

# AURORES DANS LE SYSTÈME SOLAIRE

Gaël Cessateur, chercheur à l'Institut royal d'aéronomie spatiale de Belgique.

*Quand Hélios se met en colère il transmet sa fureur à une portion de l'espace environnante selon un mécanisme de mieux en mieux connu. Les forces gigantesques mises en œuvre viennent parfois perturber notre planète et peuvent provoquer des dégâts mais aussi créer des spectacles colorés de qualité exceptionnelle comme on vient de le voir au cours des nuits des 11 et 12 mai 2024.*

Les aurores restent probablement les plus spectaculaires manifestations des relations entre le Soleil et la Terre, que l'on étudie dans le cadre d'une science relativement nouvelle, qu'est la météorologie de l'espace. Principalement observable à hautes latitudes, une aurore ressemble assez souvent à des rideaux de lumière dynamique tombant vers le sol, prenant des couleurs différentes comme le vert, le bleu-violet ou le rouge (figure 1). Avec le progrès des capteurs numériques qui se démocratisent de plus en plus, les aurores deviennent un sujet de choix pour de nombreux photographes et astrophotographes. Ces derniers mois, il arrive même de voir des aurores à basses latitudes comme dans le sud de la France, provoquant l'engouement du public.

Comprendre l'origine d'une aurore, c'est devoir s'intéresser à des thématiques scientifiques diverses, allant de la physique solaire à la chimie dans les hautes atmosphères planétaires en passant par l'étude des magnétosphères. Si l'émission aurorale provient de la partie haute de l'atmosphère terrestre, les aurores sont bien un phénomène indirect, résultant de l'interaction entre le vent solaire et la magnétosphère terrestre. Différents processus d'accélération au sein de la magnétosphère donnent suffisamment d'énergie aux électrons pour venir exciter, ioniser et chauffer l'atmosphère terrestre. Il s'agit ici de présenter les grands principes de la formation des aurores sur Terre mais également dans le Système solaire en général.

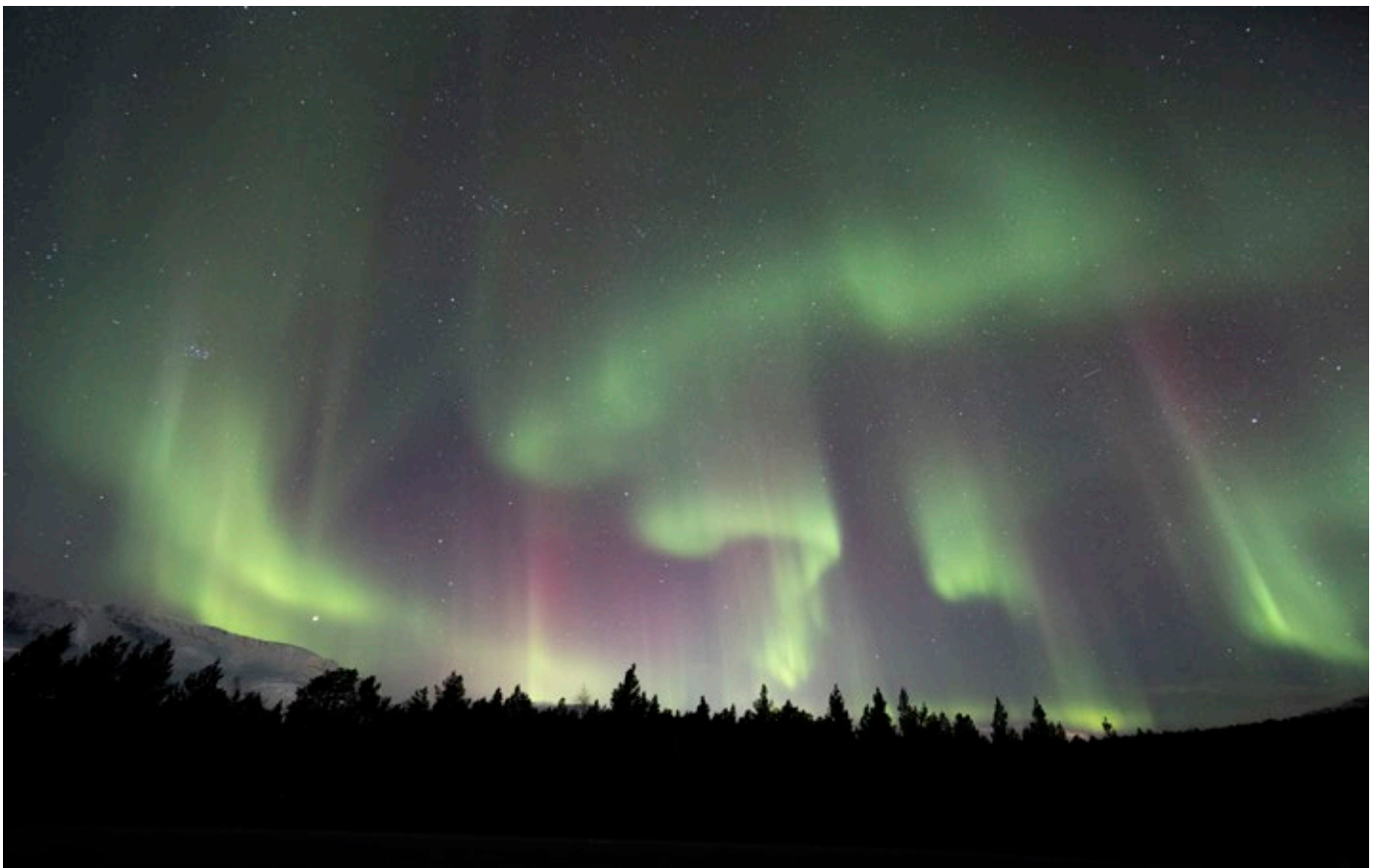


Fig.1. Aurore dans le ciel de Skibotn, Norvège, en février 2024. Canon R6, Loawa 15mm, F2, 5 sec d'exposition, ISO 3200.

Crédits : Gaël Cessateur.

## Le Soleil, la source des aurores

L'atmosphère du Soleil est structurée en température allant de 5 777 kelvins (K) pour la photosphère, à quelques millions de kelvins dans la couronne solaire, environ 2 000 km au-dessus et au-delà. La densité de la couronne étant très faible, le milieu est peu collisionnel : il faut donc comprendre la notion de température en termes d'énergie cinétique de la particule, et non le concept de température à température et pression ambiante. À la fin des années 1930, les observations de la couronne de quelques raies spectrales comme celle du Fe X (un atome de fer ionisé 9 fois) à 637,5 nm ont confirmé que la couronne était effectivement bien plus chaude que la photosphère. Il faut en effet une température de  $10^6$  K pour pouvoir ioniser autant de fois un atome de fer. Aujourd'hui, des satellites comme Solar Dynamics Observatory (SDO) observe la couronne à de multiples longueurs d'onde, et donc différentes températures caractérisant différentes altitudes, principalement dans l'extrême ultraviolet des raies du fer comme Fe IX (17,1 nm, 630 000 K) ou encore Fe XX (13,1 nm,  $10^7$  K). Toutefois, l'origine du chauffage de la couronne est encore mal comprise, et c'est un des objectifs principaux des missions solaires actuelles comme Solar Orbiter et la sonde Parker. La couronne n'est pas en équilibre hydrostatique autour du Soleil ; avec sa température élevée à sa base, la couronne solaire s'étend constamment dans le milieu interplanétaire à cause de cette forte énergie thermique convertie efficacement en énergie cinétique, générant le vent solaire. Ce dernier est composé principalement d'un mélange homogène de protons et d'électrons, mais aussi d'hélium dont le pourcentage varie entre 5 % et 25 %. Avec une vitesse comprise entre environ 400 km/s pour le vent solaire dit lent venant des moyennes latitudes solaires, et autour de 800 kms/s pour le vent solaire dit rapide provenant des latitudes élevées où sont situés les « trous coronaux », des lignes de champ magnétique solaire ouvertes laissant s'échapper plus de plasma. Les particules mettent environ 3 jours pour atteindre l'orbite terrestre. L'énergie moyenne des protons est de 1 keV, et de quelques dizaines d'eV pour les électrons, avec une densité de quelques millions de particules par  $m^3$ . Le vent solaire possède également son propre champ magnétique, avec un champ moyen entre 5 et 10 nT, avec une composante principale perpendiculaire,  $B_z$ , dont la direction (nord ou sud) dépend fortement des turbulences du plasma local, d'autant plus si du vent solaire

rapide « rattrape » du vent solaire lent.

L'expansion continue de la couronne engendre donc ce vent solaire en permanence. Toutefois, le Soleil suit un cycle d'activité de 11 ans. Nous sommes d'ailleurs en ce moment même proche du maximum du cycle solaire 25, ce qui se traduit par une activité solaire plus importante avec des éruptions solaires plus fréquentes qui libèrent de l'énergie dans l'atmosphère solaire. Une éruption peut parfois être accompagnée d'une éjection de masse coronale. Le vent solaire, surtout rapide, va alors être enrichi sporadiquement par cette nouvelle source de plasma. Si cette éjection de masse coronale est géo-effective, c'est-à-dire si ce plasma est orienté vers la Terre, alors cela peut créer des orages géomagnétiques sous certaines conditions comme on le verra plus tard. En termes de puissance, le vent solaire peut atteindre  $10^4$  W/ $m^2$ , comparé aux éruptions solaires avec  $10^6$  W/ $m^2$ .

## Interaction entre vent solaire et magnétosphère

Le vent solaire vient compresser le champ magnétique terrestre en amont (côté jour, vers le Soleil), et l'étirer vers l'arrière (côté nuit, à l'opposé du Soleil) comme l'illustre la figure 2. La zone entre les lignes de champ fermés coté jour et les premières lignes ouvertes étirées coté nuit forme les cornets polaires. La magnétopause constitue la zone où la pression du vent solaire équilibre la pression magnétique terrestre. La position de cette magnétopause peut varier entre 6 et 13 rayons terrestres en fonction de la pression du vent solaire du coté jour, et peut s'étirer sur plusieurs dizaines de rayons terrestres du côté nuit.

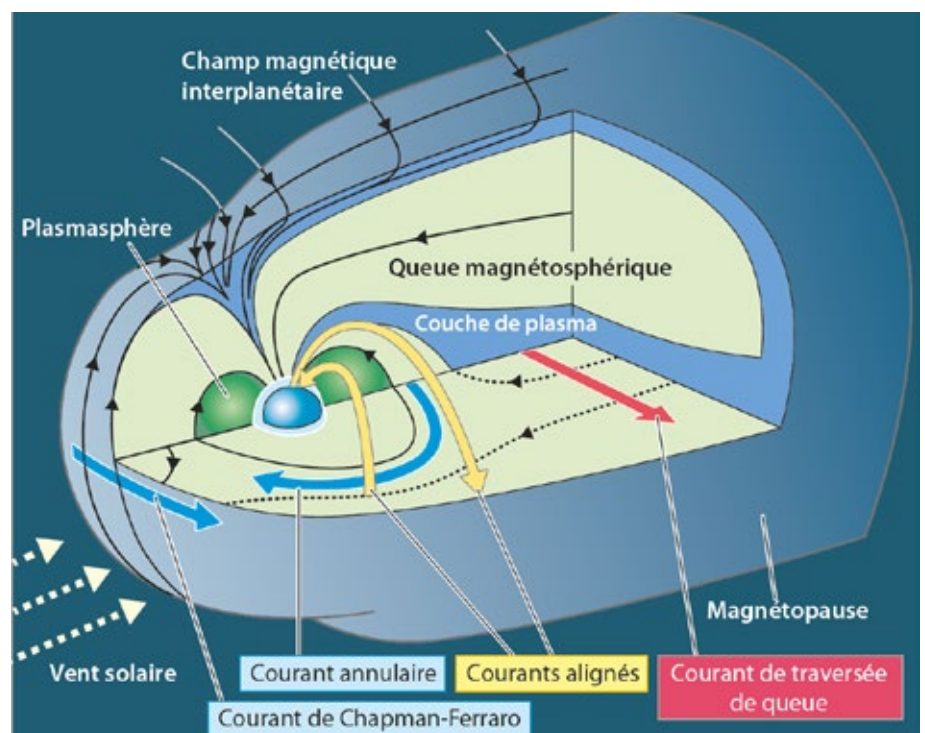


Fig.2. Schéma de la magnétosphère avec les différentes zones et les courants associés. Lilensten et al. 2021.

Le vent solaire est constitué de particules chargées, et ce plasma va subir la force de Lorentz au voisinage de la magnétosphère terrestre : les particules de vitesse  $\mathbf{v}$  et de charge  $q$ , vont être déviées en  $q\mathbf{v} \wedge \mathbf{B}$ ,  $\mathbf{B}$  étant le champ magnétique terrestre. La force résultante est perpendiculaire à la fois au champ  $\mathbf{B}$  et au sens de déplacement des particules, qui vont donc être déviées coté aube pour les électrons, et coté crépuscule pour les ions, formant un courant électrique qui circule de l'est vers l'ouest dans la magnétopause.

Cette dernière est assez poreuse, laissant entrer du plasma du vent solaire dans la magnétosphère par différents mécanismes. Les particules peuvent précipiter directement par les cornets polaires, où le champ magnétique est plus faible. Ces particules ne sont pas assez énergétiques en revanche pour provoquer de belles et lumineuses aurores. D'autres particules longent la queue magnétosphérique du coté nuit, et peuvent également pénétrer la magnétopause. Du coté jour, lorsque la composante verticale du champ magnétique solaire,  $B_z$ , est dirigée vers le sud, une reconnexion magnétique peut se produire avec une ligne de champ magnétique terrestre, orienté lui vers le nord. Deux nouvelles lignes reconnectées apparaissent et sont repoussées du coté nuit, emportant le plasma qui était confiné vers la queue de la magnétosphère. La majorité des particules qui pénètrent la magnétosphère vont dans le feuillet de plasma, situé dans le plan équatorial. Il faut noter également qu'une partie du plasma dans la magnétosphère provient de l'ionosphère terrestre en proportion variable. En effet, certaines particules ionosphériques acquièrent suffisamment d'énergie par divers mécanismes pour pouvoir s'échapper de la gravité terrestre, principalement à haute latitude où les lignes de champ magnétiques ouvertes connectent l'ionosphère au milieu interplanétaire.

Avec un excès d'ions positifs côté crépuscule et un excès d'électrons négatifs côté aube, il y a un fort champ électrique dit de convection dans le feuillet de plasma, qui engendre alors le courant de la queue. Les électrons magnétosphériques vont alors être attirés du coté crépuscule. Avec la présence du champ magnétique terrestre  $\mathbf{B}$ , ces électrons vont acquérir une vitesse  $\mathbf{v} = \mathbf{E} \wedge \mathbf{B}/B^2$ , et ainsi dériver vers la Terre. Proche de celle-ci, le champ magnétique terrestre est assez fort pour que la force de Lorentz soit de nouveau efficace, les particules chargées étant de nouveau déviées autour de la Terre, les charges positives vers l'ouest et les charges négatives vers l'est, formant alors le courant annulaire qui circule d'est en ouest.

Lorsque le vent solaire  $B_z$  est orienté sud, alors le processus de reconnexion du coté jour donne lieu à une accumulation d'énergie dans la queue magnétosphérique qui va se comprimer, les lignes de champ s'empilent les unes sur les autres. Cela va donner lieu à des

reconnexions magnétiques dans le feuillet de plasma coté nuit, des particules étant alors envoyées encore plus énergétiquement vers la Terre, ce qui crée des orages et sous-orages géomagnétiques.

Des lignes de champ magnétique terrestre fermées dont l'empreinte se trouve dans l'ionosphère à haute latitude terrestre sont connectées au feuillet de plasma. Lorsque des particules reviennent vers la Terre, une partie va alors précipiter en suivant ces lignes de champ, formant alors des courants dits alignés (car parallèles aux lignes de champs magnétiques), ou courants de Birkeland, ce qui crée par la suite les ovales auroraux dans les deux hémisphères terrestres.

Lors de sous-orages magnétiques de forte intensité, la reconnexion de côté nuit peut se faire plus proche de la Terre, où les lignes de champ terrestre ont leur empreinte dans l'ionosphère à plus basse latitude. L'ovale auroral se trouve alors élargi vers des latitudes plus basses, engendrant des aurores visibles depuis le sud de l'Europe lors de l'événement du 10-11 mai 2024. L'orage magnétique étant de très forte intensité, près des  $\frac{3}{4}$  de la puissance de l'événement de 1989 qui avait endommagé tout le système électrique du Québec ou bien encore la moitié de l'événement de Carrington en 1859, où des aurores ont été visibles jusqu'au niveau des tropiques.

Les particules précipitent donc dans l'ionosphère formant les courants de Birkeland, alignés aux lignes de champ. Dans l'ionosphère, un courant perpendiculaire aux courants alignés, dits de Hall et de Pedersen permet de fermer le circuit électrique. Ces courants ionosphériques induisent des perturbations du champ magnétique au sol. Un bon indice d'activité aurorale reste alors de suivre le champ magnétique local de l'observateur : toute variation du champ  $\mathbf{B}$  indique une activité ionosphérique et potentiellement une activité aurorale. Il existe d'autres indices, tel que Kp ou Dst, mais ceux-ci sont globaux.

## Les émissions aurorales

On a déjà établi que des électrons issus du feuillet de plasma précipitent suivant les lignes de champ magnétique à hautes latitudes, créant les courants alignés de Birkeland, et formant ainsi l'ovale auroral. Ces électrons vont venir interagir avec la partie haute de l'atmosphère terrestre, composée d'une partie neutre et d'une partie ionisée, l'ionosphère. Cette dernière est principalement formée par l'interaction entre le flux dans l'ultraviolet extrême (EUV) solaire (entre 10 nm et 121 nm) et l'atmosphère neutre du-côté jour. L'énergie de ces photons est suffisante pour ioniser les espèces neutres à partir de 60 km d'altitude. On y distingue plusieurs régions en fonction de l'altitude, mais on s'intéresse ici à la région E, entre 80 et 125 km, où les molécules telle que  $N_2$  dominant, et la région F à partir de 125 km, où

les atomes, notamment O, deviennent majoritaires. Ces régions sont complexes, il y a en effet de nombreuses réactions chimiques avec les neutres et les ions issus de la photo-ionisation. Les électrons magnétosphériques vont donc venir exciter essentiellement les atomes d'oxygène et les molécules d'azote.

Comme on peut le voir sur la figure 1, les aurores peuvent avoir différentes couleurs, principalement du vert, mais aussi du rouge. Pour en comprendre l'origine, il faut s'intéresser au spectre auroral comme le montre la figure 3.

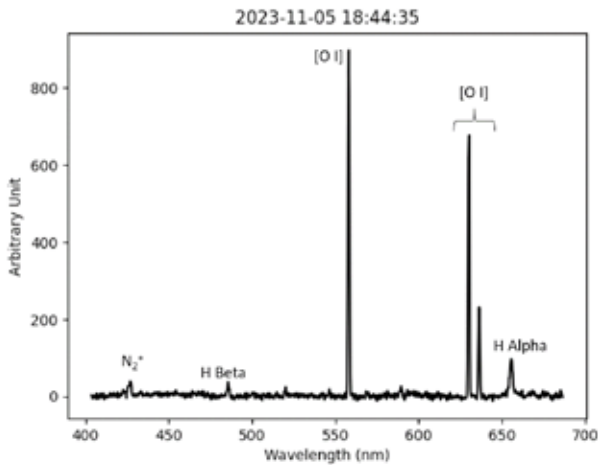


Fig.3. Spectre d'émission auroral obtenu en novembre 2023 depuis l'observatoire de Skibotn, Norvège, pour une aurore relativement faible accompagnée d'une aurore à protons.

On peut y distinguer 3 raies aurorales dominantes : le vert à 557,5 nm, le rouge qui est un triplet à 630 nm, 636 nm et 639 nm, et enfin une bande d'émission autour de 400 nm avec une raie bleue.

Prenons en particulier l'exemple de l'oxygène. Initialement au repos dans un état noté  $O(^3P)$ , une collision avec un électron va venir transférer de l'énergie à l'oxygène qui va passer dans un état excité,  $O^*$ . La probabilité de cette interaction responsable de cette transition électronique est représentée par la section efficace. Concrètement, un électron de l'atome d'oxygène acquiert suffisamment d'énergie pour passer de la dernière orbitale atomique peuplée correspondant au niveau fondamental,  $E_0$ , à une orbitale atomique d'un niveau d'énergie plus élevé  $E_1$ . L'oxygène tend ensuite à se relaxer vers un état d'énergie inférieur  $E_2$  ou vers le niveau fondamental  $E_0$ , soit par collisions avec le milieu, soit par radiation. Dans ce dernier cas, l'atome va émettre un photon dont la longueur d'onde  $\lambda$  correspond à la différence d'énergie,  $\Delta E = E_2 - E_1 = h c / \lambda$ , avec  $h$  la constante de Planck, et  $c$  la vitesse de lumière dans le vide. Dans le cas de molécules, la structure électronique est plus complexe. En plus des transitions entre différents états électroniques, il y a plusieurs niveaux vibrationnels pour un état électronique donné, ce qui donne beaucoup plus de possibilités de transitions. À faible résolution spectrale, on observe alors des bandes moléculaires d'émission au lieu de raies spectrales bien définies uniquement visibles à haute

résolution spectrale.

Le premier état excité intéressant est l'état  $O(^1D)$ , responsable du triplet rouge à 630 nm, 636 nm et 639 nm lors de la transition de  $O(^1D)$  vers  $O(^3P)$ . L'altitude de ces émissions se trouvent au-delà de 200 km, et l'énergie de seuil des électrons précipitants est relativement faible, autour de 2 eV. Toutefois, la raie rouge nous paraît faible car notre œil est très peu sensible au rouge. De plus, ce triplet est peu lumineux car l'état  $O(^1D)$  peut mettre jusqu'à 130 secondes en moyenne pour se désexciter par radiation, les collisions avec les neutres comme  $N_2$ ,  $O_2$  et  $O$  étant un processus efficace pour perdre de l'énergie.

La raie verte à 557,7 nm provient de la désexcitation de l'état  $O(^1S)$  vers l'état  $O(^1D)$ . Pour produire cet état  $O(^1S)$ , il existe plusieurs mécanismes. La réaction principale de production de  $O(^1S)$  se réalise en 2 étapes : d'abord l'excitation des molécules d'azote  $N_2$  par impact électronique, dans l'état excité  $N_2(A)$ . Ensuite, il y a une réaction chimique avec l'oxygène atomique,  $N_2(A) + O \rightarrow O(^1S) + N_2^*$ . La seconde réaction prépondérante est la réaction de recombinaison dissociative avec les électrons dits thermalisés du milieu,  $O_2^+ + e^- \rightarrow O(^1S) + O^*$ . Toutefois, le processus de production de l'état  $O(^1S)$  n'est pas encore tout à fait compris. En effet, le niveau absolu d'intensité de la raie verte n'est pas encore correctement modélisé par rapport aux observations, des réactions chimiques sont probablement encore à prendre en compte dans les modèles.

Les molécules de diazote autour de 110 km sont aussi ionisées et excitées par impact électronique, donnant alors du  $N_2^+$ , pouvant donner différentes bandes d'émission. Cette bande moléculaire est très importante car il n'y a pas de chimie dans le processus d'excitation et d'émission. On peut alors a priori remonter à l'énergie des électrons qui précipitent. Le système de la première bande négative,  $N_2$  1NG, entre 391,8 et 427,8 nm est l'émission la plus importante de  $N_2^+$ . D'autres bandes moléculaires remarquables comme les bandes de Meinel de  $N_2^+$  au-delà de 650 nm, ou bien encore des molécules  $N_2$  et  $O_2^+$  contribuent au spectre lors de très forts orages magnétiques. La raie spectrale à 520 de l'azote atomique est également présente. La figure 4 montre un spectre obtenu lors d'un important orage géomagnétique, et on s'aperçoit tout de suite du nombre important de raies spectrales et de bandes moléculaires.

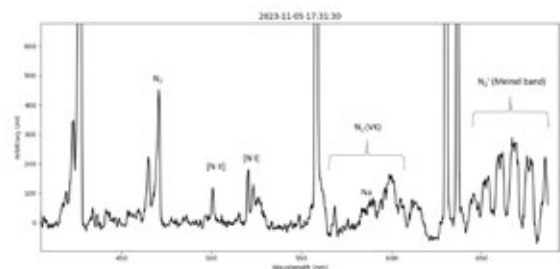


Fig.4. Spectre obtenu lors d'un important orage géomagnétique.

Enfin, si on s'intéresse au spectre en dehors du visible, les raies de l'oxygène à 777 nm et 849 nm dans le très proche infrarouge sont très intéressantes pour déduire le niveau d'énergie des électrons précipitants.

En général, l'altitude d'émission dépend justement directement du niveau d'énergie des électrons précipitants : la raie verte de O(<sup>1</sup>S) et la bande bleue ont des émissions entre 110 km et 150 km, mais la raie bleue peut aussi venir d'altitudes aussi basses que 100 km, voire 95 km, si l'énergie des électrons est assez importante, proche de 10 keV.

Sur la figure 3, il existe encore deux raies spectrales passées sous silence pour le moment : la raie H-alpha à 656 nm et H-beta à 486 nm. Ce sont des émissions liées à des aurores à protons, et non plus des électrons. Ces protons proviennent du vent solaire mais aussi du feuillet de plasma côté nuit, et précipitent dans le cornet polaire. Les protons en précipitant vont se recombiner avec des électrons ionosphériques, pour donner des atomes hydrogène, qui seront dans un état excité, donnant lieu par la suite à des émissions de la série de Balmer. Il existe également des émissions provenant d'autres séries, notamment Lyman dans l'UV, en particulier Lyman alpha à 121,6 nm. Mais ces émissions sont uniquement visibles depuis l'espace, l'atmosphère terrestre bloquant les rayons UV. Notons que les aurores à protons et celle à électrons ne sont pas corrélées.

Pour finir, il existe d'autres types d'émissions atmosphériques, mais qui ne sont pas des aurores. On voit souvent de la raie verte sur les clichés des astrophotographes amateurs : c'est bien l'émission de O(<sup>1</sup>S), qui vient aussi de la réaction de recombinaison dissociative. L'origine de O<sub>2</sub><sup>+</sup> toutefois est différente : la molécule O<sub>2</sub> est ionisée durant le jour par les photons UV, et se recombine la nuit avec les électrons thermalisés, donnant la raie verte, non aurorale, mais des lumières du ciel nocturne (*airglow* ou *nightglow* en anglais).

## Des aurores sur d'autres planètes ?

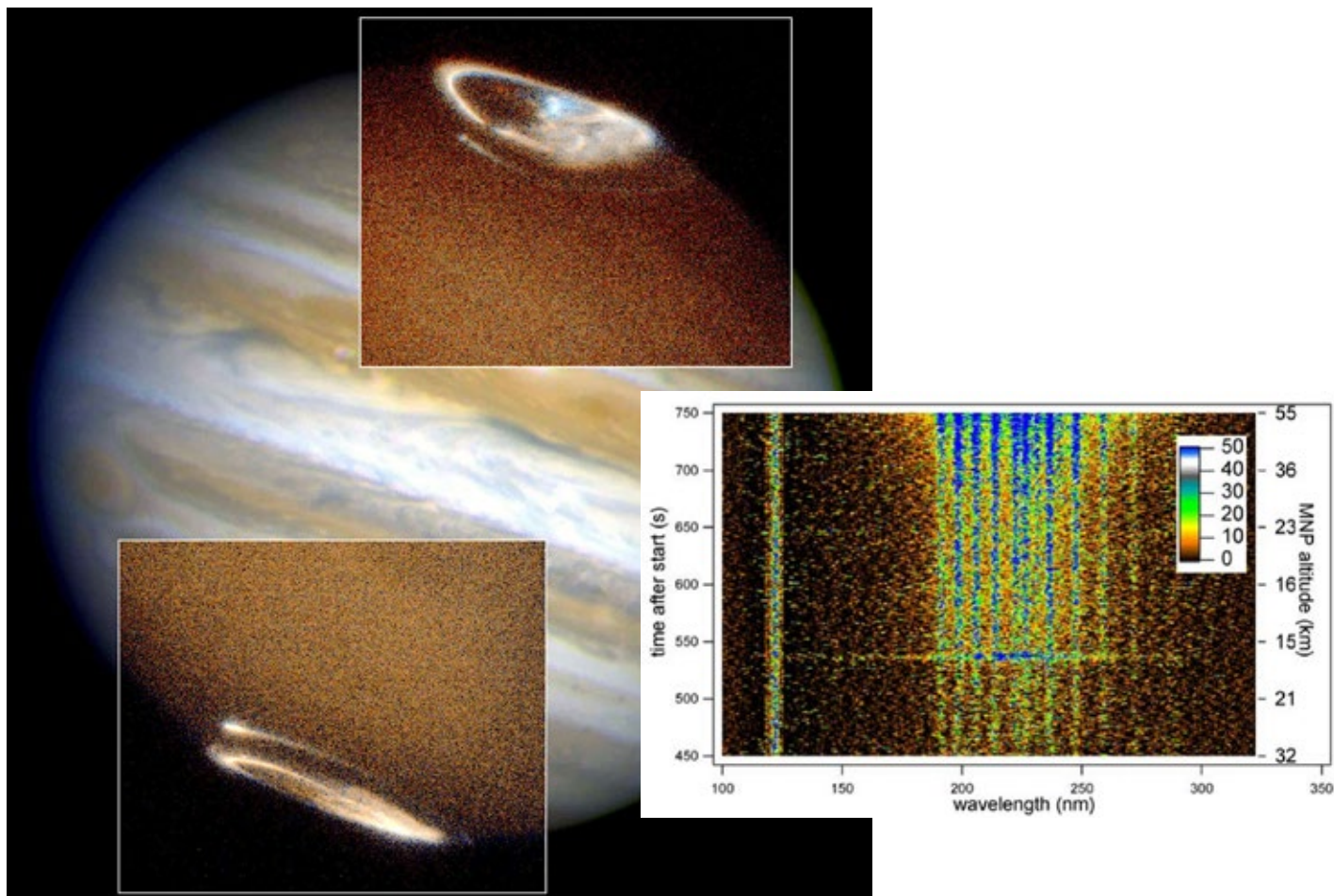
Les aurores sont des observations clés pour étudier les hautes atmosphères planétaires, d'autant plus s'il est difficile d'envoyer des sondes et réaliser des mesures in situ. On se focalise ici sur les émissions aurorales dans le visible et l'UV des planètes de notre Système solaire.

Mercury possède son propre champ magnétique, dont la topologie est assez similaire à celui de la Terre bien qu'il soit de plus faible intensité. Les particules du vent solaire peuvent alors pénétrer dans la magnétosphère dans le côté nuit, et peuvent être ramenées vers la planète, pour précipiter suivant les lignes de champ et former également des ovales auroraux. Seulement, à cause de sa faible gravité et de sa proximité avec le Soleil, Mercury possède

une atmosphère peu dense, composée principalement d'hélium, d'argon et de néon. La pression atmosphérique est trop faible pour avoir suffisamment de collisions entre les neutres et les électrons, et donc des émissions aurorales par la suite.

Vénus, en revanche possède une atmosphère dense, composée à 96 % de CO<sub>2</sub>, mais pas de champ magnétique. Constamment soumis aux radiations solaires dans l'EUV, une ionosphère diurne est alors générée, qui empêche le vent solaire de pénétrer dans l'atmosphère. Certaines particules arrivent toutefois à la franchir, ce qui provoque une légère excitation côté jour, ce qui engendre alors du *dayglow*. Des émissions ont également été observées du côté nuit de Vénus, le plasma étant transporté du côté jour au côté nuit de l'ionosphère. Toutefois, les électrons ont une énergie faible de l'ordre de 10 eV, et les émissions dans le visible sont extrêmement faibles, et ce ne sont pas des aurores en tant que telles, mais plutôt du *nightglow* comme sur Terre. Dans l'ultraviolet, toutefois, des émissions liées à l'oxygène à 130,4 nm et 135,6 nm ont été observées, ce qui suppose une population d'électrons avec une énergie d'environ 300 eV. Toutes ces émissions sur Vénus sont bien diffuses, car il n'y a pas de champ magnétique pour les structurer en ovale auroral comme sur Terre. Mars, avec une ionosphère assez comparable à la Terre, est un cas très intéressant. Si Mars a perdu son champ magnétique intrinsèque dans le passé, il reste toutefois un champ magnétique rémanent, mis en évidence par la sonde Global Mars Surveyor/NASA. Le champ n'est plus global et dipolaire comme sur Terre, mais il y a plusieurs anomalies que l'on modélise par de multiples dipôles, situés près de la surface. La sonde Mars Express/ESA avec l'instrument SPICAM a mis en évidence des bandes d'émissions aurorales des molécules CO et CO<sub>2</sub><sup>+</sup> dans le proche ultraviolet comme l'illustre la figure 5 (cf page suivante), localisées autour des anomalies du champ magnétique.

Comme la Terre, Jupiter possède bien une atmosphère composée principalement d'hydrogène atomique H et moléculaire, H<sub>2</sub>, et d'hélium He, et un champ magnétique dont l'intensité est 10 fois supérieure à celui de la Terre. Les aurores sur Jupiter pourraient constituer un article à part entière, mais on peut présenter ici quelques grandes caractéristiques. La principale source de plasma dans la magnétosphère ne provient pas du vent solaire, mais plutôt de sa lune Io. Avec un volcanisme important lié aux effets de marées induits par Jupiter, Io rejette une tonne par seconde dans l'espace des éléments comme du soufre, de l'oxygène. Ces derniers sont ionisés par le rayonnement UV solaire, alimentant la magnétosphère jovienne en plasma riche en S<sup>+</sup>, O<sup>+</sup>, S<sub>2</sub><sup>+</sup>, O<sub>2</sub><sup>+</sup> et autres ions et électrons principalement dans le feuillet de plasma équatorial. À l'instar de la Terre, des lignes de champ



**Fig.5. Composite d'images de Jupiter dans le visible et dans l'ultraviolet pour les ovales auroraux par Hubble Space Telescope. Crédit NASA (gauche). Spectre d'émission pris par SPICAM à bord de Mars Express des bandes d'émissions de CO et CO<sub>2</sub> de nuit, adapté de Bertaux et al. 2005 (droite).**

ouvertes entre l'ionosphère de Jupiter et le feuillet de plasma vont guider les électrons, qui seront accélérés par des différences de potentiel électrique, formant ainsi les ovales auroraux, dits principaux. Il existe aussi des « empreintes » liées à aux satellites de Jupiter, Io, Ganymède et Europe. Des lignes de champ magnétique relient Jupiter à ses satellites, des particules chargées précipitant directement dans l'ionosphère de Jupiter dans des zones très précises. L'élément majoritaire étant l'hydrogène, les émissions aurorales dans le domaine visible consiste à la série de Balmer avec H-alpha et H-beta. Il y a très peu d'émissions détectables du côté jour comme de nuit. C'est surtout dans l'UV avec l'émission Lyman alpha à 121,6 nm : les deux réactions prépondérantes sont l'impact électronique direct sur H, mais aussi l'impact électronique de dissociation de H<sub>2</sub>, peuplant efficacement le niveau d'état excité de l'hydrogène responsable de Lyman-alpha. De la même manière que Jupiter, Uranus et Saturne présente des émissions aurorales de H<sub>2</sub> dans le proche UV entre 130 et 170 nm.

Ganymède, la plus grosse lune de Jupiter (et de notre Système solaire), possède également son propre champ magnétique, et une atmosphère. Cette dernière est principalement formée par la pulvérisation de sa surface

par des ions soufre de la magnétosphère jovienne. Essentiellement composée de glaces, la surface dégaze continuellement de l'eau et des molécules de dioxygène. La précipitation des électrons le long des lignes de champ magnétique ouvertes au niveau des pôles de Ganymède crée alors les aurores polaires avec un ovale aurorale typique, visibles dans l'ultraviolet avec l'émission de l'oxygène à 130,4 nm et 135,6 nm. Des émissions de la raie verte et rouge sont aussi modélisées, mais l'observation est assez difficile à cause de la réflexion de la lumière solaire sur la surface. Europe présente également des émissions similaires à Ganymède.

Nous avons présenté ici uniquement les émissions aurorales dans l'ultraviolet, le visible et très proche infrarouge (< 1 µm). Mais il existe également des émissions aurorales dans le domaine de l'infrarouge proche (2 µm - 10 µm) notamment avec toute la chimie impliquant du H<sub>3</sub><sup>+</sup> dans le cas de Jupiter et d'Uranus. La contribution dans le domaine radio est aussi très importante pour les géantes gazeuses et la Terre également, avec des processus d'émissions liés à l'interaction entre les électrons et le champ magnétique. Sans parler du domaine des rayons X, très riche en information également.