

Cette détente inattendue a été expliquée par d'autres mesures. Avant l'envoi de la sonde, les astrophysiciens mesuraient indirectement le champ magnétique solaire, en examinant comment certains éléments de l'héliosphère absorbent les divers rayonnements lumineux ; comme les longueurs d'onde absorbées dépendent du champ magnétique, ils déduisaient l'intensité du champ magnétique solaire. En utilisant cet «effet Zeeman», ils avaient trouvé que le champ magnétique autour du Soleil ressemblait à celui qui enveloppe la Terre : les lignes de champ magnétique sont concentrées au voisinage des deux pôles magnétiques, localisés près de l'axe de rotation.

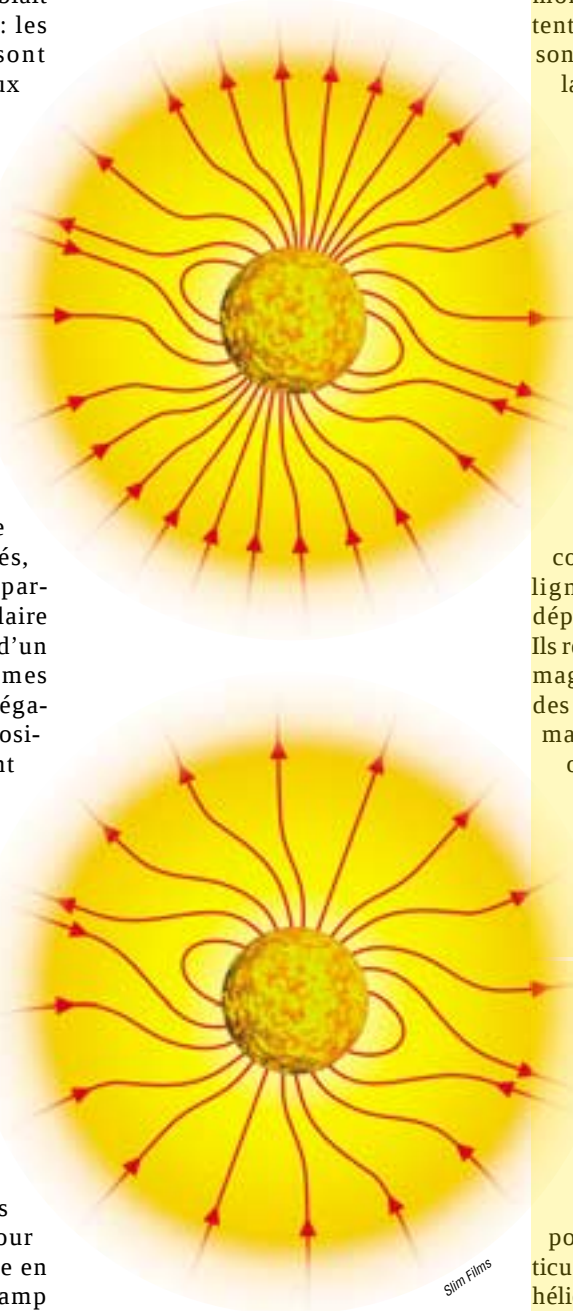
Toutefois la sonde a révélé que, loin du Soleil, le flux magnétique est quasi égal à toutes les latitudes. Les astrophysiciens ont conclu que la détente du vent solaire émis par les pôles doit être causée par des forces magnétiques qui poussent le vent vers l'équateur et étalent les lignes du champ magnétique.

Le champ magnétique et le vent solaire sont étroitement liés, parce que le vent se compose de particules chargées (la couronne solaire est si chaude – à une température d'un million de degrés – que les atomes perdent des électrons, chargés négativement, et forment des ions positivement chargés). Toutefois, tant la couronne chaude que le vent solaire qui en émerge sont électriquement neutres, parce qu'ils se composent d'ions positifs et d'électrons négatifs en nombres égaux. Malgré leur attraction mutuelle, les ions et les électrons du vent solaire ne se recombinaient pas, parce que la densité de matière est faible et que la probabilité de rencontre de deux particules est infime.

Ces particules chargées sont soumises à l'influence des champs magnétiques : elles tournent autour des lignes de champ magnétique en orbites serrées. Inversement, le champ magnétique est modifié par les particules chargées du vent solaire : les mouvements du vent solaire repoussent les lignes de champ, qui oscillent comme des algues prises dans les courants.

Intrus galactiques

Les astrophysiciens savent depuis de nombreuses années que les particules chargées de l'espace interplanétaire ne proviennent pas toutes du Soleil. Certaines sont des noyaux atomiques qui ont été accélérés dans la Galaxie à des vitesses proches de celle de la lumière. On sait détecter les plus énergiques de ces particules lorsqu'elles bombardent l'atmosphère : ce sont les rayons cosmiques.



3. LE CHAMP MAGNÉTIQUE SOLAIRE semblait être concentré aux pôles (en haut), mais la sonde *Ulysse* a révélé que les lignes de champ magnétique sont régulièrement espacées à la surface du Soleil (en bas).

miques. Puis, il y a 40 ans, des satellites ont montré que l'espace est traversé par de nombreuses particules d'énergie inférieure à celle des rayons cosmiques trouvés à la surface de la Terre ; le Système solaire est envahi par des particules variées qui semblent provenir de toutes les directions de la Galaxie.

Le vent solaire doit empêcher certains rayons cosmiques galactiques d'approcher du Soleil : une partie d'entre eux seulement pénètrent dans l'héliosphère interne où, tels des saumons remontant la rivière, ils se heurtent à des obstacles successifs. Quels sont ces obstacles, dans un espace où la densité de matière est si faible que les rayons cosmiques et les particules du vent solaire ne se heurtent pas ? Le vent solaire transporte le champ magnétique dans son mouvement parce que, composé de matière ionisée, il est comme un barreau métallique, qui fige les lignes de champ. Les rayons cosmiques qui arrivent au Soleil sont soumis aux forces que les champs magnétiques exercent sur les particules chargées en mouvement.

Plus précisément, les rayons cosmiques s'enroulent autour des lignes de champ magnétique en se déplaçant dans la direction du champ. Ils rencontrent ainsi, parfois, des ondes magnétiques, qui se propagent le long des lignes de champ magnétique à la manière d'un drapeau qui flotte. Ces ondes provoquent de brusques modifications de la direction du champ magnétique, perturbant le mouvement des particules chargées de la même façon que le ressac repousse un nageur qui s'avance dans la mer.

Avant la mission *Ulysse*, les astronomes supposaient que les rayons cosmiques qui arrivaient au Soleil par les pôles pénétraient plus facilement dans l'héliosphère que ceux qui empruntaient des routes plus équatoriales. Leur hypothèse se fondait sur deux suppositions. D'une part, comme les particules chargées suivent une trajectoire hélicoïdale le long des lignes de champ magnétique, ils avaient pensé que les lignes de champ arrivant aux pôles, plus droites et plus courtes, canalisent mieux les particules dans l'héliosphère. D'autre part, certains physiciens

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.

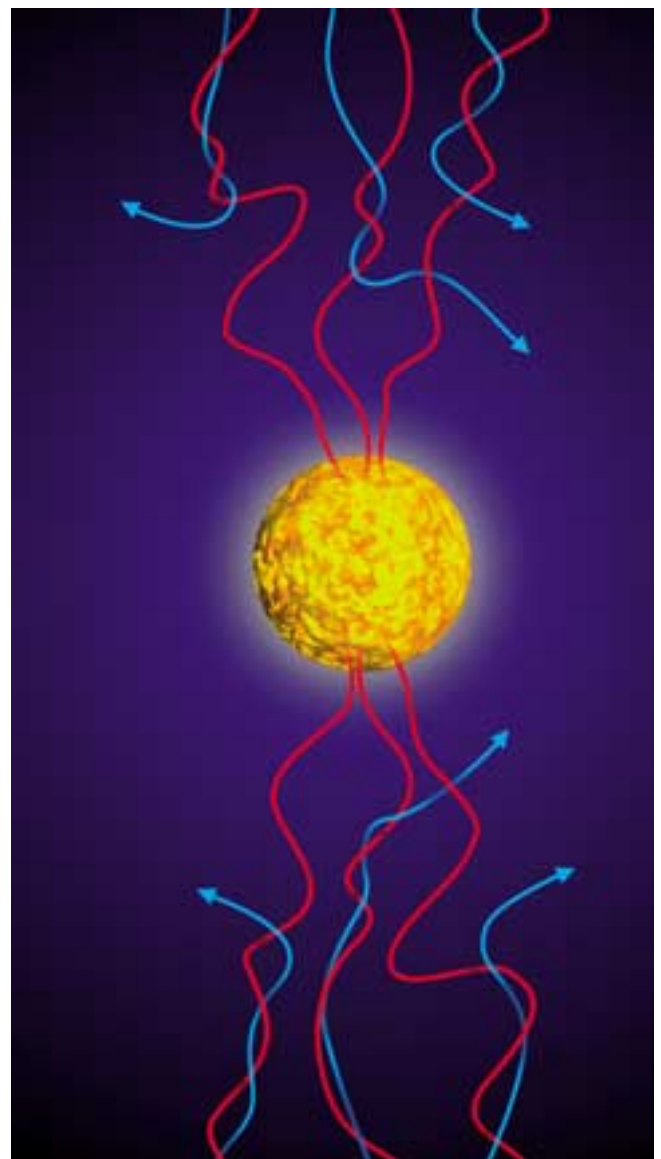
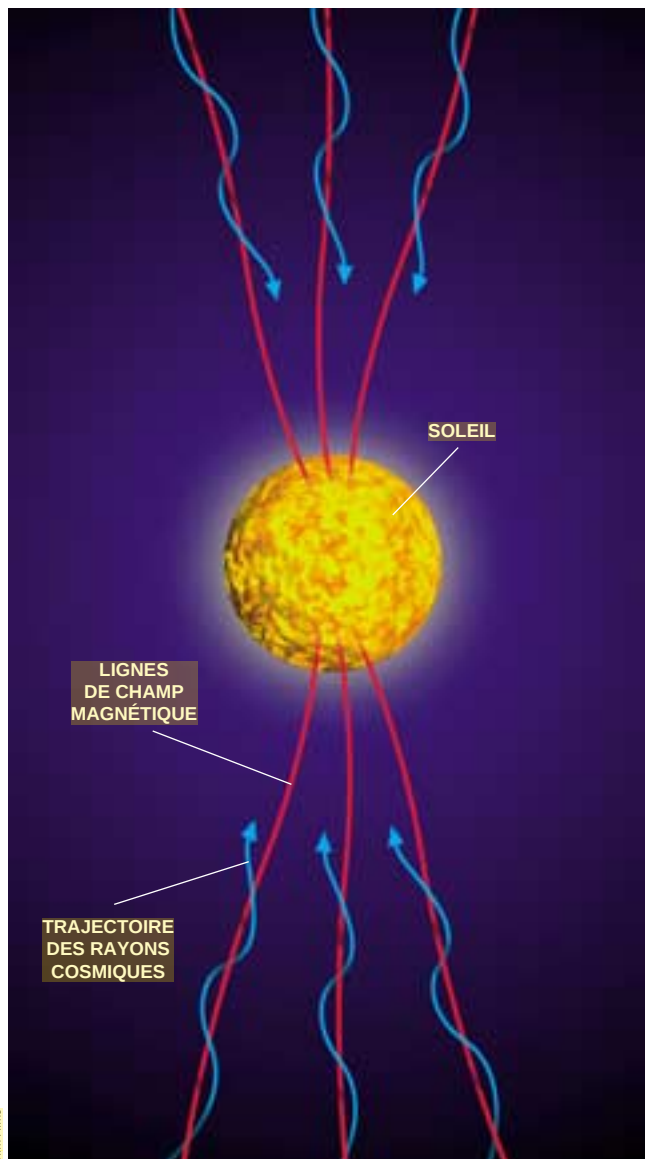
Les mesures de la sonde *Ulysse* ont montré que les rayons cosmiques sont à peine plus abondants au-dessus des pôles du Soleil qu'au voisinage de l'équateur : la sonde a trouvé des ondes qui rident le champ magnétique polaire, s'opposant au passage des rayons cosmiques vers les calottes polaires. De 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.