



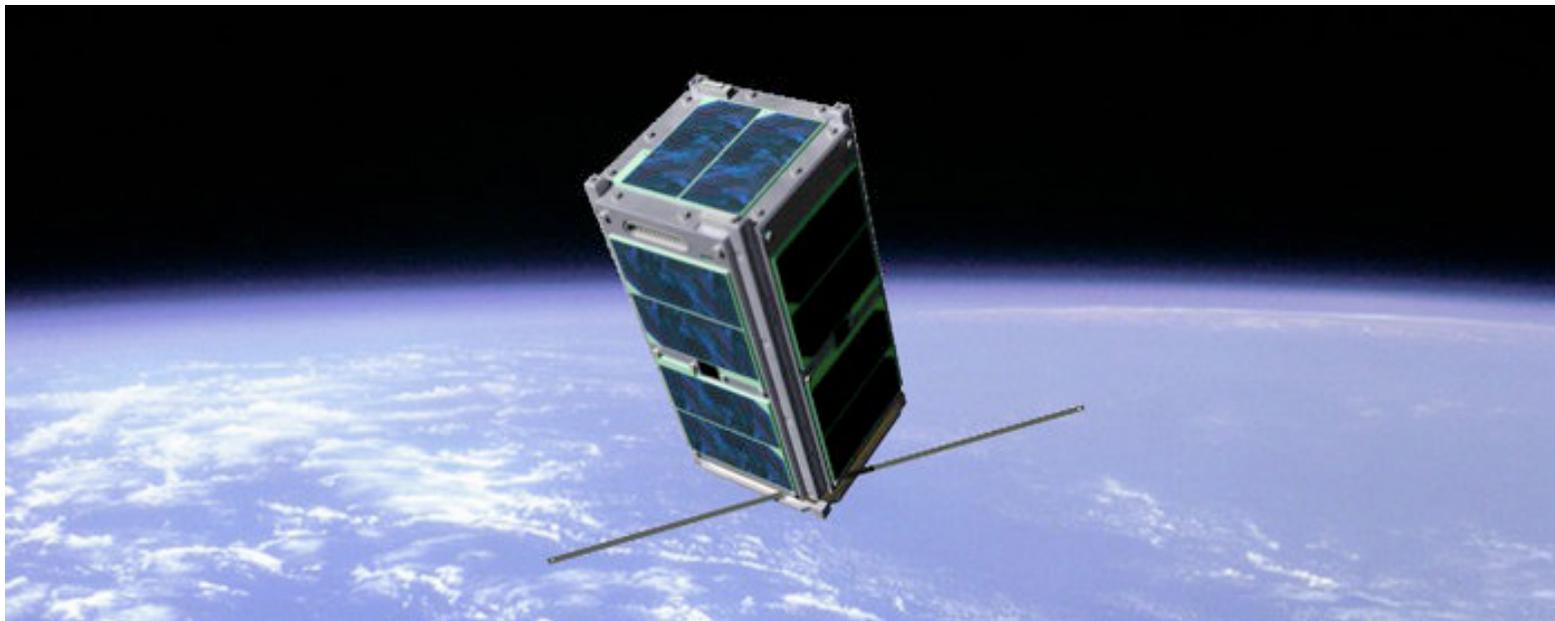
Le projet CIRCUS



Characterization of the **I**onosphere
using a **R**adio receiver on a **CU**be **S**at

Karine ISSAUTIER

LESIA – Observatoire de Paris – PSL – CNRS – Sorbonne Université – Sorbonne Paris Cité





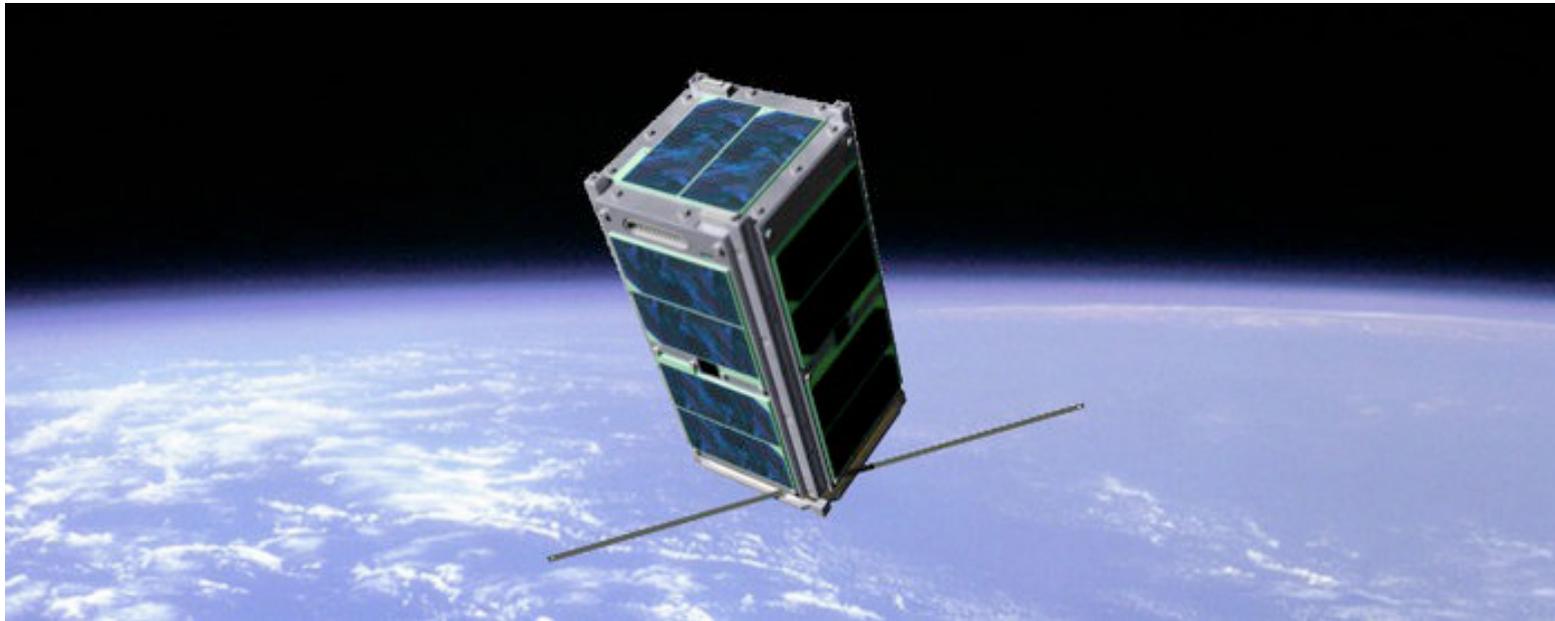
Le projet CIRCUS



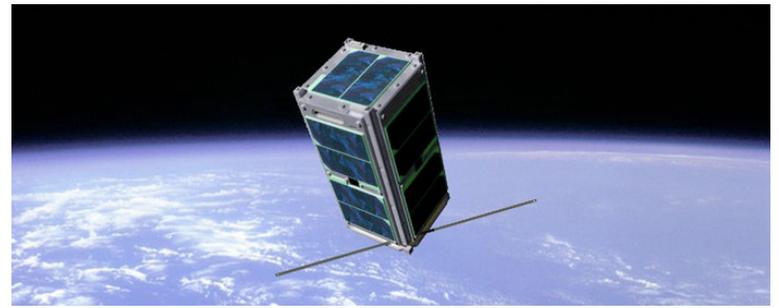
Characterization of the Ionosphere using a Radio receiver on a Cube Sat

Chef de projet: Moustapha Dekkali : Présentation Charge Utile

PI scientifique: Karine Issautier



Double motivation



- Etude de la couche F de l'ionosphère terrestre:

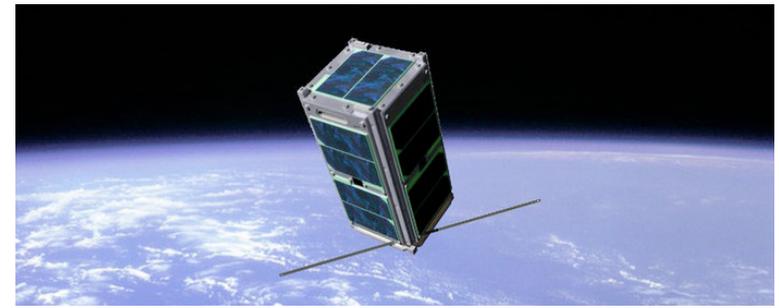
Détermination in-situ des paramètres macroscopiques du plasma avec une méthode robuste pour **des enjeux en météo de l'espace**.

Au départ, dans le cadre d'un projet spatial à vocation pédagogique.

- **Spatialisation d'une R&D** (cf M. Dekkali):

Récepteur radio à dominante **numérique nouvelle génération** pour les futures missions. Eprouver les concepts et technologies destinés aux futurs interféromètres radio basses fréquences.

CIRCUS



- ✓ **Embarquer sur un CubeSat 3U, Premier concept pour démonstrateur nanosat radio:**
 - un récepteur radio numérique
 - Bande fréquence pour CIRCUS: 20 kHz - 20 MHz
 - Et relié à deux antennes filaires (dipôle)
 - Validation d'algorithme de traitement à bord

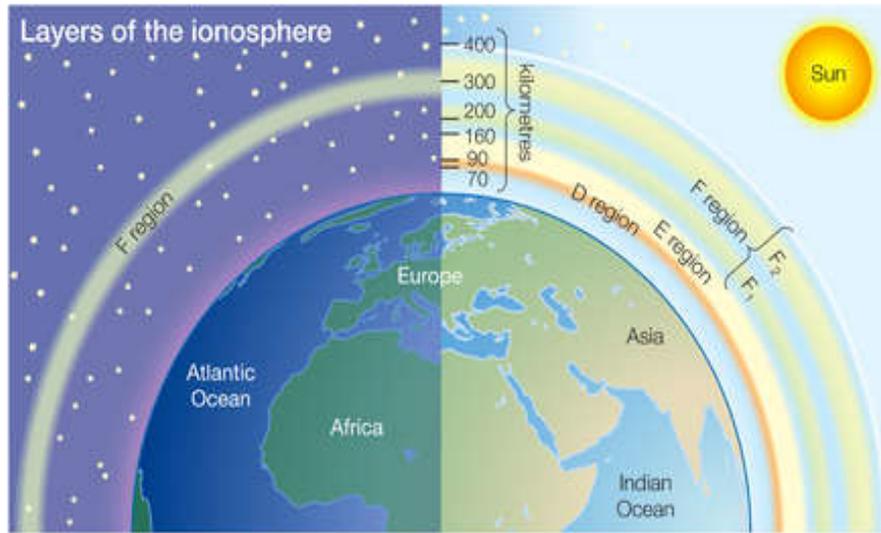
- ✓ **Développement, Construction et Opérations par le LESIA**
 - Héritage des missions passées et en cours (BepiColombo, SO)
 - Chercheurs, ingénieurs, étudiants
 - Participation des étudiants depuis 2013 (Master OSAE, Ecoles d'Ingénieurs, Télécom ParisTech...)
 - Collaborations LPC2E, IMCCE, ONERA

- ✓ **Financement**
 - 2018-2019: R&T CNES pour la charge utile
 - 2015-2018: ESEP/PSL: charge utile, stages, CDD, Tests en cuve PEPSO/Orléans simulant le plasma ionosphérique.
 - Lancement envisagé d'ici 5 ans.

EQUIPE CIRCUS

Nom	Position	Institution	Rôle
Karine Issautier	Directeur de Recherche	LESIA	Responsable scientifique
Moustapha Dekkali	Ingénieur de Recherche	LESIA	Chef de projet CIRCUS et R&D PERLS
Arnaud Zaslavsky	Maître de conférences	LESIA/UPMC	Responsable des études des antennes
Carine Briand	Astronome	LESIA	Scientifique – Responsable ESTERS
Baptiste Cecconi	Astronome adjoint	LESIA	Responsable R&D « récepteur radio »
Yann Hello	Ingénieur de Recherche	LESIA	Chef de projet R&D STAR
Pierre-Luc Astier	Ingénieur d'Etude	LESIA	Développeur électronique
Daniel Dias	Ingénieur de Recherche	LESIA	Développeur électronique
Denis Perret	Ingénieur d'Etude	LESIA	Développeur FPGA
Kamal Boughedada	Ingénieur d'Etude	LESIA	Développeur logiciel
Vincent Lapeyrere	Ingénieur de Recherche	LESIA	Chef de projet PICSAT
Lester David	Ingénieur d'Etude	LESIA	Ingénieur système PICSAT
Réda Mohellebi	Ingénieur de Recherche	ESEP	Développeur ASIC STAR
Nicolas Rambaux	Maître de conférences UPMC	IMCCE/UPMC	Responsable campus spatial UPMC
Dimitri Galayko	Maître de conférences UPMC	LIP6/UPMC	Responsable campus spatial UPMC
Florent Deleflie	Astronome-adjoint	IMCCE	Scientifique- Responsable ESTERS
Matthieu Kretzschmar	Maître de conférences	LPC2E	Responsable PEPSO

Objectifs scientifiques



- Cartographie *in-situ* du plasma ionosphérique à haute résolution temporelle grâce à la méthode de spectroscopie du bruit thermique: Mesure de la densité et température des électrons à haute cadence, **côté jour et nuit** totalement ou partiellement recombinié.

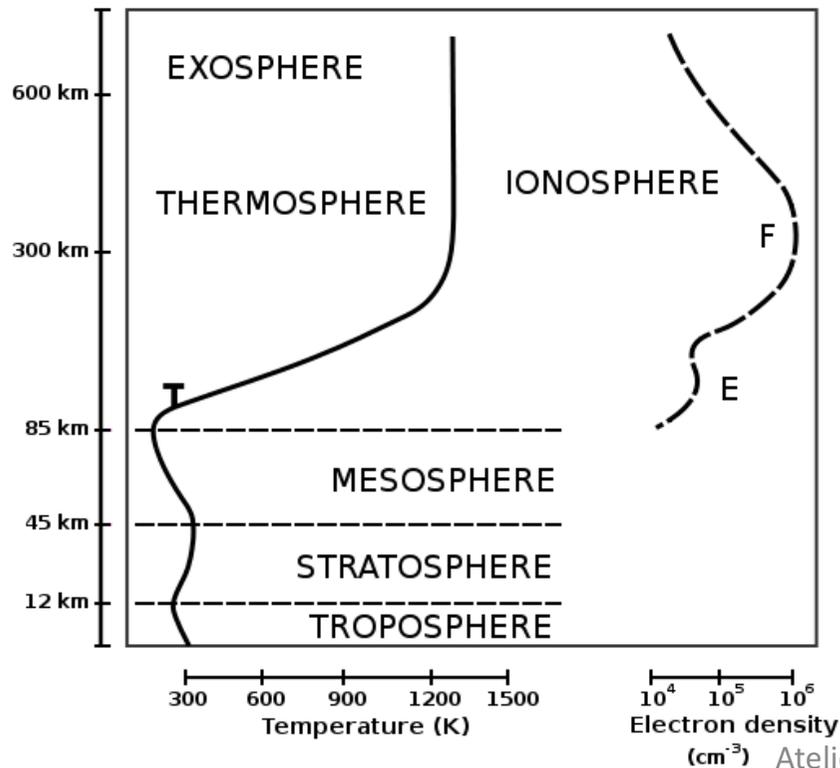
=> Etude *in-situ* de la turbulence ionosphérique

=> Enjeux en météo de l'espace.

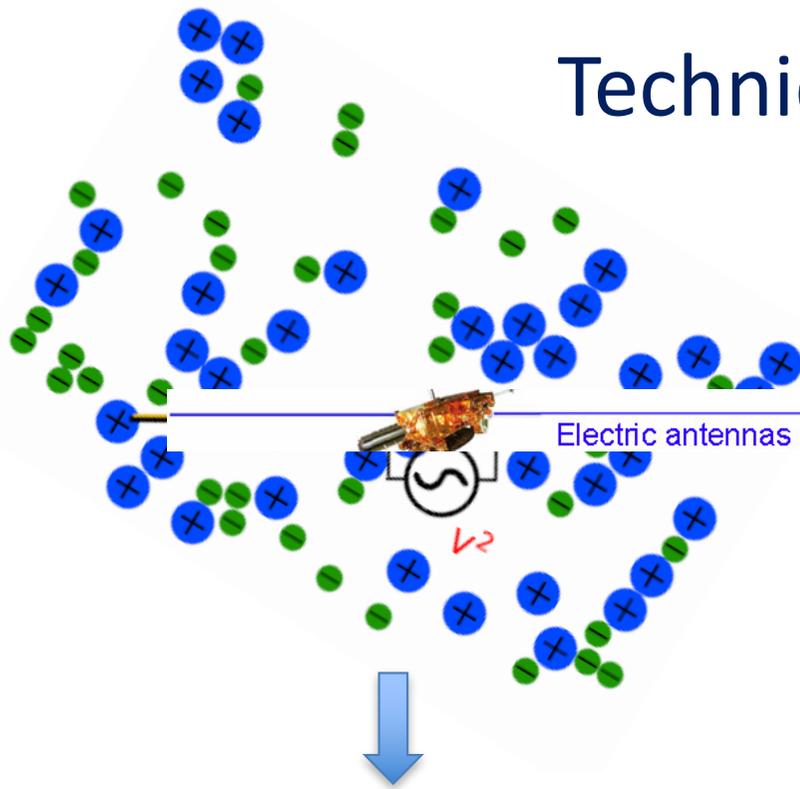
Durée > 6 mois – 2 ans

- **Technique robuste**, très peu gourmande en terme de puissance, masse, besoin en télémétrie. Pas de nécessité de stabilisation des antennes.

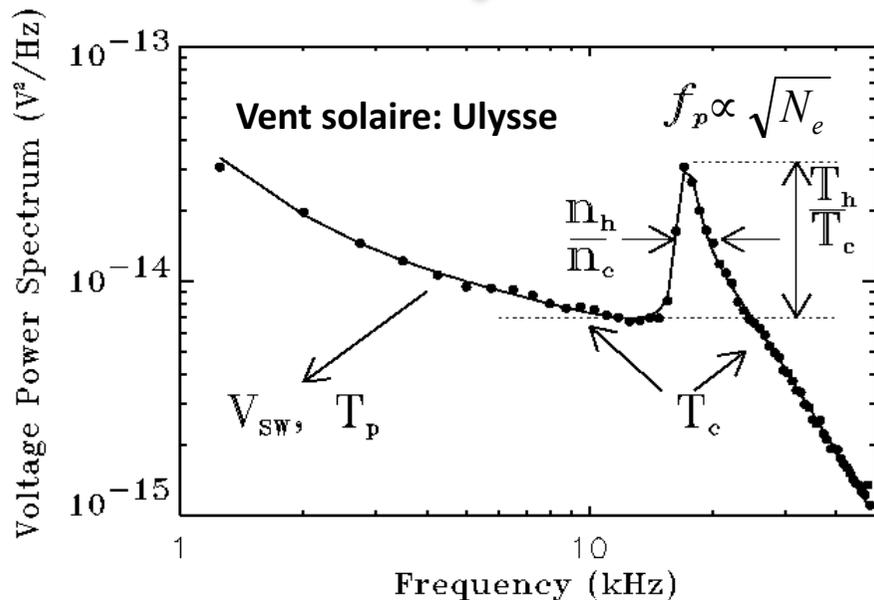
- Paramètres électroniques ionosphériques typiques à 500 km: $n_e \approx 10^5 \text{ cm}^{-3}$ et $T_e \approx 1300 \text{ K}$, Longueur de Debye : $L_D \approx 1 \text{ mm}$; dipôle: $L > 20 \text{ cm}$; $a=0.2 \text{ mm}$



Technique de mesure (QTN)



- Mesure des **fluctuations électrostatiques** dues au mouvement thermique des charges dans le plasma
- Le **spectre** de ces fluctuations nous renseigne sur la **densité** et la **température électroniques** locales

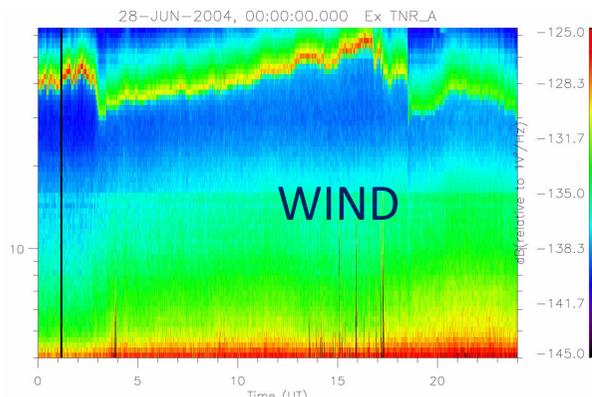
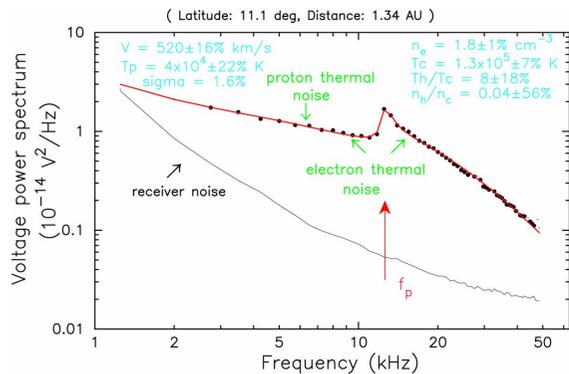
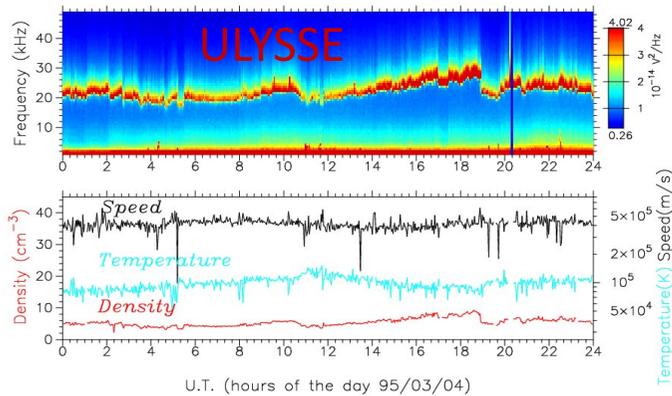


- Pic de résonance proche de la **fréquence de plasma locale** (\rightarrow **densité précise**)
- Forme du pic dépend de la FDV des électrons (\rightarrow **paramètres suprathermiques**) + ensemble du spectre (**température**).
- Spectre à basse fréquence: contribution des protons décalés Doppler par la vitesse du vent solaire + contribution du bruit d'impact.

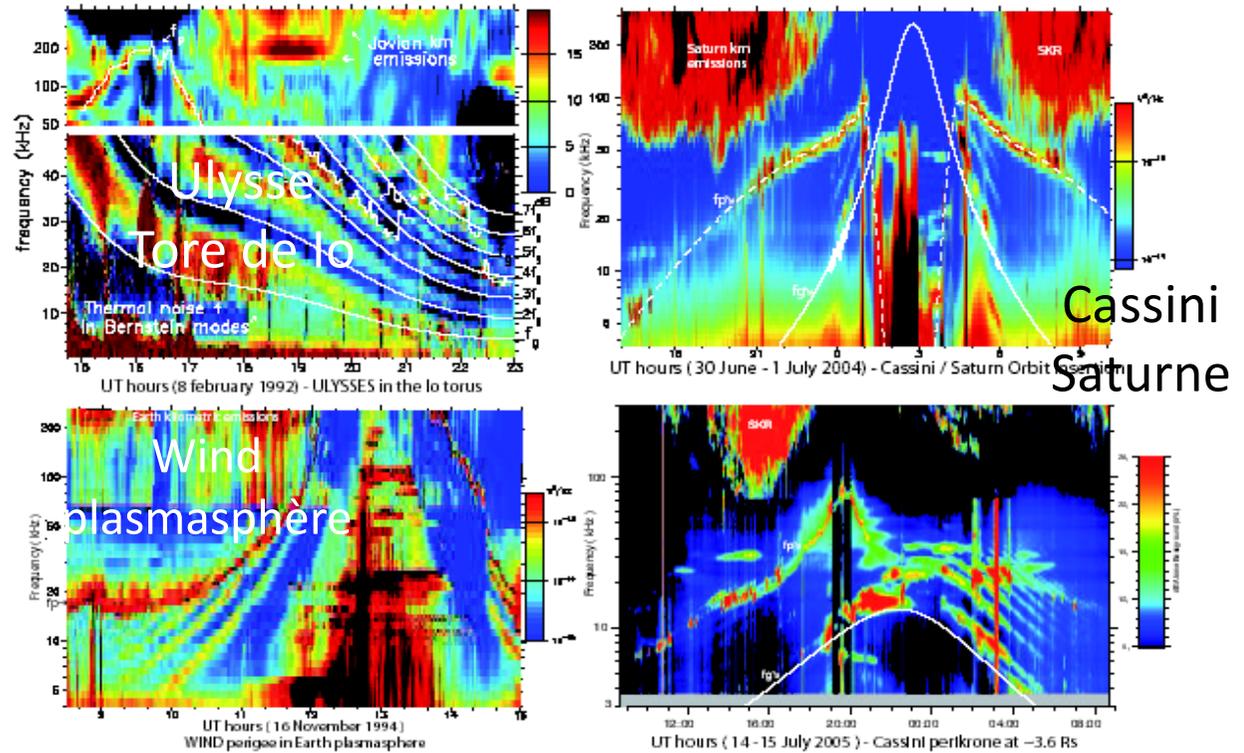
Ref.: Issautier et al., *J. Geophys. Res.*, 104, 1999

Quelques exemples QTN

Vent solaire



Environnements planétaires

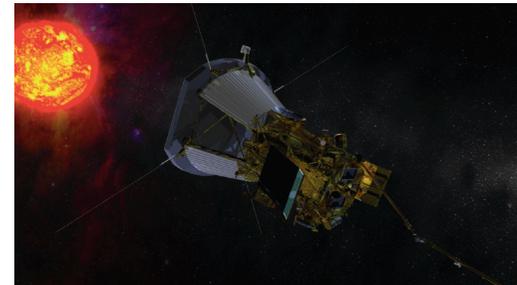
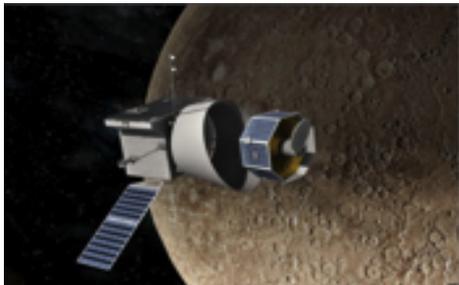


Moncuquet et al., 2005; Schippers et al., 2013; Issautier et al., 1998; Meyer-Vernet et al., 1999
Meyer-Vernet, Issautier, Moncuquet, 2017

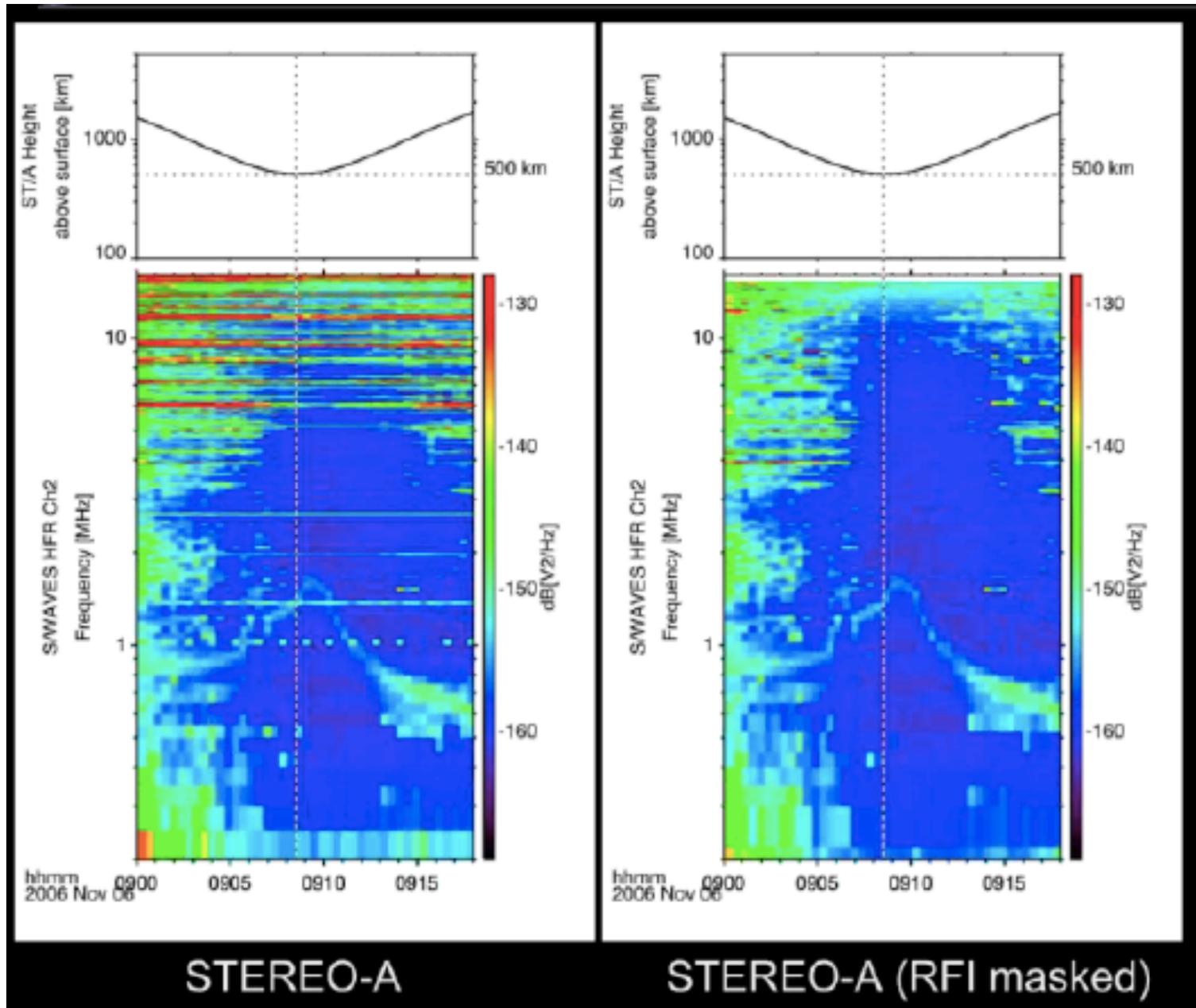
Méthode utilisée avec succès dans différents plasmas héliosphériques: vent solaire (Ulysse, Wind...), queue de comète Giacobini-Zinner (ICE), Ionosphère de Venus (Cassini), et les plasmas fortement magnétisés: Plasmasphère (Wind, Image, Cassini), tore de Io (Ulysse), Saturne (Cassini).

Mesure du Bruit Quasi-Thermique

- **Antenne électrique passive Passive** : ne perturbe pas le plasma ambiant, et sonde un large volume du milieu
- **Méthode indépendante du potentiel de la sonde**
- Mesures précises de la densité électronique (puisqu'elle ne dépend pas du niveau d'étalonnage). Développements d'algorithme de détection à bord (BepiColombo) pour détecter la raie plasma
- **Inter calibration des autres instruments plasma**
- **Méthode** appliquée sur **Bepi-Colombo/MMO/Sorbet** (vent solaire, Mercure), **Parker Solar Probe** (vent solaire, couronne, Vénus), **Solar Orbiter** (vent solaire)



Spectres QTN / ionosphère : Périgée STEREO Nov. 2006

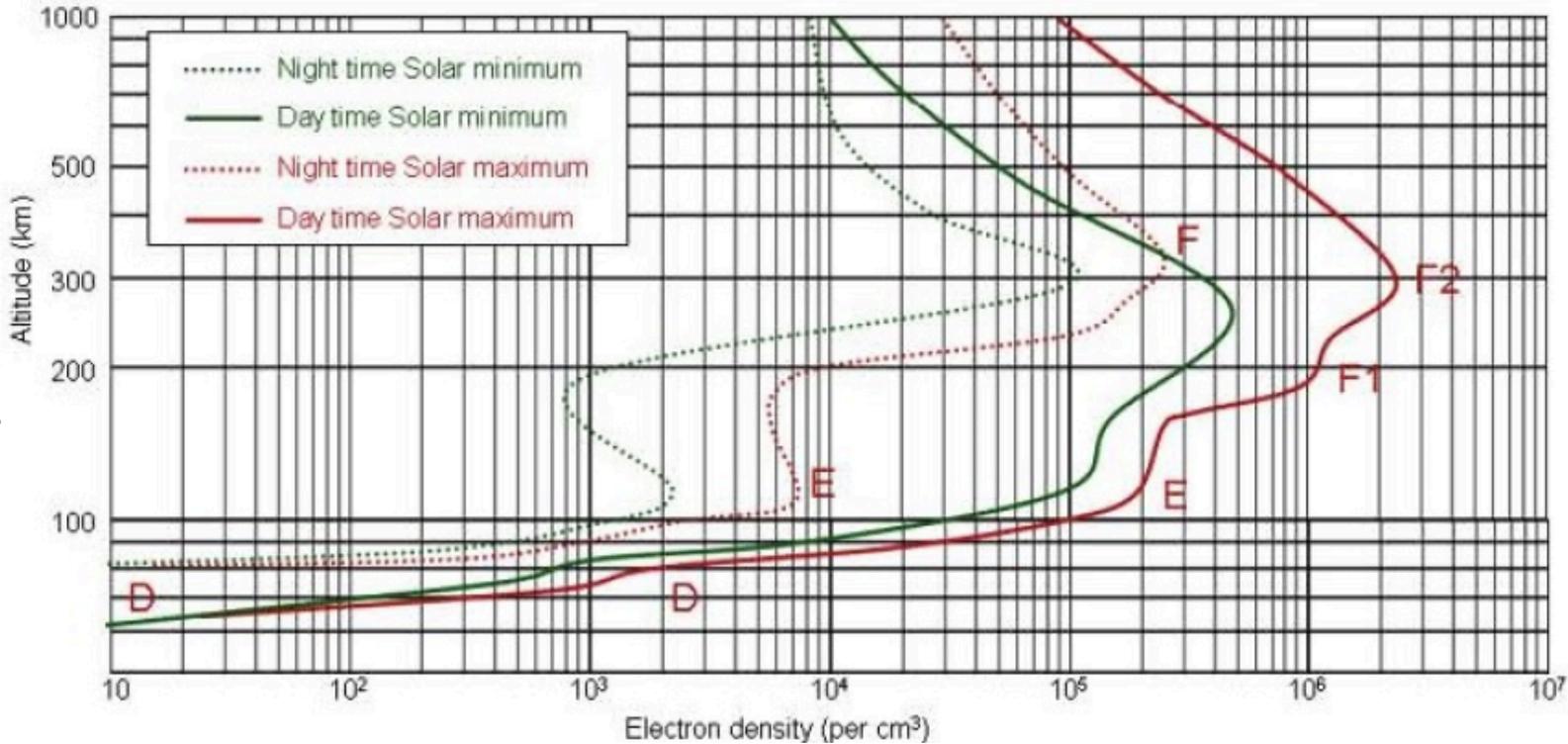


Etude de l'ionosphère



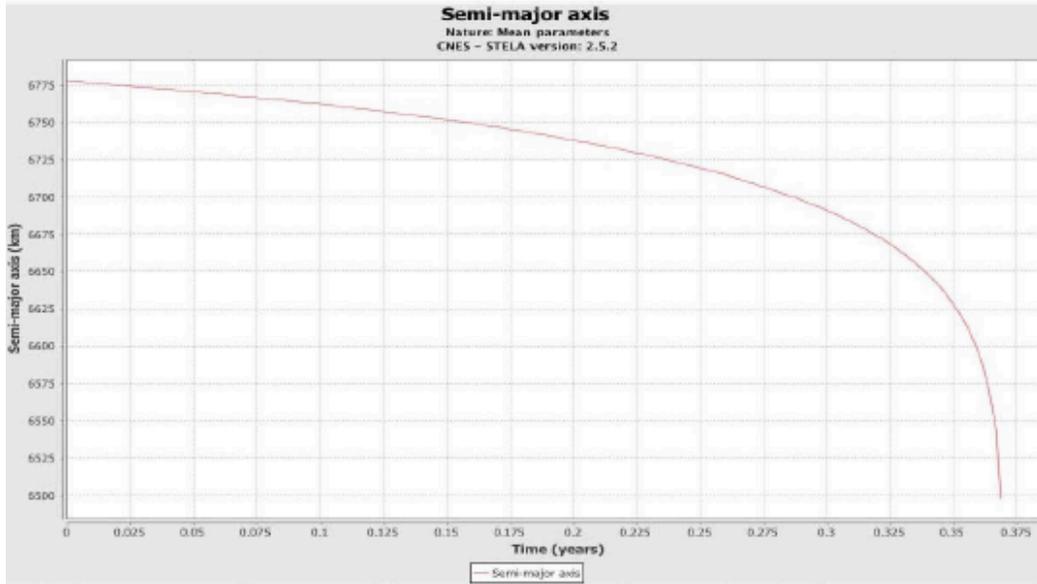
Mission supérieure à 6 mois → altitude minimum 400 km

Loi sur les opérations Spatiales (LOS) → altitude maximum de ~ 700 km



Pour valider ces 2 conditions, altitude envisagée ~ 500 km,
Orbite polaire - héliosynchrone inclinée (lanceur accessible)

Orbitographie



orbite circulaire héliosynchrone
polaire à **600 km** d'altitude

T0 : 600 km

T0 + 3 ans : 575 km

T0 + 5 ans : 550 km

T0 + 8 ans : 475 km

orbite circulaire héliosynchrone
polaire à **400 km** d'altitude

T0 : 400 km

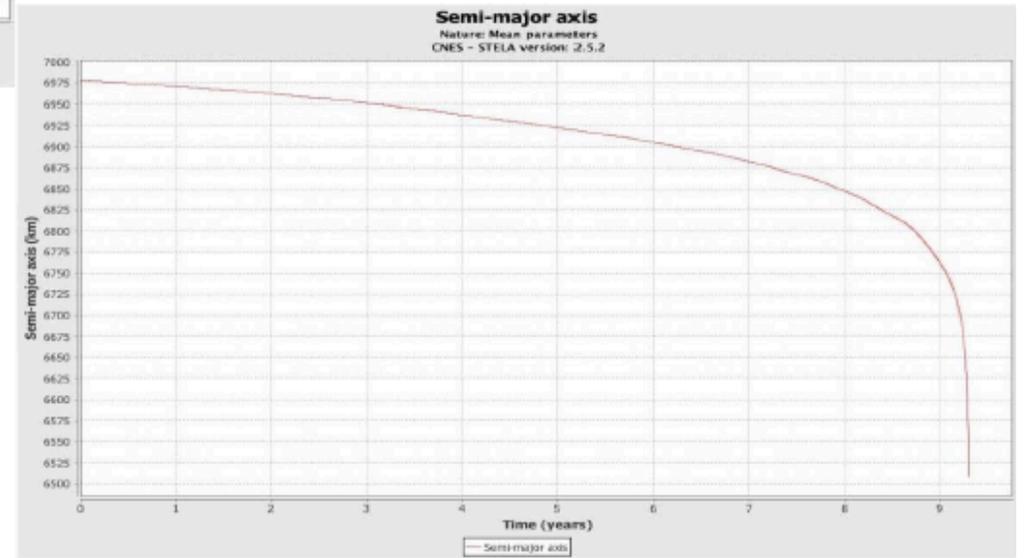
T0 + 2 mois : 375 km

T0 + 3 mois : 350 km

T0 + 3,5 mois : 325 km

T0 + 4 mois : 300 km

T0 + 4,5 mois : 250 km



Modes d'observations envisagés

- **Mode spectre** : acquisition d'un spectre entre 20 kHz et 20 MHz
1 mesure / 5 minutes
- **Mode survey** : acquisition de la position de la fréquence du pic plasma
1 mesure/seconde
- **Mode burst** : acquisition d'un spectre entre 20 kHz et 20 MHz pour suivre le pic plasma ~ **millisecond**

En cours

- **Maquettage du récepteur numérique:** R&T CNES PERLS pour la charge utile de l'instrument radio (Présentation MD).
- **Charge utile** pourrait aussi comporter
 - ✓ un GPS en s'interfaçant directement avec le récepteur.
 - ✓ Sonde de Langmuir (LPC2E)
 - ✓ Sonde quadripolaire (LPC2E)
 - ✓ 2 dipôles croisés (coll. ONERA pour mesures en conjonction radar)
- **Caractérisation des antennes:** Mesures QTN dans la cuve PEPSO/Orléans (coll. LPC2E, stage M2 printemps 2018) pour des conditions proches de l'ionosphère

Les objectifs à cours terme

- Étudier les orbites possibles en fonction des objectifs scientifiques, détermination de l'altitude, réception des données
- Puissance à bord disponible pour les données, le nano sat ...
- Concept antennes électriques, système de déploiement
- Analyse de données à bord/algorithmes
- Modèle thermique pour le nanoSat, spécifications, interface nano sat (alimentation, télémétrie...), prototype à définir

Conclusion

- Concept simple, grande flexibilité (lancement, télémétrie, contrôle attitude...)
- Accompagnement R&D PERLS et STAR
- Précurseur missions radio multi-cubesat (NOIRE, concepts météo spatiale)

- Travail à faire : étude des interfaces plateforme/charge utile
- Points durs potentiels : propreté EM du cubesat