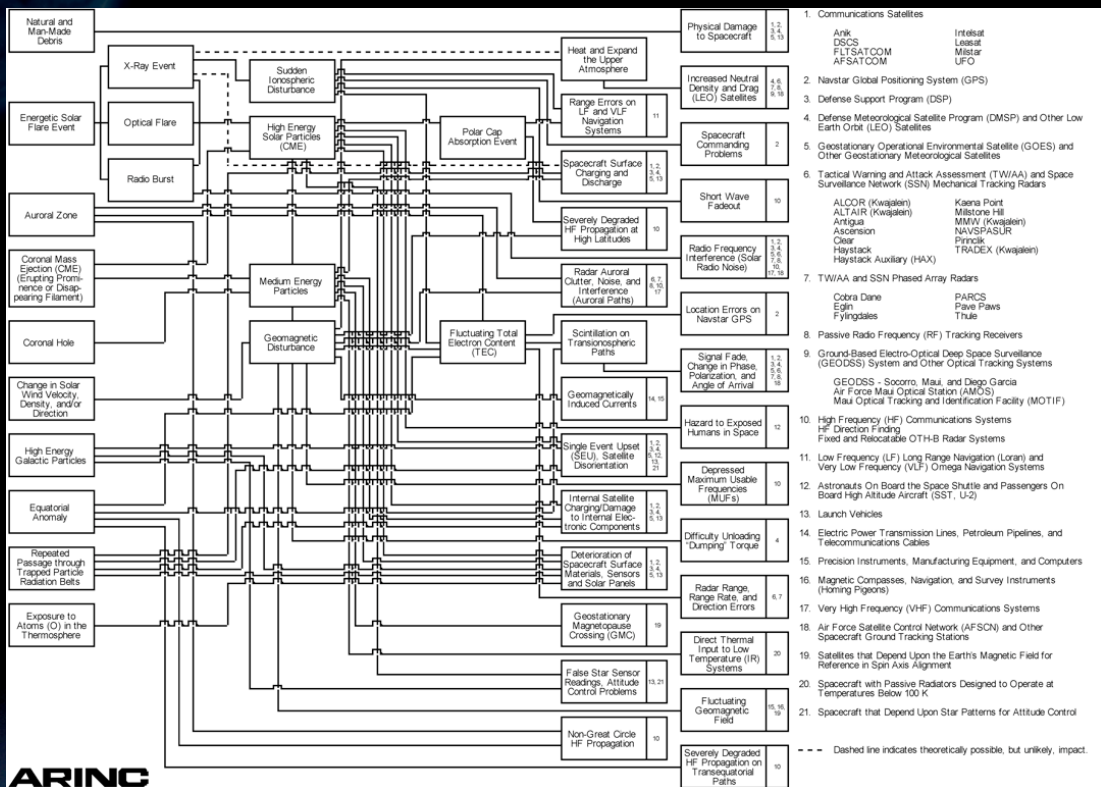


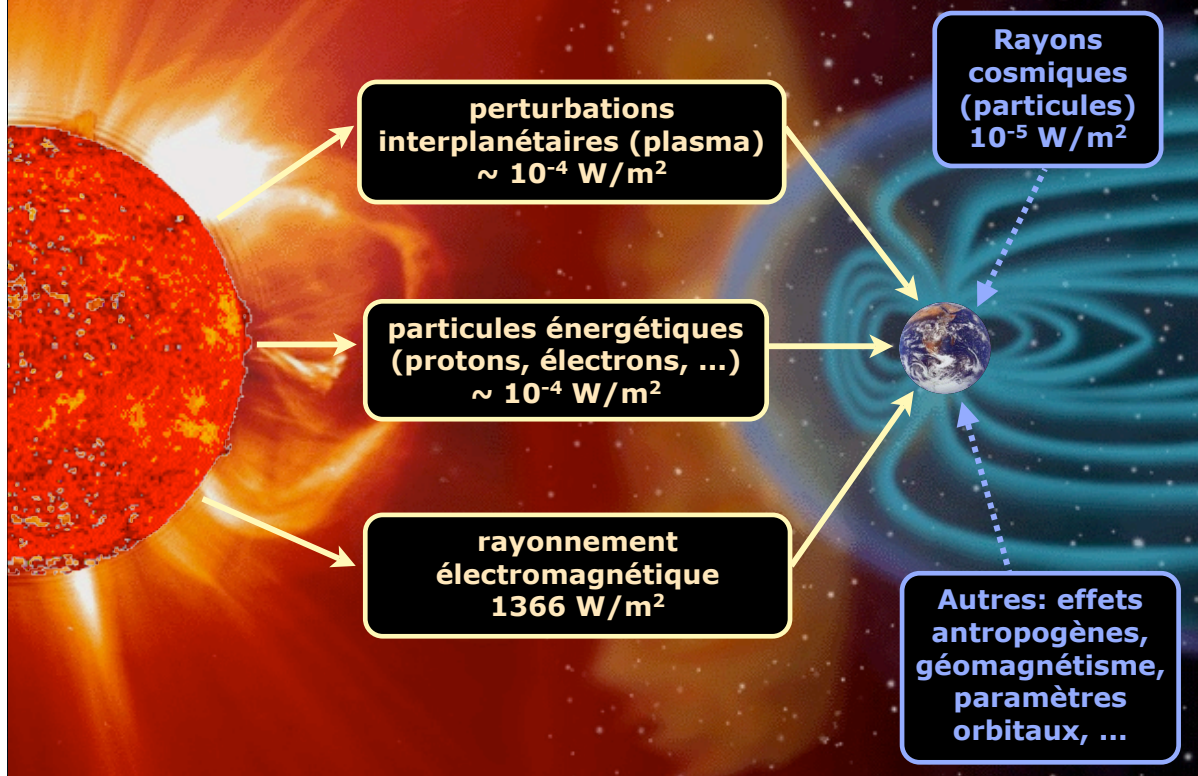
# Relations Soleil-Terre et le rôle de la composante ultraviolette

Thierry Dudok de Wit  
(Laboratoire de Physique et Chimie de l'Environnement,  
CNRS et Université d'Orléans)  
&  
membres du programme COST-724

## Rien n'est simple



## les principaux mécanismes des relations Soleil-Terre



## Quelques dates-clé

- 1612** Galilée observe des taches solaires :  
le Soleil n'est donc pas immaculé...
- 1859** Richard Carrington observe une éruption  
l'activité solaire aurait-elle un impact sur Terre ?
- 1980** début de l'âge d'or spatial...  
... et fin de la constante solaire
- 1990** météorologie de l'espace  
les impacts sociétaux de l'activité solaire
- 1998** effets sur le climat ?

# Plan

**Partie I** : Chronologie d'un événement : *fin Août 2005*

**Partie II** : Impact sur l'environnement terrestre

- rayonnement corpusculaire
- perturbations du vent solaire
- rayonnement électromagnétique (+ importance de la composante UV)
- Causalité, corrélation et alcoolisme

## Partie I

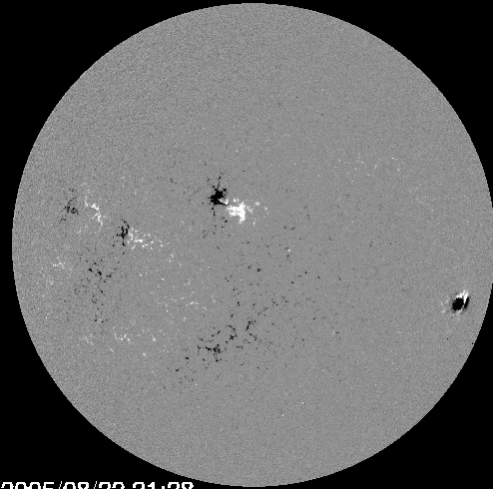
### Un exemple d'événement Soleil-Terre

**22 Août 2005**



2005/08/22 20:48

*Le Soleil en lumière  
visible (SOHO/MDI)*



2005/08/22 21:28

*Intensité du champ  
magnétique photosphérique  
(SOHO/MDI)*

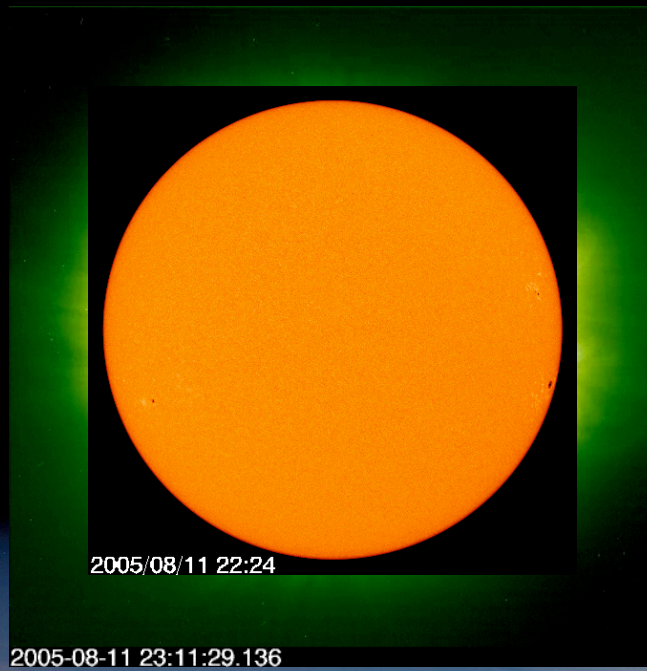
**L'effet du rayonnement  
électromagnétique**



## Le Soleil, vu en UV

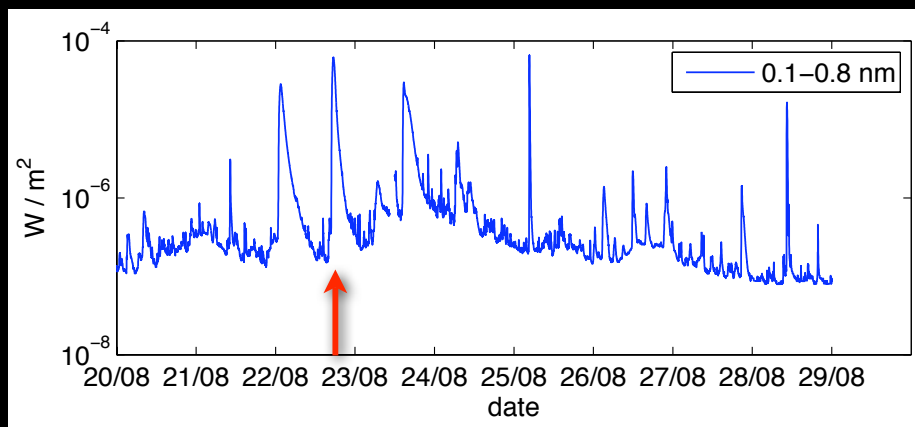
Dans l'ultraviolet (UV), le même soleil apparaît bien plus structuré

2 semaines d'observation  
en ultraviolet extrême  
(19.5 nm, EIT/SOHO)



## Le Soleil et les rayons X

Ces éruptions s'accompagnent d'émissions en rayons X mous



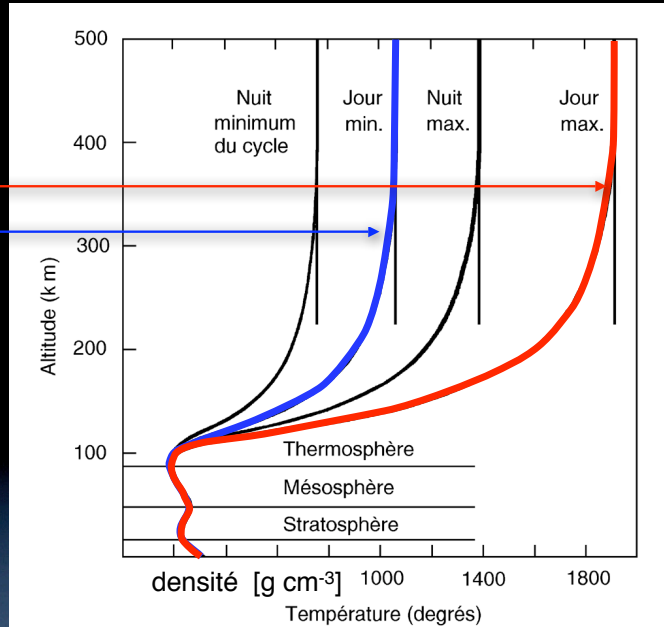
Le flux X émis par le Soleil (GOES10)

# Impact sur l'ionosphère

L'ionisation de l'ionosphère provoque une hausse de

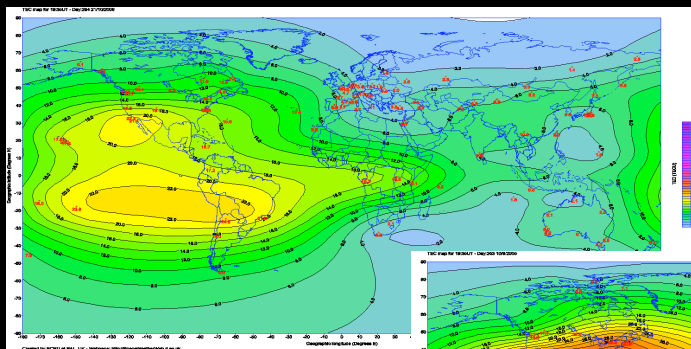
- sa densité (neutre + électronique)
- sa température

forte activité  
faible activité



# Impact sur l'ionosphère

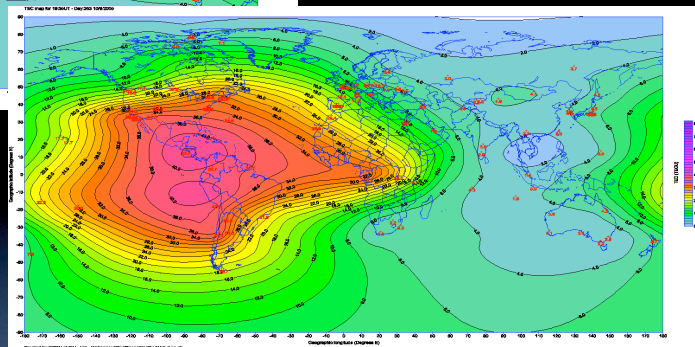
Le rayonnement UV a pour immédiat premier d'ioniser l'ionosphère



Contenu électronique total (jour calme)

crédit: RAL

Contenu électronique total (après éruption)

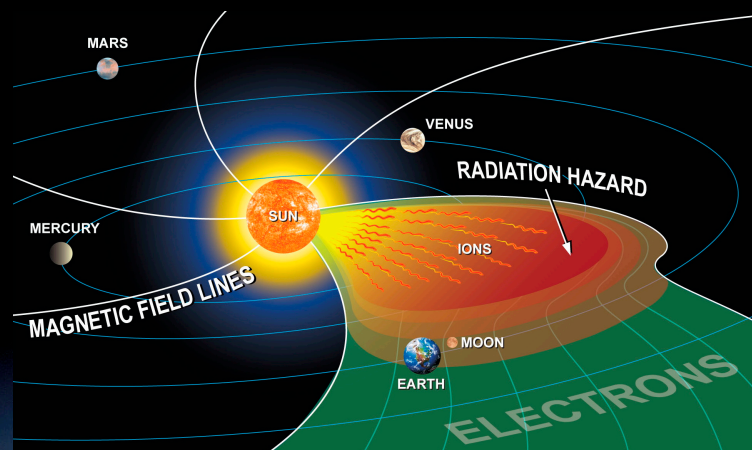


## L'effet du rayonnement corpusculaire solaire

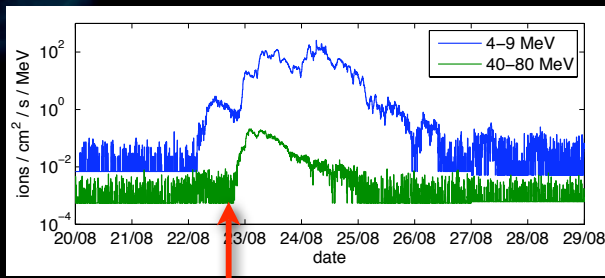
## Particules énergétiques solaires

L'éruption solaire provoque l'accélération de **particules** (protons, électrons, ...) jusqu'à de hautes énergies (100 keV - 100 MeV)

Ces particules se dirigent le long des lignes de champ magnétique



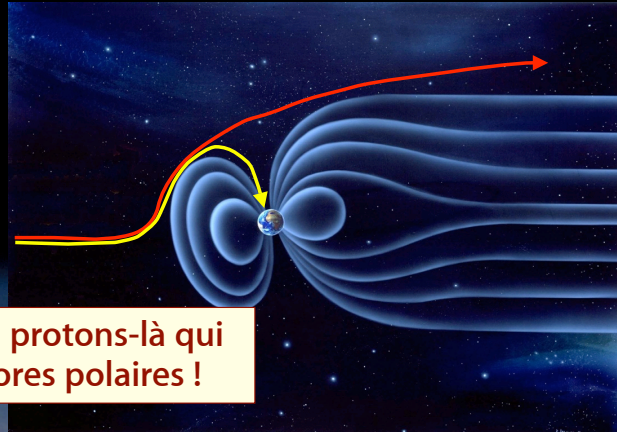
## Particules énergétiques solaires



Flux de protons mesuré en orbite géostationnaire (GOES 10)

crédit: ILWS

En raison du blindage du champ géomagnétique, seule une **faible fraction** de ce flux atteint les hautes couches de l'atmosphère.

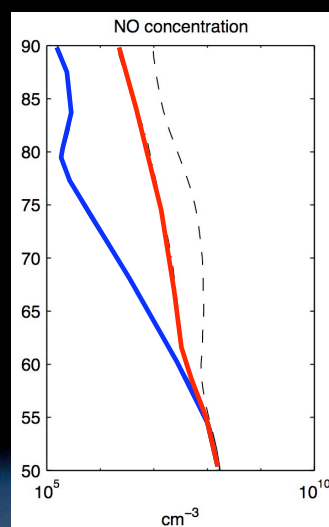


Ce ne sont pas ces protons-là qui génèrent les aurores polaires !

## Particules énergétiques solaires

Ce flux de particules ionise l'ionosphère à haute latitude, générant des  $\text{NO}_y$ , et détruisant l' $\text{O}_3$

Densité de NO dans la mesosphère *avant/après* un événement à protons



Verronen et al. (2002)



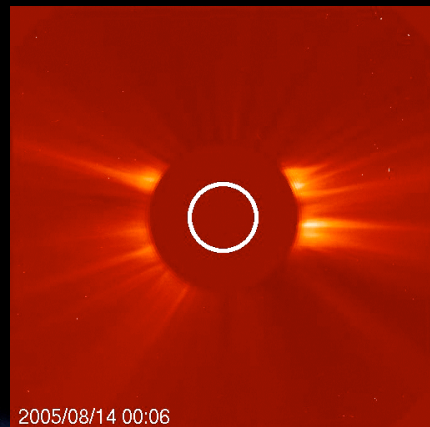
## L'effet du vent solaire

## Les perturbations du vent solaire

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

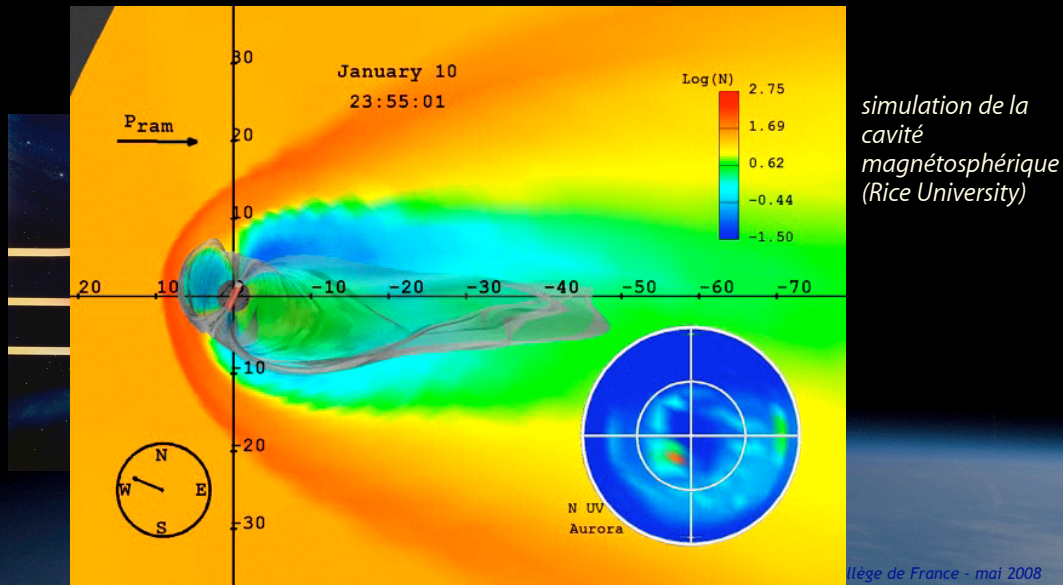
Ceci vient constituer le **vent solaire**, qu'on peut visualiser en occultant le Soleil

*2 semaines d'observations avec le Soleil occulté (coronographe LASCO-C2)*



# Impact sur le champ géomagnétique

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

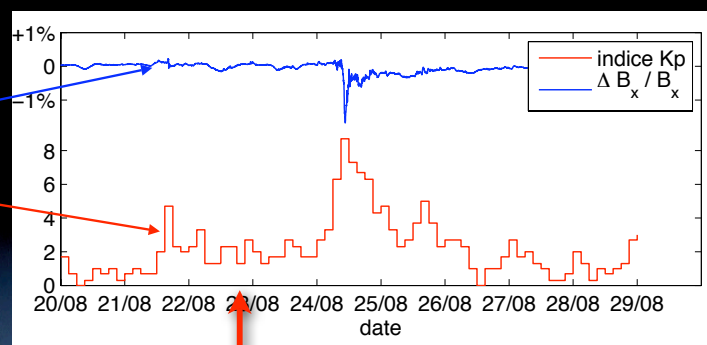


# Impact sur le champ géomagnétique

- Ces perturbations déclenchent des **orages magnétiques**, avec
  - champ magnétique modifié (< quelques %)
  - ionosphère perturbée (réchauffement + dilatation)
  - peuplement de certaines régions avec des particules de haute énergie

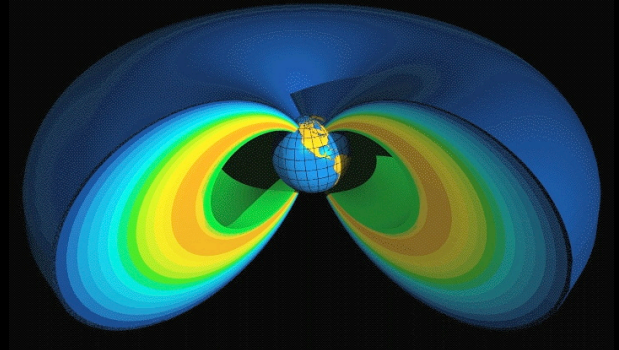
Variation du champ magnétique à Chambon-la-Forêt

Indice magnétique planétaire Kp



## Perturbation du champ géomagnétique

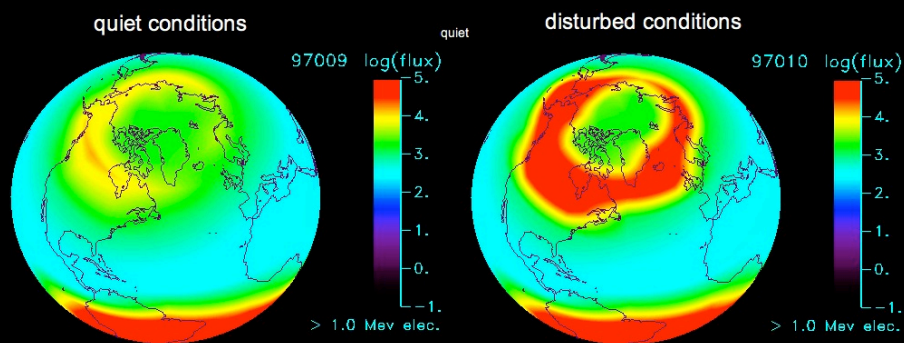
Les orages magnétiques entraînent le peuplement des **ceintures de radiation** par des particules de haute énergie ( $e^-$ ,  $p^+$ , ...)



Ces particules peuvent ensuite y rester des mois

## Perturbation du champ géomagnétique

Dans les jours qui suivent l'orage magnétique, des particules issues des ceintures de radiation **se précipitent dans la haute atmosphère**



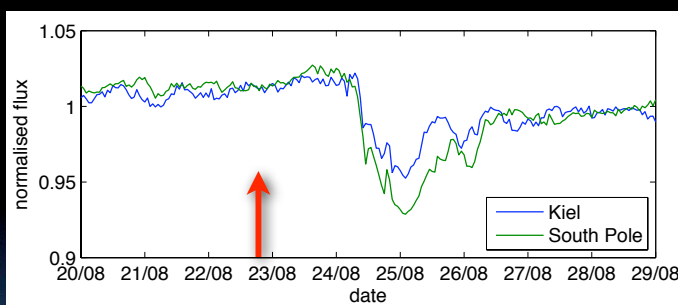
*Flux d'électrons avant/après perturbation du champ (SAMPEX)*

## L'effet des rayons cosmiques

## Les rayons cosmiques

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

La perturbation du vent solaire et les orages magnétiques provoquent une baisse du flux au niveau de la Terre

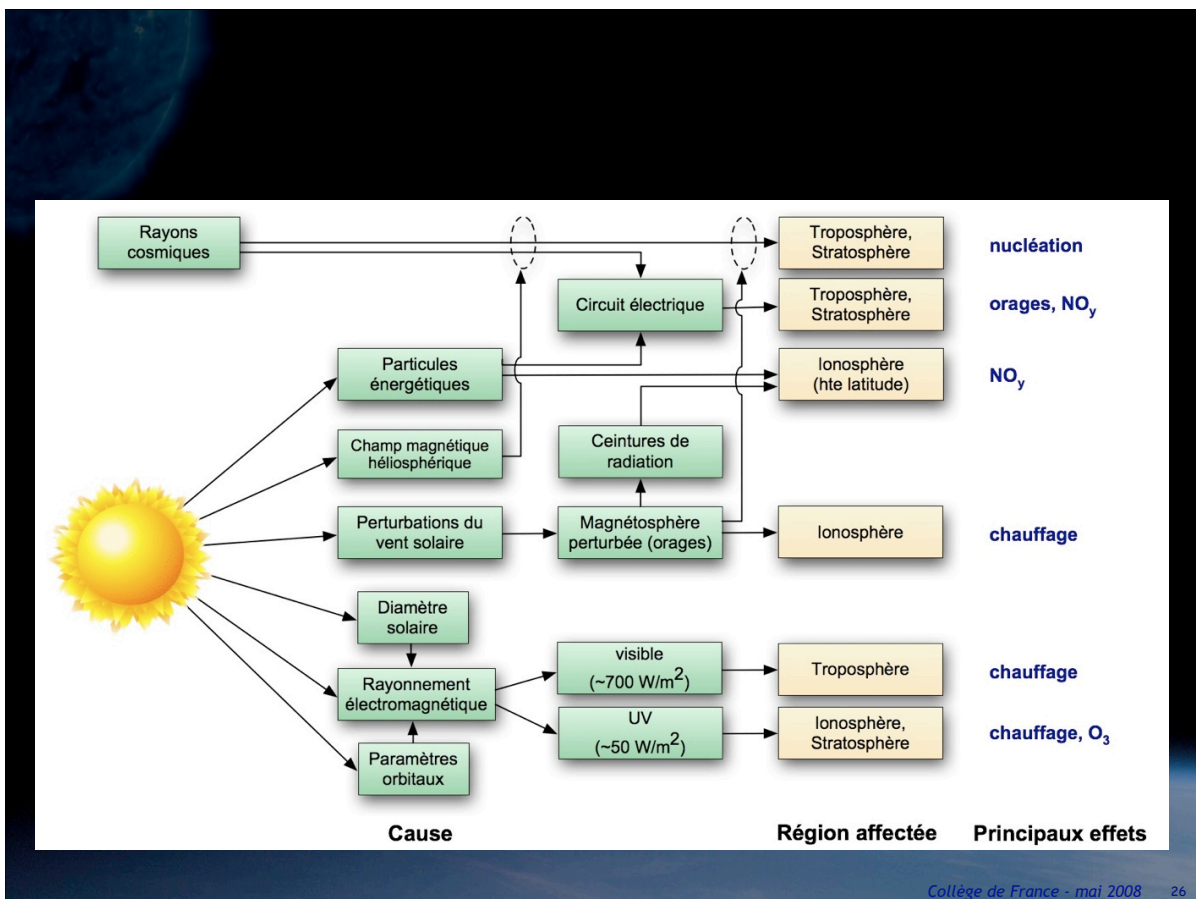


*Variation du flux cosmique en deux lieux du globe*



# Bilan

- Il existe une **variété de mécanismes** via lesquels le Soleil peut agir sur notre environnement terrestre
- Ces effets évoluent sur des **échelles de temps très diverses** (secondes-jours-années-siècles)
- Ces mécanismes sont **non-linéaires et couplés**: certains peuvent produire un effet ou son contraire
- L'impact sur le climat peut résulter aussi bien de la fréquence d'événements rares mais intenses que de la statistique d'effets fins mais persistants



# Tout est corrélé avec le cycle solaire !

Irradiance  
totale

Irradiance  
dans l'UV

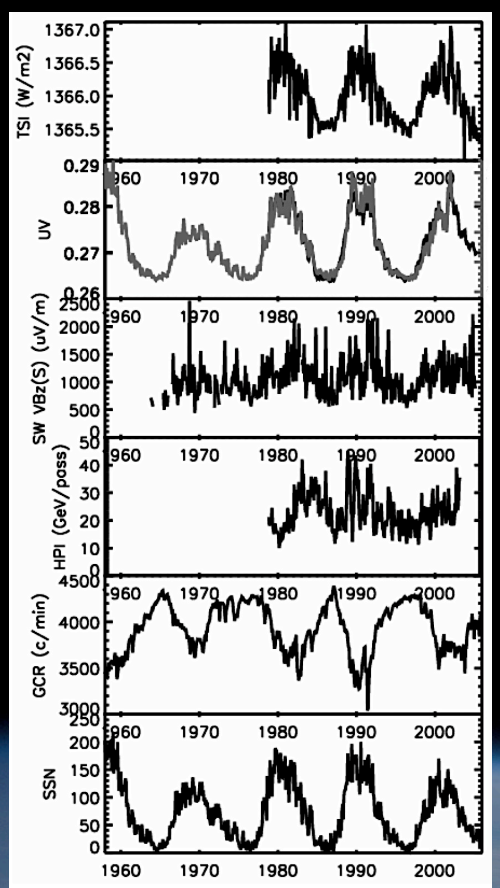
Milieu  
interplanétaire

Particules  
énergétiques

Rayons  
cosmiques

Nombre de  
taches solaires

*Haigh et al. (2007)*



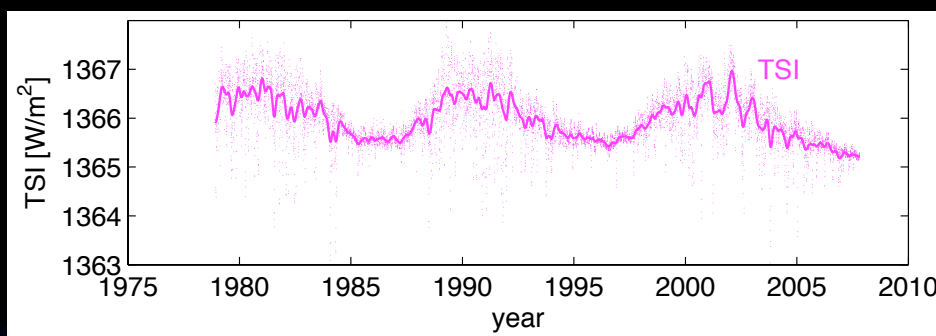
## Partie II

### Quels impacts sur le climat ?

## Forçage par rayonnement

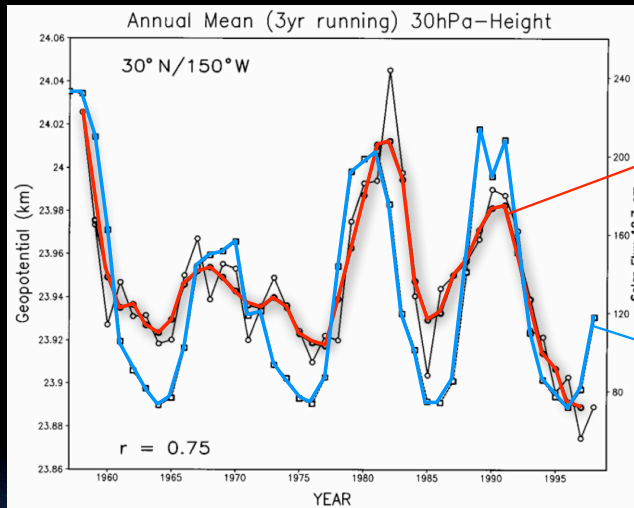
## L'irradiance totale

- la puissance rayonnée par le Soleil dans l'intégralité du spectre électromagnétique est appelée **irradiance solaire totale** (TSI)
- Elle n'est mesurée que depuis 1978
- Elle varie, mais faiblement ( $\sim 0.1\%$ )



# L'irradiance totale

Les effets dus à la modulation de l'irradiance (11 ans) sont bien observés à basse altitude, mais plus difficiles à simuler



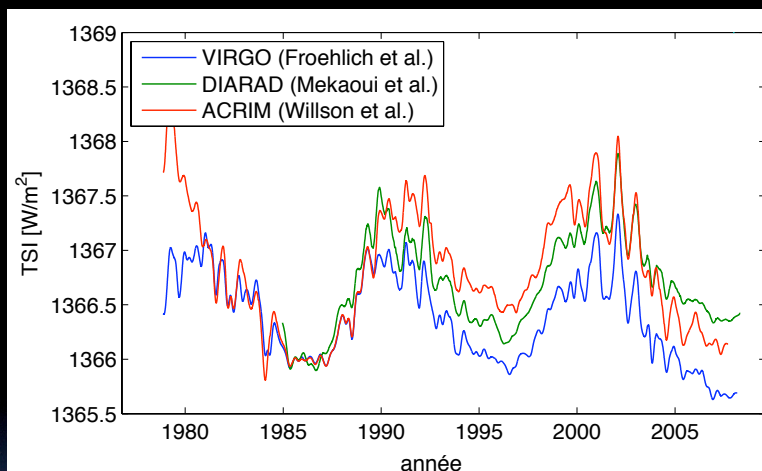
Altitude géopotentielle moyenne de 30 hPa

Activité solaire (émission à 10.7 cm)

(Labitzke et al., 1998)

# L'irradiance totale

- La reconstruction de l'irradiance totale à partir de plusieurs instruments est délicate
- Il n'y a pas de consensus entre les différentes versions





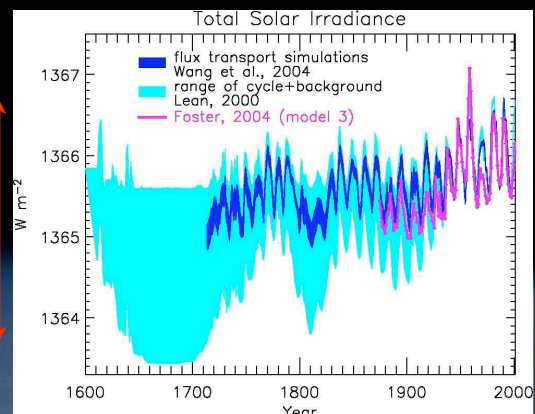
# L'irradiance totale

- Il y a eu de nombreuses tentatives pour **reconstruire la TSI dans le passé**
- Ces reconstructions sont basées sur
  - extrapolation à partir du nombre de taches solaires, d'indices géomagnétiques...
  - des modèles du flux magnétique solaire
  - comparaison avec des étoiles semblables
  - ...

- Une **incertitude** persiste, avec des conséquences possibles importantes

1-3 W/m<sup>2</sup> !

*Différentes extrapolations de la TSI  
Haigh (2007)*



## Bilan de l'irradiance totale

- Depuis 1985
  - la TSI pourrait avoir varié de -0.3 W/m<sup>2</sup> à + 0.4 W/m<sup>2</sup>
  - son augmentation pourrait expliquer 8% (IPCC07) à 70% du réchauffement
- Depuis le minimum de Maunder (~ 1650)
  - la TSI a augmenté
  - sa quantification est difficile : 0.5 à 3 W/m<sup>2</sup> (typiquement 1.7 W/m<sup>2</sup> ?)
- La mesure de la TSI est délicate et sa calibration reste sujette à caution
- Qu'est-ce qui amplifie le forçage radiatif ?

$$\Delta T = \kappa \Delta I \quad \kappa = ?$$

Au lieu de se focaliser sur la TSI, il faudrait étudier la contribution des différentes parties du spectre solaire

# Le spectre solaire

Le spectre solaire est constitué d'une multitude de longueurs d'onde, qui ont des impacts différents sur Terre



# Le spectre solaire

## Le Soleil

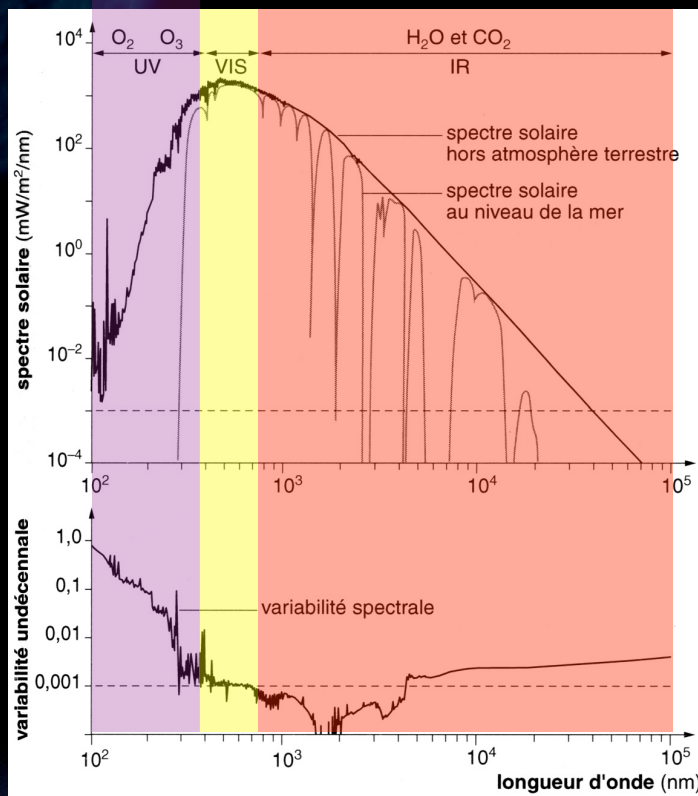
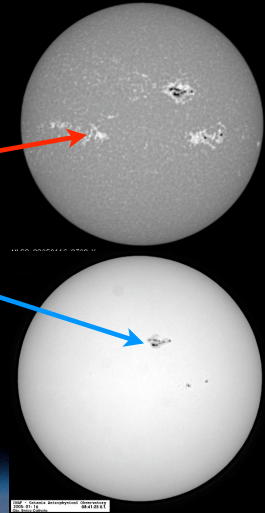
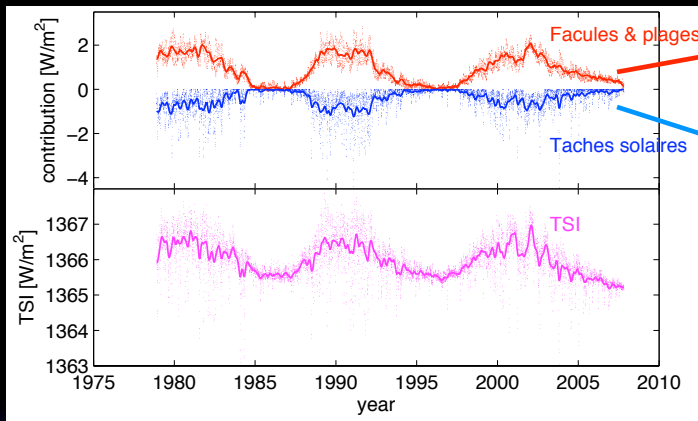
vu dans différentes longueurs d'onde  
le 11 décembre 2007



# L'irradiance totale

La variation de la TSI résulte d'un compromis entre

- déficit de rayonnement dû aux taches solaires
- excès de rayonnement dû aux plages et aux facules



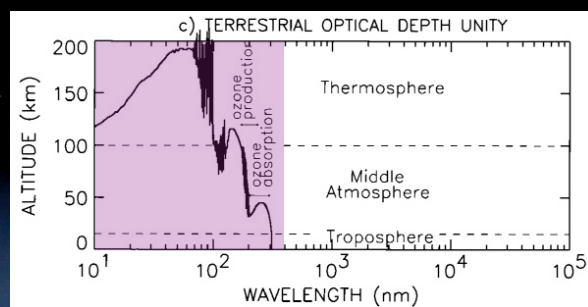
Le spectre solaire

La variabilité relative au cours du cycle de 11 ans

Nesme-Ribes & Thuillier (2000)  
Lean & Rind (1998)

## La contribution de l'UV

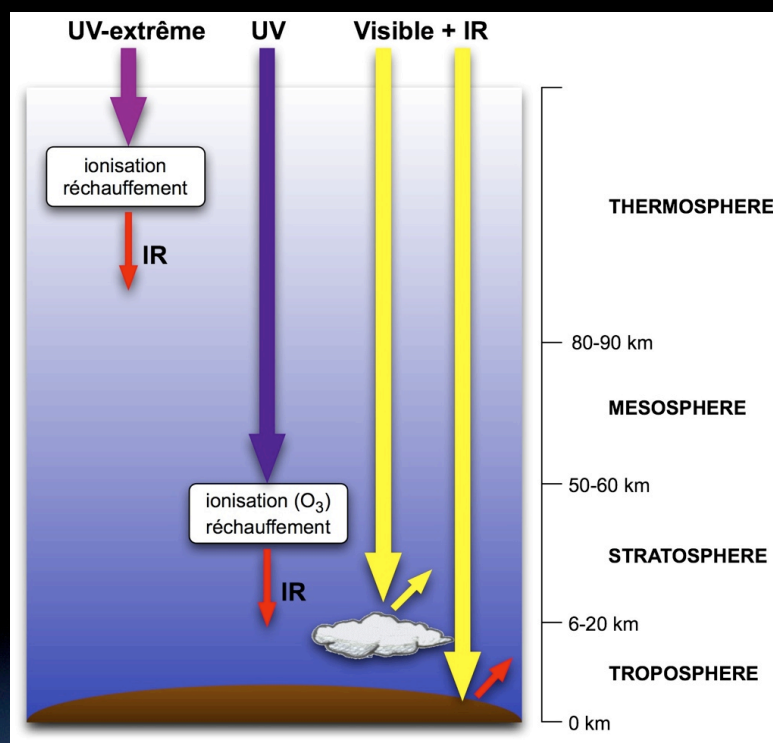
- L'UV ne représente qu'une faible fraction de la puissance reçue
  - 1% pour  $\lambda < 200$  nm
  - 8% pour  $\lambda < 300$  nm
- mais sa **variabilité est forte** (1-100%)  $\Rightarrow$  effet de levier ?
- L'UV est absorbé dans la stratosphère, où il dissocie les atomes et produit de l'O<sub>3</sub>



Lean & Rind (1998)

Collège de France - mai 2008 39

## L'irradiance : bilan

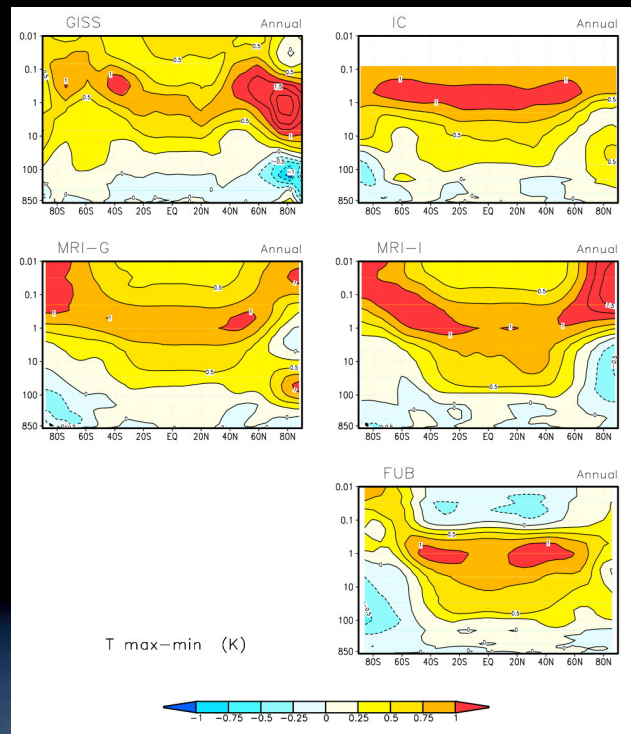


Collège de France - mai 2008 40



## La contribution de l'UV

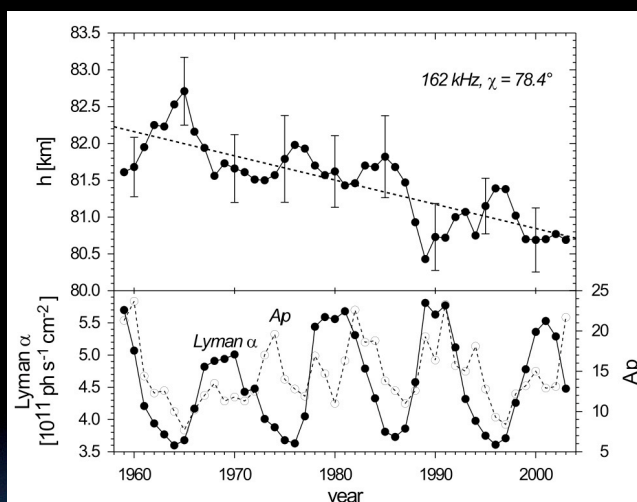
Variation de la température sous l'effet du forçage radiatif, incluant l'effet des UV sur l'ozone - 5 modèles globaux différents



Matthes et al. (2003)

## Le ciel nous tombe sur la tête


- L'altitude moyenne de la mesosphère diminue (= refroidissement de 0.2-0.4 °C/an)
- Mais ceci est surtout dû à l'accumulation en gaz à effet de serre



Altitude moyenne, obtenue par radiosondage

Activité solaire

Bremer (2005)



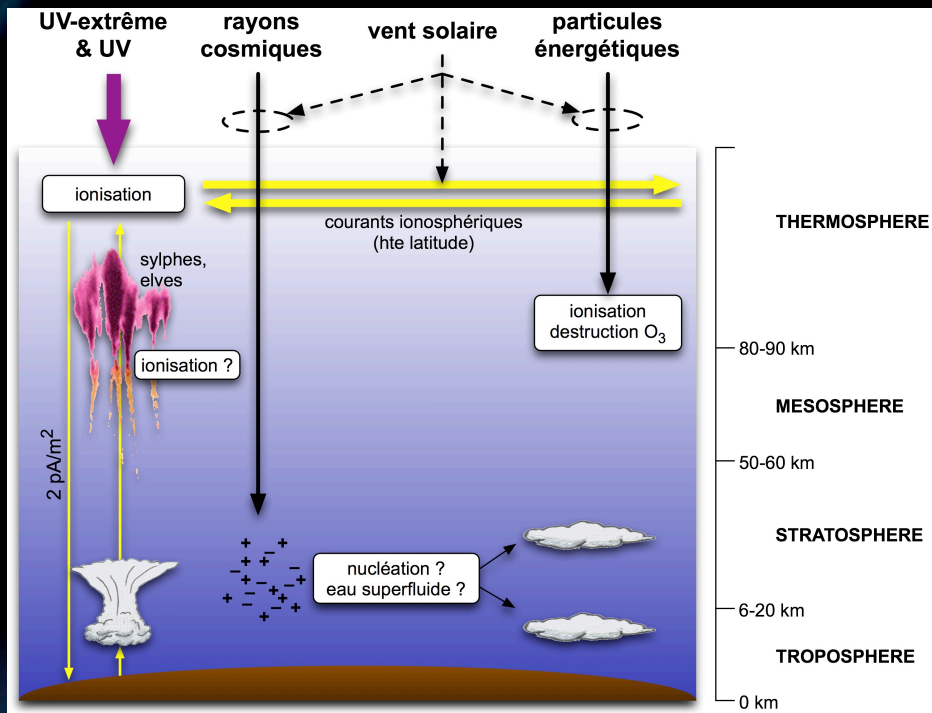
## Forçage par le rayonnement corpusculaire



## Particules : les mécanismes

- Le rayonnement corpusculaire peut avoir 3 origines
  - protons solaires (énergie : MeV)
  - protons et électrons des ceintures de radiation (keV-MeV)
  - rayons cosmiques de haute énergie (MeV-TeV)
- Ces particules ont pour effet de :
  - **ioniser** : création et destruction d'O<sub>3</sub> ⇒ circulation
  - modifier le **circuit électrique** ⇒ orages
  - créer des **noyaux de condensation** ⇒ nébulosité

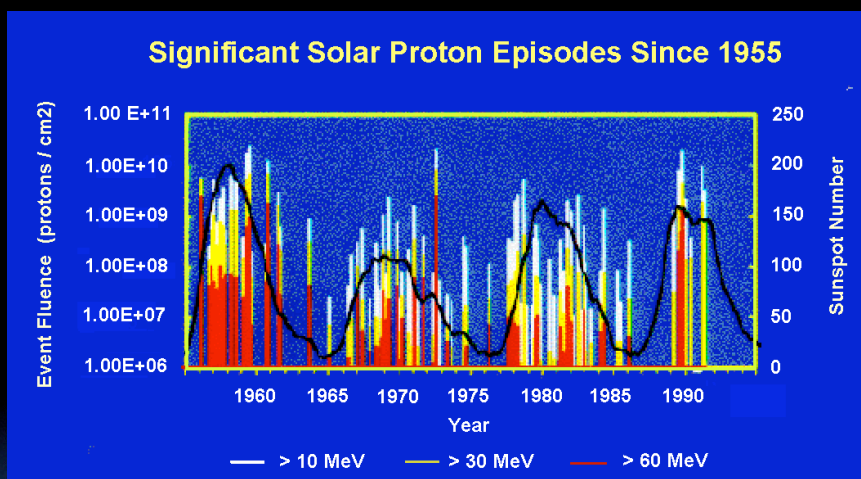
# Particules : les mécanismes



Collège de France - mai 2008 45

# Particules solaires et des ceintures

- Le flux de particules solaires est très intermittent.
  - Son impact a été observé : production de  $\text{NO}_y$ , diminution d' $\text{O}_3$
  - Son forçage est faible.



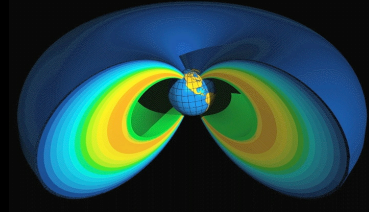
N. Fox (1998)

Collège de France - mai 2008 46

## Particules des ceintures

Le flux de particules issues des ceintures est plus persistant

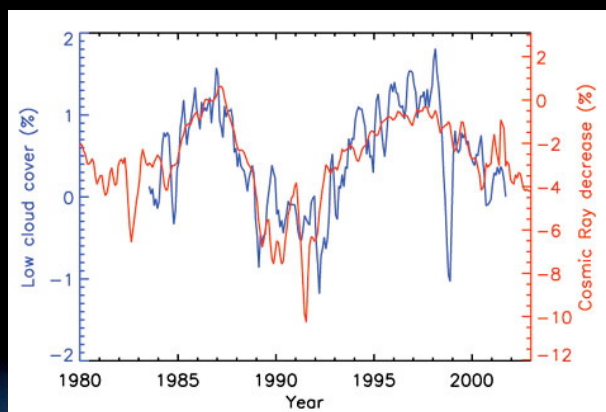
- Son impact à court terme a été observé sur le taux de  $\text{NO}_y$  (= moins d' $\text{O}_3$ )
- Soleil actif  $\Rightarrow$  flux réduit  $\Rightarrow$  moins de  $\text{NO}_y$   
 $\Rightarrow$  moins d'ozone détruit
- Son forçage à long terme est mal connu
  - effets du champ magnétique solaire, du vent solaire, du champ géomagnétique
  - les mesures (depuis 1976) ne permettent pas de conclure sur l'existence d'une variation séculaire



## Particules : les rayons cosmiques

Les rayons cosmiques pourraient avoir un impact sur la **nébulosité** à basse altitude

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



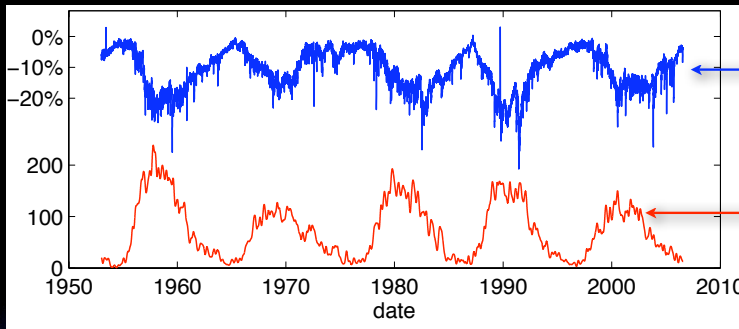
*Marsh & Svensmark (2003)*



## Les rayons cosmiques

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

Soleil actif  $\Rightarrow$  champ magnétique plus intense  $\Rightarrow$  flux cosmique réduit sur Terre  $\Rightarrow$  moins de nuages

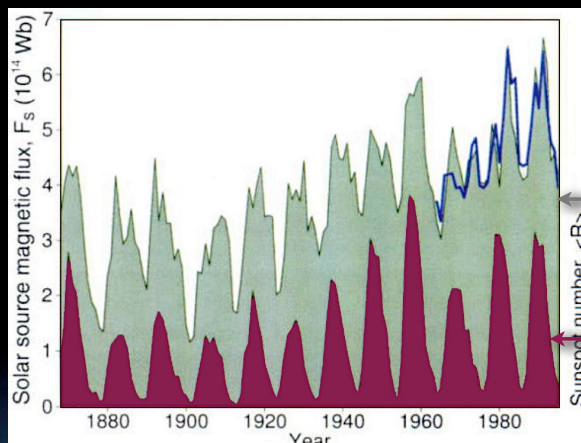


Variation relative du flux de neutrons (Climax)

nombre de taches solaires

## Les rayons cosmiques

- A long terme, les rayons cosmiques sont affectés par
  - le champ magnétique solaire : ce champ a augmenté depuis 1900
  - les conditions du vent solaire : évolution incertaine
  - notre position dans la galaxie : effets à l'échelle de  $10^6$  années



Variation du flux magnétique ouvert du Soleil

Nombre de taches solaires

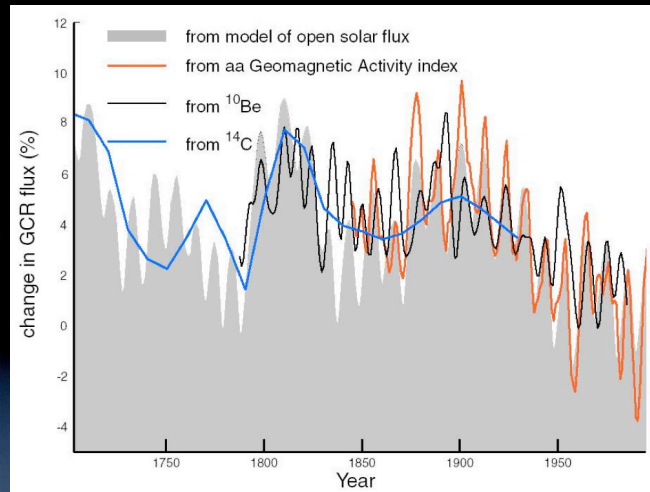
Lockwood et al., (1999)

# Le rayonnement cosmique

Ces variations à long terme sont corroborées par les mesures d'isotopes cosmogéniques

*Corrélation entre champ magnétique solaire et taux de production en isotopes cosmogéniques*

*Carslaw et al. (2002)*



Collège de France - mai 2008 51

## Particules et circuit électrique : bilan

Trois processus, avec des impacts très différents :

### ☉ Protons solaires

- flux très intermittent, **impact faible**

### ☉ Particules des ceintures de radiation

- flux plus persistant, impact à long terme incertain, **probablement réduit**

### ☉ Rayons cosmiques

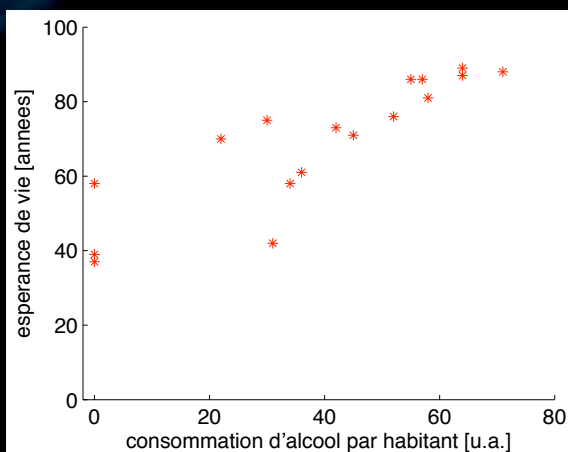
- flux continu, **impact probable**
- **plusieurs inconnues** : importance de la nucléation, effets à haute/basse latitude, effets opposés sur les nuages bas/élevés

Collège de France - mai 2008 52

## Corrélation et causalité

De nombreuses études se basent sur la corrélation entre observables pour établir des liens de causalité...

## Un exemple

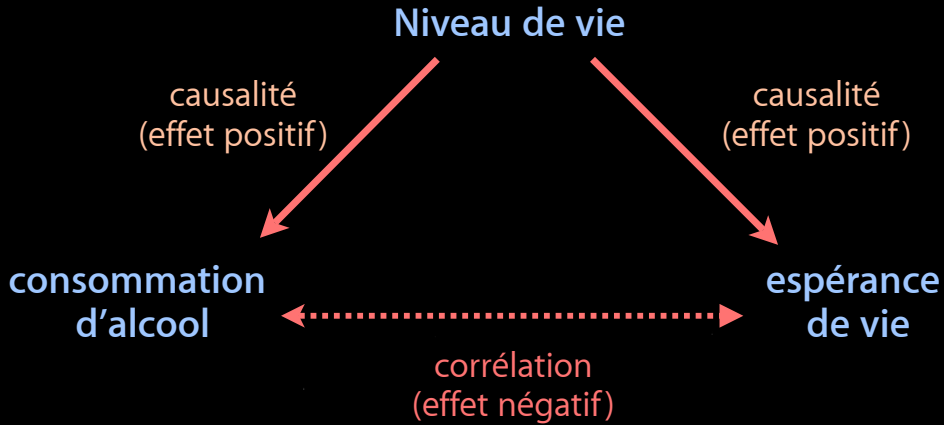


*Espérance de vie à la naissance en fonction de la consommation d'alcool, par pays.*

*d'après N. Gauvrit (2007)*

**Plus on consomme d'alcool, plus l'espérance de vie augmente ! Causalité ou corrélation ?**

# Causalité et Corrélation



Une courte bibliographie est disponible à l'adresse:  
<http://lpce.cnrs-orleans.fr/~ddwit/climat/>

Impact (>10 ans) sur le réchauffement; la taille reflète le degré de compréhension

