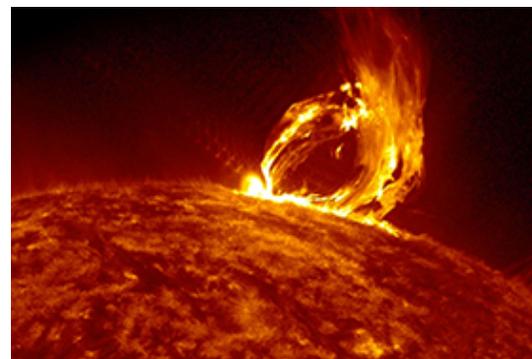


Les vents et les tempêtes solaires

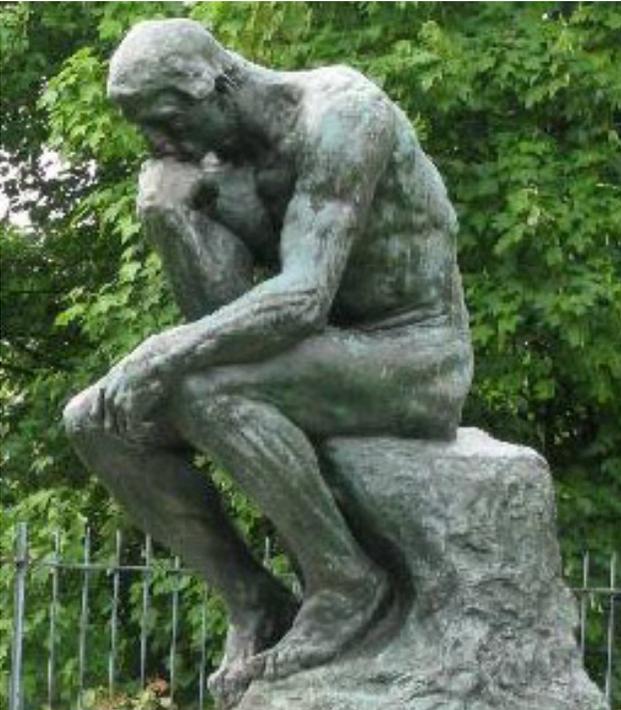
Nicole Meyer-Vernet

LESIA (Laboratoire d'Etudes Spatiales et d'Instrumentation en Astrophysique)

Stages de Troisième 14/12/2021

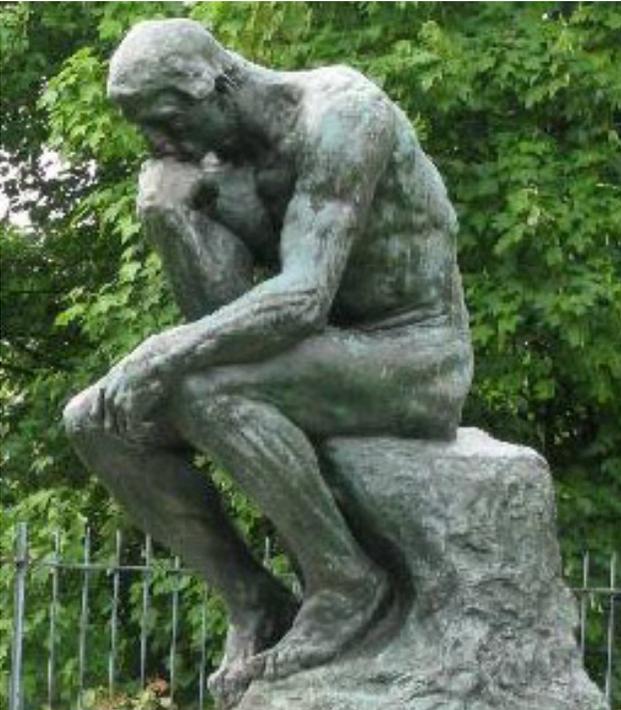


QUESTIONS



- Que sait-on du Soleil ?
- Qu'est-ce que le vent solaire?
- Et ses tempêtes?
- « Toucher le Soleil » : la mission Parker Solar Probe

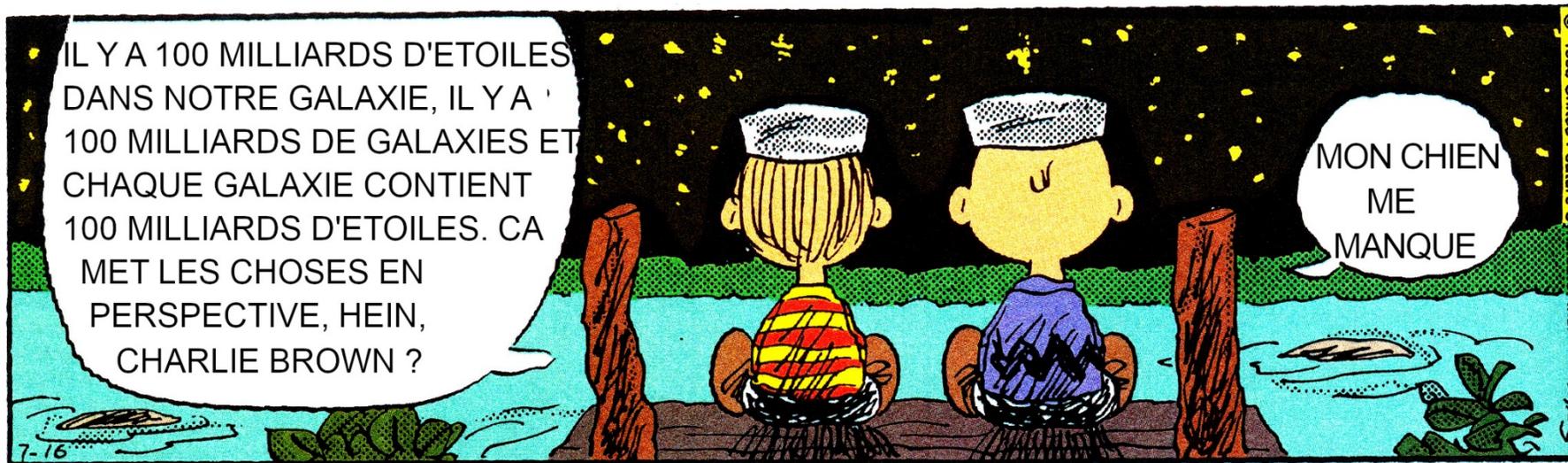
QUESTIONS



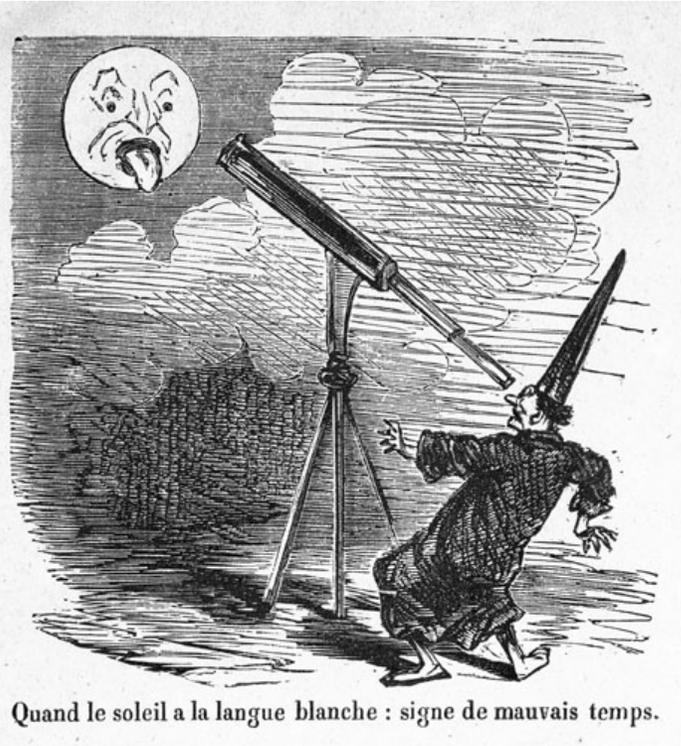
- **Que sait-on du Soleil ?**
- Comment s'échappent ses vents?
- Et ses tempêtes?
- « Toucher le Soleil » : la mission Parker Solar Probe

C'est une étoile très ordinaire ...

parmi plus de 200 milliards d'étoiles dans notre Galaxie



Avant d'aller « toucher le soleil », ce qu'on en sait est déduit de son rayonnement



THEMIS mesure des champs magnétiques solaires (Iles Canaries)



Télescope SOHO en orbite

Rayonnement : ce sont des ondes (oscillations)

Beaucoup de types d'ondes

- Ondes sonores



- Ondes sur l'eau



- **Ondes électromagnétiques** ...

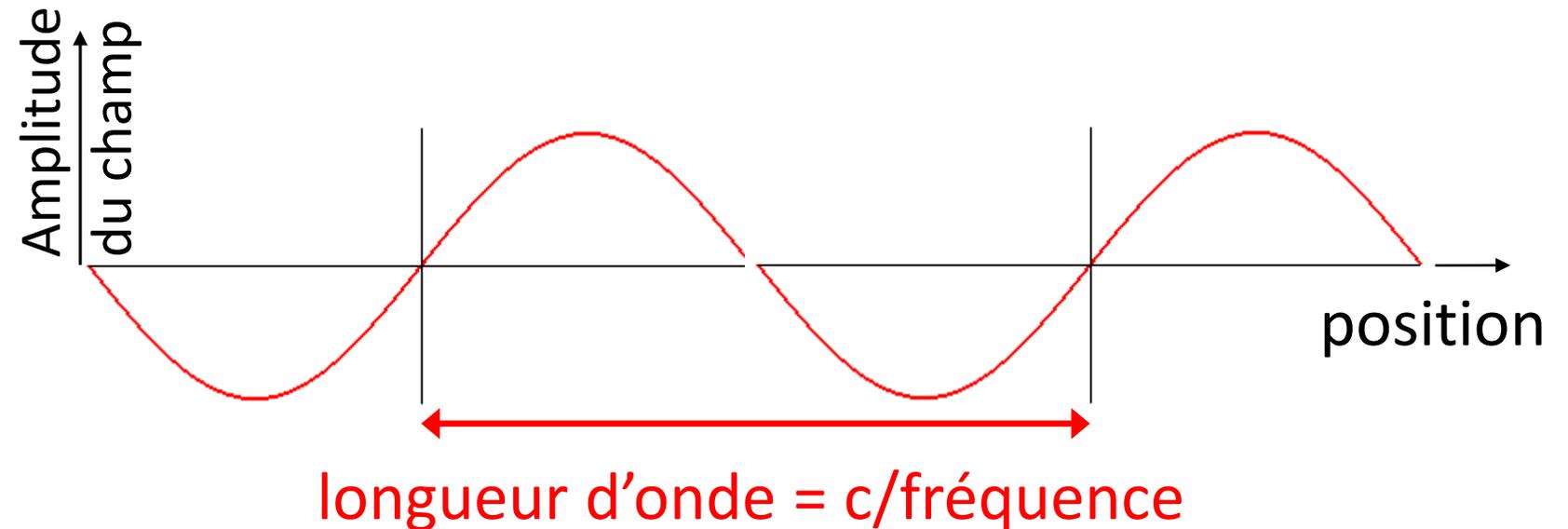


Se propagent dans un milieu ...
à une vitesse qui dépend du milieu

Peuvent se propager dans le vide

Ondes électromagnétiques

- Se propagent dans le vide à 300.000 km/s (c = vitesse de la lumière)



L'onde avance de 1 longueur d'onde pendant une période

Ondes électromagnétiques

Bande FM
Longueur d'onde
environ 3 m

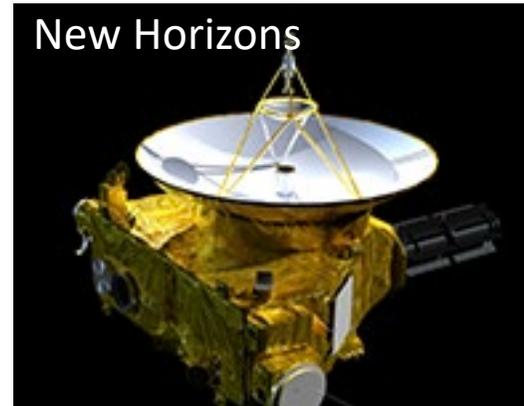


Longueur d'onde
Environ 30 cm



Longueur d'onde
Environ 15 cm

Télémessure des
sondes spatiales



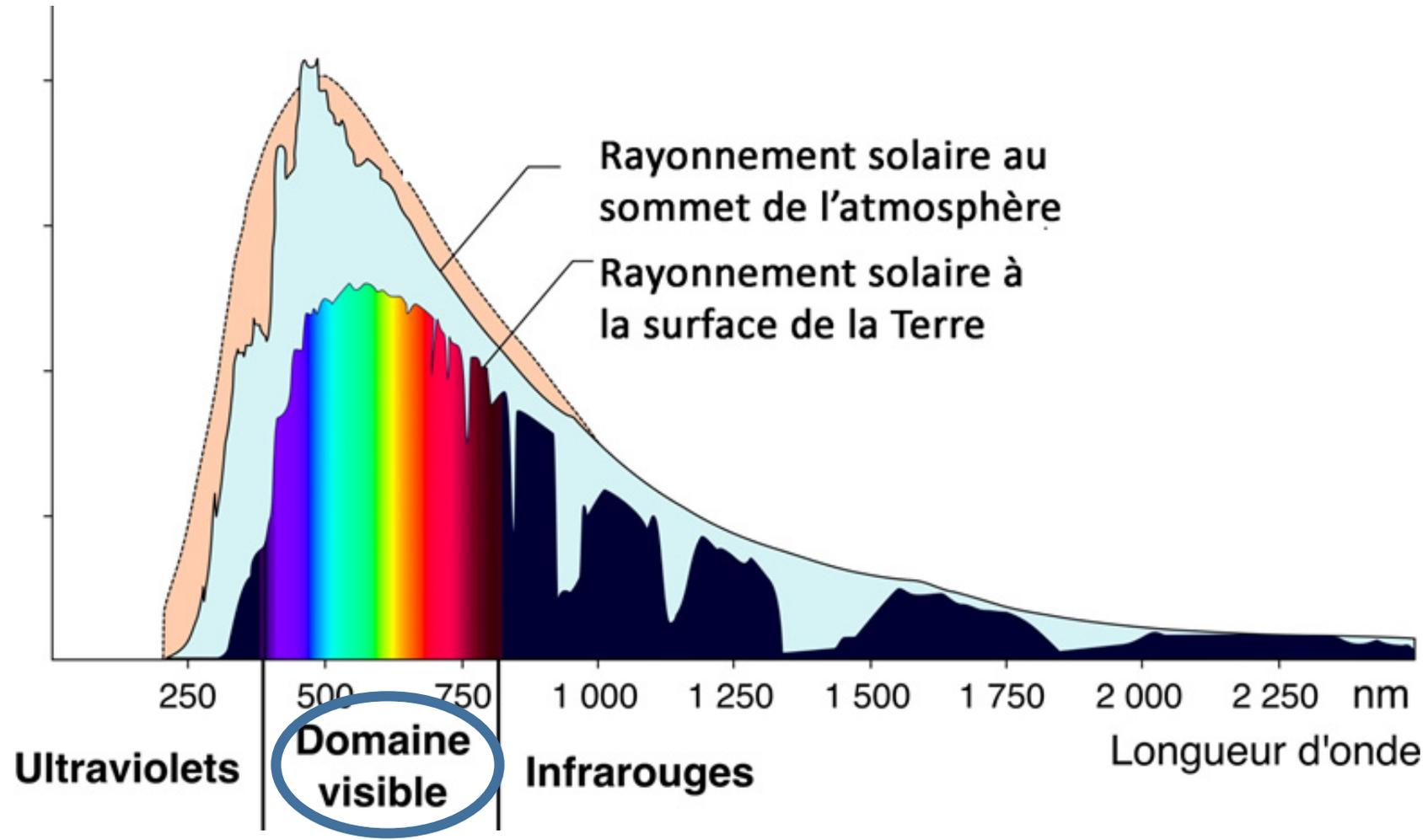
Longueur d'onde
Environ 3 cm



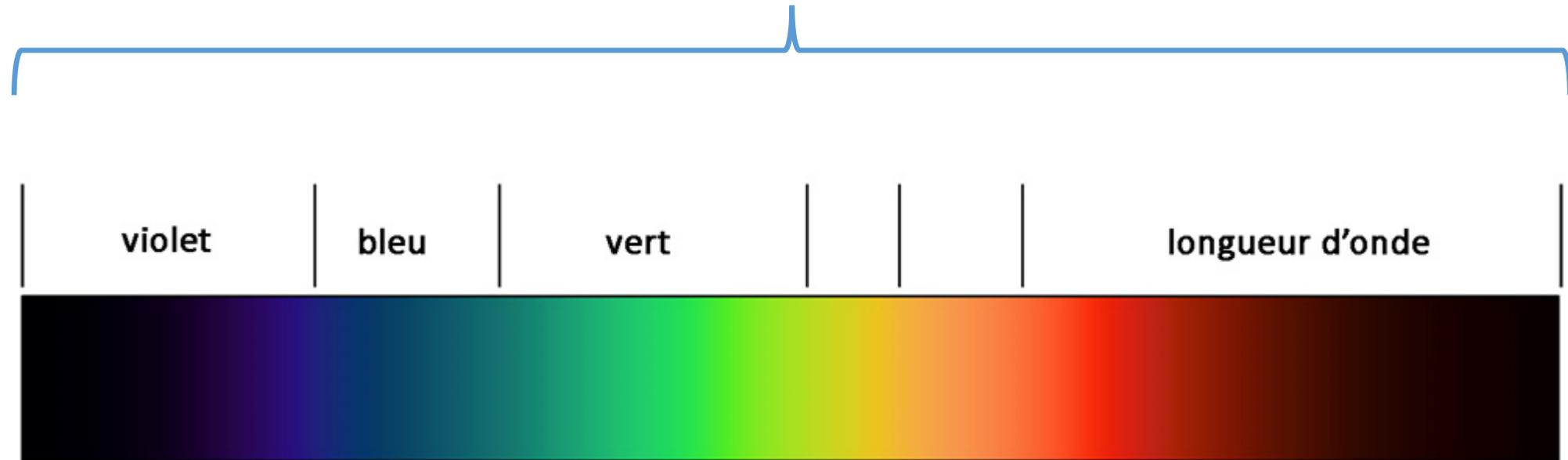
Contournent les
obstacles
(longueur d'onde
petite)

Transportent
plus de données
(fréquence
grande)

Le rayonnement du soleil



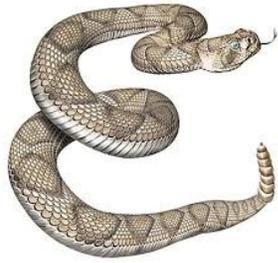
“Domaine visible” : visible par les humains



Si vous êtes une araignée, un crotale, une chouette ...



Araignée
sauteuse



crotale



chouette



chat



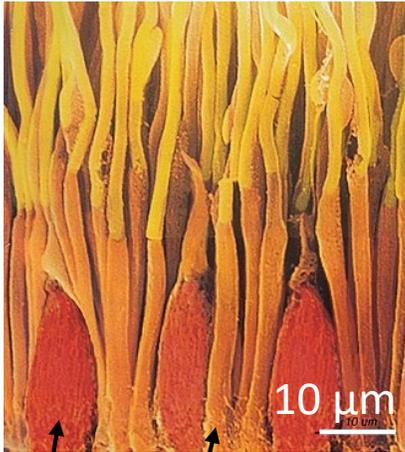
chien



Votre domaine visible est très différent !

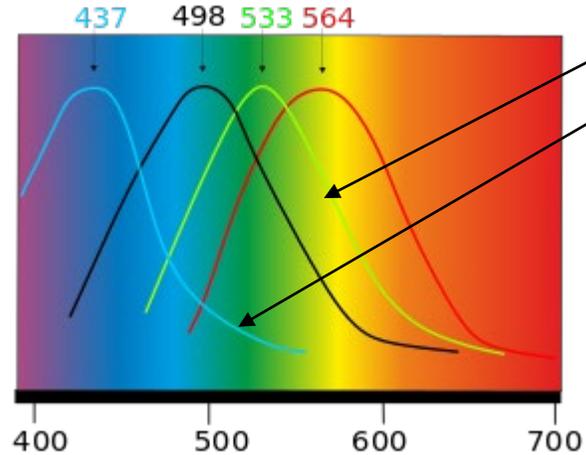
Pour les humains ...

Vue de la rétine



cônes bâtonnets

Spectres d'absorption

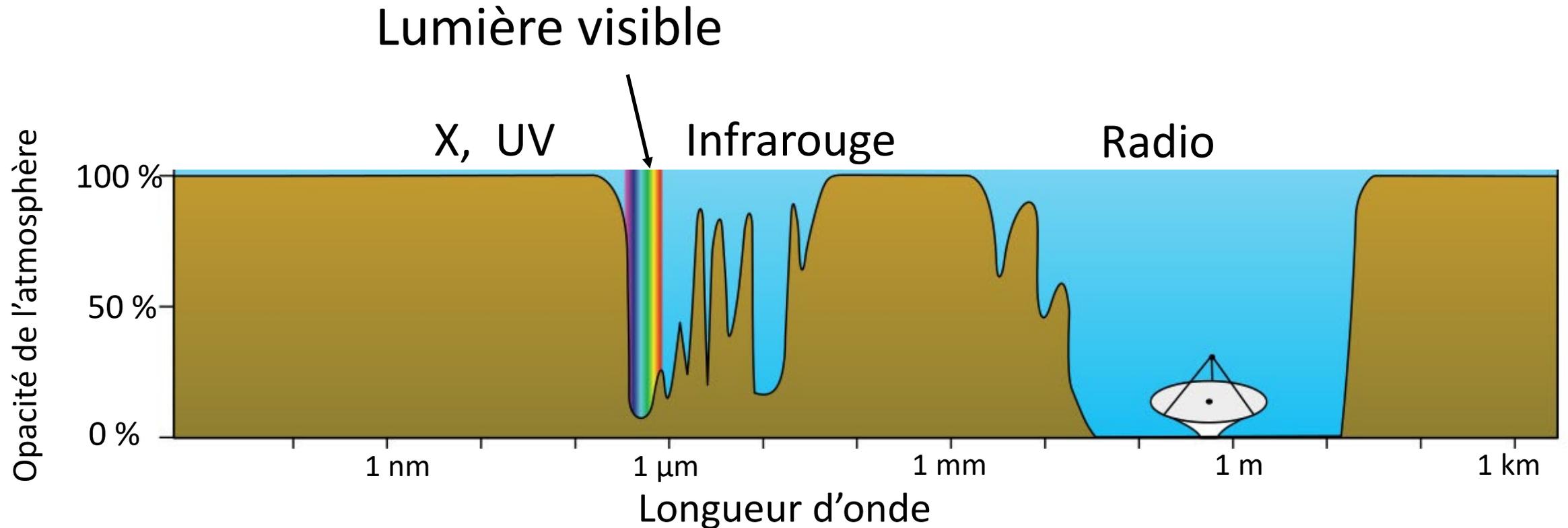


Trois types de cônes
(sensibles au bleu, vert,
rouge)

Mais les chiens, chats ... n'ont que deux types
de cônes (manque la vision du rouge)

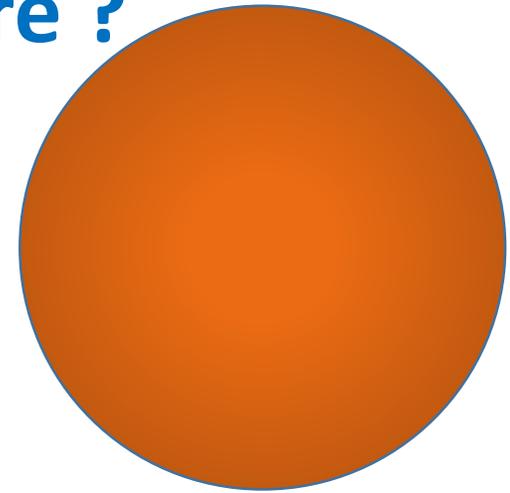


La lumière visible n'est qu'une toute petite partie du spectre solaire

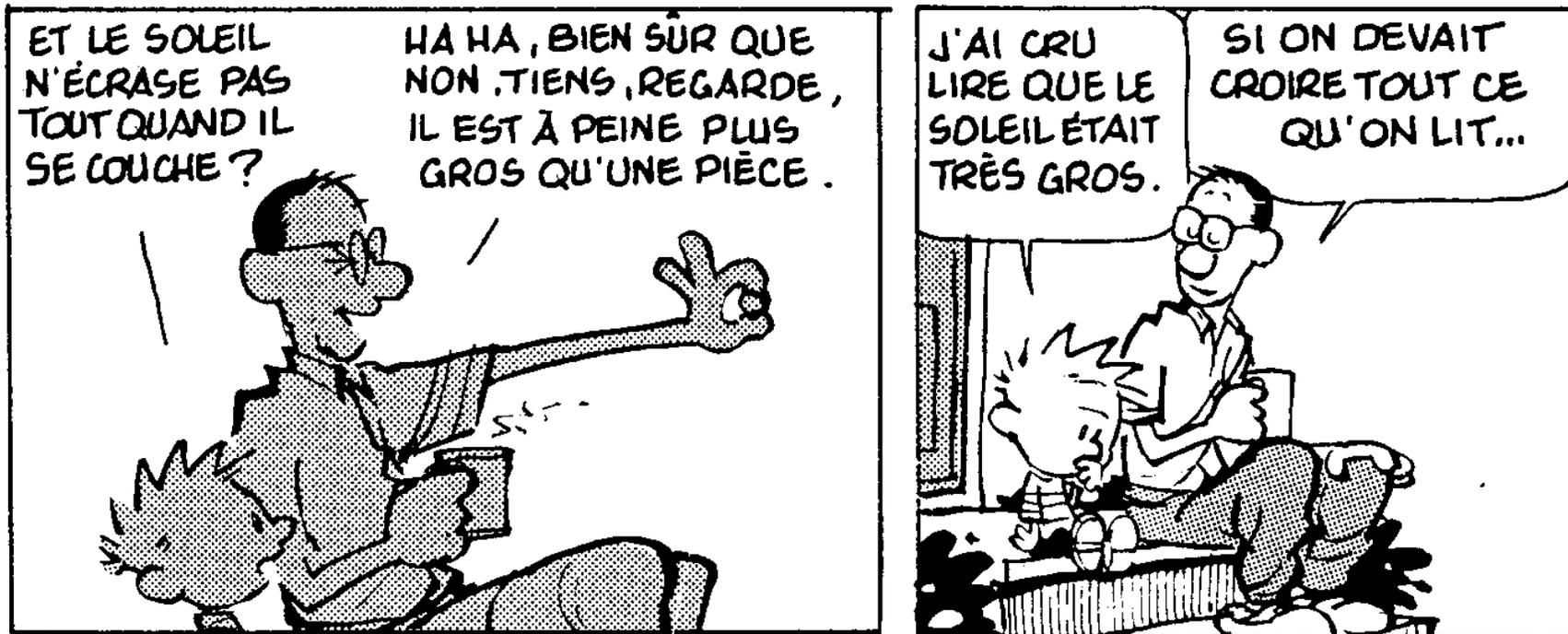


Qu'est-ce qui produit le rayonnement solaire ?

- Le soleil est une boule de gaz ionisé



Rayon 700.000 km
Masse $2 \cdot 10^{30}$ kg
(étoile ordinaire)

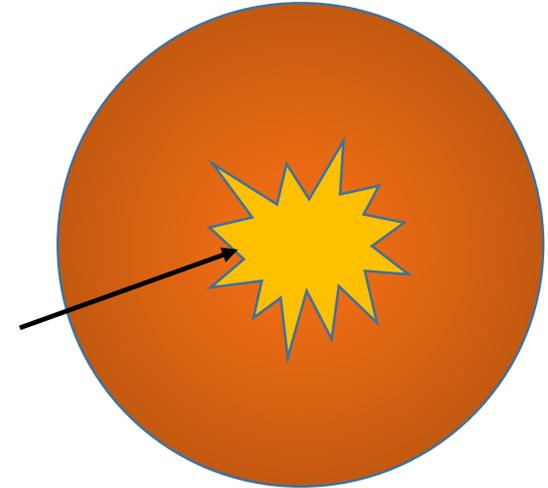


Calvin & Hobbes

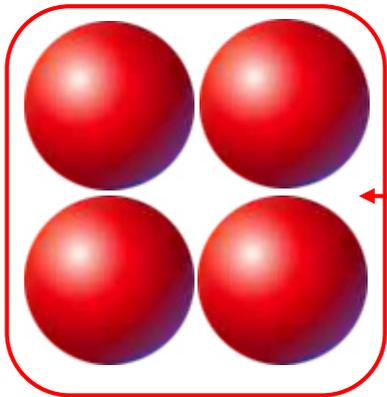
Qu'est-ce qui produit le rayonnement solaire ?

➤ Boule de gaz ionisé

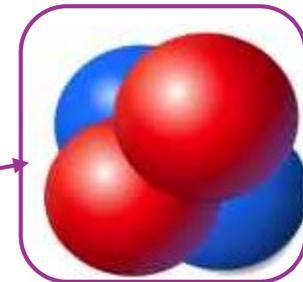
Partie centrale : 16 millions de degrés



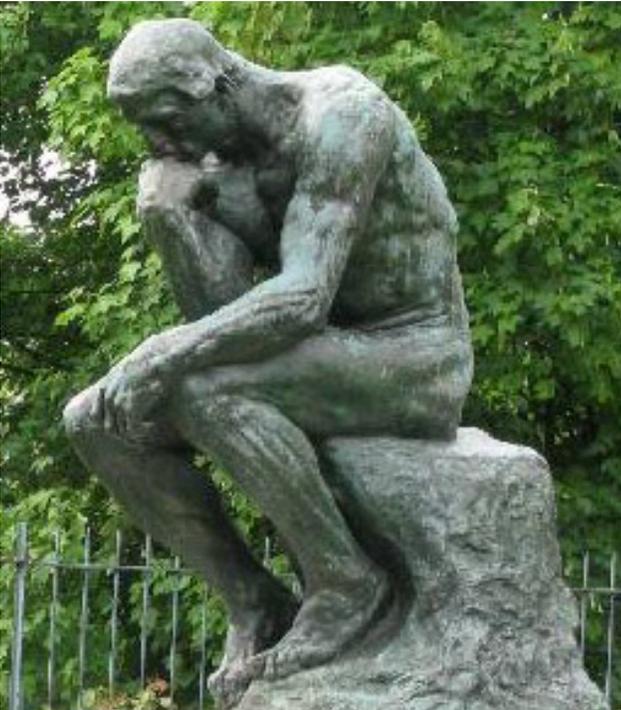
➤ Réacteur à fusion (hydrogène) confiné par la gravitation



Réactions nucléaires dont le bilan est la transformation de **4 noyaux d'hydrogène** en **noyau d'hélium**



QUESTIONS



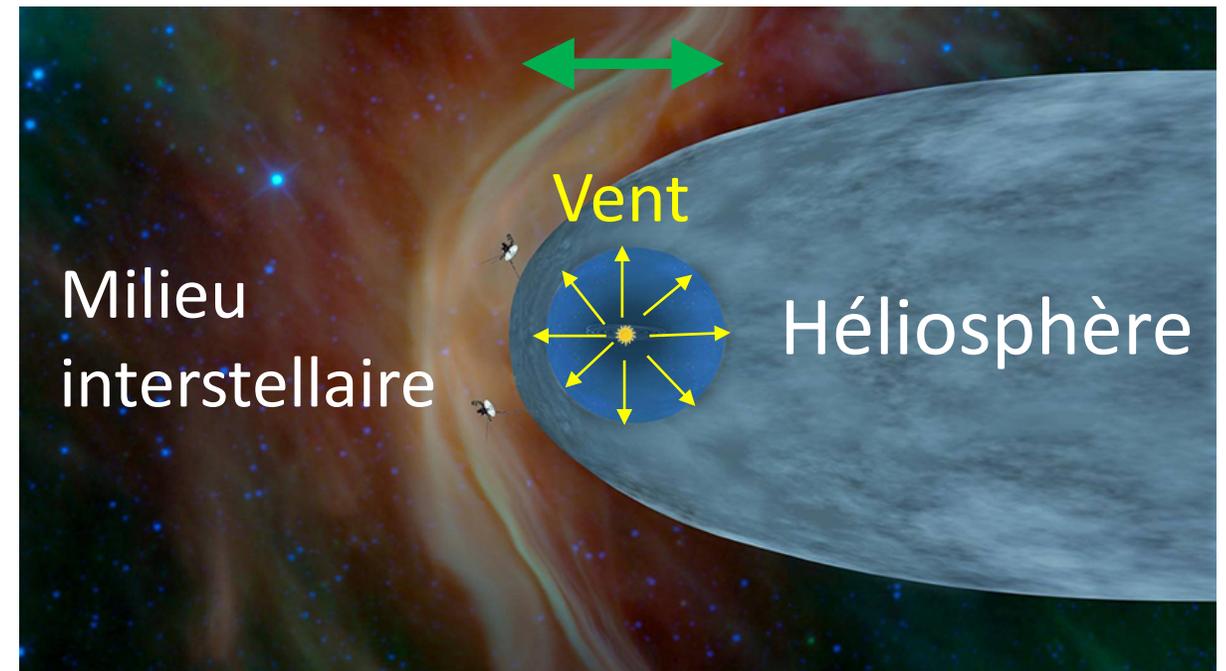
- Que sait-on du Soleil ?
- **Qu'est-ce que le vent solaire ?**
- Et ses tempêtes?
- « Toucher le Soleil » : la mission Parker Solar Probe

Le soleil émet un vent de plasma : le vent solaire

- Ejecté en permanence par le soleil
- Remplit tout le système solaire

15 milliards de km : 100 fois
la distance Terre-Soleil

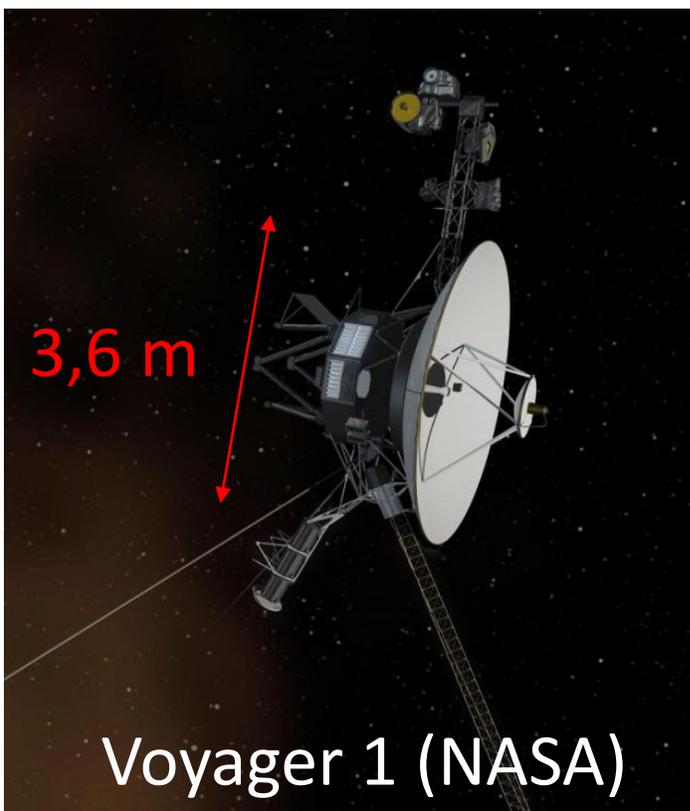
*En formant une bulle dans le
milieu interstellaire*



L'héliosphère

Comment connaît-on la taille de l'héliosphère ?

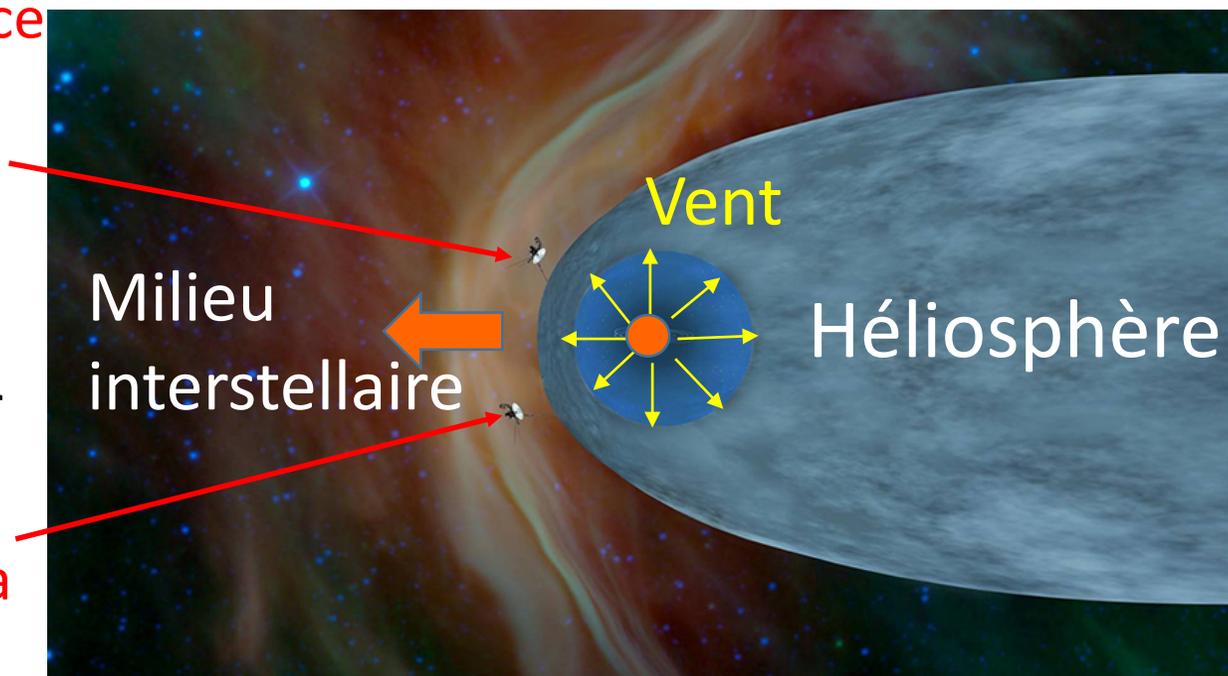
Grâce aux sondes Voyager lancées en 1977 (NASA/JPL)



Voyager 1 est ici
150 fois la distance
Terre soleil

Les signaux
mettent plus de
20 h pour arriver
!

et Voyager 2 est là



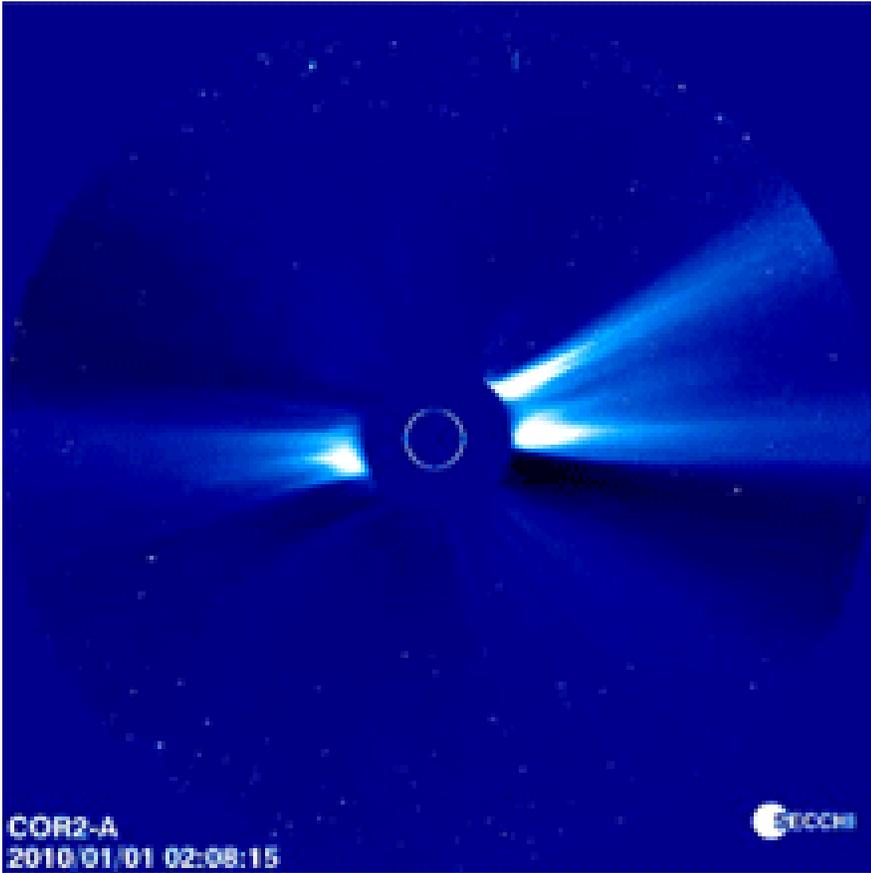
Le vent solaire

- A la distance de la Terre, le vent solaire contient environ **5 électrons et 5 protons par cm^3** à la température de **100.000 °K**, plus d'autres éléments (Helium, ...)

C'est un milieu très dilué. Comparez : à la surface de la Terre, l'atmosphère contient $2 \cdot 10^{19}$ molécules par cm^3 (à environ 300°K)

Température en ° Kelvin = valeur en °Celsius + 273

Le vent solaire

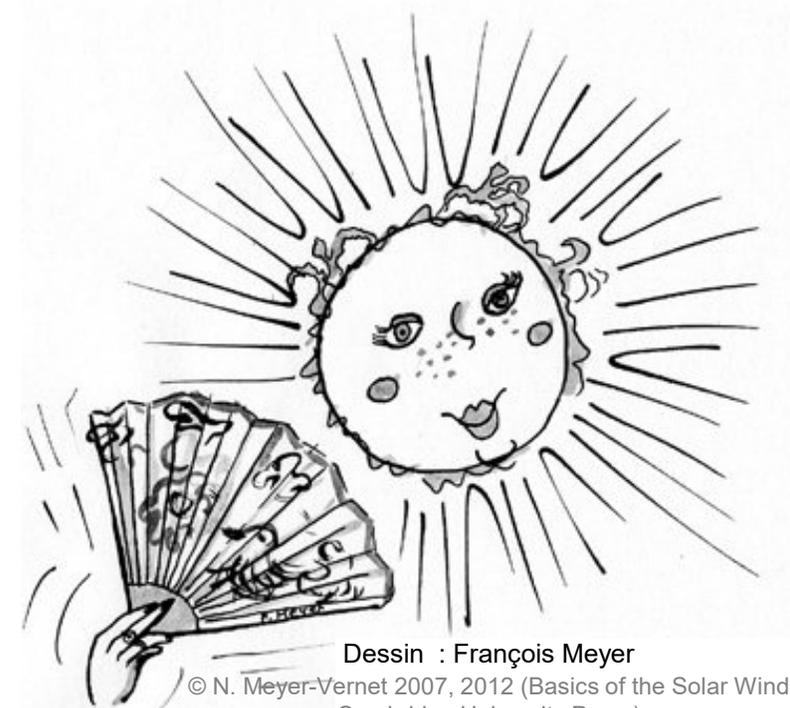


SOHO/LASCO
Photos prises pendant 1 h)

- Le soleil perd ainsi 10^9 kg/s
- En 10 milliards d'années (sa durée de vie)
il perd 1/10.000 ème de sa masse

Le vent solaire

➤ *Qu'est-ce qui souffle ce vent ?*

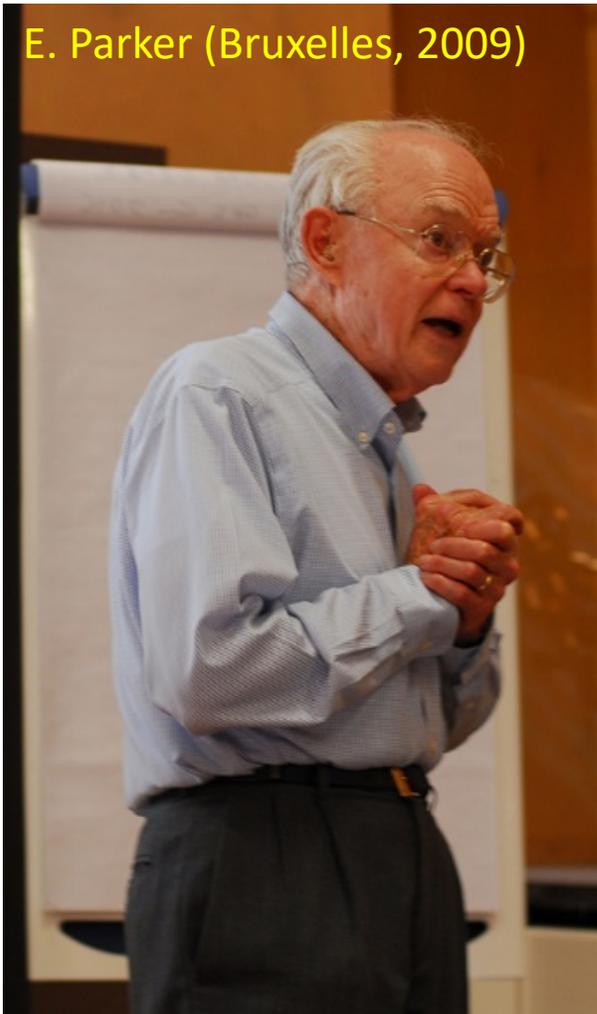


Dessin : François Meyer

© N. Meyer-Vernet 2007, 2012 (Basics of the Solar Wind
Cambridge University Press)

Le vent solaire vient de la couronne solaire

Eugène Parker (Université de Chicago) a montré en 1958 que ce vent supersonique est produit parce que **la couronne solaire est très chaude et conduit très bien la chaleur**



E. Parker (Bruxelles, 2009)



Cérémonie en 2017

Le vent solaire vient de la couronne solaire

- La couronne solaire est très chaude, dense et conduit très bien la chaleur
- Donc les électrons (légers et chauds) ne sont pas retenus par la gravitation
- Ils s'échappent vers le milieu interstellaire presque vide en entraînant les protons (de charge électrique opposée)



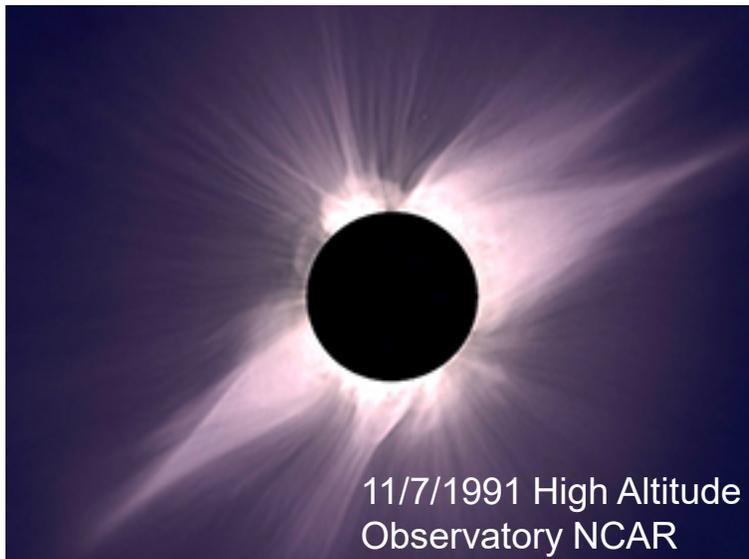
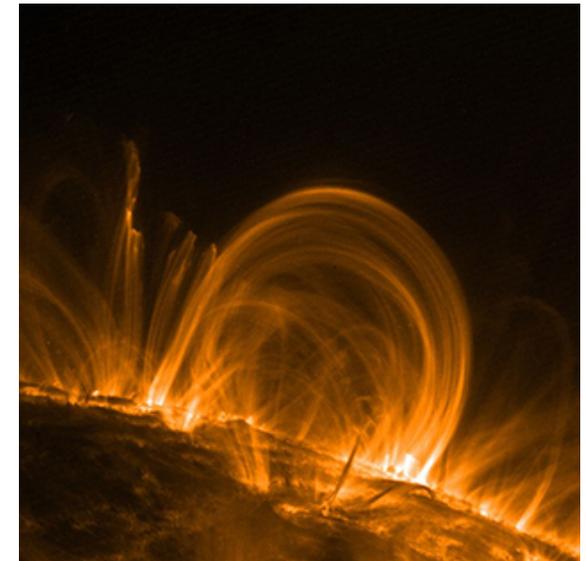
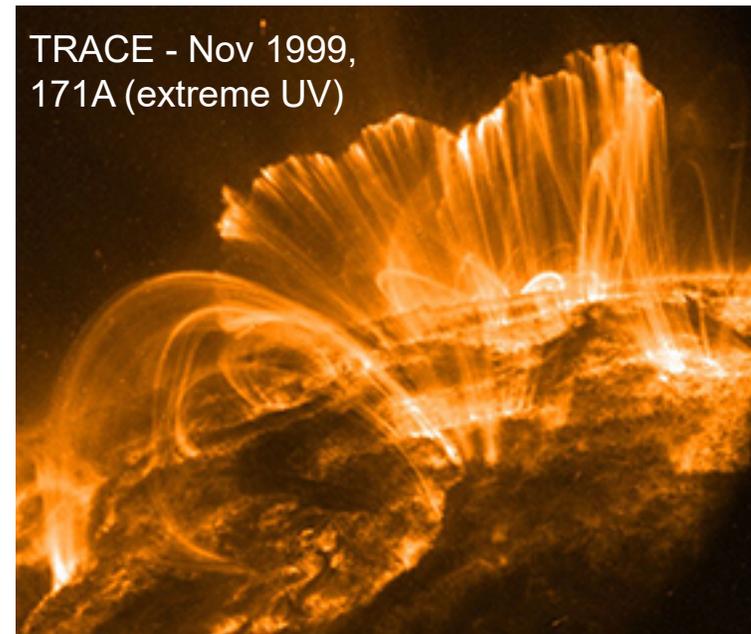
Qu'est-ce que la couronne solaire ?

Invisible ... sauf pendant une éclipse

Observée du sol pendant une éclipse (lumière visible)



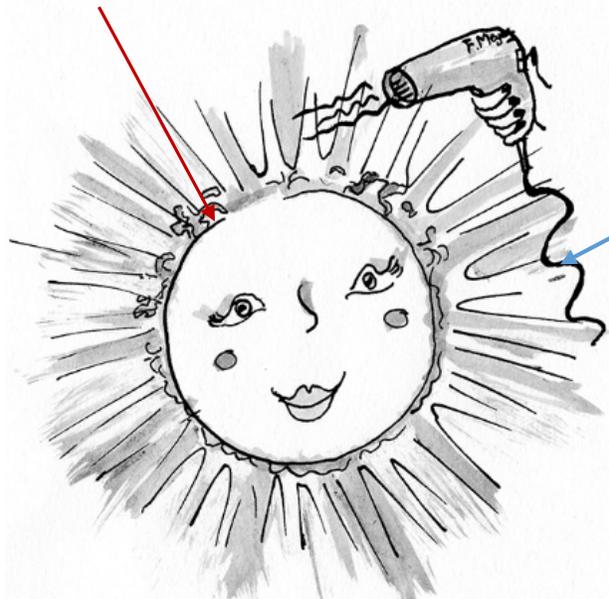
... et en détail par une sonde spatiale en ultra-violet et X



Température de la couronne > 1 million de degrés

➤ *Qu'est-ce qui chauffe la couronne solaire ?*

Surface : 5800 degrés



> 1.000.000 degrés !

© N. Meyer-Vernet 2007, 2012 (Basics of the Solar Wind
Cambridge University Press)

*Normalement, la chaleur devrait
aller du chaud vers le froid.*

C'est un vieux problème (60 ans !)

Libération (novembre 1997) **L'espion solaire Soho devrait résoudre le mystère de la couronne**

Futura sciences (août 2011)

La fin de l'énigme du chauffage de la couronne solaire ?

Science et Avenir (janvier 2011)

Nouvelle explication pour le mystère de la couronne solaire

Science et Vie (novembre 2013)

Le mystère du chauffage de la couronne solaire serait résolu

La Croix (juin 2015)

Le mystère de l'atmosphère solaire enfin résolu ?

Ouest France (décembre 2019)

La sonde solaire de la NASA livre ses premiers résultats – son objectif annoncé est de résoudre un vieux mystère : qu'est-ce qui chauffe le couronne solaire ?

La couronne solaire est un plasma

Qu'est-ce qu'un plasma ?

Plasma = 4^{ème} état de la matière

1. solide



2. liquide



3. gaz



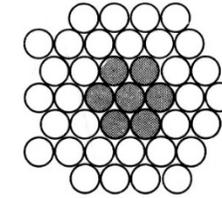
4. PLASMA



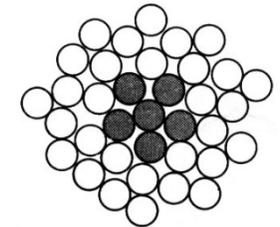
Qu'est-ce qu'un plasma ?

4^{ème} état de la matière

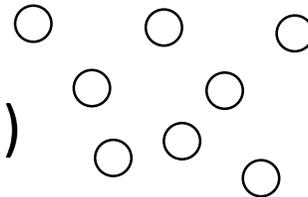
1. **solide** Rigide - Molécules liées rigidement entre elles



2. **liquide** Déformable mais incompressible - Molécules faiblement liées (peuvent bouger)



3. **gaz** Molécules libres (compressible)



4. **PLASMA** Electrons séparés des atomes (mélange d'électrons et ions libres)

Où trouve-t-on des plasmas ?

Plasmas « artificiels »

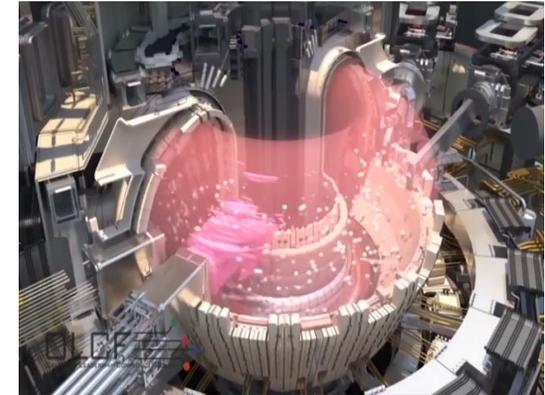
Décharges
électriques



Tubes fluorescents,
ampoules basse
consommation, ..



Ecran à plasma



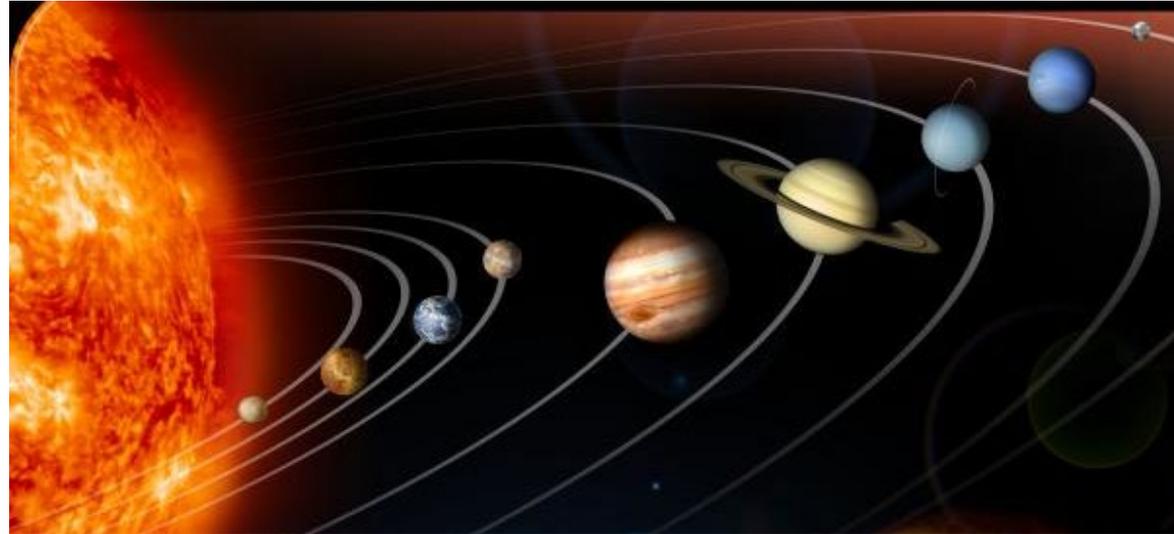
Fusion contrôlée
Tokamak (ITER)

Plasmas « naturels »

L'essentiel de l'univers est formé de plasma

Presque tout l'univers est formé de plasma

Etoiles



Environnement
des planètes

Milieu interplanétaire

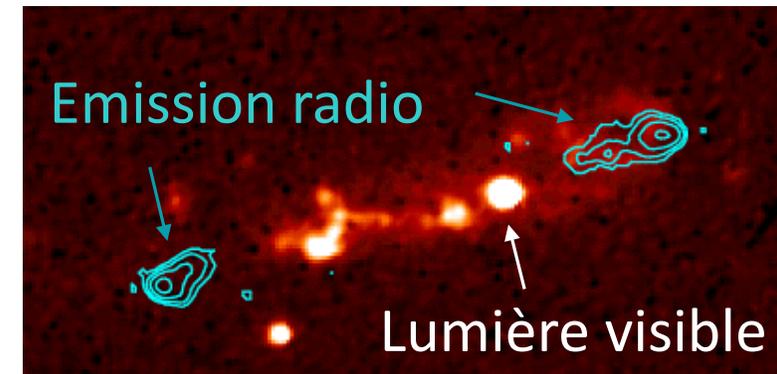
Milieu
interstellaire



Nébuleuse dans le Grand Nuage de Magella

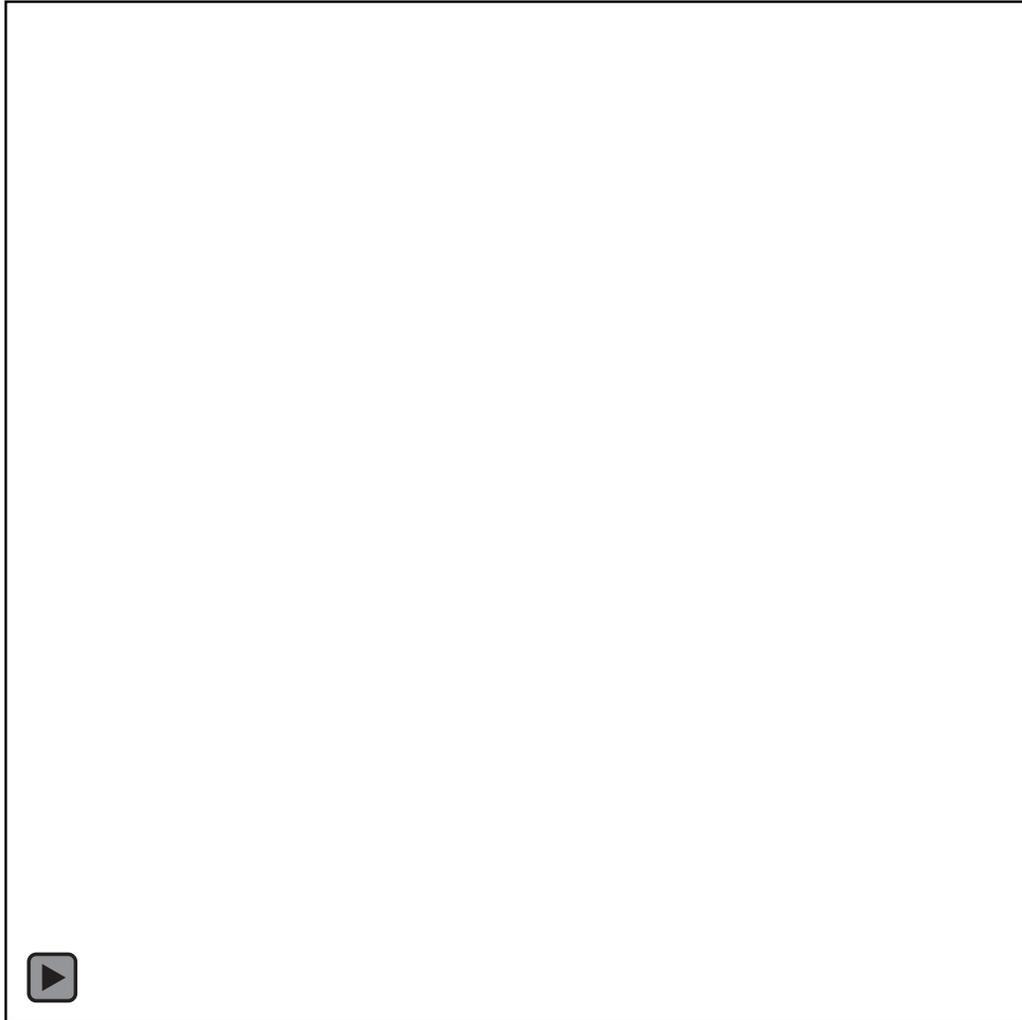
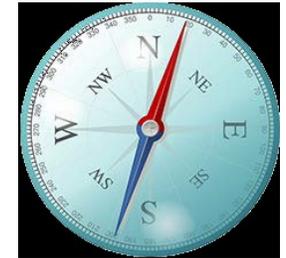
Galaxies ...

Milieu intergalactique



La couronne solaire est un plasma magnétisé

Plasma à 1 millions de degrés
guidé par le champ magnétique



Télescope SDO (NASA). Ultraviolet extreme (171 Å).
Couleurs arbitraires. 2 jours (17-19 sept. 2012)

La couronne solaire est un plasma magnétisé

Plasma à 1 millions de degrés
guidé par le champ magnétique

SDO – Extreme UV
15-16 jan. 2012
1 image/5 min



Le vent solaire ...

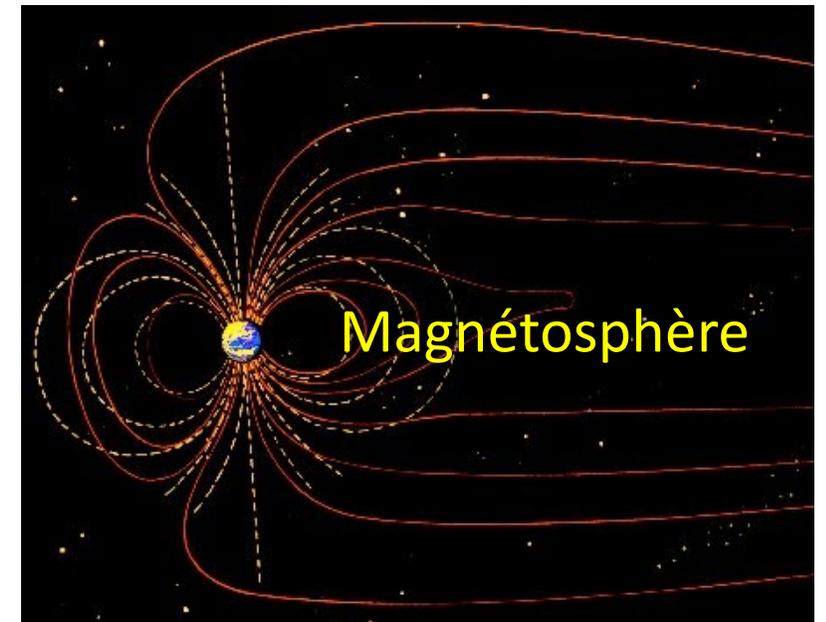
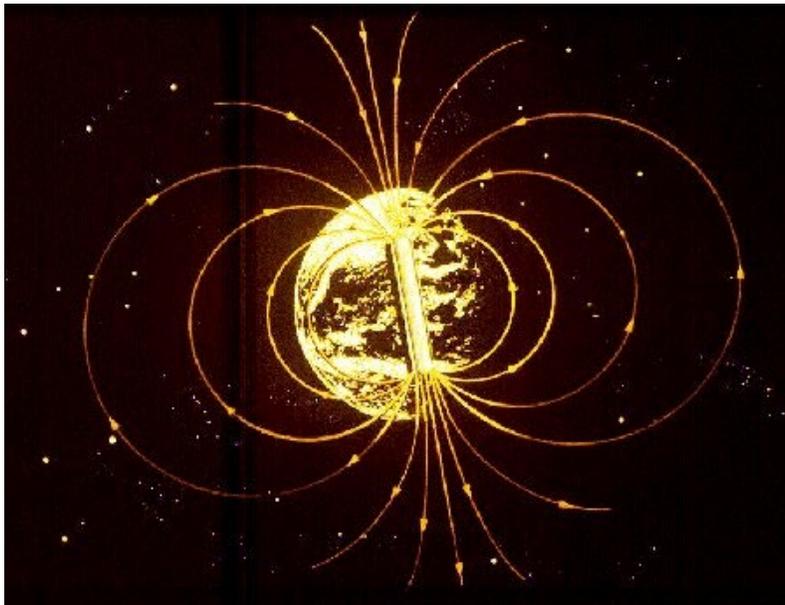
pousse et sculpte les plasmas

Lorsque les planètes ont un champ magnétique

... le vent solaire déforme ce champ

Lignes de champ magnétique
autour d'une planète

Déformation par le vent solaire

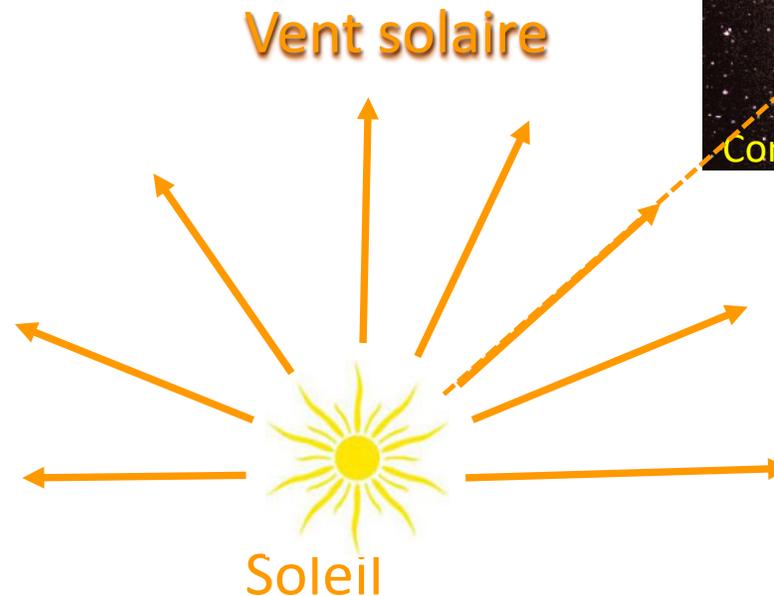
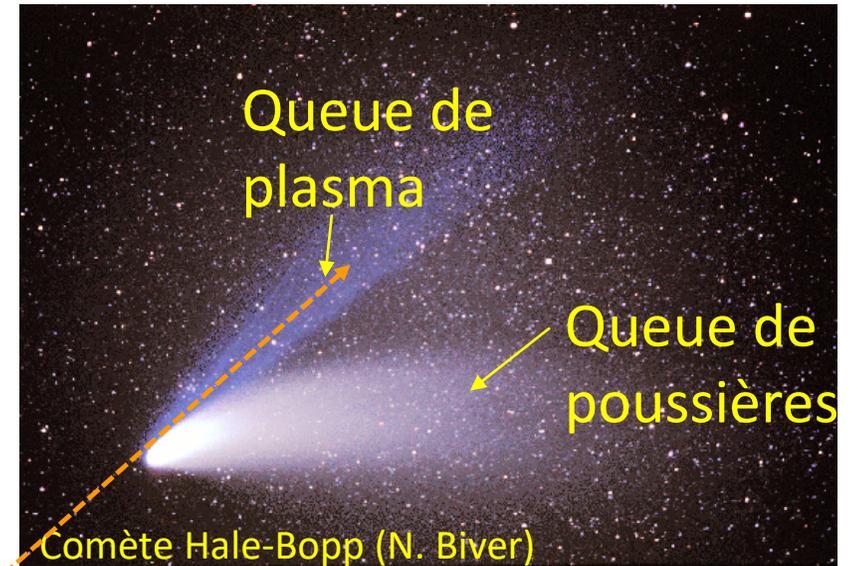


Le vent solaire ...

Produit les queues de plasma des comètes

Les queues de plasma cométaires indiquent la direction du vent solaire

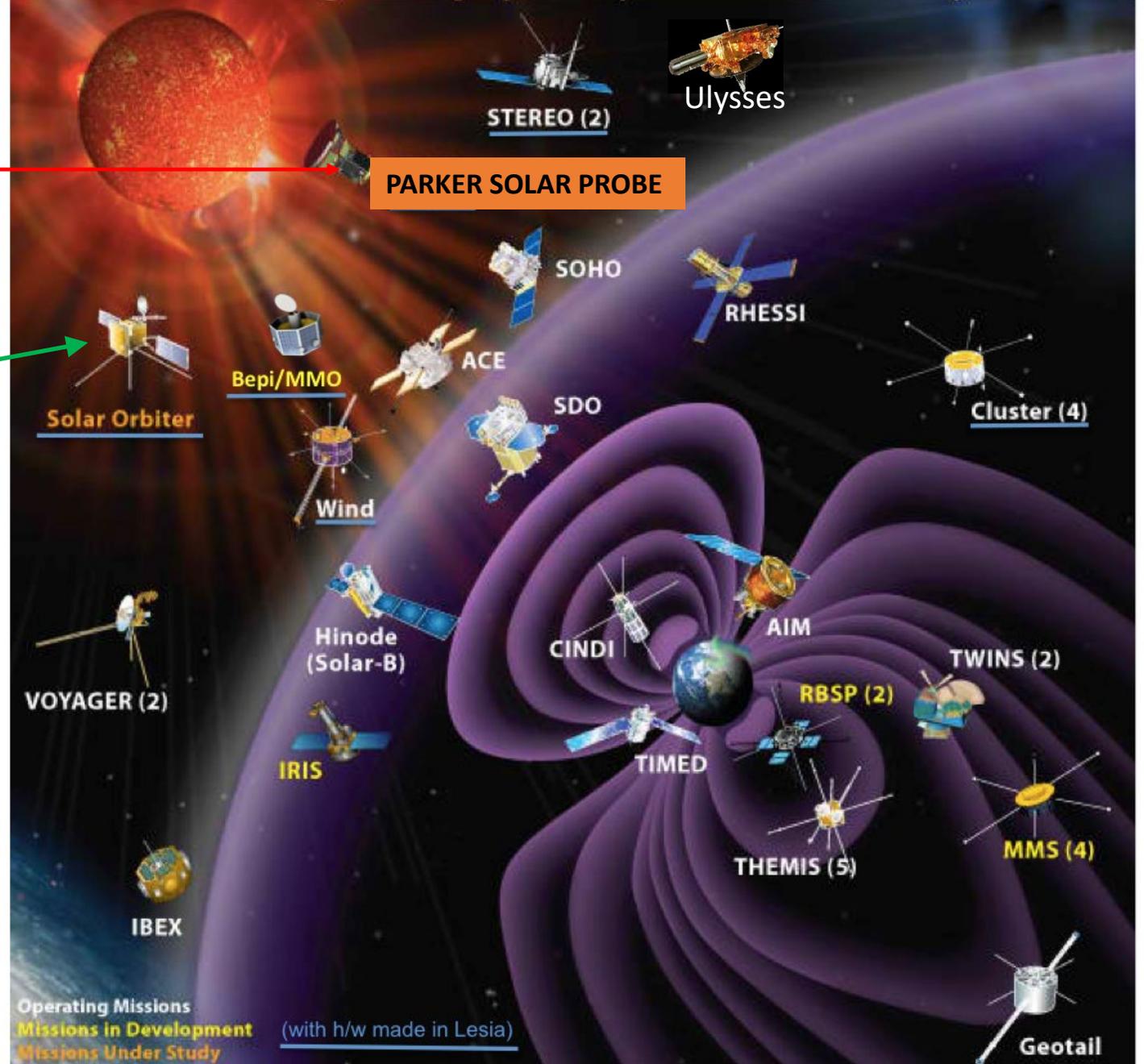
Comme une manche à air



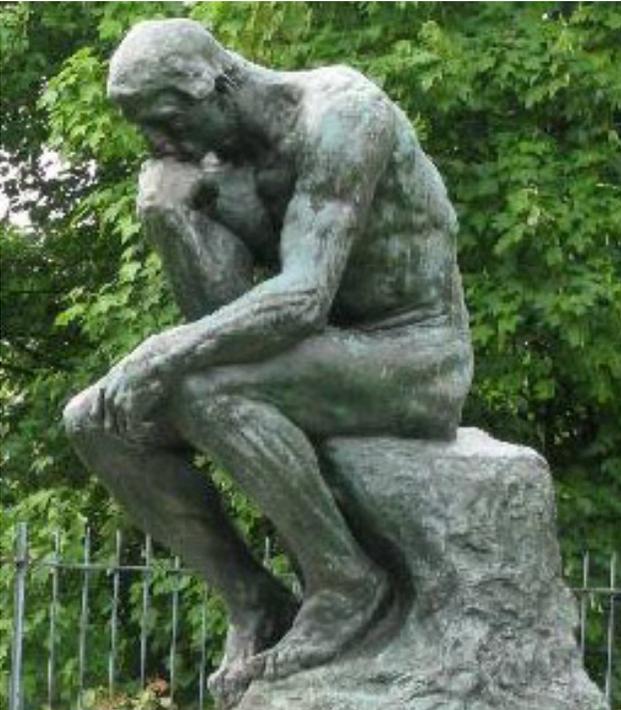
Lancé en août 2018

c.f. présentation de
Xavier Bonnin

La flottille de sondes dans le vent solaire et l'environnement de la Terre



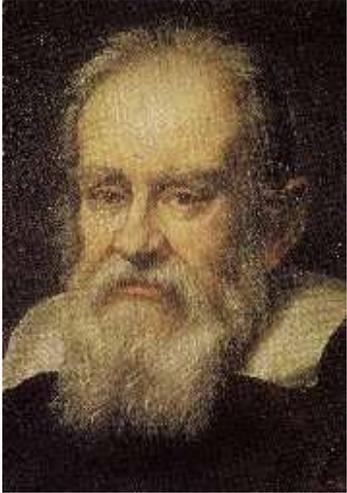
QUESTIONS



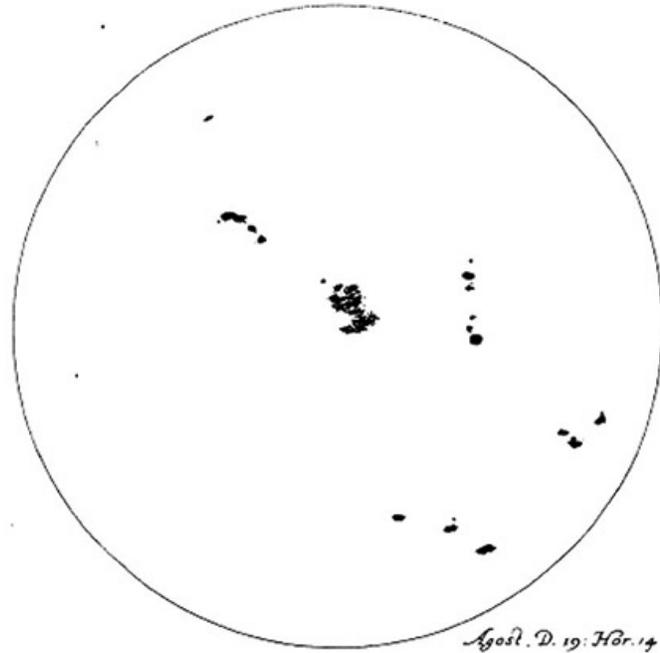
- Que sait-on du Soleil ?
- Comment s'échappent ses vents?
- **Et ses tempêtes?**
- « Toucher le Soleil » : la mission Parker Solar Probe

Activité solaire

Taches solaires



Galilée

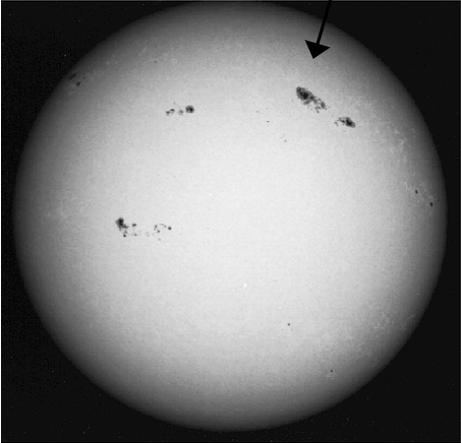


- Découverte (1^{ère} publication): 1611 David Fabricius
- Galilée dit les avoir observés en 1610

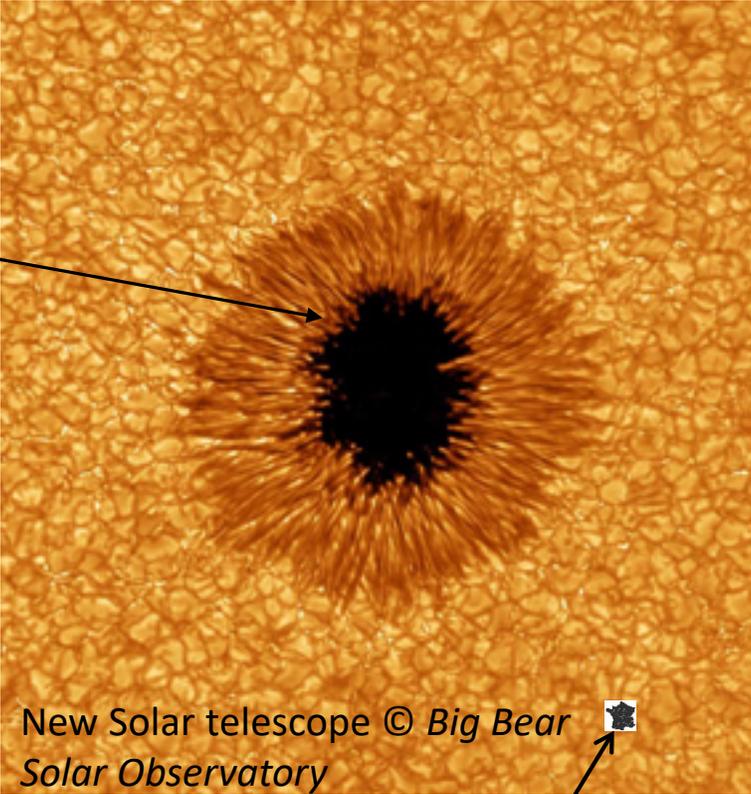
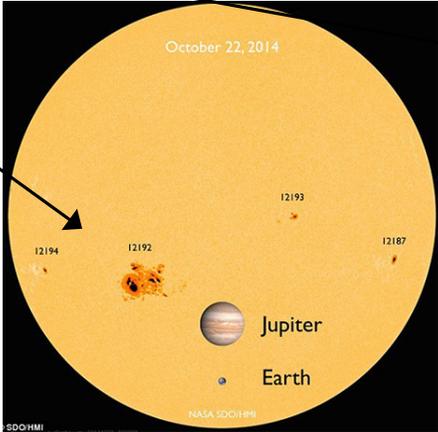
Un de ses premiers dessins du Soleil (1612)

Activité solaire

Taches solaires



Disque solaire
(lumière visible)

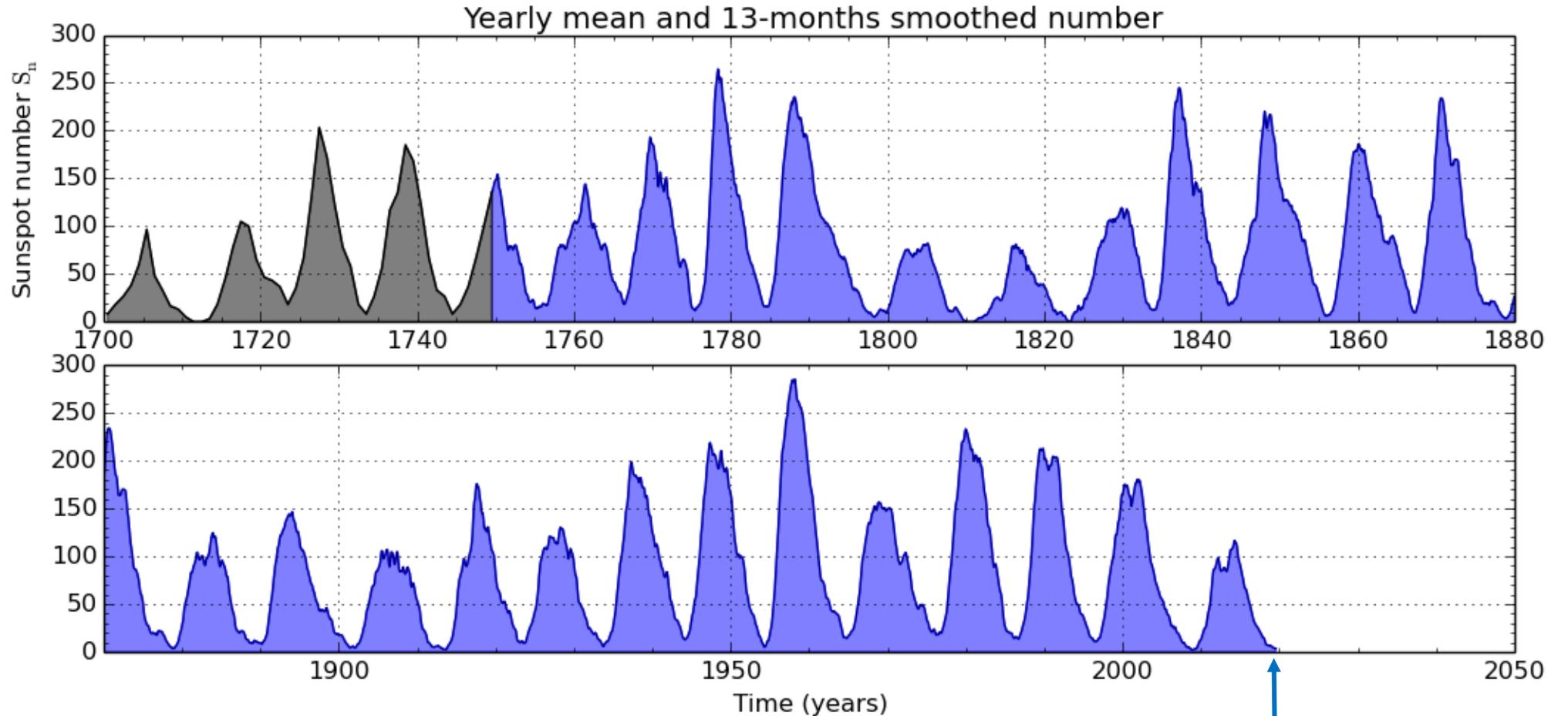


New Solar telescope © Big Bear
Solar Observatory

Taille des granules : 1000 km

Activité solaire : cycle de 11 ans

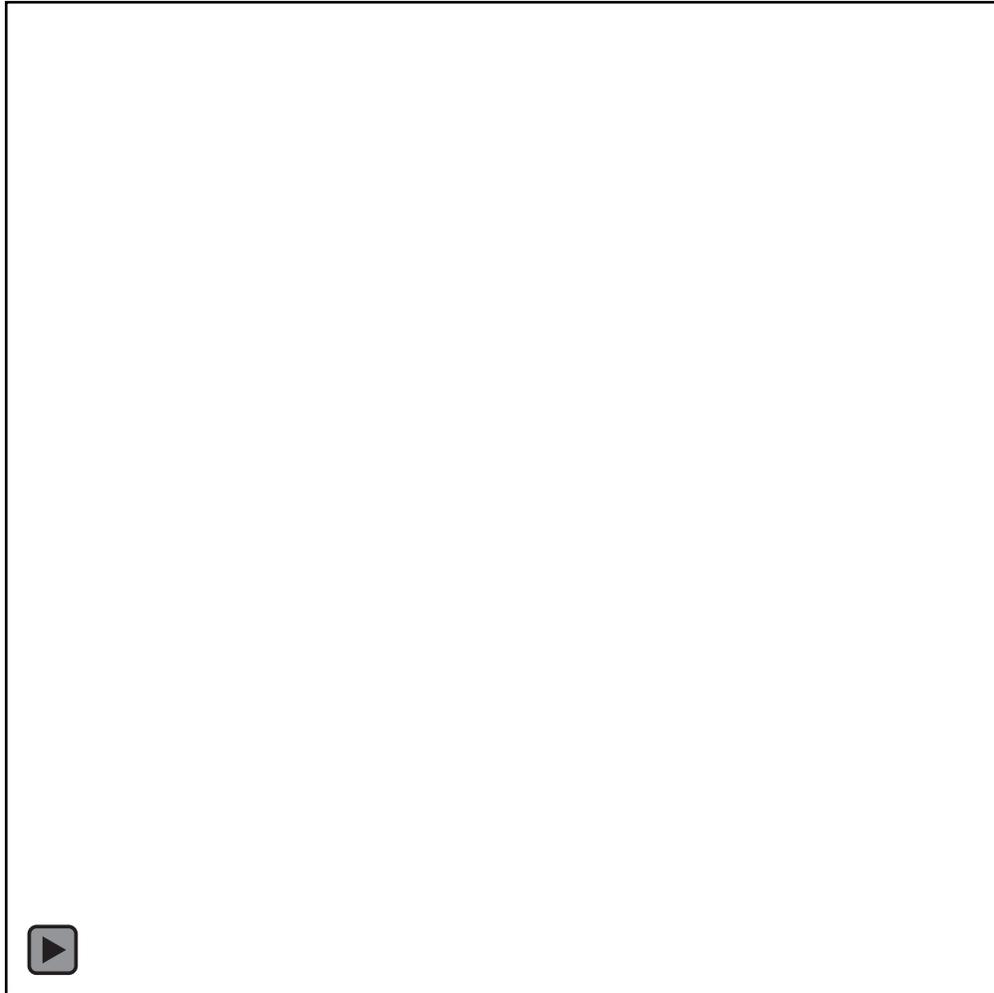
Nombre
de taches
solaires
de 1700
à 2020



SILSO graphics (<http://sidc.be/silso>) Royal Observatory of Belgium 2020 February 1

2020

En maximum solaire, il y a beaucoup d'éruptions solaires



Origine d'une éruption solaire

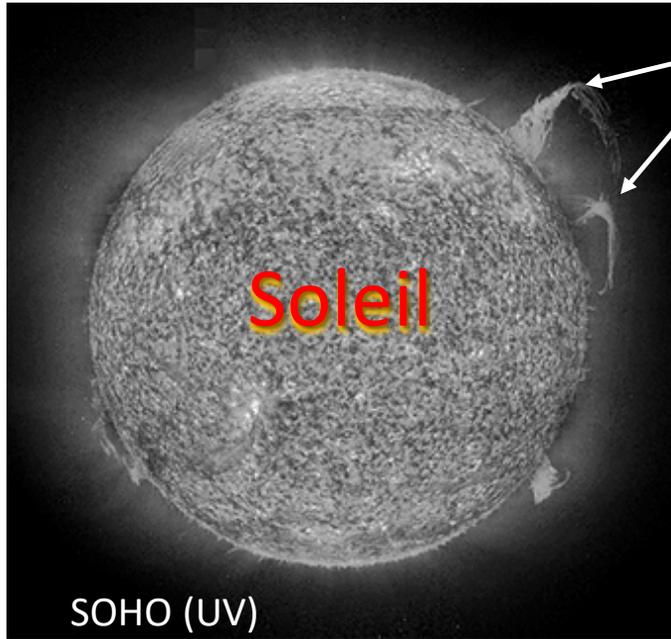
Télescope SDO (NASA). Ultraviolet extreme (304 Å).
Couleurs arbitraires. (16 avril 2012)

Origine d'une éruption solaire



Télescope SDO (NASA). Ultraviolet extreme
30 mars 2010

Eruption solaire

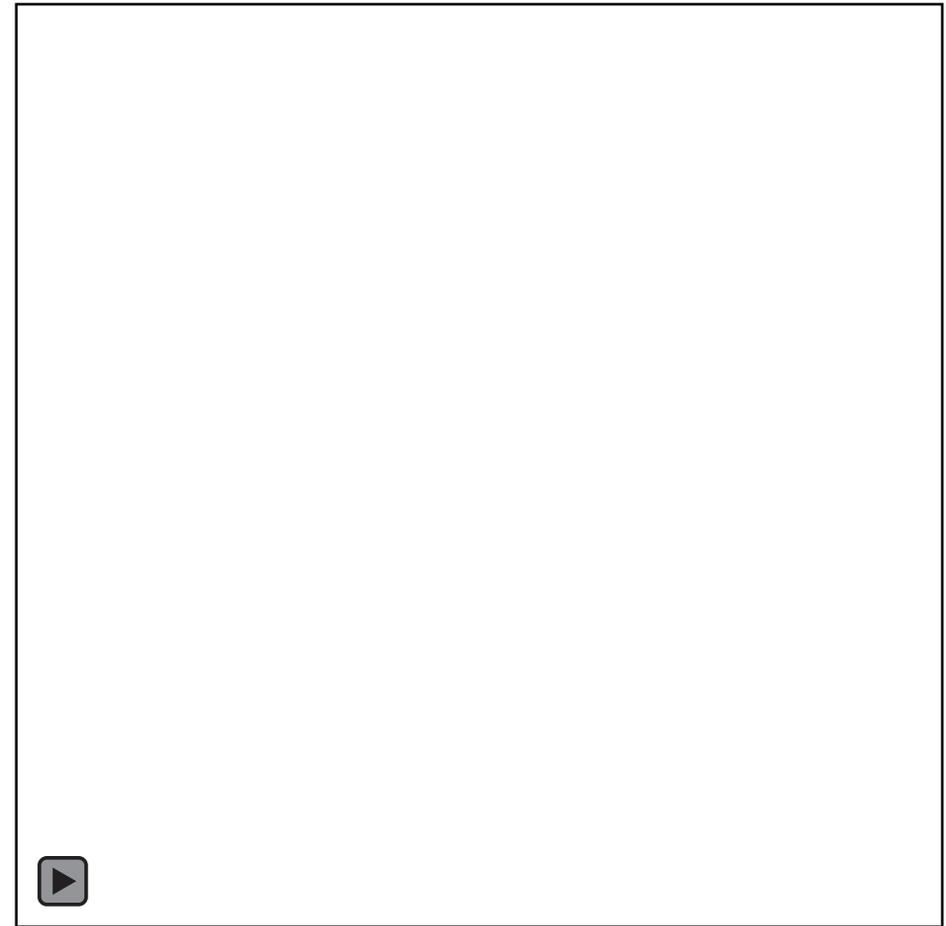


Des paquets de matière de la taille d'une montagne (10^{12} kg) supportés par le champ magnétique

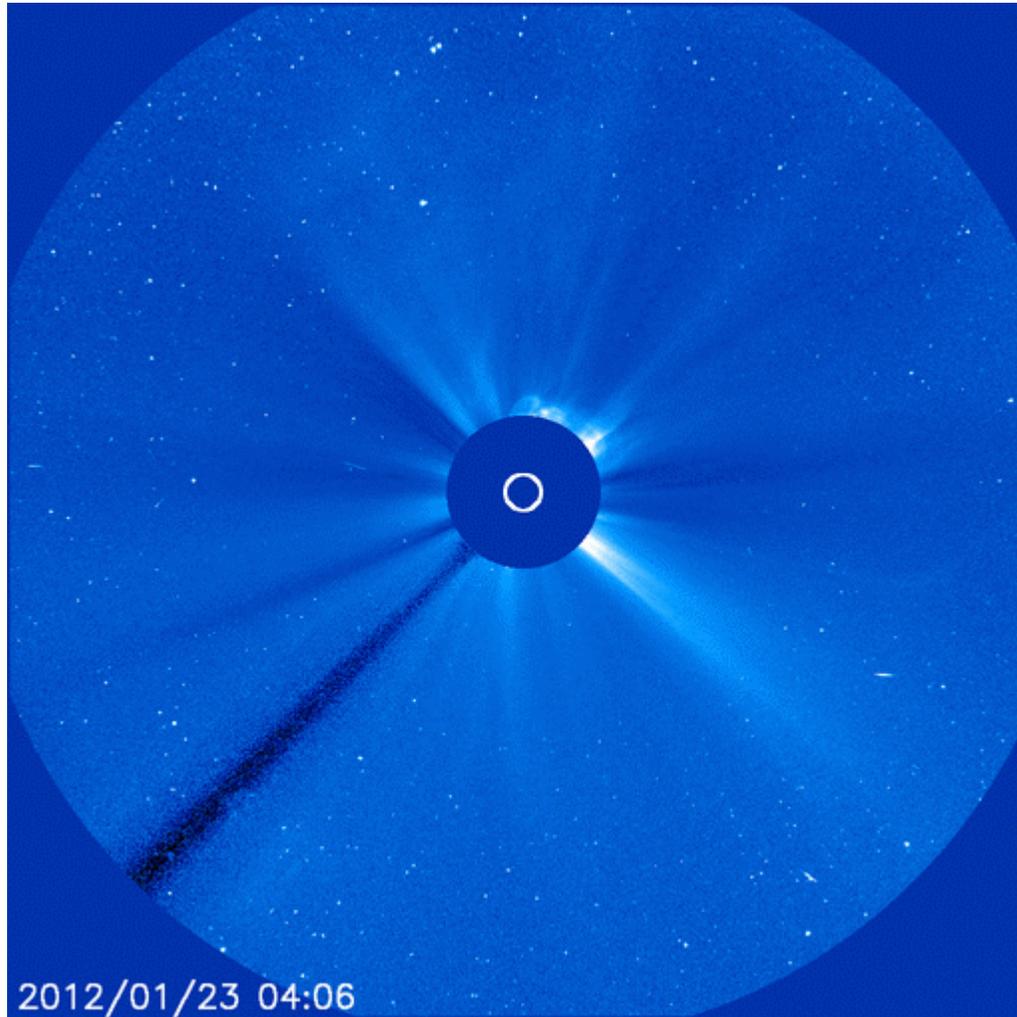
Libération de l'énergie dans une éruption solaire : 10^{24} Joules !

Pour comparer : 1 kg de TNT libère environ $4 \cdot 10^6$ J

La « montagne » part à 300 km/s !

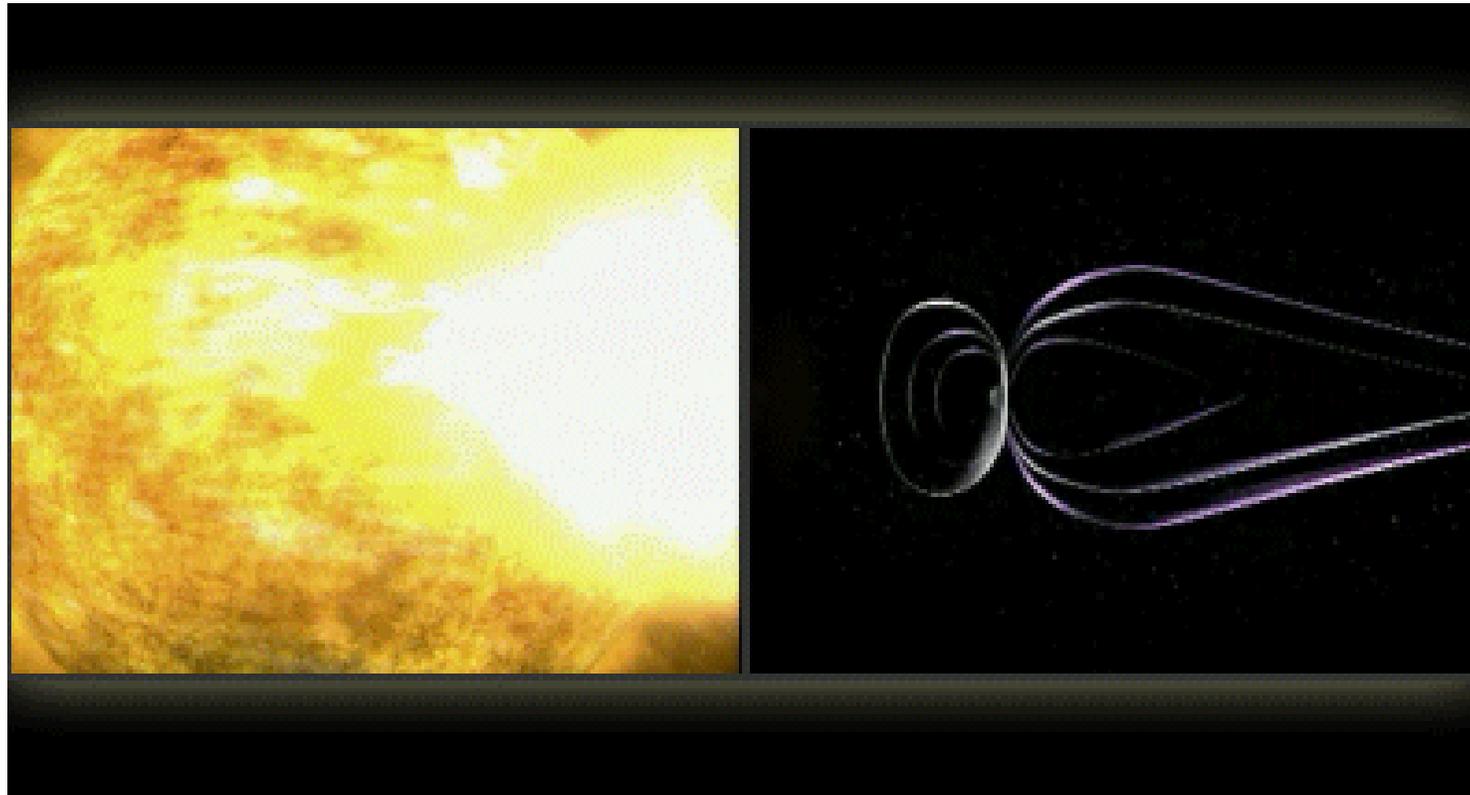


Eruption solaire



Bulle de plasma
+ Rayonnement en gamma,
X, UV, visible, radio

Effets des éruptions solaires

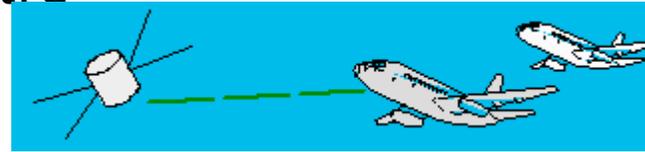


Comprime le champ magnétique Terrestre

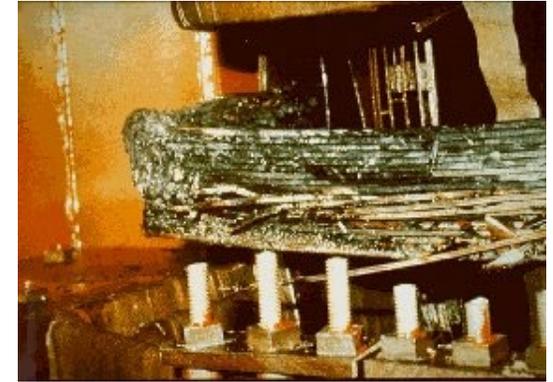
Effets des éruptions solaires

restes d'un transformateur

- En modifiant le champ magnétique terrestre
- Cela crée des courants électriques
- Perturbe les systèmes de communication



Space Environment Center

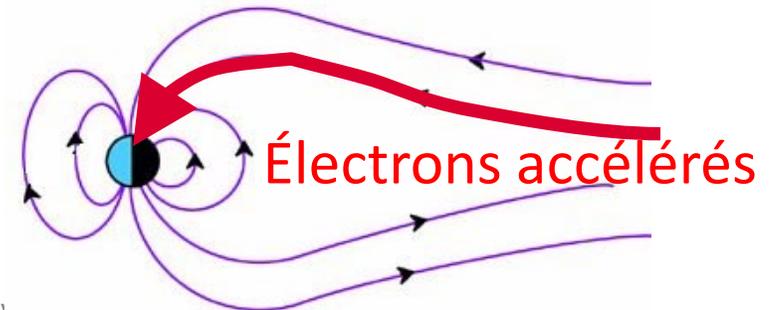


Exemples :

- En 1989, une partie du Québec plongée plusieurs heures dans le noir
- En septembre 2017, black-out des communications hf d'urgence après l'ouragan Irma sur les îles St Martin et St Barthélémy

Autre effet

- Accélère des électrons
- Ces électrons reviennent vers les régions polaires et créent les aurores polaires

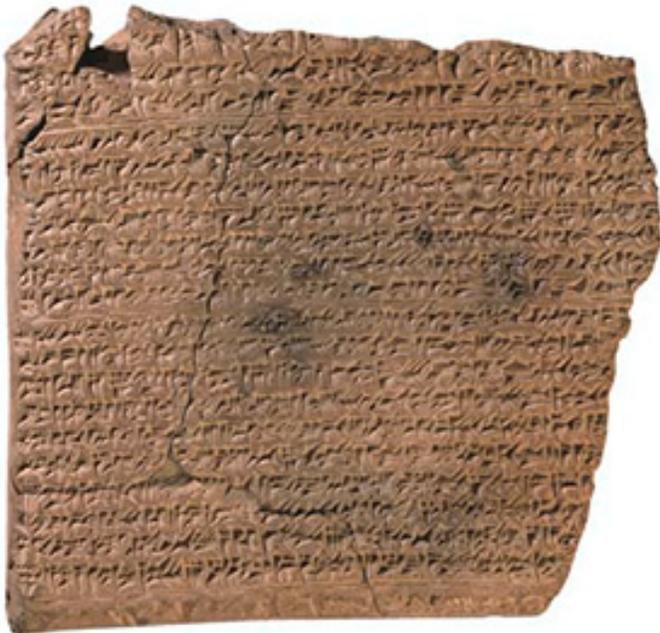


Aurores boréales ou australes

San-Hai Ching, 2200 BC

« Un serpent rouge brillant dans le ciel »

Tablette Babylonienne (567 BC)



Pline l'ancien, 1^{er} siècle AC

(Histoire Naturelle, II, XXVII)

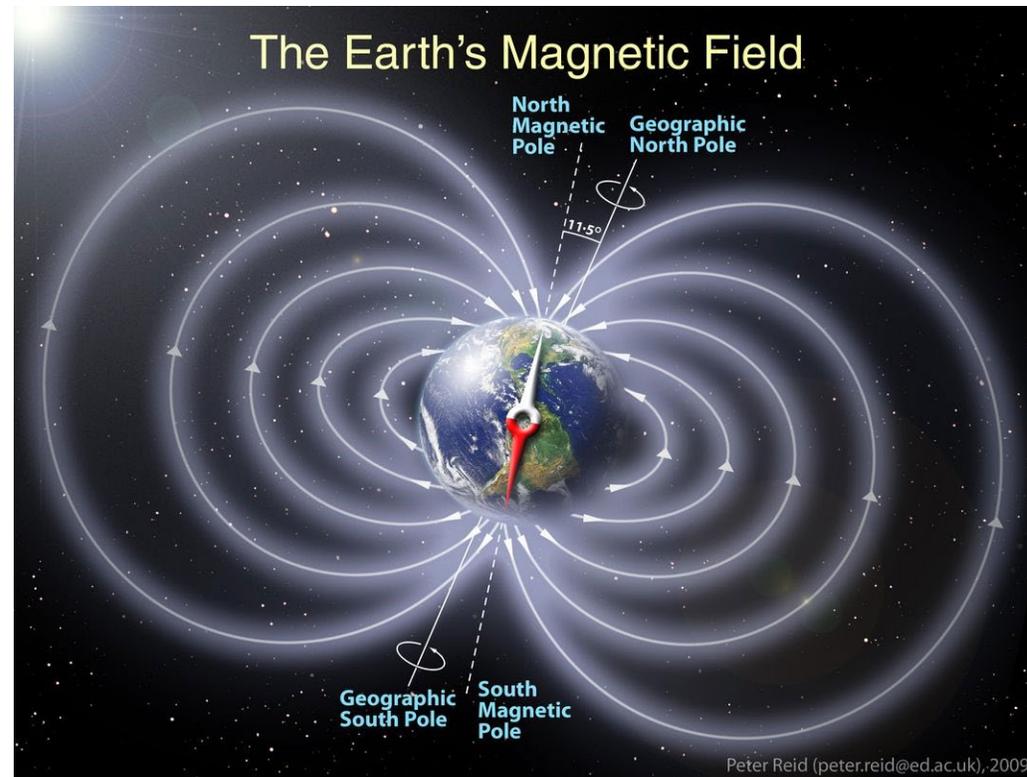
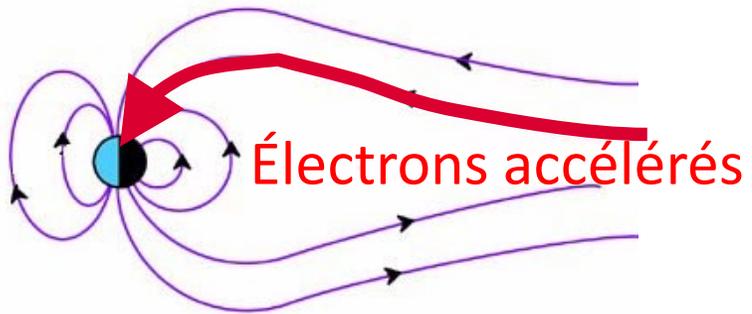
« On y voit aussi sous un aspect sanglant ... un incendie tombant vers la Terre ... »



Aurore vue dans le Calvados en 2005

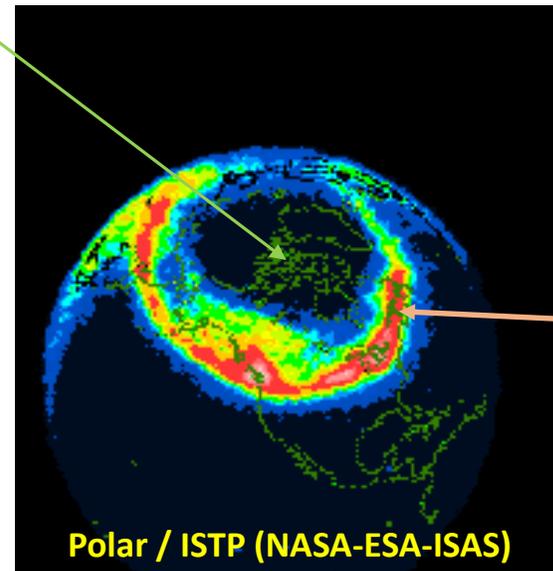
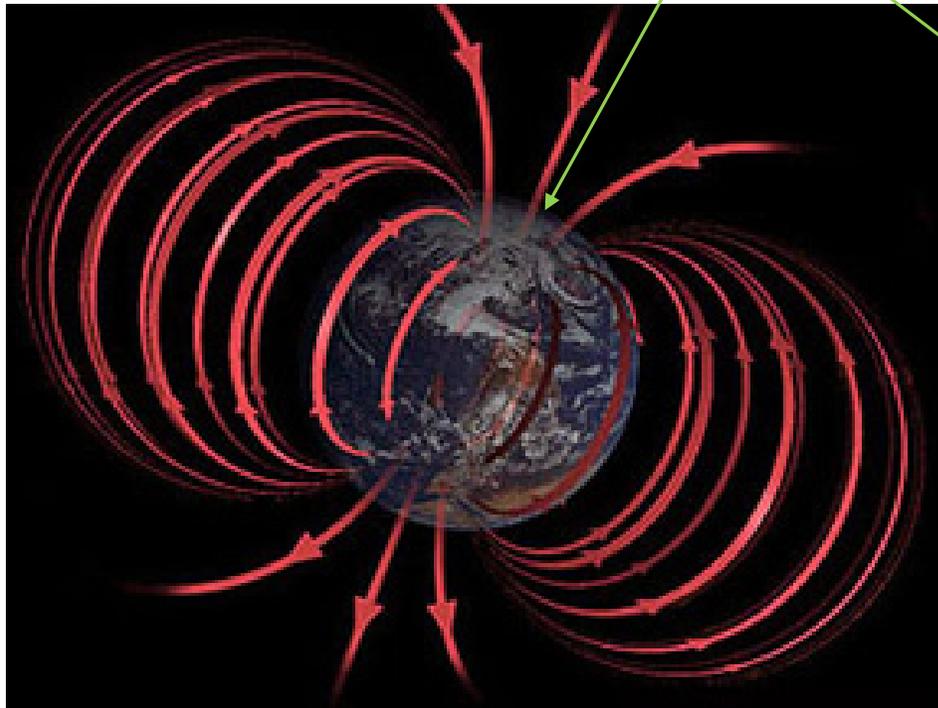
Où peut-on observer des aurores ?

Autour des pôles magnétiques de la Terre



Où peut-on observer des aurores ?

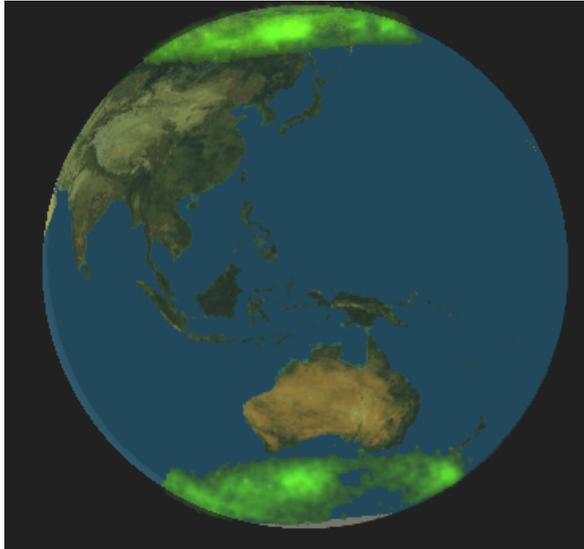
Pôle nord magnétique



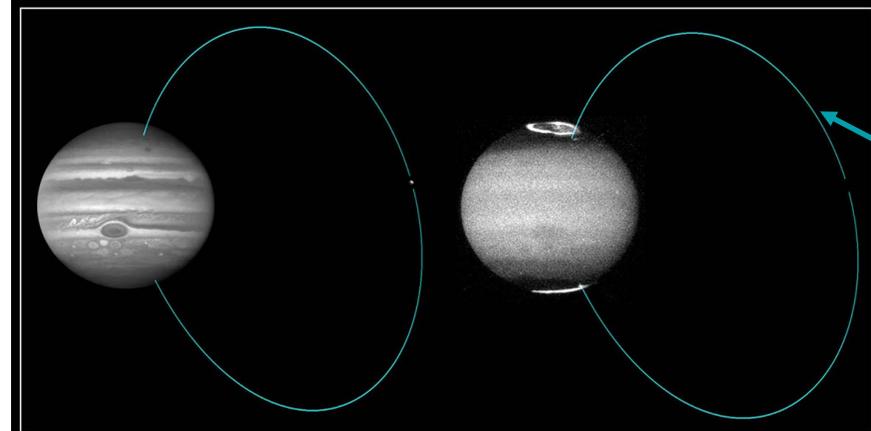
Les électrons accélérés arrivent sur un **ovale auroral** entourant le pôle

Lignes de champ magnétique terrestre

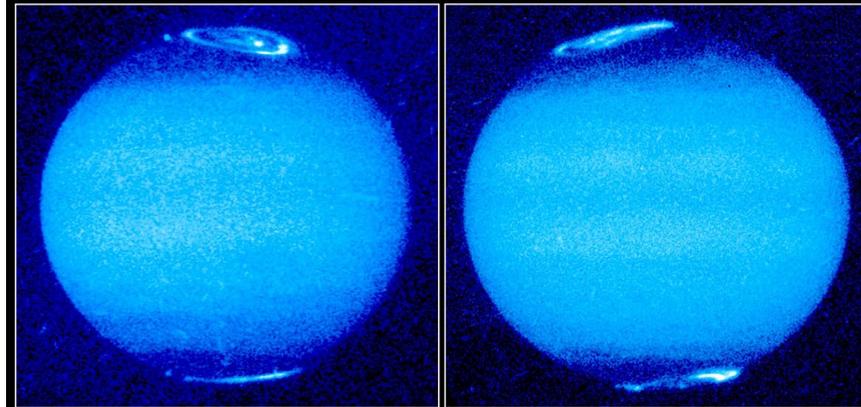
Aurores terrestres



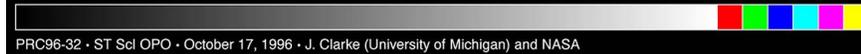
... et sur les autres planètes



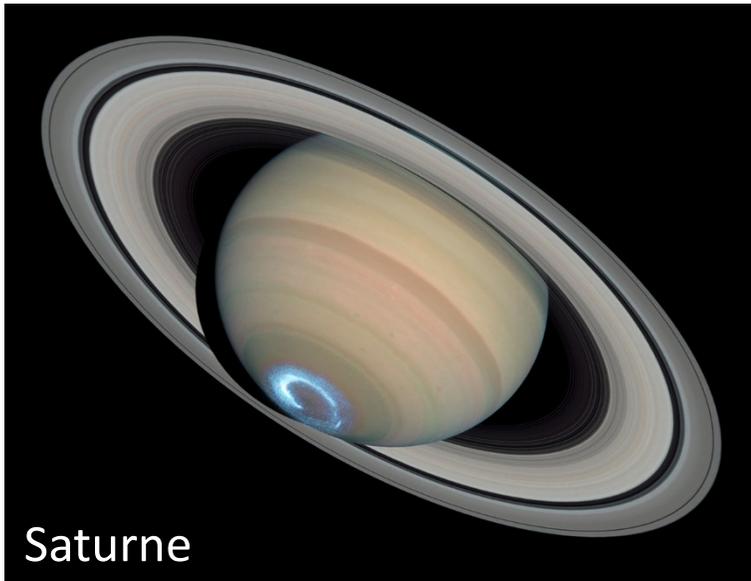
ligne de champ magnétique



Jupiter Aurora
Hubble Space Telescope · WFPC2



PRC96-32 · ST ScI OPO · October 17, 1996 · J. Clarke (University of Michigan) and NASA



Saturne

Aurore polaire



N. Meyer-Vernet 14/12/2021 - Stages de 3ème à l'Observatoire
(LESIA/Meudon)

Qu'est-ce qui détermine la couleur des aurores ?

Violet : excitation de l'Hydrogène et l'Hélium
(encore plus haut)

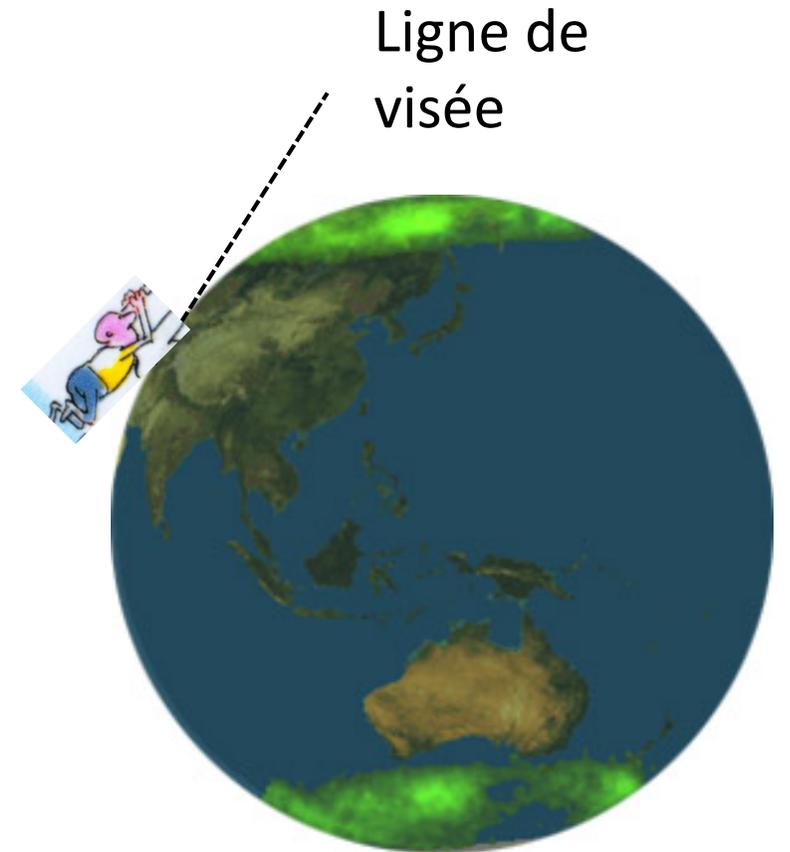
Rouge :
excitation de l'oxygène atomique
en haute altitude (300 km)



Bleu ou vert :
Excitation des
molécules d'azote et
d'oxygène (bas dans
l'atmosphère)

Qu'est-ce qui détermine la couleur des aurores ?

Loin des pôles, on est loin des régions aurorales donc la ligne de visée passe haut dans l'atmosphère



Donc les aurores sont rouges (ou violettes, c.f. aurore dans le Calvados)

la couleur des aurores

loin des pôles on voit des aurores **rouges** (ou violettes)



Aurores vues de Belgique en 2003

la couleur des aurores



Aurores observées en Grèce (Plutarque – 467 BC, Aristote 384-322 BC) et en Italie (Pline l'ancien, Sénèque) pendant l'antiquité

Shakespeare

Jules César (Acte 2, scène 1)

Calphurnia: *“Fierce **fiery** warriors fight upon the clouds
In ranks and squadrons and right form of war,
Which drizzled blood upon the Capitol”*

« Des guerriers **de feu** se sont battus féroce-
ment sur les nuages, rangés en escadrons, **et leur sang a
goutté sur le Capitole** »

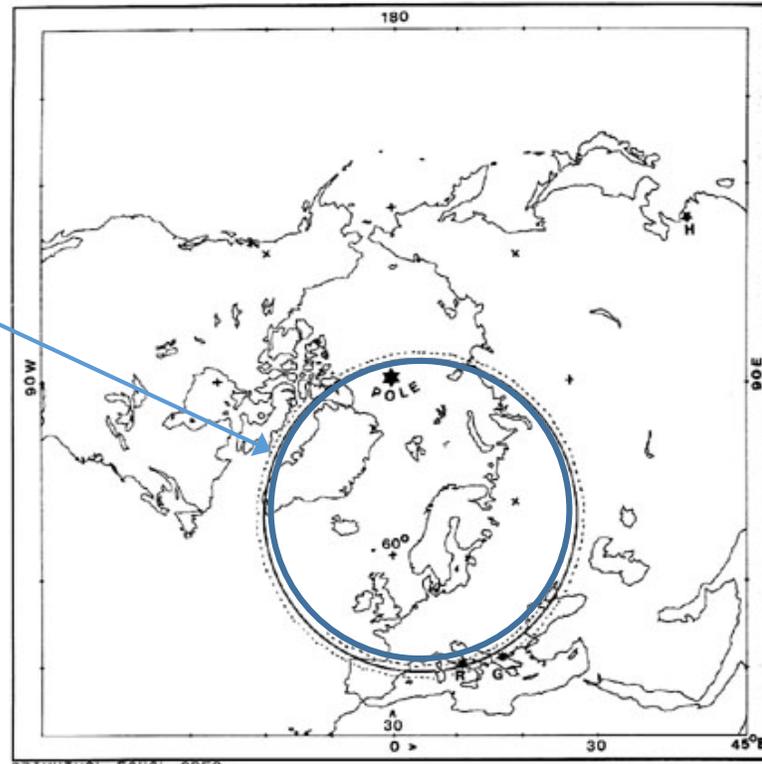
Silverman 1998 Journal of Atmospheric and Solar Terrestrial Physics

Pourquoi tant d'aurores observées loin des pôles dans l'antiquité ?

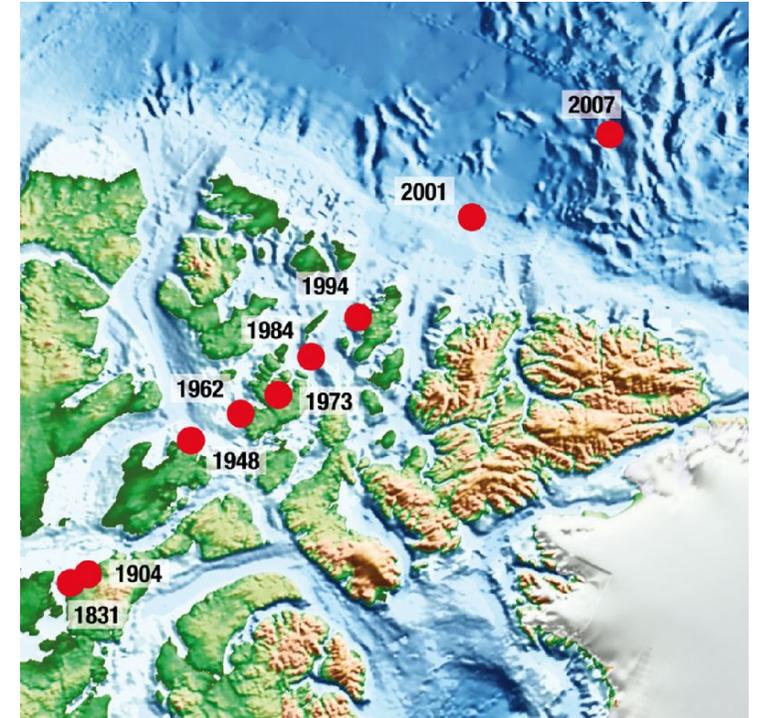
Le champ magnétique terrestre varie : les pôles magnétiques se déplacent

Reconstruction de l'ovale auroral à l'époque d'Aristote

?



Mouvement du pôle magnétique Nord

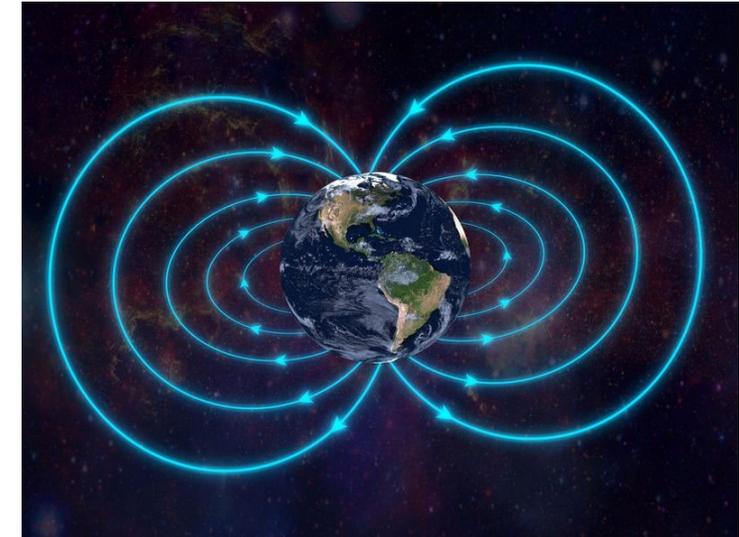


50 km/an

Dans l'antiquité, le pôle magnétique de la Terre était plus proche de la Méditerranée (?)

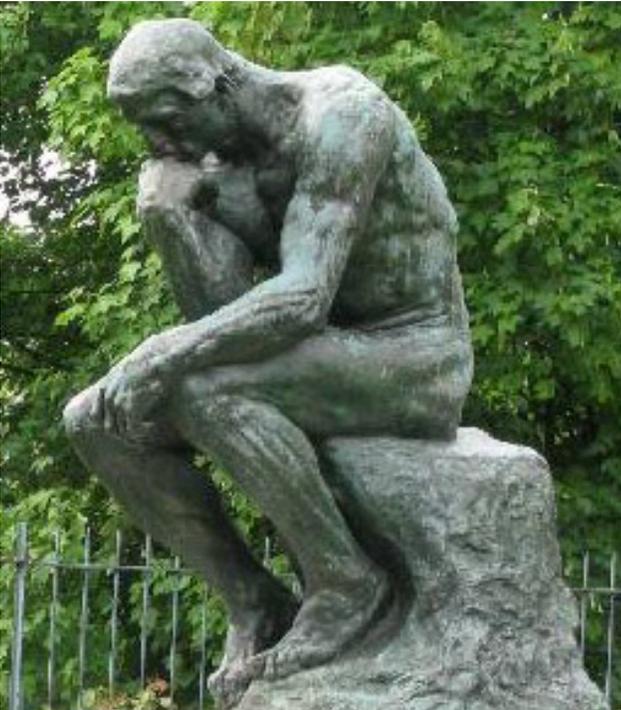
Le champ magnétique terrestre varie : les pôles magnétiques se déplacent

Un renversement du champ aurait des conséquences désastreuses car le champ nous protège du vent solaire et des rayons cosmiques

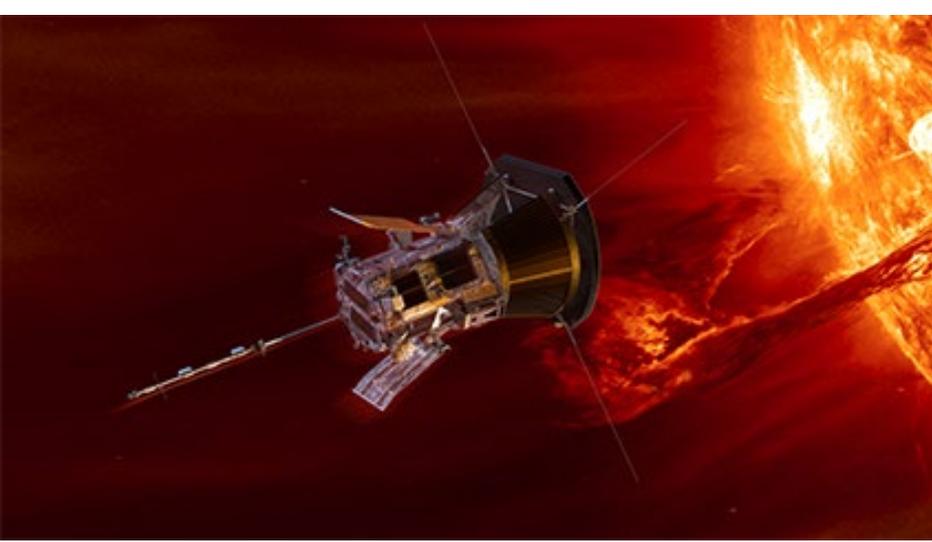


Mais pas d'affolement : le dernier renversement a eu lieu il y a 780.000 ans et si le champ se renverse, cela devrait mettre 20.000 ans

QUESTIONS



- Que sait-on du Soleil ?
- Comment s'échappent ses vents?
- Et ses tempêtes?
- **« Toucher le Soleil » : la mission Parker Solar Probe**



Parker Solar Probe

La mission de tous les records :

- Déjà plus près du Soleil qu'aucune autre sonde

Décembre 2024

- Va s'approcher à 6 millions de km de la surface du Soleil (9 rayons solaires !)
- Vitesse : presque 700.000 km/h !
- Température face au Soleil plus de 1000° C !

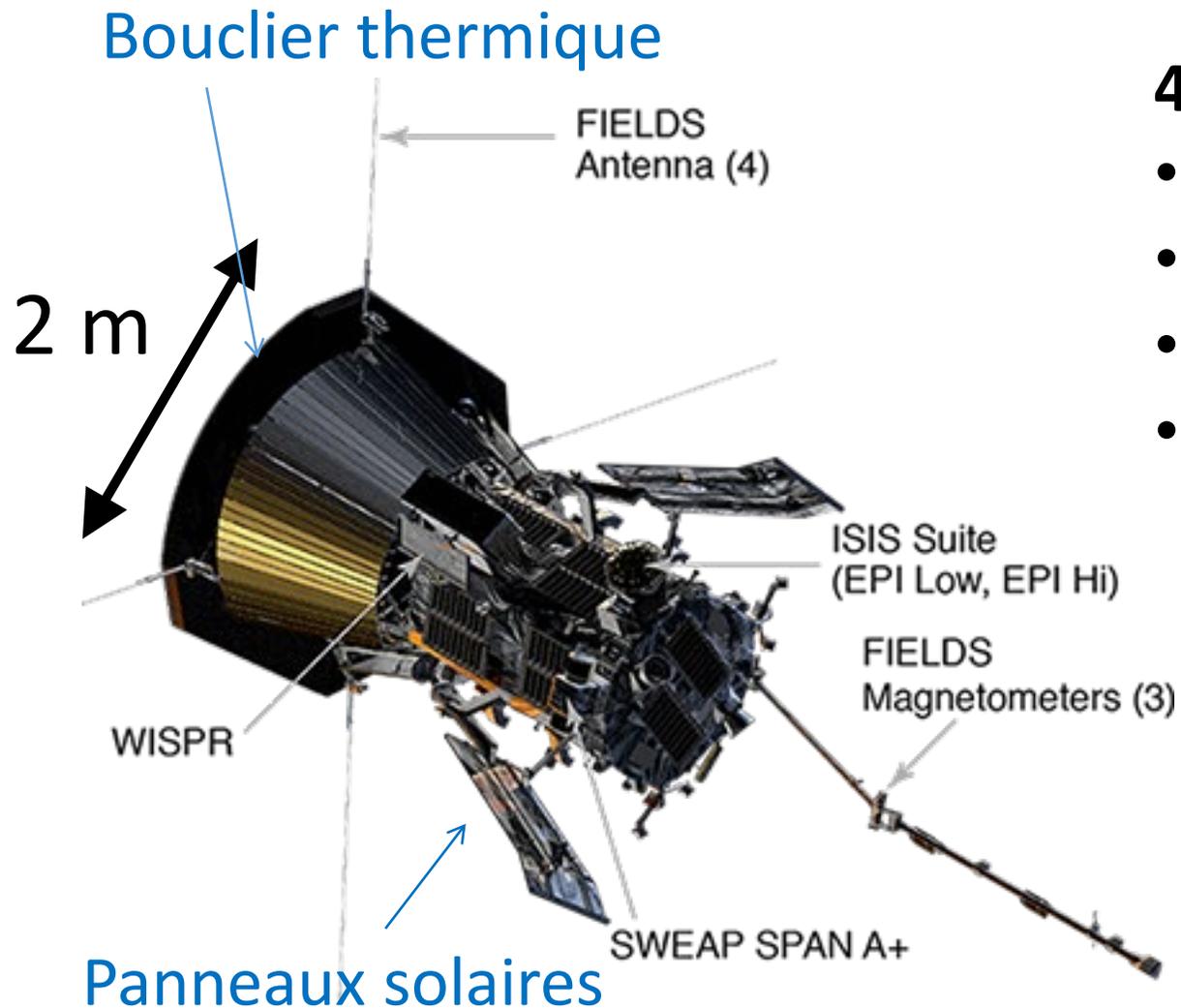
Parker Solar Probe

A $1/20$ ème de la distance Terre-Soleil → flux solaire x 400



Bouclier thermique : 11 cm d'épaisseur , 2 couches de composite de carbone entourant une couche de mousse

Parker Solar Probe



4 instruments scientifiques mesurant :

- Champs électriques et magnétiques
- Plasma
- Particules énergétiques
- Rayonnement

- Masse 685 kg
- dont 50 kg d'instruments scientifiques
- 1,5 milliards de dollars

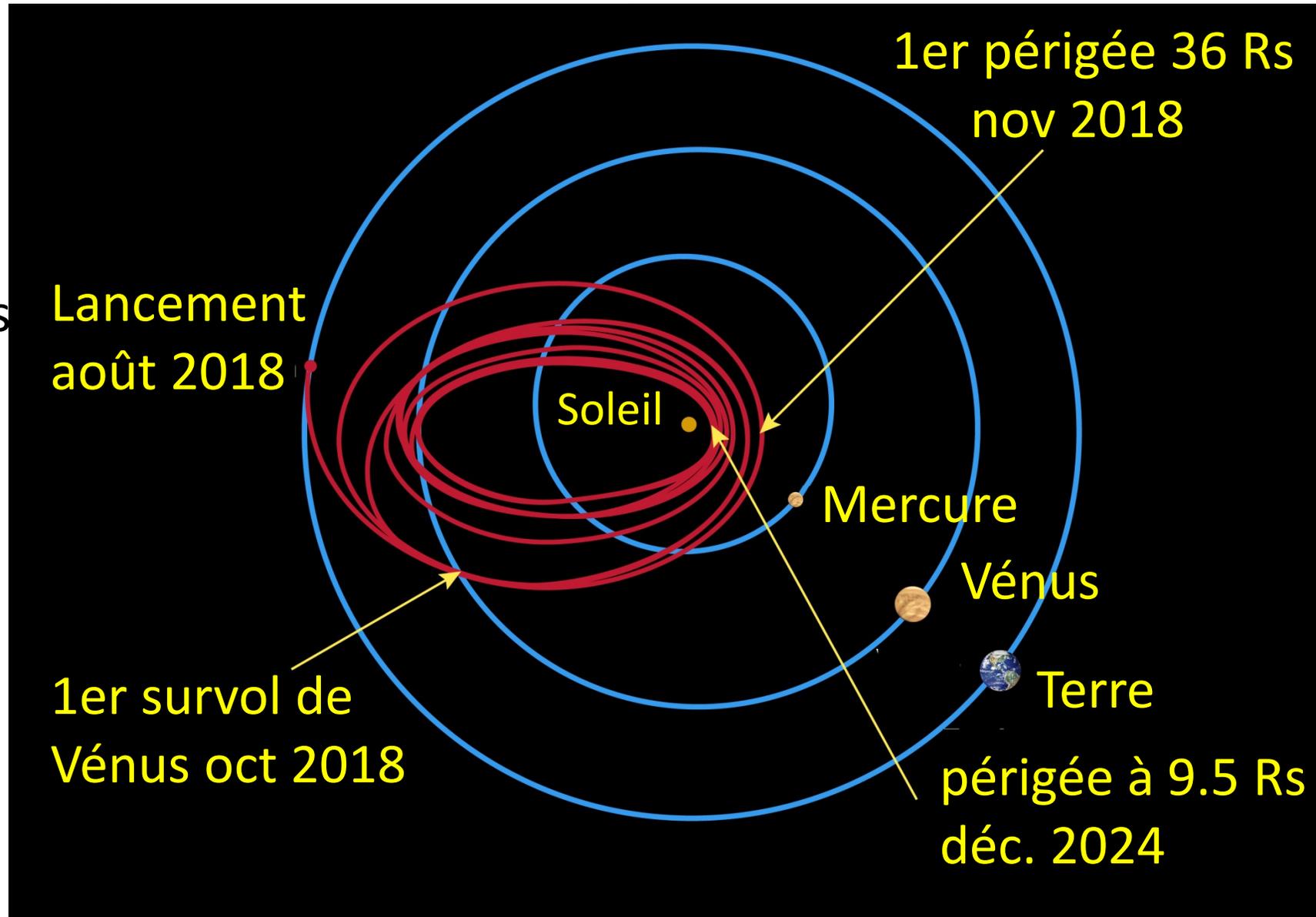


2 CV avec 3 passagers

Trajectoire

Parker Solar Probe

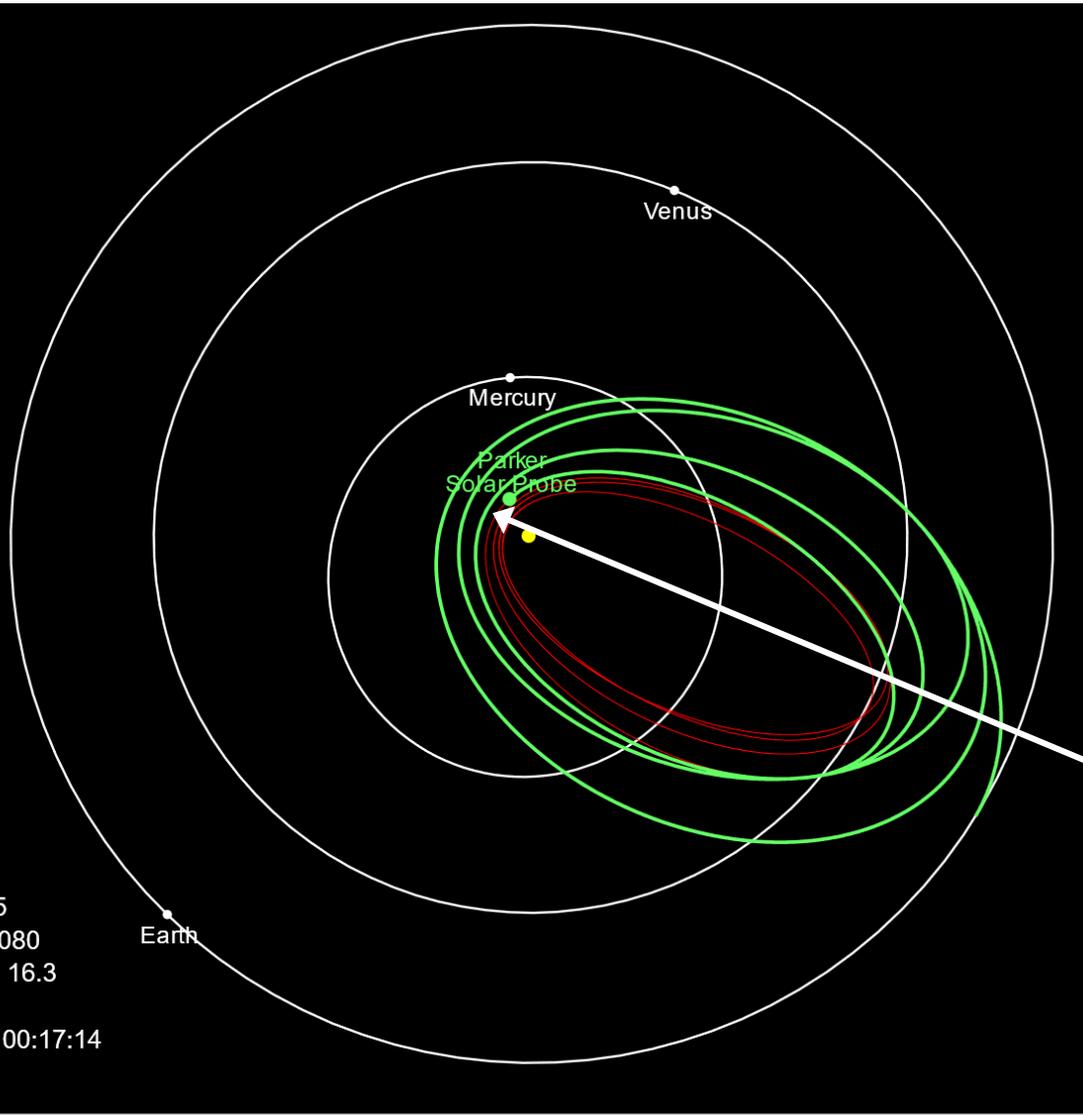
- Tourne autour du Soleil avec des orbites de plus en plus rapprochées
- Grâce à l'assistance gravitationnelle de Vénus



Où est Parker Solar Probe ?

En vert, les orbites déjà parcourues

En rouge, les orbites à parcourir



ici

- **21 novembre 2021**
- **10ème orbite**
- **distance 8,5 millions de km**
- **vitesse 600.000 km/h**
- **bouclier à 700°C**

Heliocentric Velocity (km/s): 141.55
Distance from Sun Center (AU): 0.080
Distance from Sun's Surface (R_S): 16.3
Distance from Earth (AU): 1.036
Round-Trip Light Time (hh:mm:ss): 00:17:14
28 Apr 2021 20:00:00 UTC

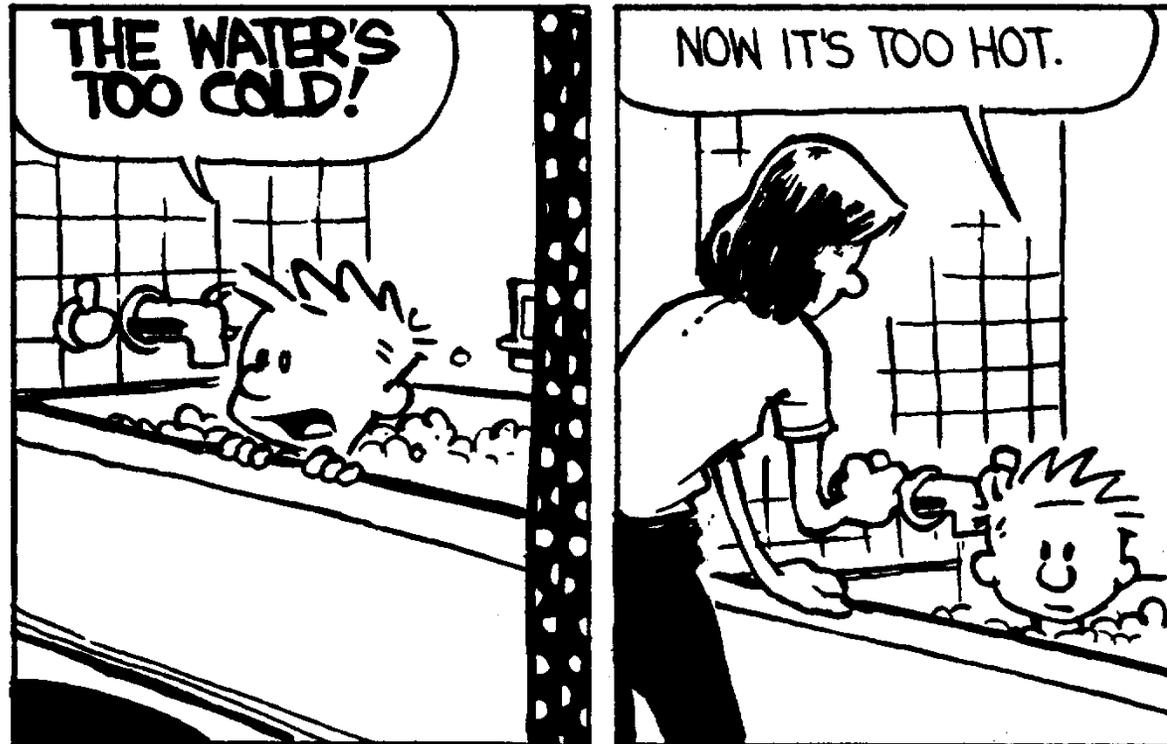
Pourquoi est-ce que la sonde solaire ne brûle pas ?

Puisqu'elle est dans un milieu à 300.000 °

Parce que la chaleur se transmet de plusieurs façons

- par conduction
- par rayonnement

Transmission de chaleur par conduction



La chaleur se transmet par l'intermédiaire des chocs des particules du milieu

Transmission de chaleur par rayonnement



La transmission de chaleur se fait par l'intermédiaire des photons envoyés par l'objet chaud

Pourquoi est-ce que la sonde solaire ne brûle pas ?

Puisqu'elle est dans un milieu à 300.000°

- La conduction n'est pas efficace car le milieu est très peu dense : 1000 particules par cm^3
- Alors que dans l'air: $2 \cdot 10^{19}$ particules par cm^3
 - On peut mettre la main dans un four à 100°
 - Mais on se brûle si on met la main dans de l'eau à 100° , car dans l'eau il y a 10^{29} particules par cm^3

Pourquoi est-ce que la sonde ne brûle pas ?

La chaleur arrive par le rayonnement du soleil

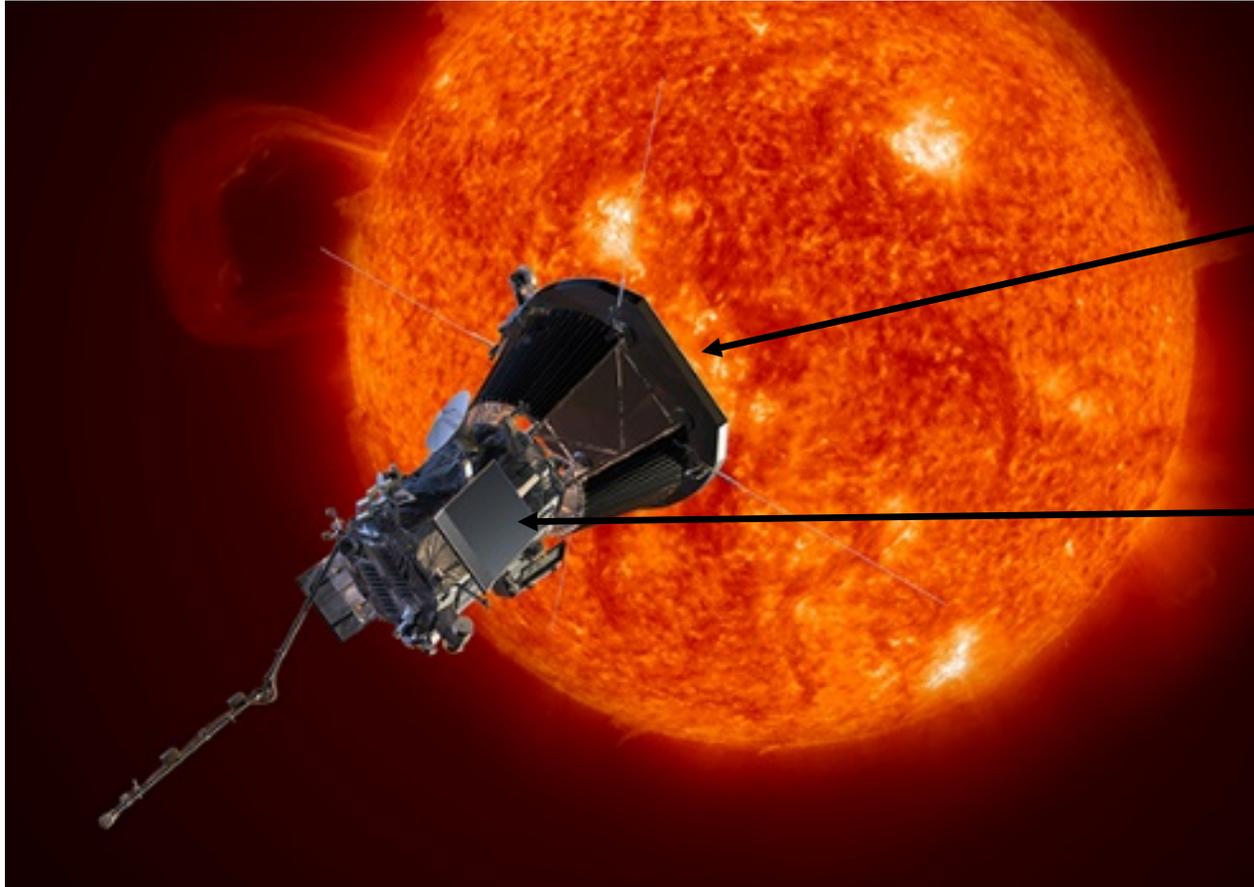
Si la sonde est 20 fois plus près du soleil de la Terre

Elle reçoit 400 fois plus de rayonnement par m^2 de surface

C'est pourquoi elle est protégée par un bouclier thermique très sophistiqué



Parker Solar Probe



Au plus près :

Face au soleil, la température du bouclier sera 1300°

Les instruments derrière seront à 30°