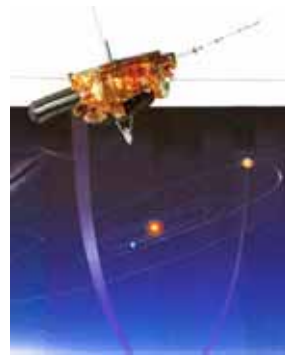


# LE VENT SOLAIRE



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



Stage IUFM - Observatoire de Meudon  
26-28 Nov. 2007



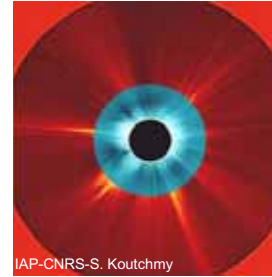
IUFM2007-meyer

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

1

Qu'est-ce que c'est ?

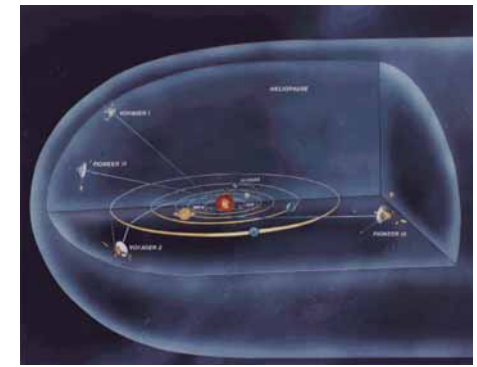
Comment il est produit



IAP-CNRS-S. Koutchmy

Composite:  
eclipse (21/06/2001)  
SOHO/LASCO C2

Comment il interagit avec les  
objets du système solaire



SOHO/LASCO/Mai 1997 (près du minimum d'activité solaire) film  
IUFM2007-meyer

2

Qu'est-ce que c'est ?

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

qui pousse les voiles solaires

le vent de photons

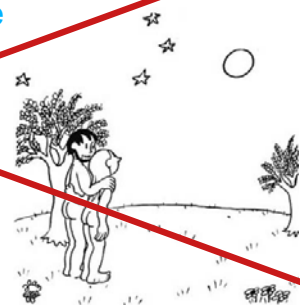
qu'on voit

dont l'énergie maintient  
la vie



© 1995-1998 U3P& Ecole Centrale de Lille  
<http://www3.ec-lille.fr/~u3p/bd/bda.html>  
Le vent qui vient du Soleil, A. Clarke  
(Course Terre-Lune en voilier solaire)

Ne pas  
confondre



c'est un vent de plasma

électrons, protons

qu'on ne voit pas directement

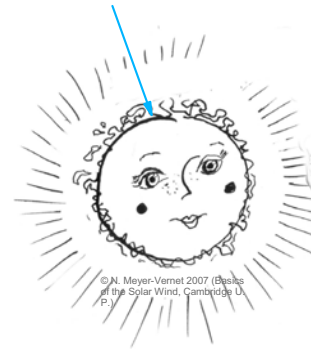
qui n'arrive pas à la surface de la Terre

mais qui sculpte les environnements du système solaire

IUFM2007-meyer

3

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



RAPPEL

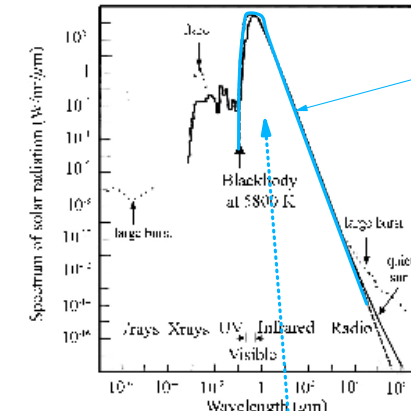
Note : Le degré K (Kelvin) est  
l'échelle de température des  
physiciens.  $0^\circ\text{K} = -273^\circ\text{C}$  est la  
température minimum qu'il est  
possible d'atteindre.

Le soleil émet deux types de vent :



des photons

(émis par la "surface" du soleil)



Spectre du  
rayonnement  
thermique à  
 $5800^\circ\text{K}$

longueur d'onde  $\lambda$

lumière visible

IUFM2007-meyer

4

RAPPEL

Le soleil émet deux types de vent :

des photons

Pic de rayonnement dans le "visible"

Energie thermique  $\sim k_B T$     Energie d'un photon  $\sim h\nu$      $h\nu \sim k_B T$  (ordre de grandeur)

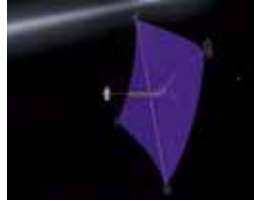
constante de Boltzmann    température    constante de Planck    fréquence

$\Rightarrow \lambda = c/\nu \sim hc/k_B T$

vitesse de la lumière

valeur plus précise  $\lambda \approx 0.5 \mu$

Poussée exercée sur une voile



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

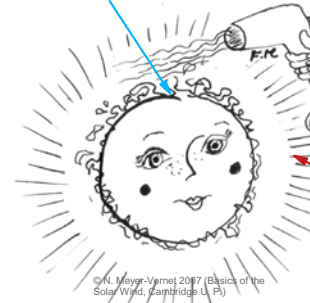
Puissance reçue  $P \approx 1400 \text{ W/m}^2$   
 $\Rightarrow$  Poussée  $\approx (4/3)P/c \approx 6 \cdot 10^{-6} \text{ Pa}$  sur une voile (N/m<sup>2</sup>)

Etude NASA pour une voile solaire  
[http://fr.wikipedia.org/wiki/Voile\\_solaire](http://fr.wikipedia.org/wiki/Voile_solaire)  
 voir aussi <http://www.u3p.net/>

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

Le soleil émet deux types de vent :

des photons  
 du plasma (électrons et protons): le vent solaire



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

c'est l'expansion de la couronne solaire chaude ( $10^6 \text{ K}$ )

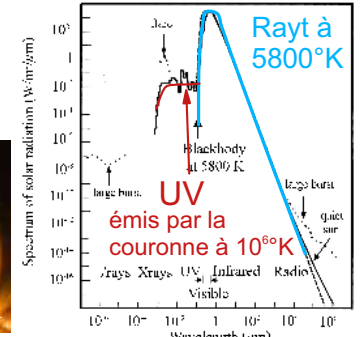
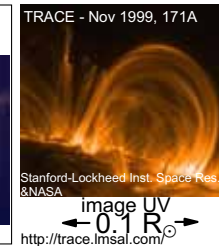
Couronne solaire observée :

au sol lors des éclipses

photo d'amateur    télescope au sol

Egypte 29/03/2006 Digital Ixus 40    11/7/1991 NCAR

lumière visible



$\lambda = c/\nu \sim hc/k_B T \sim 3 \text{ nm}$   
 $\Rightarrow$  X, UV

Le vent solaire ça n'a l'air de rien ...

- Energie transportée  $\approx 10^6 \times$  énergie transportée par la lumière
- Poussée sur une voile  $\approx 3 \cdot 10^{-3} \times$  poussée exercée par la lumière



Pourtant c'est le vent solaire qui sculpte les environnements ionisés du système solaire



c'est parce que ce sont des plasmas

les plasmas interagissent davantage avec les plasmas qu'avec les photons

Le vent solaire est un vent de plasma

- électrons, protons, ...
- éjecté en permanence

Le Soleil perd ainsi  $10^9 \text{ kg/s}$  ... en 10 milliards d'années, il perd le 10.000 ème de sa masse

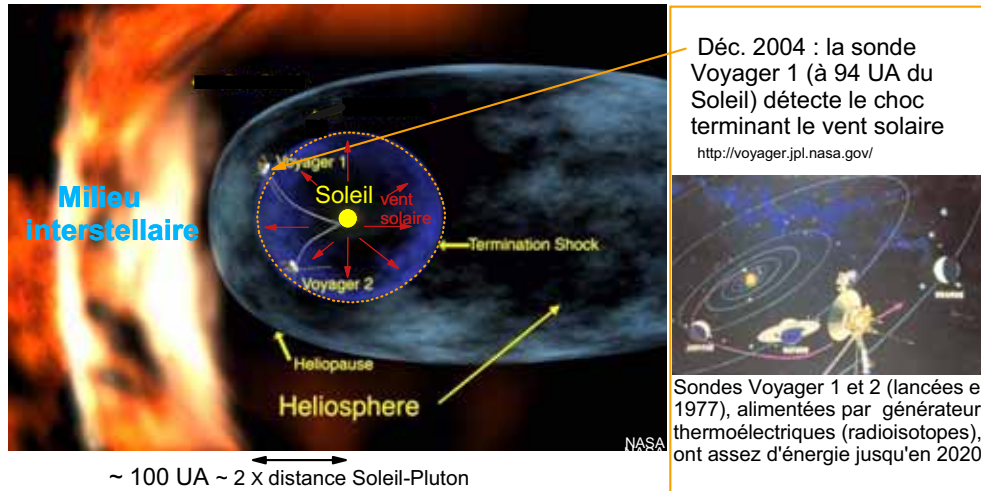
- à la distance de la Terre: 5 électrons et 5 protons/cm<sup>3</sup>,  $T \sim 10^5 \text{ }^\circ\text{K}$  (plus une petite quantité d'autres éléments: Helium,..)

- vitesse  $V \sim 300\text{-}800 \text{ km/s}$  plus rapide que les ondes "sonores"  $\Rightarrow$  produit des chocs quand rencontre obstacles



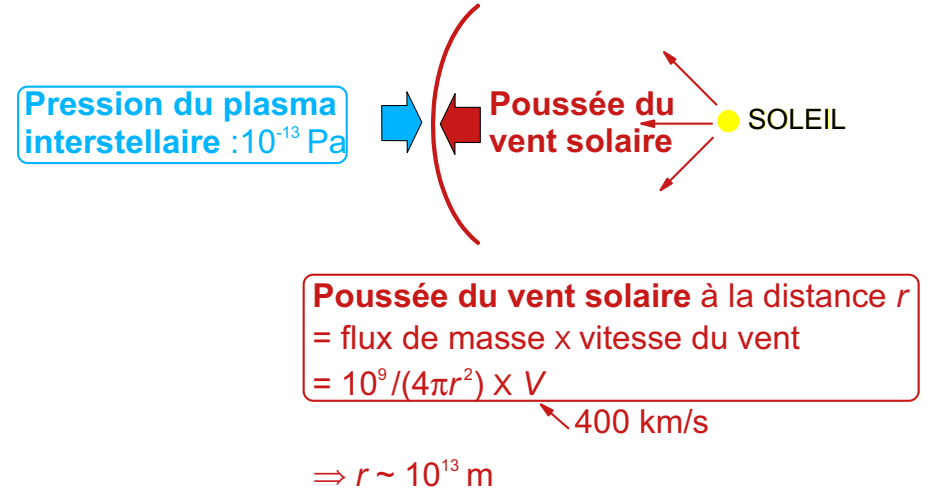
## Le vent solaire remplit tout le système solaire, formant une bulle dans le milieu interstellaire : l'héliosphère

Le système solaire se déplace à travers le milieu interstellaire

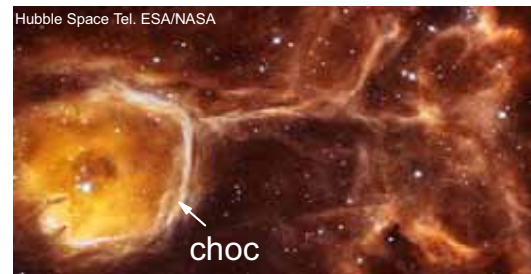


## Le vent solaire remplit tout le système solaire, formant une bulle dans le milieu interstellaire : l'héliosphère

On avait calculé cette distance ...



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



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

$2 \cdot 10^6$  UA       $1 \text{ UA} = 1.5 \cdot 10^{11}$  m

### Exemples



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

$\leftarrow 3 \cdot 10^4 \text{ UA} \rightarrow$

## Le vent solaire - raccourci historique (1)

Evolution des idées sur l'espace: (in)existence du vide, (dis)continuité de la matière, espace ou éther (véhicule des interactions et/ou matière?)

400's BC - Parménide d'Elée - Pas de vide ...  
 300's BC - Aristote - quintessence....



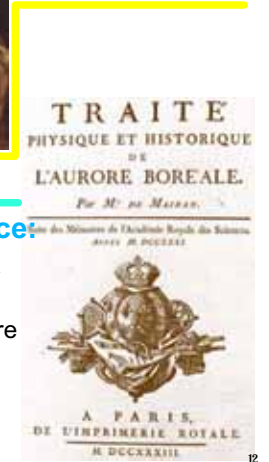
Entre les planètes ...

"... pensons que la matière du ciel où sont les Planètes tourne sans cesse en rond, ainsi qu'un tourbillon ..."

René Descartes, Principia philosophiae (Amstelodami, L. Elzevirium, 1644, Bibliothèque de l'Observatoire de Paris)



Rembrandt, *Aristote contemplant le buste d'Homère*, 1653 (Metropolitan Museum, New York)



Evolution des idées sur la "météorologie" de l'espace.

Aristote: aurores: phénomène "sublunaire" (vapeur montant de la Terre rencontre l'élément "feu")

Descartes: interaction lumière/cristaux de glace dans l'atmosphère

De Mairan (1733): aurores: rencontre entre l'atmosphère du soleil et celle de la Terre (mais ce n'est pas l'opinion dominante)

## Le vent solaire - raccourci historique (2)

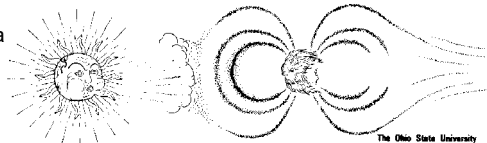
**Carrington, 1859** : Eruption solaire → aurores + perturbations champ magnétique, télégraphes, ...

**Contexte historique**: pas de théorie satisfaisante des aurores ...

**Une suggestion pionnière**: "... the sun is powerfully electrified, and repels similarly electrified molecules with a force of some moderate number of times the gravitation of the molecules to the sun ..." (George FitzGerald, 1892 - *The Electrician* 30, 48)

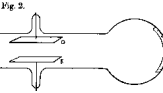
### SOLAR-TERRRESTRIAL INFLUENCES ON WEATHER AND CLIMATE

balbutiements de la météorologie spatiale →



FAWCETT CENTER FOR TOMORROW

The Ohio State University  
2400 Olentangy River Road  
Columbus, Ohio 43210



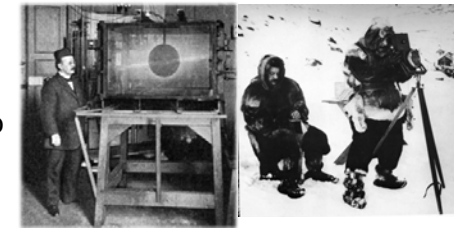
**Contexte historique**: Tubes à vide, Cathode rays (J.J. Thomson, 1897 "This experiment proves that something charged with negative electricity is shot off from the cathode ..." *Phil. Mag.* 44, 293)



L'environnement de la Terre reçoit PAR INTERMITTENCE des jets de particules chargés ... mais ce n'est pas encore le vent solaire

## Le vent solaire - raccourci historique (3)

- ~ 1900: Birkeland
- ✓ théorie,
- ✓ expériences de labo
- ✓ observation



Birkeland, K. R. The Norwegian Aurora Polar Expedition 1902-1903 (H. Aschehoug & Co., Christiania)



L'environnement de la Terre reçoit en permanence des charges électriques émises par le soleil



**vent solaire permanent** Mais ses résultats passent inaperçus

**Contexte historique** : Lorentz, Planck, Marconi ...

Lord Kelvin (Pt de la Royal Soc.) proclame qu'il est impossible que des éruptions solaires provoquent des perturbations magnétiques sur Terre

## Le vent solaire - raccourci historique (4)

~ 1950-1960: Biermann: observation des queues de comètes ⇒ **vent solaire permanent**

**Parker (1958)**: théorie du vent solaire supersonique (à partir de la dynamique des fluides)

débat scientifique : vent supersonique ou pas supersonique ??

1962: Mariner 2 : **détection du vent solaire permanent supersonique**



## Quelques sondes spatiales ayant mesuré le vent solaire



# Le vent solaire est un vent de plasma

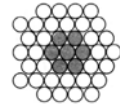
## Qu'est-ce qu'un plasma ?

C'est le quatrième état de la matière



FORMATION DE LA VAPEUR  
— À la vue de l'Esprit, la Matière s'est mise dans tous ses états...  
Jean Effel; La création du monde, © ADAGP 2007  
IUFM2007-meyer

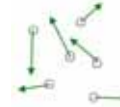
1) **Solide** : atomes ne peuvent pas bouger (sauf vibrations)  
⇒ rigide



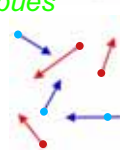
2) **Liquide** : atomes peuvent bouger un peu  
⇒ déformable (mais incompressible)  
liaisons entre atomes affaiblies



3) **Gaz** : atomes "libres"  
⇒ compressible  
liaisons entre atomes rompues



4) **Plasma** : ions et électrons "libres"  
atomes cassés



# Le vent solaire est un vent de plasma

## Comment produire un plasma ?

Arracher électrons aux atomes : Exemple :  $H \rightleftharpoons H^+ + e$

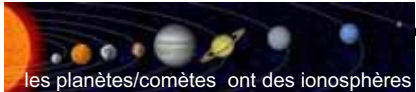
Ionisation nécessite de fournir énergie  
> énergie de liaison de l'électron  $W_{Bohr} = 13.6 \text{ eV}$

On peut fournir cette énergie de diverses façons, par exemple : envoyer des particules d'énergie  $> W_{Bohr}$

# Le vent solaire est un vent de plasma

## Comment produire un plasma ?

avec du rayonnement ionisant (UV, ...)

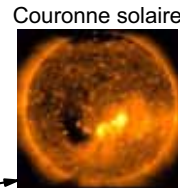


les planètes/comètes ont des ionosphères

$$h\nu > W_{Bohr} \Rightarrow \lambda < 0.1\mu$$



Milieu interstellaire



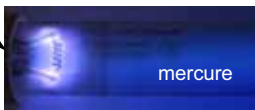
Couronne solaire

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

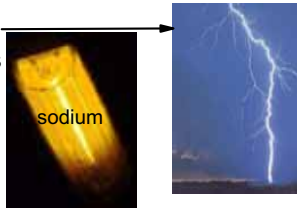
UV solaire ionise atmosphères planètes

en chauffant

avec des champs électriques (éclairs d'orage, tubes à décharge, écrans à plasma, ...)



mercure



sodium

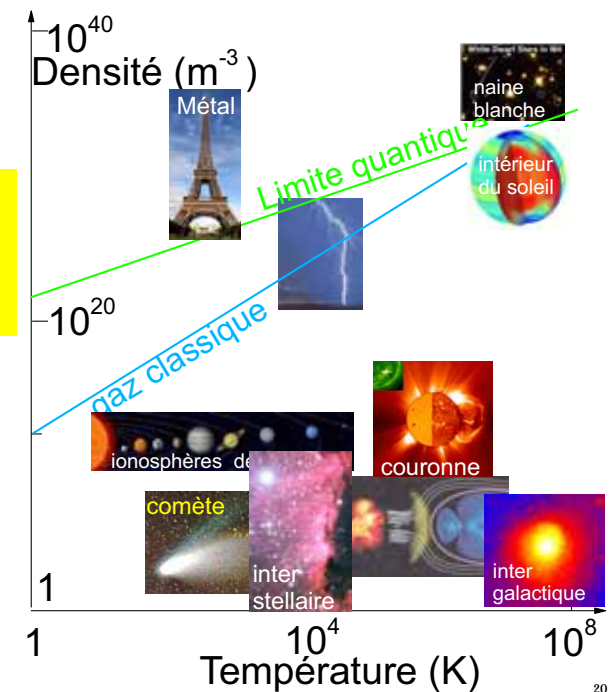


FUSION : projet de réacteur ITER

par collision avec des particules énergétiques

en comprimant

Presque tout l'univers est du plasma



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

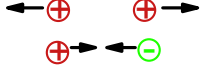
... comme la surface de la Terre



Nous vivons dans un environnement très particulier (à l'échelle cosmique)

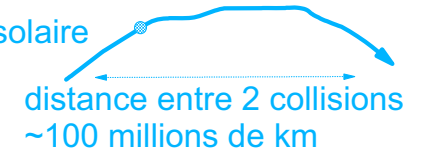
## Le vent solaire est un vent de plasma

gaz d'électrons et de protons

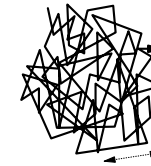
- électriquement neutre (force électrostatique) 
- très dilué (distance entre particules  $d \sim 5$  mm) et chaud  $T \sim 10^5$  °K comparez : dans cette pièce,  $d \sim 4$  nm
- très peu de collisions entre particules

Mouvement d'un électron dans le vent solaire

collisions ne sont pas des chocs dues au champ électrique



comparez : dans cette pièce



distance entre 2 collisions : 1 micron

## Le vent solaire est un vent de plasma

gaz d'électrons et de protons

électrons :

- grande vitesse d'agitation thermique
- parcourent une grande distance avant de subir une collision



- les plasmas conduisent bien la chaleur conductivité thermique couronne solaire  $\sim 10^4$  W/m/K 100 fois plus que le cuivre !

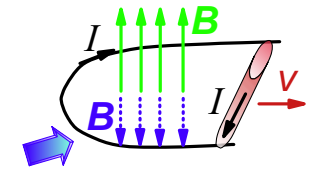
- et l'électricité

conductivité électrique couronne solaire  $\sim 10^6$  ( $\Omega/m$ )<sup>-1</sup> comme le mercure !

## Le vent solaire est un vent de plasma magnétisé

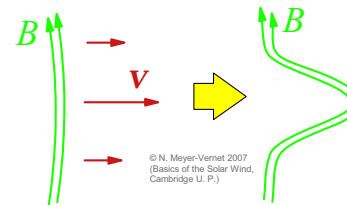
Rappel : loi de Faraday/loi de Lenz

Variation de **flux magnétique** dans circuit : induit ddp telle que courant  $I$  produit  $B$  qui **s'oppose** à la variation initiale de flux

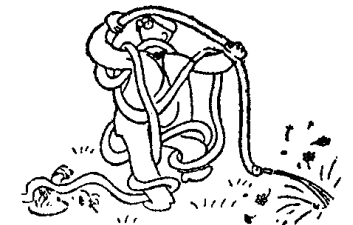


Ici : résistivité très petite; vitesses et dimensions très grandes  $\Rightarrow I \rightarrow \infty \Rightarrow$  **annule** complètement les variations de flux

$\Rightarrow$  quand le plasma bouge,  $B$  bouge avec



"champ gelé" dans plasma



Les tubes de flux magnétique se déplacent avec leur plasma

$\Rightarrow$  Vent solaire transporte champ magnétique du soleil

# Comment le vent solaire est-il produit ?

**Couronne solaire** très chaude et conduit bien la chaleur

- Près du soleil : Protons retenus par gravitation : (vitesse d'agitation thermique < vitesse de libération)

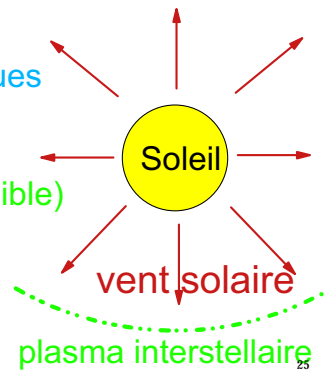
MAIS :

- Quand on s'éloigne, vitesse d'agitation thermique ( $\propto T^{1/2}$ ) décroît moins vite que vitesse de libération

⇒ vitesse d'agitation thermique > vitesse de libération ⇒ les particules ne sont plus retenues par la gravitation

➤ ni par le milieu interstellaire (pression très faible)

➤ et les électrons (légers) ne sont pas retenus et entraînent les protons



# Essayons d'expliquer le vent solaire avec le théorème de Bernoulli

Cas usuels: problèmes de plomberie et d'aération

➤ Dans l'eau (incompressible)  $V^2/2 + H + \Phi = \text{constante}$

$V^2/2$  : vitesse de l'écoulement  
 $H$  : enthalpie / unité de masse :  $P/\rho$  ← densité de masse  
 $\Phi$  : potentiel de gravitation

➤ Sur Terre :  $\Phi = gz$

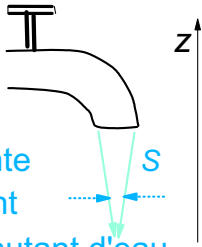
$g$  : accélération gravitationnelle =  $10 \text{ m/s}^2$   
 $z$  : altitude

Problèmes de plomberie = échange entre

- ▶ vitesse (jets d'eau, chasses d'eau)
- ▶ pression (dans le circuit d'eau)
- ▶ variation d'altitude (châteaux d'eau)

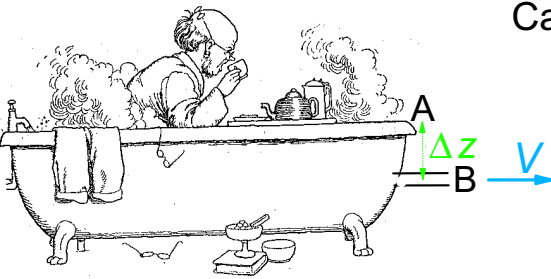


Problème de robinet: pourquoi l'écoulement se rétrécit



- $P$  dans le jet ~ pression atmosphérique ~ constante
- ⇒  $V^2/2 + gz = \text{cste}$  ⇒ l'eau accélère en descendant
- ⇒  $V$  augmente ⇒  $S$  diminue pour laisser passer autant d'eau

Problème de baignoire : comment faire un jet d'eau



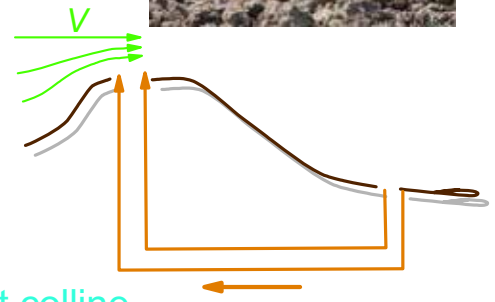
Calculer la vitesse du jet même pression en A et B (= pression atmosphérique)

⇒ même enthalpie  
 ⇒  $V^2/2 = g \Delta z$

Aération des terriers



- Vitesse du vent plus grande au sommet colline car l'écoulement se rétrécit
- Dans l'air, variation d'enthalpie ( $\propto P/\rho$ )  $\gg$  variation de  $gz$
- ⇒  $P$  plus faible au sommet colline



➤ courant d'air

S. Vogel, Cats' Paws and Catapults (Penguin Books 1998)

# Cas du vent solaire

$$V^2/2 + H + \Phi = \text{constante} + Q$$

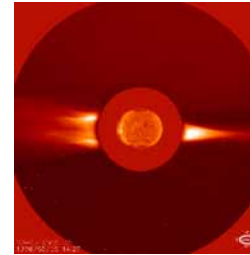
$V^2/2$  : vitesse de l'écoulement  
 $H$  : enthalpie  
 $\Phi$  : potentiel de gravitation

Différences avec la plomberie :

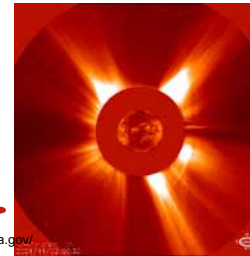
- Gas en mouvement supersonique  
 ⇒ compressibilité joue rôle important  
 ⇒ enthalpie pas proportionnelle à pression
- Conductivité thermique importante : sans échanges de chaleur, il n'y aurait pas de vent

# La structure du vent solaire dépend de l'activité solaire

Cycle d'activité solaire :



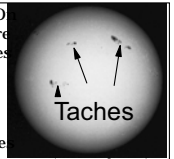
couronne (minimum solaire)



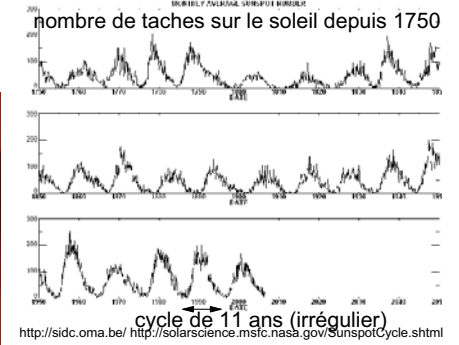
couronne (maximum solaire)

<http://sohowww.nascom.nasa.gov/>

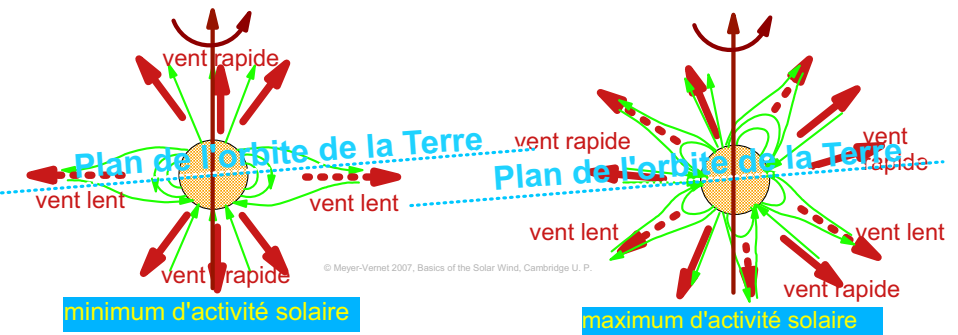
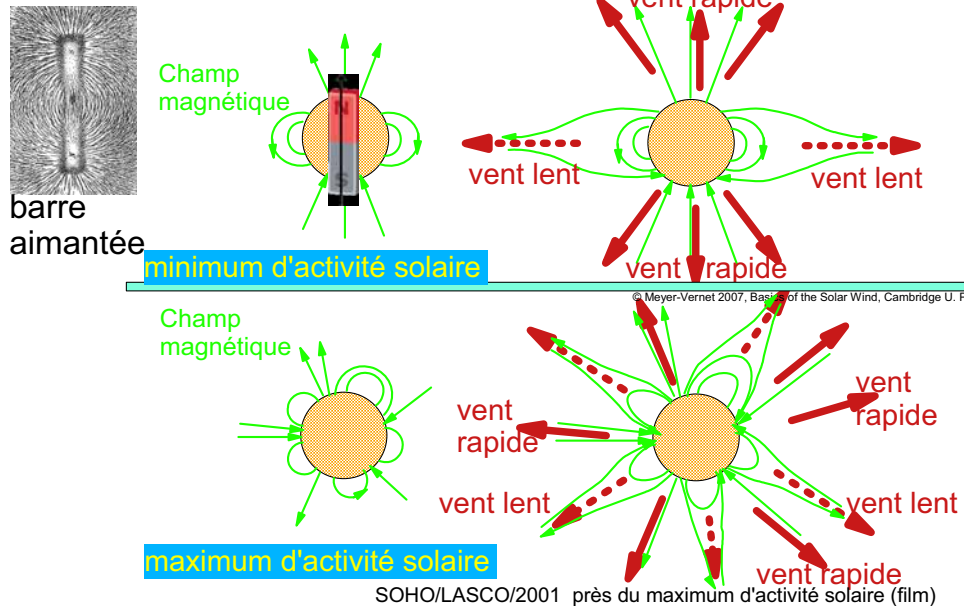
Astronomie des Dames (Jerôme de Lalande 1806) O représente aussi le Soleil comme ayant une espèce de figure humaine; mais c'est sans aucun fondement. D'autres figures le représentent comme parsemé de volcans ou de bouillons écumeux; mais dans la réalité nous n'y voyons qu'une surface jaune & unie sur 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)*



La théorie a avancé en 2 siècles, MAIS physique des taches solaires pas maîtrisée



# Structure simplifiée du vent solaire



La Terre (et les autres planètes) est dans le plan de l'écliptique (pas loin de l'équateur solaire)

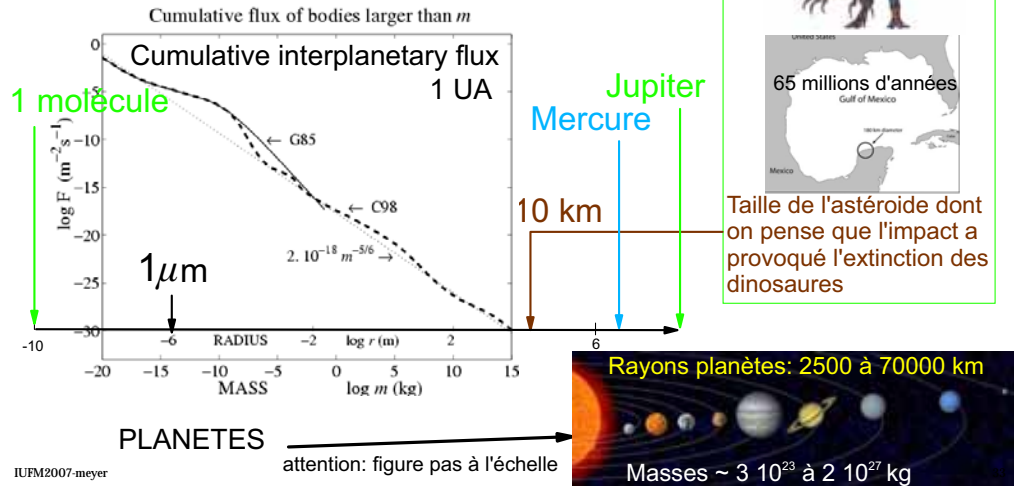


Quand le soleil tourne (1 tour en 25 jours) l'environnement de la Terre est plongé alternativement dans du vent lent et du vent rapide

## Quels sont les effets du vent solaire ?

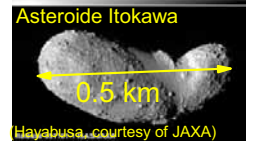
Le vent solaire interagit avec les objets du système solaire (poussières, astéroïdes, comètes, planètes ...)

Distribution des objets (taille : de 1 molécule à la planète Jupiter)



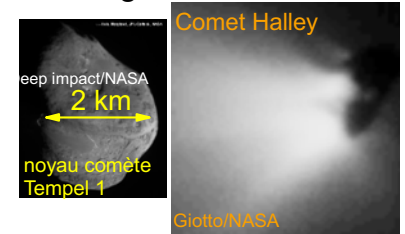
## Quels sont les effets du vent solaire ?

- astéroïdes, la Lune et Mercure : pas assez massifs pour conserver une atmosphère



mais Mercure (et certains astéroïdes ?) sont magnétisés

- noyaux de comète : éjectent de la matière (quand s'approchent du soleil)



- les autres planètes : atmosphère et /ou champ magnétique



IUFM2007-meyer

34

## Quels sont les effets du vent solaire ?

● Corps nus : sans atmosphère ni champ magnétique (astéroïdes, la Lune) : ions du vent solaire (et poussières) frappent la surface et l'altèrent



● Corps avec environnement ionisé (comètes, planètes) et/ou champ magnétique (astéroïdes, planètes): le vent solaire n'atteint pas la surface mais sculpte l'environnement ionisé

Comètes



sculptée par le vent solaire  
⇒ parallèle à vitesse vent  
⇒ queue droite

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

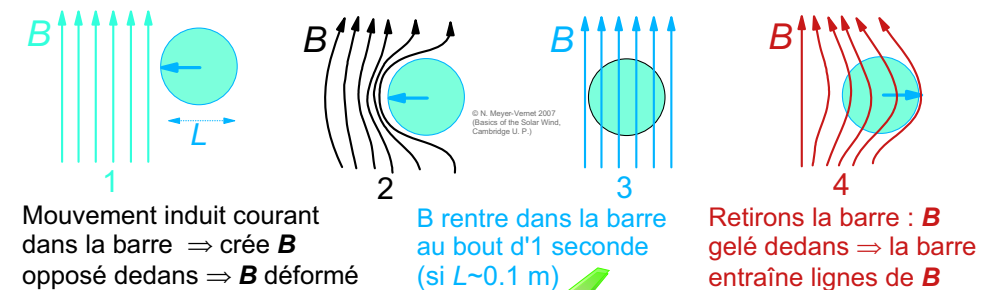
IUFM2007-meyer

35

Le vent solaire sculpte les environnements car il transporte un champ magnétique

Interaction d'objets conducteurs avec un champ magnétique

Expérience de labo. : Introduisons une barre de cuivre dans  $B$



Pour déformer lignes de champ : déplacer la barre plus vite que 0.1 m/s

Vent solaire : dimension "objets" (environnements ionisés) et vitesse beaucoup plus grandes ⇒  $B$  du vent solaire se déforme et ne pénètre pas dedans

IUFM2007-meyer

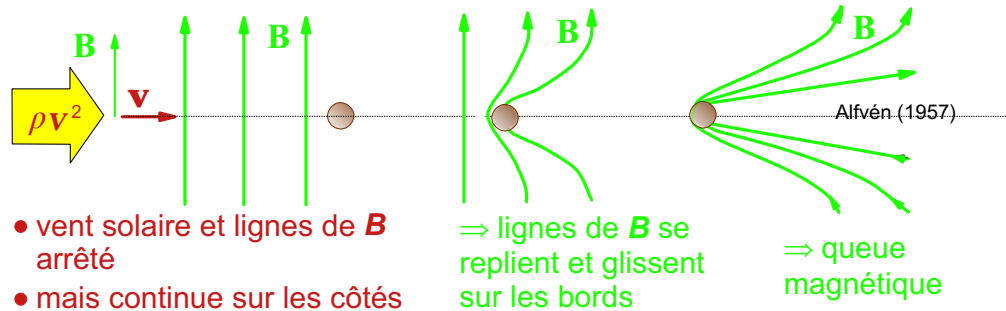
36

## Le vent solaire sculpte les environnements car il transporte un champ magnétique

Puisque **B** du vent solaire ne pénètre pas le vent solaire non plus puisque **B** gelé dedans

### Interaction du vent solaire avec un obstacle conducteur

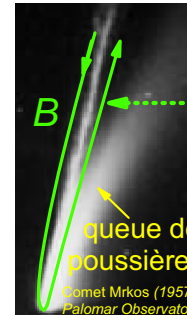
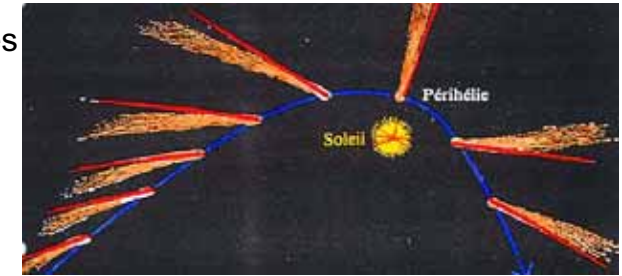
par exemple l'environnement ionisé d'une comète



- vent solaire et lignes de **B** arrêté
- mais continue sur les côtés

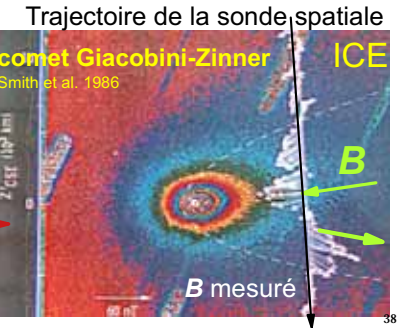
## Le vent solaire sculpte les environnements car il transporte un champ magnétique

Queues de comètes indiquent direction du vent



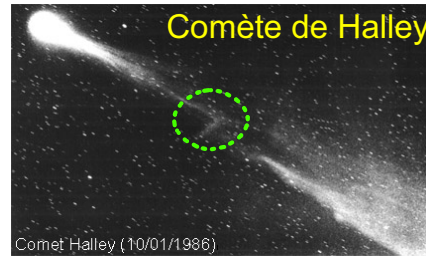
queue de plasma : plasma de la comète guidé par champ magnétique du vent

Mesure de champ magnétique dans une queue de comète



## Perturbation du vent solaire

donc de **B**



déconnexion de la queue

film- comète Encke- 0.3 UA/Stereo  
- Avril 2007- SECCHI/NASA

## Quels sont les effets du vent solaire ?

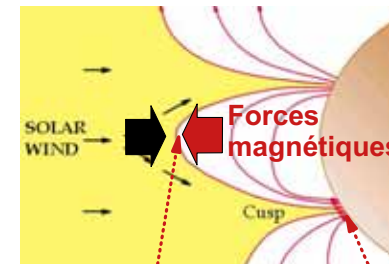
**Astéroïdes** (pas d'atmosphère/ionosphère): soumis au vent solaire  $\Rightarrow$  surface altérée

Sauf si l'astéroïde a un **champ magnétique**

Vesta (un des plus gros objets de la ceinture d'astéroïdes) : surface non altérée

Si Vesta a un champ magnétique suffisant, le vent solaire n'atteint pas sa surface

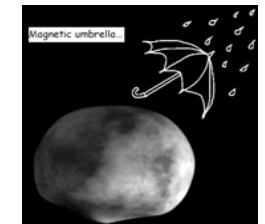
Poussée du vent solaire



Poussée du vent solaire

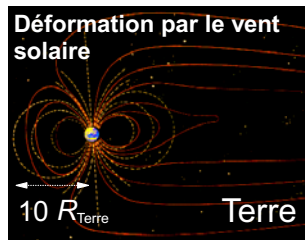
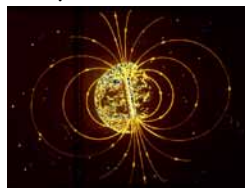
$\approx B^2 / (2\mu_0)$   
~ énergie magnétique / unité de volume

$\Rightarrow B \approx 0.2 \mu\text{G}$  à la surface



# Quels sont les effets du vent solaire ?

- Planètes : atmosphère/ionosphère (Vénus, Terre, Mars, Jupiter, Saturne, Uranus, Neptune) et/ou champ magnétique (Terre, Mercure, Jupiter, Saturne, Uranus, Neptune)



La Terre :  
exposés  
suivants

Variations/perturbations du vent perturbe environnements