

IMAGE lors de cet orage exceptionnel, les astrophysiciens comprennent mieux l'interaction des éjections coronales avec la magnétosphère terrestre.

Calme plat ou tempête ?

Comme il l'est sur la Terre, le temps dans l'espace est extrêmement variable. Les conditions passent du calme plat à la tempête en quelques minutes, et les orages durent quelques heures, voire plusieurs jours. Sur la Terre, le temps change avec les saisons : la météorologie de l'espace a aussi ses propres cycles.

Toutefois, le temps qu'il fait dans l'espace découle de phénomènes physiques différents de ceux qui gouvernent la météorologie sur la Terre. La météorologie terrestre prend place dans le gaz dense et électriquement neutre de la basse atmosphère (les 15 kilomètres de la troposphère et les premiers kilomètres de la stratosphère située juste au-dessus), dont le comportement obéit aux lois de la dynamique des fluides et de la thermodynamique. À l'inverse, la météorologie de l'espace est commandée par le comportement d'un plasma, un mélange de gaz constitué d'ions positifs et d'électrons. Contrairement aux atomes et aux molécules de l'atmosphère terrestre, les particules des plasmas sont sensibles aux champs magnétiques et électriques, qui les guident et les accélèrent dans l'espace qui entoure la Terre.

La météorologie terrestre résulte de l'échauffement de l'atmosphère, des océans et des continents, par le rayonnement solaire. En revanche, dans la magnétosphère, la météorologie est le fruit de l'interaction du champ magnétique terrestre et du vent solaire. Le vent solaire a son propre champ magnétique, qui se déplace avec le plasma éjecté dans l'espace interplanétaire. Ce vent «emporte» le champ magnétique interplanétaire loin du Soleil, et les lignes de force de ce champ «flottant» s'étirent radialement (elles pointent vers le Soleil ou dans la direction opposée). Toutefois, dans certaines conditions, ces lignes de champ s'écartent du plan équatorial du Soleil et acquièrent une composante Nord ou Sud. Quand le champ magnétique interplanétaire s'oriente vers le Sud pendant plusieurs heures, on sait qu'un orage géomagnétique se prépare, comme les astrophysiciens l'ont vérifié lors de l'orage du 14 juillet 2000.

Le vent solaire est surtout constitué de protons, qui représentent environ 80 pour cent de sa masse totale. Le reste est composé de noyaux d'hélium (à peu près 18 pour cent), et d'ions lourds présents à l'état de traces. La densité moyenne du vent solaire sur l'orbite terrestre est de neuf protons par centimètre cube, et sa vitesse atteint 470 kilomètres par seconde. L'intensité moyenne du champ magnétique interplanétaire est égale à six nanoteslas (environ un cinquième de l'intensité du champ magnétique à la surface de la Terre). Les caractéristiques du vent solaire et l'orientation du champ magnétique interplanétaire sont variables, et sont les facteurs déterminants de la météorologie de l'espace.

Tous les astres du Système solaire sont exposés au vent solaire, qui souffle vers l'extérieur du système jusqu'à ce qu'il rencontre les gaz ionisés ou neutres de l'espace interstellaire. Toutefois, le vent solaire ne touche pas directement la Terre ni son atmosphère, car la Terre est protégée par son bouclier magnétique, la magnétosphère, qui l'isole du courant de particules chargées du vent solaire. La forme de la magnétosphère est déterminée par la pression du vent solaire et par le champ magnétique interplanétaire (voir la figure 2). Le vent comprime le champ magnétique sur la face de la Terre éclairée par le Soleil, et l'étire de l'autre côté, où il forme une longue queue, telle une comète. La queue magnétique s'étire sur plus de un million de kilomètres, c'est-à-dire bien au-delà de l'orbite de la Lune.

Entre le vent solaire et la magnétosphère s'étend une mince région frontalière, nommée la magnétopause, où la pression du champ géomagnétique et celle du vent solaire s'équilibrent. Du côté éclairé par le Soleil, cette limite est située à environ 64 000 kilomètres du centre de la Terre (cette distance varie avec la pression du vent solaire). Quand la pression augmente, comme ce fut le cas lors de l'orage du 14 juillet 2000, la magnétopause se rapproche de la Terre, jusqu'à quelque 26 000 kilomètres.

Quand le vent solaire rencontre la magnétosphère, il se produit une onde de choc, nommée «onde d'étrave» à quelque 13 000 kilomètres de la magnétopause (en direction du Soleil). La région comprise entre l'onde de choc et la magnétosphère est connue sous le nom de magnétogaine. Le plasma du vent solaire qui y est confiné est plus lent, plus chaud et plus turbulent que

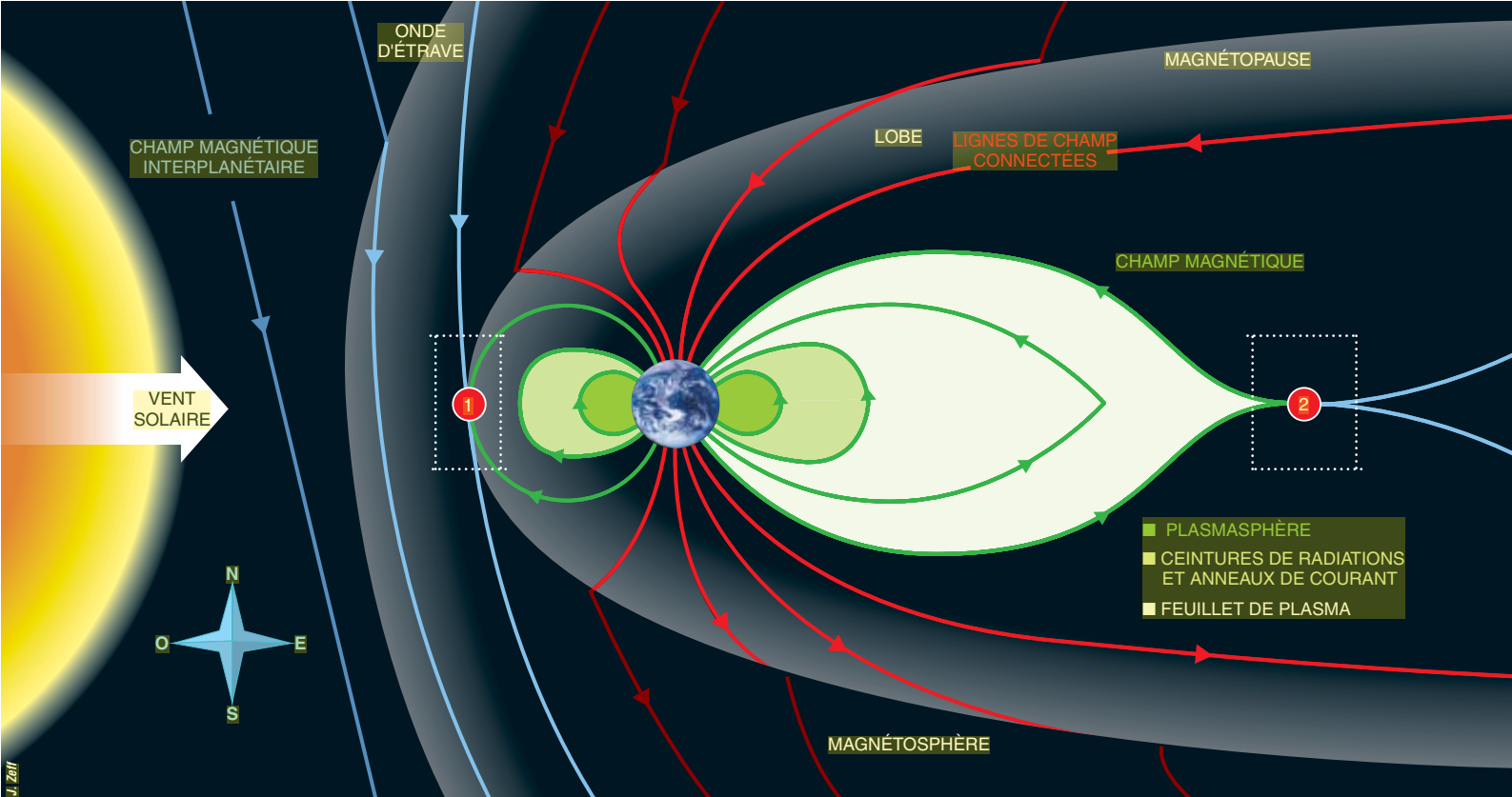
le plasma situé plus en amont, à cause du passage de l'onde de choc.

Les détecteurs des satellites ont montré que les particules chargées autour de la Terre proviennent à la fois du plasma de la magnétogaine (ce sont surtout des protons) et du plasma qui s'écoule de la haute atmosphère aux pôles Nord et Sud (surtout des protons et des ions oxygène). Les proportions de ce mélange varient selon l'état – calme ou perturbé – de la magnétosphère. Pendant les orages magnétiques, des particules chargées bombardent la Terre à des latitudes élevées. Les courants électriques qui en résultent échauffent la haute atmosphère, attirant encore davantage de protons et d'ions oxygène dans la magnétosphère. Ce plasma est stocké, avec celui du vent solaire qui s'est introduit dans la magnétosphère, dans un grand réservoir, le «feuillet de plasma», qui s'étend sur des dizaines de milliers de kilomètres du côté de la Terre qui n'est pas exposé au Soleil. Comment le vent solaire franchit-il la barrière du champ magnétique terrestre et comment modifie-t-il les mouvements du plasma à l'intérieur de la magnétosphère ?

Les aurores boréales

Selon une hypothèse émise en 1960, la magnétosphère serait fermée et imperméable. Dans ce cas, le vent solaire ne pourrait transférer de l'énergie au plasma qui entoure la Terre que par des mouvements ondulatoires, à la surface de la magnétopause. Ces mouvements seraient produits par interaction visqueuse entre le plasma du vent solaire et le plasma de la magnétosphère, tout comme le vent sur l'eau provoque des vagues. En effet, on observe des ondes dans la magnétopause, mais elles ne semblent pas y être responsables de la circulation à grande échelle, ni des perturbations qui s'y produisent. De telles ondes ne permettraient pas non plus une pénétration suffisante du plasma du vent solaire dans la magnétosphère.

Par conséquent, les ondes de la magnétopause ne semblent pas la principale façon dont le vent solaire perturbe la magnétosphère. Il agirait plutôt par un autre mécanisme, la reconnexion magnétique, proposé par le physicien britannique James Dungey en 1961. Selon lui, les lignes du champ magnétique interplanétaire se connectent par moment aux lignes du champ géomagnétique du côté de la magnétopause



2. DES PERTURBATIONS DE LA MAGNÉTOSPHÈRE se produisent quand le champ magnétique interplanétaire porté par le vent solaire s'oriente vers le Sud. Lors d'un phénomène dit de reconnexion, les lignes de ce champ se connectent avec les lignes de force du champ géomagnétique orientées vers le Nord, du côté de la magné-

topause exposé au Soleil (1). De l'énergie et des particules issues du vent solaire se précipitent dans la magnétosphère, en élargissant les lobes Nord et Sud, et réduisent l'épaisseur du feuillet de plasma. Puis les lignes du champ géomagnétique se reconnectent (2), ce qui accélère les ions et les électrons vers la Terre.

topause exposé au Soleil. Cet enchevêtrement des lignes de champ permet le transfert de grandes quantités de plasma du vent solaire vers la magnétosphère.

La reconnexion est plus efficace quand le champ magnétique interplanétaire est dirigé vers le Sud, c'est-à-dire dans la direction opposée à celle du champ magnétique terrestre. Dans de telles circonstances, la reconnexion se produit le long d'une large ceinture équatoriale, ouvrant presque toute la frontière externe de la magnétosphère au vent solaire. Pour d'autres orientations du champ magnétique interplanétaire, la reconnexion a encore lieu, mais elle est localisée à des latitudes plus élevées : l'énergie libérée s'écoule autour de la magnétosphère plutôt que d'y pénétrer.

Le transfert d'énergie magnétique issue du vent solaire change la forme de la magnétosphère. Quand une reconnexion s'amorce du côté de la magnétopause exposé au Soleil, les lignes interconnectées du champ magnétique interplanétaire et celles du champ géomagnétique sont balayées par le vent solaire au-dessus des pôles terrestres, et déversent de l'énergie dans les zones Nord et Sud, nommées lobes, de la longue queue magnétique. Les lobes s'enflent alors sous l'effet de cet apport d'énergie magnétique, tandis

que le feuillet de plasma qui les sépare s'amincit, jusqu'à ce que les lignes de champ des lobes Nord et Sud, dont les directions sont opposées, se touchent et se reconnectent.

Cette seconde reconnexion libère le champ magnétique du vent solaire, qui continue à s'écouler dans le Système solaire. Simultanément, les lignes du champ magnétique de la Terre, qui avaient été étirées en direction de la queue magnétique au moment où les lobes grossissaient, reprennent leur configuration initiale. Ce mouvement brusque des lignes de champ chauffe et accélère les particules du feuillet de plasma, qui sont injectées dans la partie profonde de la magnétosphère (où les lignes de champ sont restées fermées). Certaines des particules qui circulent le long des lignes du champ géomagnétique plongent dans la haute atmosphère au-dessus des pôles de la Terre, entrent en collision avec des atomes d'oxygène et des molécules d'azote, et stimulent l'émission de rayonnements X, ultraviolets, visibles et radio : elles donnent naissance aux aurores boréales. Cette suite d'événements (la reconnexion du côté exposé au Soleil, la reconnexion du côté opposé, puis les aurores boréales) porte le nom de sous-orage magnétosphérique.

Outre le fait qu'elle transfère de l'énergie aux lobes de la queue magnétique, la reconnexion du côté exposé au Soleil intensifie également le champ électrique le long de la queue magnétique. Ce champ augmente à son tour la fuite d'ions et d'électrons du feuillet de plasma vers la magnétosphère profonde. Cet écoulement alimente les ceintures de radiations de la Terre, qui contiennent les particules chargées qui font le tour de la Terre au-dessus de l'équateur entre 6 400 et 38 000 kilomètres d'altitude. Pendant les périodes de reconnexion les plus longues du côté exposé au Soleil (qui se produisent quand l'orientation Sud du champ magnétique interplanétaire perdure), l'écoulement continu de plasma vers la Terre augmente le nombre des particules chargées des ceintures de radiations, ainsi que leur énergie.

Un mythe s'effondre

Une longue période de champ magnétique interplanétaire orienté vers le Sud entraîne parfois une succession rapide de sous-orages, qui émettent toujours davantage de particules en direction de la Terre. L'orientation du champ magnétique interplanétaire vers le Sud est fréquente, et les sous-orages