

LES FORCAGES EXTERIEURS ET LA MISSION PICARD

Gérard Thuillier

Service d'Aéronomie

Centre National de la Recherche Scientifique, France

PLAN

LA VARIABILITE DU CLIMAT

LE SYSTEME CLIMATIQUE

LES FORCAGES EXTERIEURS

LA MISSION PICARD

CONCLUSION

MECANISMES DU CLIMAT

Comment de tels changements peuvent-ils se produire et quels sont leurs mécanismes ?

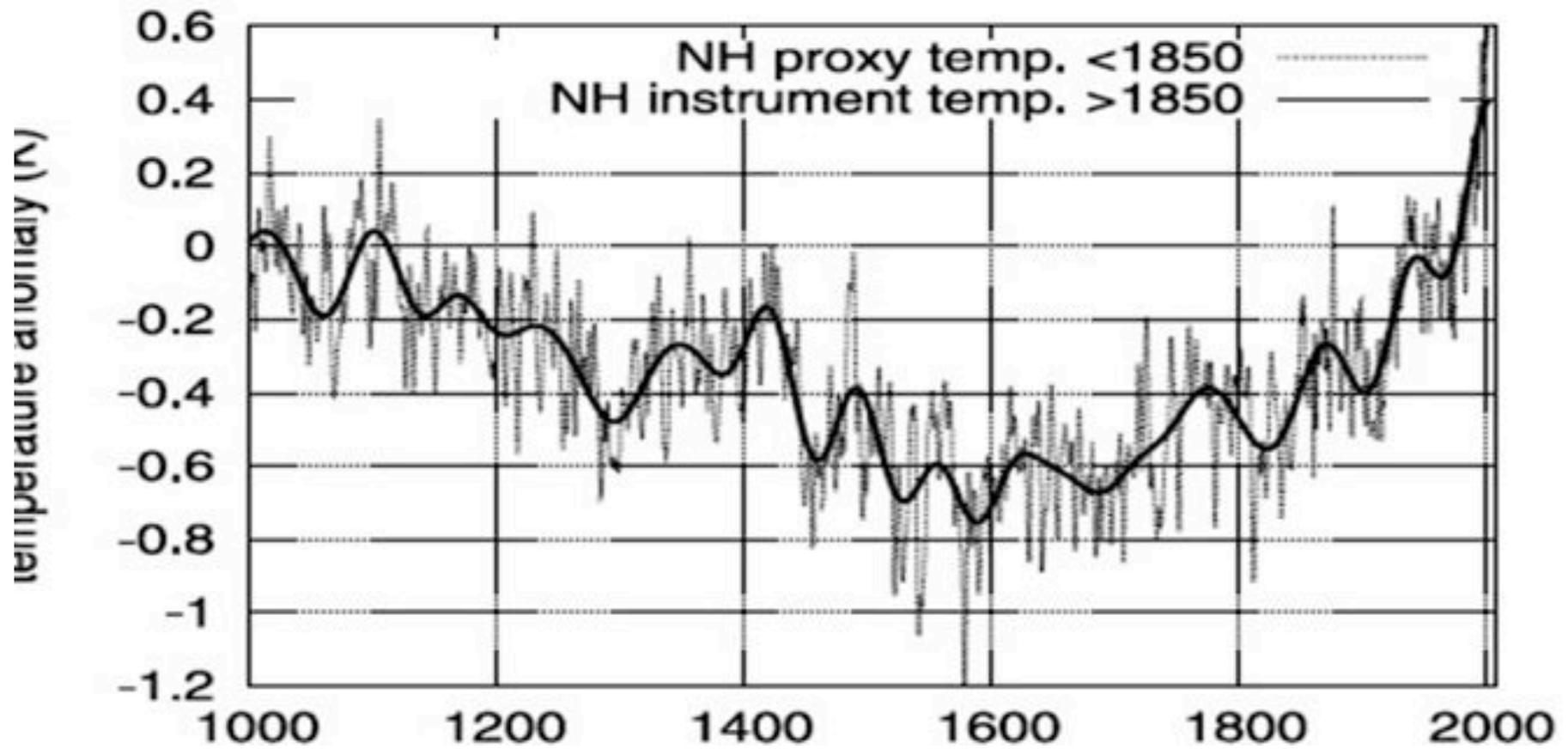
Le SOLEIL : Qui en eut le premier l'idée ?

Sans doute Riccioli, astronome italien qui exprimait son embarras à propos de la relation soleil/climat (1651) :

« Le soleil présente de moins en moins de taches. En conséquence, la chaleur atteignant la Terre devrait être plus importante et paradoxalement, le climat est de plus en plus froid ! »

Diminution du nombre de taches et rigueur du climat étaient deux faits avérés. Mais le rôle de facules solaires n'était pas alors compris.

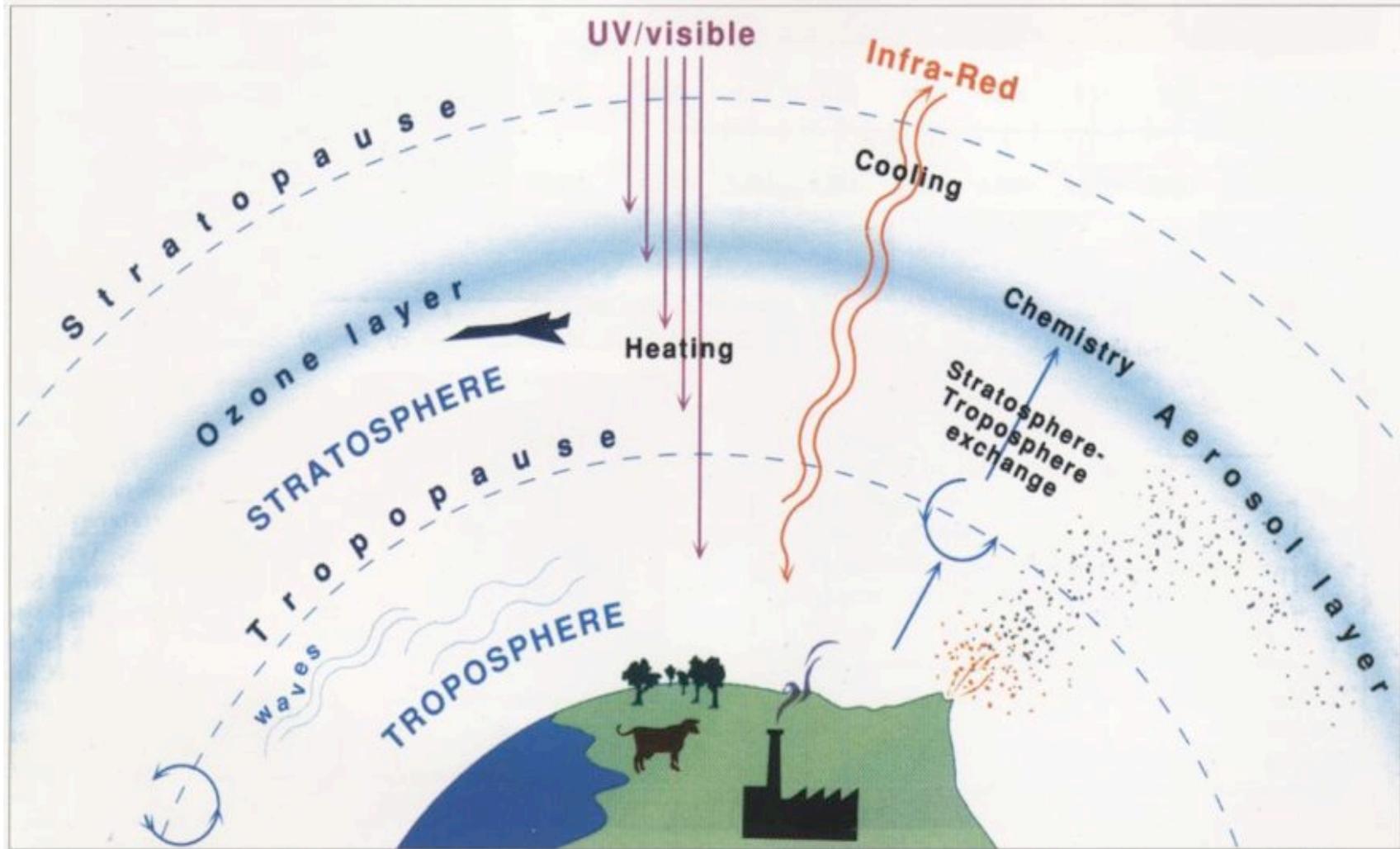
Le VOLCANISME : Le rôle des poussières dans les variations climatiques a été proposé par Benjamin Franklin après l'hiver très rigoureux de 1783-1784 qui suivit des éruptions majeures en Islande.



Optimum du Haut Moyen- Age

Petit âge glaciaire

LE SYSTEME CLIMATIQUE DE LA TERRE



SPARC

LES ACTEURS DU SYSTEME CLIMATIQUE

ACTEURS	ROLE
SOLEIL	En raison de son activité variable et des paramètres orbitaux de la Terre (théorie de Milankovitch), puissance totale et spectre varient.
Volcans	Emission de poussière, de CO ₂ et de molécules acides
Atmosphère	Composition (H ₂ O, GES). Nuages. Mouvements de l'atmosphère
Aérosols	Origine détritique, anthropique et biologique
Albédo	Océans (0.1) et continents (0.1 to 0.8)
Océan	Circulation thermohaline et de surface. Dissout et émet du CO ₂ en fonction de sa température
Biosphère	Emet/absorbe CO ₂ . Emet CH ₄ , et modifie l'albédo des sols
Orographie	Vents. Emission massive d'eau douce (H, DR)

FORCAGES EXTERNES

- ❑ SOLEIL
- ❑ VOLCANS
- ❑ EMISSIONS ANTHROPIQUES d'aérosols, de gaz, de poussières

➤ GES :

- ❖ CO₂ et CH₄ sont d'origine naturelle à laquelle contribuent la combustion du carbone fossile et l'élevage intensif.
- ❖ CFC et HCFC: leur concentration diminue (protocole de Montréal).
- ❖ HFC: leur concentration augmente car ils remplacent les CFC. Leur efficacité effet de serre est environ 10000 fois plus grande que celle du CO₂.
- ❖ Ozone troposphérique

➤ ALBEDO des sols ne constitue pas un forçage externe sauf si on change artificiellement la nature du sol.

➤ AEROSOLS : la combustion de la biomasse émet de la poussière.

FORCAGE EXTERNE : LE SOLEIL (1/8)

Le Soleil est une étoile variable car ses émissions de photons et particules sont fonction du temps. La variabilité du Soleil a été découverte à l'aide des taches solaires.

La variabilité se manifeste de la minute à plusieurs cycles undécennaux.

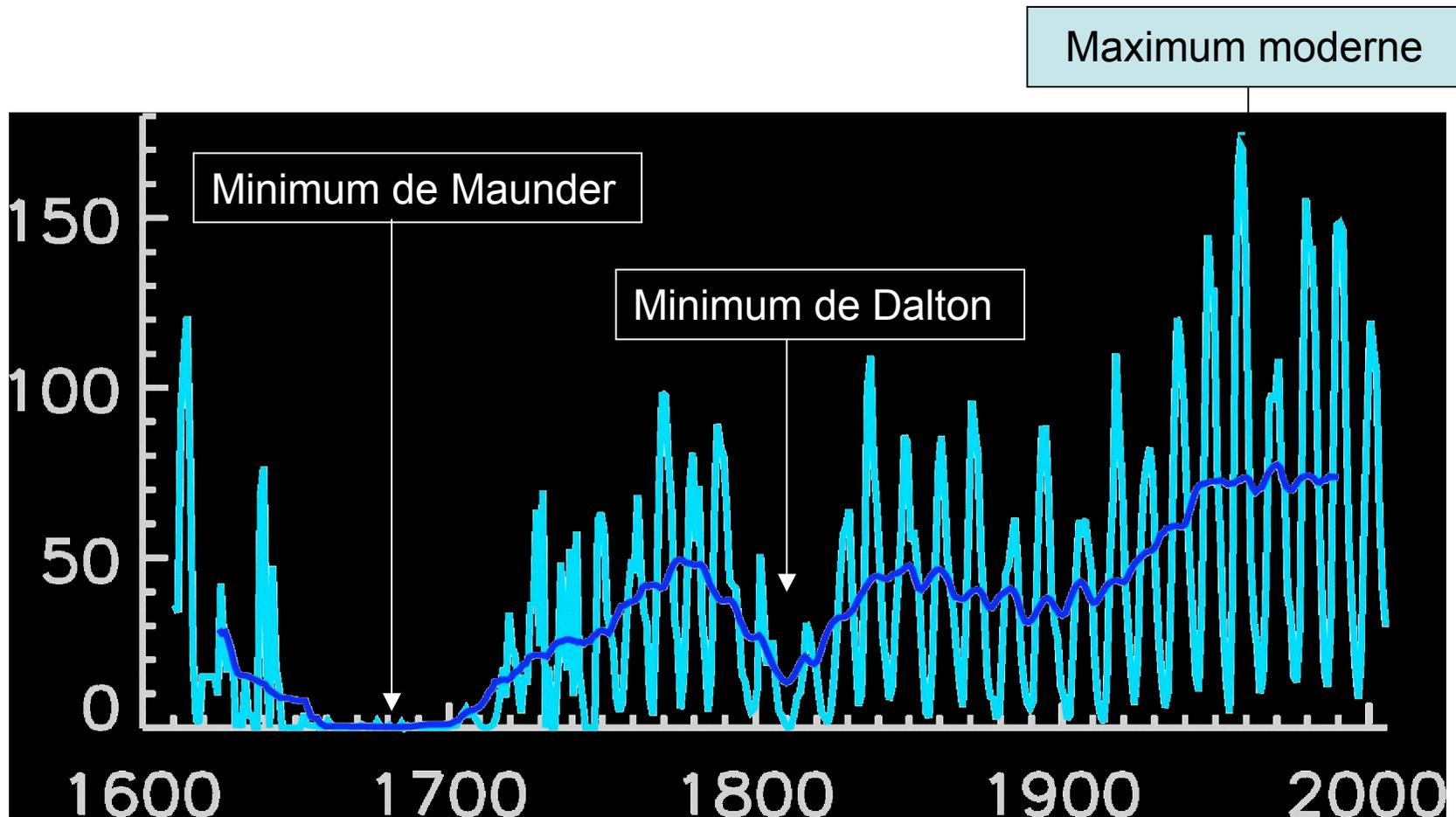
Elle présente aussi des aspects plus ou moins chaotiques, mais aussi plus ou moins périodiques.

Pour le climat, les **longues périodicités sont les plus importantes, elles sont aussi les moins bien documentées**. On a identifié :

Cycle	Période (an)
Schwabe	11
Hale	22
Gleissberg	90
Suess	200
Hallstattzeit	2300

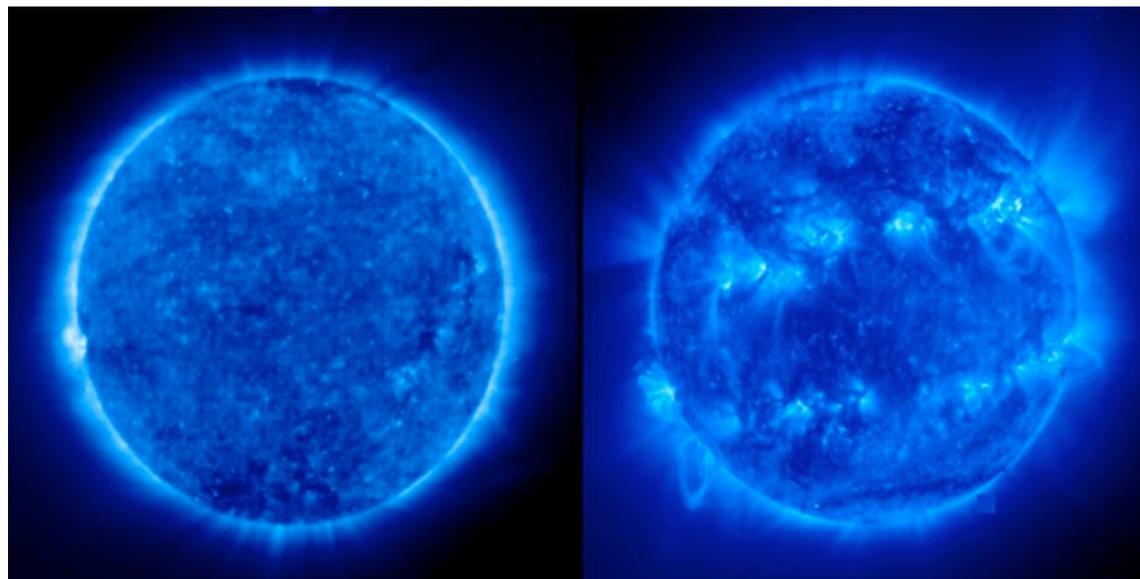
LA VARIABILITE SOLAIRE : LES TACHES (2/8)

Les taches solaires ont été instrumentalement découvertes en 1609 (Les chroniques chinoises rapportent des observations à l'œil nu effectuées depuis -200 pour des motifs astrologiques).

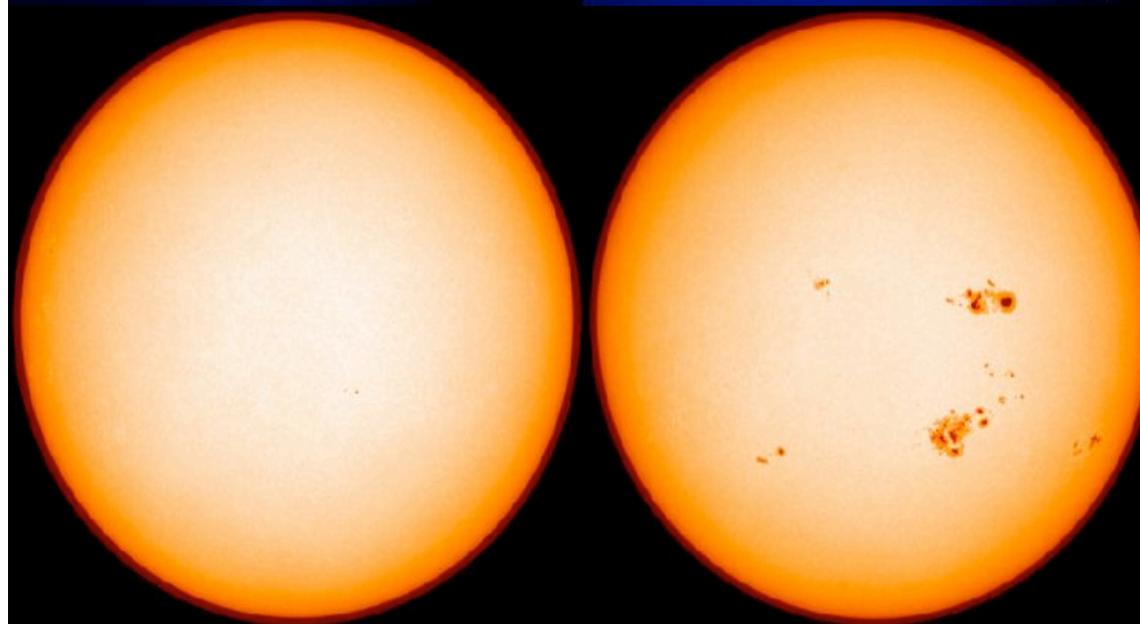


LA VARIABILITE SOLAIRE

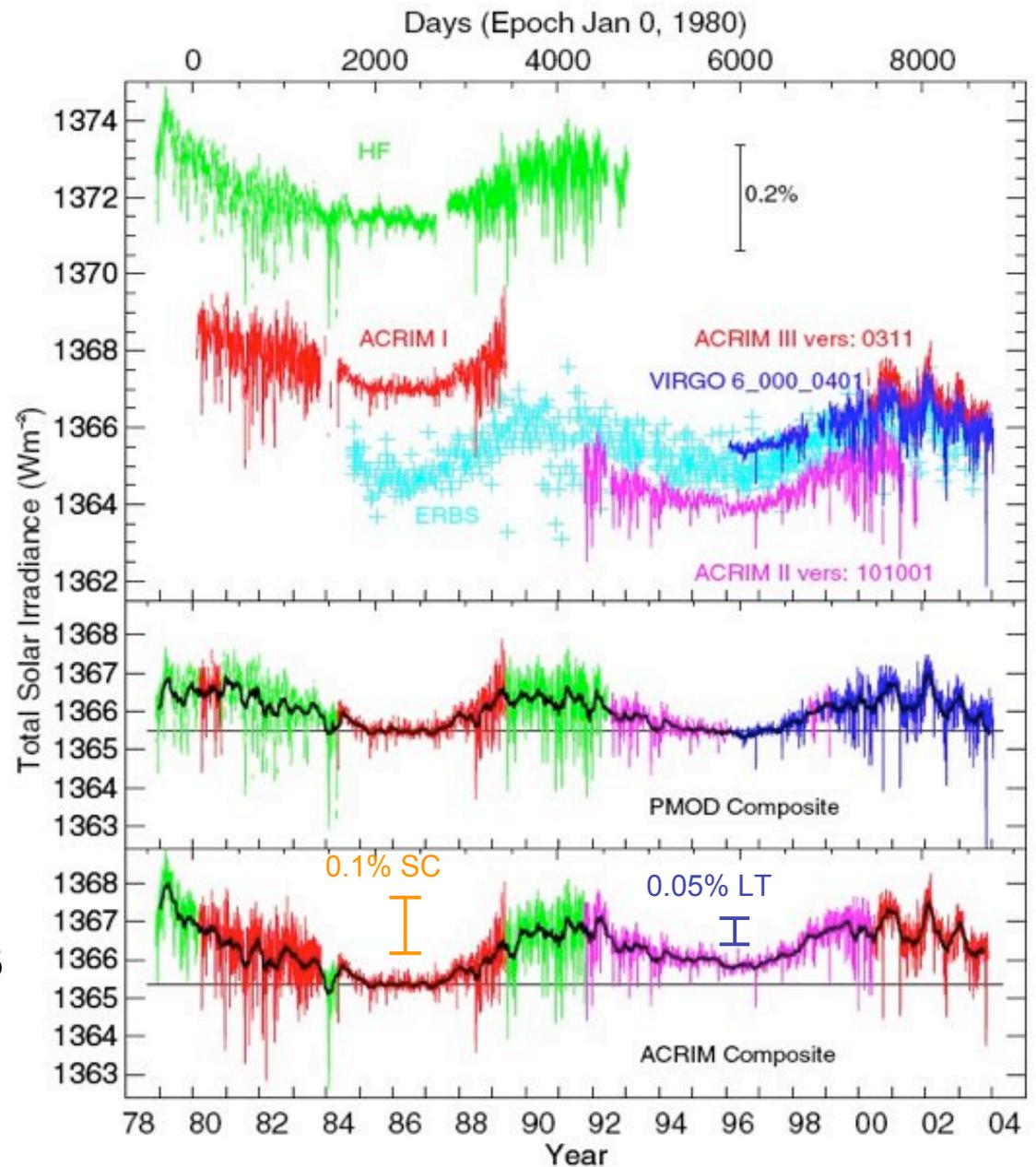
EUV (EIT)



VISIBLE

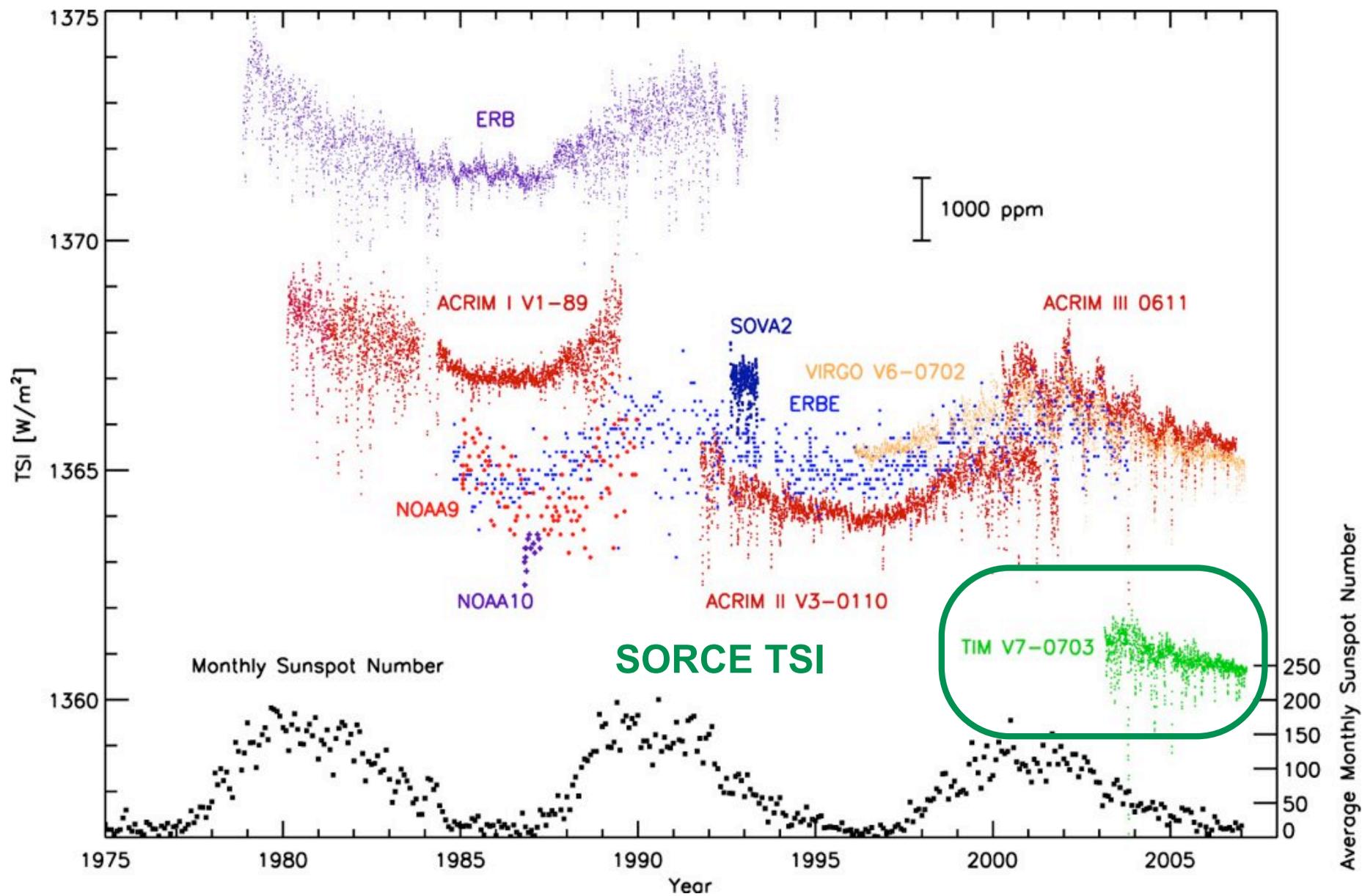


VARIATION SECLAIRE DE L'IRRADIANCE SOLAIRE TOTALE

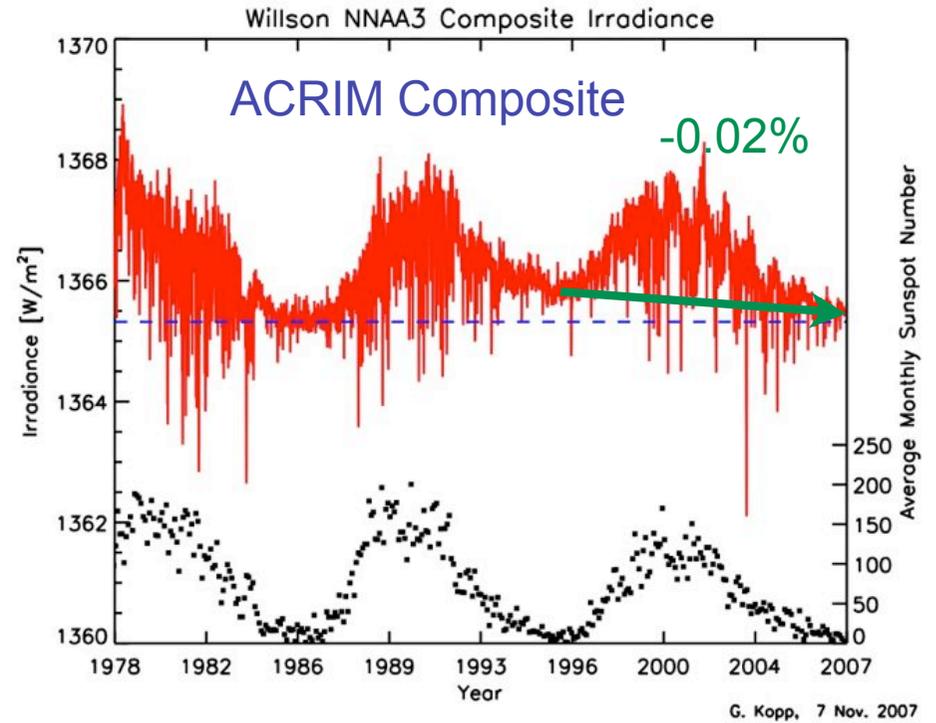
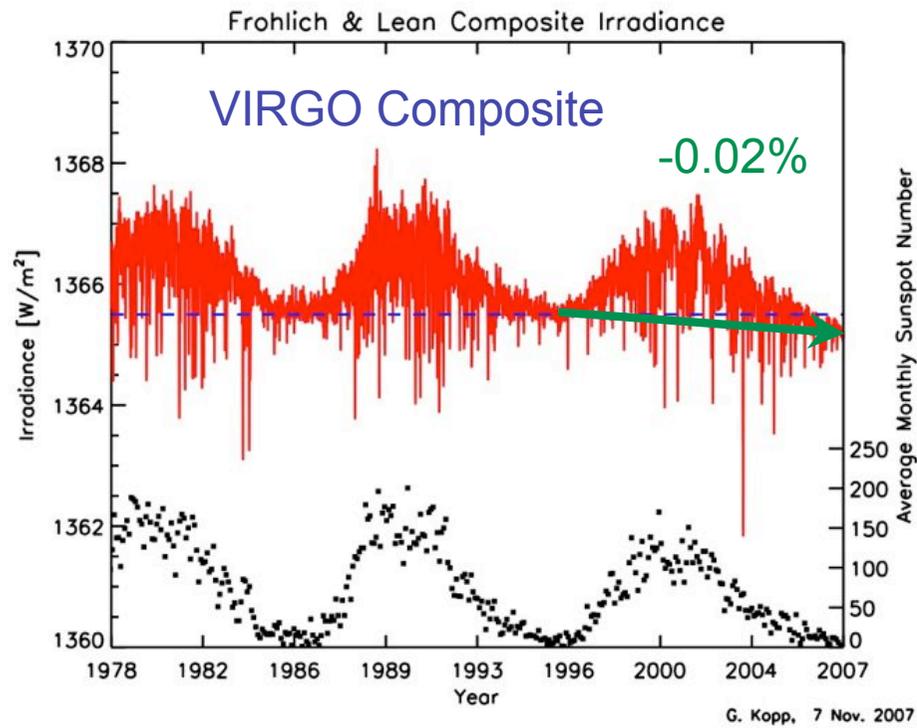


Fröhlich & Lean, *AAR*, 2004

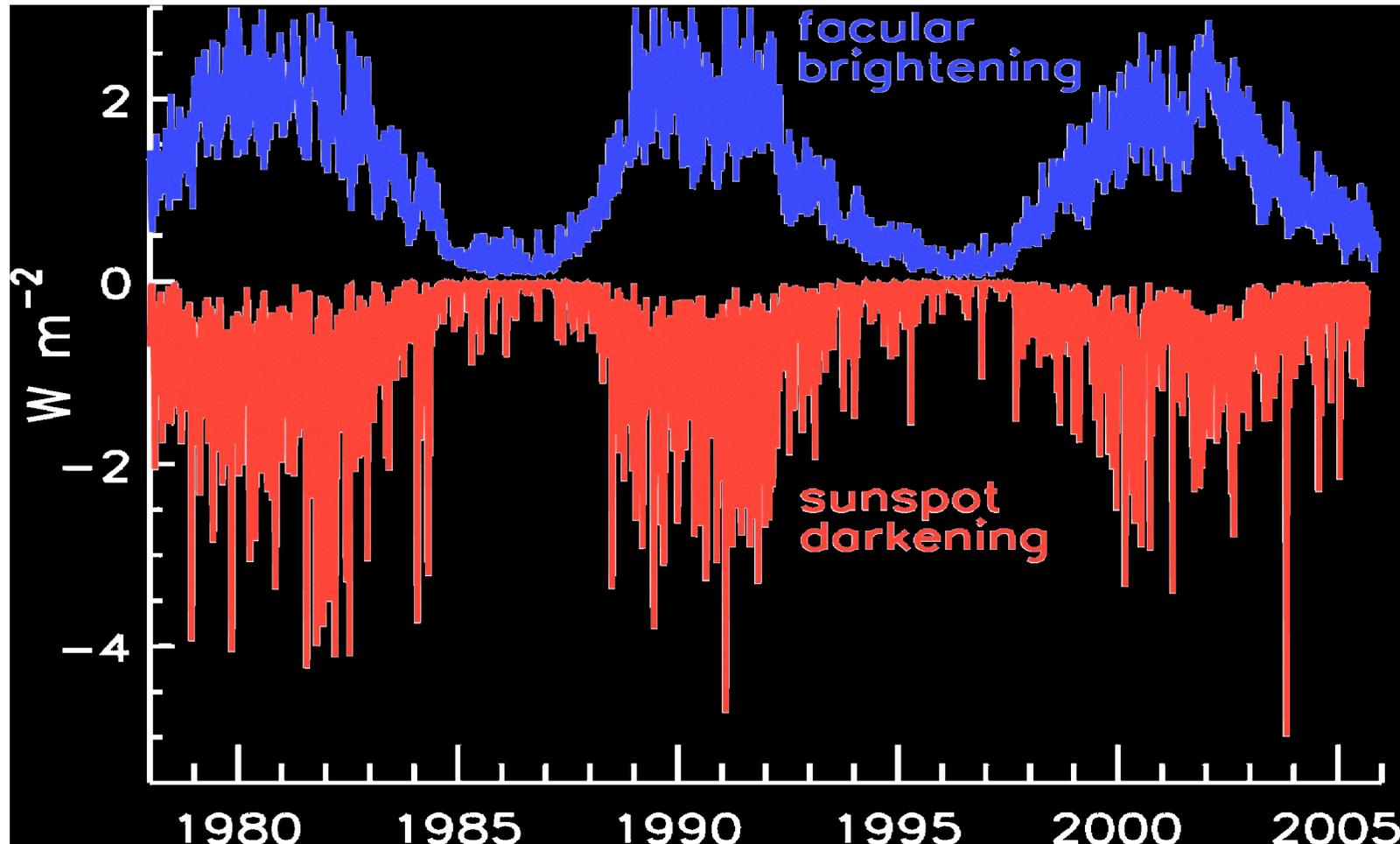
Wilson & Mordvinov, *GRL*, 2003



L'irradiance solaire totale est-elle actuellement en décroissance ?



RECONSTRUCTION DE L'IRRADIANCE SOLAIRE TOTALE



$$I(t) = I(\text{Soleil calme}) + \Delta I(\text{taches}) + \Delta I(\text{facules})$$

⇒ Modélisation de l'irradiance totale à partir de photographies et de dessins.

RECONSTRUCTIONS DE L'IRRADIANCE SOLAIRE TOTALE

Il en existe plusieurs utilisant des indicateurs différents. Ex. :

Hoyt & Schatten (1993) :

- Fraction de pénombre

- Longueur du cycle solaire

- Vitesse de rotation à l'équateur

- Taux de décroissance de l'activité solaire

- Niveau moyen d'activité solaire

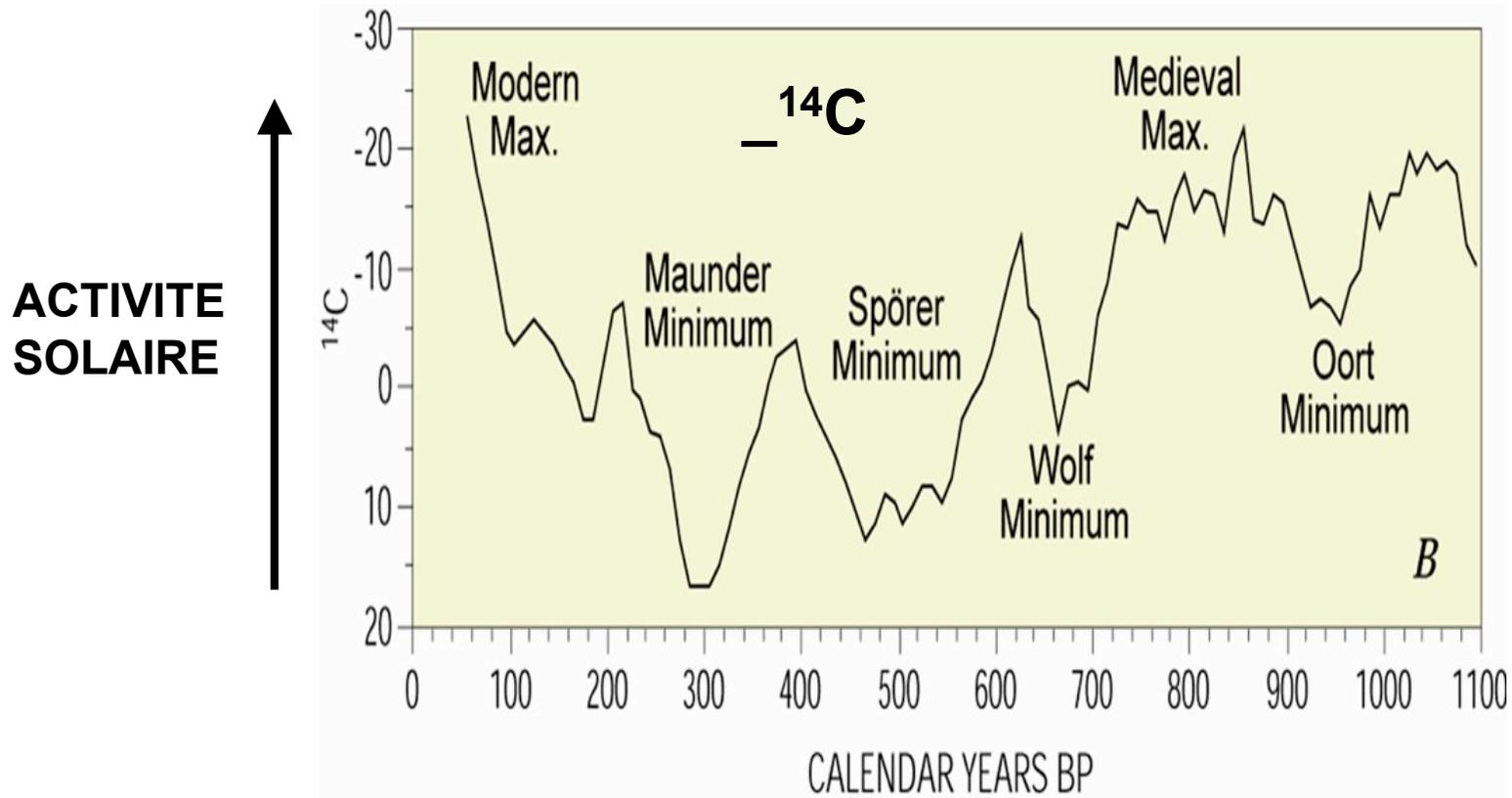
Lean et al. (1995)

- Surface des taches et leur position à la surface solaire

- Nombre de groupes de taches,

Isotopes cosmogéniques

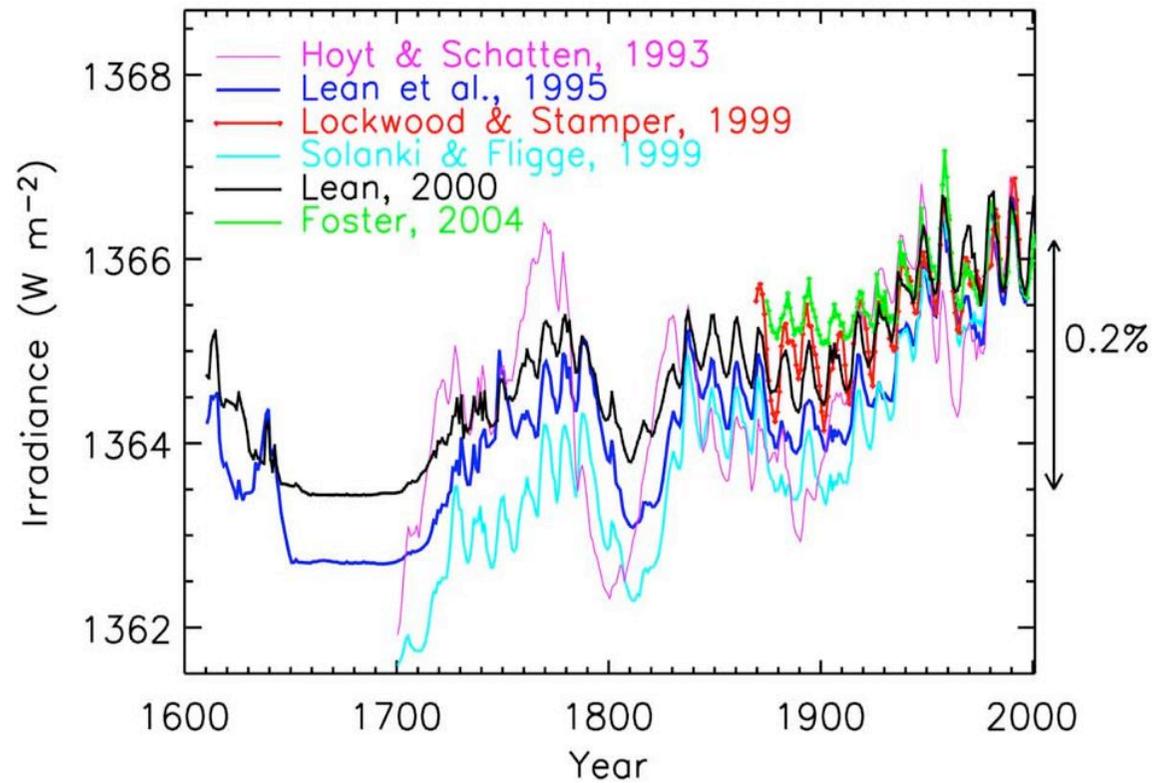
VARIATION DE LA CONCENTRATION DES ISOTOPES COSMOGENIQUES

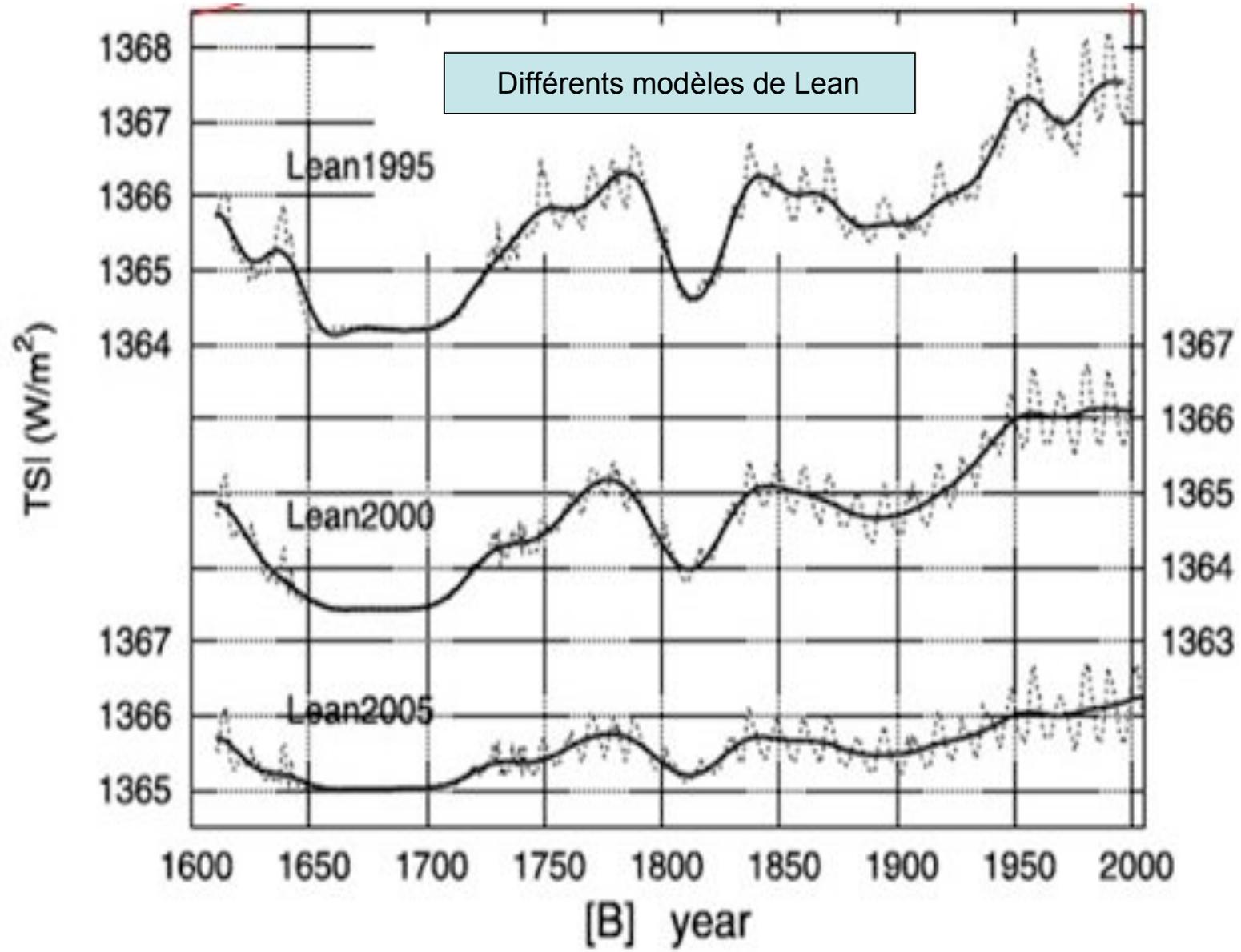


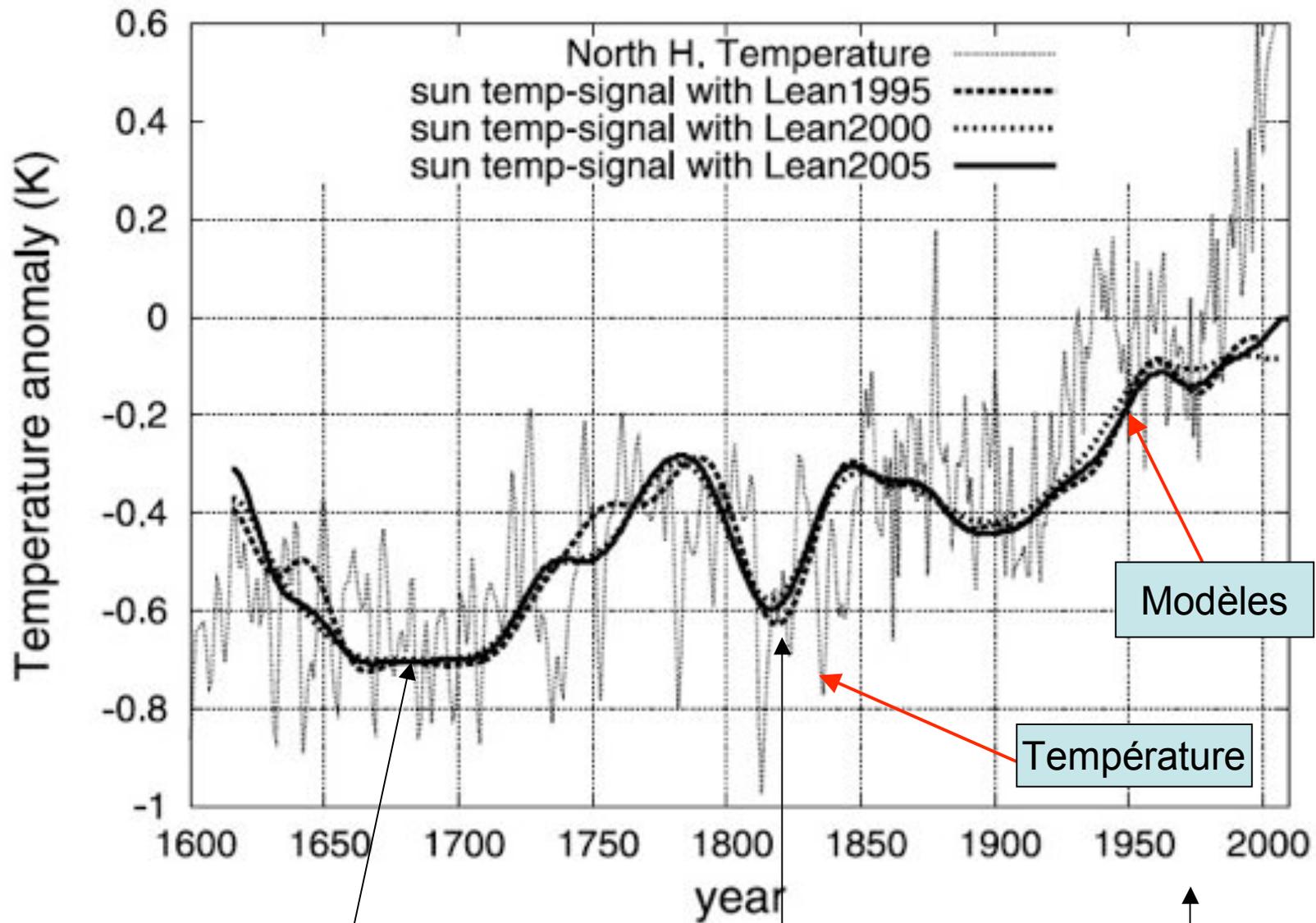
Activité solaire croissante \Rightarrow production ^{14}C décroissante

Les variations de concentration de ^{14}C sont en accord avec les variations du nombre de taches solaires.

RECONSTRUCTION DE LA LUMINOSITE SOLAIRE







Minimum de Maunder

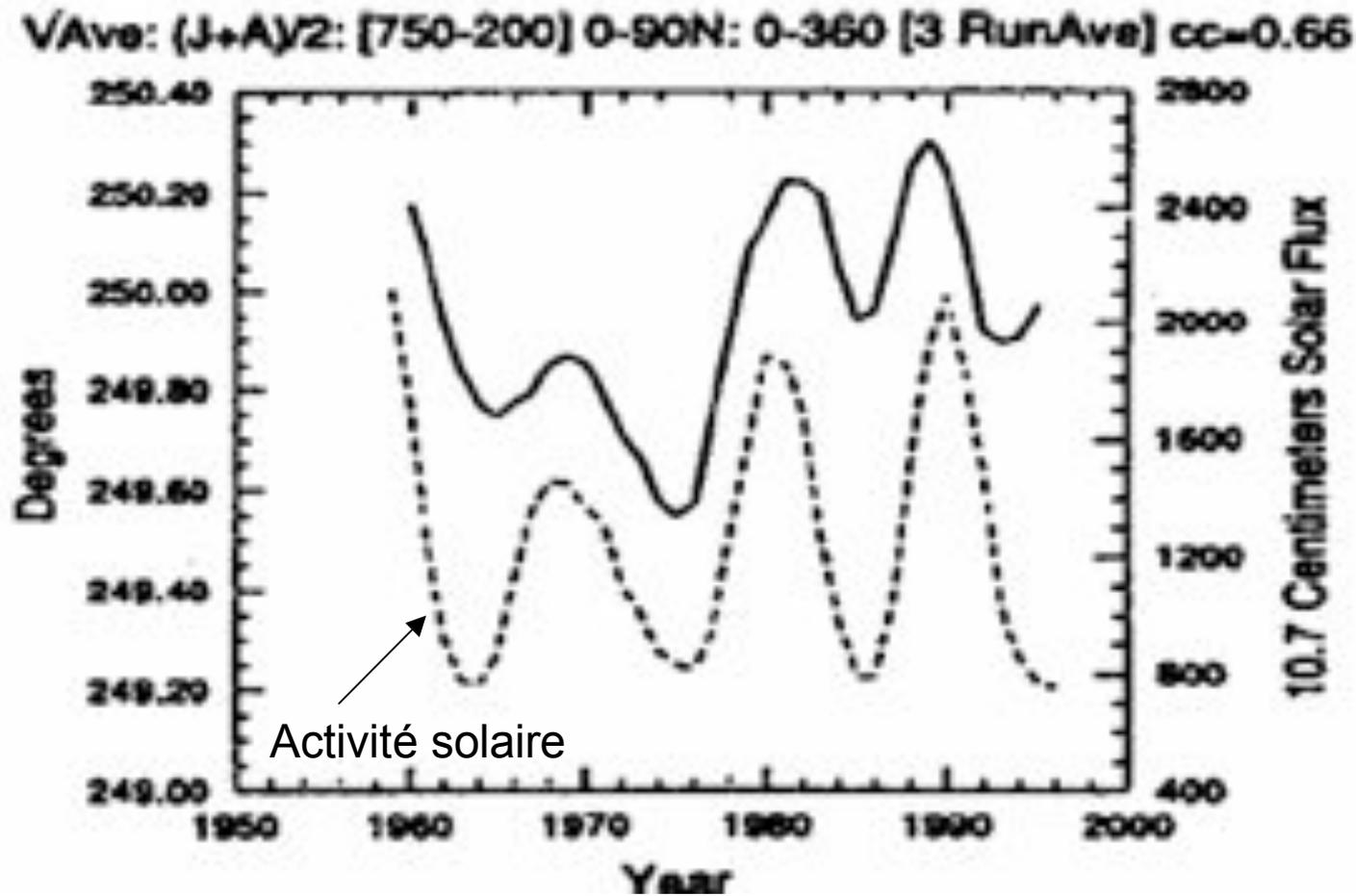
Minimum de Dalton

Maximum Actuel

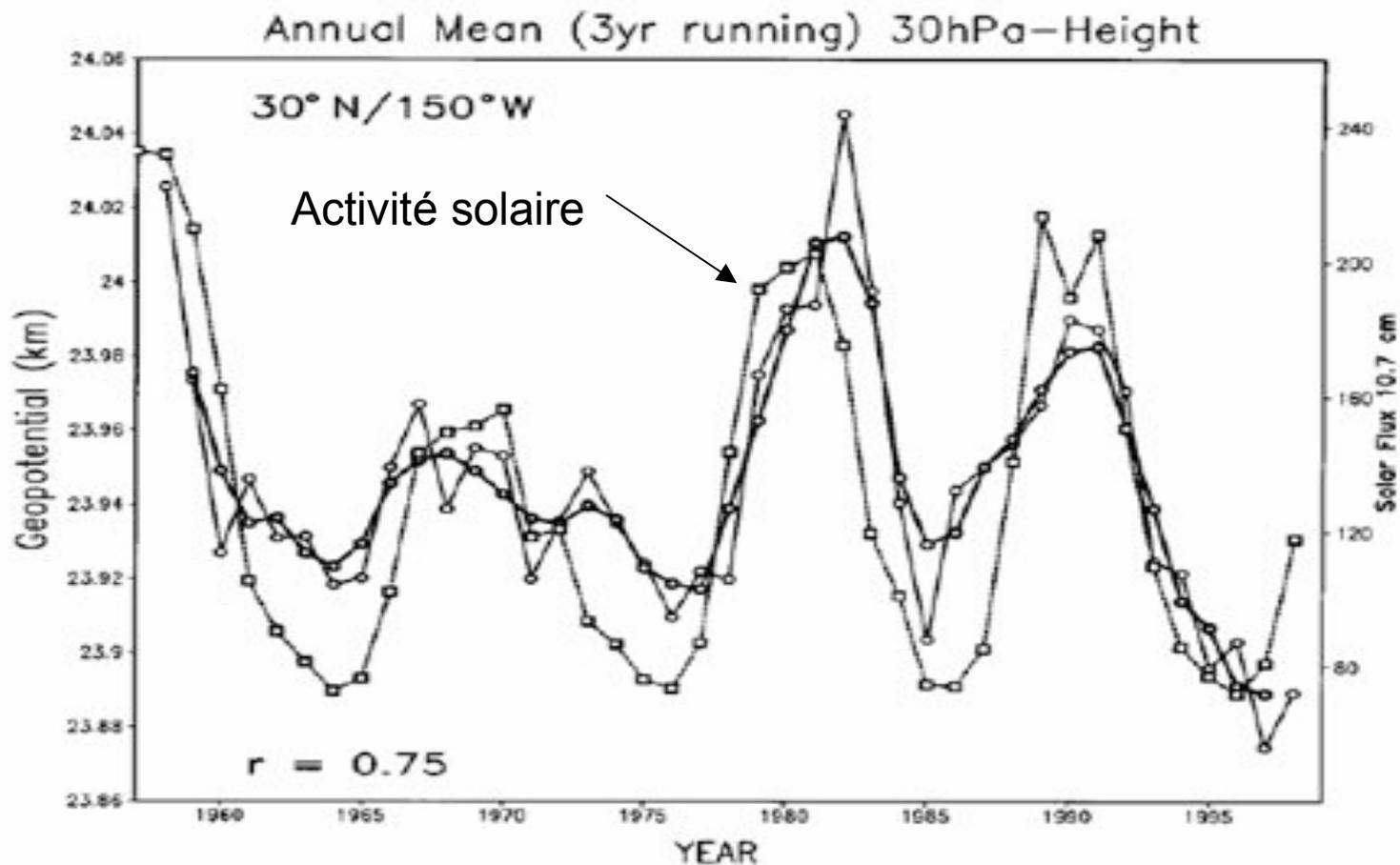
SIGNATURES SOLAIRES DANS LES DERNIERES DECENNIES

L'irradiance solaire totale est mesurée, les grandeurs atmosphériques (température, ...) sont plus précises que les données historiques, mais présentent a priori, de petites variations au cours du cycle solaire.

TEMPERATURE DE LA HAUTE TROPOSPHERE



Température de la haute troposphère entre 2500 et 10000 m en été dans l'hémisphère Nord (van Loon et Shea, 1999)

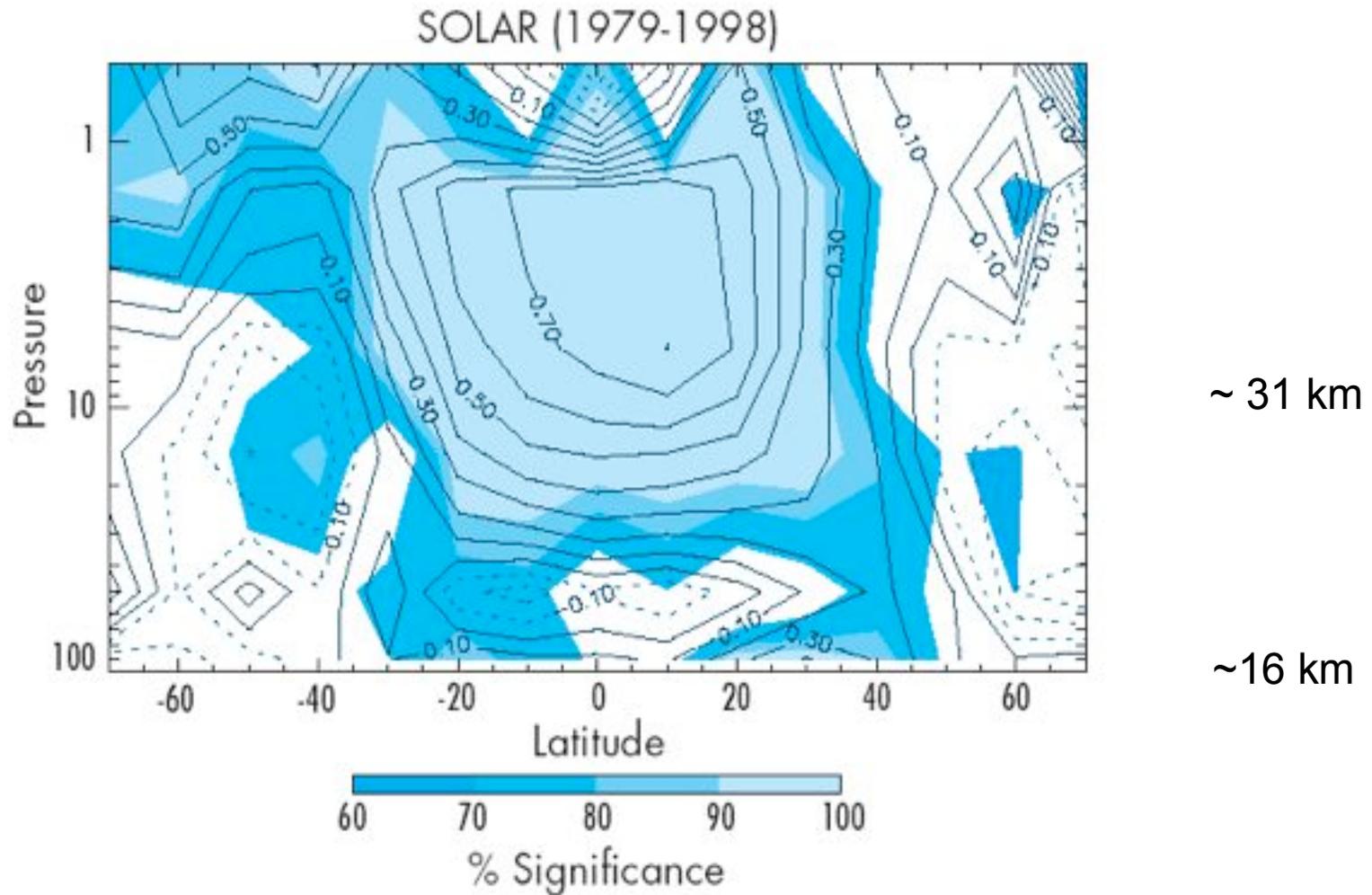


____.____. moyenne annuelle

____.____. moyenne annuelle sur trois ans

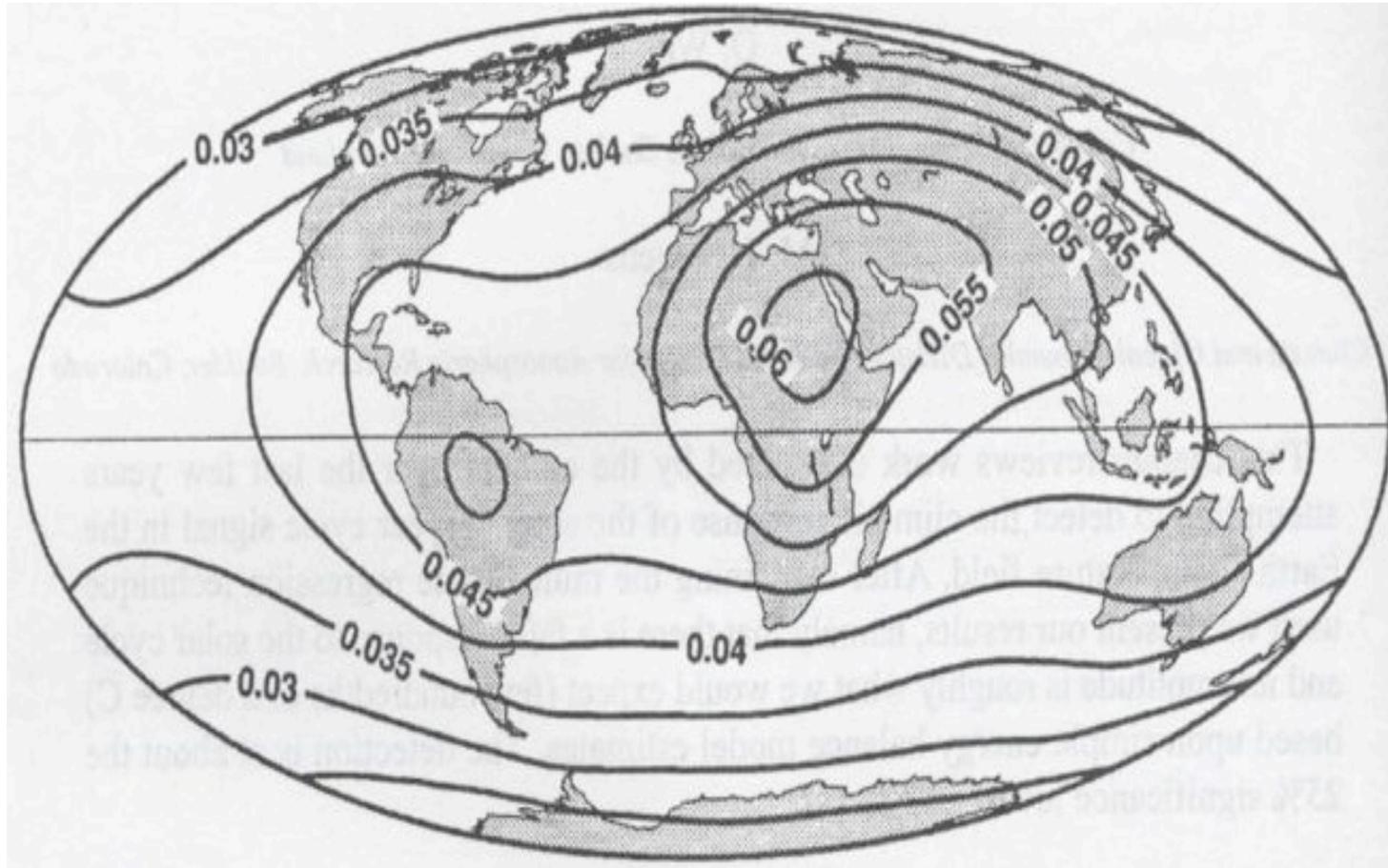
Variation de l'altitude géopotentielle de l'isobare 30 hPa à Hawaï.
 Elle représente une mesure de température moyenne au-dessous de 24 km.
 Labitzke and von Loon (1995)

VARIATION DE TEMPERATURE DANS LA STRATOSPHERE



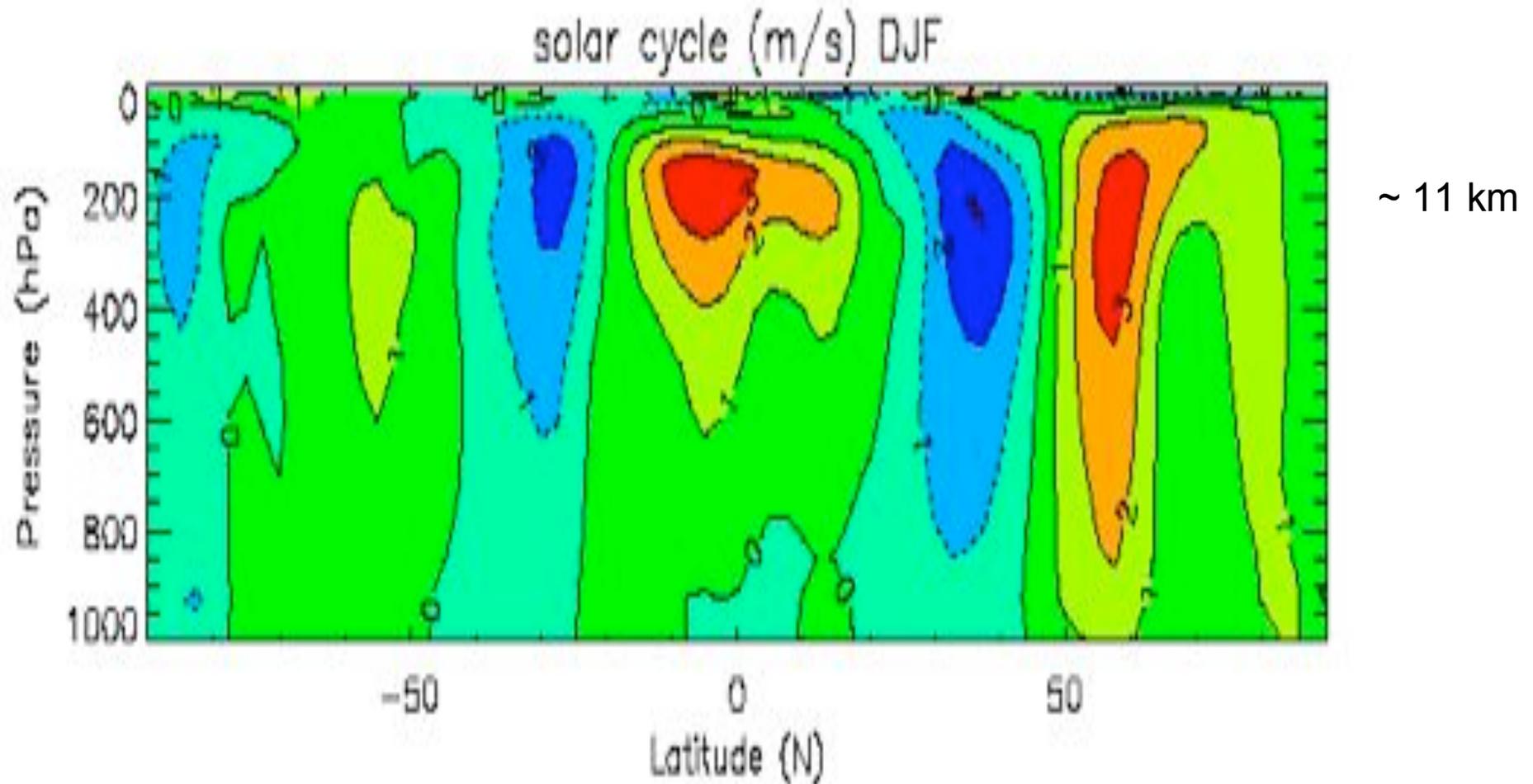
Température moyenne annuelle : Différence entre les périodes d'activité solaire maximum et minimum (mesures SSU/MMU), Haigh et al., 2004

CALCUL DE L'EFFET RADIATIF PAR UN MODELE

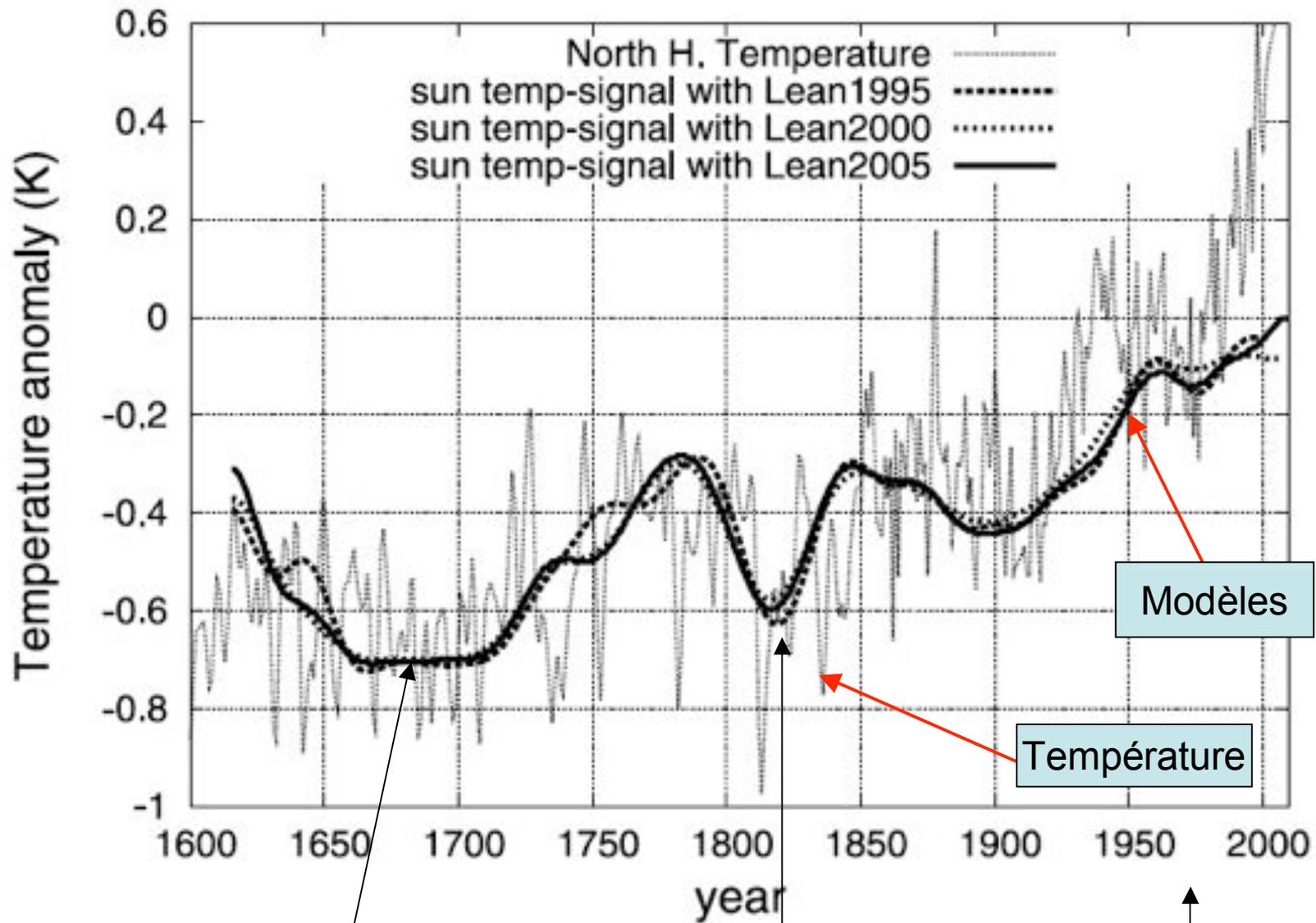


Une variation sinusoïdale de période 11 ans est imposée avec une amplitude de 0,1 % de l'irradiance totale \Rightarrow ΔT maximum de 0.06 K (North et al., 2004)

VENT ZONAL DANS LA TROPOSPHERE



Vent zonal moyen : Différence entre les périodes d'activité solaire maximum et minimum (Haigh et al., 2005)



Minimum de Maunder

Minimum de Dalton

Maximum Actuel

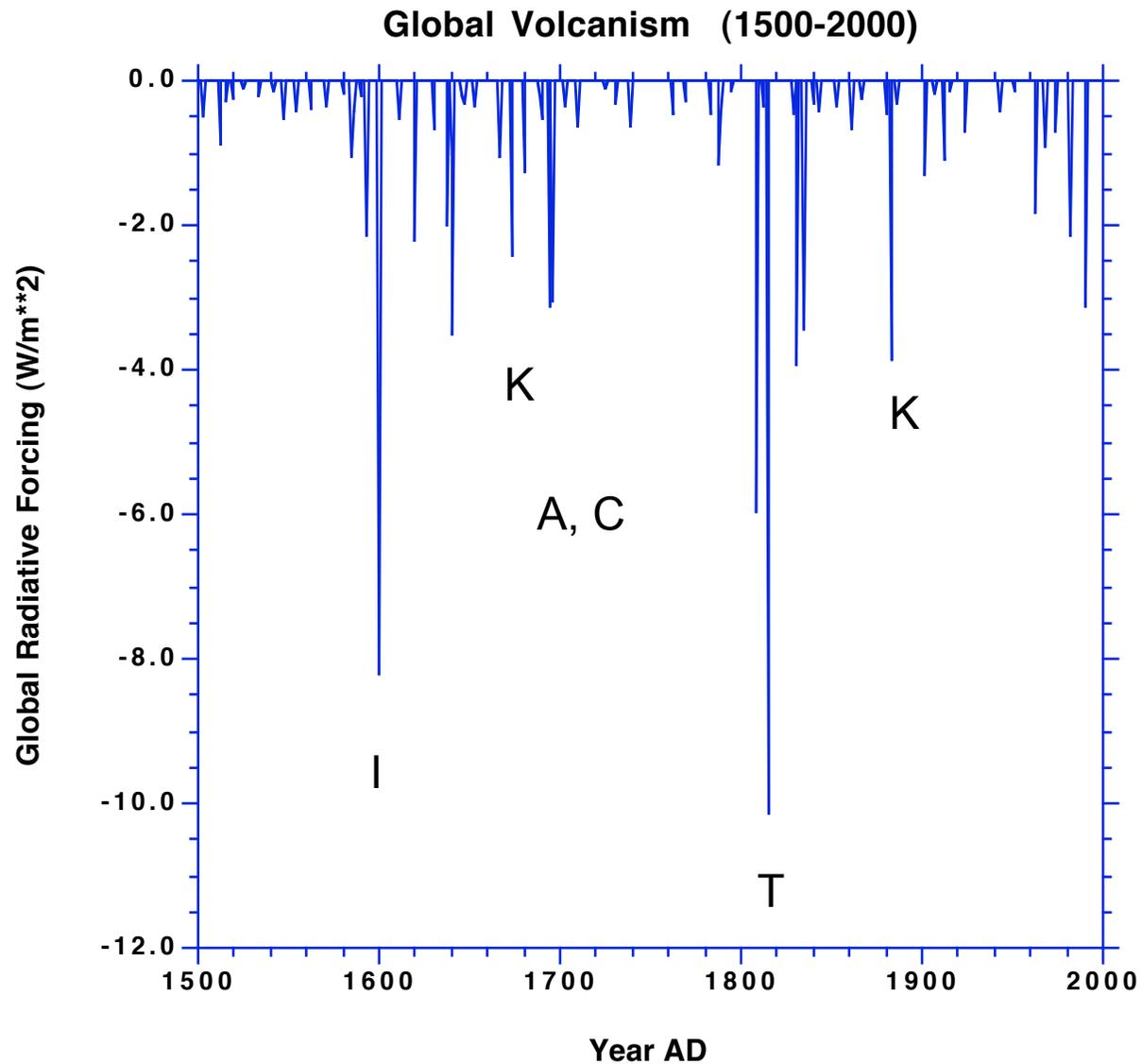
Modèles

Température

INFLUENCE DES ERUPTIONS VOLCANIQUES



FORCAGE EXTERNE : LES ERUPTIONS VOLCANIQUES

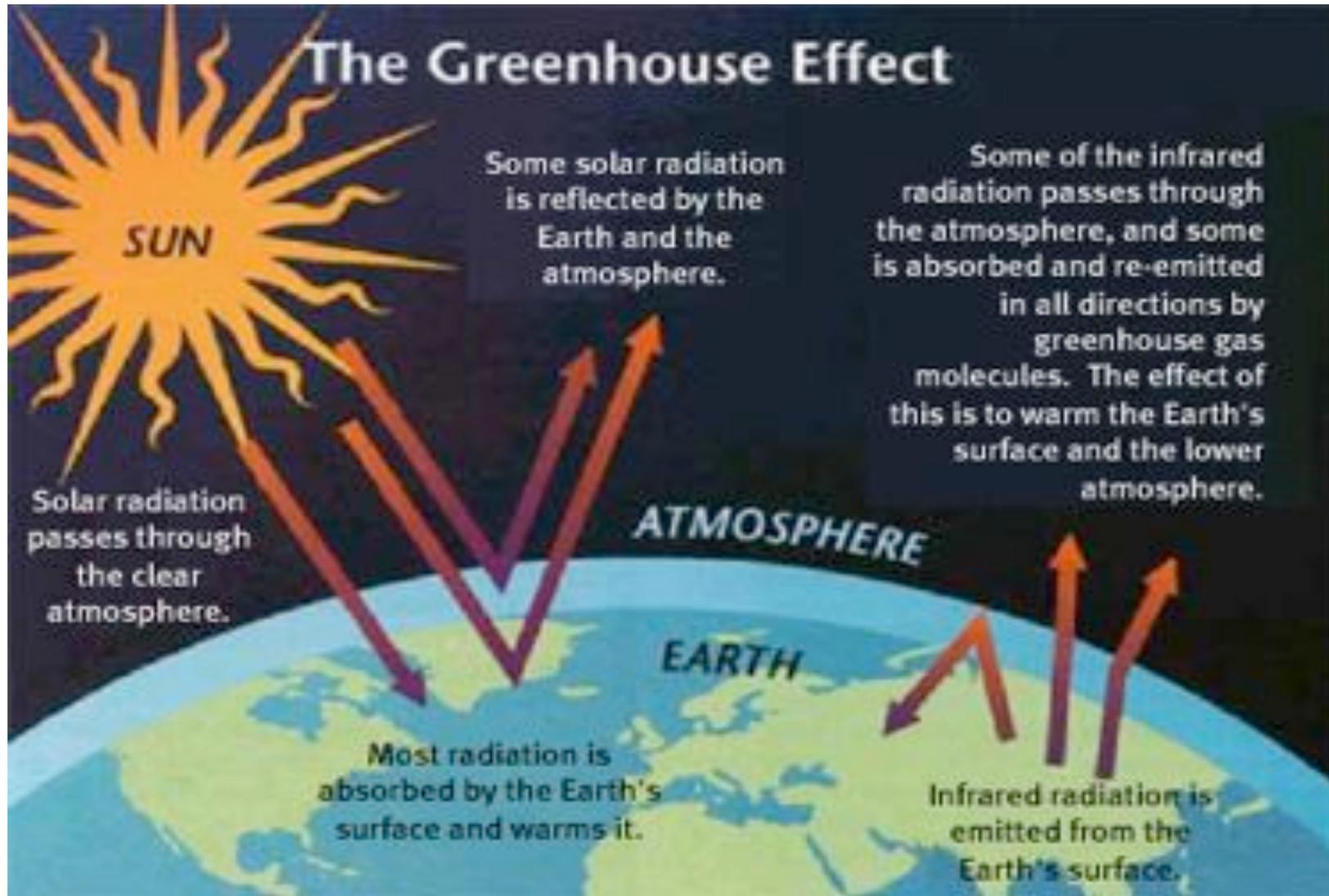


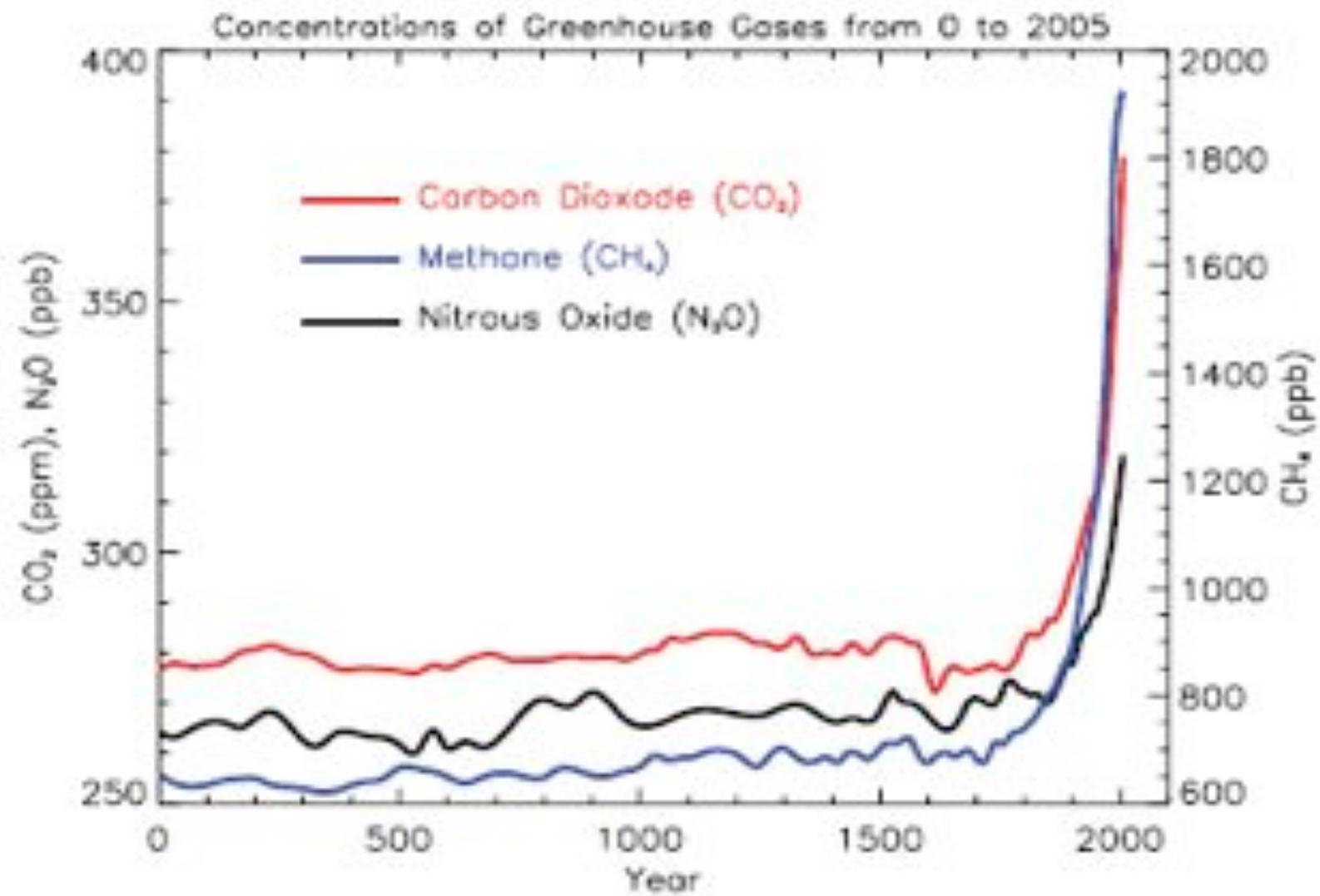
Pendant le Minimum de Maunder, le déficit solaire est estimé de 2 à 3 W/m^2 .



FROST FAIR ON THE THAMES IN THE REIGN OF CHARLES II.

CONTRIBUTION DES GAZ A EFFET DE SERRE (CO₂, H₂O, ..)





IPCC, 2007

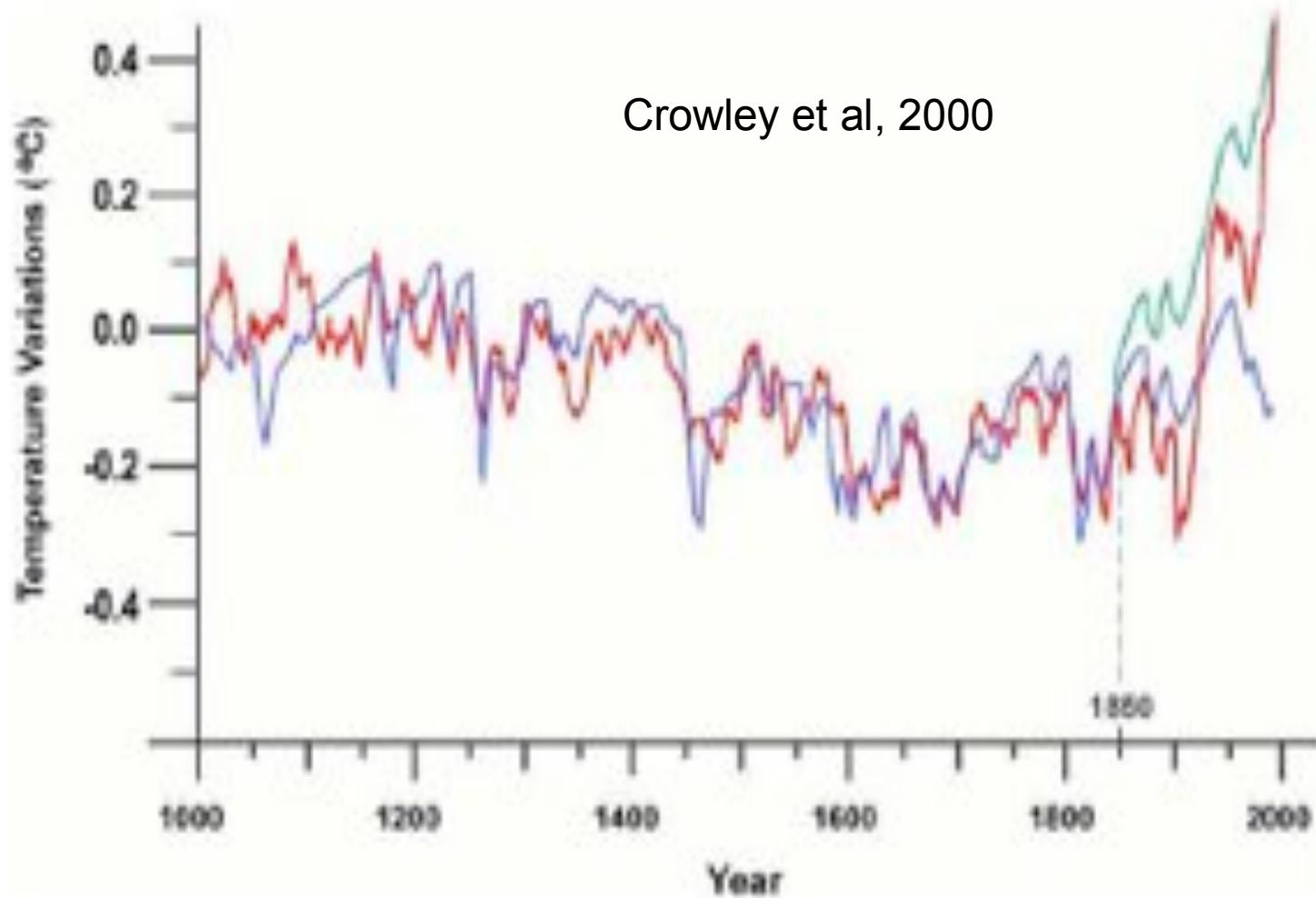
MODELISATION 1850 - 2000

A L'AIDE DES TROIS ENTREES :

SOLEIL,

GES,

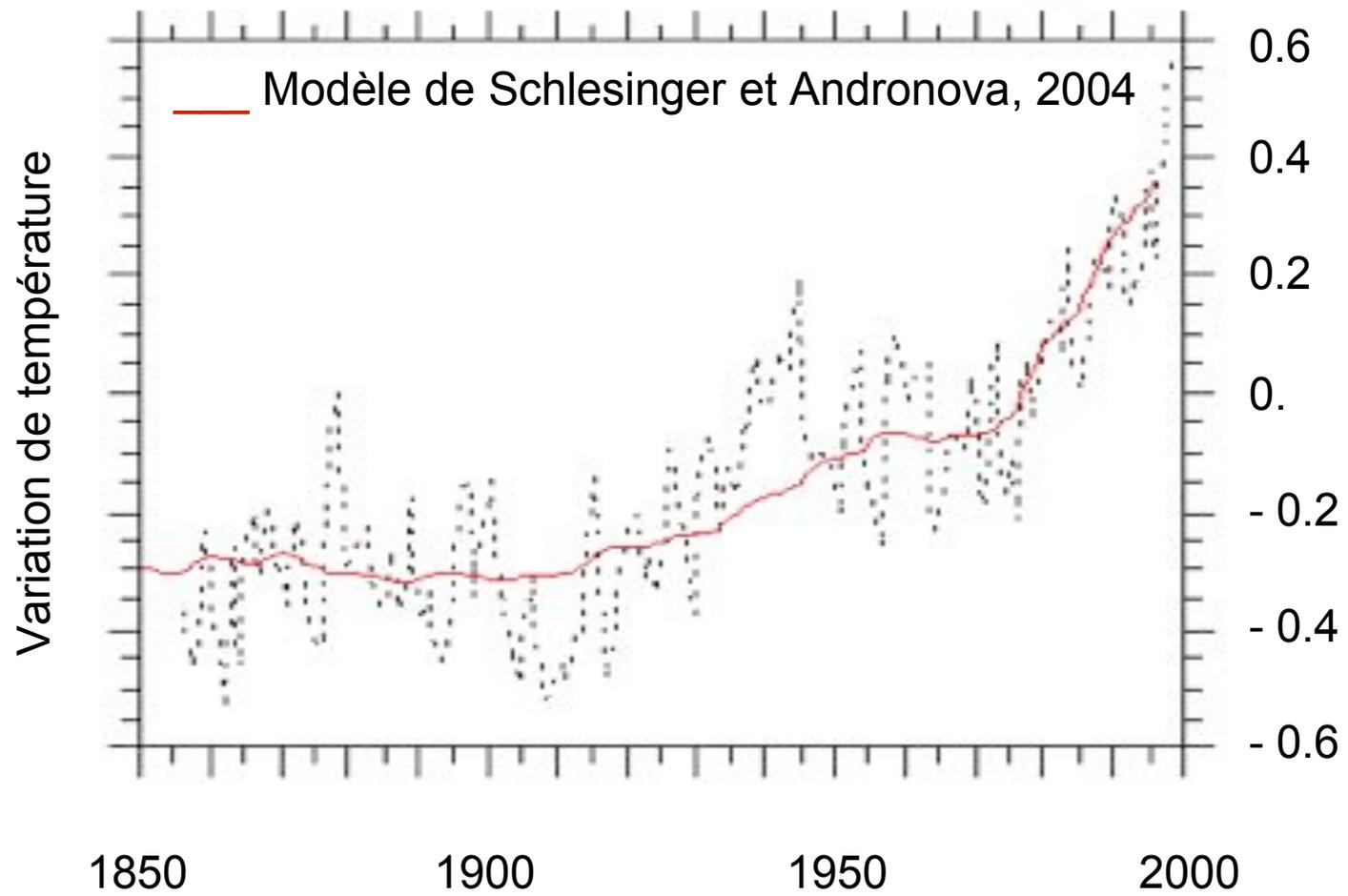
AEROSOLS



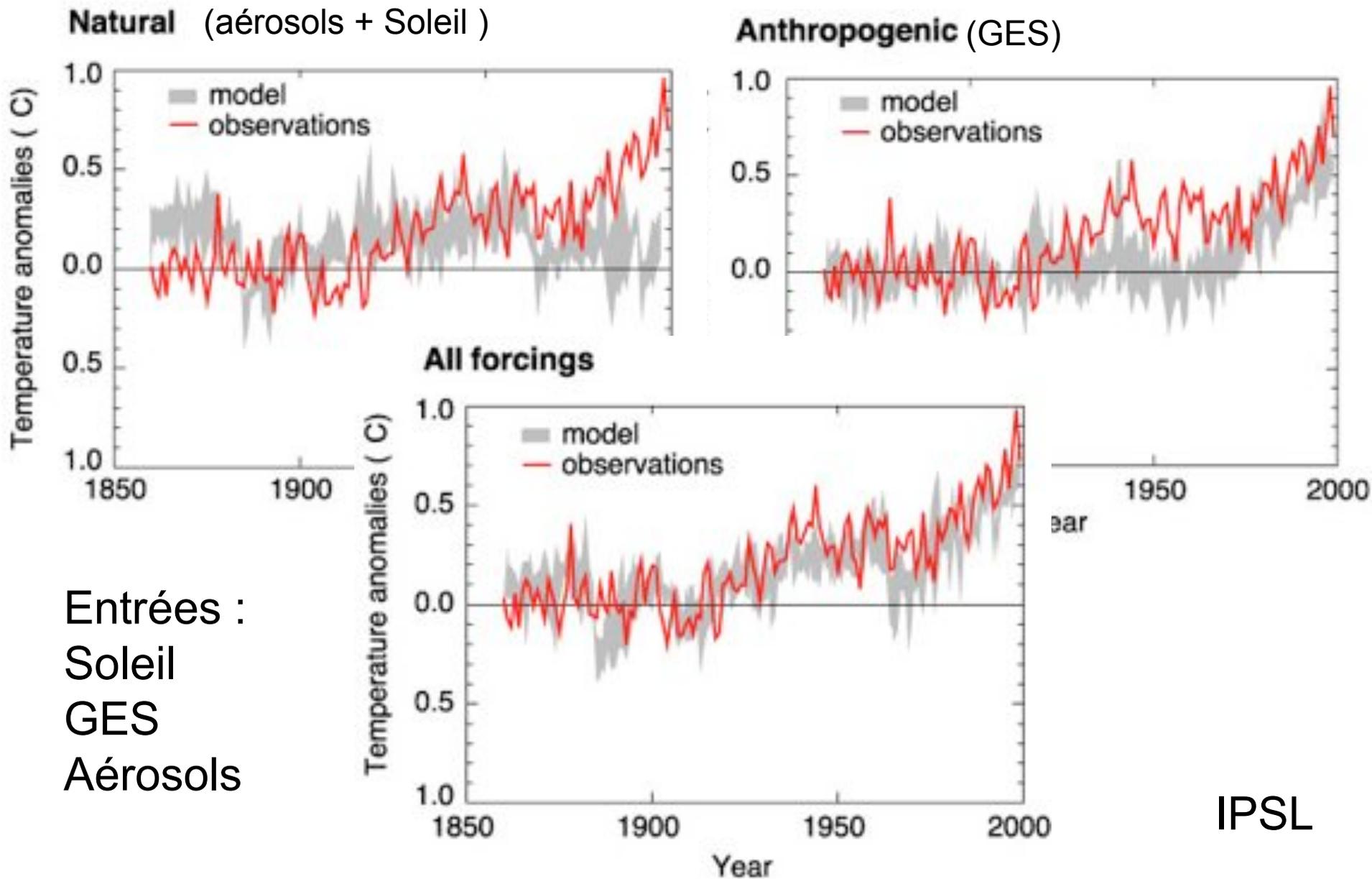
— Température mesurée

— Température calculée (Soleil + aérosols)

— Température calculée (Soleil + aérosols + GES)



CLIMATE MODELING



Entrées :
Soleil
GES
Aérosols

IPSL

Global and Continental Temperature Change

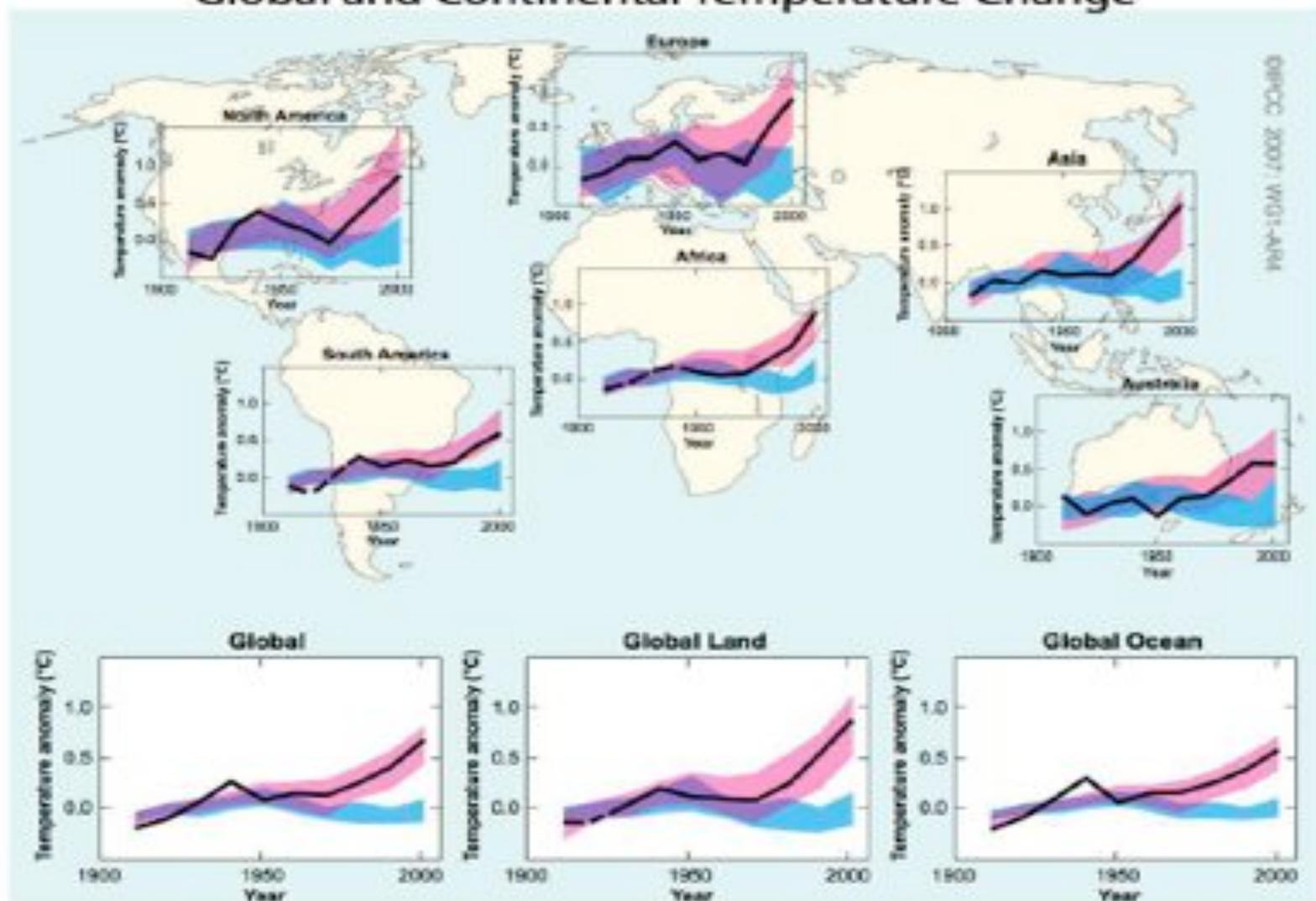
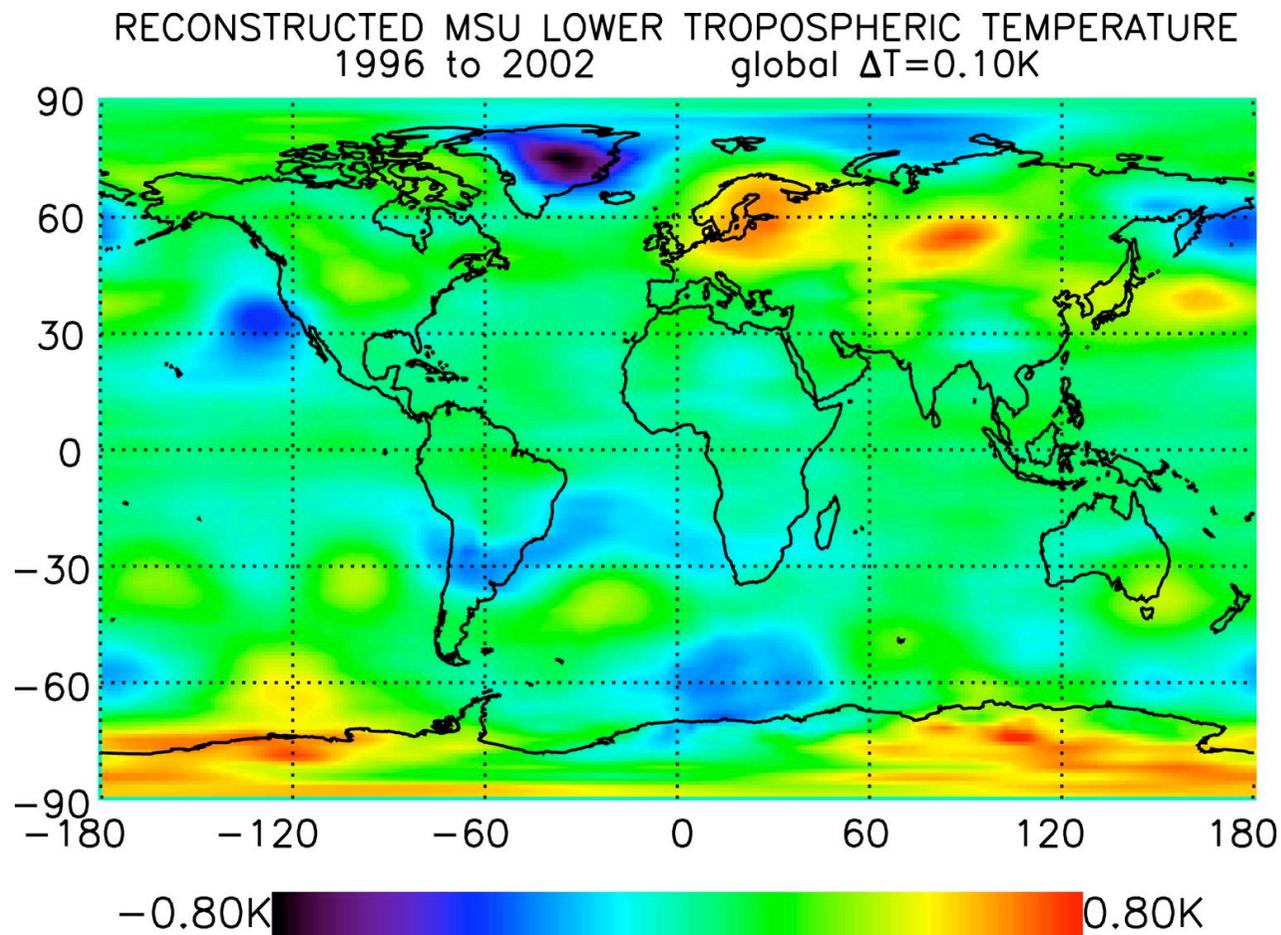


Figure 33: Annual and decadal mean surface temperature from observations (black line) and calculated using GCMs. Each panel shows calculations using all forcings (pink) and only natural forcings (blue), the spread indicates uncertainties in the estimates. From IPCC (2007).

VARIATIONS REGIONALES DE LA TEMPERATURE

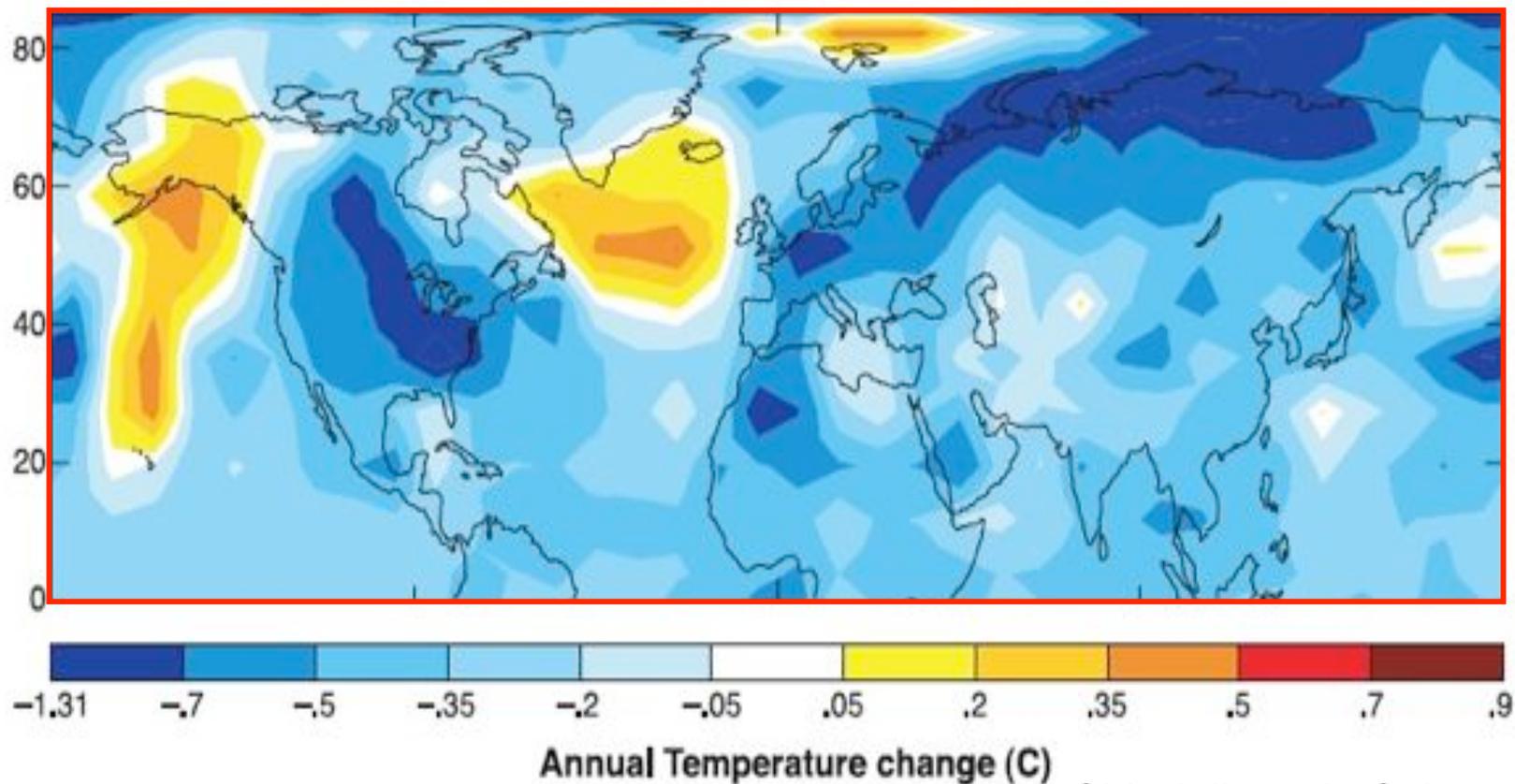
Pour la période 1996-2002 (activité solaire du minimum au maximum), la variation moyenne est de l'ordre de 0.1 K. Des variations locales peuvent être beaucoup plus grandes (0.8 K).



Woods et Lean, EOS, 2007

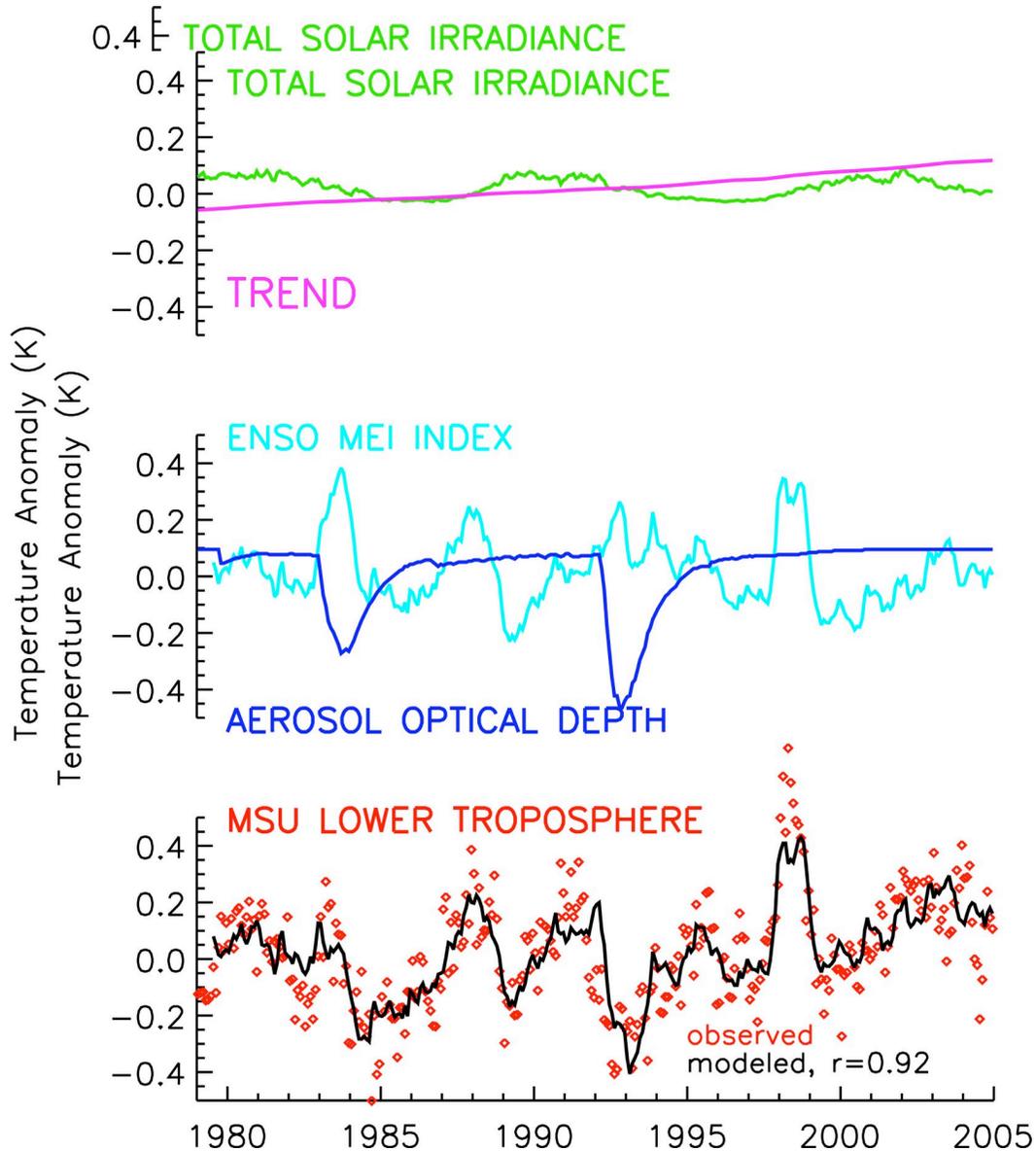
VARIATIONS REGIONALES DE LA TEMPERATURE PENDANT LE MINIMUM DE MAUNDER

Le modèle du GISS-GCM indique des variations régionales de la température pendant le minimum de Maunder.



Shindell *et al.*, *Science*, 2001

VARIATION DE LA TEMPERATURE 1980-2005



Activité solaire

+0.1 K du minimum au maximum

GES (tendance linéaire)

+0.1 K par décennie (tendance)

El Nino (ENSO)

variations temporaires de ± 0.3 K

Aérosols

variations temporaires de -0.4 K

Température mesurée

Température représentée à l'aide de 4 paramètres

Lean, *Solar Physics*, 2005

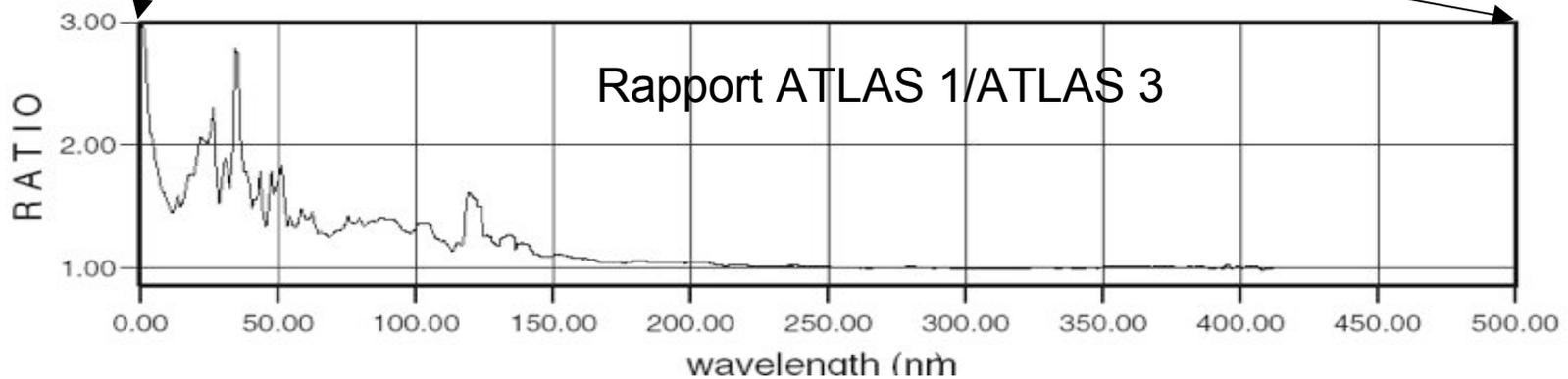
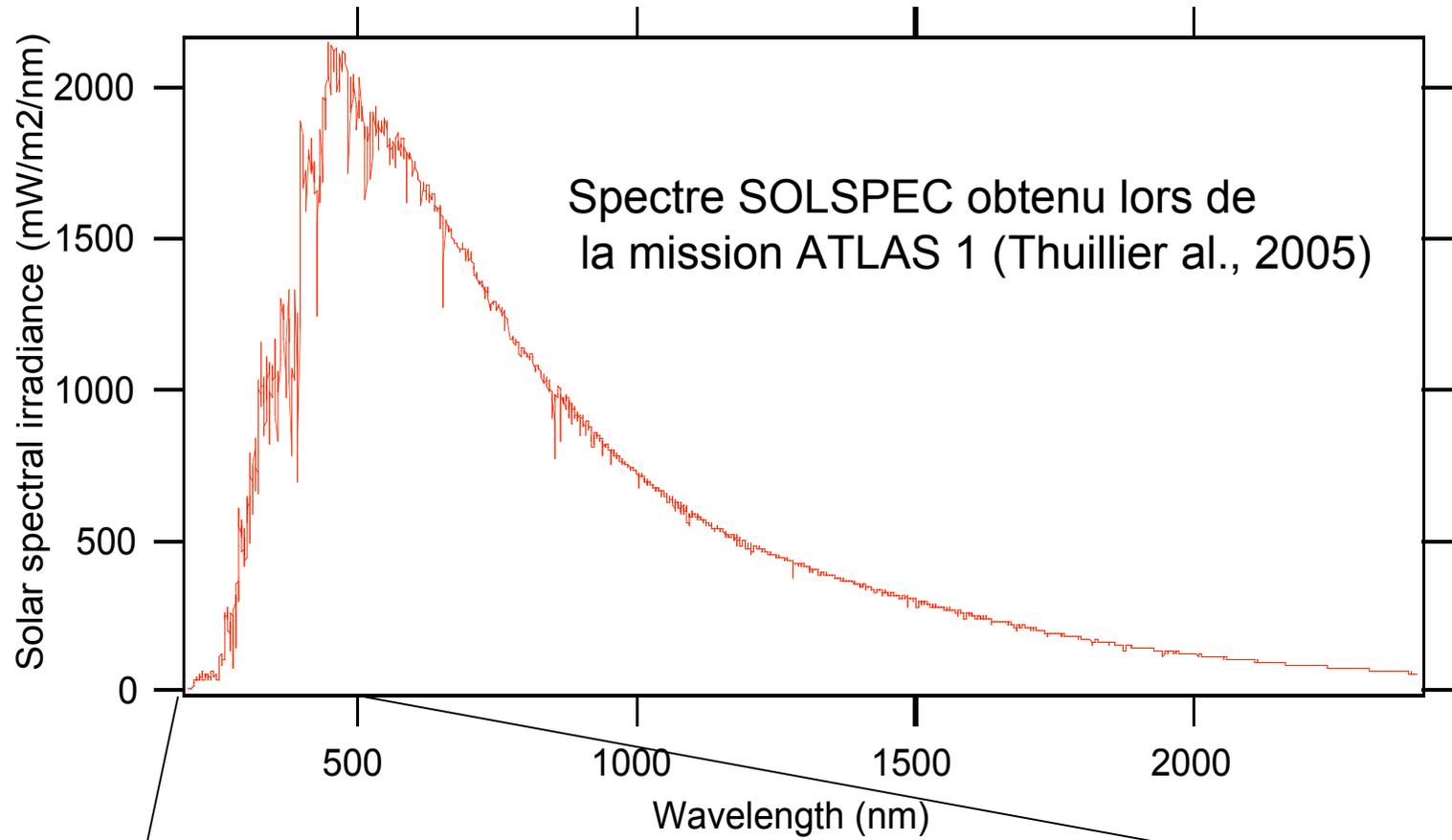
MECANISME DE L'INFLUENCE SOLAIRE SUR LE CLIMAT

Des changements climatiques importants et rapides ont été observés par exemple liés aux éruptions volcaniques : l'atmosphère se charge de d'aérosols et des retombées massives de cendres peuvent aussi modifier l'albédo des sols.

En l'absence de volcanisme, quel mécanisme invoquer ?

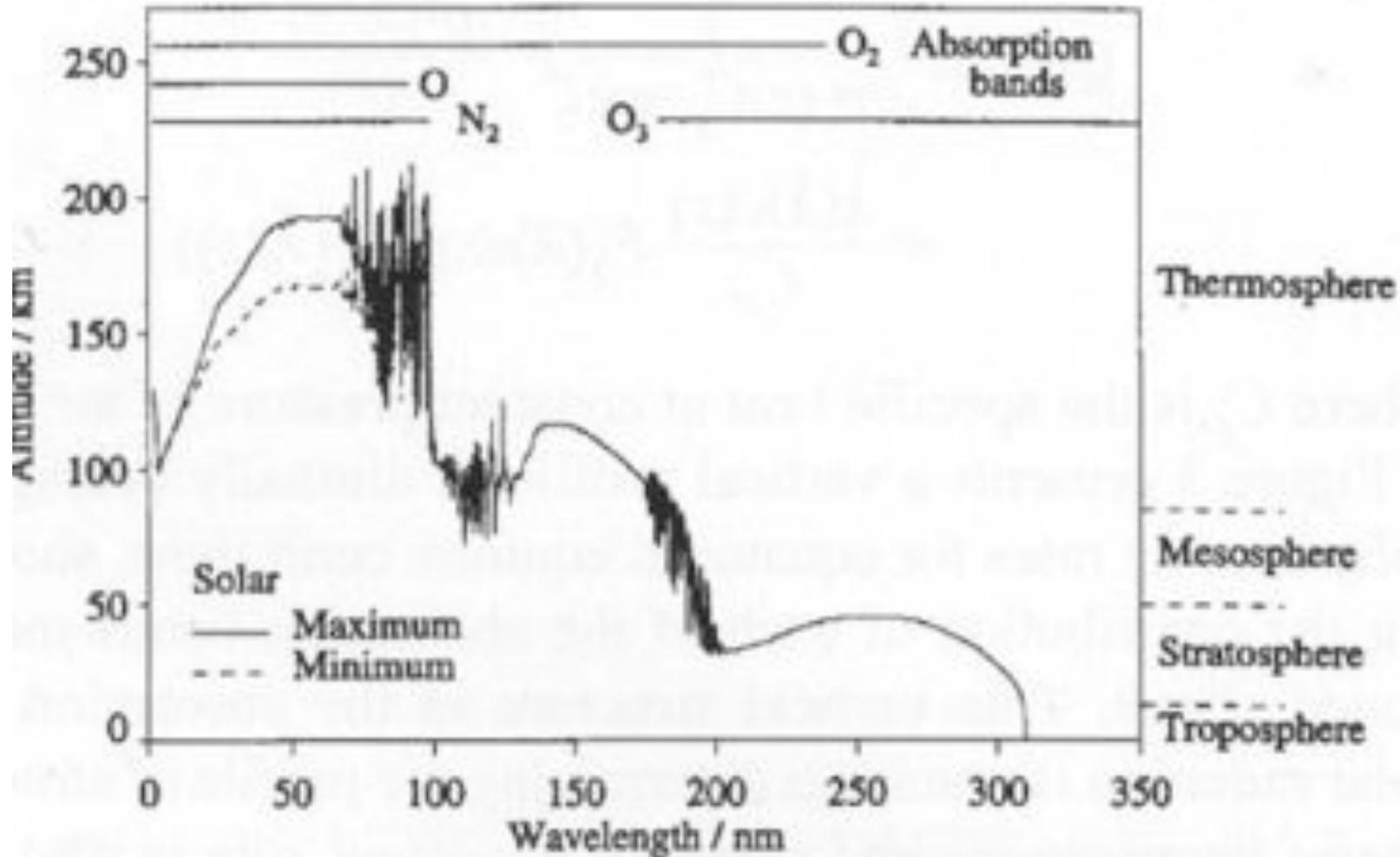
Un changement climatique rapide doit avoir pour origine l'atmosphère plutôt que l'océan en raison du rapport des chaleurs spécifiques, des masses et des bandes d'absorption des photons solaires présentant une variabilité avec l'activité solaire.

LE SPECTRE DU SOLEIL ET SA VARIABILITE

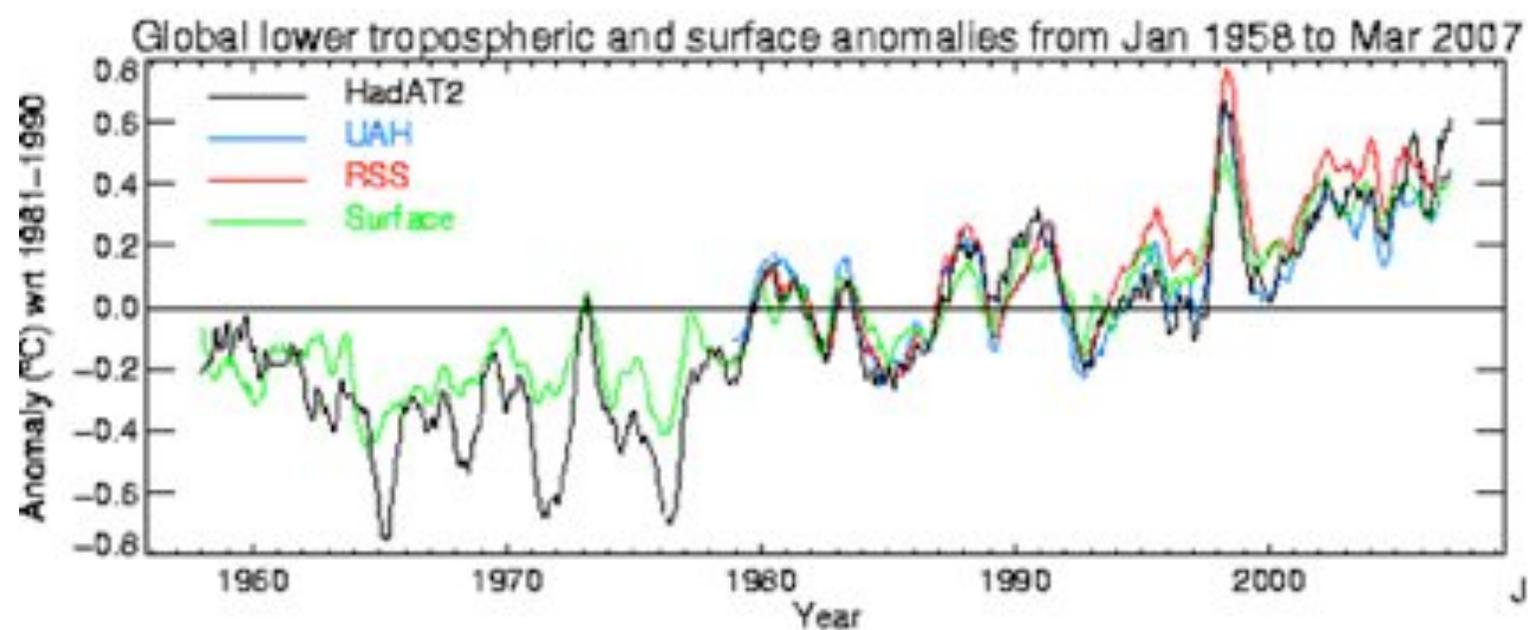
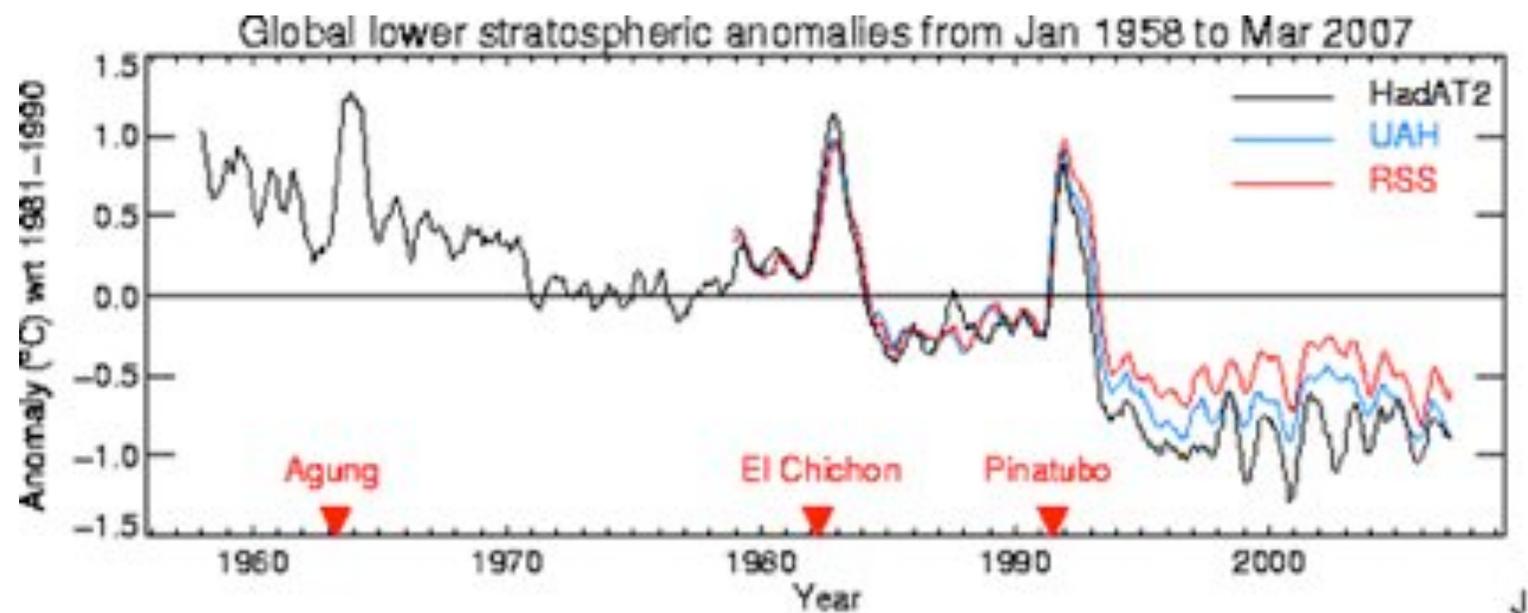


EFFECT OF SOLAR PHOTONS ON THE EARTH ATMOSPHERE

Variabilité solaire décroissante



Altitude à laquelle l'atmosphère a une épaisseur optique égale à l'unité en fonction de la longueur d'onde.



HadAT2 radiosonde data and HadCRUT3 surface data are produced by the Hadley Centre and are available at www.hadobs.org
 UAH/MSU satellite data are produced by the University of Alabama in Huntsville and are available at www.nsstc.uah.edu/public/msu courtesy of
 RSS MSU satellite data are produced by Remote Sensing Systems and are available at www.remss.com courtesy of Carl Mears

LES MECANISMES DE CONNEXION SOLEIL-CLIMAT (1/2)

▪ Effet radiatif direct :

La variation de 0.1% pendant le cycle de 11 ans ne peut pas créer une grande variation de température (0.06 K, North et al. 2004).

Les données (taches, ...) montrent qu'il existe des variations plus grandes et s'étendant sur des durées plus longues

Ex. le minimum de Maunder.

Néanmoins, la variation de l'irradiance totale serait de l'ordre de 0.2 %.
⇒ Un processus amplificateur est nécessaire.

▪ Rayons cosmiques agissant sur la formation des nuages ?

▪ **Précipitations de particules** : elles agissent dans la stratosphère par formation de $\text{NO}_x \Rightarrow [\text{O}_3] _ \Rightarrow$ modification de la température et de la dynamique.

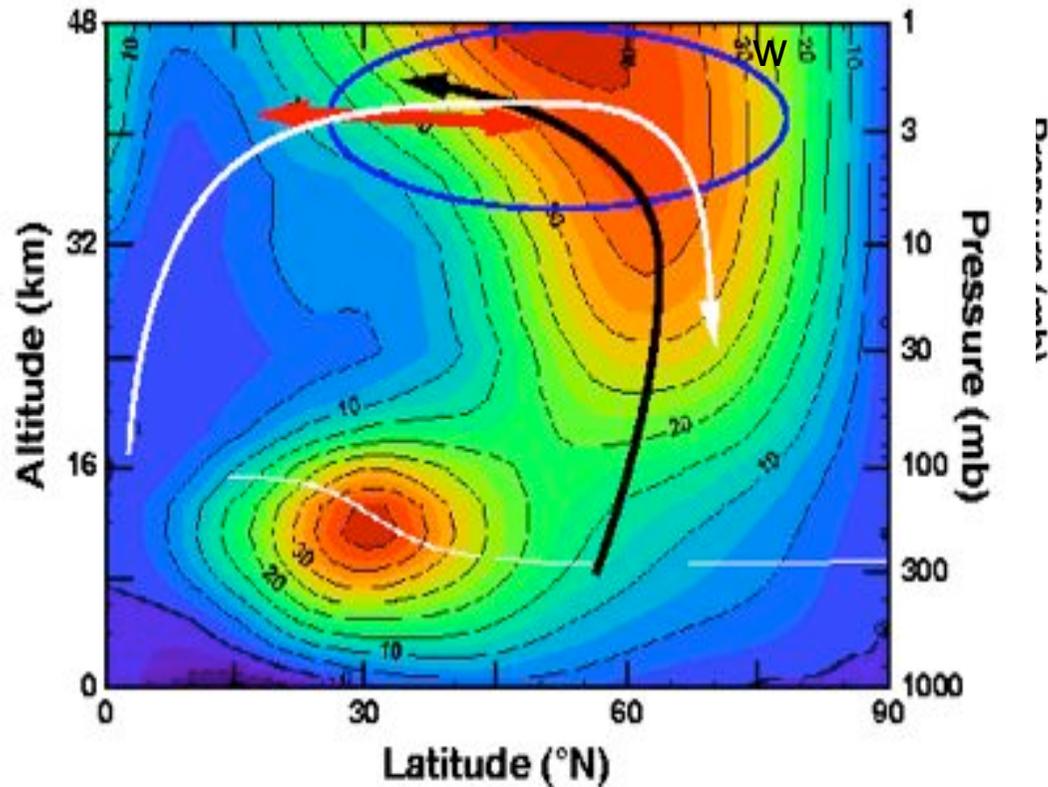
LES MECANISMES DE CONNEXION SOLEIL-CLIMAT (2/2)

- **La variabilité UV modifie la concentration de l'ozone dans la stratosphère et par suite sa structure thermique et sa dynamique**

Si l'effet de la variabilité sur l'irradiance totale est 0.1%, à 200 nm, la variation est de 8%. De plus, l'effet sur la structure de la stratosphère est non linéaire.

Kodera (1995) et Kodera et Kuroda (2002) suggèrent que la stratosphère contrôle le passage des ondes planétaires.

Zonal wind, January 1979–1997
Zonal wind, January 1979–1997



Noir: Propagation des ondes planétaires de la troposphère

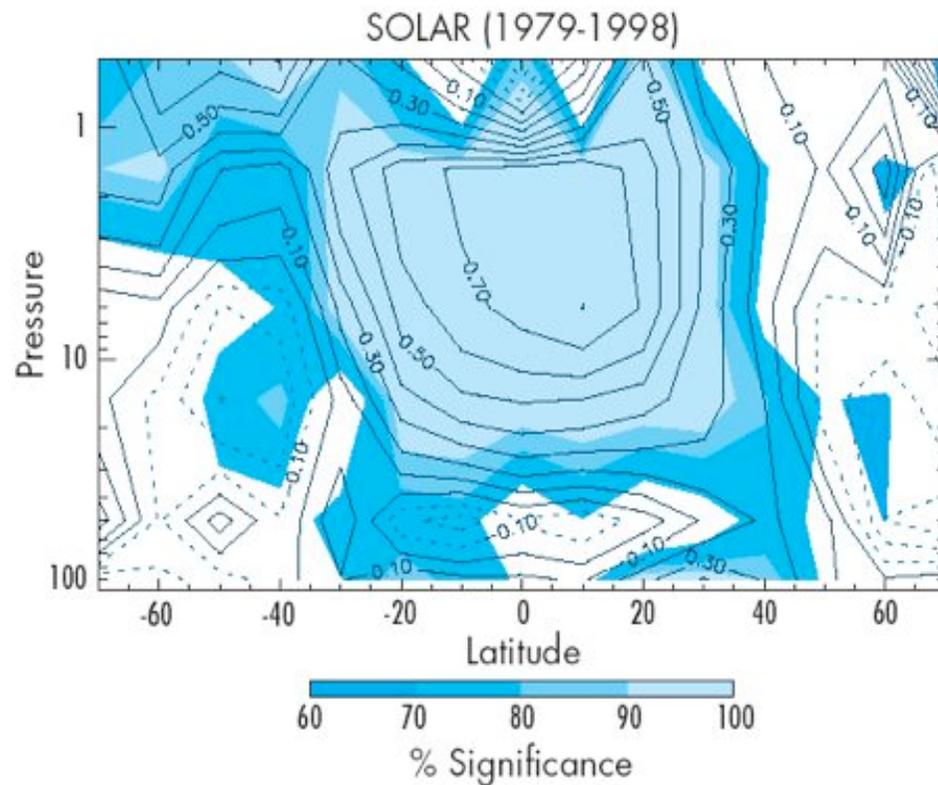
Bleu: déferlement

Rouge: zone de mélange

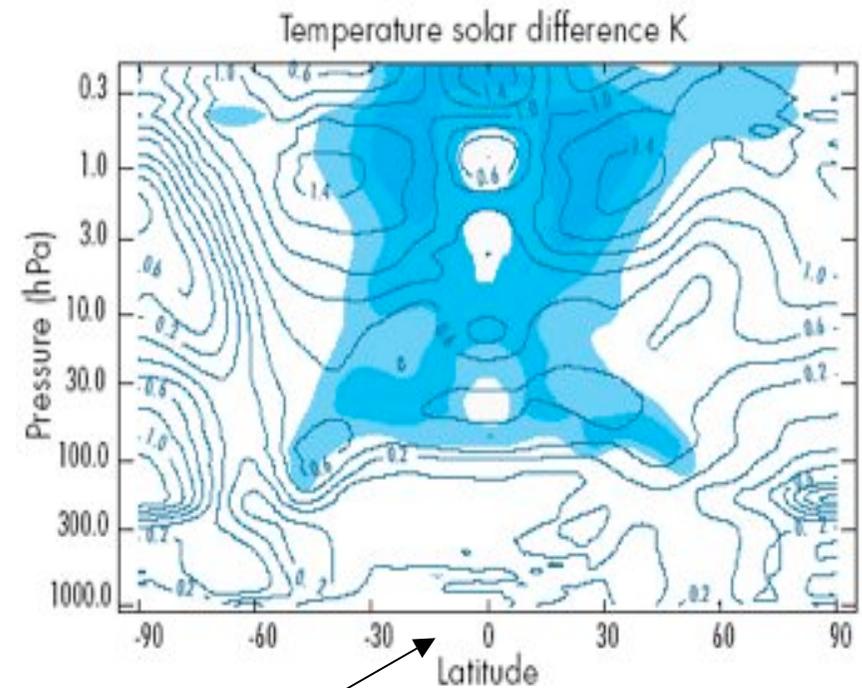
Blanc: Circulation de Brewer-Dobson

Les vents dans la stratosphère sont d'ouest en hiver et d'est en été

Observation



Simulation



Réponse de l'atmosphère à la variabilité UV simulée à l'aide d'un modèle GCM incluant la chimie et la dynamique de la stratosphère (Haigh et al., 2004). Il existe une certaine similarité entre les observations et la simulation notée par J. H., mais qui n'explique pas le détail du mécanisme.

LA MODELISATION

Une fois construit, il faut entrer l'irradiance totale en général reconstituée à partir de différentes informations (taches, facules, longueur du cycle, surface de pénombre, concentration des isotopes cosmogéniques,)

Il n'y a pas d'accord général au sujet de ces reconstructions.

La reconstitution une fois choisie, le modèle fournit des prévisions qui sont comparées aux mesures. De même, les reconstitutions de température ne sont pas uniques.

Par ailleurs, les modèles ne sont pas eux-mêmes tous en accord, sans doute en raison de la nébulosité qui joue un rôle capital pour la température au sol.

Les difficultés sont de plusieurs natures :

- modèles eux-mêmes (nébulosité)
- reconstitutions climatiques (températures)
- reconstitution de l'irradiance solaire totale et spectrale

CONCLUSION PRELIMINAIRE

Le système climatique est très compliqué en raison du couplage entre l'atmosphère et la surface et en raison de rétroactions positives. Il y a trois forçages externes principaux:

- Soleil
- L'activité volcanique
- Les actions anthropiques:

qui ont leur propre variabilité.

Au plan de la modélisation, il existe plusieurs difficultés : la nébulosité, reconstructions de l'irradiance solaire totale.

Au plan des mesures, le problème de la valeur absolue de l'irradiance solaire totale doit être résolu ainsi que la *tendance*.

Etant donné l'évolution prévue de la concentration des GES, la prévision de l'activité solaire à quelques dizaines d'années est nécessaire.

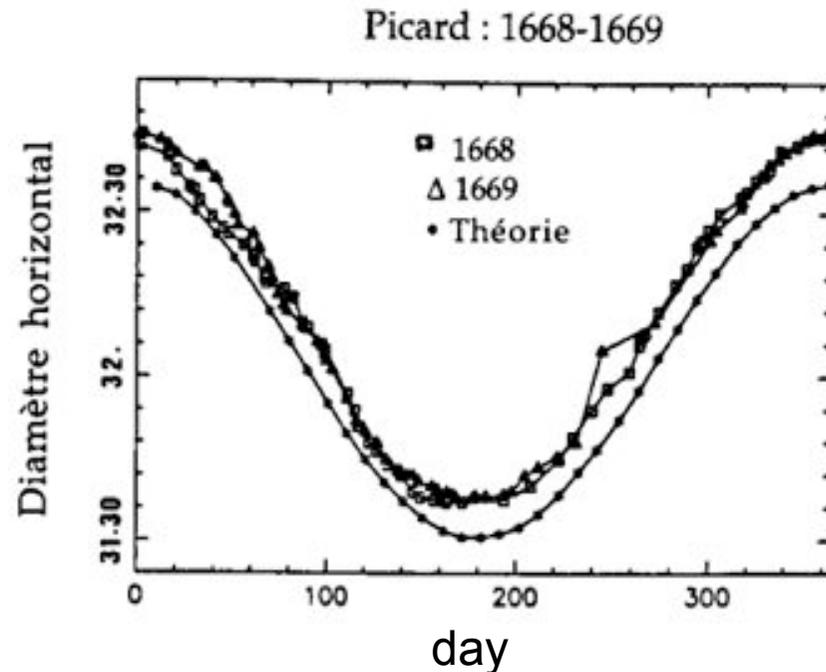
LA MISSION PICARD



Jean PICARD (1620 - 1682)

LA GENESE DE LA MISSION PICARD

Jean PICARD (1620-1682), mesura le diamètre solaire en fonction du jour de l'année pour déterminer l'excentricité de l'orbite terrestre.



Ribes (1987) normalisa les diamètres à 1 U.A. Ces mesures montraient que le Soleil aurait eu un diamètre supérieur à celui d'aujourd'hui de ~ 0.5 seconde.

Par ailleurs, ces mesures réalisées pendant le Minimum de Maunder, période d'activité solaire plus petite qu'aujourd'hui, suggéraient une anticorrélation diamètre/activité et ouvraient une discussion toujours d'actualité 20 ans après.

LES GRANDEURS FONDAMENTALES CARACTERISANT LE SOLEIL

Ce sont des quantités qui sont des contraintes essentielles pour valider les processus physiques mis en œuvre dans un modèle solaire :

- **L'irradiance solaire totale**
- **Diamètre solaire, la forme du limbe, l'asphéricité**
- **Les modes d'oscillation**
- **La température de la photosphère**

et leur variabilité

LES GRANDEURS FONDAMENTALES

Irradiance solaire totale Température de la photosphère	Luminosité Solaire	UARS, SoHO, SORCE, SOLAR, ... PSPT
Oscillations solaires asphéricité, rotation diff.	Structure Interne	SoHO, réseau sol, SDO
Spectre solaire Limbe solaire	Composition Température	ATLAS, UARS, SORCE, SOLAR
Diamètre solaire	Structure interne	SDS, SoHO (MDI), instruments au sol

La variabilité de ces quantités est une donnée essentielle pour l'étude de la Dynamique de la zone convective.

SITUATION DES DONNEES SOLAIRES

- Parmi les grandeurs précédentes, c'est le diamètre solaire qui présente la plus grande incertitude. Plusieurs facteurs y contribuent :
 - Mesures effectuées du sol contenant l'effet de l'atmosphère (diffusion, turbulence, ...).
 - Effets instrumentaux (largeur des pixels, psf de l'optique, longueur d'onde observée...)
 - Traitement des données (effets du filtrage du bruit)
- L'irradiance solaire totale (5 W/m² ?)

DIAMETRES SOLAIRES

Diamètre photosphérique :

défini par la position du point d'inflexion du limbe solaire. Mais elle dépend de la psf de l'instrument, du domaine spectral (raies de Fraunhofer), du filtrage du bruit et des effets atmosphériques dans le cas des mesures au sol.

Diamètre sismique :

Déterminé à partir des modes d'oscillation en minimisant la différence modèle/mesures (Antia et al. 1998). Sa valeur dépend du modèle solaire. Le rayon est obtenu à différentes profondeurs sous la photosphère. La variation du rayon sismique avec l'activité solaire est très petite (< 15 mas)

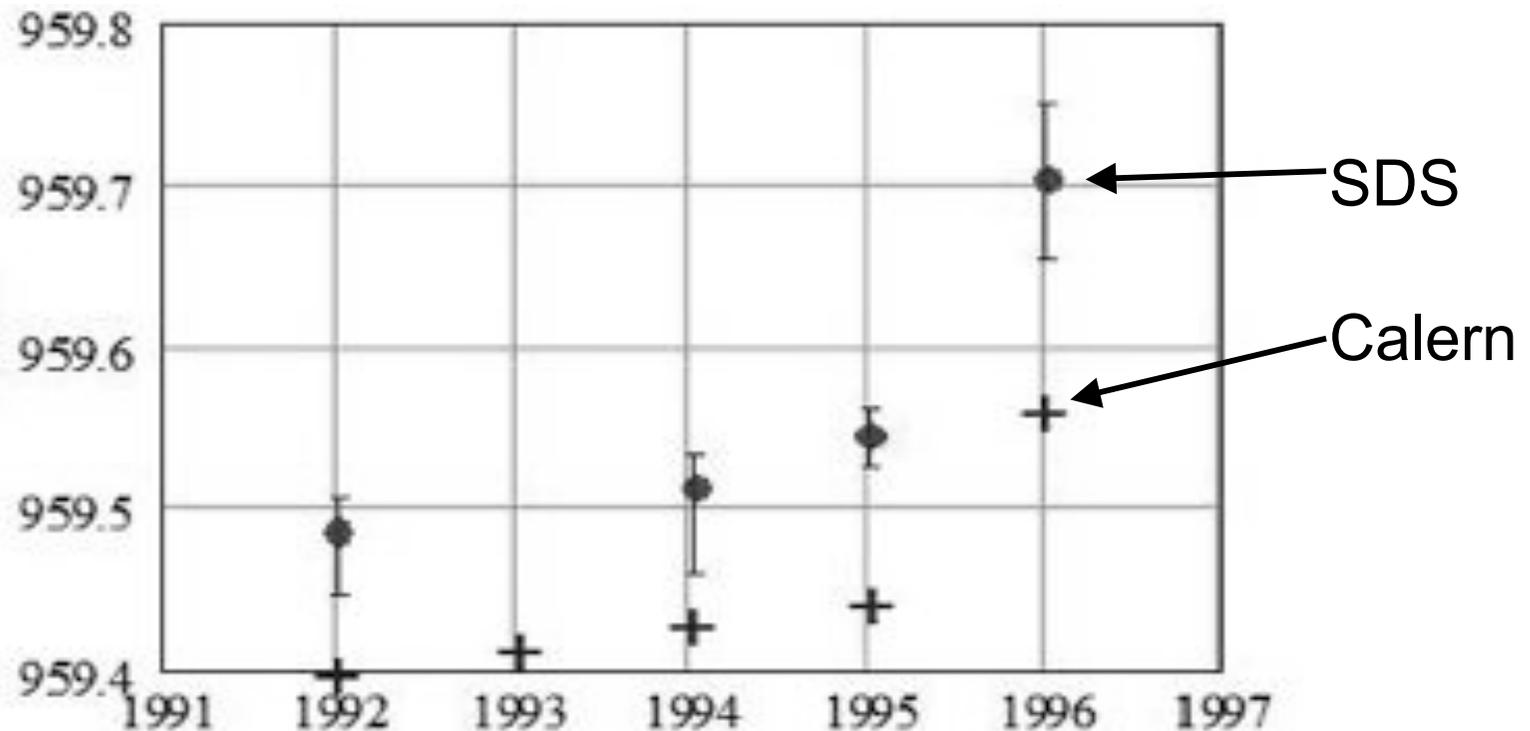
MESURES DU DIAMETRE PHOTOSPHERIQUE

A partir du sol, différentes méthodes optiques (passage de Mercure, éclipses, astrolabes, télescopes imageurs), ont montré des variations en phase ou en opposition de phase ou aucune variation en fonction du cycle de 11 ans.

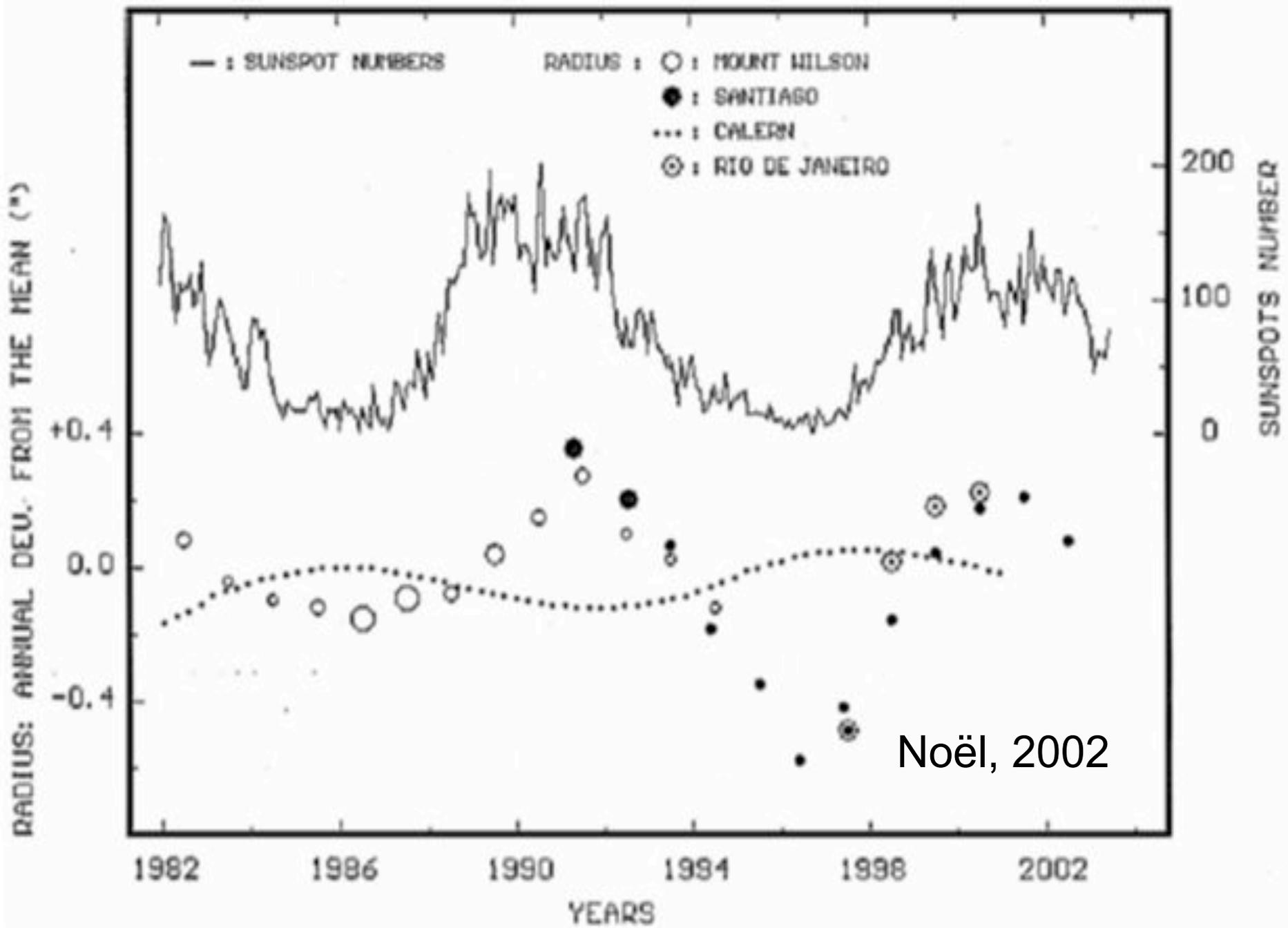
En orbite, Les images MDI/SoHO ont été utilisées pour déterminer la variation du rayon solaire entre 1995 et 2004. La variation maximum calculée serait de l'ordre de 15 mas (Kuhn et al., 2004). Cependant, MDI est un instrument conçu pour l'héliosismologie qui ne possède aucune référence angulaire interne ou externe. Les effets de vieillissement et les effets thermoélastiques sont corrigés par l'utilisation de modèles.

VARIATION DU DIAMETRE SOLAIRE OBSERVEE A PARTIR DE MESURES EN BALLON

Sofia et al. (1994) ont construit l'instrument Solar Disk Sextant (SDS) comportant une [référence angulaire](#) . Quatre vols sous ballons stratosphériques ont été effectués.

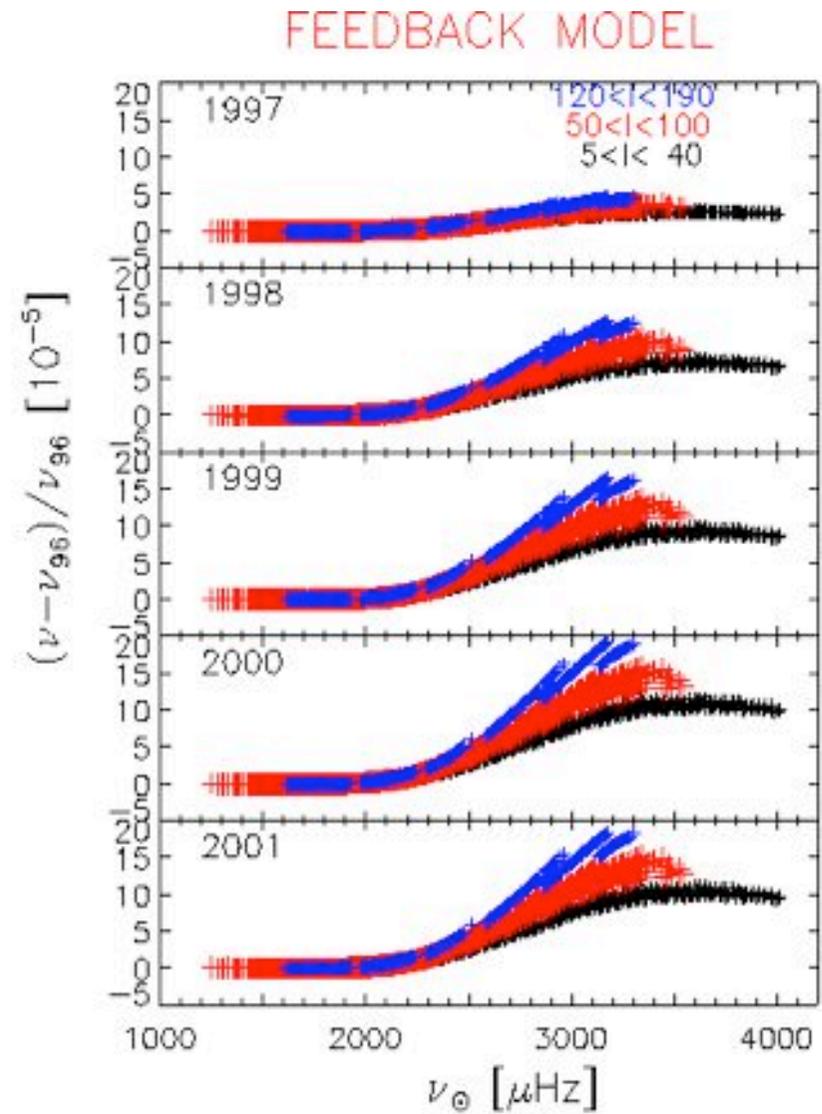
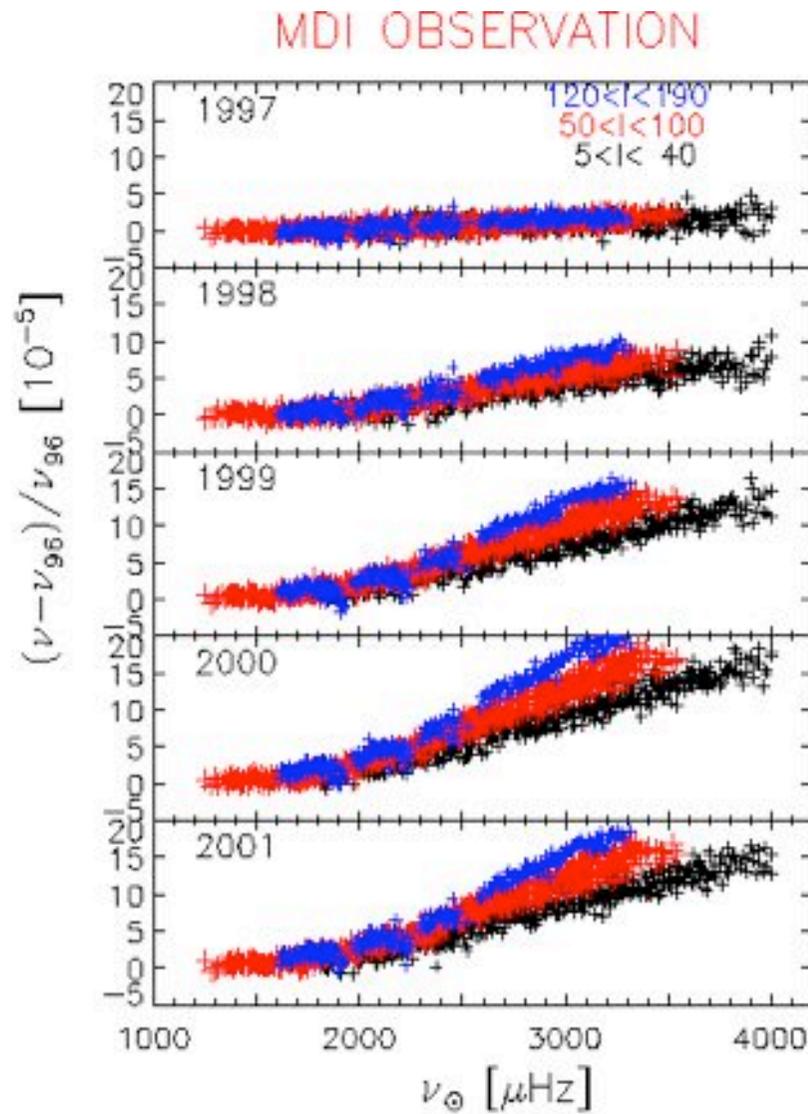


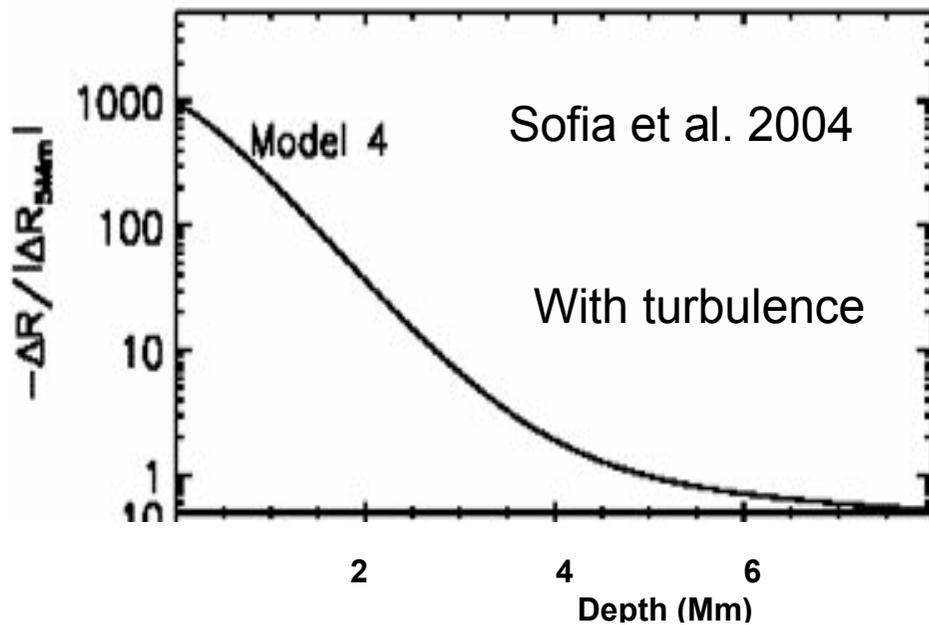
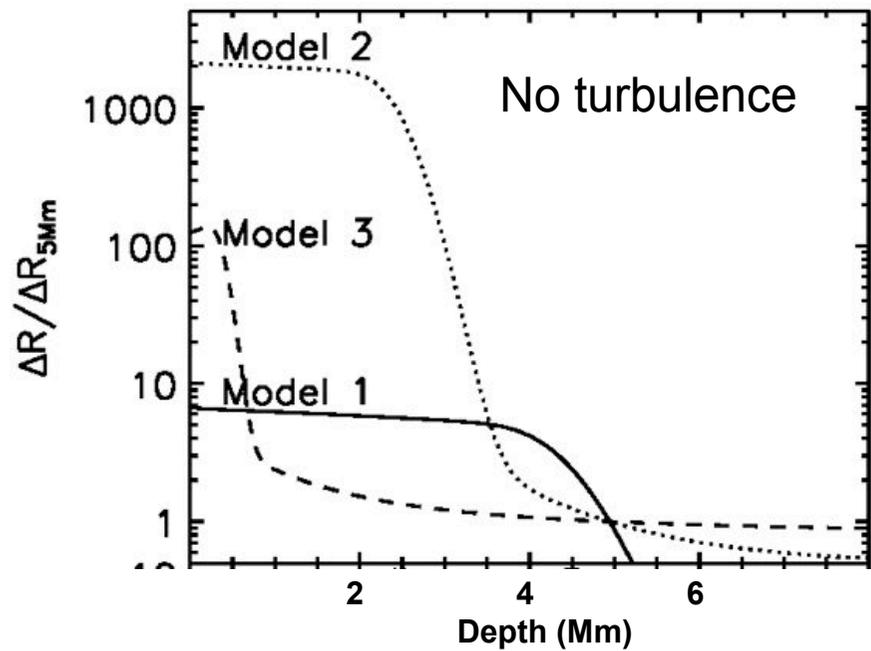
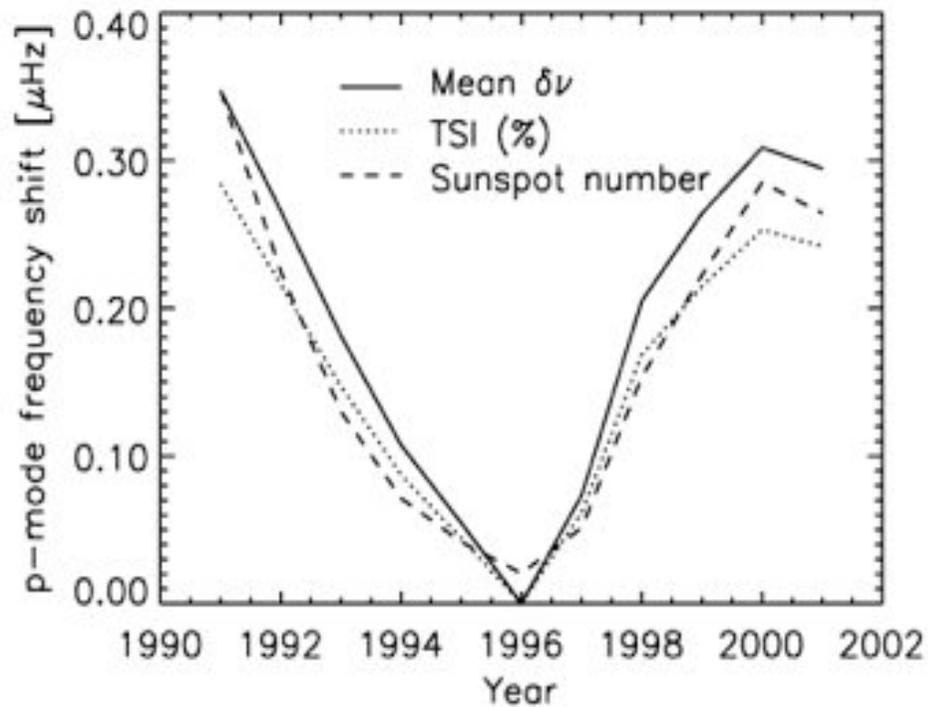
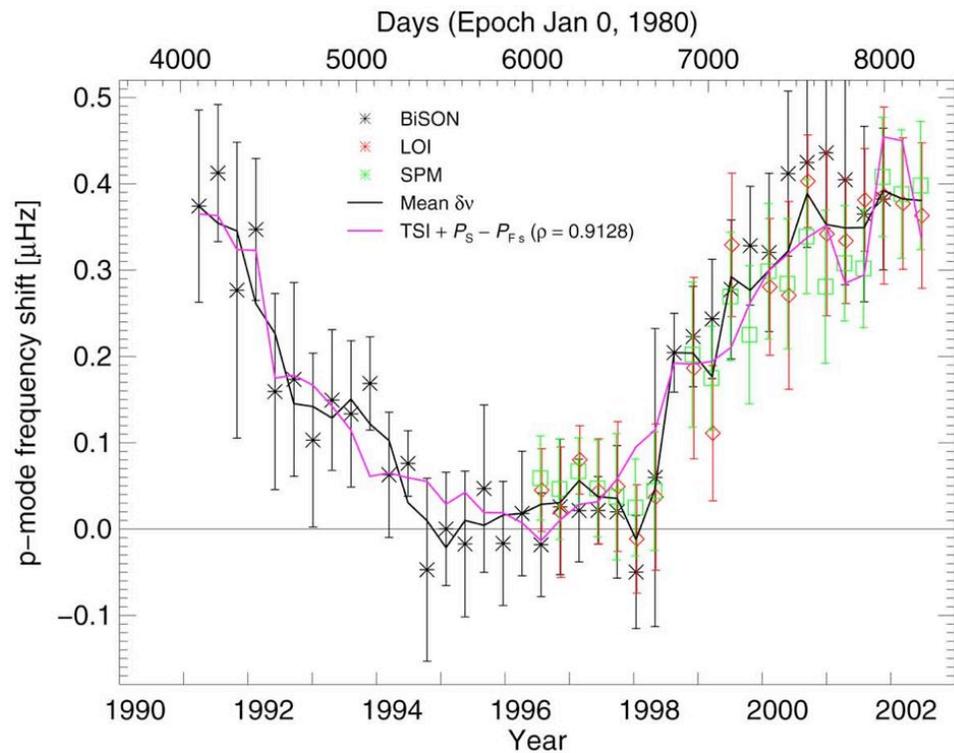
Une augmentation de 0.2" a été mesurée tandis que l'activité solaire diminuait (Egidi et al., 2006).



Noël, 2002

LE MODELE DE SOFIA ET AL.





OBJECTIVES SCIENTIFIQUES PRINCIPAUX DE LA MISSION PICARD

(1) Modélisation de la zone convective

Utilisant les mesures simultanées de plusieurs quantités fondamentales et leur variabilités.

Rôle des champs magnétiques de surface et/ou des champs profonds dans la zone convective. Origine de l'activité solaire ?

(2) Contribution à la reconstruction de la luminosité solaire

(3) Référencer le diamètre solaire à des distances angulaires de couple d'étoiles en vue de mesurer sa variation à long terme.

(4) Comprendre les mesures au sol

(5) Contribution à la météorologie de l'espace

Une forte synergie avec Solar Dynamics Observer (SDO) est prévue.

LES INSTRUMENTS DE LA MISSION PICARD

En orbite :

Deux radiomètres mesurent l'irradiance solaire totale. Etant de principes différents, Ils permettront de séparer les variations d'origine solaire des variations d'origine instrumentale comme à bord de SoHO à l'aide de l'instrument DIARAD (IRMB) et de l'instrument PMO6 (PMOD-WRC) :

- SOVAP : mesure radiométrique et bolométrique (IRMB).
- PREMOS : radiomètre et 3 photomètres solaires (PMOD, CH)

⇒ 5 W/m² ?

Pour mesurer le diamètre solaire, la forme du limbe, l'asphéricité et les régions actives :

- SODISM : un télescope imageur métrologique SA(F)

Au sol :

Au Plateau de Calern, SODISM (MQ) mesure le diamètre solaire et la forme du limbe. MISOLFA mesure turbulence locale.

Une collaboration avec le réseau PSPT et l'Observatoire de Meudon est établie.

MODELISATION SOLAIRE DANS L'EQUIPE PICARD

- Modélisation de la zone convective

La modélisation de l'intérieur solaire, utilisant les mesures simultanées de l'irradiance totale, les mesures héliosismologiques, la forme du limbe, l'aplatissement et le diamètre solaire. Ce développement (modèle 2D) est conduit par l'Université de Yale et l'observatoire de Rome (Li et al, 2006).

Au CEA, trois modélisations sont en cours :

- modélisation 1D (code CESAM) mise en œuvre de tous les processus dynamiques (effet de la rotation sur la structure et le transport de moment angulaire et le mélange des espèces chimiques)
- modélisation 2D de la zone convective conduisant au cycle de 11 ans
- modélisation 3D de portions d'étoiles (code MHD appelé ASH)

La modélisation de l'irradiance totale est développée à l'Université de Montréal.

MODELISATION DU CLIMAT DANS L'EQUIPE PICARD

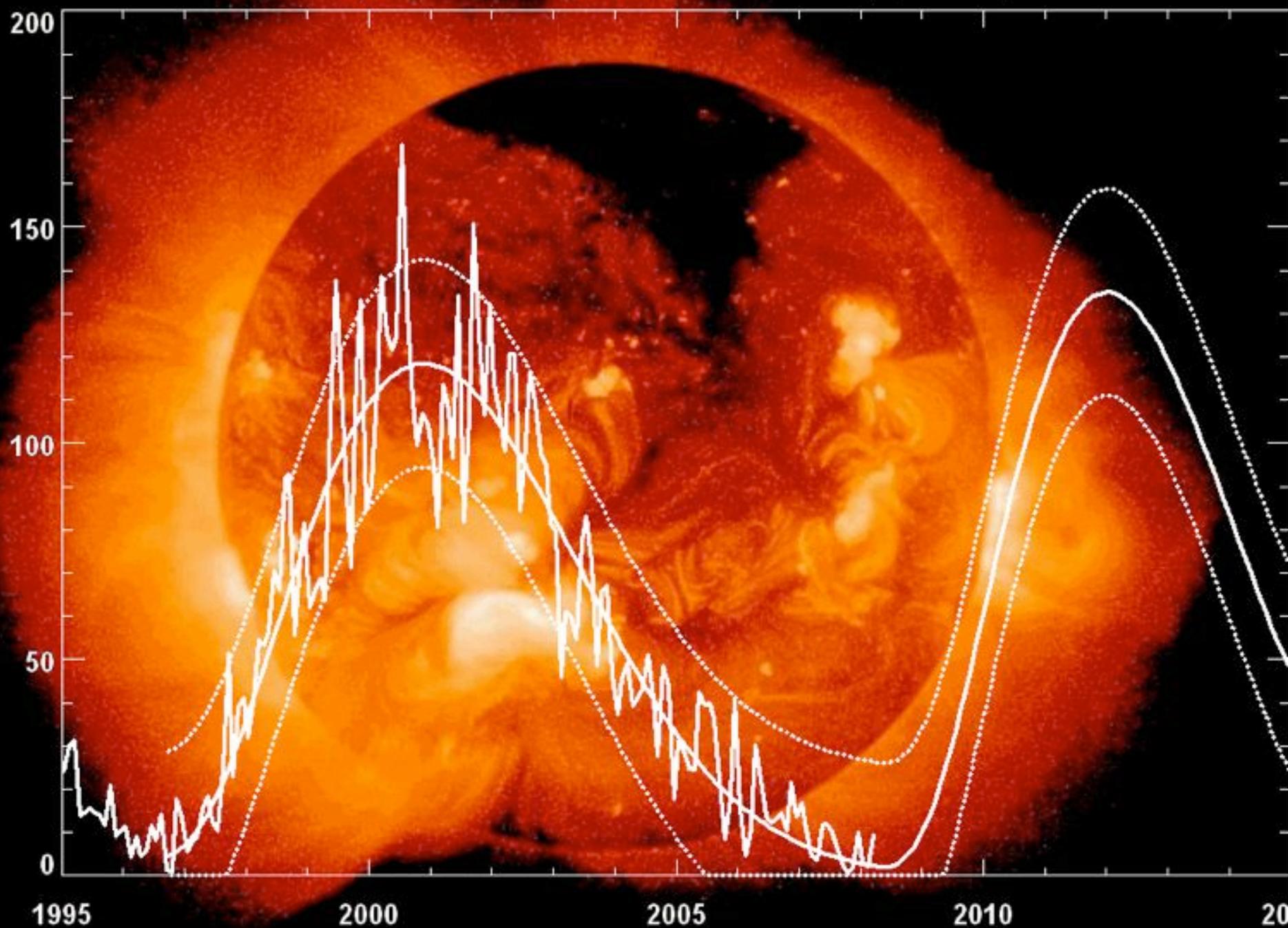
Modélisation du climat incluant la variabilité UV solaire:

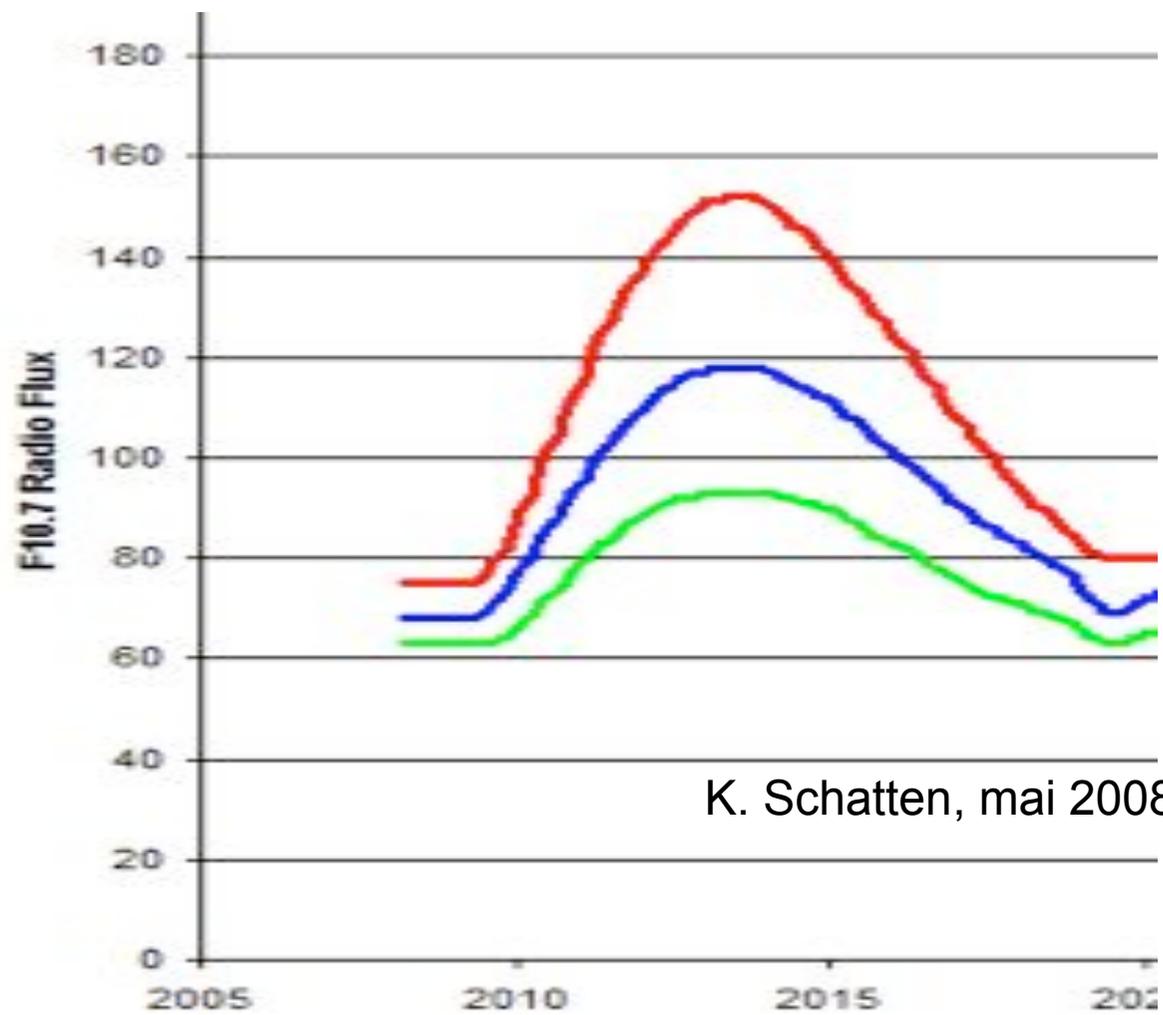
- Au Service d'Aéronomie (LMDz-REPROBUS),
- A l'Université de Toronto (CMAM)
- Au PMOD (Suisse).

Ces trois développements indépendants devraient assurer des résultats fiables.

Première réunion de travail : 10-11 juillet 2008

Cycle 23-24 Sunspot Number Prediction (April 2008)





K. Schatten, mai 2008

CONCLUSION

Le climat de la Terre résulte d'un ensemble de forçages qui, à l'échelle de quelques siècles, sont principalement le Soleil, les GES et les aérosols volcaniques ayant chacun leur propre variabilité.

L'objectif principal de la mission PICARD est la recherche de l'origine de la variabilité solaire, de sa prévision et de sa reconstruction à l'aide de modèles physiques.

Pour cela, PICARD mesure simultanément plusieurs paramètres fondamentaux et développe les outils théoriques pour les interpréter.

Pour le climat, la reconstruction de l'irradiance solaire par voie théorique et expérimentale sera entreprise et utilisée dans les modèles climatiques dont le développement est en cours

Pour la variabilité à long terme, le diamètre sera référencé de façon absolue à partir de 9 couples d'étoiles.

Enfin, la comparaison du diamètre en orbite et au sol par deux instruments identiques permettra d'élucider les contributions solaire et atmosphérique.

Lancement :
juin 2009
Lanceur :
Dnepr



© CNES - Mars 2006 // Illustration D. Ducros

Instituts fournissant des instruments: CNRS, RMIB, PMOD-WRC,
OCA. <http://smc.cnes.fr/PICARD/Fr/>