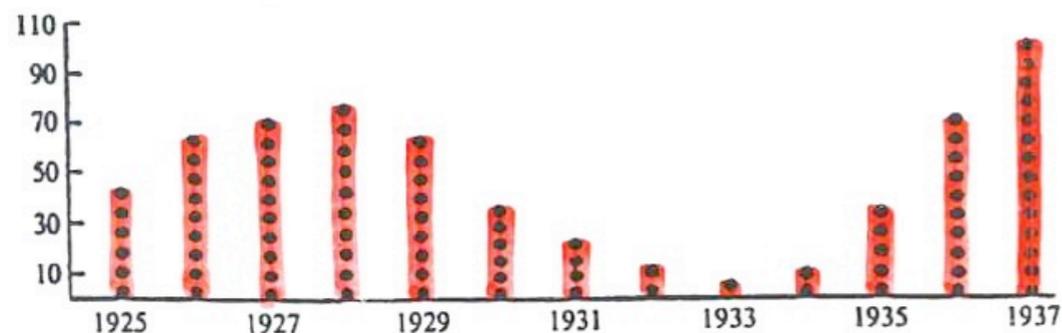
Production de l'industrie automobile



Production de l'industrie lourde



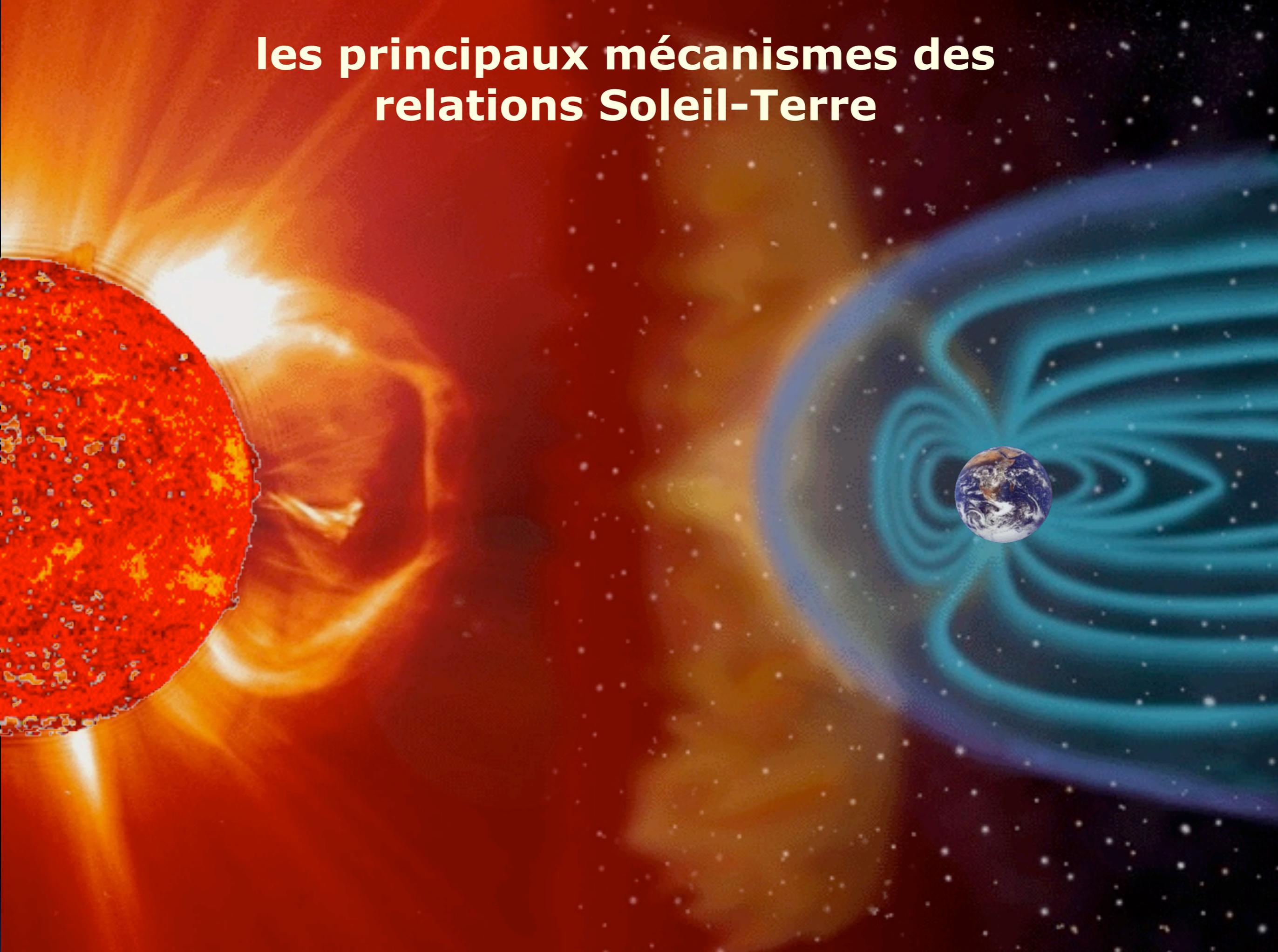
Production de l'industrie du bâtiment



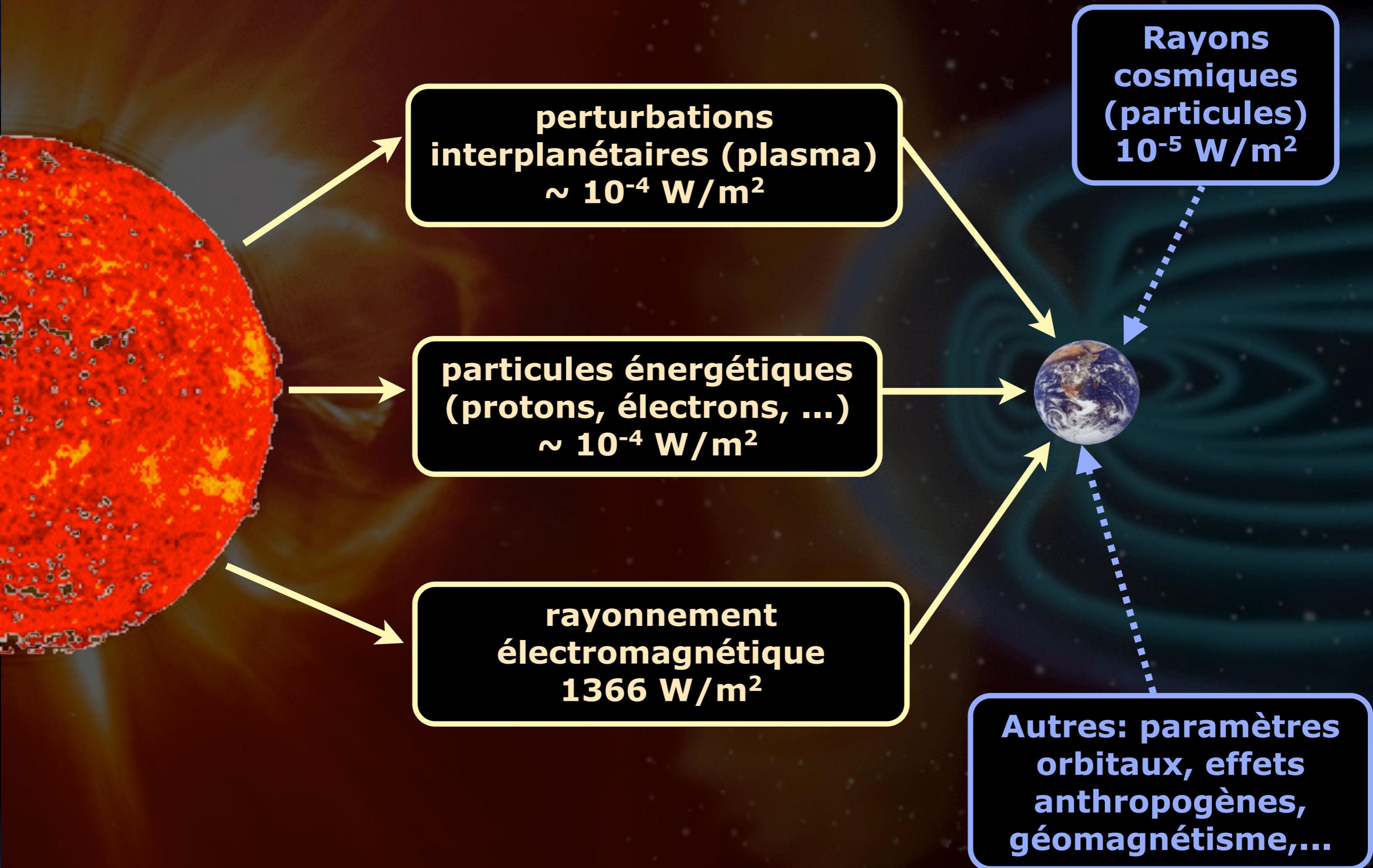
Nombre de taches solaires

archives de la Banque Nationale Suisse

les principaux mécanismes des relations Soleil-Terre

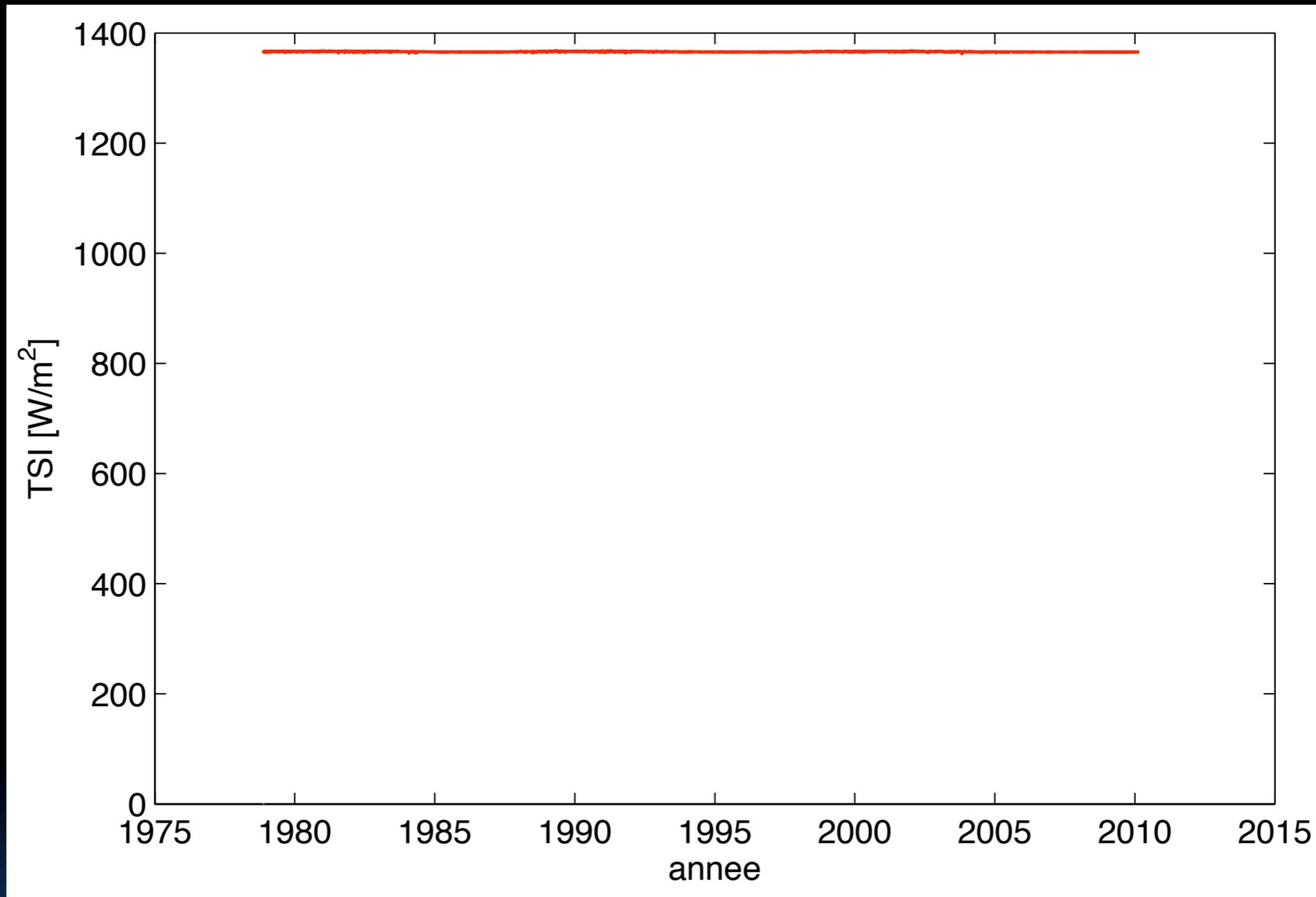


les principaux mécanismes des relations Soleil-Terre



Constante solaire ?

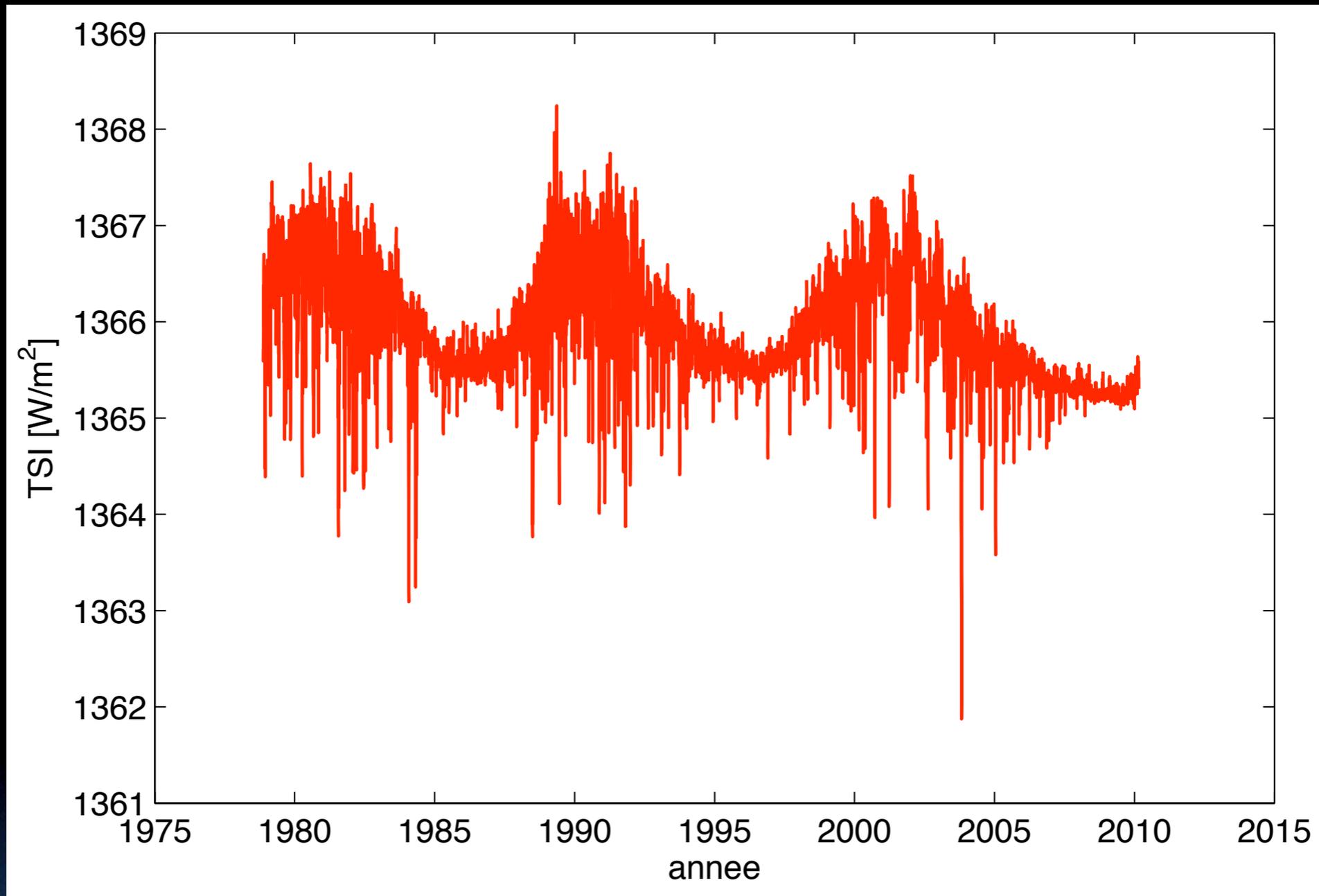
- L'irradiance solaire totale (TSI) semble constante



Constante solaire ?

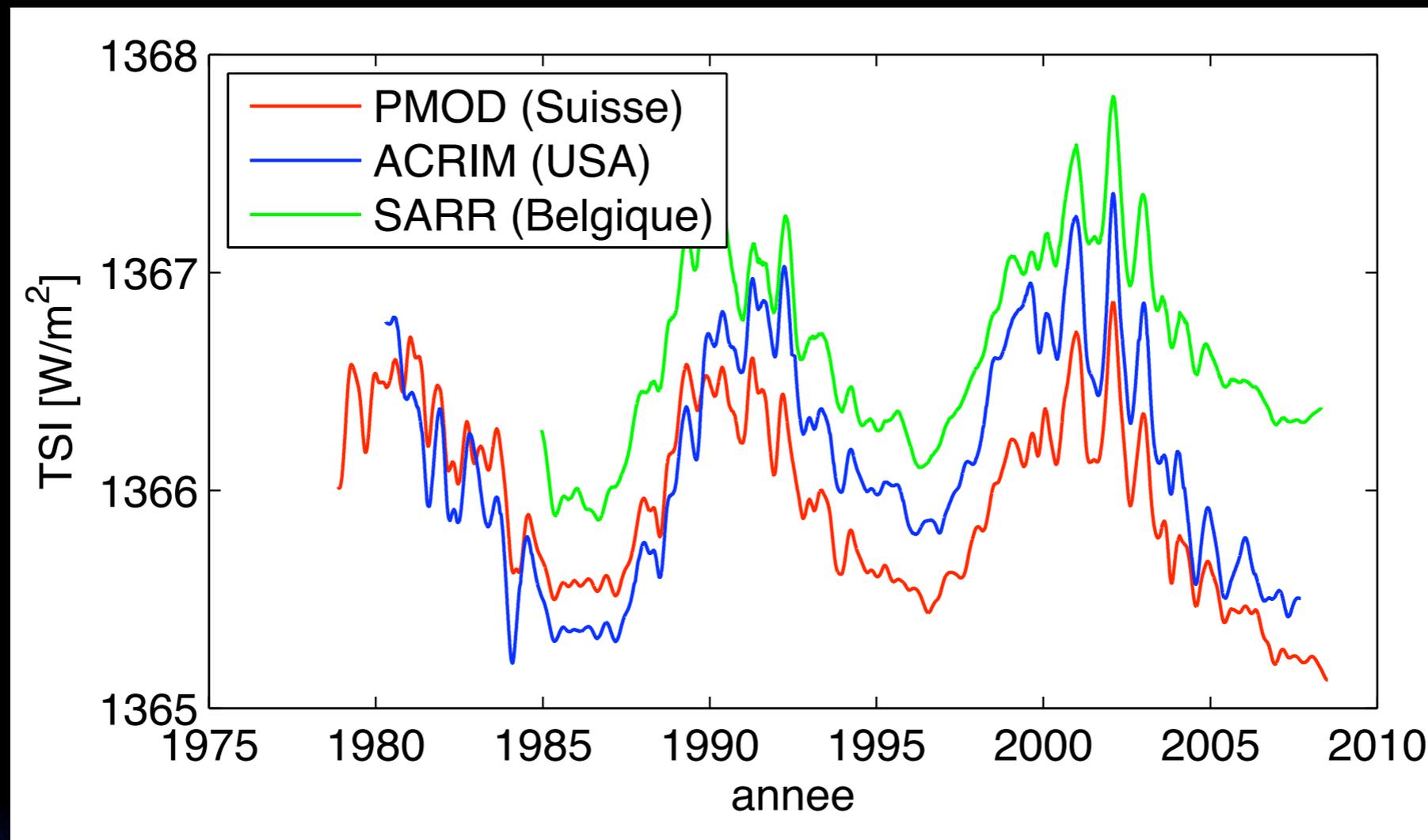
- L'irradiance solaire totale varie, mais très faiblement

1 ‰



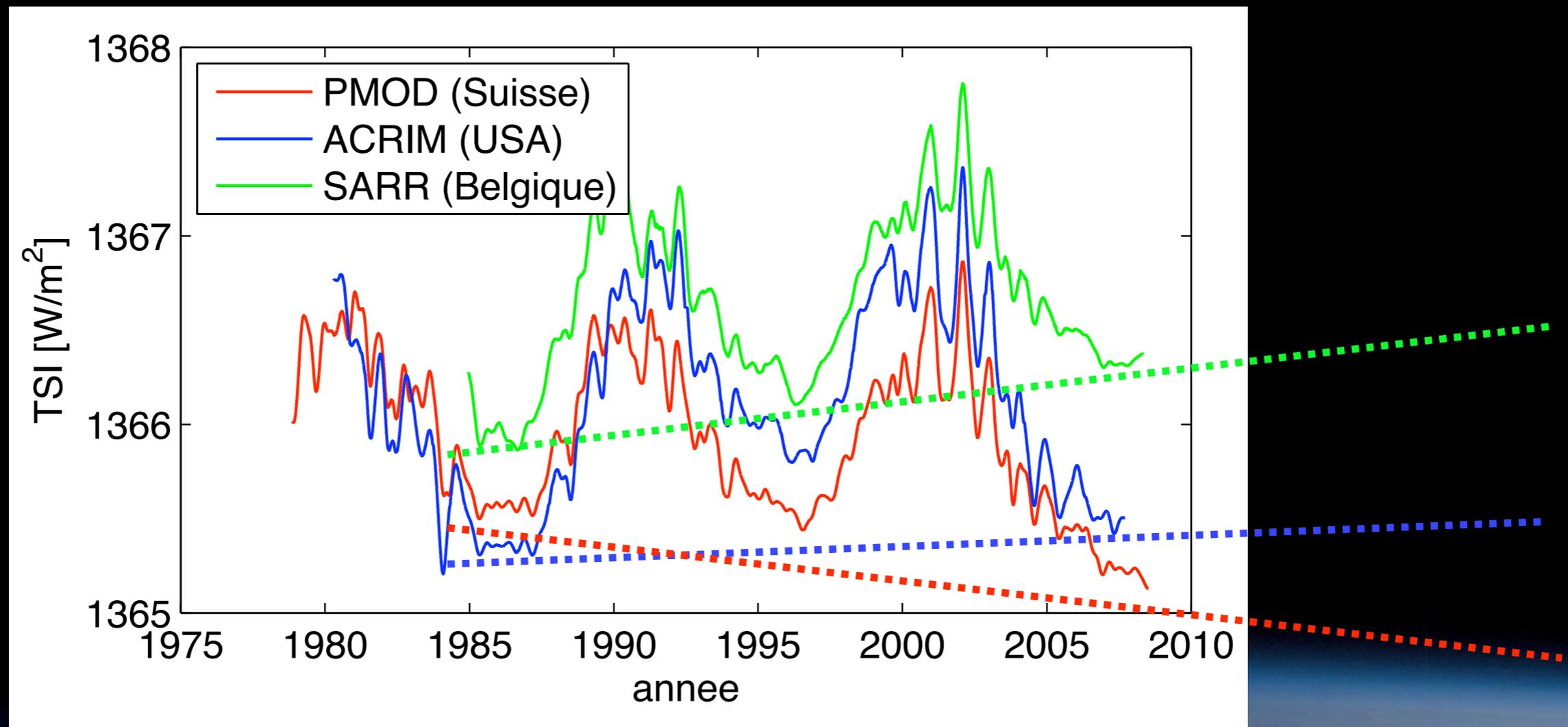
Des désaccords...

Il existe aujourd'hui trois reconstructions différentes de la TSI
Elles sont en désaccord sur la tendance à long terme



Des désaccords...

Il existe aujourd'hui trois reconstructions différentes de la TSI
Elles sont en désaccord sur la tendance à long terme



Irradiance totale : bilan

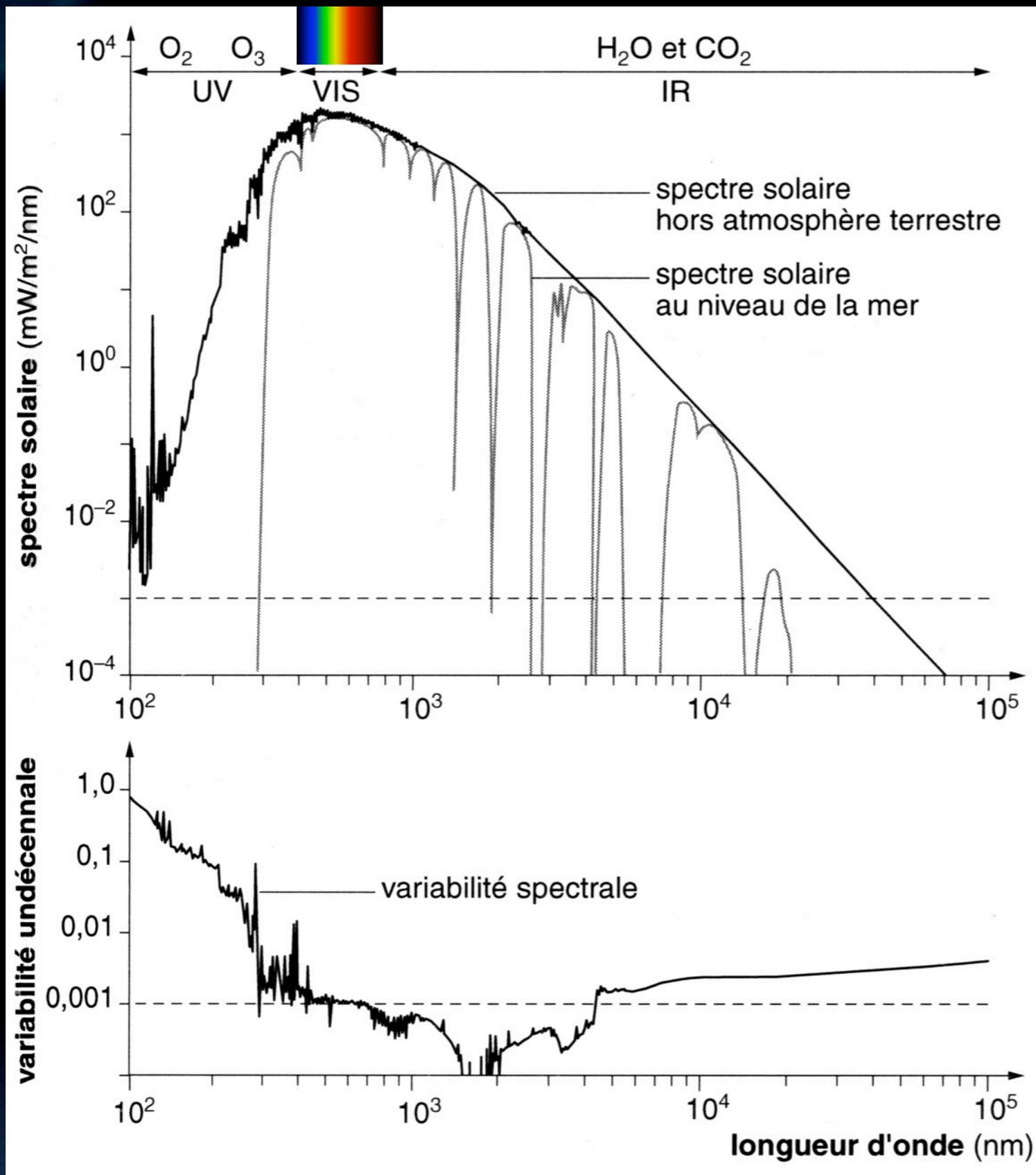
- La variabilité de l'irradiance totale est 3-6 fois **trop faible** pour expliquer les variations de température observées sur Terre
- Il n'y a **pas de consensus** sur l'existence d'une tendance
- 30 ans de données ne donnent **pas assez de recul** pour dégager une tendance à long terme

Irradiance totale : bilan

- La variabilité de l'irradiance totale est 3-6 fois **trop faible** pour expliquer les variations de température observées sur Terre
- Il n'y a **pas de consensus** sur l'existence d'une tendance
- 30 ans de données ne donnent **pas assez de recul** pour dégager une tendance à long terme

La TSI est-elle un bon indicateur de l'activité solaire ?

Le spectre solaire



Le spectre solaire

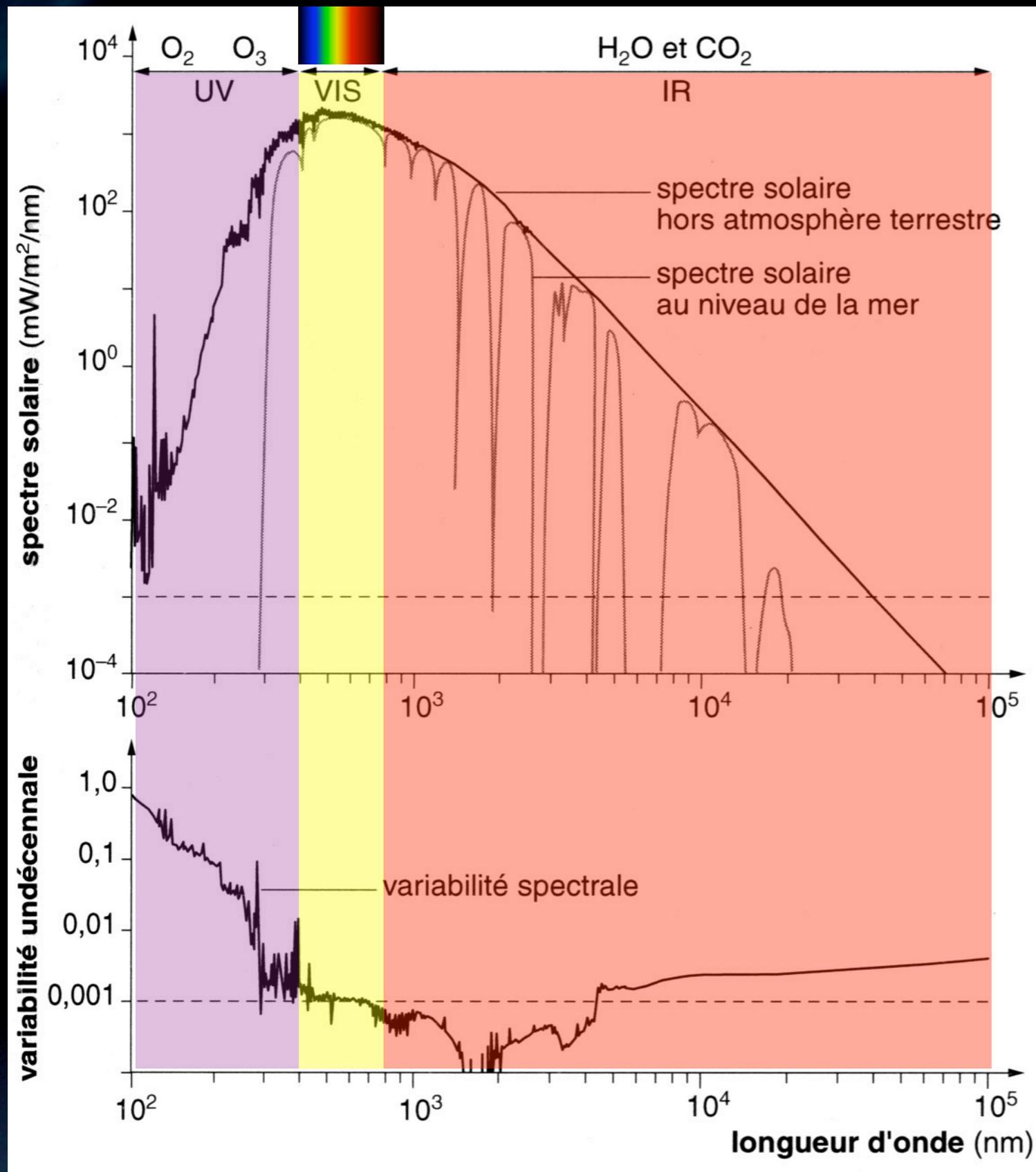
La variabilité relative au cours du cycle de 11 ans

Nesme-Ribes & Thuillier (2000)

Lean & Rind (1998)

Journées académiques 1/4/2010

Le spectre solaire



Le spectre solaire

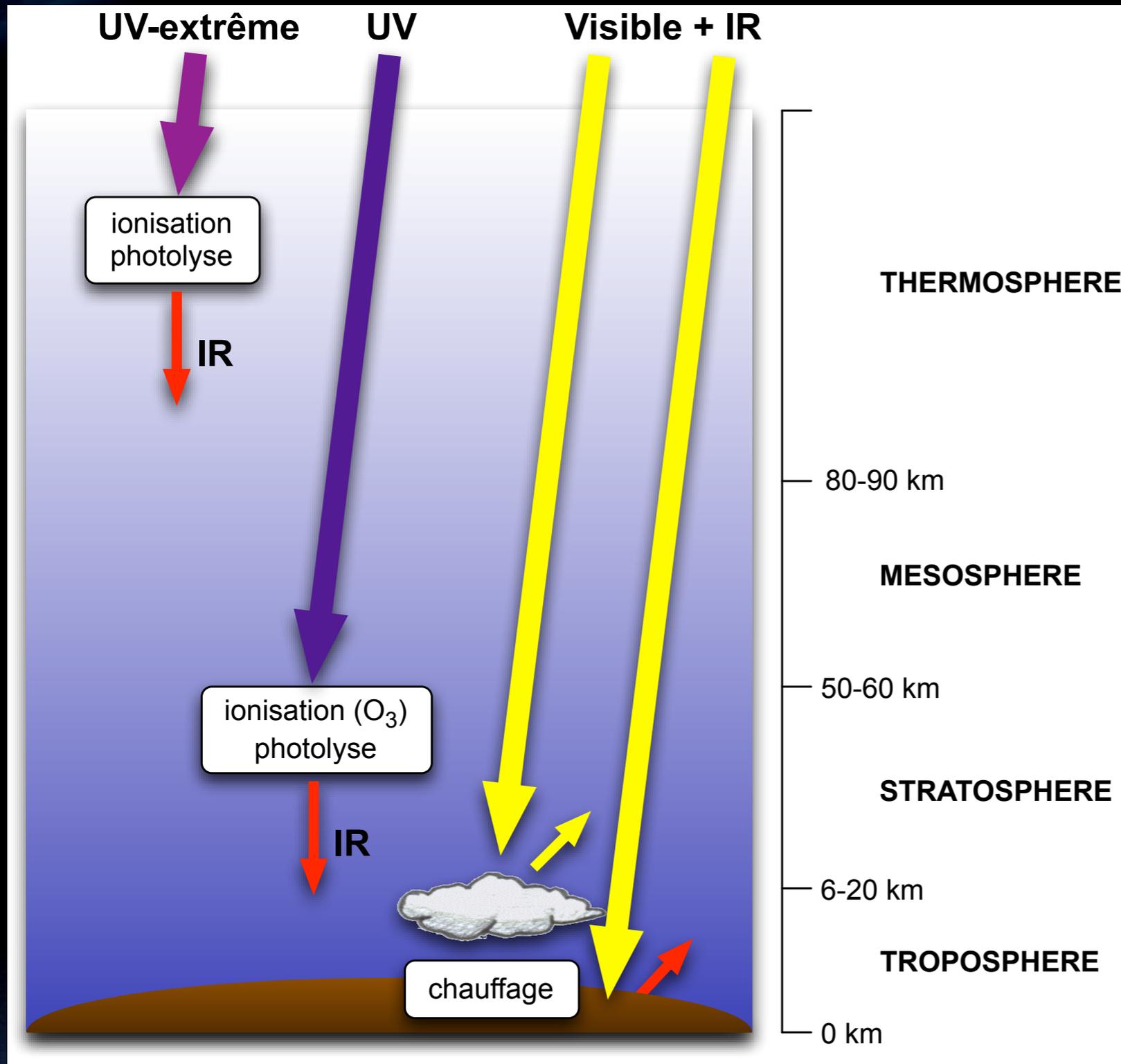
La variabilité relative au cours du cycle de 11 ans

Nesme-Ribes & Thuillier (2000)

Lean & Rind (1998)

Journées académiques 1/4/2010

Impact des différentes longueurs d'onde



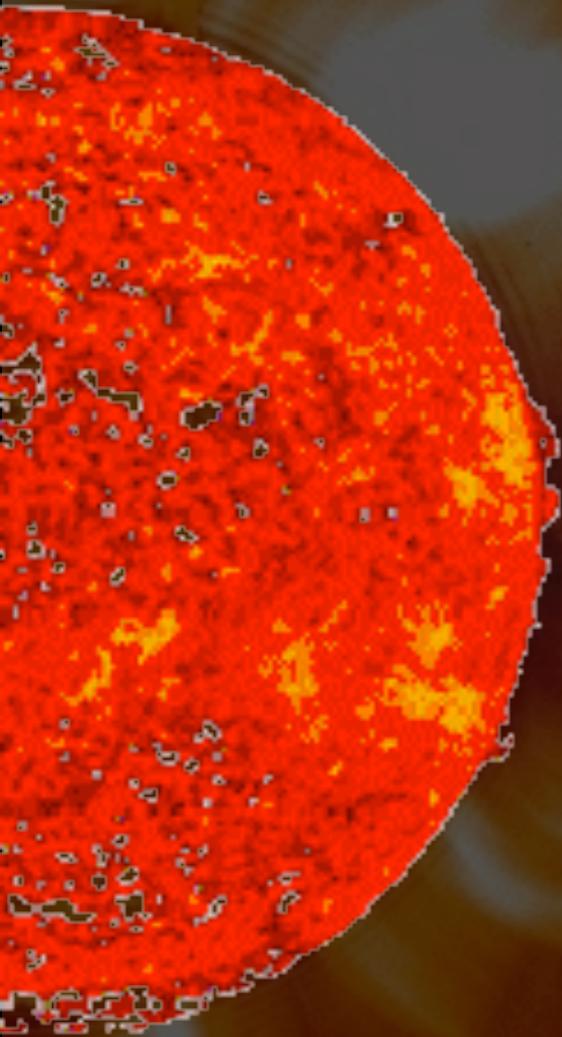
La majeure partie du spectre (visible et infra-rouge) chauffe directement le sol, les océans et la basse atmosphère

L'impact de l'ultra-violet est bien plus complexe

Bilan

- Les différentes composantes du spectre solaire ne varient pas de la même façon (et dans le même) sens au cours d'un cycle
- La *composante ultra-violette* bien que faible, pourrait servir de levier
- Comment l'UV peut-il affecter les plus basses couches atmosphériques ?
 - modulation du taux d'O₃ → modification du bilan radiatif
 - réchauffement → gradients → modification de la circulation générale

les principaux mécanismes des relations Soleil-Terre

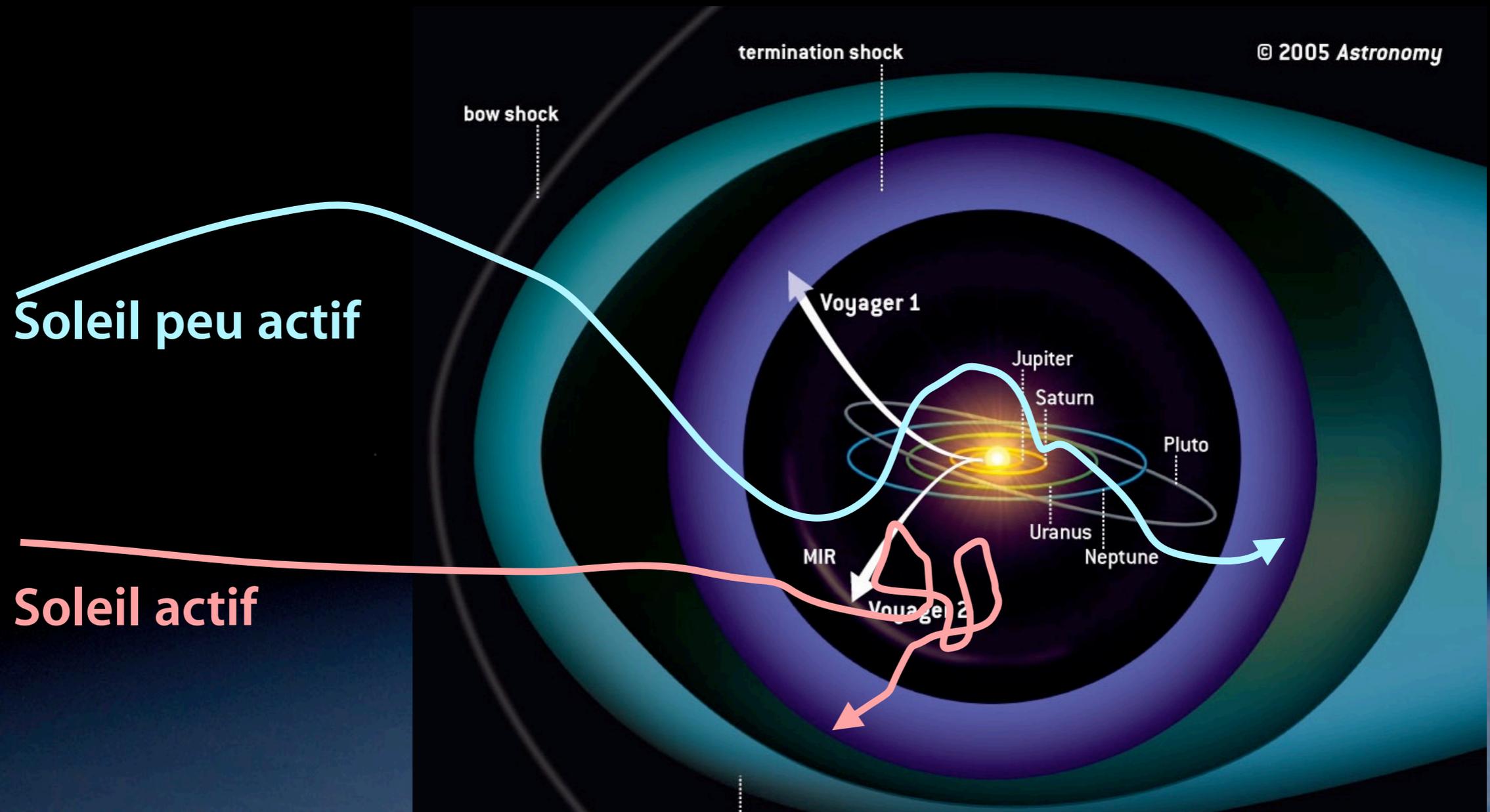


Rayons
cosmiques
(particules)
 10^{-5} W/m^2



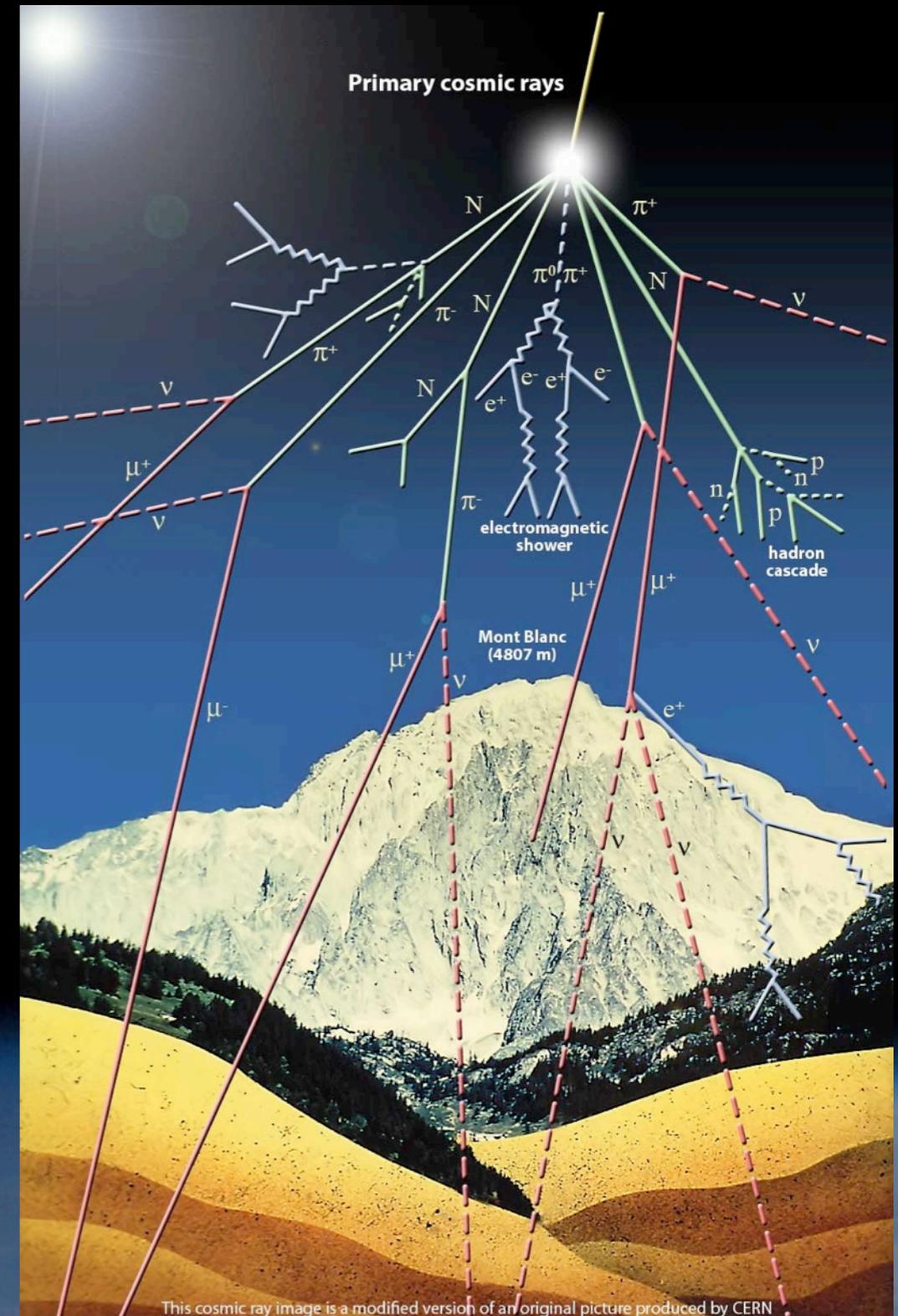
Les rayons cosmiques

- La Terre est en permanence exposée à un rayonnement corpusculaire de très haute énergie (MeV-GeV-TeV), d'origine extrasolaire : les *rayons cosmiques*



Rayons cosmiques en tant que diagnostic

- Les rayons cosmiques produisent par réactions nucléaires des **radio-isotopes cosmogéniques** (^{14}C , ^{10}Be , ^{36}Cl , ...)
- Ces radio-isotopes constituent aujourd'hui le principal moyen pour reconstruire l'histoire solaire sur $\sim 10^4$ ans

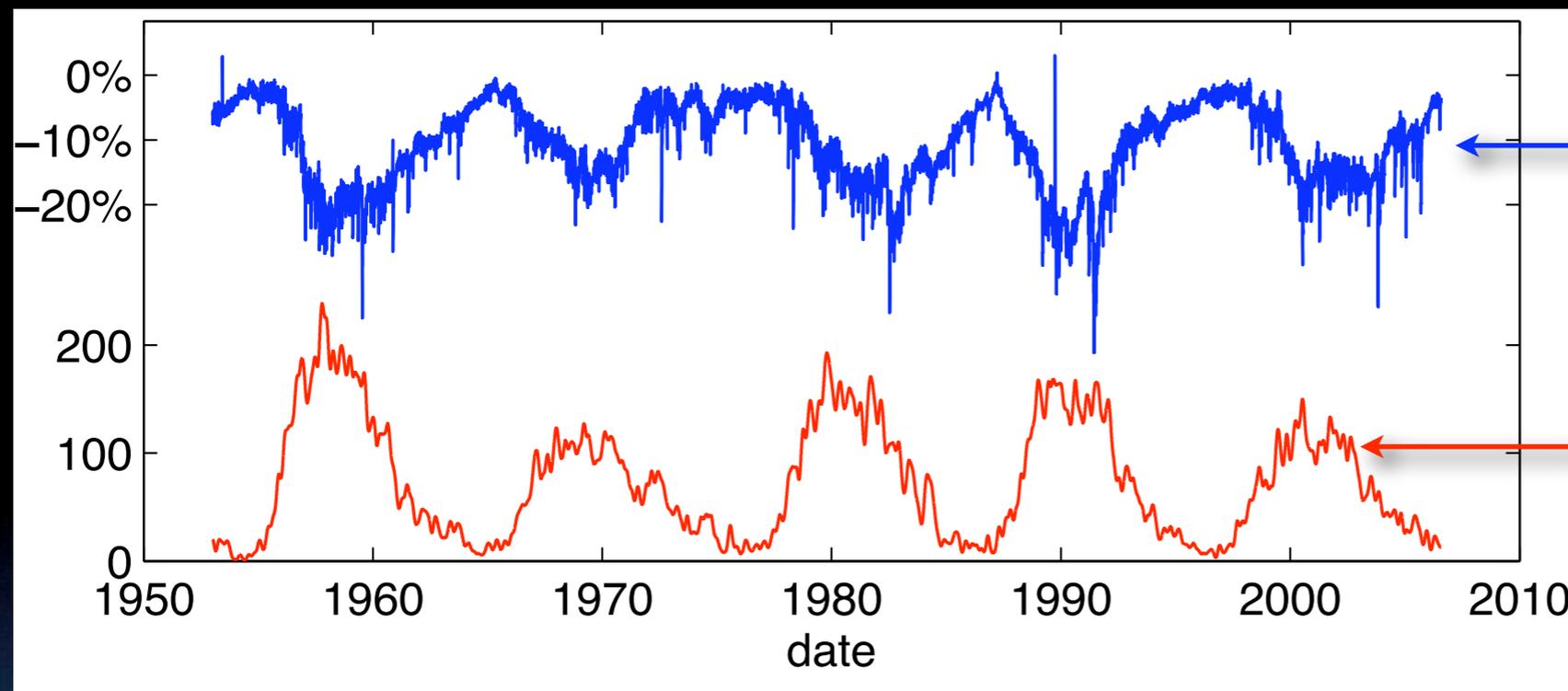


Les rayons cosmiques

A long terme, le flux de rayons cosmiques est *anticorrélé* avec l'*activité solaire* :

Soleil actif

- ⇒ champ magnétique plus intense et plus turbulent
- ⇒ flux cosmique réduit sur Terre

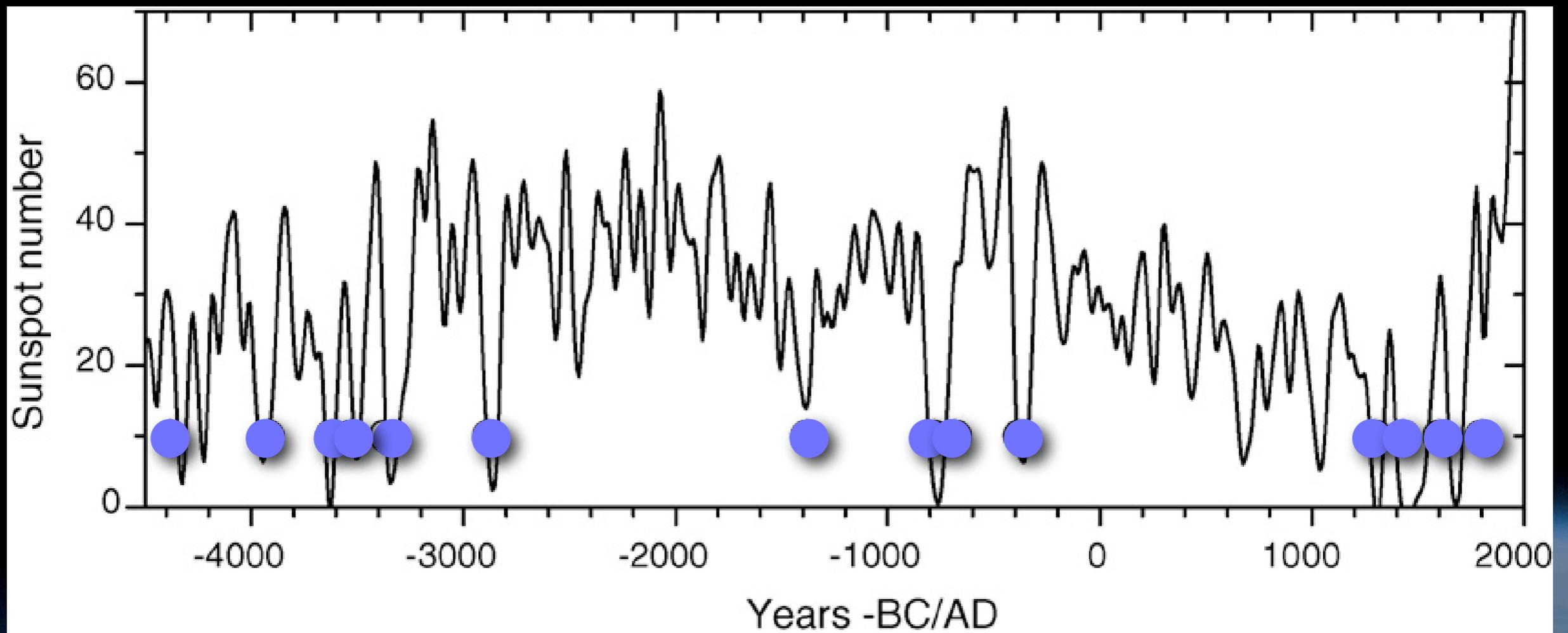


Variation relative
du flux de
neutrons (Climax)

nombre de
taches solaires

Rayons cosmiques en tant que diagnostic

Reconstruction du nombre de taches solaires à partir du ^{10}Be

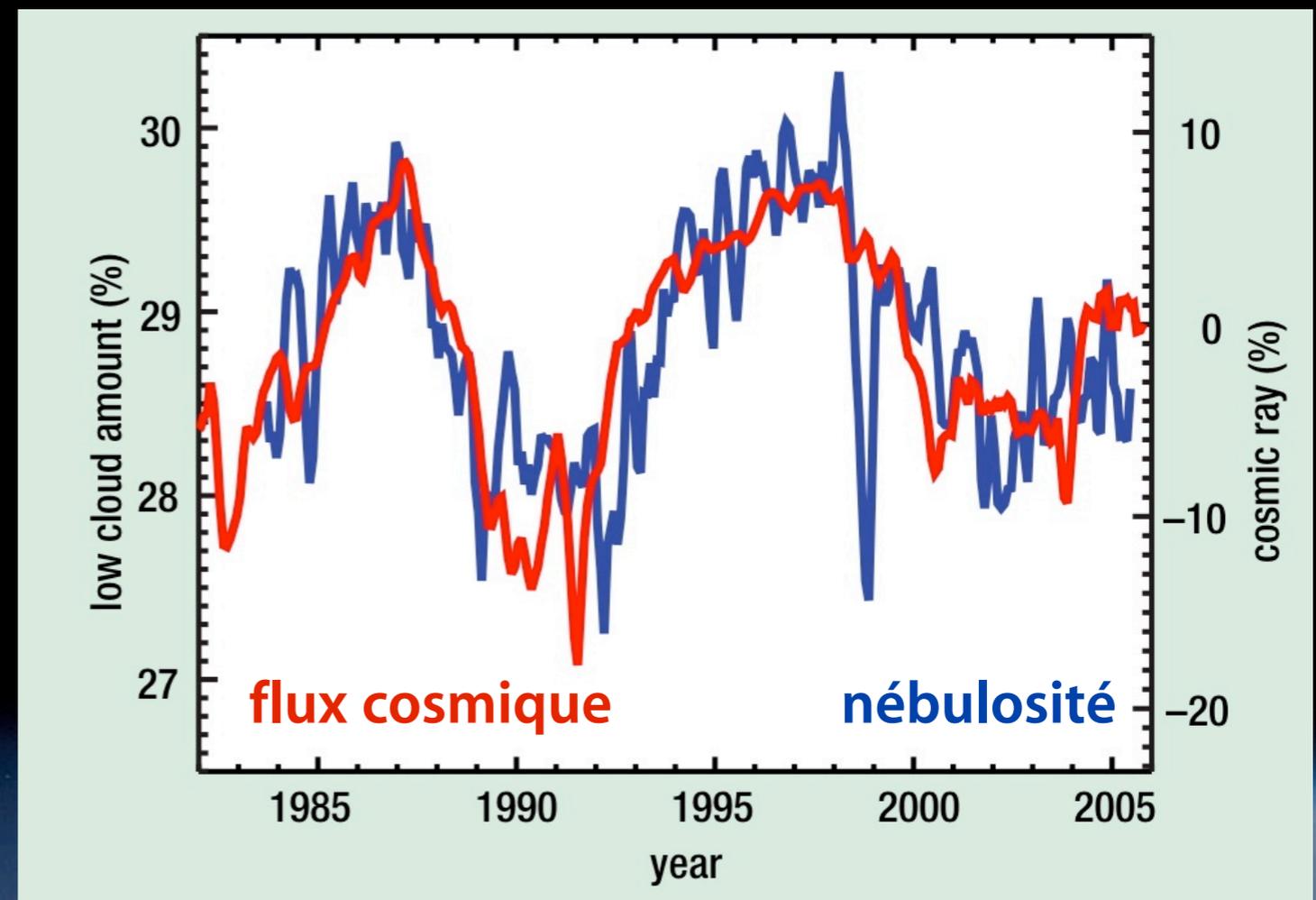


Un effet des rayons cosmiques sur le climat ?

Rayons cosmiques et climat

Ces rayons cosmiques pourraient avoir un impact sur la nébulosité :
rayon cosmique → *noyau de condensation* → *nébulosité*

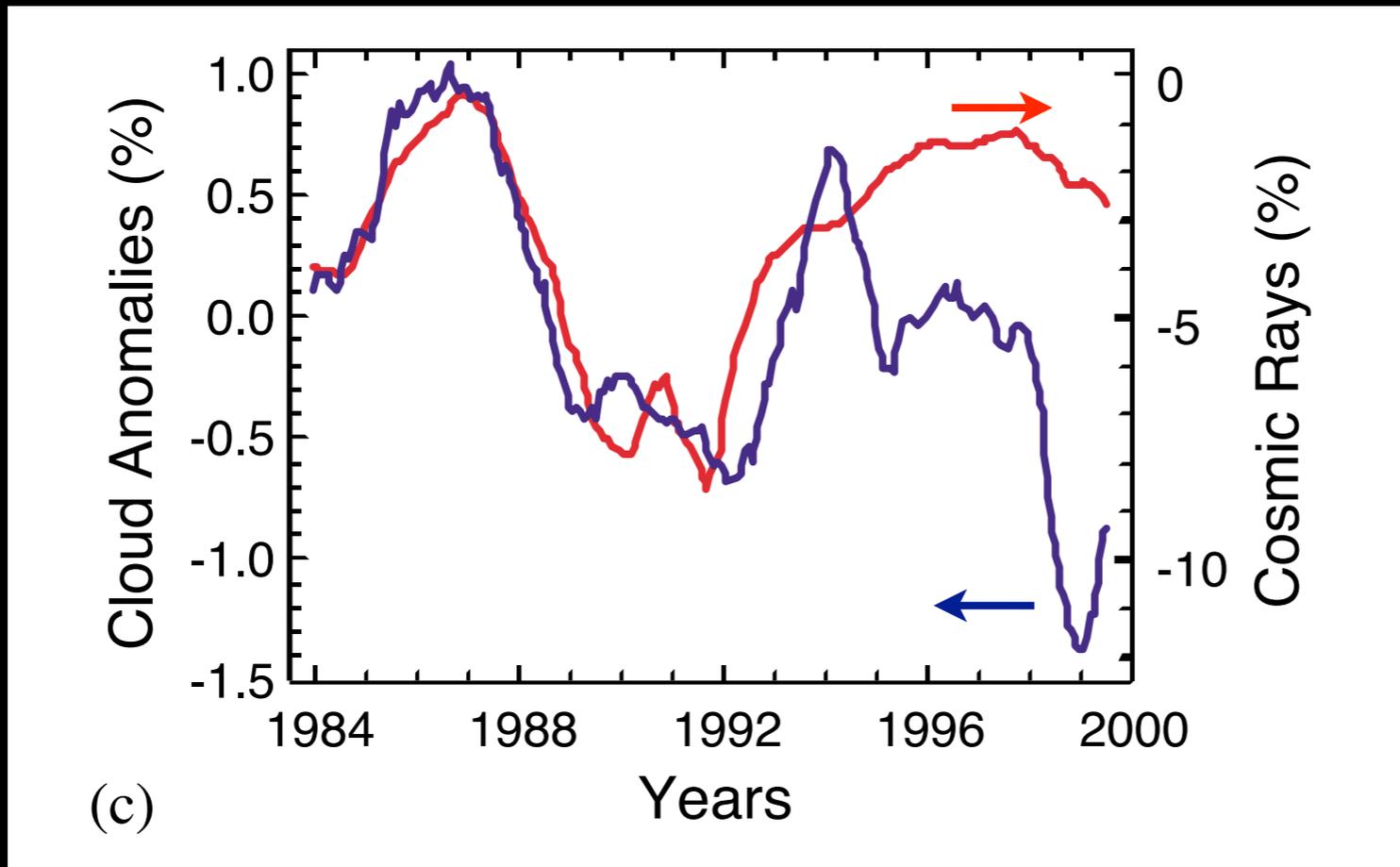
Corrélation entre la nébulosité à basse altitude et le flux de rayons cosmiques



Svensmark (2007)

Rayons cosmiques et climat

Mais l'interprétation dépend beaucoup du prétraitement des données. Les dernières observations contredisent ce modèle...

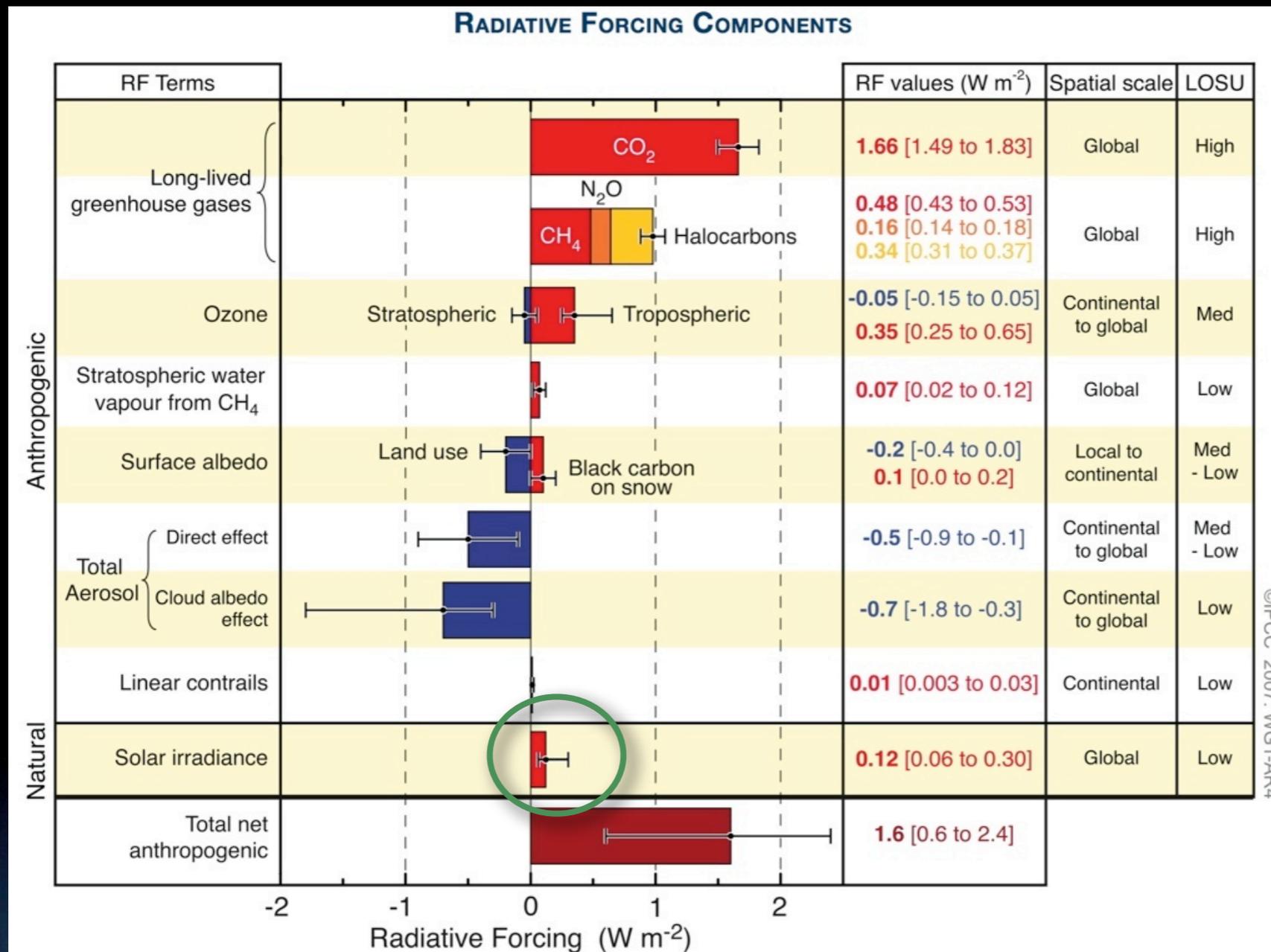


*Kristjánsson
(2002)*

Pour conclure

Le bilan du GIEC

- Le GIEC (Groupement Intergouvernemental d'Experts sur l'évolution du Climat) a établi un bilan détaillé des contributions au réchauffement actuel



Les différents forçages radiatifs (IPCC, 2007)

Bilan

Une forte majorité de scientifiques pense que l'apport du Soleil au réchauffement actuel est **significatif mais secondaire** face aux effets anthropiques.

Pour en savoir plus :

<http://lpc2e.cnrs-orleans.fr/~ddwit/soleil/>