



TERRE, une planète pas comme les autres

Pour l'astronomie optique, le Système solaire est un espace quasi vide (à quelques photons et poussières près) où orbitent les planètes, planètes naines, comètes et autres petits corps. Mais l'observation de la deuxième queue des comètes, bleutée, rectiligne et toujours à l'opposé du Soleil, a suggéré dès 1951 l'existence du vent solaire, un flot d'électrons, de protons et d'ions positifs (un plasma) qui s'échappe en permanence de l'atmosphère solaire. Confirmé par des mesures directes par satellite dès les années 1960, il baigne tout le Système solaire. Comme un plasma est toujours très conducteur, il a tendance à rester solidaire du champ magnétique qui le traverse. Le vent solaire arrache ainsi en permanence une petite fraction du champ magnétique solaire et l'entraîne à travers le Système solaire. Ce flot de plasma faiblement magnétisé interagit avec le champ magnétique des planètes pour donner naissance à leur magnétosphère, bulle magnétique protectrice riche d'une intense activité électrique. Le domaine d'influence du vent solaire est l'héliosphère, qui englobe toutes les magnétosphères planétaires, ces dernières contenant elles-mêmes les magnétosphères de certains de leurs satellites, à la manière de poupées russes emboîtées.



L'environnement Magnétique des planètes

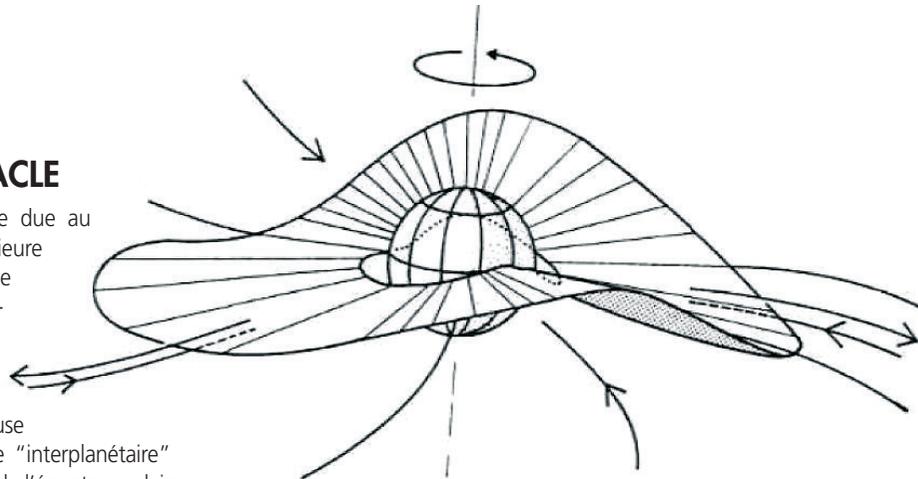
par Philippe Zarka
Observatoire de Paris - CNRS, LESIA, France,
philippe.zarka@obspm.fr

INTERACTION DU VENT SOLAIRE AVEC UN OBSTACLE

Dans le vent solaire, l'énergie cinétique due au mouvement d'ensemble du flot est supérieure à l'énergie magnétique. Le plasma entraîne donc avec lui les lignes de champ magnétique solaire, dont une extrémité reste enracinée dans le Soleil. L'expansion radiale du vent solaire combinée avec la rotation du Soleil (en environ 27 jours) cause l'enroulement de ce champ magnétique "interplanétaire" en une spirale d'Archimède. L'inclinaison de l'équateur solaire sur l'écliptique donne de plus à cette spirale une structure ondulée en "jupe de ballerine" (fig. 1), séparant deux régions où le champ magnétique interplanétaire a des directions opposées. Au niveau de l'orbite terrestre, le vent solaire a une vitesse de ~ 400 km/s (très supérieure à la vitesse du son en son sein !), une densité de ~ 5 protons/cm³ (et autant d'électrons), une température de $\sim 200\,000$ K et un faible champ magnétique de ~ 3 nanoteslas. L'interaction du vent solaire avec un obstacle planétaire dépend du fait que la planète possède ou non un champ magnétique propre, une enveloppe ionisée (ionosphère), et/ou une conductivité élevée. Dans le premier cas, une frontière abrupte apparaît à la limite de la zone d'influence dominante du champ magnétique planétaire : la **magnétopause**.

CHAMPS MAGNÉTIQUES PLANÉTAIRES

Le Système solaire compte 6 planètes magnétisées : Mercure, la Terre et les 4 planètes géantes. Leurs champs magnétiques ont une forte composante dipolaire (similaire au champ d'un barreau aimanté), et des composantes multipolaires (plus complexes, dites d'ordre 2, 3...). Le champ terrestre, mesuré en de nombreux points, est connu avec une grande précision, jusqu'à l'ordre 14, tandis que celui des autres planètes est connu au mieux jusqu'à l'ordre 4. Dans le tableau 1, on peut remarquer le faible champ dipolaire de Mercure, les dipôles très inclinés d'Uranus et Neptune, et le champ magnétique de Saturne parfaitement symétrique par rapport à l'axe de rotation de la planète.

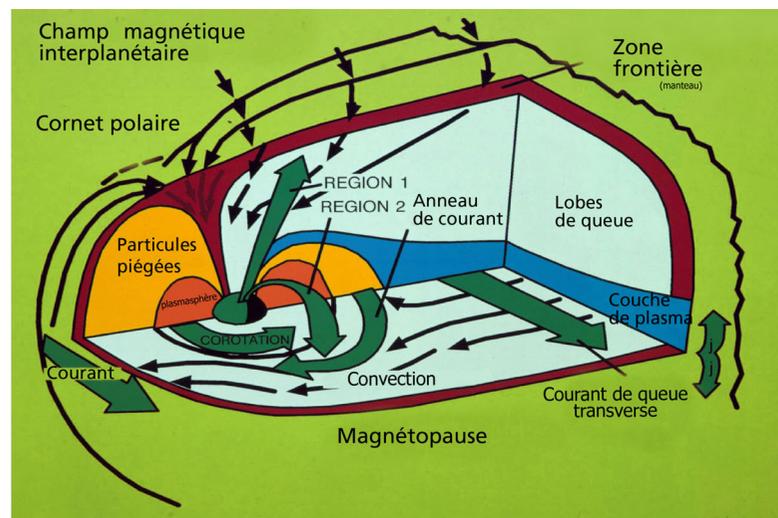
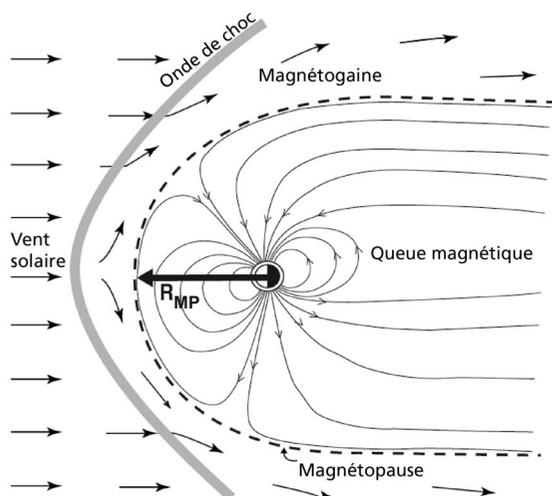


1 - La jupe de ballerine du vent solaire.

D'après J. L. Steinberg, *Le Vent Solaire, Actes du colloque "Technologie de l'environnement spatial", Editions du CNES, 1986*

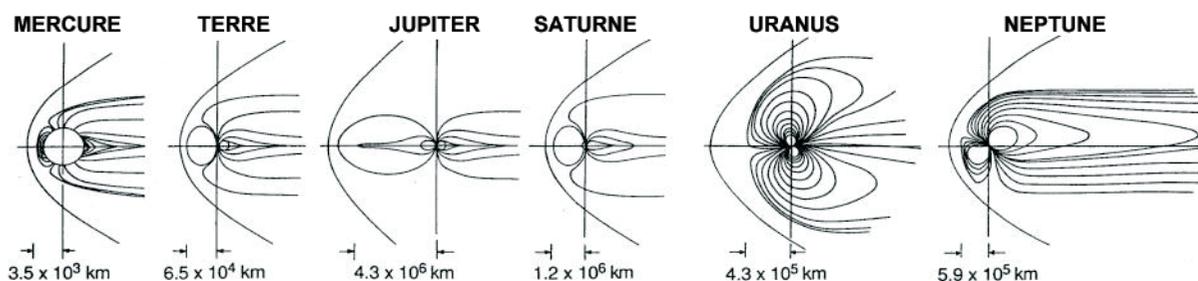
FRONTIÈRES MAGNÉTOSPHÉRIQUES

La magnétosphère d'une planète magnétisée résulte de l'équilibre entre la pression cinétique exercée vers la planète par le vent solaire, et la pression magnétique exercée vers l'extérieur par le champ planétaire. Cet équilibre de pressions définit une surface limite appelée magnétopause, sur laquelle circulent des courants électriques, et qui en première approximation n'est pas traversée par des lignes de champ magnétique (le champ est dit tangentiel sur cette surface). Il n'y a donc en principe pas d'échange de plasma entre l'intérieur et l'extérieur. La magnétopause, qui serait plus ou moins sphérique si le vent solaire "soufflait" également de toutes parts, est en fait écrasée dans la direction du Soleil et étirée en une longue queue magnétique dans la direction opposée (fig. 2). La distance de la magnétopause au "nez" de la magnétosphère (en direction du Soleil) va d'une fraction de rayon à plusieurs dizaines de rayons planétaires selon les cas (tableau 1 et fig. 3). Les magnétosphères planétaires sont les plus grandes structures du Système solaire. Si celle de Jupiter (qui peut atteindre 10 millions de km de rayon) émettait de la lumière visible, elle nous apparaîtrait plus grande que la pleine Lune ! La pression interne (magnétique) est constante, mais la pression externe varie avec l'activité solaire,



2 - La magnétosphère terrestre en 2D et 3D.

Adapté de F. Bagenal, *Planetary Magnetospheres, Encyclopedia of Astronomy & Astrophysics, Nature Publishing Group & Institute of Physics Publishing, 2001.*



3 - Dimensions comparées des magnétosphères planétaires.

Adapté de Kivelson, M. G. & C. T. Russell, eds., *Introduction to Space Physics*, Cambridge University Press, 1995. (Chap. 15, *The magnetospheres of the outer planets*, C.T. Russell & R.J. Walker)

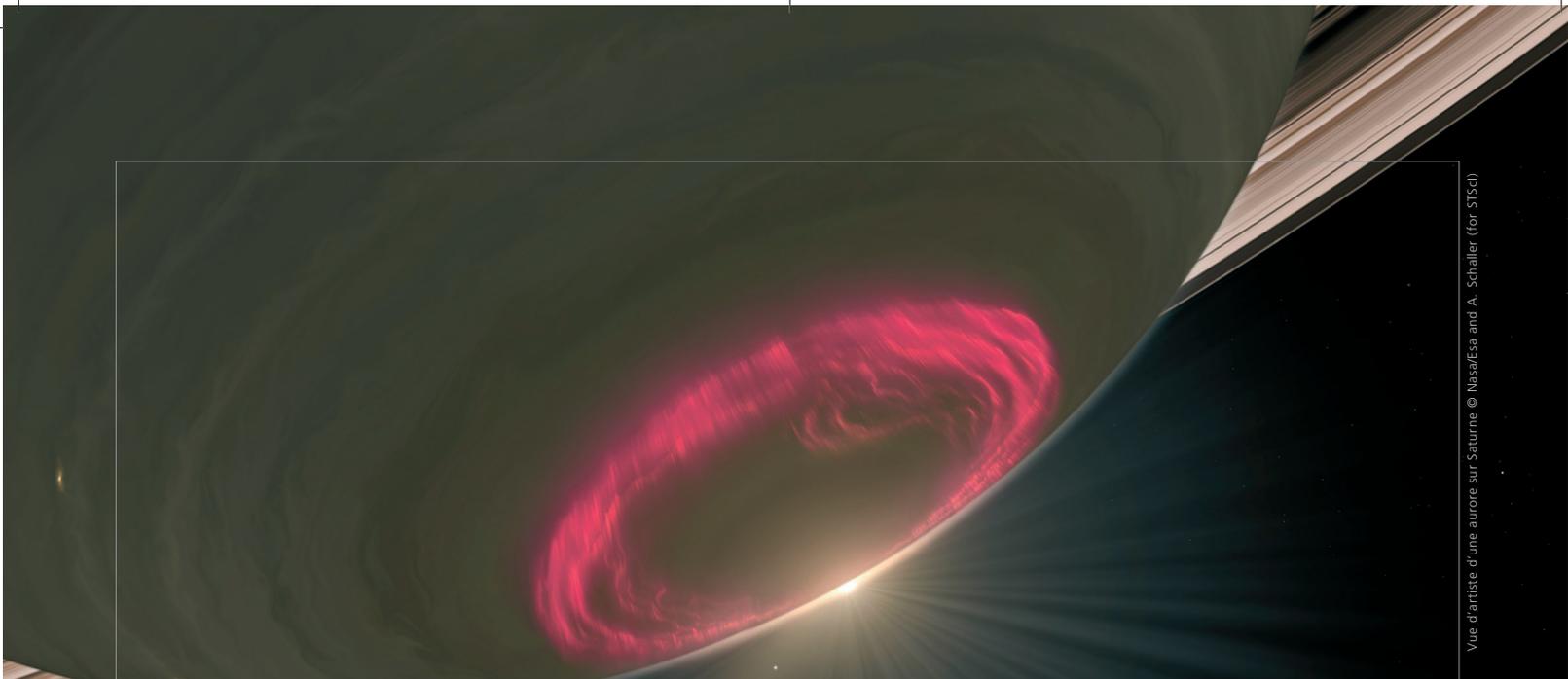
donc la distance du nez de la magnétopause peut varier, jusqu'à 40% dans le cas de la magnétosphère de Jupiter, très compressible. De grandes compressions et expansions y ont été mesurées par la sonde Ulysse en 1992, et conjointement par Cassini et Galileo en 2000. Comme le vent solaire est très supersonique, une onde de choc se forme en amont du nez de la magnétopause, similaire à celle présente devant le nez d'un avion supersonique. La région intermédiaire est la **magnétogaine**, où le vent solaire incident est ralenti, chauffé et dévié autour de l'obstacle. L'épaisseur de la magnétogaine vaut 15 à 40 % du rayon de la magnétopause (fig. 2). La **queue magnétosphérique**, elle, peut s'étendre sur des distances considérables : celle de la Terre dépasse probablement 1 000 rayons terrestres ; celle de Jupiter a été détectée jusqu'à l'orbite de Saturne, à 5 unités astronomiques (750 millions de km) de Jupiter ! À la frontière entre les lignes de champ magnétique planétaires reliant les deux hémisphères côté "jour", et celles étirées vers la queue côté nuit, on trouve le **cornet polaire**, touffe de lignes magnétiques émergeant du voisinage des pôles magnétiques, et permettant une entrée directe du plasma de la magnétogaine dans la magnétosphère.

1 - Paramètres clés des magnétosphères des planètes du Système solaire.

	Mercure	Terre	Jupiter	Saturne	Uranus	Neptune
Rayon planétaire (R_p , km)	2 439	6 378	71 492	60 268	25 559	24 764
Rayon de l'orbite (UA)	0,39	1	5,2	9,5	19,2	30,1
Période de rotation (h,m)	1407 h 30 m	24 h	9 h 55,5 m	10 h 39,4 m	17 h 14,4 m	16 h 6,6 m
Moment dipolaire magnétique ($G \cdot km^3$)	$5,5 \times 10^7$	$7,9 \times 10^{10}$	$1,6 \times 10^{15}$	$4,7 \times 10^{13}$	$3,8 \times 10^{12}$	$2,2 \times 10^{12}$
Champ magnétique à l'équateur (G)	0,003	0,31	4,3	0,21	0,23	0,14
Inclinaison [B, Ω] (°)	+14	+11,7	-9,6	-0	-58,6	-46,9
Champ mag. du vent solaire (nT)	10 (20)*	4	0,8	0,4	0,2	0,13
Rayon magnétopause, (R_{MP}/R_p) calculé	1,4	9	40	17	22	21
Rayon magnétopause, (R_{MP}/R_p) [mesuré]	~1,5	~10	~90	~20	~18	~23
d.d.p due à la convection (kV)	7	46	900	90	17	14
d.d.p due à la corotation (kV)	0,002	90	400 000	12 000	1 500	1000
R_{PS}/R_{MP} (lire texte)	0,01 - 0,02	0,3 - 0,8	~ 4	2 - 4	0,9 - 4	1 - 3

* - Du fait de l'orbite très elliptique

- NDLR : $1G = 10^{-4}T$, $1nT = 10^{-9}T$



Vue d'artiste d'une aurore sur Saturne © NASA/ESA and A. Schaller (for STScI)

SOURCES ET PUIXS DE PLASMA

Bien que considérablement plus vide que le vent solaire alentour (qui n'est déjà pas bien dense), une magnétosphère contient du plasma (ions et électrons), pouvant provenir de 4 origines distinctes :

- Le vent solaire lui-même, entrant par le cornet polaire ou diffusant lentement à travers la magnétopause (~200 g/s d'ions hydrogène et hélium pour la Terre, ~20 kg/s pour Jupiter).
- L'ionosphère (haute atmosphère chargée électriquement) de la planète, qui diffuse lentement vers le haut (~3 kg/s d'ions azote et oxygène sur Terre, ~20 kg/s d'ions hydrogène sur Jupiter).
- Les satellites qui se trouvent à l'intérieur des magnétosphères : Io pour Jupiter (qui, par son volcanisme, injecte ~1000 kg/s d'ions soufre et oxygène), Titan pour Saturne (~3 kg/s d'ions azote et hydrogène) et les petits satellites gelés (Encelade...) qui injectent les ions de l'eau dont la présence domine la magnétosphère de Saturne. Ces ions forment des tores de plasma le long de l'orbite des satellites qui les produisent. L'orbite de la Lune est bien au-delà de la magnétopause terrestre, et la Lune se limite donc à traverser brièvement la queue de la magnétosphère une fois par mois. Quant à Mercure, faiblement protégée par sa mini-magnétosphère, c'est sa surface même, criblée par les particules énergétiques du vent solaire, qui est probablement une source d'ions lourds.
- Les anneaux des planètes géantes, surtout Saturne, dont le criblage par des particules énergétiques ou la dissociation et l'ionisation par la lumière solaire fournissent une substantielle source d'ions oxygène (>200 kg/s).

Le plasma magnétosphérique est stocké dans diverses zones frontières dont notamment un feuillet équatorial dans la queue, et dans les ceintures de radiations. La masse stockée atteint 10 000 tonnes pour la magnétosphère terrestre, 10 millions de tonnes pour celle de Jupiter, ce qui est très peu pour des volumes gigantesques. Le plasma magnétosphérique est éliminé via son absorption par les anneaux ou son interaction avec les atomes neutres qui s'échappent des anneaux, des satellites et de l'atmosphère planétaire. La nébuleuse d'atomes neutres qui enveloppe Saturne est 100 fois plus dense que le plasma magnétosphérique, alors que celle de Jupiter est 300 fois moins dense.

CIRCULATION DU PLASMA

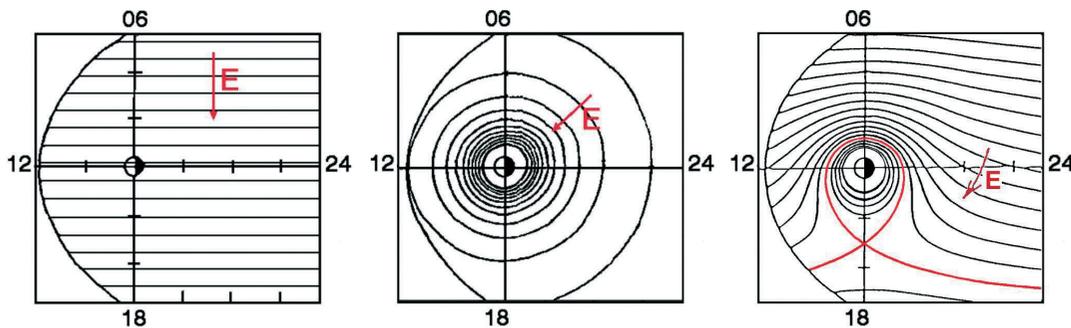
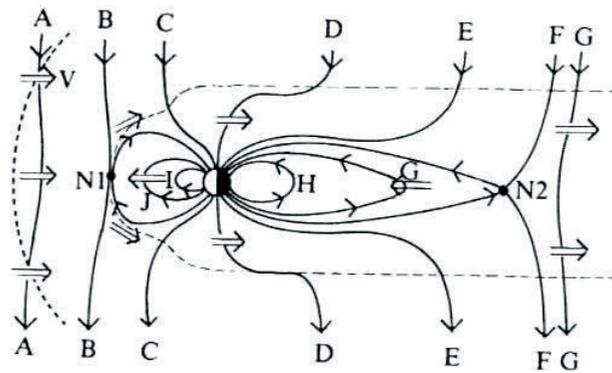
Si la magnétosphère était réellement isolée, électriquement et magnétiquement, du milieu extérieur, le plasma dans la magnétosphère serait simplement entraîné par friction visqueuse avec celui s'écoulant sur les flancs, ce qui générerait une circulation en cellules de convection similaire à celle qui apparaît dans une casserole d'eau sur le feu. Le plasma serait entraîné dans la direction antisolaire sur les bords, et reviendrait vers la planète au milieu de la magnétosphère. Cette circulation est effectivement à peu près celle observée dans la magnétosphère terrestre, mais d'autres observations sont incompatibles avec ce modèle de magnétosphère imperméable (ou "fermée") :

- La présence de plasma très énergétique dans la magnétosphère.
- L'existence d'un champ électrique global dans la direction aube → crépuscule dans toute la magnétosphère.
- Les aurores polaires formant un anneau lumineux à 70-80° de latitude Nord et Sud, particulièrement brillant côté nuit.
- La forte influence exercée par le vent solaire (et notamment la direction de son champ magnétique) sur l'activité magnétosphérique (aurores...).

De là provient le modèle de magnétosphère « ouverte » : lorsque le champ magnétique interplanétaire est de sens opposé au champ magnétique planétaire à la magnétopause, ces champs s'annulent en s'additionnant. C'est le phénomène de « reconnexion magnétique », qui ouvre les lignes de champ magnétique planétaire connectant un hémisphère à l'autre, pour les transformer en lignes reliant la planète au vent solaire. Emportées au-dessus des pôles vers la queue par l'écoulement du vent solaire dans la magnétogaine, ces lignes de champ se rejoignent finalement dans la queue, où elles se connectent à nouveau pour donner une nouvelle ligne fermée, disjointe du vent solaire. La première reconnexion, côté jour, ouvre une voie d'accès au plasma du vent solaire dans la magnétosphère. La seconde reconnexion, dans la queue, donne lieu à l'éjection d'une bulle de plasma vers la queue (avec la ligne de champ magnétique qui retourne au vent solaire) et à la re-dipolarisation (rétractation) vers la Terre de la ligne de champ nouvellement refermée, que la rotation ramène du côté jour. Ce cycle s'appelle le "cycle de Dungey" (fig. 4) et la seconde reconnexion un "sous-orage magnétique". Il correspond à une **convection** du plasma vers la queue dans les régions externes de la magnétosphère, avec un retour vers la planète dans sa partie centrale (lors de la rétractation des lignes reconnectées). À ce mouvement de convection est associé le champ électrique aube → crépuscule observé ($\mathbf{E}_{\text{conv}} \propto \mathbf{V}_{\text{VS}} \times \mathbf{B}_{\text{VS}}$) * dont les équipotentielles, perpendiculaires au champ donc parallèles à la ligne midi-minuit, sont les lignes de circulation du plasma convecté (fig. 5).

* – Les caractères en gras représentent des vecteurs, \times le produit vectoriel. \mathbf{E} est le champ électrique, \mathbf{B}_{VS} le champ magnétique du vent solaire et \mathbf{V}_{VS} sa vitesse.

4 - Le cycle de convection de Dungey en vue méridienne. On suit le mouvement d'une ligne de champ (de A à G, selon les flèches \Rightarrow). La reconnexion se produit en N1 et N2. d'après L. R. Lyons & D. J. Williams, *Quantitative aspects of magnetospheric physics, Geophysical & Astrophysical Monographs, D. Reidel Publishing Company, 1984.*



5 - Champ électrique et trajectoires du plasma en vue polaire : convection (gauche), corotation (centre) et circulation globale (droite).

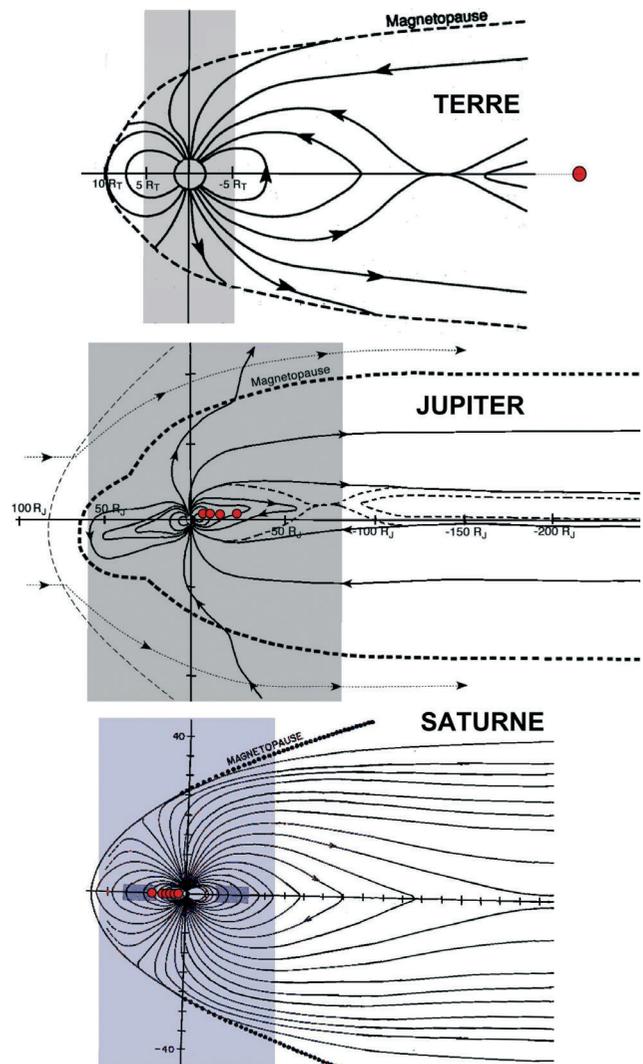
De même, à la rotation de la planète (de vitesse angulaire Ω), de son champ magnétique \mathbf{B} et du plasma qui lui est solidaire, est associé un champ électrique radial $\mathbf{E}_{\text{corot}} \propto R\Omega \times \mathbf{B}$ dont les équipotentielles sont des cercles autour de la planète. Le mouvement du plasma le long de ces cercles est appelé **corotation** (fig. 5).

La circulation globale du plasma dans une magnétosphère résulte de la superposition de la convection et de la corotation (fig. 5), d'importance relative différente pour chaque planète (les différences de potentiel dues à \mathbf{E}_{conv} et $\mathbf{E}_{\text{corot}}$ intégrés à travers la magnétosphère sont indiquées dans la tableau 1). La zone interne dominée par la corotation est la plasmasphère, où les lignes de champ planétaire ne s'ouvrent jamais sur le vent solaire, et où le plasma alimenté par l'ionosphère est dense. Son rayon (R_{ps}) est comparé à celui de la magnétopause (R_{MP}) dans la tableau 1. Pour Jupiter et Saturne, la force centrifuge excède la gravitation au-delà d'environ 2 rayons planétaires de la planète. Le plasma injecté au-delà de cette limite (par ex. par Io) est alors transporté vers l'extérieur sous l'effet de la force centrifuge et forme un anneau de plasma et de courant de plusieurs millions d'ampères qui déforme la magnétosphère. Dans le cas de Jupiter, la corotation domine largement la circulation magnétosphérique (fig. 6) et modifie le cycle de Dungey : la reconnexion dans la queue et l'éjection de bulles de plasma sont gouvernées par la force centrifuge, et tous les phénomènes magnétosphériques (flux de particules chargées, émissions radio...) présentent une forte modulation par la rotation. C'est ainsi, grâce à ses émissions radio magnétosphériques, que la rotation de Jupiter a pu être mesurée à un millionième près. La magnétosphère de la Terre, et plus encore celle de Mercure, sont dominées par la convection (fig. 6). Saturne représente un cas intermédiaire, plus complexe, où la signature rotationnelle est présente mais fluctue sous l'effet du vent solaire (de l'ordre du % pour la période mesurée en radio, comme le montrent les études récentes effectuées avec Cassini).

Il faut noter que la circulation du plasma et le degré de contrôle (co)rotationnel sont – au 1^{er} ordre – indépendants de l'inclinaison du dipôle magnétique par rapport à l'axe de rotation planétaire (sauf pour Uranus et Neptune où cette inclinaison est très forte).

6 - Région dominée par la corotation (grisée) et position des lunes (rouges) dans les magnétosphères de la Terre, Jupiter et Saturne.

© R. Prangé



RÔLE DE L'IONOSPHERE

La haute atmosphère ionisée de la planète constitue une sphère conductrice sur laquelle peuvent converger les courants générés dans la magnétosphère. Comme les particules chargées positives ou négatives se déplacent librement le long des lignes du champ magnétique, aucun champ électrique ne peut s'y développer (sauf transitoirement) car il est aussitôt annulé par des déplacements de charges électriques (les courants). Les lignes du champ magnétique sont donc des équipotentielles électriques, et les différences de potentiel électrique sont conservées entre 2 lignes de champ magnétique, de la magnétosphère à l'ionosphère. Les champs électriques de convection et de corotation ci-dessus se retrouvent donc projetés sur l'ionosphère, où ils engendrent des mouvements miroirs de ceux du plasma magnétosphérique. Du fait de la géométrie convergente (vers la planète) du champ magnétique planétaire, les mêmes différences de potentiel donnent des champs électriques beaucoup plus intenses dans l'ionosphère que dans la magnétosphère, mais la vitesse de circulation du plasma y est plus faible. Cette correspondance des champs et de la circulation ionosphérique et magnétosphérique explique l'intérêt de l'étude de l'ionosphère, par exemple avec les radars polaires Eiscat ou SuperDarn. Mercure, seule planète magnétisée sans atmosphère (donc sans ionosphère) pose alors une énigme : où les courants magnétosphériques se referment-ils ? dans des bulles transitoires de plasma créées par le criblage de la surface par les particules énergétiques du vent solaire ? Réponses attendues avec les missions Messenger et Bepi Colombo.

GÉNÉRATEURS DE COURANT

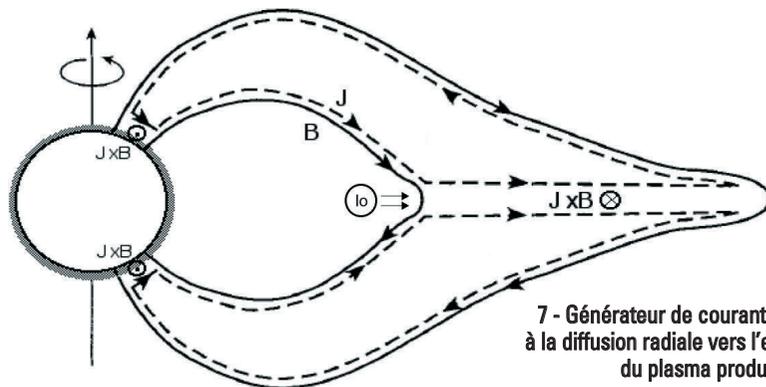
Plusieurs circuits de courant existent dans les magnétosphères planétaires, correspondant chacun à un générateur spécifique :

- L'interaction vent solaire – magnétosphère génère, via le champ électrique de convection, des courants qui se referment dans l'ionosphère polaire.
- Le plasma émis par Io diffuse radialement vers l'extérieur sous l'effet de la force centrifuge, générant un courant radial J . Pour rester en corotation à vitesse $R\Omega$, il faut que sa vitesse augmente avec R . C'est la force de Lorentz ($\mathbf{J} \times \mathbf{B}$) associée au courant radial qui fournit cette accélération. Ce courant radial se referme dans l'ionosphère via des courants alignés avec le champ magnétique. Dans l'ionosphère, la force $\mathbf{J} \times \mathbf{B}$ a une orientation telle qu'elle ralentit le plasma ionosphérique. Le circuit de courant transfère donc l'énergie du plasma ionosphérique

vers le plasma magnétosphérique, et accélère le second aux dépens du premier (fig. 7). Le champ magnétique joue ici le rôle des pales d'un embrayage centrifuge de 2 CV (les anciens comprendront...). Plus le plasma magnétosphérique s'éloigne de la planète, plus il requiert d'accélération, et plus les courants qui circulent entre lui et l'ionosphère sont intenses.

- Les satellites non magnétisés mais possédant une atmosphère (Io, Titan...), en se déplaçant à travers le champ magnétique planétaire, "voient" apparaître dans leur référentiel le champ électrique radial associé à la corotation diminué de la vitesse orbitale du satellite : $\mathbf{E} \propto (R\Omega - \mathbf{V}_{orb}) \times \mathbf{B}$. Ce champ induit un courant dans l'ionosphère du satellite, qui se referme dans l'ionosphère de la planète via des courants alignés avec le champ magnétique.

- Le satellite magnétisé Ganymède, en se déplaçant à travers le champ magnétique jovien, provoque un phénomène de reconnexion permanente entre son champ magnétique propre et le champ jovien –



7 - Générateur de courant associé à la diffusion radiale vers l'extérieur du plasma produit par Io.

Adapté de S. Cowley & E. Bunce, Jupiter : Magnetosphere, Encyclopedia of Astronomy & Astrophysics, Nature Publishing Group & Institute of Physics Publishing, 2001.

présentant quelques similarités avec le cycle de Dungey – en amont et en aval de son déplacement.

Dans tous les cas, ces circuits de courant dissipent de l'énergie dans la magnétosphère et l'ionosphère. De plus, à chaque fois qu'un courant est forcé (par un champ électrique) à circuler dans un milieu où les porteurs de charge sont rares (c'est le cas dans la magnétosphère), alors le milieu "s'arrange" pour augmenter l'énergie de ces porteurs de charge, par exemple en faisant apparaître des champs électriques alignés avec le champ magnétique planétaire. Une fraction du plasma magnétosphérique peut ainsi être accélérée à des énergies très élevées (keV, MeV).

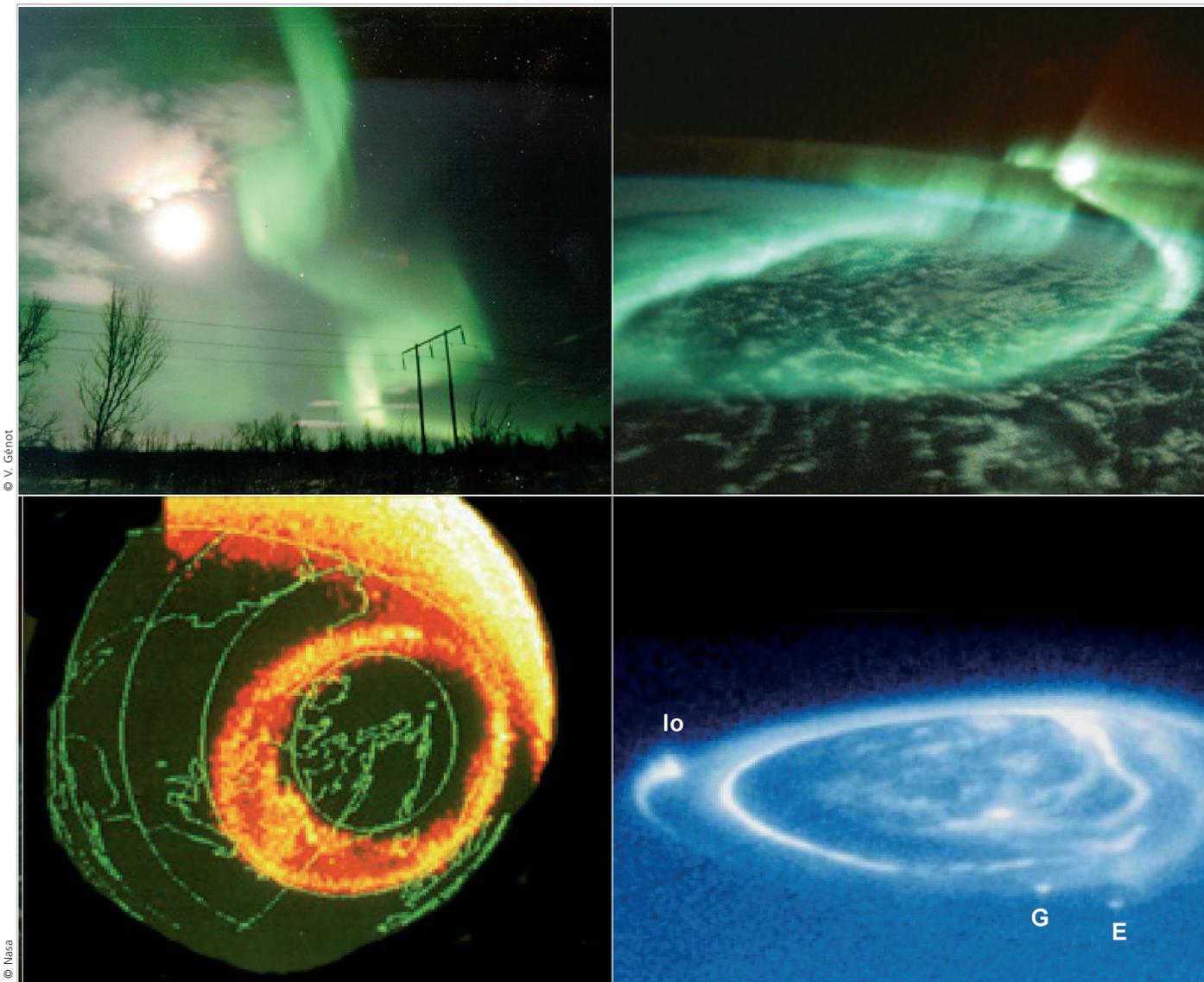
AUORES ET ÉMISSIONS INDUITES PAR LES SATELLITES

Les aurores polaires sont les manifestations visibles les plus spectaculaires de l'activité magnétosphérique (fig. 8). Elles sont produites par des atomes et molécules atmosphériques excités qui reviennent à leur état d'équilibre en émettant de la lumière à des longueurs d'ondes particulières : principalement les raies verte et rouge de l'oxygène sur Terre, et les raies et bandes UV de H et H₂ sur Jupiter et Saturne... Ces constituants atmosphériques sont excités par collision avec des électrons énergétiques (~1 à 10 keV) provenant de la magnétosphère. Ces électrons sont accélérés par les générateurs décrits ci-dessus. Au-dessus des aurores, ils produisent également d'intenses émissions radio.

Dans une magnétosphère dominée par la convection (comme sur Terre), les ovales auroraux marquent la limite entre lignes de champ fermées et ouvertes. Ils sont la projection sur l'atmosphère – le long du champ magnétique – des sites de reconnexion magnétique, notamment de la queue.

Celle-ci joue le rôle d'un accumulateur d'énergie et de flux magnétique, brutalement libérés lors des sous-orages. Notons que les aurores ne résultent en aucun cas de l'entrée directe du vent solaire dans les cornets polaires, comme on pourrait naïvement l'imaginer. Cette explication ne satisfait ni à leur localisation observée sur Terre (principalement côté nuit), ni à l'énergie requise pour les électrons incidents (<1 eV dans le vent solaire). Dans une magnétosphère dominée par la corotation (comme sur Jupiter), les aurores sont la projection de la région limite où la corotation ne peut plus être entretenue par l'ionosphère, où l'embrayage "ripe". C'est là que sont produits les courants alignés les plus intenses.

Des émissions atmosphériques similaires aux aurores sont produites au pied des



8 - En haut à gauche – Aurores terrestres vues du sol, de la navette spatiale (en haut à droite) et d'un satellite d'observation (en bas à gauche). L'ovale correspond à la limite entre lignes ouvertes et fermées. En bas à droite – Aurores joviennes. L'ovale correspond à la limite de rotation, les taches isolées aux pieds magnétiques de Io, Ganymède (G) et Europe (E).

lignes de champ magnétique connectant les satellites (magnétisés ou possédant une ionosphère) à la planète (fig. 8).

Les émissions aurorales sont l'image visible (UV, IR, radio) de l'activité magnétosphérique, projetées sur l'atmosphère comme sur un tube cathodique (un écran de TV !) le long des lignes de champ magnétique planétaire.

CONCLUSION

Les magnétosphères planétaires sont des machines électrodynamiques complexes, à la fois gigantesques accélérateurs de particules chargées et boucliers protecteurs de l'atmosphère contre les rayons cosmiques, les éruptions solaires, et l'évaporation. Ce sont aussi des laboratoires de physique des plasmas. Les mécanismes en jeu sont universels, mais les combinaisons de paramètres possibles (dimension de l'objet, distance au Soleil, champ magnétique, rotation, sources de plasma...) sont très diverses, de sorte qu'une approche comparative est essentielle. Les planètes du Système solaire offrent 6 réalisations très différentes les unes des autres, mais il est bien sûr tentant de chercher à détecter et étudier les magnétosphères des exoplanètes de plus en plus nombreuses, notamment via leurs émissions aurorales (plusieurs équipes s'y emploient dans le monde). ■

Références

Pour aller plus loin, on pourra consulter, sur l'ionosphère et la magnétosphère :

- Encrenaz, T., J. -P. Bibring, M. Blanc, A. Barucci, F. Roques & P. Zarka, *Le Système solaire (3^e édition)*, Savoirs Actuels, EDP-Sciences / CNRS-Éditions, Paris, 2003.
- Kivelson, M. G. & C. T. Russell, éd., *Introduction to Space Physics*, Cambridge University Press, 1995.
- Kelley, M. C., *The Earth's Ionosphere*, Academic Press, 1989.
- Liliensten, J. & P.-L. Blelly, *Du Soleil à la Terre*, EDP Sciences, 2000.
- Plus spécifiquement, sur Jupiter, Saturne et la mission Cassini :**
- Bagenal, F., W. McKinnon & T. Dowling, éd., *Jupiter : The Planet, Satellites, and Magnetosphere*, Cambridge Univ. Press, 2004.
- Blanc, M., *Magnetospheric and plasma science with Cassini-Huygens*, in *The Cassini-Huygens mission Vol. 1*, Space Sci. Rev., 104, pp. 253-346, 2002-3.
- Encrenaz, T., R. Kallenbach, T. C. Owen & C. Sotin, éd., *The Outer Planets and their moons*, Space Sci. Rev., 116, 1-2, ISSI series, Bern, Suisse, Springer, 2005.

Enfin sur les magnétosphères d'exoplanètes :

- Zarka, P., *Plasma interactions of exoplanets with their parent stars and associated radio emissions*, École CNRS de Goutelas XXVIII "Formation planétaire et exoplanètes", J.L. Halbwegs, D. Egret, and J.M. Hameury éd., 2006. <http://astro.u-strasbg.fr/goutelas/g2005/>