

Missions spatiales dans l'héliosphère et capteurs de mesures *in-situ*



Laboratoire de Physique des Plasmas

Dominique Fontaine

Laboratoire de Physique des Plasmas
École Polytechnique, France
dominique.fontaine@lpp.polytechnique.fr

dominique.fontaine@lpp.polytechnique.fr

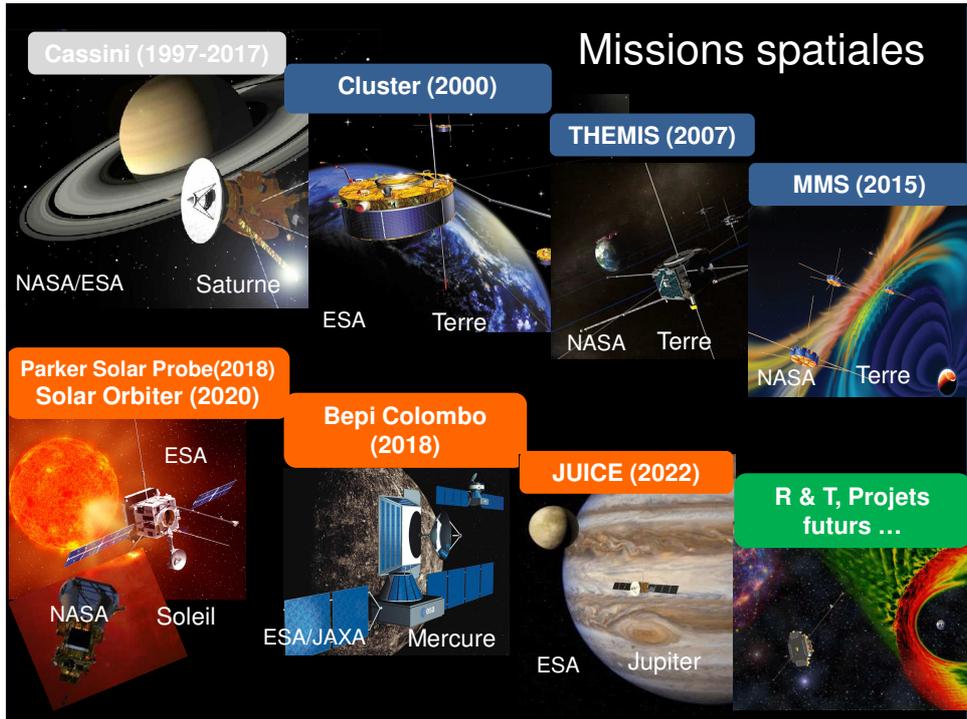


Le LPP s'intéresse aux plasmas (particules chargées) dans
l'héliosphère: - environnements des planètes et du Soleil,
 - milieu interplanétaire,...



Mesures *in-situ* des particules chargées et des
champs électromagnétiques à bord de satellites





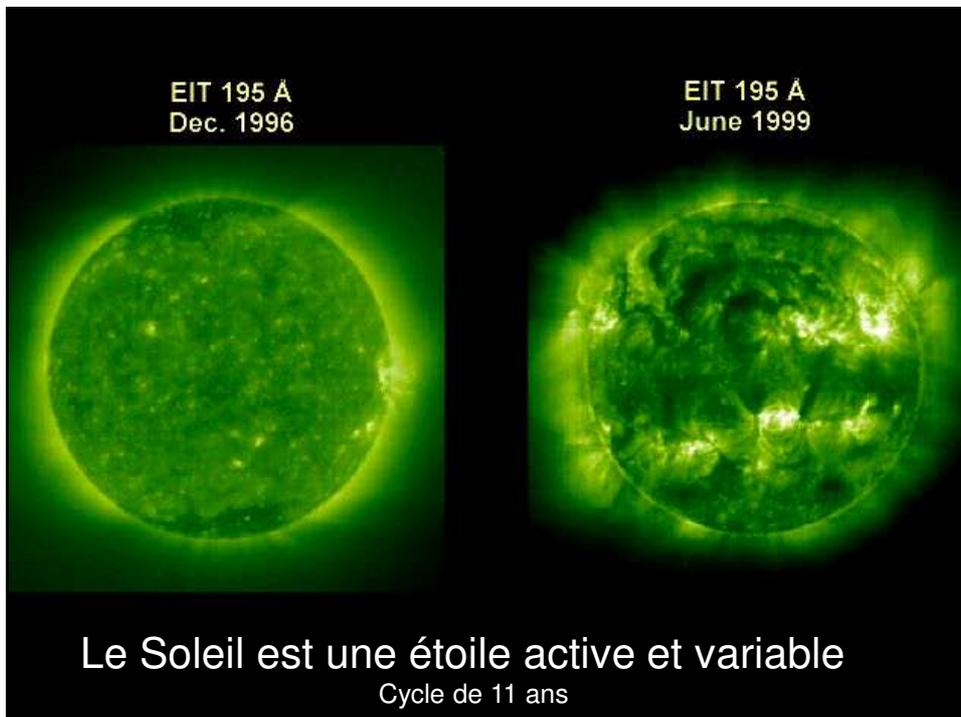
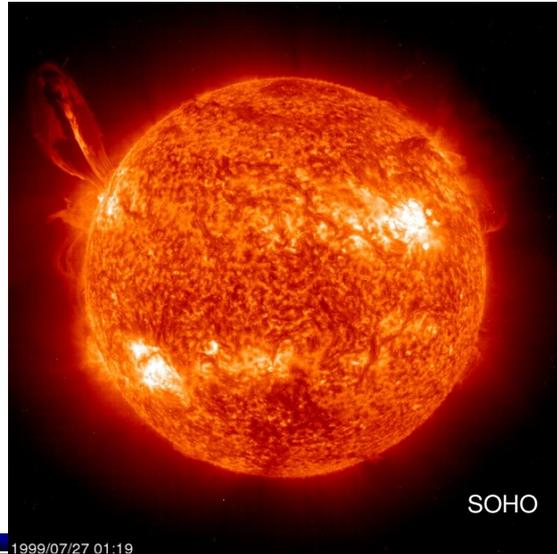
Au centre de l'héliosphère: le Soleil

Le Soleil émet en permanence :

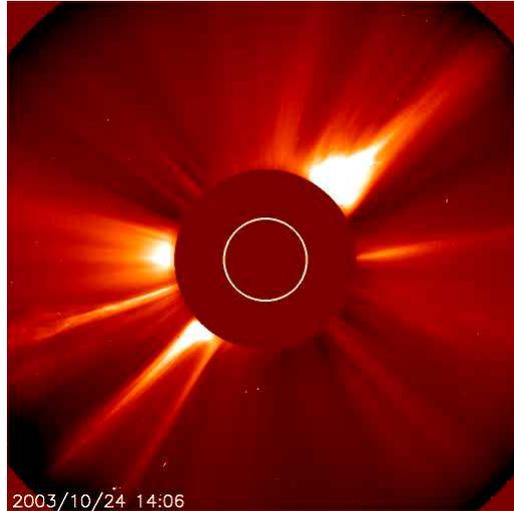
- des rayonnements : **UV, EUV, X, ...**
- des particules : **Vent Solaire**

Vent solaire:

- électrons, ions,
(densité : qq part./cm³)
- température:
(100 000 K)
- vitesse supersonique !
(400 km/s)



Propagation du vent solaire dans le système solaire

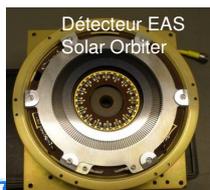
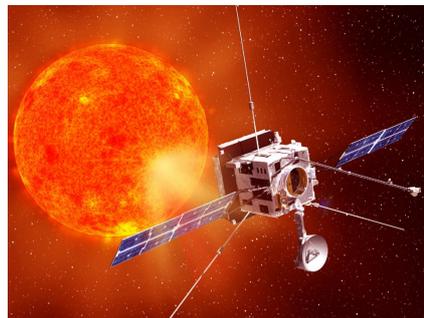


Missions Solar Orbiter (ESA) 2020 et Parker Solar Probe (NASA) 2018

Etudes des événements solaires
et de l'activité solaire

A partir d'observations:

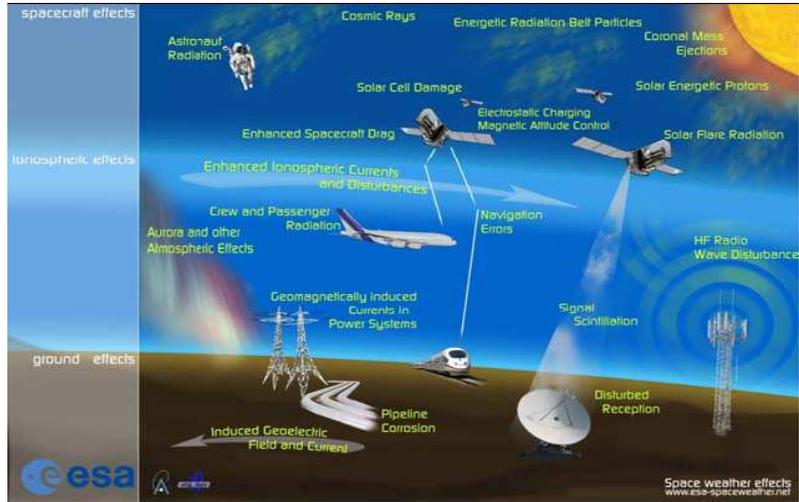
- de la surface du Soleil par *remote sensing*
- *in-situ* après propagation dans le milieu interplanétaire



Pour Solar Orbiter, le LPP construit des instruments in-situ:
- il réalise un analyseur de signaux électromagnétiques
- il fournit le détecteur pour un analyseur d'électrons



Impact des événements solaires sur Terre Météorologie de l'espace

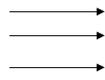


Les environnements planétaires

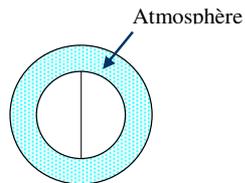


Impact des rayonnements et vents solaires sur :
→ un objet pourvu d'une atmosphère

Rayonnement solaire UV, EUV, X, ...

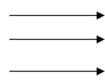


vent solaire supersonique

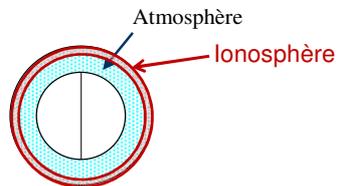


Impact des rayonnements et vents solaires sur :
→ un objet pourvu d'une atmosphère

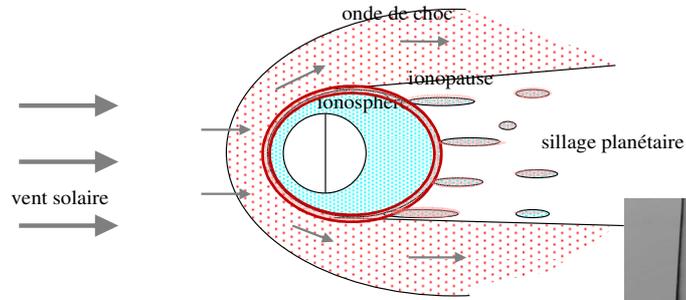
Rayonnement solaire UV, EUV, X, ...



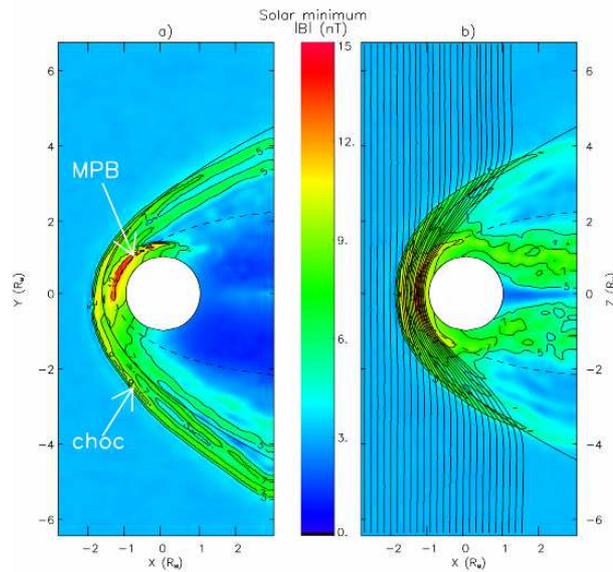
vent solaire supersonique



Cas de Mars, Vénus, comètes :



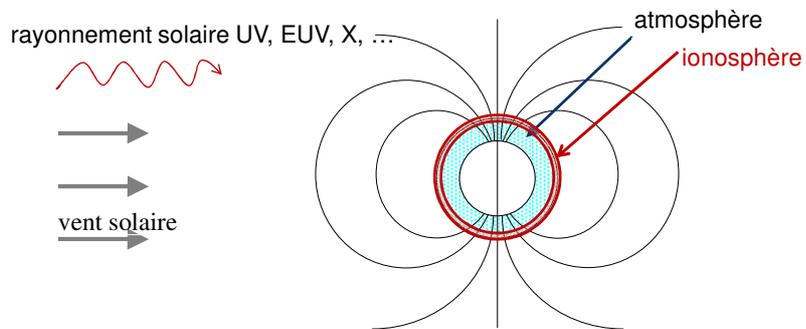
Simulation de l'interaction vent solaire/Mars (R. Modolo, thèse, 2004)



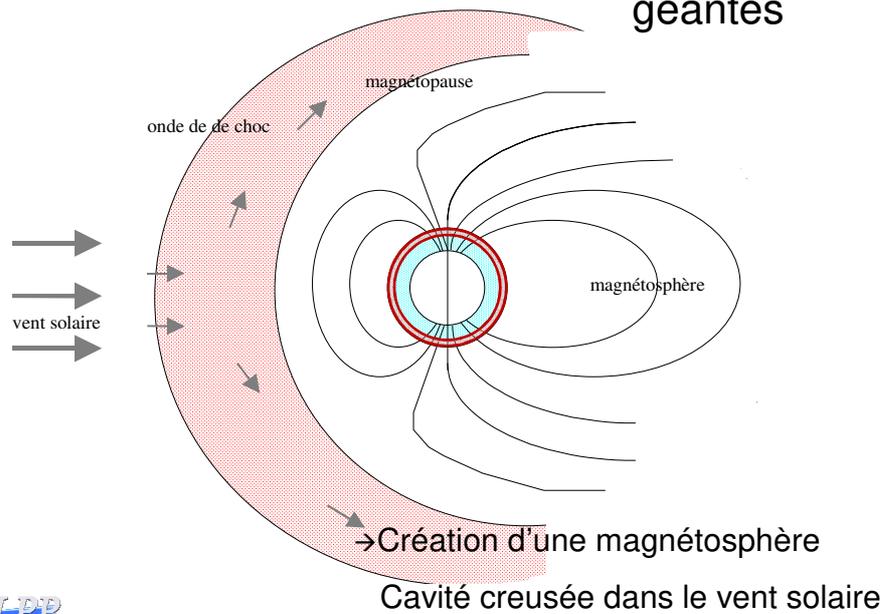
Distribution de $|B|$

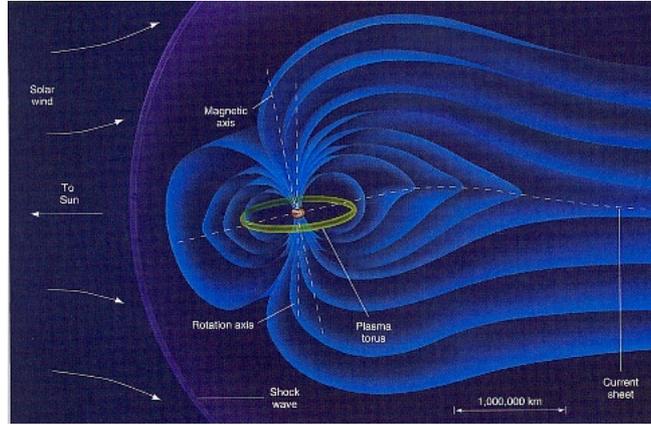


Impact sur un objet qui possède aussi un champ magnétique ?



Exemple de planète magnétisée: Terre, planètes géantes



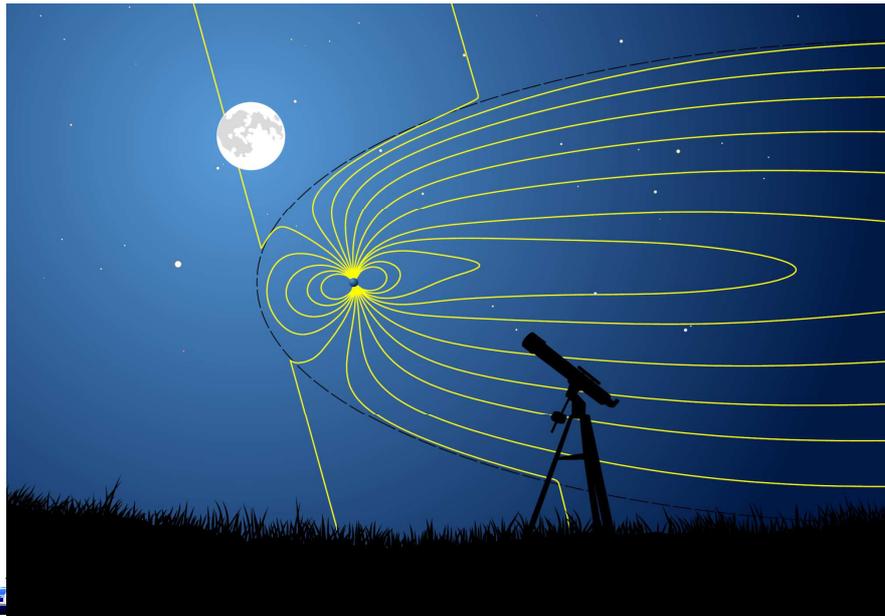


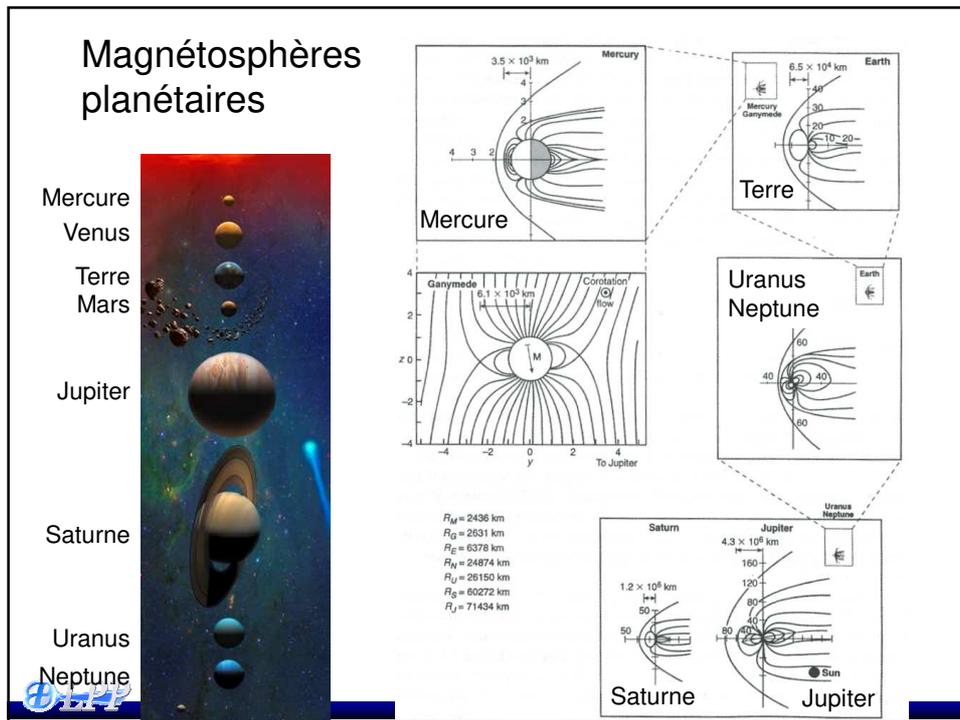
la magnétosphère de Jupiter



Magnétosphère de Jupiter

Le plus gros objet du système solaire: B (Jupiter) $\sim 14 \times B$ (Terre)



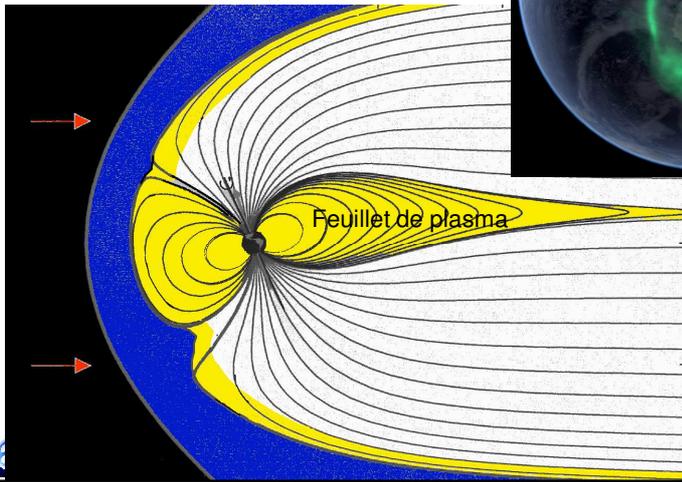
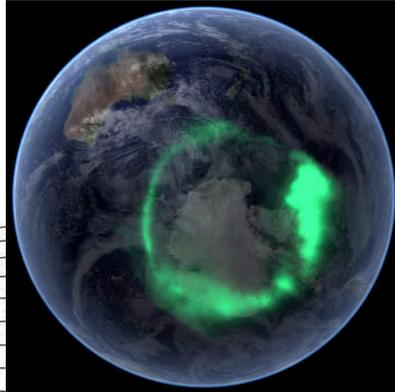


3 environnements emblématiques:

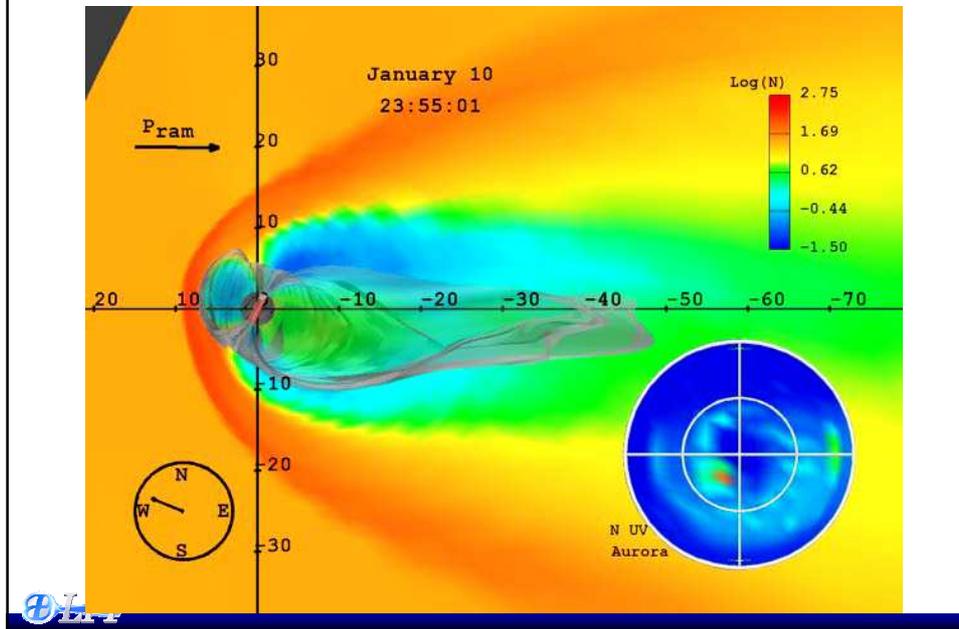
- **Terre**
(seule planète habitée)
- **Jupiter**
(la plus grosse planète du système solaire)
- **Mercure**
(la plus petite planète du système solaire)

1. Environnement de la Terre

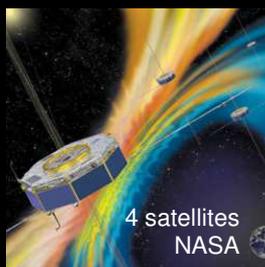
- La magnétosphère n'est pas vide:
- feuillet de plasma: couche de courant
 - aurores boréales et australes



L'environnement planétaire réagit aux fluctuations du milieu interplanétaire



Mission Magnetospheric Multi Scale (MMS)



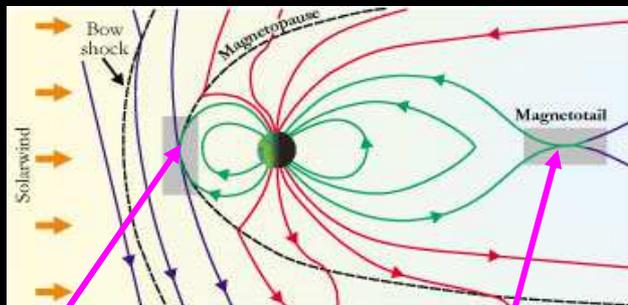
4 satellites NASA

Lancée en 2015

LPP: magnétomètre de type « fluxmètre »

Processus de petite échelle avec des conséquences macroscopiques:

- reconnexion magnétique
- turbulence



Echange de particules
Vent Solaire / Magnetosphère

Activité
exposive

2. Environnement de Jupiter

« La magnétosphère des superlatifs »

La plus grosse planète du système solaire

Rotation très rapide (~10 h)

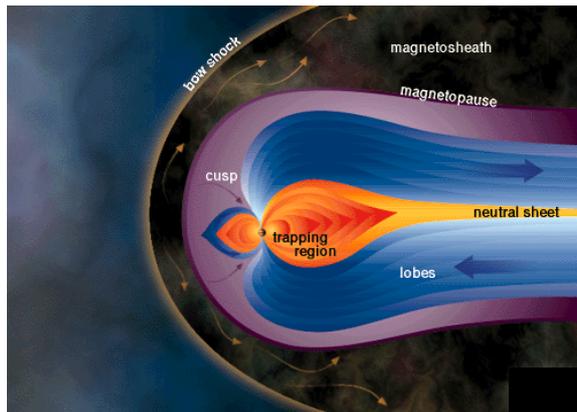
Nombreuses lunes

Le plus fort champ magnétique

Les radiations les plus intenses

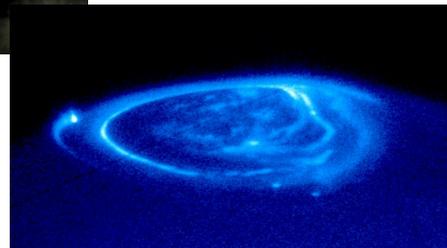


La plus grosse magnétosphère du système solaire



Centrifugation des particules dans le plan équatorial (rotation rapide)

Aurores polaires vues par le télescope Hubble

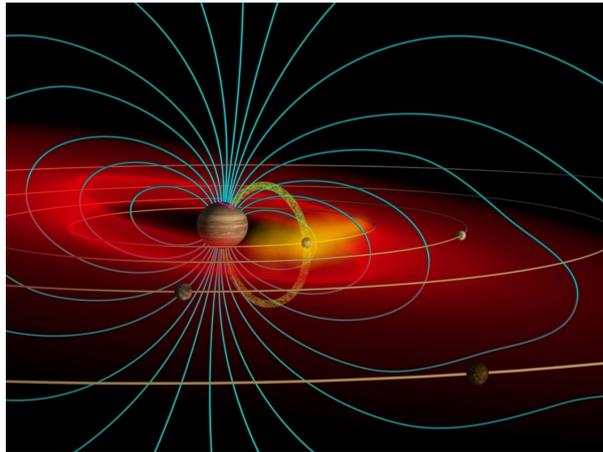


Rôle des Lunes :



Volcanisme de IO: 1 tonne / s
principalement du dioxyde de soufre

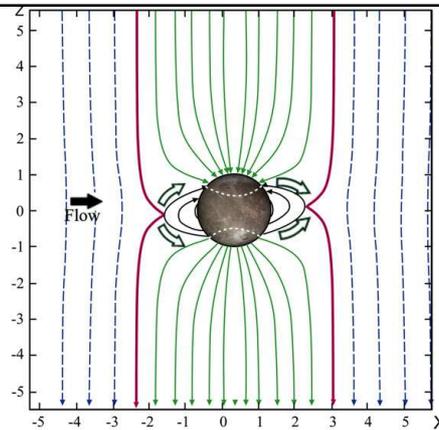
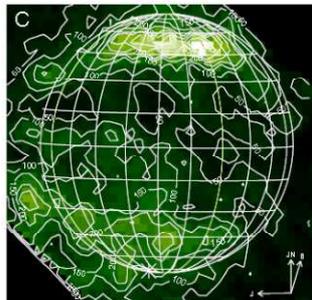
Magnétosphère d'ions issus
de IO:
 S^+ , S^{++} , S^{+++} , O^+ , O^{++} , ...



Ganymède

Seule lune dans le système solaire
à posséder un champ magnétique:

→ mini-magnétosphère dans la grosse
magnétosphère de Jupiter



Emissions aurorales près des
pôles identifiées par le télescope
Hubble



Mission JUICE (ESA) (JUperiter Icy moons Explorer)

Lancement prévu pour 2022, arrivée 2030

Questions:

- Jupiter: Atmosphère ?
- Fonctionnement du système jovien ?
- Interactions Jupiter – magnétosphère - Lunes ?
- Lunes: Ganymède, Europa, Callisto
Détection d'un océan sous la couche de glace : habitabilité ?



Le LPP fournit un magnétomètre
« fluxmètre »



3. Environnement de Mercure

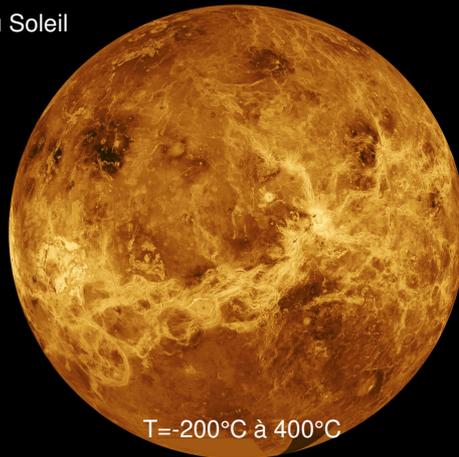
La plus petite planète et la plus proche du Soleil

MARINER 10 (NASA) 1973 : 3 survols

- faible champ magnétique
- exosphère (atmosphère très ténue)

MESSENGER (NASA) 2004: 3 survols
+ fin en orbite autour de Mercure

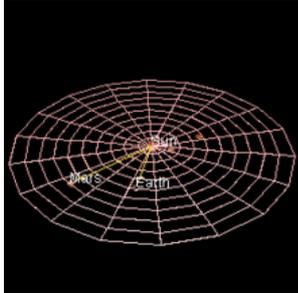
- cartographie de la surface
- cartographie du champ de gravité
- fortes concentrations au sol de sodium, soufre, chlore, ...



BepiColombo MPO (ESA) & MMO (JAXA) octobre 2018:
arrivée 2025: orbites autour Mercure



Rotation de Mercure autour du Soleil



Pour Mercure:

1 révolution autour du soleil = 1 année(M) = 88 jours(T)
→ plus rapide que la Terre

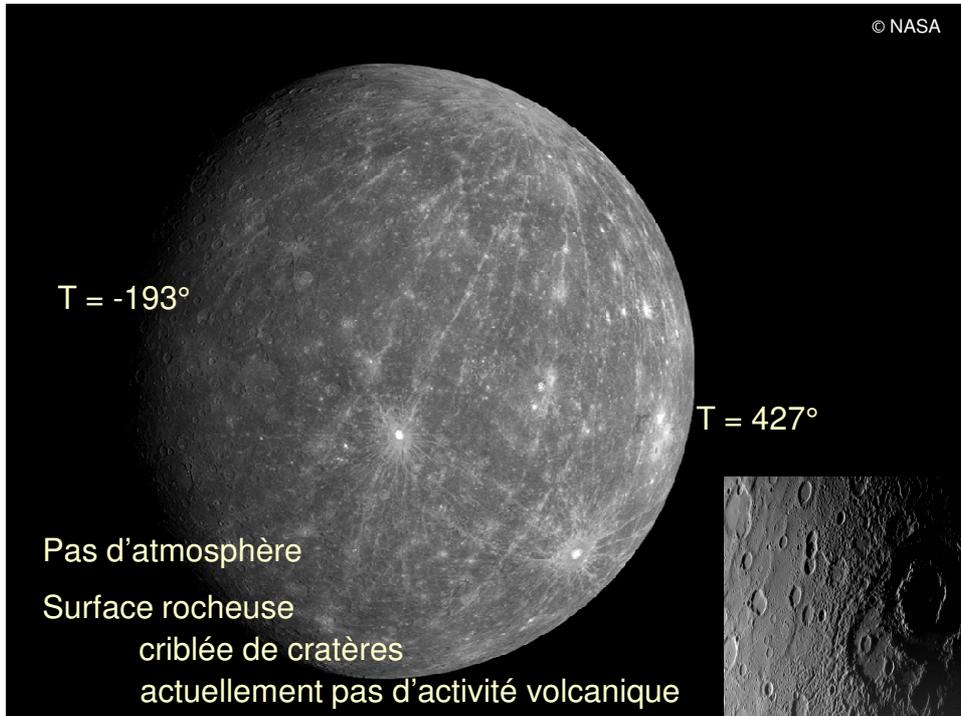
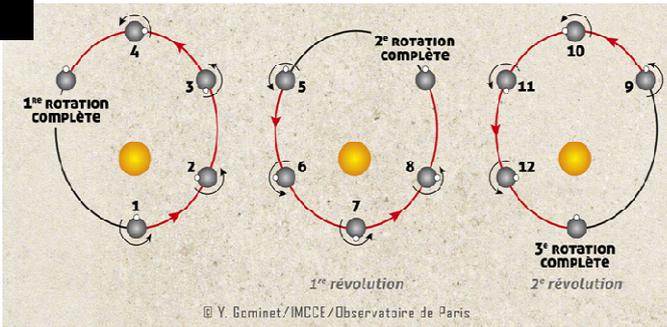
1 rotation sur elle-même = 1 jour(M) = 58 jours(T)
→ plus lente que la Terre

Résultat:

1 année (M) dure
1 jour et demi (M)

**En 2 années(M),
il y a 3 jours (M)**

(BepiColombo)

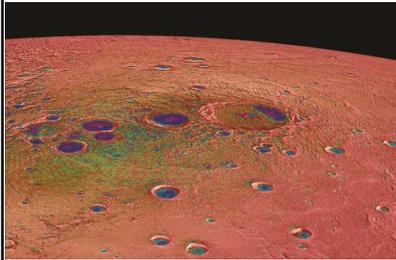
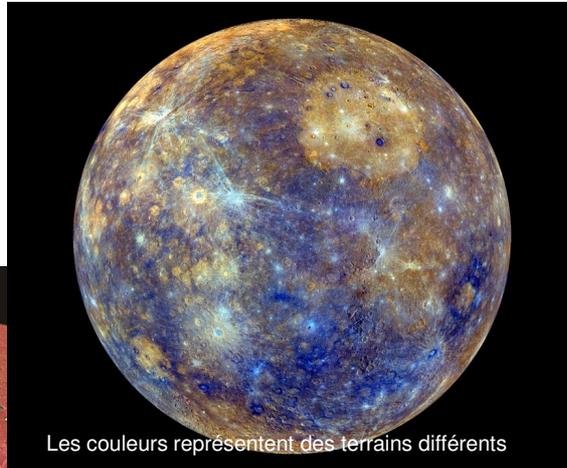


Questions:

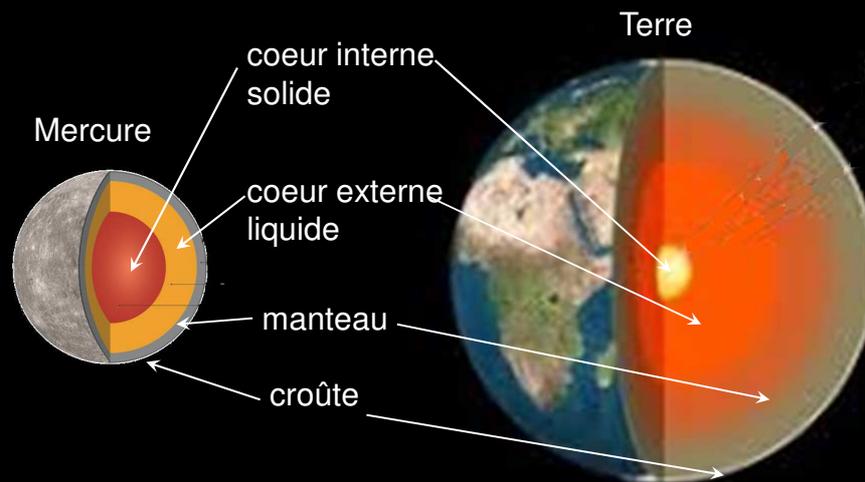
Composition et température ?

Traces plus récentes ?
Evolution de la surface ?

Dépôt au pôle Nord ?
Glace ?
Climats anciens ?

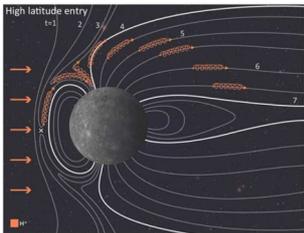


L'intérieur de Mercure



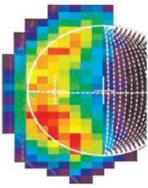
Le cœur devrait être entièrement refroidi.
Pourquoi existe-t-il encore un cœur liquide ?
Conséquence → Formation d'un champ magnétique

L'environnement de Mercure

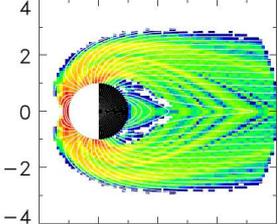


High latitude entry
t=1 2 3 4 5 6 7

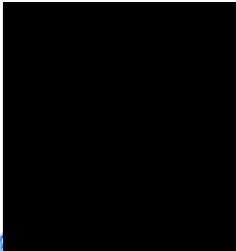
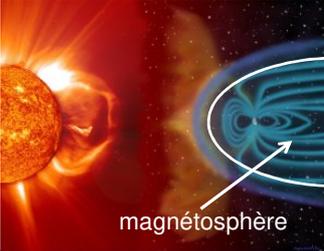
Faible champ magnétique
→ Petite magnétosphère



Emission de particules
de sodium sur la face
éclairée



Cas de la Terre

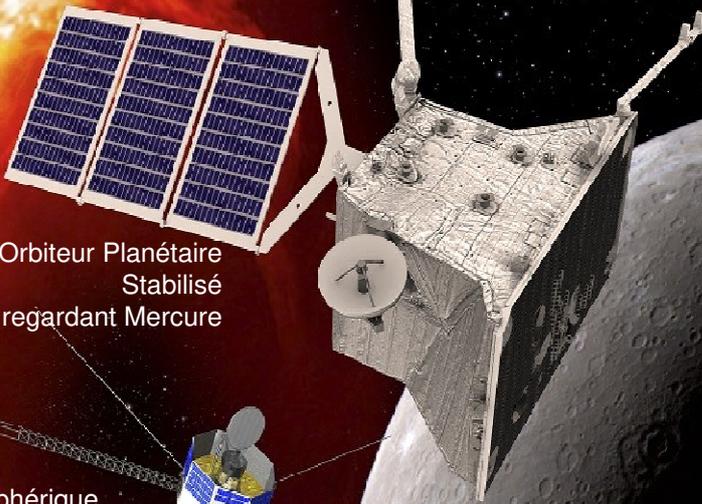
Questions:

Composition ?
(Sodium, Magnésium, Calcium, ...)

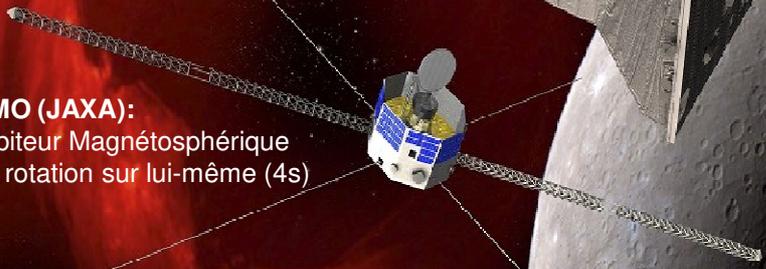
Propagation à
grande distance ?

Mission BepiColombo (2018)

2 sondes



MPO (ESA): Orbiteur Planétaire
Stabilisé
Instruments regardant Mercure



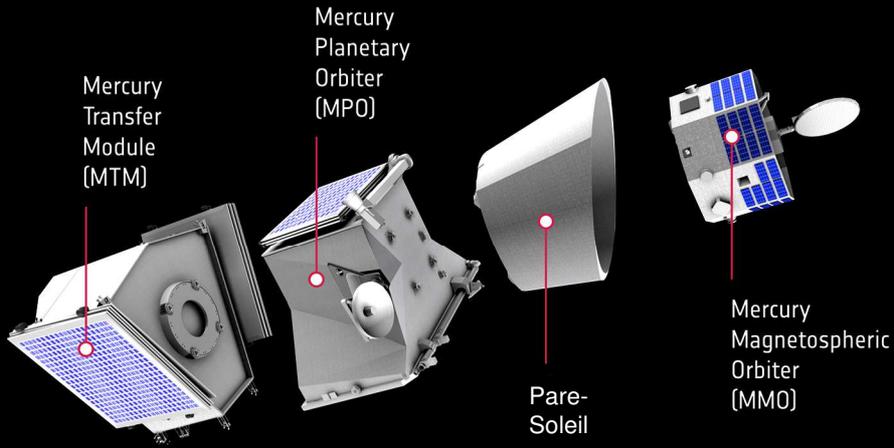
MMO (JAXA):
Orbiteur Magnétosphérique
En rotation sur lui-même (4s)

© ESA

Orbites autour de Mercure
MPO: 480 km x 1 500 km, 2h 20min
MMO: 590 km x 11 640 km, 9h 20min

© ESA

Au décollage, la fusée emporte 4 modules (4,1 tonnes):



The diagram shows four modules of the BepiColombo mission. From left to right: the Mercury Transfer Module (MTM), the Mercury Planetary Orbiter (MPO), the Sun Shield (Pare-Soleil), and the Mercury Magnetospheric Orbiter (MMO). Each module is labeled with a red dot and a line pointing to it.

- Mercury Transfer Module (MTM)
- Mercury Planetary Orbiter (MPO)
- Pare-Soleil
- Mercury Magnetospheric Orbiter (MMO)

Assemblage à l'ESA

Pare-soleil contenant
l'orbiteur magnétosphérique
(MMO)

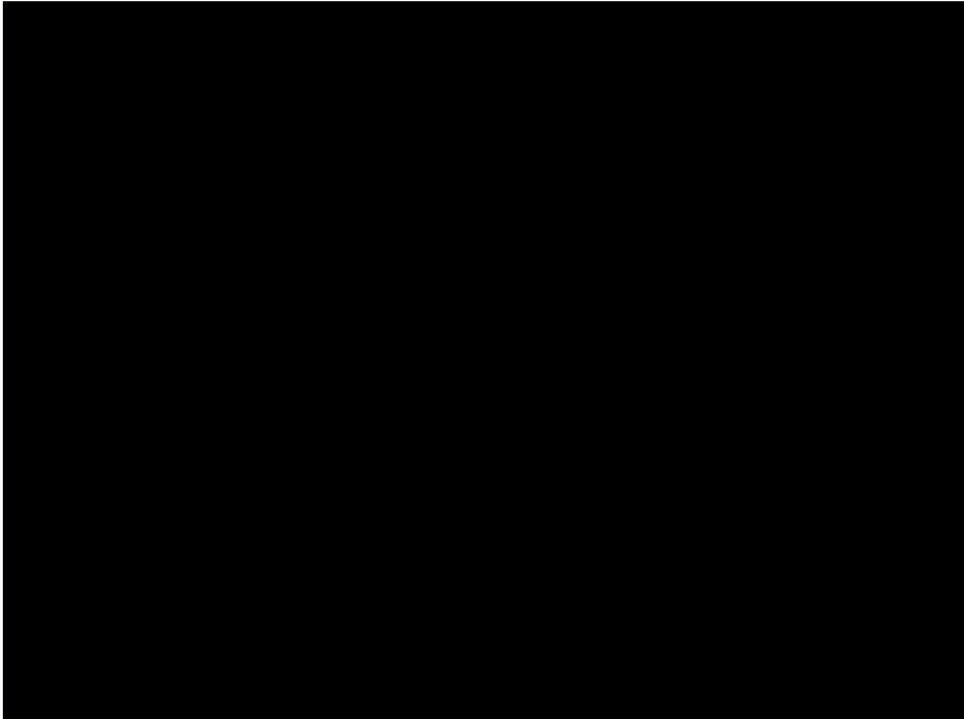
Orbiteur Planétaire
(MPO)

Module de transfert
vers Mercure

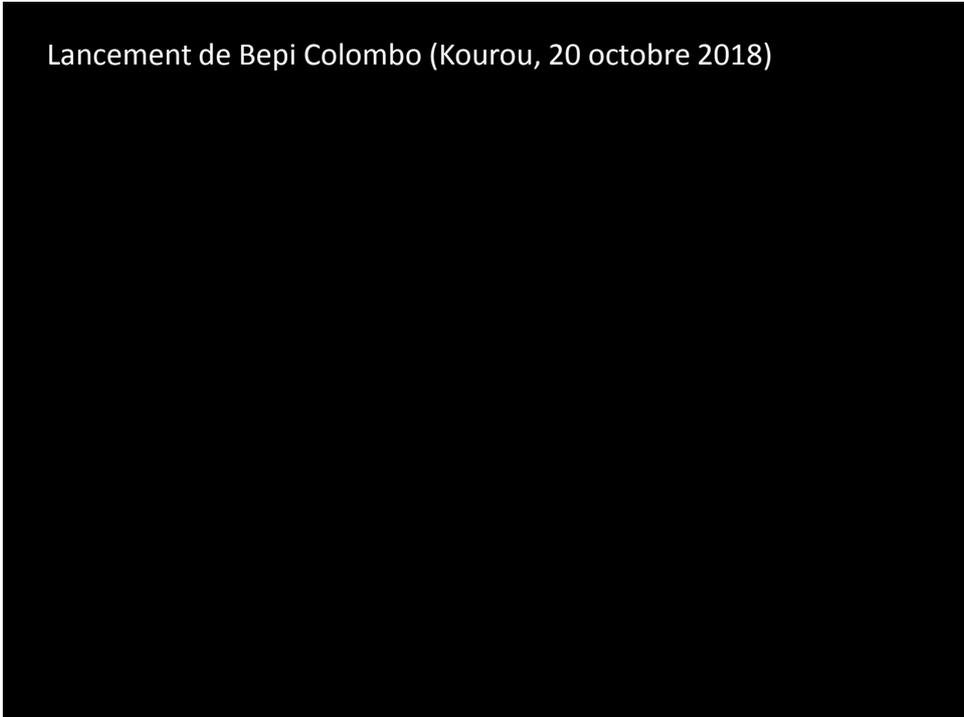


Lancement de Bepi Colombo (Kourou, 20 octobre 2018)





Lancement de Bepi Colombo (Kourou, 20 octobre 2018)

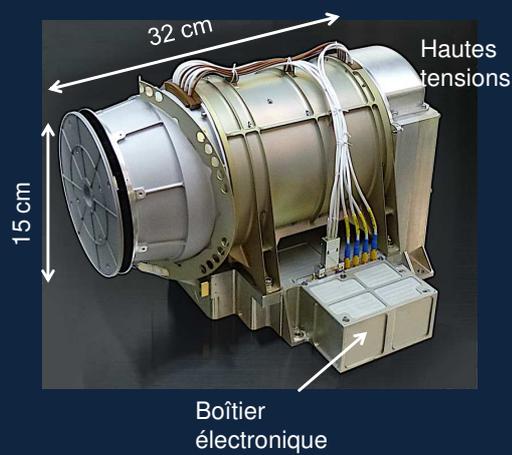


Croisière vers Mercure

Instrumentation au LPP

Spectromètre d'ions :

- Energie: qq eV à 30 keV
- Composition ionique: H+, Na+, Mg+, Ca+, ...



Magnétomètre « fluxmètre »

Instrumentation au LPP

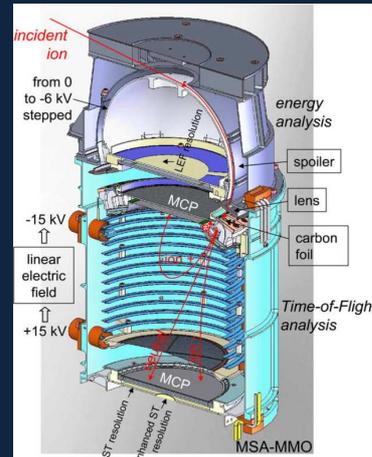
Spectromètre d'ions :
 - Energie: qq eV à 30 keV
 - Composition ionique: H+, Na+, Mg+, Ca+, ...



Spectromètre MSA
 Bepi Colombo

Analyseur
 en énergie

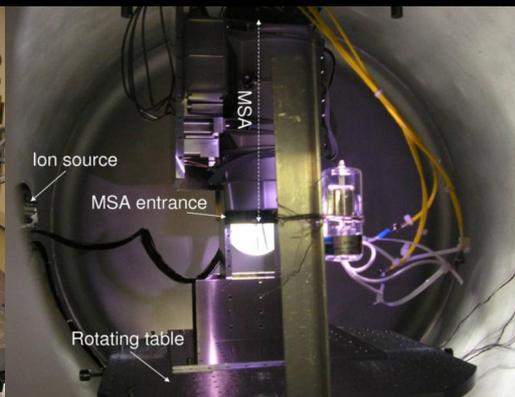
Chambre à temps
 de vol: → espèce



Tests environnements



Table vibrante

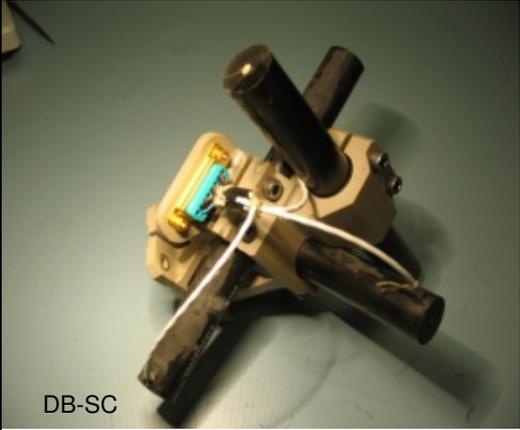


Ion source
 MSA entrance
 Rotating table

Vibrations
 Température
 UV
 Radiations
 Chocs

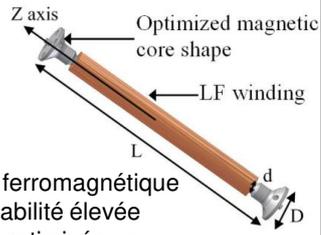


Magnétomètre « fluxmètre » tri-axial



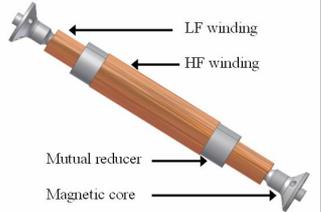
DB-SC

Magnétomètre à double bande
 BF: 100 mHz – 240 kHz
 HF: 10kHz – 640kHz



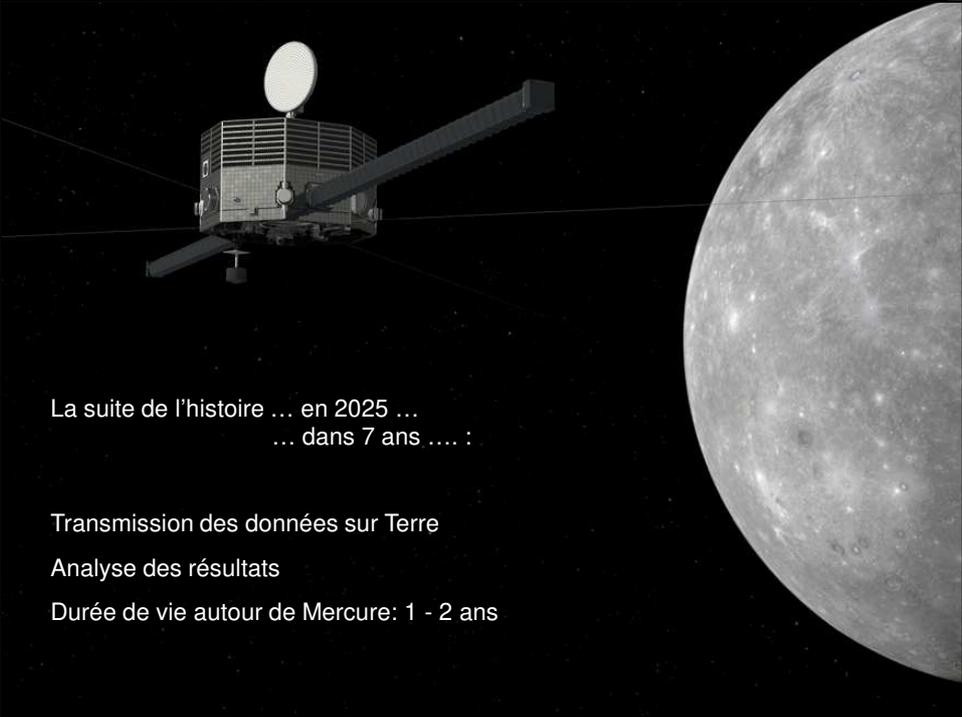
Z axis
 Optimized magnetic core shape
 LF winding
 L
 d
 D

- Noyau ferromagnétique à perméabilité élevée
- Forme optimisée pour maximiser l'amplification du flux
- Bobinage BF de 14000 spires



LF winding
 HF winding
 Mutual reducer
 Magnetic core

- Cylindre de ferrite agissant comme un découpleur magnétique
- Bobinage HF

La suite de l'histoire ... en 2025 ...
 ... dans 7 ans :

Transmission des données sur Terre
 Analyse des résultats
 Durée de vie autour de Mercure: 1 - 2 ans