

Sondes Cluster II : les étranges relations Terre-Soleil

PHILIPPE JAMET

La complexité des relations entre le champ magnétique terrestre et le vent magnétique violent venu du Soleil a été l'une des grandes révélations permises par la technologie spatiale. Les quatre sondes européennes Cluster II ne visent rien moins qu'à effectuer une cartographie de ces interactions en trois dimensions.

Dans le courant du mois d'avril 2000, quatre étonnantes sondes européennes, actuellement en phase finale d'intégration au centre de recherches IABG d'Ottobrun près de Munich, prendront la route du cosmodrome de Baïkonour (Kazakhstan). Ces quatre sondes identiques, baptisées « Cluster II », doivent être mises en orbite deux par deux en juin et juillet prochains par deux lanceurs russes Soyouz. Ces derniers sont équipés d'un étage supérieur Fregat, concept qui vient d'être validé le 9 février dernier par un tir d'essai réussi. Ces lanceurs Soyouz, désormais utilisés sur le marché mondial commercial du lancement des satellites, sont affrétés par la société franco-russe Starsem qui offre des possibilités de mise en orbite complémentaires à la filière Ariane.

Cluster II ne constitue pas un programme nouveau à proprement parler. En effet, il s'agit de la reprise du projet initial de quatre sondes (« Cluster ») qui avait été avorté lors de l'échec de leur lancement, le 4 juin 1996, par une fusée Ariane 5 effectuant alors son premier tir d'essai. Pour Cluster II, il a fallu construire trois nouveaux satellites et récupérer une sonde de réserve qui avait servi pour des modélisations thermiques et structurelles au sol dans le cadre du programme original. Le délai de temps entre l'échec de la mise à poste de la mission d'origine et la décision de l'Esa de relancer une nouvelle mission peut être considéré comme relativement court, mais il s'explique par l'importance du projet, complémentaire au

projet Soho, dans le cadre du Solar-Terrestrial Science Programm (STSP) de l'agence européenne. De ce fait, les impératifs scientifiques l'ont emporté sur les impératifs financiers et, le 3 avril 1997, le Comité des programmes scientifiques de l'agence donnait son agrément à la mission Cluster II.

Derrière ce sigle STSP se trouve l'idée, de prime abord évidente, selon laquelle il existe des relations entre le Soleil et la Terre : centre de notre système solaire, le Soleil, étoile de catégorie spectrale G2 de 696 000 km de rayon et de masse équivalente à 333 000 fois celle de la Terre, est une grande source de lumière et de chaleur constituant la base et la condition de la vie sur notre planète. Il a fallu cependant beaucoup de temps à l'homme pour saisir totalement l'influence que notre Soleil exerce sur notre planète. Ce fut l'un des nombreux apports de la technologie spatiale et notamment du satellite américain Dynamics Explorer-1, lancé le 31 janvier 1958 en plein milieu de la fameuse « Année géophysique internationale ». Celle-ci, qui dura en fait dix-huit mois, a permis une concentration des moyens d'investigation au niveau international comme jamais auparavant. L'un de ses objectifs, outre les études sur le Soleil lui-même, consistait à mieux comprendre deux phénomènes intimement liés : les aurores polaires boréales (marquées par des interactions de particules, de plasmas et de champs dans l'environnement terrestre) et le champ magnétique de la Terre. De nombreuses stations au

sol, précédant les premiers satellites artificiels, ont participé à ce programme de recherche.

Pour ce qui concerne le champ magnétique terrestre, on sait que son existence est reconnue depuis le XVI^e siècle. Le savant anglais William Gilbert a contribué de façon considérable à ce domaine avec son ouvrage *De Magnete* (1600). C'est lui qui a effectué les premières expérimentations sérieuses et démontré que la Terre possède un champ magnétique assimilable à un aimant droit ayant un faible angle avec l'axe de rotation de la Terre.

Cela explique pourquoi il ne faut pas confondre pôles géographiques et pôles magnétiques. Ainsi, si l'on prend l'hémisphère nord, le pôle magnétique se situe au Groenland par 79° de latitude nord et 60° de longitude ouest, c'est-à-dire à environ 1 000 km du pôle Nord géographique.

Après Gilbert, les recherches sont entrées dans une période de stagnation, sans progrès scientifiques majeurs. Il fallut pour cela attendre les travaux révolutionnaires du savant français de Mairan qui publie, en 1731, le *Traité historique et physique de l'aurore boréale*. De Mairan suggère qu'il existe des liens entre les aurores boréales, les phénomènes magnétiques et l'*atmosphère solaire*. C'est la première fois que l'on émet l'hypothèse selon laquelle le Soleil peut envoyer vers notre Terre autre chose que de la lumière et de la chaleur.

En 1832, Carl Gauss développe sa méthode d'analyse harmonique et crée le premier observatoire magnétique à Göttingen, permettant ainsi une étude plus approfondie du champ magnétique terrestre. On reconnaît peu à peu que ce phénomène trouve sa source à l'intérieur de la planète et qu'il s'agirait d'un *noyau liquide de fer* dont les courants en mouvement induisent la création de ce champ magnétique.

Cette théorie ne sera affinée que vers les années 50, grâce à l'Américain Elsasser et l'Anglais Bullard qui développent la théorie de la « dynamo entretenue ». Selon ces deux théoriciens, la pérennité de ces courants électriques serait assurée par un phénomène de convection thermique transportant à la fois de la chaleur et de la matière à l'intérieur de ce noyau. Le phénomène de rotation de la Terre sur elle-même jouerait également un rôle dans cet effet dynamo.

Nos connaissances n'ont pas

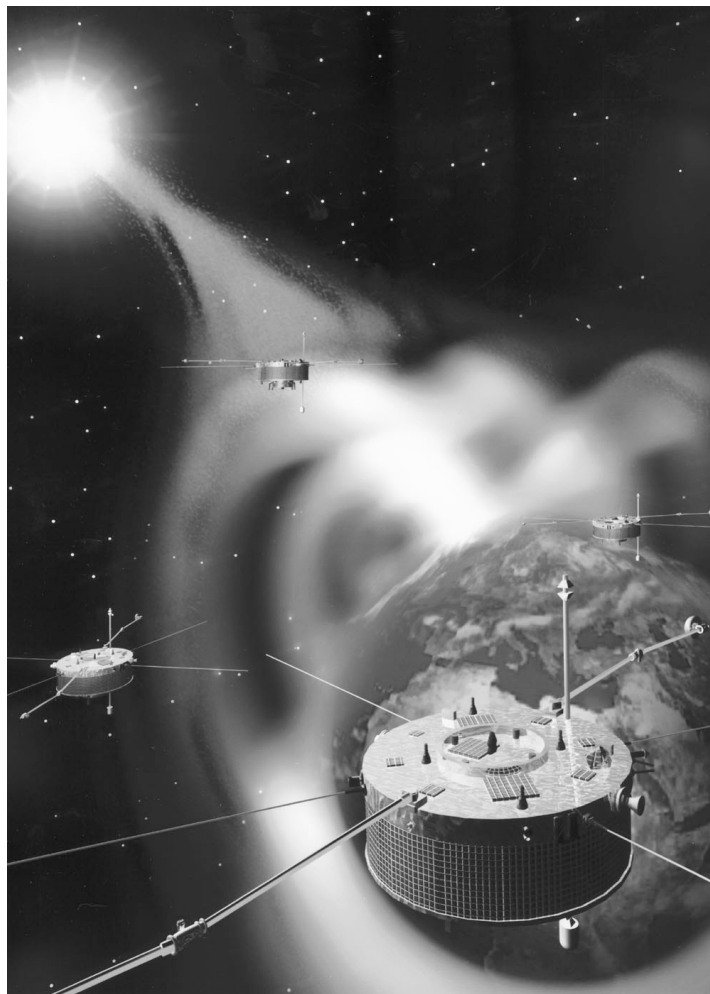
res polaires et les perturbations de notre champ magnétique à l'action du champ magnétique solaire. Grand expérimentateur et observateur, organisateur de l'expédition « Aurora Polaris » vers le pôle magnétique dès 1900, Birkland identifie pour la première fois un phénomène qu'il dénomme « orage polaire élémentaire » et que les physiciens de notre époque connaissent sous le nom d'« orage magnétosphérique ». Il apparaissait donc de plus en plus évident que ce champ magnétique terrestre s'étendait dans l'espace :

de Mairan avait donc bien eu raison en ce qui concerne l'influence des fluides venus du Soleil sur le champ magnétique terrestre et la haute atmosphère. On découvre également un lien entre les aurores polaires et les fluctuations du champ magnétique terrestre.

Bien avant l'avènement de la technologie spatiale, en 1951, l'astronome allemand Ludwig Biermann, observant l'incurvation de la queue de poussières de comètes s'approchant du Soleil, émet l'hypothèse que ce phénomène est dû à un flux de particules venu de notre étoile et que celui-ci touche aussi la Terre et son champ magnétique. Cela ne faisait toutefois que confirmer la théorie de Chapman – imaginée dans les années 30 ! – selon laquelle se déverseraient sur la Terre « des nuages de plasma, de neutrons, de protons

et d'électrons » émis par le champ magnétique solaire.

Les travaux d'Owen Storet nous semblent aussi de la toute première importance. En effet, ils mettent en évidence, dès le début des années 50, des phénomènes de « whistler » au cours desquels des signaux électromagnétiques engendrés par des éclairs ont des effets de propagation allant bien au-delà des limites assignées jusqu'alors à l'atmosphère. L'explication de ce phénomène est



seulement progressé dans l'étude du champ magnétique terrestre mais également en ce qui concerne notre étoile. Dès 1860, le physicien britannique Carrington établit le lien entre de fortes éruptions solaires et l'apparition, quelques jours plus tard, de nombreuses aurores boréales en Europe : on soupçonne déjà l'existence de liens étranges entre le champ magnétique terrestre et le Soleil... En 1896, Birkland franchit le pas et attribue les auro-

liée à la structuration spatiale du champ magnétique terrestre. Pour terminer, nous devons mentionner la théorie de l'*expansion coronale* de Barker (1958) développée avant que des sondes soient allées étudier de près l'environnement terrestre. Cette théorie remet en cause le modèle d'une atmosphère solaire statique en imaginant l'existence d'un phénomène de *vent solaire*, c'est-à-dire un flux de plasma en expansion radiale et en interaction permanente avec le champ magnétique terrestre.

Ce que nous a appris la technologie spatiale

A partir du début des années 60, des sondes et des satellites placés sur des orbites excentriques vont nous fournir des données expérimentales confirmant les théories de Chapman, Biermann et Barker. Le flux de vent solaire est pour la première fois mesuré en 1962 par la sonde Mariner 2, lors de son périple vers la planète Vénus. Au même moment, d'autres sondes mettent en évidence l'interaction entre, d'un côté, le champ magnétique terrestre et, de l'autre, le vent et le champ magnétique solaires. Mariner 2 nous a appris que ce vent solaire est un *plasma* (c'est-à-dire un gaz totalement ou partiellement ionisé) composé de protons, d'électrons et d'ions lourds, et très *conducteur* d'électricité. Toujours d'après les données de la sonde américaine, ce vent solaire contient environ dix particules par centimètre cube et sa course rugissante à travers le système solaire atteint les vitesses fantastiques de 400 à 700 km/s. En période de Soleil calme, ce vent solaire met environ quatre jours pour parvenir jusqu'à la Terre. C'est aussi la première fois que l'on tente d'établir une cartographie du champ magnétique s'étendant dans l'espace. Notons à ce sujet l'apport, en 1961, du satellite américain Explorer 12 qui est le premier à traverser la surface séparant le champ magnétique terrestre de l'atmosphère solaire en expansion.

Une des découvertes les plus étonnantes effectuées par les sondes a été celle qui a mis en évidence une énorme *onde de choc* qui s'étend du

côté de la Terre exposé au Soleil, à l'endroit où le vent solaire heurte de plein fouet le champ magnétique et dont la zone d'influence spatiale est appelée « magnétosphère ». Du côté de la Terre où arrive le vent solaire, cette magnétosphère est comme « aplatie » par un énorme coup de poing alors que du côté opposé se développe une queue magnétosphérique d'un diamètre d'environ 30 rayons terrestres pour une longueur totale de plusieurs millions de kilomètres. Cette magnétosphère n'est donc pas homogène et la partie de celle-ci exposée au Soleil est particulièrement intéressante à observer. L'ensemble de notre magnétosphère comprend une frontière dénommée « magnétopause », marquant la limite au-delà de laquelle cesse l'influence du champ magnétique terrestre. Relativement étendue du côté opposé au Soleil, la magnétopause est également compressée dans la partie frontale face au vent solaire. A cet endroit, qui correspond aussi à de grandes perturbations du champ magnétique terrestre, elle n'est située qu'à environ 10 rayons terrestres du centre de la Terre. Sur la périphérie de cette magnétopause, juste au-dessus des pôles magnétiques terrestres, se forment deux « cornets polaires » plongeant dans les couches les plus épaisses de la magnétosphère. Ils offrent au plasma solaire une possibilité de pénétration dans les couches intérieures de la magnétosphère et vers les couches supérieures de l'atmosphère terrestre dans lesquelles ils peuvent créer des aurores boréales, gêner le fonctionnement des transmissions radio passant par l'ionosphère, provoquer des phénomènes de surtension des lignes électriques, comme cela a été le cas avec les pannes électriques gigantesques à New York et au Québec. Pour ce qui concerne les satellites soumis à ces arrivées de plasma, on a parfois constaté une détérioration des microprocesseurs et des décharges électriques provoquant ainsi des pannes et causant, par exemple, une interruption des services de téléphone et de télécommunications. A l'arrière de la magnétosphère, du côté opposé au Soleil, il existe aussi une zone appelée « feuillet neutre » qui partage la queue magnétosphérique en deux zones où les champs magnétiques se trouvent en sens inverses : vers la Terre dans la zone

nord, à l'opposé dans la zone sud. On trouve également une couche de plasma – composée d'électrons et de protons de basse énergie – qui entoure les zones de *piégeage* des particules par le champ magnétique terrestre et qui se prolonge dans la queue de chaque côté du feuillet neutre.

A proximité de la Terre, du côté de l'onde de choc avec le champ magnétique terrestre, ce vent solaire va accumuler des particules en quantités énormes si bien que la densité va atteindre le nombre de 500 millions de particules frappant une surface de 1 cm². Une des conséquences est qu'à partir d'un certain point d'accumulation dans les parties périphériques de la magnétosphère, ce vent va se déverser brusquement à l'intérieur sous forme de particules entraînant une grande variété de phénomènes comme les « sous-orages » (ou « perturbations élémentaires de Birkland ») ou bien encore l'émission d'ondes TDF et UDF. Puis le cycle s'arrête et recommence en fonction de la variabilité du vent solaire. Ce flux de particules énergétiques causerait sans doute bien des dommages à la vie sur Terre et aux processus vivants s'il n'y avait pour nous en protéger la présence du champ magnétique terrestre qui les arrête en grande partie. Les particules électriquement chargées qui arrivent à franchir la frontière de la magnétopause sont piégées par les lignes du champ magnétique terrestre qui vont d'un pôle magnétique à un autre. Ce phénomène génère un « circuit électrique planétaire », créant des ceintures de radiations en forme de boucle qui entourent notre planète et constituent des zones de piégeage intense de particules. Grâce aux renseignements fournis par de nombreuses sondes, les scientifiques ont fait la distinction entre deux zones baptisées « ceintures de Van Allen », du nom du scientifique qui fut l'investigateur principal du programme Explorer 1. La ceinture interne, composée de protons et d'électrons de haute énergie, s'étend à partir de l'équateur entre 1 000 et 5 000 km d'altitude tandis que celle de la ceinture externe, composée d'électrons, s'étend entre 15 000 et 25 000 km. Au-dessus des pôles, toutefois, ces ceintures tendent à glisser vers de plus basses altitudes.

On a encore du mal à comprendre

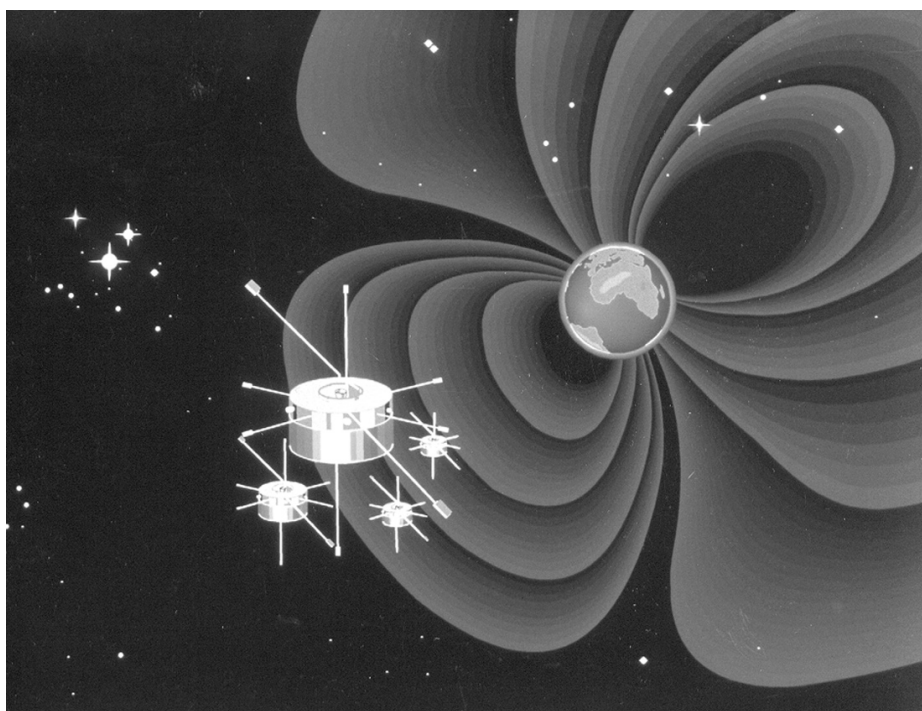


Illustration représentant la magnétosphère avec l'onde de choc et les quatre sondes Cluster. Les quatre sondes Cluster, opérant selon la technique en trois dimensions, permettront d'étudier l'interaction entre la magnétosphère terrestre et le vent solaire comme jamais auparavant.

le processus de disparition périodique des particules piégées et de nouveaux piégeages. Néanmoins, ces ceintures jouent pour nous un rôle de protection contre les particules les plus énergétiques même si elles sont électromagnétiquement très actives et peuvent parfois contribuer à occasionner quelques dégâts à des instruments à mesure fine placés sur des satellites (comme ce fut le cas récemment, lors de la traversée de ces ceintures par le satellite d'astrophysique X américain Axaf-Chandra, concurrent de notre satellite XMM). Ces ceintures pourraient être aussi très dangereuses pour des astronautes voyageant à bord de vaisseaux spatiaux, s'ils étaient exposés trop longtemps. Toutefois, lors du programme Apollo, la traversée de ces ceintures s'est révélée assez rapide pour que tout danger soit écarté.

Sans ces ceintures de radiations, l'atmosphère terrestre ne jouerait pas un rôle protecteur suffisant contre des radiations les plus énergétiques du Soleil, produites par les éruptions solaires, et qui atteignent, par vagues successives, l'orbite terrestre dans des délais de temps se situant entre environ une demi-heure et trois ou quatre jours dans le cadre d'un vent relativement dense et violent. Les ceintures de Van Allen, du fait de la présence en leur sein de puissants champs magnétiques et électriques, jouent aussi un rôle de piégeage des *rayon-*

nements cosmiques qui sont produits principalement par les explosions d'étoiles massives en supernovæ, les étoiles à neutrons et les pulsars, les noyaux de galaxies actives comme, par exemple, les galaxies de Seyfert. Caractéristiques de noyaux atomiques dissociés de leurs électrons, d'électrons et de positons (antiparticules de l'électron découvertes en 1932 par Anderson et mesurées par Blackett), ces rayons cosmiques sont majoritairement composés d'hydrogène (pour 90 %), d'hélium (9 %) et de petites quantités de béryllium, de bore et de lithium. Contrairement aux composants du spectre électromagnétique, les rayons cosmiques ont des trajectoires brisées et hétéroclites à cause de leur propension à être *déviés* par les champs magnétiques qu'ils rencontrent dans le milieu interstellaire. Leur énergie, qui peut être considérable, se mesure en électronvolts, kilo-électronvolts (keV), méga-électronvolts (MeV) et giga-électronvolts ! Selon les astrophysiciens, la durée de vie de ces rayonnements cosmiques, à cause des obstacles qu'ils rencontrent lors de leur parcours, serait au maximum de 8 à 10 millions d'années.

Si l'on fait abstraction du rayonnement cosmique, auquel notre Soleil contribue pour une faible part, et du vent solaire dont l'origine est due à des phénomènes magnétiques et non à des phénomènes de fusion nucléaire, notre étoile produit des

émissions que certains physiciens (comme, par exemple, le Français Roger Gendrin) classent en trois catégories : la lumière (qui n'est pas déviée par le champ magnétique terrestre et dont la constante solaire varie autour de la valeur de $1\,367\text{ W/m}^2$), les particules de basse énergie (environ 1 keV) et les particules de haute énergie (environ 200 MeV). En fait, la situation réelle, révélée par les sondes spatiales, est plus *complexe* puisque l'on détecte des sursauts gamma, un champ magnétique en expansion avec ses lignes de force accompagnant le vent solaire et les ondes de choc dans leurs rencontres avec les divers corps planétaires de notre système solaire intérieur (Mercure, Vénus et la Terre). La sonde spatiale Voyager 2 a d'ailleurs révélé que ce vent solaire, dans ce cas très dilué, atteignait même les orbites d'Uranus et de Neptune ! A tout cela, il faut ajouter que le Soleil produit des rayons X ainsi que des particules énergétiques émettant sur diverses bandes du spectre électromagnétique (rayonnement UV, visible, infrarouge et radio). Il ne faut pas oublier non plus, accompagnant le vent solaire, les *ondes plasmiques*. Ces ondes magnétiques (« ondes d'Alfvén », du nom d'un physicien suédois, prix Nobel et particulièrement hostile à la théorie cosmologique du *big bang*) se propagent jusqu'à des distances éloignées du Soleil grâce au gaz ionisé du vent

solaire et au champ magnétique sur lequel elles se greffent.

Une des découvertes les plus étonnantes en astrophysique, grâce aux travaux de Schwabe, a été le fameux *cycle de onze ans* lié aux taches solaires qui sont l'expression de forts champs magnétiques variables et souvent à la source d'éruptions spectaculaires. Grâce aux satellites nous avons découvert aussi que les variations induites par ce cycle solaire et ces taches changeaient sensiblement selon la longueur d'onde d'émission, avec des conséquences sur les plus hautes couches atmosphériques qui sont chauffées par ces particules solaires. Par exemple, pour ce qui concerne les rayonnements reçus et parmi les plus énergétiques (X et UV), les pics maxima d'activité solaire se traduisent par un niveau « *anormal* » de ces rayonnements. Pour l'ultraviolet, nous savons que ce type de longueur d'onde contribue à la photo-ionisation des molécules ainsi que des atomes de la haute atmosphère, et a pour conséquence la formation de l'ionosphère terrestre qui joue un rôle clef dans la propagation des ondes radio. On a constaté que l'augmentation du rayonnement UV reçu provoquait, entre autres, une *perturbation* de la transmission de ces ondes radio. Pour le rayonnement X, le niveau de perturbation constaté, lors des périodes de Soleil agité, est encore plus grand qu'en UV car le facteur inhibant et destructif est multiplié, ici, de *plusieurs centaines de fois* par rapport aux périodes de Soleil calme. Le satellite américain *Samlex* a permis une découverte très intéressante : ces variations d'émission en X et en UV, jointes également à une augmentation brutale du flux de vent solaire passant par les cornets polaires, induiraient des phénomènes de photo-ionisation et de photodissociation sur la couche d'ozone. Une pièce de plus à verser dans le dossier de ce phénomène complexe et controversé... Notons enfin, parmi les découvertes effectuées par des sondes spatiales concernant les flux cycliques de l'activité solaire, que l'on a identifié des variations saisonnières de la magnétosphère.

Au cours des dernières décennies, le proche environnement de la Terre a été la cible de nombreuses missions de satellites (les satellites américains



Les quatre satellites Cluster de la mission originelle ont été perdus lors de l'échec du lancement d'Ariane 5 en juin 1996. La seconde mission comprend une sonde de réserve (Phoenix), sur laquelle avaient été effectués des essais thermiques et structuraux, et trois sondes nouvellement construites après la décision de l'Esa de relancer la mission en 1997.

de la série Explorer, IMP, OGO, Vela, ATS et ERS ; les satellites soviétiques Prognos et Electron) qui ont contribué à nos connaissances actuelles sur le vent solaire, la magnétosphère, leurs interactions et parfois leurs conséquences sur la haute atmosphère terrestre. Pour comprendre le niveau de sophistication atteint par la programme européen Cluster, il faut savoir que sa mise au point est le fruit d'une longue expérience acquise par l'Esa, à l'époque où elle était encore dépendante des lanceurs américains pour la mise en orbite de ses satellites. L'agence européenne a en effet développé ses propres instruments de recherche ou participé à des programmes en collaboration avec les Etats-Unis. Les Européens ont fait effectuer par la Nasa, en 1977 et 1978, le lancement de deux satellites de leur programme Geos (Geostationary Earth Orbiting Satellite). Geos 1, qui fut placé sur une mauvaise orbite à cause d'une défaillance de son lanceur Thor-Delta, a été en partie sauvé par l'Esa en réussissant à en reprendre le contrôle et à le positionner sur une orbite elliptique de sauvegarde de 38 310 km d'apogée pour 2 050 km de périégée. Avec Geos 2 (qui fonc-

tionna jusqu'en 1981), Geos 1 (dont le programme fut arrêté en 1979) contribua beaucoup à l'opération internationale de cartographie de la magnétosphère mise au point par le Comité spécial pour l'étude de la physique des relations Terre-Soleil (Scotep) et le Comité pour la recherche spatiale (Cospar). Une découverte effectuée par Geos 1 a été l'étonnante variation de la magnétosphère qui se déforme quand la pression du vent solaire devient plus forte. Geos 1 fut deux fois « éjecté » de la magnétosphère sous la poussée du vent solaire ! Quant à Geos 2, il a découvert, dans cette magnétosphère, des plasmas thermiques susceptibles d'engendrer de grandes variations d'ondes observables depuis des stations au sol.

Toujours vers la fin des années 70, l'Esa a participé avec la Nasa au programme ISEE (International Sun Earth Explorer) destiné à l'étude de la magnétosphère terrestre et aux interactions Terre-Soleil. Ce programme comprenait trois satellites ISEE 1, ISEE 2 et ISEE 3, le premier et le troisième étant développés sous le contrôle de la Nasa, tandis que le deuxième était construit sous la responsabilité de l'Esa. ISEE 1 et 2

furent lancés ensemble, en 1977, par la même fusée Thor-Delta sur une orbite 280-140 000 km et opérèrent à travers la magnétosphère un peu à la manière d'un interféromètre, avec des écartements variables selon les divers besoins de la mission. Ces deux sondes apportèrent une meilleure compréhension des variations permanentes, dans lesquelles joue aussi la rotation de la Terre, et des phénomènes dynamiques de cette magnétosphère. ISEE 3 (lancé en 1978) a été placé, comme le sera plus tard le satellite solaire européen Soho, sur une orbite dite de « halo » au point de Lagrange L1 situé à 1,5 million de kilomètres de la Terre. On doit à ce satellite une bonne part de nos connaissances sur les caractéristiques du vent solaire avant son arrivée au voisinage du système Terre-Lune.

Qu'attend-on de Cluster II ?

La lecture de tous ces développements pourrait nous amener à nous poser les questions suivantes : pourquoi de nouvelles sondes pour étudier un domaine ayant déjà fait l'objet de nombreuses investigations ? Qu'apportent de nouveau les sondes Cluster ?

Toutes les missions qui ont précédé Cluster ont été handicapées par le fait que les phénomènes impliquant les interactions entre le champ magnétique terrestre et le vent solaire ne pouvaient être vues en trois dimensions. En conséquence, il était difficile de relier entre elles les variations spatiales et les variations temporelles des phénomènes observés. Ce qui rend les choses encore plus compliquées, c'est que le vent solaire et la magnétosphère terrestre ne sont pas toujours séparés d'une façon nette et tranchante mais plutôt soumis à des processus d'interactions complexes. Il est indispensable, pour la compréhension des phénomènes observés, de pouvoir effectuer des investigations simultanément sur plusieurs endroits des régions concernées. A toutes ces difficultés, la mission Cluster II apporte une solution par sa vision en *trois dimensions* de la structure des régions de la magnétosphère. Les

quatre sondes, identiques et équipées chacune de onze instruments scientifiques tout aussi identiques, seront d'abord placées sur une orbite circulaire, puis une orbite de transfert avant une phase d'inclinaison de l'orbite de 64,8° à 90°. L'orbite finale aura un périégée de 25 500 km pour une apogée de 125 000 km, et passera à travers la magnétosphère et la zone d'onde de choc là où le champ magnétique terrestre se heurte de front à l'arrivée du vent solaire. Au cours de leurs orbites, les sondes Cluster étudieront en particulier les régions de la magnétosphère sous l'influence du Soleil qu'elles parcourront en modifiant leur emplacement si nécessaire grâce aux impressionnantes réserves de carburant qu'elles emportent. On s'est en effet aperçu que les variations saisonnières de la magnétosphère avaient des conséquences sur les orbites des satellites.

L'impératif de l'étude en trois dimensions de la structure des régions de la magnétosphère implique que la distance entre les quatre sondes Cluster puisse varier de quelques centaines de kilomètres dans la région de l'onde choc à plusieurs milliers de kilomètres dans la région de la queue magnétosphérique non éclairée par le Soleil. Quelles que soient les distances variables entre les quatre sondes, celles-ci voleront en permanence les unes par rapport aux autres en *formation tétraédrique* (pyramide triangulaire). C'est en effet la configuration requise pour opérer en trois dimensions, les distances de séparation pouvant être adaptées de façon optimale en fonction des objectifs à mesurer. La mission Cluster II a été conçue pour l'étude des phénomènes à petite échelle et à grande échelle (de quelques centaines à quelques milliers de kilomètres).

A petite échelle les principaux objectifs de Cluster seront les suivants :

- physique de la zone frontière entre deux plasmas ;
- mécanismes d'accélération des plasmas pendant leur reconfiguration à grande échelle ;
- turbulences magnétohydrodynamiques ;
- ondes de choc sans collision ;
- microstructures des plasmas et des champs dans le vent solaire.

A plus large échelle, les son-

des Cluster auront pour objectifs d'étude :

- l'onde de choc et la turbulente région de transition entre l'onde de choc et la magnétosphère ;
- la magnétopause qui limite l'influence du champ magnétique terrestre ;
- les cornets polaires qui offrent des possibilités de pénétration pour le plasma solaire. En fait, une petite partie de ce plasma arrive, par ce biais, à passer vers les hautes couches atmosphériques où les particules venues du vent solaire créent des phénomènes d'ionisation et stimulent les atomes ainsi que les molécules en leur faisant émettre de la lumière.

Que ce soit à petite ou à grande échelle, les sondes Cluster sont particulièrement bien armées pour effectuer des investigations immédiates sur les changements rapides qui interviennent dans la magnétosphère. En effet, lorsque de brusques arrivées de vent solaire sont induites par des éruptions et que des phénomènes magnétiques de grande ampleur se produisent à la surface de notre étoile, il faut nécessairement des mesures fines des champs électriques et magnétiques, du plasma et des particules énergétiques.

De plus, des dispositions exceptionnelles ont été prises pour assurer aux sondes un niveau élevé de propreté magnétique et électromagnétique, de façon à permettre les mesures sensibles exigées par les objectifs de la mission : Cluster peut effectuer un *contrôle actif* du potentiel électrostatique par rapport au plasma environnant. D'autres dispositions ont été prises pour protéger les sondes des flux de particules ionisées de protons et d'électrons extrêmement énergétiques auxquels elles seront soumises. En effet, il est possible que ces flux provoquent des pannes en créant des différences de potentiel entre les diverses parties du satellite.

Il existe aussi d'autres problèmes assez sérieux dus aux phénomènes parasites créés par le « bruit électromagnétique » de certains instruments de bord qui peuvent gêner d'autres expériences à mesures fines. Ce problème parfaitement identifié a été résolu dans le passé, aussi bien sur des sondes américaines que soviétiques ou européennes, grâce

Fiche technique de Cluster II

Chaque sonde Cluster a un diamètre de 2,9 m pour une hauteur de 1,20 m. La masse totale de chacune de celles-ci est de 1 200 kg répartis de la façon suivante :

- masse sèche du satellite sans charge utile : 478 kg ;
- propergols : 650 kg ;
- charge utile scientifique : 72 kg.

La masse inhabituelle de propergols s'explique par les nombreuses manœuvres qui seront effectuées par les sondes depuis les changements d'orbite successifs originaux jusqu'aux configurations variables de la mission.

Le centre commun des opérations scientifiques sera situé au Rutherford Appleton Laboratory, en Grande-Bretagne, qui coordonnera les équipes scientifiques responsables.

Chaque sonde embarque à la fois des expériences passives et des expériences actives. Les expériences passives se contentent de mesurer les phénomènes se déroulant dans les régions observées : mesure des champs magnétiques, comptage des particules, mesure de l'énergie et de la distribution angulaire de celles-ci. Les expériences actives (telles que Whisper et EDI) consistent à créer artificiellement des événements ou des phénomènes et à mesurer leur impact ainsi que leur interaction avec le plasma de la magnétosphère ou du vent solaire.

Chaque sonde emporte les onze instruments scientifiques suivants auxquels, pour certains, participent la Nasa et la communauté scientifique américaine :

- Staff : analyse spatio-temporelle des variations de champ. Sert à déterminer de quelle manière les champs magnétiques évoluent en fonction du temps. (Principal investigateur : N. Cornilleau-Wehrin, CNET-Paris, France.)
- EFW : champs et ondes électriques. Observera les modifications du champ électrique autour du satellite. Cette expérience sensible utilise de longs mâts. (Principal investigateur : G. Gustafson, IRF-Uppsala, Suède.)
- Whisper : ondes à haute fréquence et sondeur de densité par relaxation. Exécute des mesures actives de la densité du plasma chaud conducteur émis par le Soleil. (Principal investigateur : PME Decréau, CRPE Orléans, France.)
- WBD : données à large bande. Mesure le champ électrique à très hautes fréquences jusqu'à plusieurs cen-

taines de kilohertz. (Principal investigateur : D.A. Gurnett, université d'Iowa, Etats-Unis.)

- DWP : processus d'ondes numériques, cerveau de commande et de calcul pour l'ensemble d'expériences sur les ondes (STAFF, EFW, Whisper, WBD). (Principal investigateur : L.J.C. Woolliscroft, université de Sheffield, Grande-Bretagne.)

- FGM : sonde magnétométrique. Mesure, par magnétomètre, des champs magnétiques stables contrairement à STAFF qui suit les modifications rapides du champ magnétique entourant le satellite. (Principal investigateur : A. Balogh, Imperial College, Londres, Grande-Bretagne.)

- EDI : instrument de mesure de dérive d'électrons. Utilise les technologies les plus récentes pour émettre un faisceau d'électrons selon un trajet circulaire de plusieurs dizaines de kilomètres autour du satellite. Un récepteur, placé de l'autre côté du satellite, est chargé de capter le faisceau des électrons en retour. Le point d'incidence est soumis à l'influence de l'intensité du champ électrique. (Principal investigateur : G. Paschmann, MPI-Garching, Allemagne.)

- CIS : spectromètre ionique. Analyse la composition et les caractéristiques dynamiques des particules qui entourent le satellite, plus particulièrement en ce qui concerne les ions qui se déplacent le plus lentement dans l'espace. (Principal investigateur : H. Rème, CESR-Toulouse, France.)

- Peace : analyseur d'électrons et de courants plasmatiques. Analyse la répartition, la direction, le flux et la distribution d'énergie d'électrons de basse à moyenne énergie. (Principal investigateur : A.D. Johnstone, MSSI-Holmbury, Grande-Bretagne.)

- RAPID : recherche par détecteurs adaptatifs à visualisation de particules. Se compose principalement d'une « chambre noire » dont le sténopé laisse pénétrer les électrons et les ions porteurs des plus fortes énergies. (Principal investigateur : B. Wilken, MPI-Lindau, Allemagne.)

- Aspic : régulation active de potentiel de satellite. Cet instrument est chargé de « mettre à la masse » le satellite en le débarrassant de son excès de charge positive par l'émission d'ions d'indium. (Principal investigateur : W. Riedler, IWF Graz, Autriche.)

à des mâts et bras extensibles sur lesquels se trouvent certains instruments (comme les magnétomètres) dont le bon fonctionnement est ainsi assuré par leur éloignement par rapport aux satellites.

Il est bien évident que le niveau scientifique du projet implique aussi une organisation rigoureuse pour assurer le suivi et les transmissions au niveau du sol. L'Esa estime les données transmises au sol pendant les deux ans de durée de vie de la mission à 290 millions de pages imprimées ! Les signaux échangés avec les satellites transiteront par

une antenne de 15 m installée à Villafranca (Espagne) et seront traitées au Centre d'opérations spatiales ESOC de l'Esa situé à Darmstadt, en Allemagne, et qui assurera le contrôle de la mission. Les informations transmises par les quarante-quatre instruments seront diffusées auprès de huit centres de données, six en Europe, un aux Etats-Unis et un autre en Chine. Le contretemps dû à l'échec, en juin 1996, de la première mission Cluster aura eu toutefois des conséquences positives : les quatre sondes Cluster II pourront opérer au moment où le pic d'activité solaire

de onze ans de notre étoile sera au maximum du point de vue des taches solaires, des rayonnements et du vent solaire.

Comme le déclare Philippe Escoubet, responsable scientifique du projet à l'Esa : « *Cluster II nous donnera les meilleures informations à ce jour sur la manière dont le Soleil agit sur le proche environnement terrestre. Ce sera la première fois que nous pourrions étudier le champ magnétique de la Terre avec quatre instruments identiques offrant autant de points de vue différents.* »

■