

L'ionosphère

L'ionosphère est une région de l'atmosphère située entre la mésosphère et la magnétosphère, c'est à dire entre 60 km et 800 km d'altitude. Elle est constituée de gaz fortement ionisés à très faible pression entre $1 \text{ Pa} = 10^{-5} \text{ bar}$ et $10^{-6} \text{ Pa} = 10^{-11} \text{ bar}$, on parle de plasma. la température est très variable allant de -80 °C à plus de $1\,000 \text{ °C}$. La ionisation du gaz est la conséquence de l'action des rayonnements UV provenant du Soleil. La figure 1 montre l'évolution de la température et accessoirement une courbe d'évolution de la densité électronique du plasma¹.

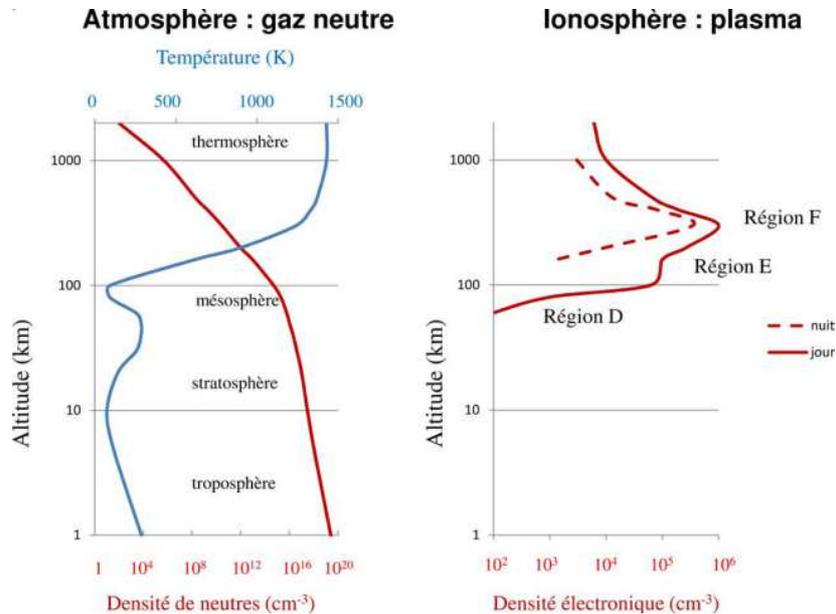


FIGURE 1 – Température dans l'ionosphère et densités de particules

1 Aspect historique

En 1901, l'italien MARCONI réalisa la première transmission transatlantique d'un message par ondes radios de fréquence $f \simeq 300 \text{ kHz}$ et donc de longueur d'onde $\lambda \simeq 1 \text{ km}$. Il reçut le prix NOBEL en 1909. La prouesse de la transmission transatlantique est liée au fait que dans un milieu homogène ou quasi-homogène, les ondes électromagnétiques se propagent en ligne droite. Or, sur les 6 000 km de traversée de l'océan, la courbure de la surface terrestre est telle que l'onde ne devrait jamais parvenir au récepteur. L'enregistrement du signal impose donc qu'il se soit réfléchi au moins une fois dans l'atmosphère. Une onde électromagnétique se réfléchit bien sur les conducteurs. L'atmosphère possède en l'ionosphère le réflecteur approprié, voir le schéma de la figure 2.

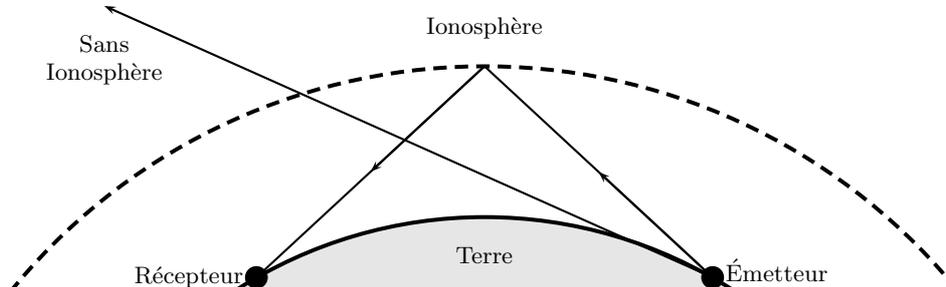


FIGURE 2 – Principe de propagation des ondes électromagnétiques autour de la Terre

Ce sont les scientifiques HEAVISIDE et KENNELY qui en ont proposé l'existence dès 1902. Ensuite, c'est EDWARD APPLETON, en 1925, qui a imaginé que la haute atmosphère devait être ionisée par l'absorption du rayonnement ultraviolet solaire et, de ce fait, conduire l'électricité. Peu après ont été réalisées les premières

1. Des données et des images contenues dans ce document sont extraites de l'article *Du plasma dans l'espace ?* écrit par Mme Laurence REZEAU du Laboratoire de Physique des Plasmas (LPP) de l'Université Pierre et Marie Curie. Cet article a été publié dans le BUP n°1000 de janvier 2018.

explorations de l'ionosphère : en envoyant vers le ciel des impulsions radio à quelques mégahertz, on les voit revenir après réflexion et le temps de parcours permet de calculer l'altitude du bas de l'ionosphère. Cette problématique est le cœur de cette étude documentaire. Ce n'est qu'avec l'utilisation des satellites artificiels que l'on put, dans la seconde moitié du XX^e siècle, caractériser l'ionosphère comme formée de différentes couches caractérisées par des densités électroniques différentes, des pressions différentes et des températures différentes.

Les sondes envoyées depuis la Terre permettent d'obtenir des caractéristiques de l'atmosphère terrestre mais on est capable de pousser les explorations beaucoup plus loin dans l'espace. Par exemple, la sonde BepiColombo est une sonde ESA/JAXA lancée en 2018 vers Mercure, voir la figure 3.



FIGURE 3 – La sonde MMO de BepiColombo en cours d'intégration. En insert, photo de l'analyseur de particules MSA fabriqué au LPP.

2 Données sur l'ionosphère

À haute altitude, au-delà de quelques dizaines de kilomètres de la surface de la Terre, la pression devient très faible. La densité particulaire est faible et les molécules présentes sont ionisées comme nous avons vu avant par le rayonnement UV provenant du Soleil. La densité électronique qui en résulte varie fortement en fonction de l'altitude, du jour et de la nuit. Les limites courantes de la densité électronique sont $n_{min} = 10^7 \text{ e}^-/\text{m}^3$ à $n_{max} = 10^{12} \text{ e}^-/\text{m}^3$, voir le graphique de la figure 4.

On peut constater que l'on distingue en fait 3 couches avec éventuellement des sous-couches. La couche D se situe entre 50 km et 100 km d'altitude. La densité électronique y atteint $10^{10} \text{ e}^-/\text{m}^3$. Pendant la journée, la densité électronique se maintient relativement bien autour de cette valeur. Par contre, cette couche disparaît très rapidement avec le coucher du Soleil. À chaque densité électronique correspond une fréquence de coupure du plasma f_p . Il s'agit de la fréquence en dessous de laquelle l'onde électromagnétique venue de la surface de la Terre se réfléchit. Cette fréquence est donnée par la formule :

$$f_p = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{ne^2}{m_e \epsilon_0}}$$

Dans cette formule, m_e représente la masse d'un électron. La fréquence du plasma dépend de la densité volumique d'électrons n mais, en dehors de cela, il ne figure dans la formule que des constantes fondamentales de la Physique. En effectuant partiellement l'application numérique, on peut aboutir à la formule pratique suivante :

$$f_p = 9 \sqrt{n} \text{ en Hz}$$

Dans cette formule, la densité électronique n est exprimé en m^{-3} .

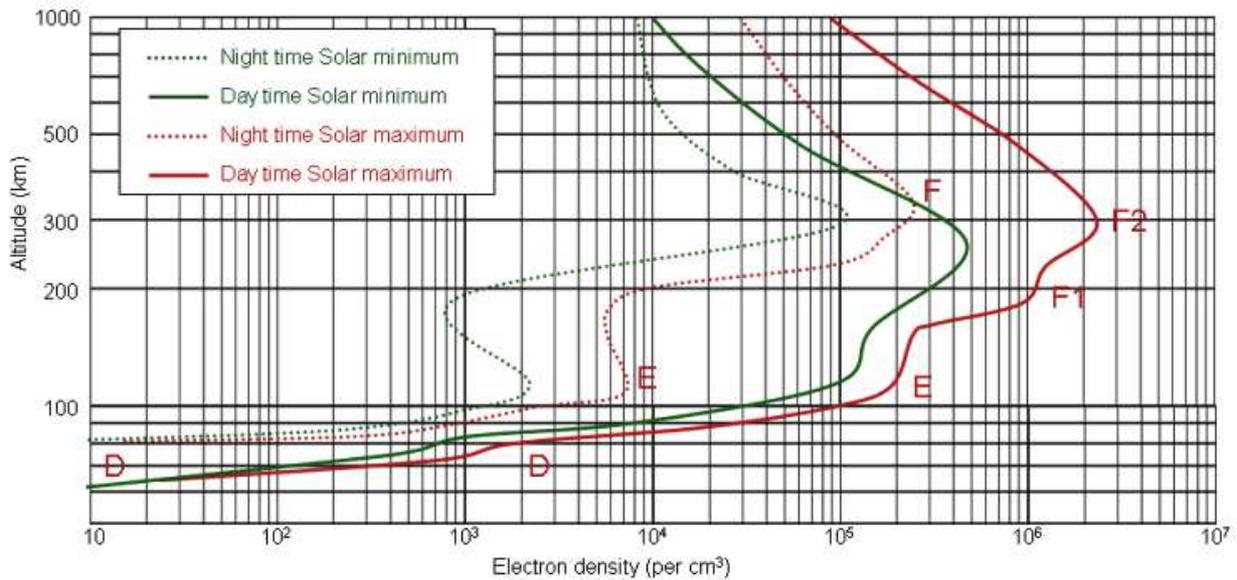


FIGURE 4 – Densité électronique dans l'ionosphère

Pour étudier la composition de l'ionosphère, on envoie une onde électromagnétique de fréquence fixée. La durée de son aller-retour permet de savoir à quelle altitude h , elle s'est réfléchi. Cette altitude est donnée par la formule $2h = c\Delta t$ où c est la vitesse de la lumière dans le vide - le milieu étant très peu dense, on assimile la vitesse de propagation à celle dans le vide -. Tant que la fréquence de l'onde est supérieure à la fréquence du plasma, l'onde continue à se propager. Or, la densité a tendance à augmenter lorsque l'altitude augmente. Au fur et à mesure de son parcours, la fréquence plasma augmente et atteint la fréquence de l'onde. À partir de ce moment, l'onde est réfléchi vers le bas. En mesurant l'intervalle de temps Δt , on possède l'altitude et la fréquence de l'onde $f = f_p$ nous permet d'accéder à la densité électronique selon :

$$n = \frac{4\pi^2 f_p^2 m_e \epsilon_0}{e^2}$$

On peut encore, en utilisant, la formule semi-numérique donner l'expression de la densité électronique :

$$n = \frac{f_p^2}{81}$$

Dans cette expression, la fréquence doit être exprimée en Hz. La densité électronique sera alors dans l'unité légale à savoir m^{-3} .

La couche E se situe entre 100 km et un peu moins de 200 km. Sa densité atteint des valeurs comprises entre $10^{11} \text{e}^-/\text{m}^3$ et $10^{12} \text{e}^-/\text{m}^3$. On voit clairement sur le graphique de la figure 4 que la densité électronique est divisée par 100 voire plus pendant la nuit. On peut considérer que cette couche disparaît elle aussi.

La couche F est très épaisse, on peut éventuellement y distinguer des sous-couches. C'est la plus épaisse des couches de l'ionosphère puisqu'on l'estime comprise entre 200 km et 500 km. La concentration en électrons dépasse $10^{12} \text{e}^-/\text{m}^3$. L'altitude de cette couche varie fortement en fonction de l'heure du jour ou celle de la nuit. La couche F se sépare souvent en deux sous-couches F1 et F2 qui se recombinent la nuit. Cette couche est importante car la plupart des satellites sont situés au-delà de 800 km d'altitude, il est donc indispensable que les ondes électromagnétiques provenant de la Terre et permettant la communication avec les satellites puissent la traverser. Leur fréquence doit donc être supérieure à la fréquence de plasma.

Les ionogrammes que l'on enregistre en utilisant les ionosondes correspondent à des graphiques comme celui de la figure 5. On y voit l'altitude à laquelle une fréquence d'ondes électromagnétiques est réfléchi.

Le cycle solaire influence beaucoup la densité électronique des couches de l'ionosphère, voir la figure 6. L'évolution des fréquences limites est très suivie afin de garantir les télécommunications.

Dans la présentation simplifiée que nous venons de faire de l'écho radio provoqué par une des couches de l'ionosphère, seul des trajets rectilignes ont été envisagés. Ces trajets sont en réalité courbes car sous l'effet d'une réfraction permanente avec un angle d'incidence non nul, on obtient ce qui est représenté sur le schéma de la figure 7.

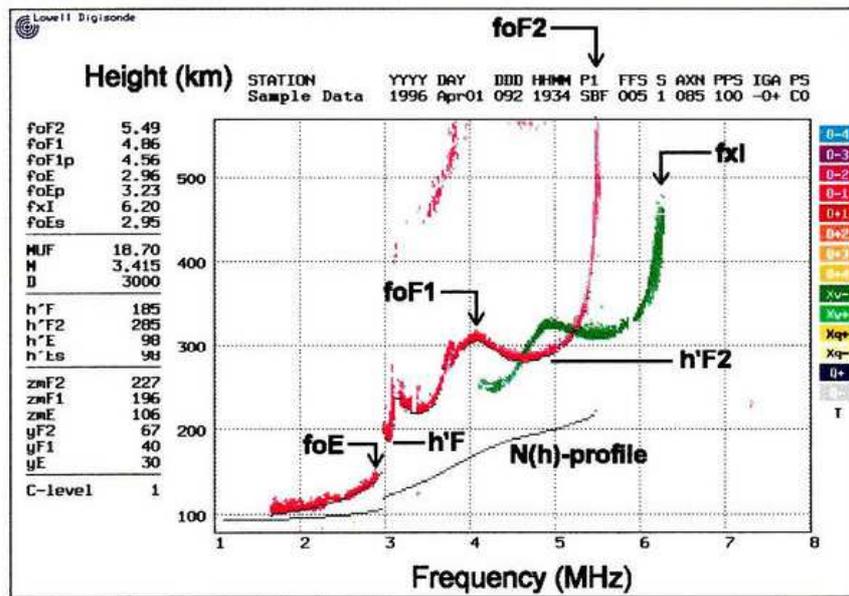


FIGURE 5 – Ionogrammes

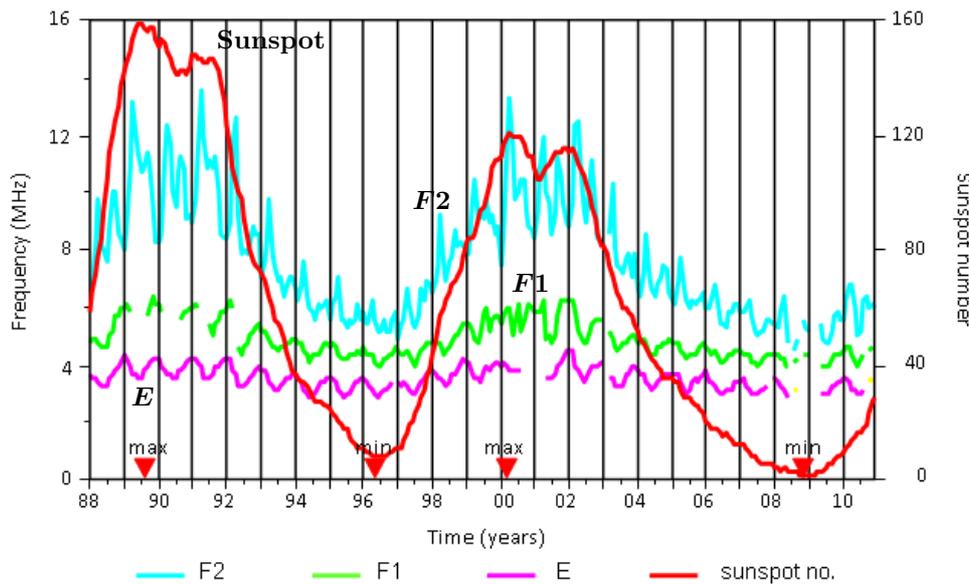


FIGURE 6 – Cycle solaire et fréquences critiques (Canberra – Australie). Les lignes verticales représentent chaque début d’année et le Sunspot number caractérise l’intensité de l’activité solaire.

La réfraction atmosphérique peut être étudiée numériquement. La simulation (voir les graphiques de la figure 8 permet de voir que ces ondes peuvent être réfléchies vers le sol à des fréquences supérieures à la fréquence critique f_p si l’angle d’incidence i sur la surface fictive de la couche considérée est assez grand. On peut montrer en exploitant les lois de Snell-Descartes que pour une fréquence f donnée, l’angle d’incidence minimal pour profiter de la réflexion ionosphérique est $i_{min} = \arccos(f_p/f)$. Ainsi, un émetteur de télécommunications peut tout de même profiter de la réflexion ionosphérique (pour ne pas être contraint par le relief ou la courbure de la Terre. . .) en exploitant une bande de fréquences supérieure à la fréquence critique de la couche F2 si les ondes sont émises avec un angle suffisant. À chaque angle correspond une fréquence maximale utilisable appelée FMU (ou MUF en anglais pour Maximum Useable Frequency), celle-ci dépendant, bien sûr, de la composition de l’ionosphère puisque la fréquence critique en dépend.

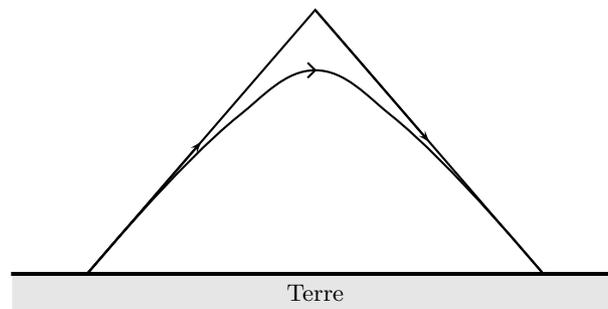


FIGURE 7 – Réfraction atmosphérique

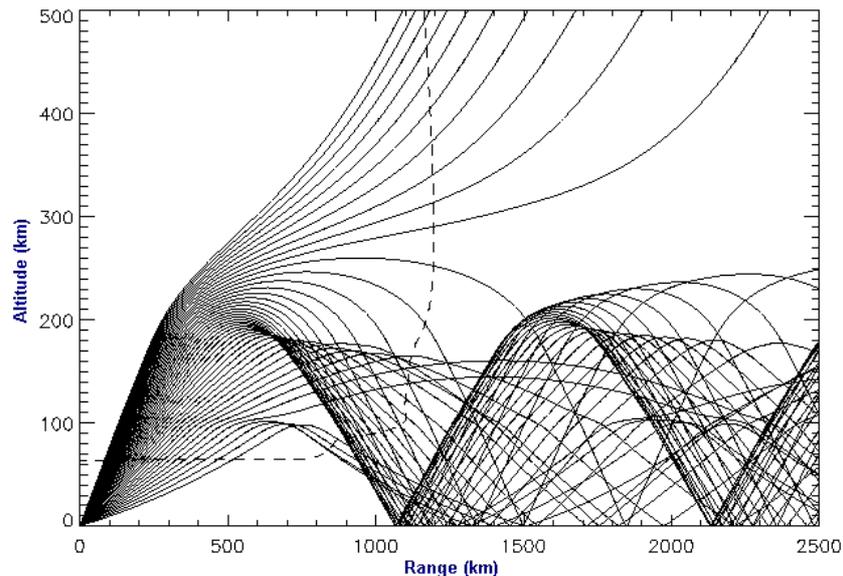


FIGURE 8 – Ionogrammes

3 Fréquences de communication

3.1 Communications terrestres

La première télécommunication transatlantique a été réalisée par MARCONI comme nous l'avons vu en introduction de cette étude. La fréquence utilisée a été de 300 kHz. À l'heure actuelle, on travaille en communication radio dans deux domaines différents. Tout d'abord, l'émission se situe entre les fréquences des *grandes ondes* qui sont des ondes modulées en amplitude dans le domaine de 150 kHz à 300 kHz. On préfère toutefois les ondes modulées en fréquence de la bande 80 MHz à 110 MHz qui sont nettement plus propices à la transmission de l'information car la modulation de fréquence qui porte le signal d'information est nettement moins détériorée que lorsque cette information est placée dans la modulation d'amplitude.

3.2 Communications satellitaires

Comme nous venons de le voir, les satellites ne pourront recevoir de communications de la Terre que si l'onde traverse les trois couches de l'ionosphère D, E et F. La fréquence plasma la plus élevée et bien sûr celle de la couche la plus dense à savoir la couche F. Nous avons vu qu'elle pouvait être $n = 10^{12} \text{ e}^-/\text{m}^3$. Avec la formule semi-numérique précédente, on peut en déduire que la fréquence de plasma est $f_p = 9 \text{ MHz}$. Les fréquences utilisées sont regroupées par bande :

- VHF (*Very High Frequency*) : $30 \text{ MHz} \leq f \leq 300 \text{ MHz}$
- UHF (*Ultra High Frequency*) : $300 \text{ MHz} \leq f \leq 3 \text{ GHz}$
- Hyperfréquences (micro-ondes) : $3 \text{ GHz} \leq f \leq 300 \text{ GHz}$

La télévision utilise deux bandes de fréquences dans le domaine des micro-ondes [4, 8 GHz] et [11, 18 GHz]. Pour le GPS, on utilise une fréquence de 1,575 GHz. Pour information : les fréquences des box internet en WiFi sont autour de 2,4 GHz.

4 Des plasmas dans le système solaire

4.1 Exemples

Le Soleil et les queues des comètes sont des plasmas, voir les photographies des figures 9.

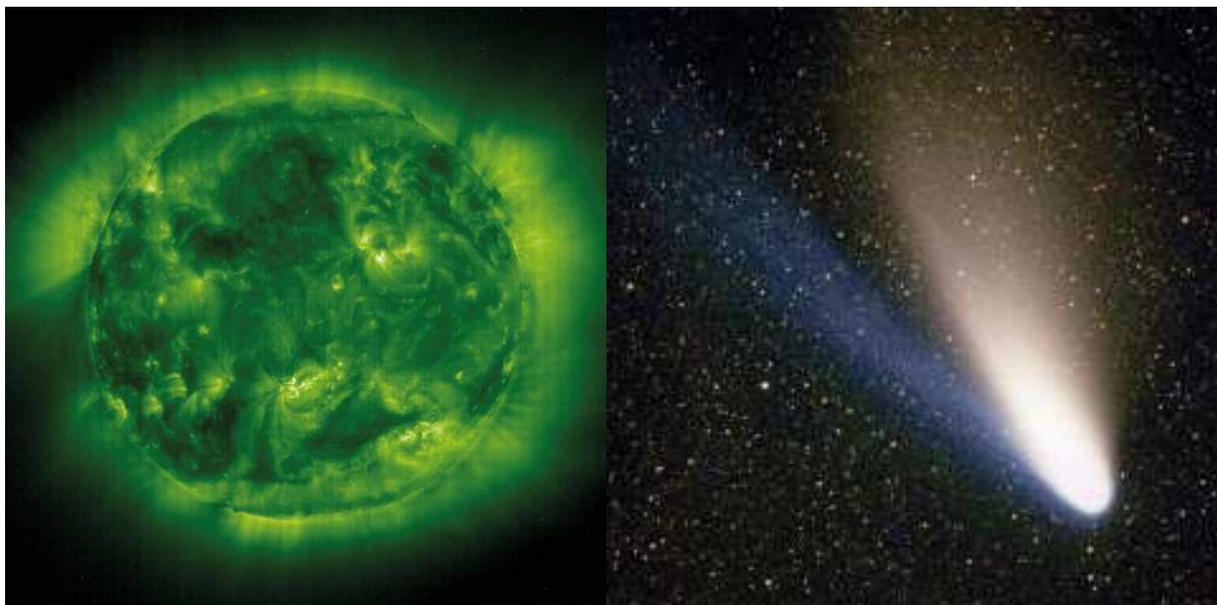


FIGURE 9 – Image en fausses couleurs de la couronne solaire réalisée par l'instrument EIT à bord de la sonde SOHO, dans la raie à 19,5 nm (ESA/NASA). Comète Hale-Bopp photographiée en 1997.

4.2 Le vent solaire

Le vent solaire est un plasma émis par le Soleil. Cette émission a été modélisée pour la première fois par EUGENE PARKER en 1958 bien avant que les premières mesures soient faites. Une avancée décisive a été faite avec la sonde Ulysse lancée par la NASA et l'ESA en 1990. Le vent solaire est émis avec une très grande vitesse jusqu'à $900 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$. La Terre reçoit donc un vent de plusieurs centaines de kilomètres par seconde en permanence. La figure 10 montre un diagramme polaire des vitesses du vent solaire.

Le vent solaire ne parvient que très peu sur Terre. En effet, les particules chargées qui le constituent subissent des interactions avec le champ magnétique terrestre ou plus précisément avec les lignes de ce champ magnétique qui s'éloignent de la Terre. On parle de magnétosphère pour ces lignes de champ magnétique terrestre. Bien que déformées par le vent solaire, elle constitue une sorte de bouclier qui nous protège des particules très énergétiques du vent solaire. C'est d'ailleurs un problème lorsqu'un astronaute quitte la zone protégée puisqu'il est dès lors exposé aux particules du vent solaire. Ces particules - vu leur énergie - peuvent provoquer des dégâts au niveau de nos cellules et en particulier des mutations de l'ADN avec les conséquences que l'on imagine facilement. C'est un des problèmes à résoudre pour envisager d'envoyer des femmes ou des hommes sur Mars. La magnétosphère est représentée à la figure 11.

4.3 Orages magnétiques

Le terme employé dans le titre du paragraphe est impropre. En effet, il y a un certain nombre de circonstances où on a observé des éruptions solaires intenses et peu après des perturbations sérieuses au sol. Cela correspond à des situations où une partie du vent solaire peut se rapprocher de la Terre, le bouclier magnétique n'agissant plus de façon suffisamment forte. La première fois, c'est CARRINGTON en 1859 qui a associé de graves perturbations des communications par télégraphe avec une éruption solaire. En 1989, il y a eu une coupure d'électricité géante

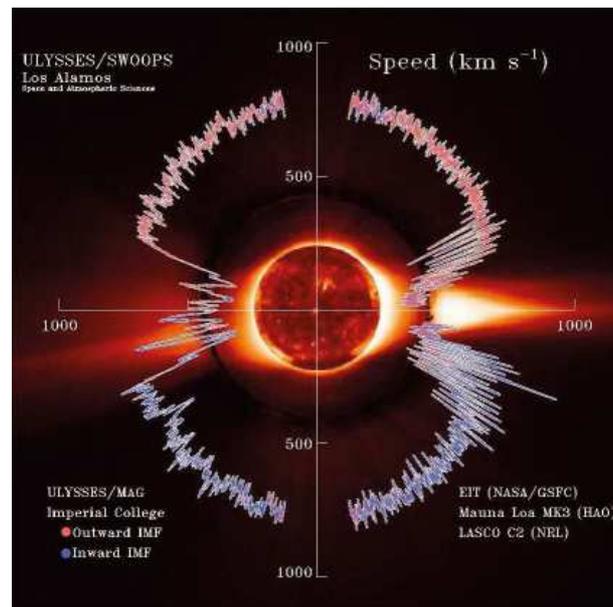


FIGURE 10 – Le Soleil est au centre avec trois images emboîtées prises par SOHO/EIT, le coronographe de Mauna Loa et le coronographe SOHO/LASCO (17 août 1996). La courbe tracée en coordonnées polaires donne la vitesse du vent solaire en fonction de la latitude mesurée par Ulysse de 1993 à 1998. La couleur donne le sens du champ magnétique (rose sortant du Soleil, violet, entrant dans le Soleil).

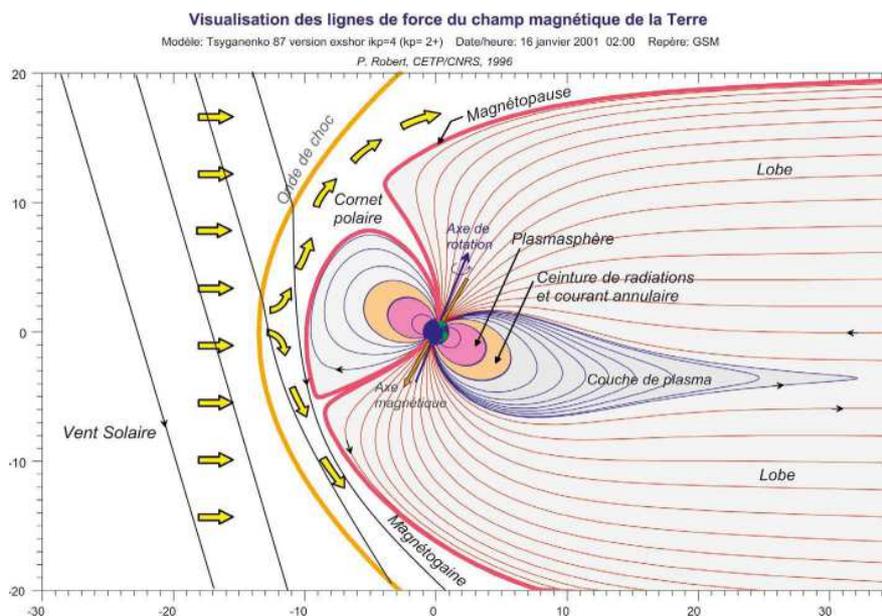


FIGURE 11 – Magnétosphère de la Terre. Les lignes en trait fin sont les lignes de champ magnétique. Le Soleil est loin à gauche, la direction du vent solaire est figurée par les flèches jaunes.

au Québec associée là aussi à une éruption solaire. Cela pose deux questions. On peut s'inquiéter aussi du fait que notre société repose de plus en plus sur des réseaux de communications de plus en plus variés et nombreux (Internet, satellites...), le risque d'accident de ce type augmente ainsi avec le temps. Les avions de ligne et les satellites sont particulièrement exposés. Il faut mettre en place des protocoles qui permettent d'éviter les conséquences graves d'une irruption solaire, voir la figure 12.

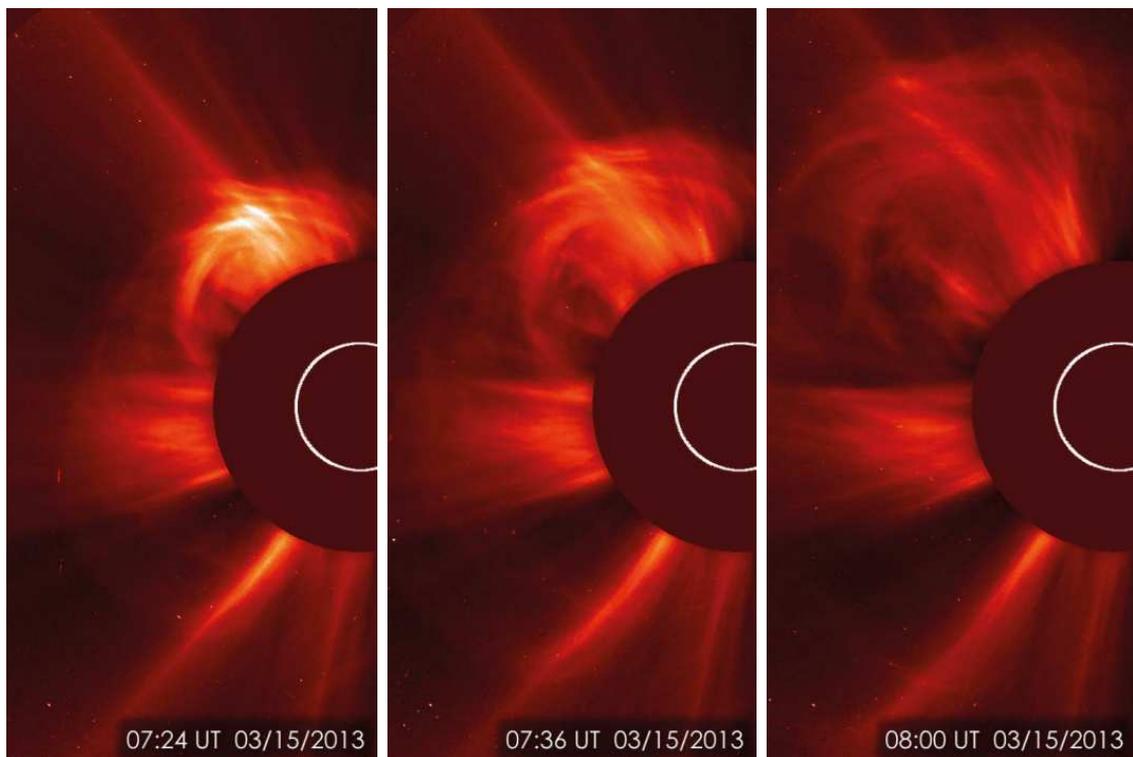


FIGURE 12 – Images successives prises par le coronographe LASCO à bord de la sonde SOHO (ESA/NASA) le 15 mars 2013. Le rond blanc indique la taille du Soleil qui est masqué pour qu'on voit bien la couronne.