LES AURORES POLAIRES

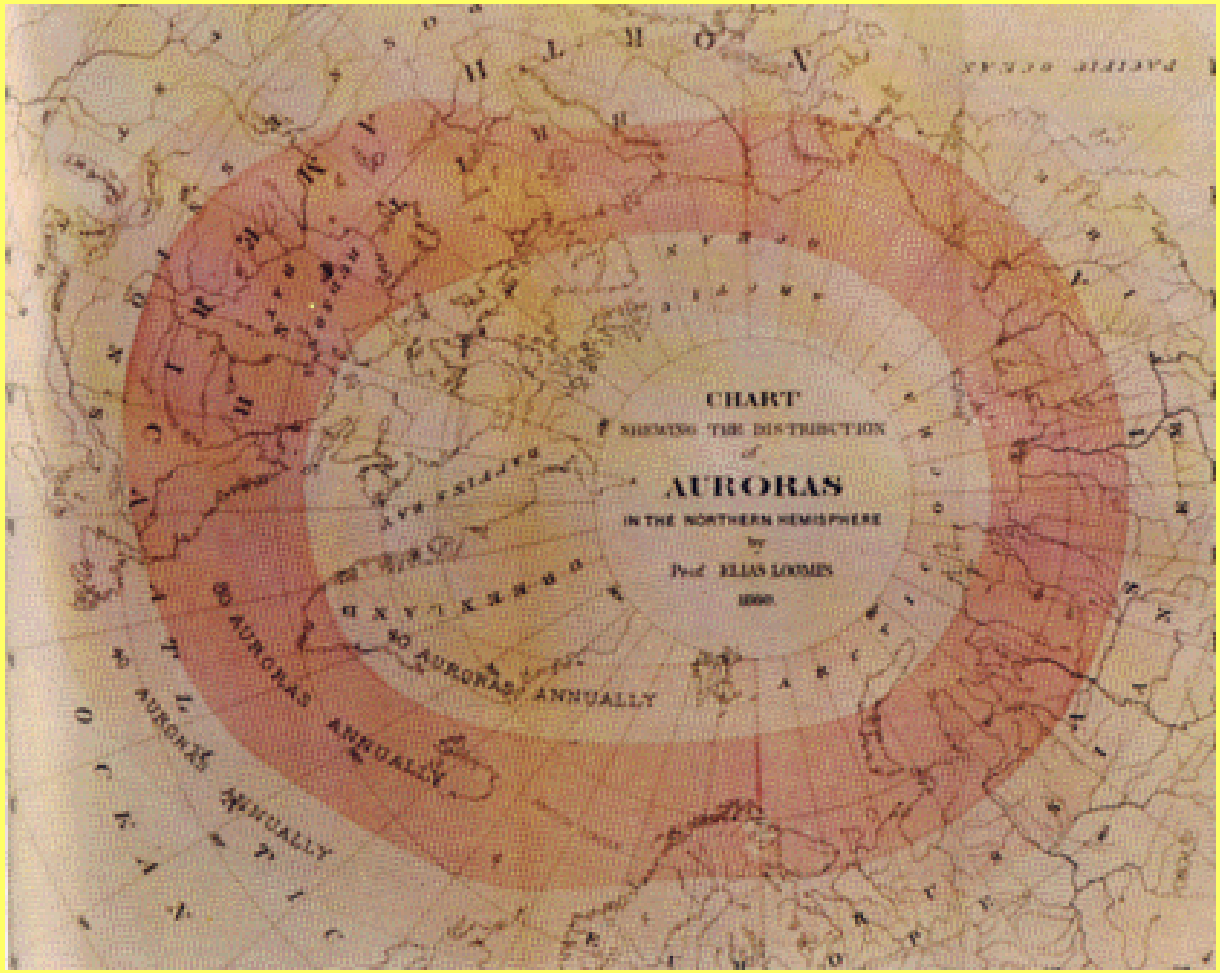
SOMMAIRE DE L’EXPOSE

- Historique de la découverte des aurores
- A la recherche des responsables du phénomène
- La description du phénomène
- La couleur des aurores polaires
- Les formes lumineuses des aurores polaires
- La prévision des aurores polaires
- Les aurores sur les autres planètes du système solaire

HISTORIQUE DE LA DECOUVERTE DES AURORES

RAPPEL HISTORIQUE DE LA DECOUVERTE DES AURORES

- De l'antiquité à la renaissance, pour les Inuits et les hommes, elles sont la signification de la colère des esprits ou des dieux,
- En 1619, Galilée les nomme sous le terme d'aurores boréales,
- En 1773, la première observation du phénomène dans l'océan Indien nous est rapportée par les marins,
- En 1779, Benjamin Franklin émet l'idée que les aurores sont dues à des décharges électriques entre la terre et l'atmosphère,
- En 1860, Elias Loomis publie une carte représentant la fréquence des apparitions des aurores boréales



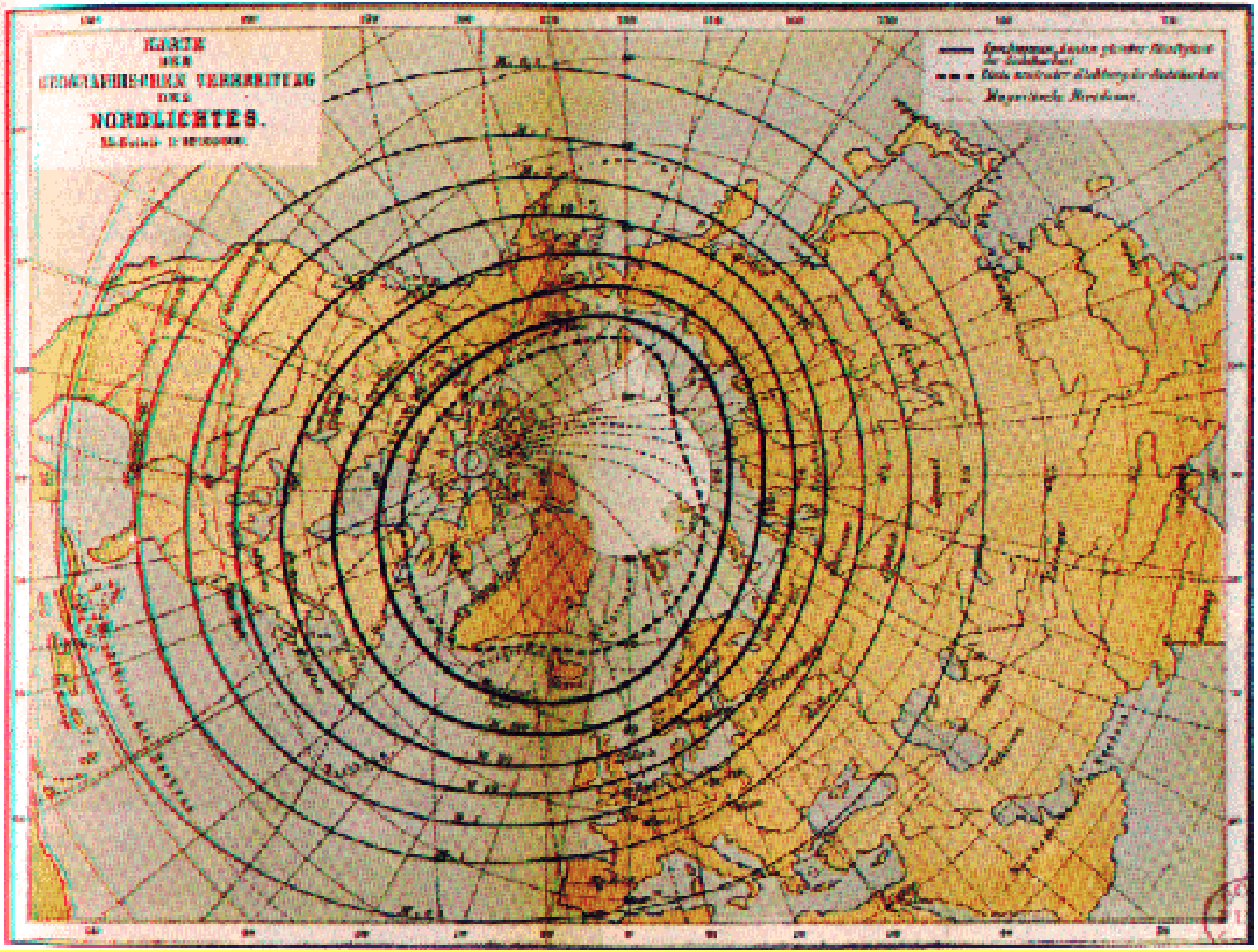
Carte de fréquence avec laquelle on peut voir les aurores dans les différentes régions polaires, établie en 1860 par Elias Loomis, professeur de philosophie naturelle à Yale. La bande centrale contient au moins 80 aurores annuelles.

- En 1863, Auguste de la Rive propose une théorie mêlant à la fois l'électricité et le magnétisme terrestre. Il conçoit un modèle réduit de simulation qu'il présente à l'observatoire de Paris.

Pour le faire fonctionner, on recouvre la sphère en bois de deux bandes de papiers buvards imbibés d'eau salée (une autour de l'équateur, l'autre reliant les deux pôles) puis on branche les électrodes sur une bobine. La décharge de haute tension provoque l'apparition d'un faisceau lumineux dans les manchons de verre contenant des gaz raréfiés. Enfin, on aimante les deux électrodes par un électroaimant. Sous l'action de ce champ magnétique, les faisceaux lumineux se mettent à tourner autour des tiges.

- En 1879, Becquerel propose une explication du phénomène par la précipitation de particules chargées originaires du soleil et guidées par le champ magnétique terrestre jusqu'aux régions polaires,

- En 1881, la carte de Loomis est complétée par Hermann Fritz,


KARTE
DER
GEOGRAPHISCHEN VERBREITUNG
DES
NORDLICHTES.

- En 1901, Christian Birkeland réussit à reproduire le phénomène dans une chambre à vide. Il démontre ainsi que le phénomène provient bien d'un flux de particules solaires guidées par le champ magnétique vers les pôles terrestres.

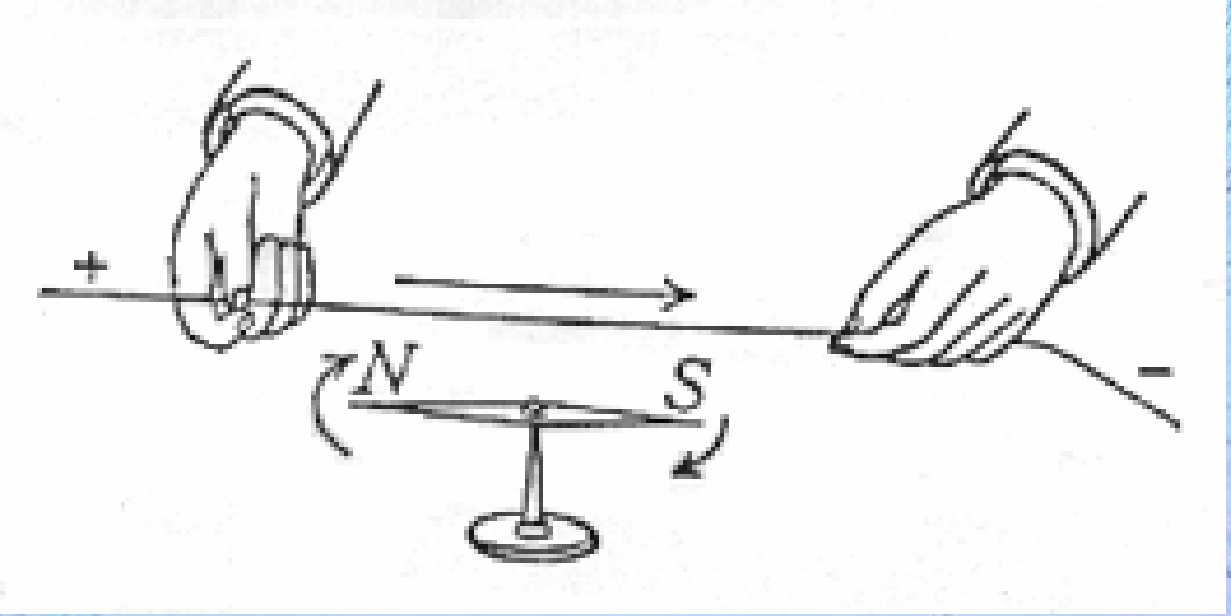
- En 1957 et 1958, les satellites Spoutnik 1 et 2 confirment la théorie de Christian Birkeland et révèlent l'existence de la magnétosphère terrestre, dont la zone d'influence se situe entre 100 et 600 kilomètres d'altitude au-dessus de notre terre,

- Mais, ce n'est que le 24 juillet 2008, que la NASA nous déclarait qu'elle venait de percer le mystère des aurores boréales, grâce à la flotte des cinq satellites de la mission américaine Themis, qui observaient depuis un an le déclenchent de ces phénomènes.

A LA RECHERCHE DES RESPONSABLES DU PHENOMENE

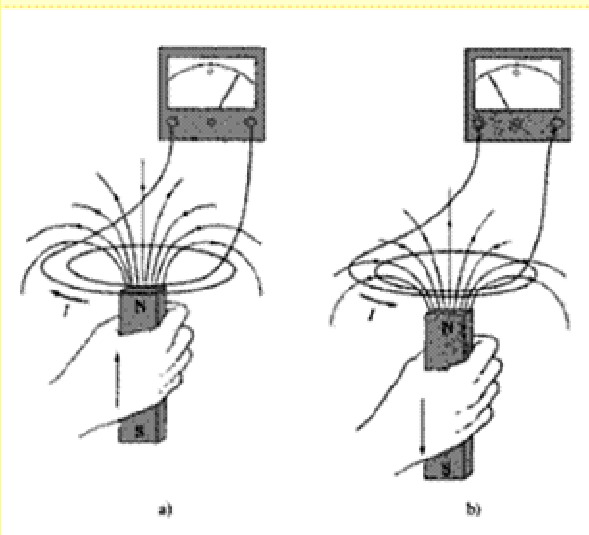
- Qu’est-ce que le magnétisme
- Le champ magnétique terrestre
- Le champ magnétique solaire

QU'EST-CE QUE LE MAGNETISME



- Le magnétisme est une force invisible. Le danois Oersted en 1820 démontra qu'à proximité d'un fil rectiligne parcouru par un courant électrique, l'aiguille d'une boussole était déviée. Il mit ainsi en évidence que le déplacement de charges électriques dans un corps conducteur crée une force invisible appelée « champ magnétique ».

- Cette propriété entre courant électrique et magnétisme fut mise en évidence par Michael Faraday. Par la suite, l'on s'aperçut que cette force était réversible et que si l'on plaçait un corps conducteur dans un champ magnétique invisible, cette force faisait apparaître un courant électrique dans ce corps conducteur.



a) Lorsque l'on approche un aimant d'une bobine, il fait apparaître un courant par induction,

b) Le courant induit s'inverse lorsque l'on éloigne l'aimant. On notera que le zéro du galvanomètre se trouve au centre et que l'aiguille dévie vers la gauche ou vers la droite selon la direction du courant.

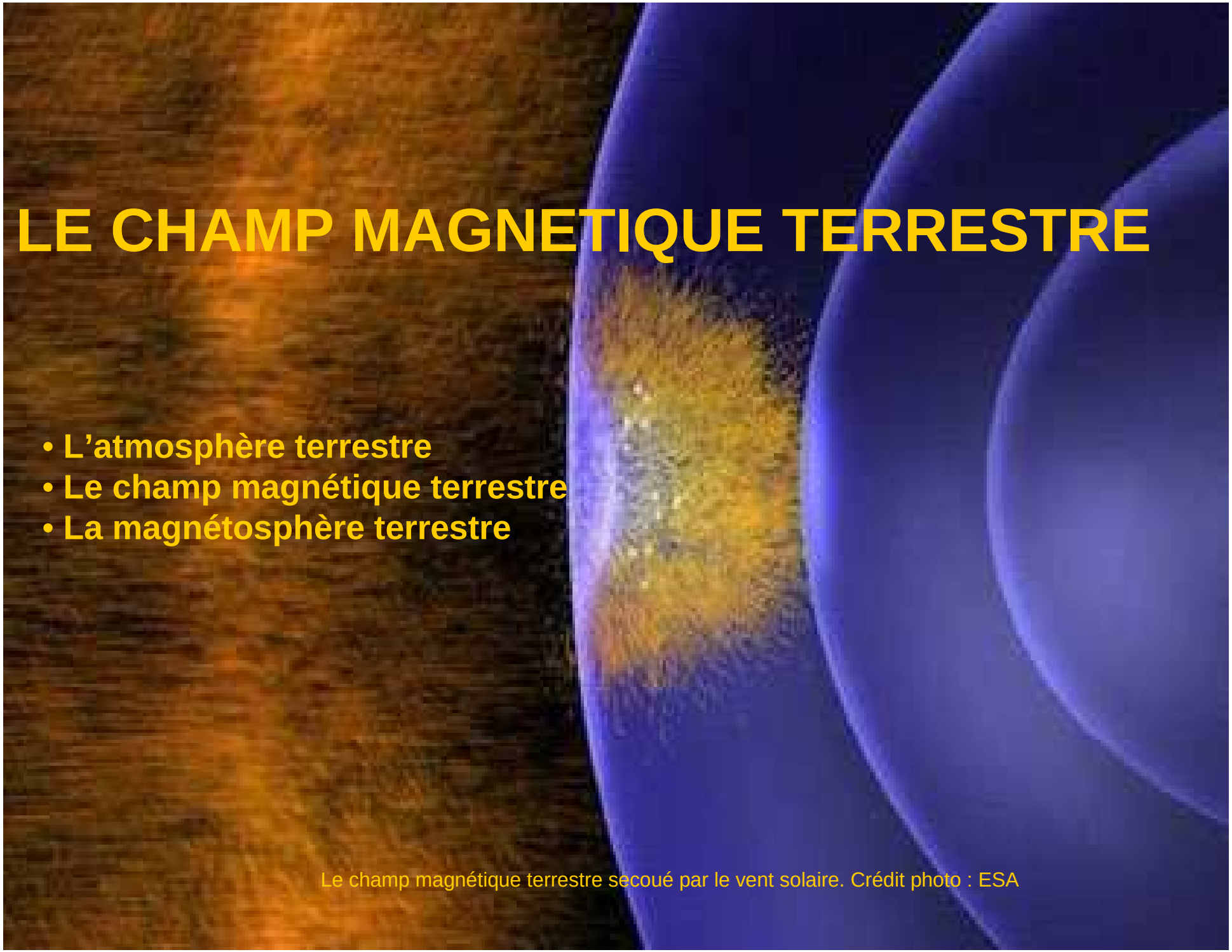
- En 1864, le mathématicien Maxwell parvient à trouver les relations qu'il y avait entre champs magnétique et électriques sous la forme d'un ensemble de 4 équations... Les équations de Maxwell, impliquent paradoxalement la vitesse de la lumière. De cette relation jaillit l'idée que la lumière était un phénomène électrique, puis la découverte des ondes radios et enfin la théorie de la relativité.

Pour en revenir à notre sujet et à la terre, les champs magnétiques ont la particularité d'agir sur les minerais riches en magnétite (oxyde de fer : Fe_3O_4). Ils agissent sur leurs cristaux internes, en figeant leur l'orientation.

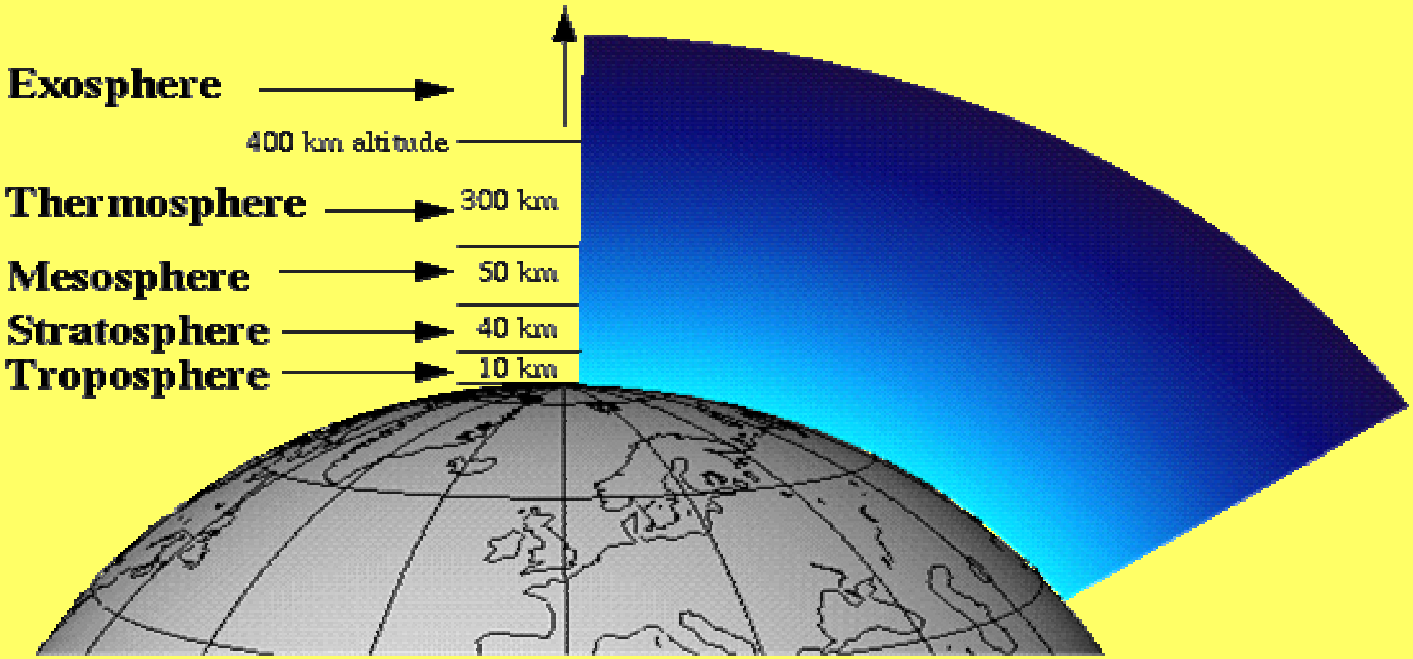
Les roches ont aussi la particularité de perdre leur caractéristique de conservation du magnétisme sous l'effet de la chaleur lorsqu'elle dépasse la température de Curie. Au-dessus de cette température, les cristaux dans le matériau sont dans un état désordonné, sans mémoire, dit « paramagnétique ». Cette transition est réversible, et le matériau retrouve son aimantation quand sa température redescend en dessous de cette température.

LE CHAMP MAGNETIQUE TERRESTRE

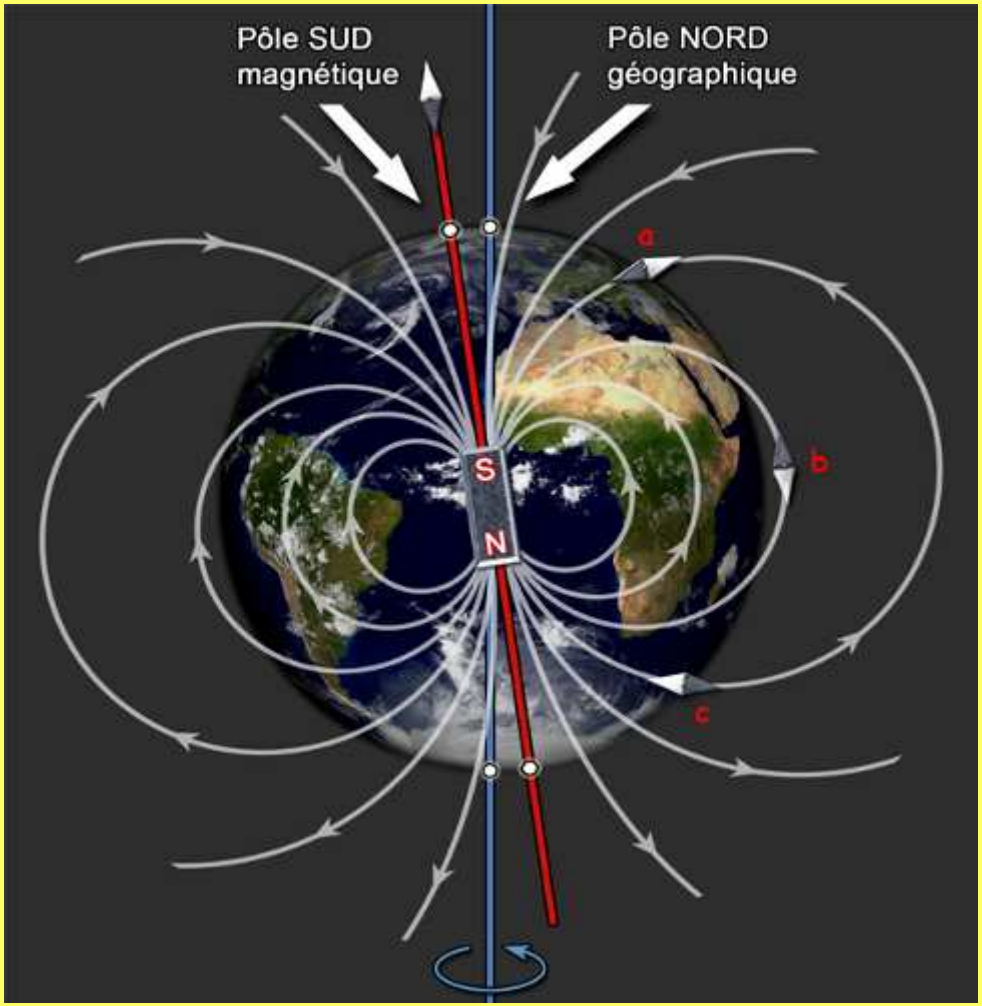
- L’atmosphère terrestre
- Le champ magnétique terrestre
- La magnétosphère terrestre



Le champ magnétique terrestre secoué par le vent solaire. Crédit photo : ESA

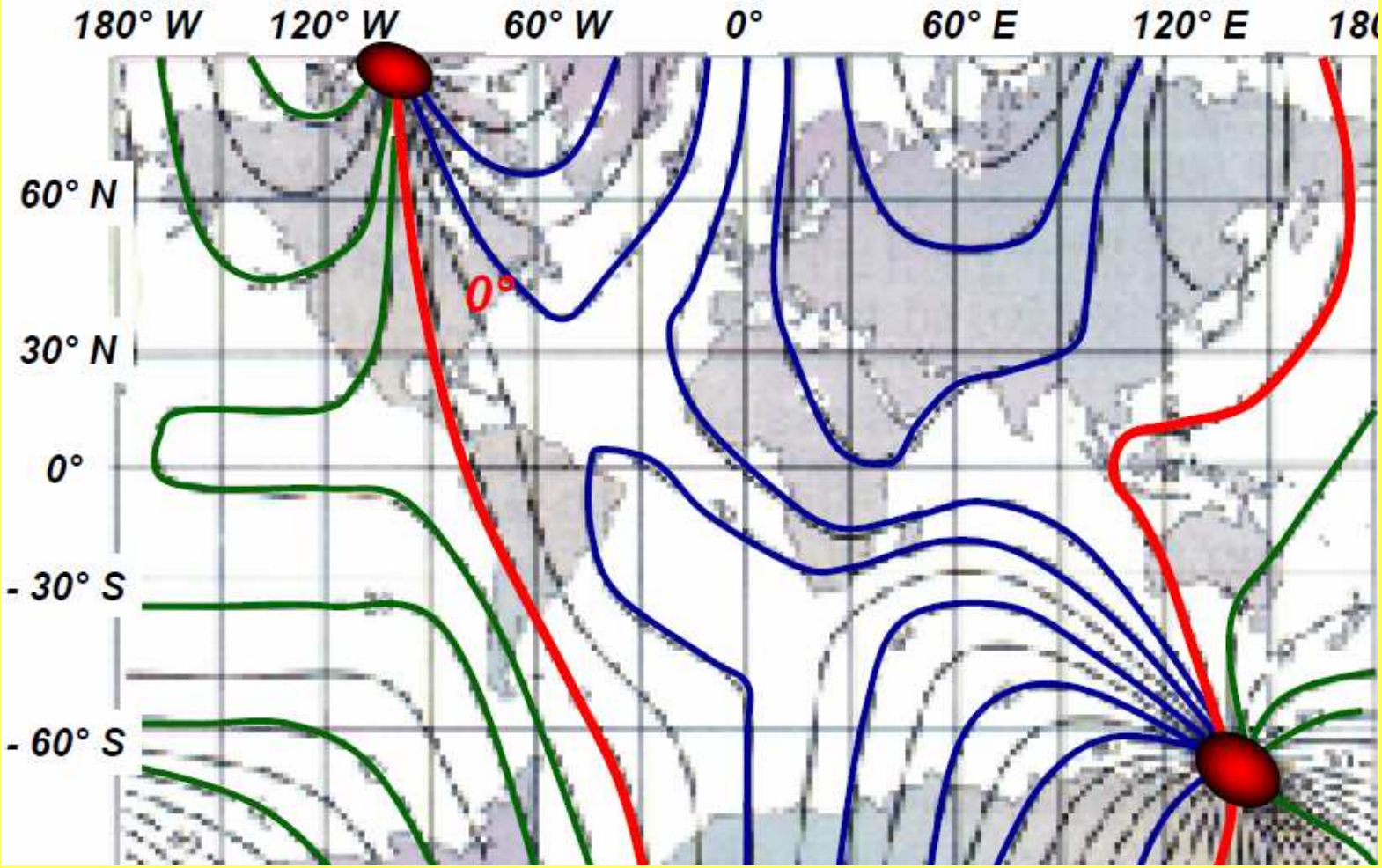


- L'atmosphère terrestre est composée de différentes couches, définies par leur température :
- La troposphère : – 55℃, où se produisent les phénom ènes météorologiques,
- La stratosphère : 0℃, où se produit l'absorption d es UV par l'ozone,
- La mésosphère : où la température redescend jusqu'à -80℃,
- La thermosphère : où les poussières stellaires et les étoiles filantes se volatilisent. C'est la zone où les rayons solaires sont bloqués, dégageant de la chaleur : +1.500℃,
- L'exosphère : température selon exposition soleil (+1.500℃) et terre (proche du zéro absolu).



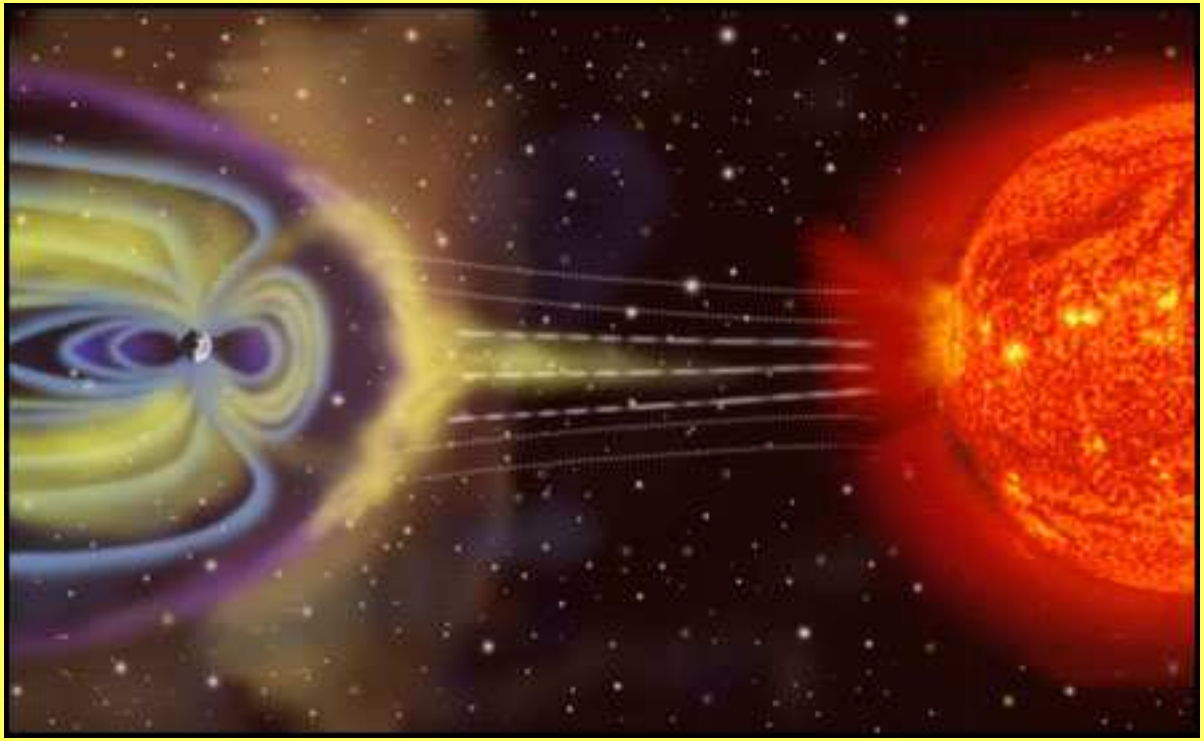
- La Terre est pourvue d'un champ magnétique. L'axe du champ magnétique n'est pas aligné sur l'axe de rotation, mais incliné d'environ 11 degrés,
- Seule la croûte terrestre est magnétisée. En arrivant près de la surface, les roches en fusion en se refroidissant figeraient leurs cristaux internes en les orientant dans le sens du champ magnétique local,
- Deux principales théories basées sur l'effet « dynamo » pour expliquer le magnétisme terrestre : la théorie α (théorie issue du déplacement des molécules dans l'atmosphère) et la théorie interne (théorie du déplacement du magma).

- Le champ magnétique terrestre n'est pas homogène en tout point du globe. Sa valeur moyenne est faible et a une valeur d'environ 0,5 gauss, soit 5×10^{-5} Tesla. Certaines étoiles, telles les pulsars ont un magnétisme de 10^{8} Tesla !



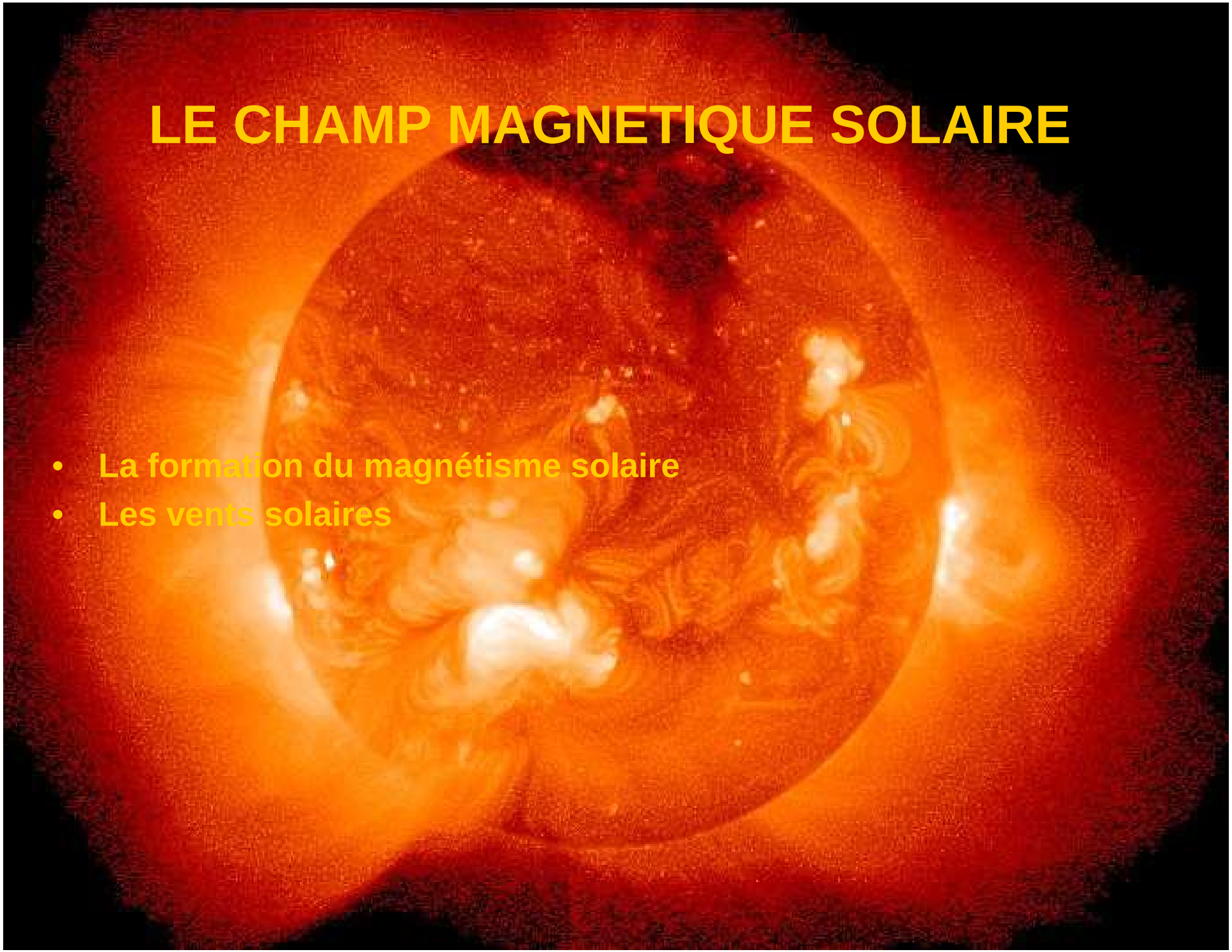
Lignes d'égales déclinaisons du magnétisme terrestre
Cours de géophysique de C. Aubourg - Université Cergy Pontoise

- Ce champ magnétique terrestre sert de bouclier et protège la terre en déviant les particules chargées issues du Soleil, dans une région appelée magnétosphère. La magnétosphère terrestre est située au-delà de l'ionosphère, c'est-à-dire au-dessus de 1.000 km d'altitude.



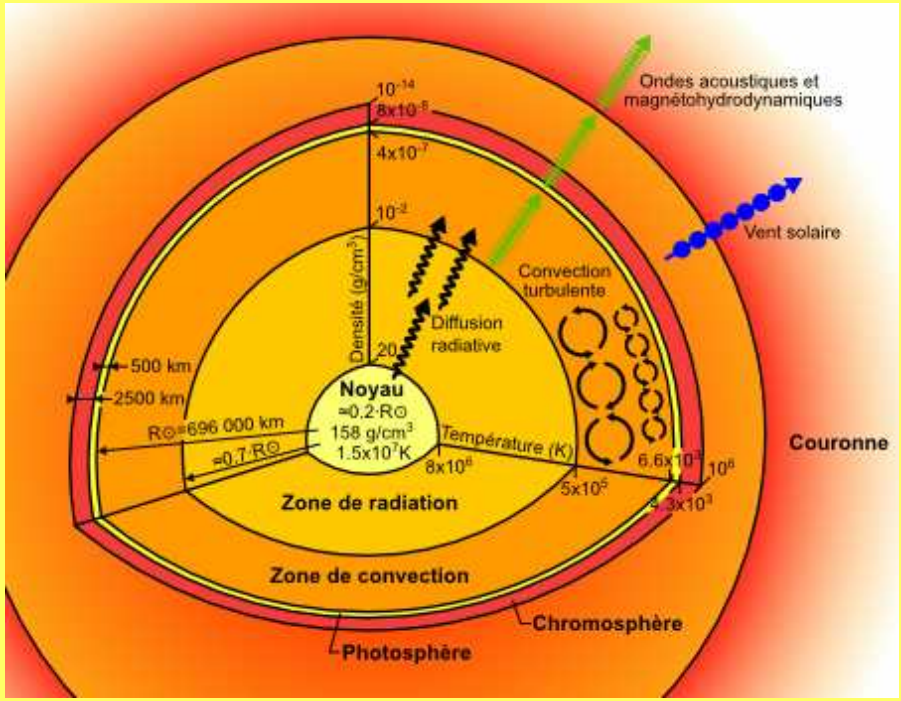
- La forme de la magnétosphère est définie par l'interaction des particules du vent solaire avec notre champ magnétique et dépend donc de l'activité de notre étoile. Dans la direction du Soleil, la magnétosphère s'étend en moyenne jusqu'à 60.000 kilomètres, mais dans la direction opposée, elle s'étire en formant une queue qui peut s'étendre jusqu'à des millions de kilomètres.

LE CHAMP MAGNETIQUE SOLAIRE



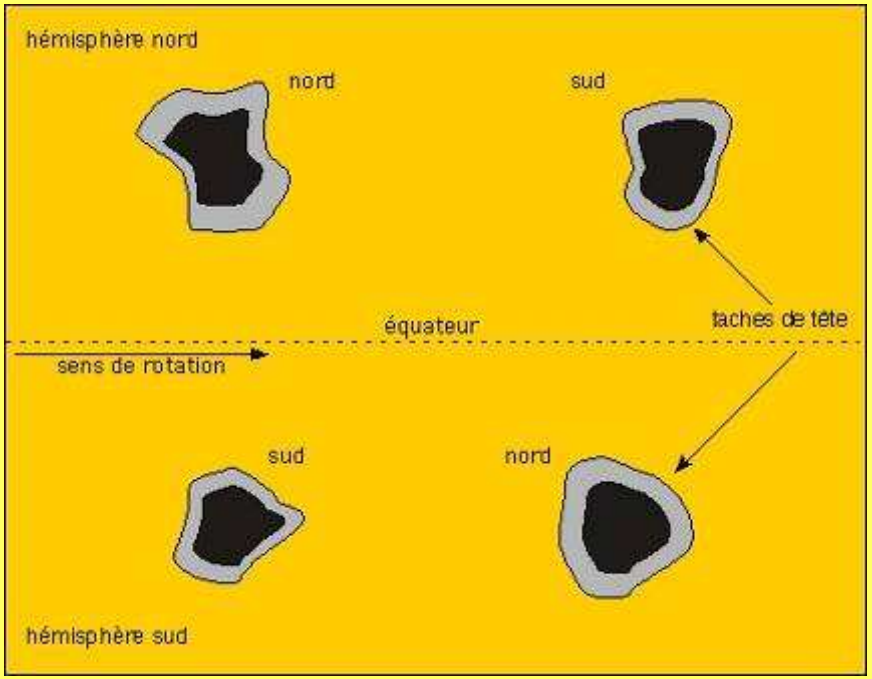
- La formation du magnétisme solaire
- Les vents solaires

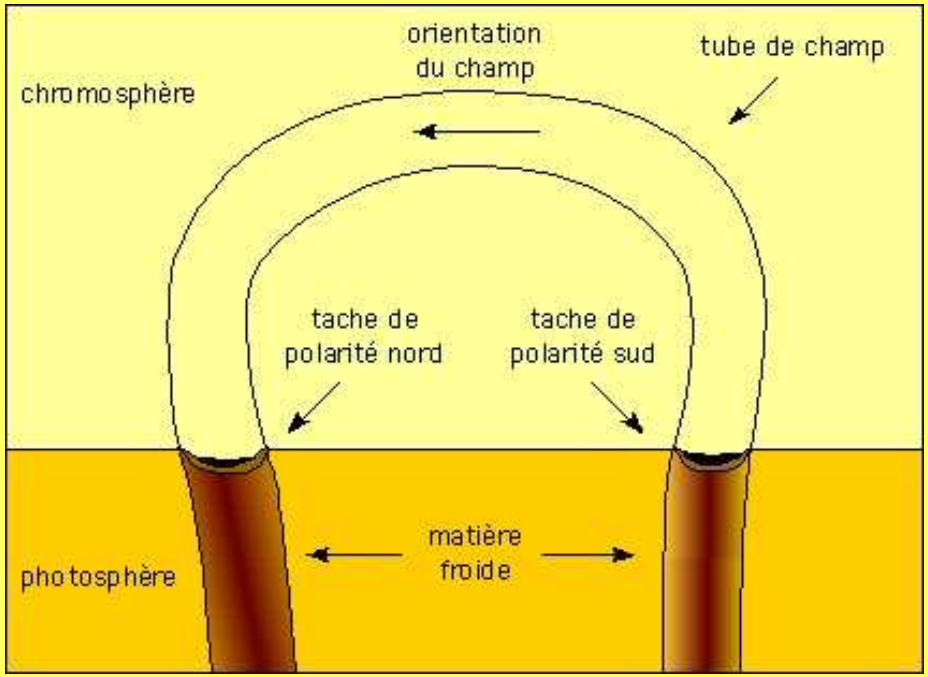
- Le Soleil ne dispose pas de champ magnétique global comme celui de la Terre. Selon nos connaissances, son magnétisme serait généré dans les taches sombres qui apparaissent à la surface solaires. La durée de vie d'une tache est de l'ordre de quelques jours à quelques dizaines de jours. Ces flux magnétiques seraient formées à l'interface appelée la tacholine qui sépare la zone radiative de la zone convective de l'astre.

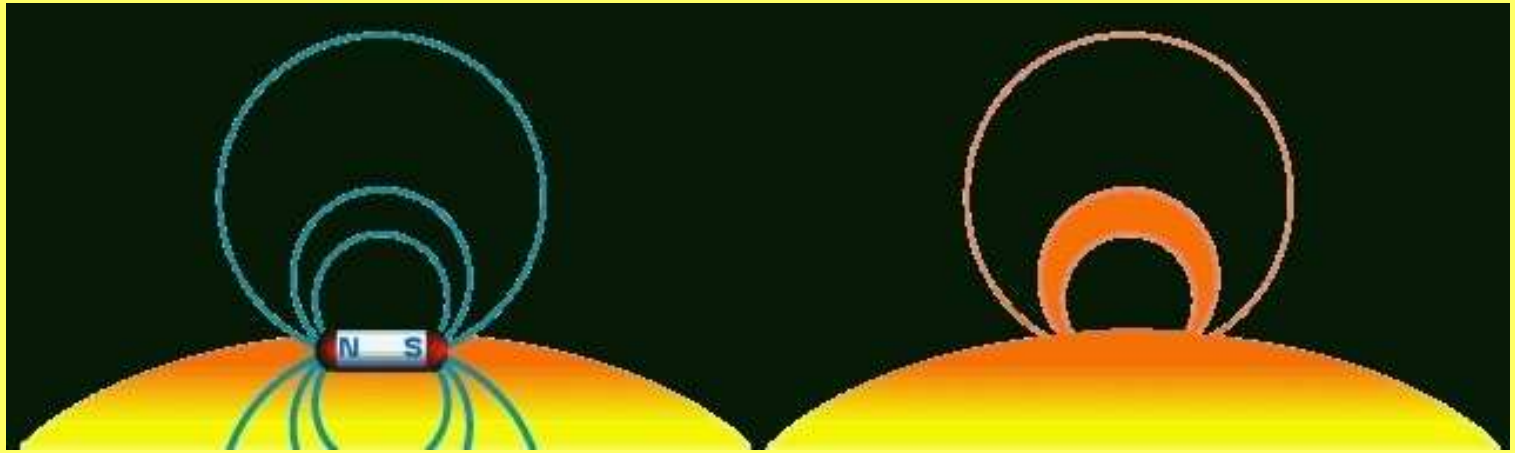


- C'est la variation de la vitesse des gaz dans cette zone de convection, qui serait à l'origine de la création des lignes du champ de force.

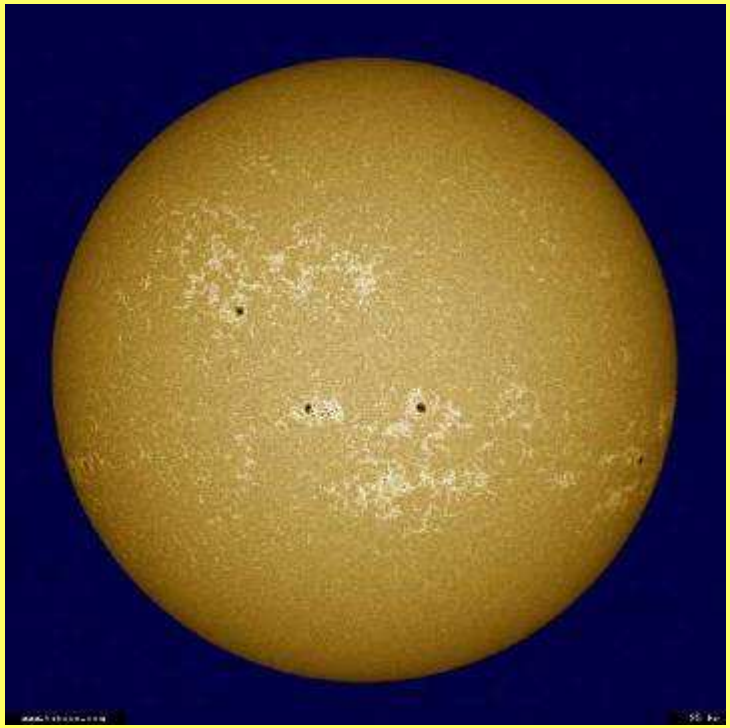
- Sous l'effet combiné de la pression et des mouvements de la matière, ces champs magnétiques perceraient la surface en formant des boucles qui désorganisent localement la surface solaire. Ces zones deviennent alors des facules (taches brillantes de l'ordre de 40.000 km de longueur) dans lesquelles se forment les taches sombres et les protubérances. Ces changements s'intensifient tous les 11 ans, à mesure que le cycle solaire approche de son paroxysme.



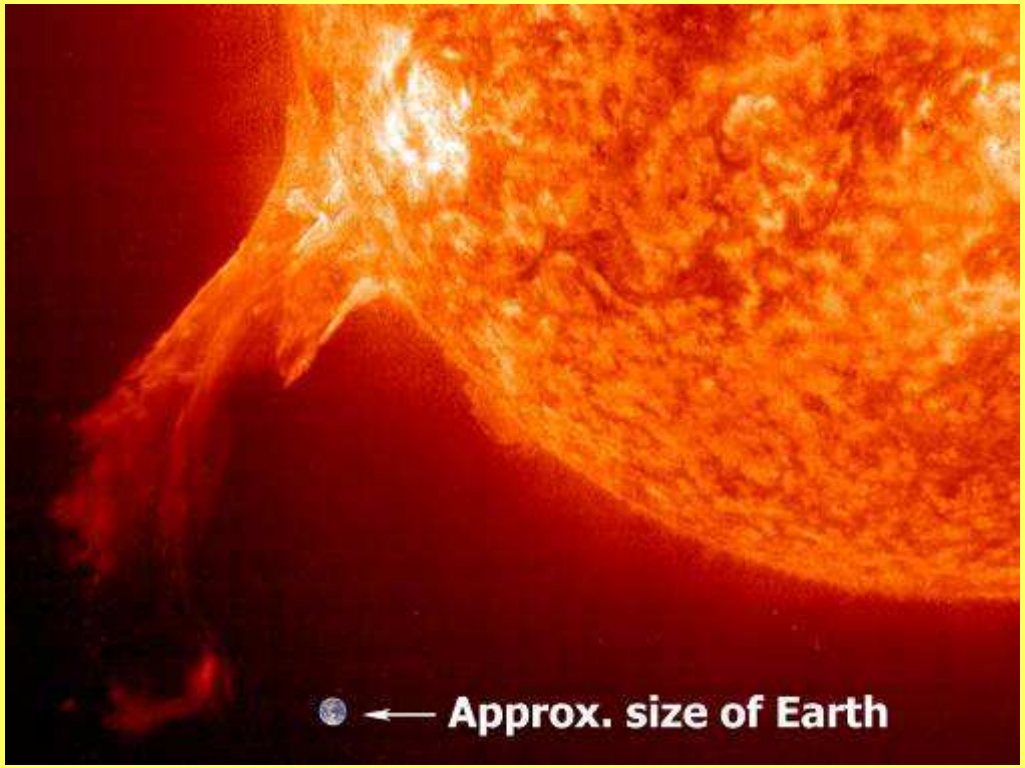




La structure en couronne des protubérances solaires doivent leur forme à l'activité magnétique.



Lors de ce paroxysme, il y a inversion entre les pôles + et – des taches. Cette inversion semble être la conséquence de l'inversion du dipôle apparent du champ magnétique solaire global dont les lignes de force émergent au niveau des taches de la photosphère. Les raisons de ces inversions et de leur fréquence de 11 ans sont encore très, très mal comprises.



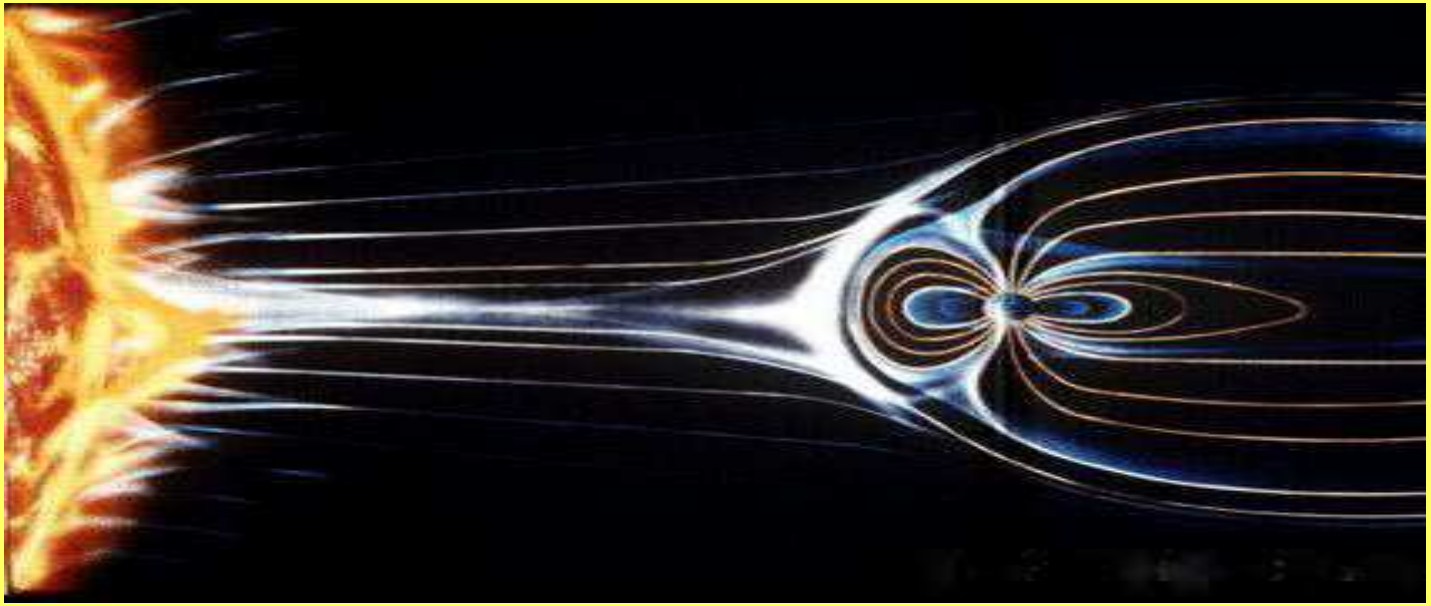
- Notre Soleil émet une très grande quantité de chaleur et de lumière, mais également une grande quantité de particules. Ce flot de particules, essentiellement constitué de protons et d'électrons de haute énergie (plusieurs millions d'eV, voir quelques milliards d'eV), donc très rapides (de 250 à 1.000 km/s), donne naissance au

  « Vent Solaire ».
- Ce « Vent Solaire » connaît son maximum tous les onze ans environ, lorsque le soleil connaît un surcroît d'activité. Les éruptions solaires produisent alors des orages magnétiques qui provoquent à leur tour d'énormes éruptions solaires. Le Vent Solaire s'en trouve alors renforcé.

DESCRIPTION DU PHENOMENE

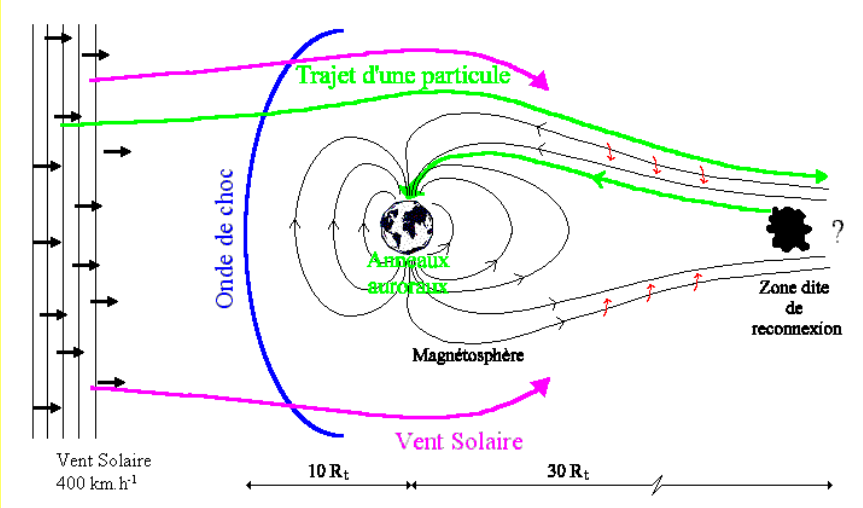
- Le déplacement des particules magnétiques
- Les orages magnétiques
- La création des photons

- Les vents solaires voyagent entre 2 à 4 jours avant d'atteindre la terre. Ces particules transportées par les vents solaires sont à l'origine de la formation des aurores.



- Les flux magnétiques transportant les particules solaires s'enroulent autour des lignes de champ comme des cordes de chanvre aléatoires, mettant en contact pendant quelques minutes les couches supérieures de l'atmosphère terrestre à celles du soleil. Les particules de vent solaire circulent le long de ces cordes.
- Arrivées près de la terre, ces flux de particules solaires sont bloqués et déviés par la magnétosphère terrestre, faisant apparaitre sur terre, du côté exposé au soleil de violents dégagements d'énergie, appelés orages magnétiques.

- Conformément à la loi de Lorentz, les électrons et les protons sont déviés dans des directions opposées. La pression cinétique du Vent Solaire va également « tasser » les lignes de champs de la Terre du côté soleil et au contraire étirer ces lignes du côté « nuit », en formant une lame neutre, car se situant entre un flux de particules positives et un flux de particules négatives.

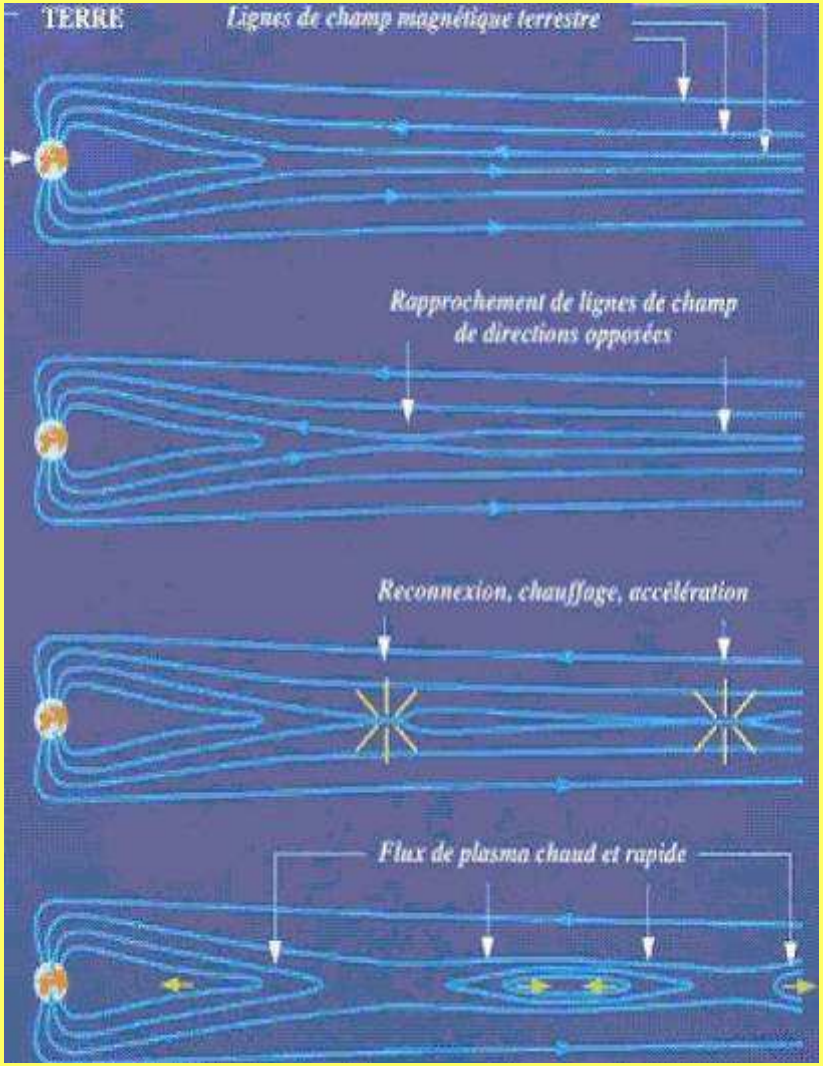


- Cependant, par intermittence naissent des perturbations du champ magnétique au niveau des pôles, que l'on appelle les sous-orages magnétiques. L'un de leurs effets visibles est la production des aurores polaires. Dans ces sous-orages magnétiques, une partie des flux de particules solaires serait bloquée et déviée dans la magnétosphère terrestre. Une autre partie se retrouverait canalisée et stockée le long des lignes de champ magnétique terrestre formant des cordes magnétiques qui s'étireraient très loin dans l'espace à l'opposé du soleil.

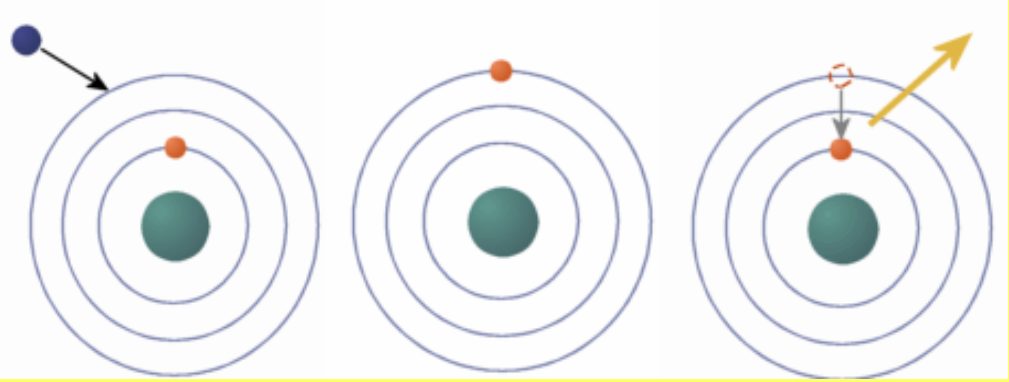
Entre 70 à 120.000 km de la terre, ces cordes magnétiques qui sont d'habitude parallèles entre-elles, se rapprochent et se touchent, donnant lieu à ce que l'on appelle des reconnexions magnétiques.

Ces reconnexions libèreraient et catapulteraient le flot des particules chargées vers l'atmosphère terrestre, en le concentrant au niveau des pôles, comme le ferait un élastique qui après étirement reviendrait à sa position initiale. Elles vont être alors précipitées vers la Terre à très grande vitesse à l'approche des cornets polaires où elles vont s'engouffrer.

L'énergie ainsi libérée serait parfois aussi puissante que celle d'un fort séisme de 5,5 degrés sur l'échelle de Richter. Elle arriverait à traverser une région polaire entière en quelques minutes.



- En arrivant dans l'atmosphère terrestre, les particules entrent en collision avec les atomes et les molécules présentes. La rencontre se produit principalement le long d'un périmètre ovale centré sur chacun des pôles magnétiques, à une hauteur du sol de 100 à 300 km d'altitude. Mais parfois la partie inférieure d'une aurore peut descendre jusqu'à une soixantaine de kilomètres, et l'on en a vu se développer jusqu'à 1.000 km d'altitude.



Le processus de production de lumière dans l'atmosphère : à gauche, une particule solaire entre en collision avec un atome de l'atmosphère. Au milieu, l'atome, suite à cette collision, est excité et change de couche. A droite, en se désexcitant, l'atome émet un photon, donc de la lumière.

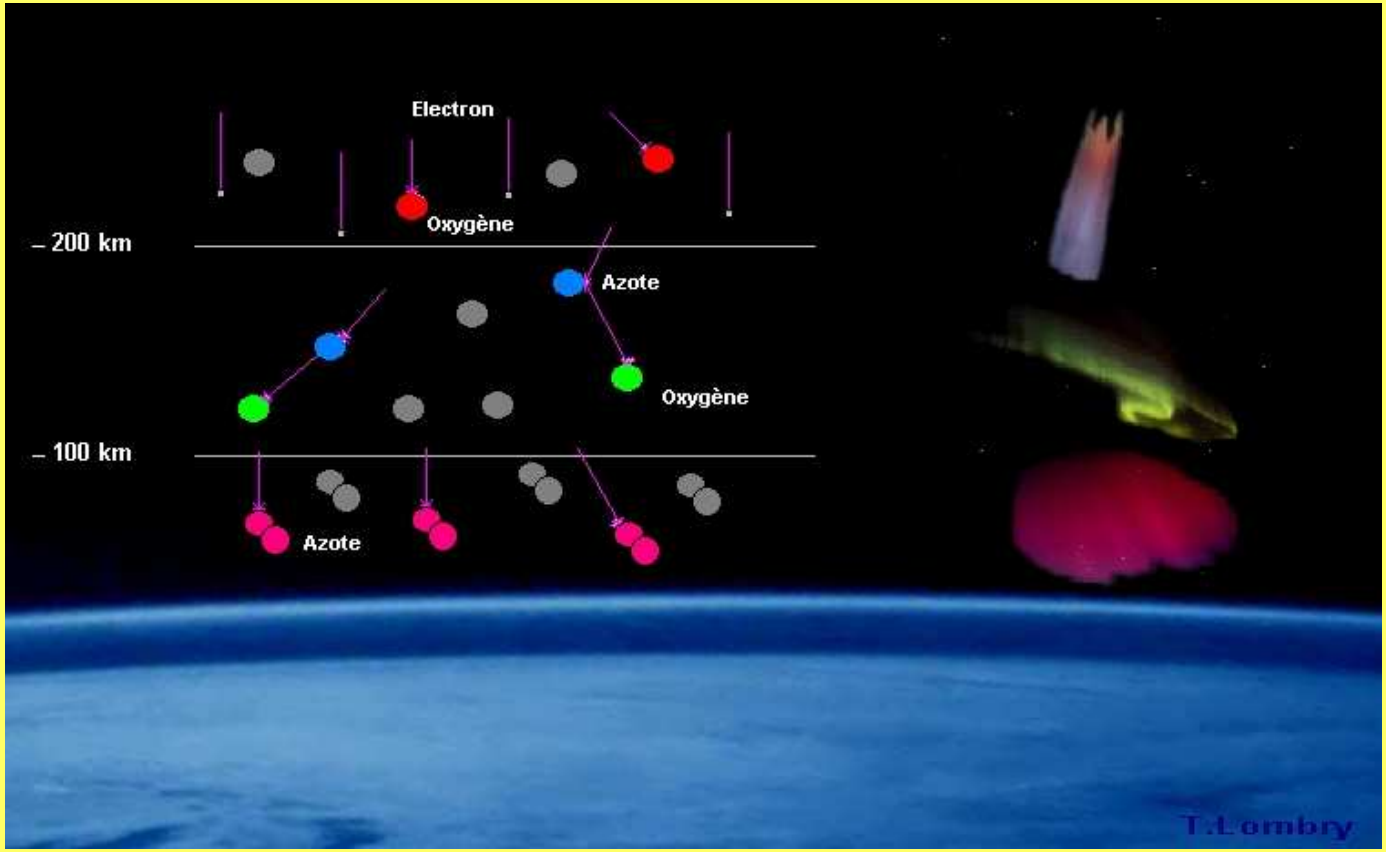
- Les atomes d'azote et d'oxygène présents sont alors percutés par les particules solaires chargées et gagnent soudainement de l'énergie qui les excite. Ils regagnent rapidement leur état initial en restituant l'énergie acquise sous la forme de photons lumineux. C'est l'ensemble de tous ces rayonnements lumineux engendrés par les collisions qui confèrent aux aurores polaires leur éclat et leurs couleurs (essentiellement bleue, verte et jaune) si particulières.

LA COULEUR DES AURORES POLAIRES

- La faible luminosité des aurores font qu'elles ne sont observables le plus souvent que de nuit.
- La couleur étant liée à la longueur d'onde, elle dépendra du type d'atome ou de molécule qui émettra le photon, mais également de l'altitude. Les particules les plus énergétiques entreront plus profondément dans la magnétosphère. Elles iront plus près du sol et communiqueront plus d'énergie aux atomes percutés. La fréquence des photons émis sera alors plus grandes. Les longueurs d'onde

  ($\lambda = v/f$) seront donc plus courtes et se rapprocheront du violet.
- Rappelons que le domaine du visible pour l'homme se situe entre 400 nanomètres et 800 nanomètres. En dessous de 400 nm, on est dans le domaine de l'ultraviolet et au-dessus de 800 nm, on est dans le domaine des infrarouges. Rappelons également que l'atmosphère est composée à 79% d'azote et à 20% d'oxygène. De ce fait les principales émissions dans le visible sont faites par :

- Les atomes d'azote (N2), qui à 100 Km d'altitude émettent une raie violette ou bleu très peu visible (427nm),
- Les atomes d'oxygène (O), qui à 100 Km d'altitude émettent une raie de couleur jaune vert (557 nm),
- Les atomes d'oxygène (O), qui à plus de 250 Km d'altitude produisent une couleur rouge foncée (630 nm),
- Les atomes d'azote (N2), qui à plus de 250 Km d'altitude produisent une couleur rouge (520 nm).



- Le phénomène présente généralement 3 couleurs de base (vert, jaune et rouge), mais près de 25 couleurs différentes peuvent être observées. Les couleurs les plus basses sont d'un violet bleuté. Le vert est la couleur la plus répandue et se produit à des hauteurs de 100 à 200 km. Le rouge à des hauteurs de 200 km et plus.

LES FORMES LUMUNEUSES DES AURORES POLAIRES

- Dans l’apparition des aurores polaires, la luminosité peut beaucoup varier et le phénomène peut durer de quelques minutes à plusieurs heures. Il est très rare d'observer des aurores à des latitudes magnétiques inférieures à 50 degrés, mais cela arrive parfois pendant la période d'activité solaire maximale du cycle de 11 ans, et lors des éruptions solaires les plus importantes.
- Nous allons aborder maintenant les différentes formes que revêtent les aurores polaires.

- **L’arc**

  L’arc s’étend d’un bout à l’autre à l’horizon comme une simple courbe. La longueur d’un arc peut atteindre 1.000 kilomètres alors que son épaisseur est inférieure à 5 kilomètres.

  C’est un modèle typique des périodes de basse activité solaire.

- **La bande**

  C’est un arc qui s’étend à l’horizon, dans le ciel et d’Est en Ouest. Les rayons verticaux se côtoient et sont parallèles. La bande présente des formes de plis, avec des éclats de lumière à sa base et des luminosités uniformes ou floues à son sommet.

  C’est un modèle fréquent dans les périodes d’activités solaires moyennes à élevées.

- **Le rideau**

Le rideau présente des formes impressionnantes et magnifiques.

Les rayons occupent la plus grande partie du ciel, avec des vagues d'ondulations et des formes spiralées.

L'intensité de la lumière change souvent.

C'est un modèle d'activité solaire forte.

- **La couronne**

  La couronne présente une explosion de rayons lumineux concentriques. Elle est au zénith et s'ouvre dans toutes les directions. La couronne a des mouvements et des variations très rapides.

  Ces formes sont typiques des périodes d'activité solaire élevées.

- **Les Piliers**

  Les piliers sont des traits de lumière brillante, alignés et suspendus verticalement. Les variations se produisent rapidement. La longueur des rayons peut être de plusieurs centaines de kilomètres.

  C’est un modèle des périodes d’activité solaire élevées.

- **Le voile**

Le voile couvre une vaste région du ciel, avec des luminosités uniformes de différentes couleurs.

Les couleurs sont brillantes et chatoyantes.

C’est assurément la forme la plus spectaculaire.

Ce modèle est fréquent durant les périodes d’activité solaire élevées.

- **La tache**

  La tache est une zone de luminosité de faible étendue, ayant la forme ressemblant à un petit nuage isolé.

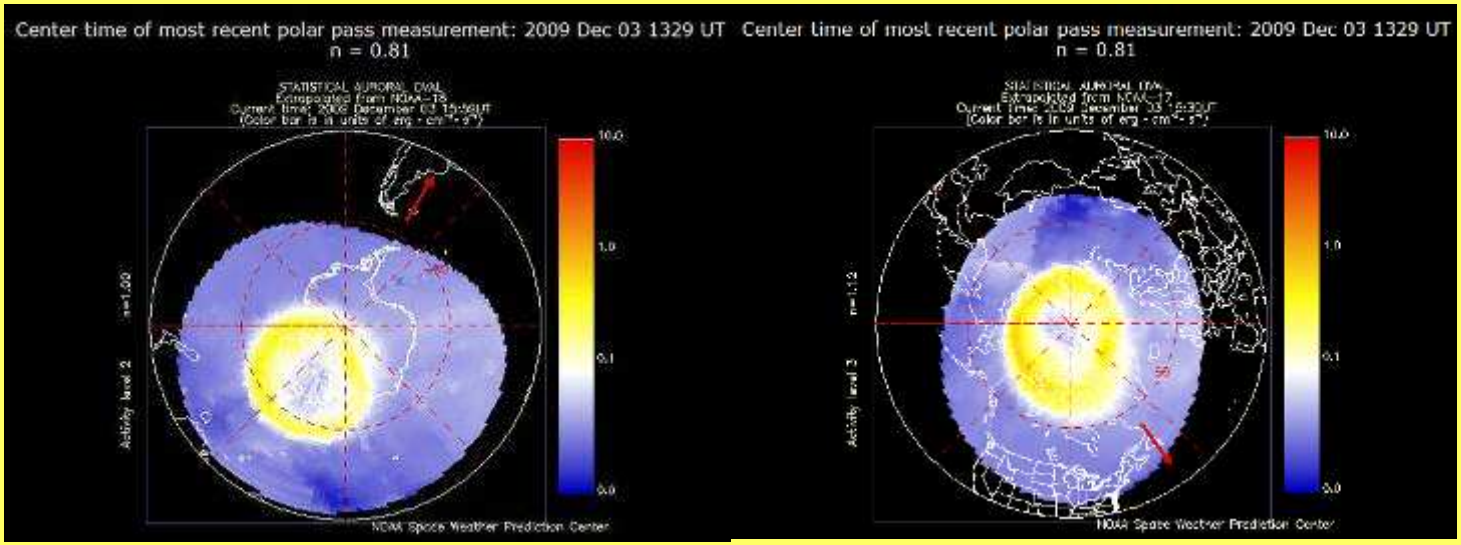
- **Le miroir**

  Le miroir n’est pas une forme en elle-même, mais un effet lumineux recherché notamment par les photographes. Les reflets des aurores boréales sur les eaux sont très spectaculaires. Lorsque les lacs, rivières et fleuves ont calmes, les formes aurorales, y compris les étoiles et les planètes sont doublées.

LA PRÉVISION DES AURORES POLAIRES

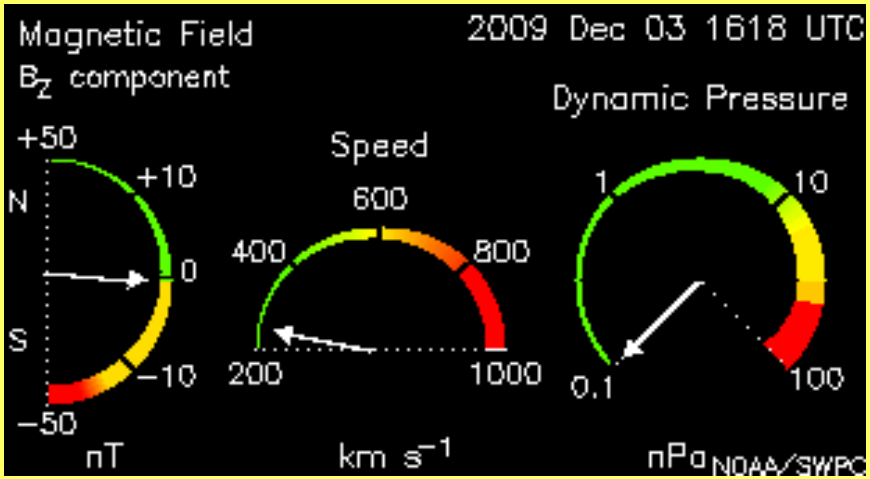
- Il est possible de prévoir les aurores boréales. Le satellite « Soho » en orbite autour du soleil, nous envoie les images des éruptions solaires et des trous coronaux, nous permettant de prédire les aurores.
- La possibilité de voir une aurore polaire dépend principalement de quatre facteurs :

  - L'activité géomagnétique, définie par le degré de perturbation du champ magnétique de la Terre,
  - La situation géographique de l'observateur,
  - Les conditions météorologiques du lieu,
  - La pollution lumineuse ambiante (lumières, pleine lune, etc..).



Niveau d'activité géomagnétique et définition de l'oval boréal par le NOAA-SWPC

- Le niveau d'activité géomagnétique est un indice simple appelé Kp, représenté par un nombre de 0 à 9. Il est diffusé sur Internet par le NOAA-SWPC, réactualisé toutes les 15 minutes.
- En dessous de l'indice Kp de 5, il n'y a pas d'aurore polaire possible. Les aurores sont possibles pour des indices de 7 à 9. Pour l'Europe du nord, les prévisions peuvent être consultées sur le site Finlandais http://cc.oulu.fi/~thu/Aurora/forecast.html



Données transmises par le satellite ACE sur les vents solaires

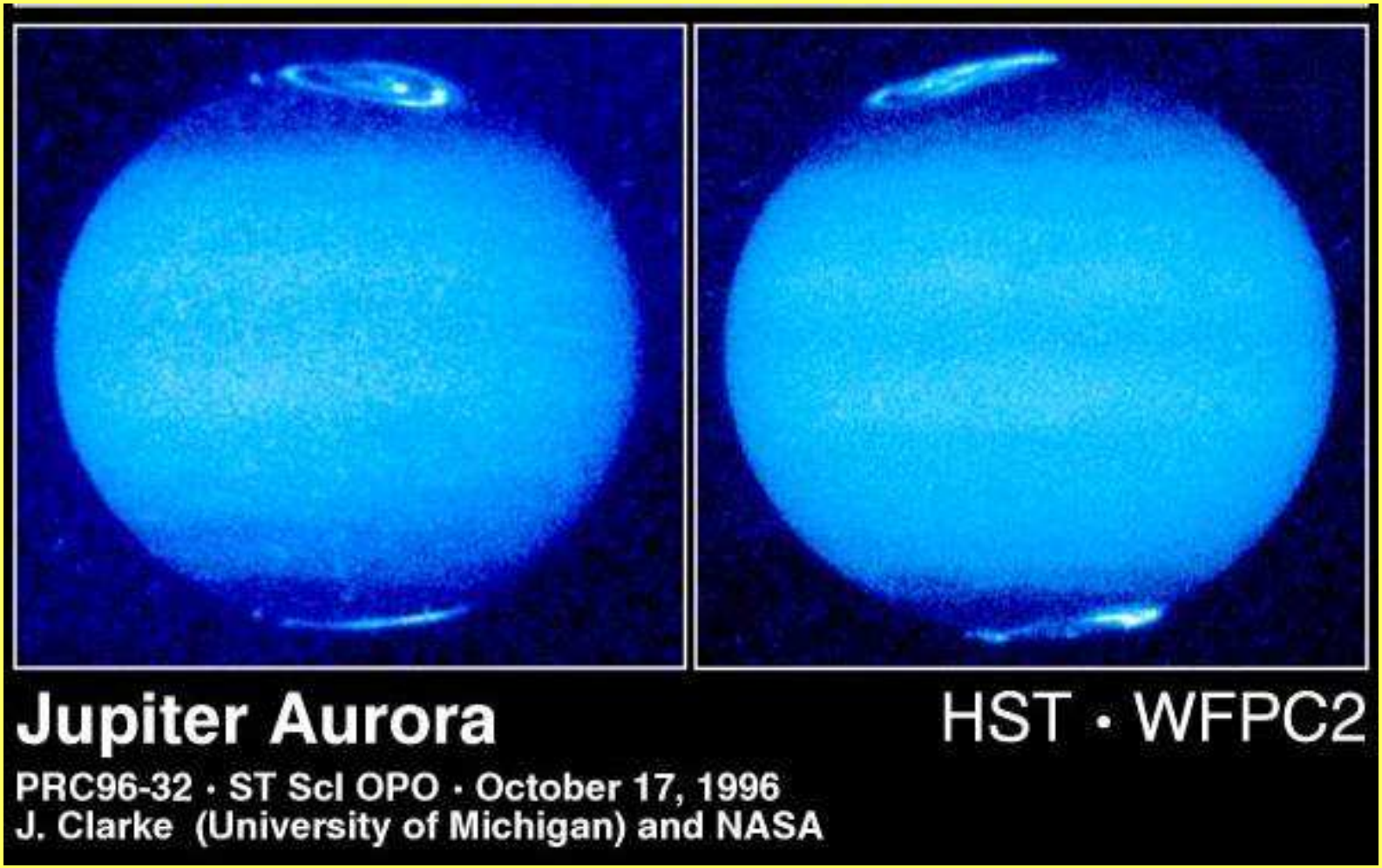
- Les données en temps réel des vents solaires nous proviennent du satellite ACE de la NASA. Elles sont mises à jour toutes les 5 minutes.

LES AURORES POLAIRES SUR LES AUTRES PLANETES DU SYSTEME SOLAIRE

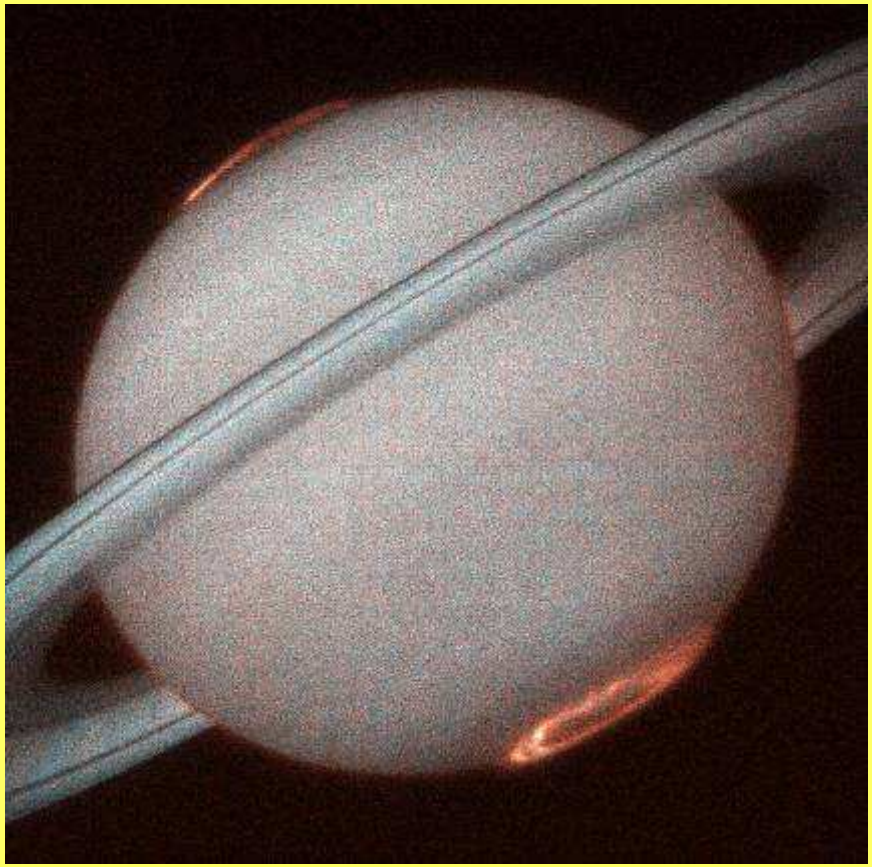
Aurore polaire sur Saturne, photo du pôle Nord, prise au spectromètre infrarouge le 10 novembre 2006, à une distance de 1.061.000 km

- Au cours de leurs voyages dans notre système solaire, les fusées et les sondes spatiales ont montré que les aurores polaires se produisaient également sur les autres planètes dotées d'une magnétosphère : Mercure, Saturne, Jupiter, Neptune, Uranus.

- Sur Terre, les particules chargées proviennent du vent solaire. Pour les autres planètes, il en est de même, mais sur Jupiter par exemple, les particules proviennent essentiellement de ses propres satellites, Io notamment qui rejette une tonne de particules par seconde. Il pourrait en être de même pour Saturne.



Aurores boréale et australe sur Saturne



- Les deux planètes Uranus et Neptune, visitées par Voyager 2, ont montré quelles avaient une magnétosphère active dans leur voisinage. Ce phénomène n'est donc pas unique dans notre galaxie, mais propre aux planètes avec un magnétisme et une atmosphère.
- Mais pour Mercure, qui n’a pas d’atmosphère dense, et qui possède des émissions aurorales, les phénomènes ne peuvent être identiques.
- Si aujourd’hui, les aurores ont perdu une partie de leur mystère, elles continuent néanmoins de susciter l’intérêt des chercheurs qui s’efforcent toujours de comprendre plus en détail ce phénomène dont on ne maîtrise, pour l’heure, que les grandes lignes.