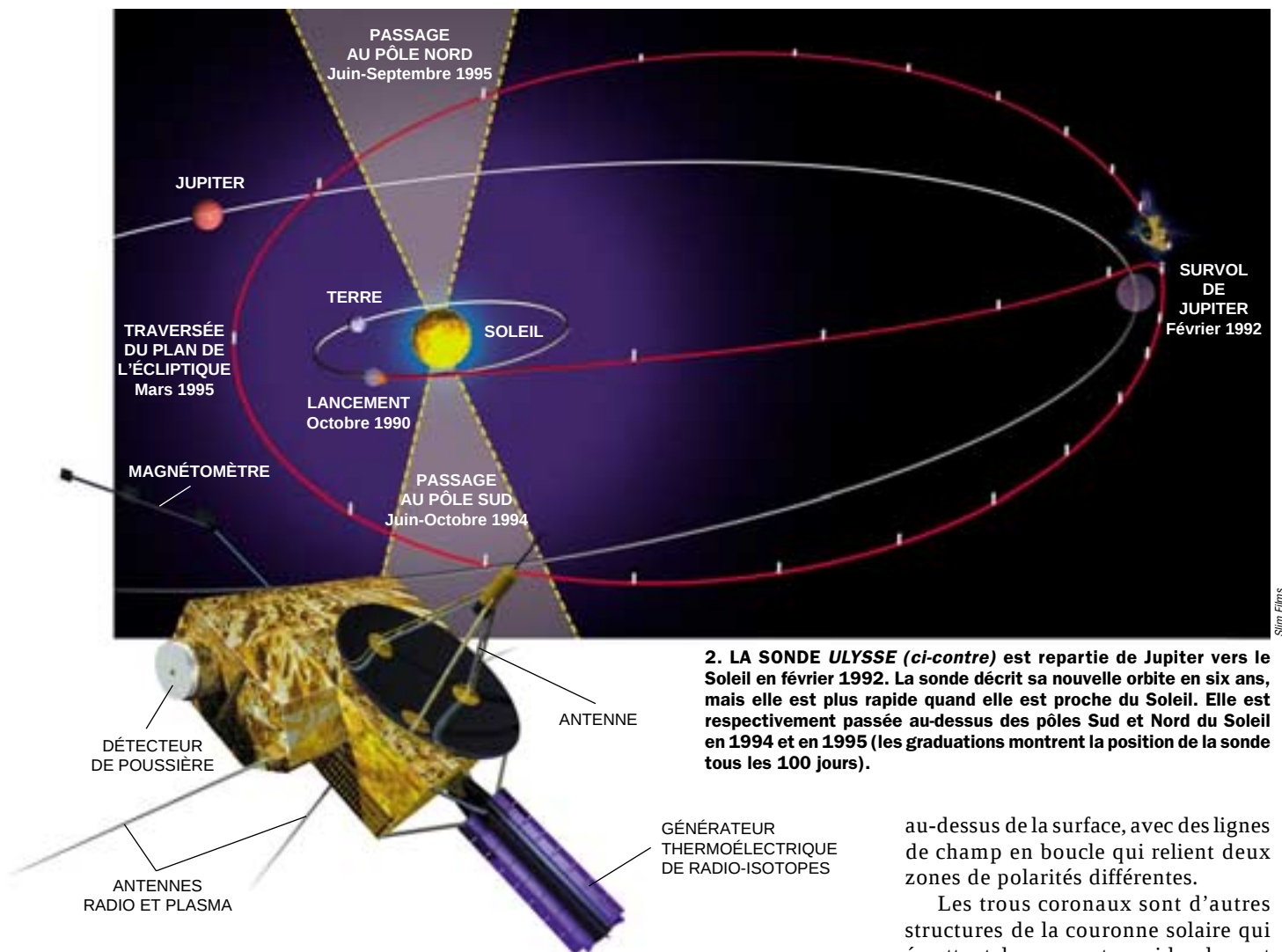




2. LA SONDE ULYSSE (ci-contre) est repartie de Jupiter vers le Soleil en février 1992. La sonde décrit sa nouvelle orbite en six ans, mais elle est plus rapide quand elle est proche du Soleil. Elle est respectivement passée au-dessus des pôles Sud et Nord du Soleil en 1994 et en 1995 (les graduations montrent la position de la sonde tous les 100 jours).

Slim Films

Jupiter en l'occurrence, afin de dévier la sonde dans la direction voulue.

De nombreux ingénieurs craignaient que les rayonnements intenses au voisinage de Jupiter n'endommagent l'électronique sensible emportée par la sonde, mais deux engins spatiaux, *Pioneer 10* et *Pioneer 11*, survolèrent Jupiter au début des années 1970 et démontrèrent qu'ils résistaient aux tempêtes de particules énergiques. Une mission autour des pôles du Soleil fut alors décidée : elle fut nommée *Ulysse*, comme le guerrier grec mythique qui traversa également des territoires inexplorés.

La NASA et l'Agence spatiale européenne collaborèrent à ce projet à partir de 1977, mais le lancement de la sonde *Ulysse* n'eut lieu qu'en 1990 : il fallait étudier l'engin, le fabriquer, le tester. Initialement l'Europe et les États-Unis voulaient construire des sondes séparées, mais les impératifs budgétaires imposèrent que l'Agence spatiale européenne construise une sonde qui serait

envoyée par la NASA ; elle emporterait des instruments européens et américains. Puis un accident désastreux se produisit l'année même où la sonde *Ulysse* devait être chargée dans la navette spatiale : la navette *Challenger* explosa peu après le décollage, immobilisant la flotte de navettes pendant deux ans. Ainsi, en 1986, après neuf années de préparation, la sonde *Ulysse* resta clouée au sol pendant quatre ans.

Feu et vent

Bien avant le début de la mission *Ulysse*, les observations faites du sol ou par des satellites en orbite autour de la Terre avaient montré que le vent solaire n'est pas uniformément émis par tous les points du Soleil. Les boucles brillantes qui s'élèvent très haut au-dessus du Soleil, au voisinage de l'équateur solaire, émettent beaucoup plus de vent solaire que les autres régions. Ces «arches éruptives» suivent le champ magnétique du Soleil, qui s'étend bien

au-dessus de la surface, avec des lignes de champ en boucle qui relient deux zones de polarités différentes.

Les trous coronaux sont d'autres structures de la couronne solaire qui émettent des courants rapides de vent solaire. Ces zones, qui se caractérisent par une absence de matière visible, peuvent apparaître n'importe où à la surface du Soleil, mais ils sont habituellement présents aux calottes polaires.

La sonde *Ulysse* a montré que le vent solaire n'est pas uniforme dans l'héliosphère : après avoir tourné autour de Jupiter et commencé son voyage vers le Sud (c'est-à-dire vers le pôle solaire qui se trouve du même côté que le pôle Sud terrestre), la sonde a traversé une région de vent rapide qui provenait d'un trou coronal situé au pôle Sud du Soleil : les capteurs ont détecté un vent intense, au débit régulier et dont la vitesse moyenne était deux fois supérieure à celle des rafales des latitudes inférieures. Comme la sonde a rencontré ce vent rapide bien avant d'atteindre la latitude du trou coronal méridional du Soleil, on a conclu que le vent polaire se détend considérablement après avoir quitté le Soleil.

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

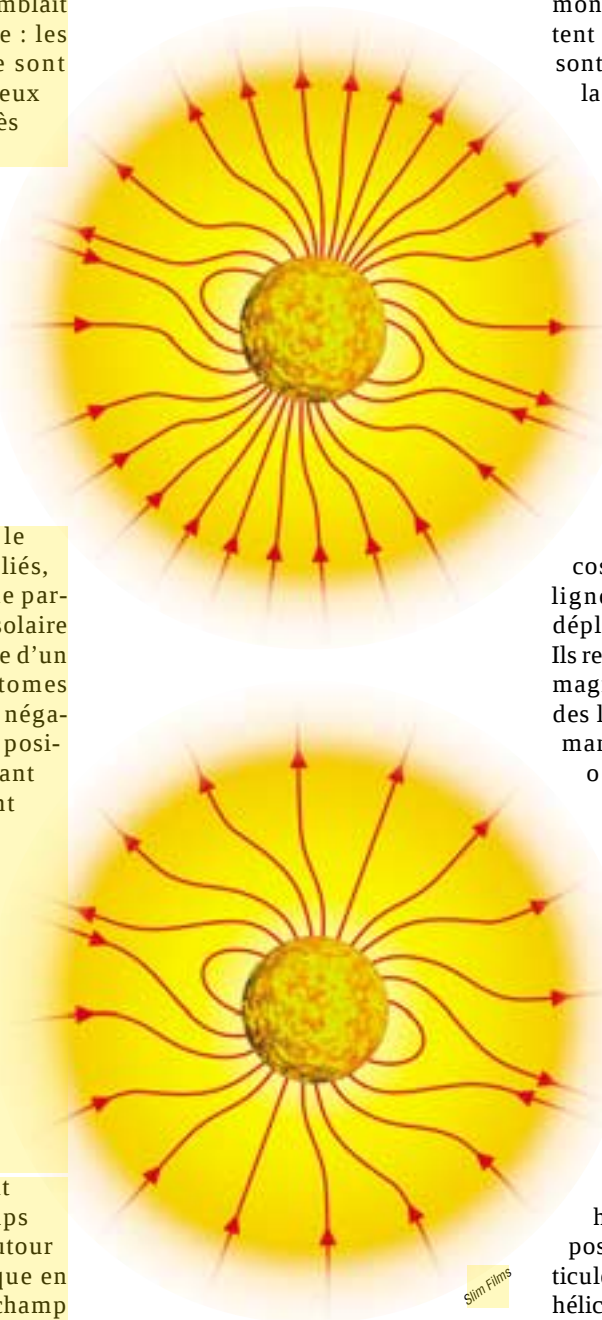
Les astrophysiciens savent depuis de nombreuses années que les particules chargées de l'espace interplanétaire ne proviennent pas toutes du Soleil. Certaines sont des noyaux atomiques qui ont été accélérés dans la Galaxie à des vitesses proches de celle de la lumière. On sait détecter les plus énergiques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

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



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).