

La physique solaire

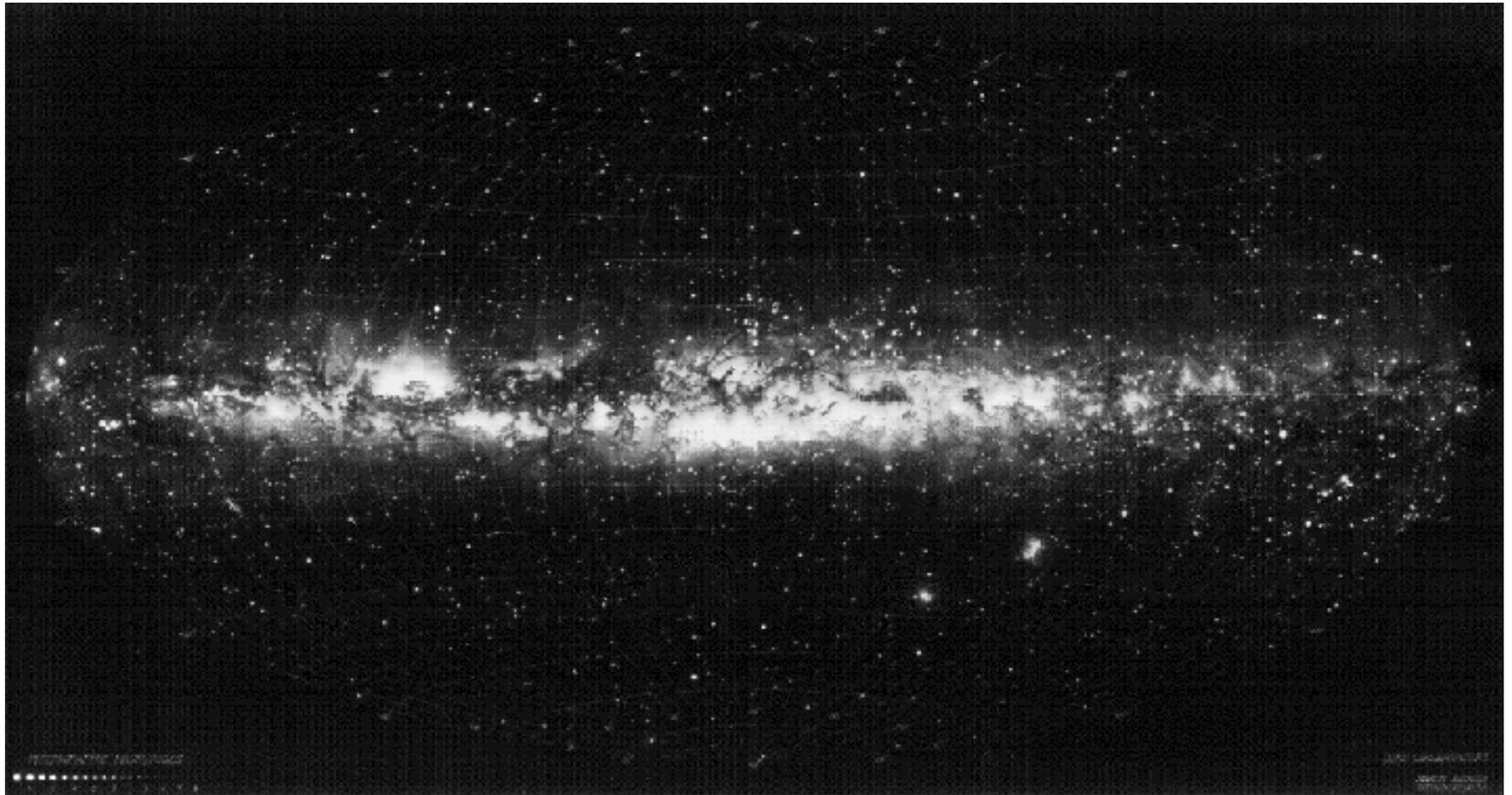
Jean-Claude Vial

Institut d'Astrophysique Spatiale

- **I. Le Soleil, une étoile**
- **II. Le Soleil, sa structure interne**
- **III. L'héliosismologie et l'énigme des neutrinos**
- **IV. Le Soleil, étoile magnétique**
- **V. Le Soleil et la Terre**

I. Le Soleil, une étoile dans notre Galaxie

La Voie lactée vue en lumière visible



I. Le Soleil, une étoile dans notre Galaxie

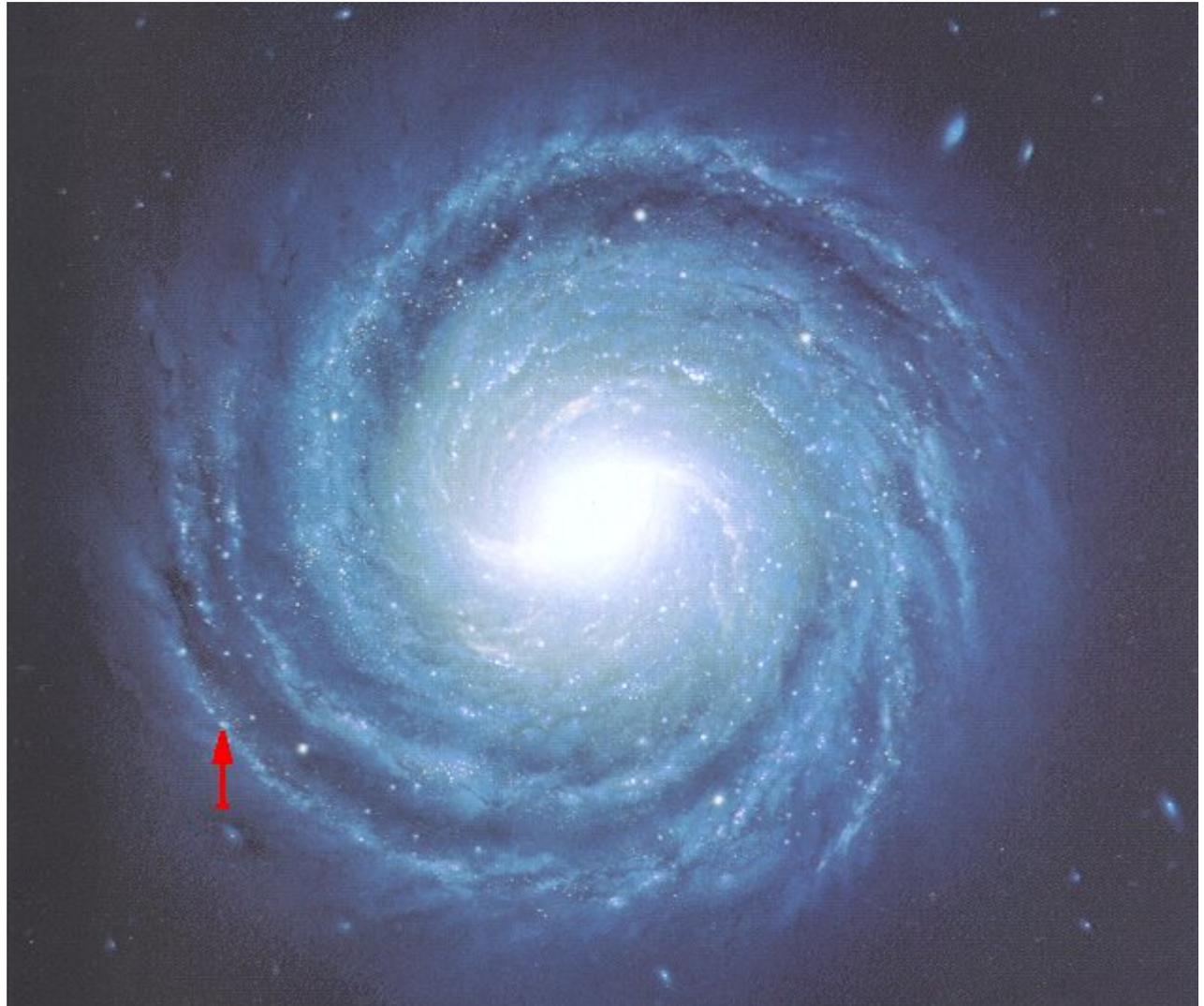
Une étoile parmi les quelques 100 milliards d'étoiles de la Galaxie

Position du Soleil : $> 25\,000$ années-lumière du Centre

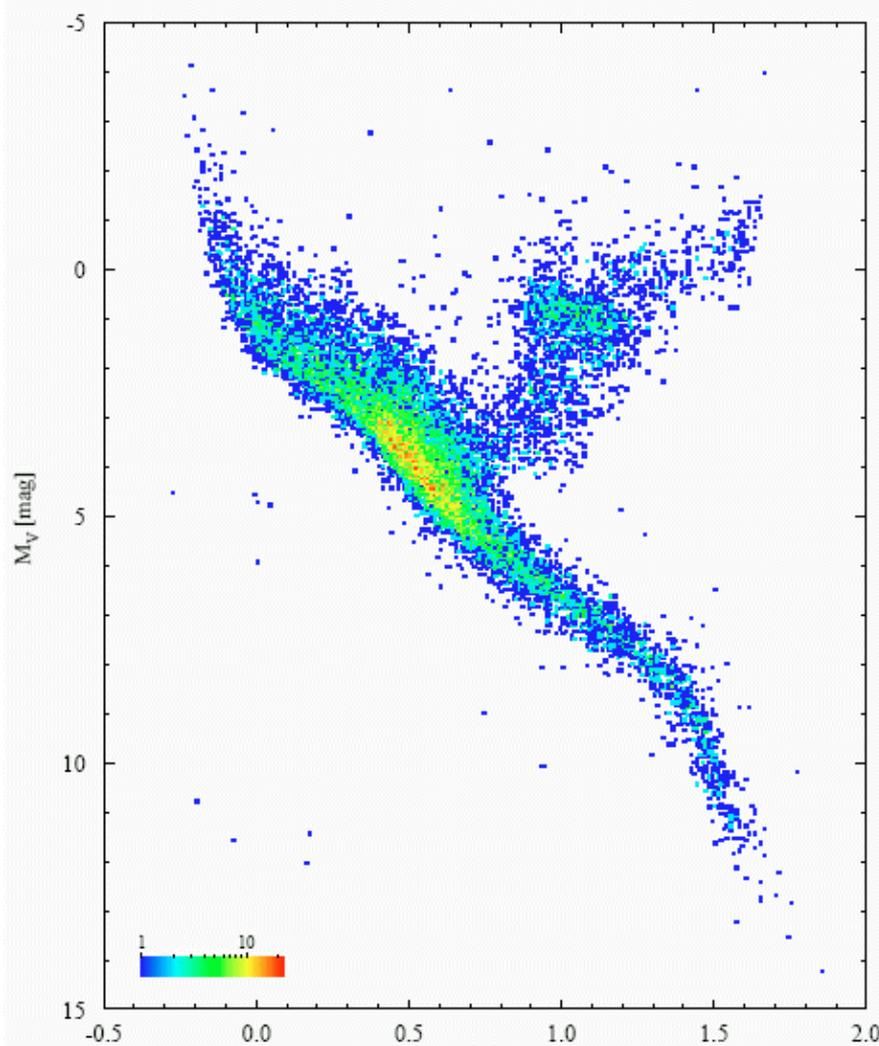


I. Le Soleil, une étoile dans notre Galaxie

- 1 tour :
200 millions
d'années
- $V = 250$
km/s



Hipparcos



Classification
spectrale

O B A F G K M

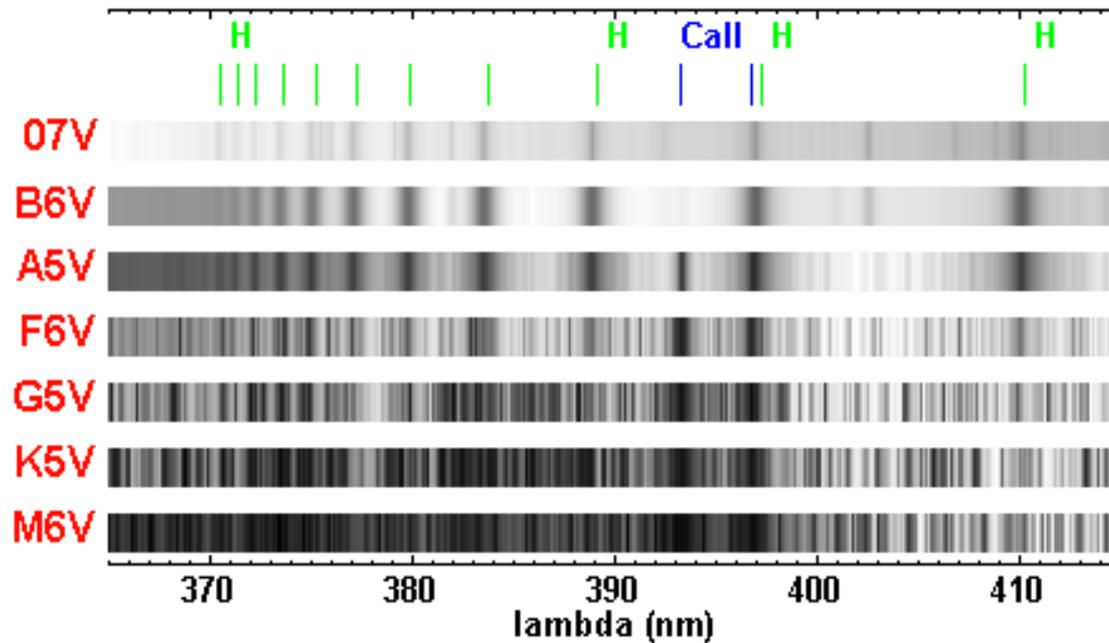
Bleues Blanches Jaunes Rouges

**Rigel
Vega, Sirius**

Soleil

**Bételgeuse
Antarès**

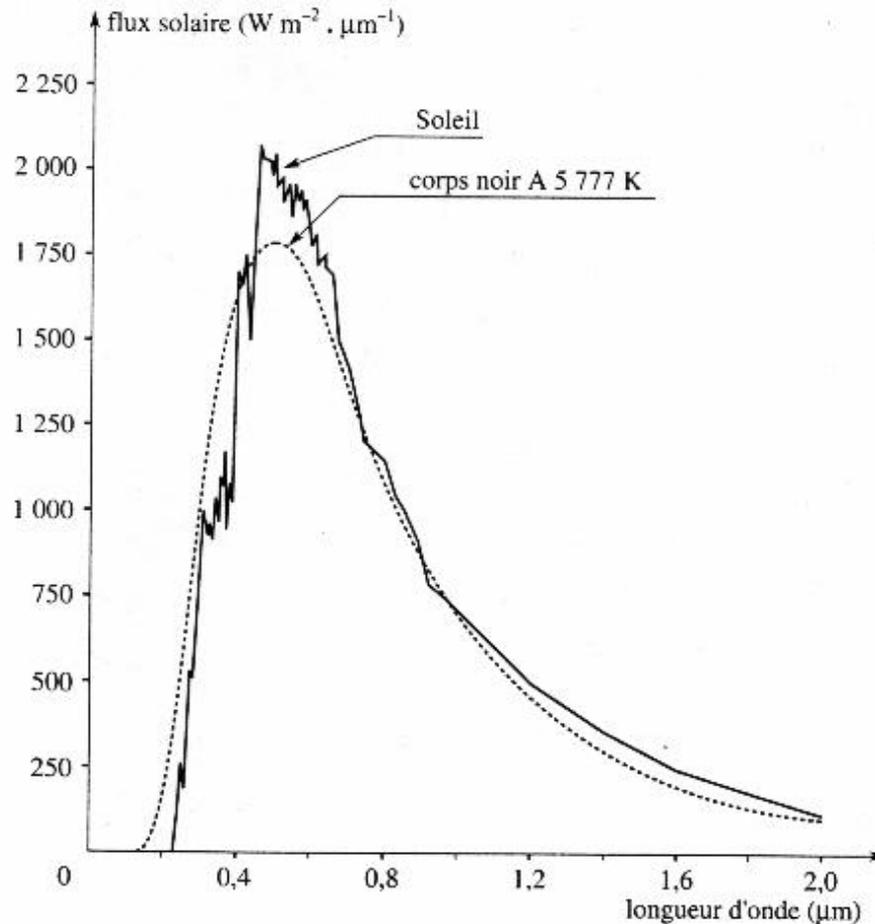
- Spectres très différents des étoiles de type :
- **O B A F G K M**
- Présence de :
- **He+ He H H Métaux Métaux Molécules**
- **ionisés neutres**
- **(Ca II)**
- **"T" 35 000 K -----> 2500 K**



Le spectre solaire

- Soleil : Source de lumière
 - 1370 W / m² reçus à la Terre (hors atmosphère) (1/4 en moyenne)

- UV, X, ..
- IR, Radio



La loi de Planck et la température de couleur

- Corps Noir :

$$I(\nu) = \frac{2h\nu^3}{c^2} \left(\frac{1}{\exp\left(\frac{h\nu}{kT}\right) - 1} \right)$$

- λ_m où I est max ?

$$I(\lambda) = \frac{2hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{\exp\left(\frac{hc}{\lambda kT}\right) - 1} \quad \lambda_m = \frac{hc}{5kT} = \frac{2.8810^{-3}}{T} (m)$$

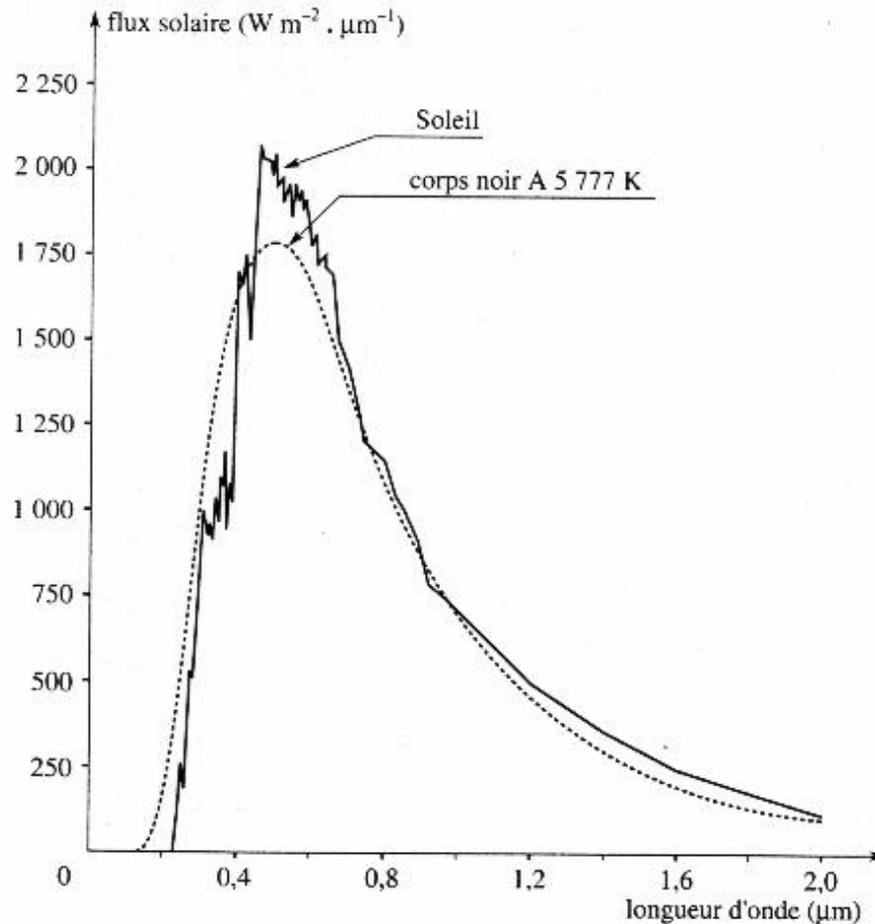
- Soleil (couleur jaune-verte) : $\lambda_m = 4700 \text{ \AA} = 4.7 \cdot 10^{-7} \text{ m} \dots T_c = 6200^\circ \text{K}$

Cette "température de couleur" est la température des atomes émetteurs situés "à la surface" du Soleil.

Le spectre solaire

- Soleil : Source de lumière
 - 1370 W / m² reçus à la Terre (hors atmosphère) (1/4 en moyenne)

- UV, X, ..
- IR, Radio



La loi de Planck et la température effective

- Température effective = « température » de son rayonnement (corps noir équivalent)
- Loi de Stefan :

$$\int I(\lambda) d\lambda = \text{Constante} * T^4 = \frac{\sigma}{\pi} T^4$$

$$(\sigma = 5.67 \cdot 10^{-8} \text{ Js}^{-1} \text{ m}^{-2} \text{ K}^{-4})$$

- Puissance totale rayonnée par la surface S : $P = S \cdot \sigma \cdot T^4$
 - Soleil : 1400 W/m² à la Terre
- => Connaissant S et Terre-Soleil:
- $T_{\text{eff}} = 5780^\circ \text{ K}$
 - $T_c (6200^\circ \text{ K}) \neq T_{\text{eff}} (5780^\circ \text{ K})$!!!!!

Fiche d'identité du Soleil : quelques chiffres

- Age : 4,5 milliards d'années
- Rayon : 696 000 km (110 fois celui de la Terre)
- Masse $1,99 \cdot 10^{30}$ kg (330 000 fois celle de la Terre)
- Composition : 90 % d'hydrogène et 10 % d'hélium
- Densité moyenne : $1\,410 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ (varie entre centre et couches extérieures)
- Gravité à la surface : 274 m s^{-2} (28 fois la gravité terrestre)
- Vitesse d'échappement : 618 km s^{-1} (56 fois la vitesse de libération autour de la Terre)
- Luminosité (énergie lumineuse totale rayonnée par seconde) : $3,9 \cdot 10^{23} \text{ kW}$
- Température de surface : 5 780 degrés K (mais très élevée au centre où elle atteint quinze millions de degrés K)
- Température de couleur : 6200 degrés K (pic d'émission dans le vert à 470 nm)
- Rotation sur lui-même (dite sidérale) : 25 jours à l'équateur solaire ; 31 jours aux pôles
- **Rotation différentielle => champ magnétique !**
- Perte de masse : 10^9 kg s^{-1} (10^{-14} Ms/an) : le vent solaire

II. Le Soleil, sa structure interne

Ce que l'on a mesuré

- Rayon : 696 000 km
- Masse $1,99 \cdot 10^{30}$ kg
- Luminosité : $3,9 \cdot 10^{23}$ kW
- Température de surface : 5 780 degrés K
- Rotation sur lui-même : 25 jours à l'équateur solaire ; 31 jours aux pôles

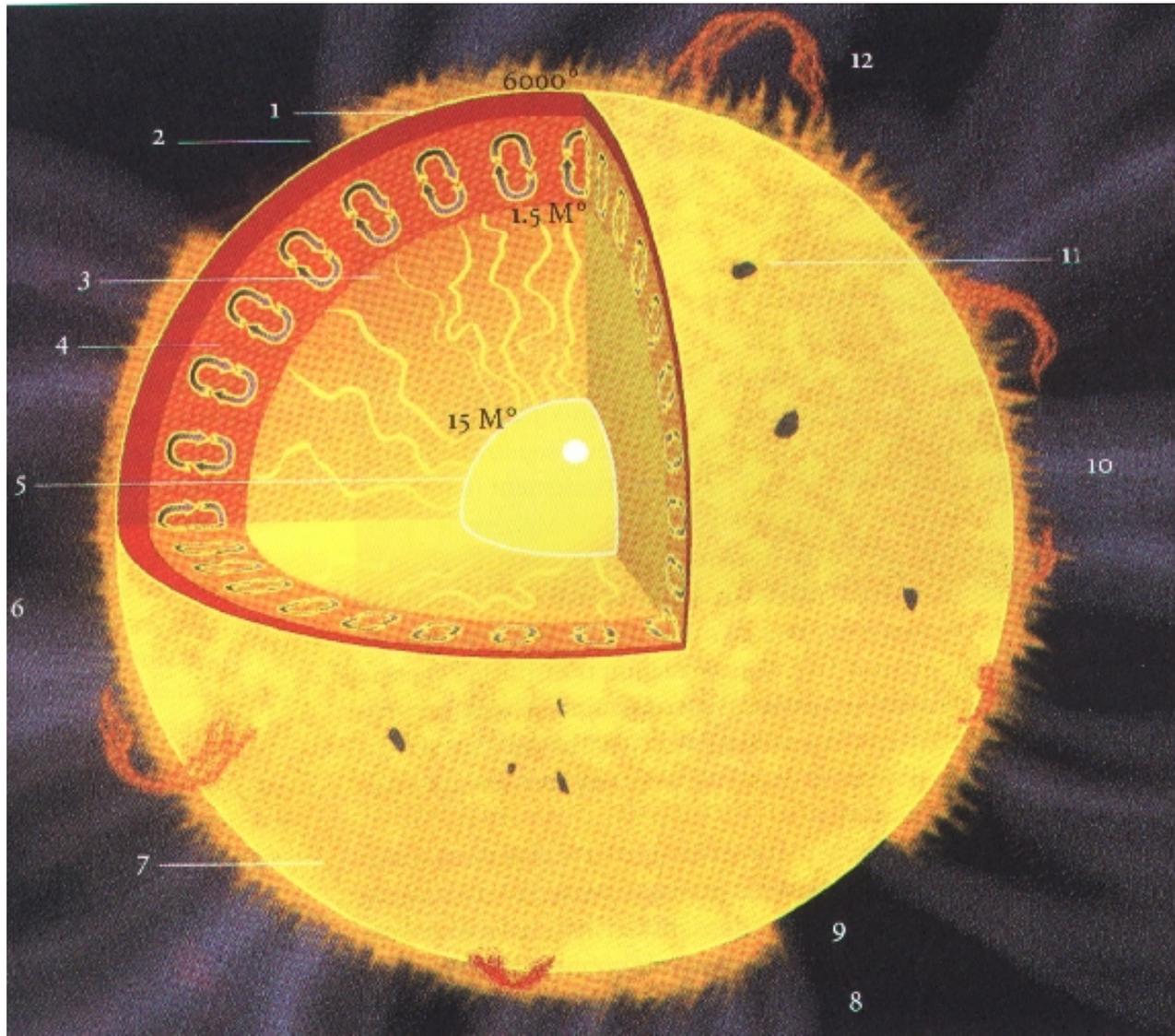
Mais comment savoir ce qui se passe à l'intérieur ?

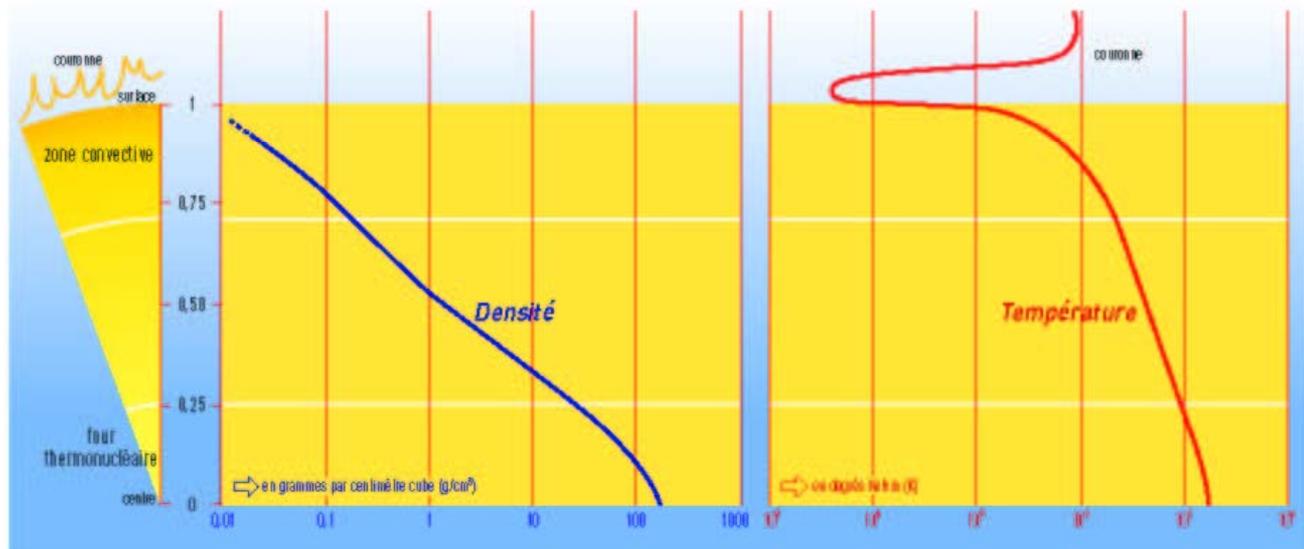
Jusqu'aux années 1970, élaboration d'un modèle à partir des lois de la physique : génération d'énergie (nucléaire), transport, rayonnement, gravité ..

- “A première vue, il semblerait que l’intérieur profond du soleil et des étoiles est moins accessible aux investigations scientifiques que n’importe quelle autre région de l’univers. Nos télescopes peuvent sonder de plus en plus loin dans les profondeurs de l’espace; mais comment pourrions-nous jamais obtenir une connaissance précise de ce qui est caché derrière de substantielles barrières? **Quel instrument peut percer les couches externes d’une étoile et tester les conditions au dedans?”**
- Sir Arthur Stanley Eddington, *The Internal Constitution of the Stars*, 1926, page 1, ligne 1.

II. Le Soleil, sa structure interne

3 régimes, 3 régions : cœur, zone radiative, zone convective





Vial 2004

II. Le Soleil, sa structure interne

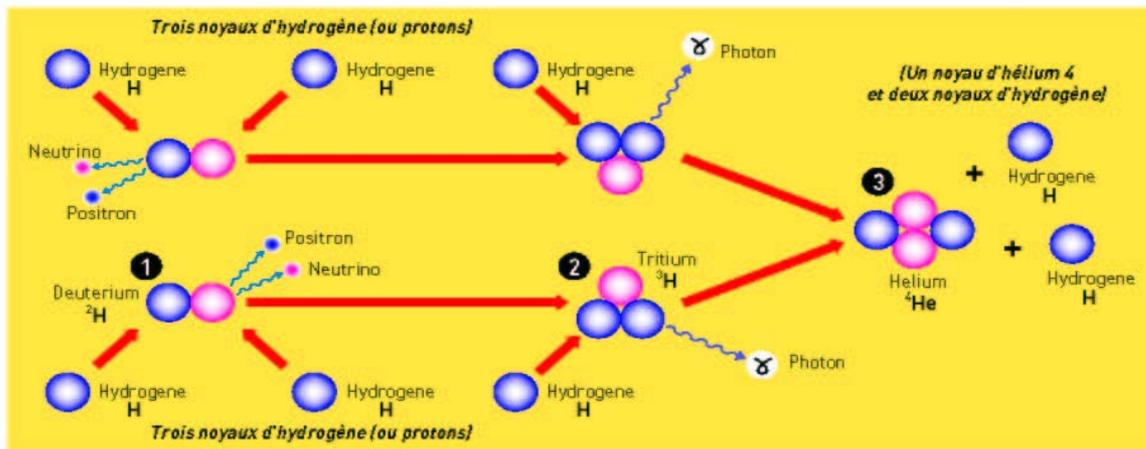
1. Le cœur du Soleil

Luminosité : $3,9 \cdot 10^{23}$ kW ne peut s'expliquer par l'énergie gravitationnelle (insuffisante)

Siège des réactions de fusion thermonucléaire (von Weizsäcker et Hans Bethe, 1938) :

Plusieurs « chaînes » de réaction impliquant des noyaux d'hydrogène (ou protons), d'hélium, de béryllium, ...

Et aussi de carbone, azote, oxygène



II. Le Soleil, sa structure interne

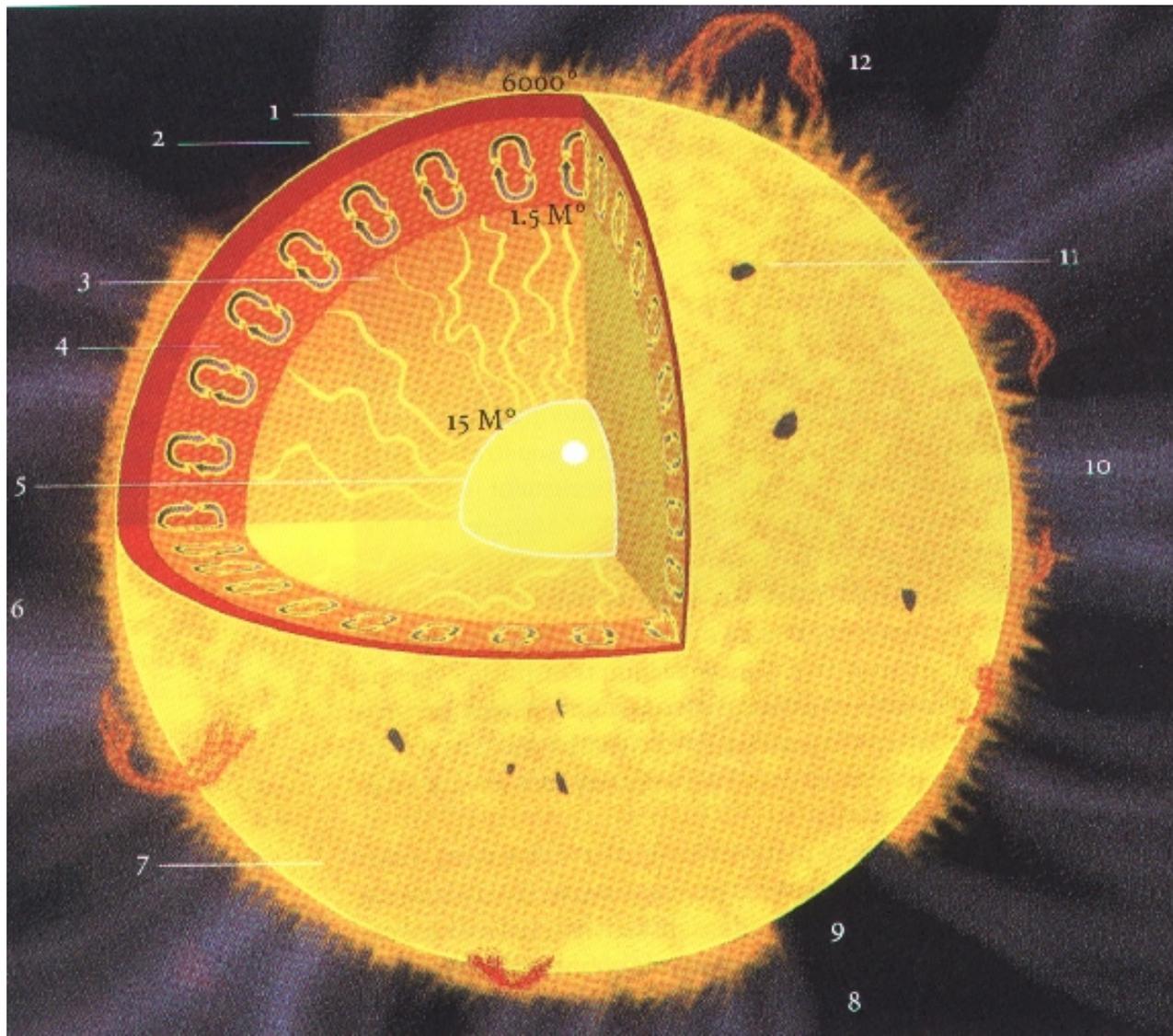
1. Le cœur du Soleil

L'énergie « créée » correspond à un bilan négatif de masse de l'ordre de 7 millièmes :
 $6,3 \cdot 10^{14}$ Joules par kg d'hydrogène.

610 millions de tonnes d'H « brûlées » par seconde

Emission de neutrinos et rayonnement γ

3 régimes, 3 régions : cœur, zone radiative, zone convective



II. Le Soleil, sa structure interne

2. La zone radiative du Soleil

Au delà de 175 000 km du centre, arrêt des réactions nucléaires

Le rayonnement γ diffusé par les particules chargées du milieu se propage vers l'extérieur où la température n'est plus que de deux millions de degrés K.

Marche de l'ivrogne du photon γ : > 170 000 ans pour sortir

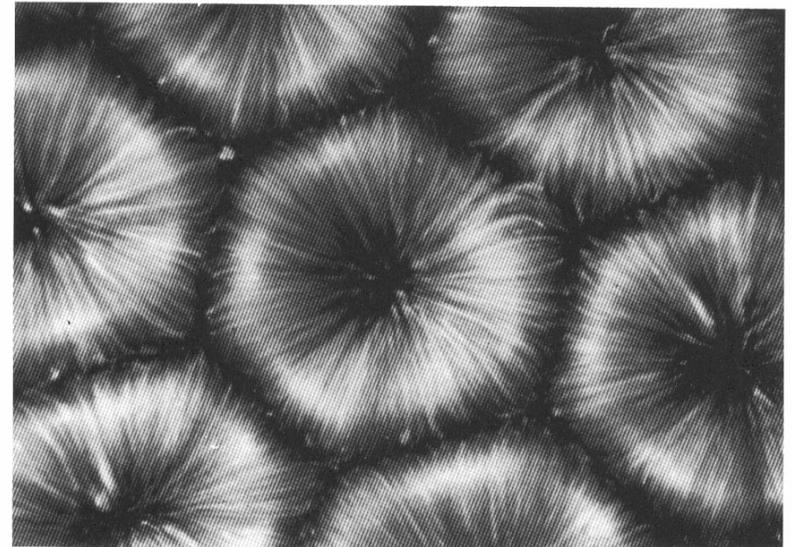
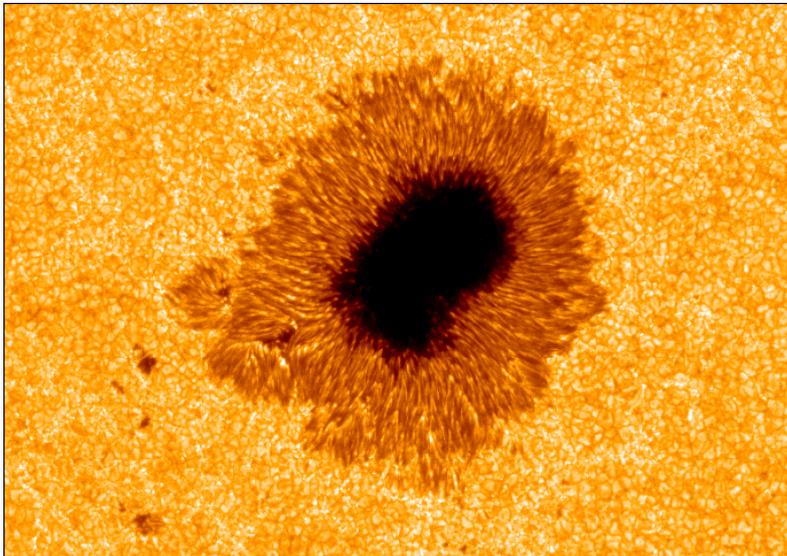
A la périphérie de la zone radiative : le rayonnement rencontre un milieu constitué par l'hélium puis l'hydrogène devenus froids donc « neutres » : il est bloqué et absorbé.

II. Le Soleil, sa structure interne

3. La zone convective

Le rayonnement ne pouvant plus sortir, le transfert d'énergie s'effectue par convection : la matière chaude monte vers la surface un peu comme dans une bouilloire, sous l'action de la poussée d'Archimède.

Les bulles de gaz chaud montent, se refroidissent à la surface et redescendent froides : c'est ce que montre la granulation solaire.



II. Le Soleil, sa structure interne

3. La zone convective

Granulation solaire : **Information de surface**

Comment mesurer, analyser la matière en-dessous ?

Les mouvements turbulents génèrent des ondes sonores :
celles qui sortent vont aller chauffer la chromosphère ;
celles qui entrent dans la sphère solaire vont y subir des réfractions et des réflexions diverses et amasseront le long de leur trajet une information précieuse sur ce qui se passe « en-dedans ».

Cette information est utilisée par une technique de sondage qui s'apparente à celle de la sismologie terrestre :
l'héliosismologie.

III. L'héliosismologie et les neutrinos

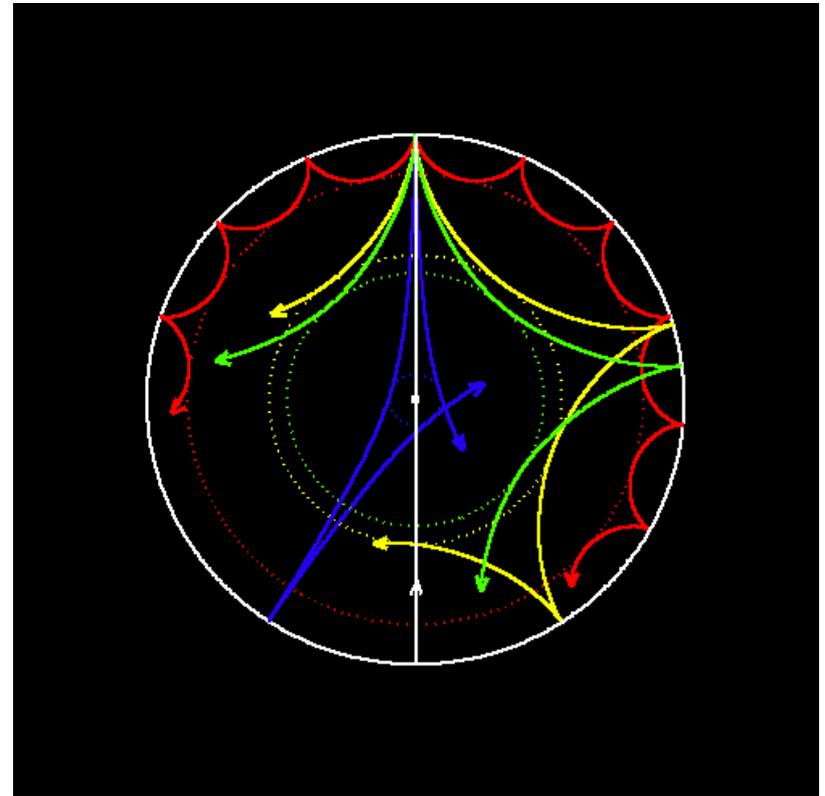
Trajet des ondes sonores :

Réfraction vers l'intérieur et réflexion à la surface

Combinaison constructive de ces ondes pour des trajets particuliers

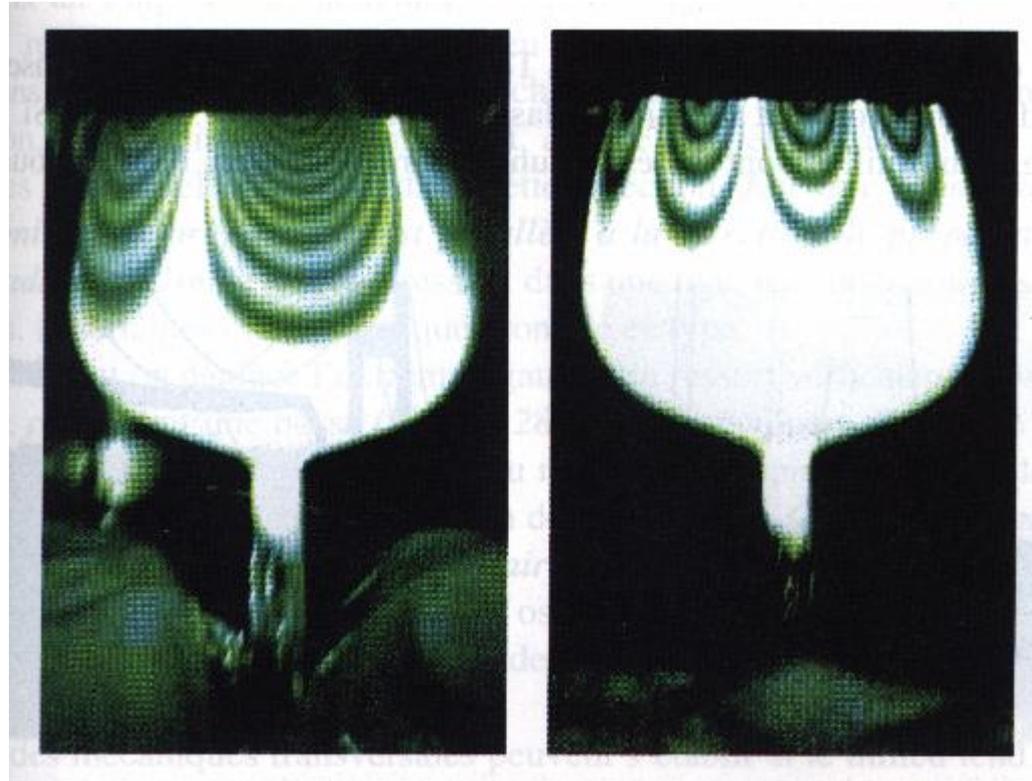
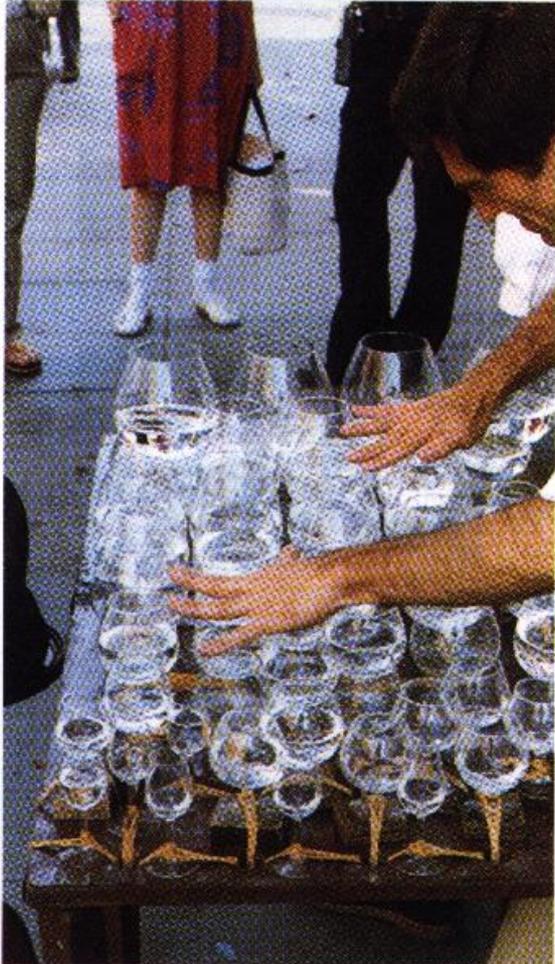
Les petits pas restent à la surface.

Les grands pas pénètrent profondément.



III. L'héliosismologie et les neutrinos

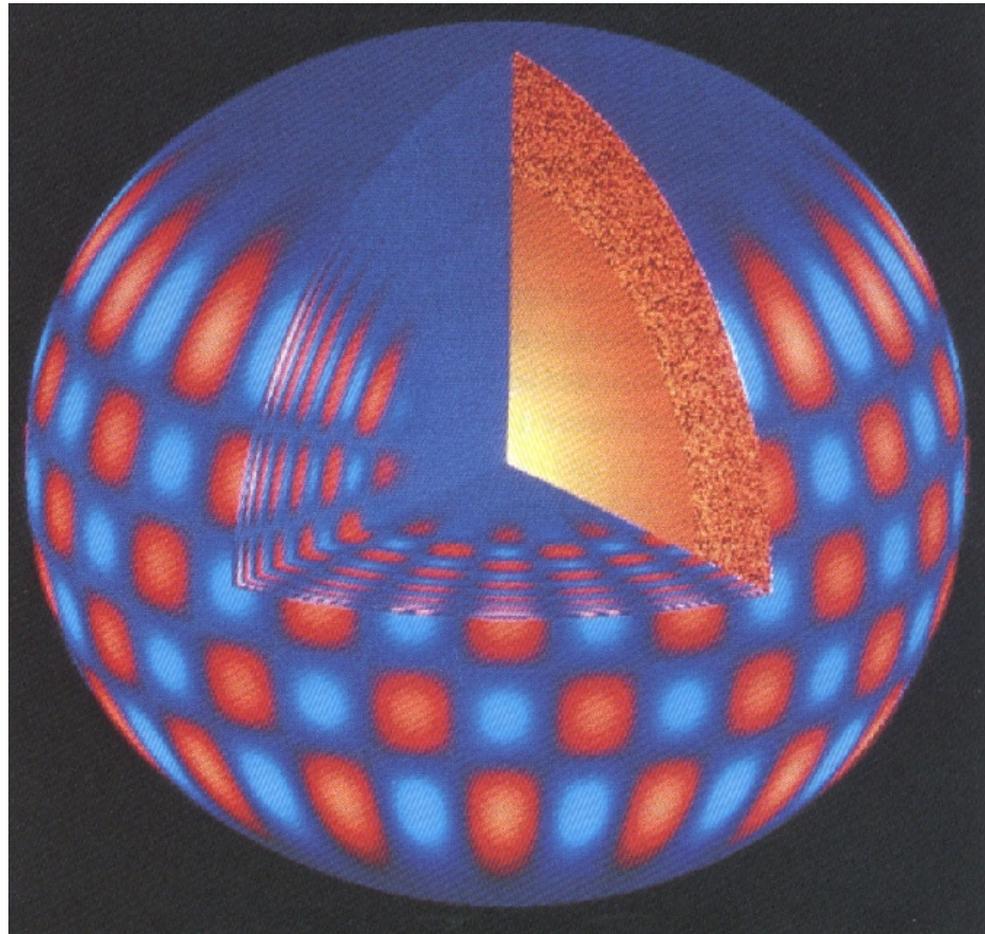
Trajet des ondes sonores. Un exemple « solide » :



III. L'héliosismologie et les neutrinos

Très grand nombre de modes de vibration.

Un exemple :

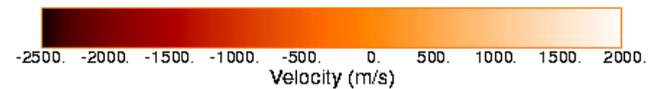


III. L'héliosismologie et les neutrinos

Les observations :
Vitesses de déplacement
(effet Doppler-Fizeau)

Single Dopplergram

(30-MAR-96 19:54:00)



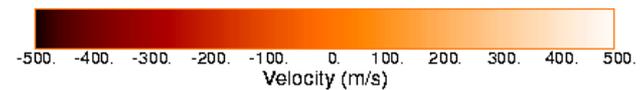
SOI / MDI

Stanford Lockheed Institute for Space Research

III. L'héliosismologie et les neutrinos

Les observations :
Vitesses corrigées

Single Dopplergram Minus 45 Images Average
(30-MAR-96 19:54:00)



SOI / MDI

Stanford Lockheed Institute for Space Research

III. L'héliosismologie et les neutrinos

Analyse des observations :

Périodes de l'ordre de 300 secondes (ou fréquences de 3 millièmes de Hertz)

La précision de cette technique dépend de la durée et la **continuité** de l'observation.

Comment l'assurer ?

Passer l'été au pôle (Sud) où le Soleil ne se couche pas : **solution niçoise**

Installer un réseau de stations d'observation tout autour du globe, en sorte que le Soleil ne se couche jamais : **solutions niçoise et américaine (GONG)**

Aller se placer entre Terre et Soleil en un « point » (dit de Lagrange) où attractions solaire et terrestre s'équilibrent.

C'est dans cette région qu'est allé se positionner le satellite SOHO (Solar Helio-graphic Observatory) au début de l'année 1996.

Avec ses 800 kg d'instruments, SOHO ausculte de façon quasi-continue notre astre solaire.

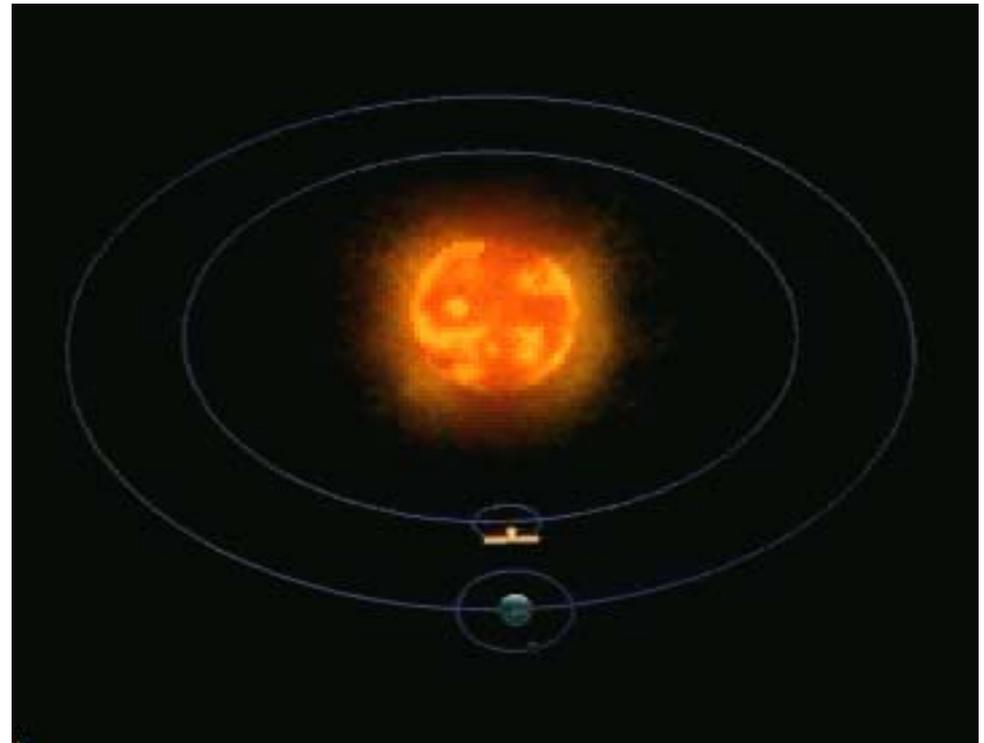
III. L'héliosismologie et les neutrinos

SOHO

Les instruments et le satellite



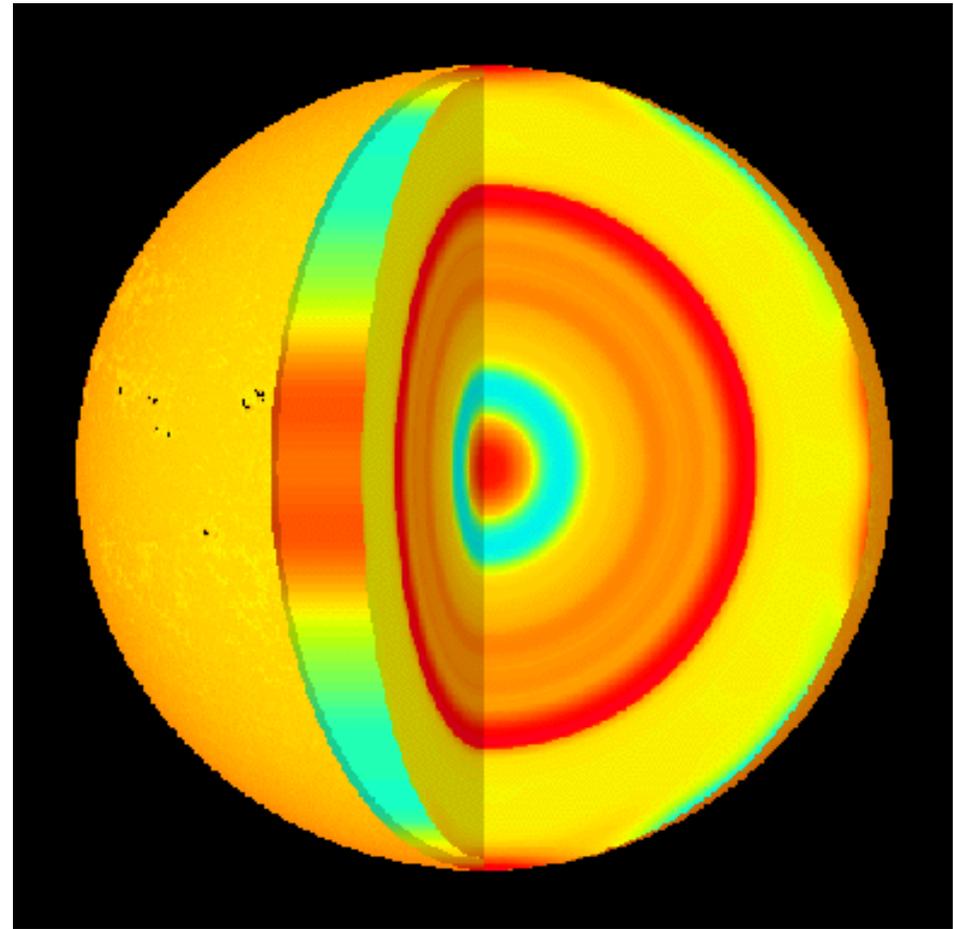
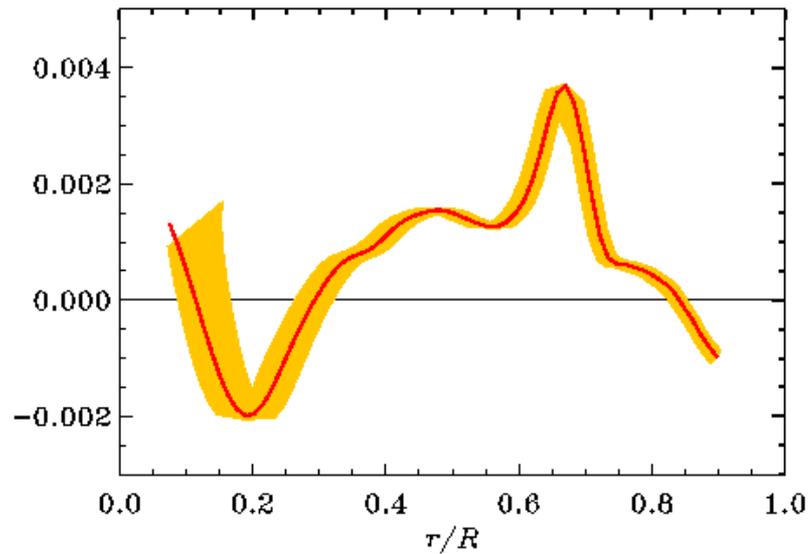
L'orbite



III. L'héliosismologie et les neutrinos

Quelques résultats :

Comparaison des mesures
de vitesses du son avec
les modèles



III. L'héliosismologie et les neutrinos

Accord modèle/observations sismiques :

un résultat bien contraignant pour la physique des particules....

ou l'énigme des neutrinos.

III. L'héliosismologie et l'énigme des neutrinos

Neutrino, qui es-tu ?

Une particule aux curieuses propriétés : électriquement neutre et masse infinitésimale

Prédite en 1931 par le physicien allemand W. Pauli, baptisée par E. Fermi et détectée en 1956.

Quelle masse ??

Produite par les réactions nucléaires dans le Soleil

Mais véritable « passe-murailles » capable de traverser tout le Soleil sans encombre (une sur un million est arrêtée) et donc de nous renseigner sur les conditions dans **le cœur** même du Soleil.

Donc difficile –mais pas impossible - à détecter depuis la Terre !

III. L'héliosismologie et l'énigme des neutrinos

Les mesures de neutrinos solaires

Premières mesures dès 1968 par R. Davis :
380 000 litres de perchloréthylène dans une mine d'or désaffectée du Sud-Dakota (U.S.A.) pour « arrêter » quelques neutrinos

Il en manque par rapport à ce que prédisent les modèles du Soleil !

Beaucoup plus tard : M. Koshiba (SuperKamiokande) le confirme.

Modèle solaire en défaut ? Mais la sismologie le trouve excellent

ou problème de neutrino ?

III. L'héliosismologie et l'énigme des neutrinos

Le problème du neutrino et les mesures de neutrinos solaires

Si les neutrinos sont massifs, alors ils peuvent exister sous 3 formes : « e », « μ » et « τ ».

Et s'ils peuvent facilement passer d'une forme à l'autre, les mesures faites sur une espèce (par exemple, l'expérience Gallex qui mesure seulement les « e ») n'en « manquent » -elles pas ?

Hypothèse **justifiée** par les mesures du SNO (une sphère de 1 000 tonnes d'eau lourde) qui a mesuré les neutrinos de toutes espèces et trouvé la valeur du modèle sismique !

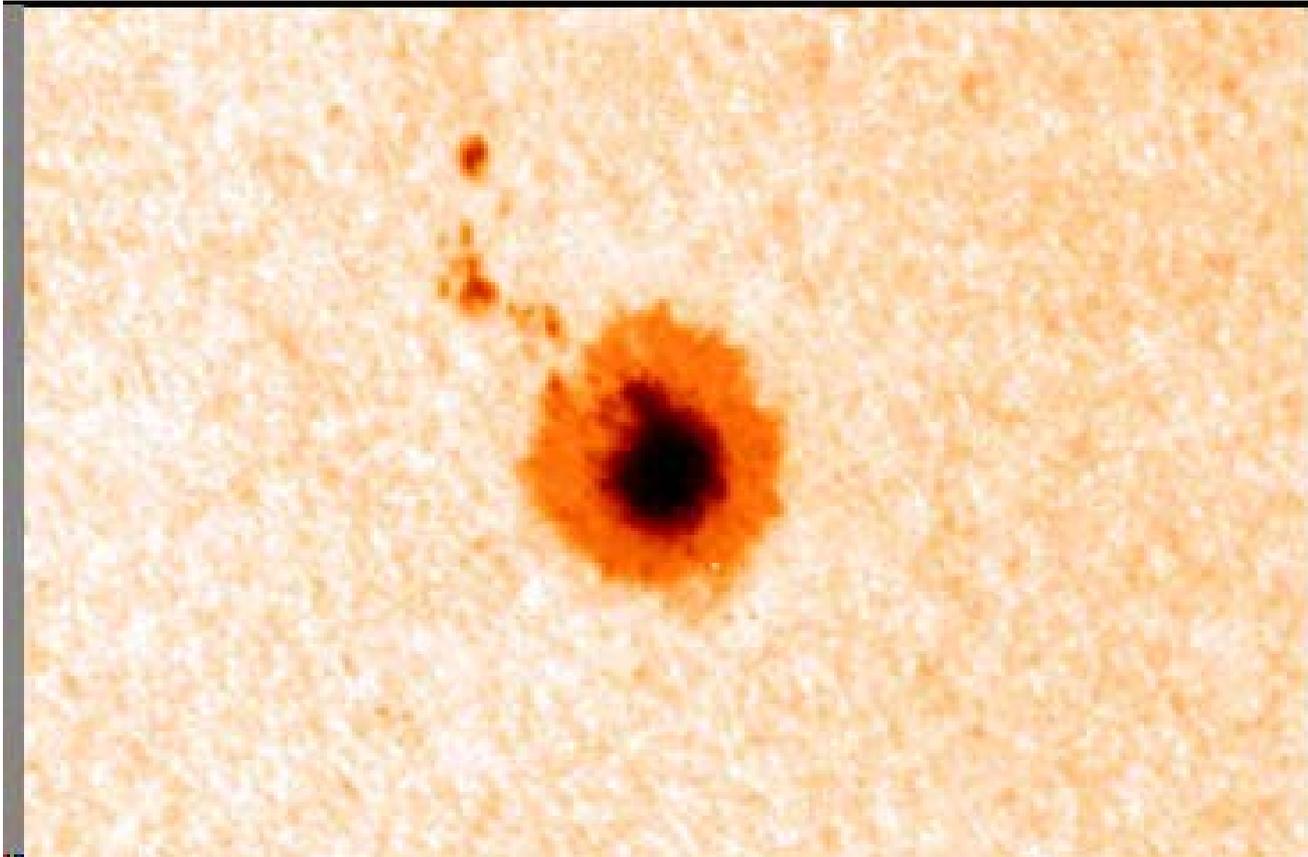
Mais s'il y a ces « oscillations » entre espèces, c'est donc que le neutrino a une masse!

Hypothèse **vérifiée** par des mesures effectuées à « proximité » (180 km) d'un réacteur nucléaire au Japon.

IV. Le soleil étoile magnétique

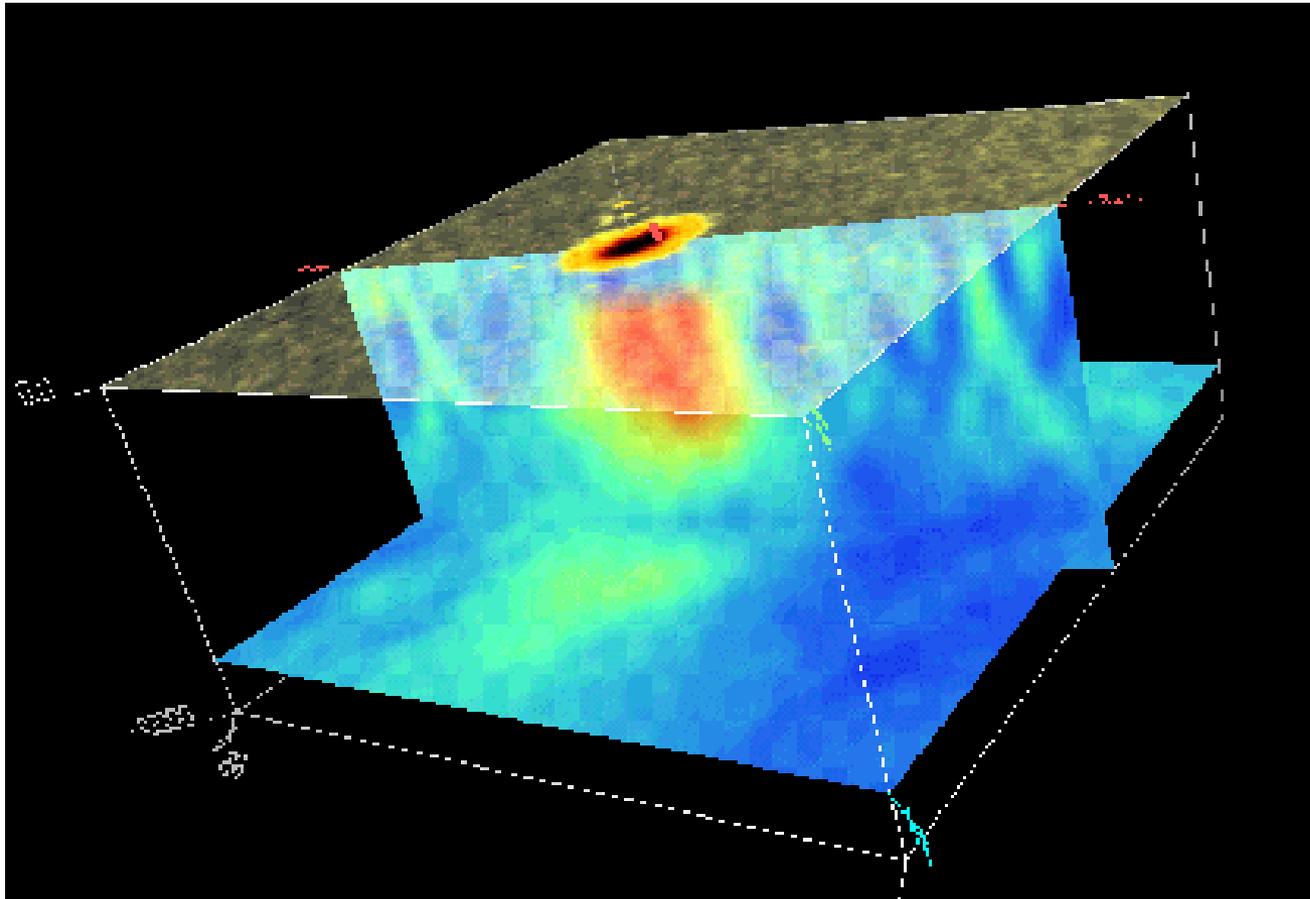
Sismologie locale : information sur les irrégularités des couches traversées

Exemple : les dessous d'une tache



L'intérieur magnétique

Les « dessous » d'une tache

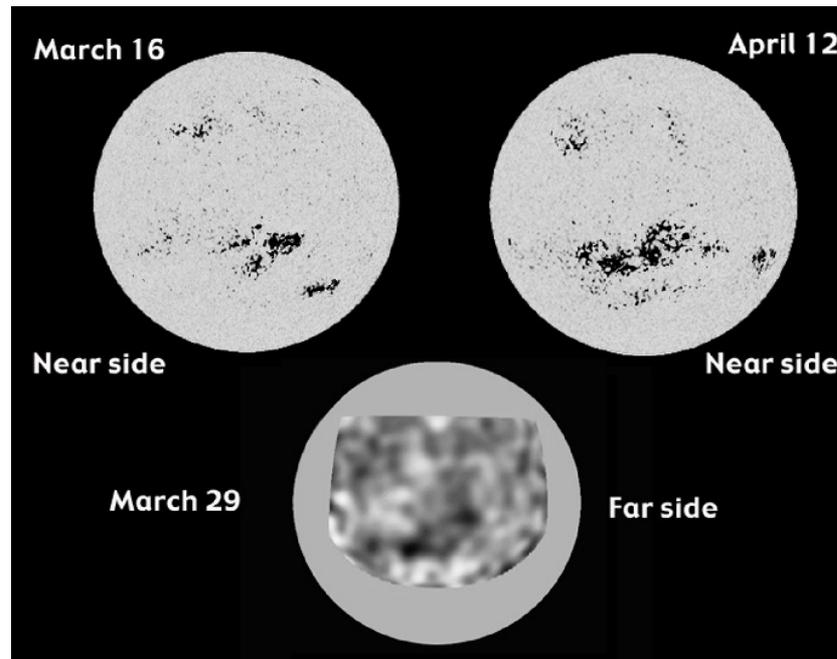


Mes remerciements à Tom Ducall

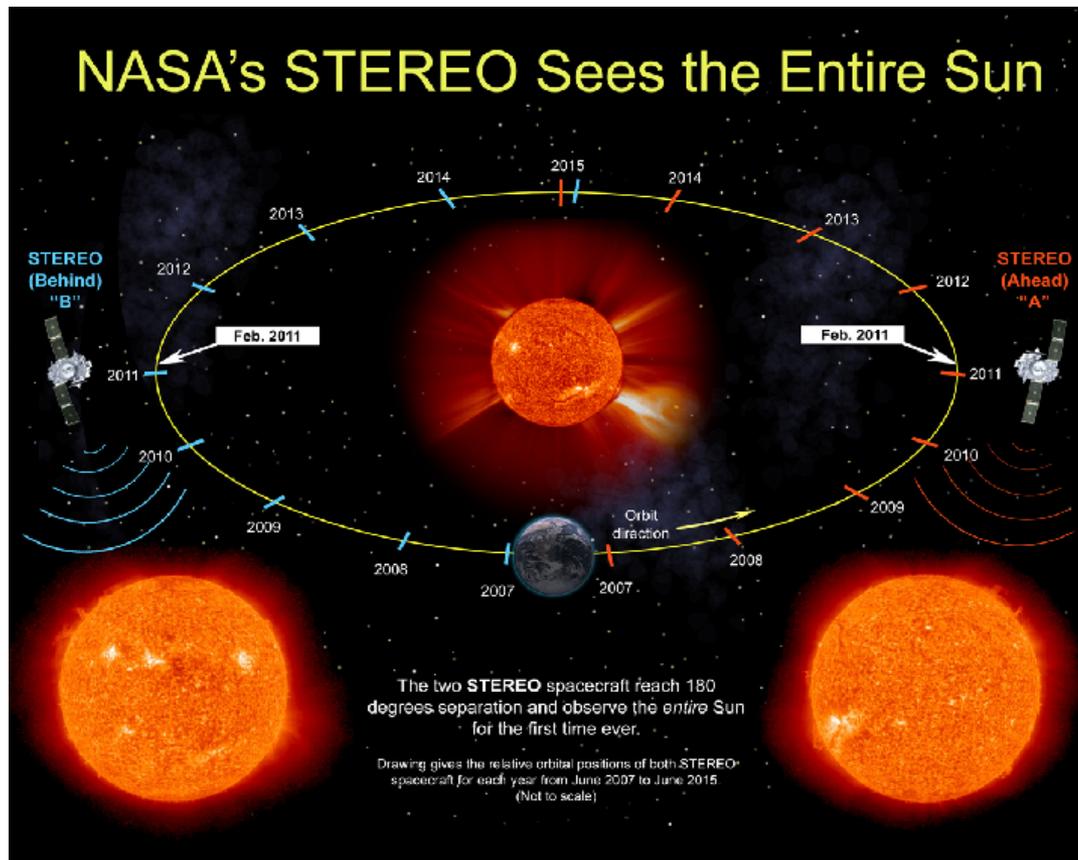
La Physique solaire - Poitiers - 16
février 2011

L'intérieur magnétique

- La face cachée du Soleil :
Grâce à des techniques combinant information sismique et holographie, on peut « voir » la face cachée du Soleil !



Février 2011 : avec ses deux sondes, STEREO voit tout le Soleil !



4_STEREO_Full_Sun_H264_320x180_29.97_iPhone.m4v

Les 4 télescopes AIA de la mission SDO (Solar Dynamics Observatory) lancé le 10 février 2010



24 heures de la vie d'une protubérance (presque éruptive) vue par SDO



AVC_TomBerger_SDO_304_367.6_20100618_165305.mov

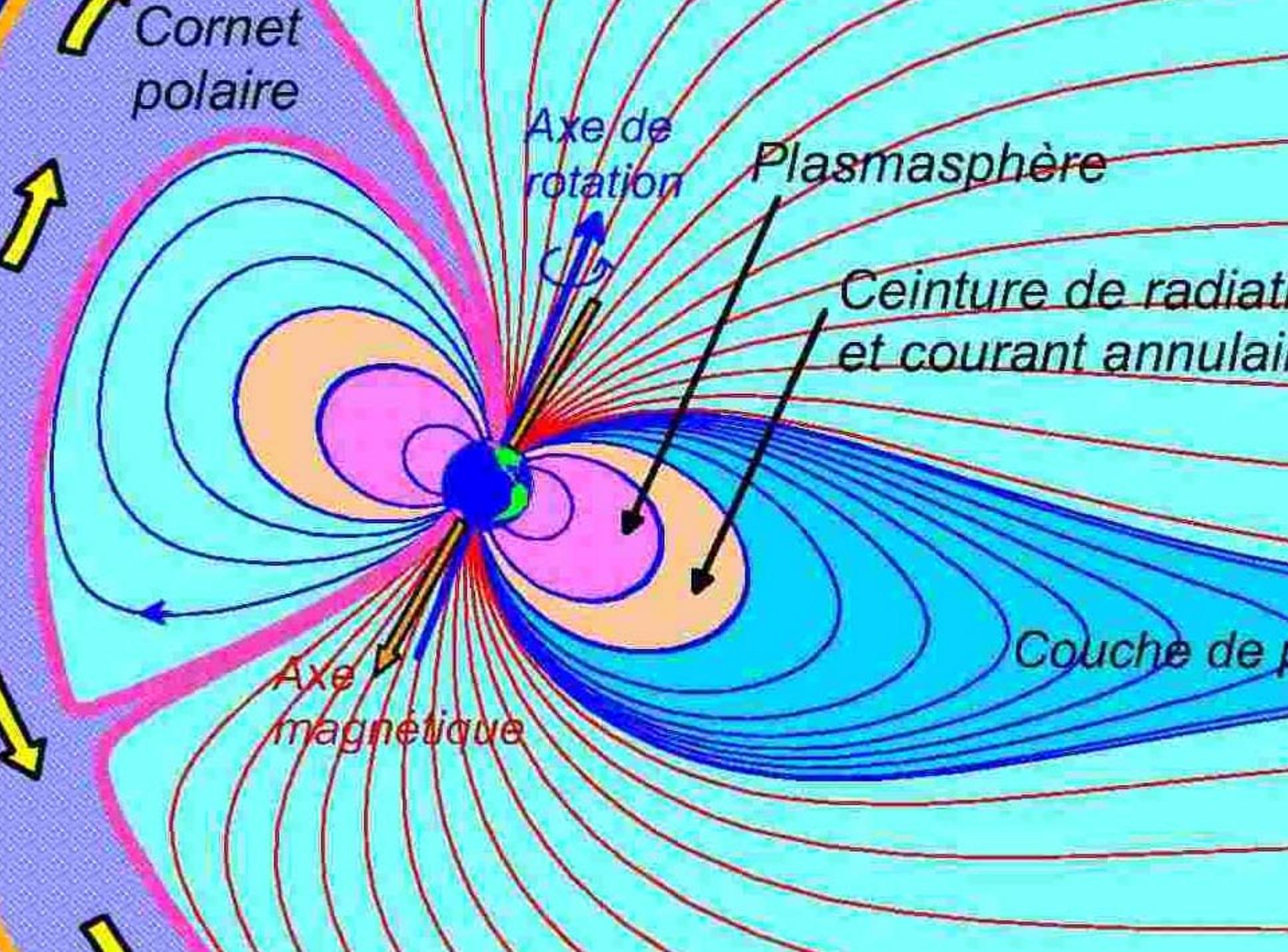
Une journée solaire avec SDO



daily_304-211-171.mov

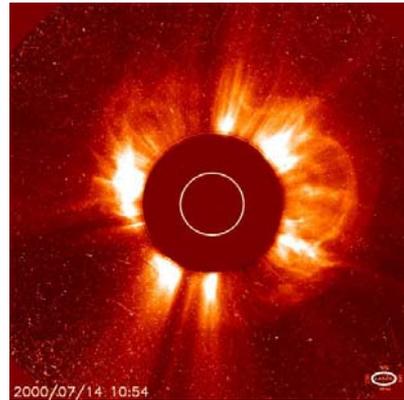
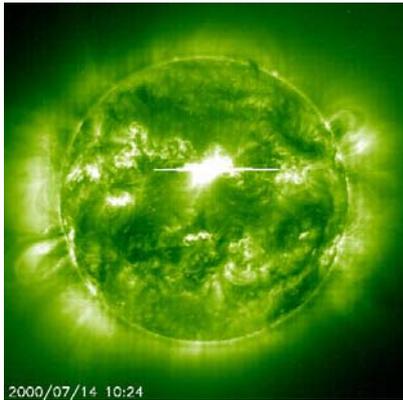
V. Le Soleil et la Terre

- Soleil =
 - Source de lumière
- et
- Source de particules chargées
 - **Vents solaires** : rapide et lent
 - **Ejections de masse coronale** : nuages de « plasma » de toutes tailles et masses
 - Particules chargées très énergétiques (issues des éruptions)
- +
- Particules TRES énergétiques, d'origine extra-galactique :
les rayons cosmiques
- dont la pénétration dans le système solaire est gouvernée ... par le Soleil

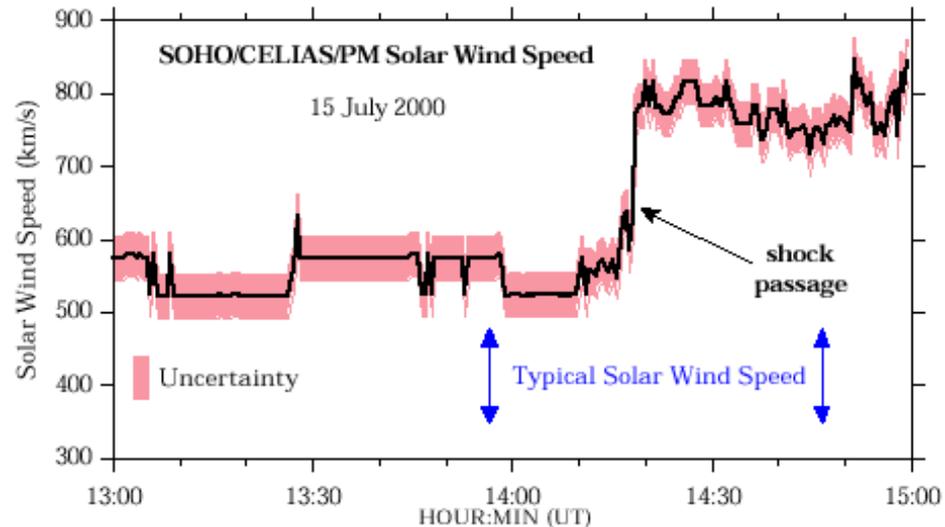


Le Soleil et la Terre

- Un exemple : le 14 juillet 2000

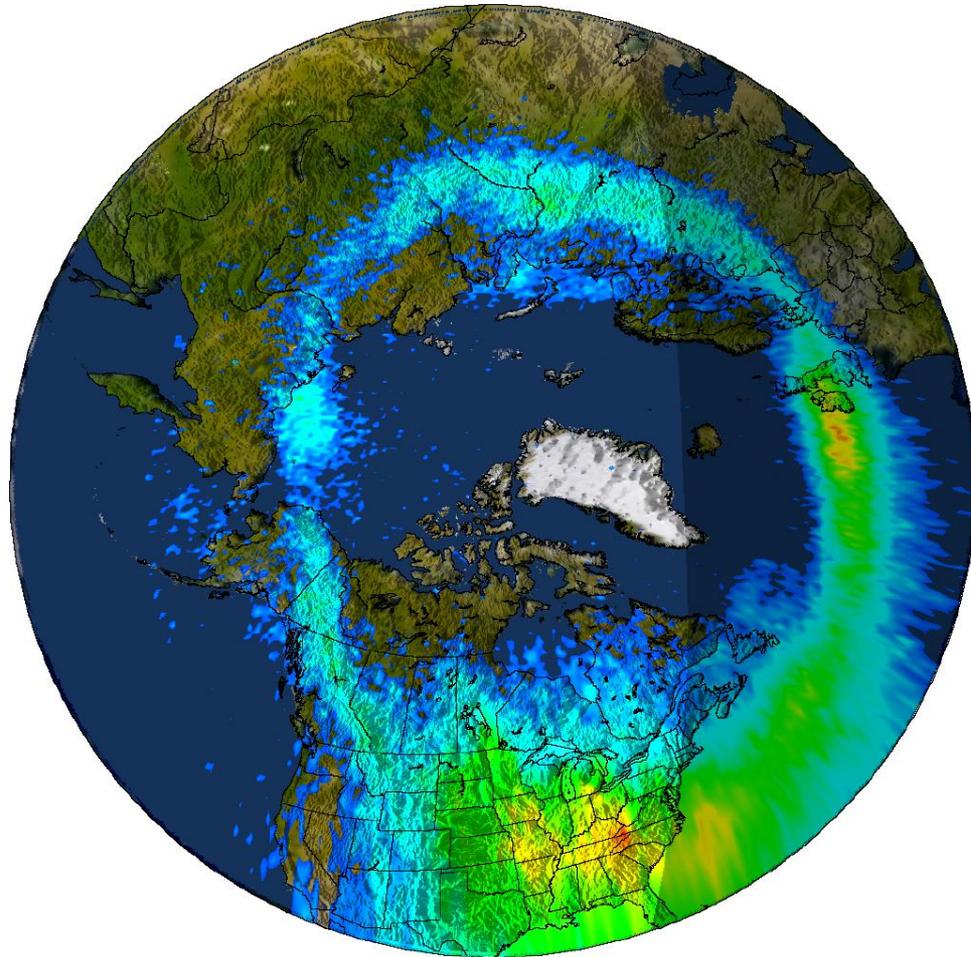


**Ejection de plasma
le 14
En route
vers la Terre !
Arrivée à la Terre
le 15 juillet.**



Le Soleil et la Terre

- **Un exemple : le 14 juillet 2000 (suite et fin):
arrivée à la Terre :
l'ovale auroral**



Le Soleil et la Terre

- **Bouclier fragile aux pôles :**
Aurores boréales



Le Soleil et la Terre

- **Les courants induits :**
 - **Dans l'atmosphère ... et sur Terre :**
 - **Lignes électriques : disjonction des réseaux (aux tensions de plus en plus élevées et de plus en plus interconnectés)**
13 mars 1989 : 6 millions de Québécois dans le noir pendant 9 heures ...
 - **Transformateurs : Delaware (EU), mars 1989**
(10 millions \$)
 - **Corrosion pipelines (Alaska, Scandinavie)**

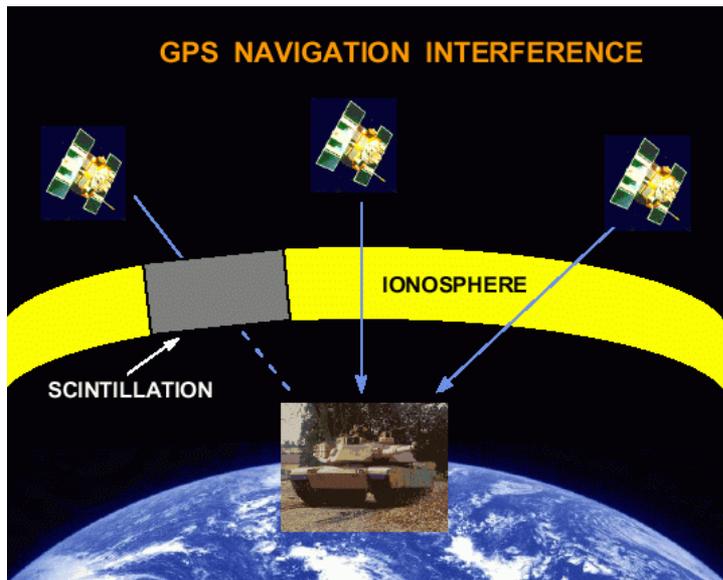


Le Soleil et la Terre

Scintillations dans l'ionosphère (variations locales de densité électronique) :

Plus fortes aux lever-coucher de Soleil, aux équinoxes, **en période de maximum d'activité solaire**

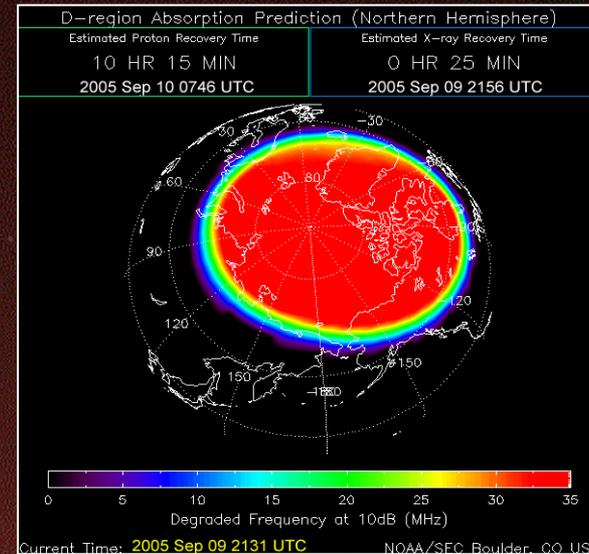
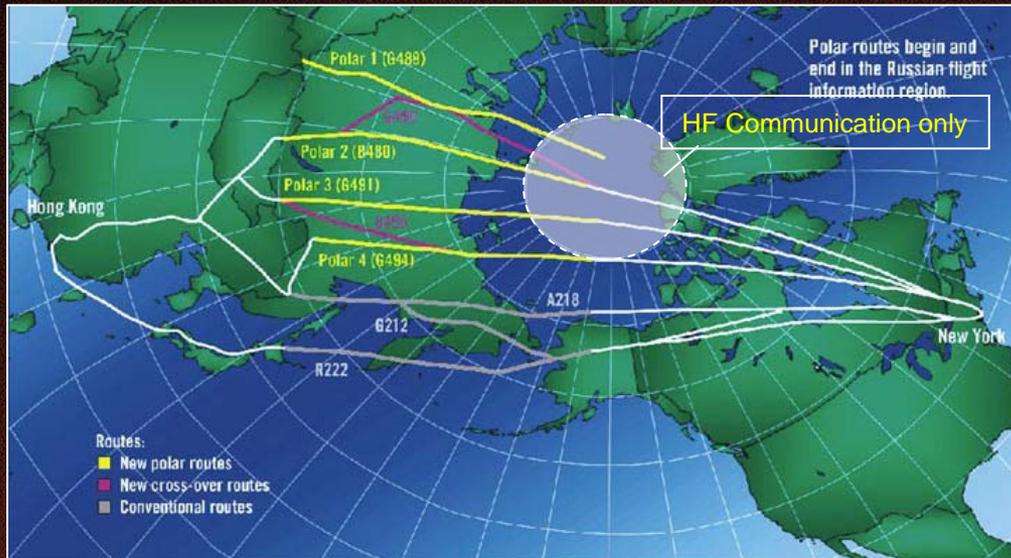
Erreurs de positionnement du GPS (jusqu'à 100 m)



Le International GNSS Service se sert du GPS pour mesurer les perturbations ionosphériques

Données immédiatement disponibles à tous !
<http://igscb.jpl.nasa.gov/>

Les routes polaires des compagnies aériennes



Courtesy
NASA

- Les vols polaires (à l'intérieur du cercle 82°) utilisent les liaisons HF (3 – 30 MHz).
- La Federal Aviation Regulation Sec. 121.99 – aircraft impose une liaison radio sur TOUT le trajet.
- Les compagnies aériennes re-routent souvent les vols hors des passages polaires pendant les orages magnétiques au prix de près de \$100,000 par vol.

Le Soleil et la Terre

- Les humains : particules solaires à hautes énergies



* Sorties dans l'espace :

Navette, ISS, ... OK

* Exploration de la Lune :

Apollo 16 (16 avril - 27 avril 1972)

Apollo 17 (7 déc. - 19 déc. 1972)

**2 août 1972 : éruption(s) du siècle
une semaine de feux d'artifice
ininterrompus ...**

* Exploration de Mars !!

- Equipages et passagers aériens :

- Vols stratosphériques
- SIEVERT : service d'alerte sur les doses encourues

Relations Soleil- Terre : vers une météorologie de l'espace

Les tâches futures en météorologie de l'espace

Observer, modéliser, comprendre le Soleil et l'atmosphère terrestre

- SOHO va observer jusqu'au début du cycle 24 (2013)
- STEREO est en opérations depuis début décembre 2006
- CLUSTER continue à explorer la magnétosphère terrestre

-La mission SDO (Solar Dynamics Observatory) a été lancée en février 2010 : orbite géosynchrone; 123 Mb/s, 24h/24, 7j/7

Observer, modéliser, comprendre leurs relations complexes

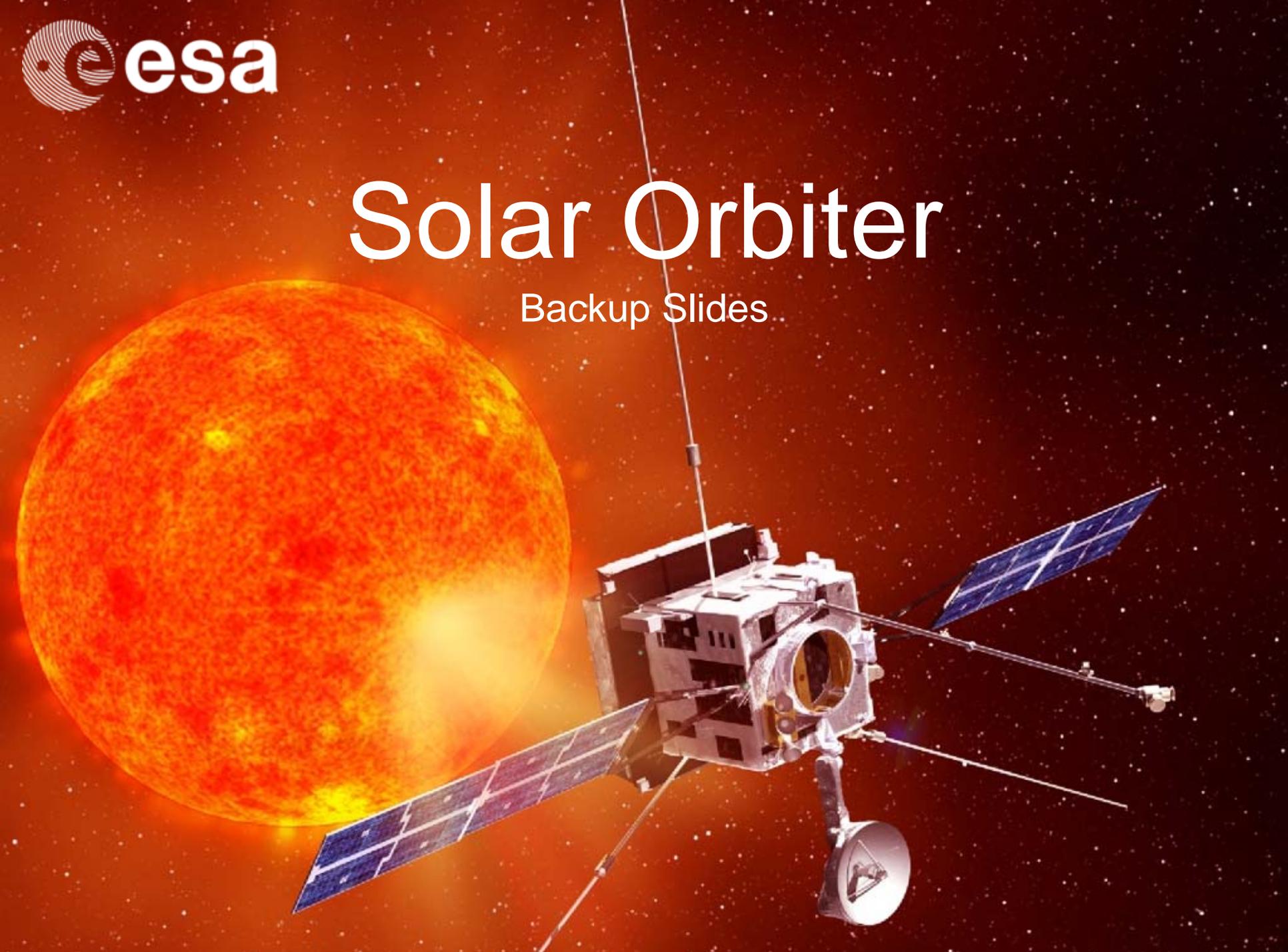
- Vaste diversité d'échelles de temps et d'espace :
un défi pour la physique des plasmas
- Gare à la tentation des corrélations simplistes ...

Et essayer de prévoir ...

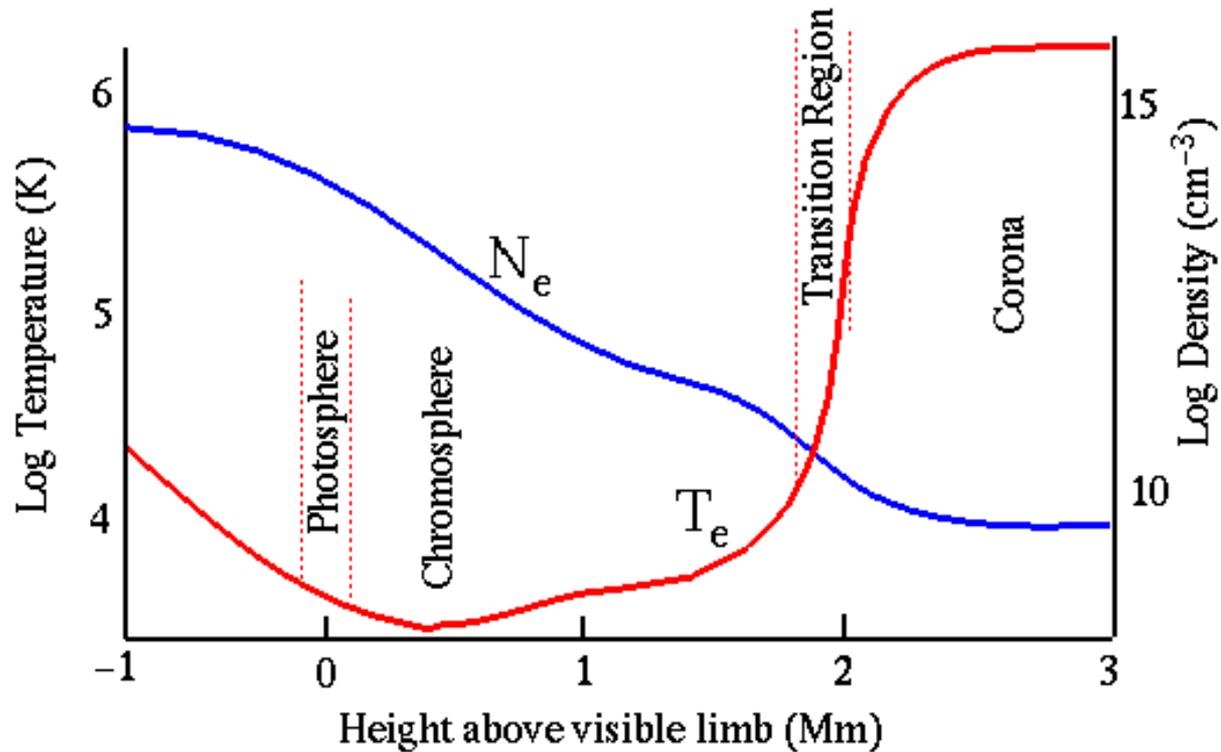


Solar Orbiter

Backup Slides



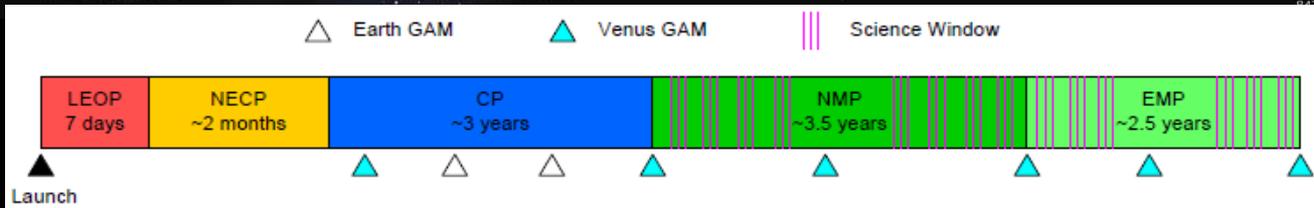
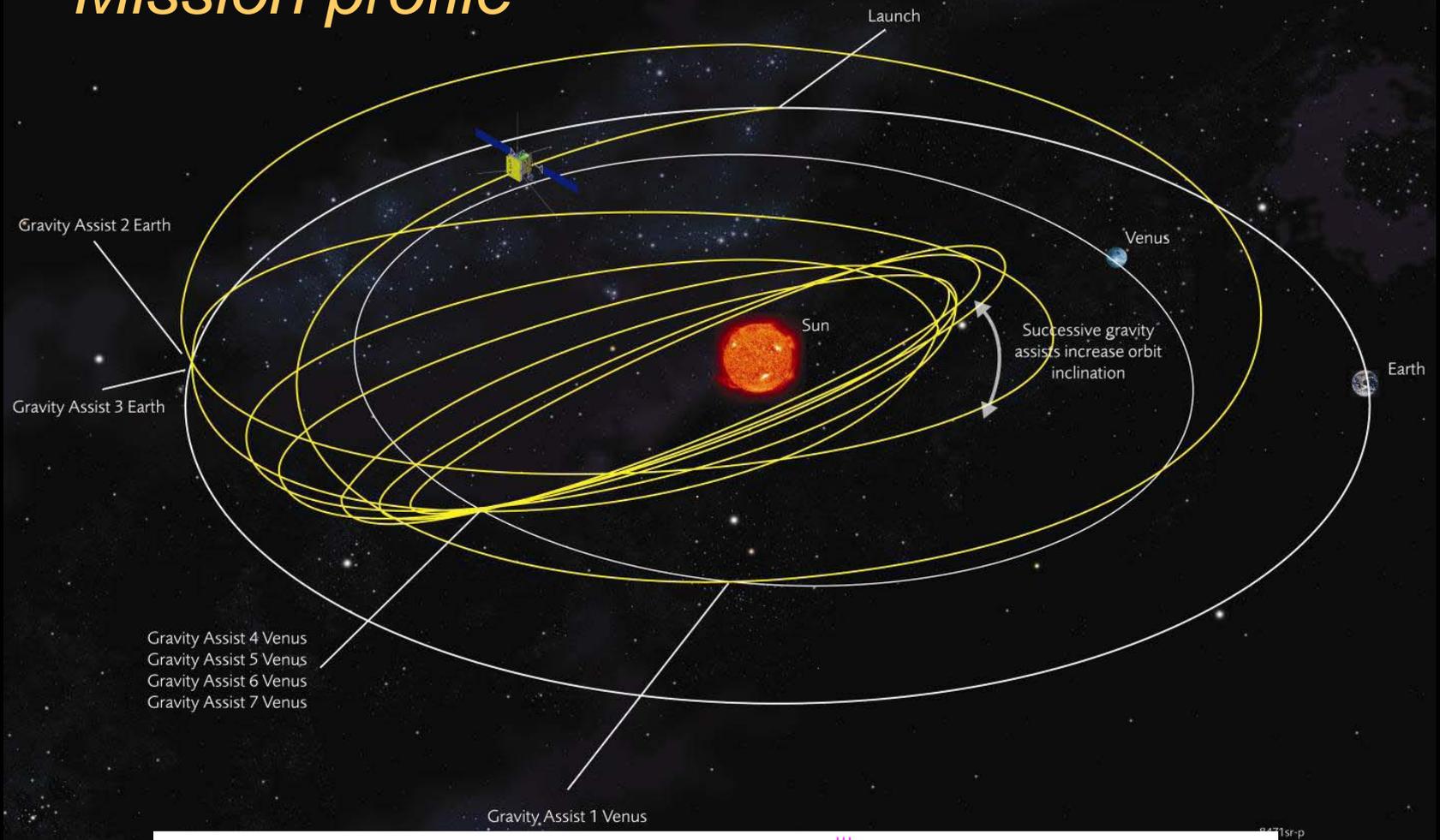
A la surface



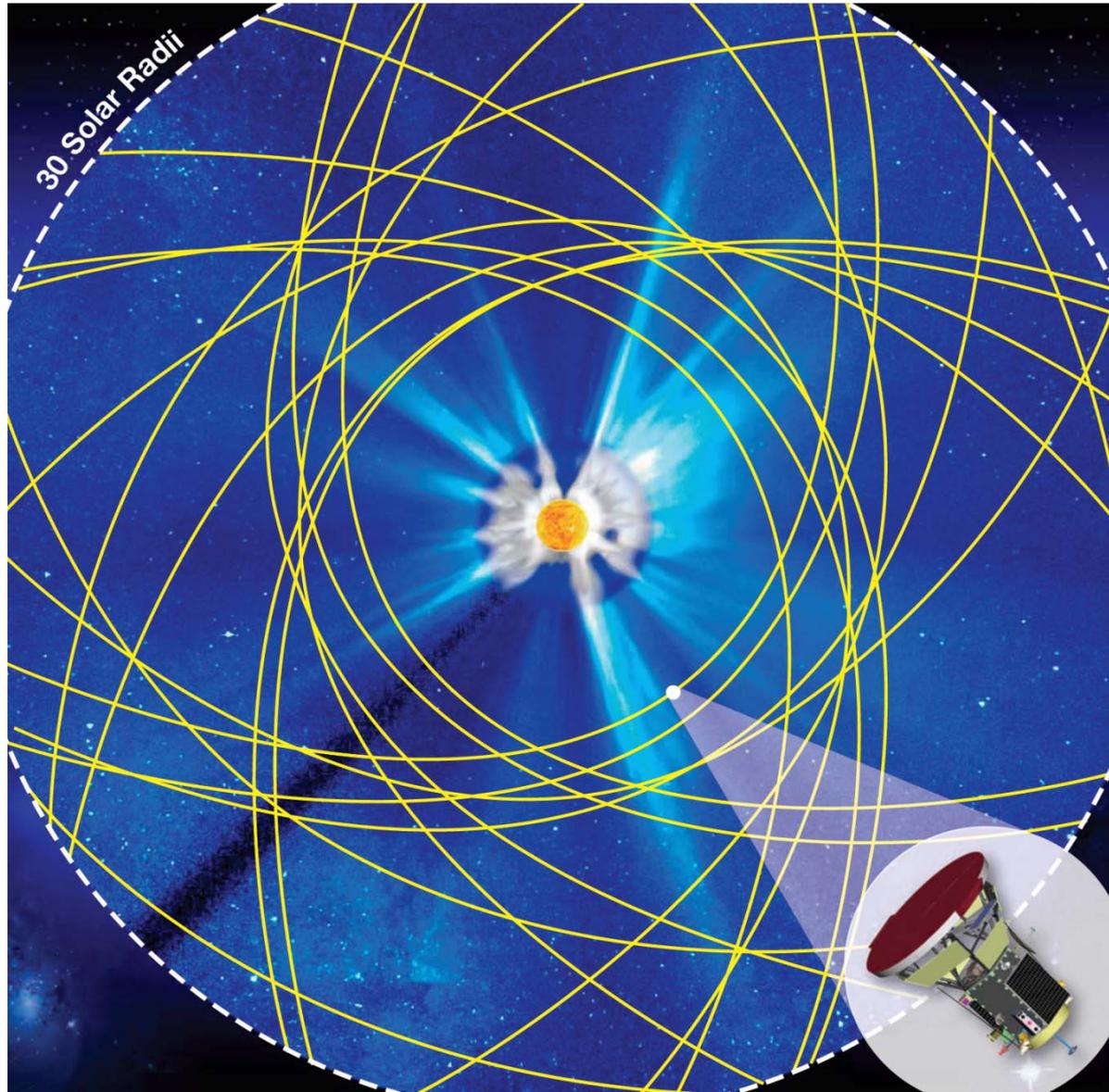
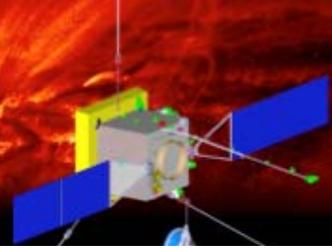
Court. E. Marsch

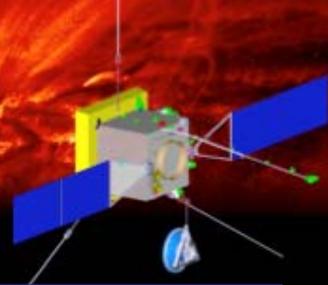


Mission profile

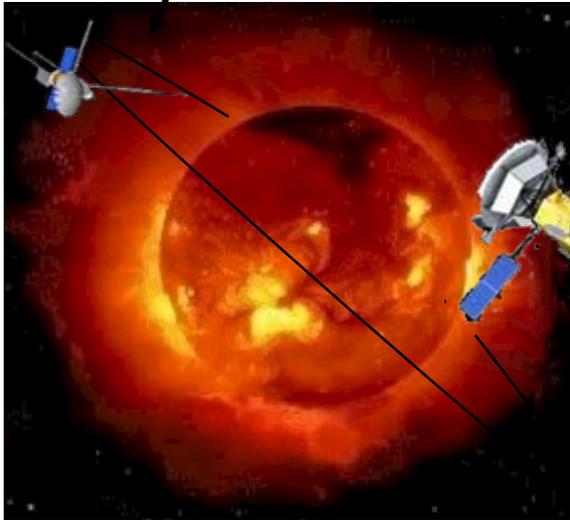


SOLAR ORBITER Solar Probe Plus

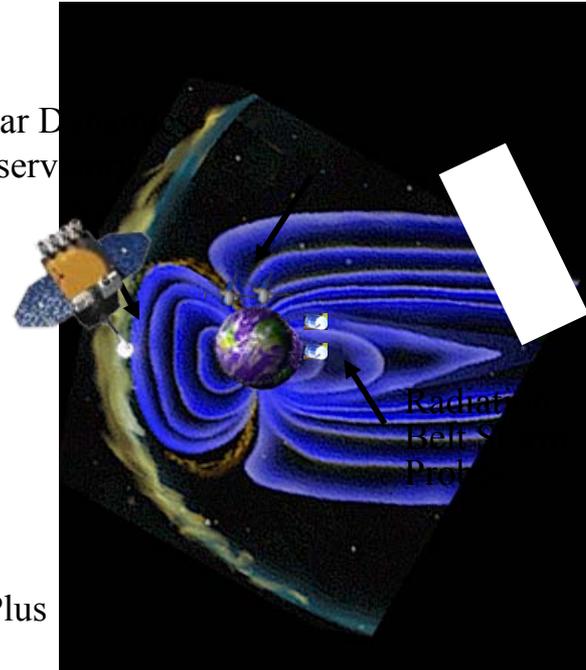




Solar Orbiter



Solar D
Observ



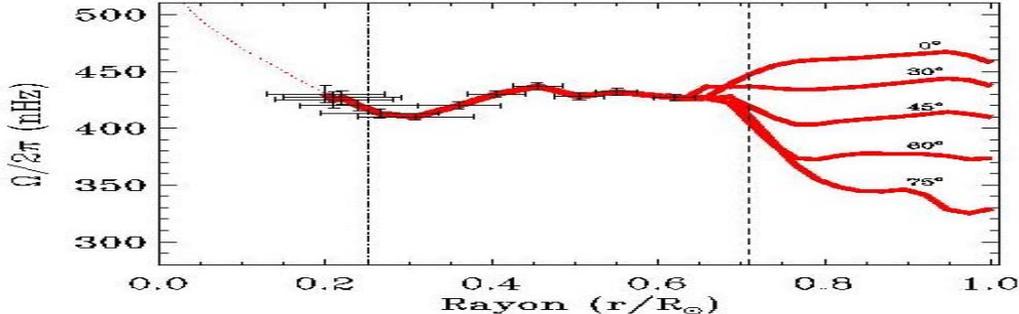
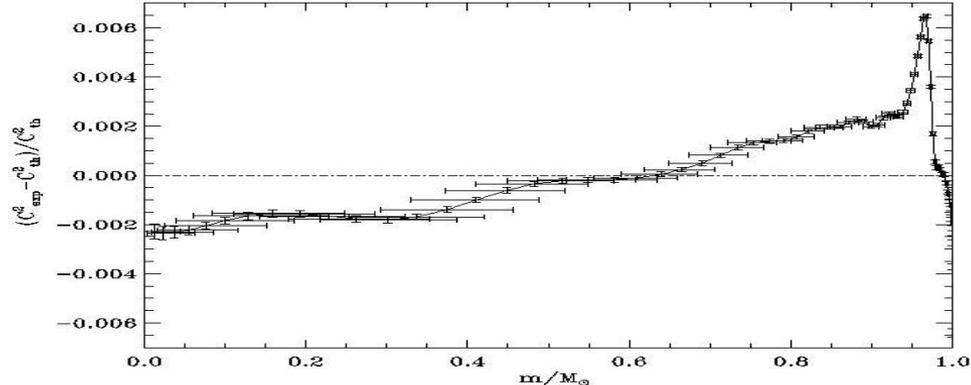
Solar Probe Plus

Radiat
Belt S
Pro

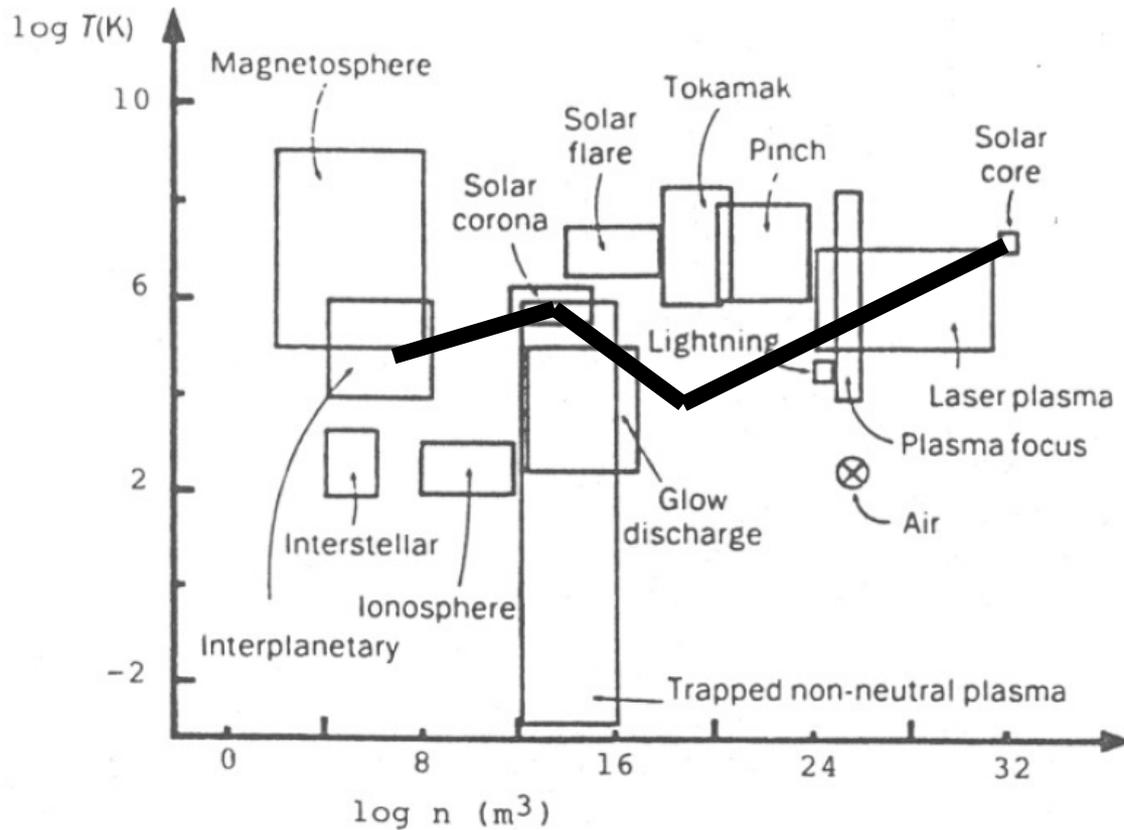
Conclusion

- Ces techniques sont applicables à d'autres étoiles : l'astérosismologie (projet COROT)
-
- Encore beaucoup d'efforts pour comprendre l'intérieur du Soleil :
- Il reste (entre autres) à « mesurer » le cœur
- Beaucoup d'efforts aussi pour comprendre le magnétisme solaire et en particulier sa source interne ...
- Mais enjeu important pour la compréhension des relations Soleil-Terre et la météorologie de l'espace

Comment améliorer les modèles internes



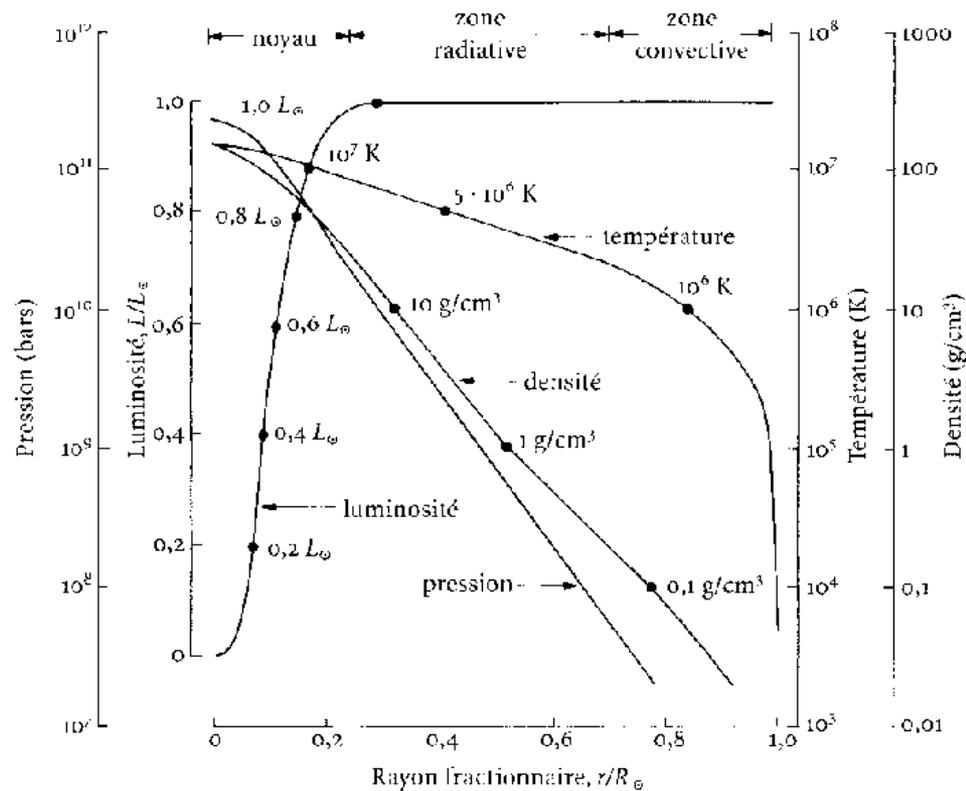
Intérieur, couronne et vent solaire dans le « spectre » des plasmas



Petrasso, *Nature*, 1990

I. Le Soleil, sa structure interne

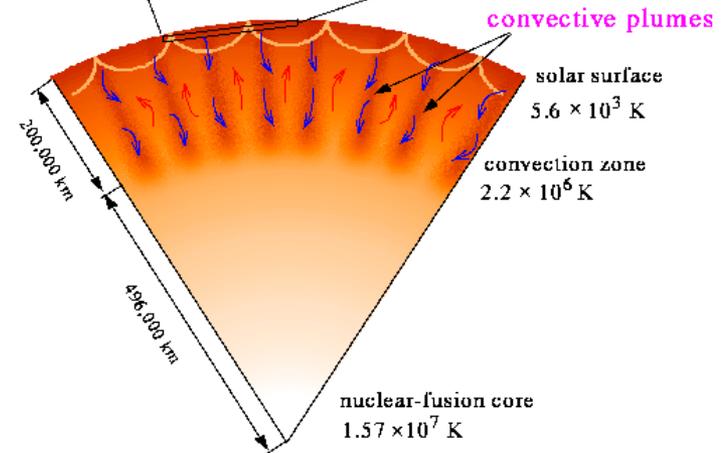
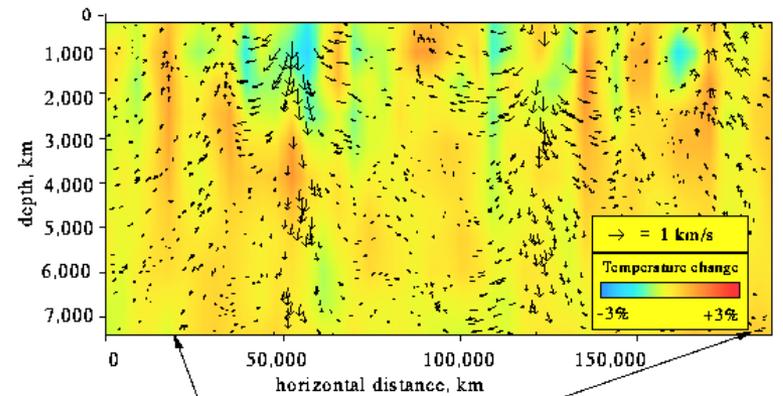
Un modèle détaillé de l'intérieur solaire



IV. La rotation du Soleil

Une mesure des mouvements de convection (vitesse et température)

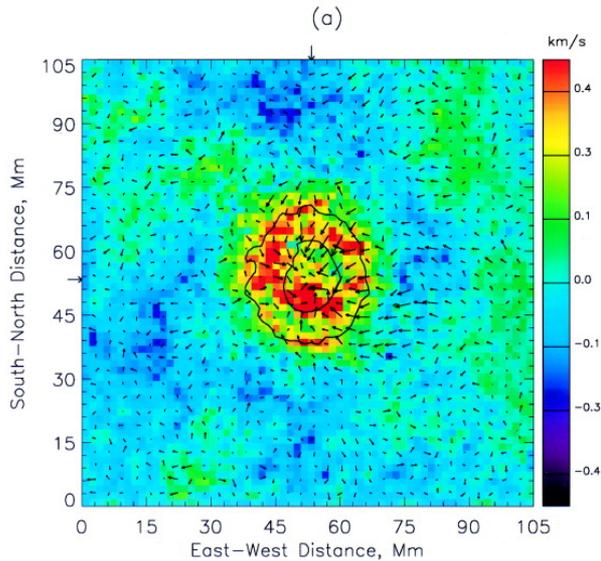
Convective Flows Below The Sun's Surface



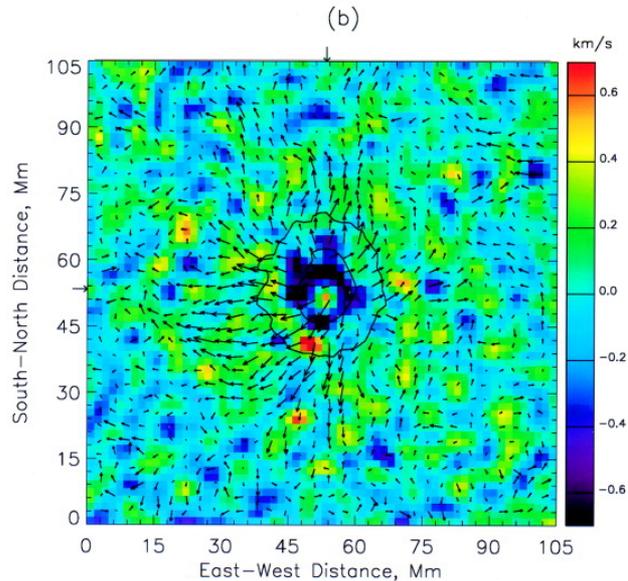
L'intérieur magnétique

- Mouvements de matière sous une tache

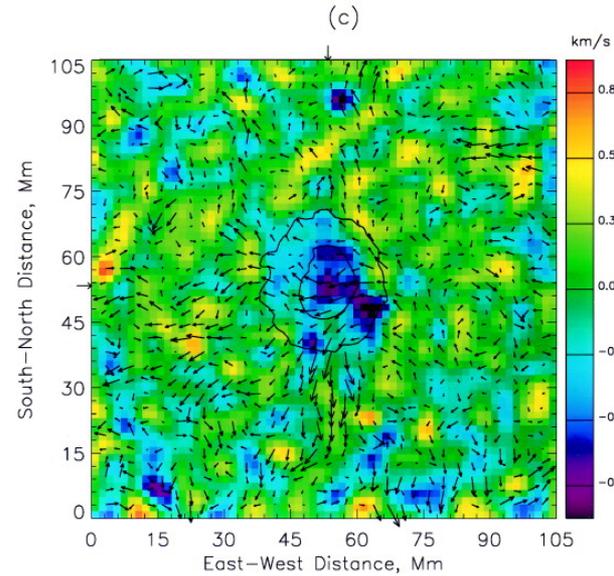
Z=0-3Mm



Z=6-9Mm



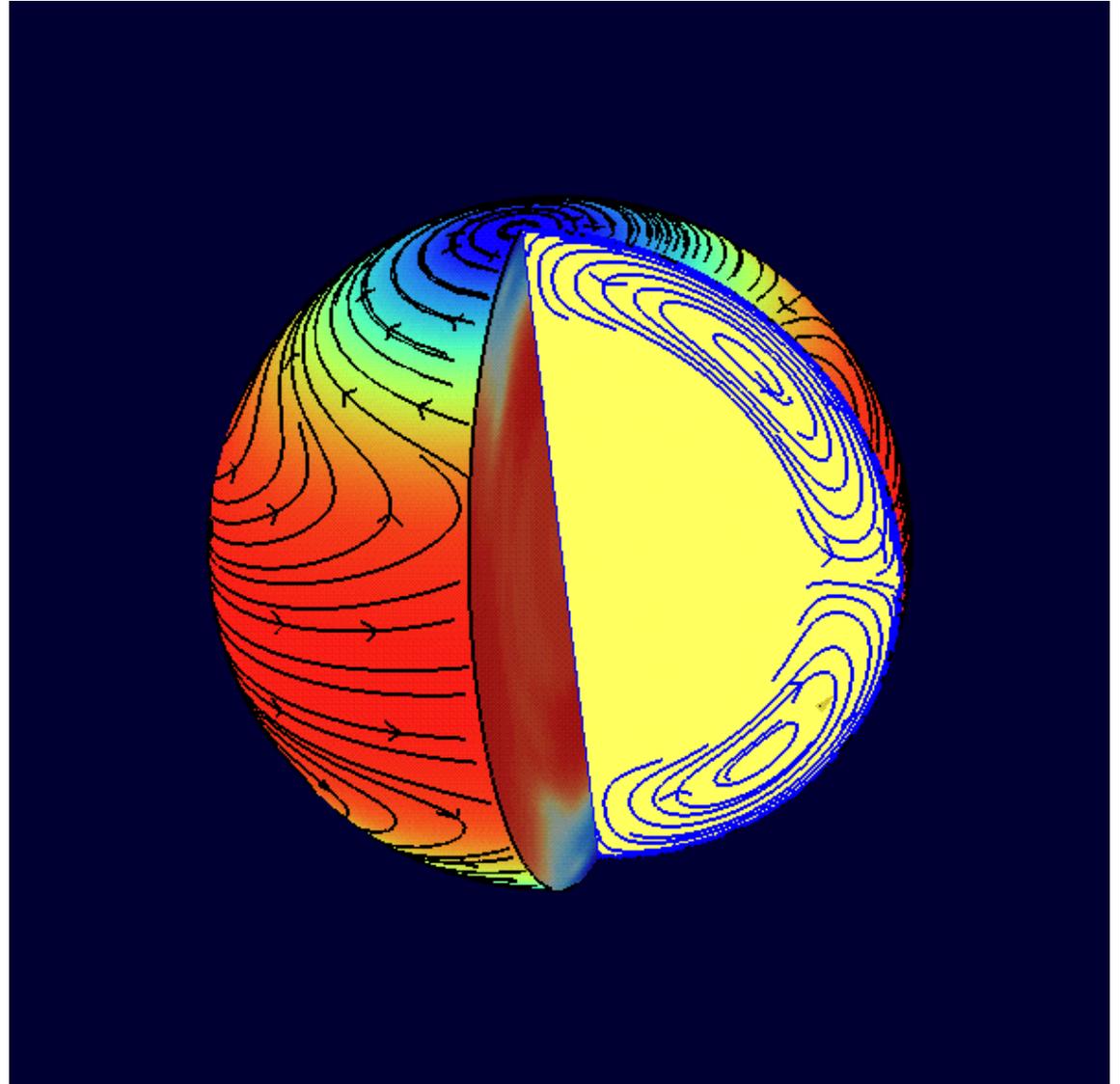
Z=9-12Mm



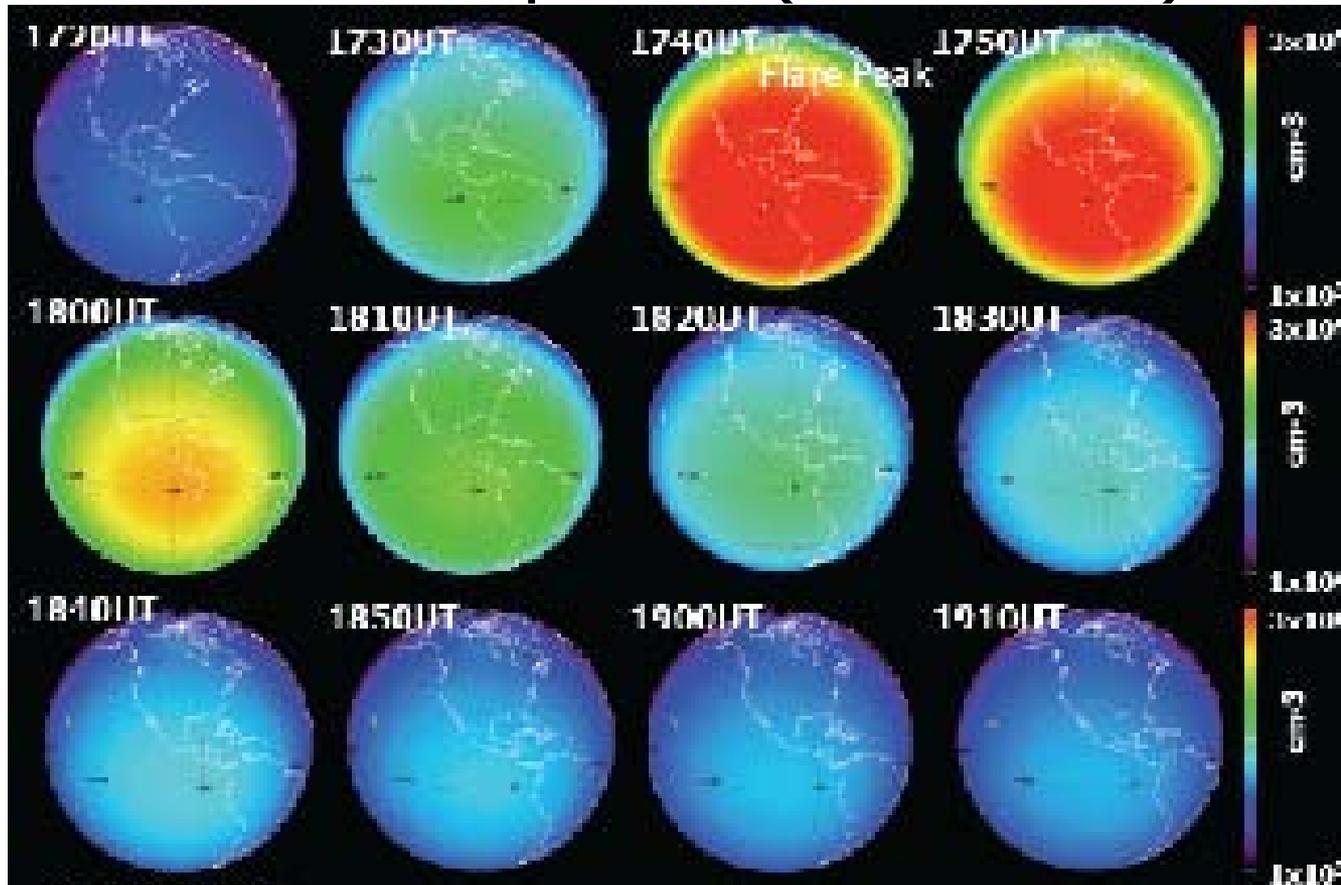
Rouge = descend / Bleu = monte

IV. La rotation du Soleil

Des courants de
matière
électrisée dans
la zone convective

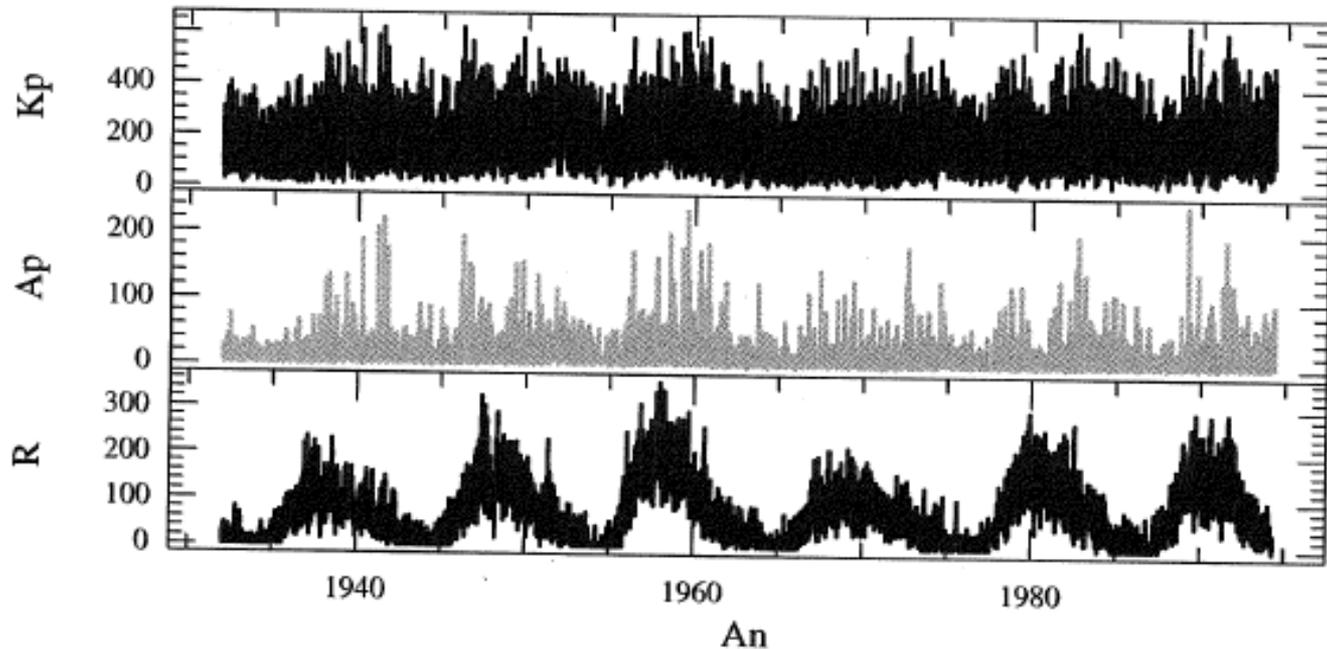


Impact d'une éruption solaire sur la densité électronique dans la thermosphère (à 110 km)



Le Soleil et la Terre

- Magnétisme Terrestre et Activité Solaire

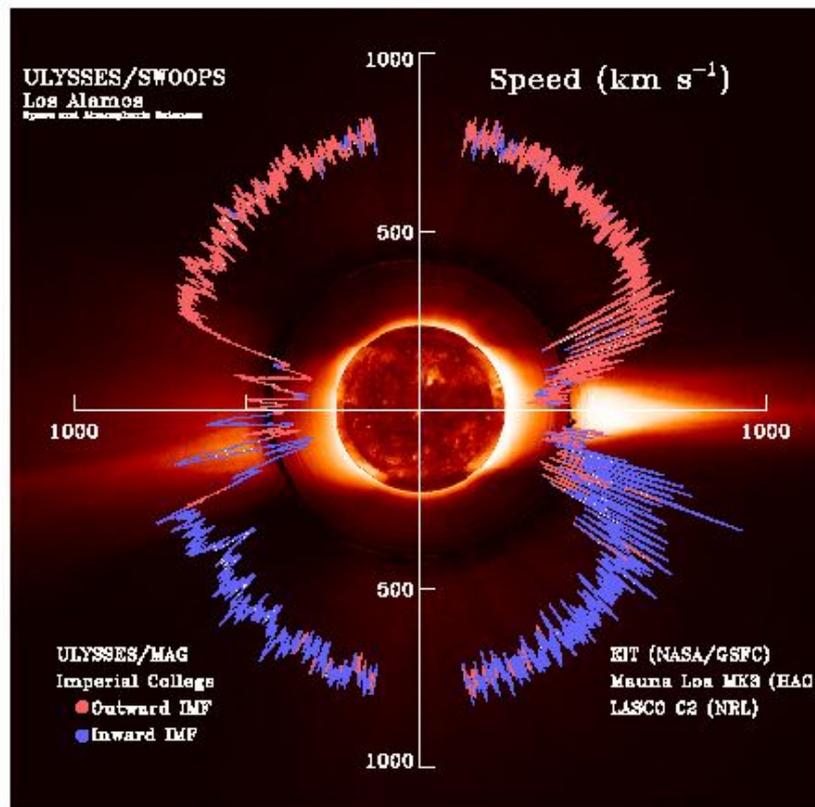


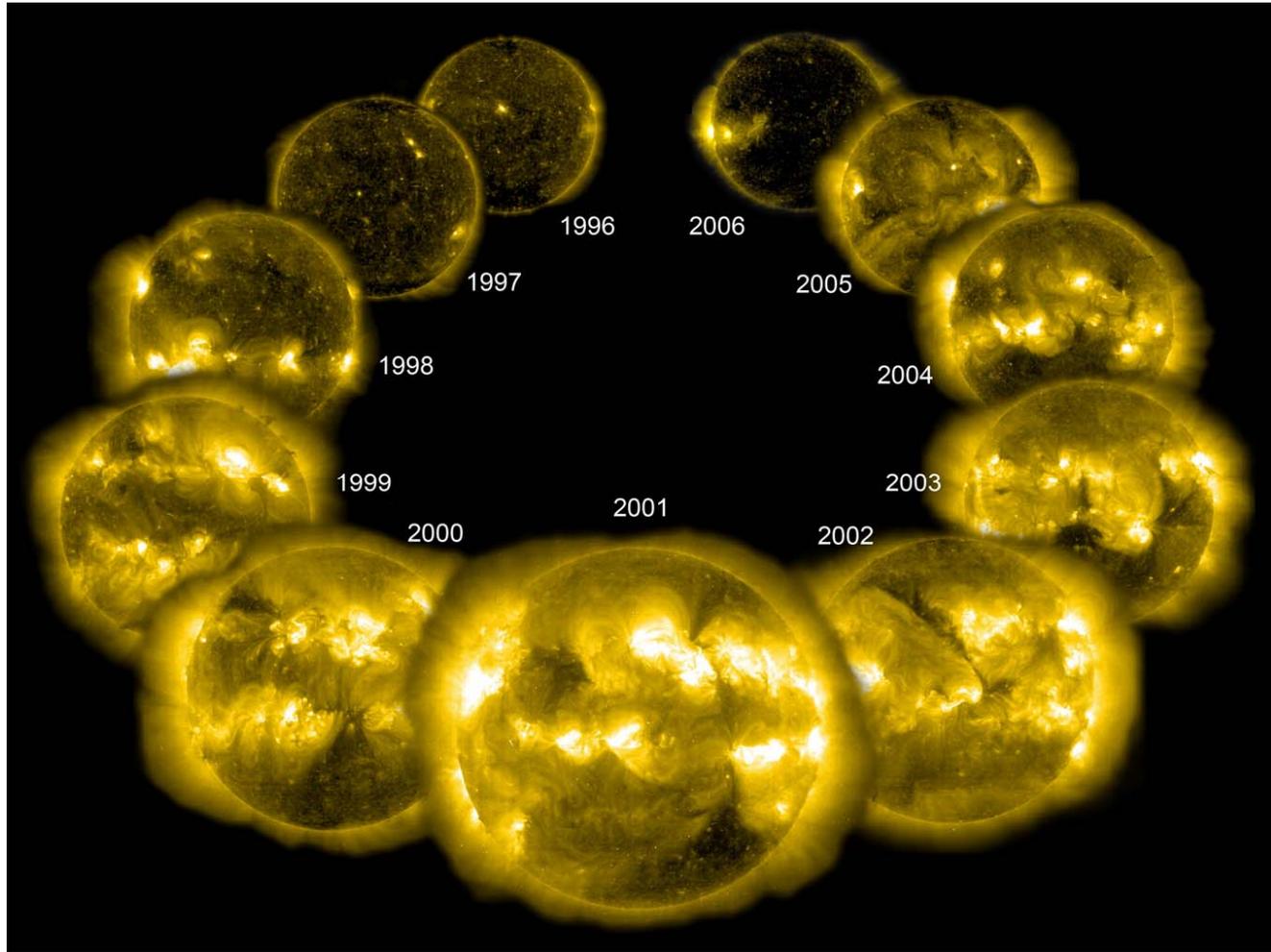
Lilensten & Bletly 1999

Quand le Soleil perd du poids : le(s) vent(s) solaire(s)

Perte de masse : million de tonnes par seconde

Ce vent est une brise (vitesse entre 400 et 800 km/s)

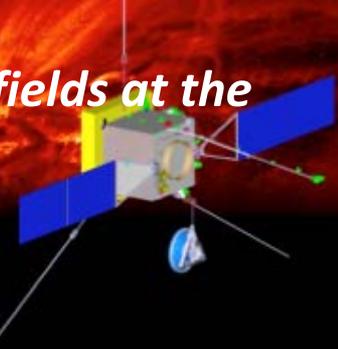




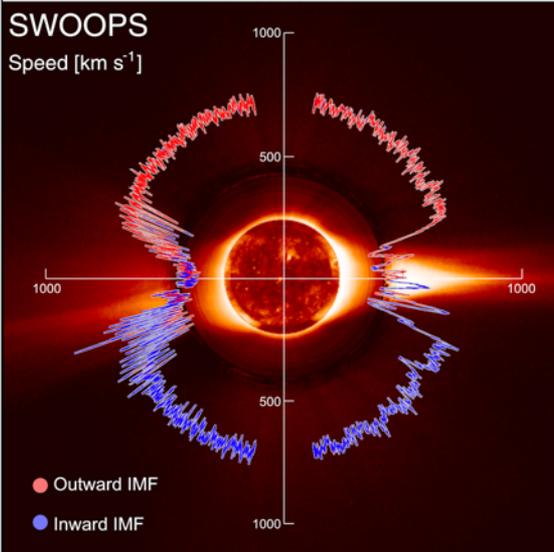
EIT/SOHO

La Physique solaire - Poitiers - 16
février 2011

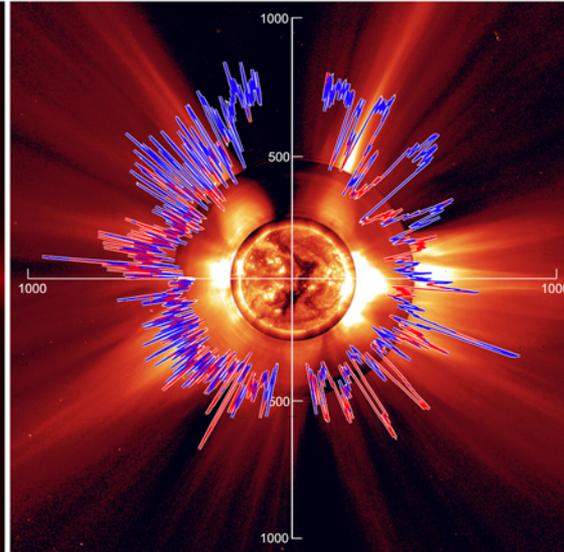
SOLAR ORBITER and dynamics of the magnetic fields at the sources of the fast and slow solar wind



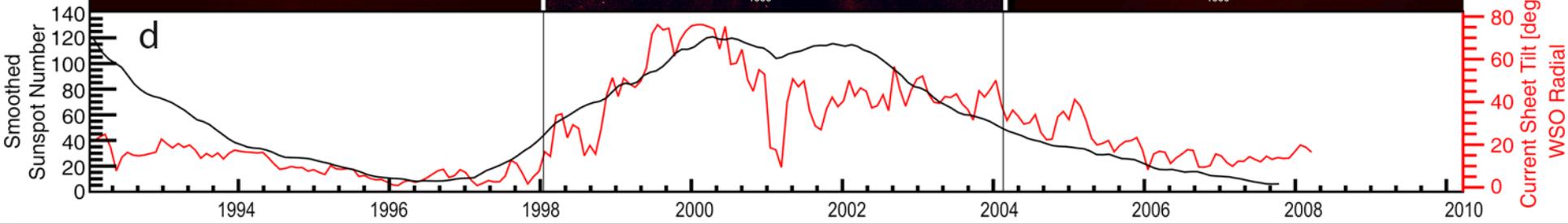
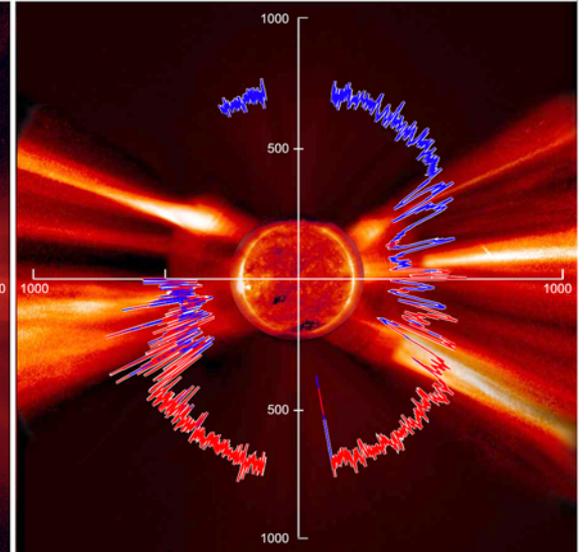
a Ulysses First Orbit



b Ulysses Second Orbit

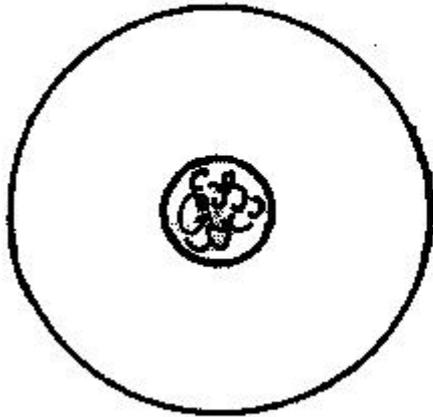


c Ulysses Third Orbit

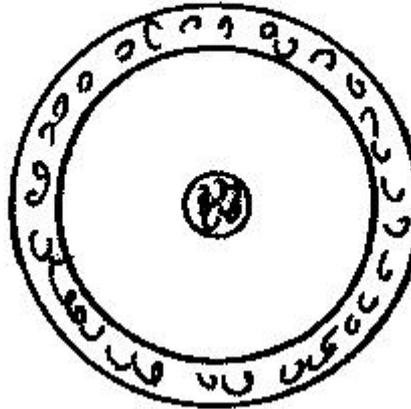


Le cas des autres étoiles:

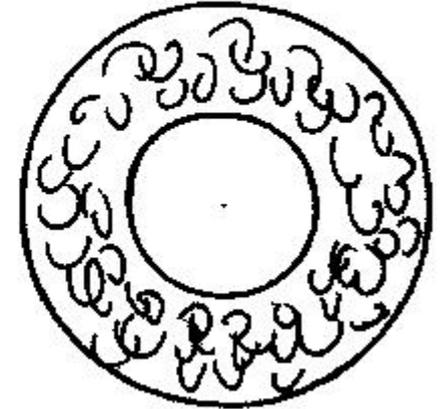
$$M \geq 2M_{\odot}$$



$$1M_{\odot} < M < 2M_{\odot}$$



$$M \leq 1M_{\odot}$$



Baudin, 2004

La rotation du Soleil

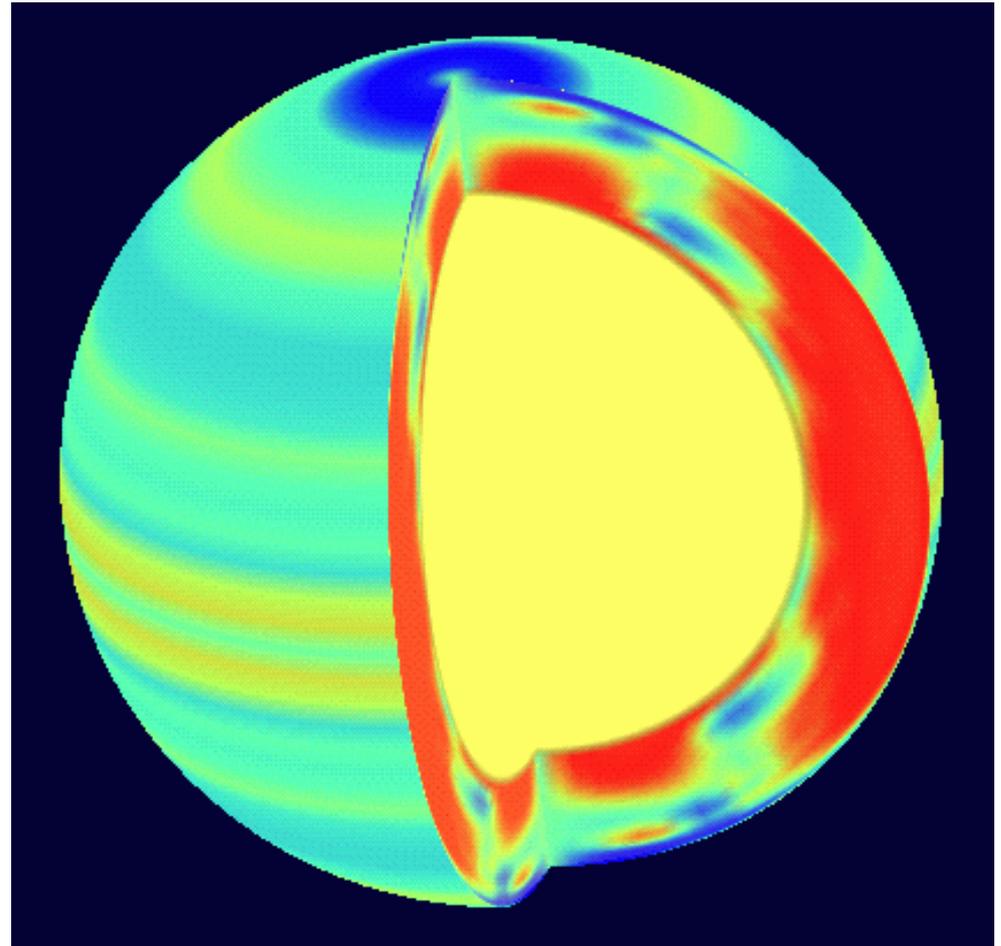
En surface :
rotation différentielle

Zone convective : s'atténue
et s'annule au sommet de la

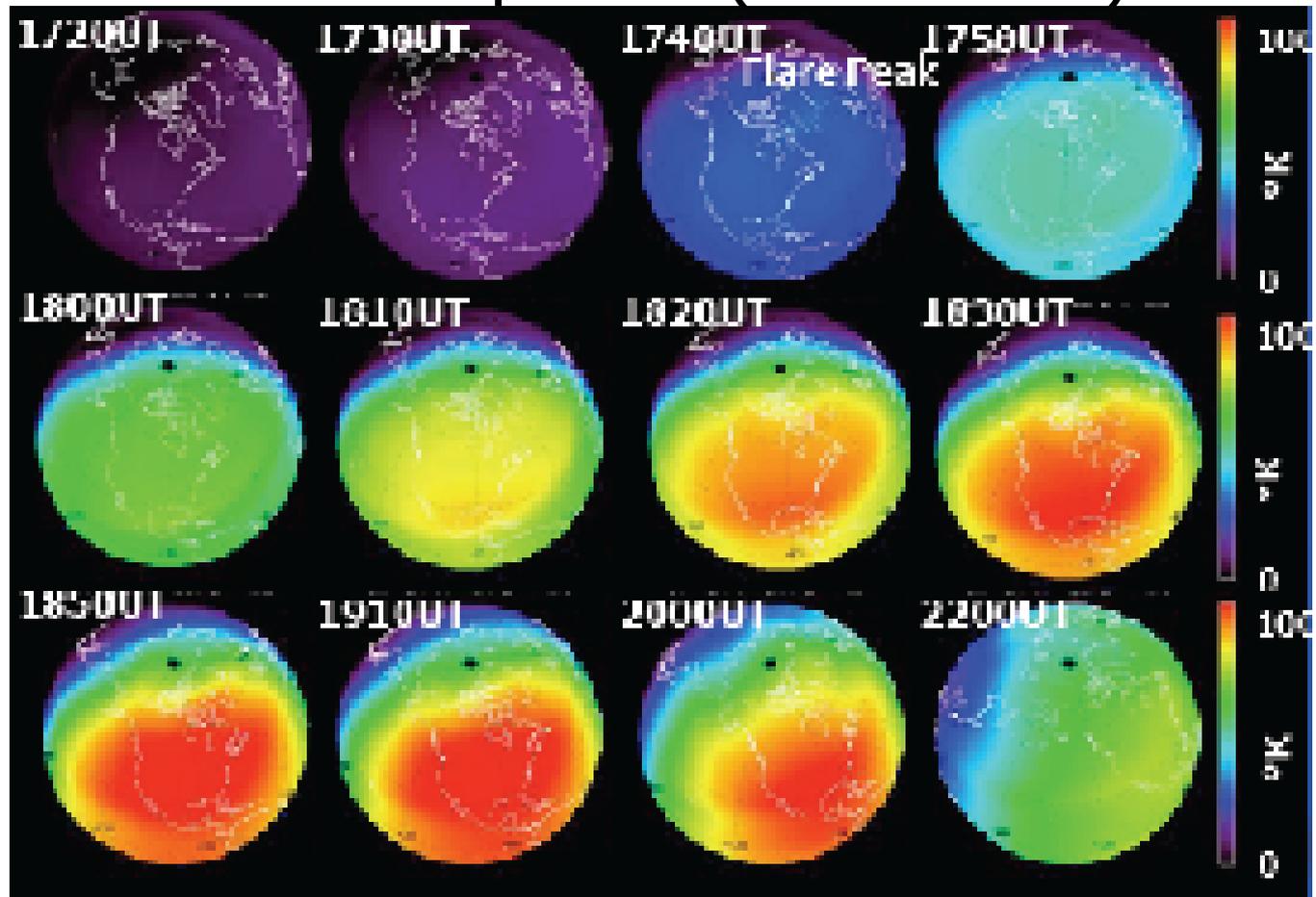
Zone radiative où tout le
monde tourne à la même
vitesse

Entre les deux :
la tachocline : périodicité de
 ~ 1.3 an dans sa rotation

Et le coeur ?



Impact d'une éruption solaire sur la température des neutres dans la thermosphère (à 350 km)



Le Soleil et la Terre

- **Les pannes de satellites :**
 - **De l'anomalie réparable (erreur électronique) ou la dégradation lente (panneaux solaires)**
 - **A la panne fatale :**
 - **Telestar 401 (Jan 11 1997) (la télé...)**
 - **Galaxy IV (1998) (les mobiles...)**
 - **500 millions \$ perdus en 4 ans à cause des orages solaires ? (anomalies pas forcément toutes rapportées ...)**