

# **L'ionosphère à haute latitude : couplage avec la magnétosphère et le vent solaire**

Romain Maggiolo

BIRA/IASB Bruxelles



- ✓ **Introduction sur la magnétosphère Terrestre**
- ✓ **Résultats récents**
- ✓ **Les mesures sol**

**1- Présentation et historique**

**2- Dynamique de la magnétosphère**

**3- Systèmes de courant magnétosphérique**

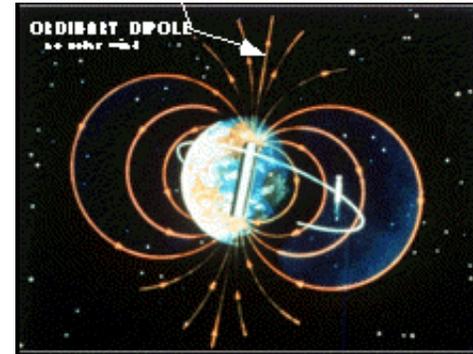
## La magnétosphère

**Région autour d'un objet où la force dominant le mouvement des particules chargées est la force magnétique produite par le champ magnétique de cet objet**

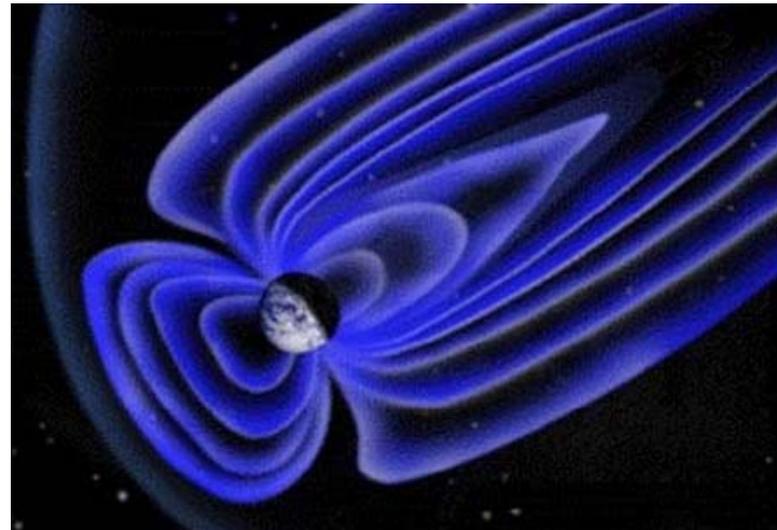
*Le terme magnétosphère a été proposé par Thomas Gold en 1959 pour faire référence à l'environnement magnétique de la Terre*

## La magnétosphère terrestre

- La Terre est un dipôle magnétique. L'influence son champ magnétique s'étend à grande distance dans l'espace

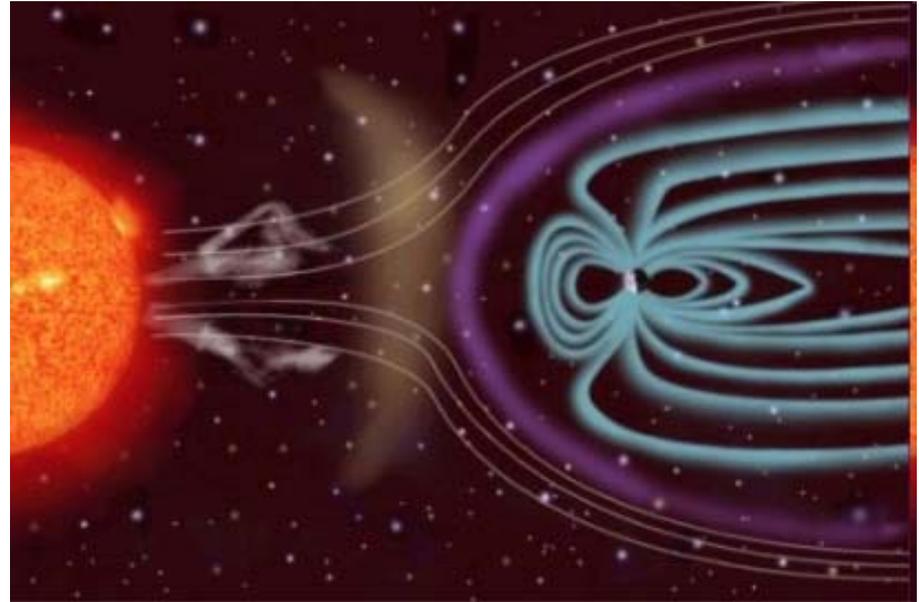


- Le vent solaire comprime la magnétosphère lui donnant une forme allongée



## Notre Bouclier dans l'espace

- Le champ magnétique terrestre dévie les particules du vent solaire. La magnétosphère est donc une cavité séparant la Terre du vent solaire.



*Dans les années 1830, l'existence de perturbations magnétiques à grande échelle fut mise en évidence. Von Humbolt les nomma orages magnétiques*

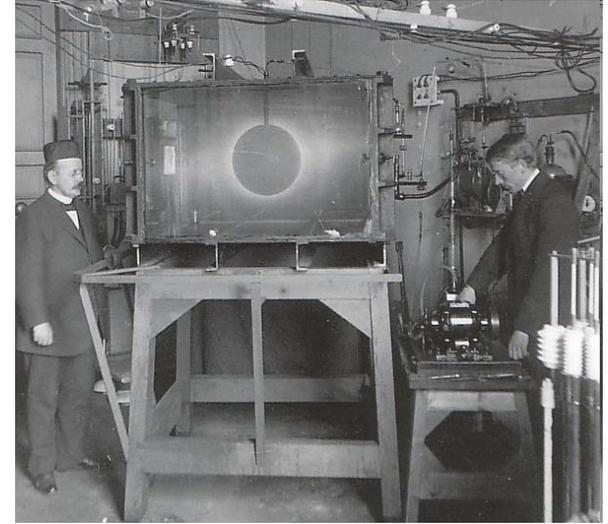
## Les aurores polaires

- L'observation d'aurores polaires remonte à l'antiquité.
- Ces phénomènes lumineux sont dynamiques. Ils sont associés à des perturbations du champ magnétique au sol



## Connection avec le Soleil

- Vers la fin du 19<sup>ème</sup> siècle, l'origine solaire des particules à l'origine des aurores polaires fut proposée



*En 1895, Kristian Birkeland reproduisit une émission lumineuse ressemblant aux aurores polaires avec sa Terrella*

- Vers le début du 20<sup>ème</sup> siècle une relation entre l'activité solaire et les perturbations magnétiques sur Terre furent établies

*En 1930, Sidney Chapman et Vincent Ferraro suggérèrent que le Soleil envoie de gigantesques nuages de plasma électriquement neutres et que les orages magnétiques surviennent lorsque ceux-ci enveloppent la Terre*

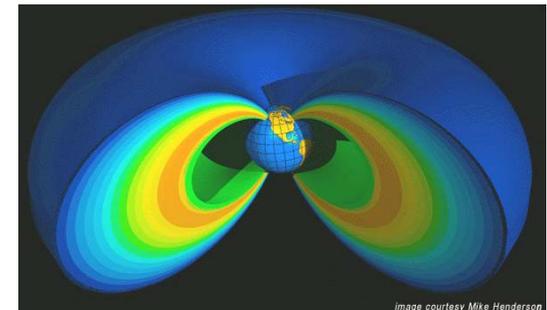
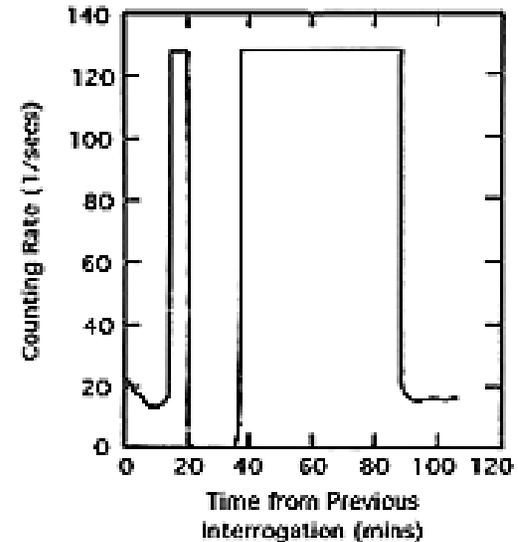
## Présence de plasma dans la magnétosphère

- Mise en évidence de la présence de particules de haute énergie à l'intérieur de la magnétosphère.

*Découvertes en 1958 par le compteur Geiger d'Explorer 1, le premier satellite américain*

- Mise en évidence de la présence d'ions d'origine ionosphérique dans la magnétosphère

*En 1972, à l'aide du spectromètre de masse à bord sur satellite 1971-089A, Shelley détecte des ions  $O^+$  dans la magnétosphère*



**La magnétosphère est :**

**- Dynamique**

- Aurores, orages magnétiques au niveau de la Terre
- Cette dynamique est liée à l'activité Solaire

**- Peuplée de plasma**

- Ceintures de radiation,  $H^+$ ,  $O^+$
- Source des particules: Vent Solaire, Ionosphère

✓ **Quels sont les mécanismes de couplage entre le vent solaire, la magnétosphère et l'ionosphère?**

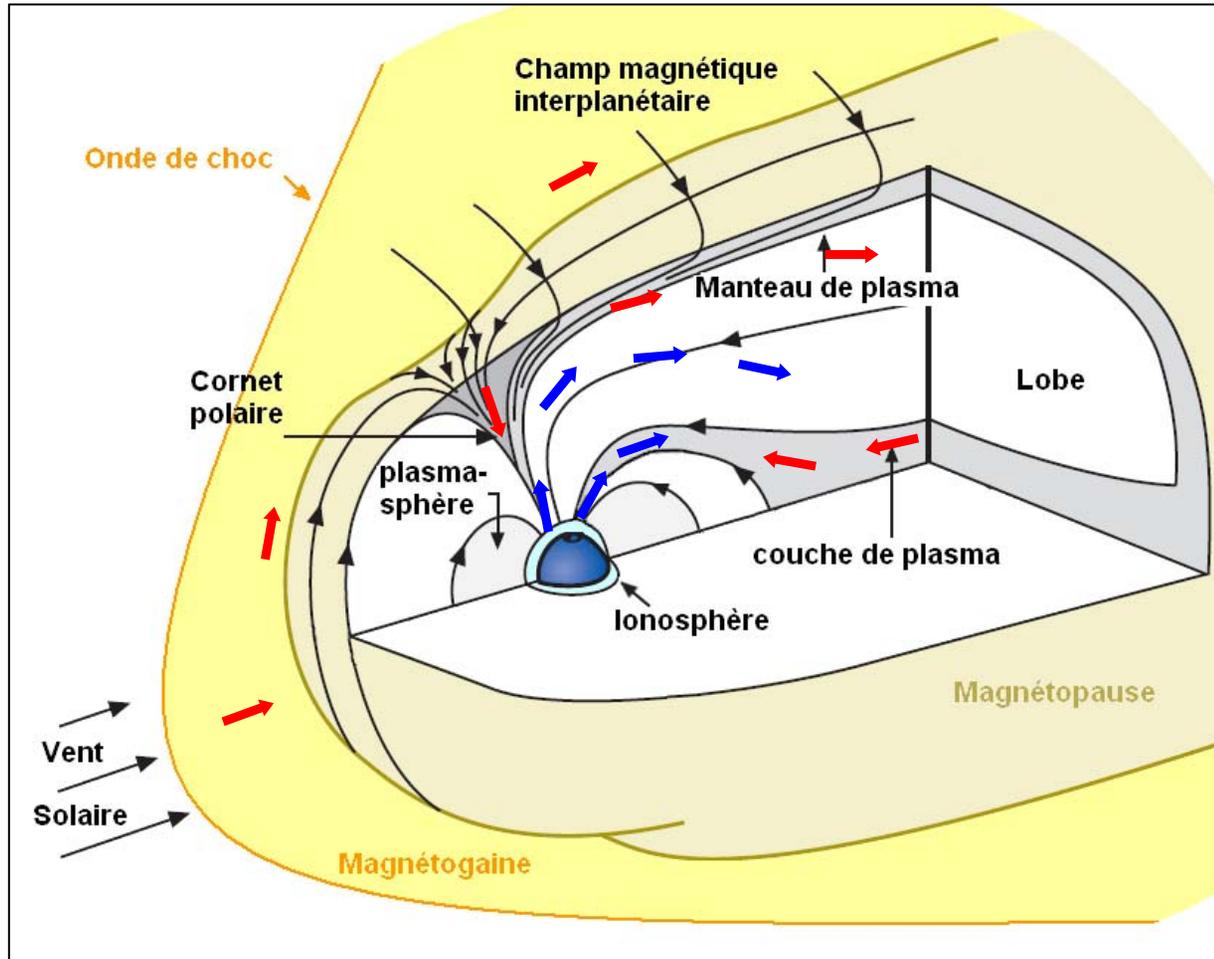
✓ **Comment s'effectuent les transferts d'énergie et de matière entre ces trois systèmes?**

✓ **Quel est l'influence de l'activité solaire?**

### Régions magnétosphériques et sources de plasma

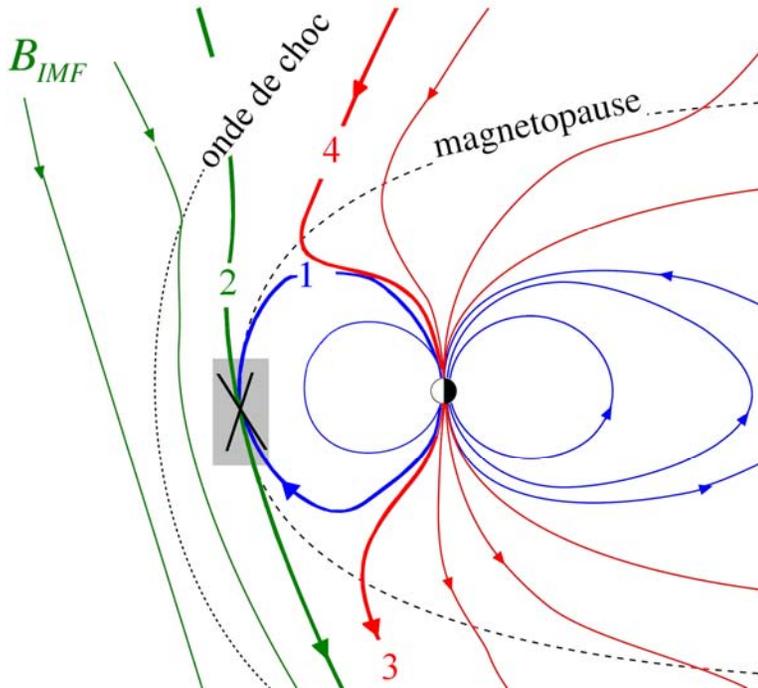
Vent  
solaire

Ionosphère



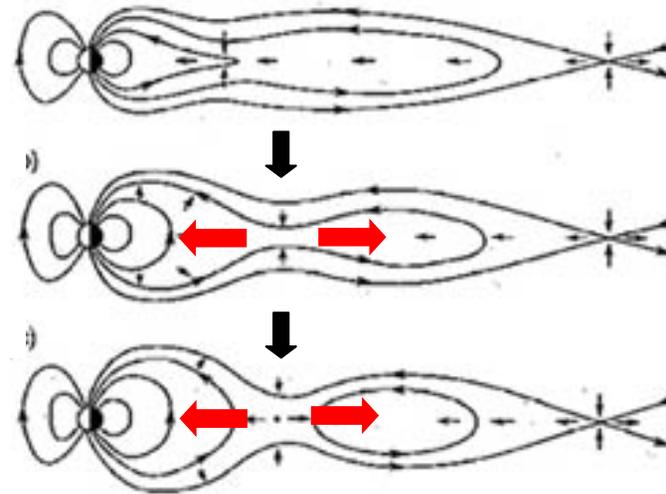
## Reconnection magnétique et activité géomagnétique

**Face avant:** apport de flux magnétique  
(Champ magnétique interplanétaire orienté vers le Sud)

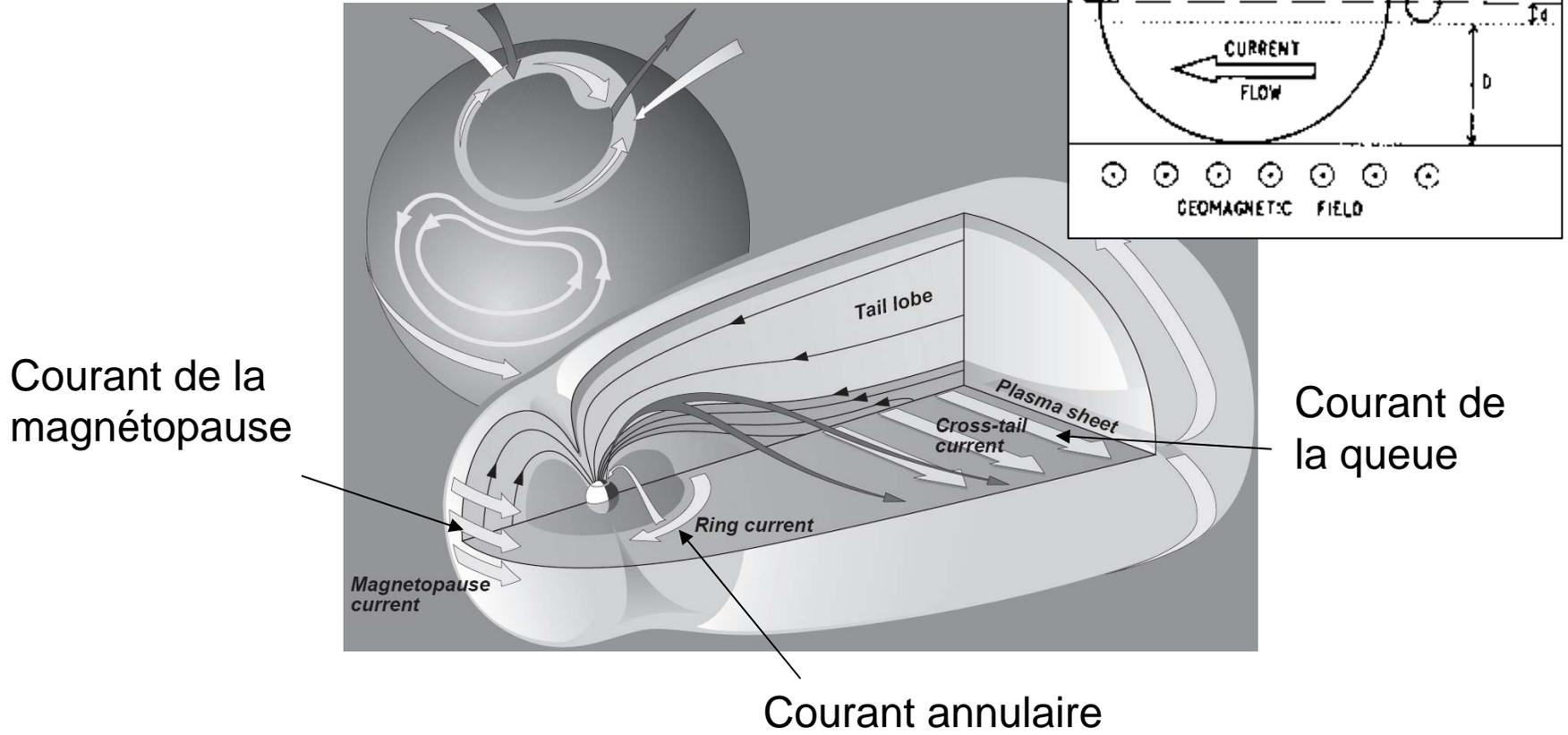


$$1 + 2 \Rightarrow 3 + 4$$

**Queue:** orage géomagnétique,  
relâchement d'énergie



### Principaux systemes de courant



### Principaux systemes de courant

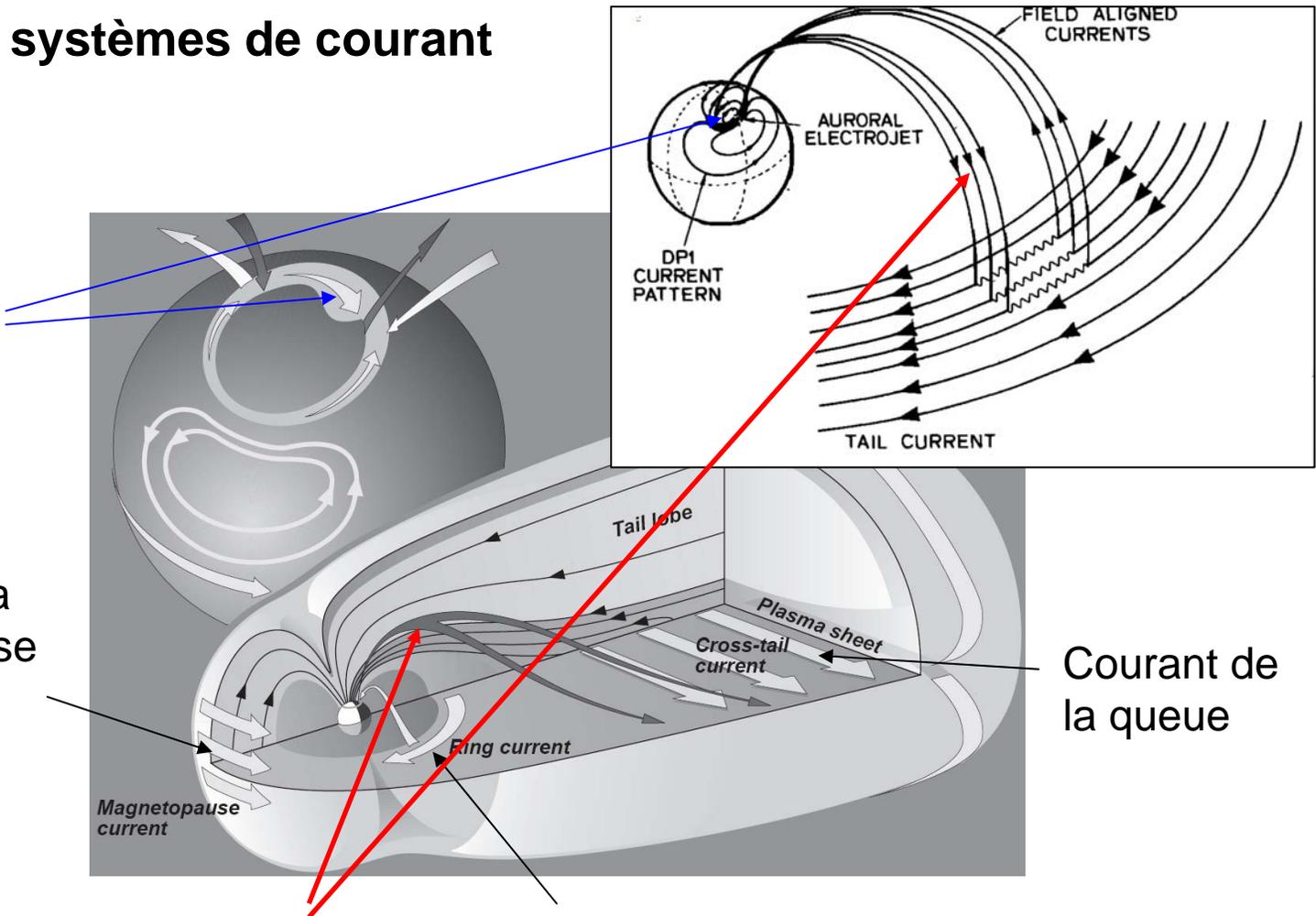
Electrojet auroral

Courant de la magnetopause

Courants alignes

Courant annulaire

Courant de la queue



**Couplent l'ionosphere et magnetosphere dans les regions a haute latitude**

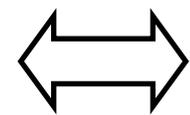
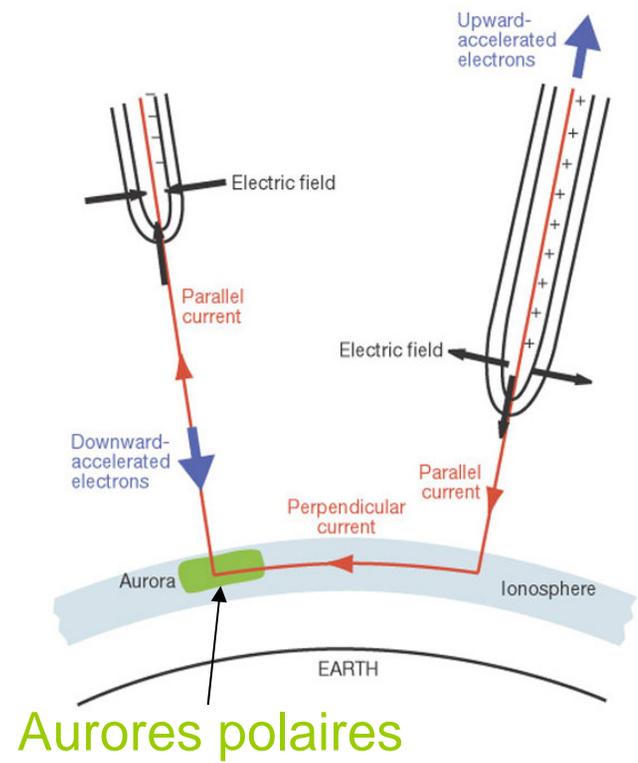
## Fermeture des courants

Générateur

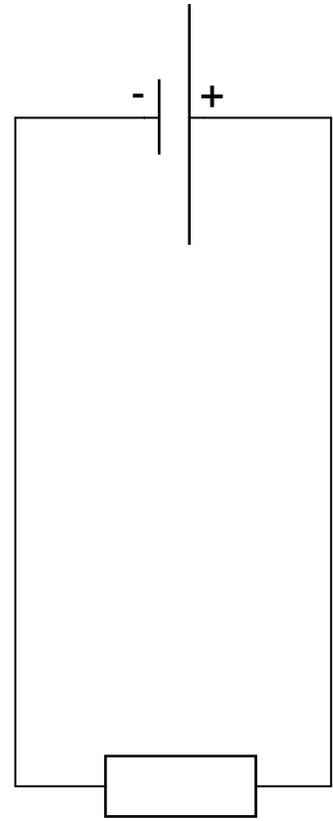
Magnétosphère

Courants alignés

Courants de fermeture



Ionosphère



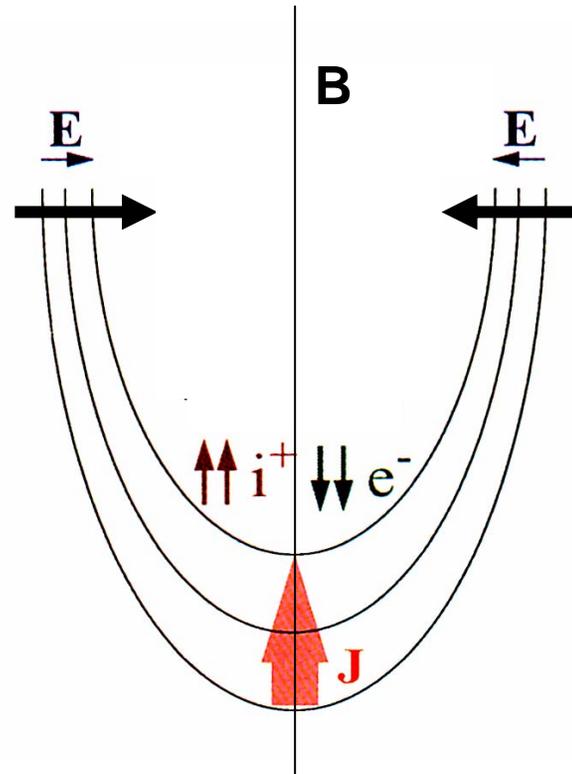
**Comment sont générés les courants alignés?**

**Quelle est l'influence de la réponse ionosphérique?**

### Courants alignés

Accélération par un champ électrostatique

Magnétosphère



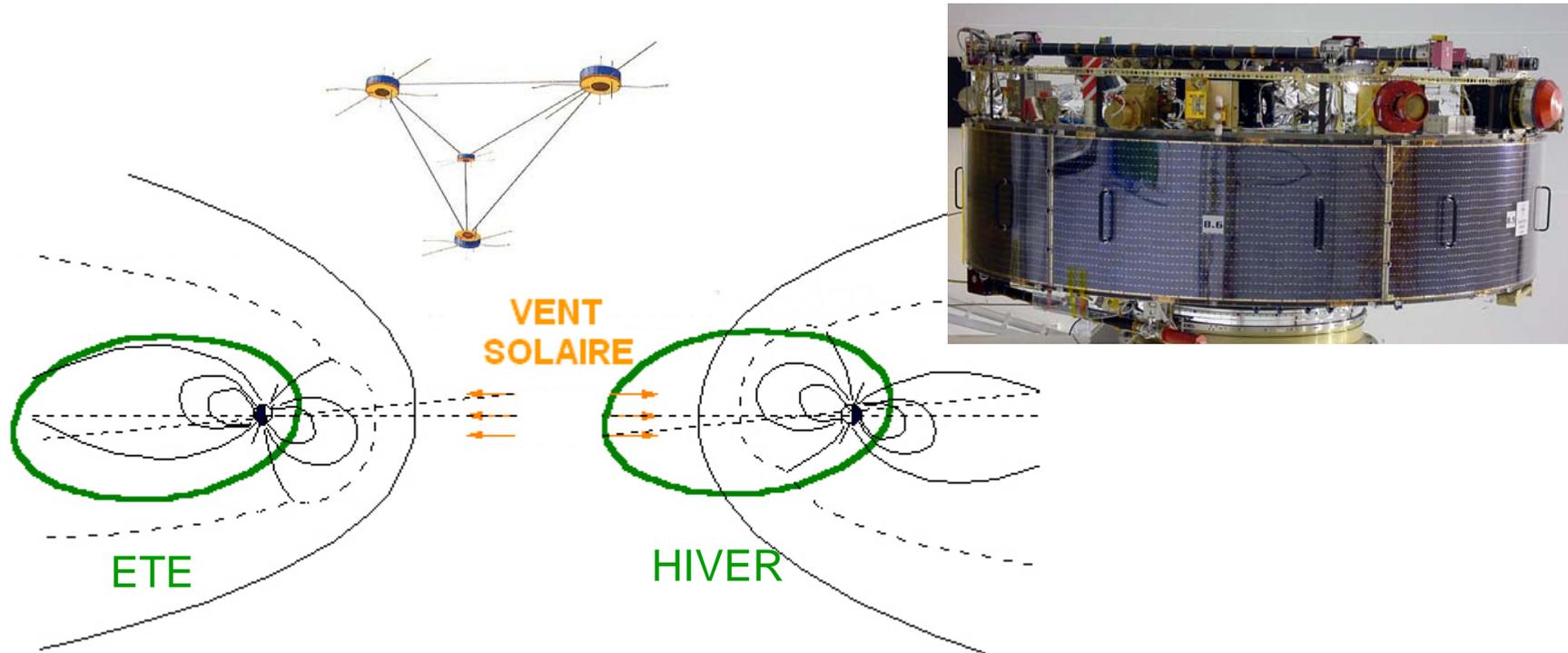
Ionosphère

**1- La mission CLUSTER**

**2- Zone aurorale**

**3- Calotte polaire**

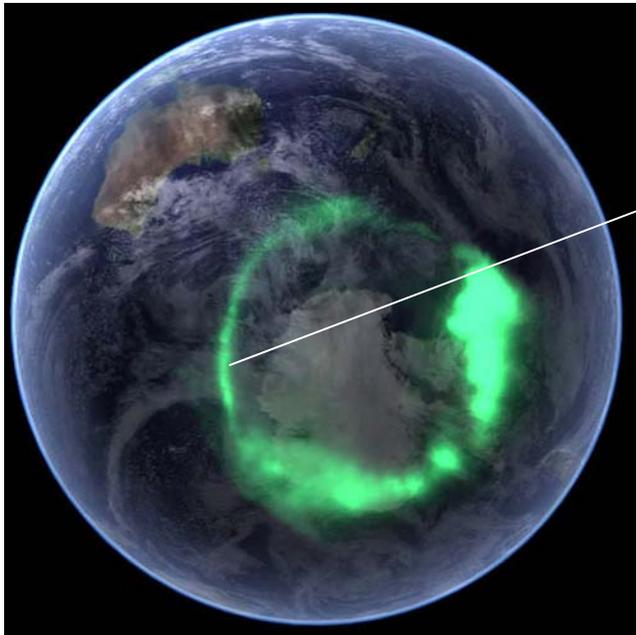
4 satellites identiques en formation tétraédrique



Orbite polaire elliptique 19 000 à 119 000 km, période 57h

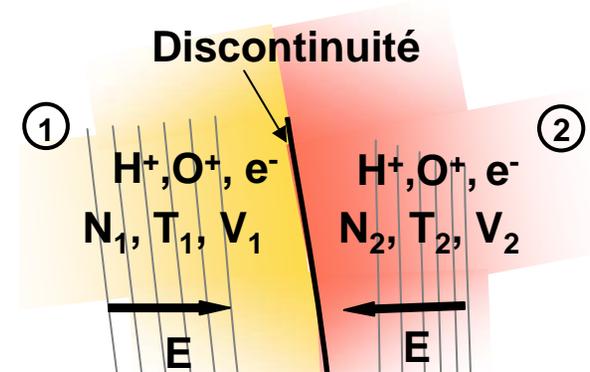
Haute altitude  $\Rightarrow$  étude des mécanismes de génération des arcs auroraux

## Génération d'arcs auroraux discrets par des discontinuités magnétosphériques



## Modélisation

- Les discontinuités tangentielles peuvent produire des champs électriques convergents dont l'échelles de taille correspond à celle des arcs auroraux discrets  
(*Roth et al. 1993*)



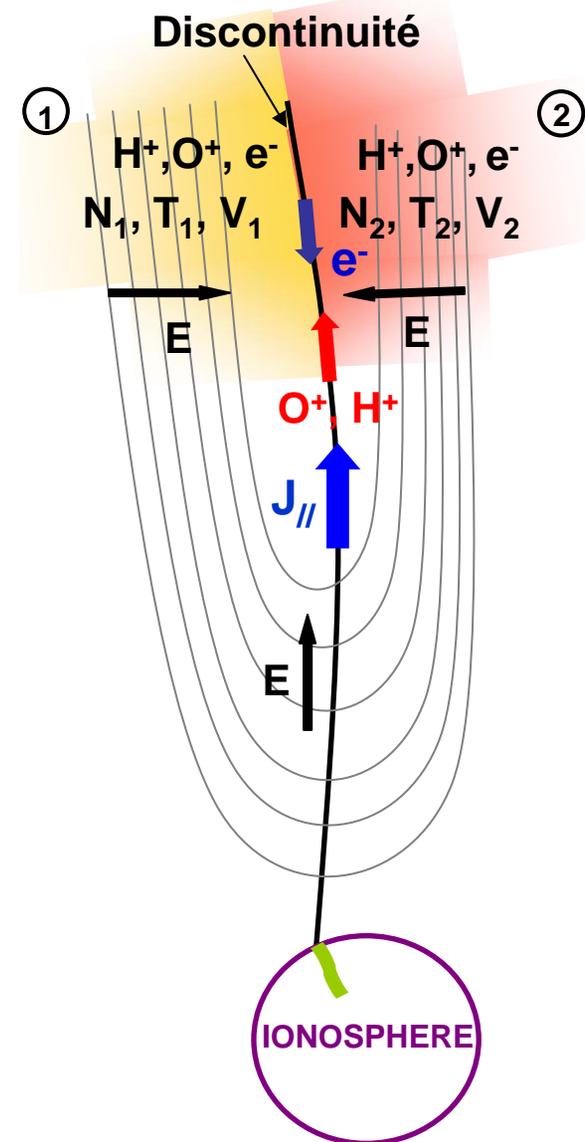
## Modélisation

- Les discontinuités tangentielles peuvent produire des champs électriques convergents dont l'échelles de taille correspond à celle des arcs auroraux discrets

*(Roth et al. 1993)*

- En couplant ces discontinuités avec l'ionosphère, on génère un système de courant

*(Echim et al. 2007, 2008)*



## Modélisation

### Modèle cinétique de discontinuité

Entrée:

$N_1, T_1, V_1, N_2, V_2, T_2$

### Relation courant-tension

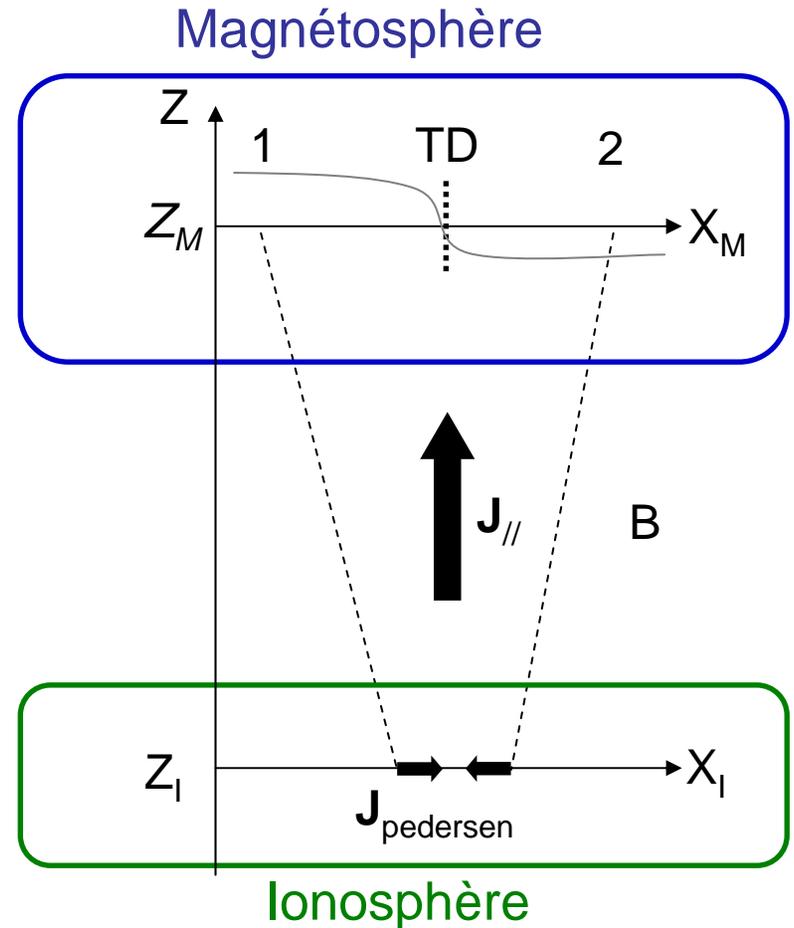
(Knight 1973; Lemaire & Scherer 1973)

Ions (Lemaire & Scherer 1971)

### Continuité des courants à l'ionosphère

Paramètres:

$N, T, \Sigma$



## Comparaison avec les données

### Conjonction CLUSTER – DMSP

*Echim, M. M.; Maggiolo, R.; Roth, M.;  
De Keyser, J.; GRL 2009*

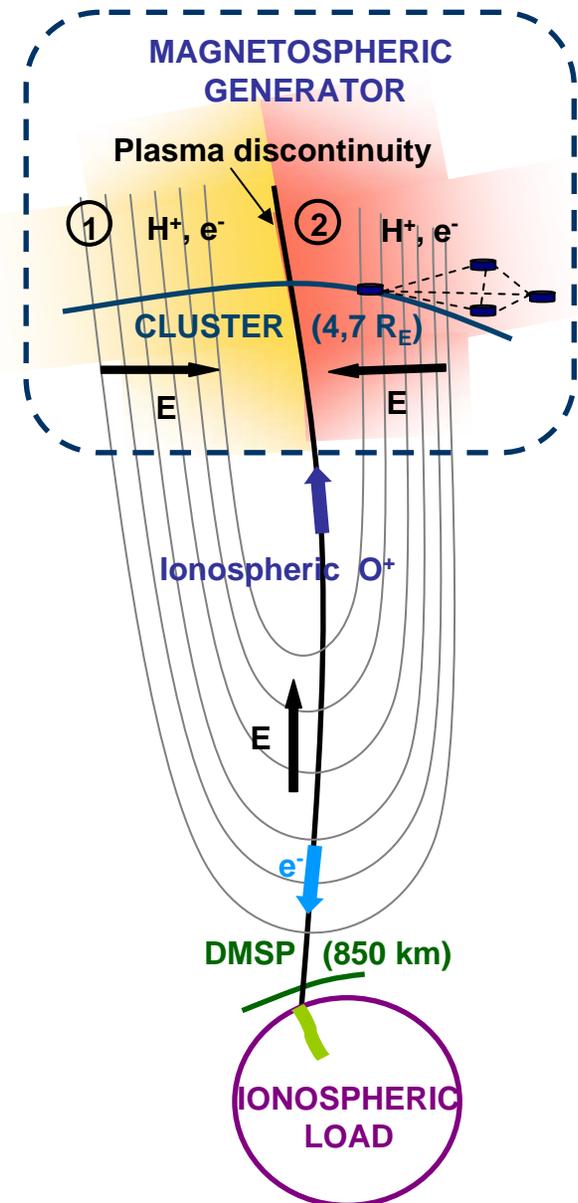
*(Données décrites dans Vaivads et al.  
2003)*

### Comparaison modèle-données :

- A l'altitude de CLUSTER
- A l'altitude de DMSP

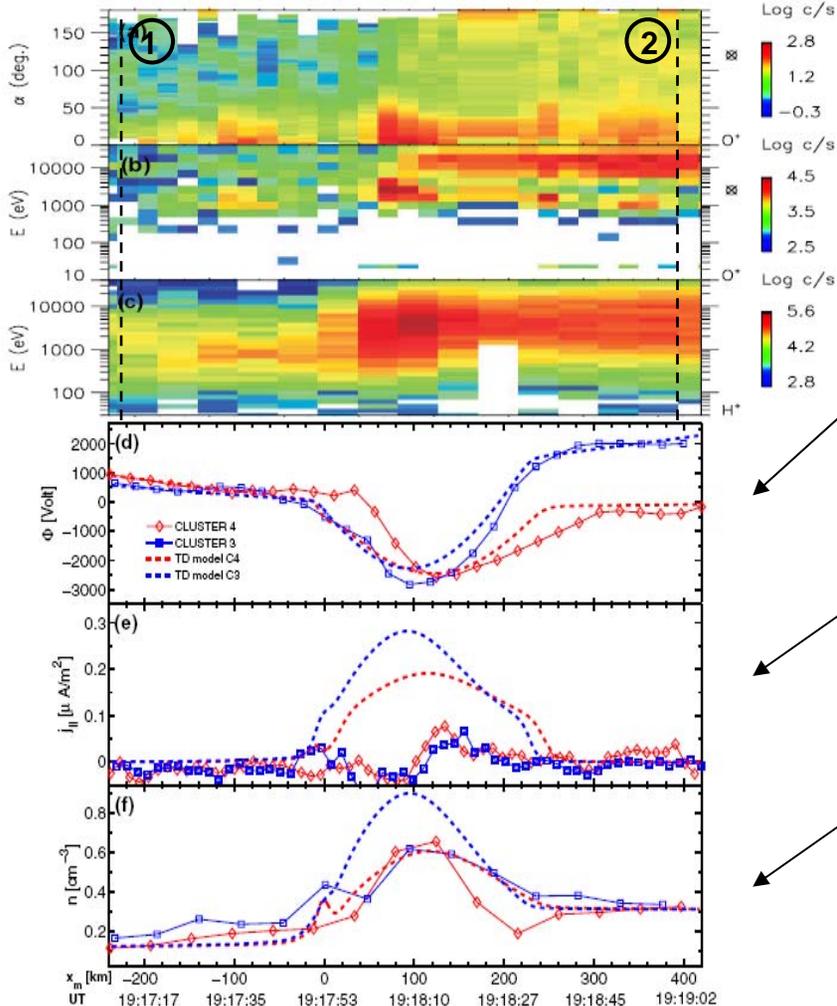
Entrée du modèle:

N,T,V mesurés de part et d'autre de la discontinuité par CLUSTER



## Comparaison avec les données de CLUSTER

CIS-CODIF TANGO (SC 4) 28/Apr/2001

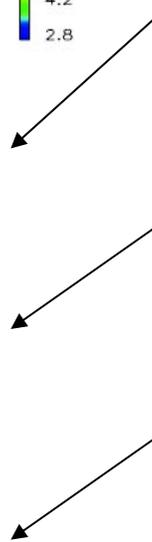


A l'altitude de CLUSTER, le modèle reproduit:

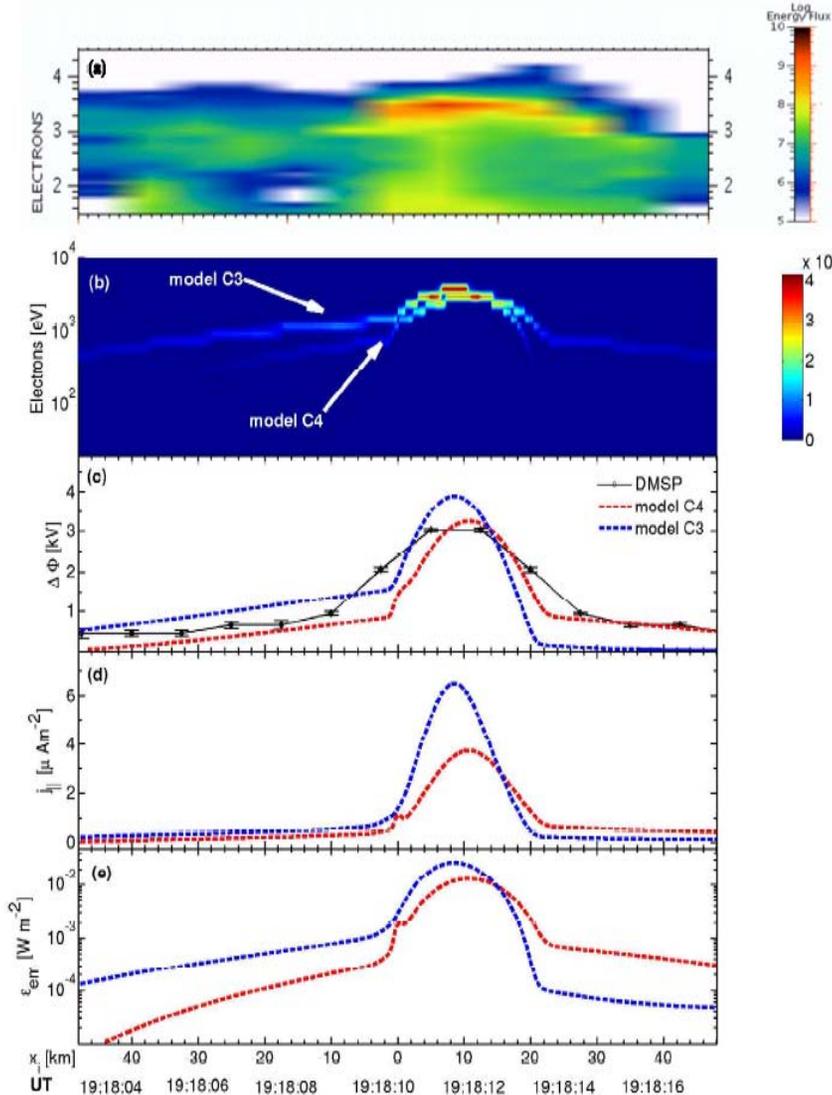
L'échelle spatiale de la structure  
La variation du potentiel électrique

La présence d'une couche de courant remontant

La variation de densité à travers la discontinuité



## Comparaison avec les données de DMSP



A l'altitude de DMSP le modèle reproduit:

La taille de la structure  
 Modèle ~15 km  
 DMSP ~15-25 km

La différence de potentiel  
 Modèle 1.5-2 kV  
 DMSP 2.5 kV

Le courant  
 Modèle 4-6 mA/m<sup>2</sup>  
 DMSP ~6mA/m

Le flux d'énergie des électrons  
 Modèle 10mW/m<sup>2</sup>  
 DMSP 20 mW/m<sup>2</sup>

## Conclusion

Le modèle et les données sont en bon accord:

**Les discontinuités de plasma au sein de la magnétosphère peuvent générer des arcs auroraux discrets**

**La force électromotrice est créée par des effets thermoélectriques et de cisaillement de vitesse au niveau de la discontinuité**

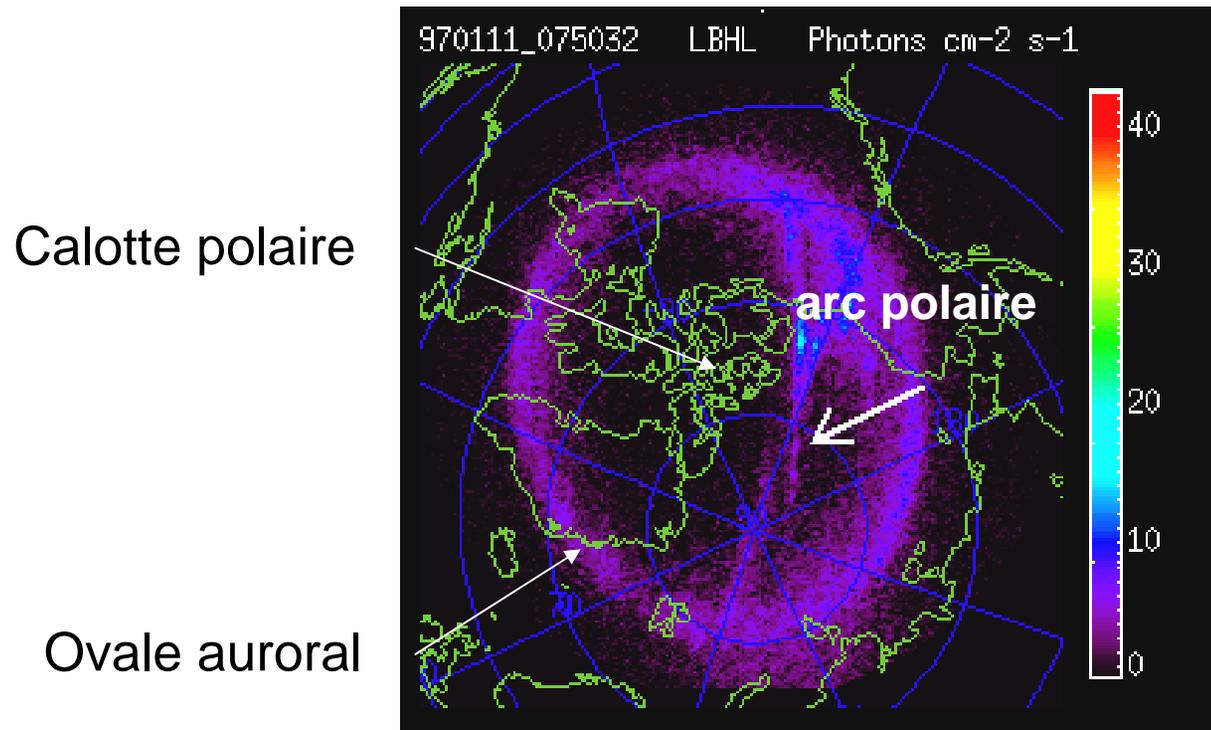
- Autre étude de cas:

*J. De Keyser, R. Maggiolo, and M. Echim. Submitted JGR*

- Relation entre les paramètres (N,T,V) des discontinuités et les caractéristiques des arcs auroraux: comparaison statistique données-modèle

*R. Maggiolo, and M. Echim., J. De Keyser, en préparation*

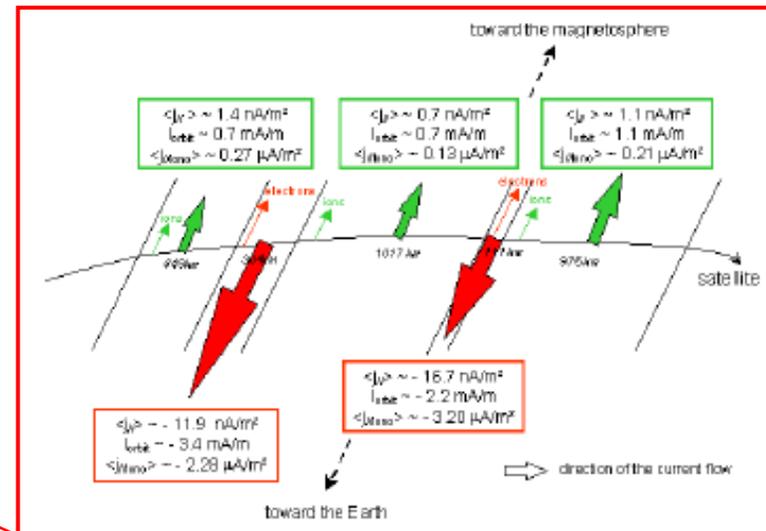
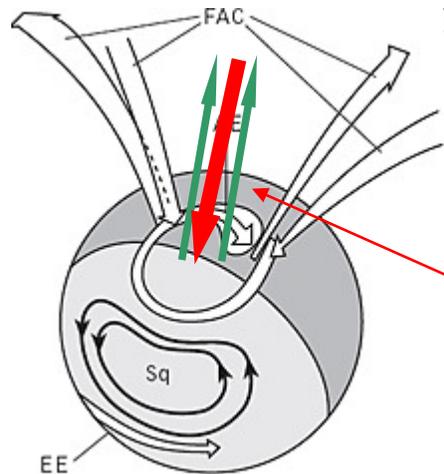
Etude des structures aurorales au-dessus de la calotte polaire



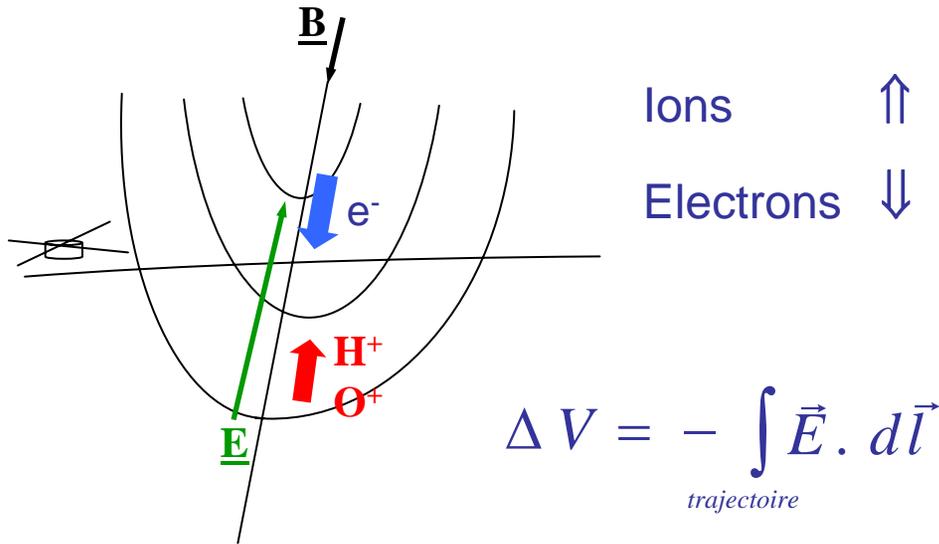
## Présence de couches de courant au-dessus de la calotte polaire

Pendant des périodes prolongées de très faible activité géomagnétique, les satellites CLUSTER détectent des couches de courant remontant et descendants au-dessus de la calotte polaire

*Maggiolo et al. Ann. Geo. 2006*

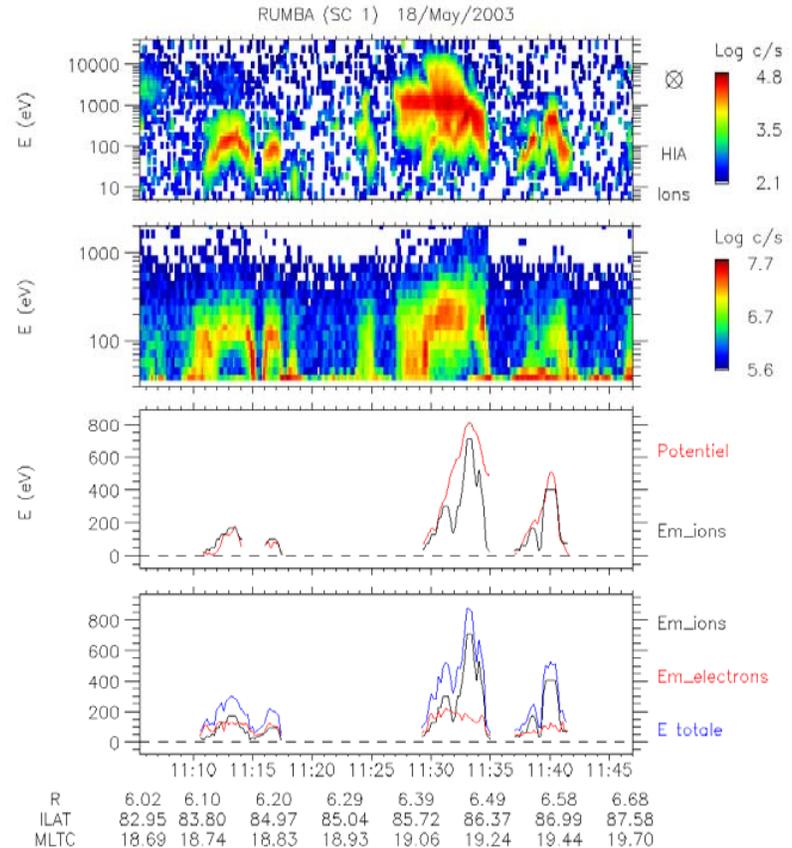


## Mécanisme d'accélération



**L'accélération est causée par un champ électrique parallèle au champ magnétique**

**Ce champ électrique s'étend à des altitudes supérieures à celle du satellite (~5 R<sub>T</sub>)**



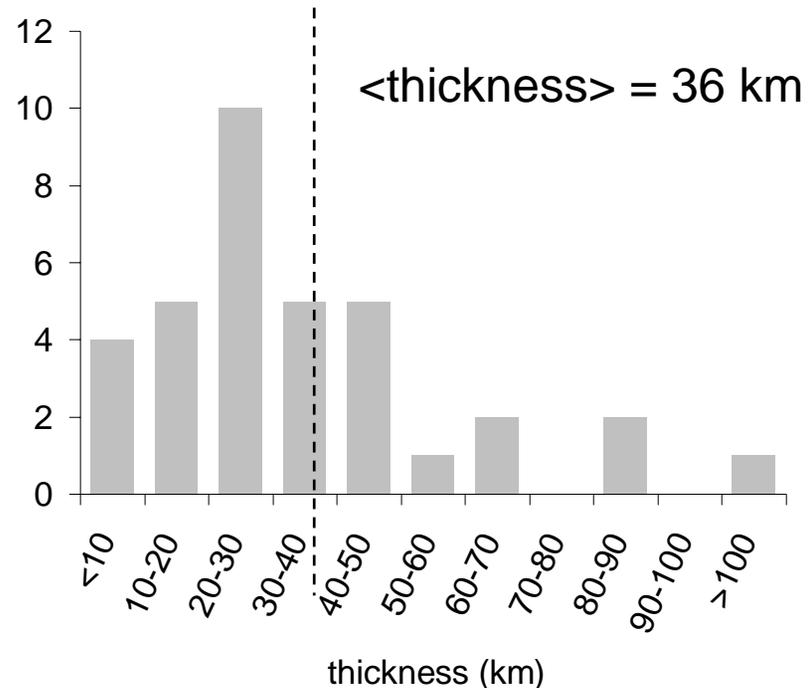
## Propriétés statistiques

*Maggiolo et al. Submitted to Ann. Geo.*

**Caractéristiques similaires à celles des arcs polaires obtenues par des mesures optiques au sol**

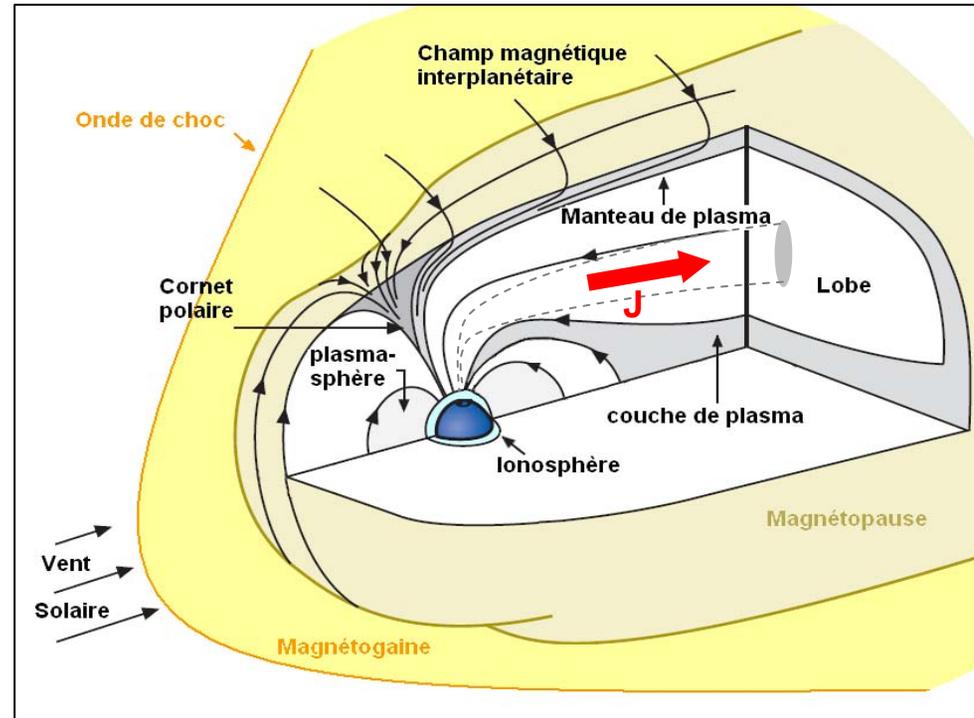
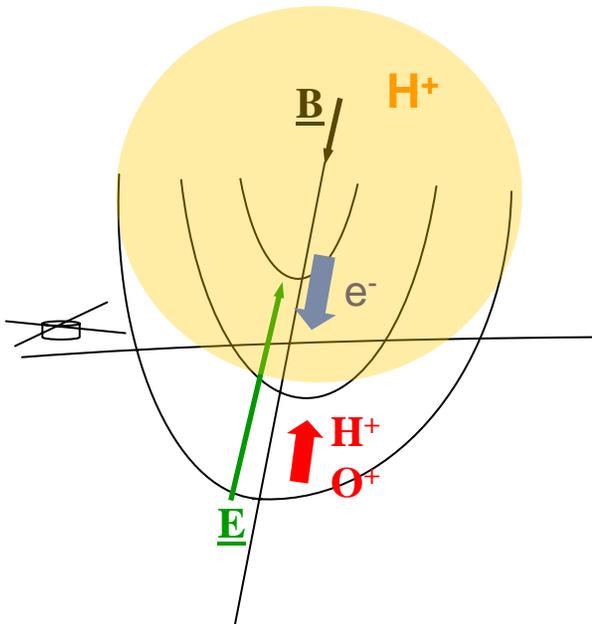
(faible activité géomagnétique, relation avec le champ magnétique interplanétaire (IMF), orientation, durée de vie, ...)

**Apparaissent après environ 2 heures d'IMF Nord, disparaissent ~20 minutes après un basculement vers le Sud**



Quel mécanisme génère ces structures?

- Même processus d'accélération qu'en zone aurorale (champ électrostatique)
- Liés à la configuration globale de la magnétosphère en périodes de très faible activité géomagnétique
- Dans 40% des cas, ils sont associés à la présence de nuages de plasma dans les lobes magnétosphériques



## 2 exemples de couplage entre l'ionosphère, la magnétosphère et le vent solaire:

- ✓ En zone aurorale, entre des discontinuités de plasma magnétosphérique et l'ionosphère.

*Etude d'une conjonction entre un satellite à basse altitude (DMSP) et un satellite à haute altitude (CLUSTER)*

- ✓ Au-dessus de la calotte polaire, avec l'apparition de couches de courant lorsque l'activité géomagnétique est faible

*Comparaison entre les résultats obtenus avec CLUSTER et des mesure optiques au sol*

**Complémentarité entre les mesures à basse altitude et les mesures à haute altitude**

**1- Magnétomètres**

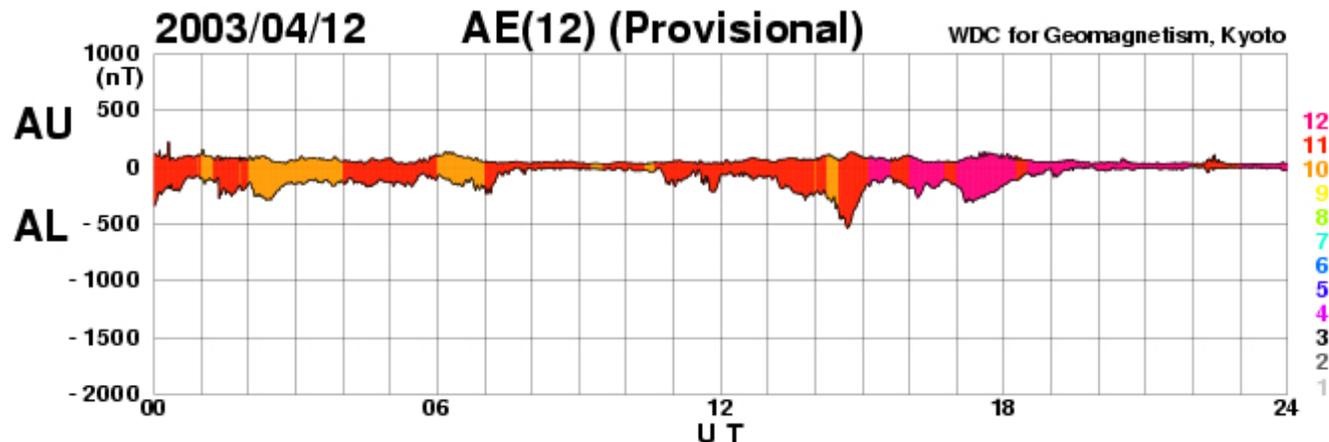
**2- Radars**

**3- Mesures optiques**

- Grande échelle (plusieurs observatoires)

## Mesure de l'activité géomagnétique, production d'indices

- Haute latitude: AE, AU, AL (électrojet auroral)
- Moyenne latitude: indice tri-horaire Kp (courant annulaire+électrojet auroral)
- Latitude équatoriale: Dst (courant annulaire)



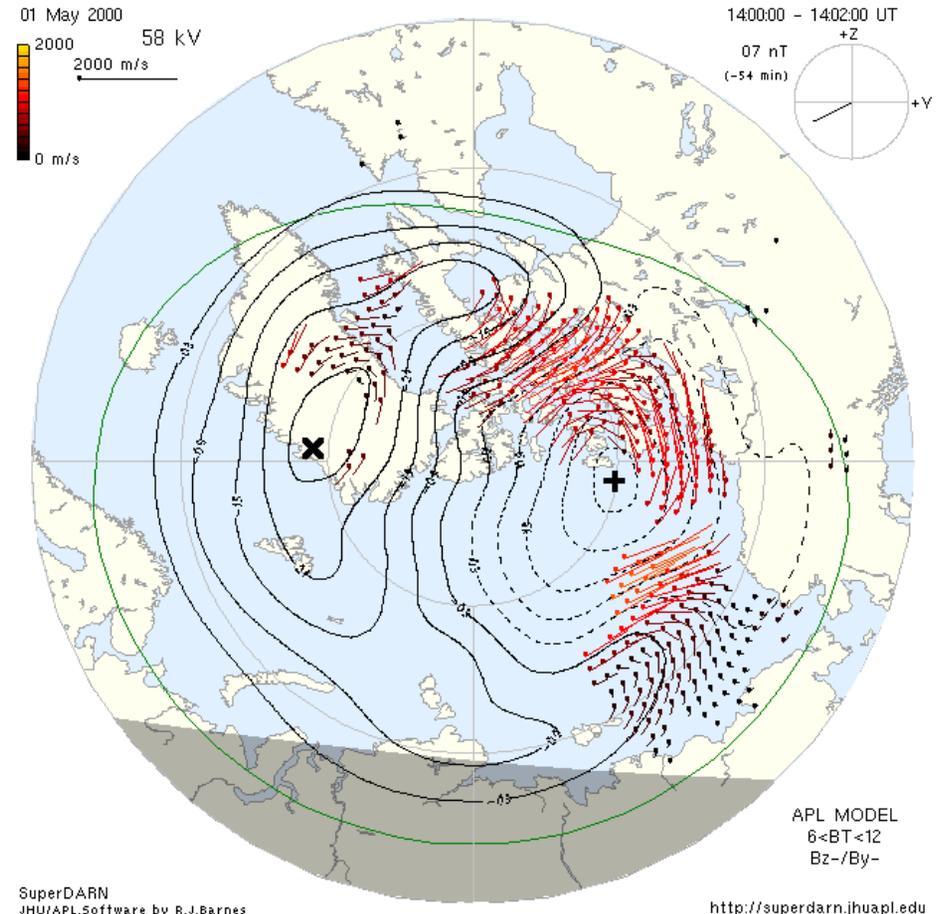
*Indice AU et AL le 12/04/2003*

- Petite échelle (un seul observatoire)

Mesure des courants de fermeture et des perturbations à petites échelles

- SuperDARN, EISCAT
  - Champ électrique, cartes de convection
  - Structure ionosphérique locale: discontinuités, température...

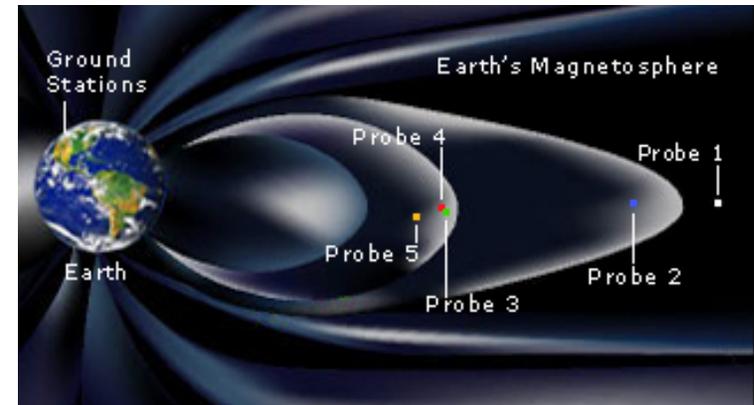
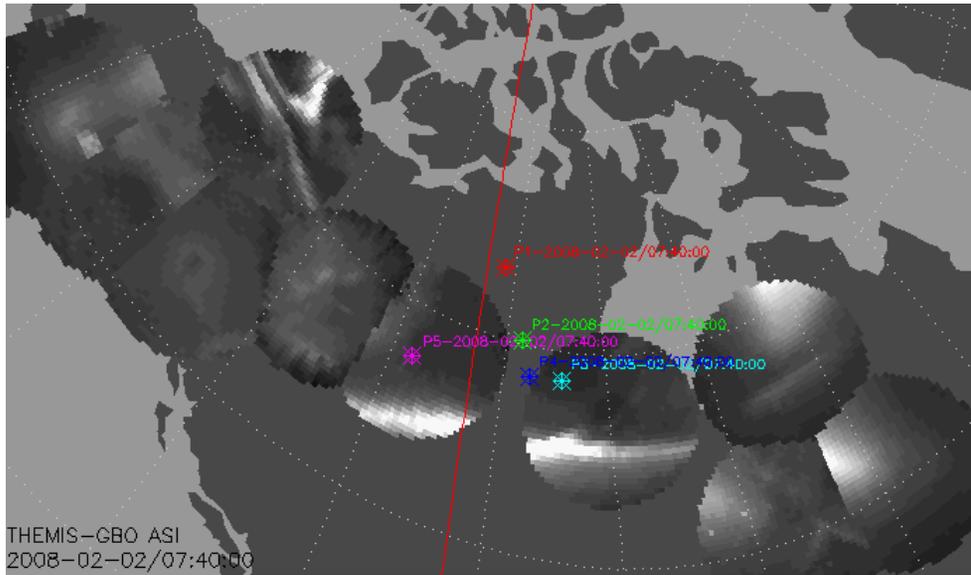
*Carte de convection extrapolée à partir des données SuperDARN*



## Emissions optiques aurorales

- Etude des structures à grande échelle (caméras plein ciel)
- Etude de cas (conjonctions) : mesures à différentes longueurs d'ondes, polarimétrie

*Etude des sous-orages magnétosphérique avec la mission THEMIS*



2 types d'utilisation des données sol:

## ➤ Grande échelle

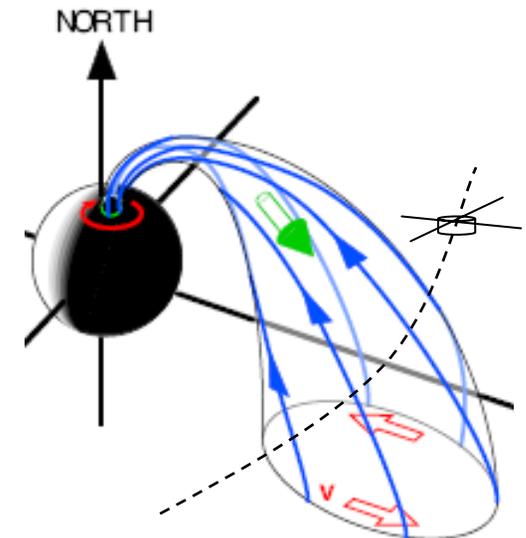
Indices géomagnétiques, cartes convections, structures optiques à grande échelle

**Meilleure couverture spatiale et temporelle que les satellites**

## ➤ Petite échelle

Conjonctions avec des satellites

**Informations sur la partie à basse altitude (charge) des systèmes de courant**



**La magnétosphère terrestre est un environnement dynamique.**

**Elle possède deux interfaces par lesquelles s'effectuent des transferts d'énergie et de matière.**

- Une interface externe avec le vent solaire
- Une interface interne avec l'ionosphère

**L'étude du couplage entre ces trois systèmes est un des thèmes majeurs de la recherche magnétosphérique**

**Les données sol ont un rôle fondamental à jouer en complément des données satellitaires.** Leurs atouts sont:

- Leur bonne couverture spatiale et temporelle
- La mesure de paramètres non accessibles aux satellites