

croyaient que les ondes et les diverses perturbations du champ seraient minimales, parce que le vent solaire s'écoule régulièrement à partir des trous coronaux polaires.

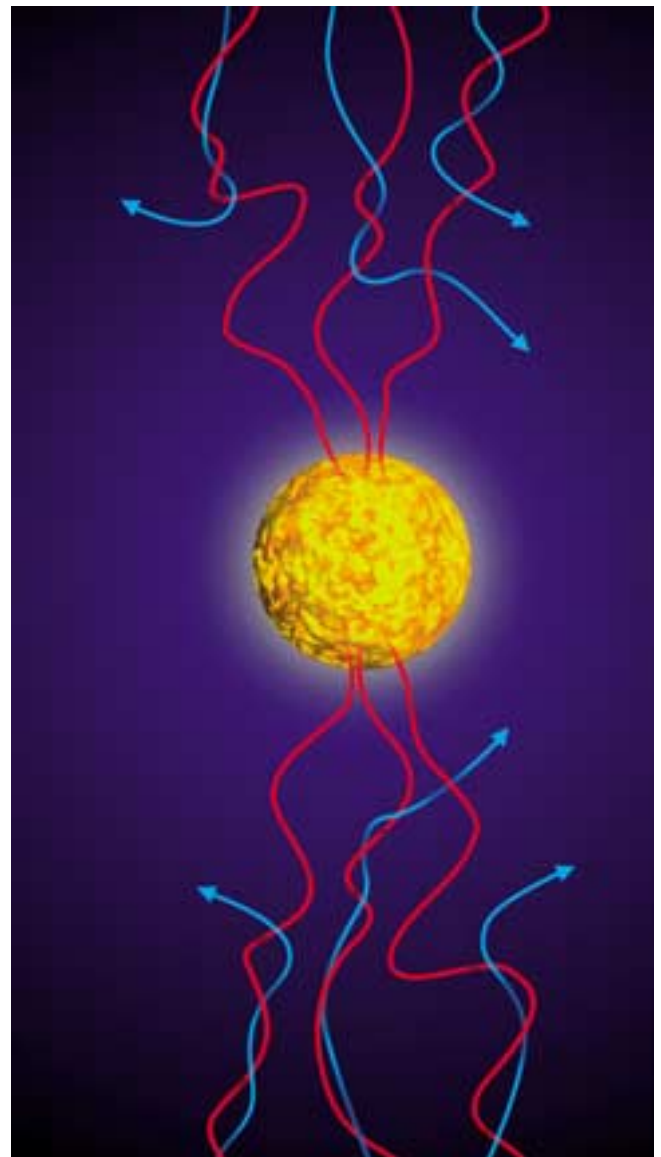
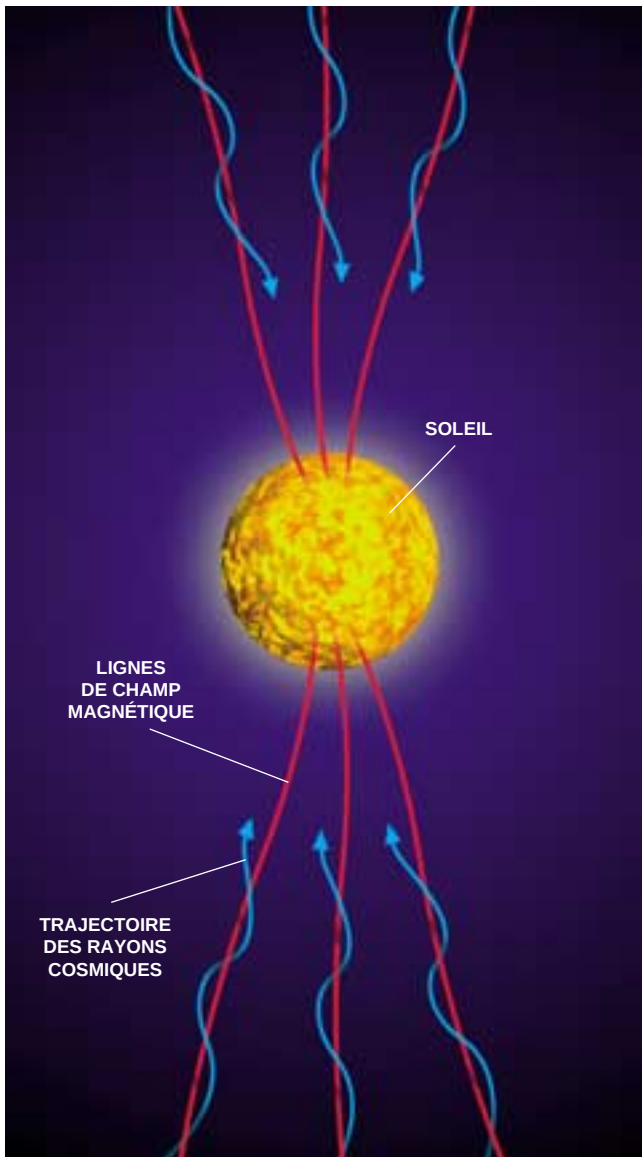
Les mesures de la sonde *Ulysse* ont montré que les rayons cosmiques sont à peine plus abondants au-dessus des pôles du Soleil qu'au voisinage de l'équateur : la sonde a trouvé des ondes qui rident le champ magnétique polaire, s'opposant au passage des rayons cosmiques vers les calottes polaires. De telles perturbations dévient les particules cosmiques durant leur périple dans l'héliosphère ; au total, les rayons cosmiques atteignant l'héliosphère interne sont homogénéisés par le champ magnétique tumultueux,

comme les composants d'un cocktail dans un shaker.

Prendre de la vitesse

Les rayons cosmiques ne sont pas les seules particules présentes dans l'héliosphère : d'autres particules rapides y naissent. D'une composition similaire à celle des ions du vent solaire, elles se meuvent considérablement plus vite que lui. Mieux encore, elles se déplacent si vite qu'elles n'ont pu gagner leur énergie élevée par chauffage ; apparemment ces ions très rapides sont accélérés par un phénomène analogue à celui qui est mis en œuvre dans les accélérateurs de particules nommés cyclotrons.

Dans un cyclotron, les particules chargées qu'on injecte sont piégées par un champ magnétique intense autour duquel elles tournent en spirale, tout en recevant de l'énergie d'un champ électrique oscillant. Dans l'espace, des champs électriques et magnétiques intenses n'apparaissent que dans des circonstances particulières, par exemple lorsque des bouffées de vent solaire rapide rencontrent des flots plus lents, devant eux : un front incurvé de hautes pressions se forme, créant de grandes ondes magnétiques qui se propagent vers l'avant et vers l'arrière. Ces ondes magnétiques s'intensifient progressivement, telles les vagues qui approchent du rivage, et elles forment finalement des ondes de choc, de



4. AVANT L'ENVOI DE LA SONDE *ULYSSE*, on croyait que les rayons cosmiques étaient guidés par les lignes de champ magnétique vers les calottes polaires du Soleil (à gauche). Toutefois la sonde a montré que ces lignes de champ magnétique polaires sont

tordues par des ondes magnétiques (à droite) : leurs irrégularités, qui sont approximativement de la même taille que le rayon de giration des particules, gênent l'écoulement des rayons cosmiques vers le Soleil.

minces couches où les propriétés du vent solaire changent brusquement.

Les mesures effectuées par les sondes qui ont précédé *Ulysse* ont démontré que de telles ondes de choc accélèrent parfois les particules considérablement. Voilà pourquoi les particules énergiques apparaissent régulièrement dans le voisinage de la Terre, deux fois par rotation solaire : l'axe magnétique du Soleil étant un peu incliné vers l'écliptique, notre planète reçoit alternativement un vent solaire lent, issu des environs de l'équateur solaire, et un vent rapide venant d'abord d'une calotte polaire, puis de l'autre ; les alternances engendrent les ondes de choc, et les particules rapides.

Entre la Terre et Jupiter, la sonde *Ulysse* a observé de nombreuses concentrations de particules énergiques associées à de telles ondes de choc. Toutefois, après avoir quitté les basses latitudes, elle cessa d'observer des ondes de choc, parce qu'elle était dans une région où le vent solaire, émis par les calottes polaires du Soleil, est toujours rapide. Pourquoi enregistrerait-elle encore des bouffées régulières de particules énergiques ? Les astrophysiciens étudient ce mystère. Notamment, une équipe du CEA analyse les électrons des rayons cosmiques.

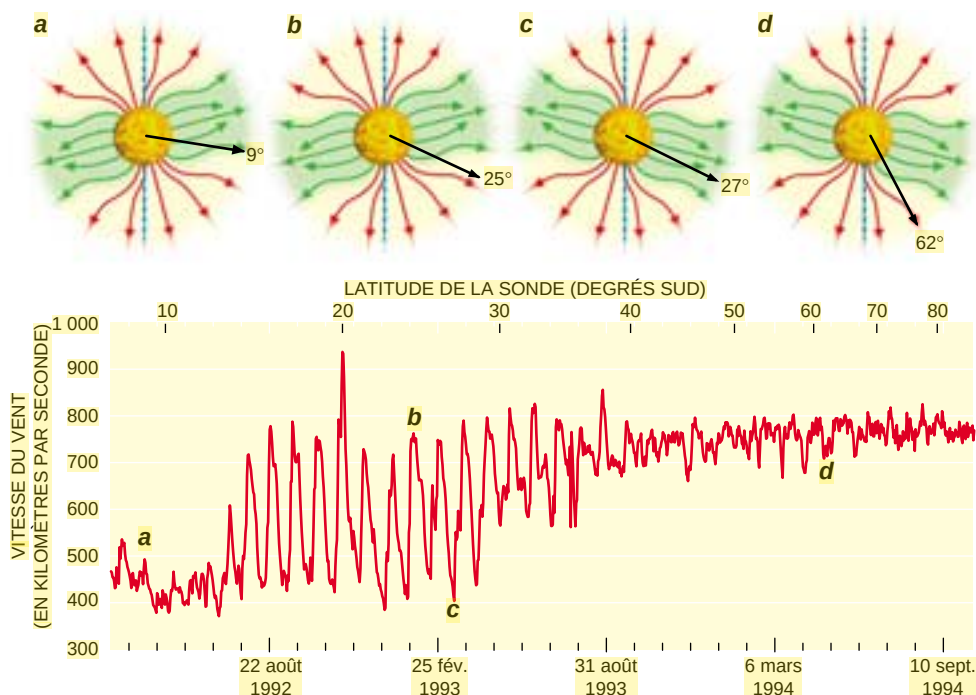
D'autres types de particules solaires énergiques restent également à étudier. Quand des champs magnétiques de directions opposées se rencontrent, une situation qui se produit communément près du Soleil, les deux champs opposés s'annulent, et l'énergie magnétique est transférée aux particules chargées, à proximité. La nature de certaines particules énergiques détectées indique qu'elles provenaient de régions de la basse atmosphère solaire, où l'annihilation de champs est fréquente. Il reste à élucider comment ces particules y ont été accélérées.

Les « rayons cosmiques anormaux » sont également des particules qui sont accélérées dans l'héliosphère. Ce sont initialement des atomes neutres du gaz interstellaire (de l'hélium, de l'azote ou de l'oxygène), qui dérivent lentement dans l'héliosphère. Leur neutralité élec-

trique leur permet de traverser le champ magnétique qui barre l'accès de l'héliosphère interne à la plupart des autres particules. Cependant, au voisinage du Soleil, ces atomes sont ionisés par le rayonnement solaire ou par des collisions avec des ions du vent solaire. Les ions formés sont alors immédiatement happés par le champ magnétique environnant, et ils s'éloignent du Soleil, avec les autres particules. En révélant la nature des ions happés, la sonde *Ulysse* donnera une meilleure compréhension de l'évolution des ions piégés au sein de l'héliosphère et de la nature des atomes qui peuplent l'espace interstellaire.

Avant la mission *Ulysse*, on pensait que l'accélération des ions happés, et la création de rayons cosmiques anormaux, avaient lieu dans l'onde de choc qui limite l'héliosphère, une frontière fixe où le vent solaire ralentit brusquement et s'échauffe. La sonde *Ulysse* a démontré que des ondes de choc qui se propagent à l'intérieur du choc frontalier accélèrent aussi les ions happés.

Le nombre de ces ondes de choc, et de la plupart des phénomènes enregistrés par la sonde *Ulysse* pendant son premier tour polaire de l'héliosphère, varie périodiquement avec une période de onze ans, égale à celle de l'activité solaire.



5. LA VITESSE DU VENT SOLAIRE a été mesurée par la sonde *Ulysse*. Elle varie selon la latitude de la sonde (flèches noires) et selon l'orientation des pôles magnétiques du Soleil. Tant que la sonde était aux basses latitudes (a), elle ne rencontra que des vents équatoriaux lents (en vert). À des latitudes australes supérieures, la sonde s'est heurtée à des vents polaires rapides (en jaune) quand le Soleil tournait son pôle magnétique Sud vers la sonde (b) et à des vents lents quand ce pôle s'écartait (c). Puis, près de l'axe des pôles, les vents étaient continuellement rapides (d).

Par un heureux hasard, la sonde est passée au-dessus des deux pôles en 1994 et en 1995, quand le Soleil était calme ; les conditions aux calottes polaires du Soleil semblaient très simples. Quand la sonde repassera au-dessus des pôles, en 2000 et en 2001, l'activité du Soleil sera maximale. L'équipe d'astrophysiciens qui pilote *Ulysse* est impatiente de découvrir les modifications de l'espace péri-solaire à ce moment. La sonde fonctionne très bien ; elle envoie continuellement ses résultats de mesures vers la Terre, tout en tournant autour du Soleil. Les astrophysiciens ont déjà beaucoup appris, mais ils s'attendent encore à des moissons de résultats importants.

Edward SMITH et Richard MARSDEN sont coordinateurs scientifiques de la mission *Ulysse*.

The High Latitude Heliosphere, sous la direction de R.G. Marsden, Kluwer Academic Publishers, 1995.

R.G. MARSDEN et E.J. SMITH, *Ulysses : Solar Sojourner*, in *Sky and Telescope*, vol. 91, n° 3, pp. 24-31, mars 1996.

Ulysse est présentée sur le réseau Internet à l'adresse : <http://ulysses.jpl.nasa.gov/> and at <http://helio.estec.esa.nl/ulysses/welcome.html>, et <http://www.ifctr.mi.cnr.it/ulysses>