

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