

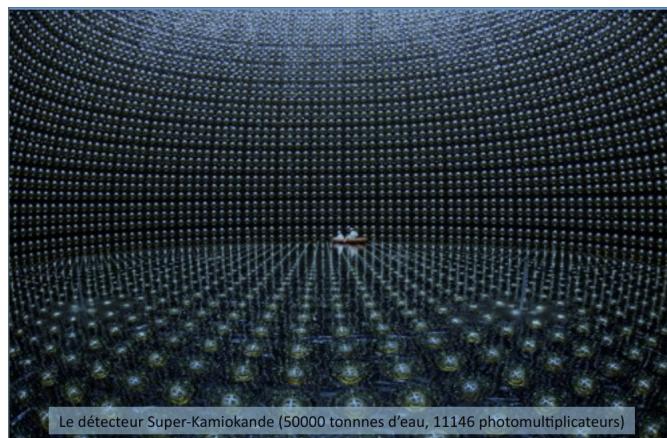
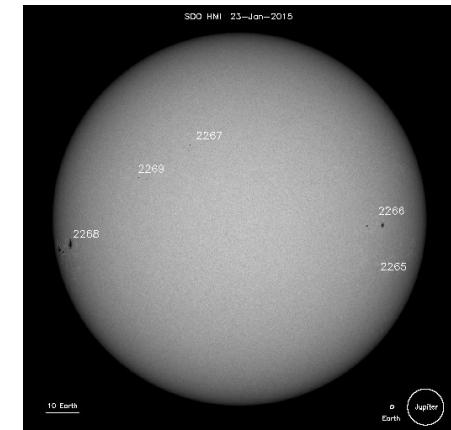
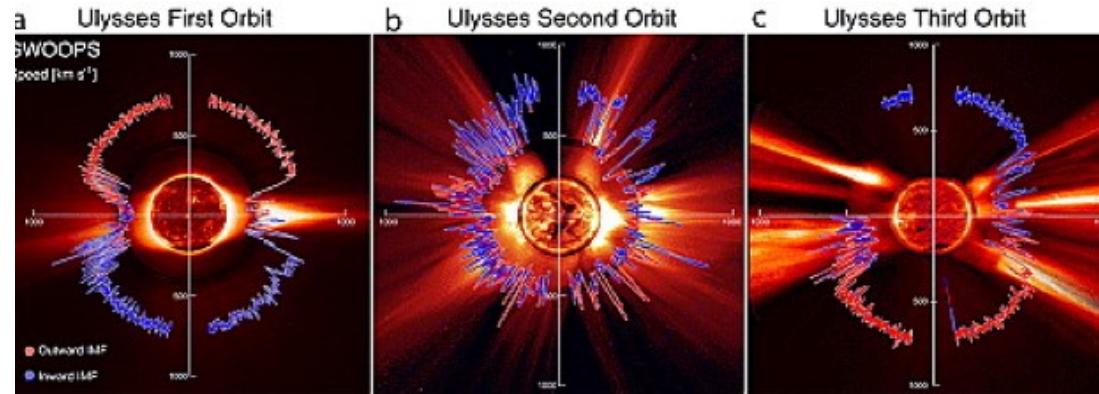
Vingt ans de SoHO dans l'espace



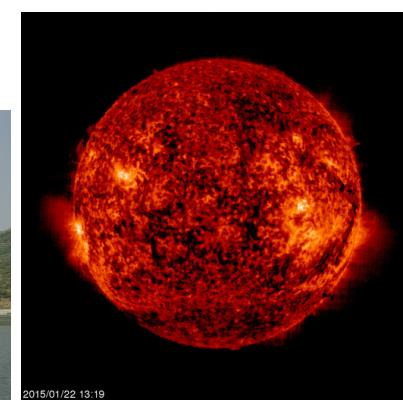
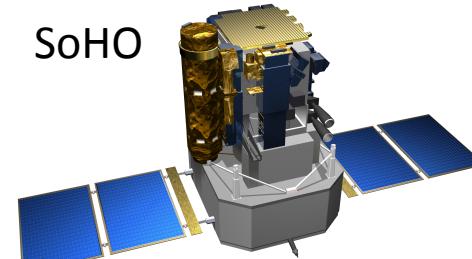
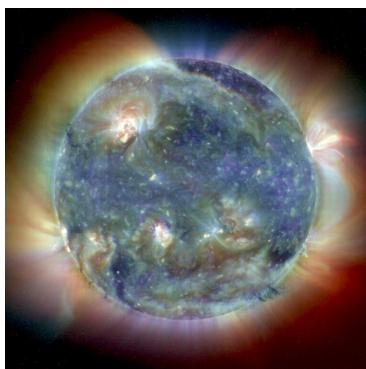
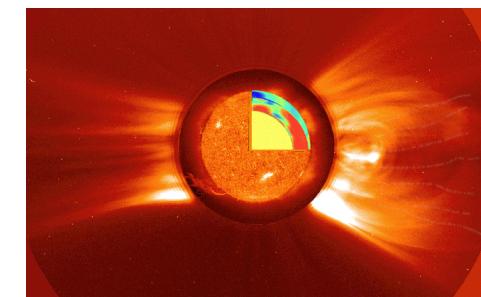
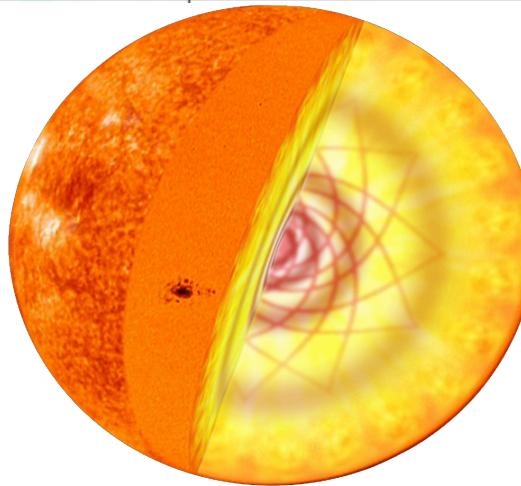
DESIGN BY ALEX LUTKUS

Sylvaine Turck-Chièze, CEA, Nice le 2 Décembre 2015

Le soleil dans tous ses états



Le détecteur Super-Kamiokande (50000 tonnes d'eau, 11146 photomultiplicateurs)



DE LA RECHERCHE À L'INDUSTRIE



www.cea.fr

QUATRE GRANDS THÈMES

- LE SOLEIL ET LA PHYSIQUE FONDAMENTALE
- LE PLASMA SOLAIRE EN LABORATOIRE
- L'ENERGETIQUE SOLAIRE, LA FUSION
- LE SOLEIL, UNE VISION DYNAMIQUE DE
L'INTERIEUR SOLAIRE
RELATION SOLEIL-TERRE,
- LES QUESTIONS OUVERTES

Sylvaine.Turck-Chieze@cea.fr

PRÉSENTATION HISTORIQUE

Fin du 19ème siècle: incompatibilité entre âge de la Terre et âge du Soleil
millions d'années, milliards d'années

1920: Source d'énergie interne: l'énergie nucléaire Perrin, Eddington, Bethe

1932 découverte du neutron, du neutrino

1960-1970: les premières modélisations numériques:
les étoiles naissent, vivent et meurent, les premiers neutrinos sont détectés

1980: naissance de l'héliosismologie, réseau sol IRIS, instrument spatial GOLF
1995-...: lancement du satellite SoHO

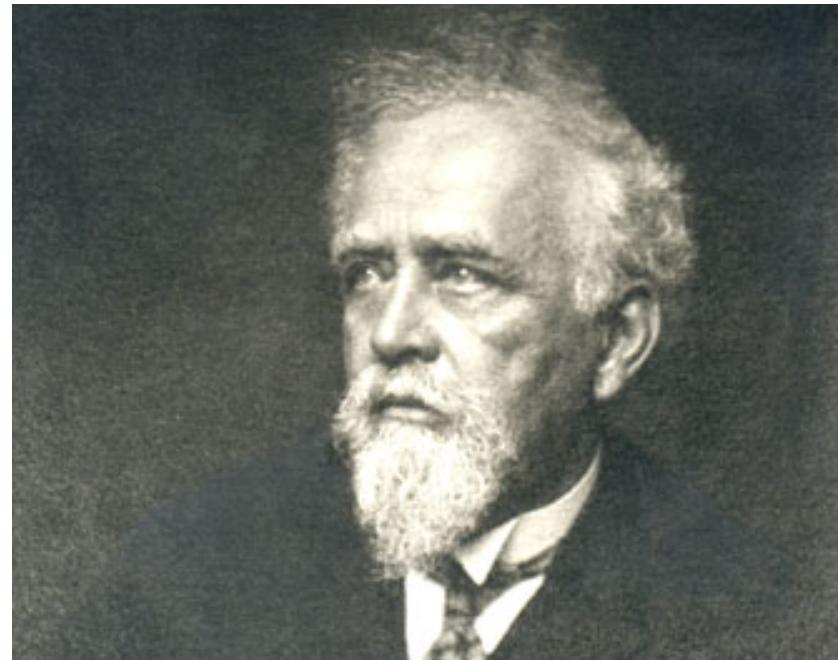
2007: lancement des satellites COROT, 2009: lancement de KEPLER:
recherche d'exoplanètes, **généralisation de la sismologie à des milliers d'étoiles**

Jean Perrin 1870-1942 Prix Nobel 1926

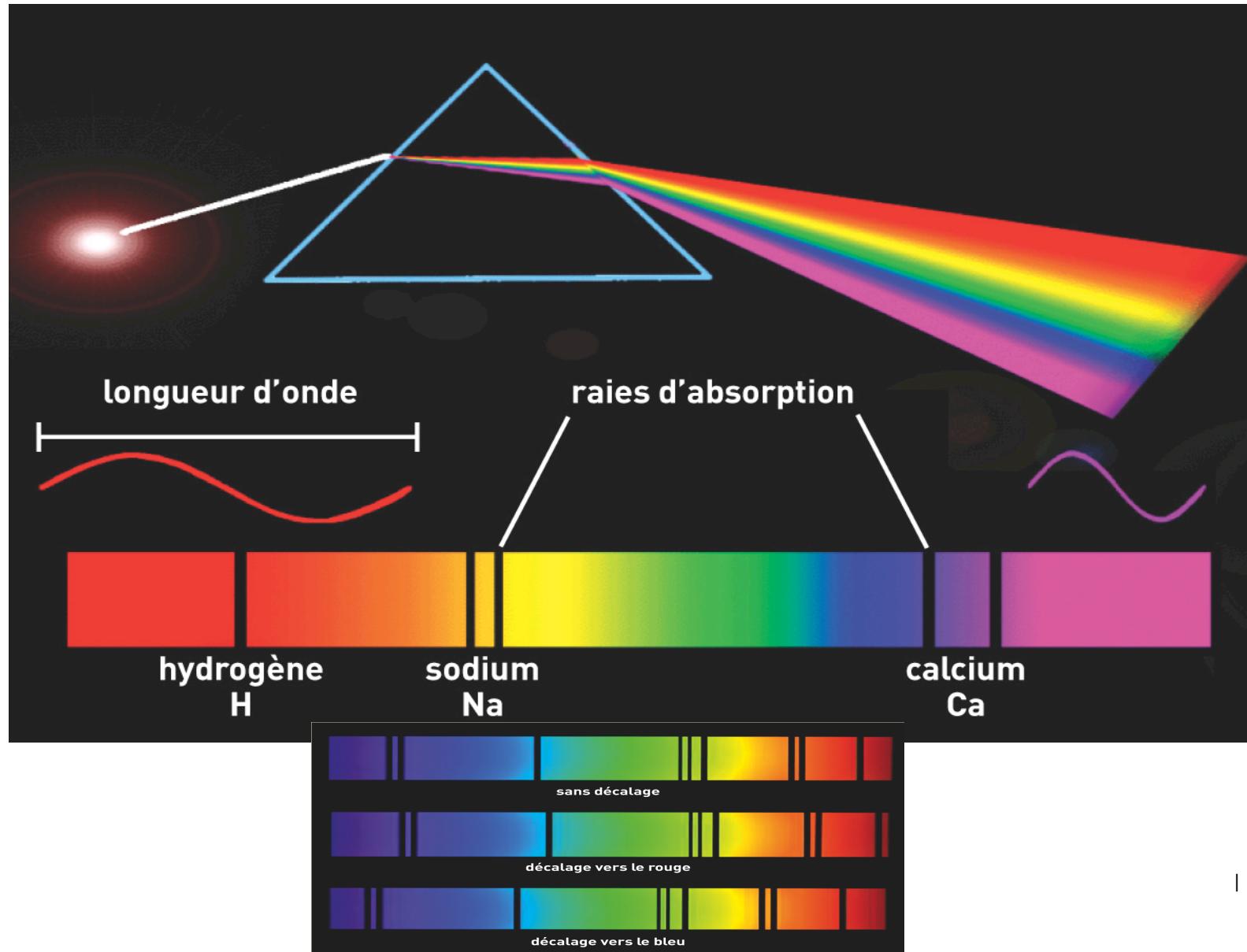
En 1919, Perrin propose que les
réactions nucléaires puissent fournir la source
d'énergie des étoiles.

' Bref, nous nous rendons largement compte, dans une évolution solaire prenant la matière au stade hydrogène et la laissant au stade atomes lourds, d'une fuite d'énergie égale à cent milliards de fois ce que le Soleil rayonne actuellement par an.

Nous expliquons donc aisément les quelques milliards d'années de rayonnement quasi stationnaire dont l'Histoire de la Terre apporte la preuve. Et il est possible que ce rayonnement reste encore à peu près le même pendant une période comparable à celle des époques géologiques, ce qui nous donnera le temps de faire quelques progrès ! Encore faut-il ajouter que nous ne savons pas si les atomes lourds actuellement connus marquent le terme de la condensation atomique (1).



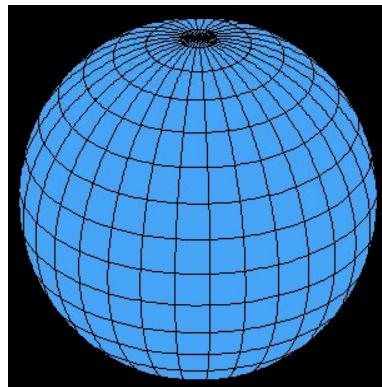
Sismologie: Décalage Doppler : mesure de la vitesse de déplacement des couches superficielles du Soleil



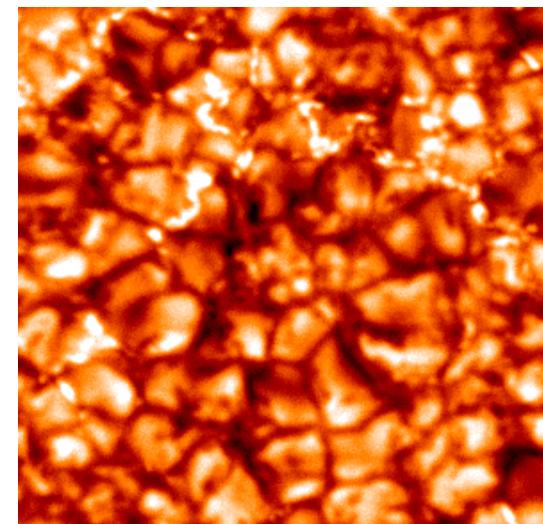
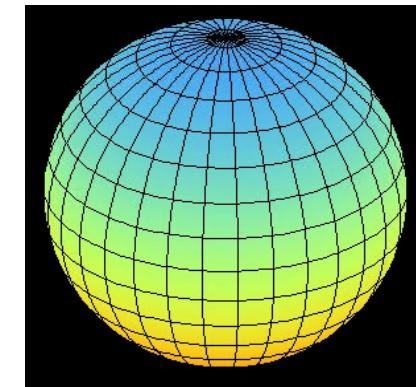
Presque toutes les étoiles oscillent
et ce pour des raisons différentes

Modes radiaux et dipolaires

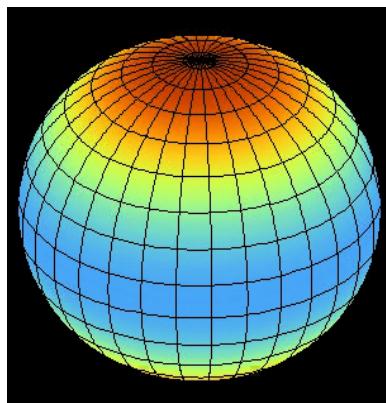
$l = 0$



$l=1, m=0$

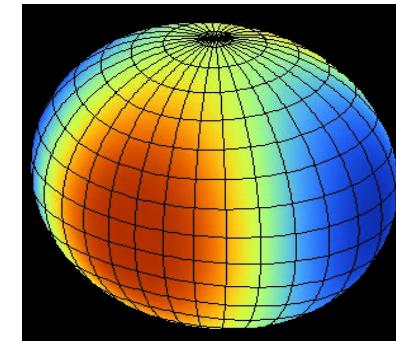


Modes non radiaux: les modes quadrupolaires

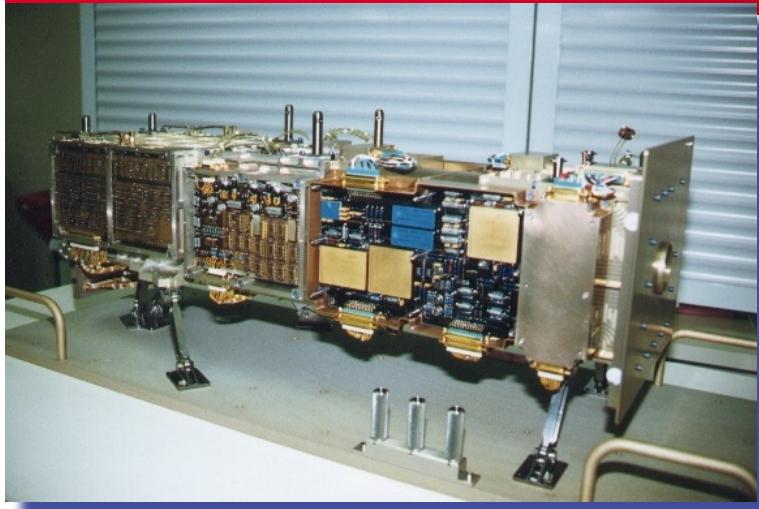


$l=2, m=0$

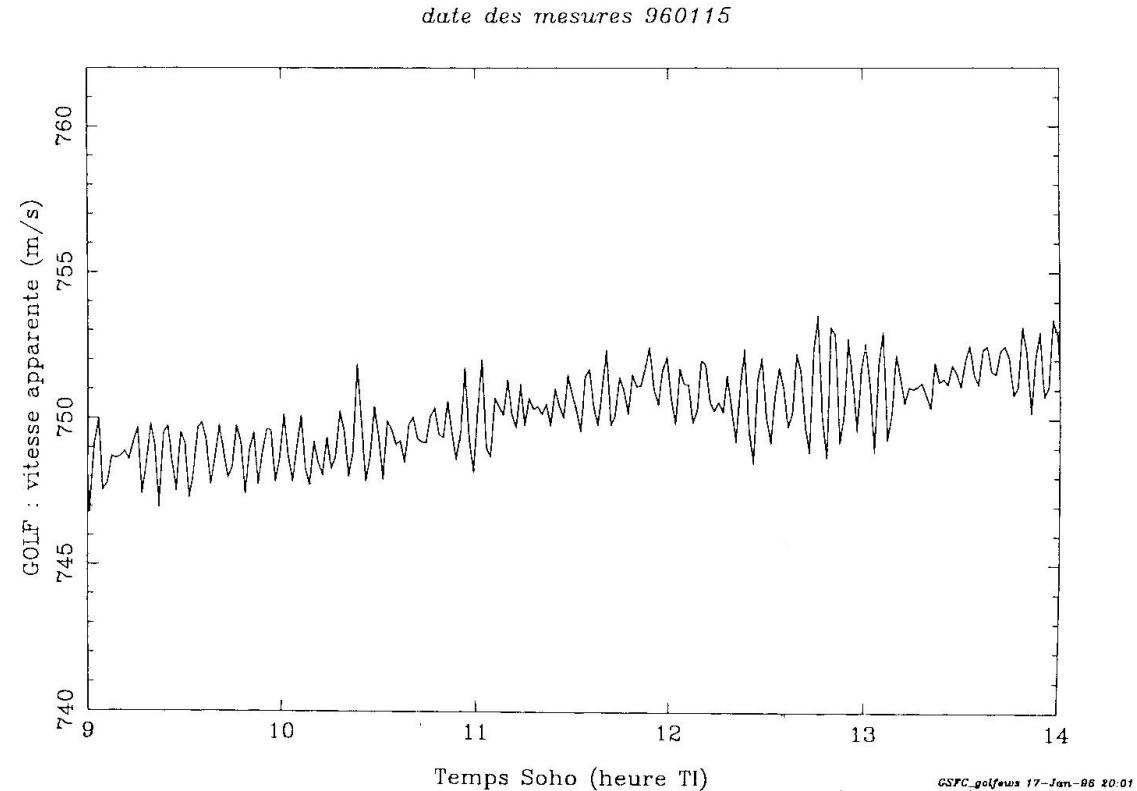
$l=2, m=2$



Mesures de la vitesse Doppler avec GOLF



GOLF: modes de bas degré
IAS-CEA-IAC + Nice et Bordeaux



Puis transformée de Fourier pour passer dans le domaine des fréquences quelques centièmes de mHz jusqu'à 5 mHz

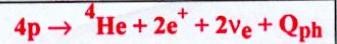
I- Le soleil et la physique fondamentale:

Objectif: Vérifier la véracité des équations de structure stellaires et leurs ingrédients physiques

profil maxwellien des vitesses d'interaction, réactions nucléaires, écrantage, équation d'état, opacités

Méthode: associer héliosismologie et détection de neutrinos

Combustion de l'hydrogène dans le Soleil et les étoiles de petites masses



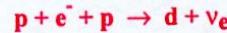
Qph 26 MeV

99.76 % (1.172 MeV)

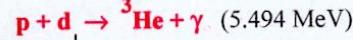


$$E_\nu \leq 0.420 \text{ MeV (0.270)}$$

0.24 % (0.001 MeV)



$$E_\nu = 1.442 \text{ MeV}$$



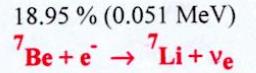
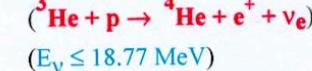
81.03 % (12.860 MeV)



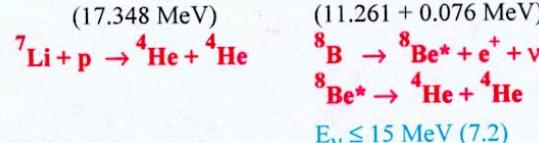
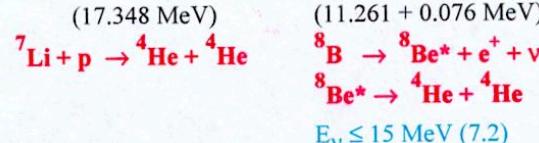
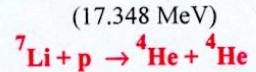
18.97 % (1.586 MeV)



(10⁻⁵ %)



$$E_\nu = 0.861 \text{ MeV (90 \%)} \quad E_\nu = 0.383 \text{ MeV (10 \%)}$$



$$E_\nu \leq 15 \text{ MeV (7.2)}$$

Chaîne PPI

$$Q_{ph} = 29.19 \text{ MeV}$$

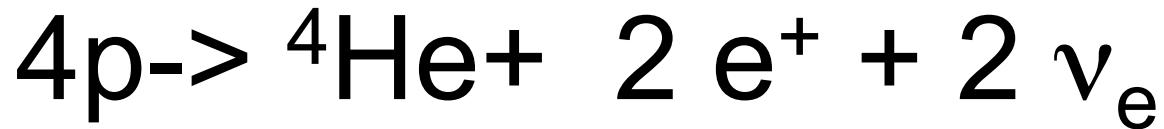
Chaîne PPII

$$Q_{ph} = 25.65 \text{ MeV}$$

Chaîne PPIII

$$Q_{ph} = 19.73 \text{ MeV}$$

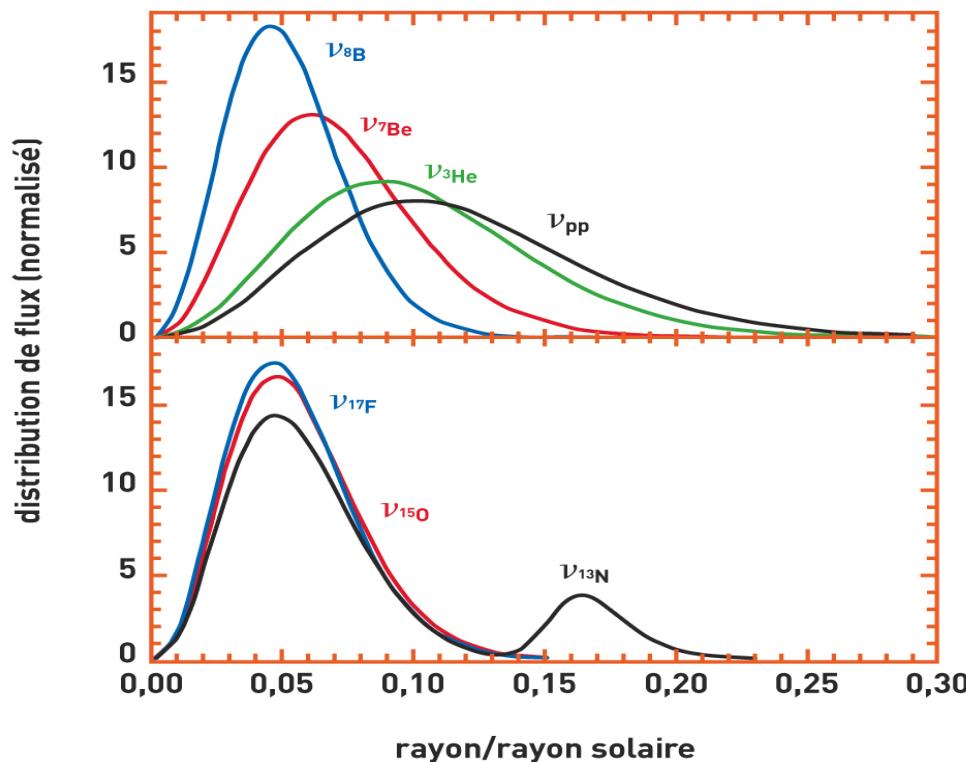
Production d'énergie:



Luminosité sur terre $1.36 \cdot 10^6 \text{ erg cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$

énergie / réaction 26 MeV pour 2 neutrinos

d'où **6.5 10^{10} neutrinos/cm²/s** principalement pp



Sensibilité à la température

$$\nu_p \text{ prop } T^{-1/2}$$

$$\nu_{^8\text{B}} \text{ prop } T^{24}$$

température centrale connue aujourd'hui

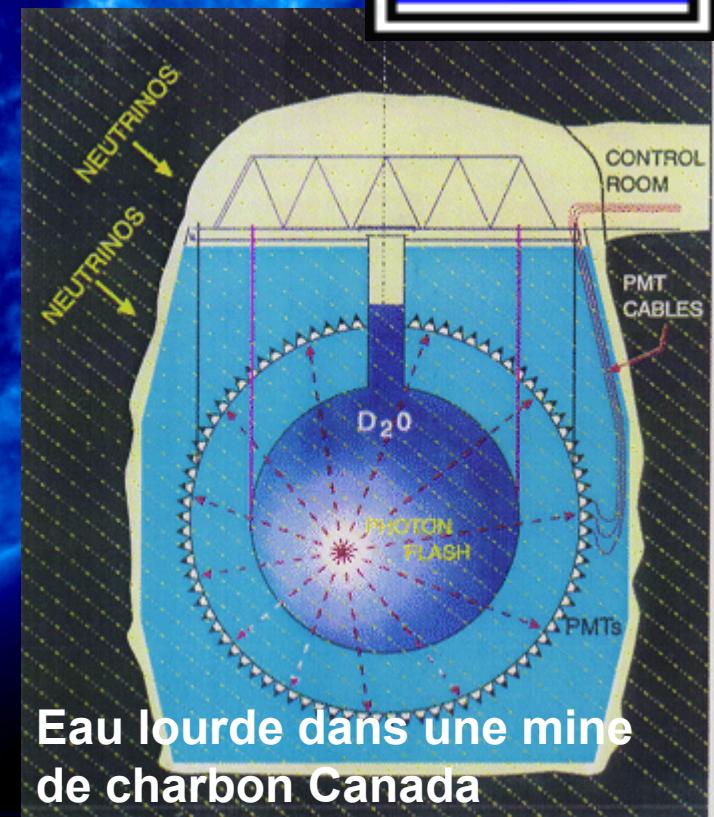
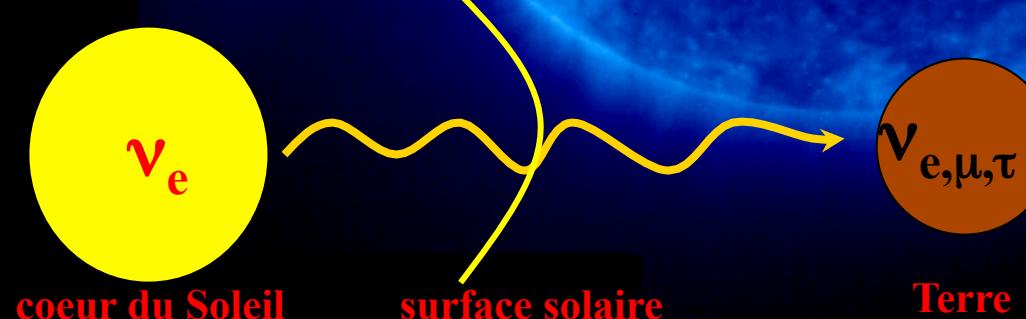
à $0.1 \cdot 10^6 \text{°K}$ près

Les neutrinos produits par le Soleil: l'interaction faible



- 10 milliards de neutrinos/cm²/s: 5000 détectés /an
50000 tonnes d'eau pure SK Japon 1km sous terre

comparaison SNO/modèles solaires →
l'origine du problème des neutrinos
est résolue





PROFIL DE VITESSE DU SON

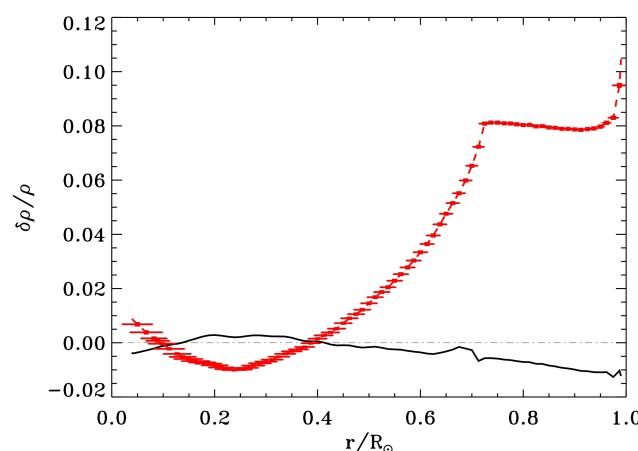
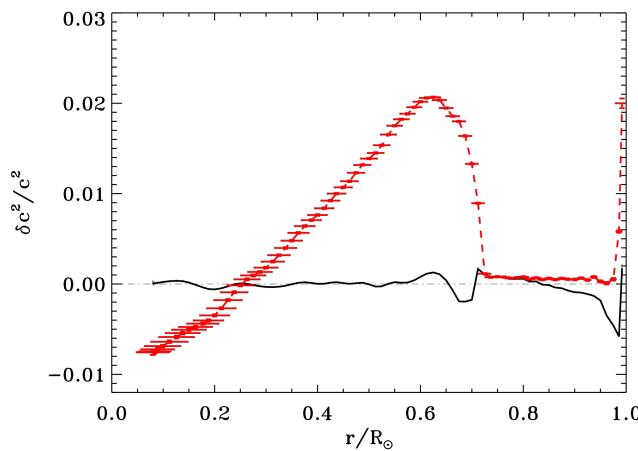
$$c^2 = \gamma P/\rho \text{ prop to } T/\mu$$

$$\delta c^2/c^2 = (c^2_{\text{exp}} - c^2_{\text{model}}) / c^2_{\text{model}}$$



Ray Davis 1914-2006
Prix Nobel 2002

**Précision de 10^{-5} , quelques 10^{-4}
sur la détermination de la vitesse du son**



**Détermination d'un modèle standard
et d'un modèle solaire sismique en accord avec
la vitesse du son et le profil de densité interne**

**Prédiction des différents flux de neutrinos,
confrontation aux détections**

Turck-Chièze et al. 2001, 2004, ...Turck-Chièze & Couvidat 2011, Tuck-Chièze & Lopes 2013

Heliosismologie et neutrinos en accord

	Predictions without neutrino oscillation	Predictions with neutrino oscillation
HOMESTAKE		2.56 ± 0.23 SNU
Standard model 2009	6.315 SNU	2.24 SNU
Seismic model	7.67 ± 1.1 SNU	2.76 ± 0.4 SNU
GALLIUM detectors		
GALLEX		73.4 ± 7.2 SNU
GNO		$62.9 \pm 5.4 \pm 2.5$ SNU
GALLEX + GNO		67.6 ± 3.2 SNU
SAGE		$65.4 \pm 3.3 \pm 2.7$ SNU
GALLEX+GNO+SAGE		$66.1 \pm 3.$ SNU
Standard model 2009	120.9 SNU	64.1 SNU
Seismic model	123.4 ± 8.2 SNU	67.1 ± 4.4 SNU
BOREXINO ^7Be		$3.36 \pm 0.36 \text{ } 10^9\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$
Standard model		
Seismic model	$4.72 \text{ } 10^9\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$	$3.045 \pm 0.35 \text{ } 10^9\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$
Water detectors	Predictions or Detections B^8 electronic neutrino flux	
SNO	$5.045 \pm 0.13 \text{ (stat)} \pm 0.13 \text{ (syst)} \text{ } 10^6\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$	
SNO +SK	$5.27 \pm 0.27 \text{ (stat)} \pm 0.38 \text{ (syst)} \text{ } 10^6\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$	
Standard model 2009	$4.21 \pm 1.2 \text{ } 10^6\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$	
Seismic model	$5.31 \pm 0.6 \text{ } 10^6\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$	
B^8 neutrino flux	electronic + other flavors in $10^6\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$	
SK1 (5 MeV)	$2.35 \pm 0.02 \text{ (stat)} \pm 0.08 \text{ (syst)}$	
SNO D ₂ O (5 MeV)	$2.39 \pm 0.23 \text{ (stat)} \pm 0.12 \text{ (syst)}$	
BOREXINO (2.8 MeV)	$2.65 \pm 0.44 \text{ (stat)} \pm 0.18 \text{ (syst)}$	

Le neutrino a une masse

- Le neutrino change de saveur:
 - Le neutrino électronique se transforme partiellement en neutrino tauique et muonique
 - Le neutrino est t'il une particule de Majorana ?
 - Propre antiparticule ?
- Prix Nobel de Physique 2015
Arthur Mc Donald SNO!!
1943-

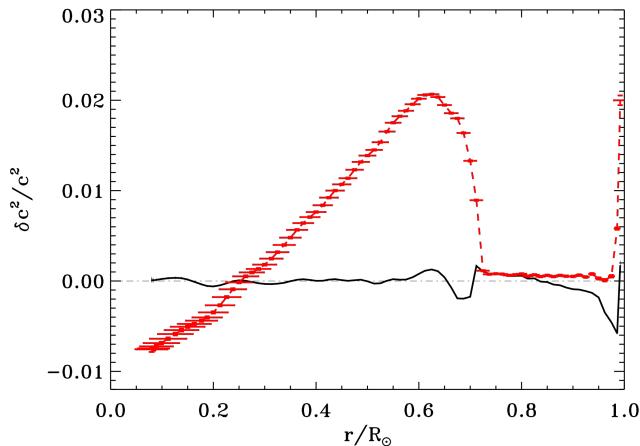




PROFIL DE VITESSE DU SON

$$c^2 = \gamma P/\rho \text{ prop to } T/\mu$$

$$\delta c^2/c^2 = (c^2_{\text{exp}} - c^2_{\text{model}}) / c^2_{\text{model}}$$

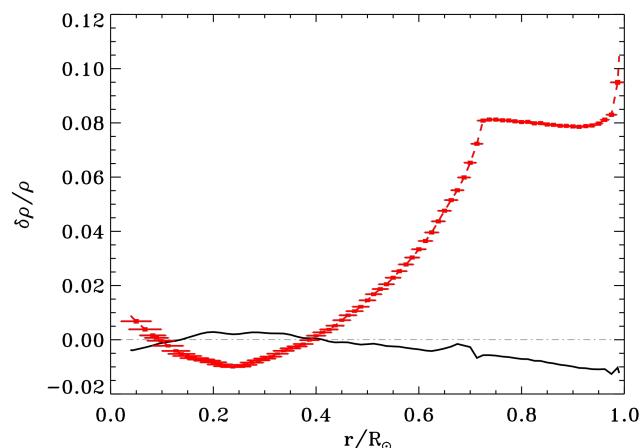


Comment interpréter ces différences significatives ?

Incertitude de la physique utilisée ?

Hypothèses du calcul à revoir ?

**pas de champ magnétique
pas de circulation de matière**



II- Le plasma solaire en laboratoire

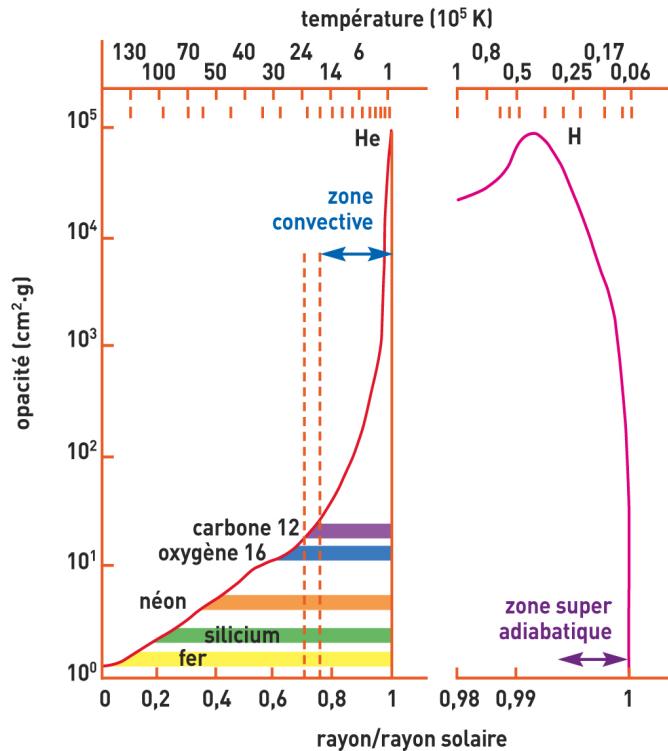
Objectif: Que dire de l'interaction photon-ions ?

Les calculs sont ils justes, suffisants ?

Peut on les vérifier ?

Méthode: nouveaux calculs, mesures

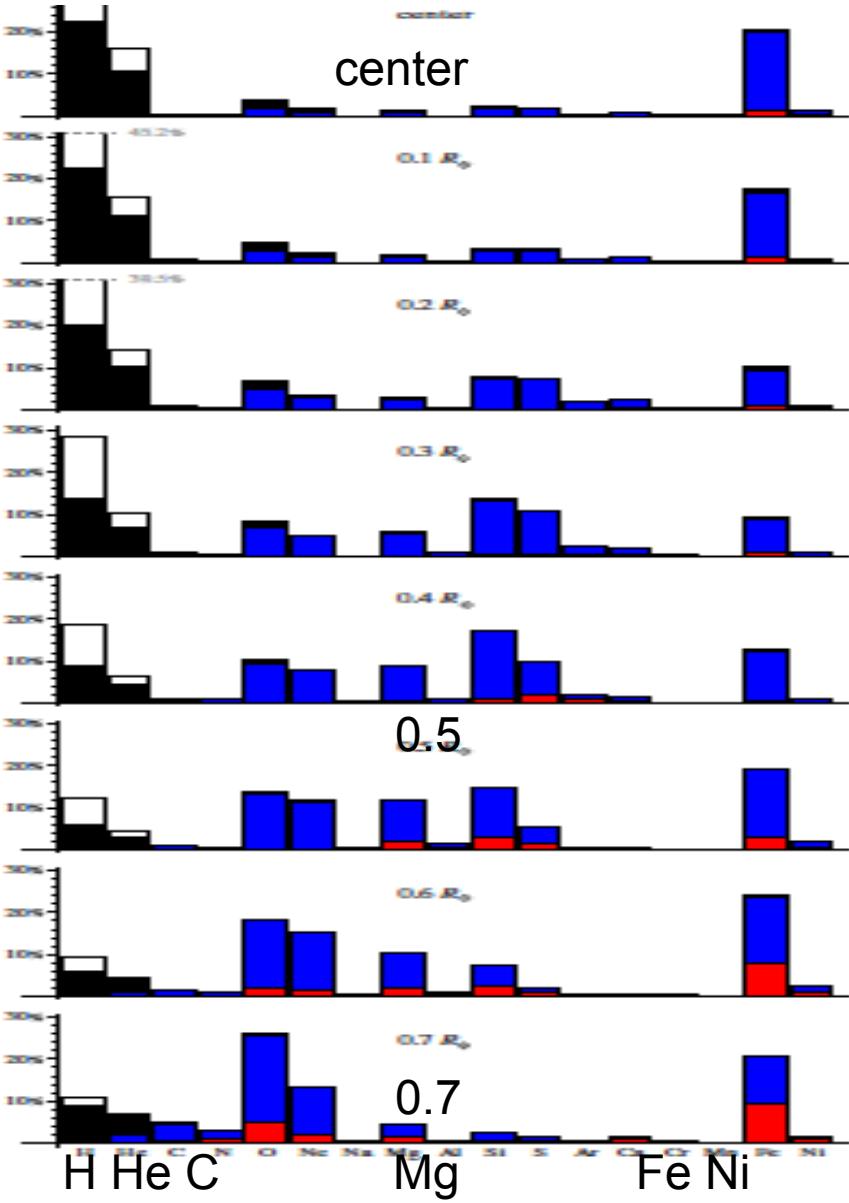
CONTRIBUTORS TO THE TOTAL OPACITY



Evolution in the Rosseland mean along solar profile. Adapted from Turck-Chièze et al. 1993

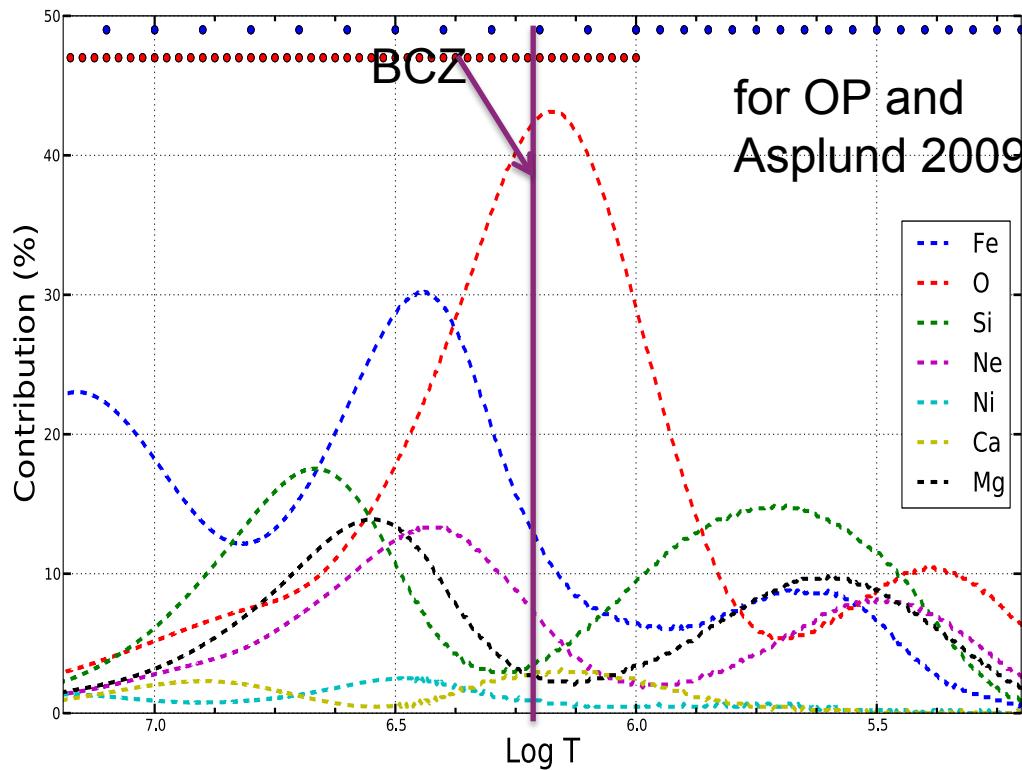
Black: free-free
 White: diffusion
 Blue: bound-free
 Red: bound-bound

Blancard et al 2012
 OPAS: CEA
 New calculations
 for the Sun



CONTRIBUTIONS OF THE METALLIC ELEMENTS

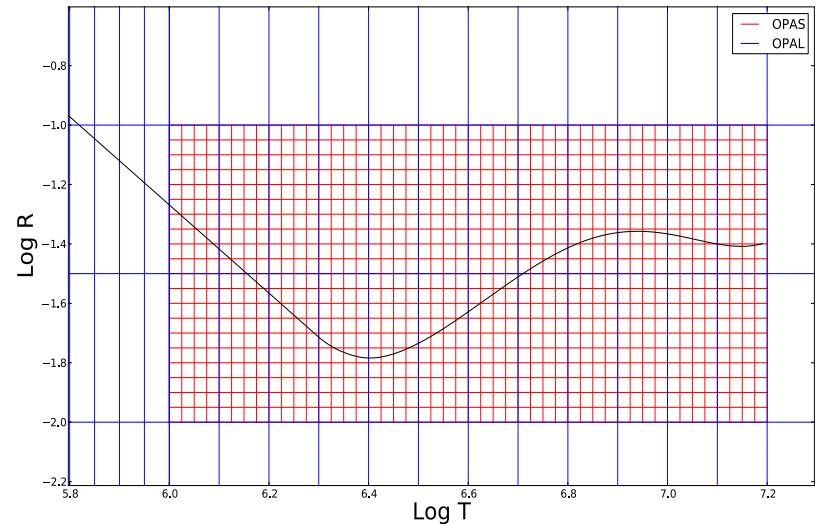
OPAL and OPAS grids **Mondet, Blancard et al. 2015, Le Pennec, T-C et al. 2015**



^{16}O OP greater than OPAL by 20%
 ^{56}Fe and ^{58}Ni smaller by 30%

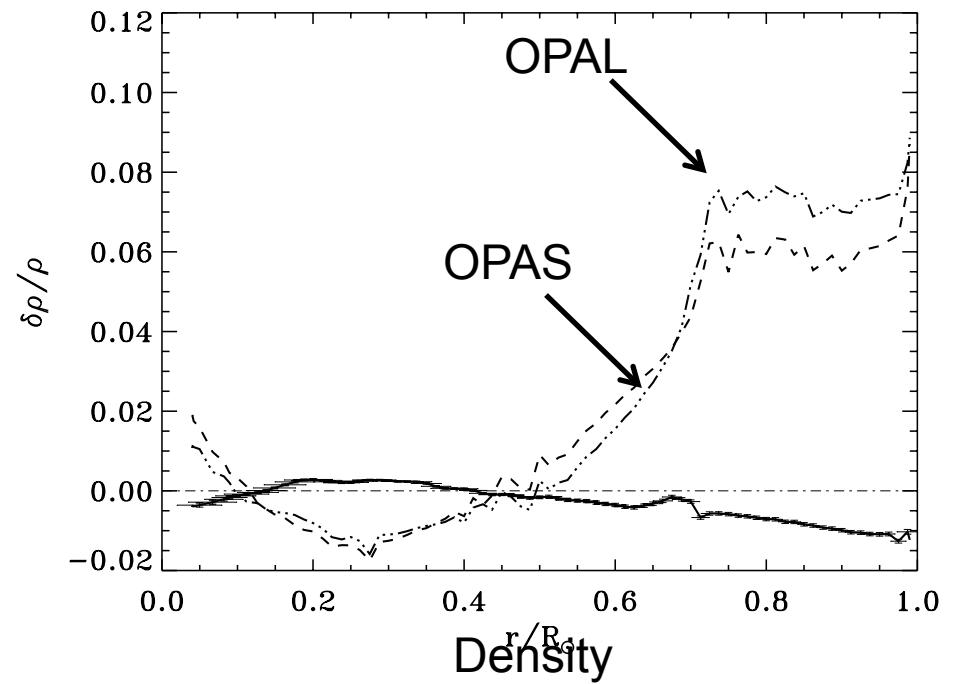
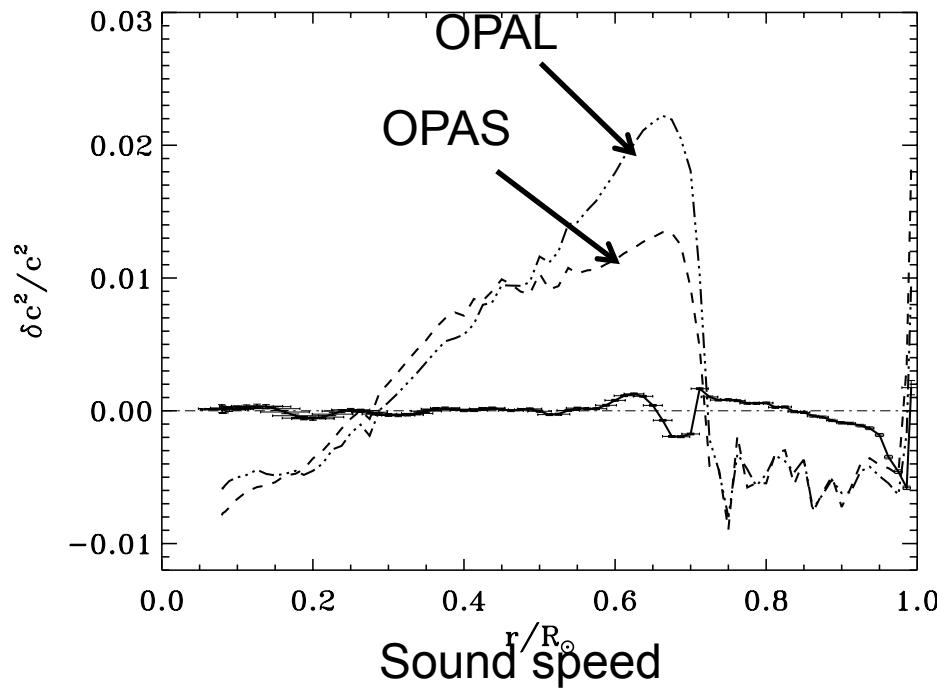
22 elements, 21142 points
 1 Tbytes of information
 32 billions of lines, different Z for interpolations

OPAS improves the **accuracy** of the calculations (several %) and the **interpolation in the grids**.
 Inner elemental composition through opacity gradients ?



OPAS /OPAL

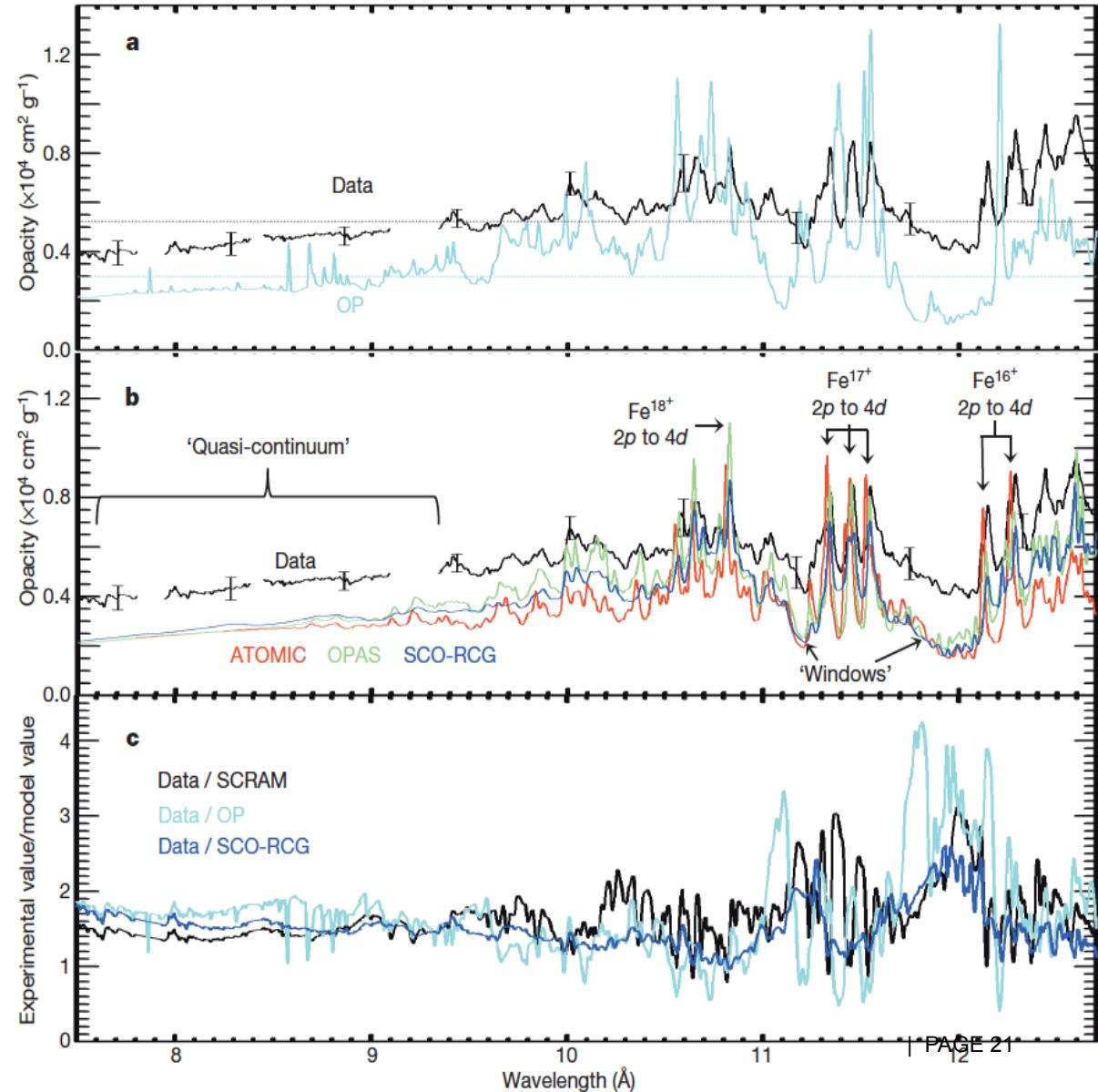
- Opacities OPAS included in OPAL tables with the OPAL grids to calculate an SSM MESA (no effect of interpolation yet)
- BCZ= 0.723 instead 0.729 Rsol for OPAL

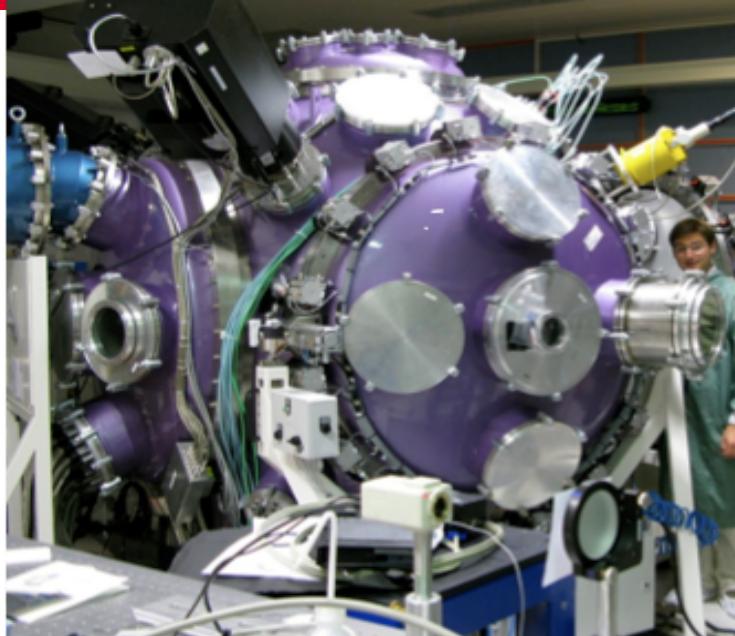


Bailey et al. 2015

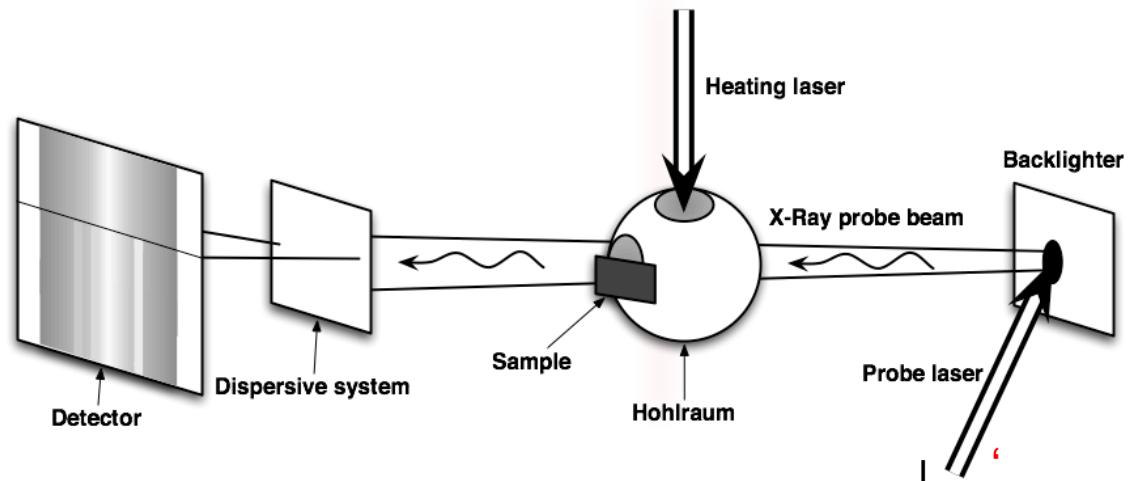
Difficulty to produce plasma in the conditions of the solar interior

Prb with the bound free contributions or problem with the experiment ?

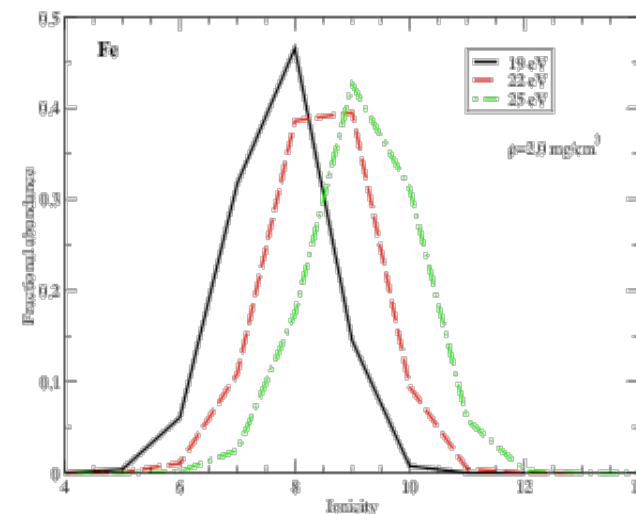
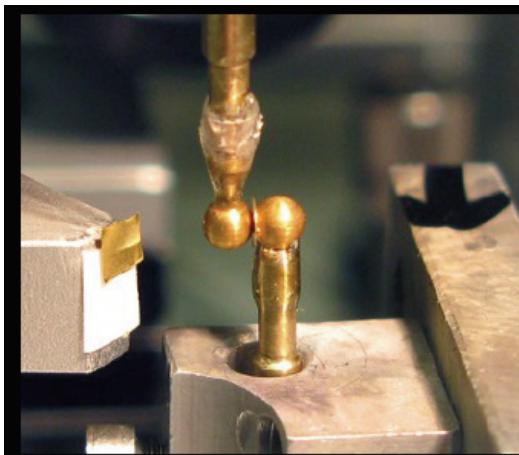




LULI2000



$T = 200000\text{K}$, densité: quelques mg/cm^2



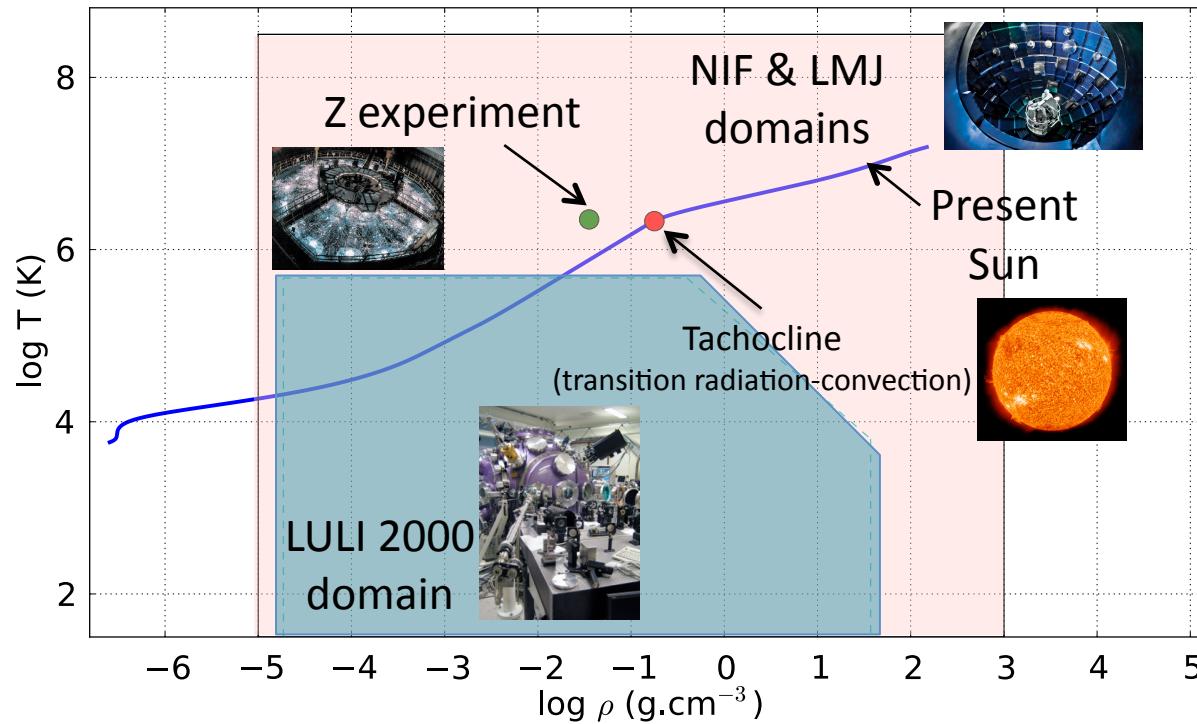
LASER MEGAJOULE AT CEA BORDEAUX



20% d'utilisation pour la communauté académique.

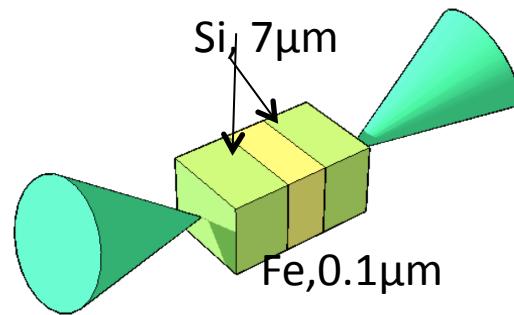
Premier tir académique 2017-2018

Morceau de soleil: $T >$ million de degrés, densité supérieure densité du solide **LTE**

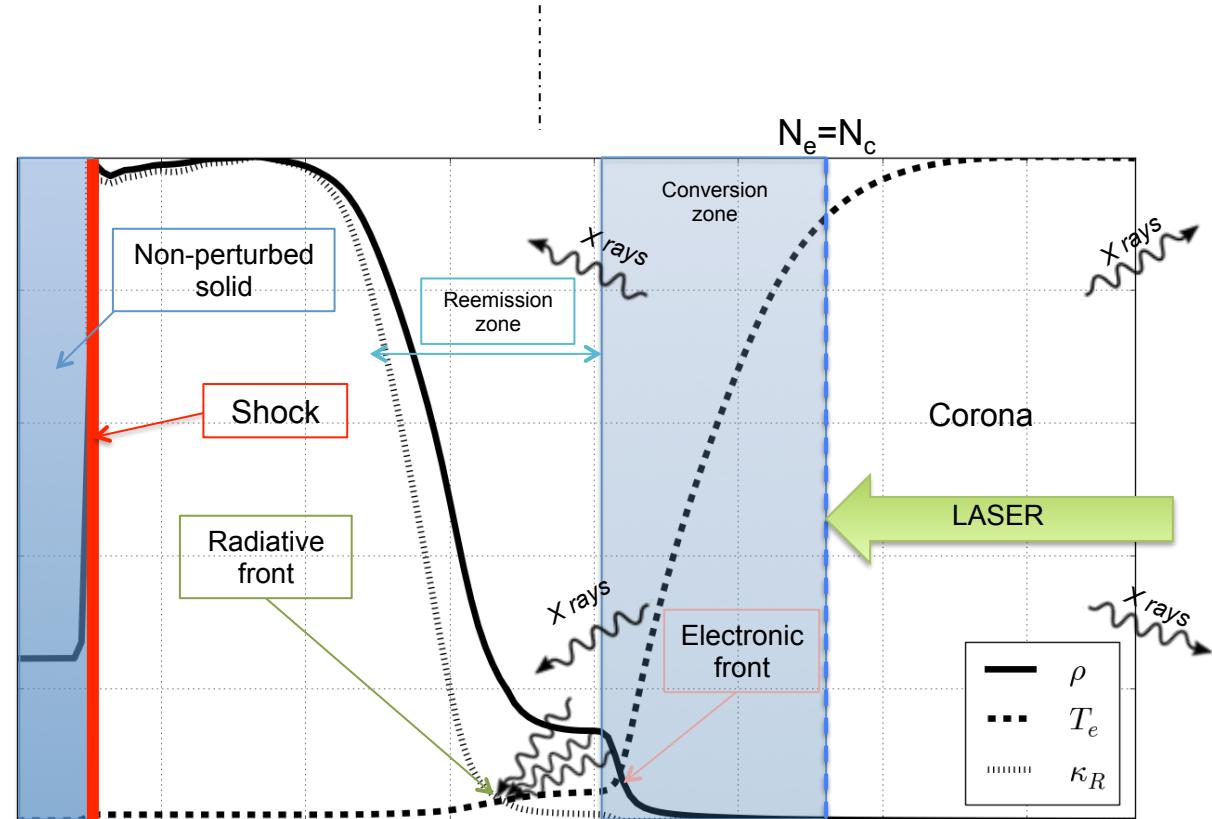


Double Front d'ablation

Le Pennec, Ribeyre, Ducret,
Turck-Chièze HEDP 2014



$$I_{\text{Laser}} \sim 4 \times 10^{15} \text{ W/cm}^2$$



Gradients densité < 12%, température < 5%

III- L'énergétique solaire, la fusion

Objectif: Enrichir les équations de structure des étoiles ?,

Quantifier les différences.

Mieux maîtriser la fusion sur terre

Méthode: sismologie, neutrinos, lasers, tokamacs

VÉRIFIER LA BALANCE ENERGETIQUE

Turck-Chièze, Piau, Couvidat 2010; T-C & Couvidat Rep. Prog. Physics 2011, T-C & Lopes 2012, RAA

T_c seismic model $15.74 \cdot 10^6$ K

T_c SSM $15.54 \cdot 10^6$ K

ρ_c seismic model 153.02 g/cm^3

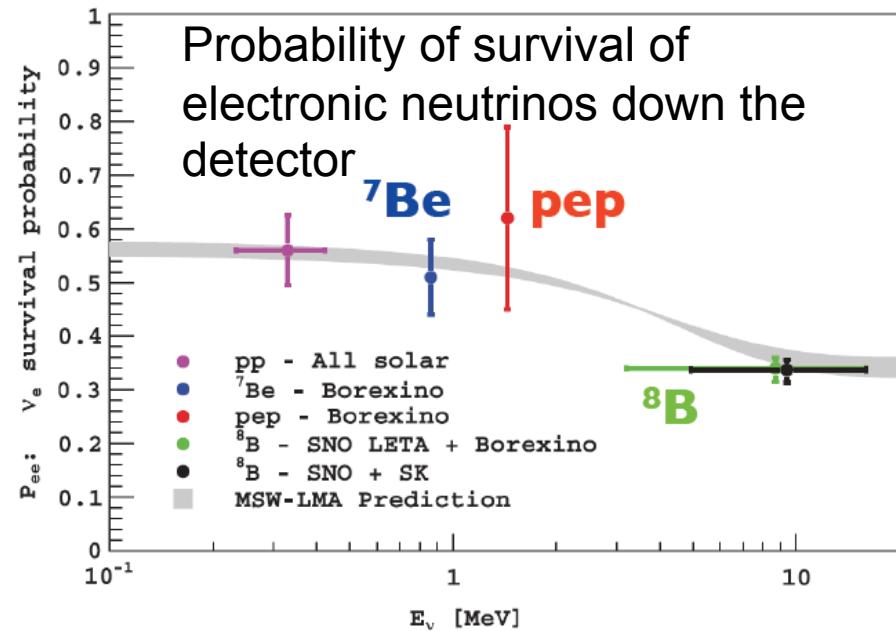
ρ_c SSM 150.06 g/cm^3

X_c seismic model 0.339

Y_{initial} 0.277

Y_{surf} 0.251

1.5% difference in central temperature =>
no more than 5- 6% difference
in luminosity $L_{\text{nuc}} > L_{\text{sol}}$



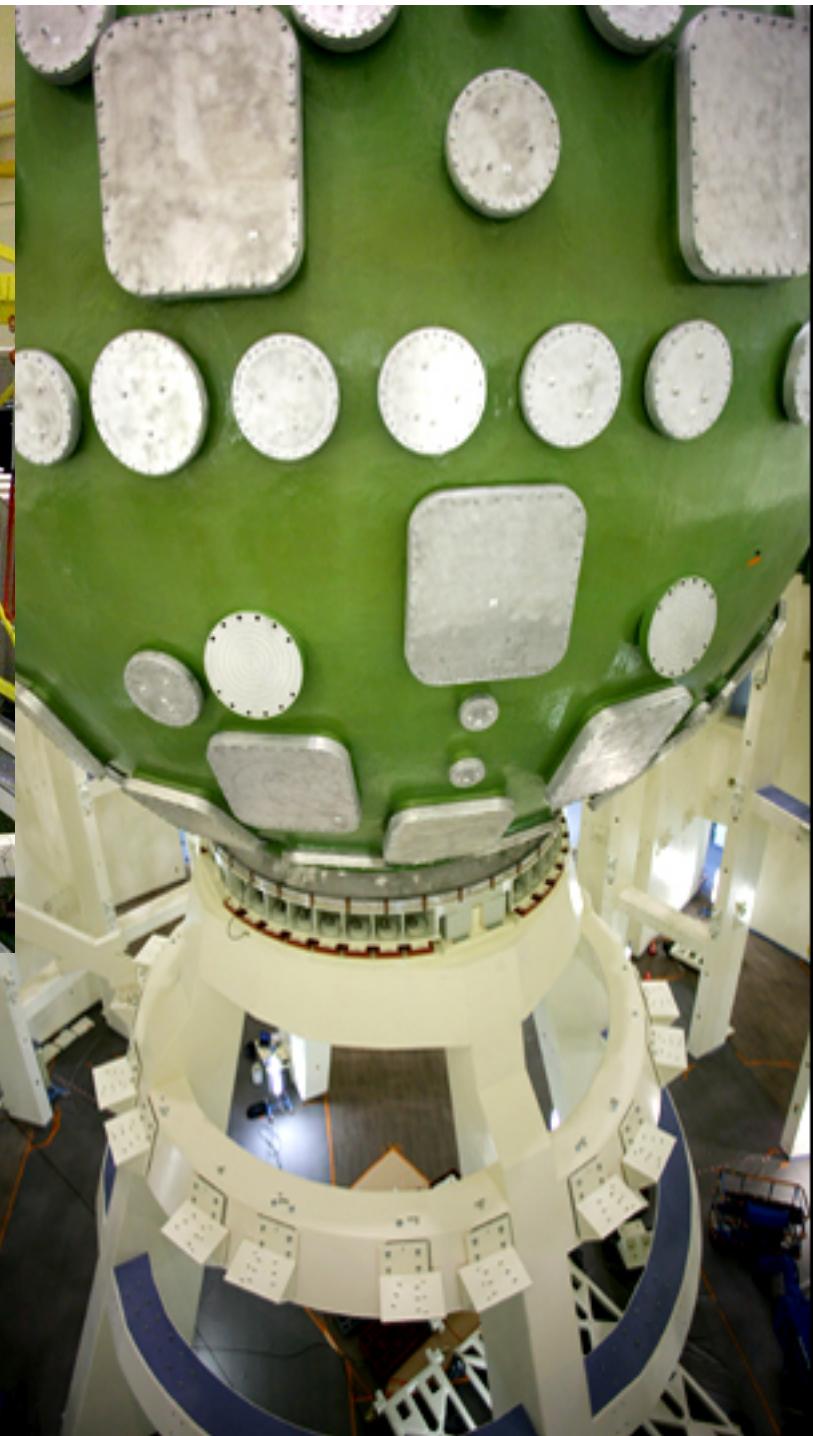
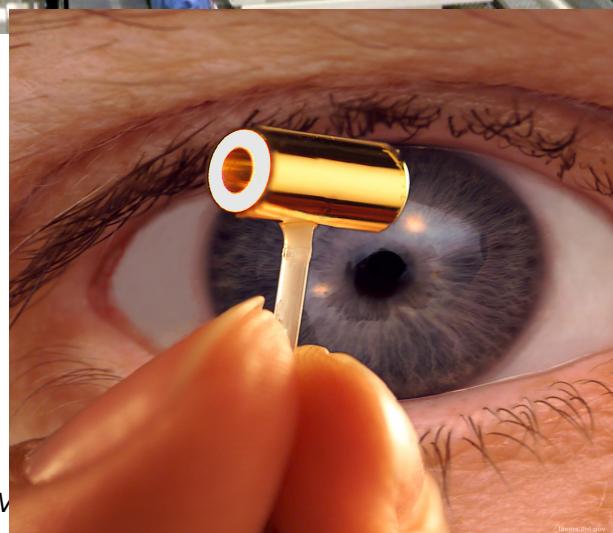
Energie cinétique, magnétique, mouvements méridionaux ...

Core CNO composition could be obtained by N15 and O15 neutrino fluxes
Spectroscopy of neutrinos could lead to an independent measurement of the electronic density profile



**Laser Mega Joule
+ PETAL vont
étudier la
possibilité de
fusion inertuelle
pour l'énergie du
futur**

Sylvaine Turck-Chièze, CEA Saclay, IRM

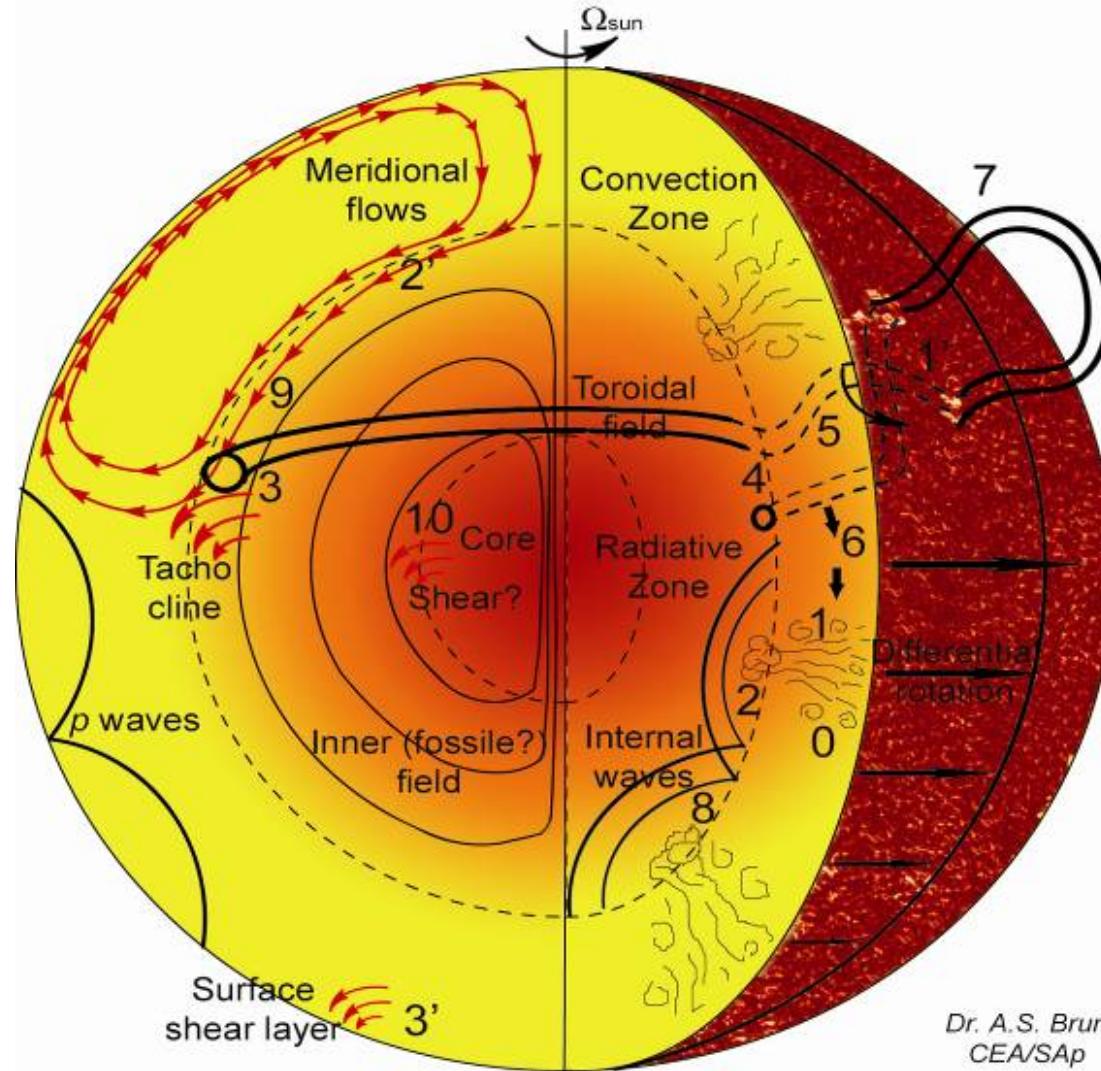


IV- Le soleil pour une vision dynamique de l'intérieur stellaire et de l' interaction soleil-terre

Objectif: Comprendre la rotation interne et l'origine du champ magnétique

Méthode: modes de gravité, suivi des cycles, toutes les mesures SoHO, SDO, PICARD, corrélation activité solaire- volcans

NOUVELLE VISION DYNAMIQUE DE L'INTERIEUR DU SOLEIL



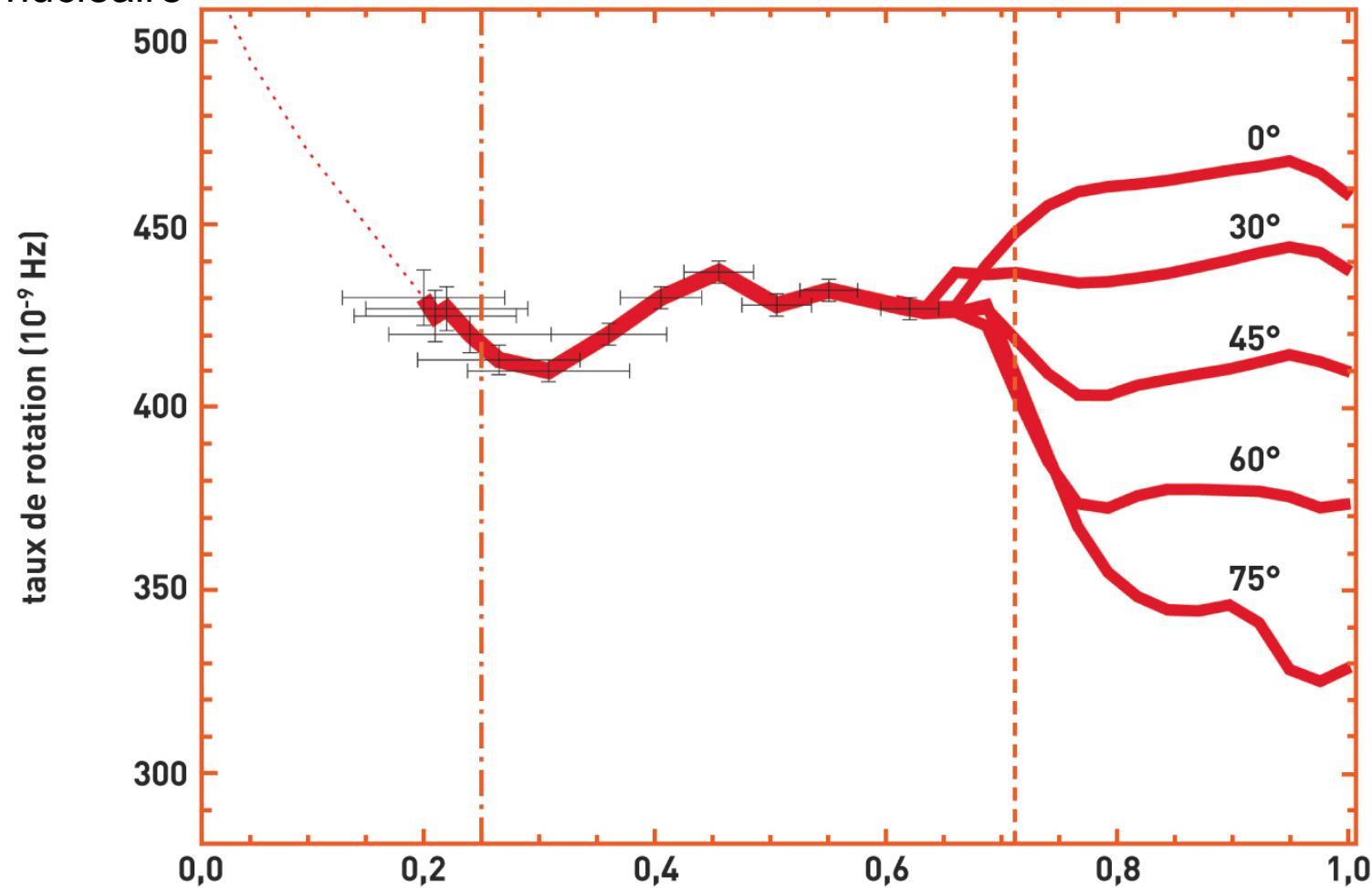
Aller vers de plus petites échelles temporelles:

milliers d'années, centaines d'années, années

Introduire les phénomènes dynamiques

MESURES SISMIQUES DE LA ROTATION INTERNE

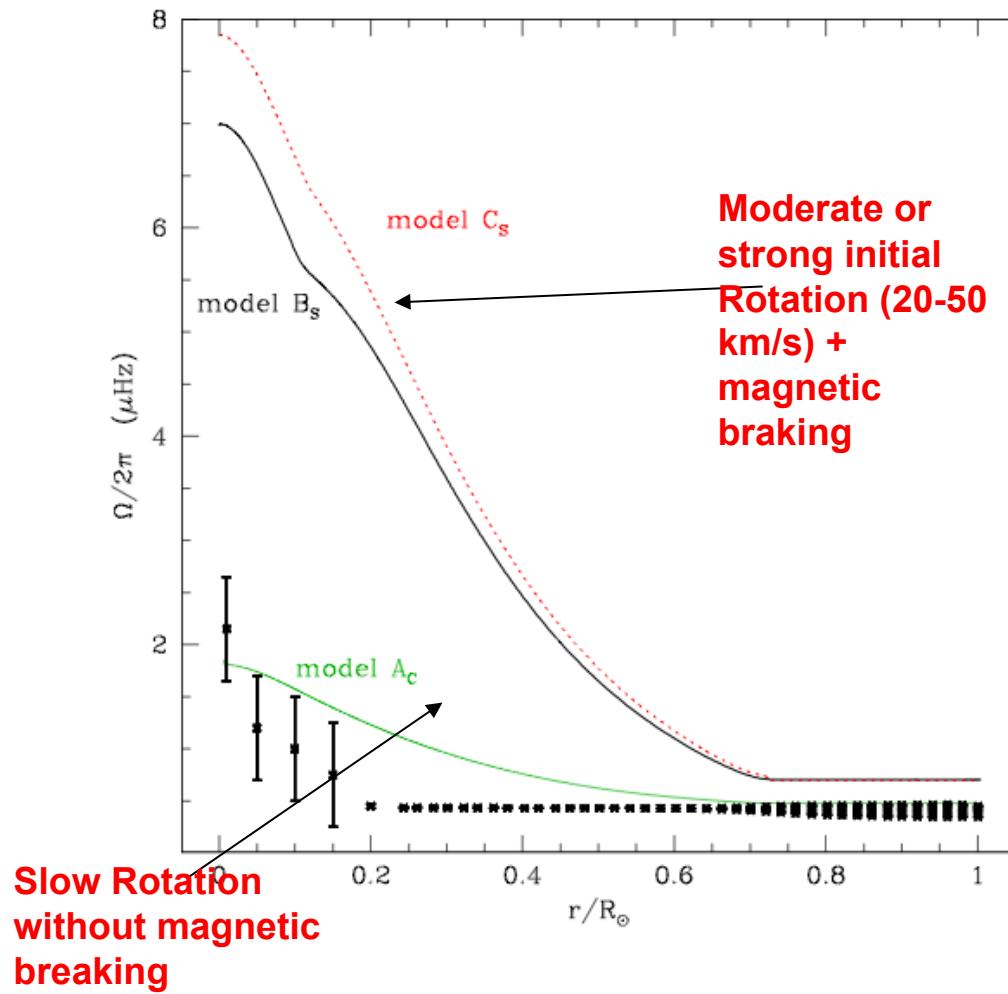
Seuls les modes de gravité permettent d'approcher la rotation du cœur nucléaire



Couvidat, Turck-Chieze, Garcia 2003,
Garcia et al 2007, Turck-Chièze et al. 2013 | rayon/rayon solaire

DYNAMICS OF THE SOLAR CORE

Turck-Chièze, Palacios, Marques, Nghiem,
ApJ 2010

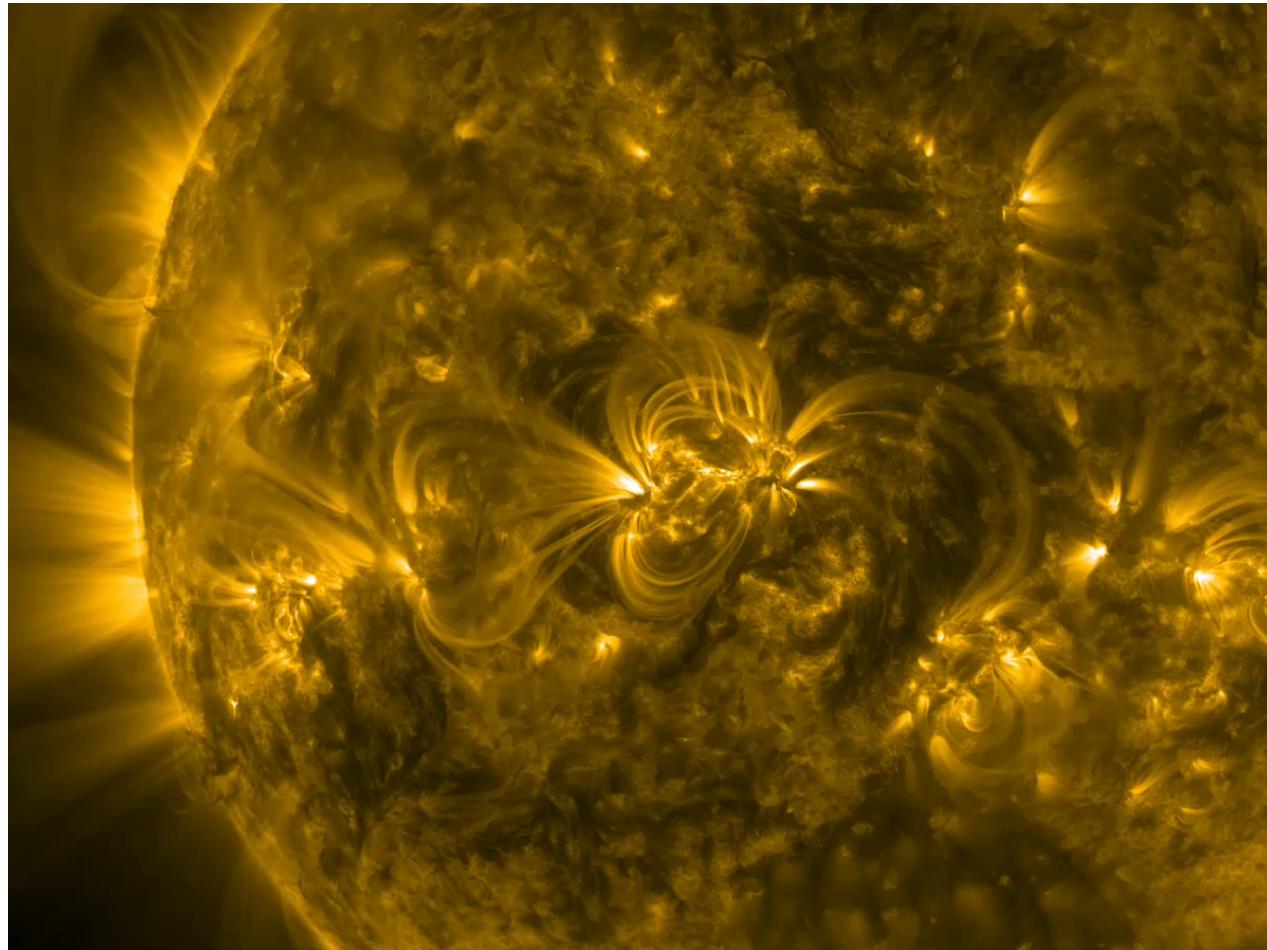


The radial differential rotation exists in all models and exists also in the Sun thanks to the detection of the asymptotic gravity modes.

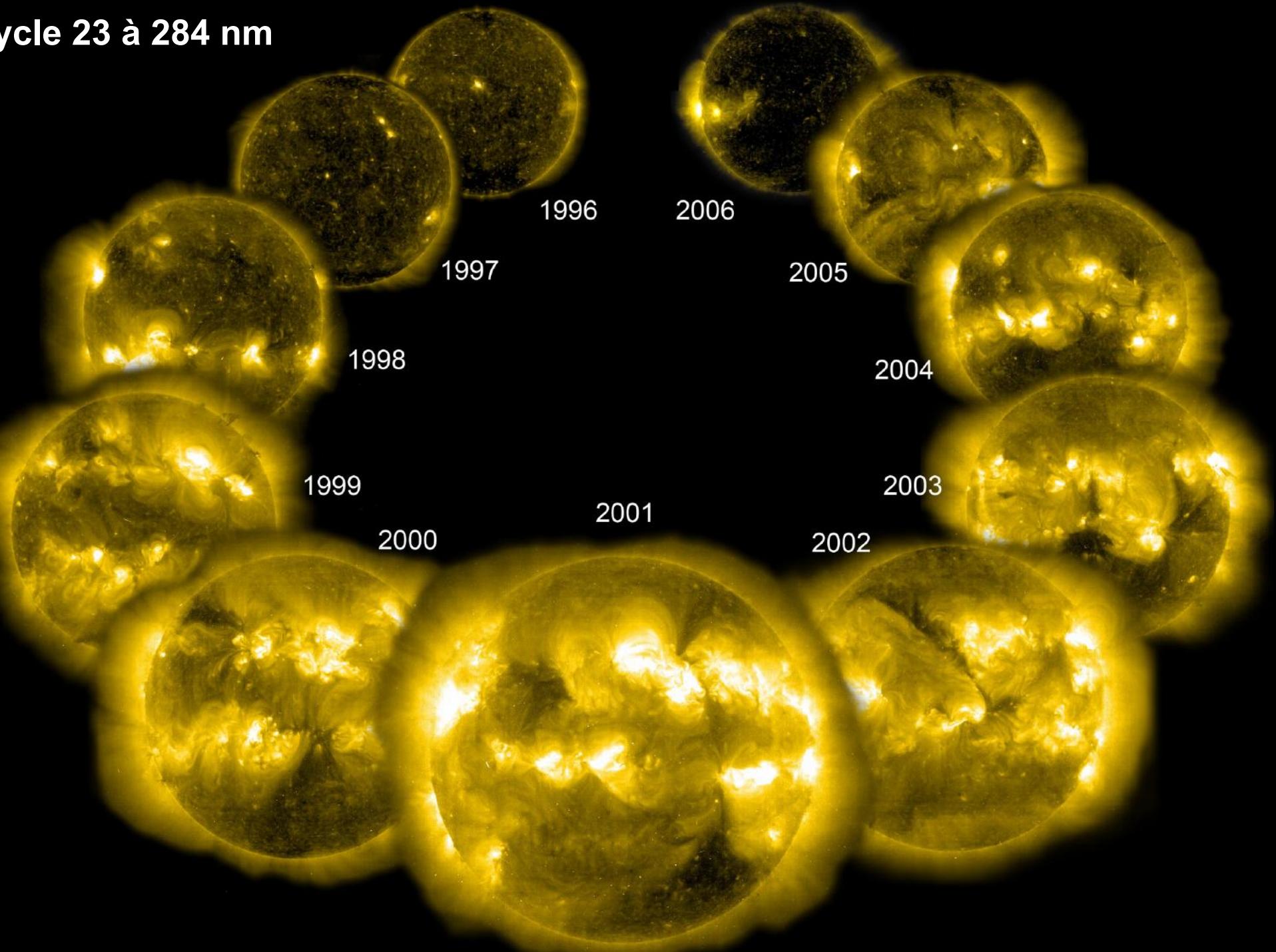
The increase in the core is built during the contraction phase and then slightly evolved

One needs certainly magnetic field to flatten the profile outside of the core (Eggenberger et al. 2007)

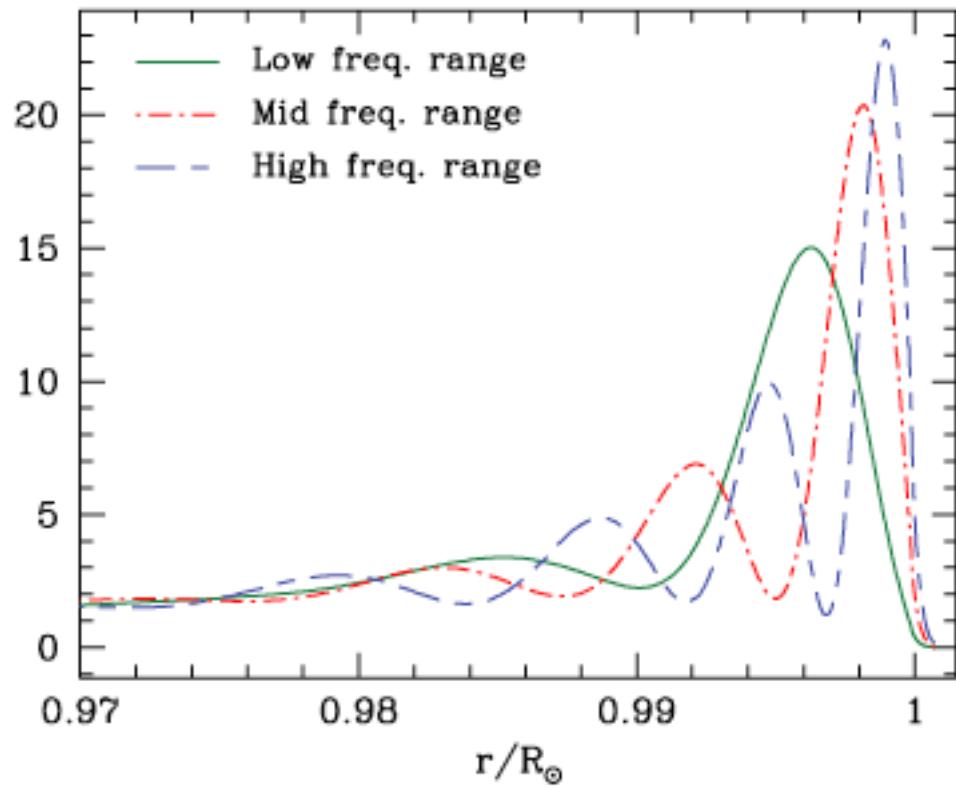
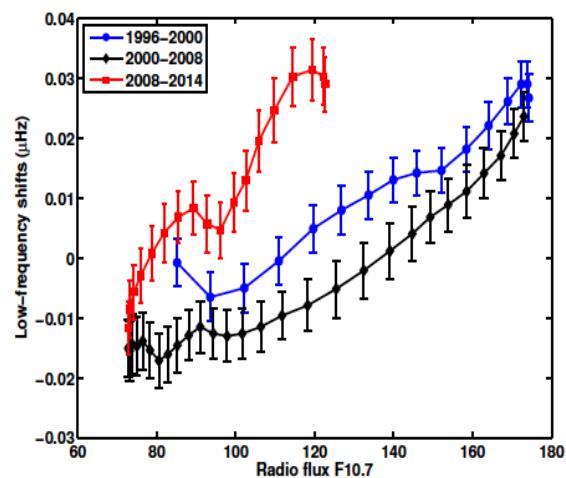
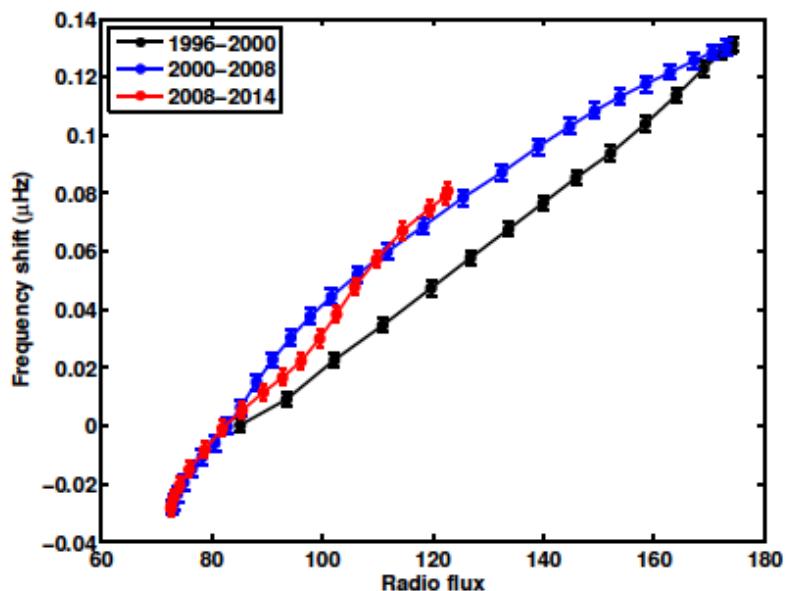
AIA ON SDO AT 197 NM IN JANUARY 2015



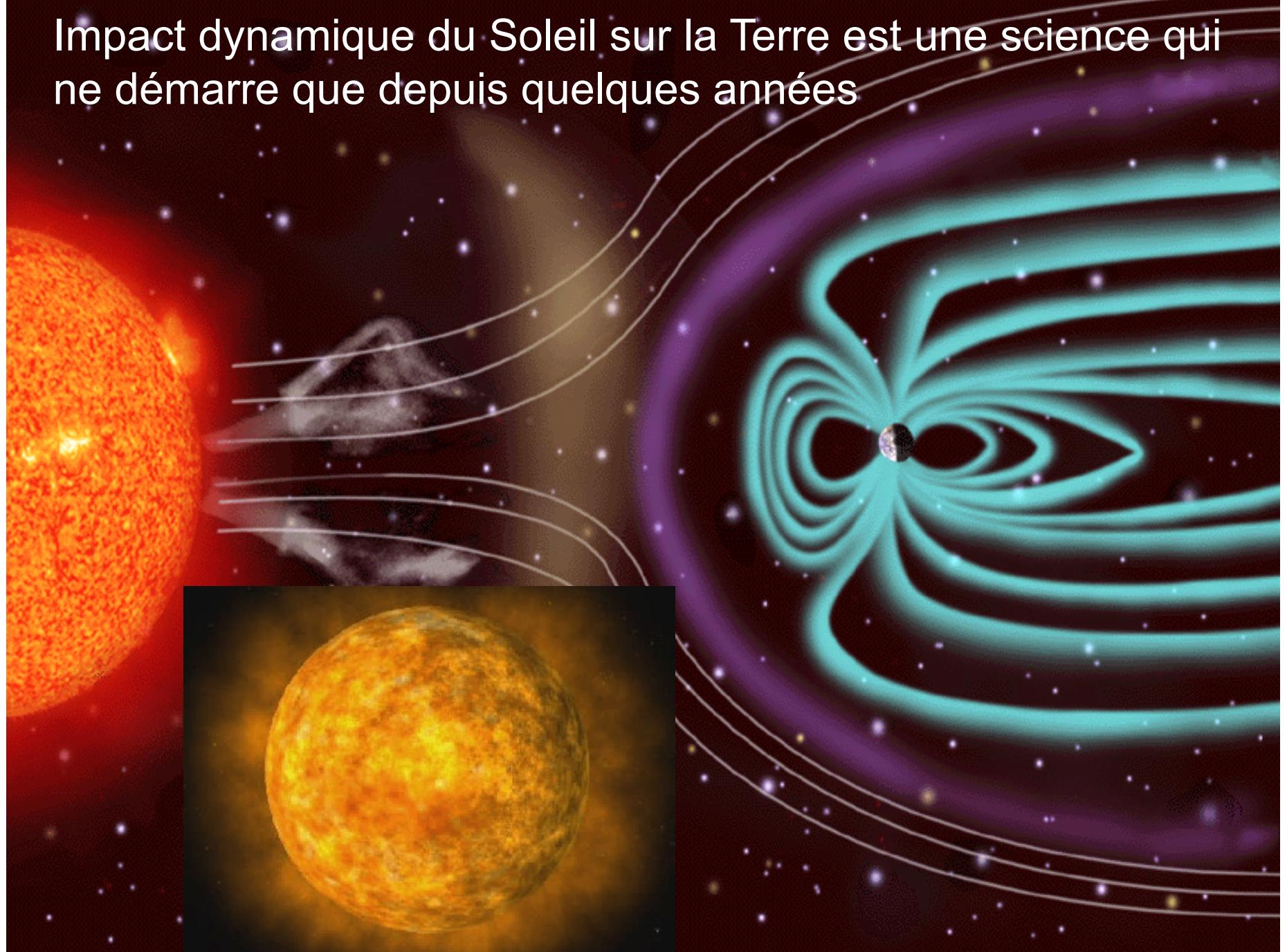
Cycle 23 à 284 nm



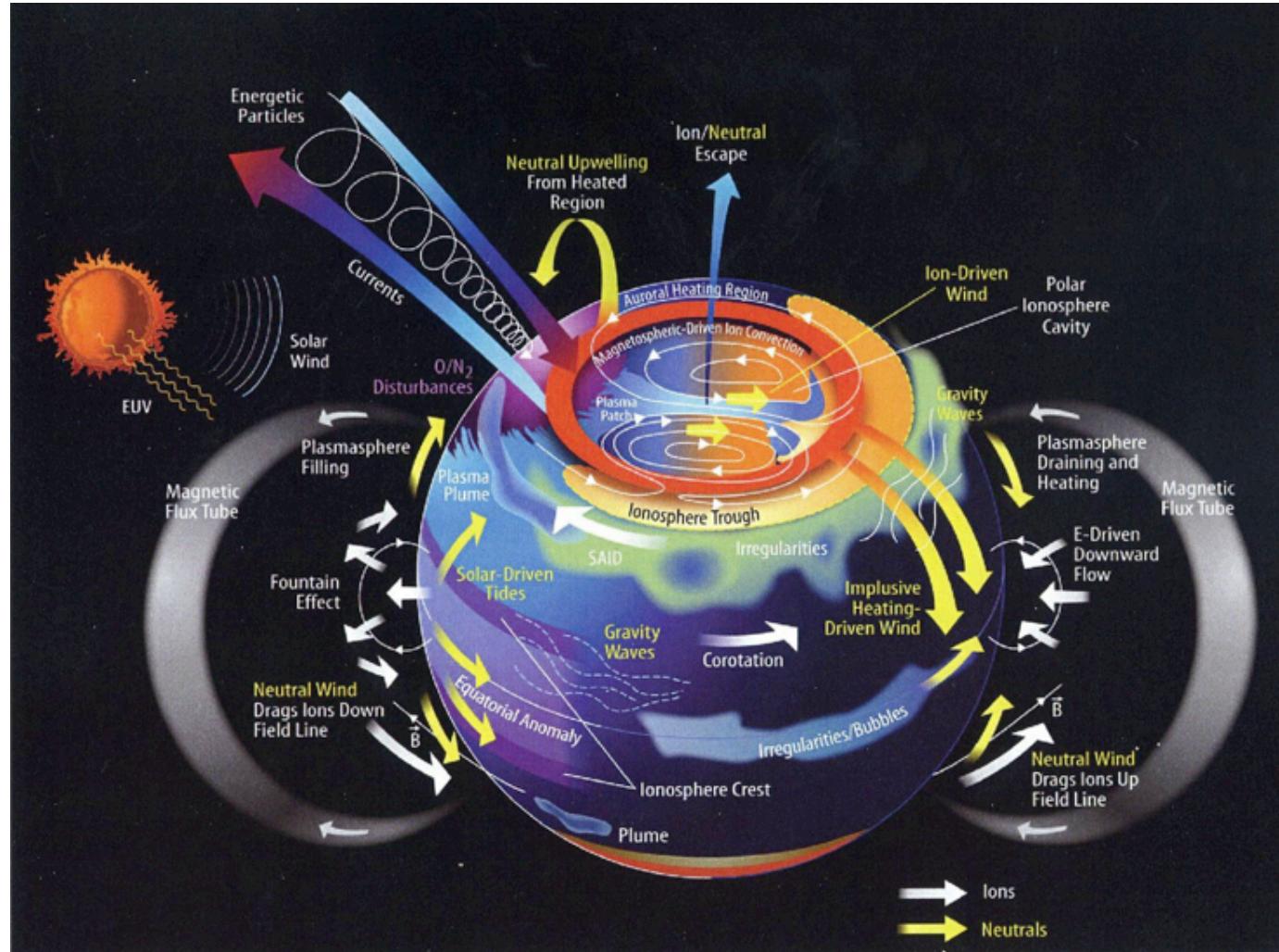
Change of Magnetic hysteresis between cycles



Impact dynamique du Soleil sur la Terre est une science qui ne démarre que depuis quelques années

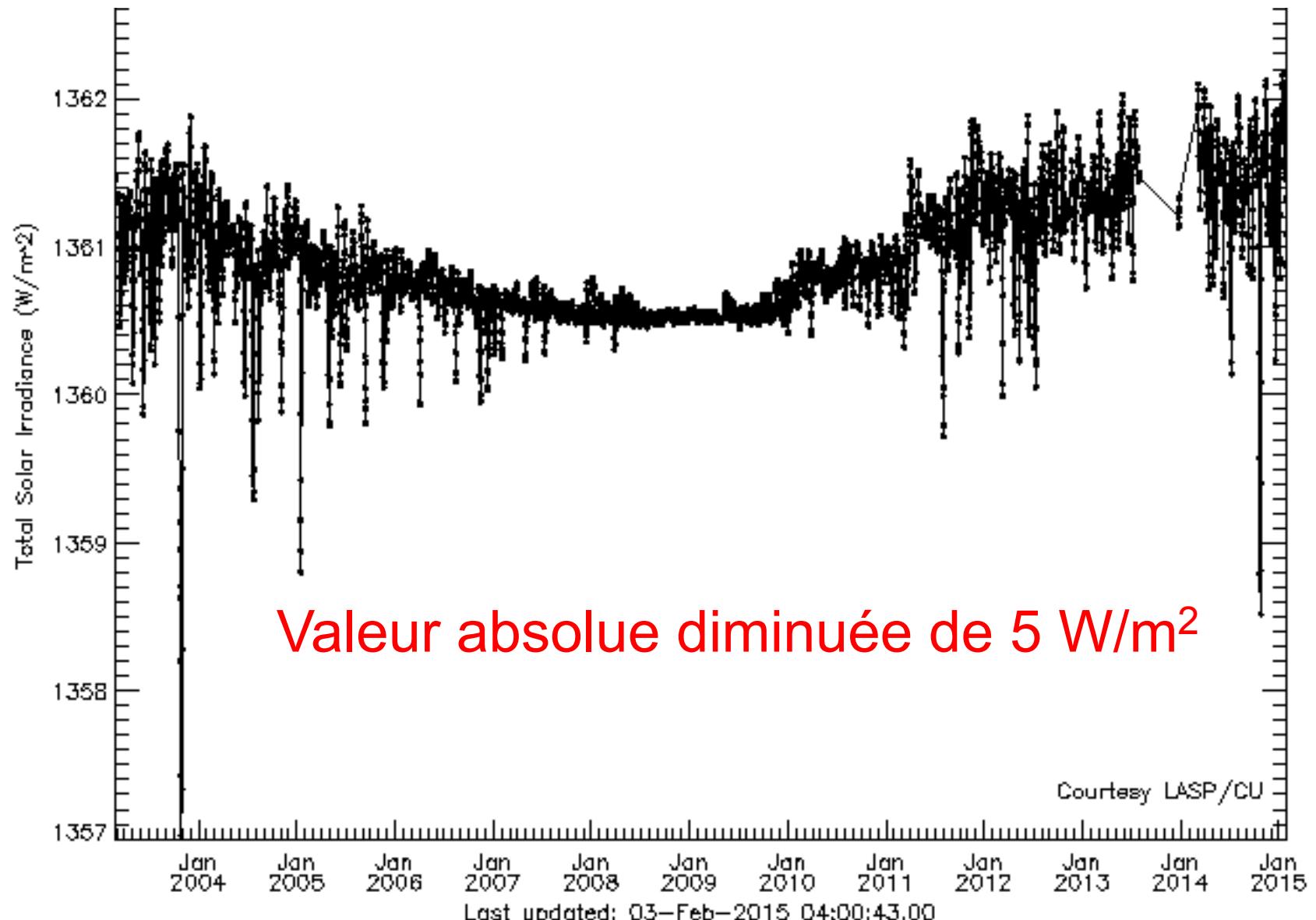


MÉTÉOROLOGIE SOLAIRE ET CLIMATOLOGIE SOLAIRE

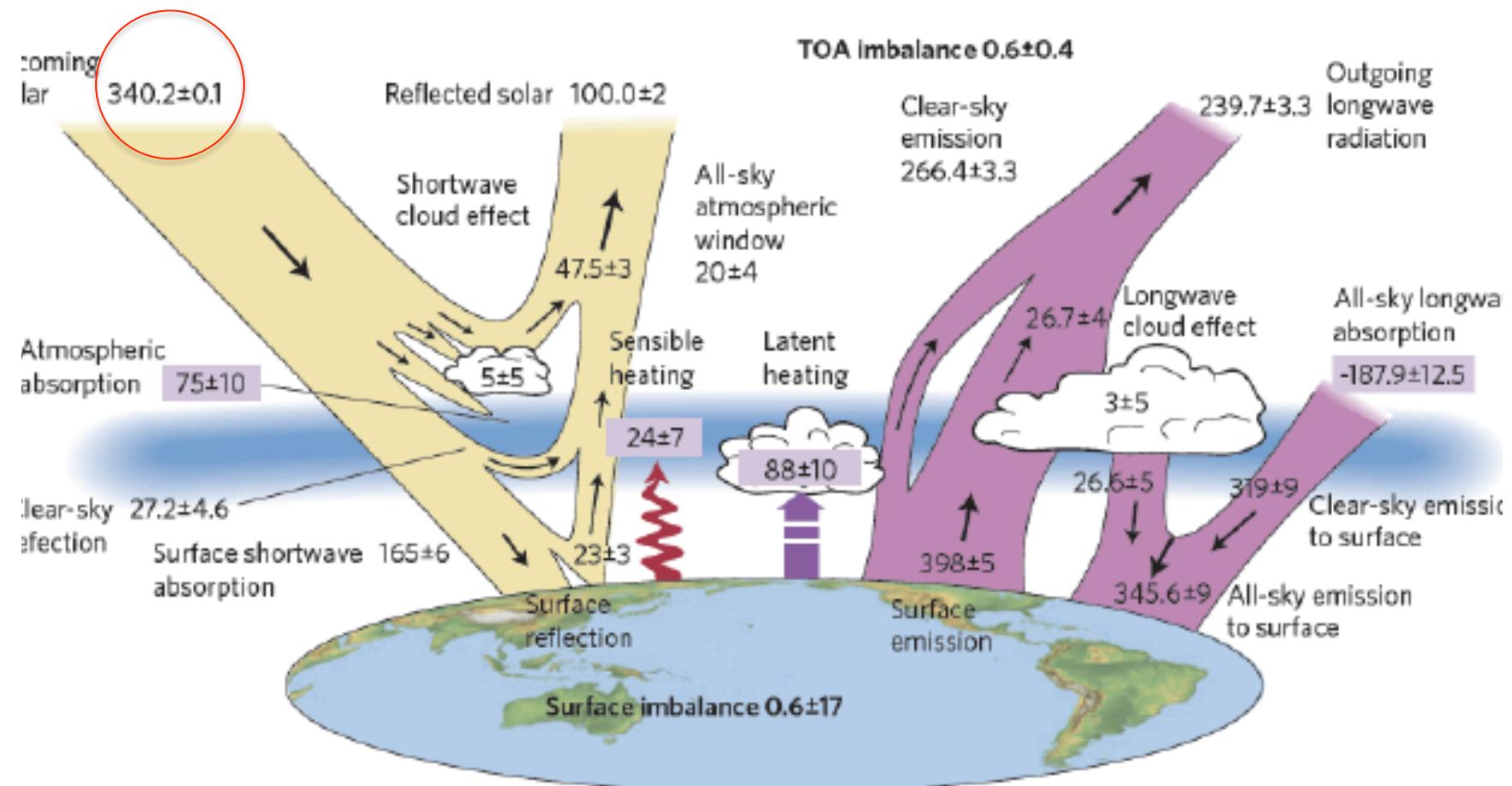


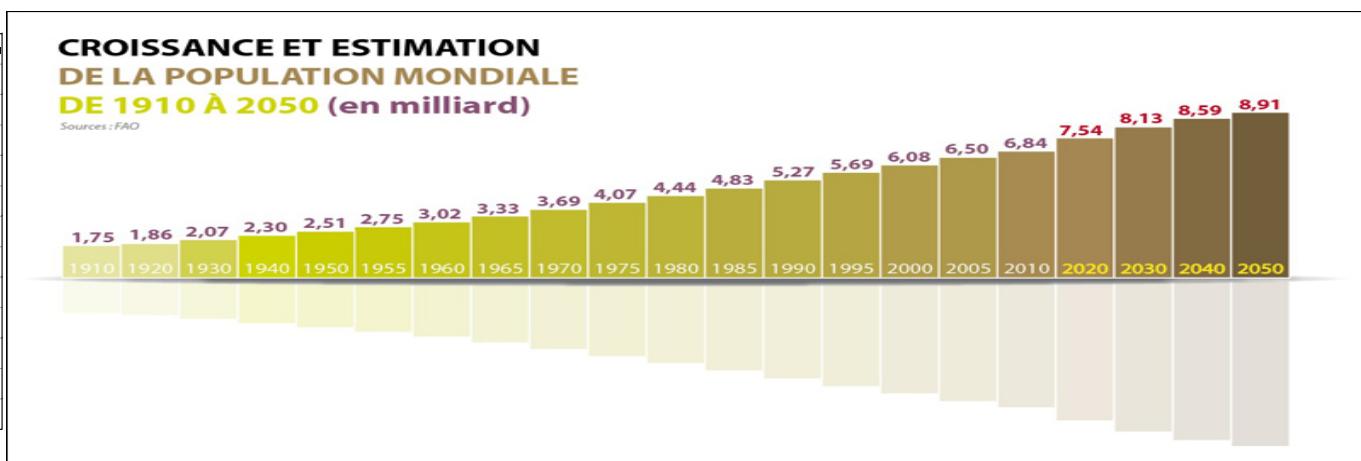
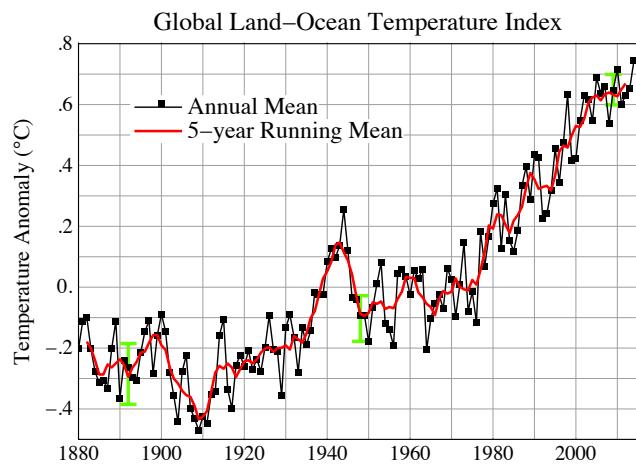
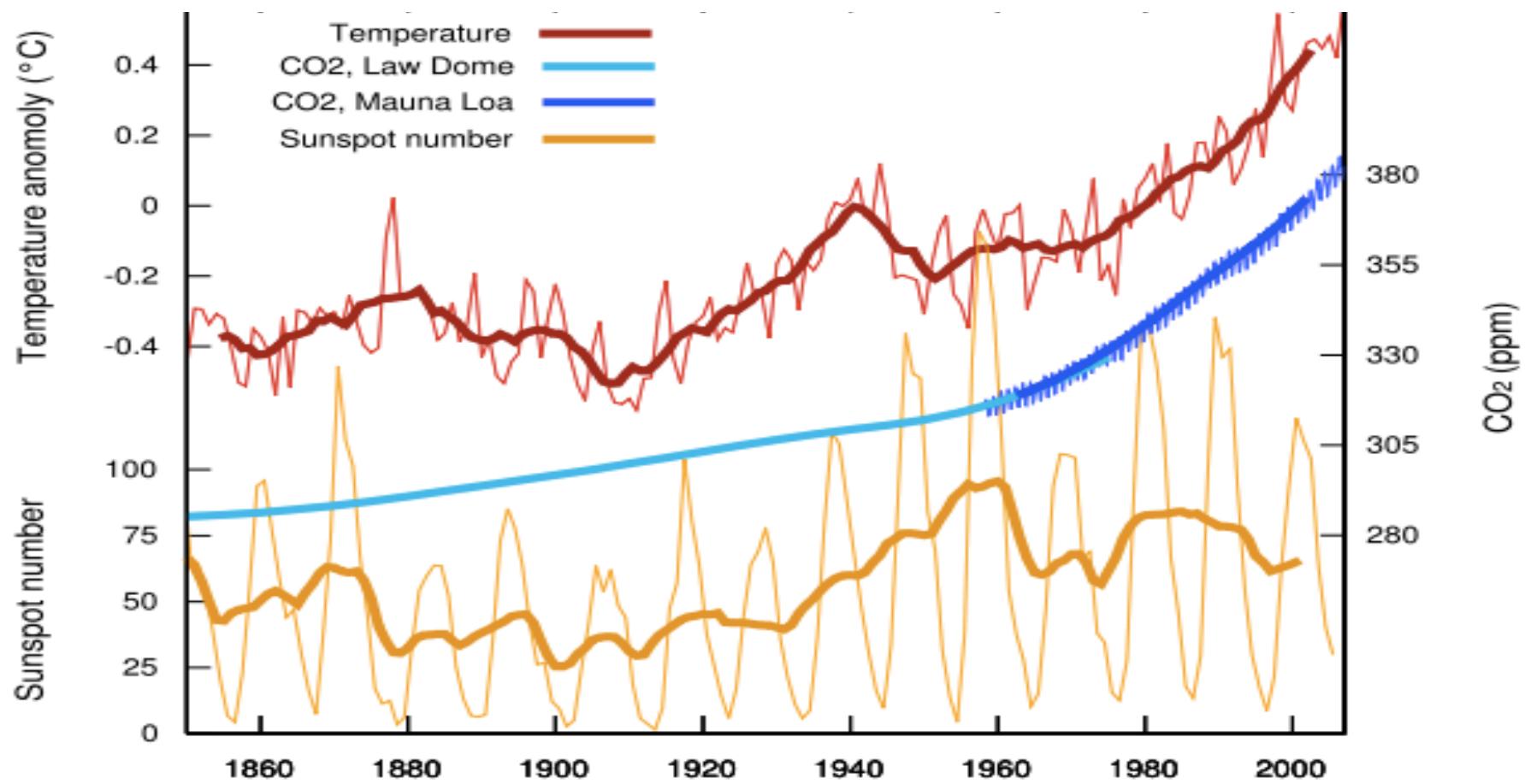
Ces études scientifiques ne s'opposent pas au problème de l'impact de la pollution humaine sur le climat de la Terre

EVOLUTION DE L'IRRADIANCE TOTALE

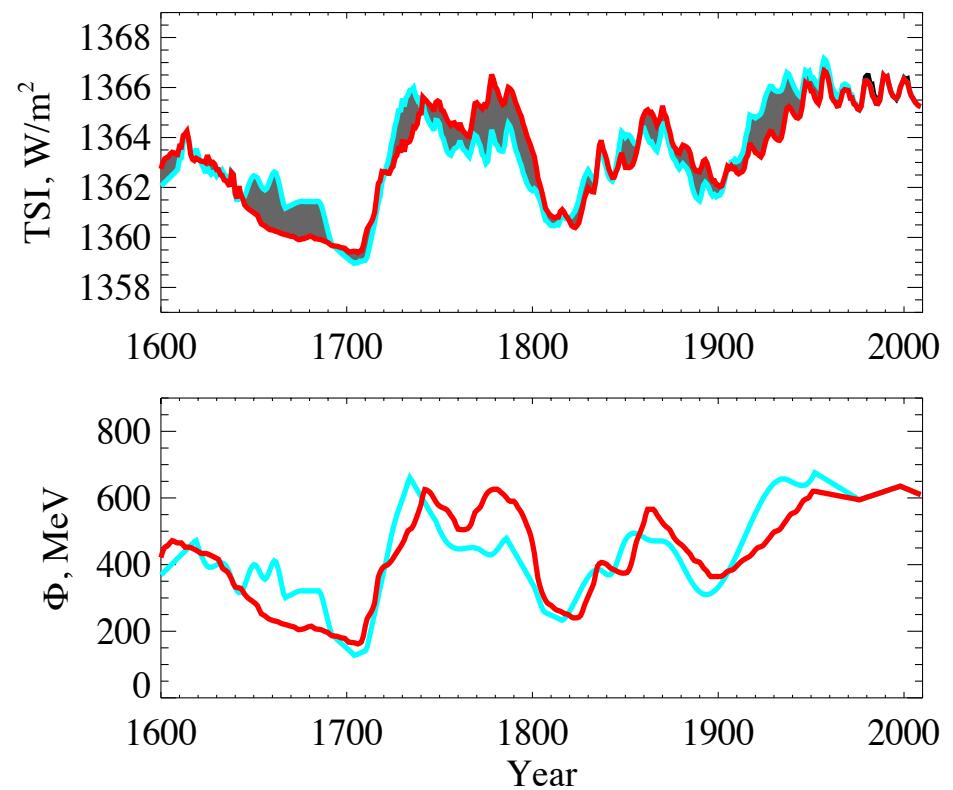
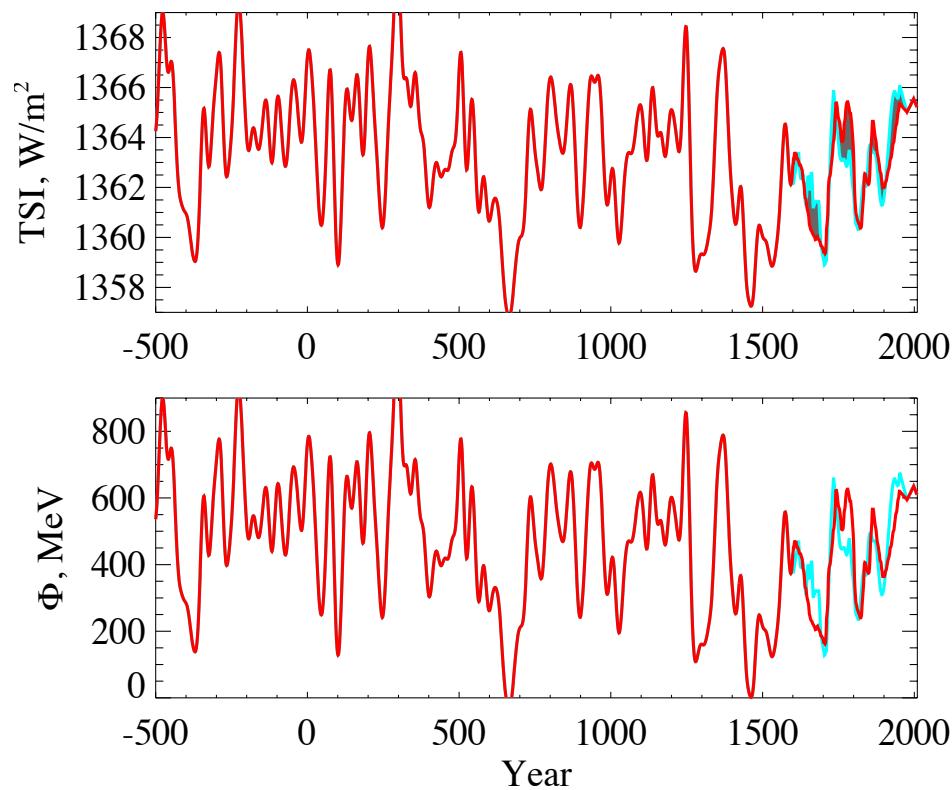


Bilan radiatif

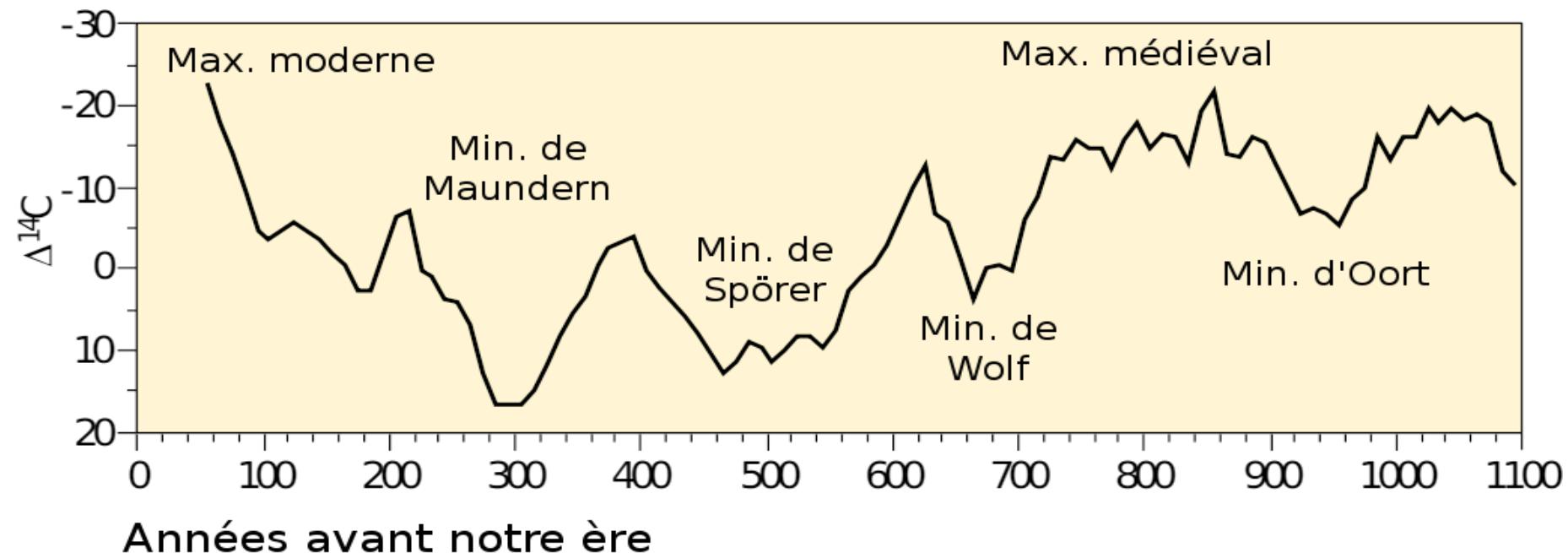
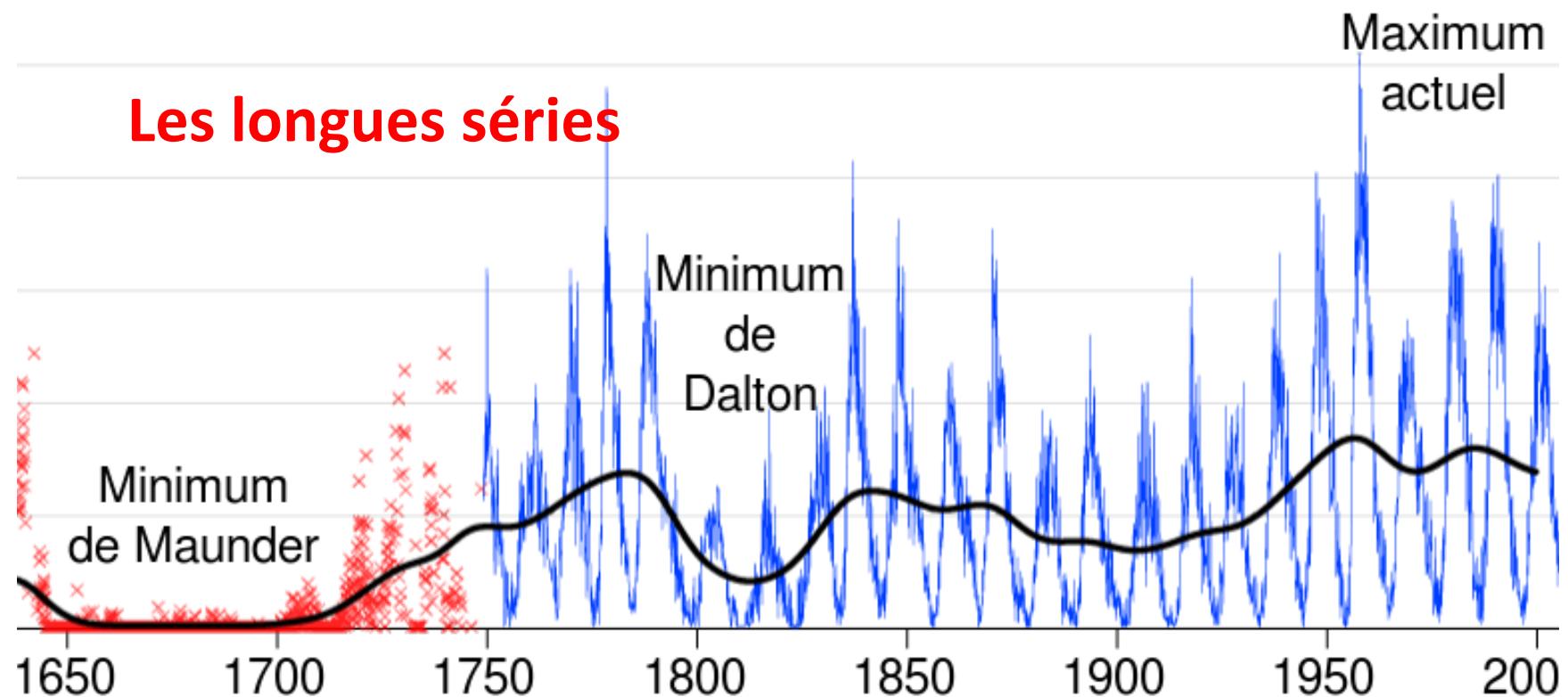




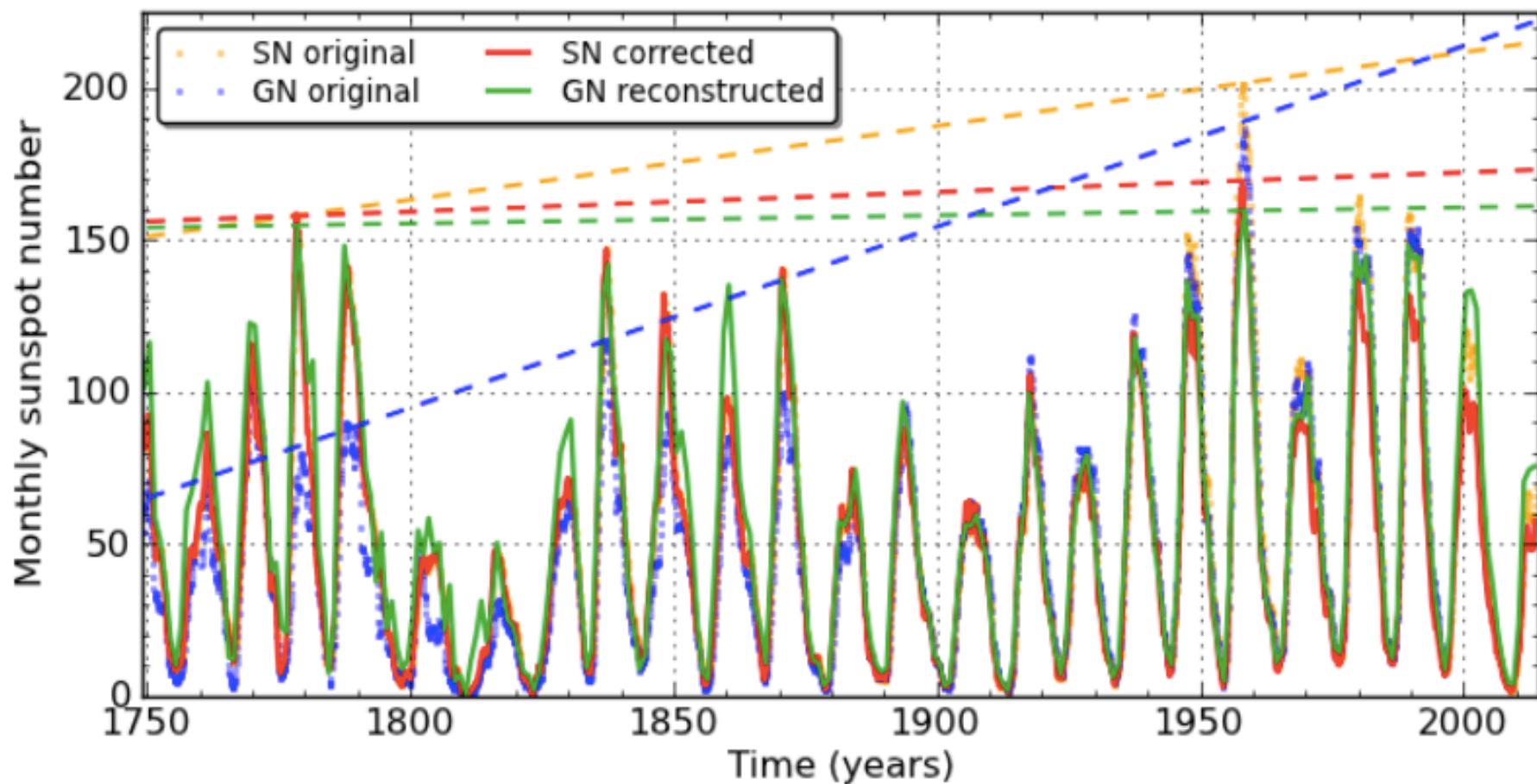
REMONTER A LA VARIATION D'IRRADIANCE

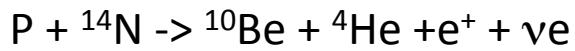


Les longues séries



Clette et al. 2014 reconstruction

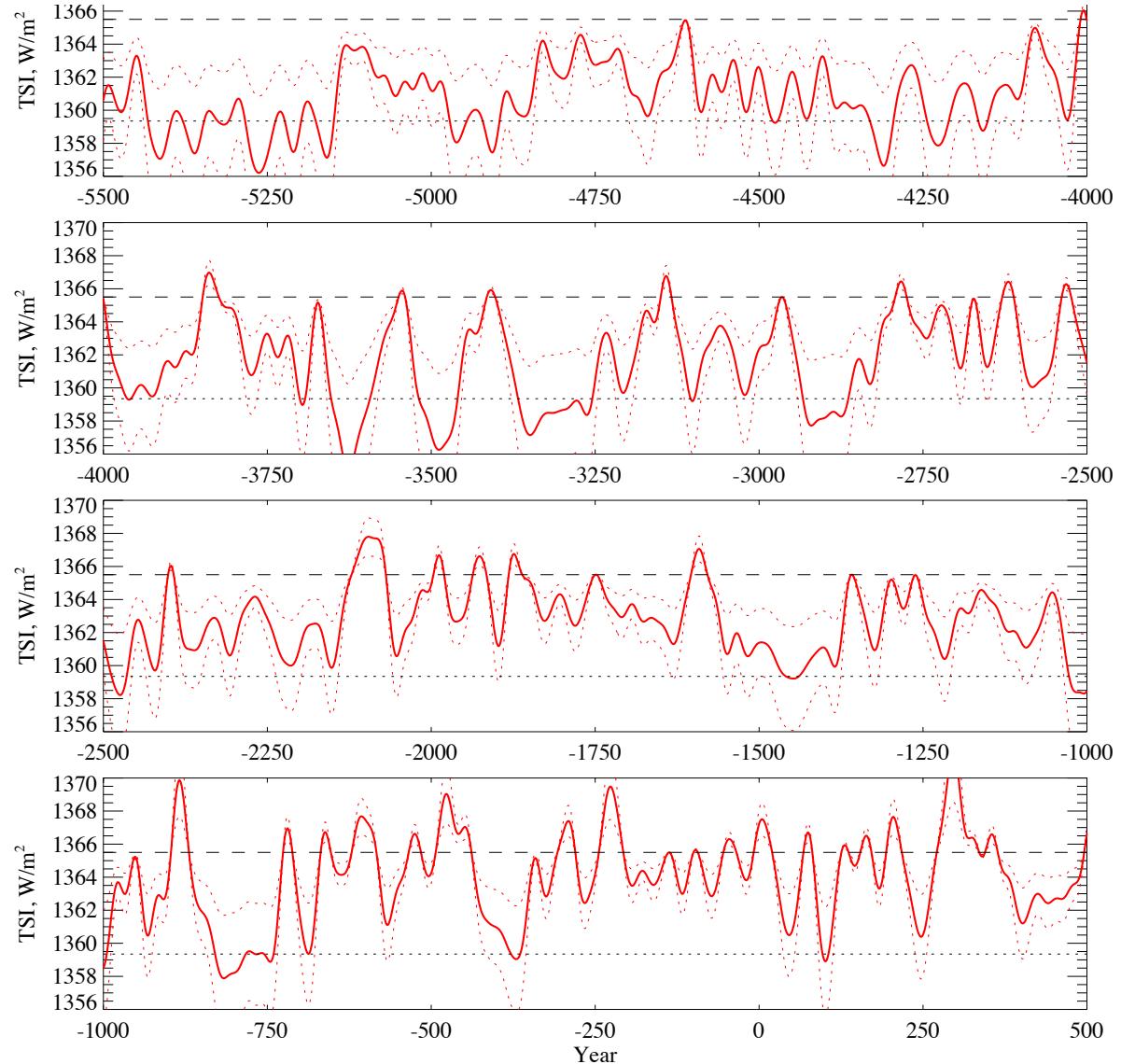




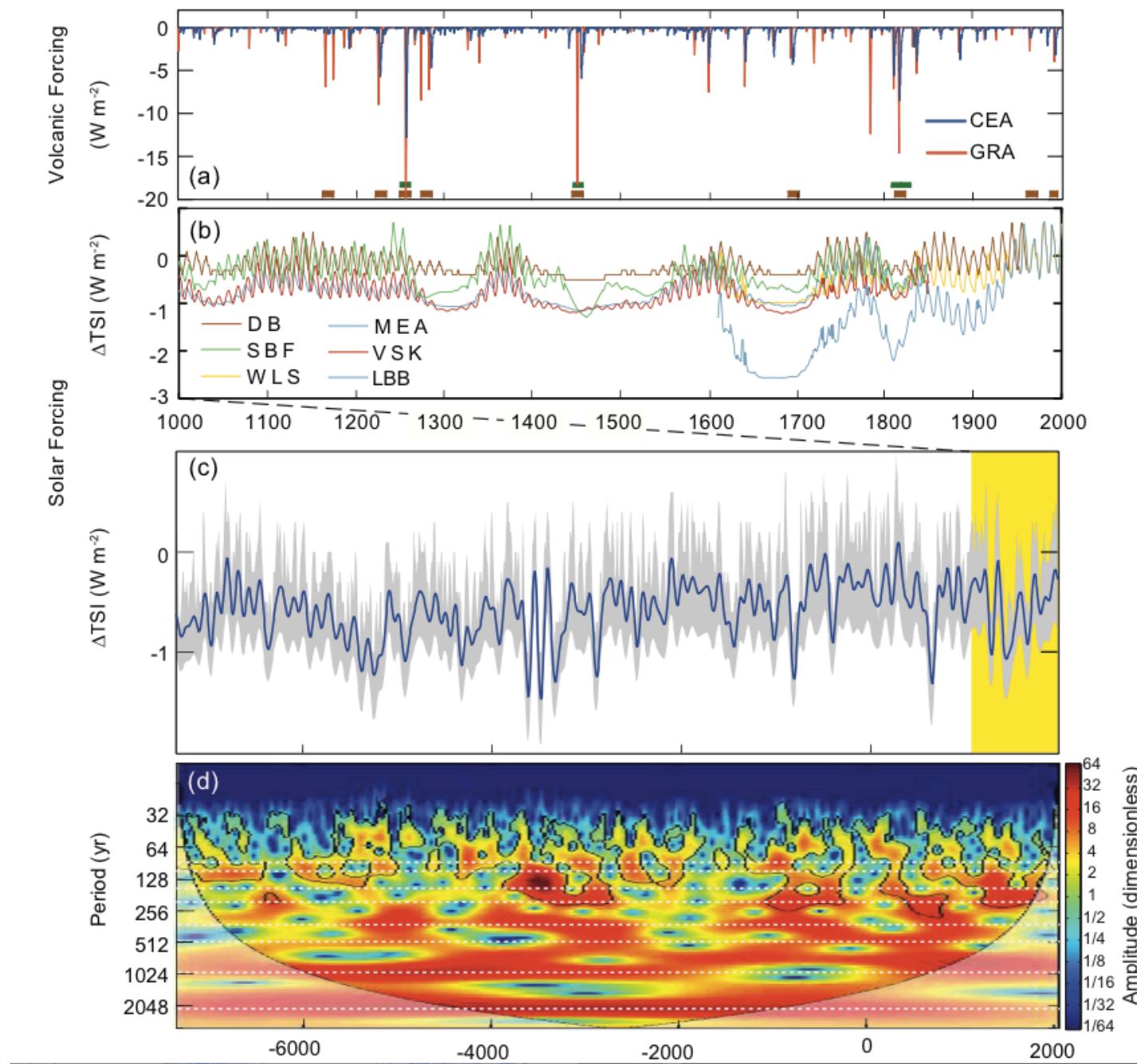
Calotte
glaciaire
de l'Antartique

${}^{14}C$ dans les arbres
dendochronologie

Remonter le temps avec la mesure des rayons cosmiques



GIEC 2013



Questions ouvertes

-Produit on plus d'énergie au centre du Soleil qu'il ne s'en échappe à l'extérieur ?

-Réponse: neutrinos

-Conséquences: maîtriser le magnétisme interne et son émergence

-Confirmera t'on la détection des modes de gravité ?

-Progressera t'on sur le magnétisme interne solaire

-Réponse: SoHO

-Conséquences: plus de cycles? Magnétisme interne

-Impact sur l'interaction Soleil-Terre: magnétisme solaire – Volcans

-Autre système étoile-planètes

Impact du Soleil sur le climat et l'activité humaine

Sismologie de plusieurs régions cruciales: sous surface et tachocline: METEOSPACE, GOLD (successeur de GOLF), Vol en formation (DynaMICCS) ...

Le Soleil reste une source d'inspiration, nous ne pouvons le négliger ...

La fusion reste un enjeu colossal et difficile