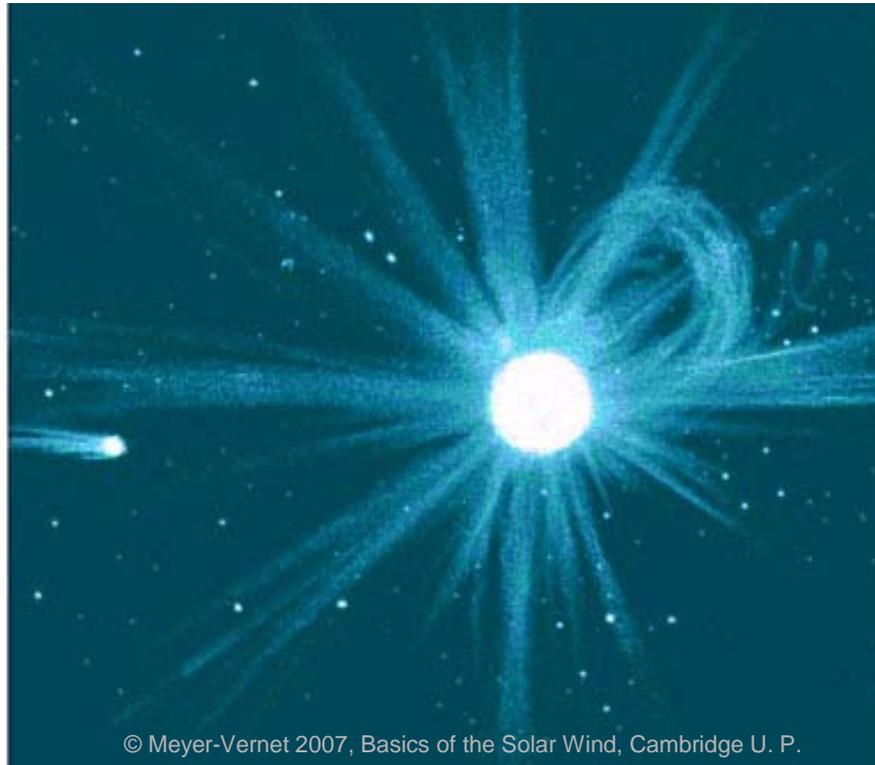


LE VENT SOLAIRE



© Meyer-Vernet 2007, Basics of the Solar Wind, Cambridge U. P.

Nicole Meyer-Vernet, *CNRS, Observatoire de Paris*
<http://lesia.obspm.fr/~meyer>

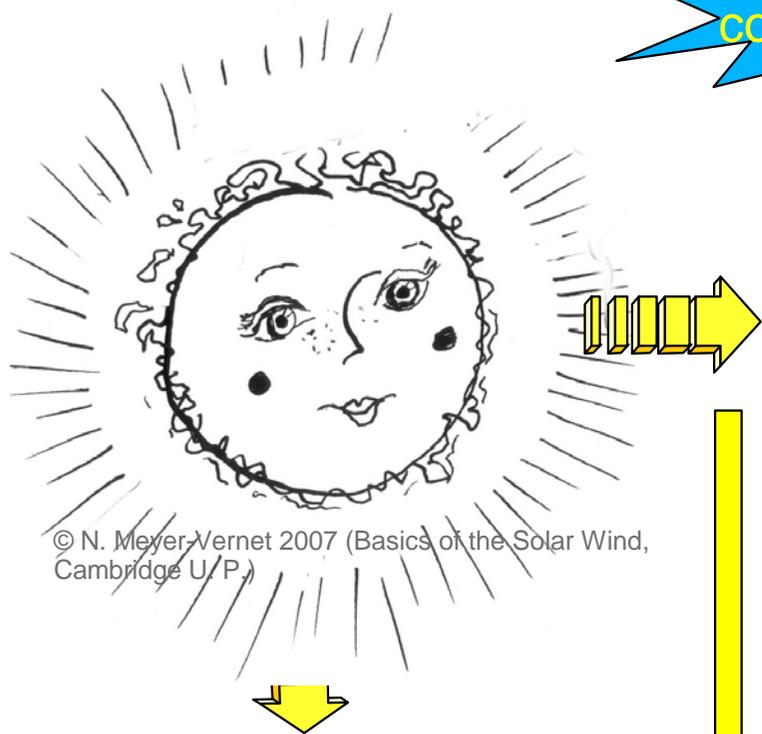
Qu'est-ce que le vent solaire ?

Comment le vent solaire est-il produit ?

Quels sont les effets du vent solaire ?

Qu'est-ce que le vent solaire ?

Ne pas confondre



© N. Meyer-Vernet 2007 (Basics of the Solar Wind, Cambridge U.P.)

Le vent solaire ...ce n'est pas :



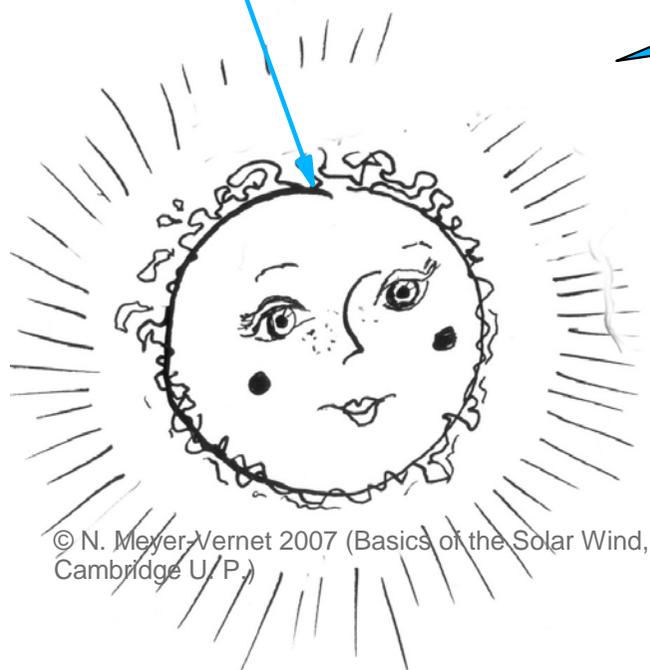
... le vent de photons (qui pousse les voiles solaires)

... c'est un vent de plasma

(électrons, protons)

c.f. nouvelle d'A.C. Clarke
(*Le vent qui vient du Soleil*, Presses Pocket)-
Course Terre-Lune en voilier solaire)

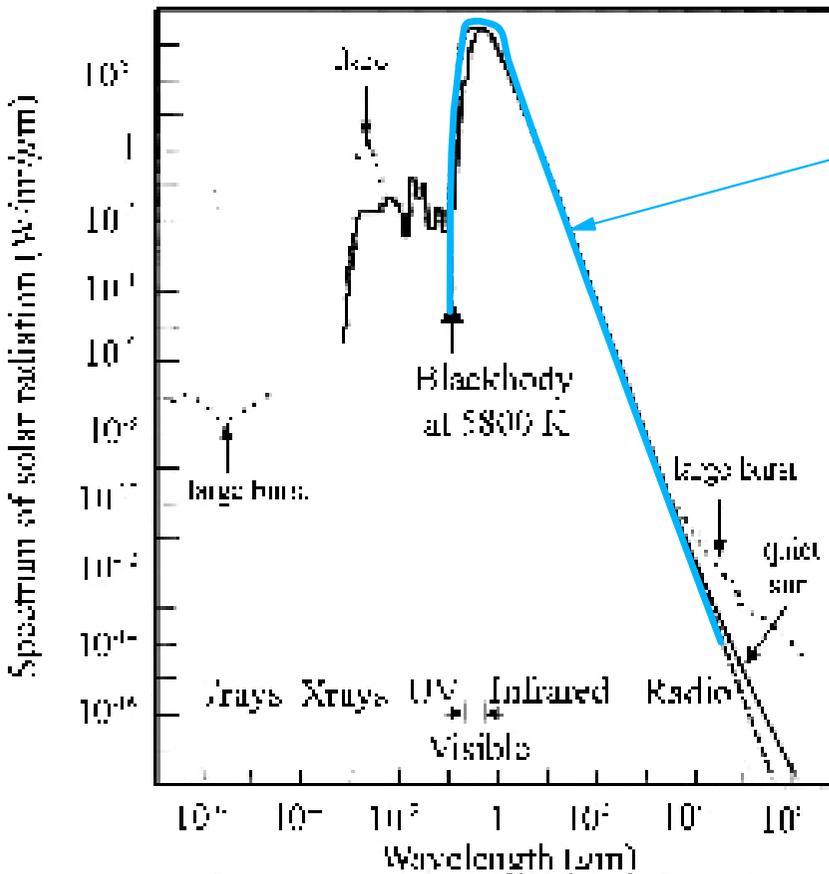
Température
 $T \sim 5800^{\circ}\text{K}$



Le soleil émet deux types de vent :



des photons (émis par la "surface" du soleil)



Spectre du rayonnement thermique à 5800°K

Note : Le degré K (Kelvin) est l'échelle de température des physiciens. $0^{\circ}\text{K} = -273^{\circ}\text{C}$ est la température minimum qu'il est possible d'atteindre.

longueur d'onde λ
lumière visible $\lambda \sim 0.5 \mu$

Le soleil émet deux types de vent :



des photons

Pourquoi le pic de rayonnement est à $\lambda \sim 0.5 \mu$?

	constante de Boltzmann	température	
Energie thermique $\sim k_B T$	\downarrow	\downarrow	$h\nu \sim k_B T$ (ordre de grandeur)
Energie d'un photon $\sim h\nu$	\uparrow	\uparrow	$\Rightarrow \lambda = c/\nu \sim hc/k_B T$ valeur plus précise $\lambda \simeq 0.5 \mu$
	constante de Planck	fréquence	vitesse de la lumière

Quelle est la poussée exercée sur une voile ?



Etude NASA pour une voile solaire
http://fr.wikipedia.org/wiki/Voile_solaire
voir aussi <http://www.u3p.net/>

A la distance de la Terre (1 Unité Astronomique du Soleil = $1.5 \cdot 10^{11}$ m) :

Puissance reçue $P \simeq 1500 \text{ W/m}^2$

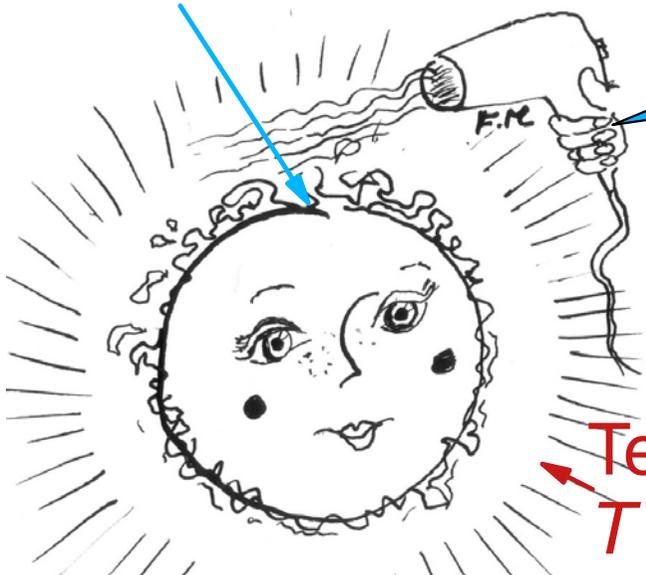
\Rightarrow Poussée $\simeq (4/3)P/c \simeq 6 \cdot 10^{-6} \text{ Pa}$

sur une voile

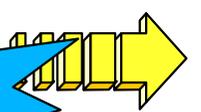
(N/m^2)

Le soleil émet deux types de vent :

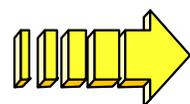
Température
 $T \sim 5800^\circ\text{K}$



Ne pas confondre



des photons (émis par la "surface" du soleil)



du plasma (électrons et protons): le vent solaire

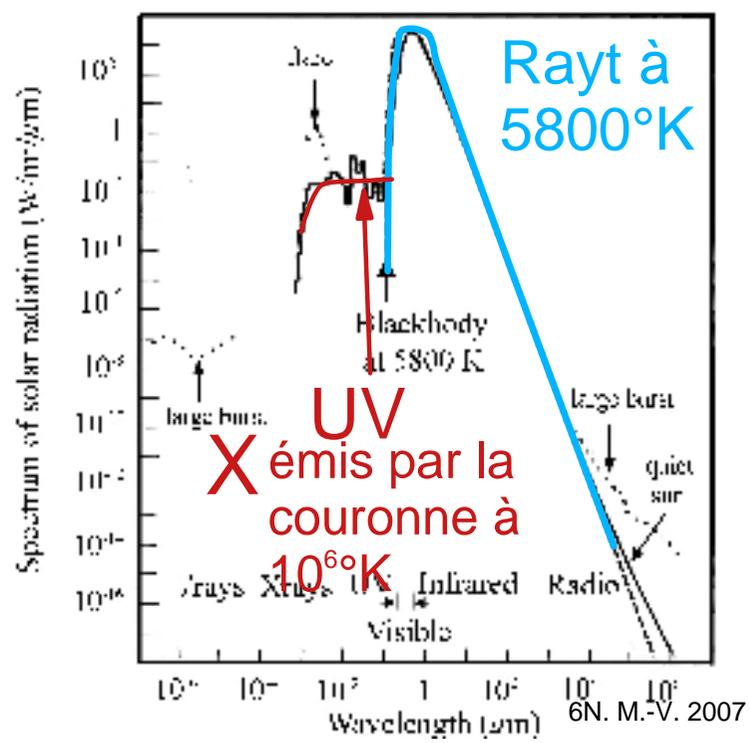
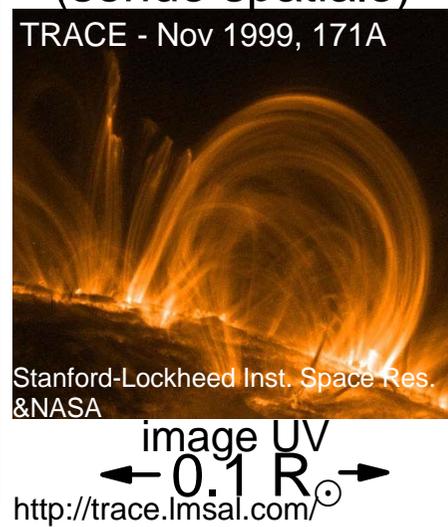
Température
 $T \sim 10^6^\circ\text{K}$

c'est l'expansion de la couronne solaire chaude (1 million de deg.)

© N. Meyer-Vernet 2007 (Basics of the Solar Wind, Cambridge U. P.)

Couronne solaire observée :

↪ en détail (sonde spatiale)

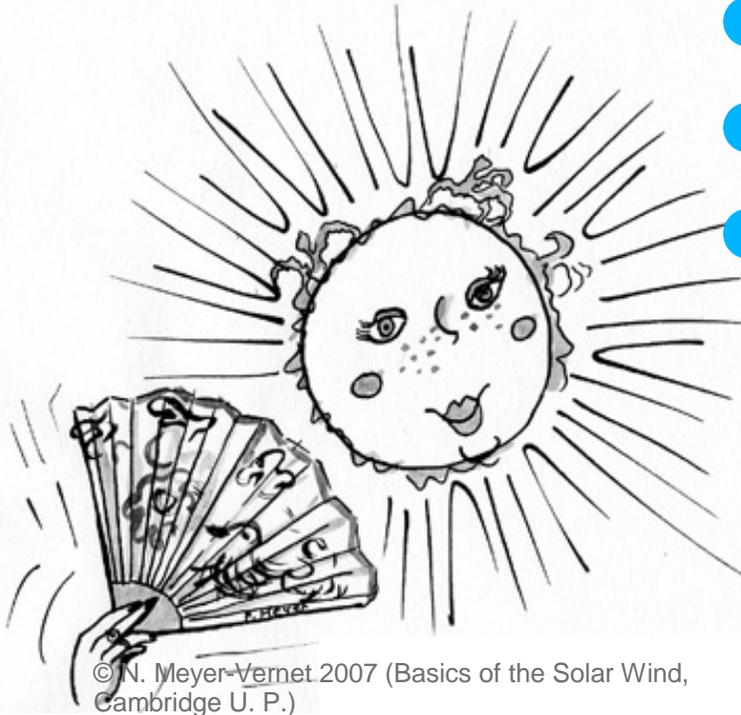


Le vent solaire est un vent de plasma

- électrons, protons, ...
- éjecté en permanence par le soleil, ..
- qui remplit tout le système solaire

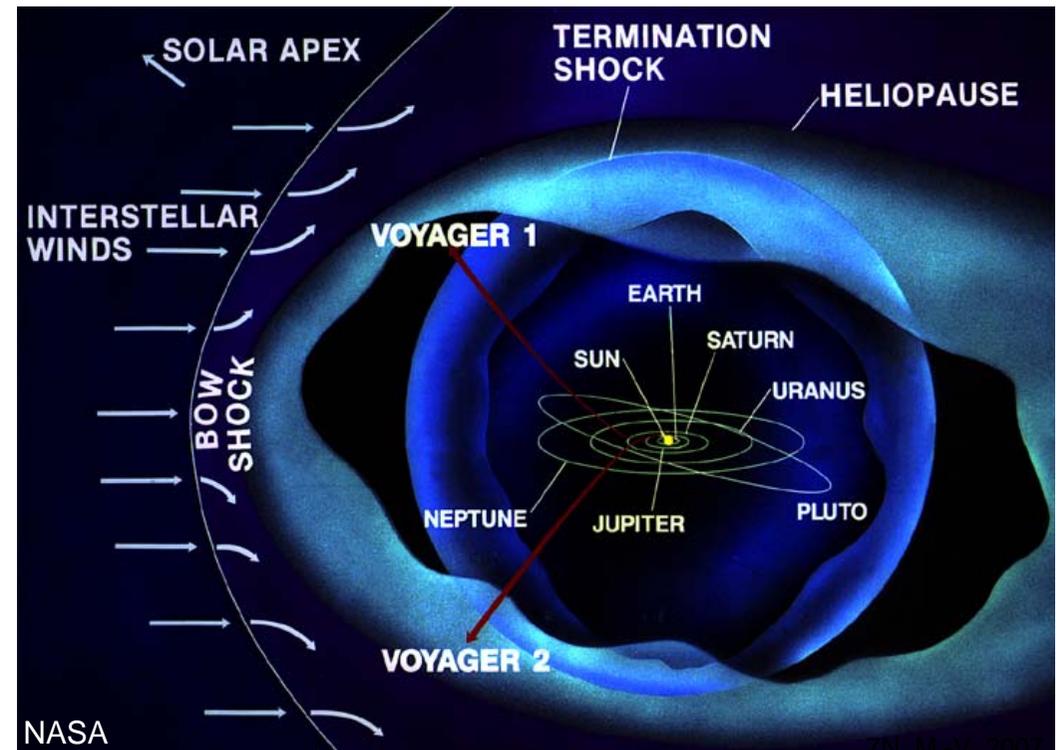
Le Soleil perd ainsi 10^9 kg/s ...

en 10 milliards d'années, c'est le 10.000 ème de sa masse



© N. Meyer-Vernet 2007 (Basics of the Solar Wind, Cambridge U. P.)

..formant une bulle dans le milieu interstellaire :  l'héliosphère



Le vent solaire est un vent de plasma

Qu'est-ce qu'un plasma ?

C'est le quatrième état de la matière



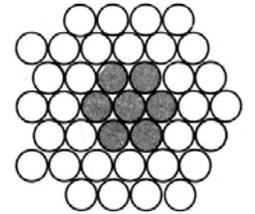
FORMATION DE LA VAPEUR

— A la vue de l'Esprit, la Matière s'est mise dans tous ses états...

Jean Effel; La création du monde, © ADAGP 2007

1) Solide : atomes ne peuvent pas bouger (sauf vibrations)

⇒ rigide



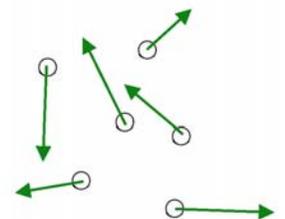
2) Liquide : atomes peuvent bouger un peu

⇒ déformable (mais incompressible)

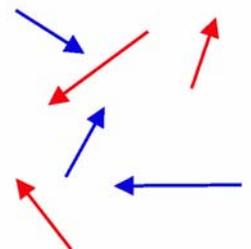


3) Gaz : atomes "libres"

⇒ compressible



4) Plasma : ions et électrons "libres"



Le vent solaire est un vent de plasma

Comment produire un plasma ?

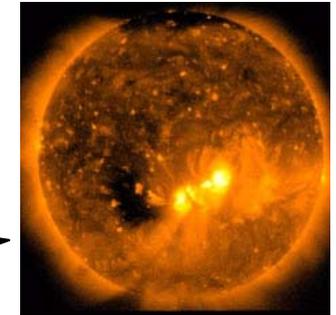
Arracher électrons aux atomes :

- ☛ en chauffant
- ☛ avec du rayonnement ionisant (UV, ...)
- ☛ avec des champs électriques (éclairs, tubes, écrans à plasma, ..)
- ☛ par collision avec des particules énergétiques
- ☛ en comprimant

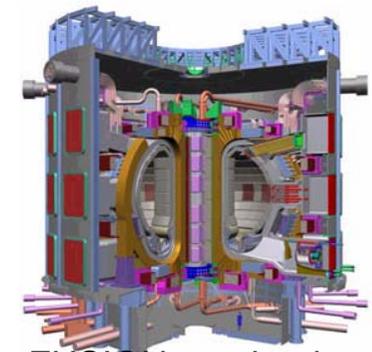
Milieu interstellaire



Couronne solaire



Hinode X-Ray T. NASA
<http://solarb.msfc.nasa.gov>



FUSION : projet de réacteur ITER

Presque tout l'univers est fait de plasma ...
sauf les régions denses, froides, protégées du
rayonnement ionisant et des particules énergétiques

... comme la surface de la Terre ...



Le vent solaire est un vent de plasma

- à la distance de la Terre, le vent solaire contient ~ **5 électrons et 5 protons par cm^3** à la **température $T \sim 10^5 \text{ °K}$** , plus une petite quantité d'autres éléments (Helium, ...)

Comparez à notre environnement : $2 \cdot 10^{19}$ molécules par cm^3 (à $T \sim 300 \text{ °K}$)

- la vitesse du vent $V \sim 300\text{-}800 \text{ km/s}$
 - ⇒ plus rapide que les ondes "sonores"
 - ⇒ produit des chocs quand il rencontre des obstacles
- puisque le plasma est fait de charges électriques le vent **conduit l'électricité** et est **couplé au champ magnétique** un peu comme la limaille de fer dans le champ d'un aimant
 - ⇒ le vent solaire entraîne le champ magnétique du Soleil

Note : Le vent solaire contribue de manière négligeable à l'énergie émise par le Soleil ($\sim 10^{-6}$ x valeur due aux photons)

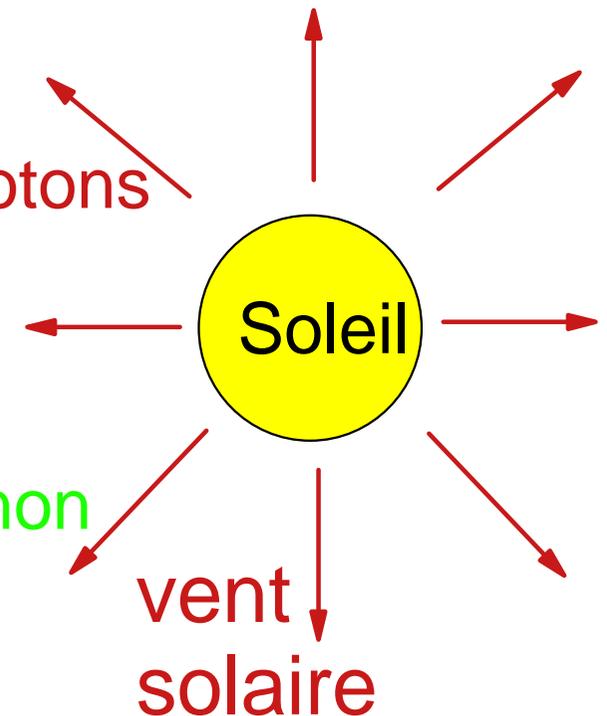
Comment le vent solaire est-il produit ?

- la **couronne solaire est très chaude** (1 million de degrés), dense, et conduit très bien la chaleur
- les électrons (légers et chauds) ne sont pas retenus par le champ de gravitation du Soleil

vitesse d'agitation thermique des électrons \gg vitesse de libération de l'attraction gravitationnelle du Soleil

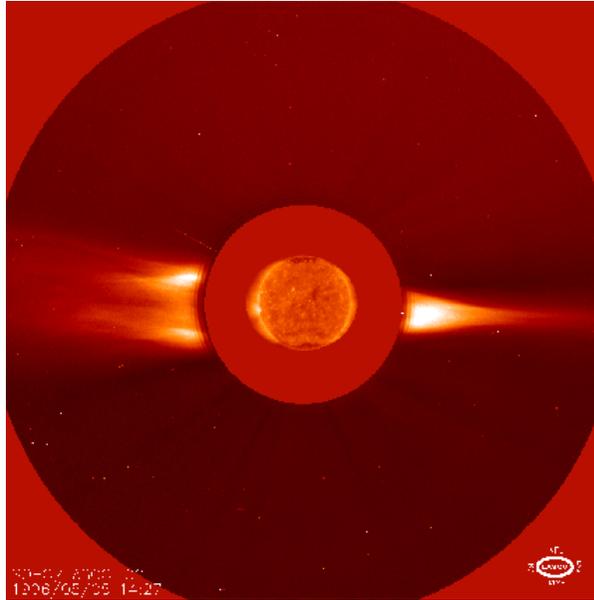
→ les électrons s'échappent vers le milieu interstellaire presque vide et entraînent les protons (de charge électrique opposée)

→ mais on comprend mal comment le vent est accéléré aux vitesses observées : particules non thermiques et/ou ondes, produites à partir de l'énergie magnétique ?

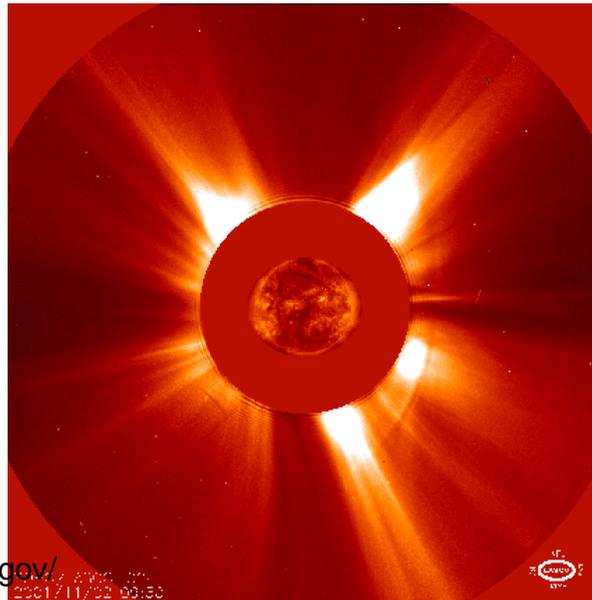


La structure du vent solaire dépend de l'activité solaire

Cycle d'activité solaire :

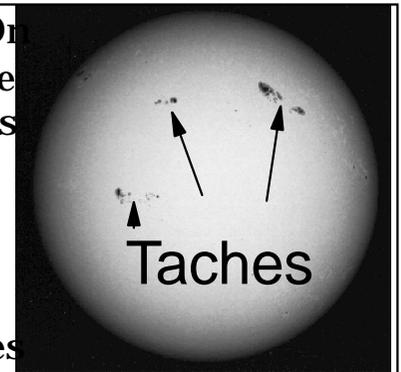


couronne
(minimum
solaire) ↑

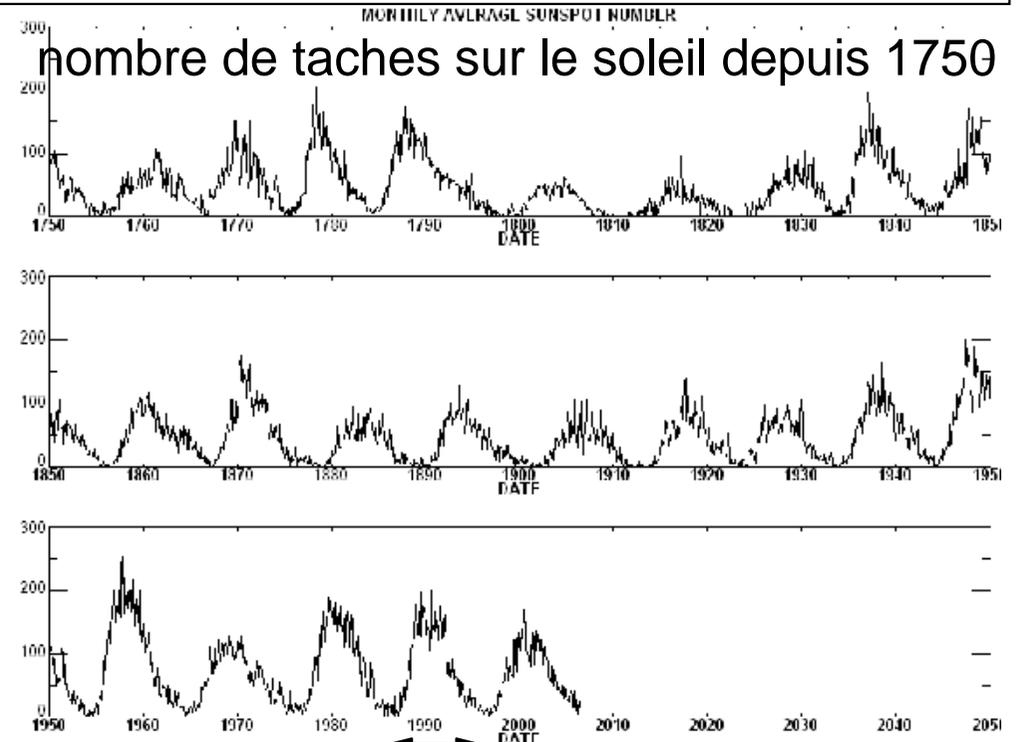


couronne
(maximum
solaire) →

Astronomie des Dames (Jérôme de Lalande 1806) On représente aussi le Soleil comme ayant une espèce de figure humaine; mais c'est sans aucun fondement. D'autres figures le représentent come parsemé de volcans ou de bouillons écumeux; mais dans la réalité nous n'y voyons qu'une surface jaune & unie sur laquelle paraissent seulement de temps en temps plusieurs points noirs qu'on appelle les taches du Soleil ; ce sont peut-être les écumes ou les scories de cet immense fourneau.. *Bibliothèque Universelle des Dames (8ème classe)*

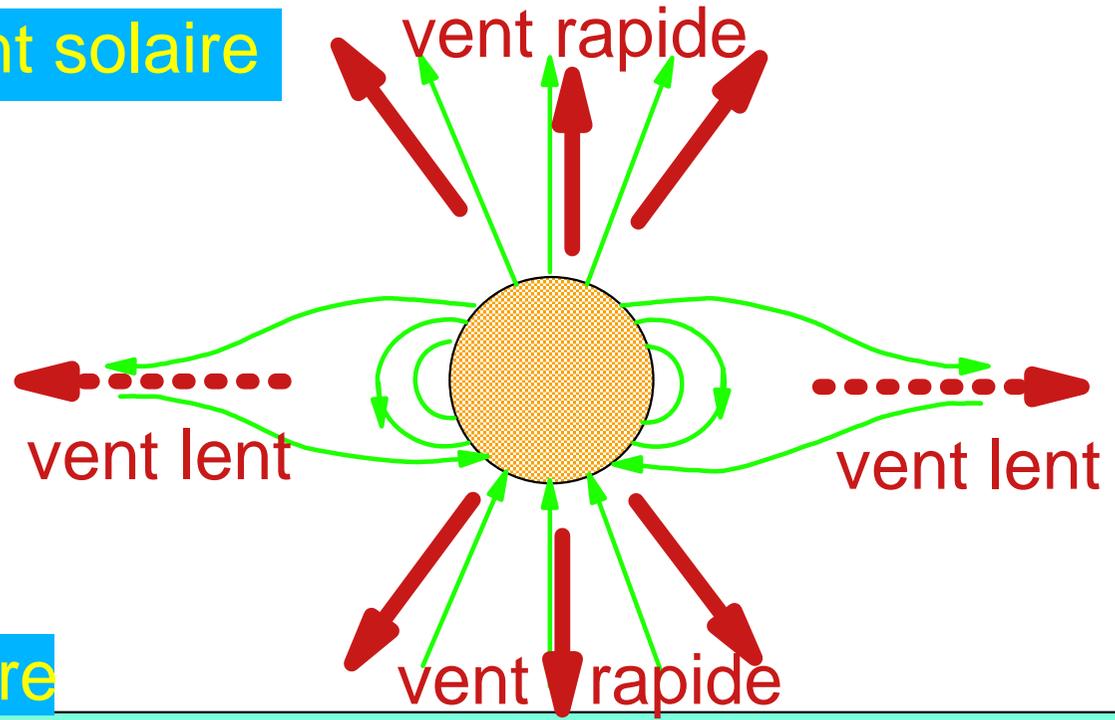
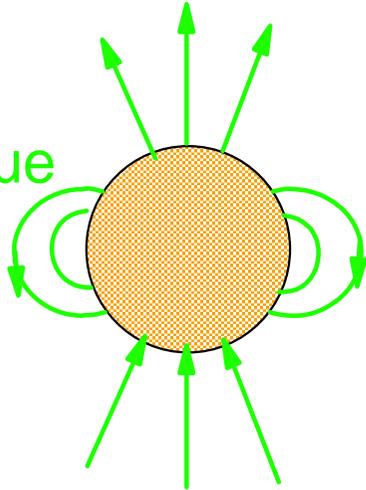


Bien que la théorie ait avancé en 2 siècles, la physique des taches solaires est loin d'être maîtrisée



Structure simplifiée du vent solaire

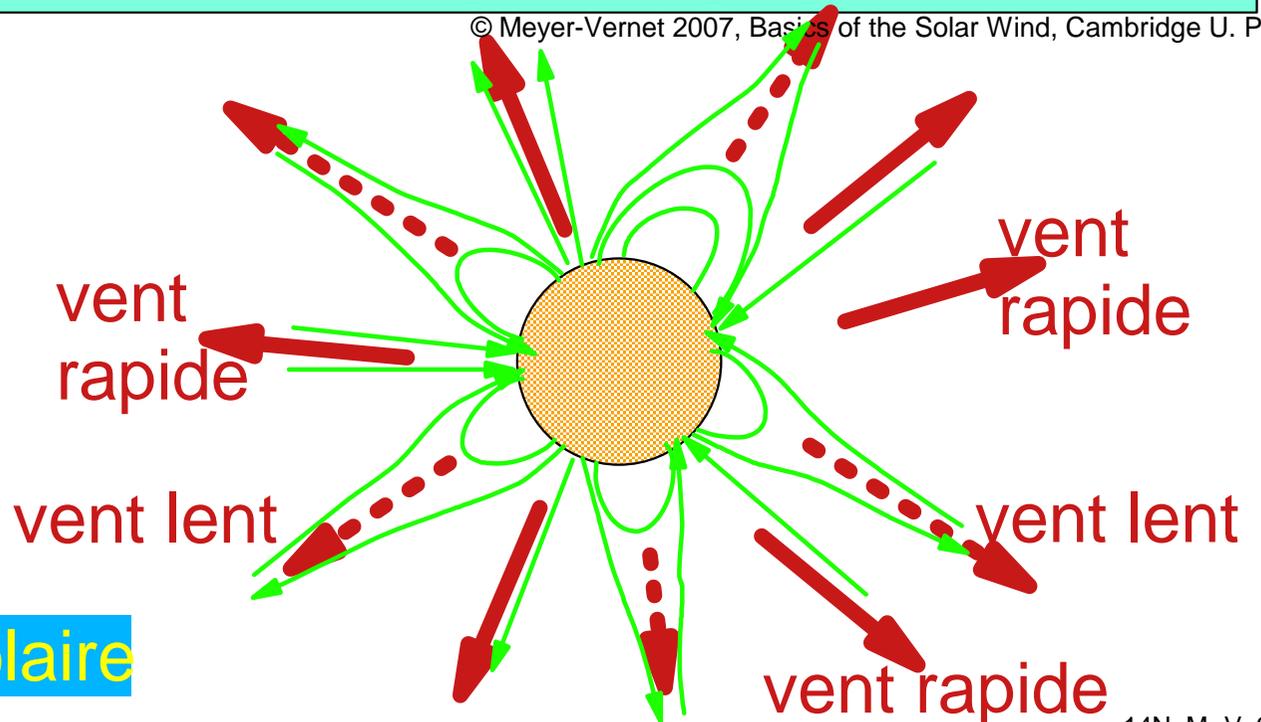
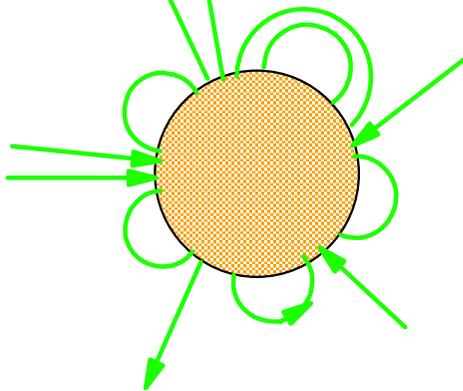
Champ magnétique



minimum d'activité solaire

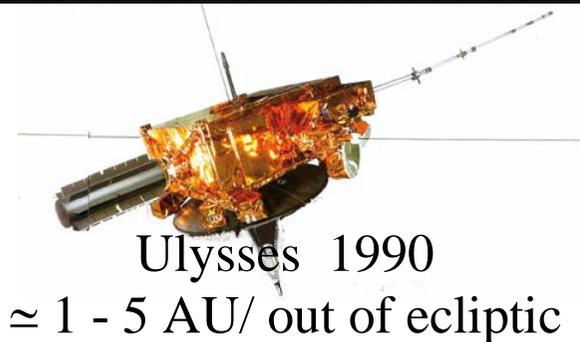
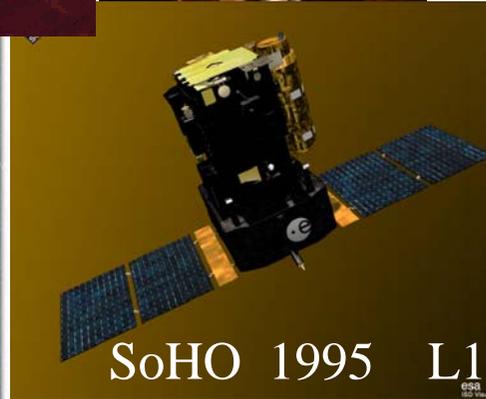
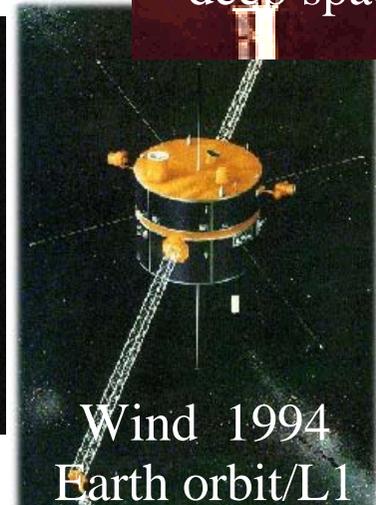
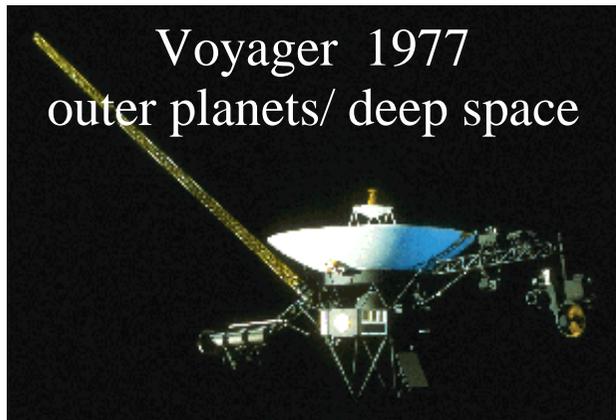
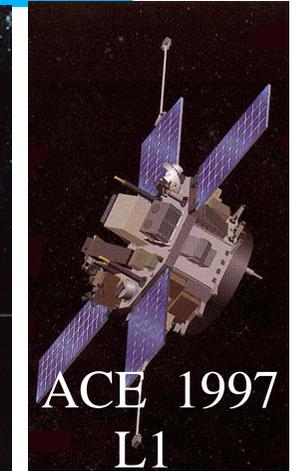
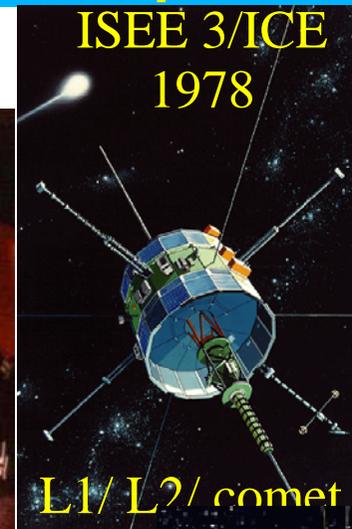
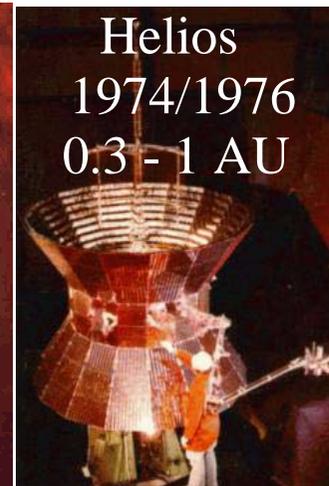
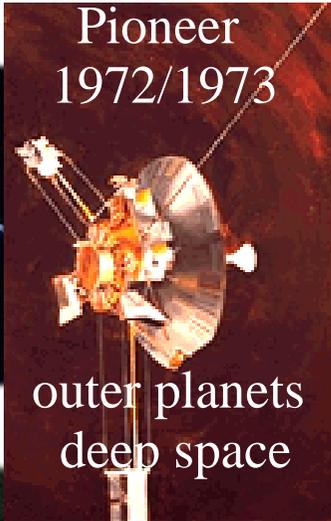
© Meyer-Vernet 2007, Basics of the Solar Wind, Cambridge U. P.

Champ magnétique



maximum d'activité solaire

Mesures *in situ* : quelques sondes spatiales



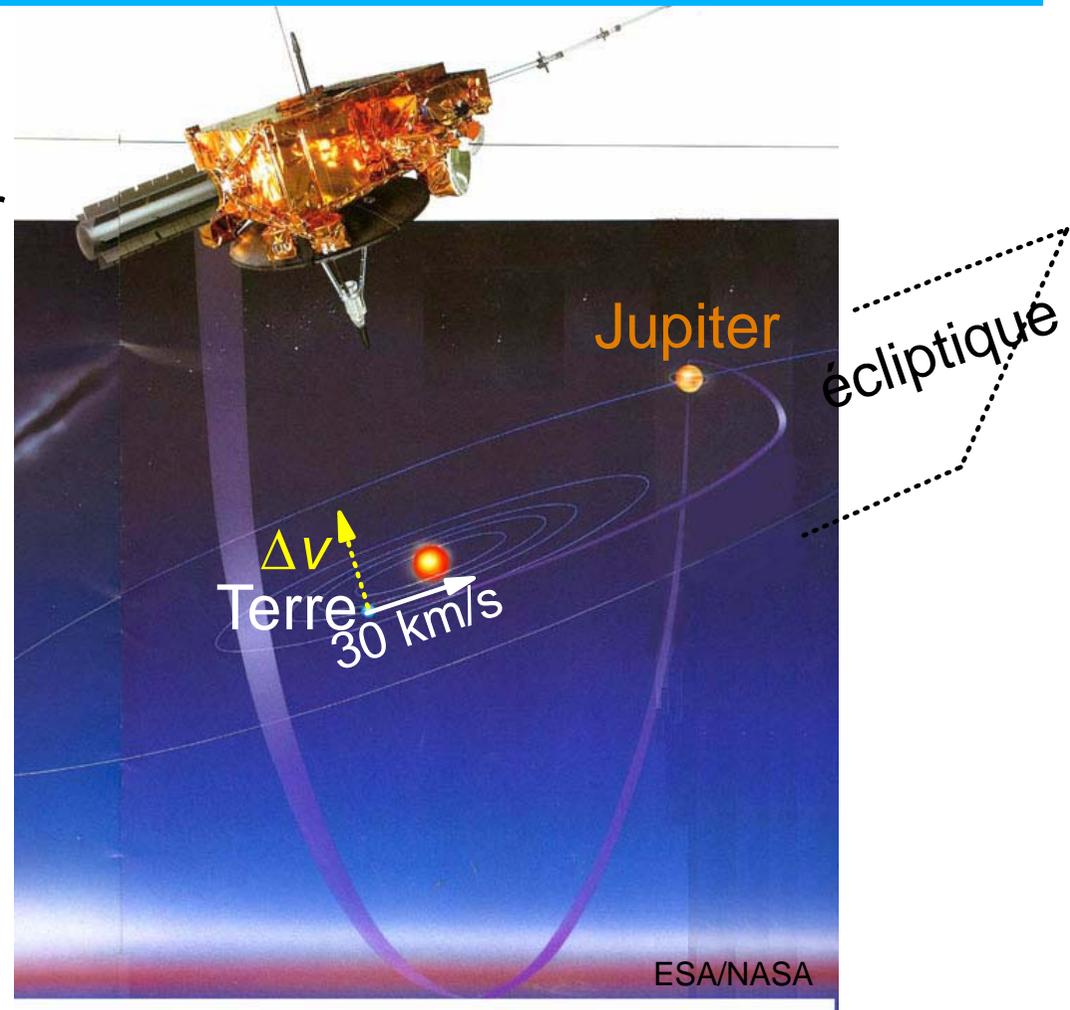
Les sondes spatiales sont proches du plan des planètes (l'écliptique)

... sauf la sonde Ulysse : la seule qui explore le vent solaire à 3 dimensions

Trajectoire de la sonde:
ping-pong gravitationnel avec Jupiter (nécessaire pour la faire sortir du plan de l'écliptique)

Note : Pourquoi faut-il utiliser une planète pour faire sortir une sonde de l'écliptique ?

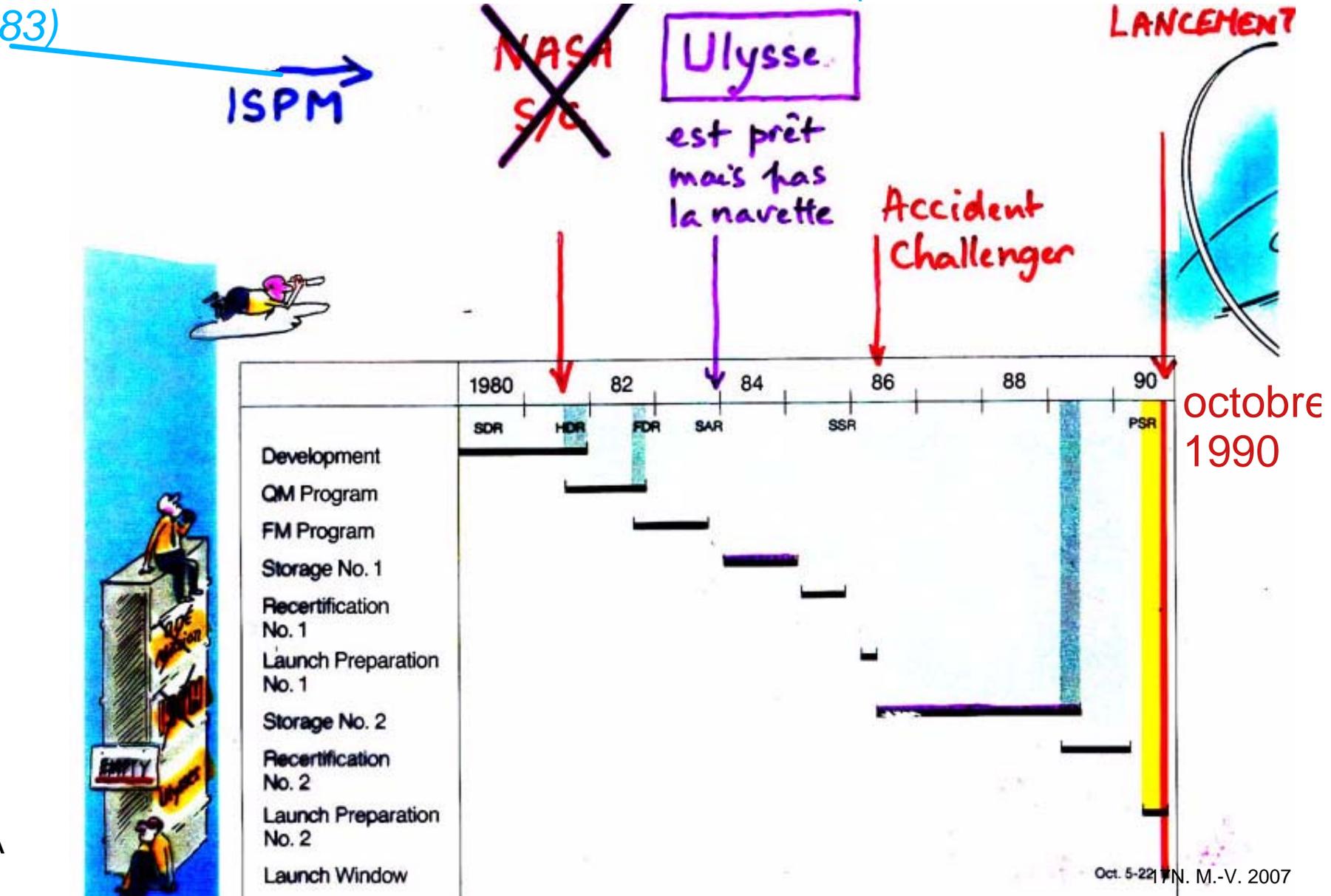
- ☛ Les sondes sont lancées depuis la Terre, qui gravite à $v \sim 30$ km/s dans l'écliptique
- ☛ pour les faire sortir de ce plan, il faut changer beaucoup la direction de leur vitesse \Rightarrow leur fournir $\Delta v \sim v$
- ☛ cela est impossible avec les lanceurs actuels
- ☛ si la sonde passe près d'une planète, l'attraction gravitationnelle la dévie



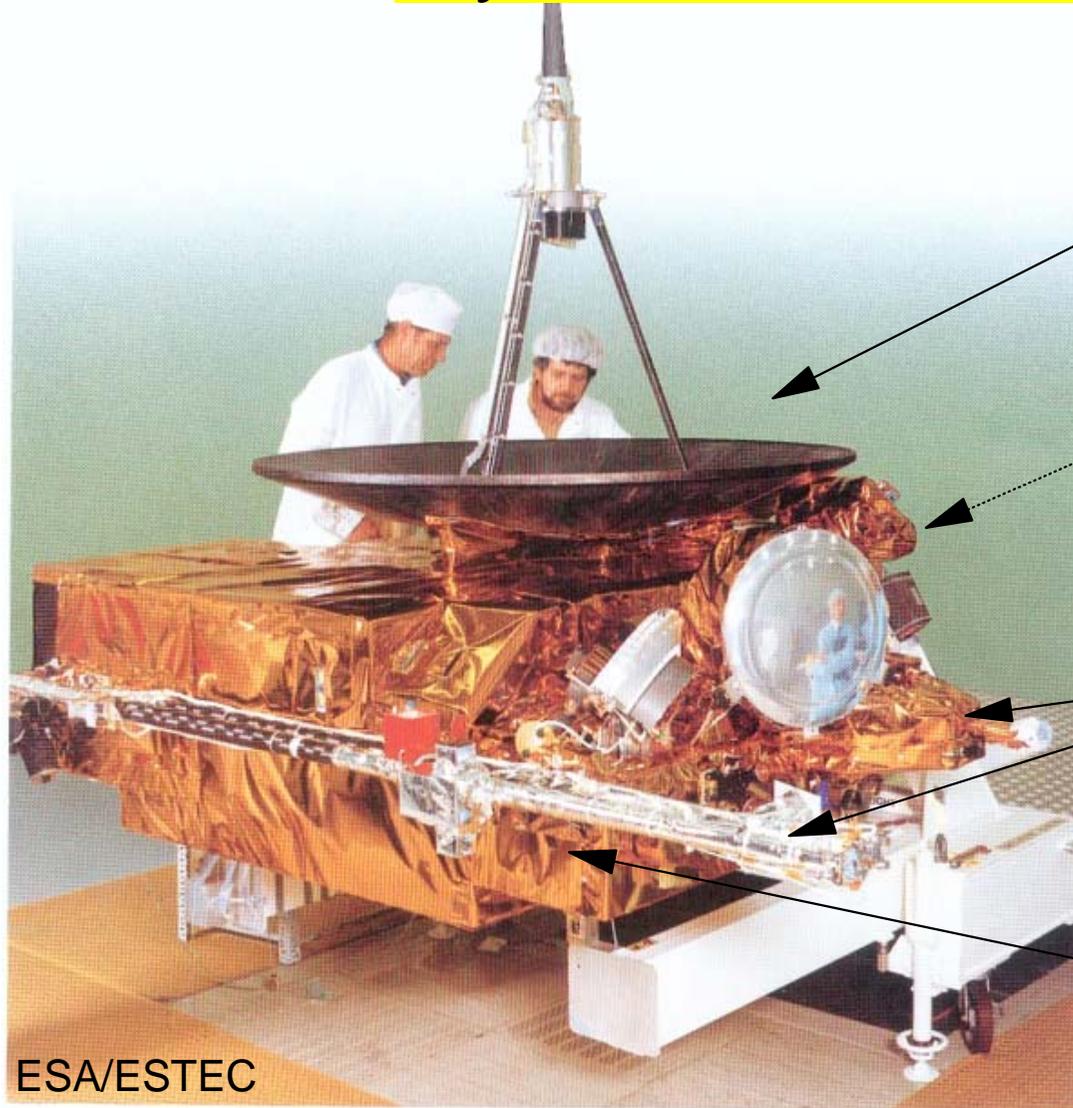
Ulysse : Une histoire mouvementée

1959 : 1ère proposition : "Out of Ecliptic"

1974 : Europe + USA: "International Solar Polar Mission" (2 S/C - lancement prévu en 1983)



Ulysse avant le lancement



ESA/ESTEC

antenne de télémétrie

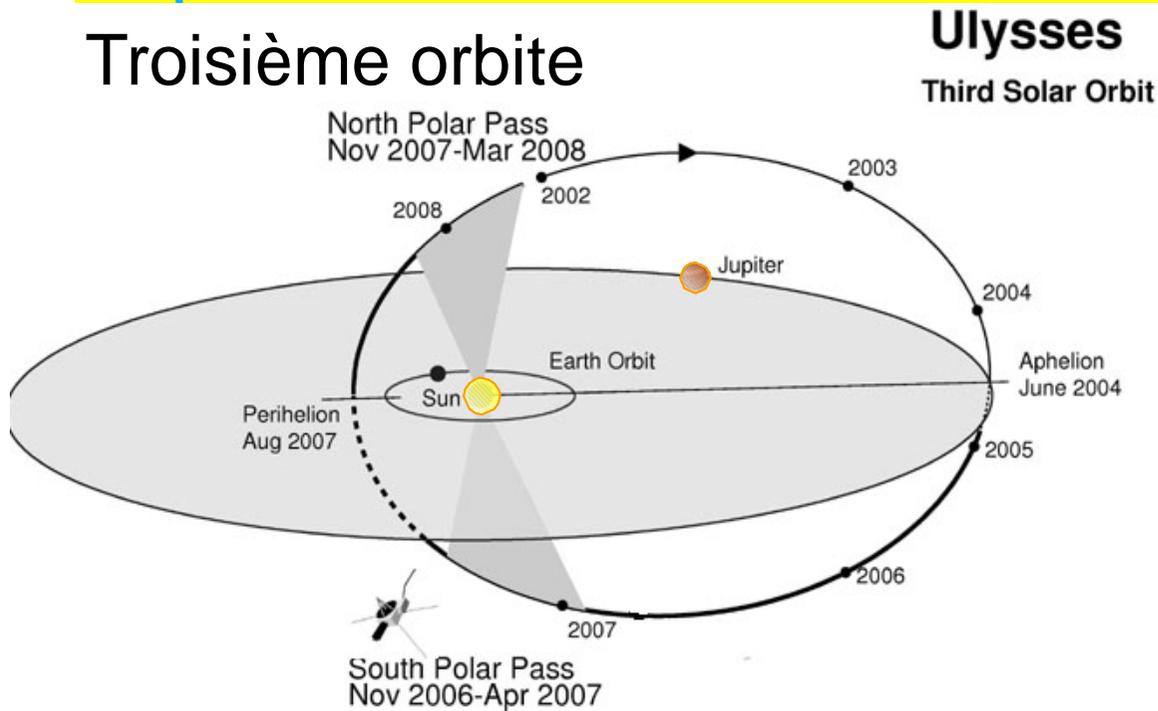
Générateur thermoélectrique
(radioisotopes)

instruments scientifiques

pellicule conductrice pour éviter
les différences de potentiel

Exploration du vent solaire à 3 dimensions

Troisième orbite

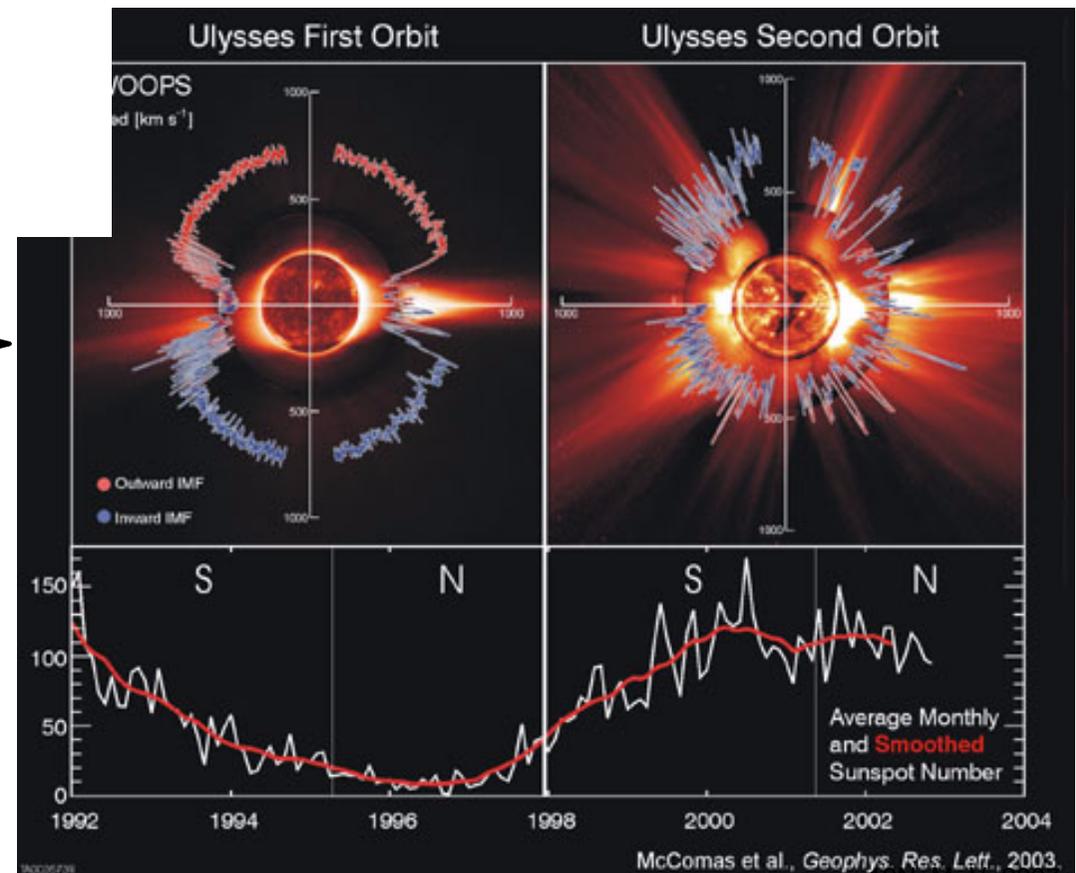


Février 2007 : Passage dans le vent issu du pôle Sud du Soleil

Vitesse du vent en fonction de la latitude

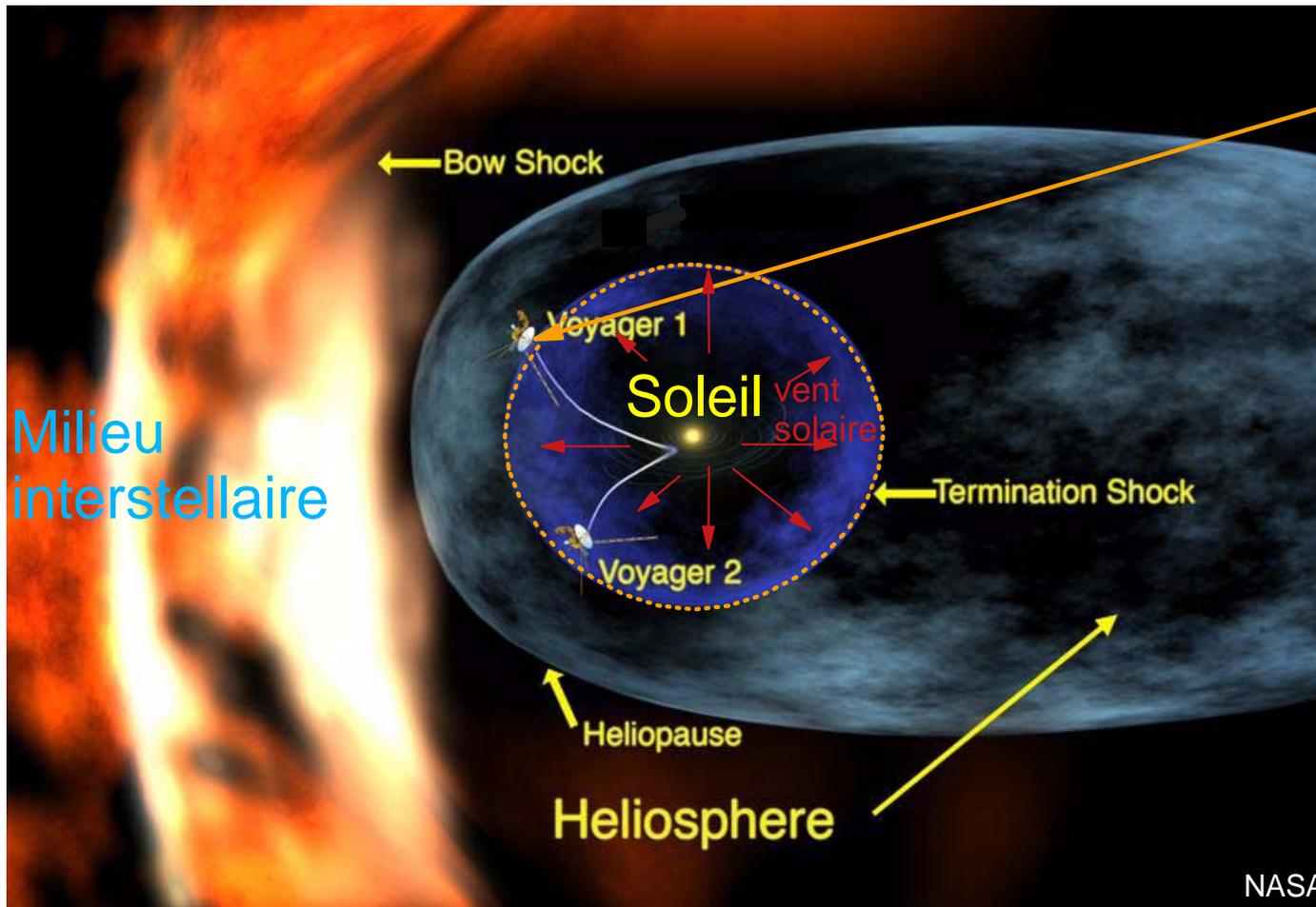


Nombre de taches solaires



Le vent solaire remplit tout le système solaire, formant l'héliosphère

Le système solaire se déplace à travers le milieu interstellaire à ~ 25 km/s (vitesse probablement supersonique)



~ 200 UA ~ $30 \cdot 10^9$ km
~ 4 X distance Soleil-Pluton

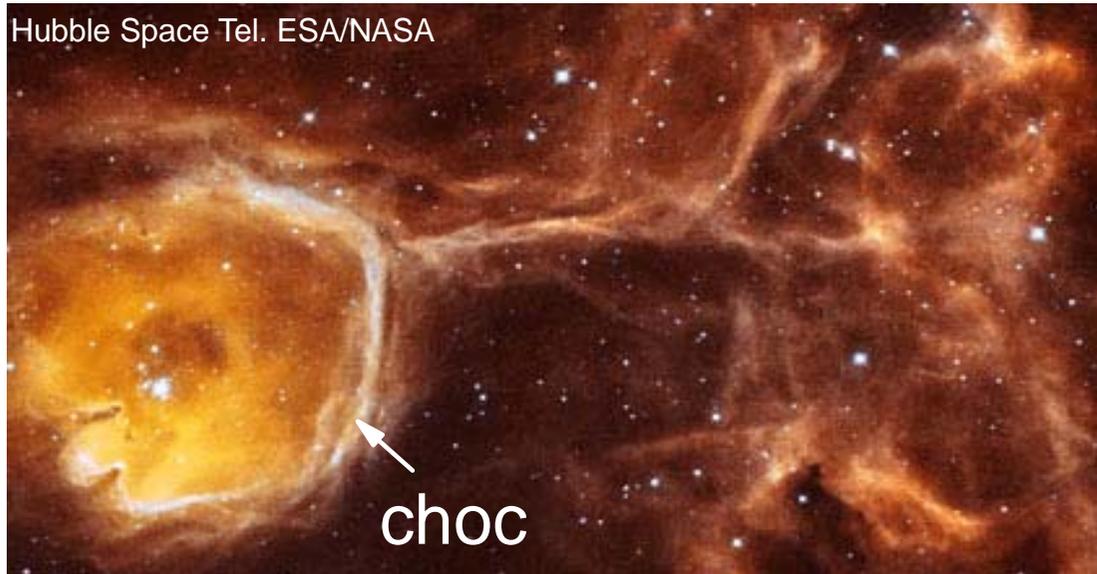
Déc. 2004 : la sonde Voyager 1 (à 94 UA du Soleil) détecte le choc terminant le vent solaire

<http://voyager.jpl.nasa.gov/>



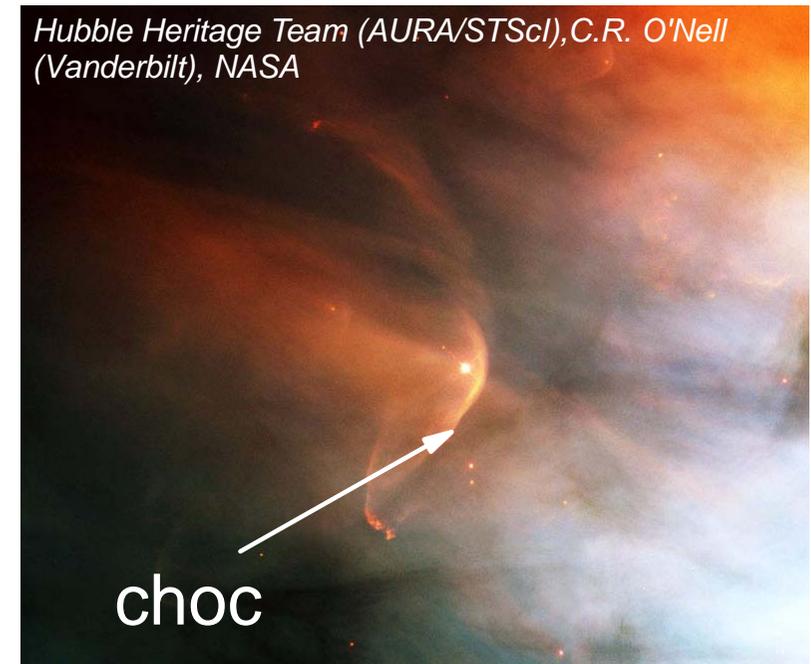
Les sondes Voyager 1 et 2 (lancées en 1977), alimentées par des générateurs thermoélectriques (radioisotopes), ont assez d'énergie jusqu'en 2020

La plupart des étoiles produisent un vent, et une "astrosphère"



N44F : produite par le vent d'une jeune étoile (dans le grand nuage de Magellan)

← 2 10⁶ UA →



Vent de la jeune étoile LL Orionis, qui rencontre le milieu interstellaire de la nébuleuse d'Orion

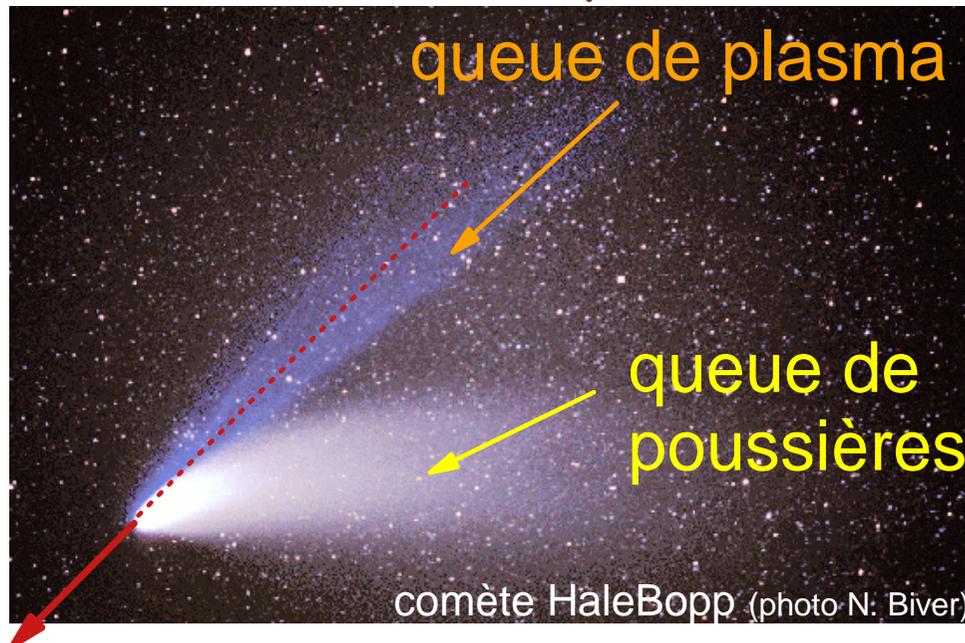
← 3 10⁴ UA →

Quels sont les effets du vent solaire ?

Les particules du vent solaire :

- frappent la surface des corps sans atmosphère ni champ magnétique (astéroïdes, la Lune) et la modifient
- Interagissent avec atmosphères/ionosphères des comètes, planètes

Exemple: Les comètes ont 2 queues :



sculptée par le vent solaire (orientée suivant la vitesse du vent solaire \Rightarrow queue droite)

poussières poussées par le rayonnement solaire (et attirées par le Soleil \Rightarrow queue courbe)

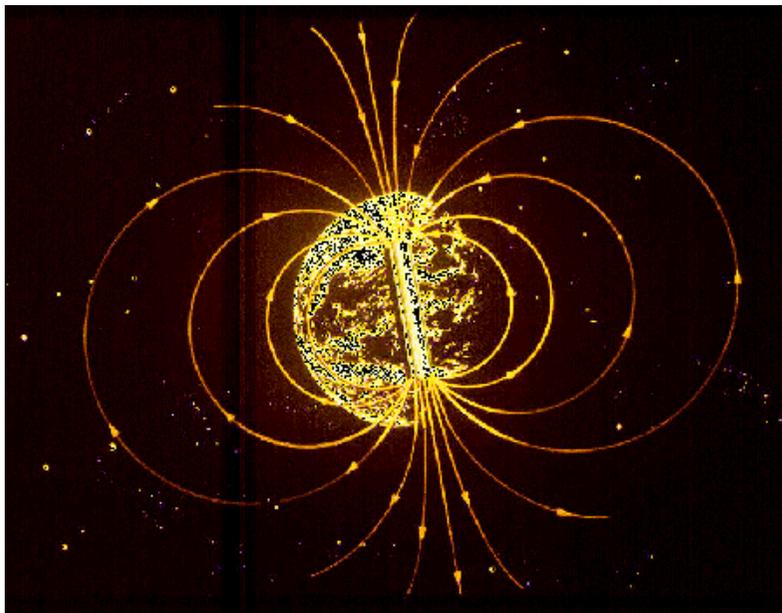
Effets du vent solaire sur le système solaire

"sculpte" les environnements

- Lorsque les planètes ont un champ magnétique, le vent solaire déforme ce champ

La Terre, Mercure, Jupiter, Saturne, Uranus, Neptune ont un champ magnétique global

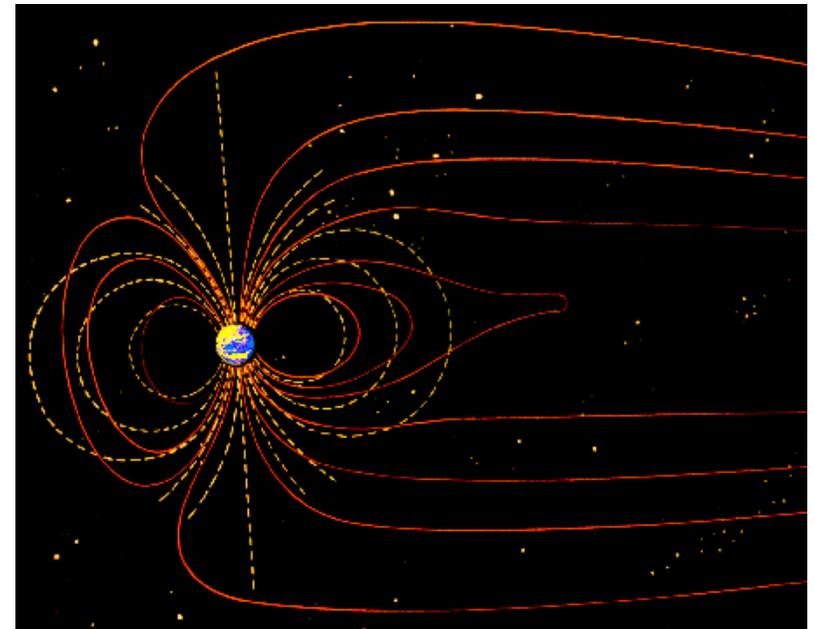
Approx. du champ magnétique d'une planète : champ dipolaire



vent solaire



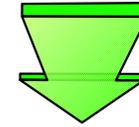
Déformation par le vent solaire





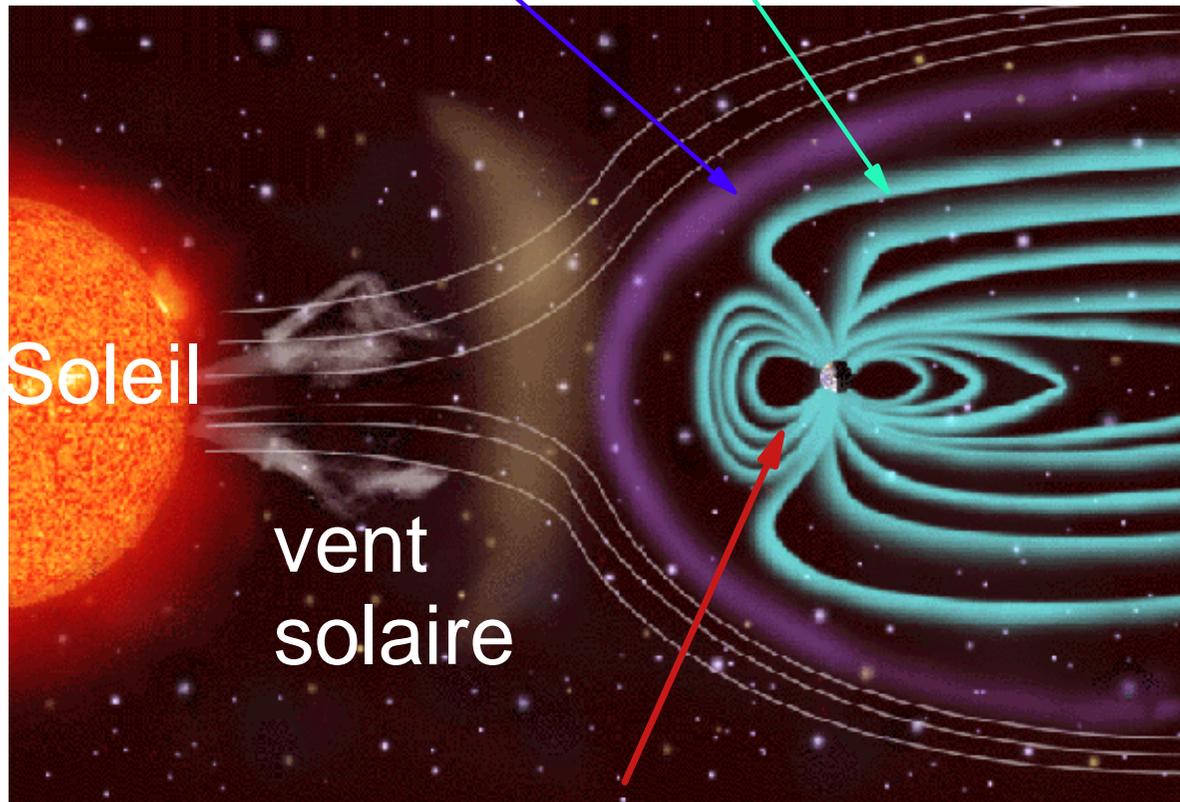
Effets du vent solaire sur la Terre

variations lentes du vent



Champ magnétique qui tend à isoler l'environnement terrestre du vent solaire

Onde de choc

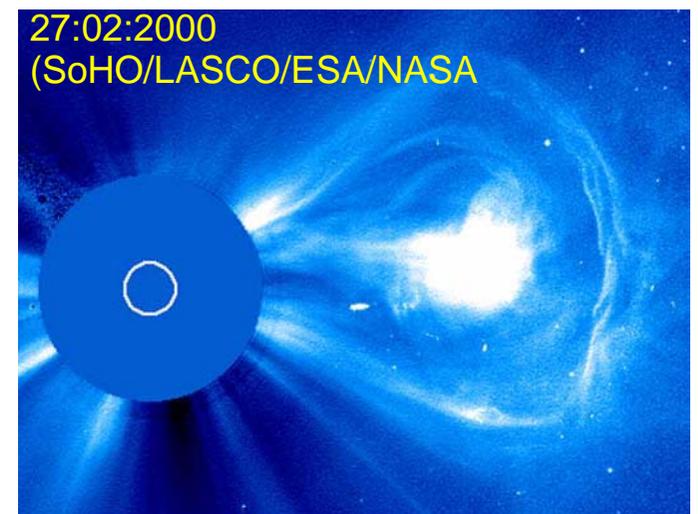
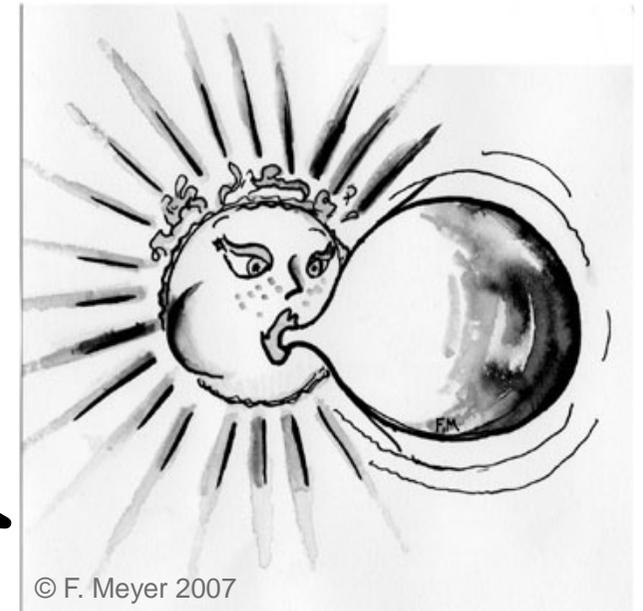


Magnétosphère terrestre

film

Effets des perturbations du vent solaire sur la Terre

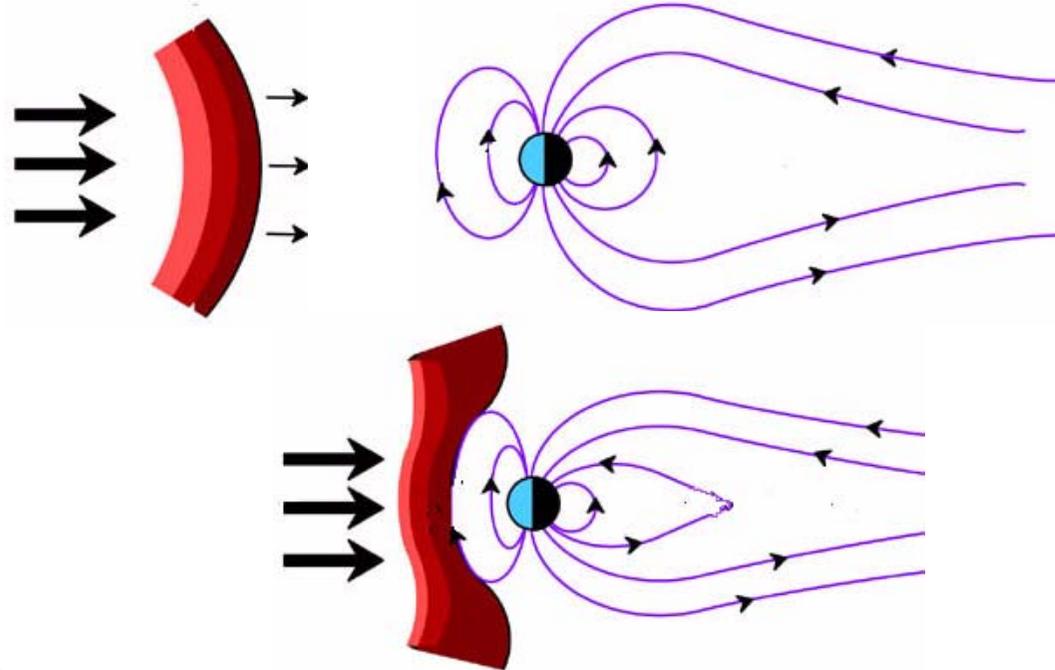
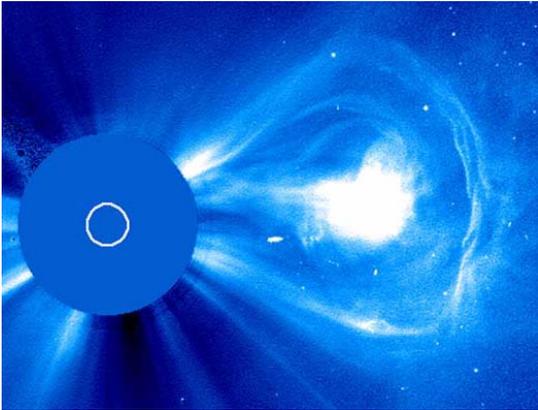
- variations de vitesse du vent (quand le vent rapide rattrape le vent lent)
- éruptions solaires (\Rightarrow particules et rayonnement de haute énergie)
- éjections de matière par le Soleil (souvent liées aux éruptions solaires)



film

Effets des perturbations du vent solaire sur la Terre

Ejection de matière par le soleil



- compression de la magnétosphère

Effets des perturbations du vent solaire sur la Terre

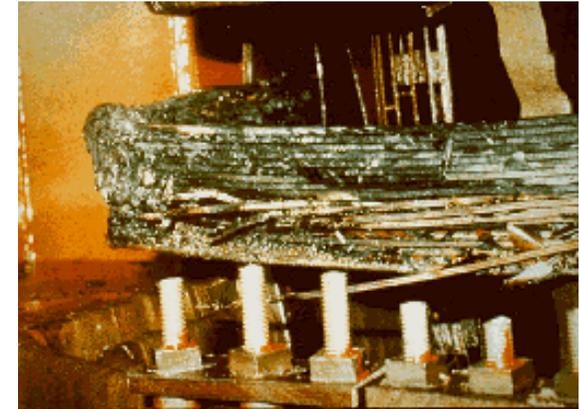
- courants électriques
- modification du champ magnétique

➔ courants induits dans les lignes électriques

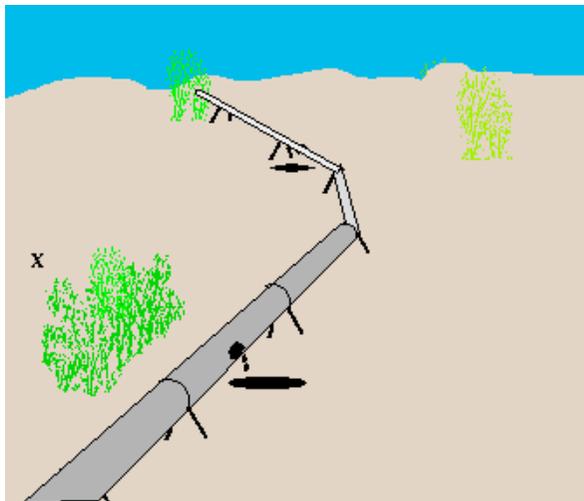
➔ courants induits dans les pipelines
⇒ corrosion



restes d'un transformateur



Space Environment Center

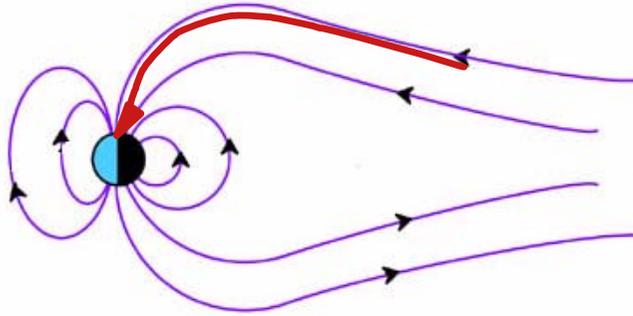


<http://www.sec.noaa.gov/>

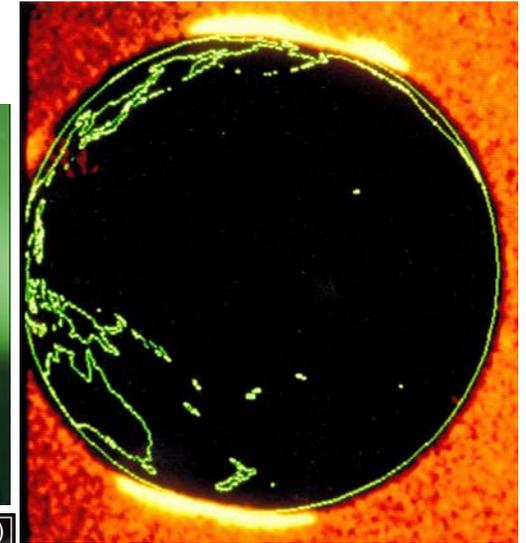


Effets des perturbations du vent solaire sur la Terre

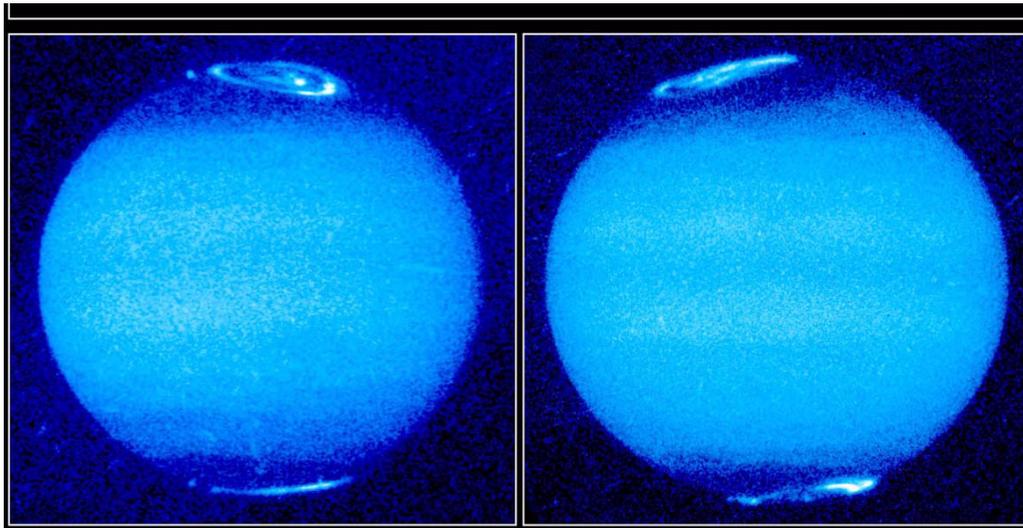
- accélération de particules dans la magnétosphère qui vont vers les zones polaires (et excitent l'atmosphère)



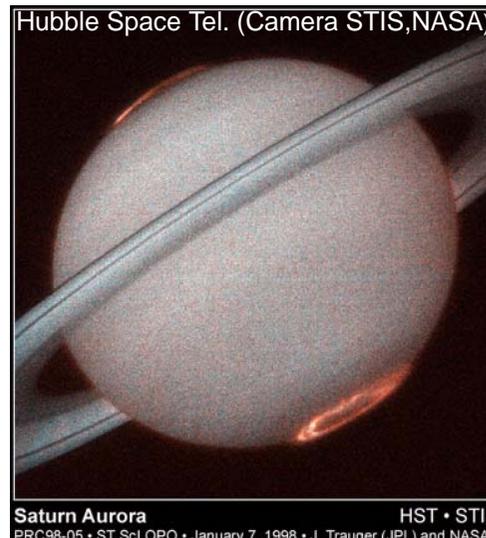
⇒ Aurores terrestres →
et sur les autres planètes ↘



Aurores terrestres



Aurores sur Jupiter (Hubble Space Tel. (NASA, J; Clarke)



Saturn Aurora HST • STIS
PRC98-05 • ST Sci OPO • January 7, 1998 • J. Trauger (JPL) and NASA

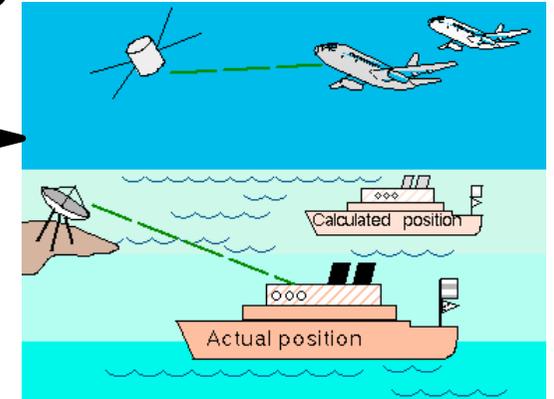
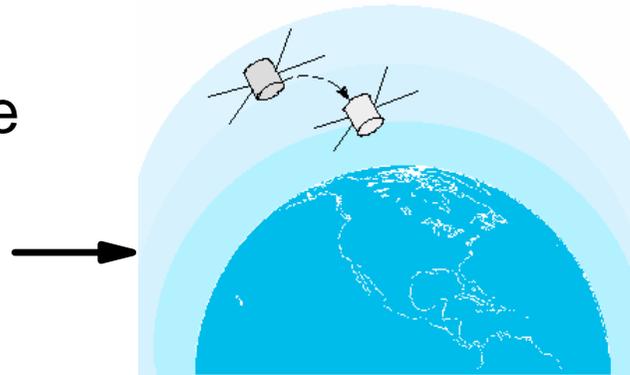
Aurores sur Saturne

Effets des perturbations du vent solaire sur la Terre

● modification de l'atmosphère/ionosphère

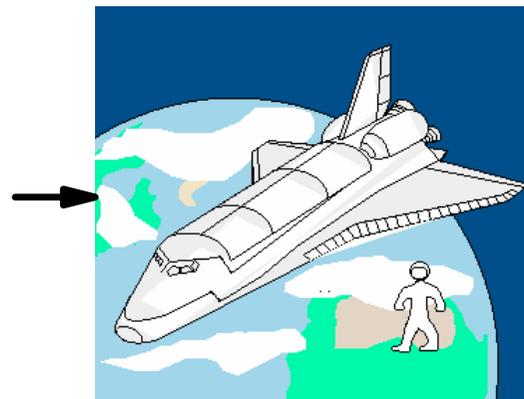
☛ perturbation des systèmes de communication et navigation

☛ augmentation de densité de l'atmosphère
⇒ freinage des satellites



☛ augmentation de densité de l'ionosphère et des flux de particules énergétiques ⇒ décharges électriques et dommages aux circuits électroniques

☛ particules énergétiques
⇒ dommages aux astronautes



Les perturbations du vent solaire **pourraient** avoir un effet à long terme sur le climat

Attention :

- l'effet est controversé
- l'existence de corrélations n'implique pas nécessairement une relation de cause à effet

N'explique pas l'augmentation récente de température

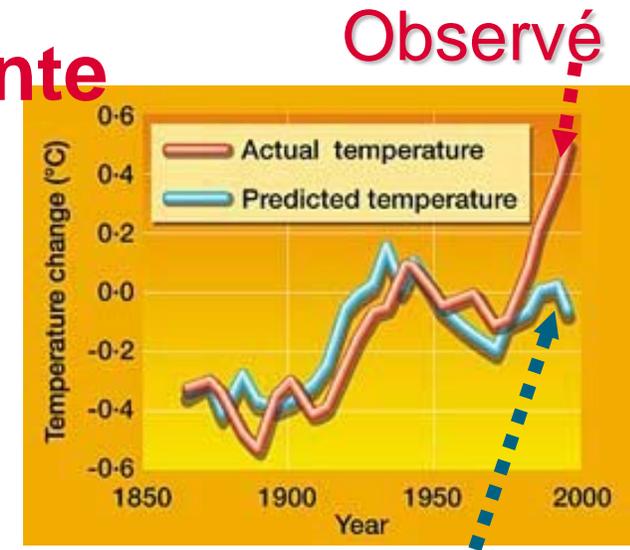
... qui est due à l'émission de gaz produisant effet de serre



Ici, un dessin des Shadocks serait une excellente illustration si j'avais l'autorisation de reproduction



- ☞ Tous les chats sont mortels
- ☞ Socrate est mortel
- ☞ Donc Socrate est un chat



Effet dû au Soleil