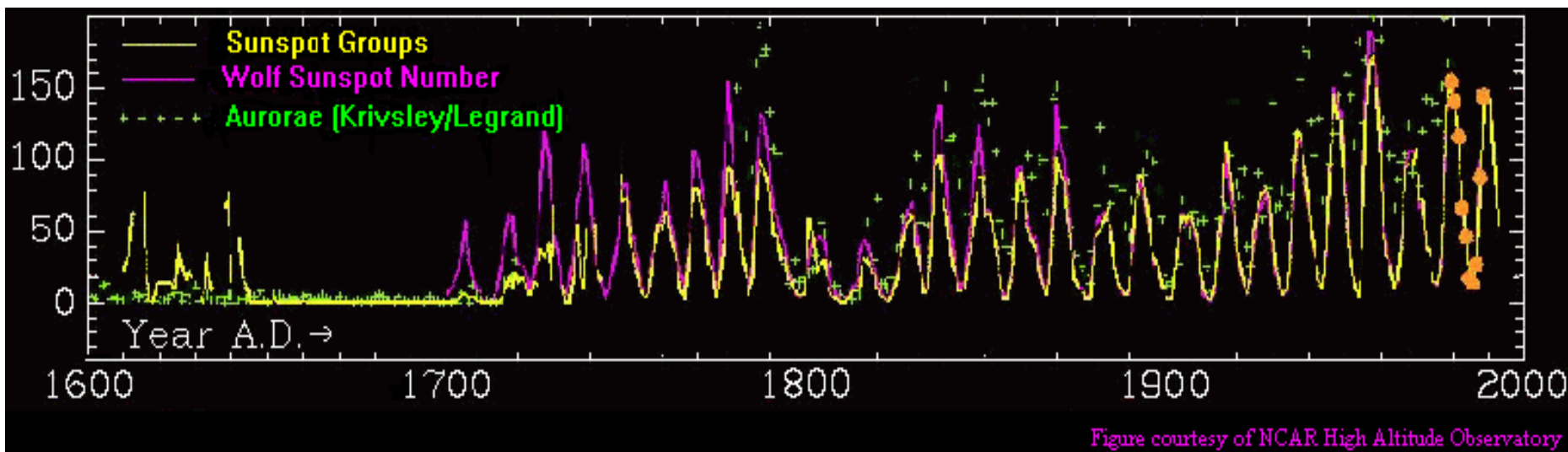


Le vent solaire

- Quelques observations
- Un modèle fluide simple : Parker (1958)
- Implication pour le champ magnétique interplanétaire
- Les limites du modèle de Parker
- D'autres modèles pour le vent ?
- La frontière avec le milieu interstellaire

Un lien entre l'activité solaire et l'activité aurorale



Qu'est-ce qui peut faire ce lien entre la surface solaire et la Terre ?

~ 1900 : Kristian Birkeland (théoricien et expérimentateur – *terella*, aurores, perturbations géomag. ...) propose que « *La Terre est en permanence bombardée par des corpuscules électriques émis par le Soleil* »

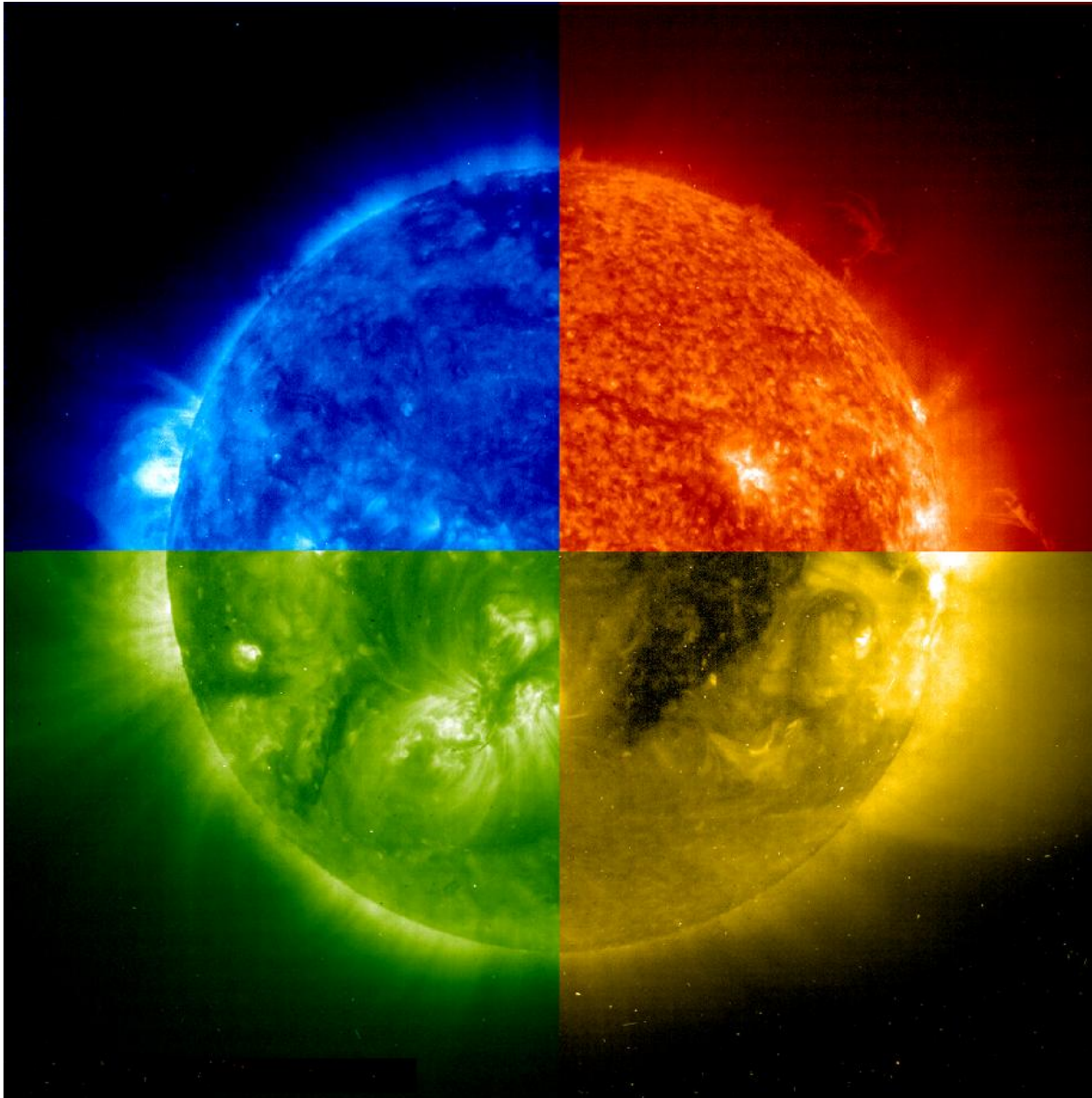


La couronne solaire en lumière blanche



La couronne solaire en UV

Fer
8/9 fois ionisé
171 nm
0.8 Millions K

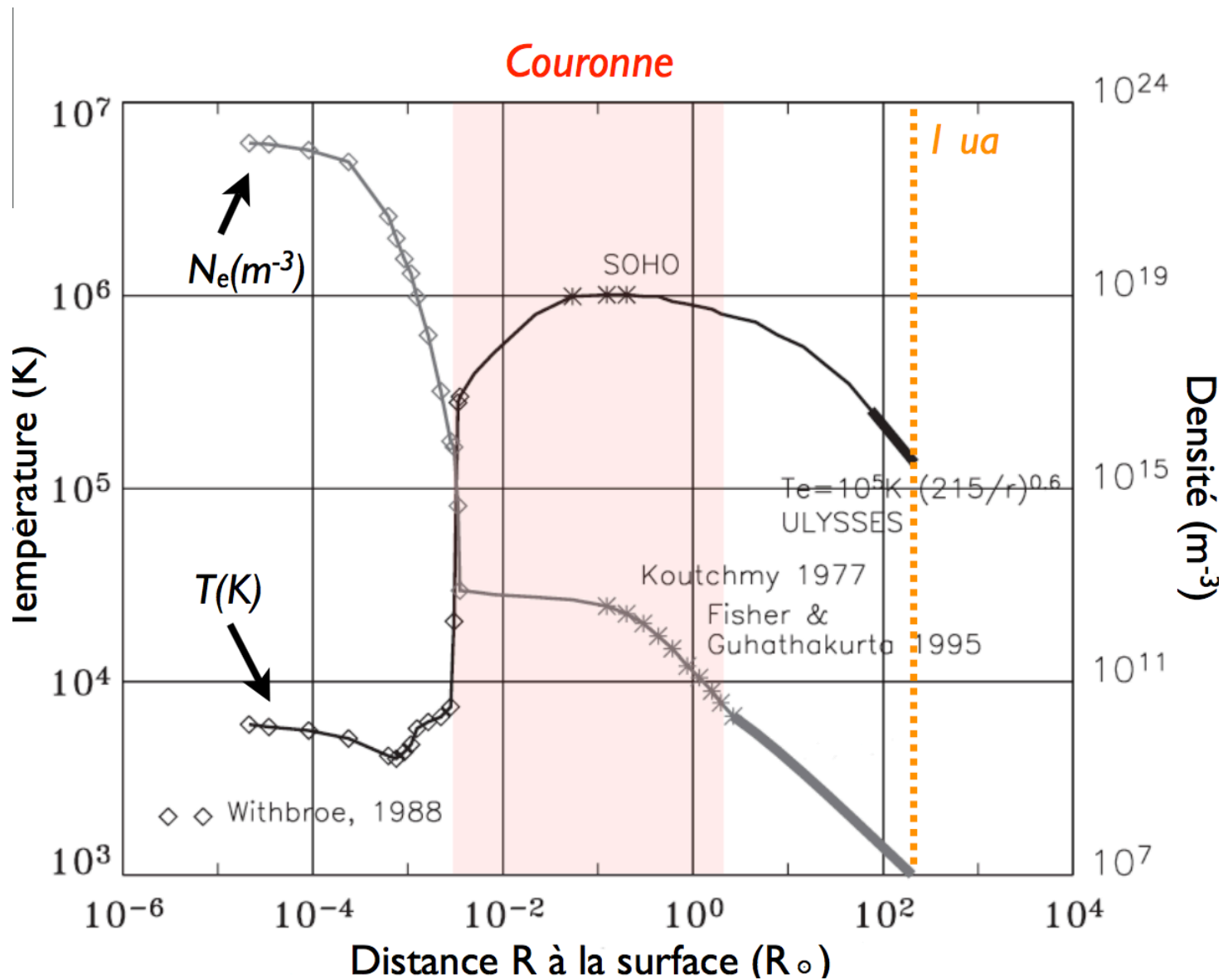


Helium
1 fois ionisé
304 nm
60000 K

Fer
11 fois ionisé
195 nm
1.5 Millions K

Fer
14 fois ionisé
284 nm
2 Millions K

La couronne solaire : profil de température



Vitesse de libération

Quelle est la vitesse de libération à la surface du soleil ?

$$v_{lib} = \sqrt{\frac{2GM}{R}} \simeq 600 \text{ km/s}$$

Quelle est la vitesse thermique des particules (protons/électrons) à la surface du soleil ?

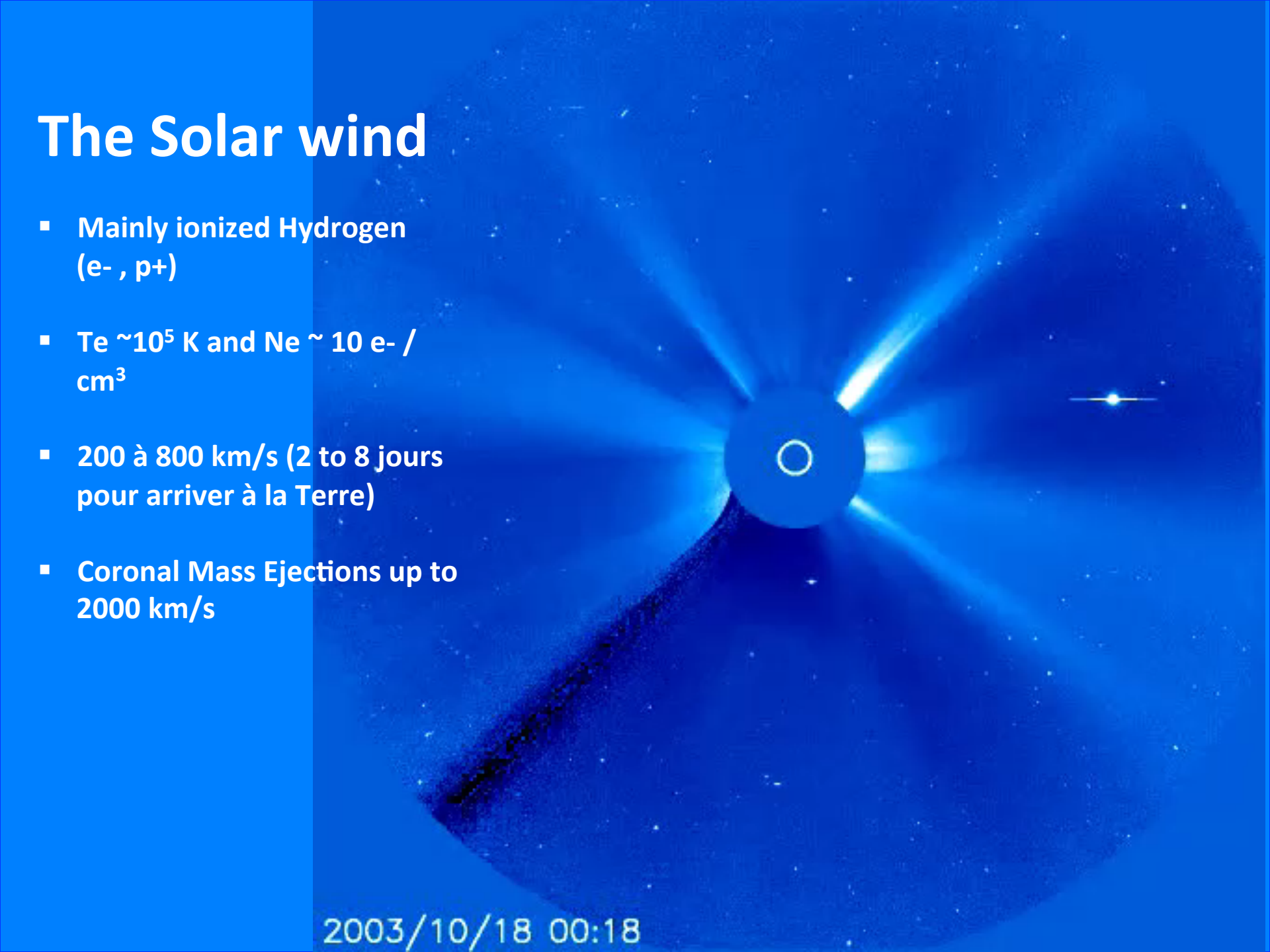
$$v_{th} = \sqrt{\frac{k_B T}{m}} \Rightarrow v_{thp} \simeq 90 \text{ km/s} \text{ et } v_{the} \simeq 4000 \text{ km/s}$$

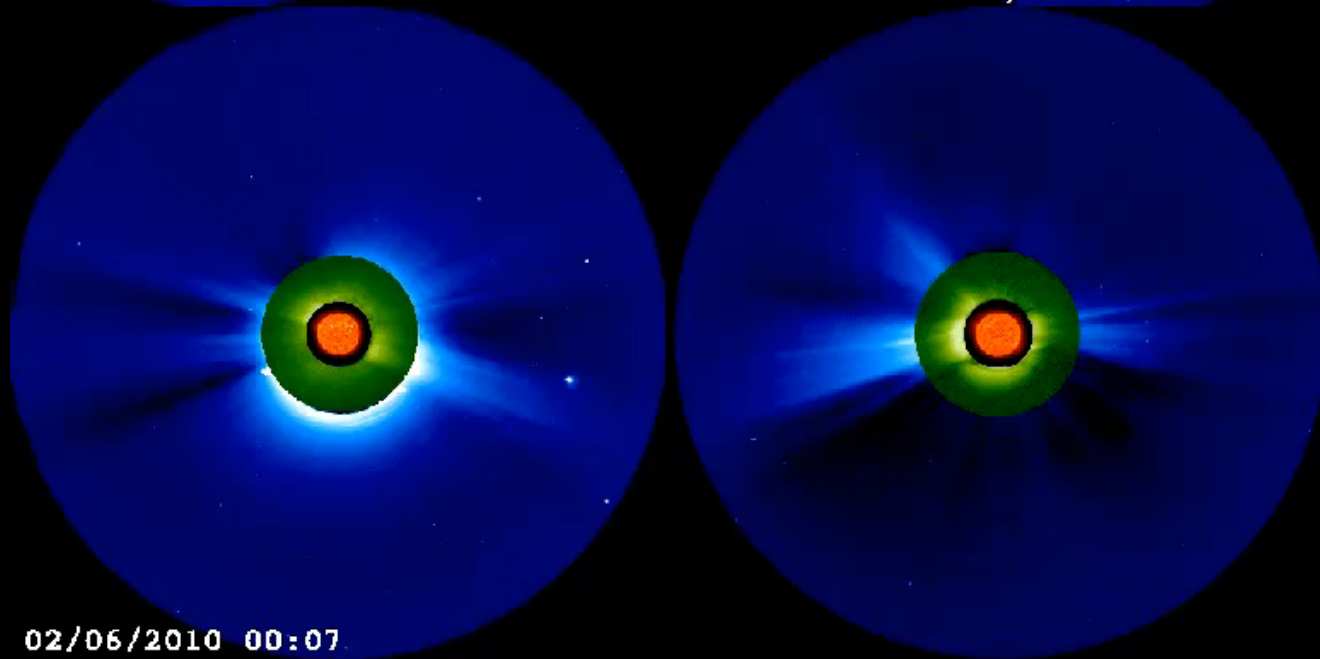
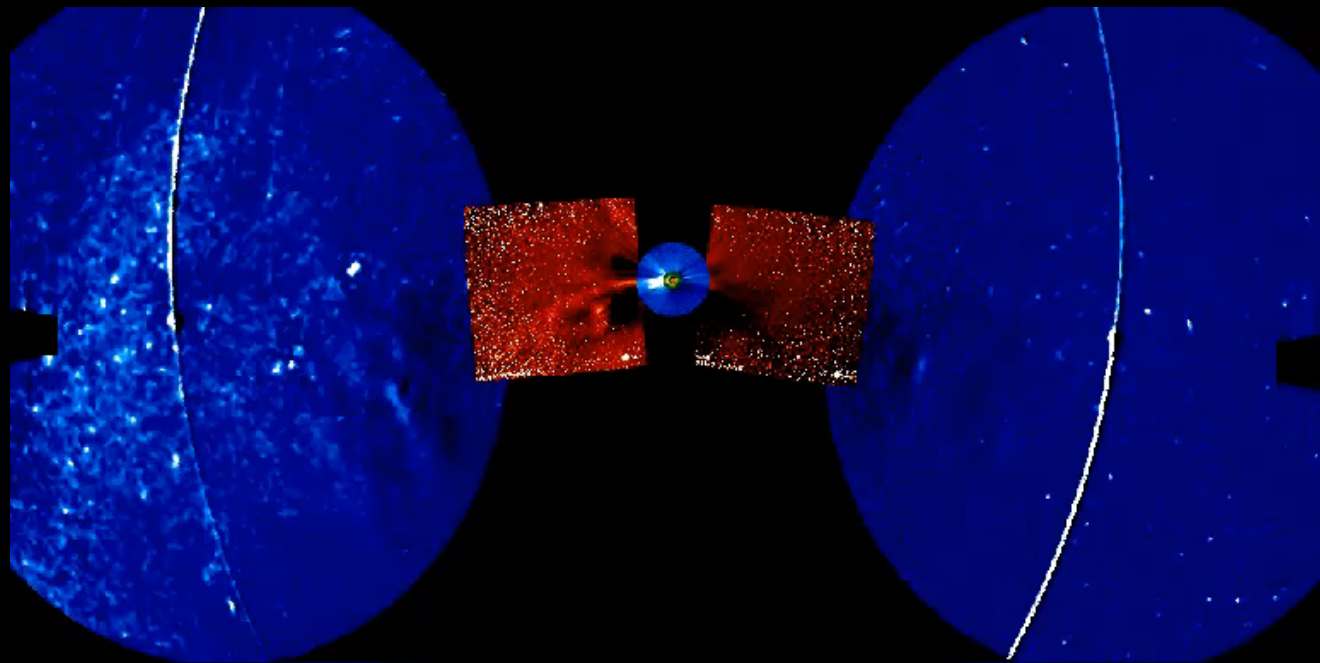
Conclusion : le soleil se charge ?

The Solar wind

- Mainly ionized Hydrogen (e⁻, p⁺)
- $T_e \sim 10^5$ K and $n_e \sim 10$ e⁻ / cm³
- 200 à 800 km/s (2 to 8 jours pour arriver à la Terre)
- Coronal Mass Ejections up to 2000 km/s

2003/10/18 00:18

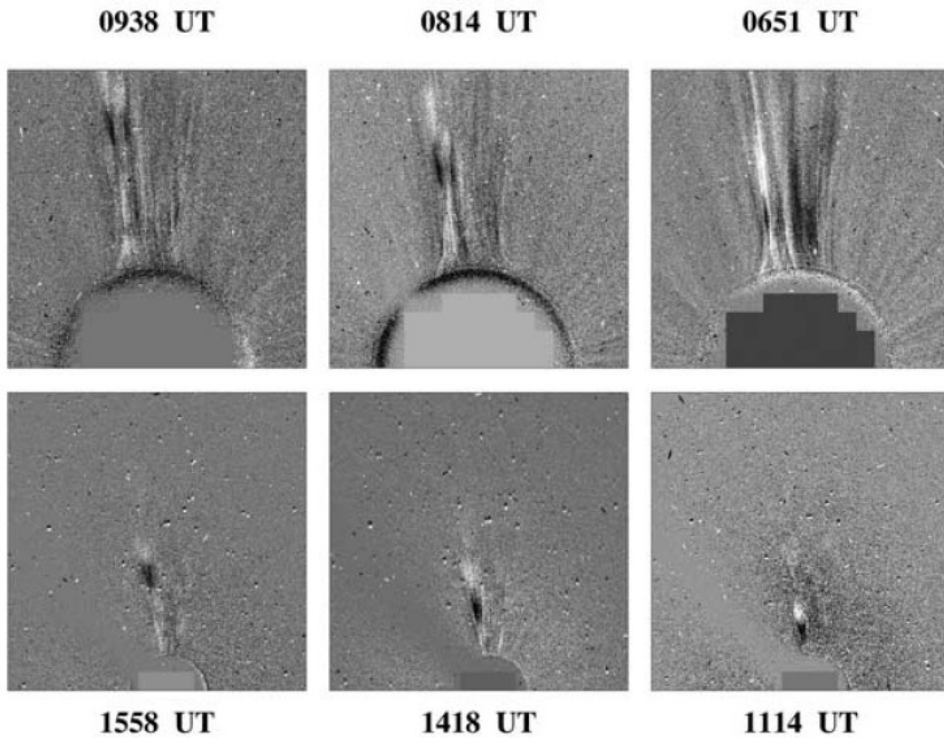




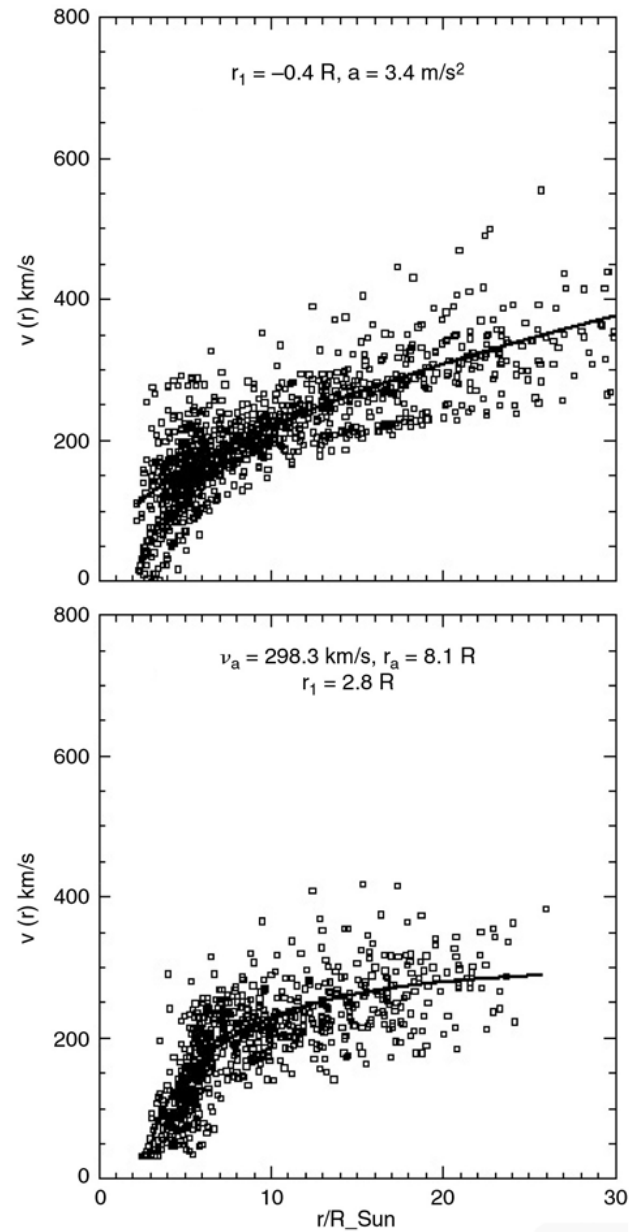
02/06/2010 00:07

Courtesy F. Auchère

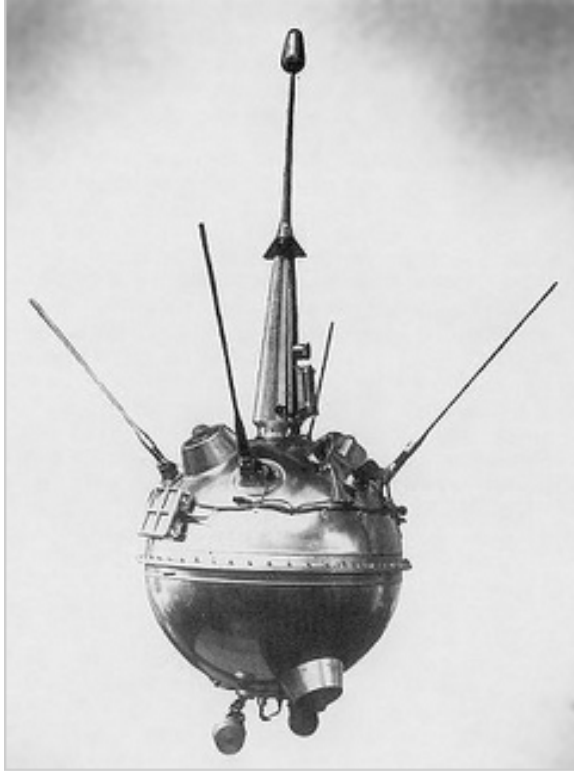
Profils de vitesse dans le vent lent



Sheeley et al., 1997



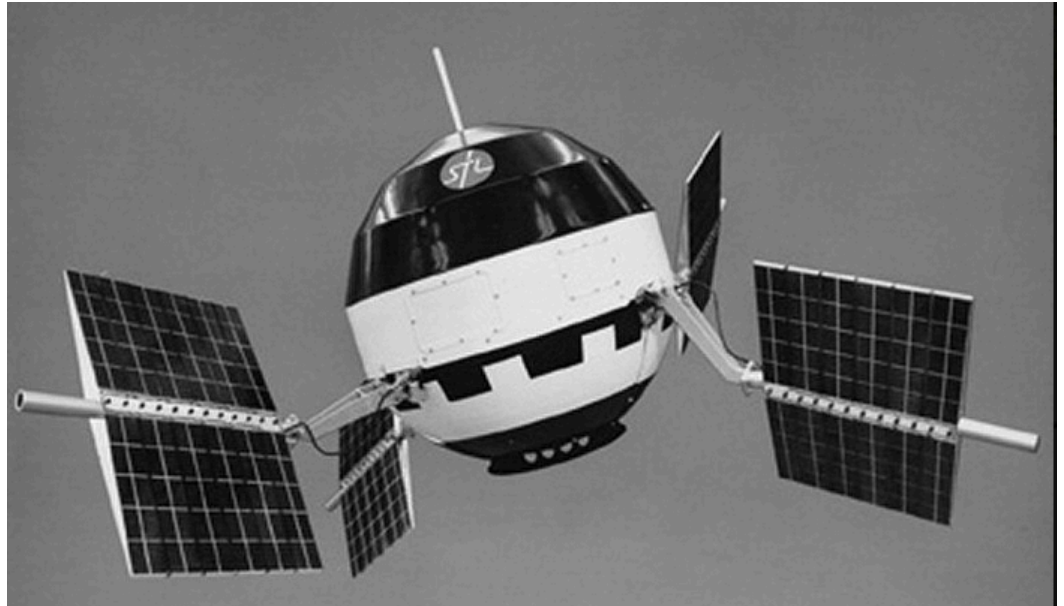
Sondes interplanétaires



Luna 2 (orbiteur lunaire, 1959)

Flux d'ions, mais pas de direction

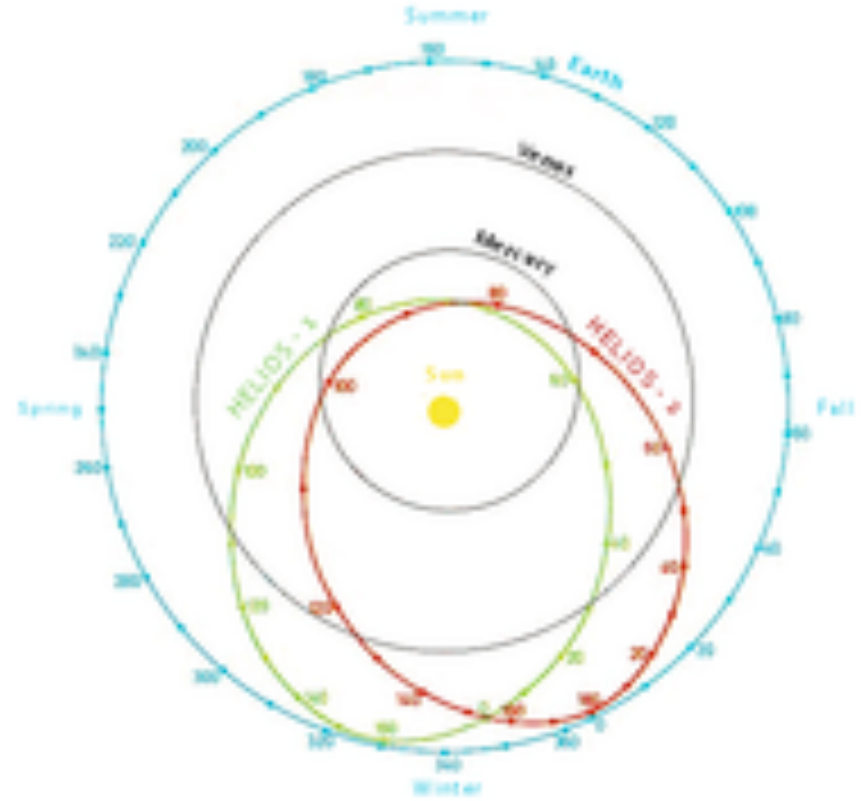
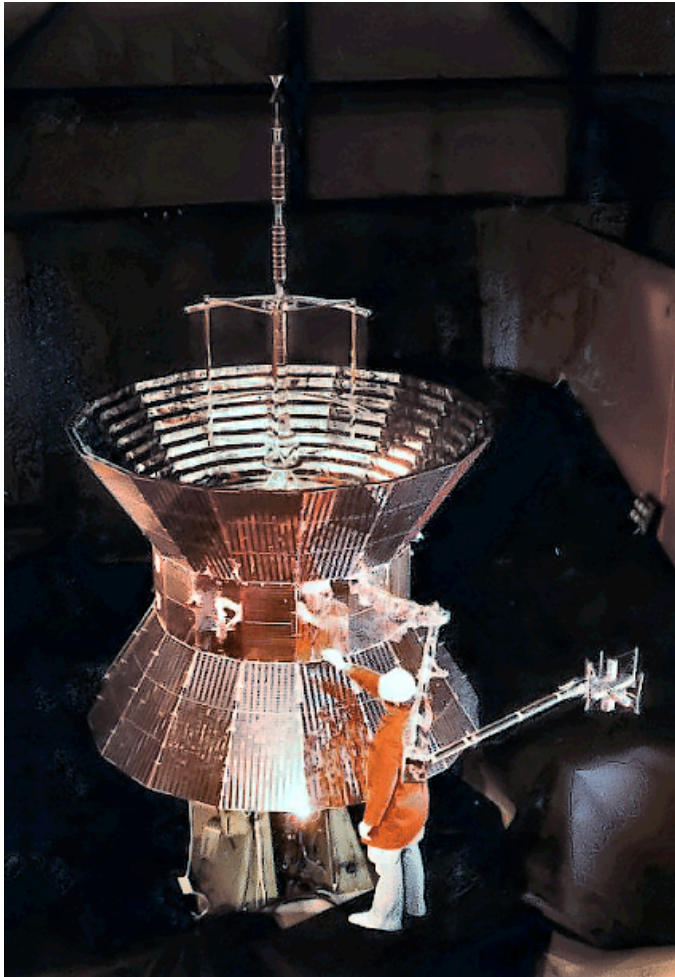
Les premières réussites...



Pioneer 5 (interplanétaire, orbite Terre-Venus, 1960)

Premières mesures d'un vent supersonique dans la direction anti-solaire

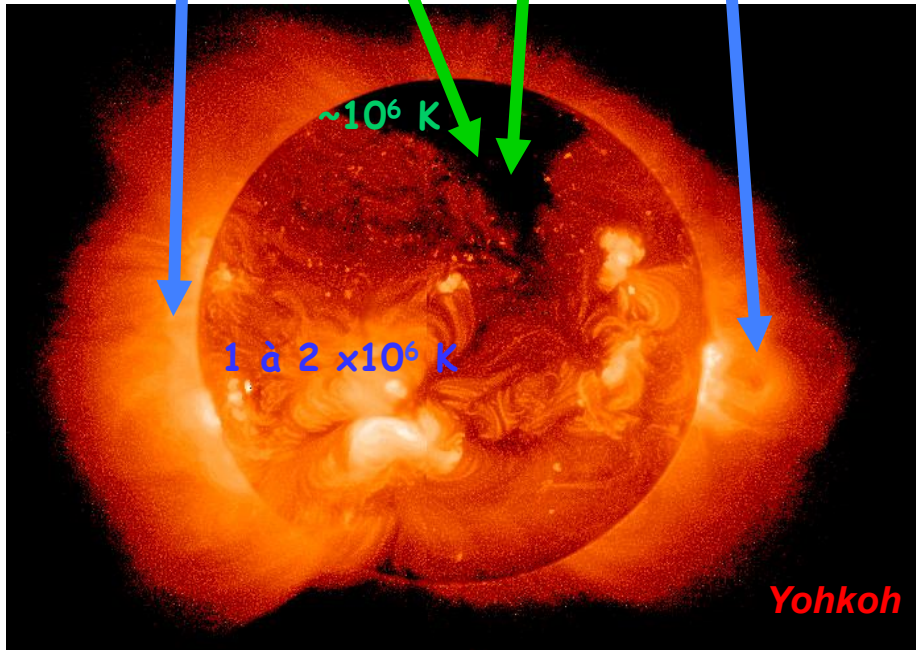
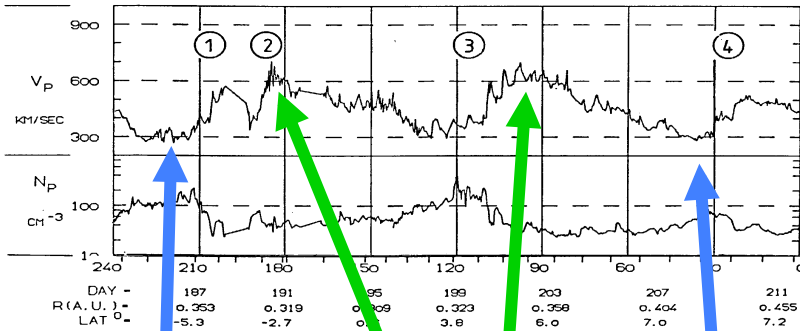
Sondes interplanétaires



Les sondes Helios (lancement 1974)

Le vent solaire vu de l'écliptique

Helios, 1983



Hydrogène ionisé :

- e^- : ~1% d'ions lourds
- H^+ : ~95% (C, N, O, Ne, Mg, Fe)
- He^{2+} : ~4%

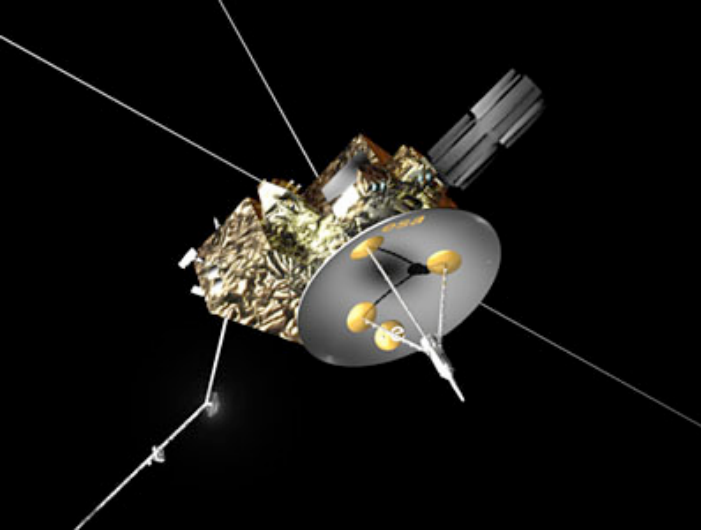
Vent lent :

- $V \sim 200$ à 600 km/s
- $N_e \sim 5$ à 20 cm^{-3}
- $\rho V^2 \sim 2.1 \times 10^{-9}$ Pa
- $T_e \sim 1$ à 3×10^5 K $\rightarrow V_{the} \sim 2500$ km/s
- $T_p \sim 0.5$ à 3×10^5 K $\rightarrow V_{thp} \sim 40$ km/s

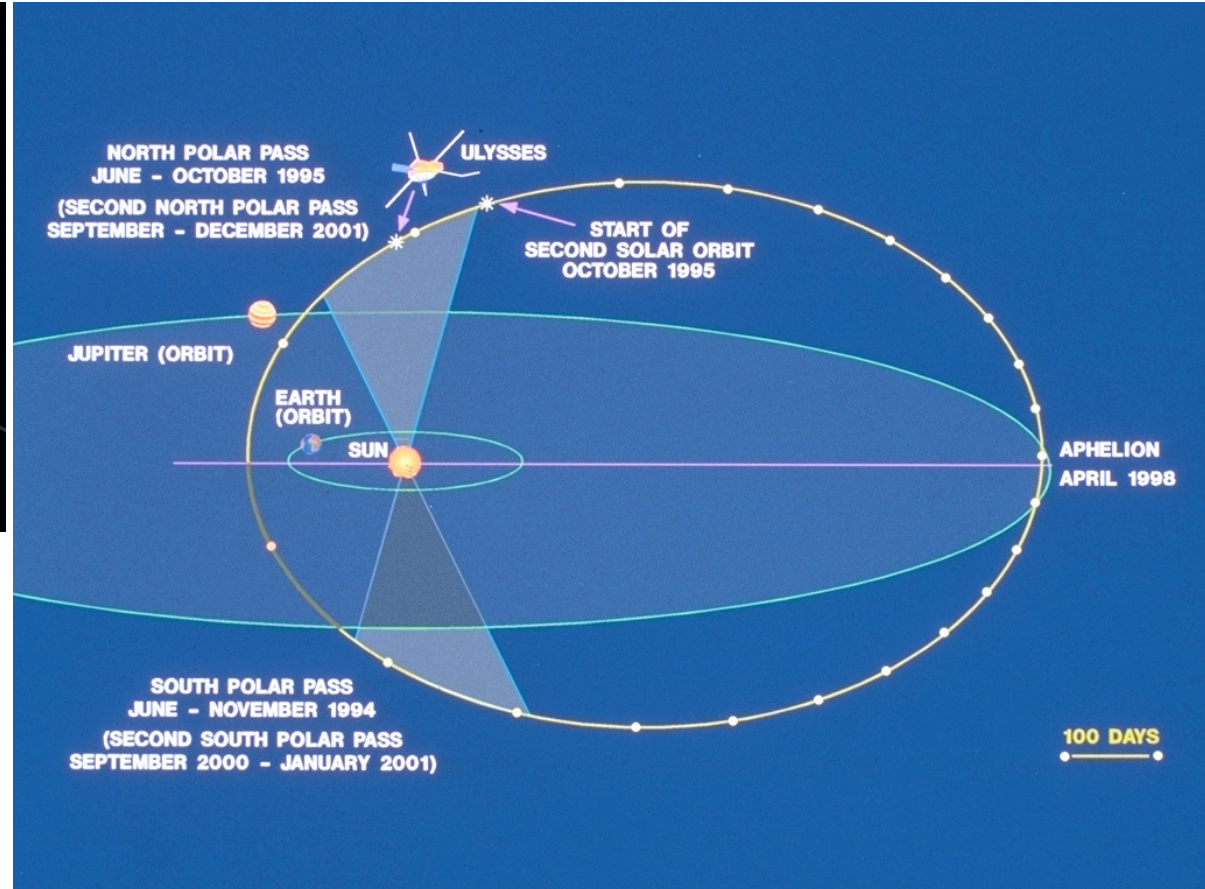
Vent rapide :

- $V \sim 600$ à 800 km/s
- $N_e \sim 1$ à 5 cm^{-3}
- $\rho V^2 \sim 2.6 \times 10^{-9}$ Pa
- $T_e \sim 1$ à 2×10^5 K $\rightarrow V_{the} \sim 2100$ km/s
- $T_p \sim 2$ à 5×10^5 K $\rightarrow V_{thp} \sim 80$ km/s

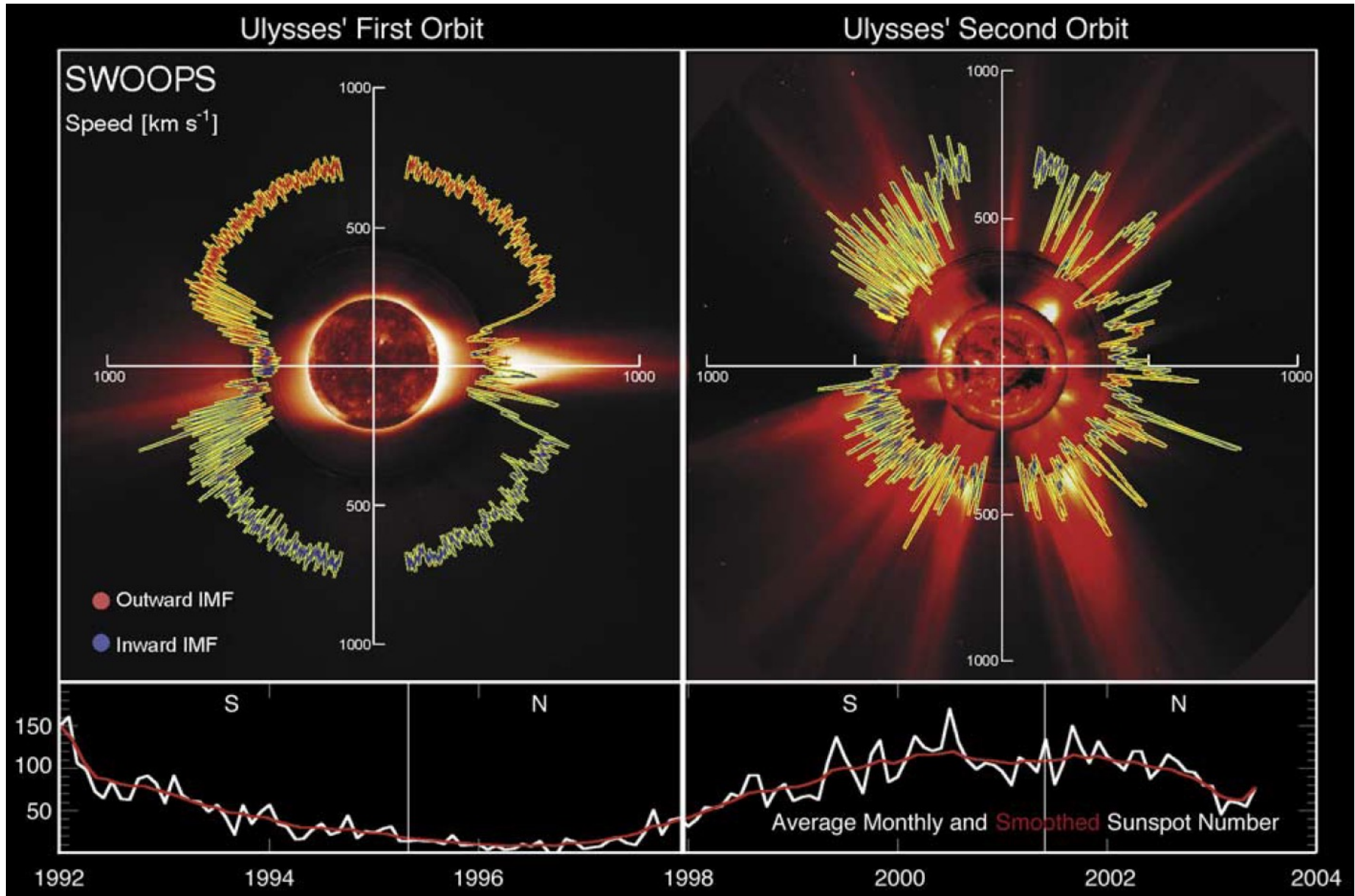
Sondes interplanétaires



**Ulysses :
premier orbiter
solaire en
dehors du plan
de l'écliptique**



Le vent solaire et le cycle solaire



Quelques ordres de grandeur

Luminosité solaire : $L_{\text{sol}} \sim 4 \times 10^{26} \text{ W}$

A 1 UA : $P_{\text{rad}} \sim L_{\text{sol}} / 4\pi c R^2 \sim 6 \cdot 10^{-6} \text{ Pa}$
 $P_{\text{plasma}} \sim \rho V^2 \sim 2 \cdot 10^{-9} \text{ Pa}$

Taux de perte de masse $dM/dt \sim \rho V 4\pi R^2 \sim 10^9 \text{ kg/s}$

⇒ un million de tonne d' H par sec ($10^{-14} M_{\text{sol}}/\text{an}$).

Néanmoins :

- Influence l' ensemble du système solaire et ses constituants
- Effet sur les sondes interplanétaires (charge)
- A des effets visibles au quotidien (Météo de l' espace)
- Laboratoire pour la physique des plasmas *in-situ*

Modéliser le vent solaire

L'approche fluide

Les équations fluides

symétrie sphérique, régime permanent

Equation de continuité :
$$\frac{d}{dr} \rho(r) v(r) r^2 = 0$$

Conservation du moment :
$$\rho v(r) \frac{d}{dr} v(r) = -\frac{dP}{dr} - \rho \frac{GM_{sun}}{r^2}$$

(forces négligées ? Quel pourrait être leur impact ?)

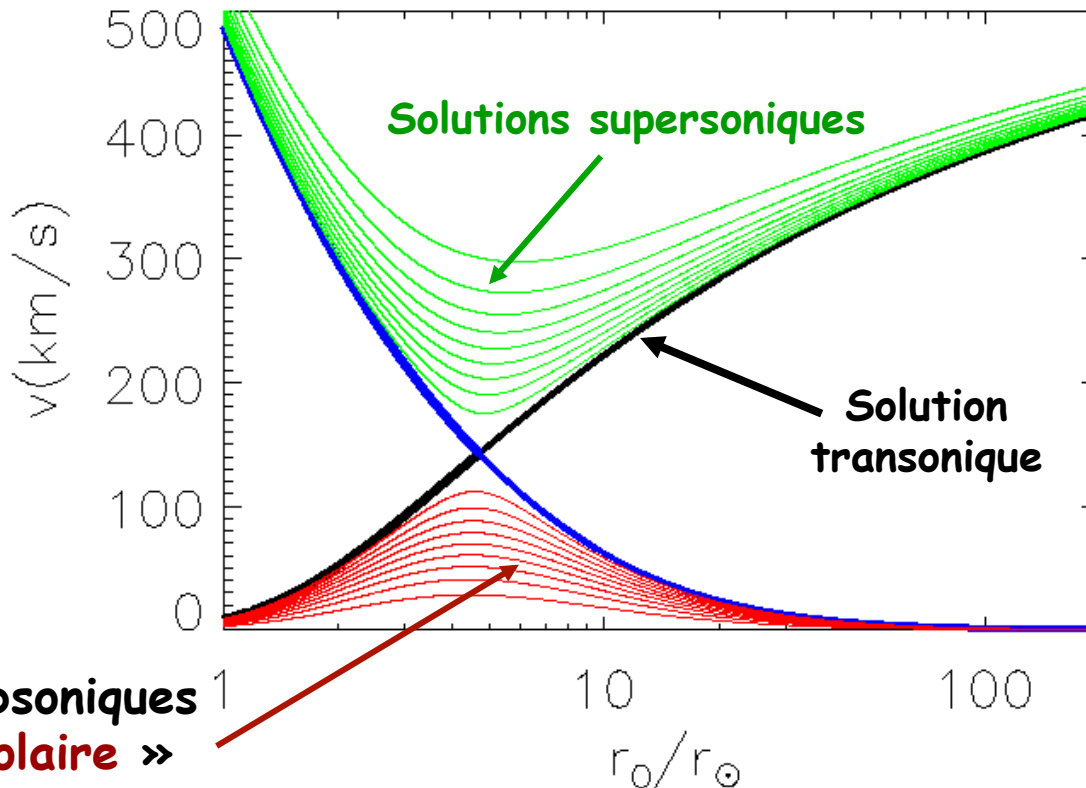
Fermeture : Isotherme (Parker, 1958) :

$$P = \rho(r) k_B T / \mu \quad \text{avec} \quad k_B T / \mu = cste = A_s^2$$

Les équations fluides

symétrie sphérique, régime permanent

Montrer que :
$$\frac{1}{V} \frac{dV}{dr} = \frac{1}{V^2 - A_s^2} \frac{2A_s^2}{r^2} (r - r_C) \quad \text{où} \quad r_C = \frac{GM_{\odot}}{2A_s^2}$$



Solutions subsoniques
ou « brise solaire »

Le champ magnétique interplanétaire

Conséquence de l'existence du vent solaire sur la structure du champ magnétique interplanétaire

Le milieu interplanétaire est baigné par un plasma s'écoulant radialement. Le champ B est gelé dans le plasma.

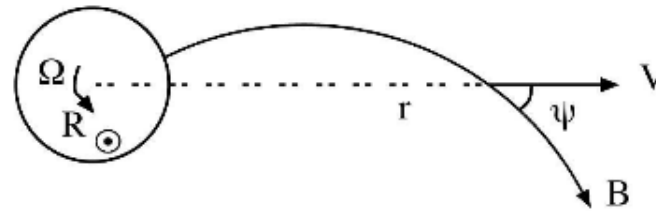
Le soleil tourne sur lui même avec une vitesse angulaire $\Omega = 2.7 \times 10^{-6}$ rad/s

Écoulement « loin » de la surface du soleil

$$V_r = V_{sw}$$

$$V_\theta = 0$$

$$V_\phi = -\Omega r \sin \theta$$



Lignes de champ gelées : $d\vec{\ell} \times \vec{V} = \vec{0}$

On obtient : $dr/d\phi = -V_{sw}/\Omega \Rightarrow r = r_0 - V_{sw}(\phi - \phi_0)/\Omega$

Angle « local » : $\tan \psi = B_\phi/B_r = r d\phi/dr = -\Omega r \sin \theta / V_{sw}$

1 UA : $\Psi = 45^\circ$ environ

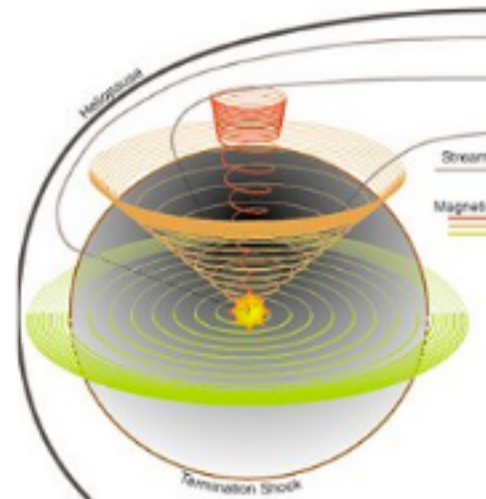
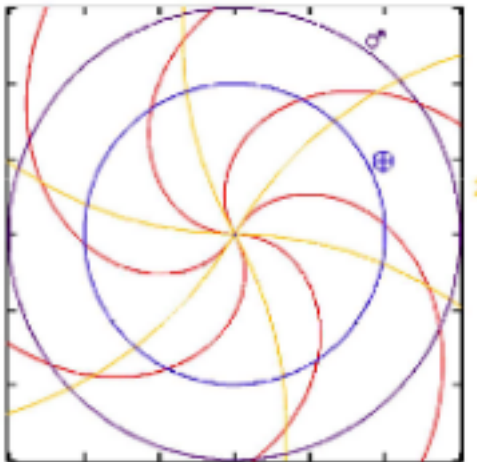
Variation du module de B

On a la forme des lignes de champ B, comment varie l'amplitude des différentes composantes (i.e. le module de B) avec la distance au soleil ?

Conservation du flux magnétique : $\text{div} B = 0 \Rightarrow B_r = B_0 (r_0/r)^2$

On en déduit l'évolution de l'autre composante : $B_\phi = -\frac{\Omega B_0 r_0^2 \sin \theta}{r V_{sw}}$

Donc le module de B varie avec la distance au soleil comme $1/r$ (sauf dans les régions polaires où B varie en $1/r^2$)



La couche de courant héliosphérique

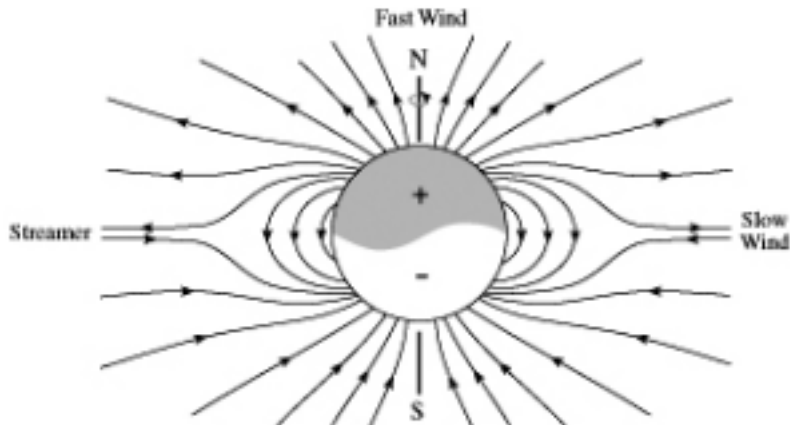
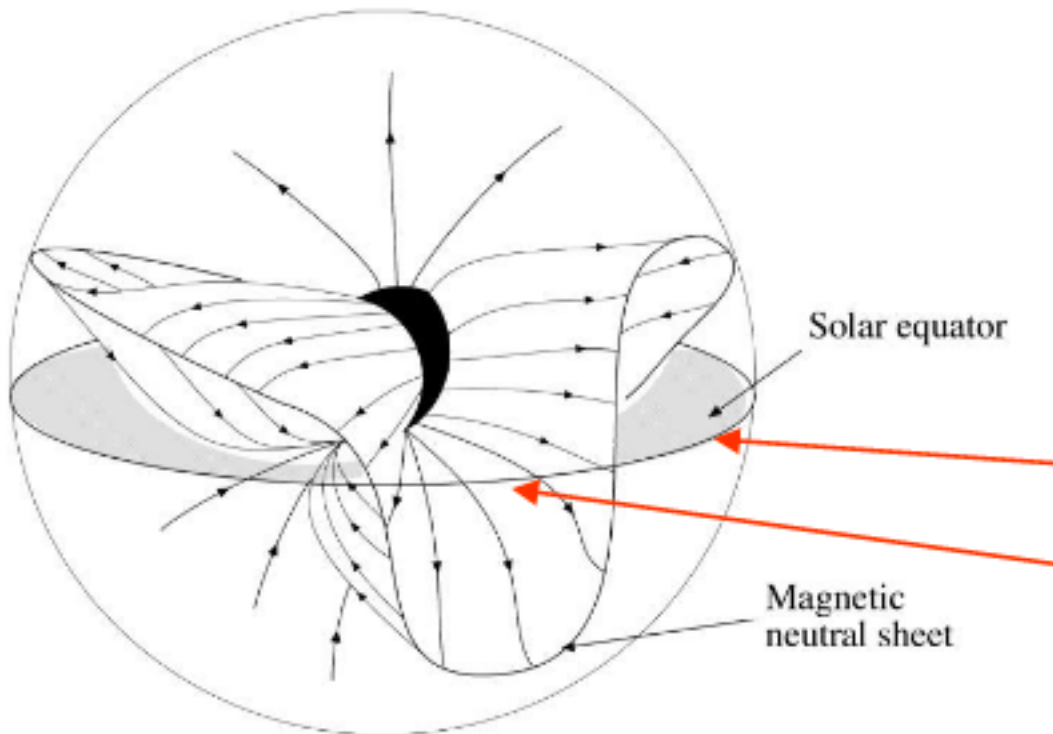


Image simple du champ B dans un plan perpendiculaire à l'équateur solaire

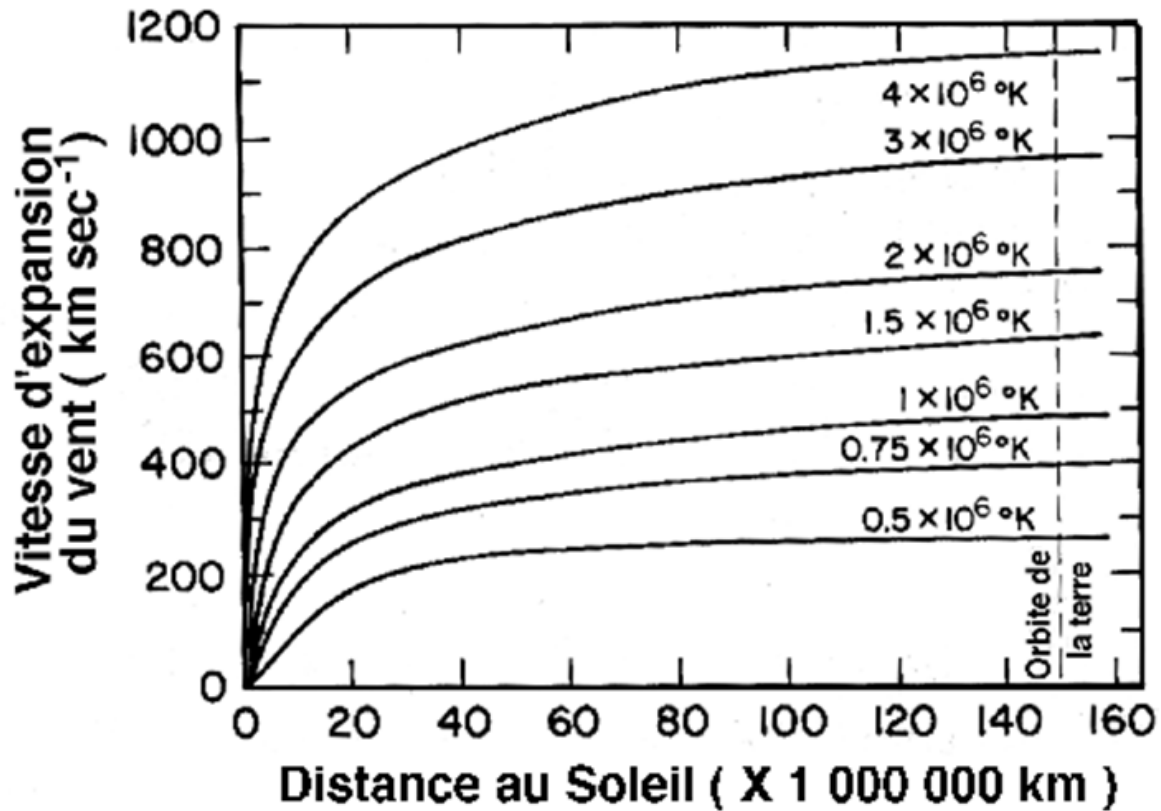


En réalité la couche de courant est courbée (effet « robe de ballerine »)

La Terre va voir alternativement une polarité ou l'autre pour le champ B (direction solaire ou anti-solaire)

Problèmes avec le modèle de Parker

Les solutions isothermes



Evaluation de V à l'infini pour le modèle isotherme

$$V_{\infty} \simeq 2A_s \sqrt{\ln \left(\frac{r}{r_0} \right)}$$



Déposition d'énergie infinie

Vent adiabatique

On change la relation de fermeture : $P/\rho^\gamma = cste$

Le théorème de Bernouilli nous dit (on le démontre ?)

$$\begin{array}{l} \text{Énergie par} \\ \text{unité de masse} \end{array} \leftarrow W = \frac{v^2}{2} + \frac{\gamma}{\gamma-1} \frac{k_B T}{\mu} + \Phi_G = cst \quad \Phi_G = -\frac{M_* G}{r}$$

En. cinétique \leftarrow

Enthalpie $= \frac{5}{2} k_B T$

En $r_0 = R_{\text{sun}}$ on a $v_0 \sim 0$, $T_0 = 1.5 \times 10^6$ K et $m = 0.6 m_p$ (effet He)

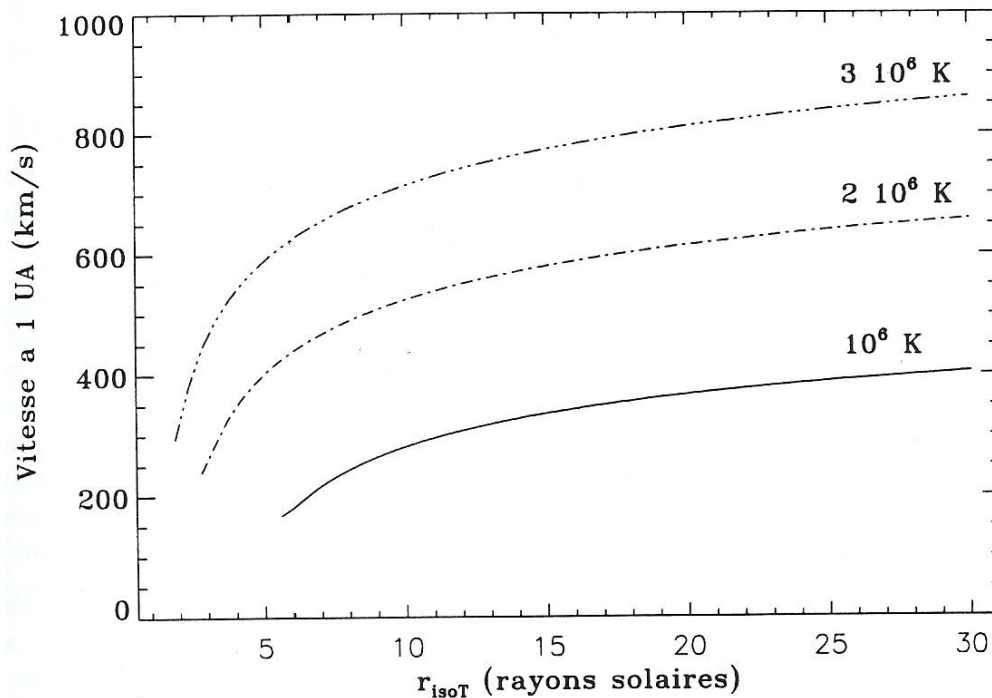
$$V_0^2/2 \sim 0$$

$$\text{Enthalpie} \sim 0.5 \times 10^{11} \text{ J/kg}$$

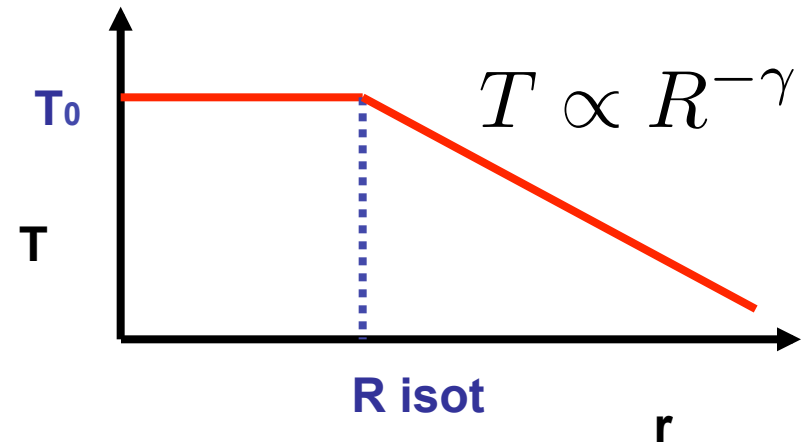
$$F_G \sim -1.9 \times 10^{11} \text{ J/kg}$$

**$W < 0$: Pas de vent si le
fluide est adiabatique
($\gamma = 5/3$)**

Un modèle « bricolo »



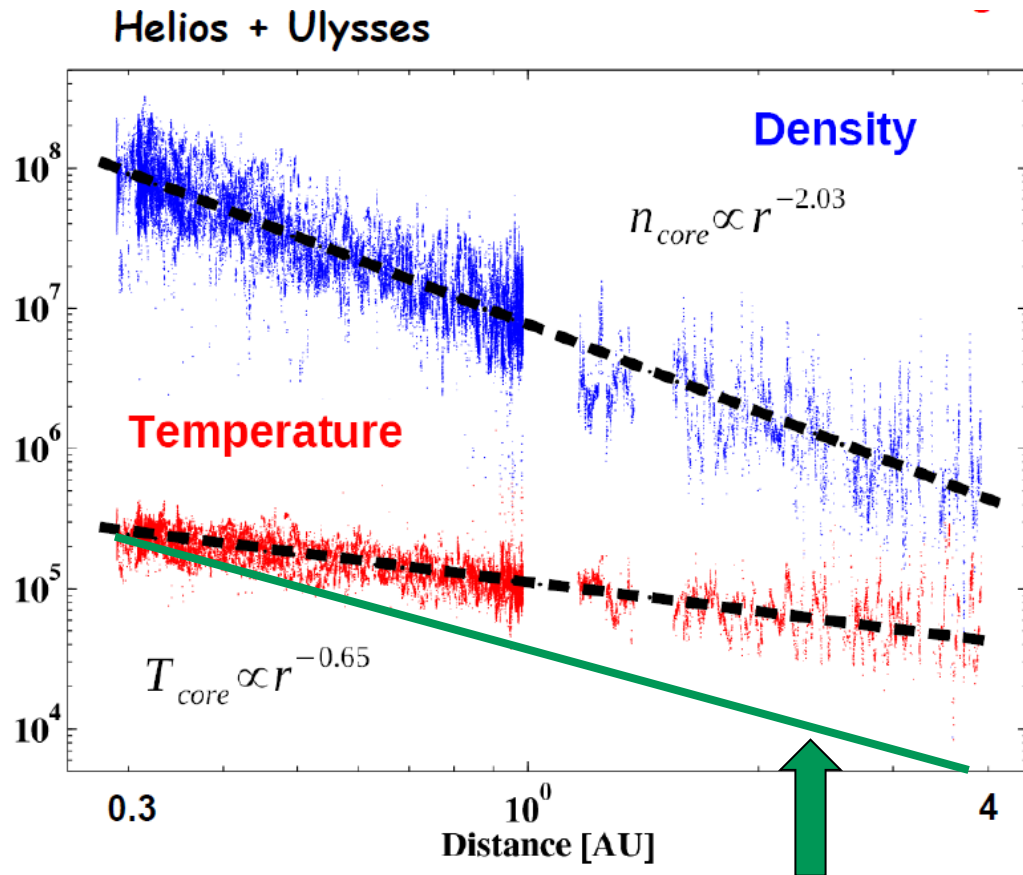
(M. Maksimovic)



- Il pourrait y avoir assez d'énergie thermique pour accélérer le vent lent
- Clairement pas assez d'énergie thermique pour le vent rapide

→ Le problème de l'accélération du vent (rapide) : source d'énergie supplémentaire ?

Observation des gradients de température



$$T_e = R^{-\beta}$$

électrons : $\beta \sim 0.4$ à 0.8
 Protons : $\beta \sim 0.9$ à 1.4

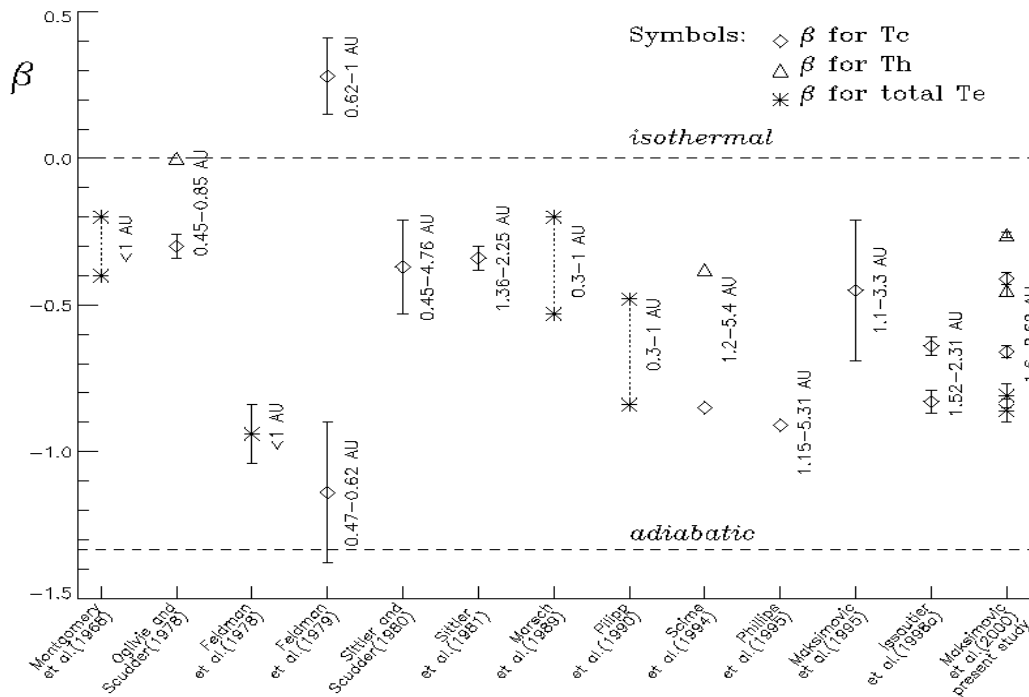
Pour $r \gg R_{\odot}$ $N \propto r^2$
 $Nk_B T \propto N^{\gamma}$

$$\rightarrow \gamma = \beta/2 + 1$$

$$T \propto r^{-4/3}$$

Observation des gradients de température

$$T_e = R^{-\beta}$$



électrons : $\beta \sim 0.4$ à 0.8
Protons : $\beta \sim 0.9$ à 1.4

Pour $r \gg R_{\odot}$ $N \propto r^2$
 $Nk_B T \propto N^{\gamma}$
 $\rightarrow \gamma = \beta/2 + 1$

$\gamma = 1.4$ to 1.7 : protons
 $\gamma = 1.1$ to 1.4 : électrons

$\gamma = 1$ isotherme
 $\gamma = 5/3 = 1.66$ adiabatique

Electrons : entre adiabatique & isotherme
Protons : plus proche d'adiabatique

Energie supplémentaire : Le flux de chaleur

On reprend l'équation de conservation de l'énergie en régime stationnaire, mais sans l'hypothèse adiabatique (qui se traduisait par $\text{div}(\mathbf{Q}) = 0$)

$$\frac{v^2}{2} + \frac{5}{2} \frac{k_B T}{\mu} + \Phi_G + \frac{Q}{\rho v} = \text{cst}$$

À la base $V \sim 0$, à l' ∞ l'enthalpie et la gravité négligeable devant leur valeurs à la base

$$\frac{v_\infty^2}{2} \approx \frac{5}{2} \frac{k_B T_0}{\mu} + \Phi_{G0} + \left[\frac{Q}{\rho v} \right]_0 - \left[\frac{Q}{\rho v} \right]_\infty \quad (\text{on prend un « meilleur cas »})$$

En $r_0 = R$ on a $v_0 \sim 0$, $T_0 = 1.5 \times 10^6$ K et $\mu = 0.6 m_p$ (effet He)

$$V_0^2/2 \sim 0$$

$$\text{Enthalpie} \sim 0.5 \times 10^{11} \text{ J/kg}$$

$$\Phi_G \sim -1.9 \times 10^{11} \text{ J/kg}$$

$$v_\infty^2/2 \sim 1 \text{ à } 3 \times 10^{11} \text{ J/kg}$$

(400 à 800 km/s)

Avec lux de chaleur collisionnel de Spitzer (loi de Fourier) :

$$Q_{SP} = -q_0 T_e^{5/2} \frac{dT_e}{dr} \quad \text{avec } q_0 = 10^{11} \text{ Wm}^{-2}$$

$$Q_{SP0} \approx \frac{2}{7} q_0 \frac{T_{e0}^{7/2}}{r_0} \approx 17 \text{ Wm}^{-2}$$

=> On doit avoir $Q_0 \geq 70 \text{ Wm}^{-2}$

Pas assez !!

A la recherche de l'énergie perdue

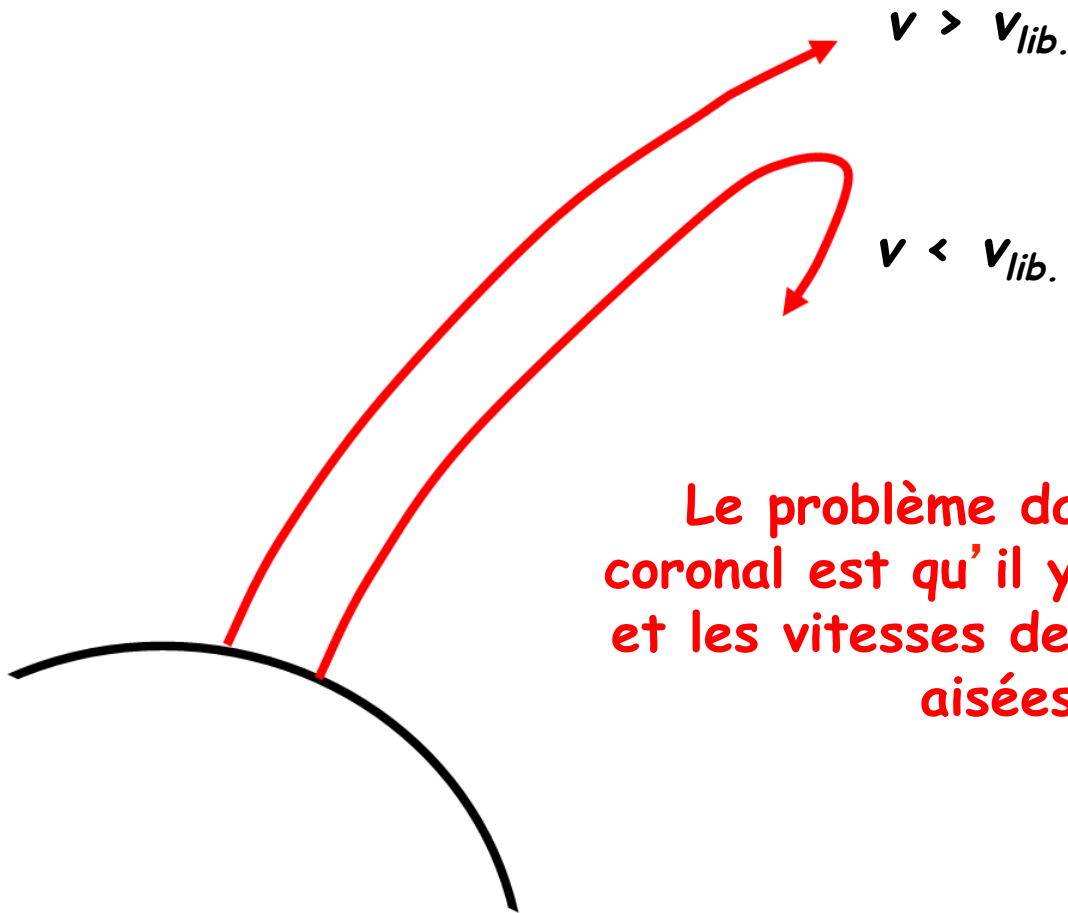
- Interactions ondes-particules
- Lien avec la turbulence interplanétaire
- Chauffage cyclotronique ionique
- Modèles multi-fluides (électrons chauds découplés)
- etc ...

Modéliser le vent solaire

L'approche cinétique

Flux d'échappement de Jeans

$$F_{echap.} = \int_{v_{lib}}^{+\infty} \int_0^{\pi/2} \int_0^{2\pi} v_r f_0(v, \theta, \phi) v^2 \sin \theta d\theta d\phi$$



Le problème dans le cas du plasma coronal est qu'il y a un champ électrique et les vitesses de libération ne sont pas aisées à calculer

Champ de Panekoeck-Rossland (hydrostatique)

$$\frac{d}{dr} p_e = -m_e n_e \frac{GM}{r^2} \quad \boxed{-en_e E}$$

$$\frac{d}{dr} p_p = -m_p n_p \frac{GM}{r^2} \quad \boxed{+en_p E}$$

$$n_e = n_{e0} \exp \left[-\frac{GMm_e}{R_0 k_B T} \left(1 - \frac{R_0}{r} \right) \right]$$

$$n_p = n_{p0} \exp \left[-\frac{GMm_p}{R_0 k_B T} \left(1 - \frac{R_0}{r} \right) \right]$$

* $H_e \gg H_p$: la quasi-neutralité locale est violée

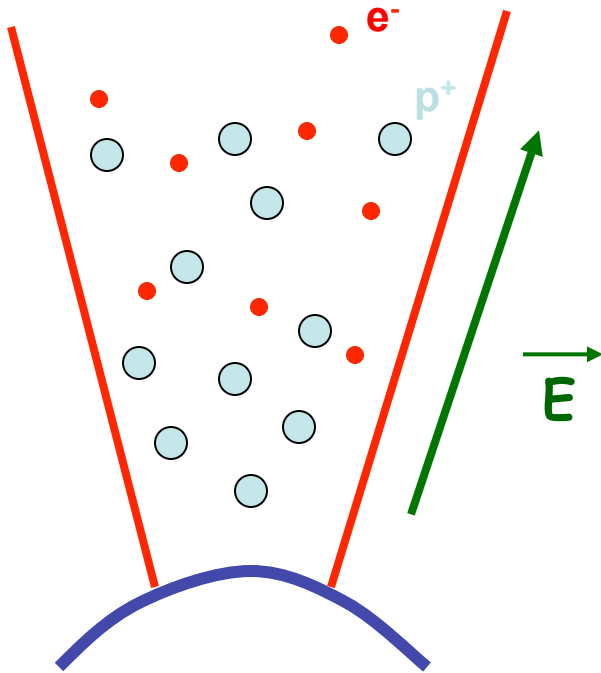


La séparation de charges induit un champ électrique de polarisation

E + quasi-neutralité

$$E_{PR} = \frac{GM(m_p - m_e)}{2er^2}$$

$$\varphi_{PR} = \frac{GM(m_p - m_e)}{2er}$$



Flux d'échappement en tenant compte du champ PR

$$\frac{mv^2(r)}{2} + m\phi_g(r) + Ze\phi_E(r) = \frac{mv^2(r_0)}{2} + m\phi_g(r_0) + Ze\phi_E(r_0)$$

$$v^*(r_0) = \left(-2\phi_g(r_0) - \frac{2Ze\phi_E(r_0)}{m} \right)^{1/2}$$

Avec un champ E de P.R

$$v_p^* = \sqrt{\frac{GM}{R_0}} \quad v_e^* = \sqrt{\frac{GM}{R_0}} \sqrt{\frac{m_p}{m_e}} \quad \rightarrow \quad \frac{v_{e0}^*}{v_{p0}^*} = \sqrt{\frac{m_p}{m_e}}$$

$$F_{échap.} = \int_{v_{lib}}^{+\infty} \int_0^{\pi/2} \int_0^{2\pi} v_r f_0(v, \theta, \phi) v^2 \sin \theta d\theta d\phi$$

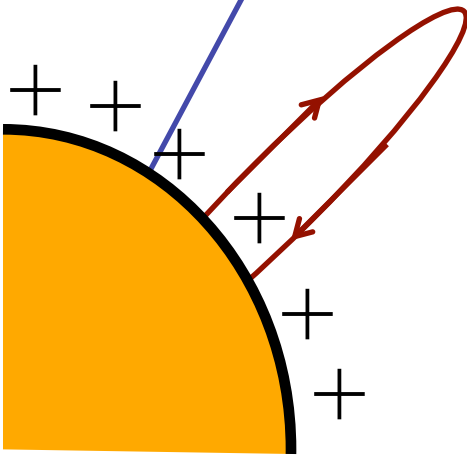
$$\frac{F_{échap.}^e}{F_{échap.}^p} = \sqrt{\frac{m_p}{m_e}}$$

**Avec un champ de P.R. le Soleil se chargerait positivement !
Le champ réel est beaucoup plus intense et du coup il accélère le vent !**

Principe des modèles exosphériques

Électrons : $m_e \Phi_G \ll k_B T$

Protons : $m_p \Phi_G > k_B T$

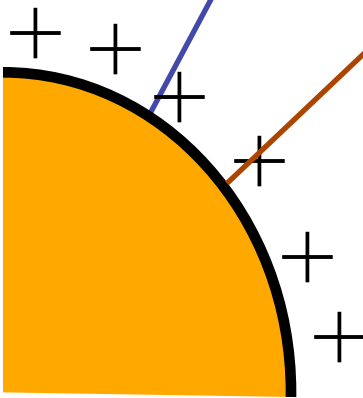


Principe des modèles exosphériques

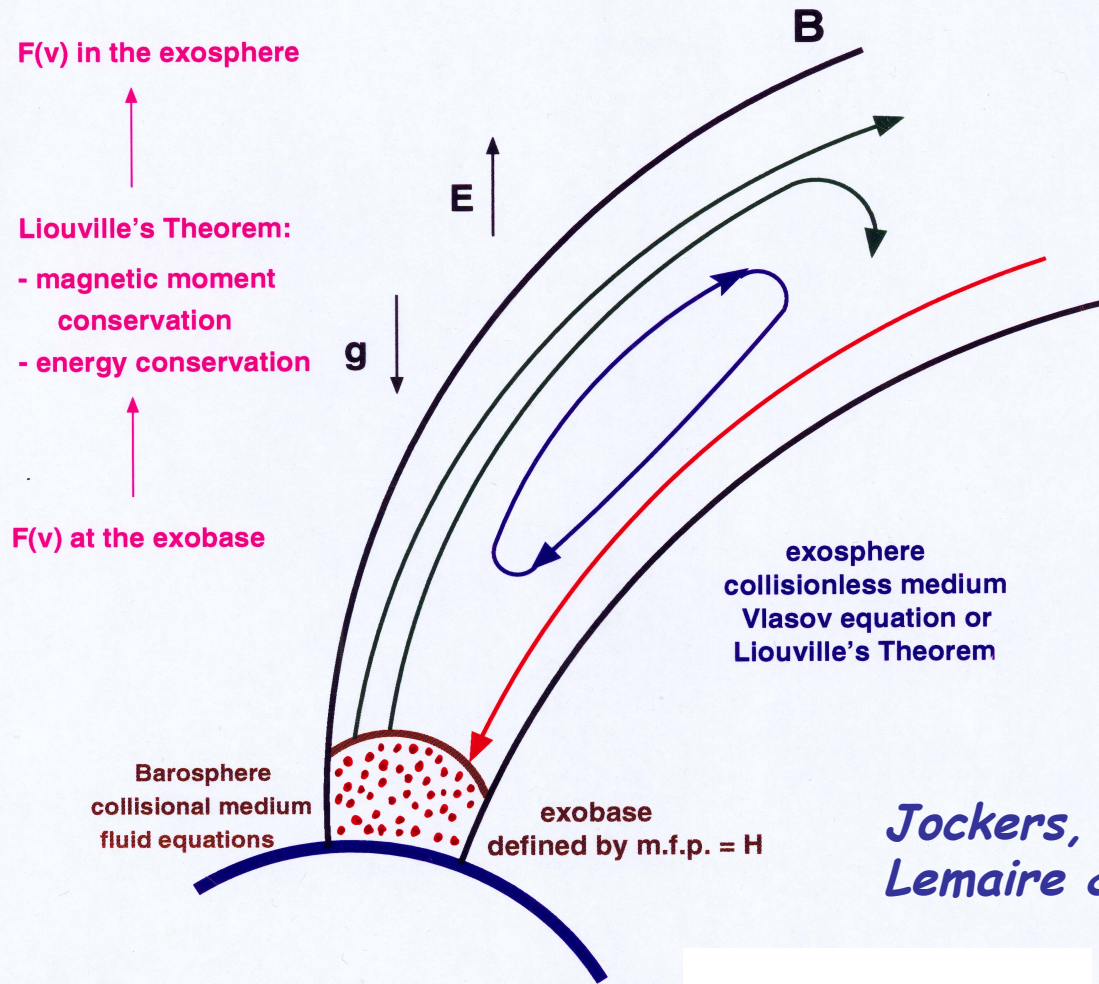
Électrons : $m_e \Phi_G < k_B T - e \Phi_E$

Protons : $m_p \Phi_G < k_B T + e \Phi_E$

Les électrons «tirent» le vent



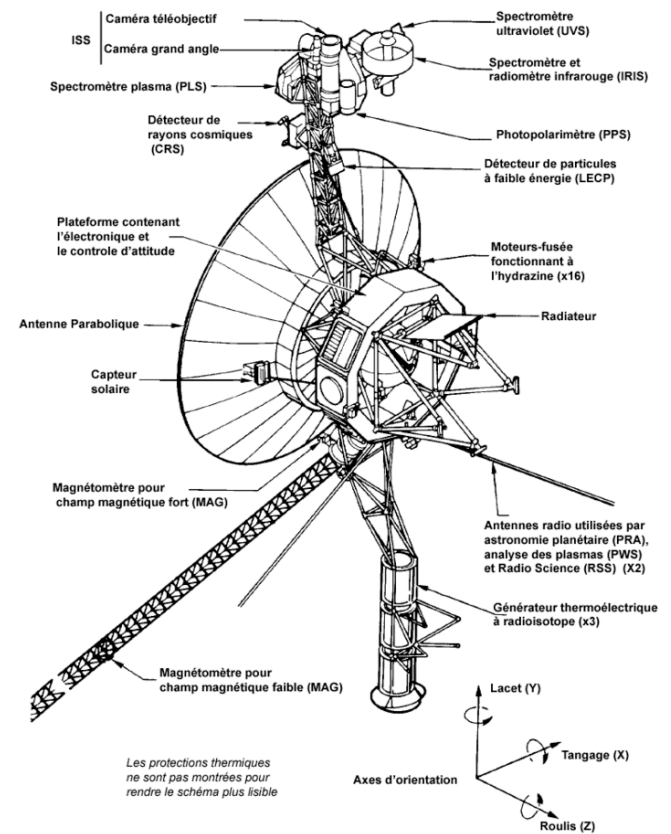
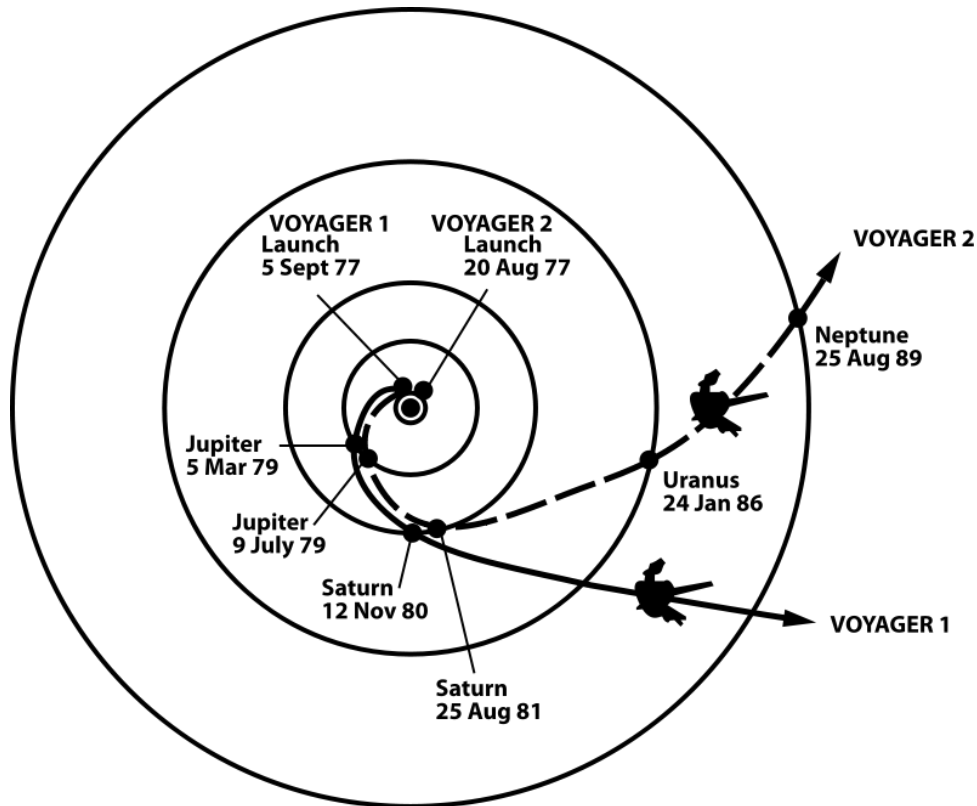
The exospheric approach



Jockers, 1971
Lemaire & Scherer, 1971

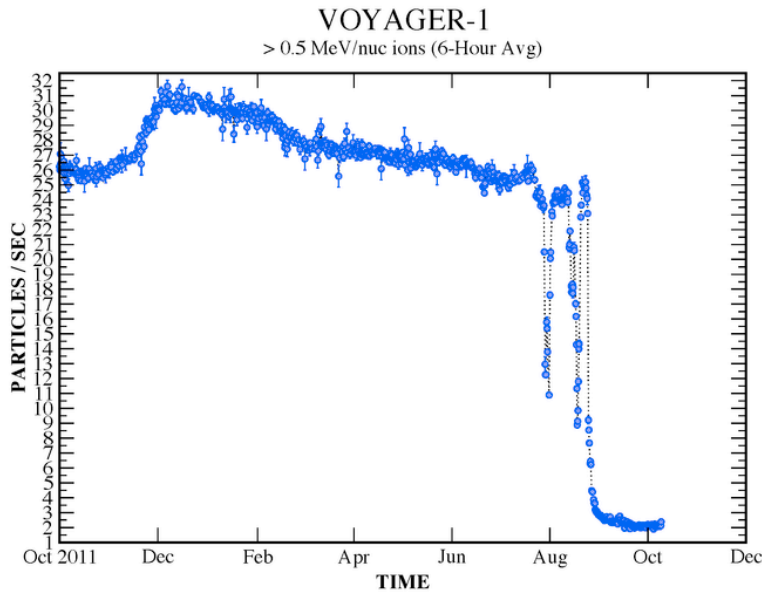
Frontière avec le milieu interstellaire

Sondes interplanétaires



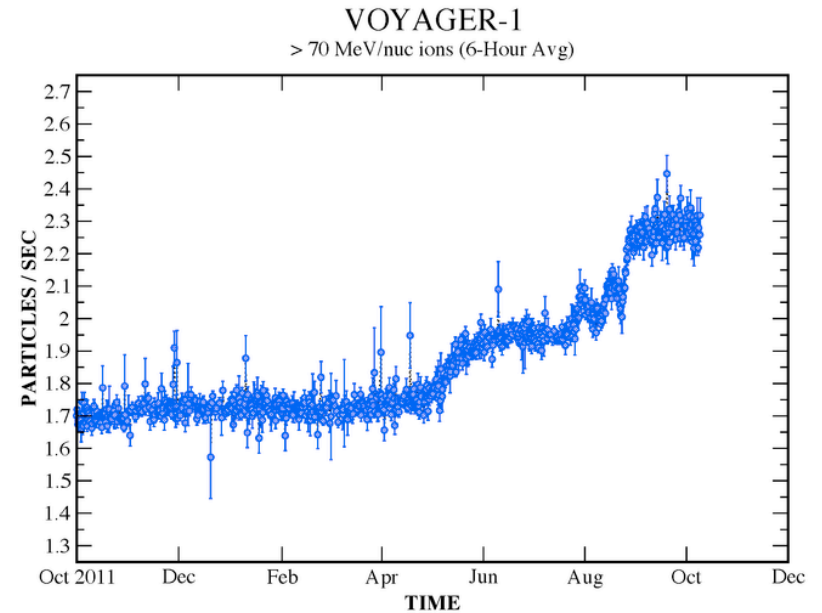
Les sondes Voyager (lancement 1977)

Voyager



Generated:
Wed Oct 10 14:16:24 2012

**Particules énergétiques de
provenance solaire**



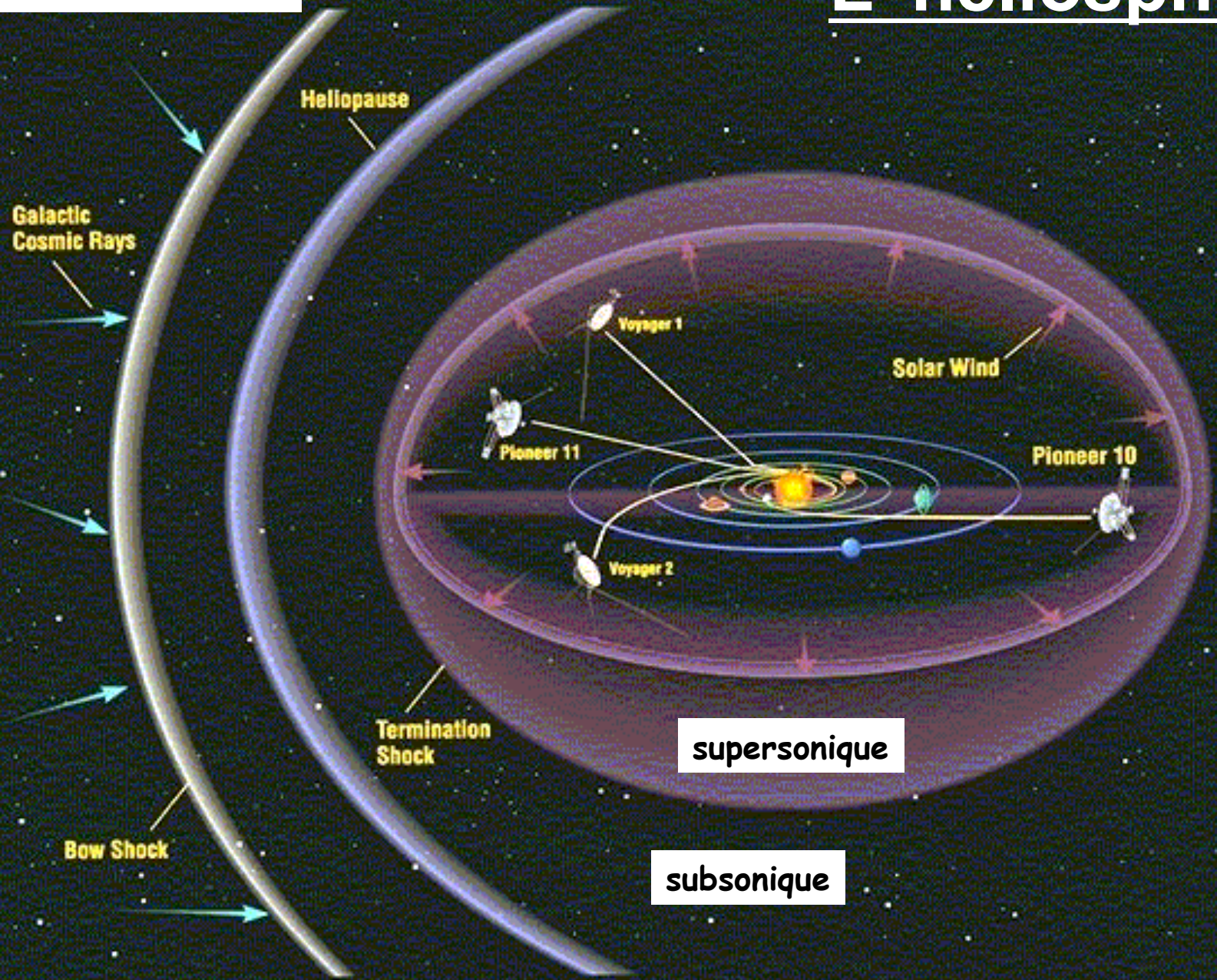
Generated:
Wed Oct 10 14:16:23 2012

Rayons cosmiques >70 MeV

Quelque chose change (drastiquement !) en Aout 2012

Milieu interstellaire

L' héliosphère



Galactic Cosmic Rays

Heliopause

Pioneer 11

Voyager 1

Solar Wind

Pioneer 10

Voyager 2

Termination Shock

supersonique

Bow Shock

subsonique

Distance du choc terminal

Densité d'énergie du milieu interstellaire au voisinage du Soleil

Énergie cinétique

$$r_1 v_1^2 / 2 \sim 2 \text{ à } 4 \times 10^{-14} \text{ J.m}^{-3}$$

Énergie thermique (e- + p+)

$$3n_1 k_B T_1 \sim 1 \text{ à } 2 \times 10^{-14} \text{ J.m}^{-3}$$

Pression magnétique

$$B^2 / 2\mu_0 \sim 2 \text{ à } 4 \times 10^{-14} \text{ J.m}^{-3}$$

Pression de rayon cosmiques

$$P_{RC} \sim 3 \times 10^{-14} \text{ J.m}^{-3}$$

$$P_{\text{tot.}} \sim 1.4 \times 10^{-13} \text{ Pa}$$

Pression cinétique du vent solaire (au point de stagnation juste après le choc)

$$P_{\text{stag.}} = \frac{7}{8} \rho_{\text{vs}} v_{\text{vs}}^2$$

$$\rho_{\text{vs}} v_{\text{vs}}^2 \approx 2.1 \times 10^{-9} \left(\frac{1 \text{ UA}}{d_{\text{choc}}} \right)^2 \text{ Pa}$$

$$P_{\text{stag.}} \approx 1.8 \times 10^{-9} \left(\frac{1 \text{ UA}}{d_{\text{choc}}} \right)^2 \text{ Pa}$$

$$\frac{d_{\text{choc}}}{1 \text{ UA}} \approx \left(\frac{1.8 \times 10^{-9}}{1.4 \times 10^{-13}} \right)^{1/2} \approx 100$$

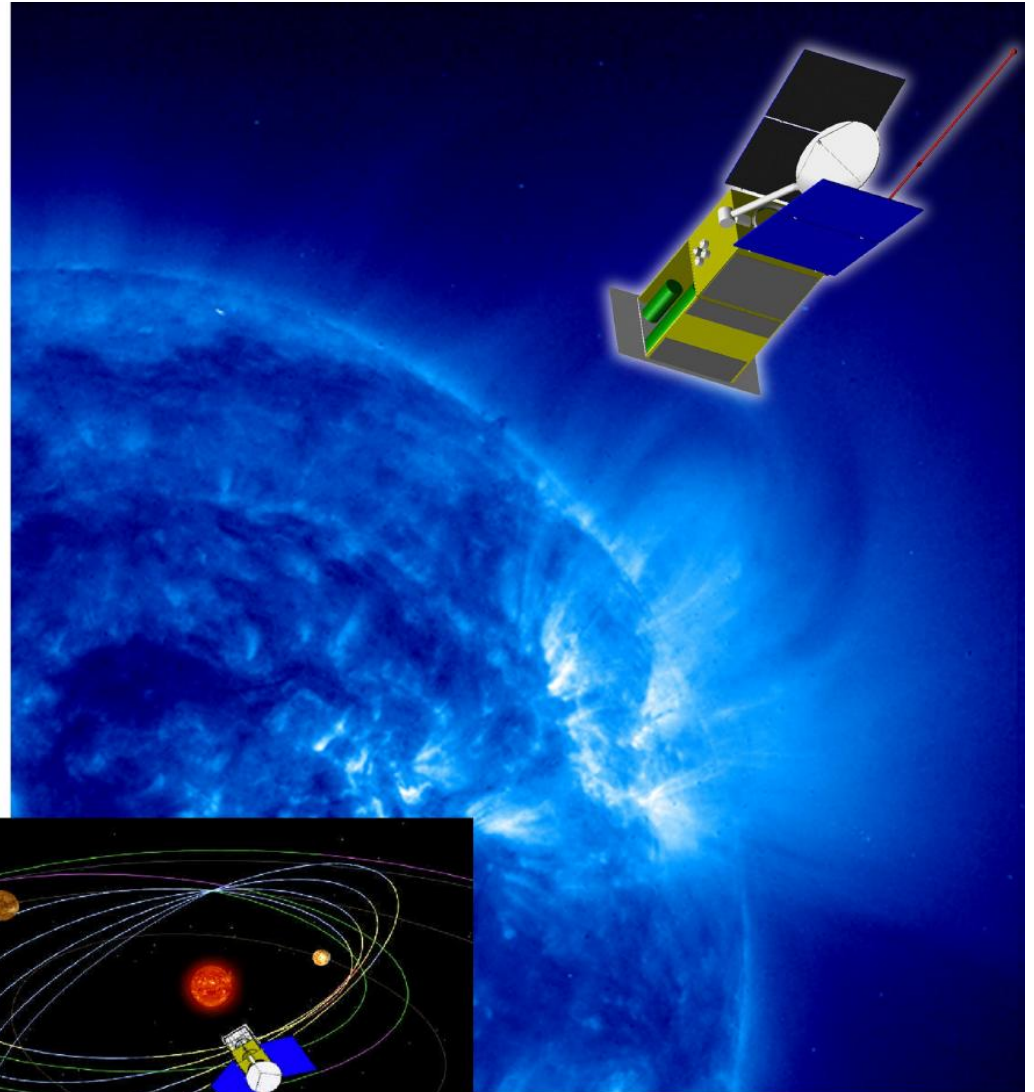
**L'exploration de
l'héliosphère interne : un
sujet d'actualité**

The Solar Orbiter

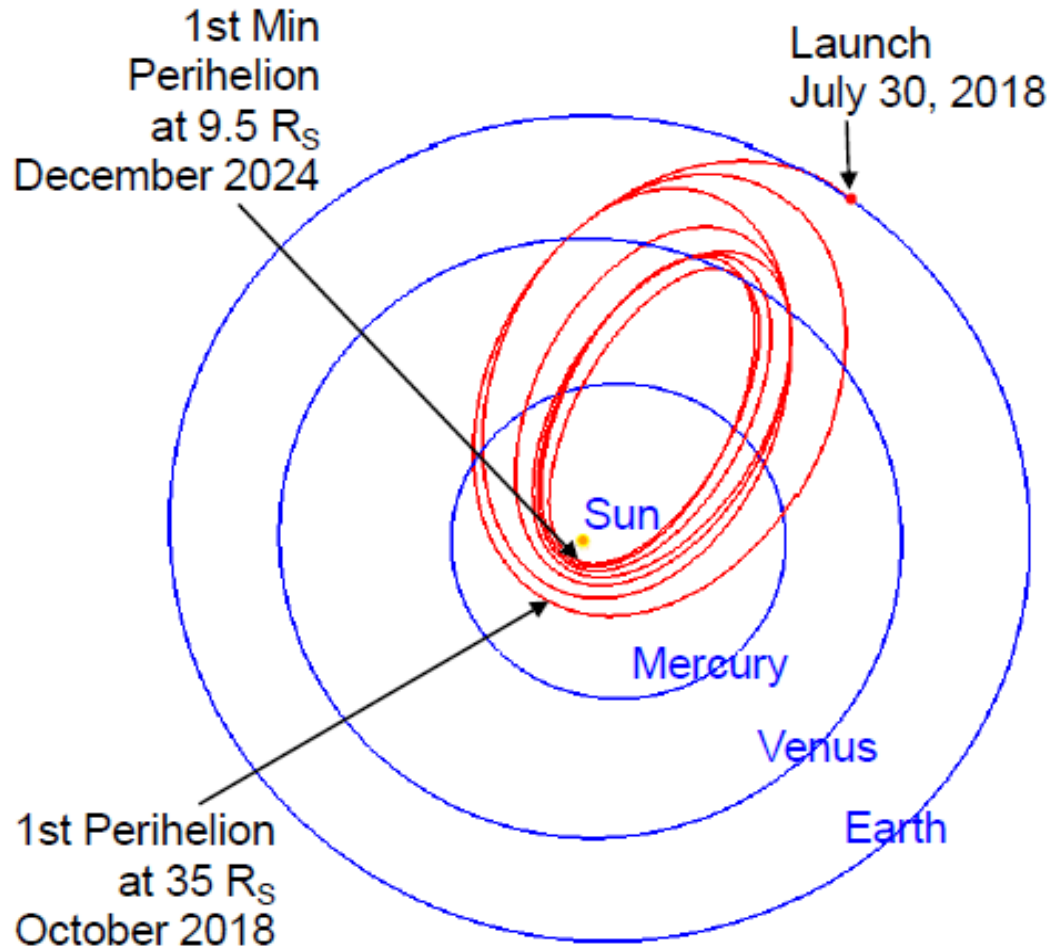


**A high-resolution
mission to the Sun
and inner
heliosphere**

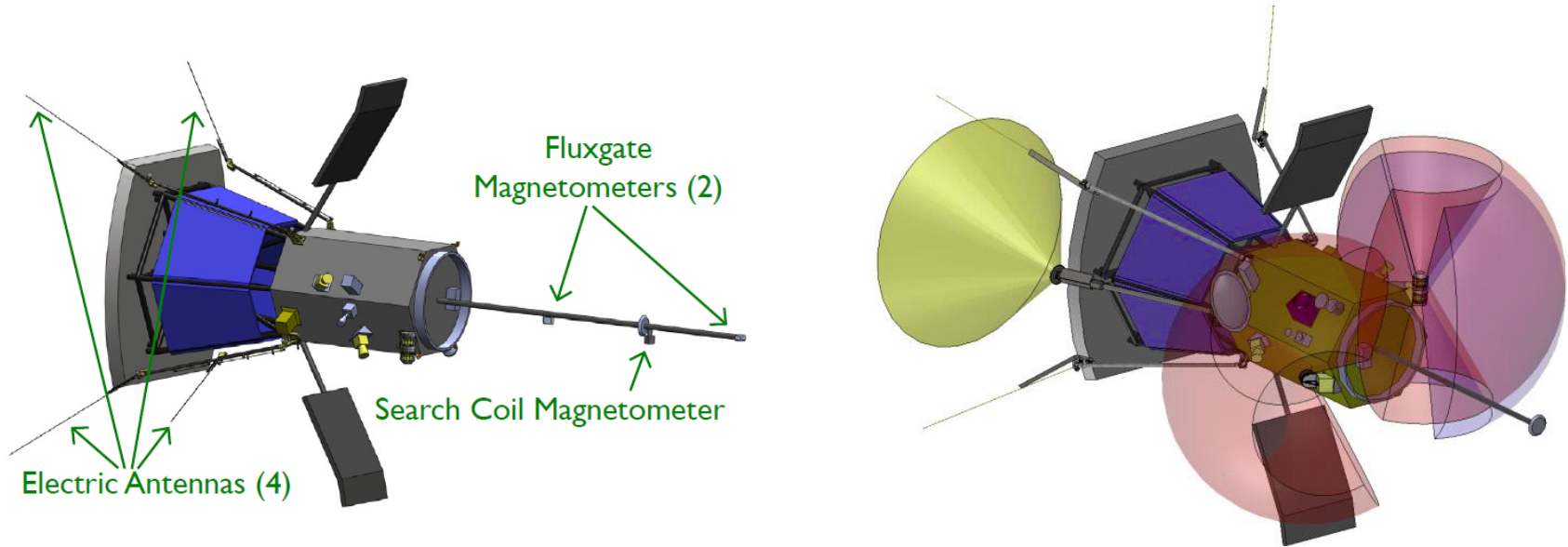
**Jusqu' à 0.3 UA
Lancement en 2018 ?**



Solar Probe Plus



Solar Probe Plus



**Etudier l'environnement plasma proche du soleil
=> Etude in-situ de tout ce que je viens de vous
raconter (et bien plus encore) à partir de 2018 !**