



**Astro Evasion**

Un regard sur le ciel à la portée de tous

# Les Aurores Polaires

**Rencontre des Observateurs Solaires  
Serbannes 2026**

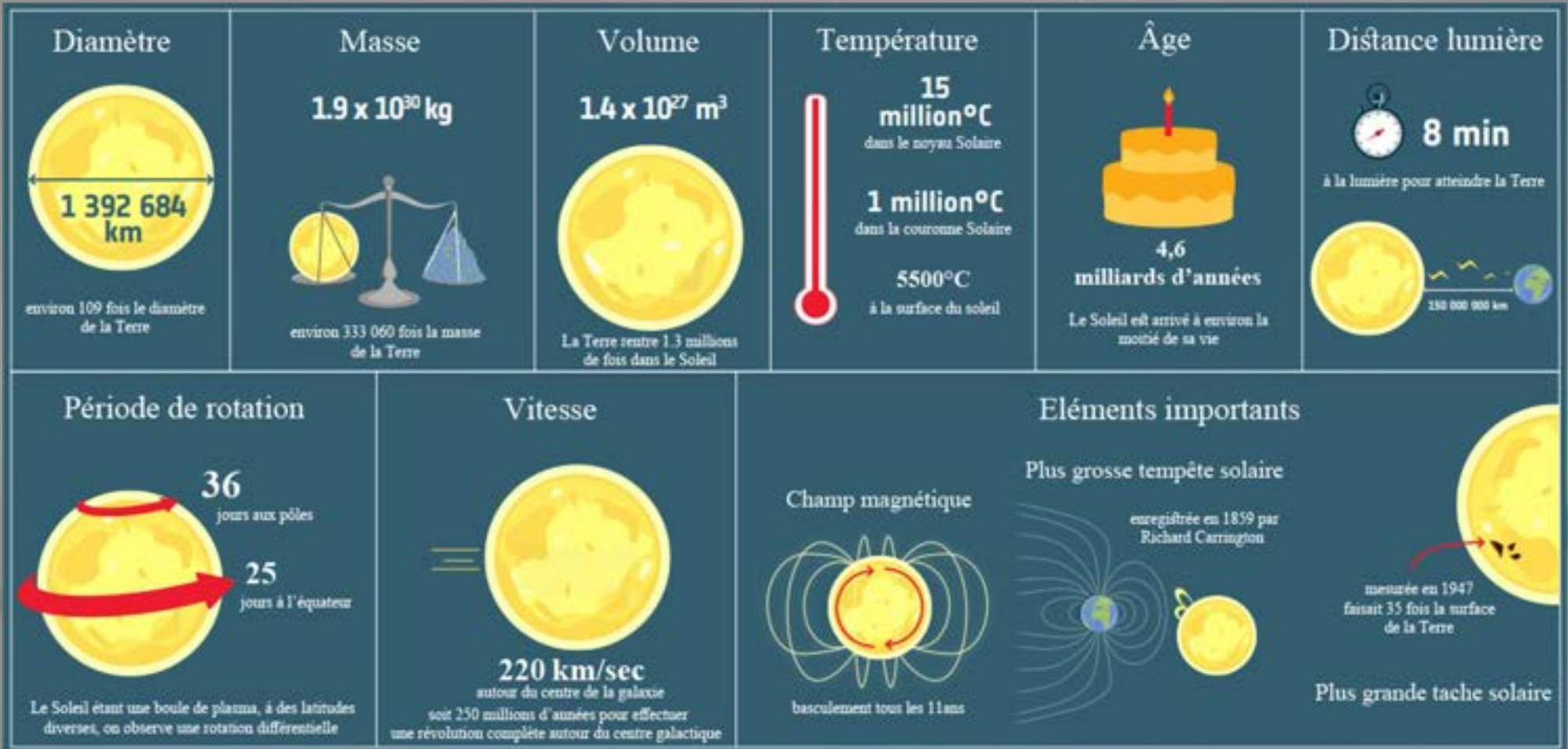
**Xavier Dequévy – Astro Evasion**

Image Xavier Dequévy  
Kilpisjärvi le 19 février 2025

## La connaissance actuelle de notre étoile

- Quelques informations chiffrées « utiles » sur notre Soleil
- Observation de sa surface et sa basse atmosphère : Les taches solaires
- Relation entre taches solaires et activité solaire, le nombre de Wolf
- Le champ magnétique et la dynamo solaire
- L'activité solaire vers la Terre et sa classification

# Notre Soleil, une étoile « banale »



# Un indicateur de l'activité du Soleil : Les taches solaires

Image de AR3055 du 11 juillet 2022

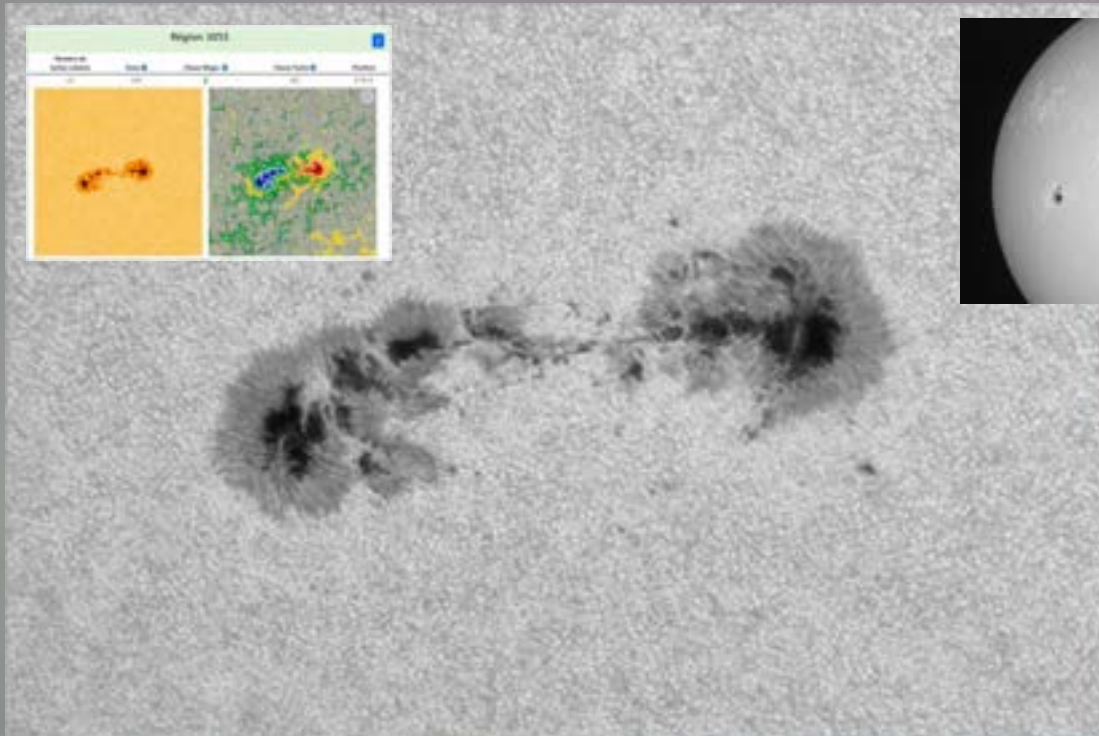


Image du Soleil le 11/08/2024 lunette de 150mm filtre K-Line

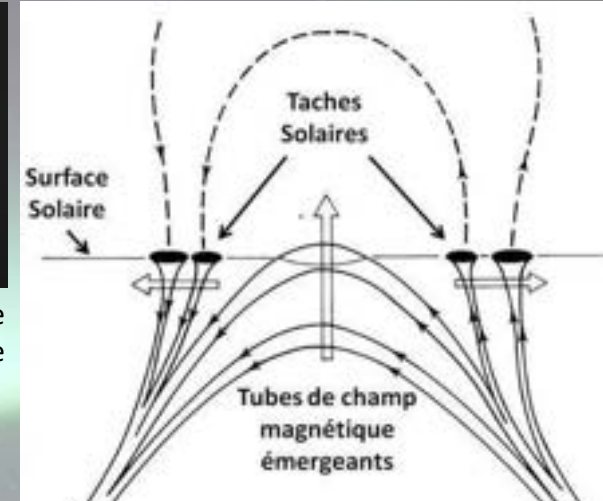
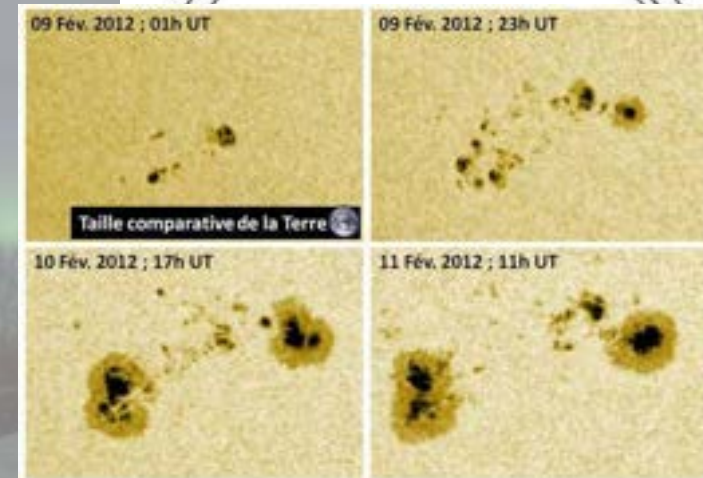


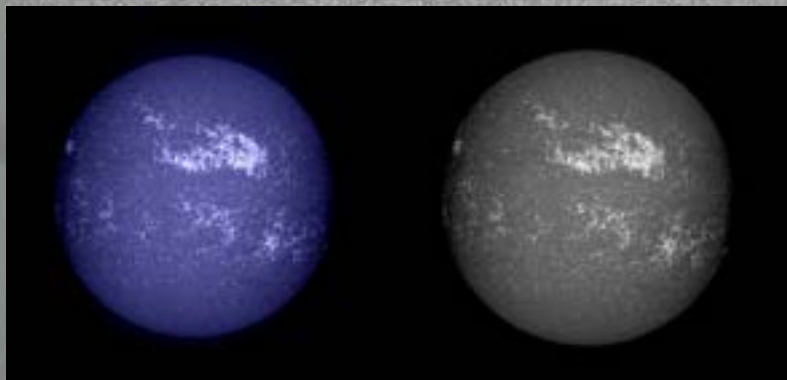
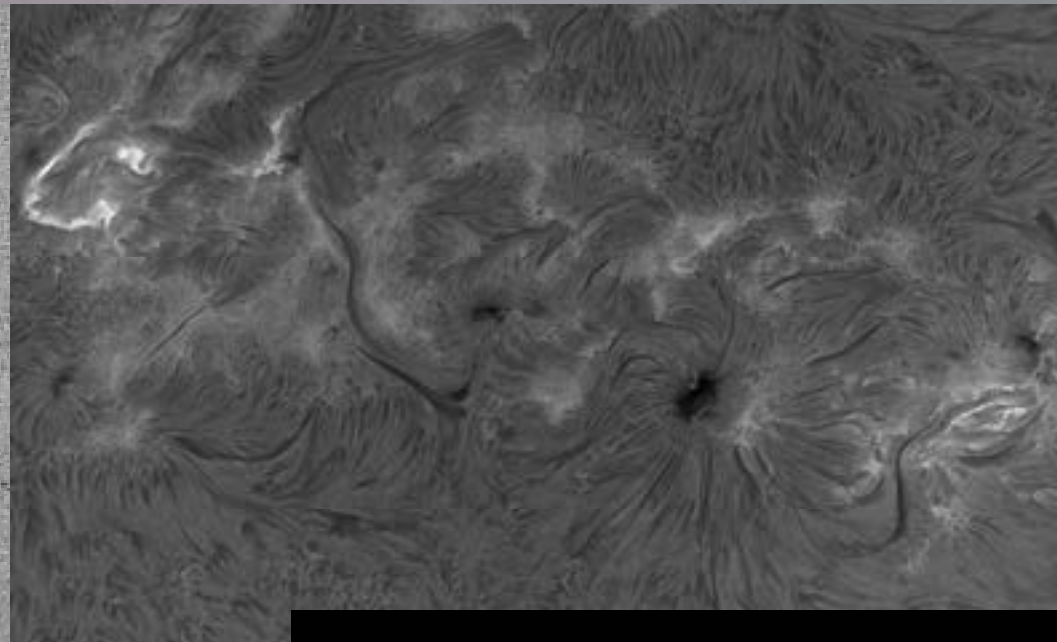
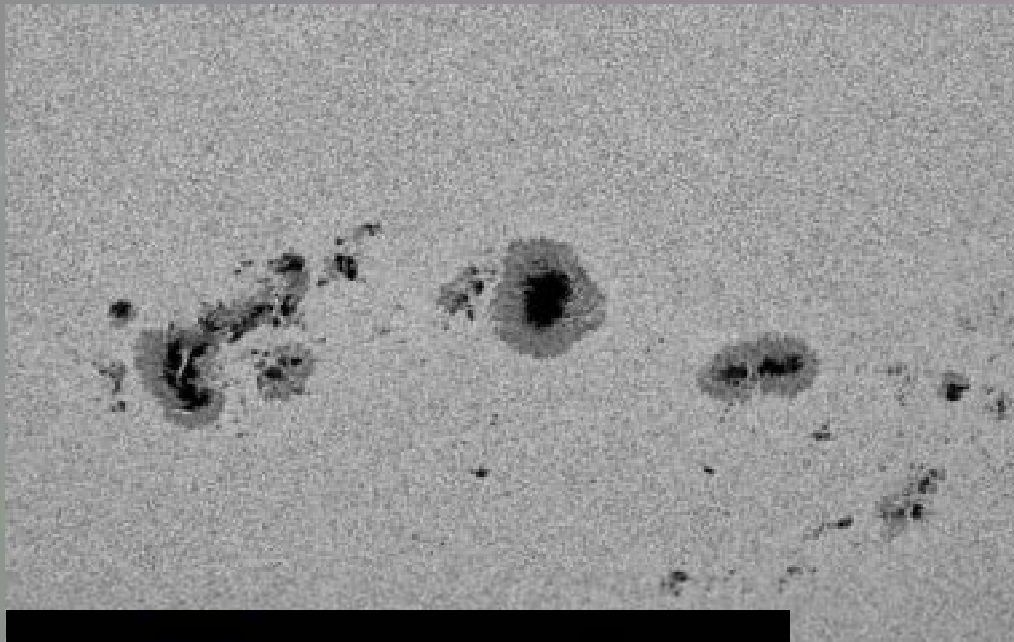
Image du Soleil réalisée avec une lunette LUNT 130/910 munie d'un prisme de Herschel et une Powermate 5x et une caméra ZWO ASI 174mm.

**NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration)** => numérotation des taches solaires. Début en janvier 1972 avec la 10000<sup>ième</sup> le 14 juin 2002.

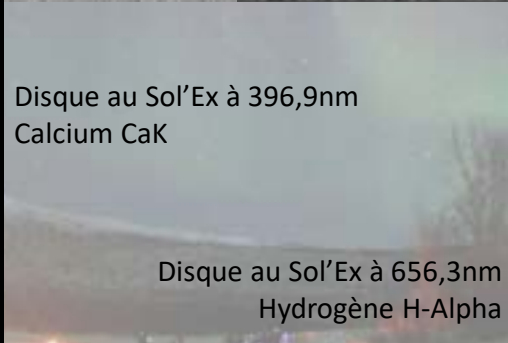


# Au travers de l'atmosphère solaire ...

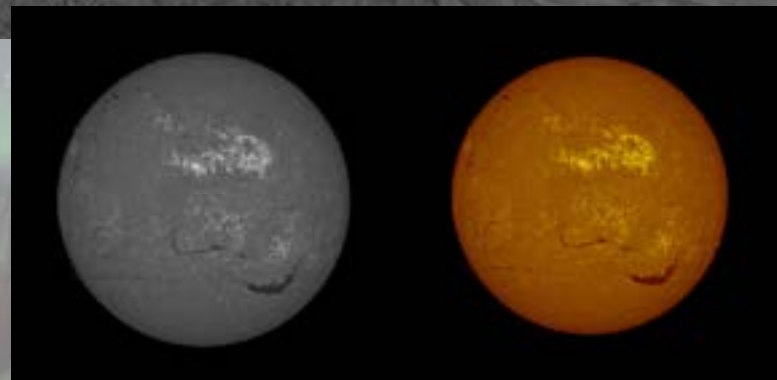
Région active AR3981 du 04/02/2025



Disque au Sol'Ex à 396,9nm  
Calcium CaK



Disque au Sol'Ex à 656,3nm  
Hydrogène H-Alpha



Région active AR2339 du 29/06/2015

## Evolution d'un groupe de taches

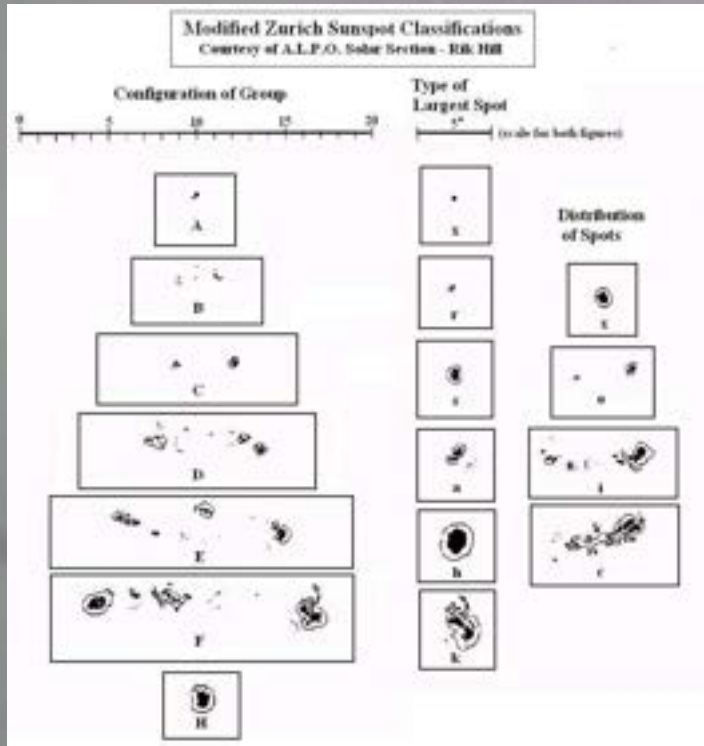


Christian HORREBOW  
(1718–1776)  
Astronome danois



# Un quantificateur de l'activité du Soleil : Le Nombre de Wolf

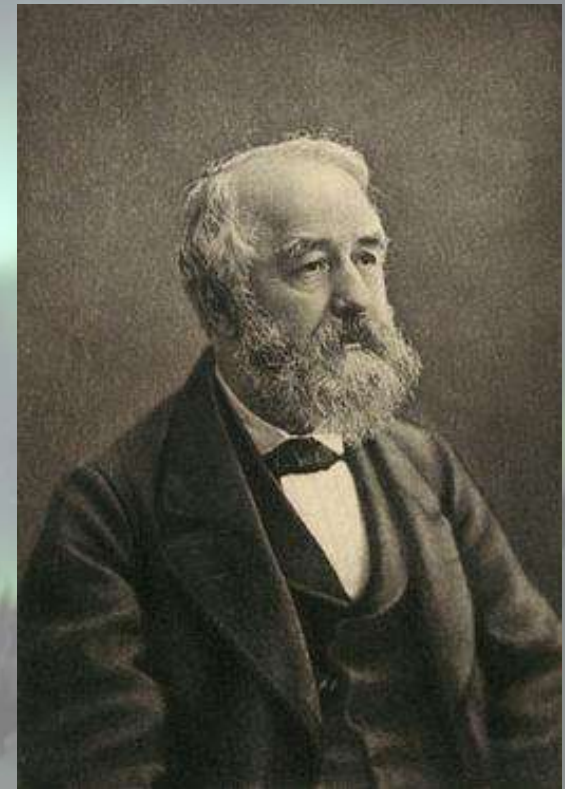
Indice de l'activité solaire  
 $W = 10g + t$



Nombre de ZURICH  
 $Z = k \cdot W$

Rudolph WOLF  
(1816–1893)

Astronome Suisse – Obs de Zurich



Classification de Waldeimer (de 1912 à 2000)  
Classification « Modifiée de Zurich »

# Une variation de l'activité du Soleil : Schwabe à la recherche de Vulcain

Cycle 1 : maximum en 1761

...

...

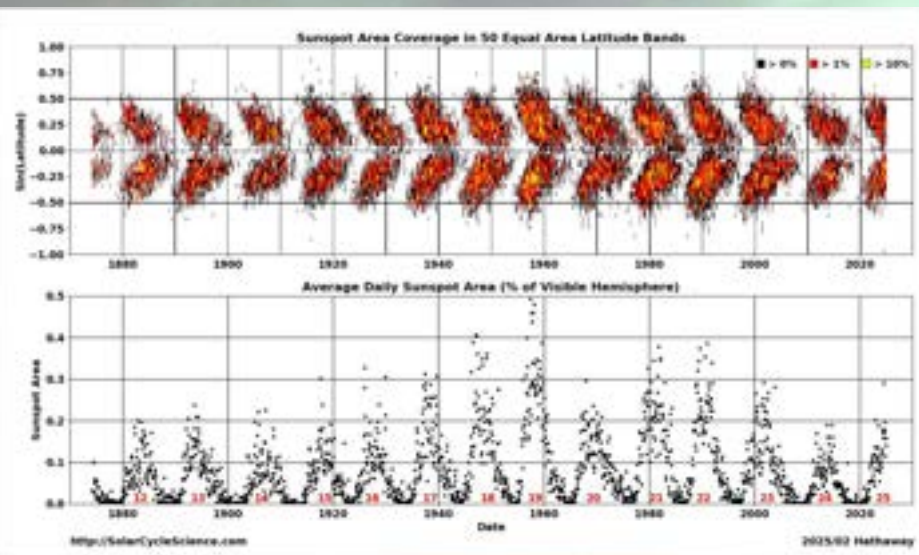
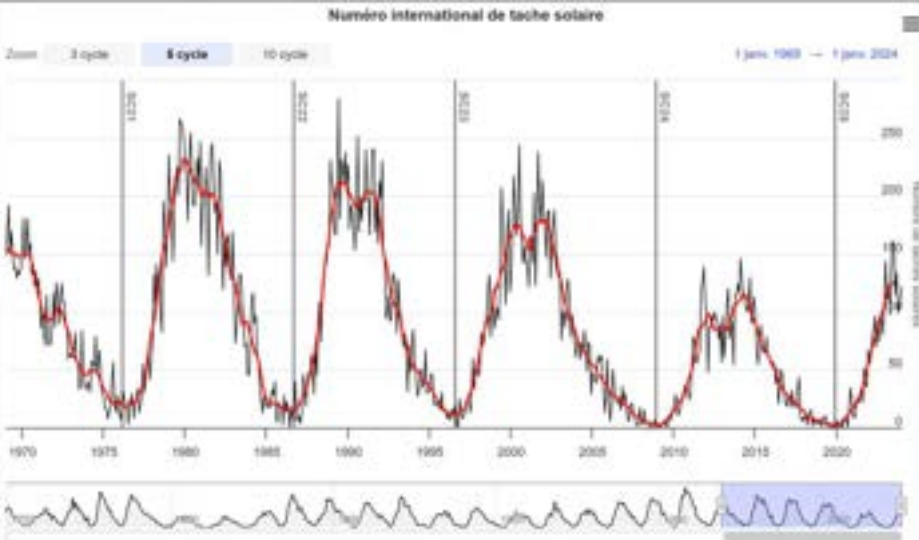
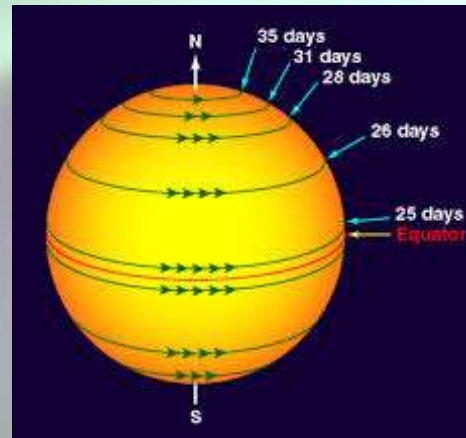
Cycle 23 maximum en 2000

Cycle 24 maximum en 2011/2014

Cycle 25 : maximum en 2025/2026



Heinrich SCHWABE  
(1789 – 1875)  
Astronome allemand



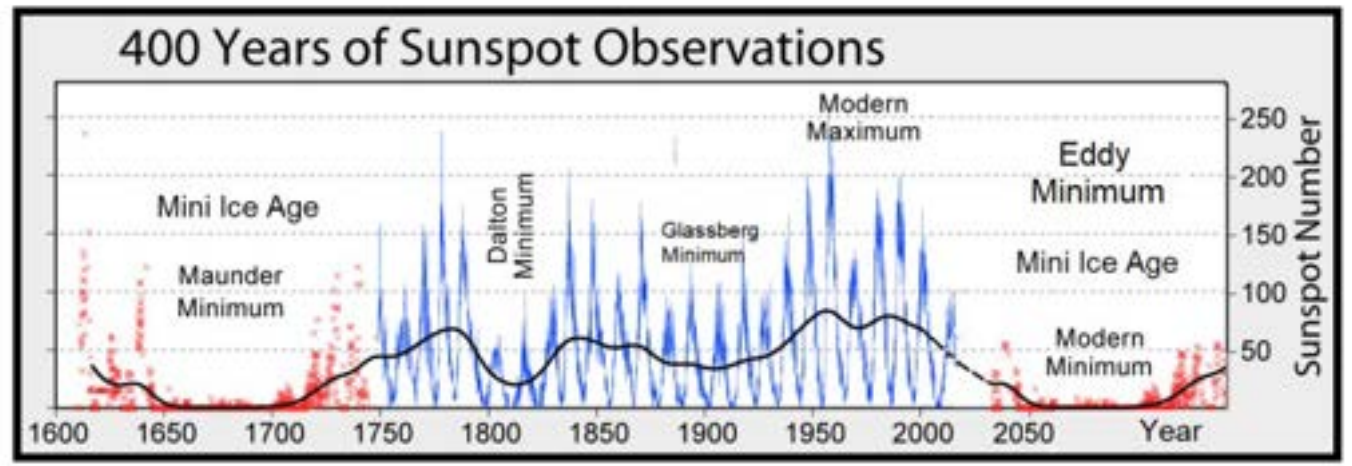


Edward Walter MAUNDER  
(1851–1928)  
Astronome britannique

Autres cycles solaires étudiés

- Gleissberg** – 90 ans – Maximum vers n°26
- Suess** – 190 ans – Alignement planétaire
- Hallstattzeit** – 2300 ans

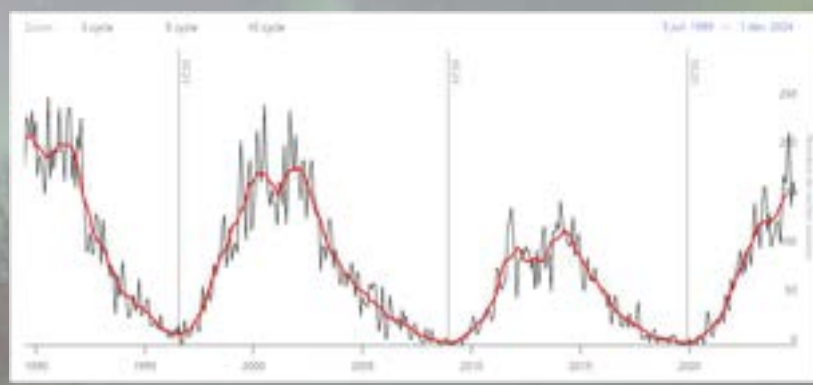
# Des irrégularités de l'activité du Soleil : Le minimum de Maunder



Etude du magnétisme solaire et indirectement, par l'étude de documents historiques, la découverte d'un minimum d'activité entre 1645 et 1715 ... durant le règne du Roi Soleil.

**179,6 ans**

Barycentre du Système Solaire

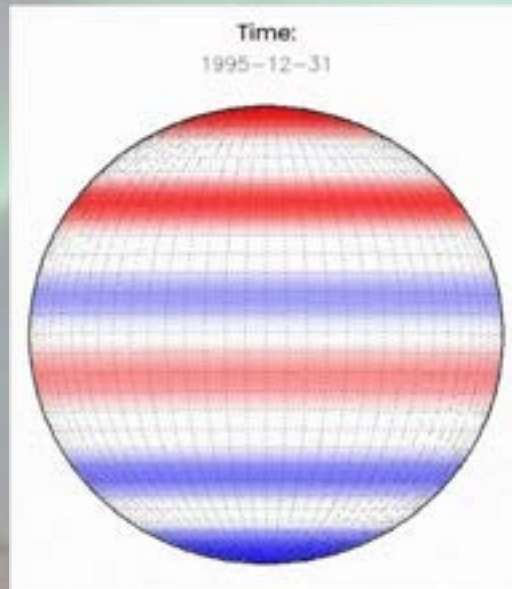
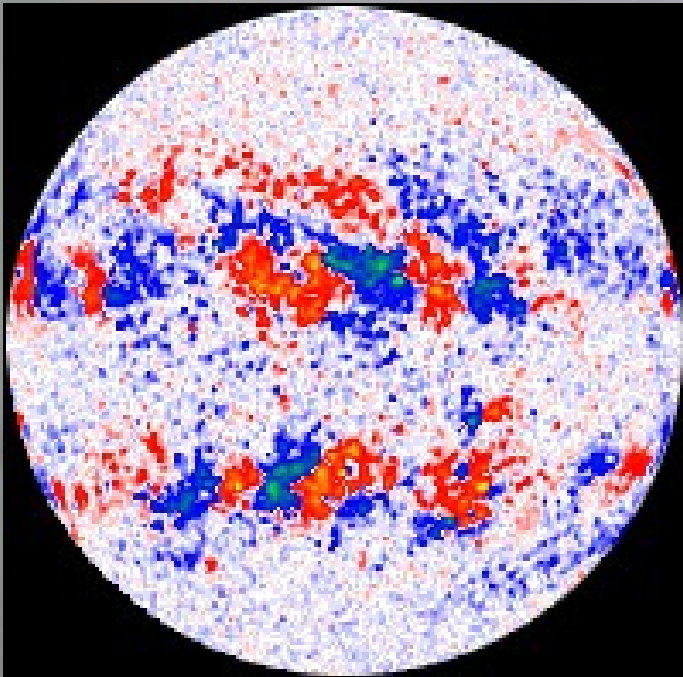




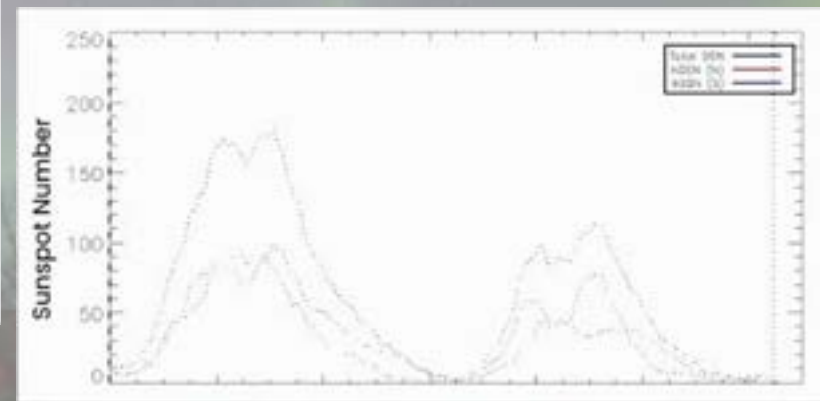
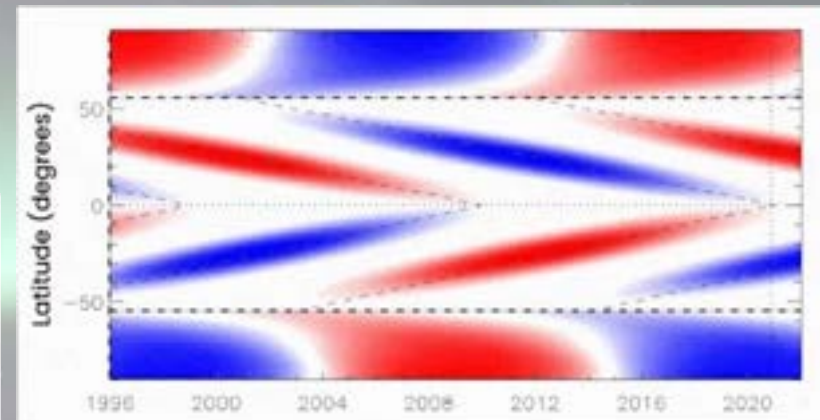
George Ellery HALE  
(1868–1938)  
Astrophysicien américain

# La variation du champ magnétique du Soleil : Un double cycle undécennal

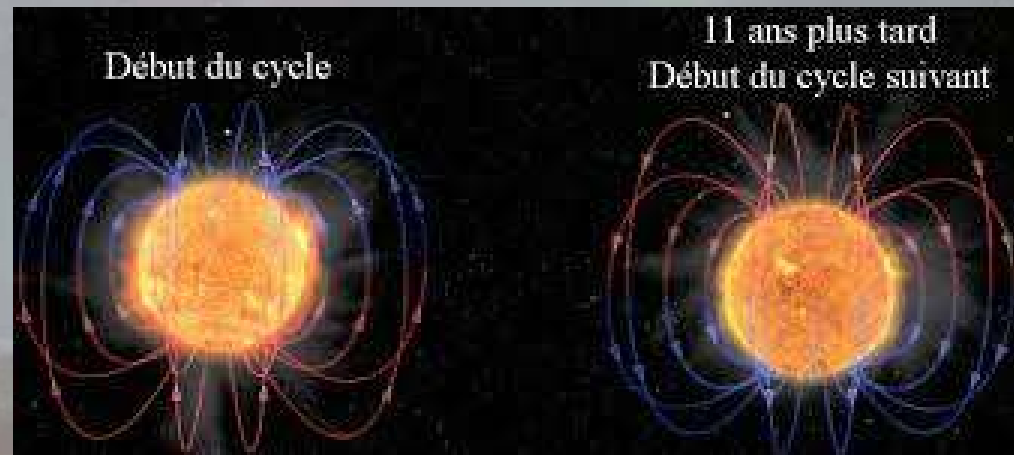
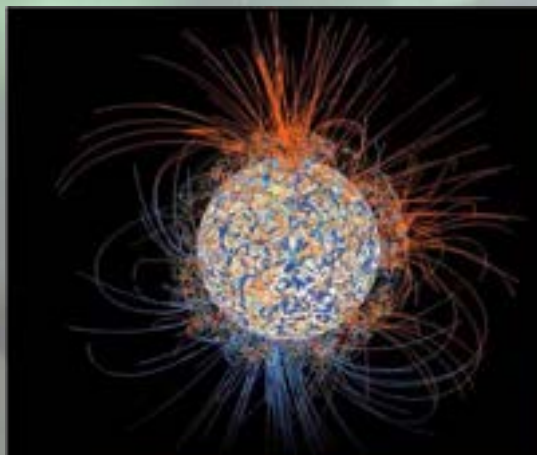
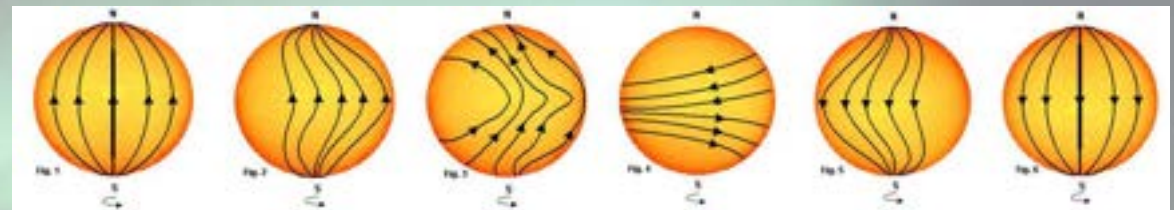
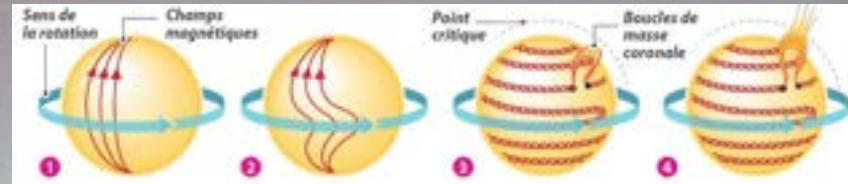
Evolution de la polarité des zones de taches en fonction de la latitude et de l'activité solaire



Magnétogramme du 3/08/2000



# Un champ magnétique gigantesque : La dynamo solaire



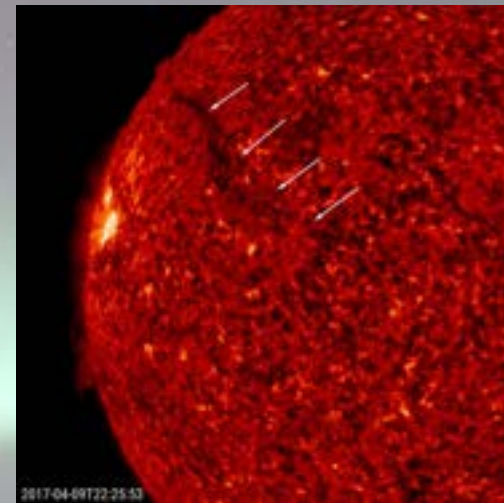
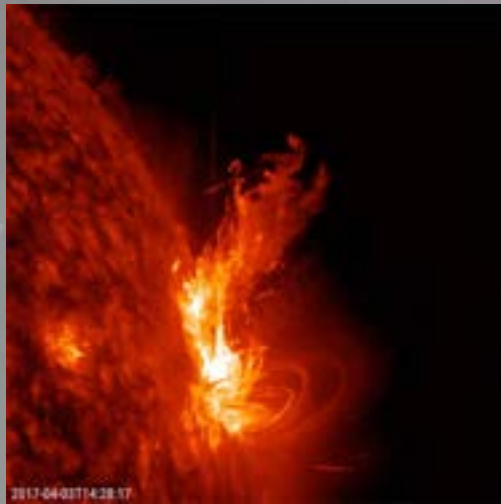
# L'activité solaire vers la Terre et sa classification

Le système de classification par lettres

Classe	Intensité du flux (W/m <sup>2</sup> )	Description et effets sur Terre
A	< 10 <sup>-7</sup>	Niveau de fond : Éruptions minuscules, presque indétectables. Aucun impact sur la Terre.
B	10 <sup>-7</sup> à 10 <sup>-6</sup>	Très faibles : Fréquentes pendant le minimum solaire. Aucun impact.
C	10 <sup>-6</sup> à 10 <sup>-5</sup>	Mineures : Peuvent générer de petites éjections de masse coronale, mais n'ont généralement pas de conséquences notables sur Terre.
M	10 <sup>-5</sup> à 10 <sup>-4</sup>	Modérées : Peuvent provoquer de brèves pannes radio au niveau des pôles terrestres et de légères tempêtes de radiations spatiales (qui présentent un risque mineur pour les astronautes).
X	> 10 <sup>-4</sup>	Majeures (Extrêmes) : Éruptions massives. Elles peuvent déclencher des coupures radio mondiales (côté jour de la Terre), de graves tempêtes géomagnétiques et endommager les satellites ou les réseaux électriques.

Flares et protubérances  
Solar Dynamics Observatory

Vue de la zone de transition en limite haute de la chromosphère  
AIA 304 Angstrom  
T° de 5000K



# Les influences de l'activité solaire sur la Terre

- Des premières intuitions à nos jours
- Les observations de Carrington
- Premières découvertes de l'ovale auroral
- La première Terrella de Birkeland
- Preuves de la théorie d'Eugène Parker sur le vent solaire
- Les plus grosses tempêtes solaires enregistrées
- Les influences sur la vie actuelle et classification géomagnétique

## Premières intuitions et premières mesures



**1564** : Absalon PERDERSEN  
Première représentation d'aurores - Bergen



**1619** : Le baptême du phénomène  
Les Aurores Boréales – Aurore et Borée



Galileo GALILEI  
(1564–1642)  
Mathématicien, physicien et astronome italien




Edmond HALLEY  
(1656–1742)

Astronome et ingénieur Britannique

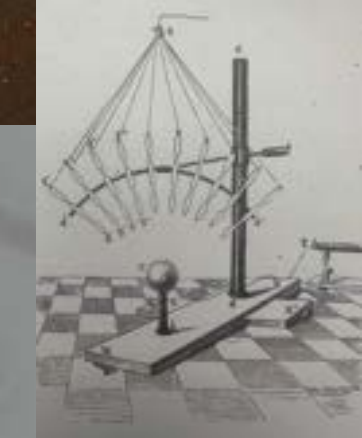
**1716** : Lien avec le magnétisme terrestre  
Lumières alignées

# Premières intuitions et premières mesures



Anders CELSIUS  
(1701–1744)  
Professeur d'astronomie à Uppsala

**1741** : Un phénomène magnétique  
Les boussoles sont influencées par les aurores



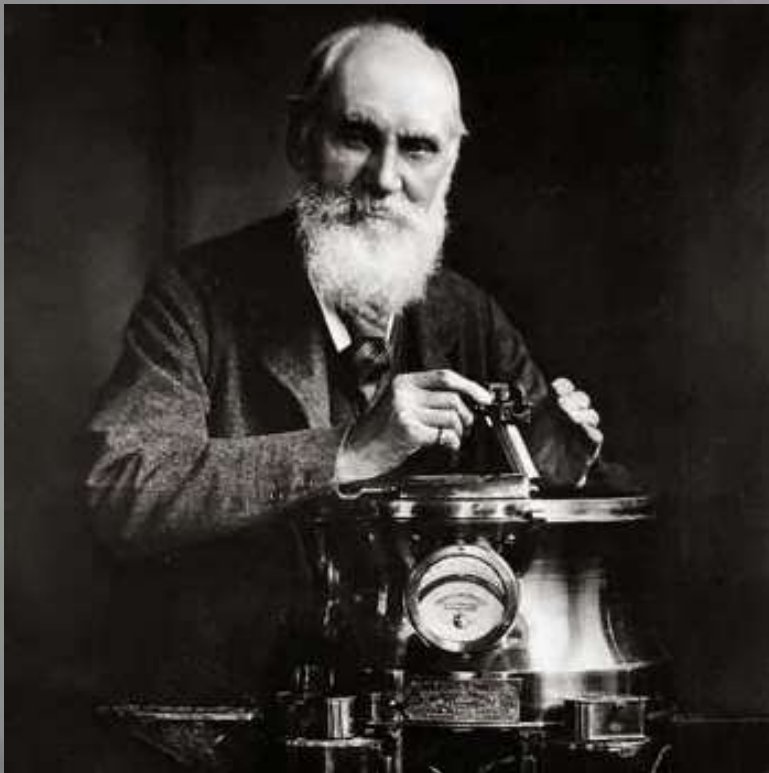
Olaf HIORTHER  
(1696–1750)  
Professeur d'astronomie à Uppsala



Henry CAVENDISH  
(1731–1810)  
Physicien et chimiste Britannique

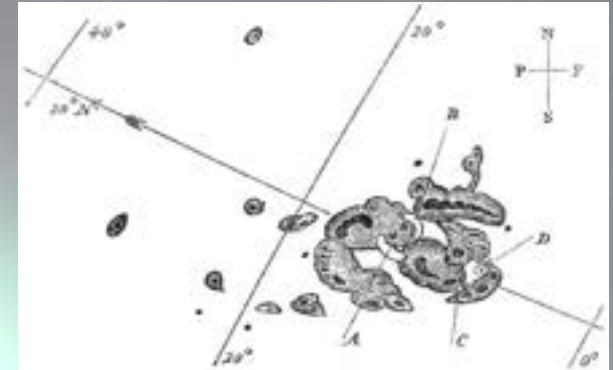
**1790** : Altitude par triangulation  
Phénomène dans la très haute atmosphère

# Connexion avec l'espace : L'événement de Carrington



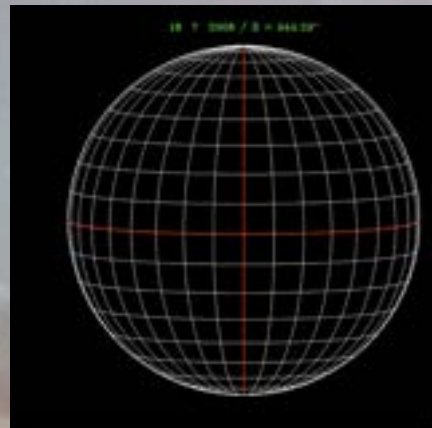
Richard CARRINGTON  
(1826–1875)  
Astronome britannique

Relevés d'observation de la tempête solaire du 28/08/1859 réalisées par Carrington



A partir du 9 novembre 1853, Carrington décida le « méridien central » qui est l'origine des coordonnées héliocentriques.

$L_0$  est la longitude du centre du disque



Expédition Antarctique,  
Île Jan Mayen - 1926

# Connexion avec l'espace : Olaf Christian Birkeland



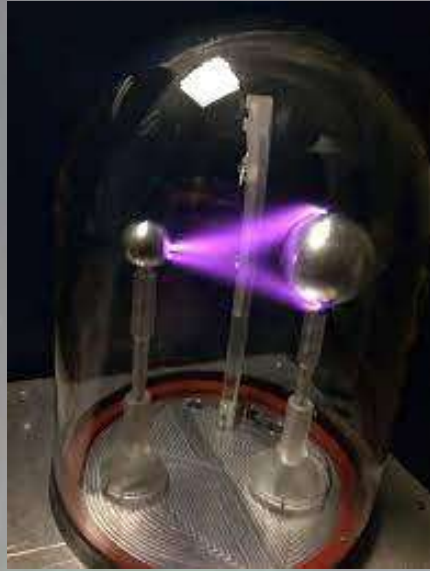
Canon magnétique de Birkeland en 1902

Christian BIRKELAND  
(1867–1917)  
Physicien norvégien



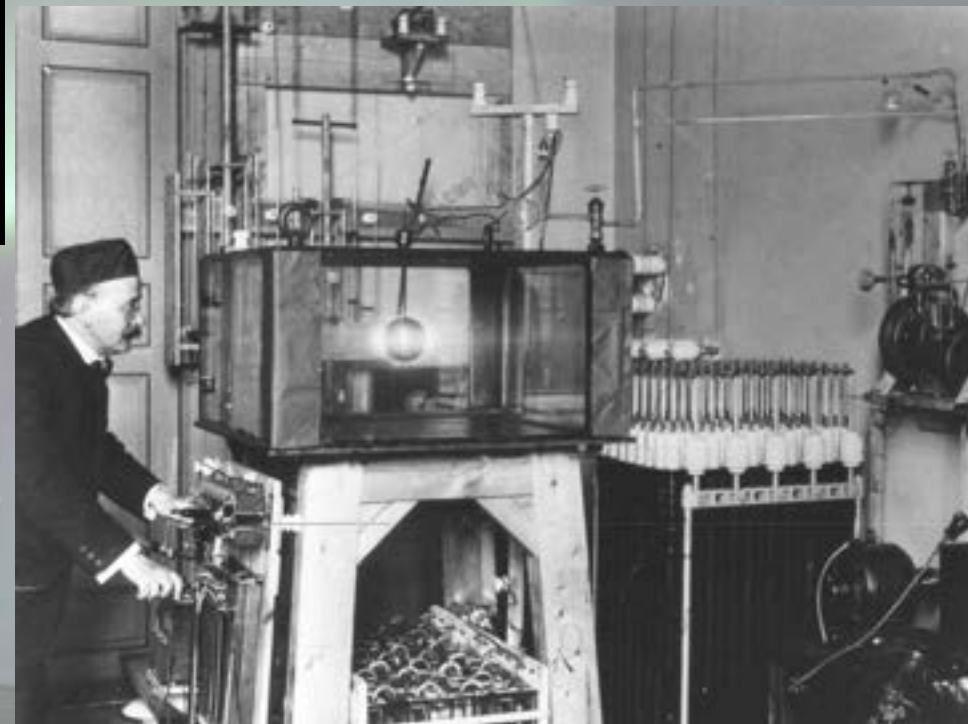
Arc auroral par Elias Loomis (1860) et Yakov Feldstein (1963)

La théorie des particules électrisées (1896)



## La Planeterrella de Christian Birkeland

Planeterrella dans l'exposition du musée de l'Université de Tromsø et dans le laboratoire de physique des plasmas de l'Université.



Planeterrella dans le laboratoire de Birkeland à Oslo (1895).

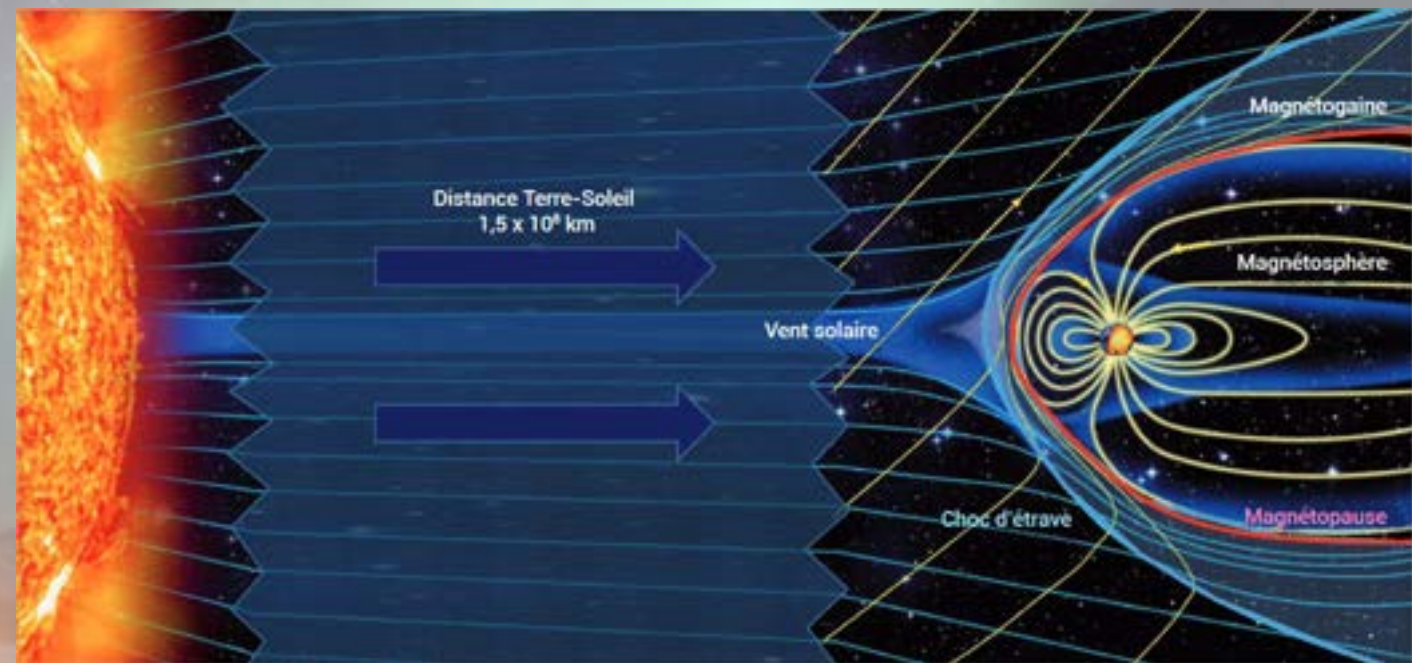
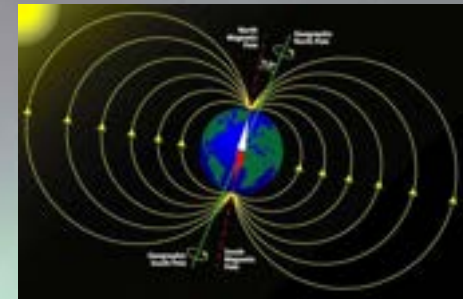
# L'ère spatiale : Preuves directes et mécanismes complexes



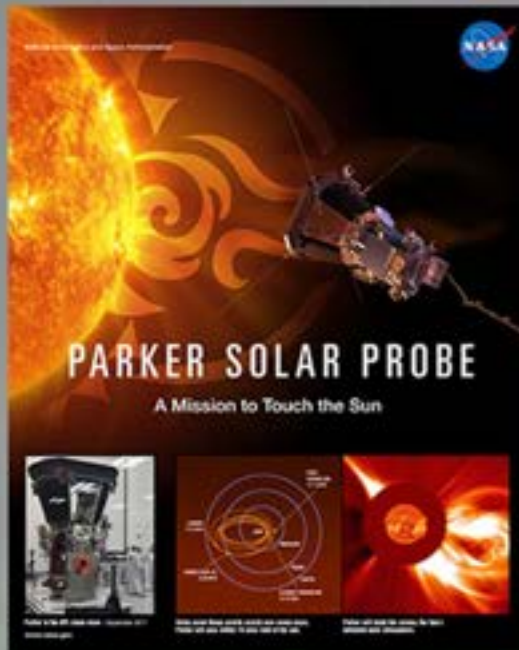
Eugene Newman PARKER  
(1927– 2022)  
Astrophysicien américain

**1957** : Théorie sur le vent solaire ..  
Confirmé par Luna 1 et Explorer 1

**1965** : Explication de la couleur des aurores



## Eugène Parker avait raison ... Le vent solaire



Lancé le 12/08/2018

de Cap Canaveral par une fusée Delta.

Etude du magnétisme solaire, de la progression du vent solaire dans la couronne.

NASA's first successful recording of video & audio of our Sun's solar wind



# L'ère spatiale ... Thémis et les reconnections magnétiques



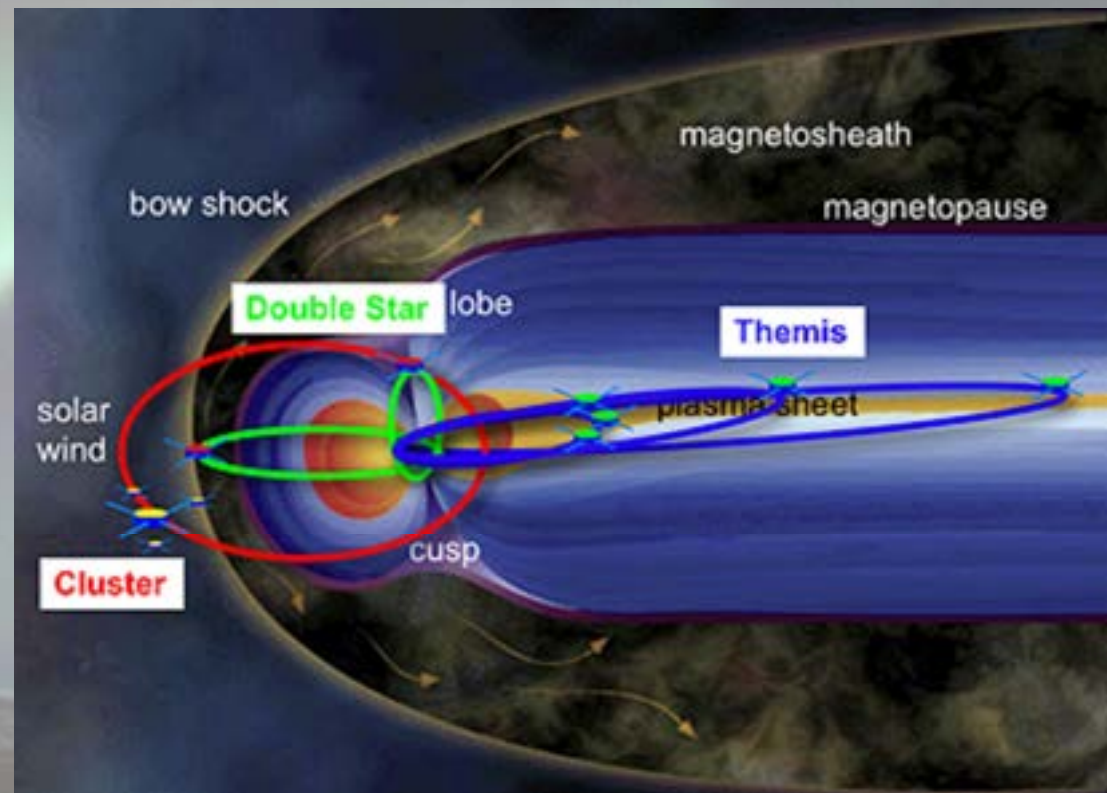
Lancé le 16/02/2007

de Cap Canaveral par une fusée Delta II.

Time History of Events and Macroscale Interactions during Substorms.



2007 : Mise en évidence de la reconnexion magnétique





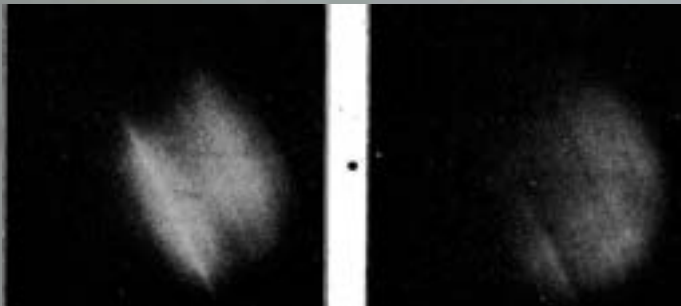
Fusa MIYAKE  
(1987–...)  
Physicienne Japonaise à l'Université de Nagoya

Les événements de Miyake

- 12350 : Puissance de type X.8000
- 774-775 : Puissance de type X.800
- Début des cycles en 1761 ...

**Septembre 1859** : L'événement de Carrington  
Cycle 10 – Puissance de type X.50

**Mai 1921** : La tempête du Métro New-Yorkais  
Cycle 15 – Puissance de type X.15



Images prises depuis l'Observatoire de Lowell - Flagstaff

# Les plus grosses tempêtes enregistrées

Les ESPE – Extreme Solar Particle Events

**Mars 1989** : Le black out de Québec  
Cycle 22 – Puissance de type X.15  
6 millions de personnes sans électricité durant 9h



**Octobre – Novembre 2003** : Les tempêtes d'Halloween  
Cycle 23 – Puissance de type X.45  
Texas, Méditerranée, Afrique du Sud, ...  
C'est la durée qui est exceptionnelle, près de 45 jours.

# Les influences sur Terre



# Observation des aurores

## Classification des tempêtes géomagnétiques

### G1

#### Mineur

900 jours sur 11 ans

Kp=5

#### Effets

De faibles fluctuations peuvent subvenir sur les réseaux.

### G2

#### Modéré

360 jours sur 11 ans

Kp=6

#### Effets

Les systèmes aux hautes latitudes peuvent être concernés par des alertes de tension. Les tempêtes géomagnétiques de longue durée peuvent endommager les transformateurs.

### G3

#### Fort

130 jours sur 11 ans

Kp=7

#### Effets

Des corrections de tension électrique peuvent être nécessaires. Fausses alertes déclenchées sur certains systèmes de protection.

### G4

#### Sévère

60 jours sur 11 ans

Kp=8

#### Effets

Il est possible que des problèmes généralisés de contrôle de la tension surviennent et que certains systèmes de protection déconnectent par erreur des actifs clés du réseau.

### G5

#### Extrême

4 jours sur 11 ans

Kp = 9

#### Effets

Coupures d'électricité, voir effondrements des systèmes, liés aux tensions induites et aux blocages des systèmes de protection. Les transformateurs peuvent être endommagés.

**BLACKOUTS DE RESEAUX ELECTRIQUES**

**Tempête géomagnétique**

## Les outils d'observation et la mécanique des aurores

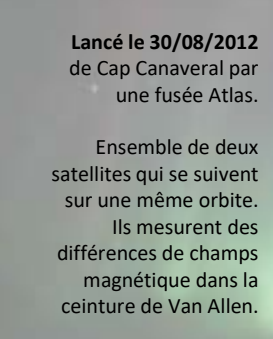
- Notre protection, la magnétosphère terrestre
- Le feuillet de plasma, la ceinture de Van Allen, le courant de queue, ...
- Les ovales auroraux
- Les reconnections magnétiques
- Ce que montrent les satellites depuis l'espace
- La couleur des aurores lors d'observations
- Un site d'observation privilégié ...

# La magnétosphère terrestre



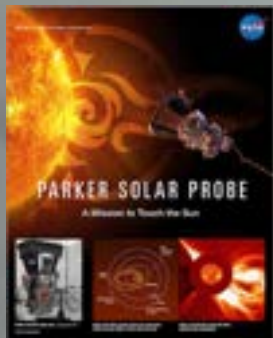
**Lancé le 01/11/1994**  
de Cap Canaveral par une fusée Delta.  
Observation de la magnétosphère, du vent solaire et de son impact sur Terre.  
Lancée pour une durée de mission de 5 ans ... toujours en activité

Projet ISTP (Polar, Cluster, Soho, ...)



**Lancé le 30/08/2012**  
de Cap Canaveral par une fusée Atlas.

Ensemble de deux satellites qui se suivent sur une même orbite.  
Ils mesurent des différences de champs magnétique dans la ceinture de Van Allen.

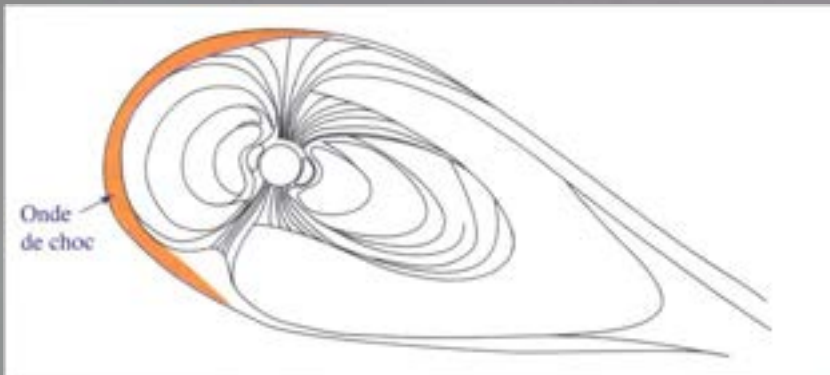


**Lancé le 12/08/2018**  
de Cap Canaveral par une fusée Delta.

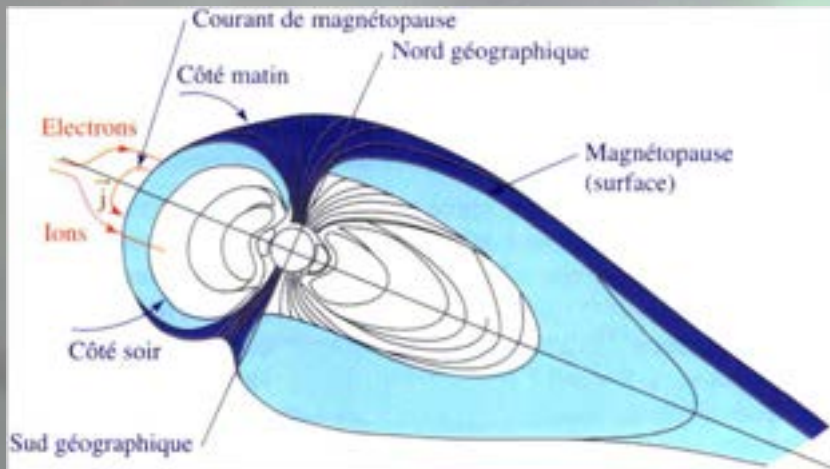
Etude du magnétisme solaire, de la progression du vent solaire dans la couronne.



# Impact avec la magnétosphère ?

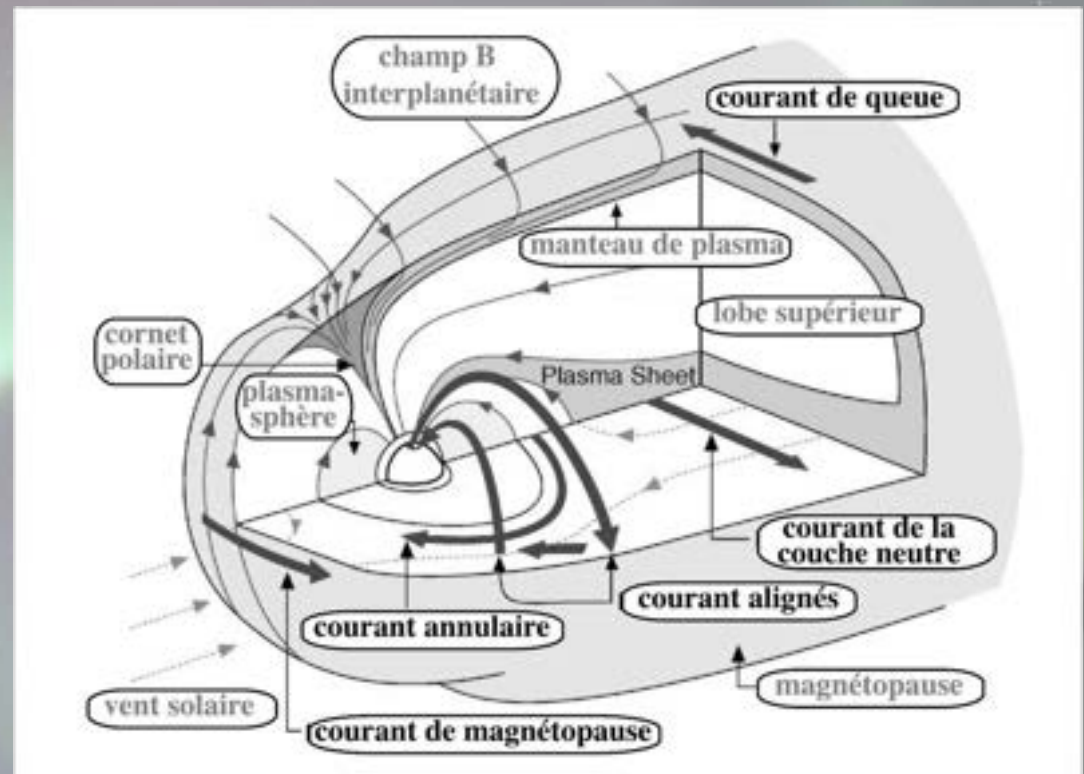


Premier contact entre le **vent solaire** et le **champ magnétique terrestre**. Les particules plus rapides rattrapent les particules les plus lentes freinées en arrivant proche de la Terre.

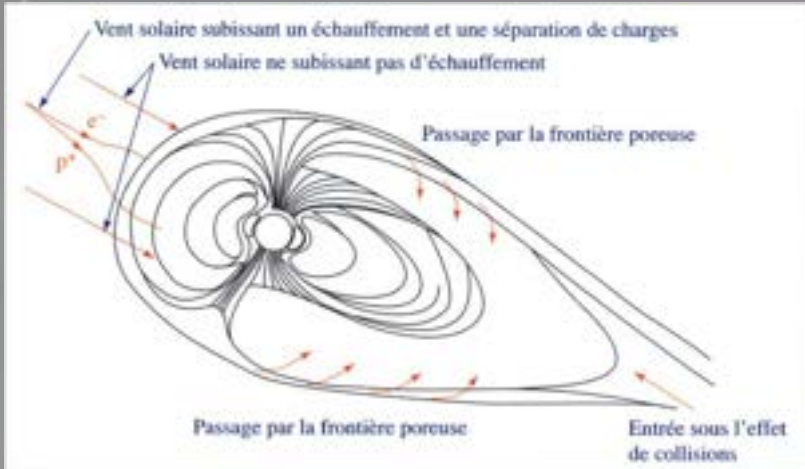


Les particules chargées se séparent à l'approche de la Terre. Les électrons côté matin et les ions côté soir. C'est le début de la **magnétosphère**. Il s'y crée alors un courant électrique : le **courant de magnétopause**.

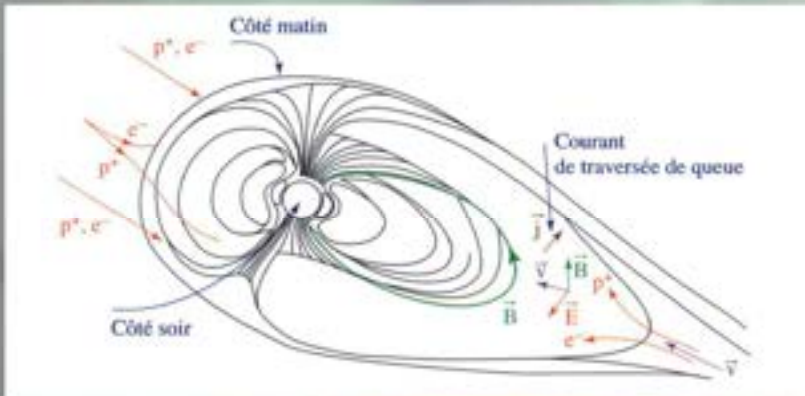
**Les courants de CHAPMAN-FERARO**



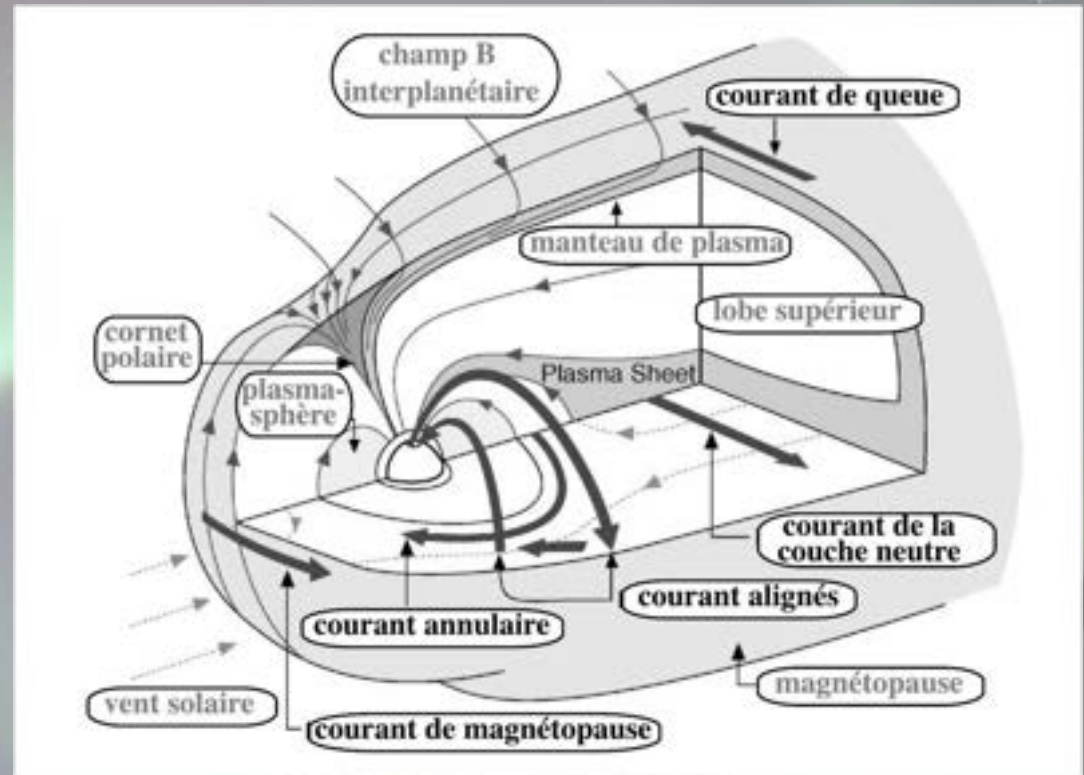
# La magnétosphère est poreuse



Le vent solaire qui contourne la **magnétopause** s'accélèrent, certaines particules traversent la frontière poreuse tandis que certains aussi rentrent par la partie arrière de la **magnétosphère**.



Les particules arrivent par la **queue de la magnétosphère** et se séparent eux aussi en fonction de leur polarité. Il est induit un **courant de queue**.



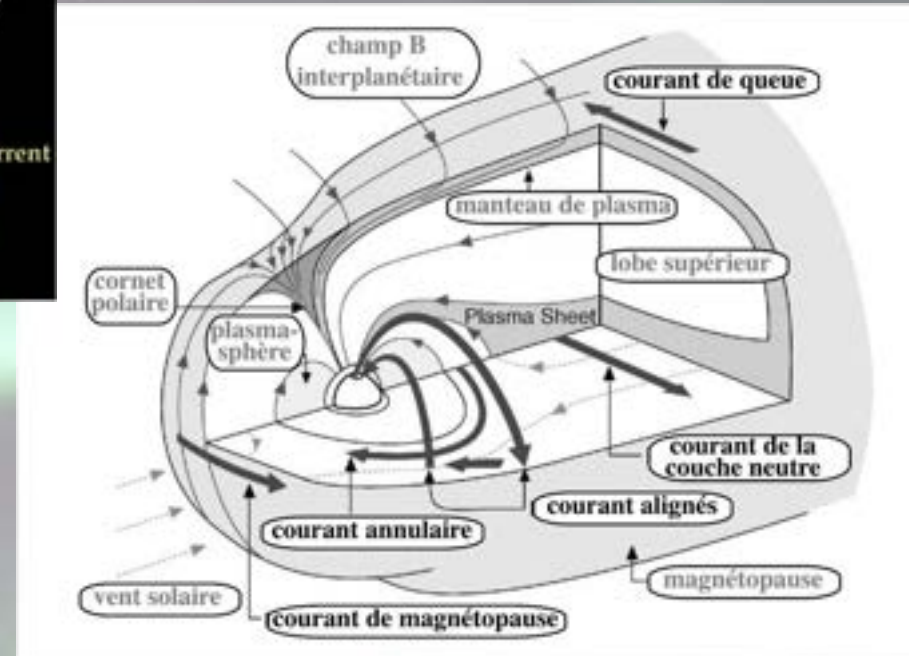
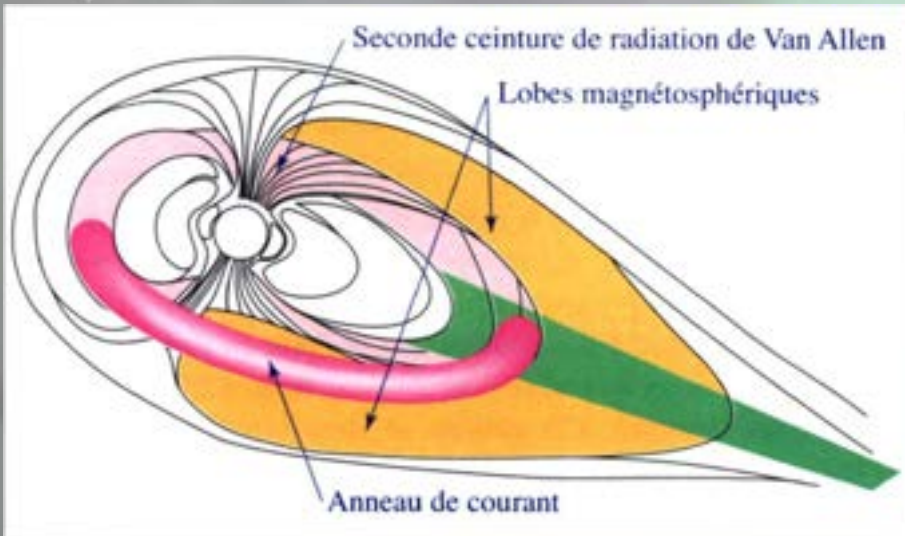
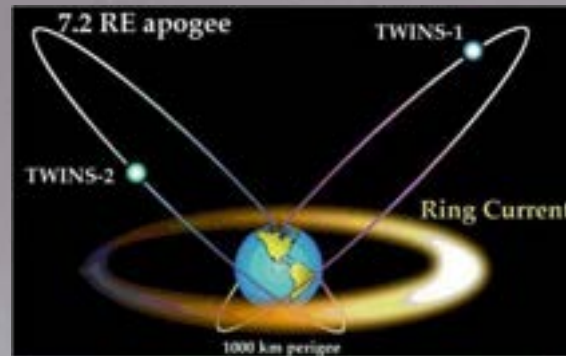
# Accélération dans le feuillet de plasma



TWINS A Lancé le 28/06/2006  
TWINSB2 Lancé le 13/03/2008

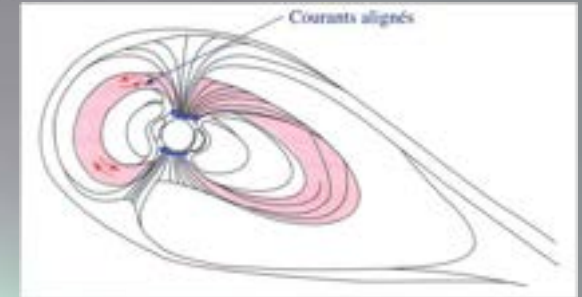
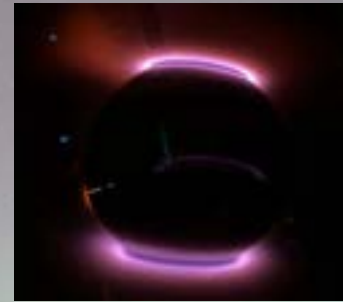
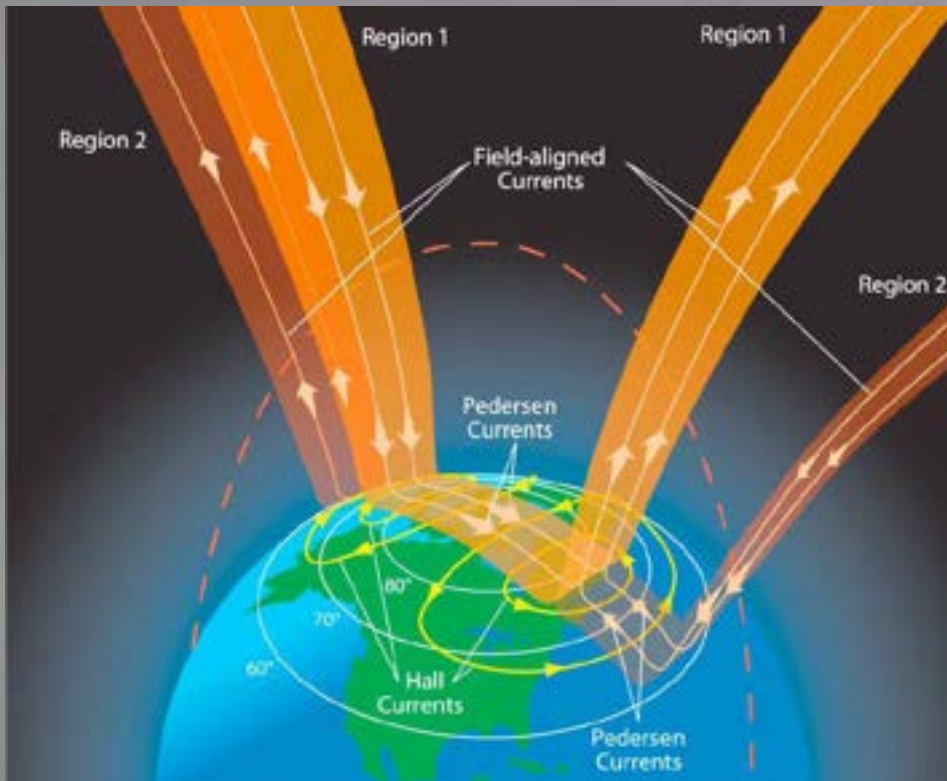
Par des satellites militaires de reconnaissance.

Satellites spécialisés dans l'observation de l'anneau de courant qui entoure la Terre

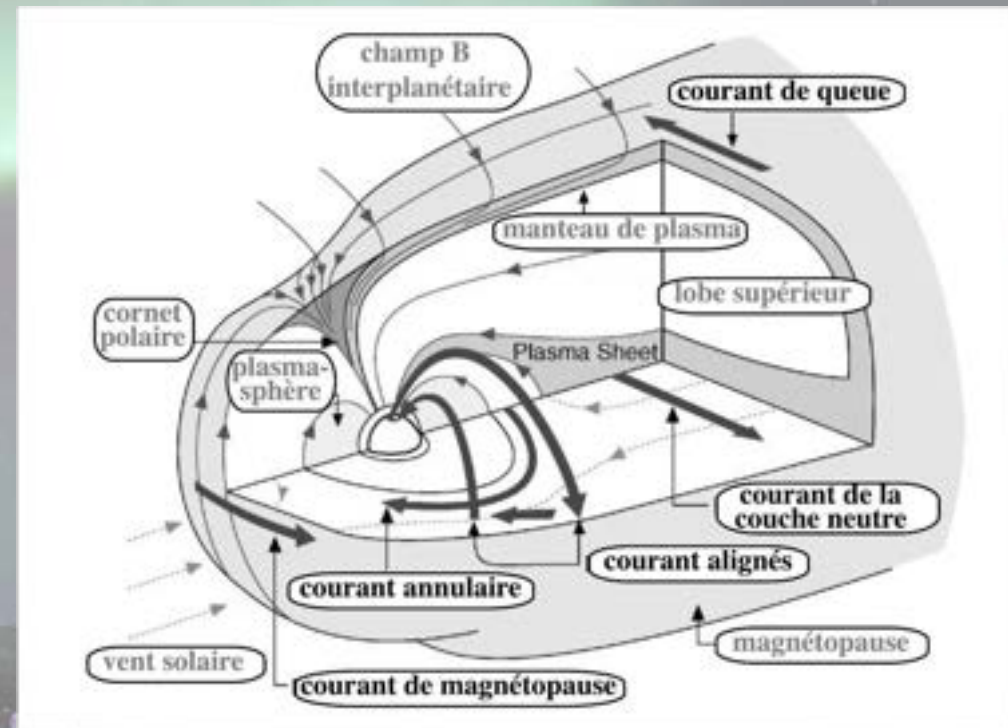


Les particules sont accélérées et « stockées » dans le **feuillet de plasma** jusqu'à se répartir dans l'**anneau de courant**. Les particules vont remplir la **seconde ceinture de Van Allen**.

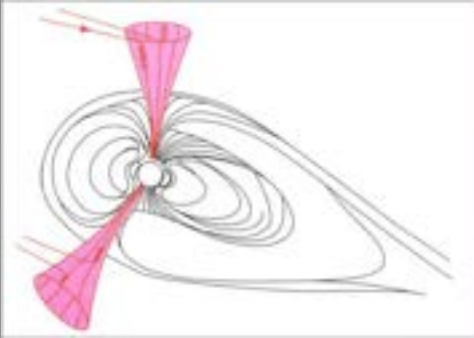
# Des ovaux auroraux?



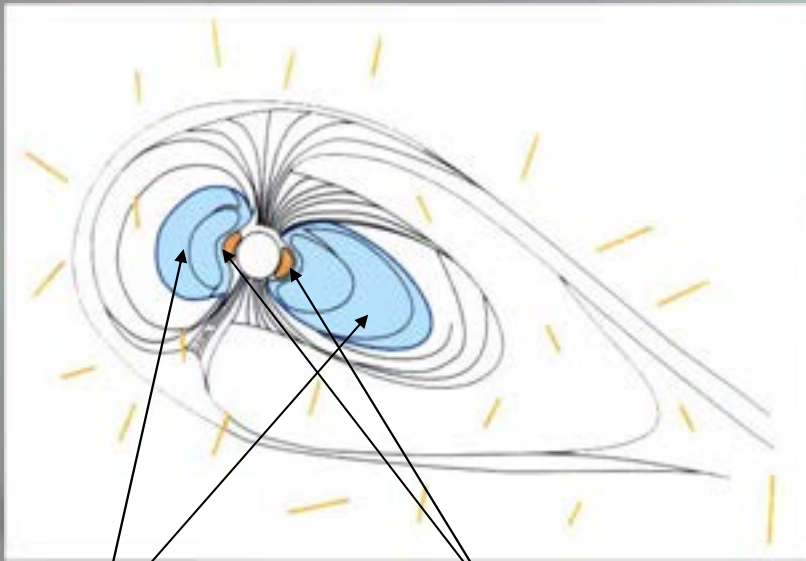
Un courant se forme parallèlement aux lignes du champ magnétique terrestre, il rentre dans l'ionosphère par les cornets polaires, ce sont les **courants alignés (courants de Birkeland)** et se heurtent aux courants horizontaux, les **courants de Pedersen**.



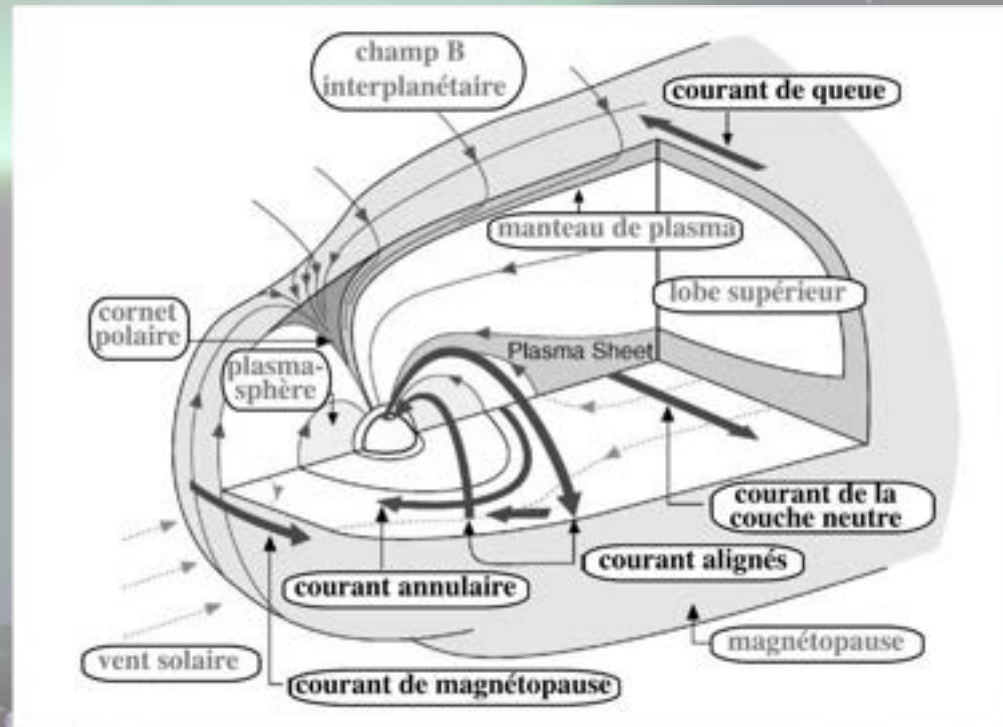
# La magnétosphère est bombardée de partout !



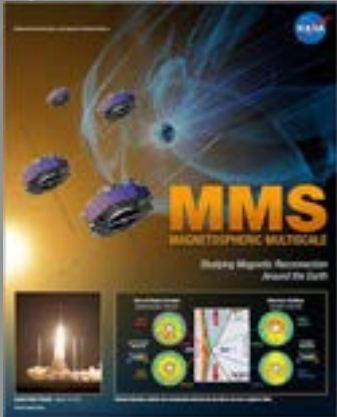
Les **cornets polaires** piègent des particules directement issues du vent solaire pour le précipiter dans l'atmosphère polaire



La **plasmasphère** et la ceinture de **Van Allen** (ceinture interne de radiation) est en corotation avec la Terre. Elles sont traversées par des particules issues du rayonnement cosmique qui se propagent dans tous les sens.

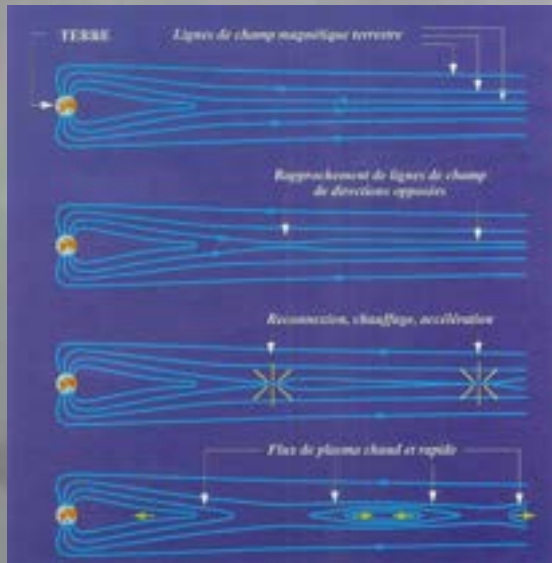


# Que se passe-t-il aux environs de la Terre ?

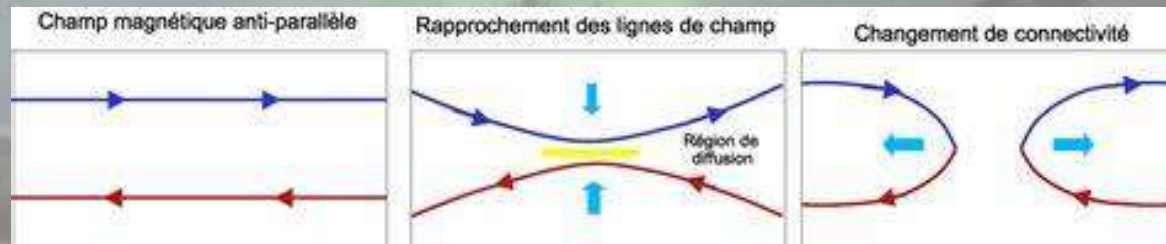
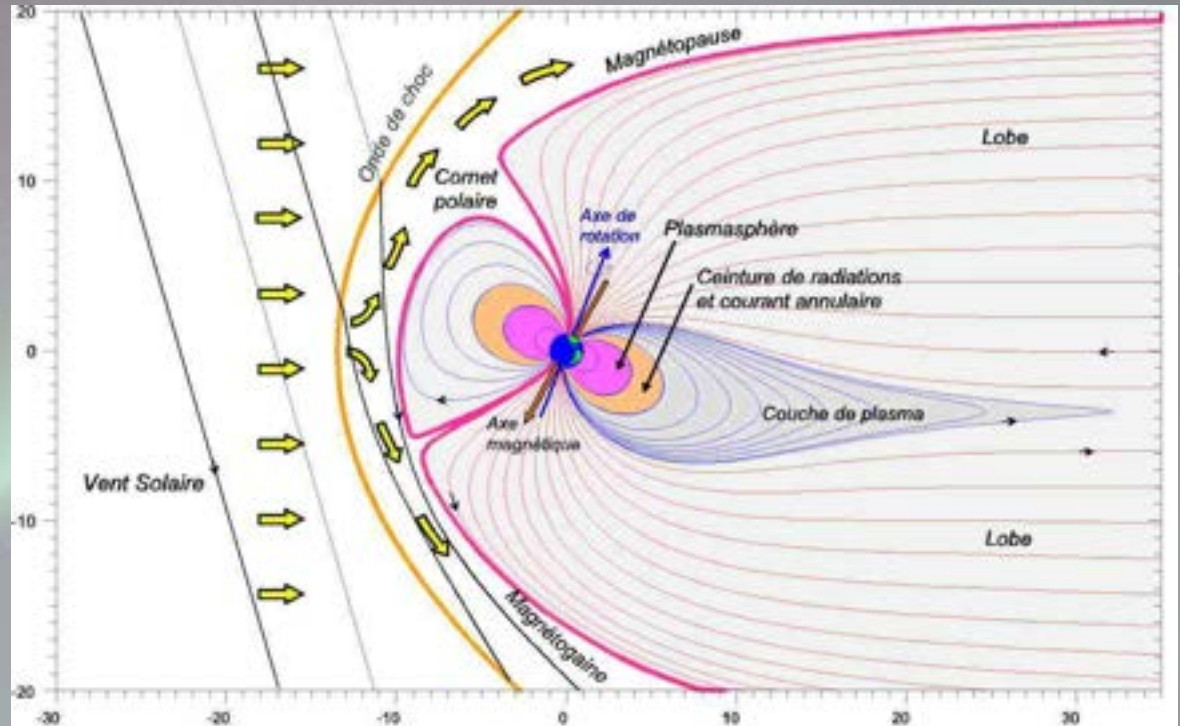


Lancé le 13/03/2015  
de Cap Canaveral par une fusée Atlas V

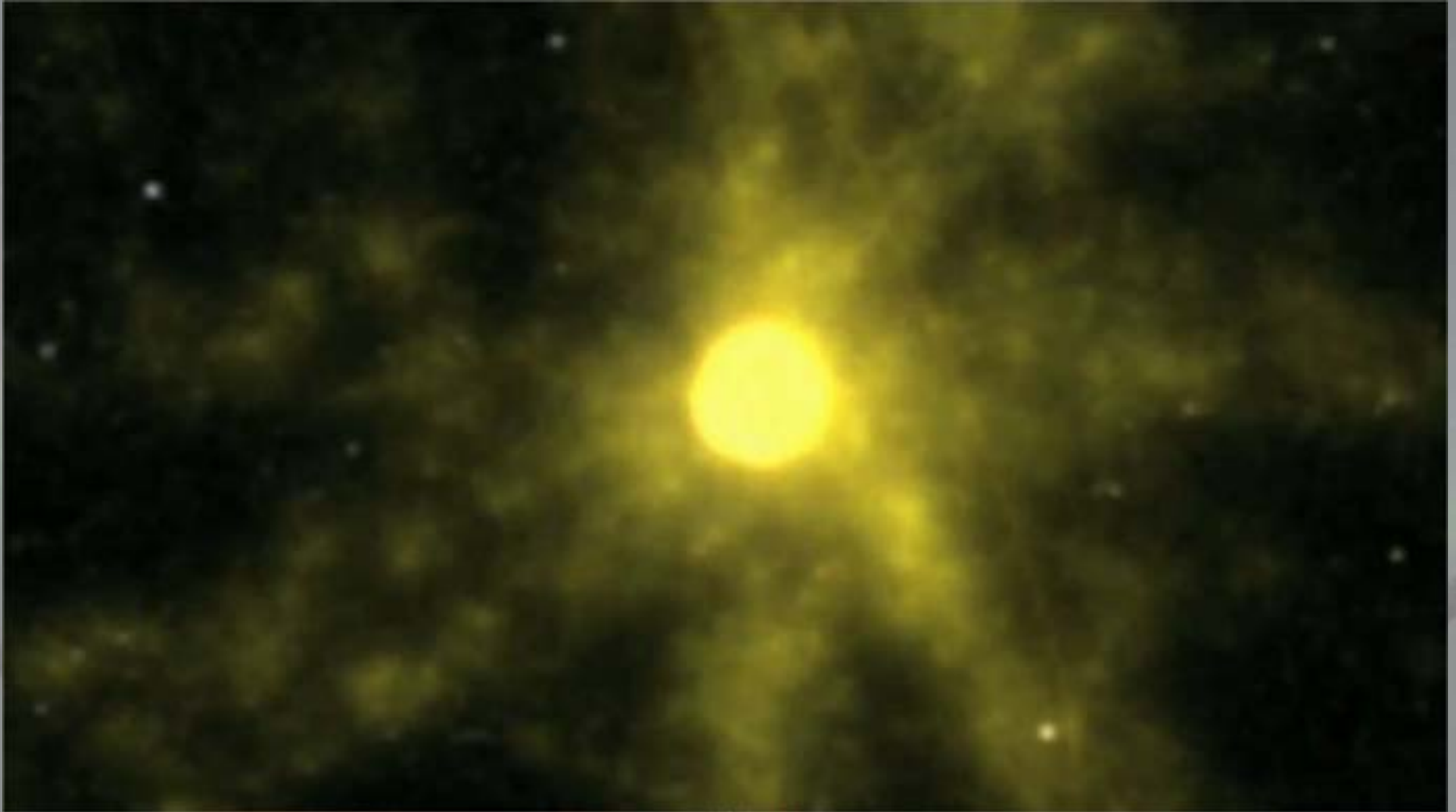
Ensemble de 4 satellites dédiés à l'observation de l'interaction des champs magnétiques solaires et terrestre



Les reconnexions magnétiques dans la queue de courant accélèrent les particules directement vers la Terre.



## Une petite visualisation simplifiée du phénomène ...



## Observation des aurores

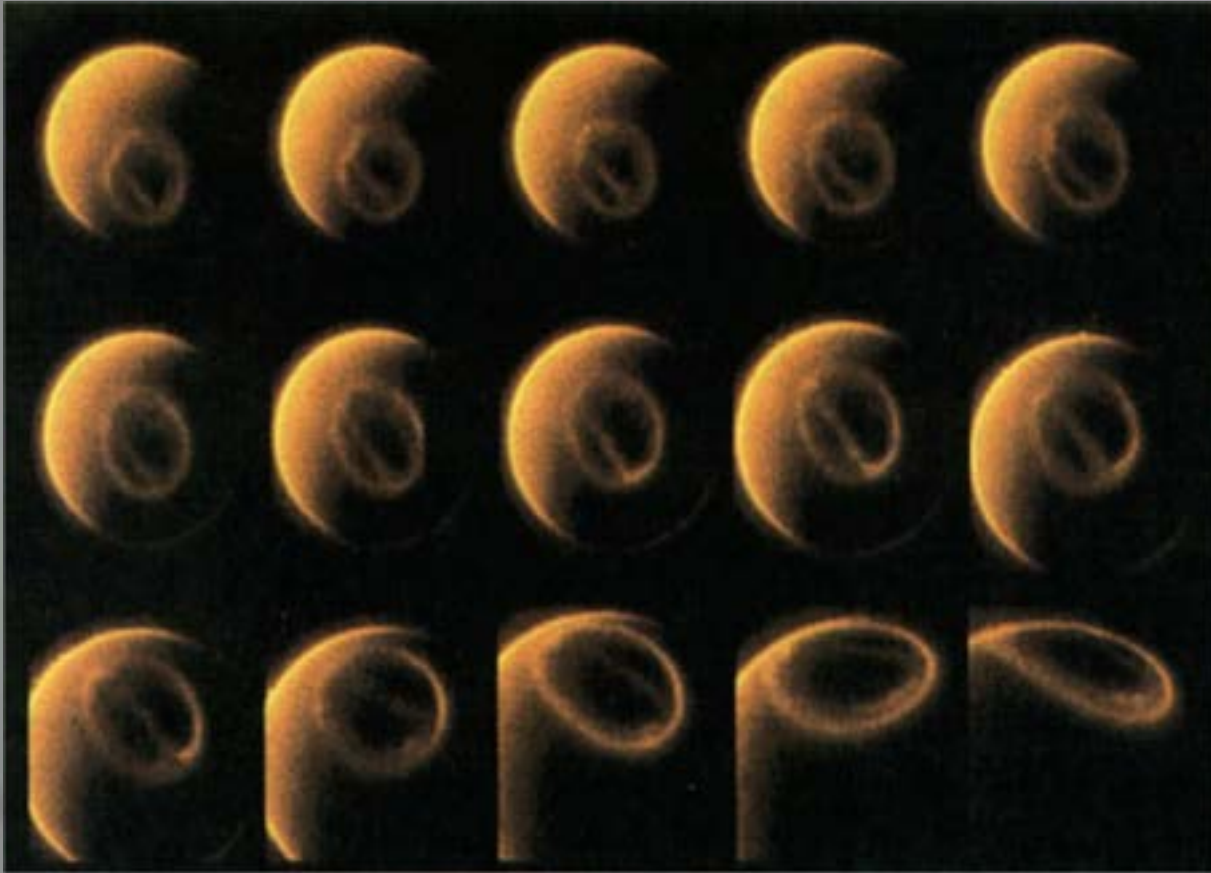
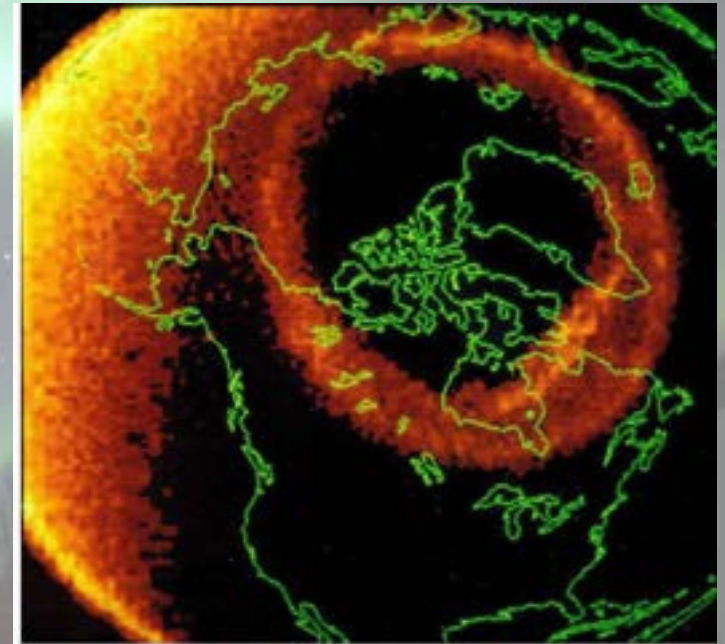


Photo du Dynamics Explorer en 1981 montrant la croissance et la décroissance de l'ovale auroral en forme de Théta lors d'un orage magnétique.

Ovale auroral pris depuis l'espace en fausse couleur.



## Observation des aurores depuis l'espace

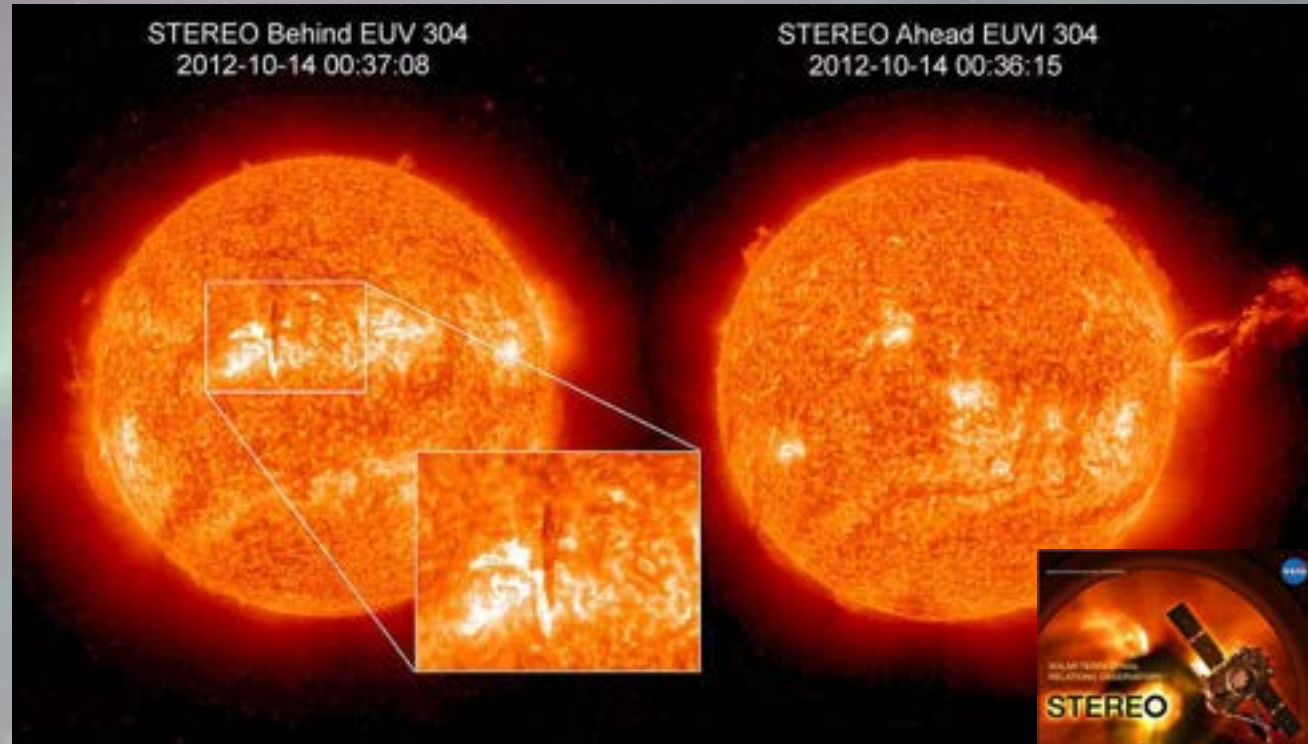
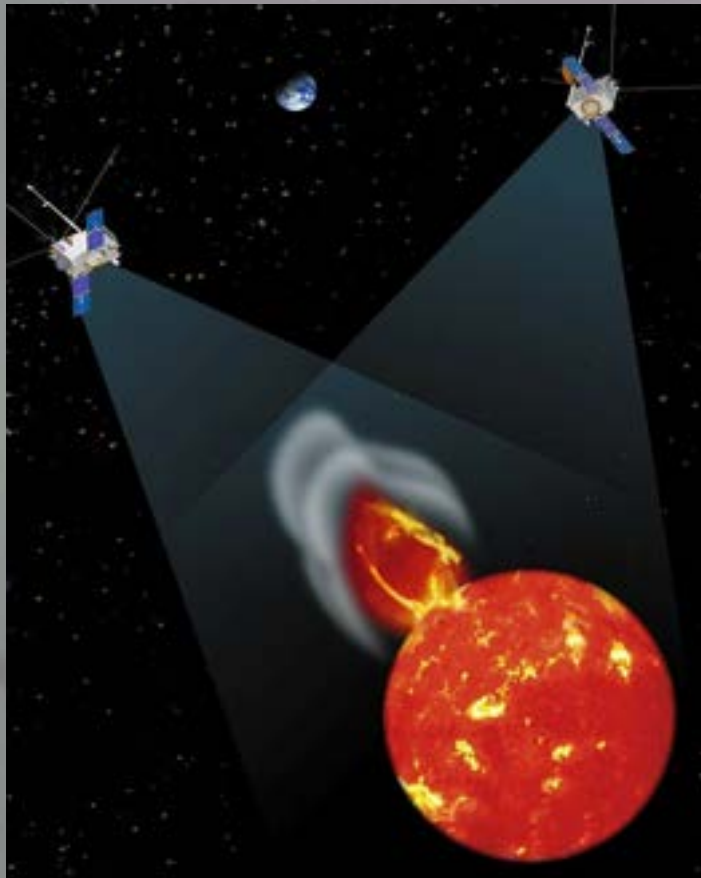


Evolution de l'apparition de l'arc auroral durant la nuit.

Ciel complètement dégagé sur tout le Canada la nuit du 9 mars 2008 durant plus de 8 heures.

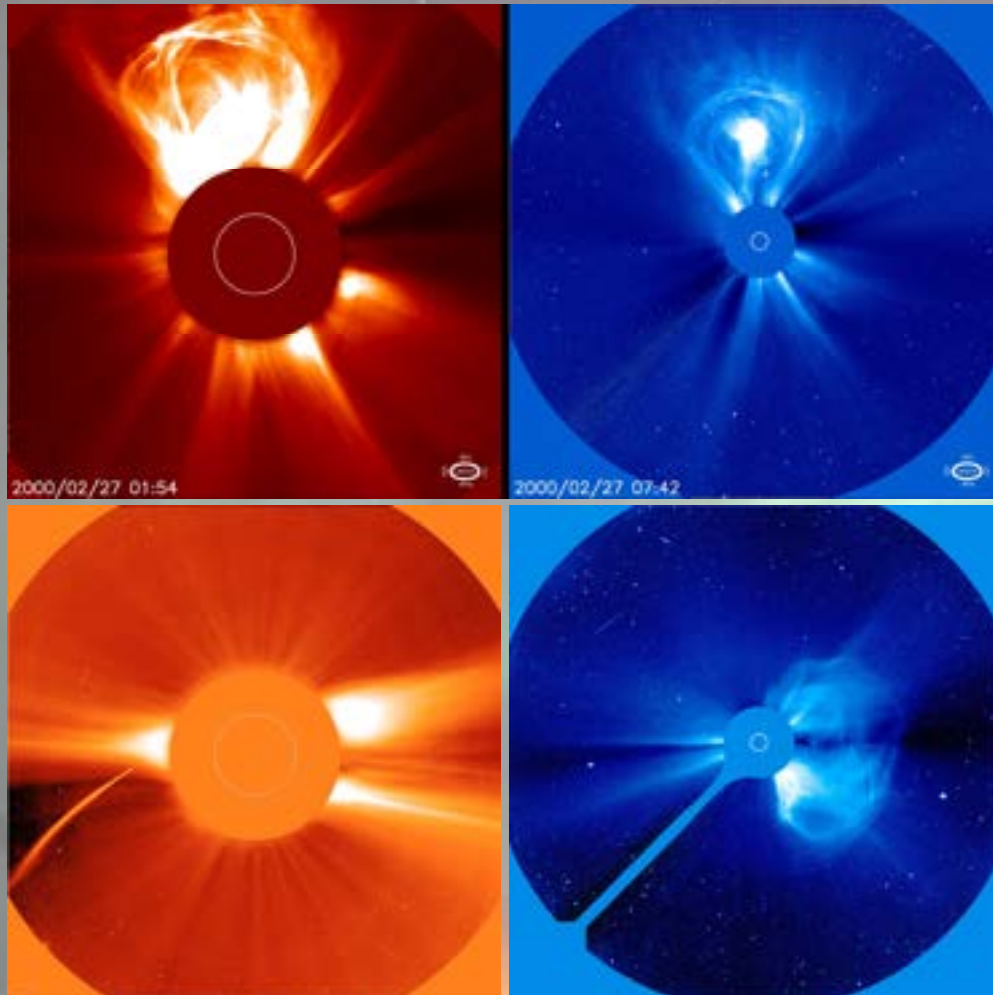


# Observation depuis l'espace Satellites STEREO



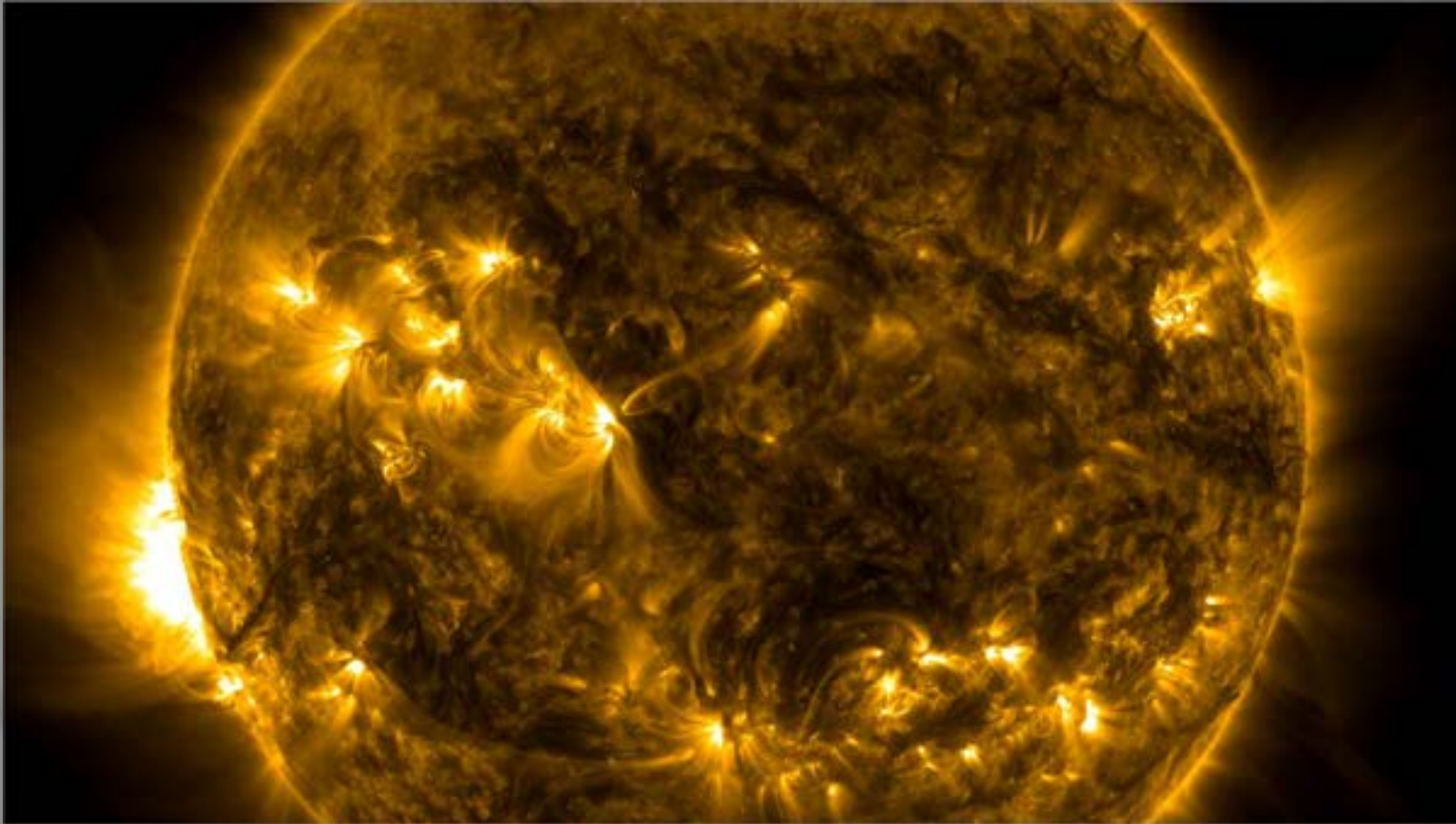
Solar TERrestrial RELation Observatory

# Observation depuis l'espace Satellite SOHO



Solar and Helispheric Observatory

# Observation depuis l'espace Satellite SDO



Lancé le **11/02/2010**  
de Cap Canaveral par une fusée  
Atlas.

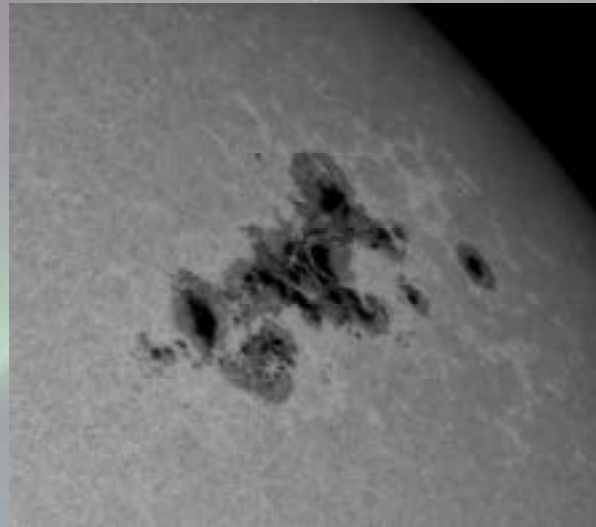
Observations en direct du Soleil sous  
un ensemble de longueurs d'onde  
comprenant le rayonnement UV  
ainsi que magnétique.

**Solar Dynamics Observatory**

On peut distinguer que les couleurs rouges sont sur les parties en altitude alors que les couleurs vertes sont sur des altitudes plus basses.



Images réalisées depuis Bauduen (France) lors de l'activité exceptionnelle du 10 mai 2024.



Images réalisées depuis la plage de Ramsfjordsbotn le 03/03/2024 (Norvège) et depuis le site de EISCAT le 04/03/2024 (Norvège) .

Images réalisées par Xavier Dequévy

## Des aurores en couleur



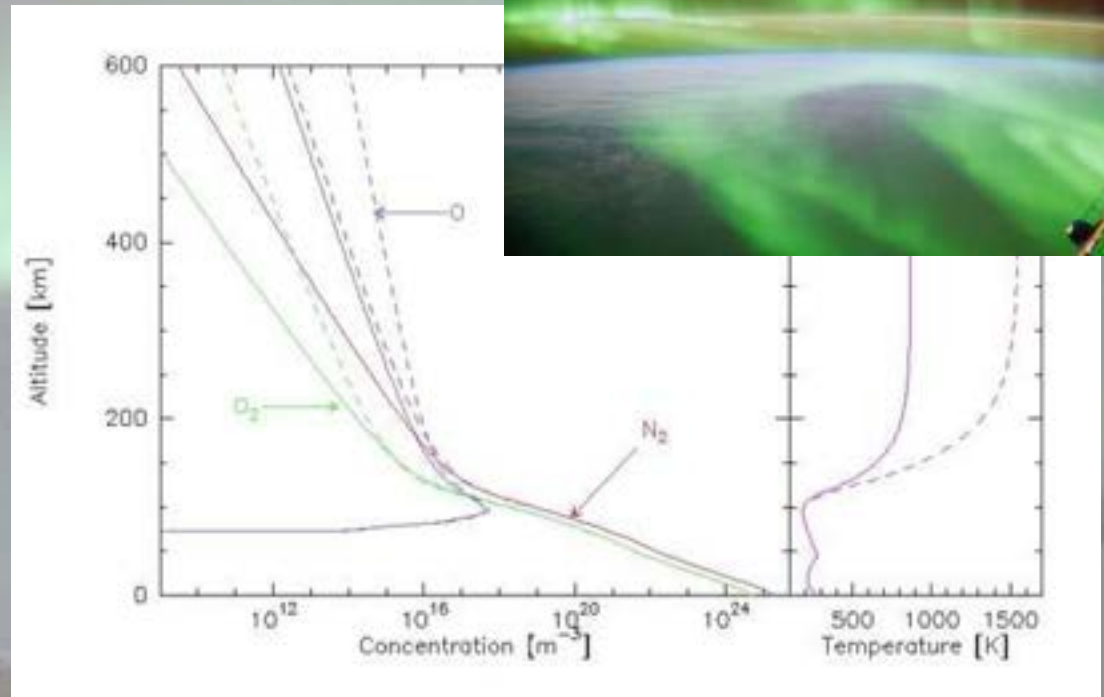
# Pourquoi de la couleur ...

Images d'aurores depuis la station spatiale Internationale par Alexander GERST en 2014



## LES COULEURS DES AURORES BORÉALES

- **ROUGE** - PLUS RARE  
 Oxygène à plus de 200 km, là où l'atmosphère est plus ténue.
- **VERT** - LA PLUS FRÉQUENTE  
 Émission de l'oxygène vers 100-150 km d'altitude.
- **BLEU**  
 Azote ionisé entre 90 et 120 km, signe de particules très énergétiques.
- **VIOLET**  
 Mélange d'azote neutre et ionisé, souvent visible en bordure des aurores actives.
- **ROSE / MAGENTA**  
 Combinaison oxygène + azote, lors d'aurores très dynamiques.



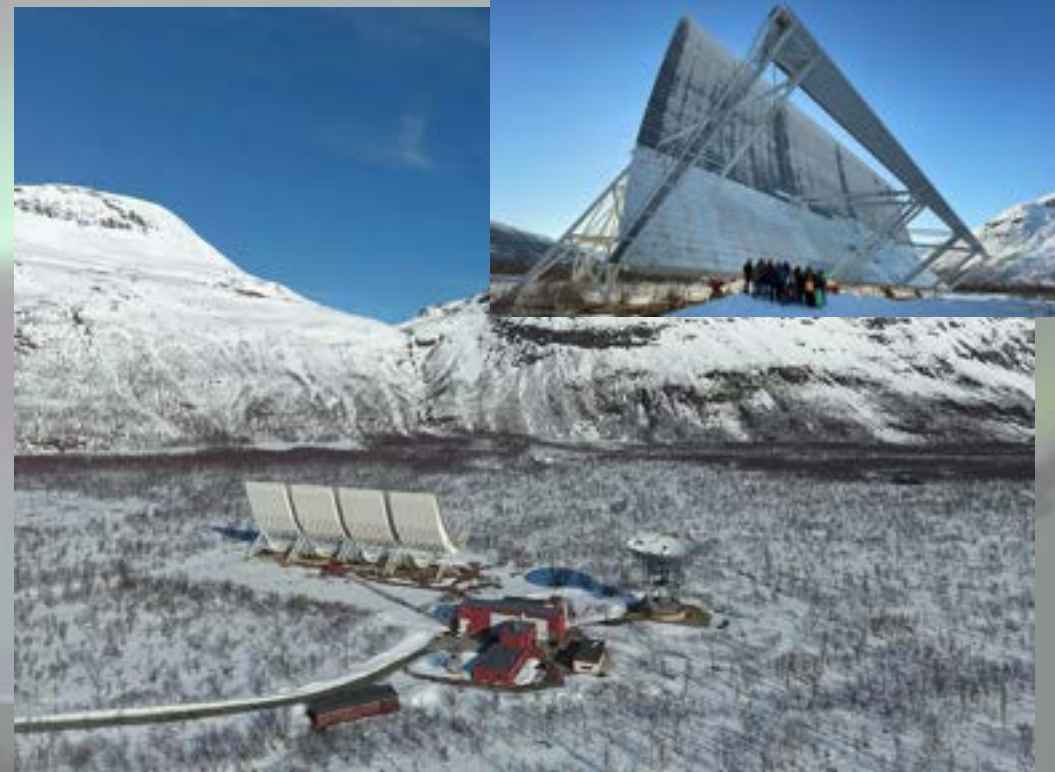
Concentration d'éléments chimiques dans l'atmosphère en fonction de l'altitude

# Observation des aurores Prévision du phénomène

EISCAT (European Incoherent Scatter Scientific Association) est une association scientifique à but non lucratif proche de Tromsø



Nouvelle base de recherche de EISCAT 3D situé à Skibotn



## Comment « prédire » les aurores boréales ?

- Etude de l'indice Kp Terrestre
- Vitesse et densité du vent solaire
- Indice Dst et puissance hémisphérique
- Observation des variations du champs magnétique
- Les stations d'observations terrestres
- Quelques images d'aurores

# Une multitude d'applications ...



SpaceWeatherLive



SolarMonitor



AuroraAlerts



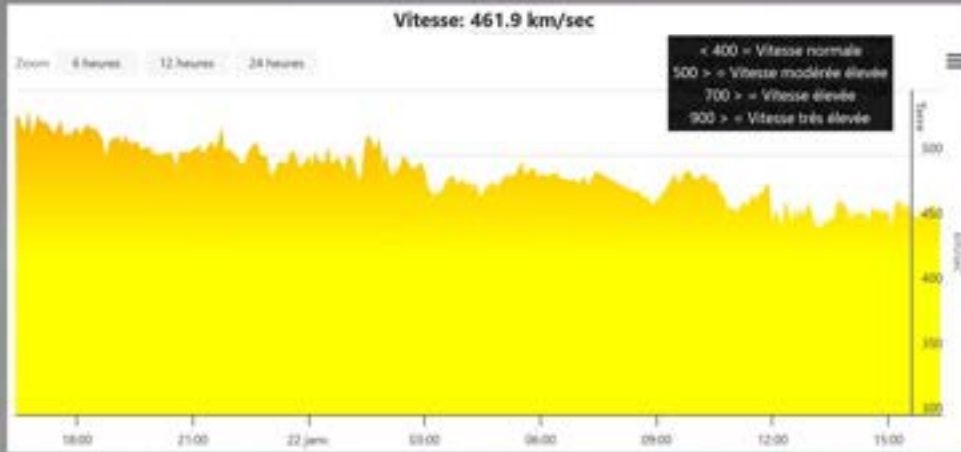
<https://www.swpc.noaa.gov/>



<https://www.spaceweatherlive.com/>



# Observation des aurores Vitesse et densité du vent solaire



## Activité aurorale en temps réel

7 Aide

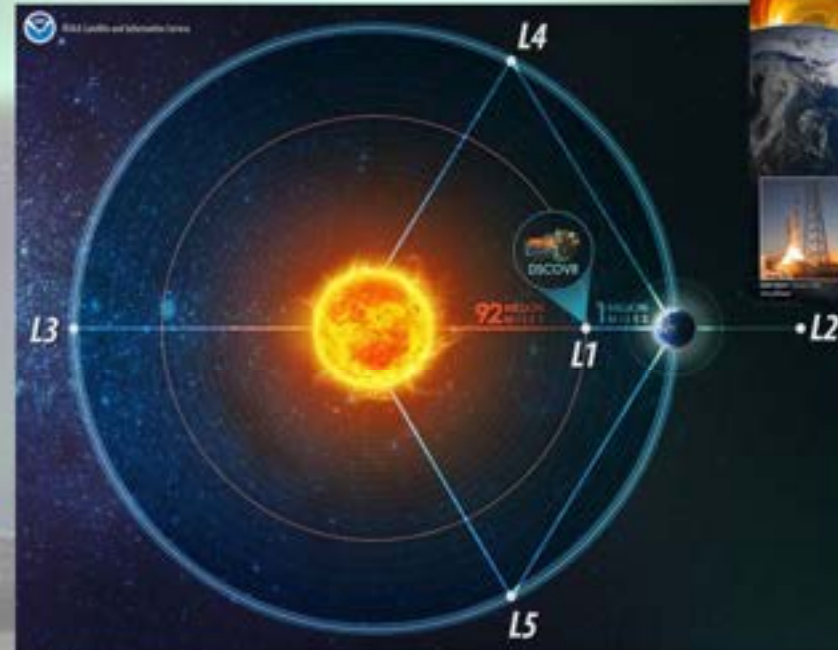
Vous trouvez ci-dessous les dernières données sur le vent solaire et le champ magnétique interplanétaire couvrant les dernières 24 heures, mesurées par la sonde spatiale Deep Space Climate Observatory (DSCOVR) situé au point Soleil-Terre L1. Ces paramètres sont les premiers paramètres utilisés pour prédire l'activité aurorale. Plus les graphiques est rouge, mieux c'est pour l'activité aurorale ! À la vitesse actuelle, il faudra **58 minutes** au vent solaire pour se propager de DSCOVR à la Terre.

## Vent solaire en temps réel

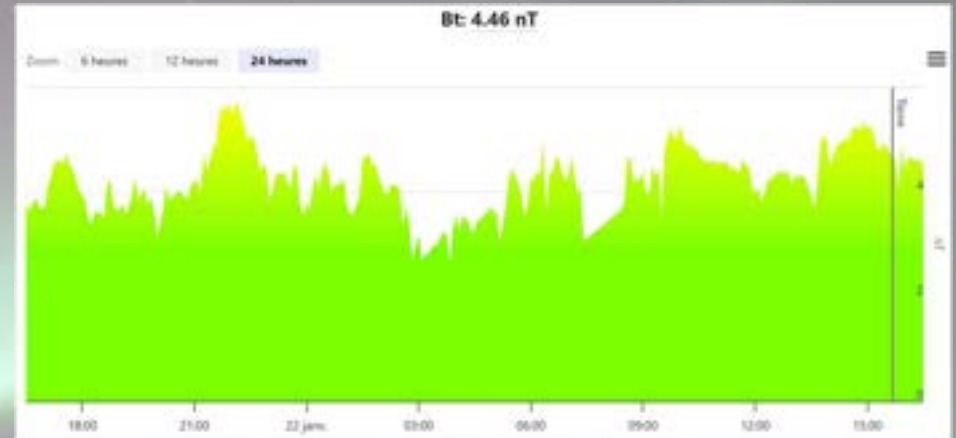
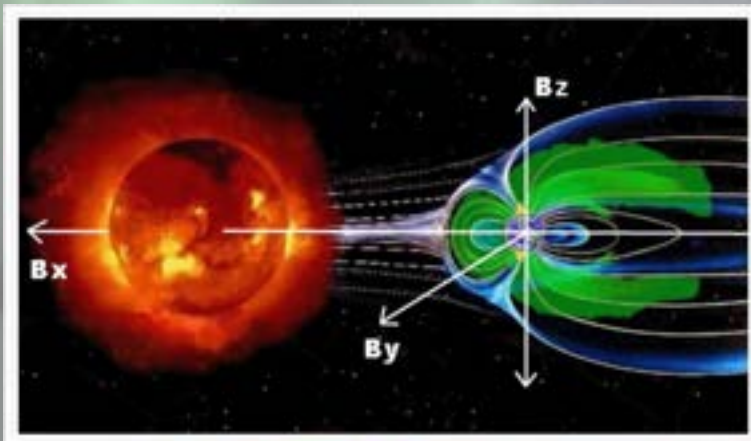
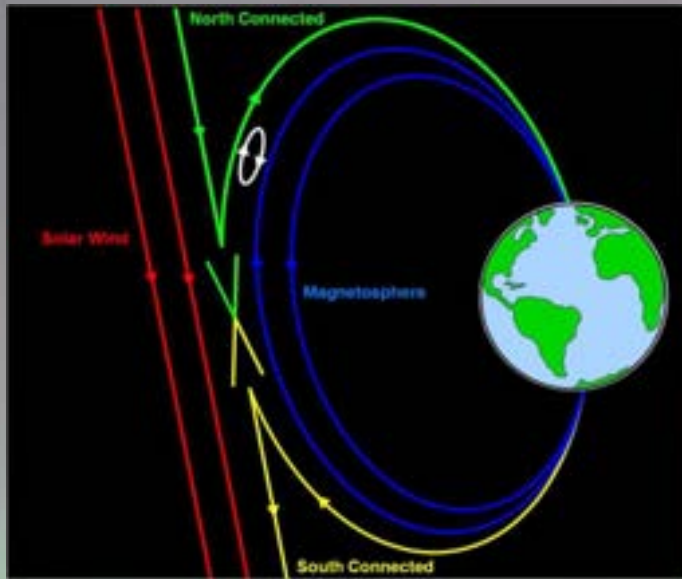
À la vitesse actuelle, le vent solaire prendra **52 minutes** pour se propager de DSCOVR à la Terre.

Lancé le 11/02/2015 de Cap Canaveral par une fusée Falcon 9.

Composée de 2 instruments : EPIC Telescope UV, IR, Visible NISTAR Radiomètre



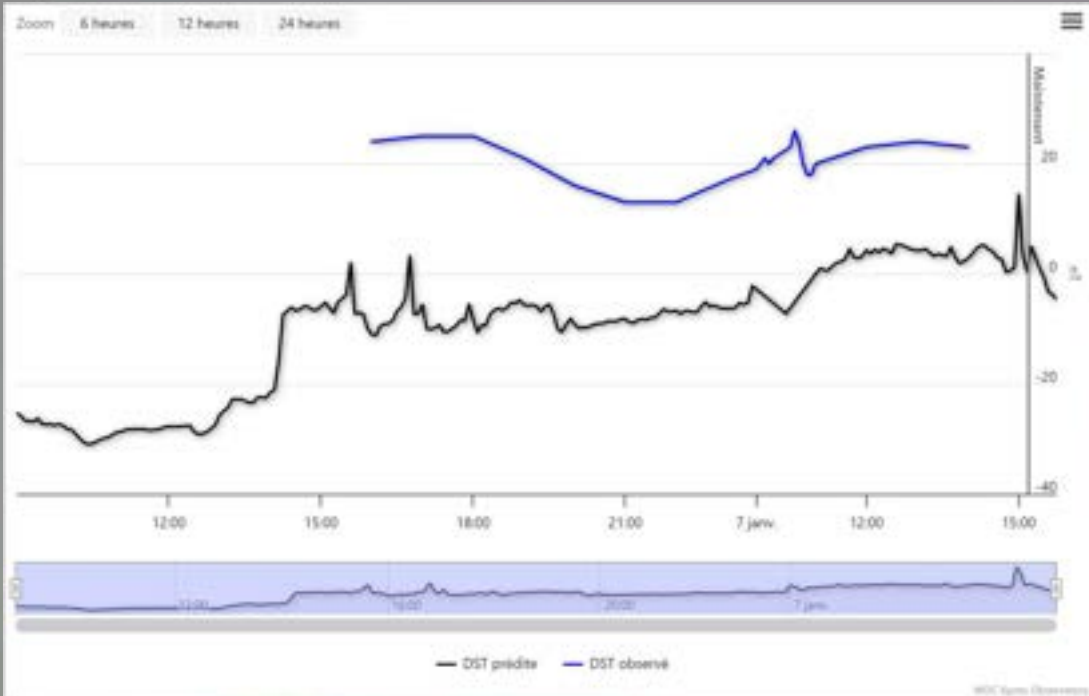
# Observation des aurores Le champ magnétique



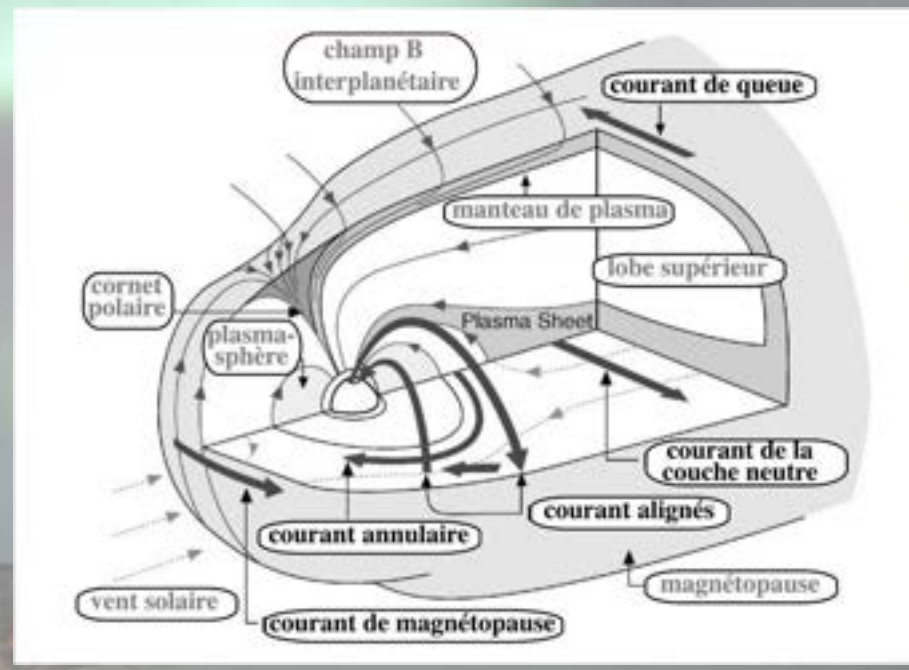
# Observation des aurores

## Indice Dst

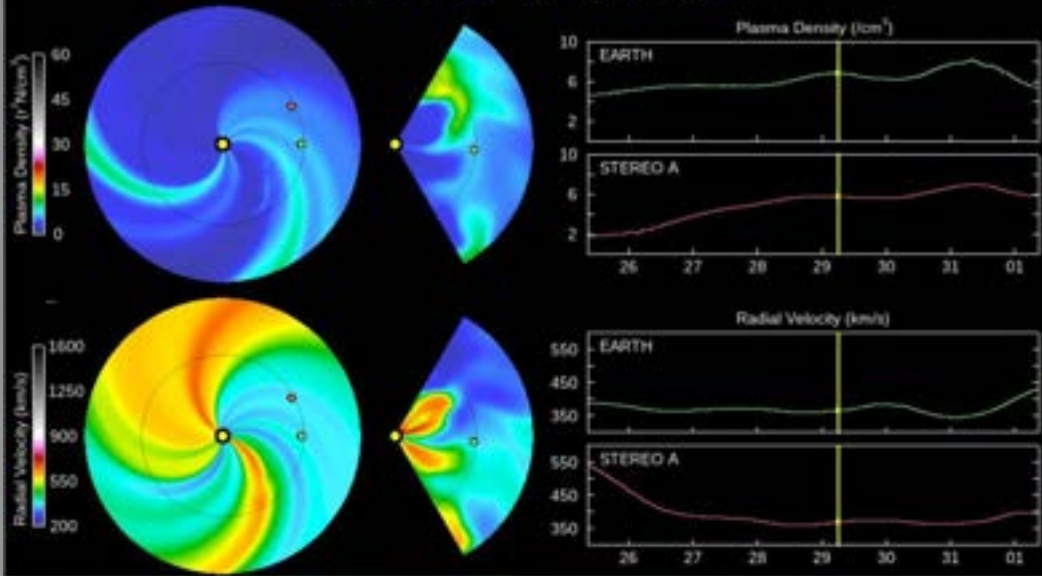
**Disturbance Storm-Time (Dst)** ou l'indice de Perturbation Tempête Temps est une mesure de l'activité géomagnétique dans les zones équatoriales dans l'anneau de courant.



- Dst à -50nT :**  
Tempête géomagnétique modérée
- Dst à -100nT :**  
Tempête géomagnétique forte
- Dst à -500nT :**  
Tempête géomagnétique grave

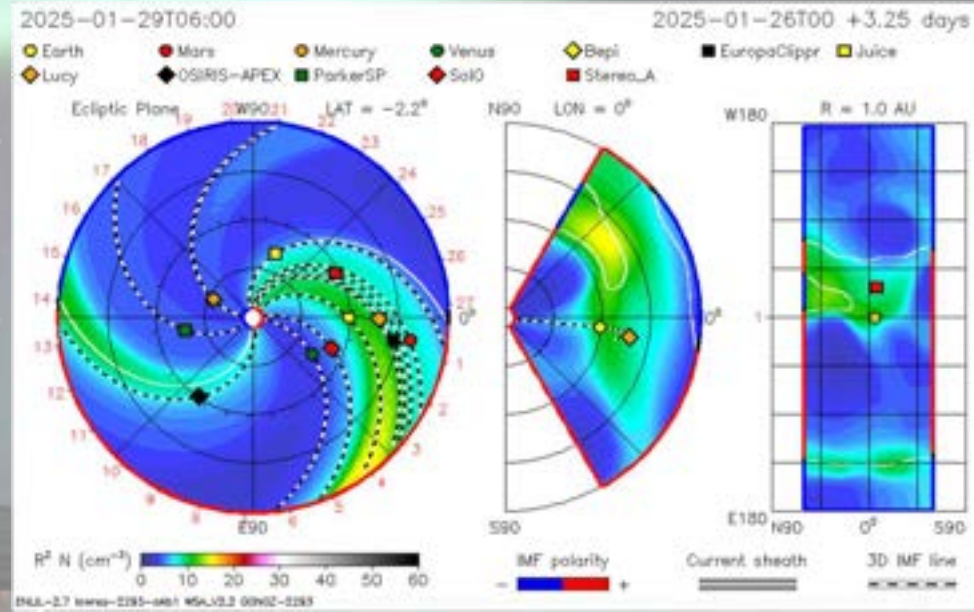
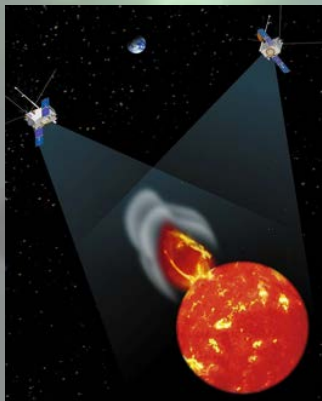


2025-01-29 06:00Z

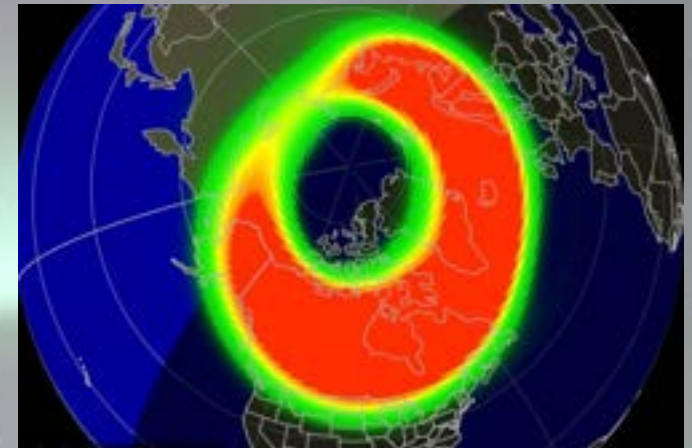
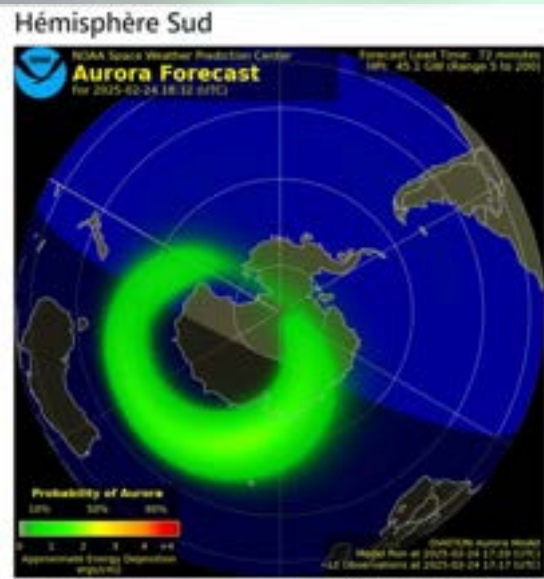
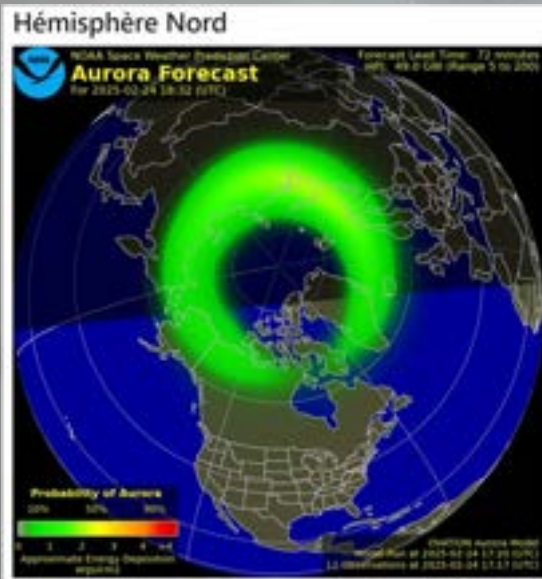


# Observation des aurores Orientation du flux solaire

Graphique de l'orientation du flux solaire  
Prédiction des planètes impactées par le flux solaire



# Observation des aurores Puissance hémisphérique et arc auroral



Exemple d'ovale auroral du 10/05/2024

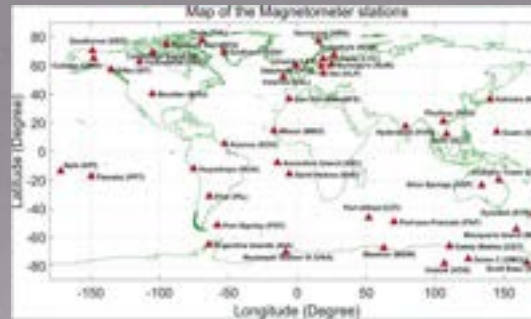
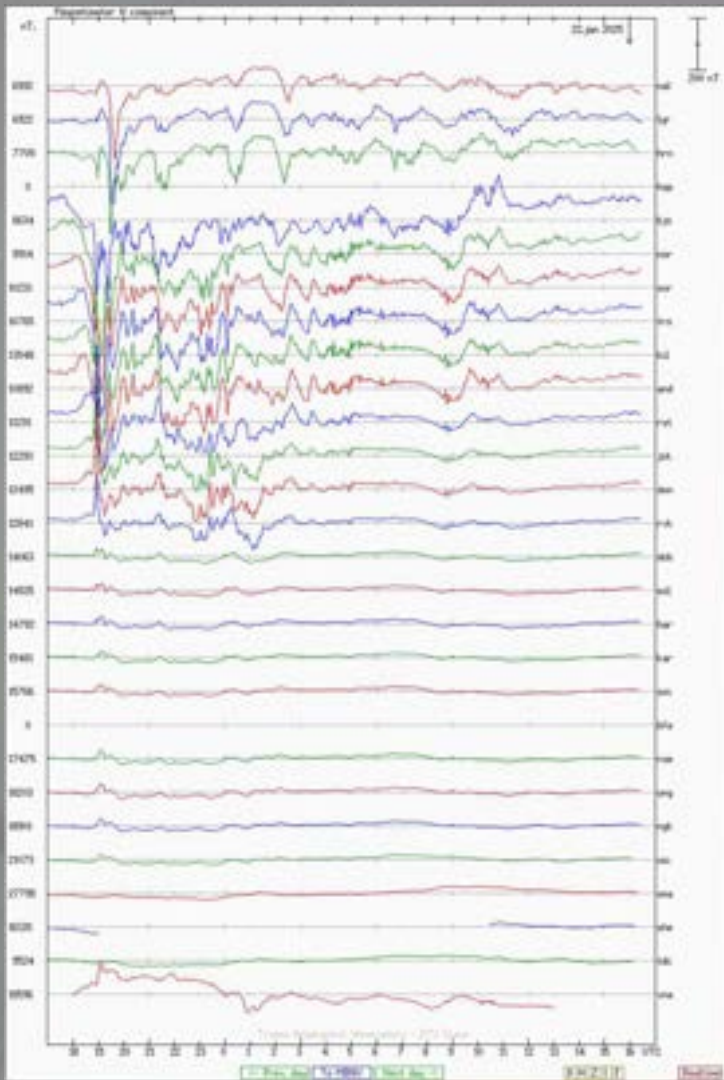
**Puissance hémisphérique** issue du modèle OVATION qui détermine le dépôt d'énergie jusqu'à 30 min à l'avance les valeurs sur Terre.

**PH < 20GW** Aurores faibles

**20GW < PH < 50GW** Aurores actives

**PH > 50GW** Tempête géomagnétique

# Observation des aurores Les magnétomètres



Code	Nom	Position	Latitude géographique
NAL	Ny-Ålesund	Svalbard	78.92N
LYR	Longyearbyen	Svalbard	78.20N
HOP	Hopen	Svalbard	76.51N
BJN	Bjarmøya	Svalbard	74.50N
NOR	Nordkapp	Norvège	71.09N
SOR	Serøya	Norvège	70.54N
TRO	Tromsø	Norvège	69.66N
KIL	Kilpisjärvi	Finlande	69.07N
AND	Andenes	Norvège	69.30N
RST	Rast	Norvège	67.52N
JCK	Jäckeå	Suède	66.40N
DON	Demna	Norvège	66.11N
RVK	Rønnevik	Norvège	64.95N
DOB	Dombås	Norvège	62.07N
SOL	Solund	Norvège	61.08N
HAR	Harestua	Norvège	60.21N
KAR	Karmøy	Norvège	59.21N
BFE	Brorfelde	Danemark	55.63N
ROE	Røme	Danemark	55.17N
WIC	Vienne	Autriche	47.92N
TDC	Tristan da Cunha	Atlantique sud	-37.06N



Images réalisées lors du séjour organisé par Astro Evasion  
lors du séjour à Tromsø en février 2024

## Images d'aurores



Images réalisées depuis la plage de Ramsfjordsbotn et depuis le site de EISCAT

## Images d'aurores

Vidéo réalisée lors du séjour organisé par Astro Evasion  
lors du séjour à Tromsø le 12 février 2025



Images réalisées depuis le Bro Mellan à Keinovuopio à la frontière FIN/SUE  
(proche de Kilpisjärvi) le 19 février 2025.

... Astro Evasion, c'est partager la science et vivre l'émerveillement ...

# Merci à toutes et tous pour votre attention

Vous pouvez retrouver cette présentation sur la page « Membre » du site  
ainsi que toutes les informations sur les prochains séjours proposés

[www.astroevasion.com](http://www.astroevasion.com)

Xavier Dequévy – Astro Evasion

