

Le Soleil: structure interne et atmosphère

Jean Louis ZERBO

jeanlouis.zerbo@gmail.com

jeanlouis.zerbo@u-naziboni.bf

Université Nazi

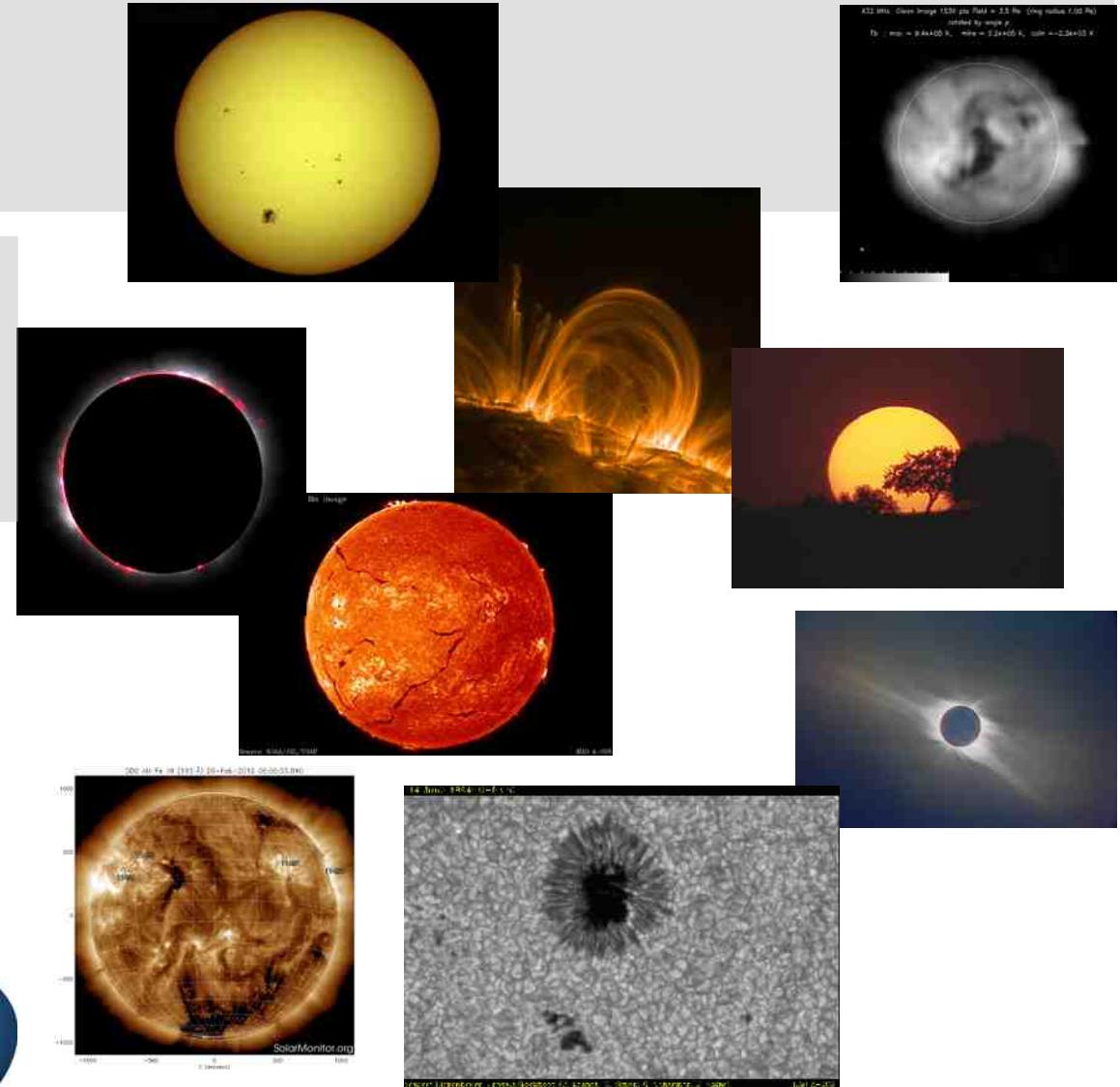
BONI

Bobo-Dioulasso



- BURKINA FASO
Karl Ludwig Klein

ludwig.klein@obspm.fr,



Soleil, activité, environnement spatial de la Terre

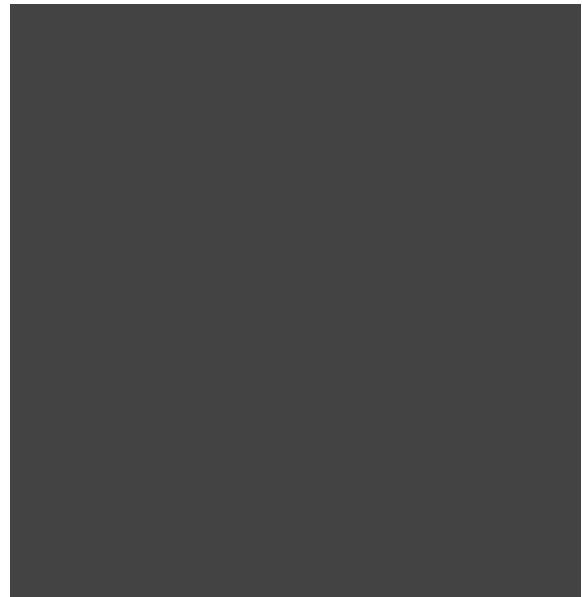
La météorologie de l'espace



© C. Viladrich

- Champ magnétique « ancré » dans un gaz en mouvement (convection): transport d'énergie vers couronne, instabilités
- Libération d'énergie dans la couronne (éruptions solaires) et éjection des structures magnétiques (éjections coronales de masse – CMEs), champs électriques => accélération de particules et chauffage du plasma
- Cycle d'activité d'environ 11 ans

- Couronne solaire: non-symétrique (champ magnétique), haute température
- Haute pression: vent solaire



Observatoire du Pic du Midi

Le Soleil: structure interne et atmosphère

Plan

- Carte d'identité
- Structure interne : génération et transport d'énergie
- L'atmosphère solaire : de la photosphère à la couronne
- Le vent solaire

Le Soleil

Carte d'identité



Le Soleil: carte d'identité

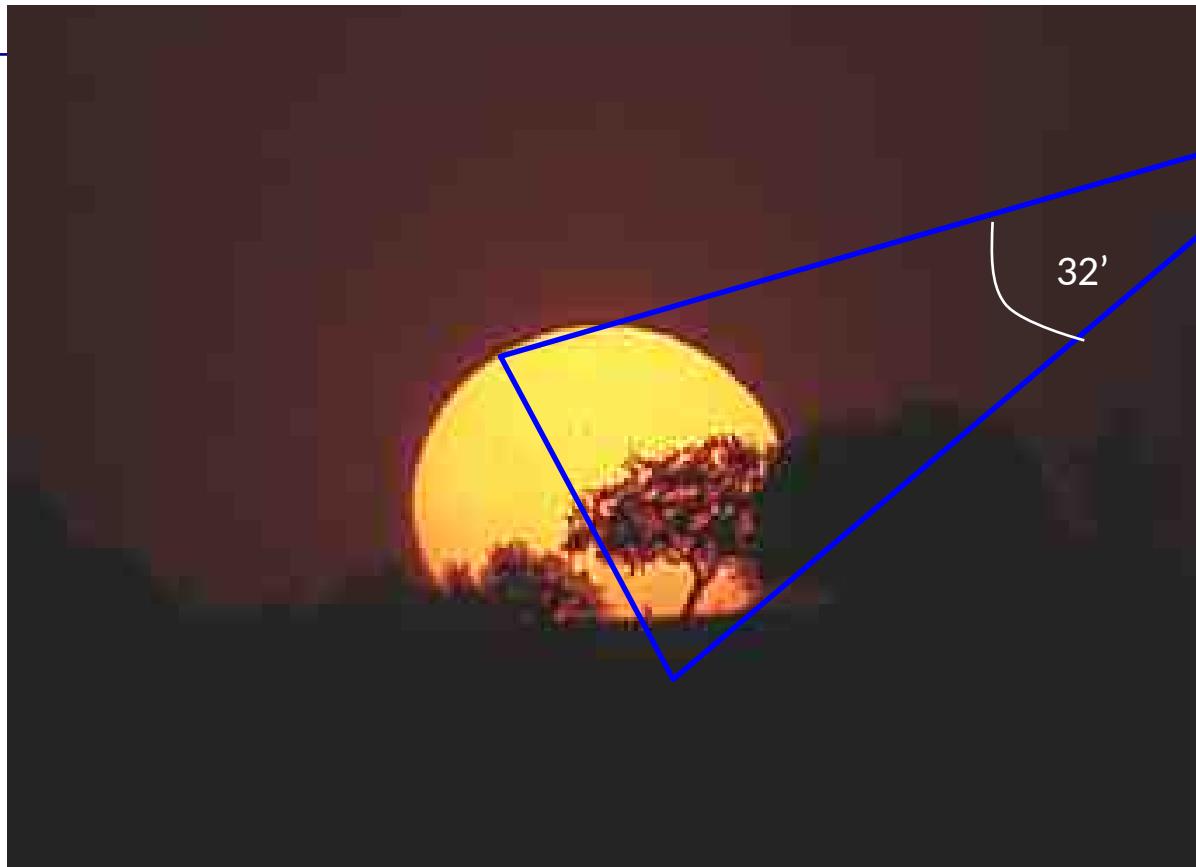
Taille

- astre sphérique
- couche visible (“photosphère”): ~jaune (vue depuis le sol de la Terre)

Le Soleil: carte d'identité

Taille

solaire.obspm.fr/pages/galerie/couchers.html



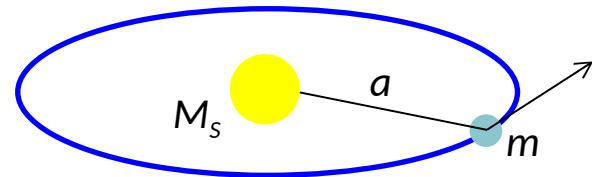
- diamètre:
 - environ 32', depuis la Terre (rayon apparent)
 - 14×10^8 m ($\approx 110 \times$ la Terre) => rayon solaire $R_s = 7 \times 10^8$ m

- distance moyenne de la Terre (unité astronomique, UA): $1,5 \times 10^{11}$ m
- temps de parcours de la lumière ~ 500 s (8 min)

Le Soleil: carte d'identité

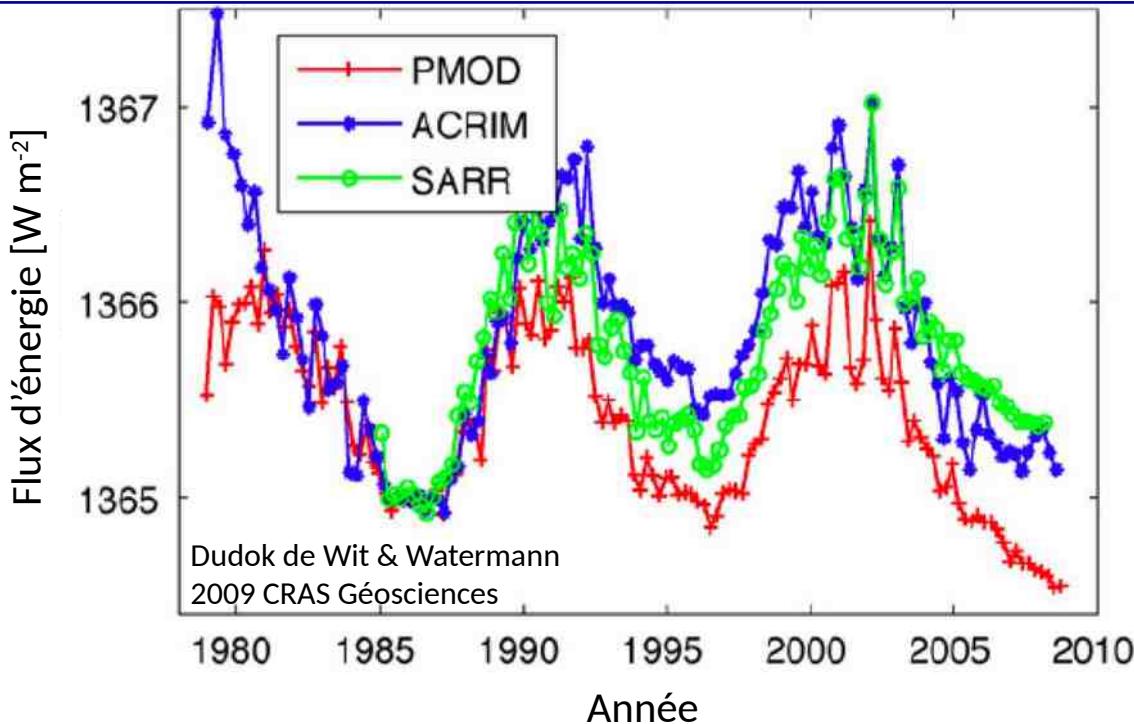
Masse

- A partir de la loi de gravitation, en simplifiant: hypothèse que la Terre a une orbite circulaire de rayon $a=1$ UA autour du Soleil qui est au centre.
- Orbite circulaire :
- Force centripète :
- Force de gravitation (Newton) :
- Détermination de la masse M_s :
- v = vitesse orbitale moyenne de la Terre, M_s = masse du Soleil,
 m = masse de la Terre, $G=6,7 \times 10^{-11} \text{ N m}^2 \text{ kg}^{-2}$ = cte. de gravitation.



Le Soleil: carte d'identité

Flux d'énergie

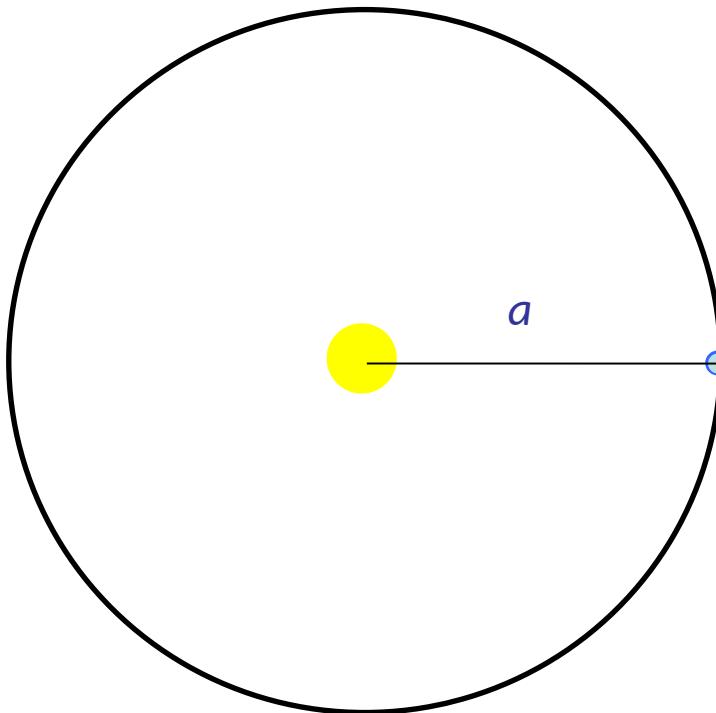


- Mesures depuis des satellites (élimination de l'absorption atmosphérique)
- flux d'énergie environ $1,366 \text{ kW m}^{-2} \approx 1,4 \text{ kW m}^{-2}$ (« constante solaire »)
- légère variation (~1 pour mil), rythme environ 11 ans

Le Soleil: carte d'identité

Puissance rayonnée

- A la distance de la Terre ($a=1$ UA), l'énergie émise par le Soleil est répartie sur une sphère de rayon a et de surface $4\pi a^2$.
- Le flux d'énergie est la puissance rayonnée par le Soleil (L) divisée par cette surface :
- Puissance rayonnée par le Soleil (luminosité):



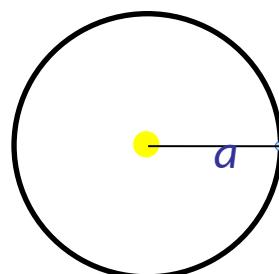
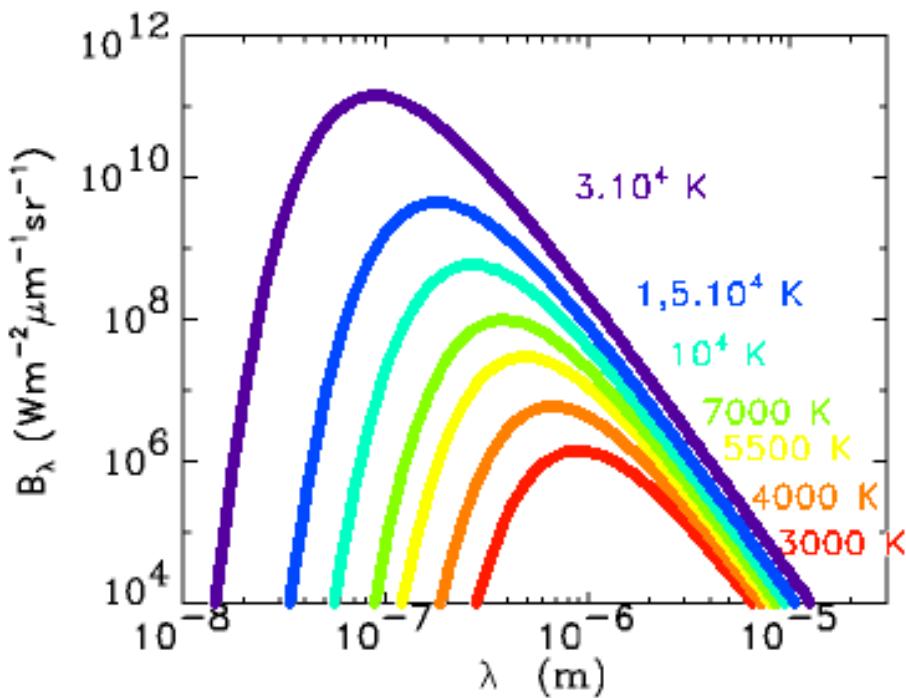
Le Soleil: carte d'identité

Température

- Répartition spectrale de la brillance décrite par la loi de Planck (1900) du corps noir (gaz dense)
- On en déduit deux lois qui étaient connues empiriquement avant:

- longueur d'onde du maximum de brillance $\lambda_m \propto T^{-1}$ (Wien 1893)

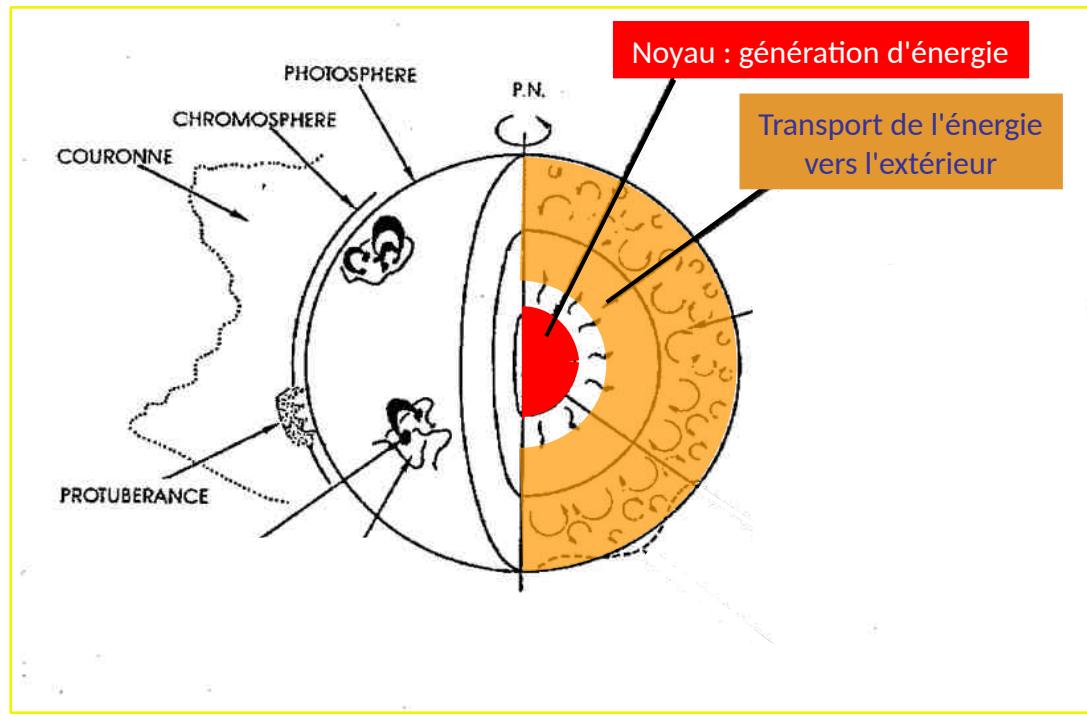
- flux émis $F = \sigma T^4$ (Stefan 1879),
 $\sigma = 5,67 \times 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$



Le Soleil: structure interne

Processus de
génération d'énergie

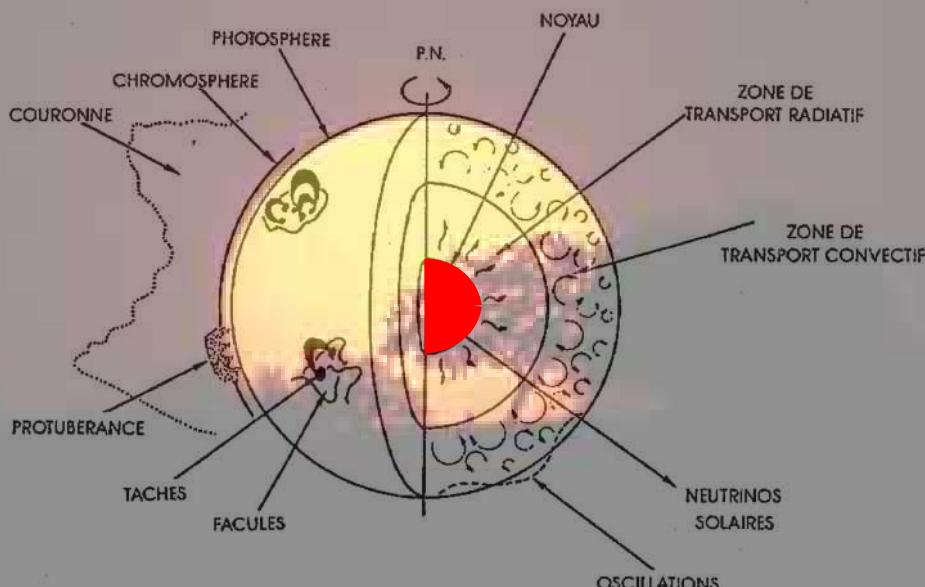
Le Soleil: structure interne Génération et transport d'énergie



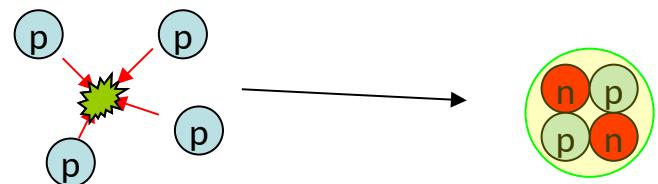
- Deux problèmes physiques à discuter:
 - Où le Soleil puise-t-il l'énergie qu'il rayonne ? Quels processus ?
 - Comment cette énergie est-elle transportée de la région centrale du Soleil (noyau) vers l'extérieur ?

Le Soleil: structure interne

Fusion nucléaire



- 4 protons (H) 1 noyau He (2p, 2n – deux p sont convertis en n pendant ce processus)



Bilan des masses de cette réaction :

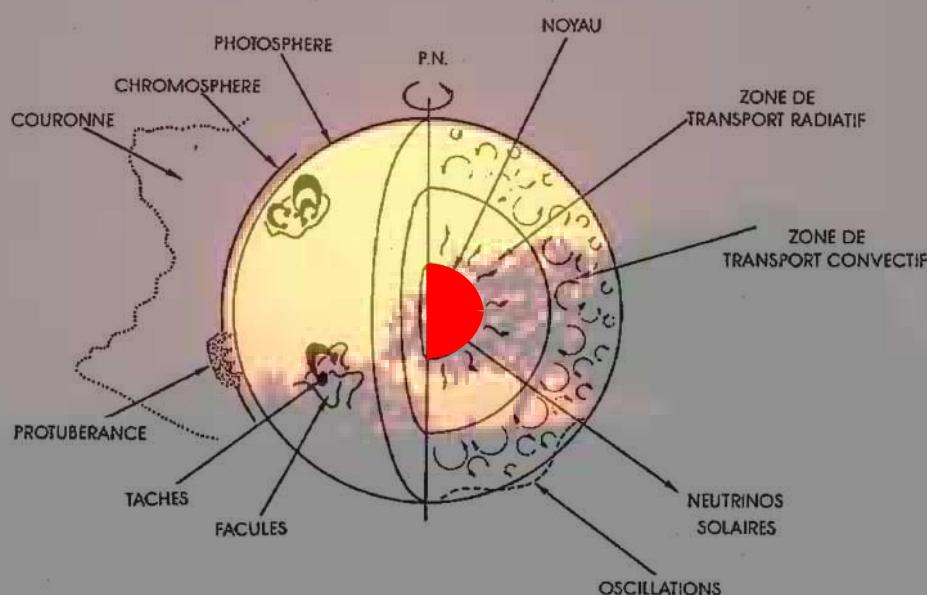
$$\text{proton } m_p = 1,6725 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$$

$$\text{neutron } m_n = 1,6748 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$$

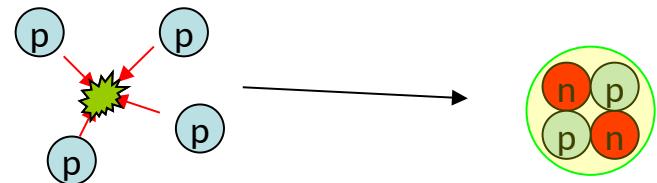
$$\text{Hélium } m_{He} = 6,6459 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$$

Le Soleil: structure interne

Fusion nucléaire



- 4 protons (H) 1 noyau He (2p, 2n – deux p sont convertis en n pendant ce processus)



- Perte de masse:

$$m = 2m_p + 2m_n - m_{He}$$

$$0,029m_p \quad 4,9 \times 10^{-29} \text{ kg}$$

- Equivalent d'énergie
- $E = m c^2 \quad 4,4 \times 10^{-12} \text{ J}$
28 MeV
- MeV = mega-électron-Volt

Bilan des masses de cette réaction :

$$\text{proton } m_p = 1,6725 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$$

$$\text{neutron } m_n = 1,6748 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$$

$$\text{Hélium } m_{He} = 6,6459 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$$

Le Soleil: structure interne

Fusion nucléaire

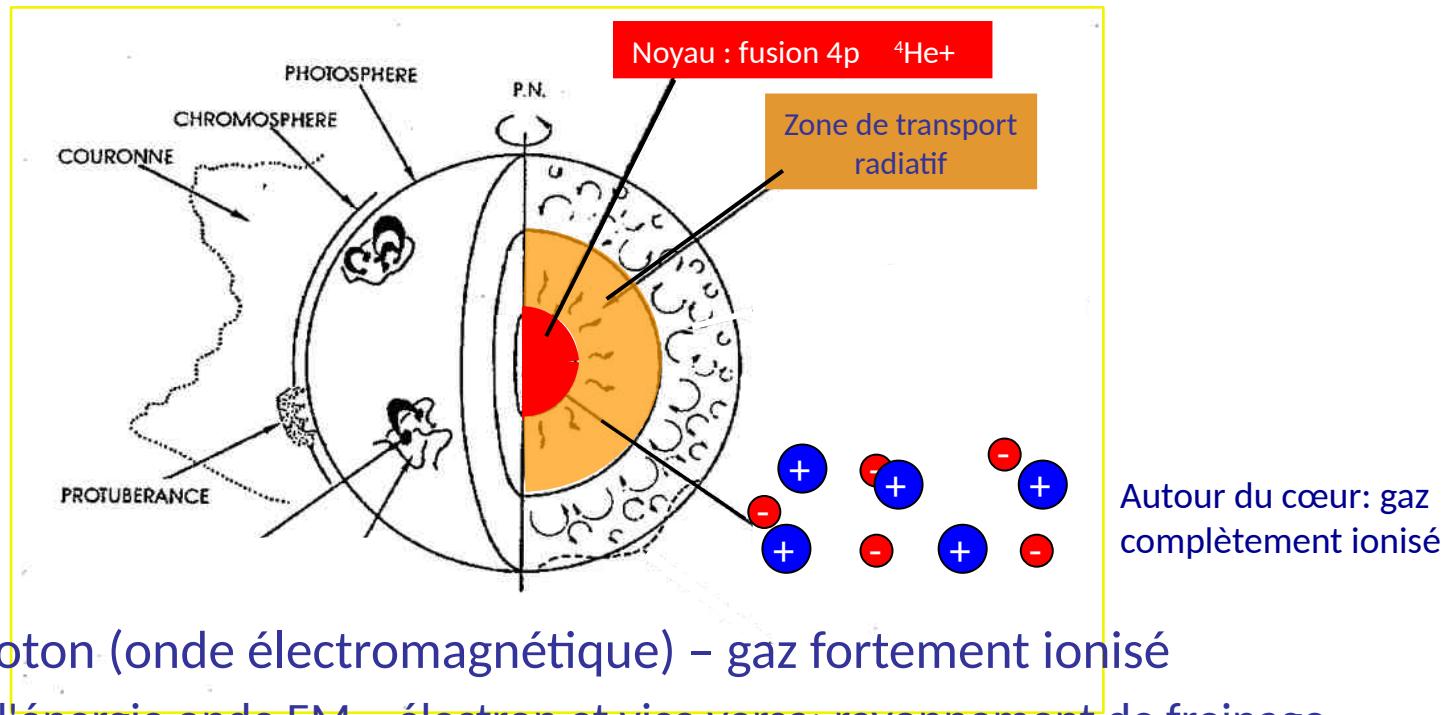
- Chaîne de fusions successives (Atkinson & Houtermans, Bethe, von Weizsäcker 1930-1940)
- Réaction la plus fréquente dans le Soleil:
- Energie libérée par réaction: 28 MeV, dont environ 26 MeV sous forme de photons de rayonnement gamma (γ), 2 MeV sous forme de neutrinos (ν)

Le Soleil: structure interne

Processus de
transport d'énergie

Le Soleil: structure interne

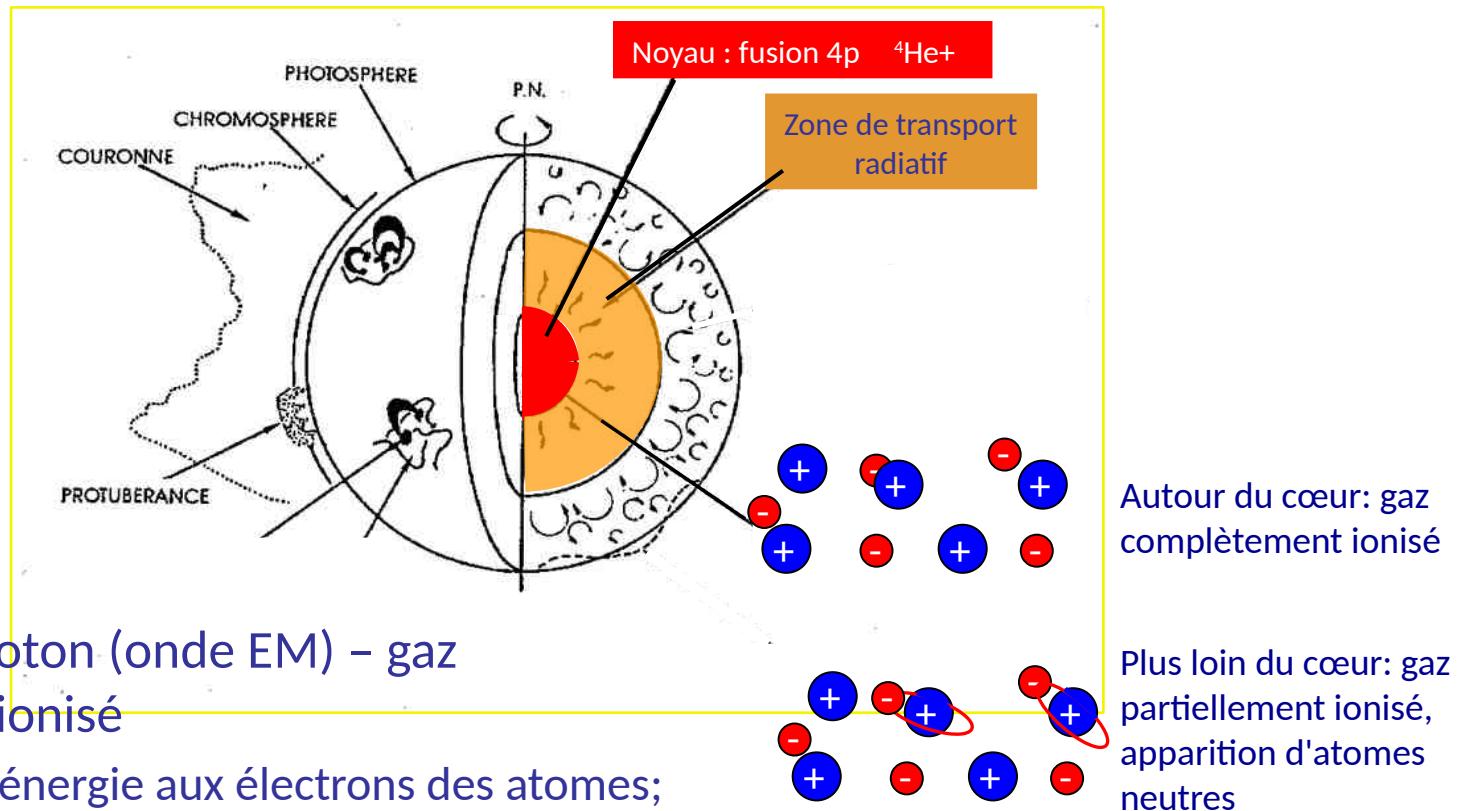
Transport d'énergie par rayonnement



- Interaction photon (onde électromagnétique) – gaz fortement ionisé
 - transferts d'énergie onde EM – électron et vice versa: rayonnement de freinage (électron, ion, onde EM) et diffusion Thomson (électron, onde EM)
 - transport de l'énergie par une succession de processus d'absorption et émission dans une direction quelconque
 - parcours aléatoire de l'énergie, durée de parcours $> 10^5$ ans; baisse T vers l'extérieur

Le Soleil: structure interne

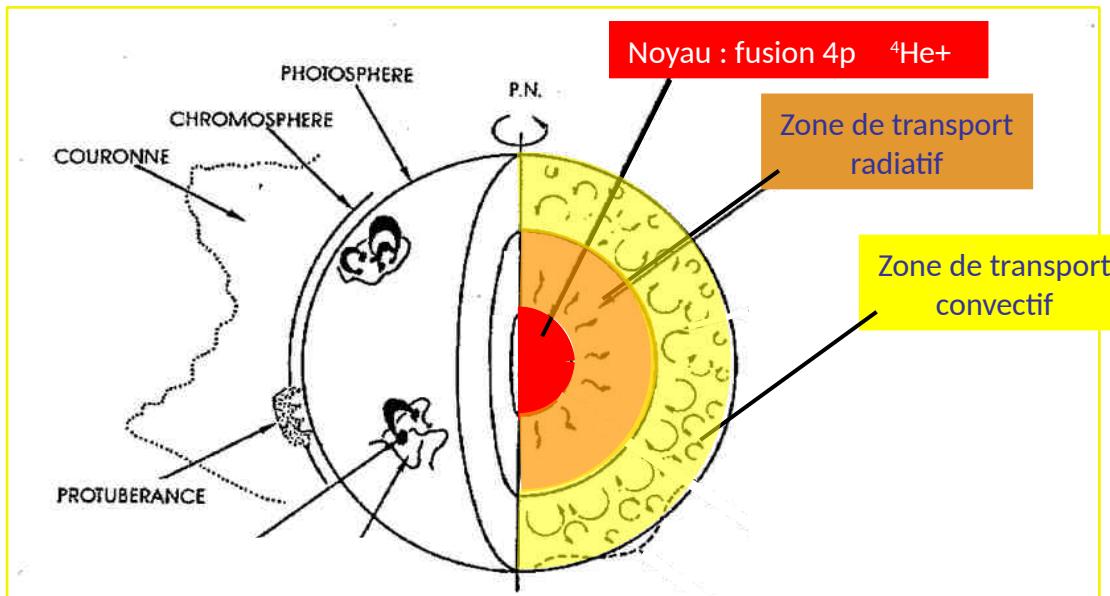
Transport d'énergie par rayonnement



- Interaction photon (onde EM) – gaz partiellement ionisé
 - transfert d'énergie aux électrons des atomes; chauffage local
 - accumulation locale de l'énergie, puisque réduction du transport radiatif
 - une situation instable

Le Soleil: structure interne

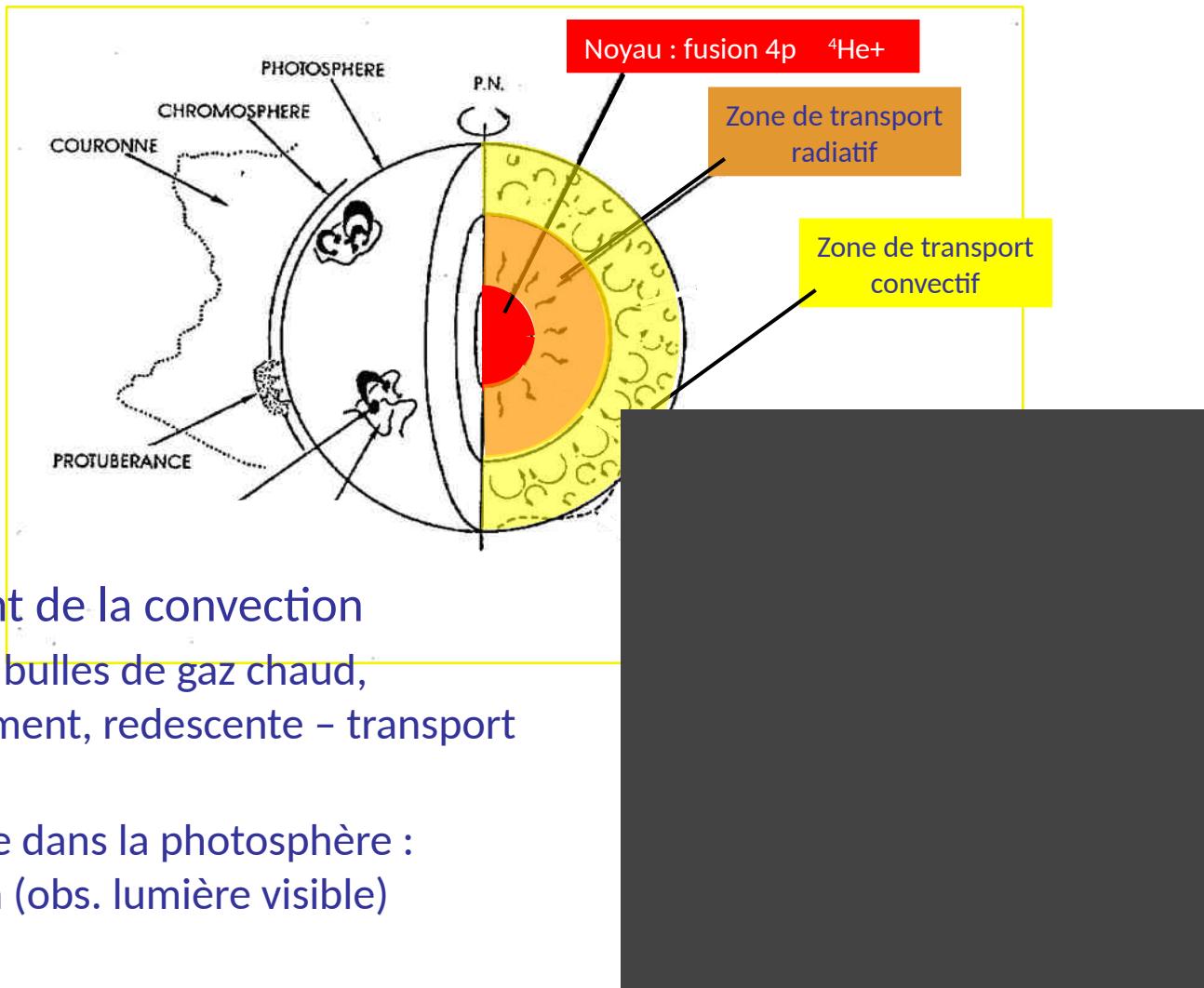
Transport d'énergie par convection



- Déclenchement de la convection
 - montée de bulles de gaz chaud, refroidissement, redescente – transport convectif
 - trace visible dans la photosphère : granulation

Le Soleil: structure interne

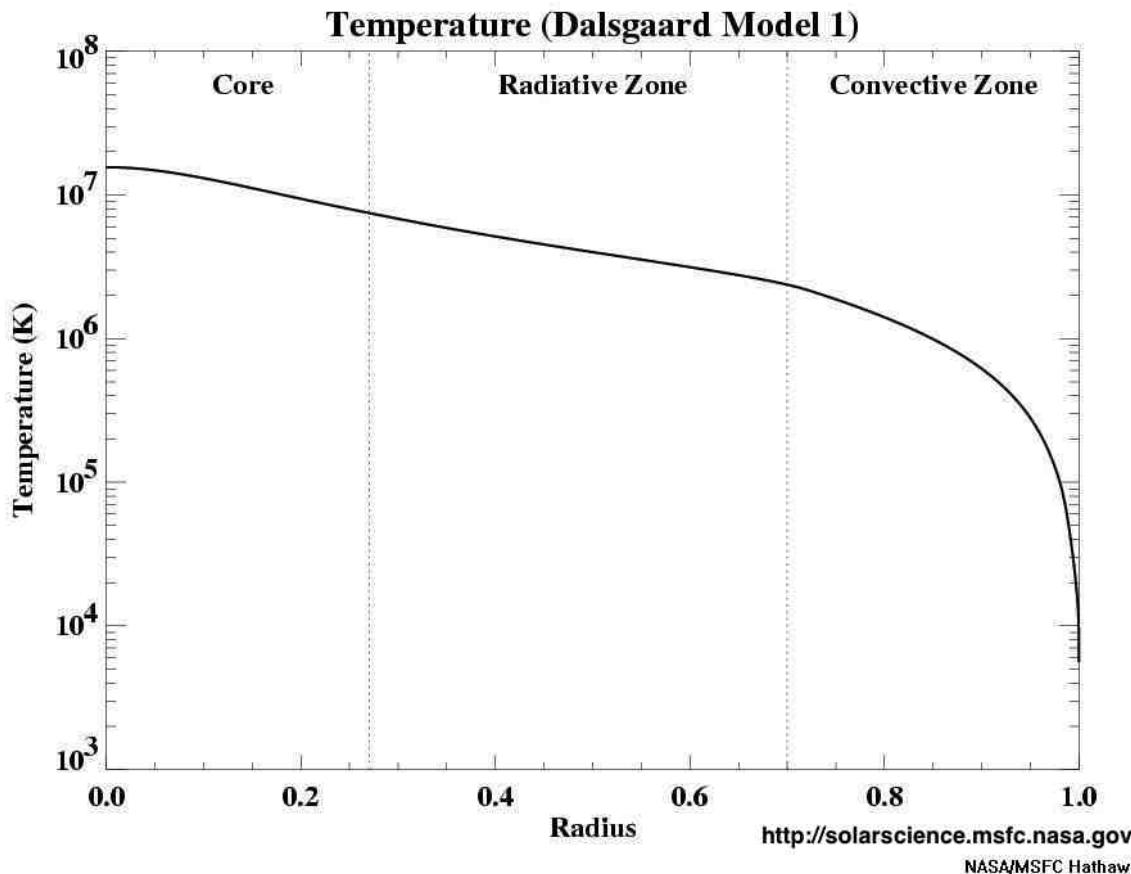
Transport d'énergie par convection



Le Soleil: structure interne

Profil de température

- Profil de température à l'intérieur du Soleil
 - modèle
 - calcul du profil de la vitesse du son
 - comparaison avec les résultats de l'héliosismologie

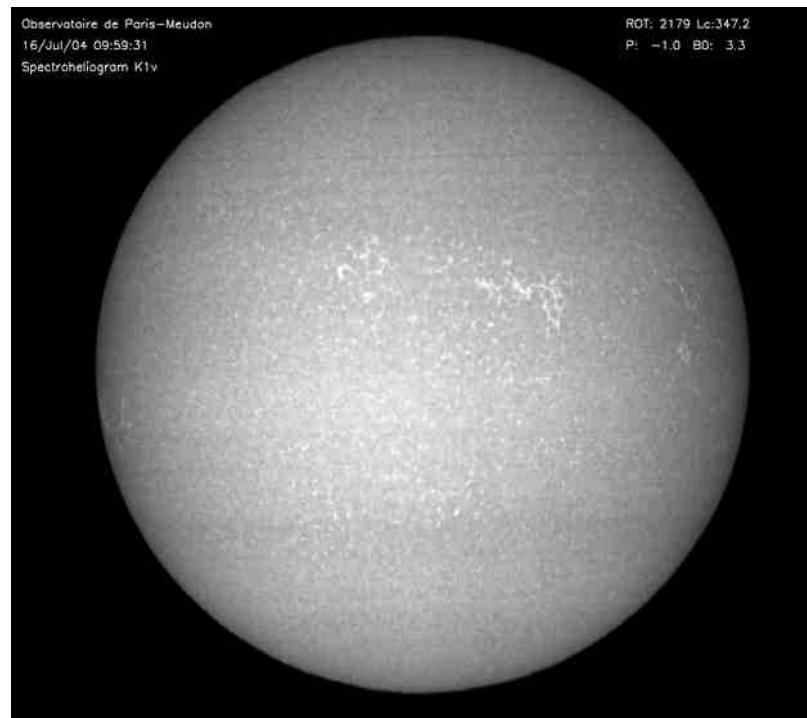


Le Soleil: atmosphère

De la photosphère à la couronne

Le Soleil: atmosphère La photosphère

- Un modèle simple: équilibre hydrostatique (force : gravitation)
- Equation d'Euler statique (vecteur vitesse $v=0$):
- Configuration à symétrie sphérique:
- Profil de pression (masse volumique) si $T=T_0=\text{cte}$:
- Hauteur d'échelle :



Cliché Obs. Paris (Meudon): bass2000.obspm.fr

Le Soleil: atmosphère

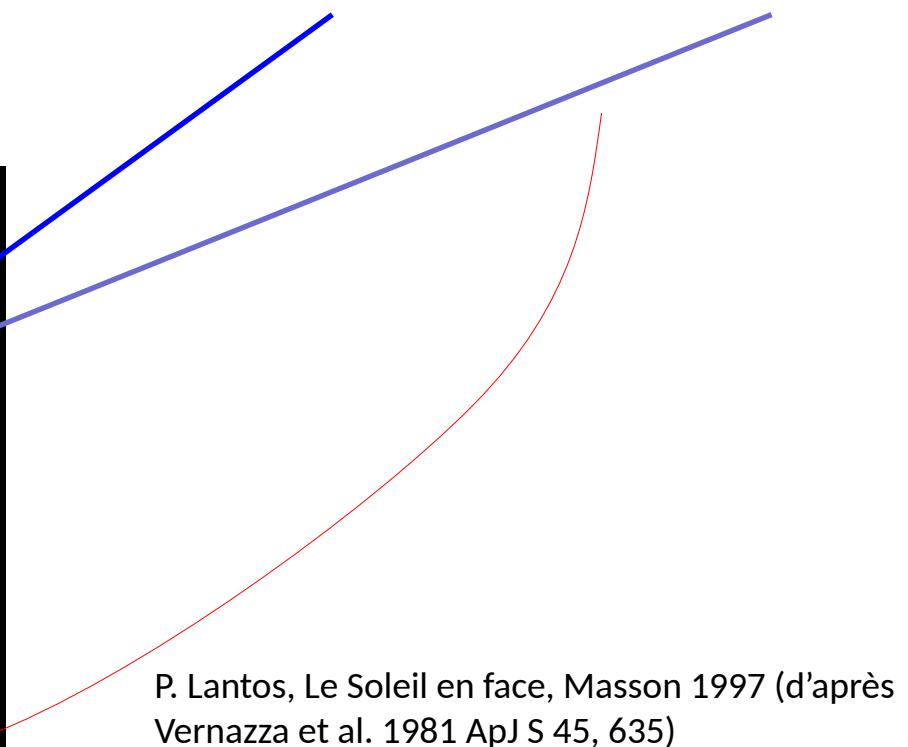
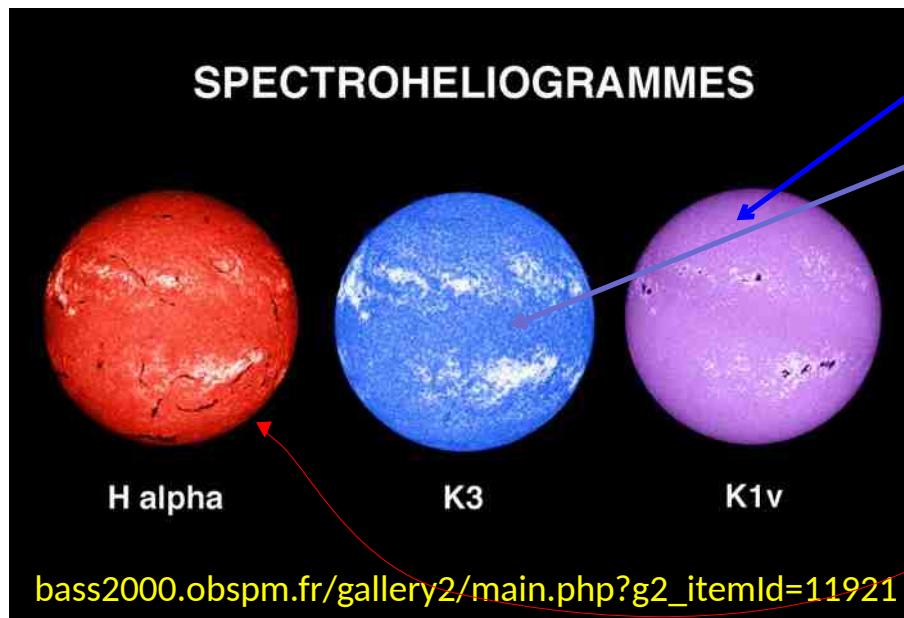
Profil de température

- Profil de température dans la photosphère et au-dessus
 - décroissance de la basse vers la haute photosphère:
5800 K 4000 K
 - remontée avec l'altitude au-dessus (chromosphère) : 4000 K 8000 K
 - montée raide au-dessus (zone de transition) jusque dans la couronne (1-2 millions K)

P. Lantos, Le Soleil en face, Masson 1997 (d'après Vernazza et al. 1981 ApJ S 45, 635)

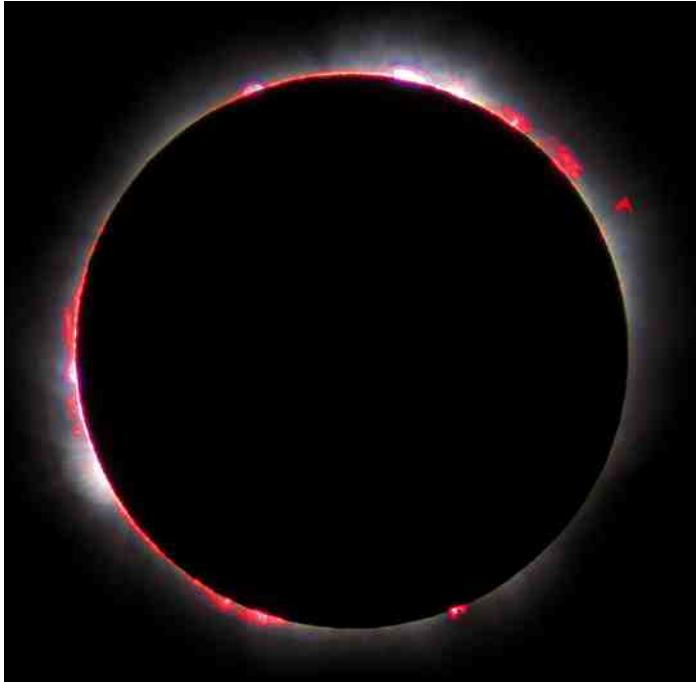
Le Soleil: atmosphère Profil de température

- Profil de température dans la photosphère et au-dessus



Le Soleil: atmosphère La chromosphère

<http://fr.wikipedia.org/wiki/Chromosphère>



<http://bass2000.obspm.fr>

- La chromosphère vue lors d'une éclipse solaire
 - émission colorée (d'où le nom); rouge: H_α; protubérances
 - possibilité de l'observer devant le disque solaire, hors éclipse: spectrographie visible (à droite; + radio, UV); filaments, plages

Le Soleil: atmosphère

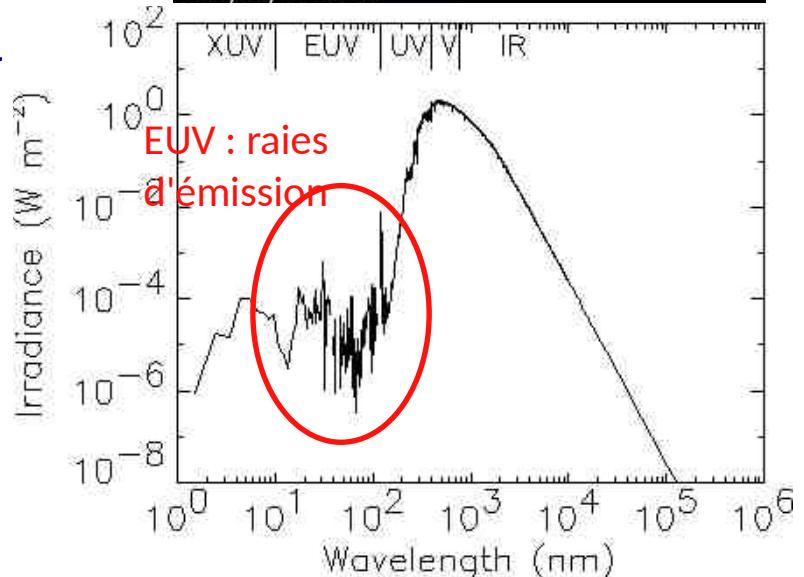
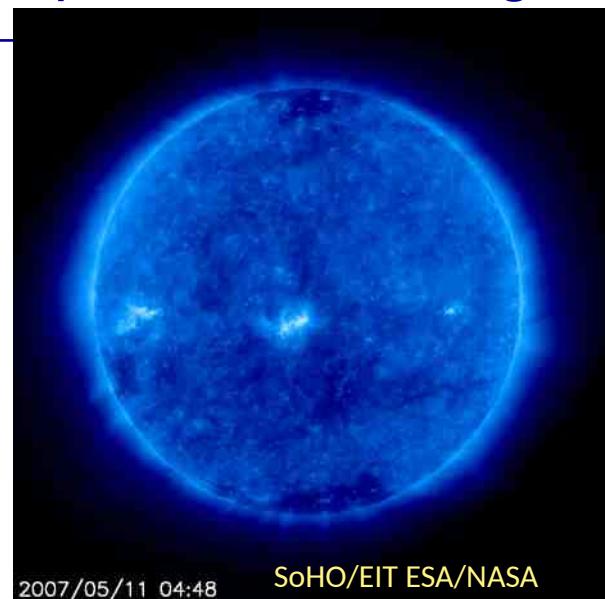
Le spectre électromagnétique



http://bass2000.obspm.fr/solar_spect.php

Spectre solaire

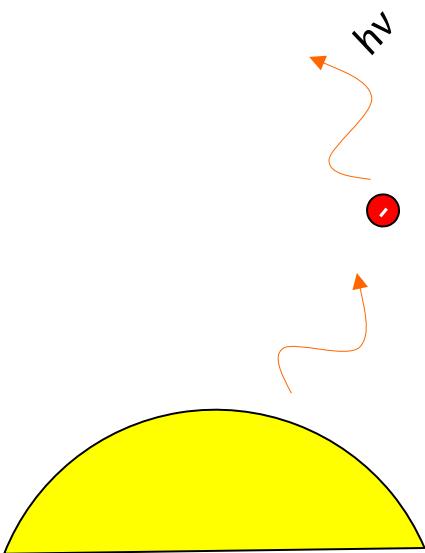
- lumière visible:
 - continuum ($T = 5800$ K)
 - raies d'absorption décroissance de T dans la haute photosphère
- EUV, X: raies d'émission (augmentation T dans la chromosphère et couronne)
- Plasma dilué (raies) et chaud (émission EUV, X: $\geq 10^6$ K)
- Structures brillantes en EUV = concentrations de plasma (densité – « régions actives »)



Le Soleil: atmosphère

La couronne

Eclipse solaire

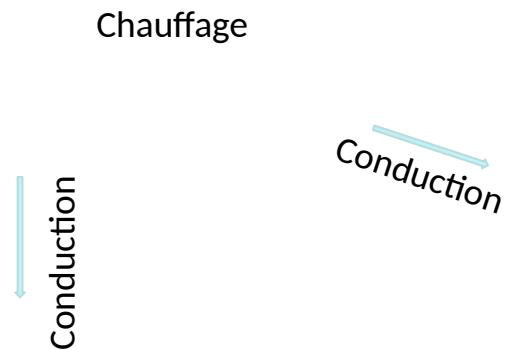


- Diffusion Thomson: rayonnement (photosphère) + électron libre
- L'intensité de l'émission en lumière blanche reflète

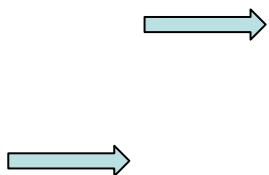
Le Soleil: atmosphère

Modèle hydrostatique de la couronne

- Profil hydrostatique de la pression,
symétrie sphérique :



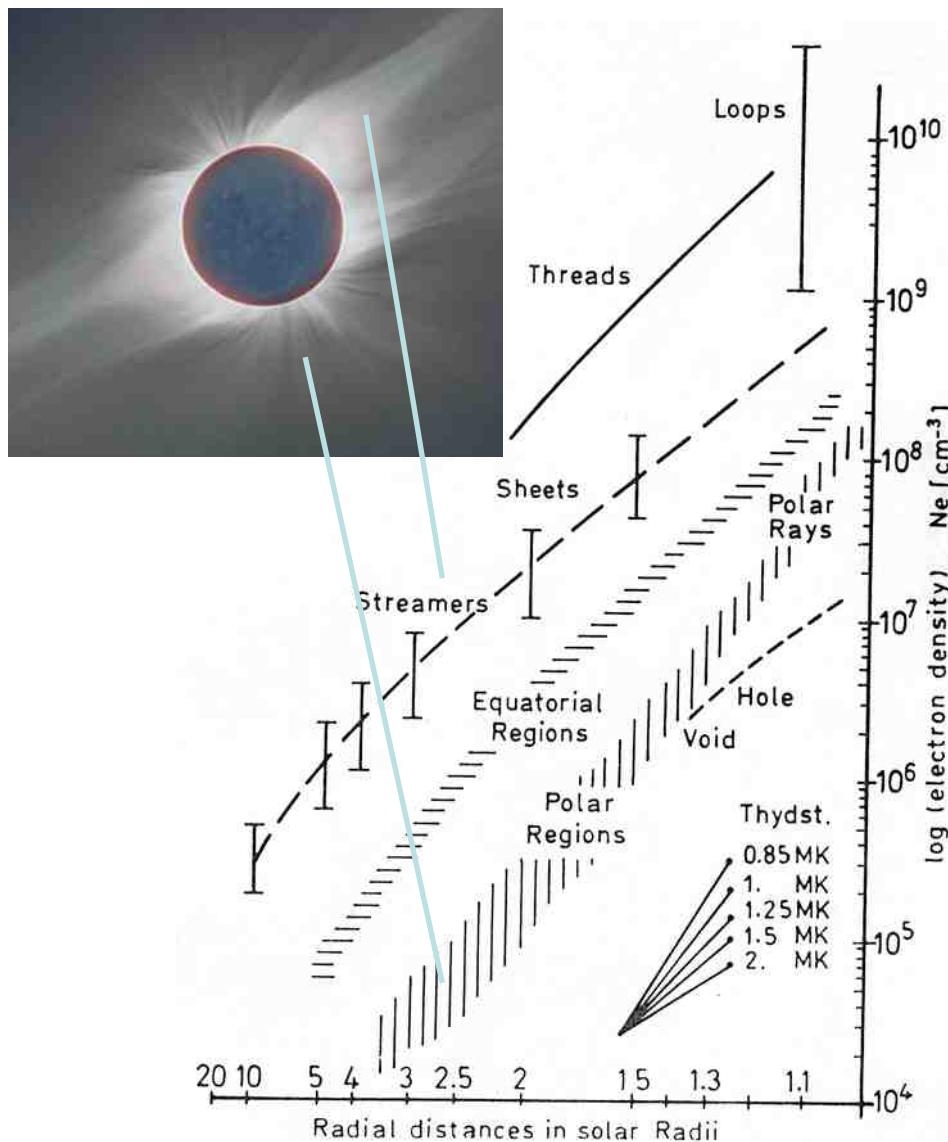
- Aux alentours du maximum de température: $T \approx cte. = T_0$



Le Soleil: atmosphère

Modèle hydrostatique de la couronne

- Profil hydrostatique de la densité n :
- comparaison avec les profils de n_e déduits des éclipses
- température moyenne déduite des profils $n_e(r)$ observés lors des éclipses totales: $T = (1.4-1.6) \times 10^6$ K

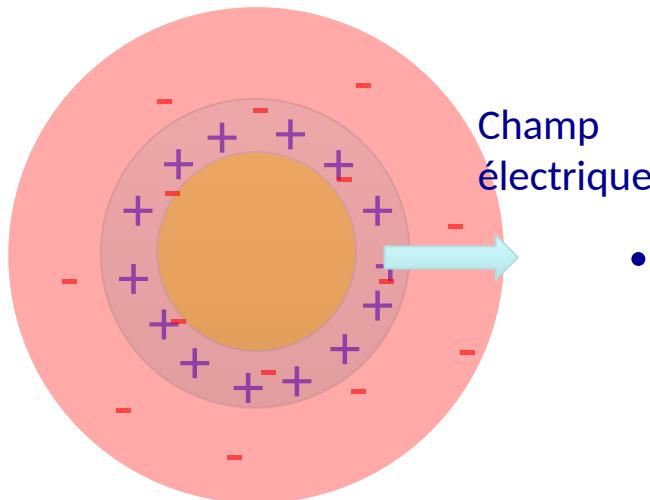


Koutchmy 1994 Adv Space Res 14(4), 29

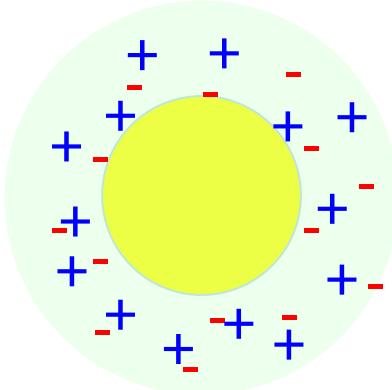
Le Soleil: atmosphère

Modèle hydrostatique de la couronne – description bi-fluide

- Hauteur d'échelle:



- Champ électrique = profil de particules neutres, masse $m_p/2$
- Question: comment les protons deviennent-ils plus légers et les électrons plus lourds ?
- Equations du mouvement rendant explicite le champ électrique :



Modèle hydrostatique de la couronne – description bi-fluide

- Gaz parfait :
- Eq. du mouvement; supposer T_e, T_p constant, quasi-neutralité $n_p \approx n_e$:
- Somme :
- $m_e + m_p \approx m_p$. Si $T_e = T_p = T$:



Modèle hydrostatique de la couronne – description bi-fluide

- Gaz parfait :
- Eq. du mouvement; supposer T_e , T_p constant, quasi-neutralité $n_p \approx n_e$:
- Exercice :
 - Calculez le champ électrique et le potentiel électrostatique correspondant
 - Quelle valeur ce potentiel aurait-il à une distance héliocentrique de 0,2 UA ?
 - Note: un des premiers résultats publiés de la sonde Parker Solar Probe est une estimation du champ électrique de 50-300 V à des distances $\leq 0,2$ UA (Halekas et al. 2021 ApJ 916, 16)

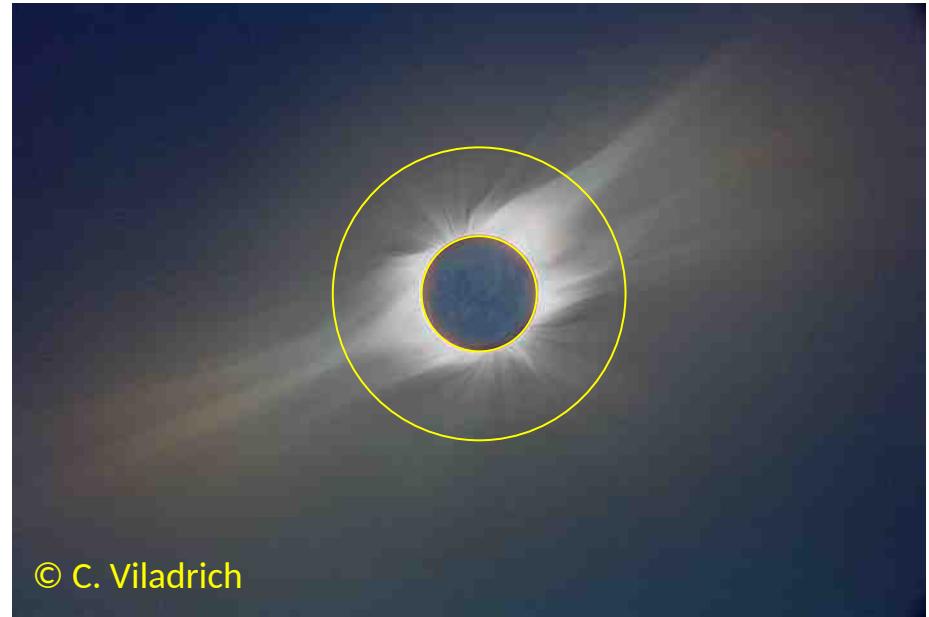
Le Soleil: vent solaire

La couronne solaire peut-elle être en
équilibre hydrostatique ?

Le Soleil: vent solaire

Pourquoi le vent solaire ?

- Jusqu'où la couronne s'étend-elle ?
- Théorie:
 - modèles hydrostatiques (HS) de la couronne => pression à l'infini => pression du milieu interstellaire (MIS)
 - haute température de la couronne et faible pression du MIS => vent solaire supersonique (Parker, 1958)



© C. Viladrich

- Conséquence : au-delà d'une certaine altitude la gravitation et le champ magnétique ne retiennent pas la couronne
- => écoulement dans l'espace interplanétaire

Le Soleil: vent solaire

Le modèle de Parker

- Eugene Parker (Univ. Chicago, 1958 ApJ 128, 664) :

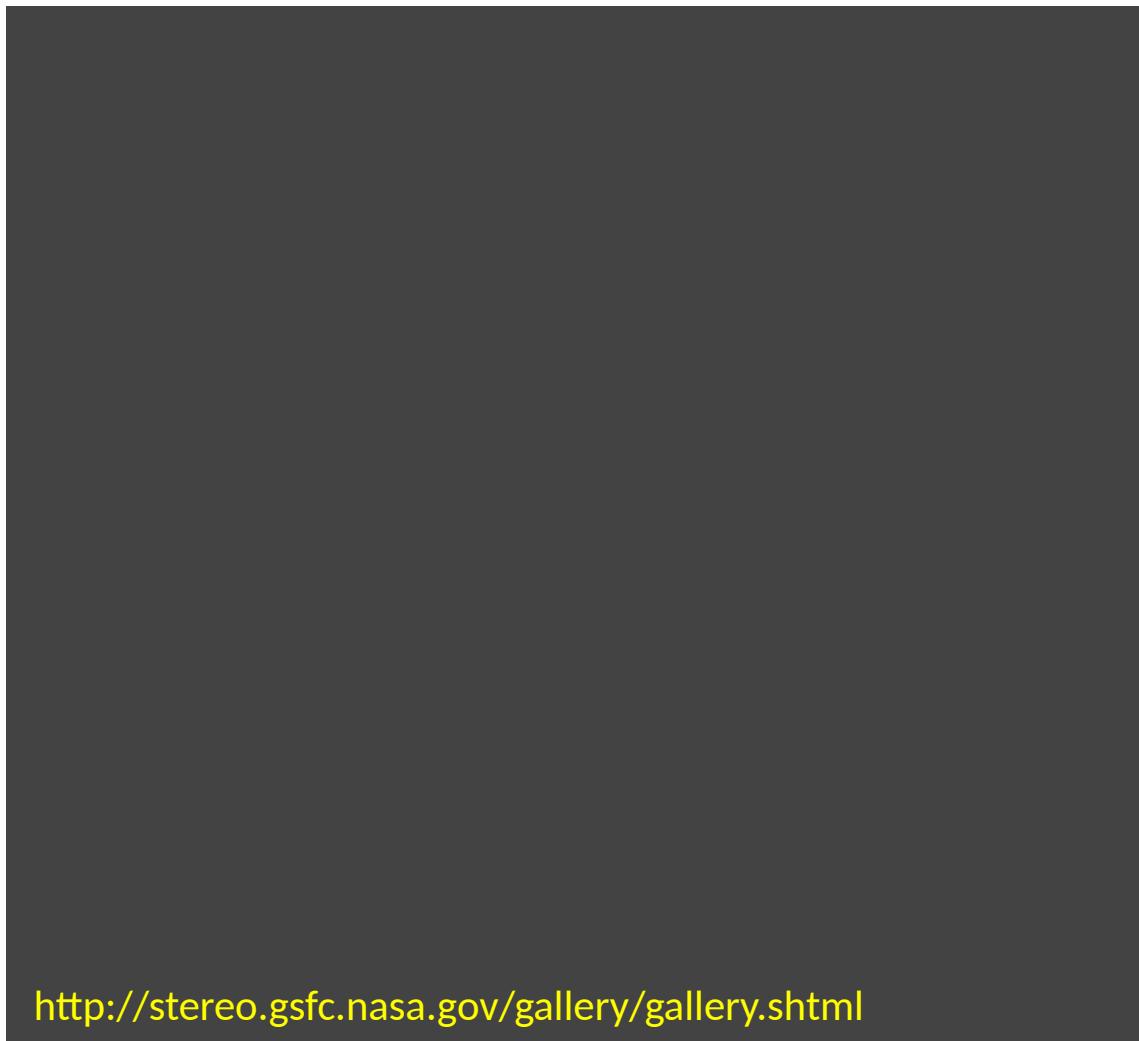


Distance heliocentrique [multiple de 2,5 R_{sun}]

Le Soleil: vent solaire

Interaction avec la queue d'une comète

- Imagerie de l'espace interplanétaire (sondes STEREO/NASA)
- Soleil en haut à droite, les structures brillantes sont des parties de la couronne (grands jets)
- queue de la comète « flottant » dans le vent solaire

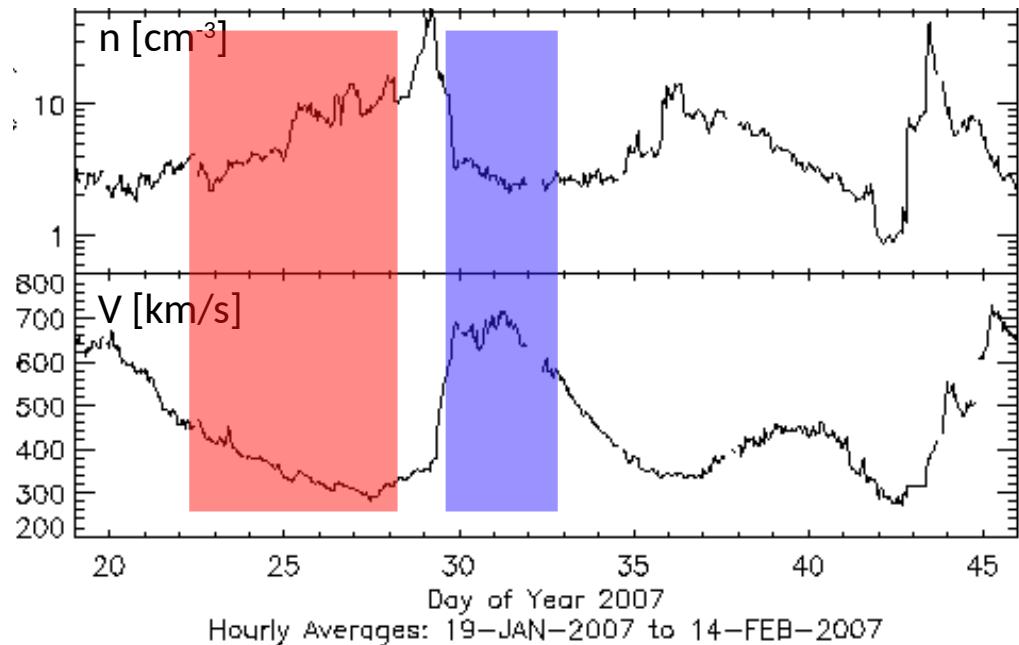


<http://stereo.gsfc.nasa.gov/gallery/gallery.shtml>



Le Soleil: vent solaire

Mesures près de la Terre



[http://web.mit.edu/space/www/wind/
wind_plot.html](http://web.mit.edu/space/www/wind/wind_plot.html)

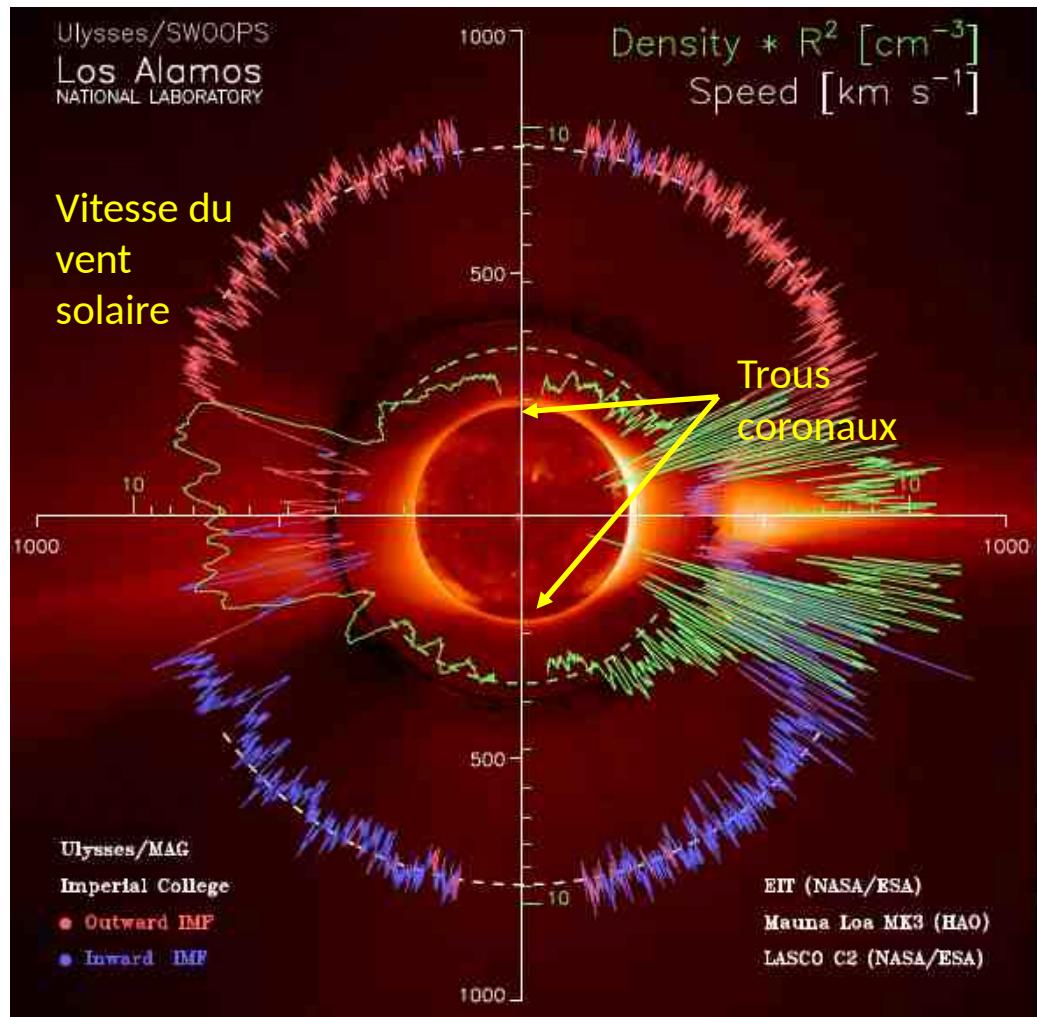
à 1 UA:	V [km s^{-1}]	$n_p [\text{m}^{-3}]$	$T_p [\text{K}]$
lent	400	10^7	$4 \quad 10^4$
rapide	700	$3 \cdot 10^6$	$2 \quad 10^5$

- Mesures par satellites : vitesse, densité, température ... (depuis 1961)
- composition: protons, électrons, noyaux He (=particules) ...
- deux types de vent solaire:
 - rapide 600-800 km/s, faible densité
 - lent 300-400 km/s, forte densité

Le Soleil: vent solaire

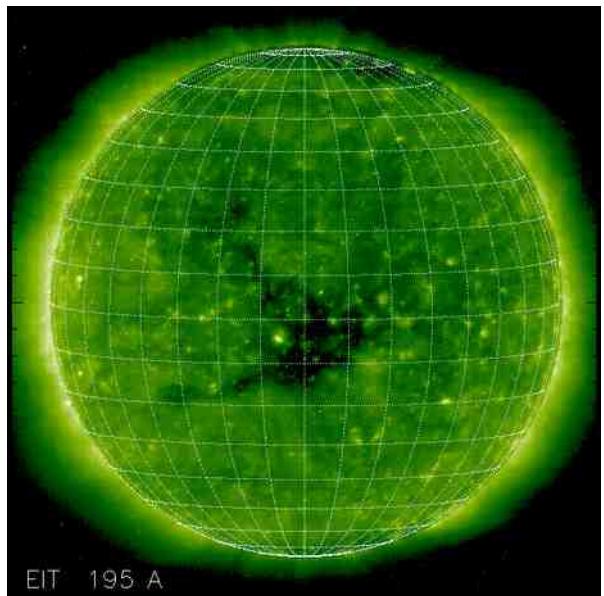
Mesures en dehors du plan de l'écliptique

- Mesures du vent solaire ~plan perpendiculaire à l'écliptique (sonde Ulysses/ESA)
- vent rapide aux pôles (trous coronaux=champ magnétique ouvert vers l'espace interplanétaire – voir cours suivant)
- vents mélangés (rapide, lent) autour de l'équateur

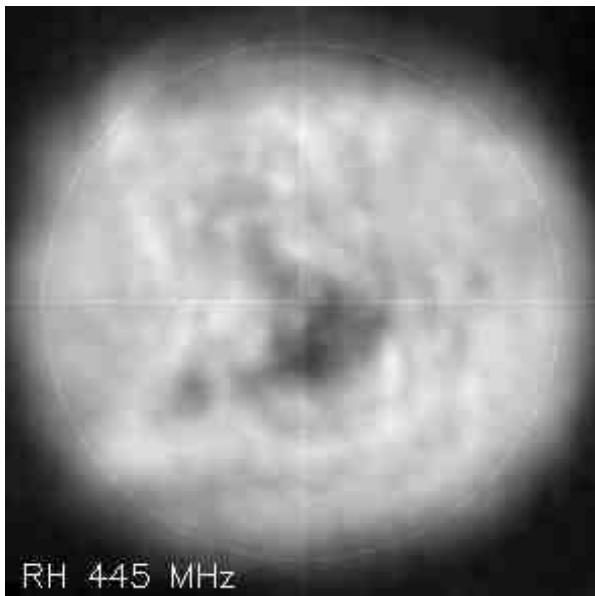


Le Soleil: vent solaire

Trou coronal et vent solaire rapide dans le plan de l'écliptique



EIT 195 Å



RH 445 MHz



Ha KSO

- Trou coronal sur le disque solaire: images EUV (19,5 nm; EIT/SoHO), radio (67 cm; Radiohéliographe Nançay), visible (Obs. Meudon - le TC n'est pas observé)
- Vent solaire rapide issu de ce TC observable à la Terre (voir TP)



MERCI