

coronale rapide comprime le vent solaire situé devant elle, et accroît ainsi l'intensité du champ magnétique dans la région comprimée et dans le front de l'éjection coronale. Le champ magnétique enveloppe l'éjection coronale, de sorte que la direction du champ magnétique interplanétaire se rapproche de l'axe Nord-Sud et que la reconnexion est plus importante puisque le champ magnétique interplanétaire se combine au champ magnétique terrestre.

Des orages magnétiques moins violents se produisent durant la phase décroissante de l'activité solaire et à

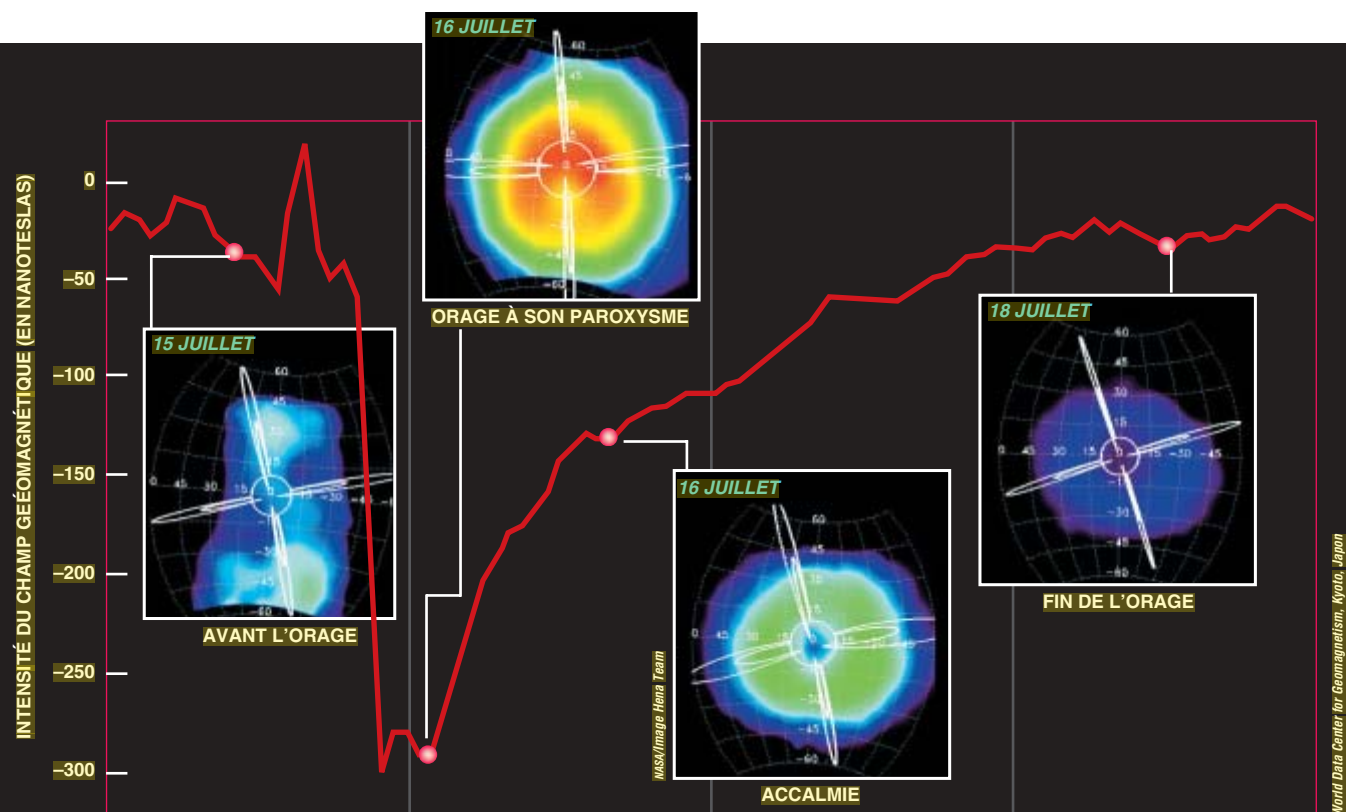
l'approche de son minimum. Bien que les éjections coronales ne soient pas la cause de ces orages récurrents, elles contribuent sans doute à en renforcer l'intensité.

Avec le satellite IMAGE, les astrophysiciens ont obtenu des images globales du déroulement d'un important orage géomagnétique, minute par minute. Le satellite décrit une orbite elliptique polaire, dont l'altitude varie de 1 000 à 46 000 kilomètres, de sorte qu'il observe une bonne partie de la magnétosphère, notamment la magnétopause du côté exposé au Soleil, la partie interne de la queue magnétique et

les régions polaires, les principales «portes d'entrée» dans la magnétosphère des particules du vent solaire.

En pleine tempête (spatiale)

Le satellite IMAGE observe les plasmas de la magnétosphère de plusieurs façons. Il est équipé de trois caméras qui enregistrent les atomes neutres énergétiques et mesurent, indirectement, les flux d'ions. Quand un ion rapide (un ion oxygène chargé positivement, par exemple) entre en collision avec un atome neutre d'hydrogène de la magnétosphère, il arrache parfois l'électron



World Data Center for Geomagnetism, Kyoto, Japon

15 JUILLET 2000



unique de l'atome d'hydrogène et se transforme en un atome neutre. Comme cet atome ne porte plus aucune charge, il n'est plus contraint de se déplacer le long des lignes du champ géomagnétique. Au contraire, il se propage en ligne droite à partir de l'endroit où il a été créé. Les caméras d'IMAGE enregistrent le nombre et l'énergie des atomes neutres provenant d'une région donnée, et les astrophysiciens en déduisent la masse, la vitesse, la direction et la densité des ions de cette même région.

Le satellite surveille également les émissions dans l'ultraviolet. Une caméra mesure la densité des ions d'hélium (portant une seule charge) de la plasmasphère – une région de la magnétosphère interne, qui contient un plasma de basse énergie – en détectant le rayonnement ultraviolet que ces atomes absorbent, puis réémettent. Un autre dispositif d'imagerie dans l'ultraviolet lointain est composé de deux instruments (une caméra à large bande spectrale et un spectrographe) pour observer les aurores boréales, ainsi que des photomètres destinés à détecter les émissions

des atomes neutres d'hydrogène. Enfin, un dispositif d'imagerie du plasma par ondes radio envoie des impulsions qui rebondissent sur les nuages de particules chargées. Il fonctionne comme un radar : les signaux radio réémis renseignent sur la direction, la vitesse et la densité des nuages de plasma.

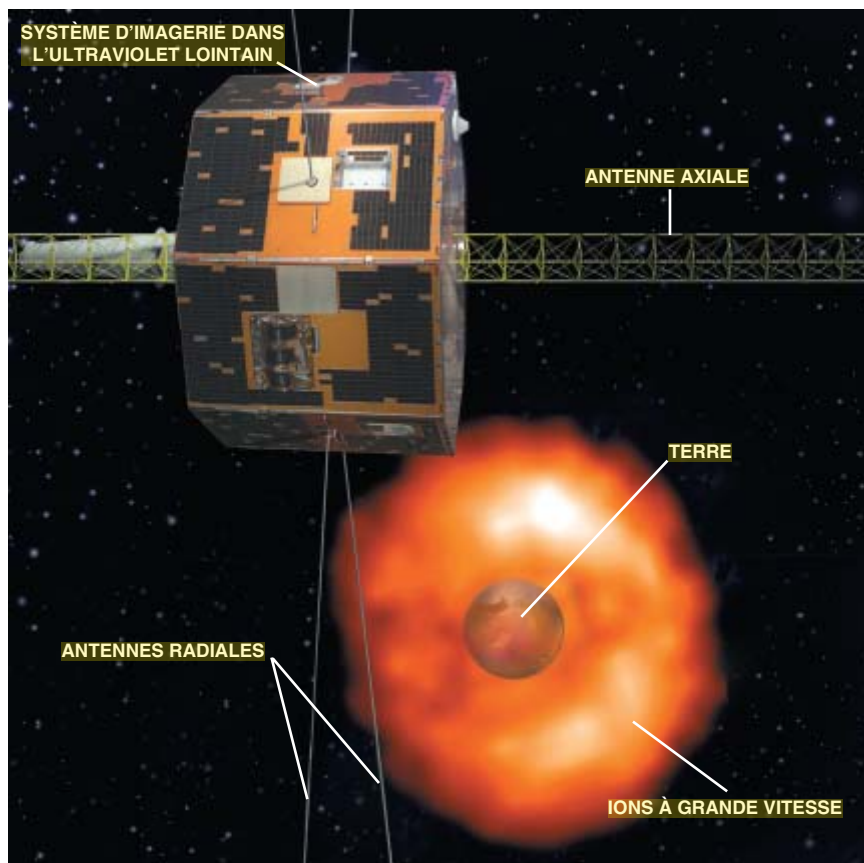
Pendant la tempête du 14 juillet 2000, IMAGE a commencé à enregistrer les effets de la tempête moins de deux minutes après l'arrivée de l'onde de choc de l'éjection coronale sur le champ magnétique de la Terre, qui eut lieu le 15 juillet. La caméra à large bande spectrale a transmis de remarquables clichés de l'aurore boréale déclenchée par la compression du champ (voir l'encadré des pages 50 et 51). Un film réalisé à partir de ces images montre l'illumination soudaine et spectaculaire d'un anneau au-dessus de la région arctique (l'ovale auroral), avec des émissions brillantes qui se dirigeaient à toute allure vers le pôle Nord. L'aurore boréale se dissipa moins d'une heure après le début de la tempête, pour reprendre de plus belle avec l'arrivée d'une seconde

onde de choc vers 17 heures (temps universel). De puissants sous-orages suivirent, lors de la libération explosive dans la haute atmosphère de l'énergie emmagasinée dans la queue magnétique. Les sous-orages et les aurores associées ont duré pendant toute la journée du 15 juillet, et la matinée du 16.

Pendant la phase principale de la tempête, quatre heures après sa naissance, l'intensité du champ magnétique à la surface de la Terre baissa brusquement de 300 nanoteslas par rapport à sa valeur habituelle. Ce phénomène, qui caractérise les orages géomagnétiques, résulte de l'augmentation rapide du courant de l'ovale auroral. Les caméras du satellite IMAGE ont fourni des clichés de ce flux d'ions et d'électrons autour de la Terre à son point culminant, le 16 juillet, puis quand il commençait à décliner. À partir du moment où le transfert d'énergie du vent solaire a commencé à décroître, le flux de plasma vers la magnétosphère interne a ralenti, et l'ovale auroral a perdu des ions plus vite qu'il n'en a reçu de nouveaux. À mesure que le courant s'affaiblissait, le champ magnétique à la surface de la Terre augmentait, mais ne retrouvait sa valeur normale qu'au bout d'un mois.

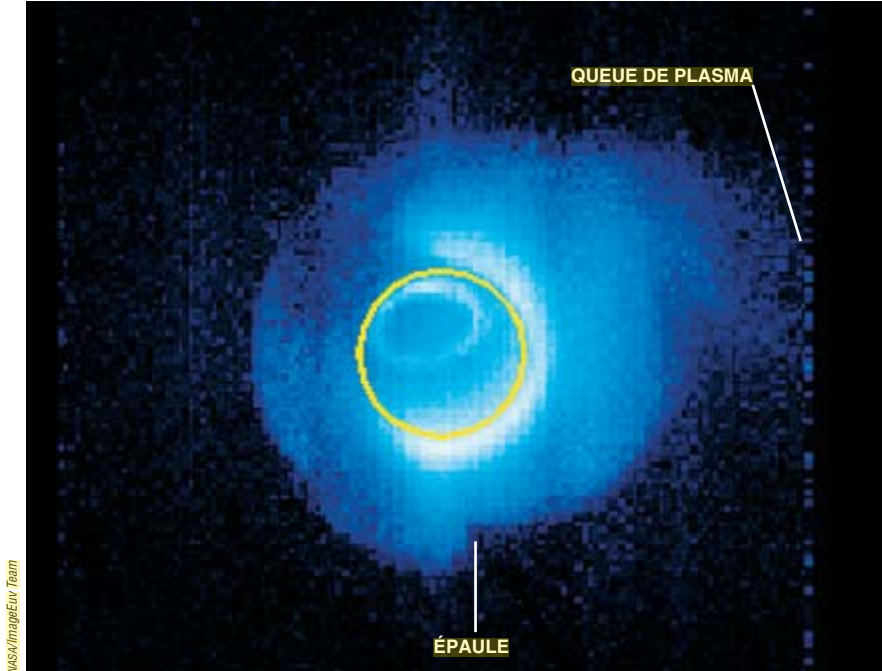
Les orages géomagnétiques modifient également la forme de la plasmasphère. Les particules de la queue de la magnétosphère se dirigent de plus en plus nombreuses vers la Terre, et érodent la plasmasphère, dont elles entraînent les particules vers le côté de la magnétopause exposé au Soleil. Quand la tempête se calme, la plasmasphère est réalimentée par le flux d'ions issus de la haute atmosphère. Grâce à des modélisations, les astrophysiciens supposent que le matériel issu de l'érosion de la plasmasphère forme une longue queue qui s'étend jusqu'à la face de la magnétopause exposée au Soleil, et qui se perd ensuite dans le vent solaire. Cette hypothèse, émise il y a 30 ans, est désormais confirmée par des images du satellite IMAGE (voir la figure 3). Ces images ont aussi révélé des structures inconnues qui soulèvent de nouvelles questions sur les réactions de la plasmasphère aux perturbations magnétosphériques.

Contrairement aux nuages de l'atmosphère terrestre, les nuages de plasma observés par IMAGE sont transparents, et nous manquons de repères pour évaluer leur épaisseur. De nouveaux satellites seront nécessaires pour effectuer des mesures locales dans les



NASA/Image Team, E. Mayfield (Spacecraft)

3. LE SATELLITE IMAGE est représenté sur cette illustration au-dessus d'un nuage d'ions ultra-rapides en rotation autour de la Terre. Cette image a été obtenue à partir de données recueillies par une des caméras d'IMAGE qui envoie des impulsions radio à partir des antennes du satellite et recueille les signaux retour. L'antenne axiale a une longueur égale à dix mètres et les quatre antennes radiales mesurent 250 mètres. Bien que le satellite ne mesure que 2,25 mètres, l'envergure de ses antennes en fait l'un des plus grands détecteurs jamais envoyés dans l'espace.



4. LA PLASMASPHÈRE apparaît comme un nuage bleu clair qui est constitué d'ions (au centre du cercle jaune) et entoure la Terre, sur cette image obtenue grâce au satellite IMAGE pendant un orage géomagnétique d'intensité modérée, le 24 mai 2000. Les résultats ont confirmé l'existence d'une queue de plasma, et ont révélé une structure inattendue que l'on a surnommée l'«épaule».

plasmas, par exemple sur les champs et sur les courants qui commandent leurs mouvements. La prochaine étape de l'observation de la météorologie de l'espace fera intervenir plusieurs satellites en même temps, qui imiteront les avions chasseurs d'ouragans : ils se rendront dans les zones où ont lieu les orages magnétiques.

Des patrouilles de satellites

L'Agence spatiale européenne conduit déjà une nouvelle mission, nommée *Cluster II*, qui a été lancée pendant l'été 2000 (la mission antérieure, *Cluster I*, avait été détruite par l'explosion de la fusée *Ariane* juste après son lancement, en 1996). *Cluster II* est constituée de quatre sondes identiques et rapprochées, destinées à explorer les plasmas turbulents dans la magnétosphère et dans le vent solaire avoisinant. La NASA projette également le lancement d'une mission de ce type en 2006. Elle étudiera la reconnexion, l'accélération des particules chargées, et la turbulence de la magnétopause du côté exposé au Soleil et en des points précis de la queue magnétique, où prennent naissance les sous-orages.

Les agences spatiales envisagent des missions encore plus ambitieuses, qui utiliseront des constellations de satellites : des dizaines de minuscules engins observeront de larges régions de l'espace, de même que des réseaux de satellites météorologiques surveillent

aujourd'hui les conditions atmosphériques sur la Terre. Les premières constellations auront pour mission de contrôler la magnétosphère interne et la magnétopause du côté exposé au Soleil. Chaque appareil, de la taille d'un ballon, enregistrera les caractéristiques des plasmas et des champs magnétiques.

La magnétosphère terrestre constitue un bouclier protecteur, mais imparfait. Ses champs magnétiques intenses protègent les hommes des rayonnements dangereux émis par le Soleil. Toutefois, ils ne suffisent pas à écarter les ondes de choc les plus puissantes issues du Soleil. Comme la zone des cyclones tropicaux, la magnétosphère est sujette à des orages soudains. Pour cette raison, les guetteurs d'orages, tels le satellite IMAGE et les sondes de *Cluster*, sont indispensables pour surveiller les mouvements des particules chargées, traquer les signes avant-coureurs des orages et les prévoir le plus tôt possible.

James BURCH, vice-président de la Division science et ingénierie spatiales de l'Institut de recherche du Sud-Ouest, à San Antonio, au Texas, participe à la mission IMAGE.

S. SUESS et B. TSURUTANI, *From the Sun : auroras, magnetic storms, solar flares, cosmic rays*, in *American Geophysical Union*, 1998.

Sten ODENWALD, *The 23rd cycle : learning to live with a stormy star*, Columbia University Press, 2001.
