

## Le lien entre l'héliosphère et la Terre

# Recherche magnétosphérique à l'Institut d'Aéronomie Spatiale de Belgique (IASB)

La Terre se trouve dans l'héliosphère, la région dominée par le Soleil et son vent solaire (voir page 3). L'interaction entre le milieu interplanétaire et la magnétosphère terrestre influence l'homme et sa technologie. Les activités menées à l'Institut d'Aéronomie Spatiale de Belgique (IASB) ont pour objectif de comprendre cette interaction et d'en évaluer les effets sur les activités humaines.

### Le vent solaire

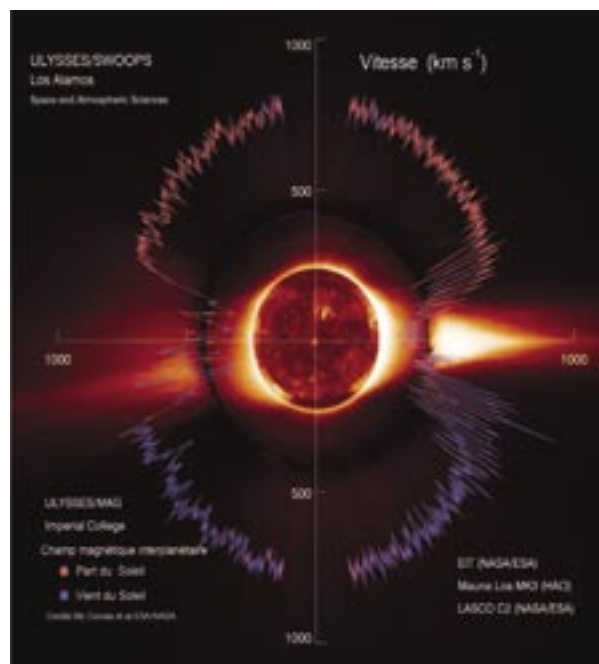
L'IASB a interprété des observations d'Ulysse, une sonde solaire de l'ESA et de la NASA, lancé en 1990, qui continue à nous transmettre des mesures après plus de 17 années ... Ulysse a découvert que le vent solaire qui provient des pôles du Soleil a une vitesse de 800 km/s alors que la vitesse près de l'équateur est "seulement" de 400 km/s. Le vent emporte avec lui le champ magnétique solaire qui a des polarités opposées dans les deux hémisphères séparés par la "couche de courant héliosphérique". Lors d'un alignement Soleil-Terre-Ulysse, les chercheurs de l'IASB ont pu montrer comment le vent solaire et la couche de courant héliosphérique se déforment en s'éloignant du Soleil. Ils étudient aussi le vent avec des modèles qui utilisent une description basée sur la microphysique du plasma. Le réchauffement de la couronne et l'accélération du vent solaire sont des sujets auxquels l'IASB a apporté aussi des éléments de réponse.

### La magnétosphère terrestre

La Terre possède un champ magnétique généré à l'intérieur de la planète. Il constitue un bouclier efficace empêchant l'entrée directe du plasma solaire dans la haute atmosphère.

*Ulysse enregistre des vitesses plus élevées du vent solaire aux pôles qu'à l'équateur du Soleil.*

© NASA/ESA



Ce champ définit la *magnétosphère*. En amont de la Terre se forme la *magnétopause*, qui sépare le vent solaire et le plasma d'origine terrestre. Le vent solaire est dévié autour de la Terre, en formant la *magnétogaine*. La magnétosphère est comprimée du côté jour; du côté nuit, elle forme la *queue magnétosphérique*, qui est étirée sur des millions de kilomètres.

L'ESA a lancé en 2000 la mission CLUSTER, un ensemble de quatre satellites qui orbitent autour de la Terre avec une séparation de quelque centaines de kilomètres afin d'établir une cartographie tridimensionnelle de la magnétosphère. L'IASB est impliqué dans l'interprétation des données.

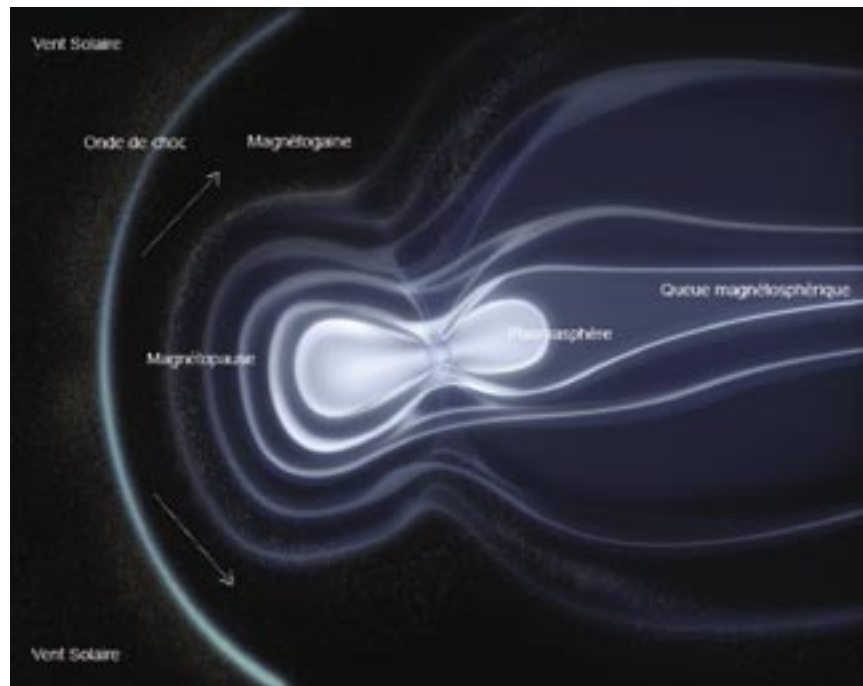
La magnétopause forme le lien entre l'héliosphère et la Terre: c'est là où une partie de l'énergie du vent solaire est transmise vers la Terre. La magnétopause se comporte souvent comme une couche impénétrable; nous avons créé un modèle qui explique sa structure. De temps en temps par contre, la magnétopause permet un transfert de masse de la magnétogaine à la magnétosphère. Il existe souvent une couche frontière à l'intérieur de la magnétopause, formée par l'entrée de plasma d'origine solaire, par différents mécanismes que nous avons étudiés. La magnétopause et la couche frontière constituent *la frontière magnétosphérique*.

La magnétopause se forme là où la pression dynamique du vent solaire est balancée par la pression de la magnétosphère. CLUSTER nous a permis de perfectionner la technique de "reconstruction" développée à l'IASB: en utilisant les données de tous les satellites pendant le passage de la frontière, ses chercheurs peuvent établir le mouvement de la couche et sa structure spatiale. Ils savent donc séparer les variations spatiales des variations temporelles et ils ont bien retrouvé que la magnétopause se déplace vers la Terre quand la pression dynamique augmente et qu'elle s'éloigne quand la pression diminue.

La pression dynamique est plus grande dans un flux provenant d'une *éjection de masse coronale (CME)*, voir encadré pages 10 et 11). Quand un tel flux atteint la Terre, la magnétosphère est comprimée, ce qui provoque un *orage magnétosphérique*. Lors d'un orage, des satellites géostationnaires peuvent se retrouver soudainement dans le vent solaire, ce qui peut provoquer des dysfonctionnements. Les ondes de choc, ainsi que la compression rapide de la magnétosphère, accélèrent certaines particules qui peuvent endommager les circuits électroniques des satellites...

### La magnétosphère interne et l'ionosphère

Le couplage entre le vent solaire et la magnétosphère entraîne une circulation typique dans le plasma magnétosphérique. Cette circulation est capable de stocker de l'énergie dans un réservoir de la queue magnétosphérique, qui se vide pendant



Les éléments les plus importants de la magnétosphère terrestre.  
© IASB

des événements que l'on appelle des *sous-orages*. Ces perturbations sont souvent initiées par des changements dans l'orientation du champ magnétique interplanétaire.

Les lignes de force magnétiques qui connectent la magnétosphère et l'ionosphère sont des conducteurs d'électricité presque parfaits. Par conséquent, chaque structure dans la magnétosphère a une signature dans l'ionosphère et des courants électriques dissipent l'énergie inhérente aux structures magnétosphériques dans l'ionosphère. A l'IASB, on étudie les aurores comme exemple de ce transfert d'énergie. Les arcs auroraux discrets sont dus à la précipitation dans l'ionosphère d'électrons provenant de la queue magnétosphérique. L'IASB utilise son modèle des couches frontières pour déterminer le potentiel électrique dans la magnétosphère. En tenant compte du couplage avec l'ionosphère, nous pouvons établir le potentiel d'accélération des électrons magnétosphériques, le flux de précipitation et la luminosité des aurores. Ce modèle explique la largeur typique des arcs (quelques kilomètres). A l'IASB on étudie aussi les observations d'aurores par CLUSTER et des stations au sol, comme les caméras optiques du réseau ALIS en Suède, qui permettent la tomographie des arcs.

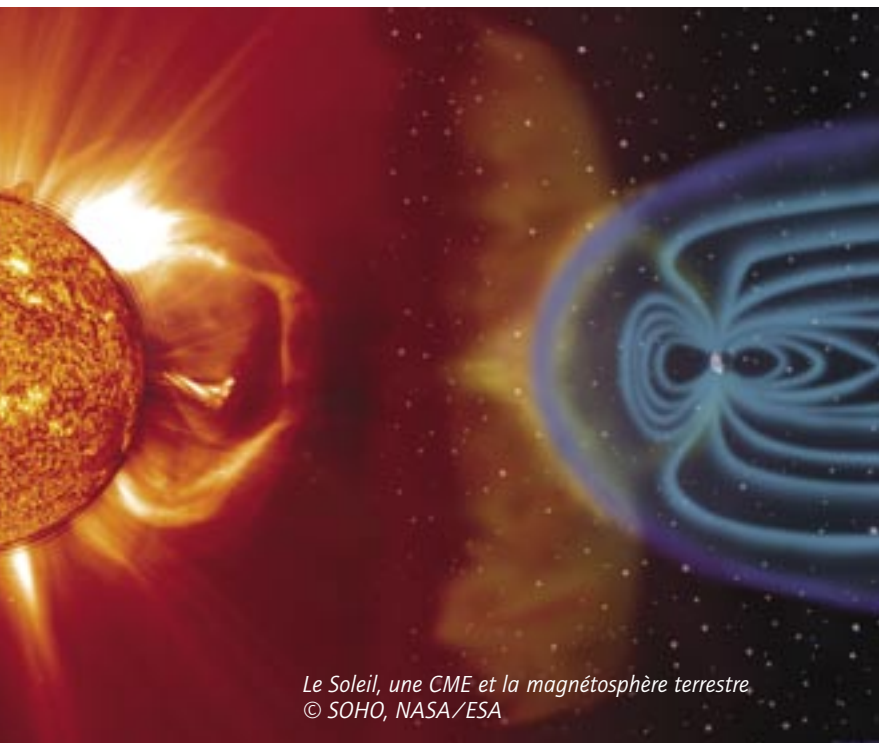
Plus près de l'équateur, l'ionosphère se prolonge vers le haut dans la *plasmasphère*, une région de plasma piégé par le champ géomagnétique. La frontière extérieure de la plasmasphère est très dynamique: c'est le "champ de bataille" entre la magnétosphère interne et externe, où le mouvement de corotation imposé par la Terre est confronté à l'interaction due au vent solaire. Pendant des perturbations

*L'aurore polaire dans toutes ses couleurs.*  
© IASB



(sous-orages ou orages magnétosphériques), la circulation magnétosphérique s'intensifie et la plasmasphère perd ses couches extérieures. Plus tard, la plasmasphère se rétablit par remplissage de particules d'origine ionosphérique. L'IASB a développé un modèle dynamique de la plasmasphère en fonction de l'activité géomagnétique. Avec CLUSTER, nous étudions en particulier les "plumes plasmasphériques", du plasma qui a presque été détaché de la plasmasphère lors de périodes de forte activité géomagnétique.

Nous utilisons les mesures de densité (de l'expérience WHISPER) pour calculer le gradient de densité dans la plasmasphère. Le but de CLUSTER était de calculer le gradient spatial à partir de mesures simultanées à quatre points non coplanaires. Ce calcul du gradient de densité nous a permis de mieux comprendre la structure globale de la plasmasphère. Nous avons aussi développé un calcul alternatif du gradient qui est plus robuste et que nous pouvons utiliser quand un satellite n'est pas opérationnel ou trop éloigné des autres.



*Le Soleil, une CME et la magnétosphère terrestre.*  
© SOHO, NASA/ESA

## *Les CMEs – éjections de masse coronale*

Le champ magnétique du Soleil crée une isolation thermique qui peut emprisonner un plasma, par exemple dans un énorme tube à flux magnétique ou dans une boucle coronale qui peut atteindre 700.000 km de longueur. Ainsi, dans l'atmosphère solaire du plasma très chaud peut se retrouver juste à côté d'un plasma plus froid. Les structures magnétiques dans la couronne solaire conduisent des ondes et des flux d'énergie et peuvent stocker des quantités d'énergie énormes. Cependant, elles peuvent devenir tout d'un coup instables et provoquer ainsi des protubérances et des éjections de masse coronale (en anglais "CME", *coronal mass ejection*).

Lors d'une CME, la matière des couches extérieures est éjectée du Soleil. Il s'agit aussi d'un plasma, mais sa vitesse peut être très supérieure à celle du vent solaire normal. Les CMEs dites rapides ont une vitesse typique de 1000 km/s qui peut monter jusqu'à plus de 2000 km/s, c'est-à-dire à plus de 7,2 millions de km/h! Une CME typique éjecte de 1012 à 1013 kg de plasma, ce qui représente à peu près la masse du Mont Everest.

## La météorologie spatiale et l'IASB

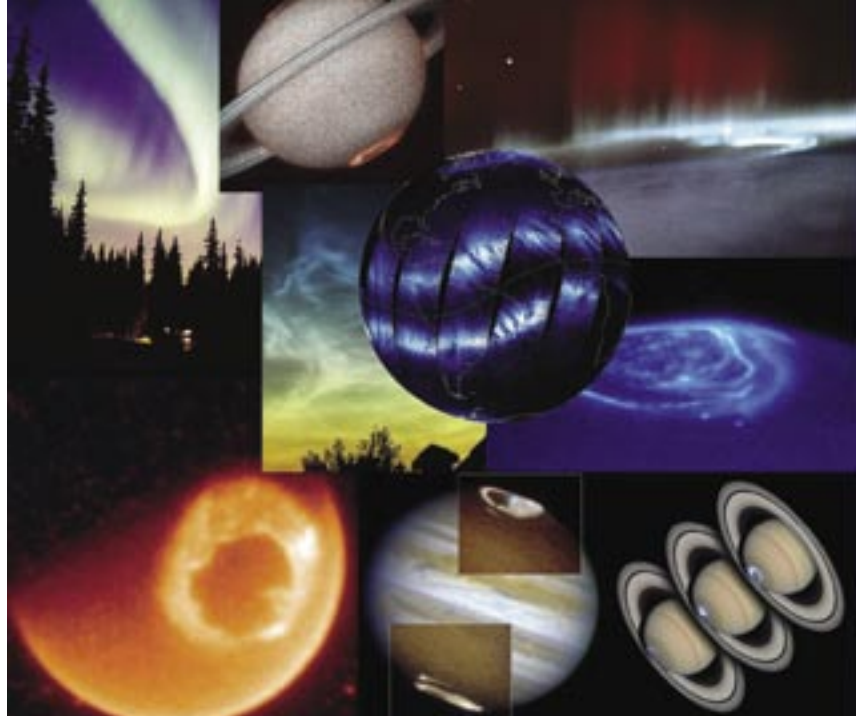
Comprendre les interactions entre l'héliosphère et la magnétosphère est indispensable pour la *météorologie de l'espace*, la prévision de l'impact des conditions héliosphériques sur les activités humaines.

Par exemple, la construction d'un satellite nécessite de connaître la dose de radiation ionisante qu'il va accumuler pendant sa durée de vie. On a donc besoin de modèles de la distribution de la radiation, y compris leur évolution avec l'activité solaire. L'IASB a développé un outil pour ceci : le système SPENVIS.

Évaluer l'impact de l'héliosphère sur le corps humain sera indispensable dans le futur. L'IASB a récemment analysé plusieurs scénarios pour l'exploration de Mars. Une telle mission implique que les astronautes seront sensibles aux conditions héliosphériques pendant le voyage vers Mars et pendant le retour, mais aussi à la surface de Mars, une planète sans champ magnétique interne protecteur...

L'IASB s'intéresse aux relations Soleil-Terre, en étudiant l'espace interplanétaire et l'environnement immédiat de la Terre. En utilisant des mesures de satellites, ses chercheurs essayent de comprendre la physique des plasmas spatiaux. Ils étudient la météorologie spatiale pour évaluer l'influence de l'héliosphère sur les activités humaines.

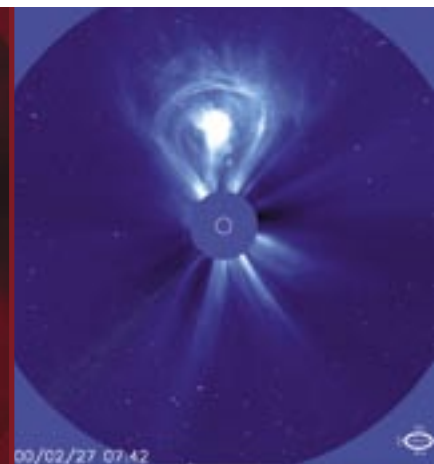
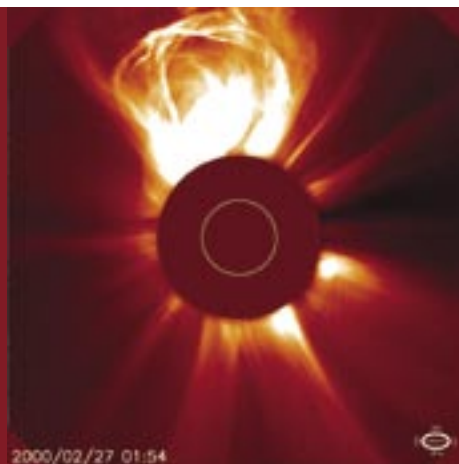
**Johan De Keyser et Viviane Pierrard (IASB)**



*L'aurore polaire sur la Terre et sur d'autres planètes.*  
© IHY2007, J. Rumburg

Le processus d'éjection de masse coronale est éruptif et très violent. En quelques heures, le nuage peut se détacher du Soleil pour continuer son avancée dans l'espace. En quelques jours il peut atteindre la Terre. Le nuage porte en soi un champ magnétique et interagit avec l'espace interplanétaire, les planètes et leur environnement.

Même si la couronne solaire a déjà pu être observée pendant des milliers d'années (lors des éclipses totales), les CMEs viennent tout juste d'être découvertes dans 'l'ère spatiale'. Les toutes premières preuves de l'existence de ce phénomène dynamique ont été apportées par le coronographe à bord du septième *Orbiting Solar Observatory (OSO 7)* de 1971 à 1973. Un coronographe crée une éclipse solaire artificielle en recouvrant l'image du disque solaire avec un disque occulteur. À partir de la Terre, un coronographe permet ainsi d'observer uniquement la partie de la couronne la plus proche du Soleil dans un ciel dégagé. Dans l'espace, la partie visible de la couronne est cependant bien plus large et peut être observée sans interruptions.



*La CME du 27 février 2000 observée par les instruments du satellite SOHO.*  
© SOHO, NASA/ESA

*La couronne solaire lors d'une éclipse totale du Soleil.*  
© ORB

