

A la découverte du vent solaire en dehors de l'écliptique

Joseph Lemaire

Institut d'Aéronomie Spatiale de Belgique

1. Introduction

ULYSSES (anciennement appelé ISPM ou « International Solar Polar Mission ») est une mission exploratoire réalisée conjointement par l'ESA et la NASA. L'objectif premier de celle-ci est l'étude des propriétés du milieu interplanétaire et du vent solaire aux hautes latitudes héliocentriques. En effet, il y a de bonnes raisons de considérer que les propriétés du milieu trouvées par les sondes spatiales dans la région de l'écliptique (c'est-à-dire aux basses latitudes héliocentriques) sont très différentes de celles existant dans les régions polaires. Jusqu'à présent les descriptions de ces régions polaires et des mécanismes physiques qui s'y déroulent sont basées sur des conjectures et extrapolations sur la base des connaissances acquises par l'observation directe dans le plan de l'écliptique. ULYSSES permettra d'obtenir pour la première fois des mesures directes des caractéristiques du vent solaire à grande distance du plan de l'écliptique et au-dessus des pôles du Soleil, car la trajectoire de cette sonde transportera les neuf instruments de mesure scientifique qui sont à bord de ULYSSES, pour la première fois, dans la troisième dimension de l'Héliosphère.

L'Agence Spatiale Européenne fournit la sonde qui abrite ces neuf instruments, et est responsable du contrôle et des opérations en orbite. La NASA fournit le lancement de la sonde à l'aide de la navette spatiale DISCOVERY. L'agence spatiale américaine fournit également le générateur de puissance ainsi que le support du réseau des antennes de réception des signaux qui seront envoyés par la sonde depuis l'espace. Elle assumera également le

pré-traitement et la distribution des données de mesure aux différents groupes de scientifiques concernés.

La moitié des instruments à bord de la sonde ont été construits aux USA avec des fonds de la NASA, tandis que l'autre moitié est apportée par les laboratoires des pays membres de l'ESA.

ULYSSES sera la seconde sonde de l'ESA, après GIOTTO, à s'aventurer profondément dans les régions lointaines du système solaire. Cette sonde aurait dû être lancée par la navette spatiale CHALLENGER deux mois après la tragique catastrophe de celle-ci en février 1986. Après une longue attente de quatre années, les préparatifs de lancement de ULYSSES ont récemment recommencé en Floride. Le lancement à partir du complexe 39 au Kennedy Space Center est prévu entre le 5 et le 23 octobre 1990.

2. L'orbite de ULYSSES

Aucune fusée ne possède assez d'énergie pour propulser un objet d'environ 370 kg comme ULYSSES directement hors du plan de l'écliptique et lui faire survoler le pôle sud du Soleil, comme le montre la figure 1. C'est pourquoi ULYSSES sera d'abord dirigé vers la planète JUPITER au voisinage de laquelle elle arrivera en février 1992, après un voyage de 16 mois dans le plan de l'écliptique. ULYSSES utilisera alors le champ gravifique de JUPITER pour être dévié vers une trajectoire qui l'amènera après 44 mois de vol à 70 degrés de latitude héliocentrique. Ceci aura lieu en mai 1994. Le champ gravifique du Soleil infléchira la trajectoire de telle

manière que la sonde traversera ensuite le plan équatorial du Soleil et passera finalement au-dessus du pôle nord et du pôle sud de celui-ci, respectivement au 52^{ème} et 55^{ème} mois. La fin de la mission est prévue pour octobre 1995, soit 5 ans après le lancement.

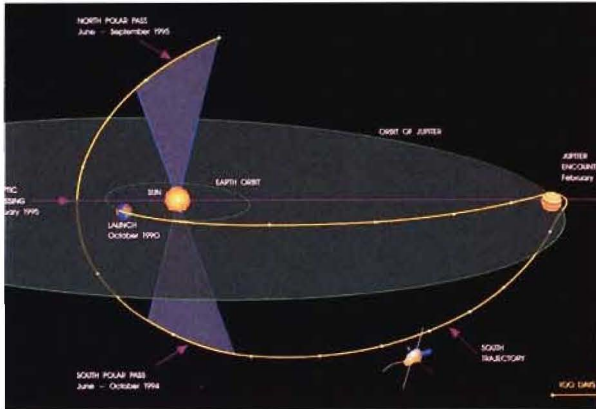


Figure 1 : Trajectoire de la sonde interplanétaire ULYSSES. Les points le long de cette trajectoire sont espacés de 100 jours chacun

3. Le générateur de puissance et la transmission des données d'observations

Comme l'intensité du rayonnement solaire à la distance de JUPITER (780 millions de km du Soleil) est 25 fois plus faible que celle disponible à la distance de la TERRE, il était difficile d'utiliser un générateur de puissance électrique à partir de cellules photo-électriques. C'est pourquoi le courant électrique nécessaire au fonctionnement des instruments scientifiques, des ordinateurs de bord, et de tous les systèmes utilitaires de la sonde spatiale sera fourni par un générateur thermoélectrique (RTG) capable de fournir une puissance de 280 W. La traversée des zones de radiation corpusculaire dans la magnétosphère de JUPITER, exclut également l'utilisation de cellules photo-électriques pour produire l'énergie électrique.

Cette énergie servira également à la transmission des données d'observations vers l'une des grandes antennes de réception des signaux radio appartenant au réseau de la NASA (Deep Space Network). L'antenne émettrice à bord de la sonde sera constamment orientée en direction de la Terre. Des corrections d'orientation de ULYSSES devront être effectuées tous les deux jours pour maintenir le contact radio avec la Terre de manière permanente. Les signaux radio de ULYSSES mettront environ une heure pour atteindre la Terre depuis son point d'éloignement maximum.

Les faibles signaux ainsi reçus seront ensuite envoyés vers le centre de contrôle de ULYSSES situé au Jet Propulsion Laboratory, Pasadena, Californie.

4. Les objectifs scientifiques

Bien que multiples, les objectifs scientifiques de cette mission sont principalement centrés sur l'étude du Soleil et du milieu interplanétaire : la structure à trois dimensions du vent solaire émis par le Soleil ; la distribution des vitesses des électrons et des différentes espèces d'ions constituant le plasma du vent solaire ; la configuration à grande échelle du champ magnétique interplanétaire ; l'observation des sursauts d'ondes radioélectriques émis par le Soleil ainsi que les ondes de plasma générées par des instabilités dans le vent solaire ; l'étude des rayons X également émis sporadiquement par la couronne solaire ; la distribution des grains de poussières interplanétaires (micrométéorites) et des atomes neutres interplanétaires et interstellaires pénétrant à l'intérieur du système solaire.

4.1. Champs magnétiques solaire et interplanétaire

Les champs magnétiques mesurés spectroscopiquement à la surface du Soleil et dans la couronne solaire, sont produits par des courants électriques très intenses au sein du Soleil et dans son atmosphère ionisée. En raison de la rotation du Soleil et de l'expansion radiale de sa haute atmosphère (: la couronne solaire), les lignes de force magnétique sont étirées en forme de spirales d'Archimède comme le jet d'eau sortant d'un tuyau d'arrosage attaché sur une plate-forme en rotation. Ces lignes de force s'étendent et s'enroulent dans le plan de l'écliptique, jusqu'aux confins du système solaire. Mais au-dessus des pôles du Soleil (où l'effet de vitesse de rotation est fortement réduit) ces lignes de force magnétique devraient être pratiquement parallèles à la direction radiale, c'est-à-dire parallèle à la direction d'expansion de la couronne solaire et du vent solaire. Il est important de vérifier cette conjoncture en vue de confirmer ou d'infirmer les modèles actuels du vent solaire et de son champ magnétique.

Aux hautes latitudes héliocentriques la vitesse du vent solaire est présumée être plus grande que dans le voisinage du plan de l'écliptique : plus de 600 km/s au voisinage des pôles, au lieu de 300-400 km/s dans les courants du vent solaire lent observés aux basses latitudes. Bien que plus rapide au-dessus des pôles, il est vraisemblable que la structure du vent solaire sera plus homogène et moins variable dans le temps du fait du manque d'alternance continue de courants lents et de courants rapides observés au voisinage du plan de l'écliptique. Mais qui sait ? Pour le savoir il faut aller voir !

4.2. La détection des particules présentes dans le milieu interplanétaire

Les astronomes utilisent des détecteurs de photons (télescopes optiques, radioléctriques, infrarouge, gamma...) pour observer les astres. Ils mesurent ainsi des flux de photons dans une vaste gamme d'énergie et de longueur d'onde, allant de moins de 1 nm jusqu'à plus de 10 cm. Il en est de même pour les physiciens de l'espace interplanétaire : ils utilisent différents types de détecteurs de particules (atomes, ions et électrons) pour observer le rayonnement corpusculaire émis par les astres du système solaire ou pour observer le rayonnement cosmique venant de l'espace interstellaire.

La figure 2 schématise les différents phénomènes étudiés dans le cadre de la mission ULYSSES.

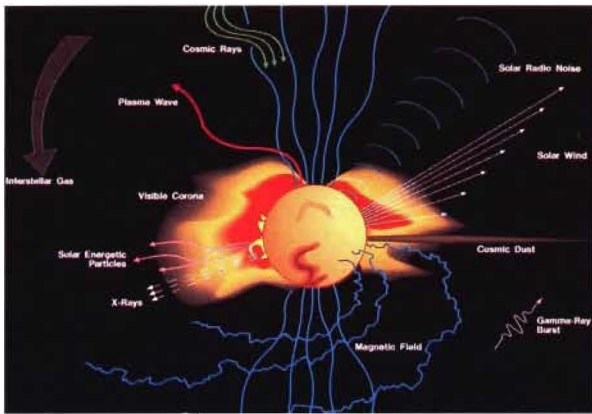


Figure 2 : Représentation schématique des différents phénomènes solaires, interplanétaires et galactiques qui seront étudiés dans le cadre de la mission ULYSSES

Le Soleil est un important pourvoyeur de particules de toutes énergies. Les plus énergétiques de celles-ci sont les ions et les électrons émis lors des violentes éruptions solaires (« solar flares » en anglais). Les protons émis lors de ces explosions produites à la base de la couronne solaire ont des énergies de plusieurs dizaines de millions d'électrons-volt (1-100 MeV). Le flux maximum de ces protons, mesuré au voisinage de l'orbite terrestre, peut atteindre des valeurs de 10^4 p/cm²/s. Ces jets de matière contiennent également des ions d'Hélium, de Fer, de Silicium, d'Oxygène et de tous les autres éléments présents dans le système solaire et dans les météorites. L'origine de ces éruptions n'est pas encore connue. Les spectres d'énergie et les spectres de masse de ces « rayons cosmiques solaires » obtenus à l'aide des cinq détecteurs construits par l'équipe de J.A. Simpson de l'Université de Chicago, devraient aider à élucider un certain nombre de questions non résolues quant à l'origine de ces éruptions et quant à la manière dont ces particules se propagent dans l'Héliosphère en suivant des trajectoires compliquées dans le champ magnétique interplanétaire. Ces jets

de particules énergétiques sont dangereux pour certains composants électroniques et surtout pour les astronautes, en particulier lors des futures missions habitées vers la Lune et la planète Mars. Heureusement ces redoutables jets de particules énergétiques n'apparaissent que sporadiquement et rarement, du moins en ce qui concerne les plus intenses d'entre eux, comme c'est le cas également pour les éruptions volcaniques sur la Terre.

Alors que ces émissions de particules provenant des éruptions solaires ne durent qu'un jour ou deux, le Soleil émet de manière continue un flux important d'électrons et d'ions de beaucoup plus faible énergie (10-20 eV pour les électrons et 100-500 eV pour les protons) ; plus de 10^8 de ces ions et électrons sont mesurés à la distance de la Terre par cm² et par seconde. Ce flot de particules constitue le vent solaire. C'est la variabilité du vent solaire interagissant avec la magnétosphère de la Terre qui est à l'origine des différentes perturbations du champ géomagnétique, et indirectement des aurores boréales que l'on peut observer à partir du sol.

Ce sont également ces perturbations du vent solaire et les courants électriques qu'ils induisent qui sont à l'origine de certaines coupures de courant comme celle qui a plongé New York dans l'obscurité durant une nuit entière en août 1972.

La mesure du flux de ces électrons, protons, particules alpha (Hélium ionisé 2 fois), d'ions de Fer, de Silicium (ionisés entre 6 et 12 fois)... nécessite des détecteurs très complexes et des techniques adaptées à chaque domaine d'énergie et à chaque domaine de masse des particules. Plusieurs de ces détecteurs sont installés à bord de ULYSSES.

Les détecteurs de S.J. Bame (Los Alamos Nat. Lab., USA) sont adaptés pour mesurer le flux d'électrons du vent solaire entre 1 eV et 903 eV ainsi que celui des ions entre 257 eV/Q et 35 keV/Q.

Par contre la technique mise au point par G. Gloeckler (Univ. de Maryland, USA) et J. Geiss (Univ. de Bern, Suisse) permet de déterminer la composition ionique, la température et la vitesse moyenne des ions dont la vitesse instantanée est comprise entre 145 km/s (H⁺) et 1352 km/s (Fe⁺⁶).

L. Lanzerotti (Bell Lab., USA) et le personnel de son équipe internationale ont construit des détecteurs capables de mesurer les flux relativement faibles des ions entre 50 KeV et 5 MeV, et des électrons entre 30 keV et 300 keV présents dans le milieu interplanétaire surtout lors des éruptions solaires. Les détecteurs de E. Keppler et H. Rosenbauer (Max Planck Institut für Aeronomie, RFA) sont eux destinés à observer les ions entre 80 keV et 15 MeV/nucléon, ainsi que les atomes d'Hélium du milieu interstellaire.

Investigation	Acronyme	Masse (kg)	Puissance moyenne (W)	Taux de transmissions données
— Champ magnétique	HED	4.8	5.3	80
— Plasma vent solaire	BAM	6.7	5.5	160
— Composition ions vent solaire	GLG	5.6	4.0	88
— Ions et électrons énergétiques	LAN	5.8	4.0	160
— Particules énergétiques et gaz interstellaire	KEP	4.2	3.1	16
— Rayons cosmiques	SIM	14.6	14.8	160
— Ondes radio et ondes de plasma	STO	7.3	9.9 / 10.4	232
— Rayons X solaires et cosmiques	HUS	2.0	2.6	40
— Poussières cosmiques	GRU	3.8	2.0	8
Total		54.7	51.2	944

Tableau : Masse, puissance et taux de transmission des données du second pod pour chacun des instruments constituant le pod de la sonde interplanétaire ULYSSES.

Tous ces instruments dont la liste est reprise dans la tableau 1 avec leur poids, leur consommation de puissance et le taux de transmission des données vers la Terre, sont donc dédiés à l'observation détaillée du plasma formant le vent solaire. Nul doute que des nouvelles découvertes seront réalisées à l'aide de chacun de ces instruments pris individuellement.

Ces résultats seront ensuite publiés dans des revues spécialisées par le groupe des expérimentateurs et chercheurs associés à chacune de ces expériences. Ils seront présentés et discutés à des colloques et réunions internationales de spécialistes scientifiques.

Mais ces observations seront également mises à la disposition de deux groupes pluridisciplinaires associés à la mission ULYSSES. G. Noci (Obs. Astr. Arceti, Florence) est le Principal Investigator (PI) d'une de ces études interdisciplinaires intitulée : Dépendance de la composition ionique du vent solaire en fonction de la latitude héliocentrique. La seconde des études sélectionnées par l'ESA et la NASA dans le cadre du projet ULYSSES est celle proposée par Joseph Lemaire de l'Institut d'Aéronomie Spatiale de Belgique (Uccle). Cette étude présentée dans le paragraphe suivant est intitulée : Etude théorique et expérimentale des discontinuités observées dans le plasma du vent solaire. Joseph Lemaire est le PI pour cette étude interdisciplinaire, Michel Roth (IASB, Bruxelles), Dominique Fonteyn (BIRA, Brussel) et Michael Schulz (Aerospace Corporation, LA) sont les co-investigateurs pour celle-ci.

4.3. Structure des discontinuités dans le plasma du vent solaire

La Belgique participe donc à cette première mission interplanétaire de l'ESA en offrant d'analyser et d'interpréter des observations faites simultanément

avec plusieurs de ces instruments de mesure. Le but de l'étude proposée par l'IASB (Institut d'Aéronomie Spatiale de Belgique) est d'utiliser ces observations pour tester et affiner les modèles théoriques des discontinuités directionnelles développés depuis 1976 par Michel Roth et Joseph Lemaire, tous deux chercheurs dans cette Institution Nationale Belge de Recherche Spatiale.

Qu'est-ce qu'une discontinuité directionnelle dans un plasma comme celui du vent solaire où les collisions entre ions et électrons sont très peu fréquentes en raison de la faible densité du milieu (plasma) ? Il existe différents types de discontinuités directionnelles. La figure 3 nous en montre une que nous appelons « discontinuité tangentielle » parce que la direction du champ magnétique, représenté dans ce diagramme à 3 dimensions par des lignes droites, change progressivement de direction au sein de celle-ci tout en restant perpendiculaire à la direction ox . L'axe ox est donc perpendiculaire à la nappe de courant électrique qui produit ce changement de direction du vecteur champ magnétique conformément aux équations électromagnétiques de Maxwell. Le modèle théorique établi à l'IASB permet de déterminer la densité de ce courant électrique ainsi que la distribution du champ électrique au sein de la nappe de courant, pour une grande variété de conditions aux limites de part et d'autre de celle-ci, et pour différents types de fonctions de distribution de vitesse des électrons et des ions.

Les conditions aux limites sont les concentrations, les températures, les pressions, les flux des électrons et des différentes espèces d'ions à grande distance de cette nappe de courant. Ces conditions aux limites pourront être déterminées par les observations d'ULYSSES pour un ensemble de discontinuités de ce type. La structure interne détaillée des champs magnétiques et électriques, ainsi que la distribution du plasma au sein de celles-ci sera

ensuite calculée sur les ordinateurs de l'IASB. Ces distributions théoriques seront ensuite confrontées avec les observations faites par les instruments de mesure (magnétomètre, flux de particules chargées de différentes énergies,...) lorsque ULYSSES traversera ces feuillets de courant séparant deux régions de plasma de composition ionique et/ou de températures distinctes.

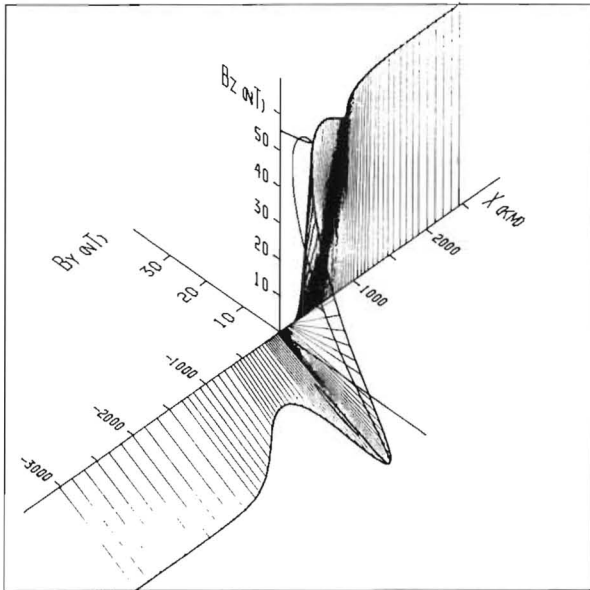


Figure 3 : Représentation graphique des directions du champ magnétique au travers d'une discontinuité tangentielle. La surface plane de cette discontinuité est perpendiculaire à la direction ox .

La stabilité à l'échelle microscopique de ces discontinuités tangentielles est actuellement à l'étude de l'IASB en collaboration avec M. Kuznetzova de l'Institut de Recherche Spatiale de l'Académie des Sciences d'URSS à Moscou. Ces instabilités produisent des ondes électromagnétiques dont nous espérons pouvoir comparer le spectre et l'intensité avec les observations qui seront réalisées à bord d'ULYSSES grâce aux antennes radioélectriques et magnétiques construites par R.G. Stone GSFC, (USA) en collaboration avec le Département de Recherche Spatiale à l'Observatoire de Meudon ainsi que le Centre de Recherches sur la Physique de l'Environnement à Issy-les-Moulineaux en France.

5. ULYSSES : un détective cosmique dans notre environnement astronomique

Outre les observations du vent solaire par lesquelles des chercheurs belges sont plus particulièrement concernés, ULYSSES permettra en outre de mesurer le spectre de masse des micro-météorites qui sillonnent l'espace interplanétaire.

Les scientifiques tireront également profit de la grande distance séparant la sonde de la Terre pour effectuer des mesures d'intérêt astrophysique. En effet en utilisant simultanément le détecteur de photons de 5-150 keV qui est à bord d'ULYSSES et ceux qui se trouvent à bord d'autres satellites en orbite autour de la Terre, on espère pouvoir localiser les sources cosmiques émettant les sursauts de rayonnement Gamma que l'on observe sporadiquement tous les quelques jours.

ULYSSES devrait permettre de mettre en évidence les paquets d'ondes gravitationnelles produits pense-t-on lors d'événements cataclysmiques survenant dans des objets extragalactiques de très grande masse comme les « trous noirs ».

On doit donc conclure qu'ULYSSES, une mission principalement destinée à l'étude du Soleil et du milieu interplanétaire proche de celui-ci, offre également des perspectives de découvertes extraordinaires dans le domaine astrophysique en permettant d'observer des phénomènes cosmiques lointains, bien au-delà de notre petite Hélosphère, qui n'est qu'un exemplaire parmi une multitude d'autres dans l'Univers.

Références

- The International Solar-Polar Mission - Its Scientific Investigations, K.-P. Wentzel, R.G. Marsden & B. Battrock, ESA Publication SP-1050, July 1983.
 ULYSSES - Preparations for the Voyage over the Solar Poles Resumed, K.-P. Wentzel & R.G. Marsden, ESA Bulletin N° 60, pp. 9-12, 1989.