

Mesure des fluctuations du champ magnétique dans l'espace : de la conception du capteur à l'analyse des données

Le système solaire comprend une grande variété d'objets astrophysiques magnétisés. Du Soleil, en passant par les planètes telluriques comme la Terre et Mercure, jusqu'aux planètes géantes comme Jupiter et Saturne, ou encore Ganymède satellite galiléen de Jupiter, les missions spatiales rencontrent des milieux magnétisés très variés.

Dans la plupart des cas, le plasma qui interagit avec le champ magnétique de l'objet peut être considéré en régime non collisionnel. En effet, le libre parcours moyen entre deux collisions des particules chargées constituant le plasma est en général bien plus grand que la taille du système associé au champ magnétique. Dans un tel régime sans collisions, les fluctuations électromagnétiques jouent un rôle prépondérant dans l'interaction entre le plasma et le champ magnétique de l'astre. Ces fluctuations peuvent être dues à des ondes plasmas caractéristiques du milieu, des micro-instabilités, des structures non linéaires cohérentes (solitons) ou encore à de la turbulence.

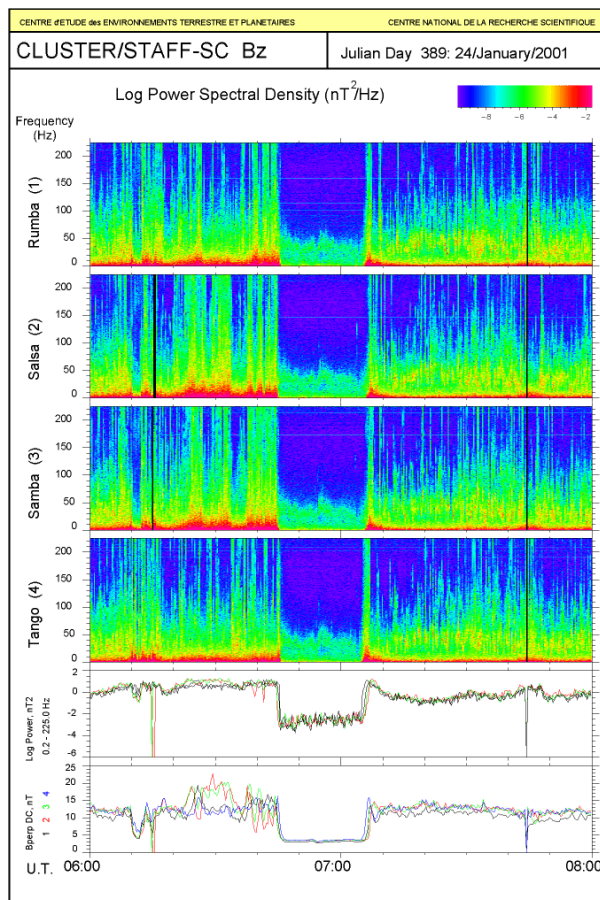
Une partie des chercheurs du LPP (Laboratoire de Physique des Plasmas) étudient donc les processus de physique des plasmas se produisant dans le voisinage de ces objets du système solaire à partir de la mesure des fluctuations électromagnétiques. Ces fluctuations sont mesurées à l'aide d'antennes qui détectent soit le champ électrique, soit le champ magnétique. Ces capteurs sont embarqués à bord de satellites ou de sondes interplanétaires pour effectuer des mesures *in situ* des propriétés des ondes qui sont souvent complexes (la présence du plasma complique sérieusement les propriétés de propagation). Le LPP (anciennement CETP) s'est fait une spécialité de la conception et de la réalisation des capteurs magnétiques appelés « magnétomètres alternatifs à contre-réaction de flux ». Les antennes magnétiques, conçues et réalisées par les ingénieurs et les techniciens du groupe « plasmas spatiaux » du LPP, ont équipé ou équiperont les missions internationales suivantes : GEOS (satellite géostationnaire pour l'étude de la magnétosphère terrestre), Ulysse (étude du vent solaire), Galileo (étude de Jupiter et de ses satellites), Cassini (étude de Saturne et de ses satellites), Cluster (magnétosphère terrestre-choc-vent solaire), THEMIS (aurores polaires-sous-orages terrestres), MMO-BepiColombo (magnétosphère de Mercure-vent solaire), MMS (magnétosphère terrestre) et Solar Orbiter (Soleil et vent solaire). Tout récemment, le LPP a intégré le consortium « ondes » sélectionné par l'ESA pour la future mission JUICE centrée sur l'étude de Callisto, Europa et Ganymède ainsi que de l'environnement jovien.

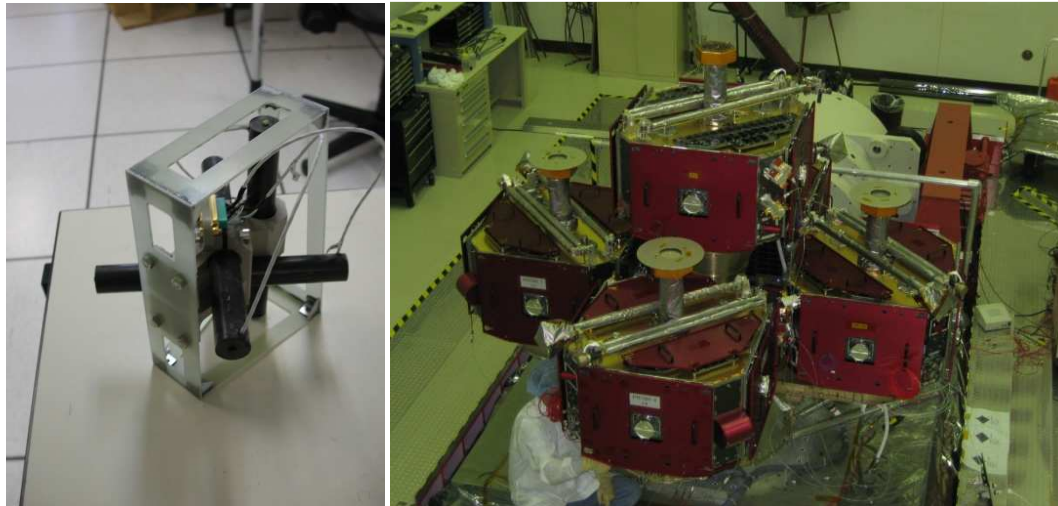
Ce projet méthodologique propose donc de découvrir les différentes phases de la vie de cet instrument spatial : de sa conception (principe de fonctionnement, caractérisation, dimensionnement, comportement thermique, ...) à l'analyse des données via les phases de test et de calibration.

Un modèle d'essai de la mission européenne Cluster (ESA) sera étudié et caractérisé (mesure de la fonction de transfert, mesure de bruit) afin de comprendre le principe de fonctionnement de l'instrument. Les études de conception d'un nouveau capteur seront abordées dans le cadre des développements actuels liés à **la future mission JUICE** de l'ESA. Les phases de calibration et d'analyse des données seront abordées grâce aux outils développés pour la mission THEMIS (NASA – université de Berkeley, lancée en 2007) et un cas physique sera analysé. La problématique de la calibration en vol des instruments sera présentée dans le cadre des récents développements effectués pour **la mission Magnetospheric Multi-Scale (MMS) mission** de la NASA (lancement 2014). Tous les outils

de traitement du signal développés au laboratoire et en collaboration avec l'université de Berkeley seront à la disposition des étudiants.

La figure ci-dessous donne un exemple des données obtenues grâce aux magnétomètres embarqués à bord des quatre satellites (Rumba, Salsa, Samba et Tango) de la mission Cluster : les spectrogrammes temps-fréquence montrent clairement l'intensification des ondes de basse fréquence ($F < 180$ Hz) lorsque les satellites traversent l'onde de choc qui est en amont de la Terre. Les satellites, distants de quelques 100 km, traversent le choc à des temps légèrement différents.





(A gauche) : Modèle d'essai du système tri-axe de magnétomètres alternatifs développé pour la mission THEMIS (NASA). (A droite) : Les cinq sondes THEMIS (NASA) au Space Sciences Laboratory (SSL) de l'université de Berkeley en Californie avant leur départ pour des tests en vibration réalisés au Jet Propulsion Laboratory (JPL). On distingue au bout des bras argentés repliés les systèmes tri-axes d'antennes magnétiques (enveloppés dans leur manteau thermique) réalisés au LPP.



(A gauche) : Calibration d'un modèle de vol du système tri-axe de magnétomètres alternatifs de la mission MMS à l'aide du système de bobines de Helmholtz 3-axes de 2 m de diamètre installé à l'observatoire magnétique national de Chambon-la-forêt. (A droite) : Test d'interférences réalisé au Goddard (NASA) lors des intégrations du système tri-axe d'antennes magnétiques sur le satellite MMS#1. Afin de ne pas être saturée par le 60 Hz ambiant et de pouvoir détecter de possibles perturbations conduites par les câbles de connexion, le tri-axe est placé dans une boîte en mumétal (boîte noire en bas à droite de la photographie) qui absorbe les perturbations magnétiques provenant de l'extérieur.