



# Champ magnétique terrestre : les sources externes

*Christine Amory-Mazaudier*

*LPP, CNRS/Ecole Polytechnique/Sorbonne Université/Université Paris-Sud/Observatoire de Paris*

[christine.amory@lpp.polytechnique.fr](mailto:christine.amory@lpp.polytechnique.fr)

Ecole de Météorologie de l'Espace, 14-25 octobre 2024 - Conakry

# Magnétisme –sources externes

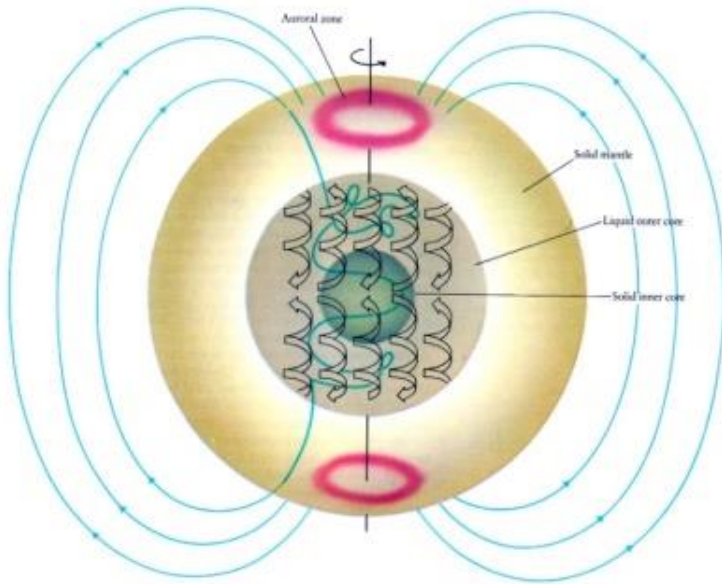
La dynamo terrestre

Les Courants électriques dans l'ionosphère  
et la magnétosphère

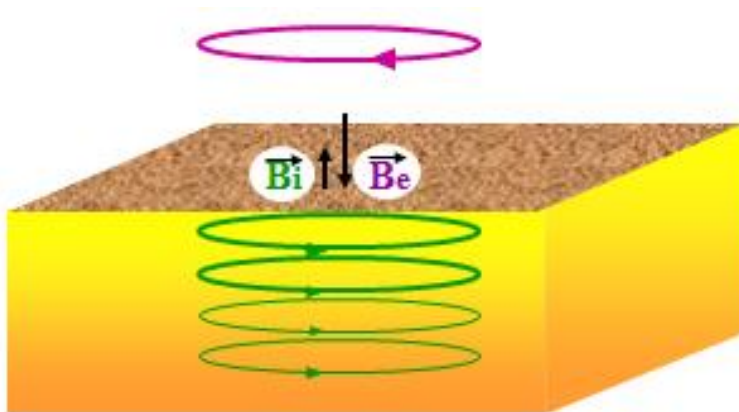
Les Courants électriques équivalents

Les Indices magnétiques

# La Dynamo terrestre



Model of the terrestrial magnetic field IGRF  
[http://www.iugg.org/IAGA/iaga\\_pages/pubs\\_prods/igrf.htm](http://www.iugg.org/IAGA/iaga_pages/pubs_prods/igrf.htm)



$$B = B_p + B_a + B_e + B_i$$

$B_p$  = champ principal (**variation séculaire**)  
(30000-60000nT)

$B_a$  = magnétisation des roches dans la  
Lithosphere (**constant**) ( $\sim 10$ -1000 nT)

(**Variations transitoires**)

$B_e$  = champ du aux sources externes dans  
l'ionosphere et la magnetosphere (10nT to  
 $\sim 2000$ nT)

**Dynamo Vent solaire /Magnetosphere**

**Dynamo Ionospheric ionosphérique**



$B_i$  = champ du aux courants induits par les  
courants électriques externes  $B_e$  , (Kamide and  
Brekke, 1975) /(% of  $B_e$ )

**Une variation magnétique intègre les effets  
de tous les systèmes de courants**

Le Soleil influence tous les paramètres géophysiques dans l'environnement terrestre suivant des processus physiques variés.

Pour utiliser correctement les données magnétiques, il faut trouver les processus physiques qui étaient actifs dans le système Terre Soleil lorsque les données ont été enregistrées

# EQUATIONS DE MAXWELL

mouvement

**V**

**B**

Champ Magnétique

**VxB**

Champ électrique dynamo

FORCE DE LORENTZ  
 $\mathbf{j} \times \mathbf{B}$

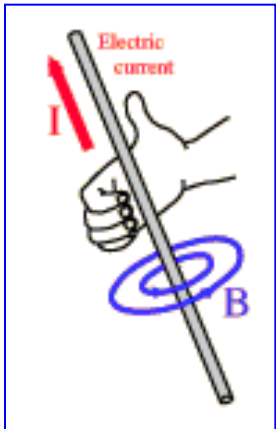
LOI DE FARADAY  
 $\nabla \times \mathbf{E} = -\delta \mathbf{B} / \delta t$

**E**

Champ électrique  
de polarisation

LOI D'AMPERE  
 $\nabla \times \mathbf{B} = \mu \mathbf{j}$

LOI D'OHM  
 $\mathbf{j} = \sigma (\mathbf{E} + \mathbf{V} \times \mathbf{B})$

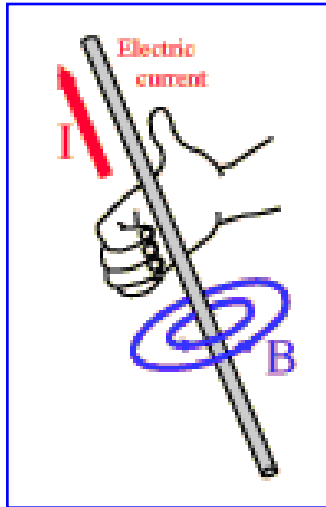


**B**

**j**

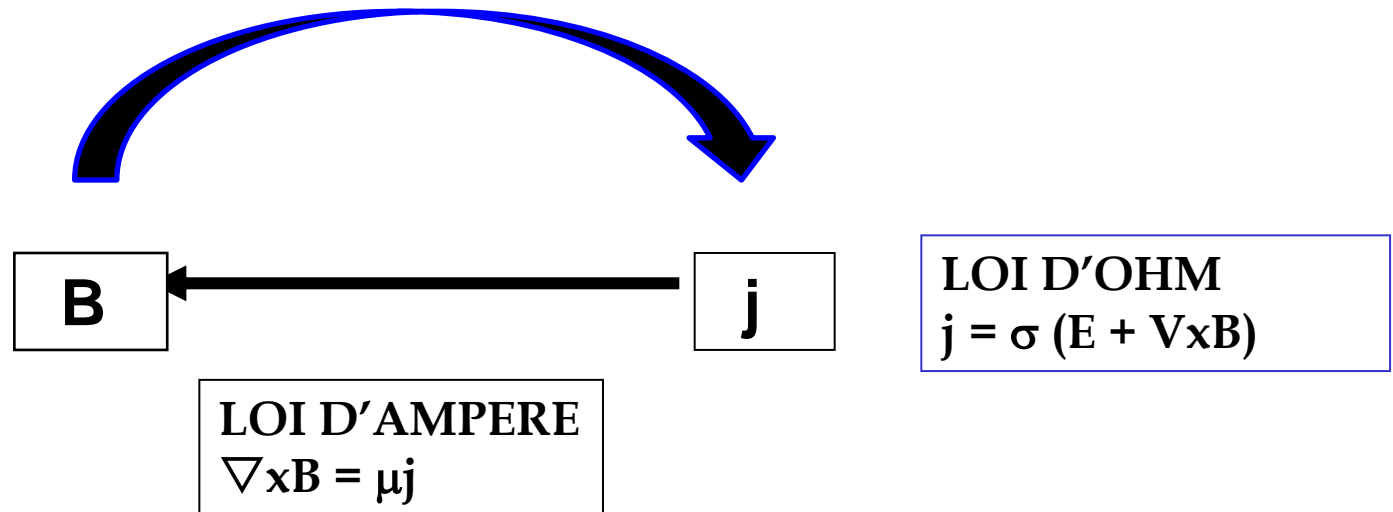
Rappel

Principe de l'ACTION DYNAMO

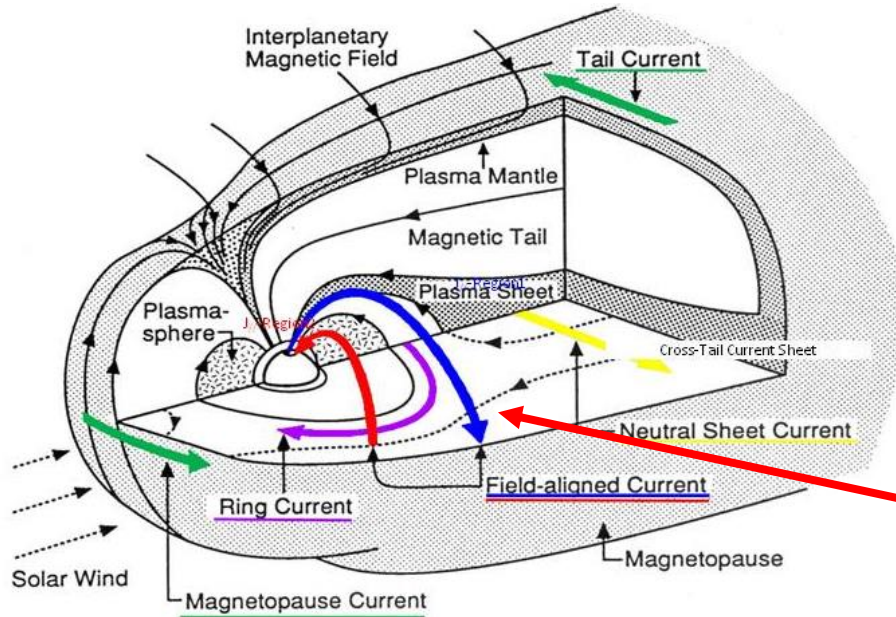


il y a très peu de mesures de courant électrique par contre il y a de nombreuses mesures de champ magnétique.

On va donc utiliser les mesures du champ magnétique pour évaluer le courant électrique

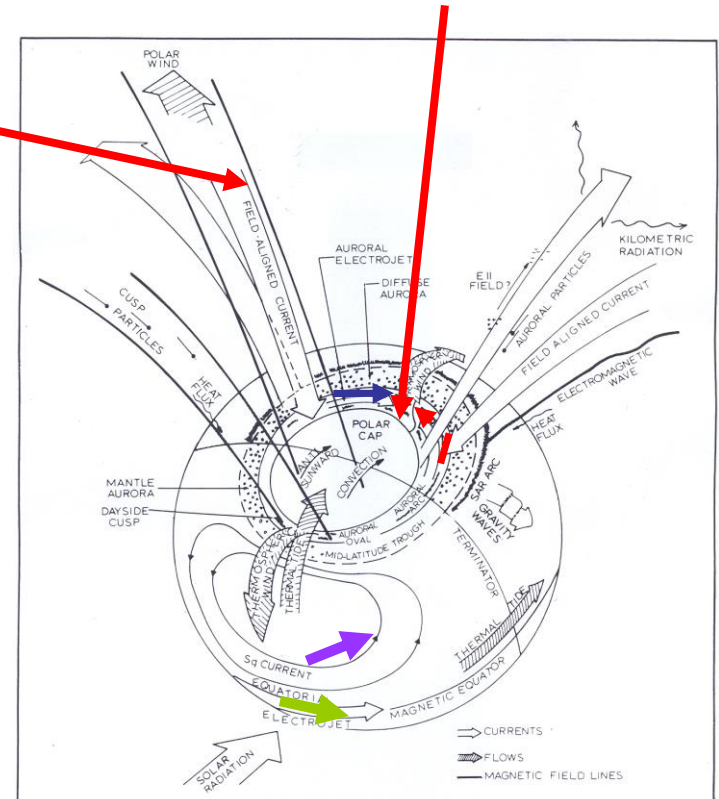
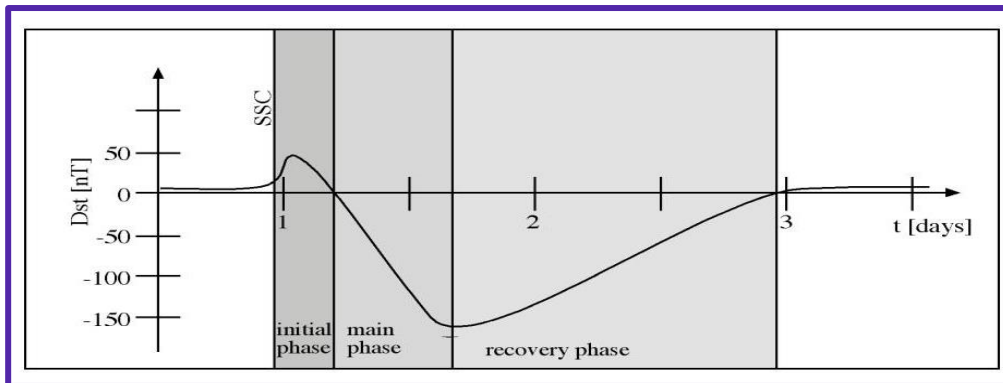


# Dynamo Vent solaire / magnétosphère



- Zone aurorale
- \* Courants alignés
  - \* Précipitation
  - \* Champ électrique de convection
  - \* Courants électriques ionosphériques

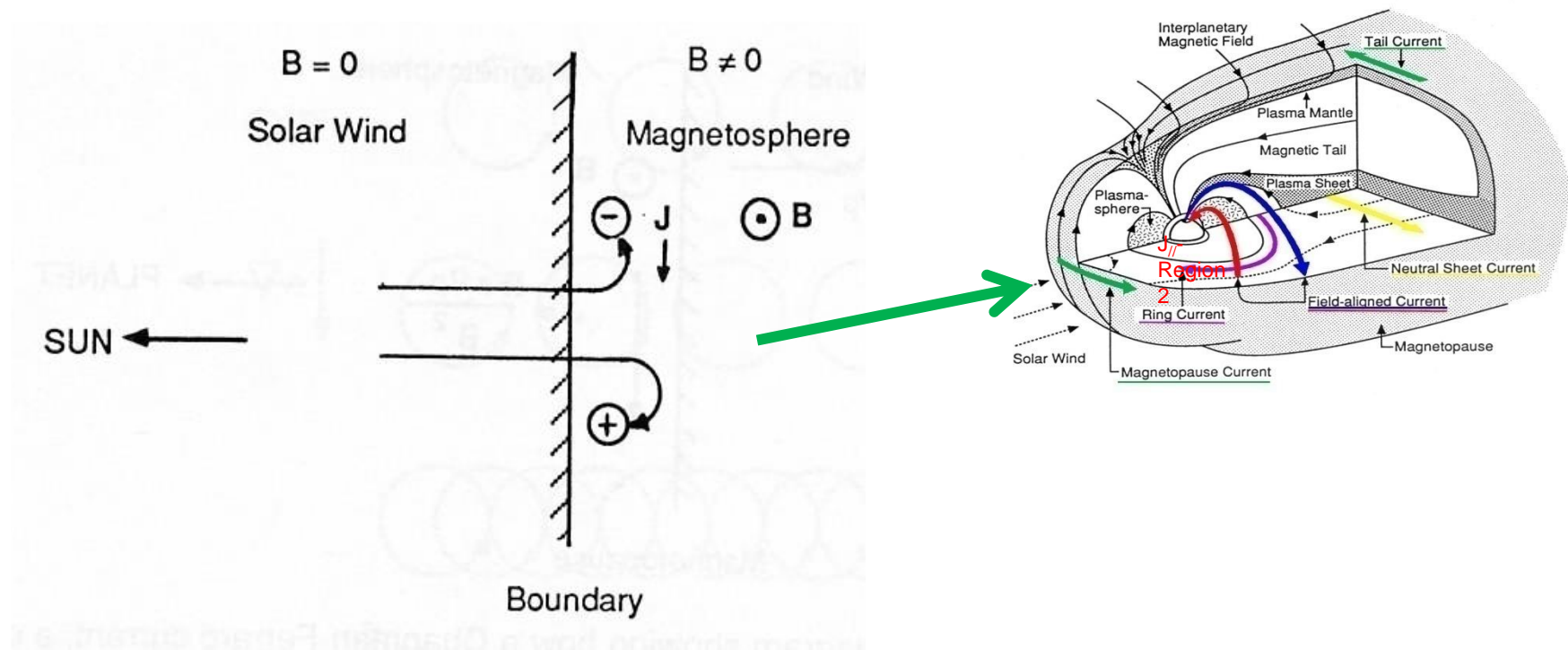
## MAGNETOSPHERE



Indices magnétiques Dst, SYM-H, ASYM-H



# Courant Chapman Ferraro / 1935



The Chapman Ferraro currents flow in the Magnetopause layer, the boundary between the solar wind and the geomagnetic field. At the nose of the magnetopause the geomagnetic field pressure is balanced by the dynamic pressure of the solar wind

$$K_1 N_i m_i V_i^2 = \frac{B_{mp}^2}{2\mu_0}$$

dynamic pressure of the solar wind  $\Leftrightarrow$  geomagnetic field pressure

$K_1$  is the correction factor for flow deflection in magnetosheath and compression of  $B$ . The order of magnitude of the Chapman Ferraro current is  $\sim 30$  nT (Gosling et al. 1990).



# Courant annulaire

Différence de voltage aube crépuscule imposé à la magnétosphère



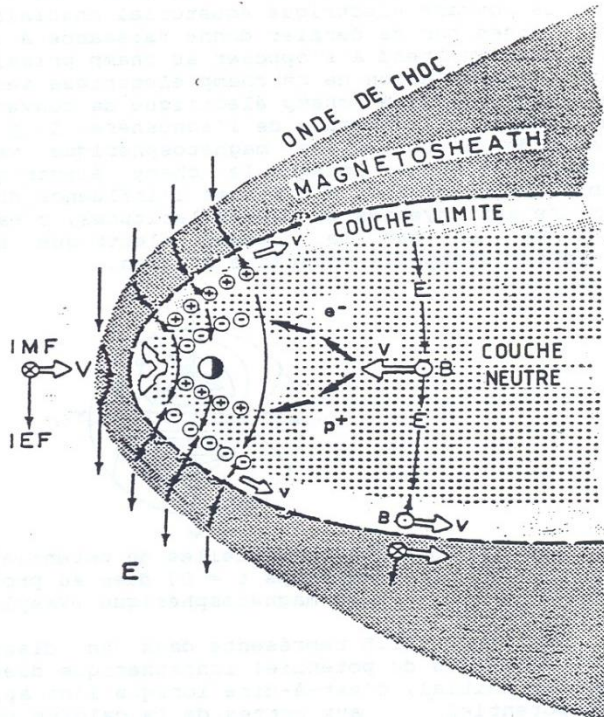
Les particules suivent des trajectoires depuis la queue de la magnétosphère vers la terre



Dans la région où la courbure et les gradients du champ magnétiques sont larges (vers la terre) les électrons sont déviés côté matin et les protons côté soir.



Formation du courant annulaire



The expression of the drift due to gradient and curvature and the resulting current is:

$$\vec{V}_{gc} = \frac{1}{2} m V_{\perp}^2 \frac{B \times \nabla B}{q B^3} + m V_{LL}^2 \frac{B \times (b \cdot \nabla) \hat{b}}{q B^2}$$

$$J_{gc} = N q V_{gc}^{ions}$$

This current is mainly carried by ions.

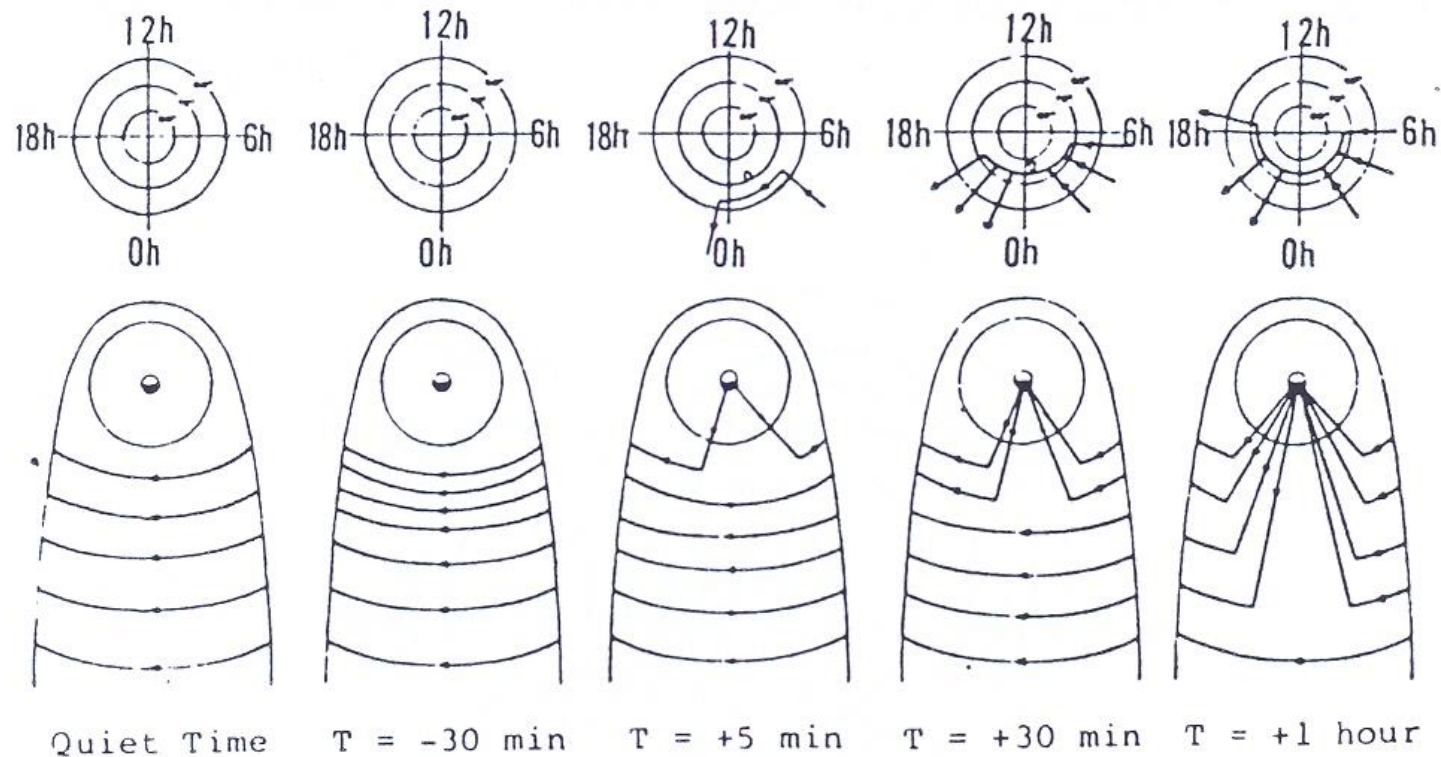
There is also an additional contribution of the magnetic moments of all particles:

$$\vec{M} = -N_i \frac{1}{2} \frac{m_i V_{i\perp}^2}{B} \hat{b} - N_e \frac{1}{2} \frac{m_e V_{e\perp}^2}{B} \hat{b}$$

$$\vec{J}_m = \nabla \times \vec{M}$$

The ring current keeps the pressure gradient and the Lorentz force in balance.

# Courants dans la queue de la magnétosphère / 1972



Proposé par Akasofu en 1972, les courants de la queue circulant à la frontière de la plasma sheet sont interrompus et déviés vers la terre du côté soir via des courants de Birkeland (courants alignés) et convertis en un électrojet Ouest

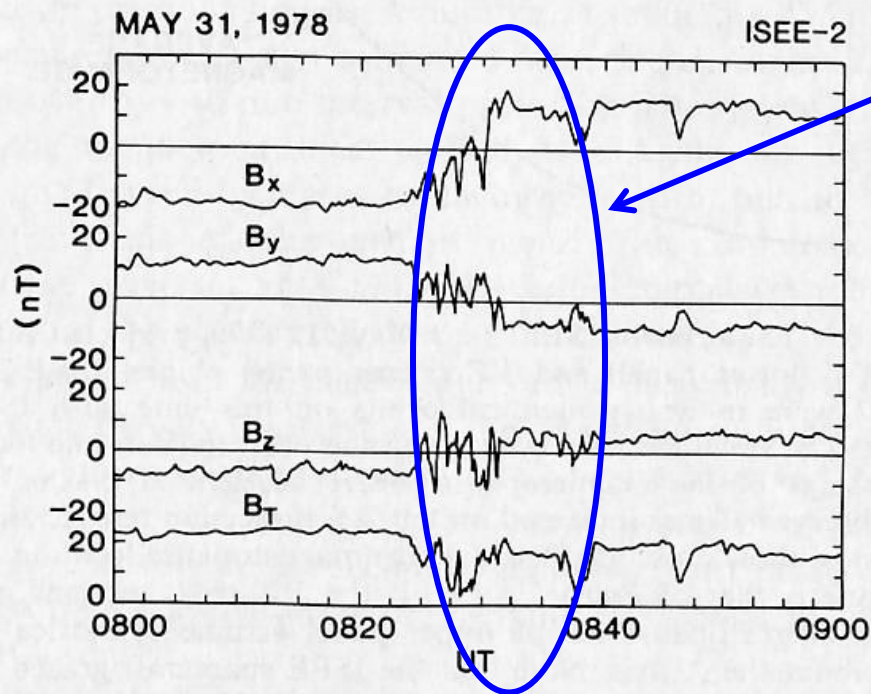
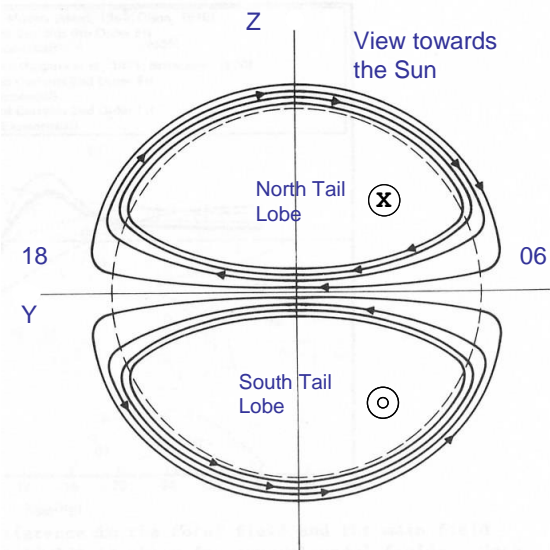
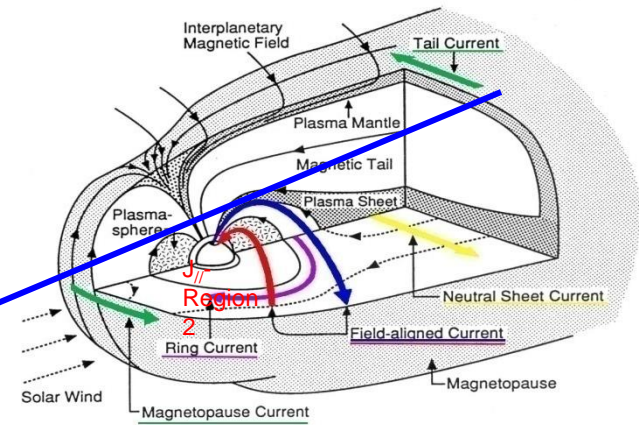


Fig. 2. Magnetic field data from ISEE 2 surrounding the ~0830 UT magnetopause crossing on May 31, 1978. From top to bottom the quantities plotted are the x, y, and z components (GSE coordinates) of the field and the total field magnitude.

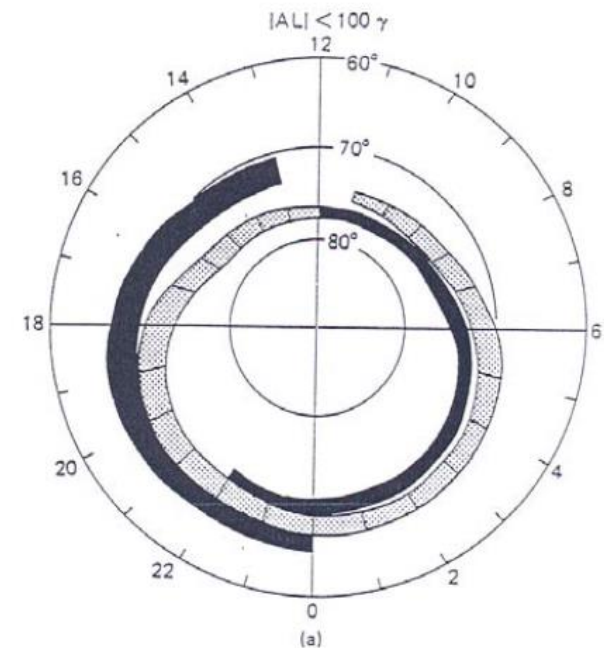
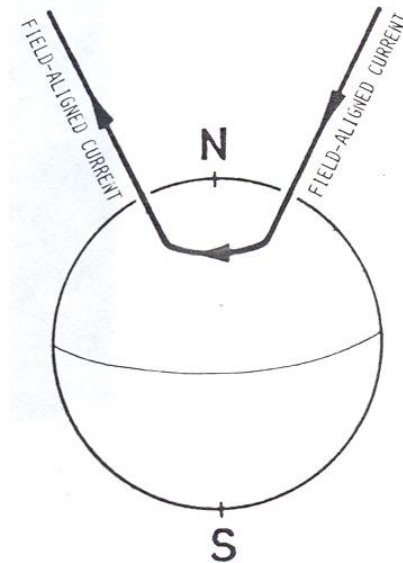
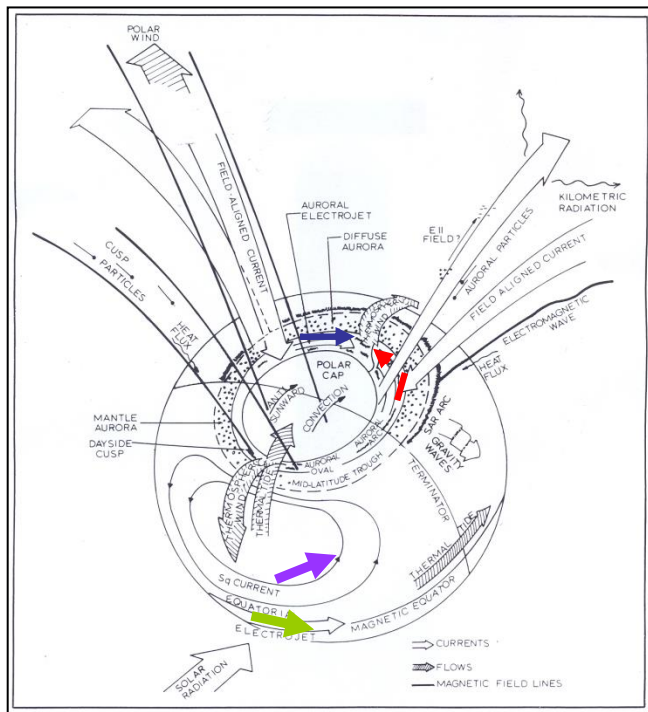


Traversée de la magnétopause

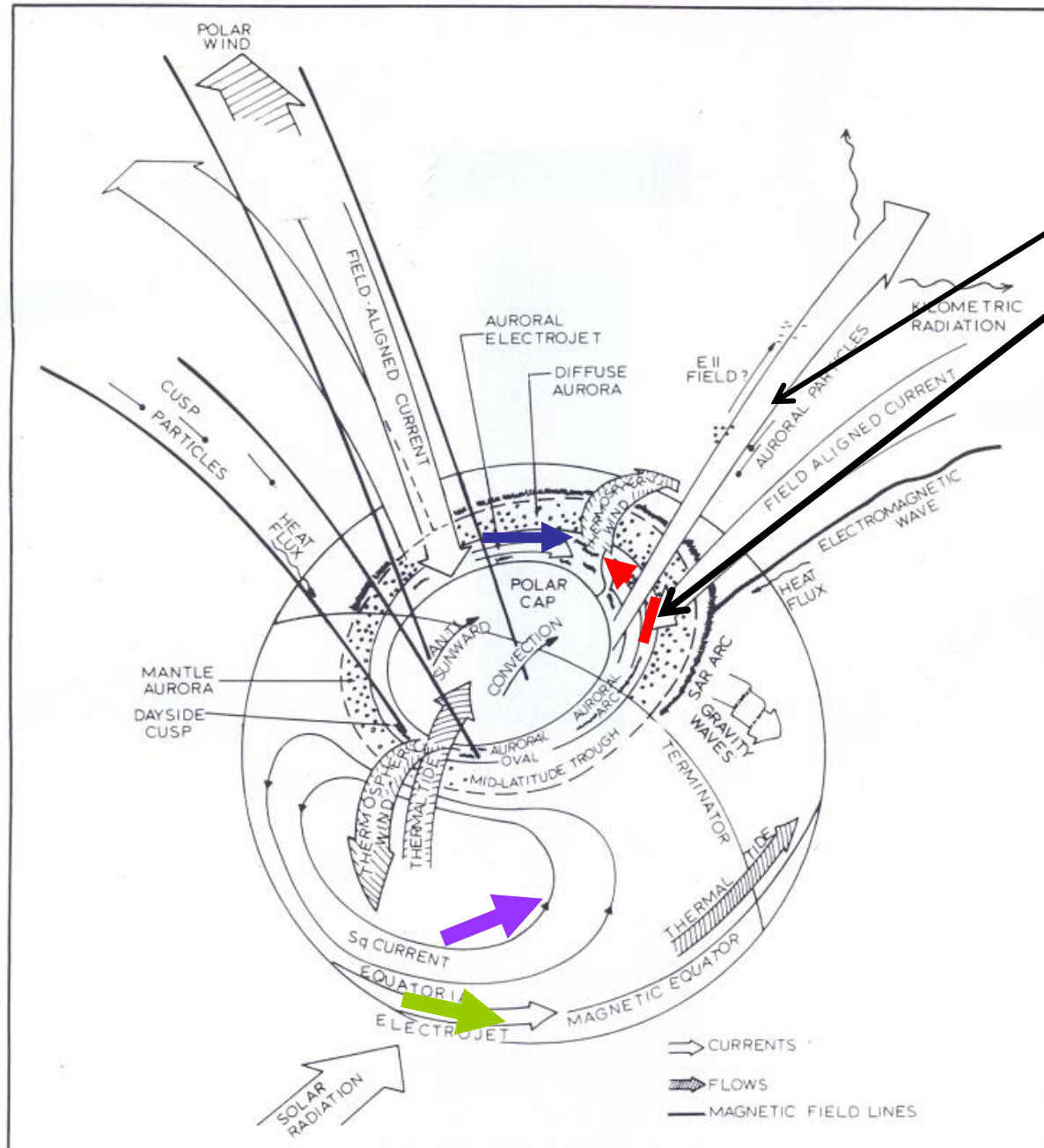


# Courants électriques alignés le long des lignes du champ magnétique qui connectent la magnétosphère et l'ionosphère

Birkeland, 1908



Ijmra and Potemra 1978  
(données satellites)



Courants alignés

Electrojets auroraux

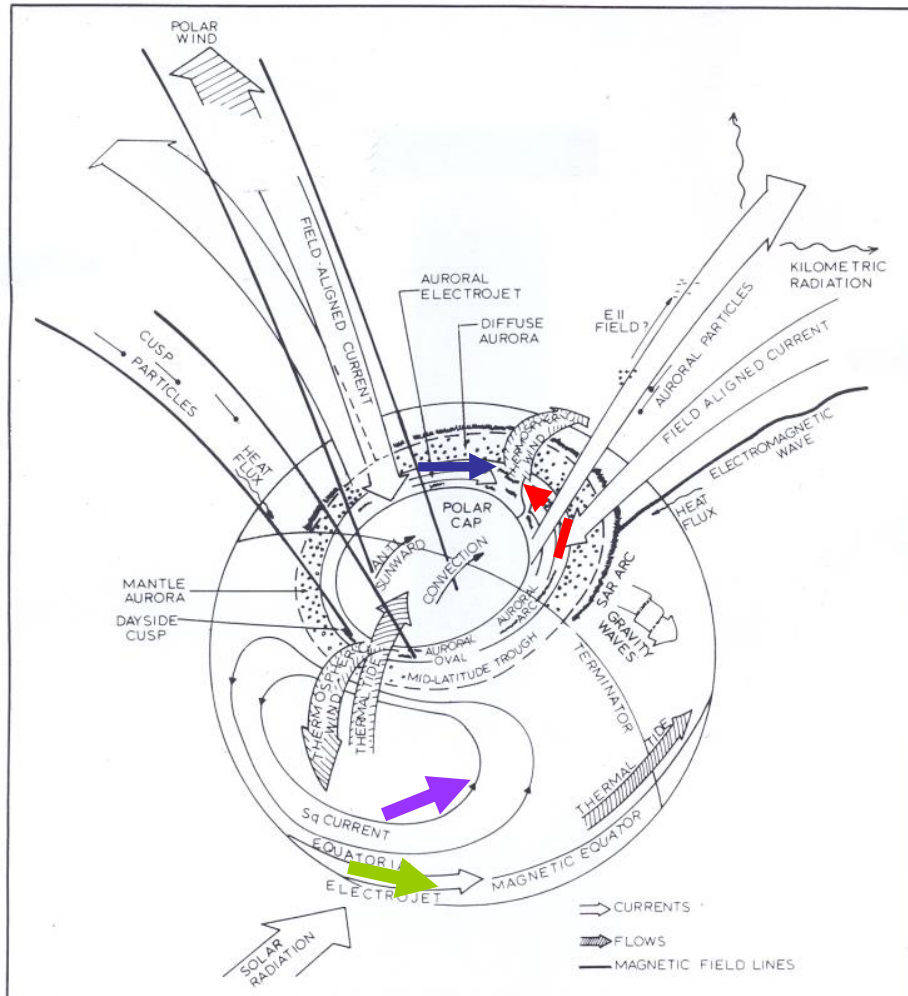
Précipitation de particules

Champ électrique

Zone Aurorale

Moyennes latitudes

Latitudes équatoriales



Les courants électriques sont tridimensionnels

Leur structure est complexe

on utilise

- 1) Les courants équivalents
- 2) les indices magnétiques

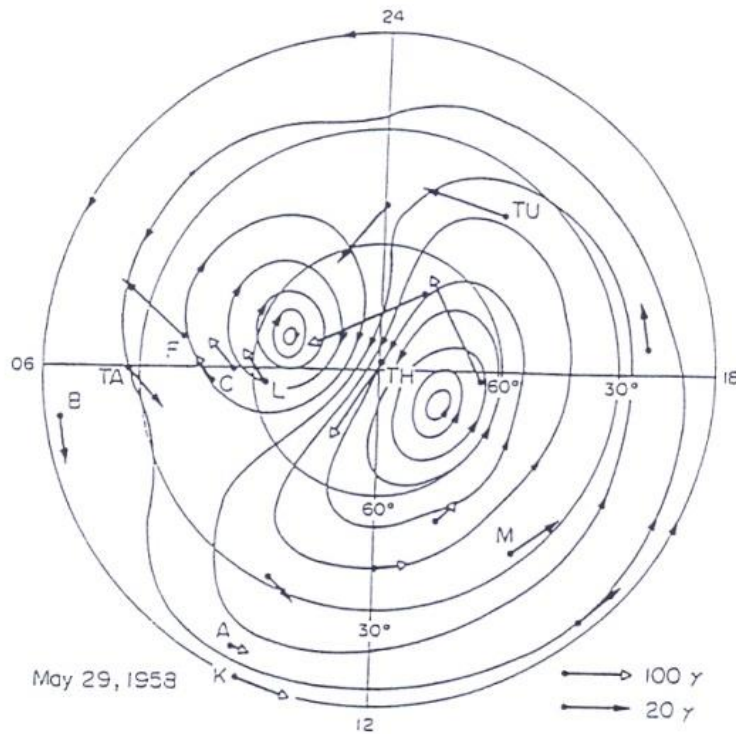
pour approcher les courants réels

- Nous organisons les observations magnétiques suivant
  - 1) les zones de latitudes
    - Hautes (polaires et aurorales),
    - moyennes
    - basses (équatoriales ) latitudes
  - 2) les processus physiques
    - Phénomènes liés aux émissions électromagnétiques régulières , au solar flare, au vent solaire rapide au CME etc....



# Courant équivalent : principe

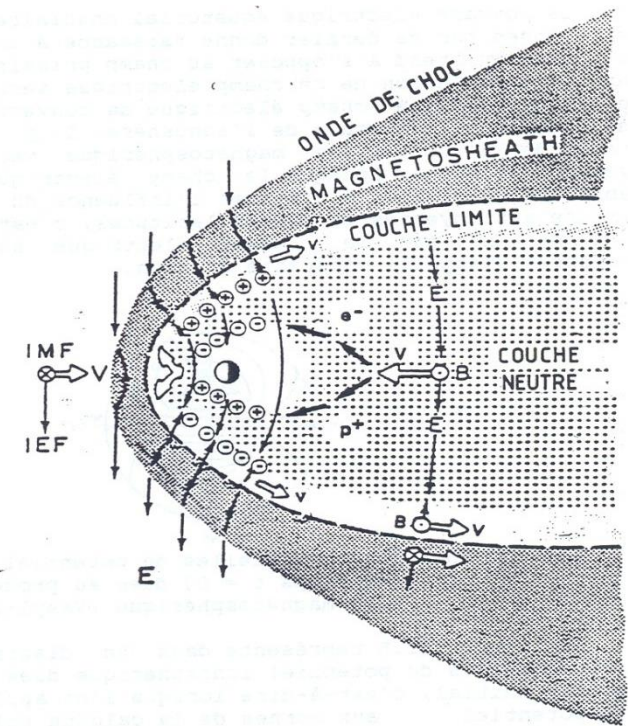
- Nous dérivons des observations ‘ un système de courant équivalent’ qui approche ‘ le système de courant électrique réel’
- Le système de courant équivalent est basé sur des hypothèses concernant la géométrie et les propriétés des courants électriques réels, simplifiant la réalité.
- Cependant le système de courant équivalent nous aide pour organiser les observations magnétiques à l'échelle planétaire et donne une première approximation grossière des courants électriques



Vue du pôle -> **DP<sub>2</sub>**, Nishida, 1968  
Système de courant associé au mouvement des particules dans la magnétosphère

Pénétration rapide de la convection magnétosphérique

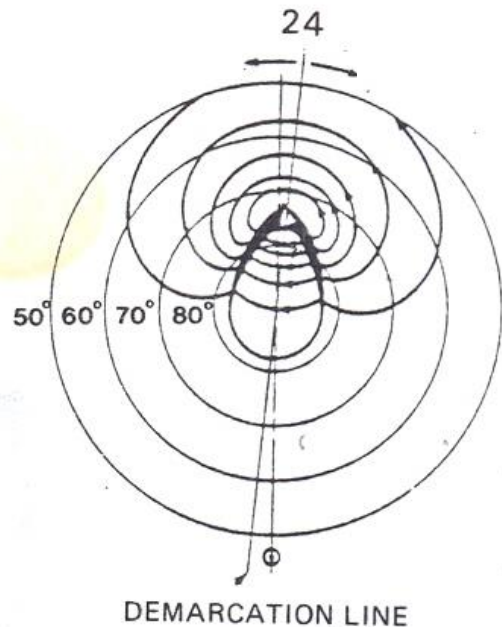
Les Courants équivalents ne sont pas les Courants réels  
1D or 2D -> les courants réels sont 3D



Courant équivalent  
Dynamo vent solaire magnétosphère

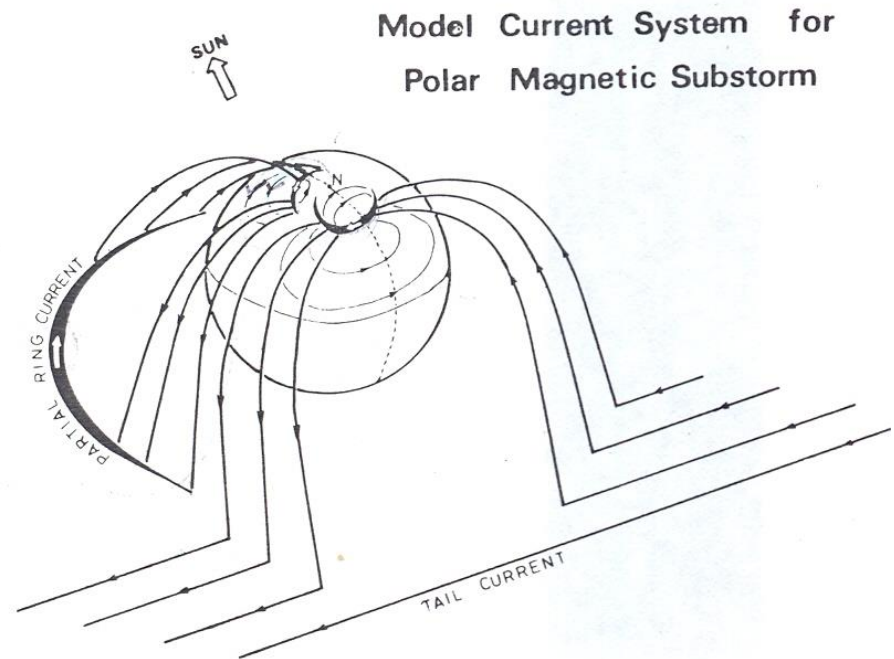
courant équivalent  $DP_1$

Une cellule de courant côté nuit  $\Leftrightarrow$  signature d'un sous orage magnétique polaire



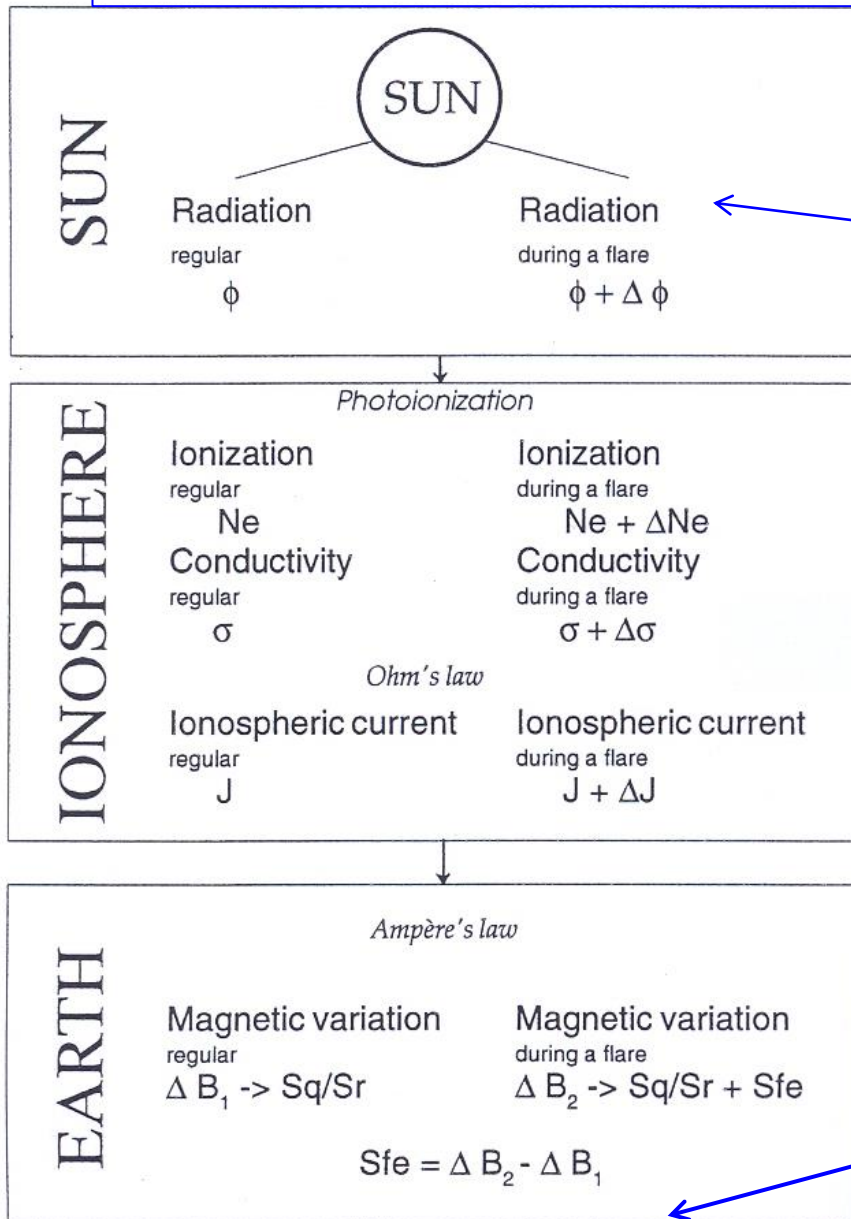
Rostoker, 1967

## Modèle de sous orage

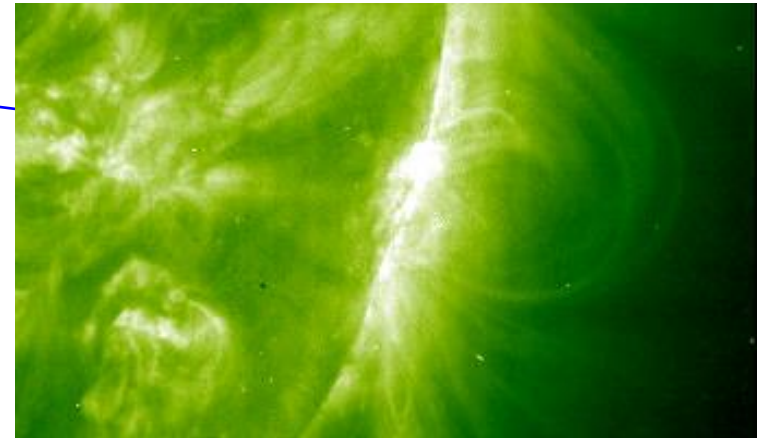


Fukushima and Kamide, 1973

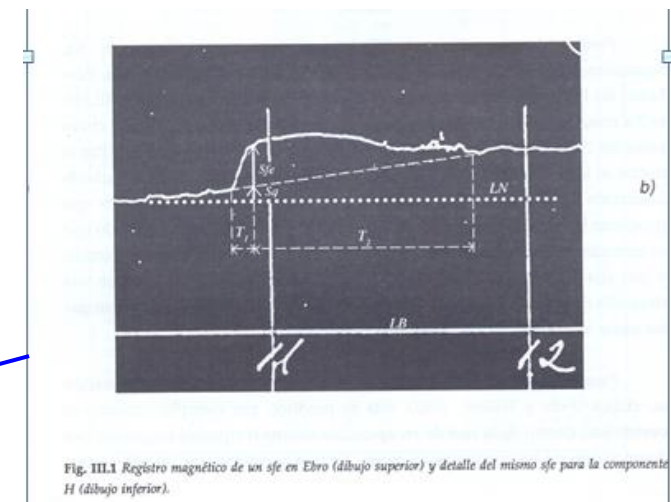
# Variation magnétique associé à un 'Solar Flare' :crochet



## Solar Flare



Crochet observé sur la composante H du champ magnétique

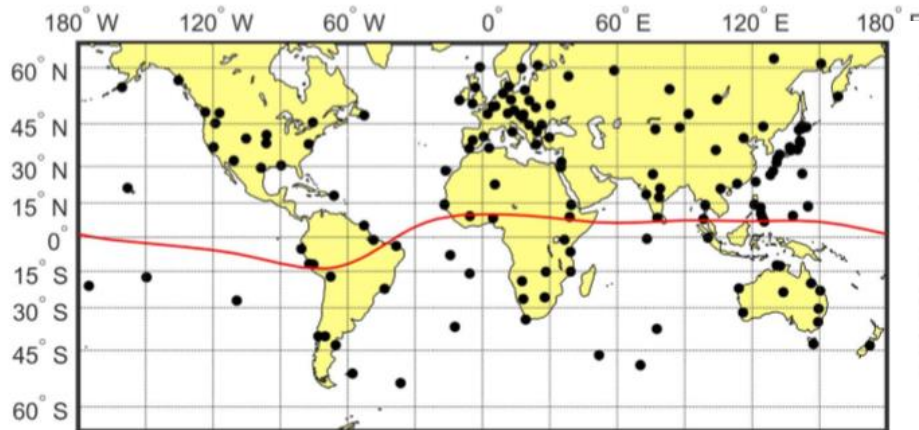




# Courant équivalent associé à un 'Solar Flare '

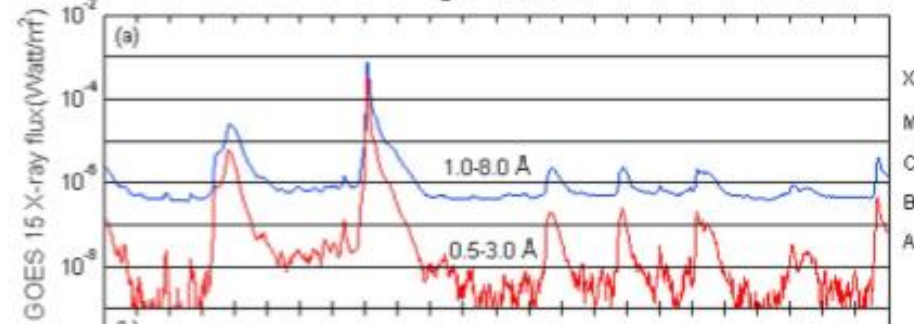
Annadurai et al., JGR 2018

Location of stations

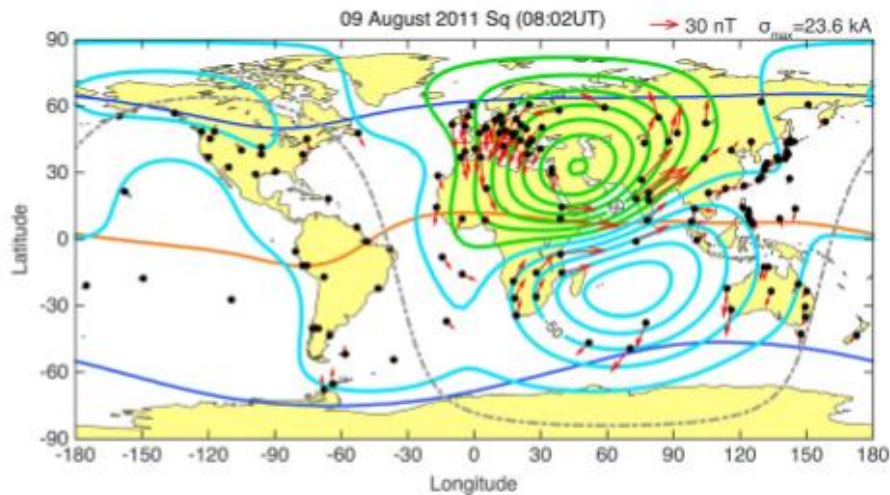


Magnétomètres utilisés

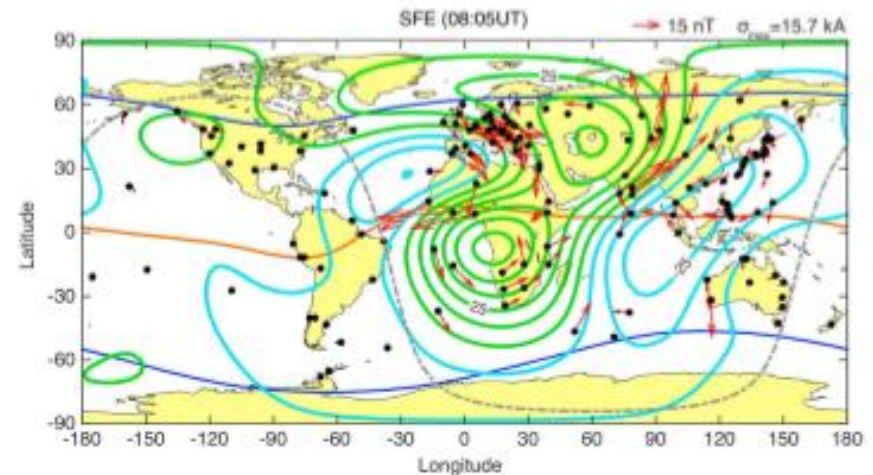
August 09, 2011



'Solar Flare '



Courant équivalent avant le 'solar flare '

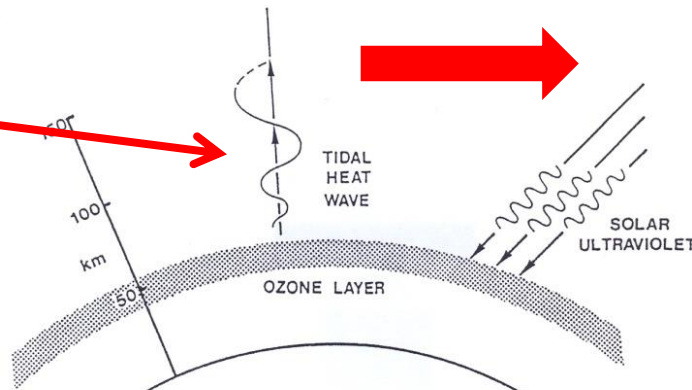


Courant équivalent durant le solar flare

# DYNAMO IONOSPHERIQUE

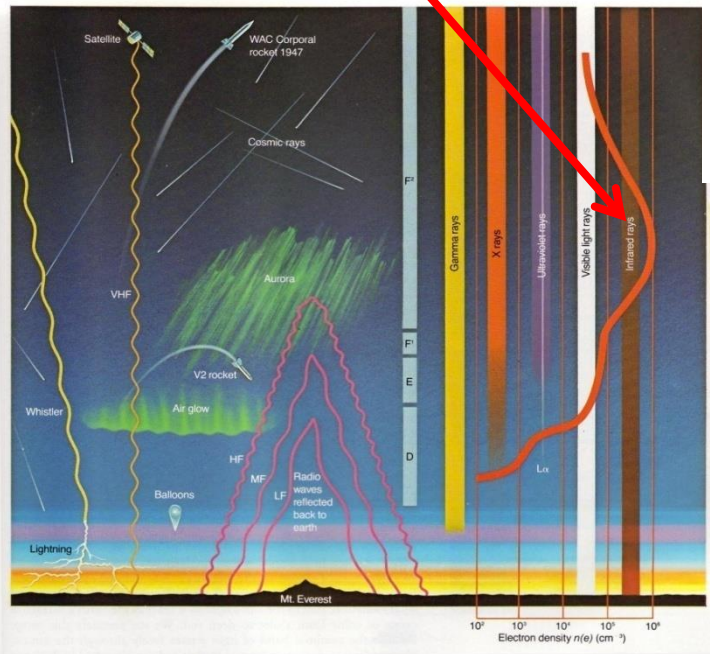
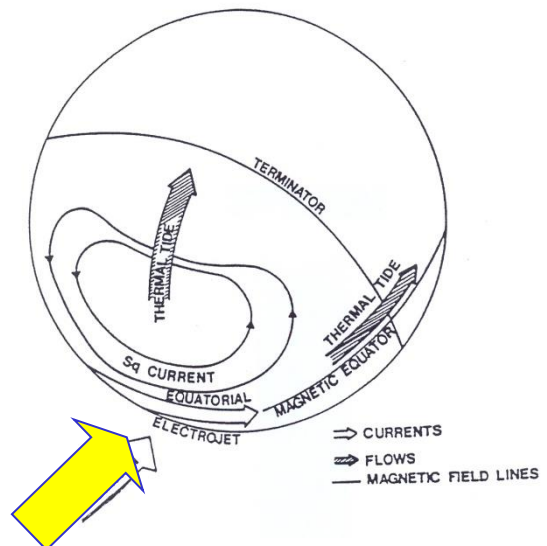
Le Rayonnement UV et EUV engendre la variation régulière  $S_R$  du champ magnétique

Courants  
électriques  
Région dynamo  
 $90\text{km} < h < 150\text{km}$



Mouvements de l'atmosphère

Variation régulière du  
Champ magnétique  
Terrestre



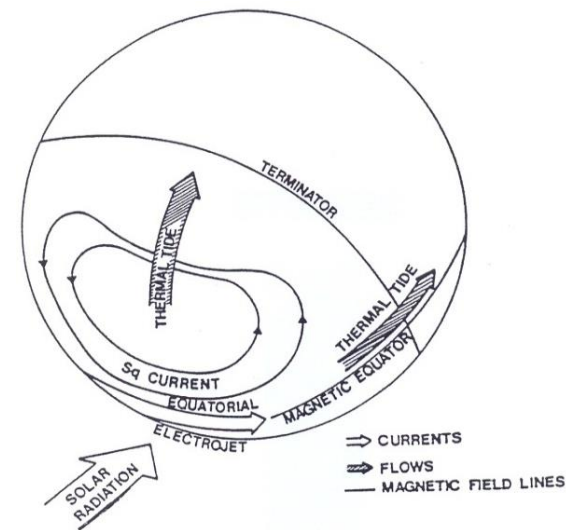
Ionosphère créée par photoionisation

# Systèmes de courants électriques équivalents réguliers déduits des variations magnétiques au sol associées à la composante toroïdale du champ magnétique solaire

SOLEIL

COMPOSANTE TOROÏDALE DU CHAMP  
MAGNÉTIQUE SOLAIRE RADIATION UV EUV  
PHOTO IONISATION => DENSITÉ ÉLECTRONIQUE  
VENT NEUTREDYNAMO IONOSPHERIQUE  
COURANT ÉLECTRIQUE IONOSPHERIQUE  
VARIATIONS MAGNÉTIQUES AU SOL

**Sq et électrojet équatorial**  
**EEJ Contre-électrojet CEJ**





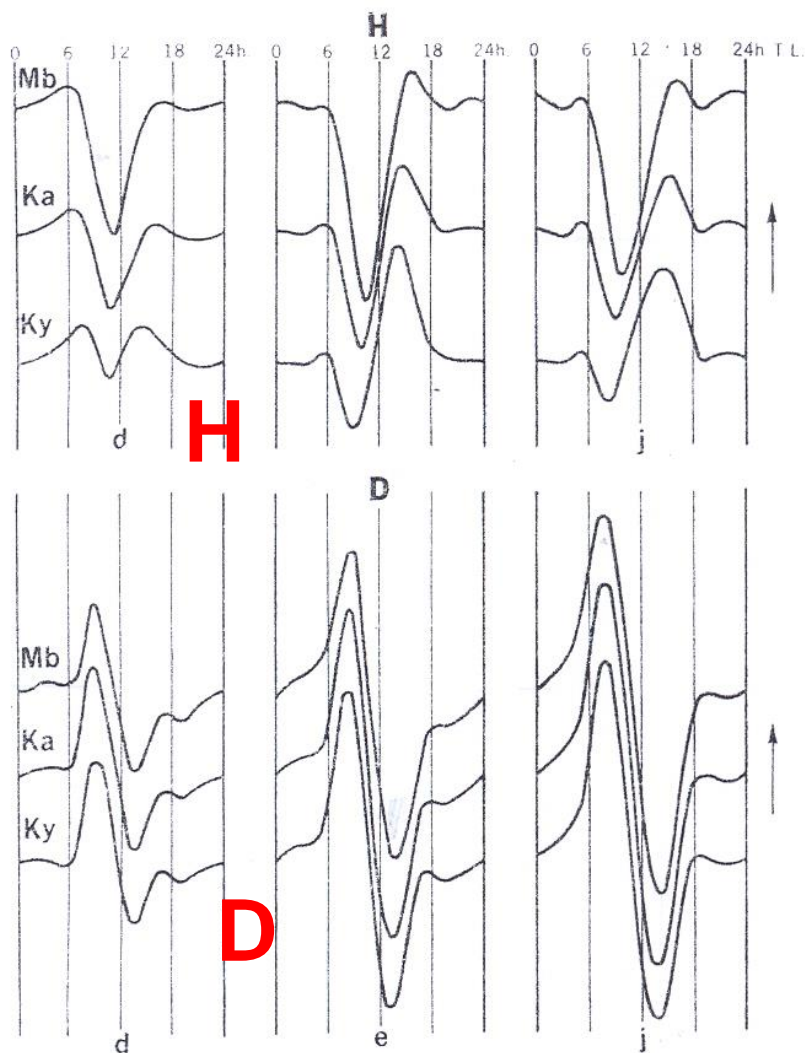


FIG. 20. — Courbes Sq de H et D pour les 3 saisons (*d* : solstice de décembre ; *e* : équinoxe ; *j* : solstice de juin) des années 1958-1959 à Memambetsu (Mb), Kakioka (Ka) et Kanoya (Ky). Échelle de 2 gammas/heure.

## Variations Sq des composantes H et D du champ magnétique terrestre

3 stations de l'hémisphère nord  
Memambetsu (Mb),  
Kanoya (Ky),  
Kakioka (Ka)).

### Dans le passé

→ 3 saisons magnétiques

Hiver : *d*,

Equinoxes : *e*

Été : *j*

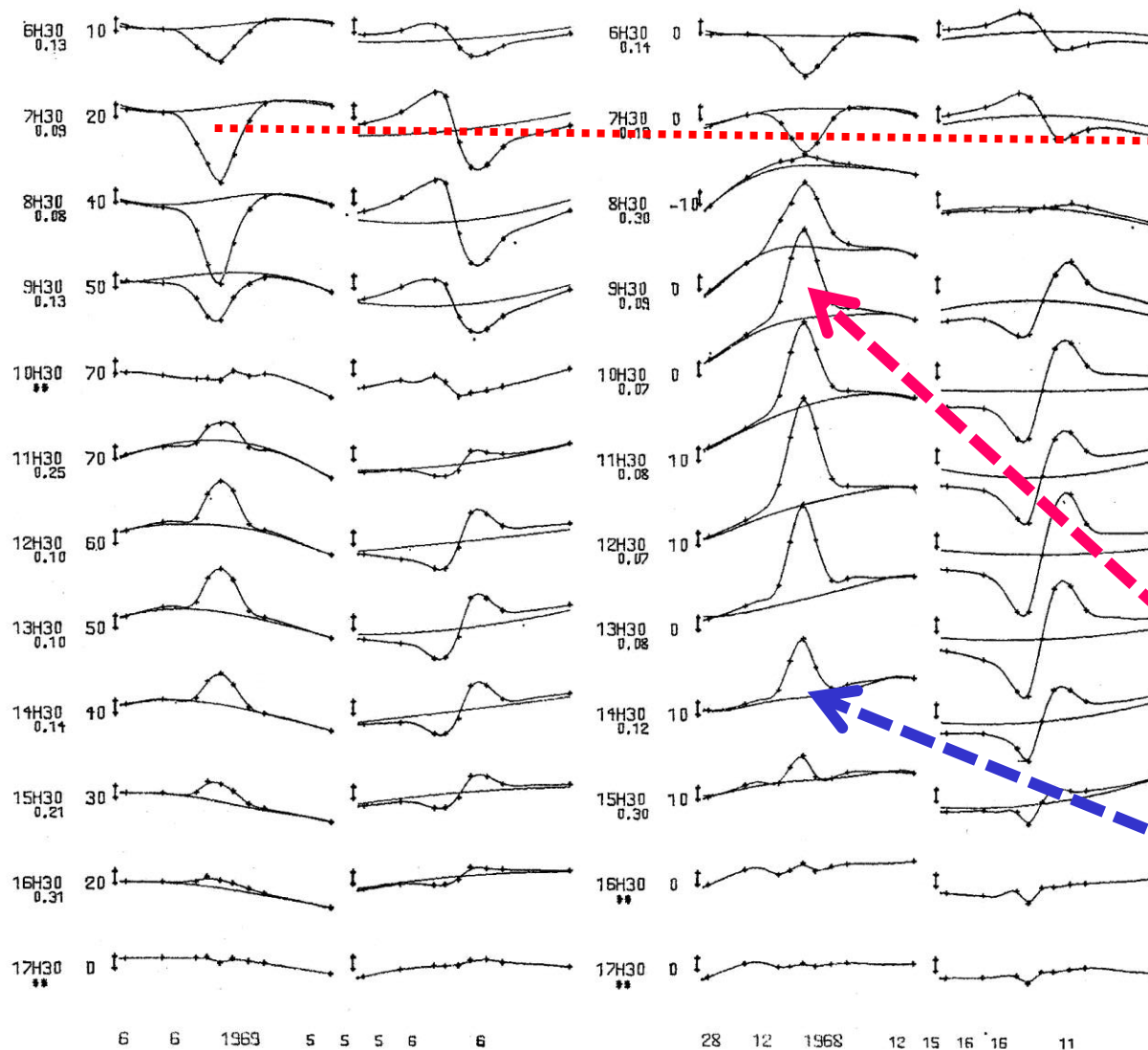
Variation diurne  $Sq/S_R$

Variation saisonnière  $Sq/S_R$

Variation annuelle:  $Sq/S_R$

Variation cycle de tâche  $Sq/S_R$

Perturbations D

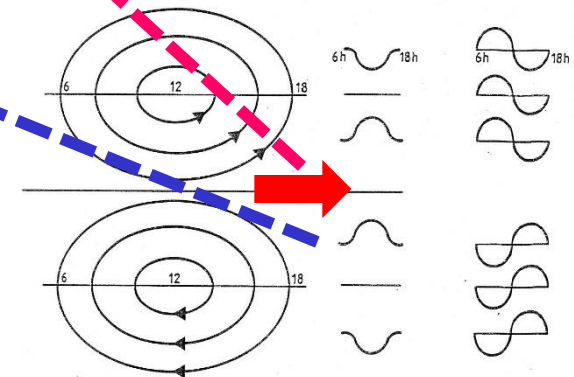


6 juin 1966

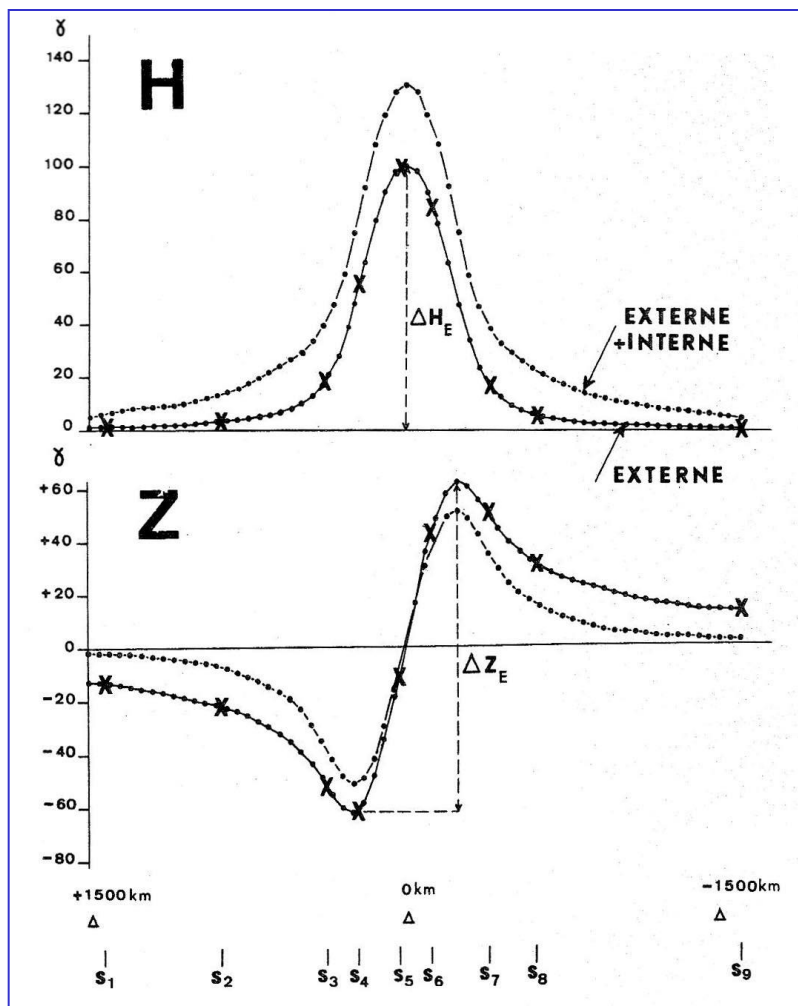
12 décembre 1968

Contre-électrojet  
Gouin and Mayaud,  
1967

Dynamo ionosphérique



Variation Latitudinale du Champ magnétique terrestre  
[after Fambitakoye, 1975]

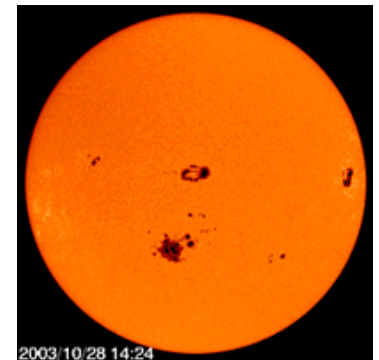


La figure de Fambitakoye (1973) illustre les variations latitudinales des composantes H et Z en dessous d'un ruban de courant. La composante H est maximum à l'équateur et elle diminue quand on s'éloigne de l'équateur. La composante Z est nulle à l'équateur et présente 2 maximums correspondant à la demi hauteur de la composante H. Le terme induit est pratiquement nul à l'équateur.

$$B_e + (B_i \sim 0)$$

Terme induit

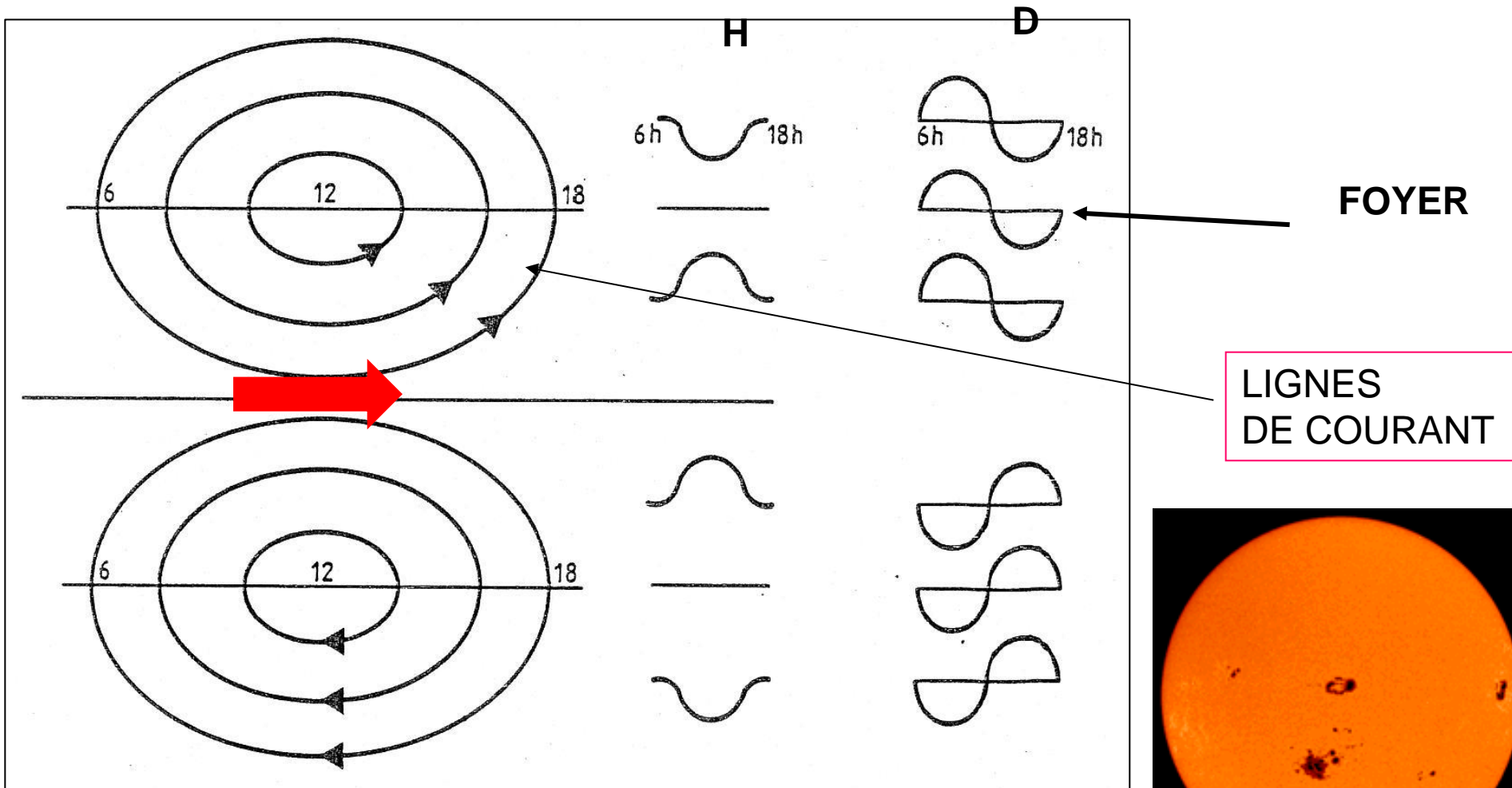
Source externe



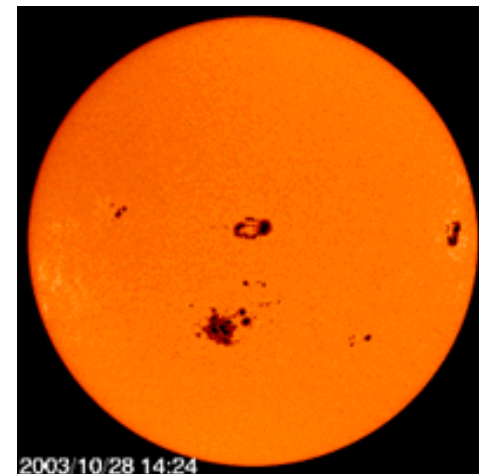
$$I(x) = I_0 \left[ 1 - \frac{(x-c)^2}{a^2} \right]^2$$

Where  $I_0$  is the current intensity at the centre  $c$  of the ribbon whose halfwidth is  $a$  and length is infinite. The ribbon is assumed to be infinitely thin, and located at a height of 105 km.

Couche plane infinie au-dessus d'une terre plane :  
La fermeture des courants est réalisée sur chaque hémisphère



Courant équivalent  $S_q/S_R$  [(Amory-Mazaudier ,1983)]



2003/10/28 14:24

# INDICES MAGNETIQUES

- *Indice K*
- *Indices AU AL (AE, A0)*
- *Indice Dst*
- *Indices Kp (Ap), Km (Am)*

## Nécessité du $S_q/S_R$ pour définir les perturbations magnétiques et les indices magnétiques

- Le courant équivalent  $S_q$  (Chapman and Bartels, 1940) est basé sur la moyenne des 5 jours les plus calmes du mois.
- Le courant équivalent  $S_R$  est basé sur la variation d'un jour donné (Mayaud, 1965). Mayaud a introduit le  $S_R$  car il a remarqué que pour certains mois agité magnétiquement le  $S_q$  était pollué par des perturbations magnétiques. Le  $S_R$  est nécessaire pour étudier la variation jour à jour du champ magnétique terrestre.

Variations transitoires du champ magnétique terrestre  
seconde, minute, heures, jour, saisons, année, cycle solaire

$$\Delta B = S_R + D$$

- $S_R$  : variation régulière du champ magnétique terrestre
- $D$  : perturbation
- $S_q$  -> variation moyenne régulière du champ magnétique terrestre -> dynamo ionosphérique
- $D$  -> variation moyenne perturbée -> dynamo Vent solaire/magnétosphère



# Indices magnétiques -> pour analyser les perturbations du champ magnétique

**Site ISGI**

**International Service of  
Geomagnetic indices**

- *Indice K*

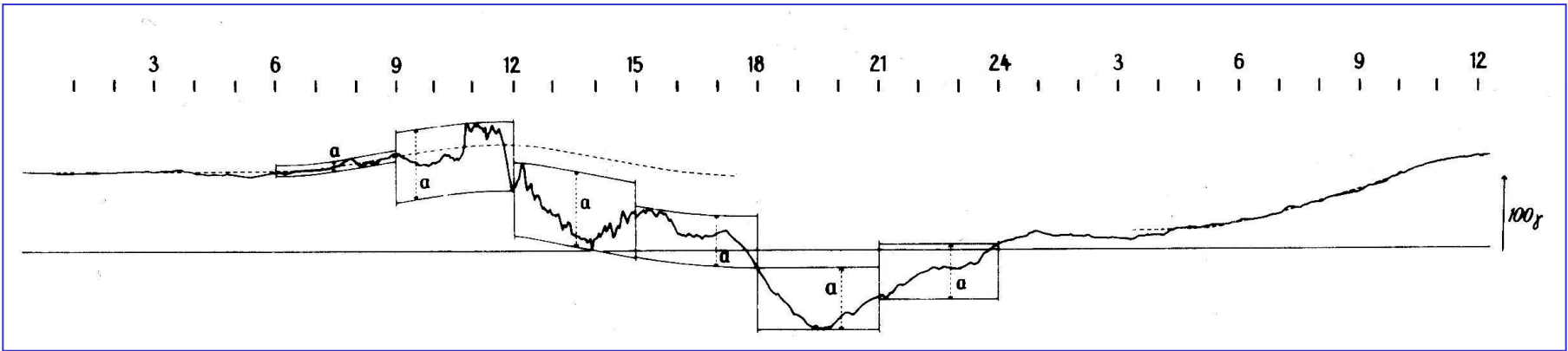


Figure de Mayaud, 1980

Figure de Mayaud illustrant comment sont calculés les indices K

L'indice K, pour un intervalle de 3-H est déterminé par la différence entre

Les valeurs extrêmes après avoir retiré le  $S_R$ .

Sur cette figure -> c'est un enregistrement de la station Guam (basse latitude).

# Indices magnétiques

**SSC** décrit un choc sur la magnétosphère, c'est la variation de la composante horizontale H du champ magnétique observée à l'arrivée d'une CME

**Aa** : défini par deux stations magnétiques antipodales => permet de définir l'activité magnétique liée aux 2 composantes du champ magnétique solaire

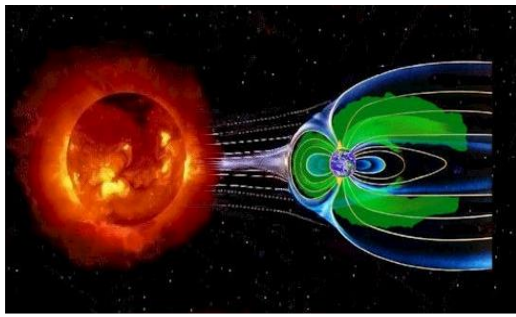
**Kp / Ap et Km / Am** : définis à partir de stations magnétiques aux latitudes moyennes => permet de définir l'activité magnétique

**Dst, SYMH, ASYMH** : définis à partir de stations magnétiques près de l'équateur, ils caractérisent les orages magnétiques

**AU, AL, AE** : définis à partir des stations magnétiques dans la zone aurorale, ils caractérisent l'électrojet auroral

**PC (N et S)** : défini à partir de stations sur la calotte polaire est un proxy du champ électrique transmis par la dynamo vent solaire/ magnétosphère à la magnétosphère.

Livre sur les indices magnétiques Mayaud (1980)



Les indices magnétiques permettent de quantifier certains paramètres de l'activité géomagnétique. Ils sont des indicateurs des perturbations magnétiques

Electrojets auroraux

AU-AL

Courant annulaire

Dst, SYMH ASYMH,

Courant de la magnétopause

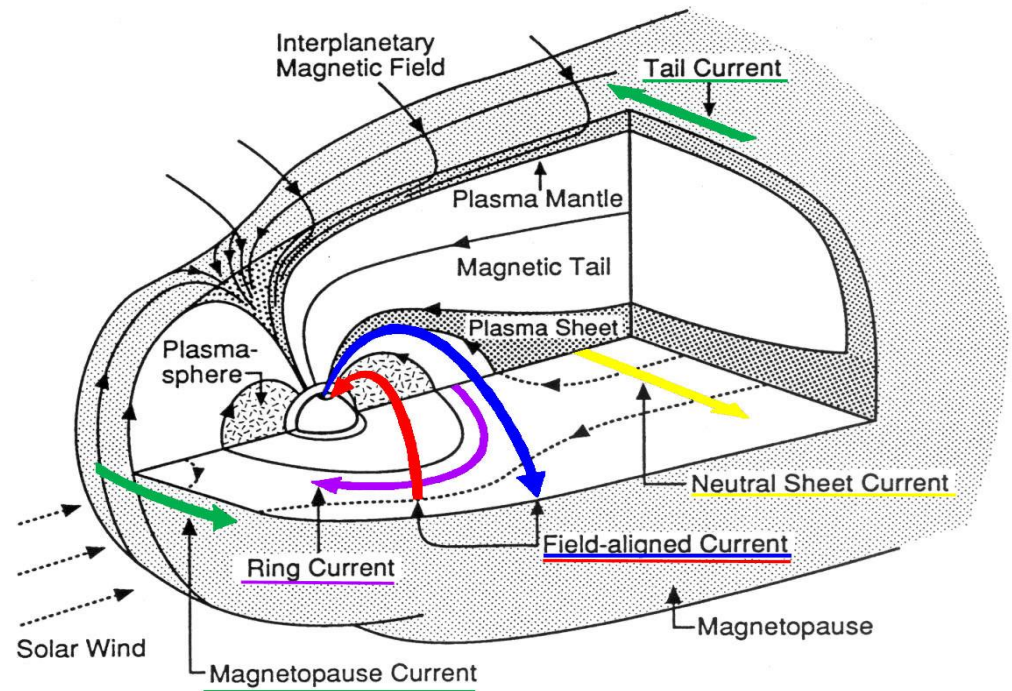
Dst, SYMH, ASYMH

Activité magnétique

Km (Am), Kp (Ap)

Activité solaire

Aa

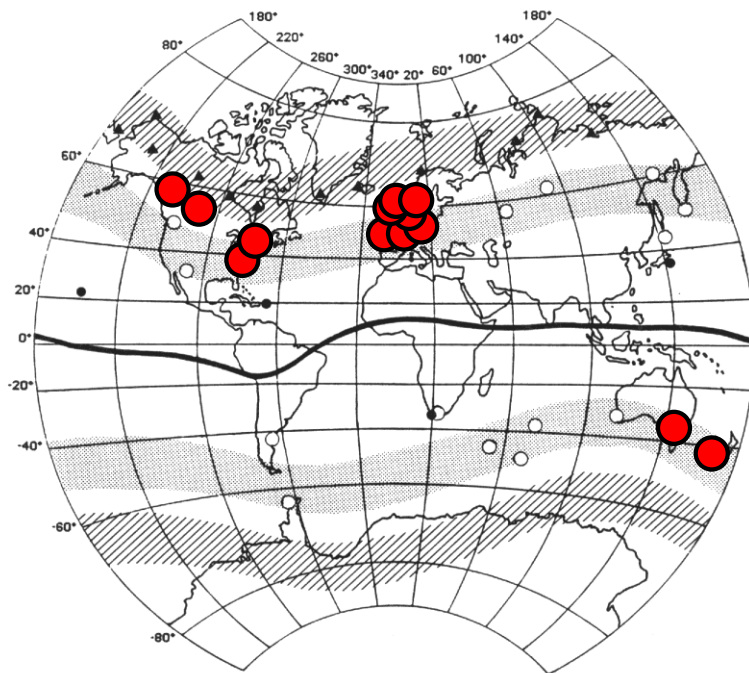


Bases de données : ISGI

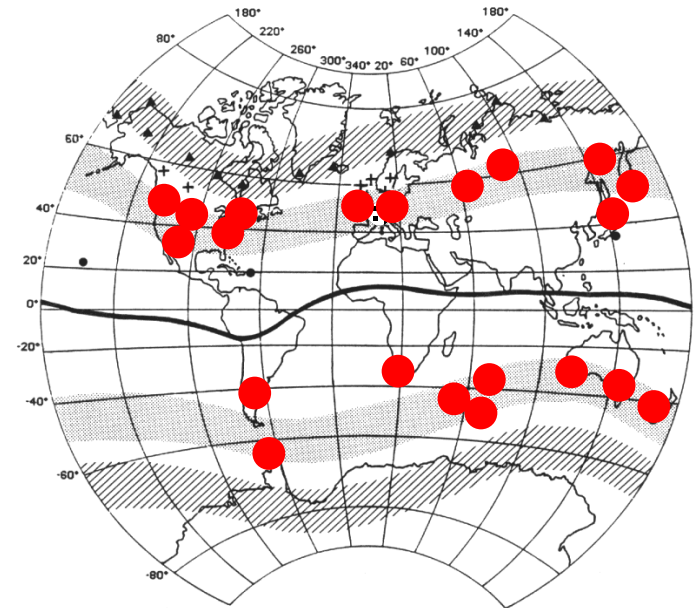
# Stations utilisées pour le Kp (ap) et le Km(am)

On fait la moyenne des K des stations sélectionnées

$a_m < 20 \text{ nT}$  = jours calmes ;  $a_m < 13 \text{ nT}$  = jours très calmes



Kp, Ap  
12 observatoires  
9 dans l'hémisphère nord  
2 dans l'hémisphère sud

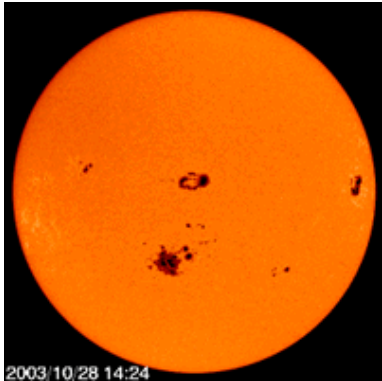


Km, Am  
23 observatoires  
12 dans l'hémisphère nord  
9 dans l'hémisphère sud  
 $K_N$  et  $K_S$

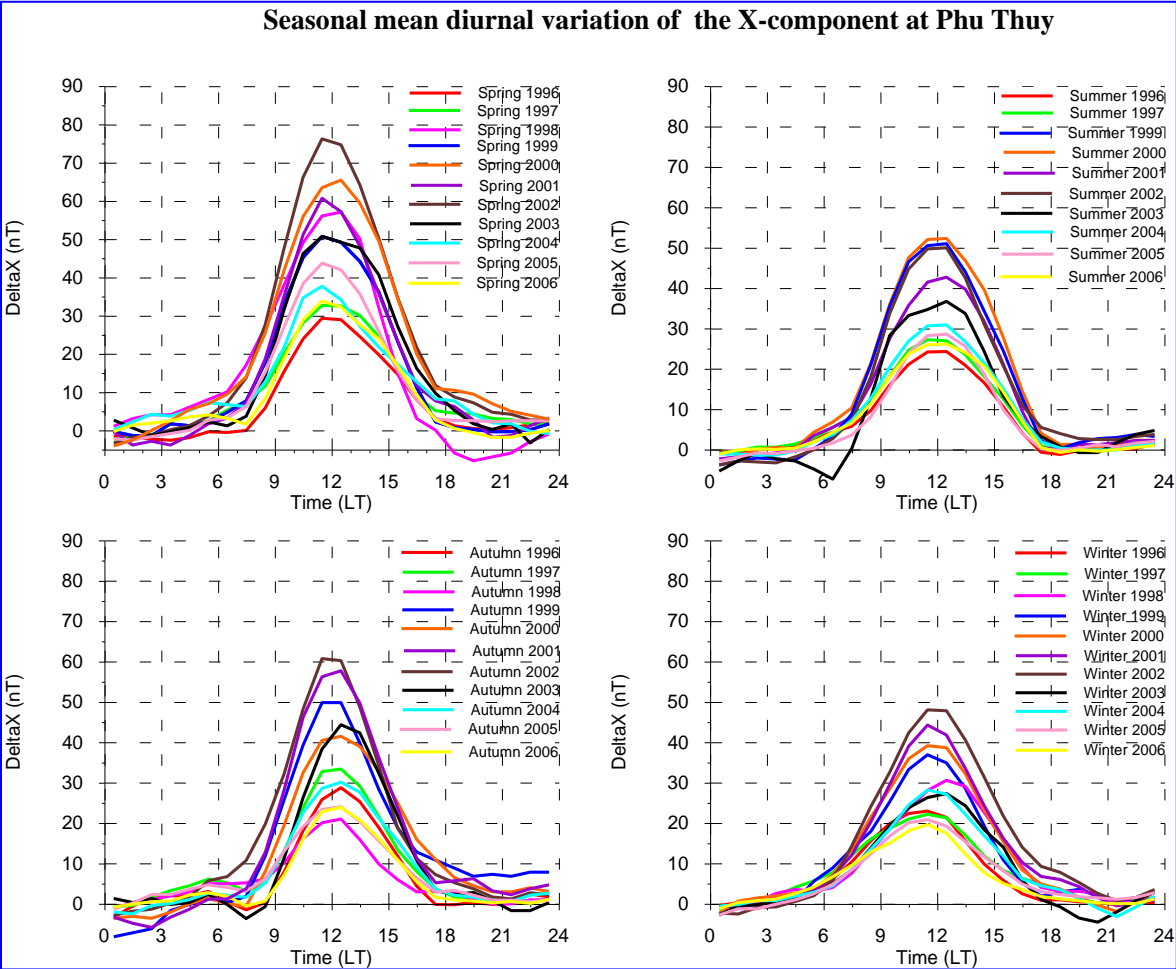
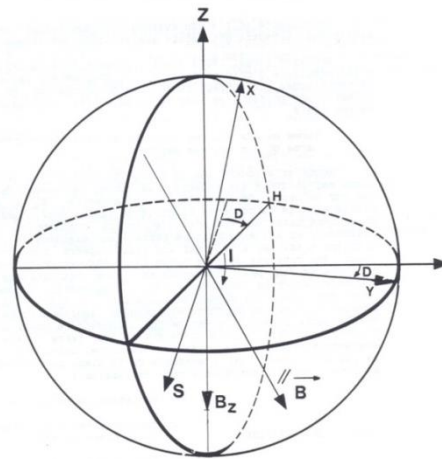
Le  $K_m$  ( $A_m$ ) est basé sur une meilleure distribution des stations utilisées que le  $K_p$  ( $A_p$ )

Le  $K_m(A_m)$  a une composante pour chaque hémisphère : Il permet donc d'étudier les différences entre les 2 hémisphères.

Composante toroïdale du champ magnétique solaire [Taches solaires].=> émissions électromagnétiques solaires EUV, UV => Ionosphère=> courant électrique ionosphérique => Variation régulière du champ magnétique terrestre les jours de calme magnétique ( $K_p$  ou  $K_m < 2+$ )

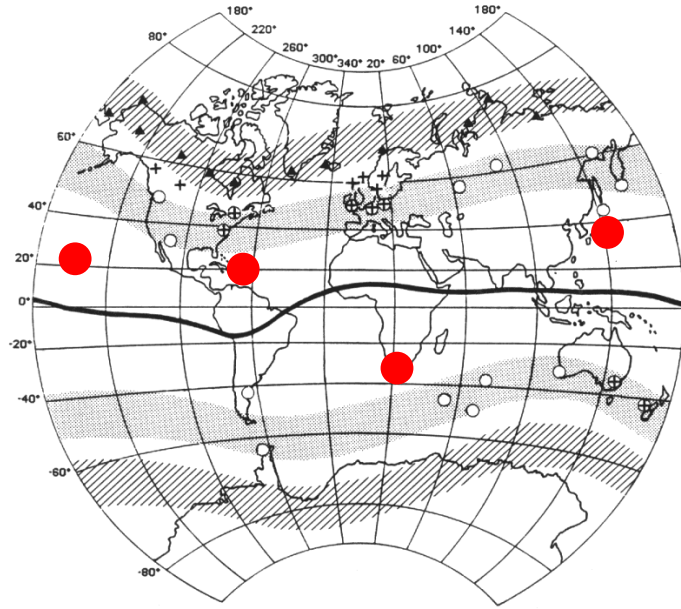


Images du satellite SOHO  
NASA - ESA

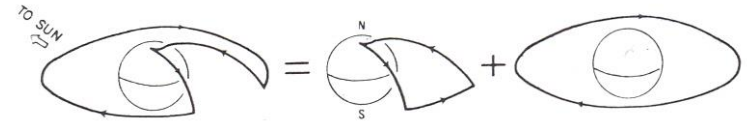


Composante X du champ magnétique à at Phu Thuy/ Vietnam  
Pham et al., Ann. Geophys. 2011, PhD 2012





# INDICE DST COURANT ANNULAIRE



Nouveaux Indices SYMH et ASYMH

*“Le Dst est calculé à partir des valeurs minute de quatre observatoires de basses latitudes. Les observatoires sont suffisamment distants des électrojets auroraux et de l’électrojet équatorial*

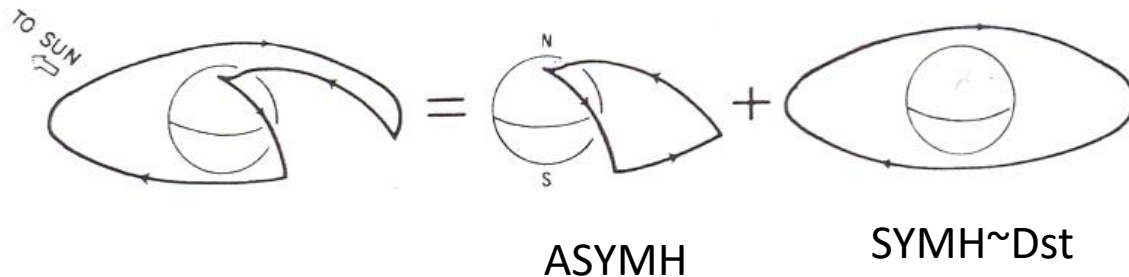
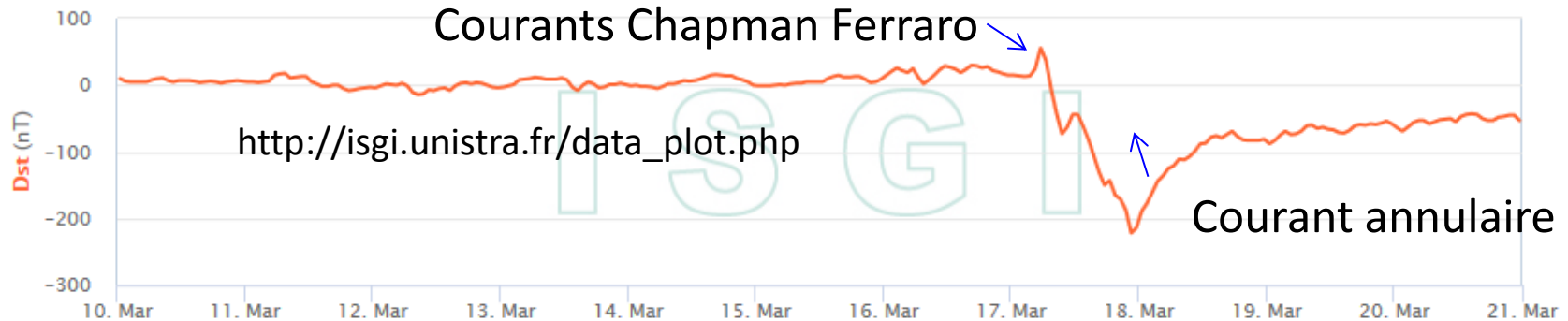
*Les valeurs locales du Dst sont calculées dans chaque observatoire à chaque instant. Les contributions du champ principal, du champ d’aimantation et de la variation solaire régulière  $S_R$  sont retirées de la composante  $H$  mesurée. La variation locale du Dst est la valeur résiduelle  $D$  normalisée au dipole équatorial.*

*Pour chaque intervalle horaire UT, le Dst est la moyenne des valeurs horaires Dst des quatre observatoires sélectionnés (Menvielle et al., 2008).*



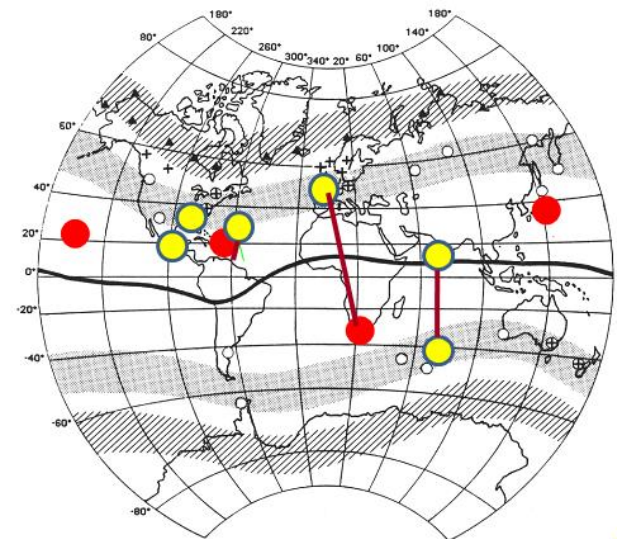
# Indice d'orage magnétique courants électriques magnétosphériques

Plot of Dst index from 2015-03-10 to 2015-03-20



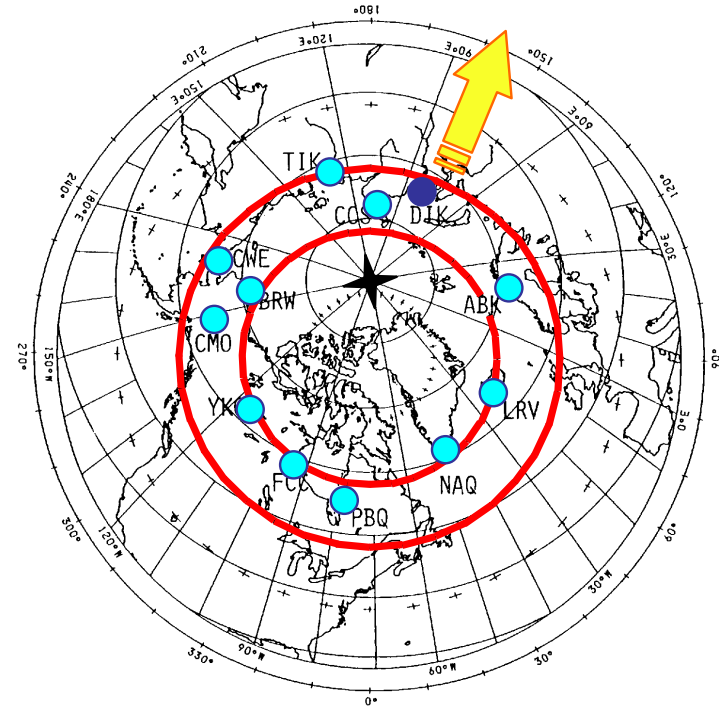
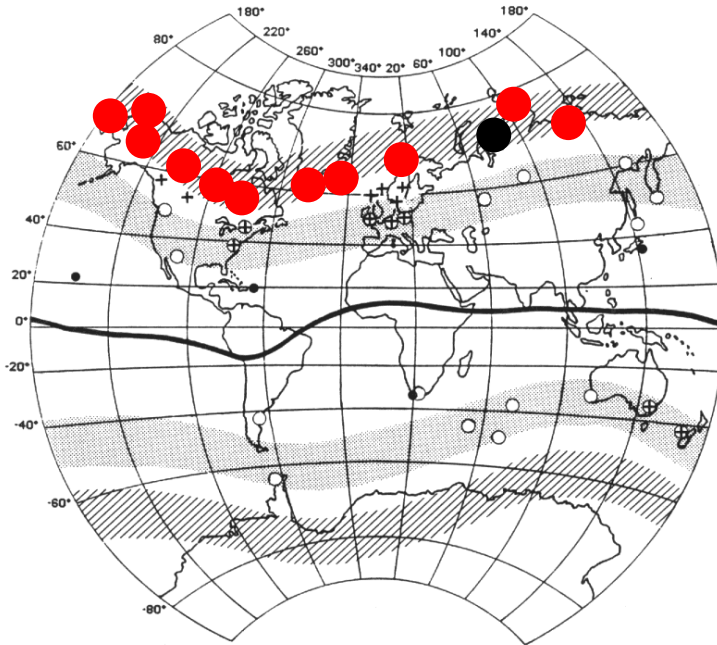
SYMH (1')  $\Leftrightarrow$  Dst (1h)

- SYM + ASYM
- Dst



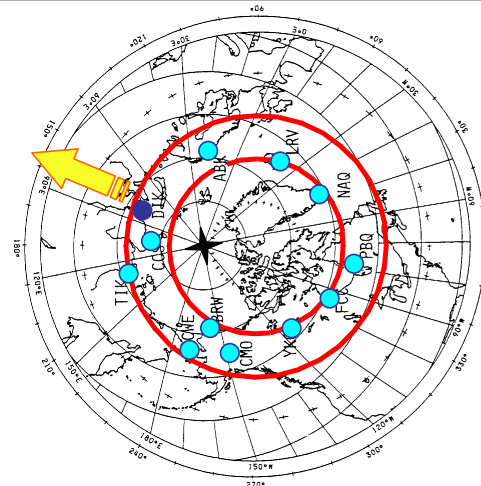
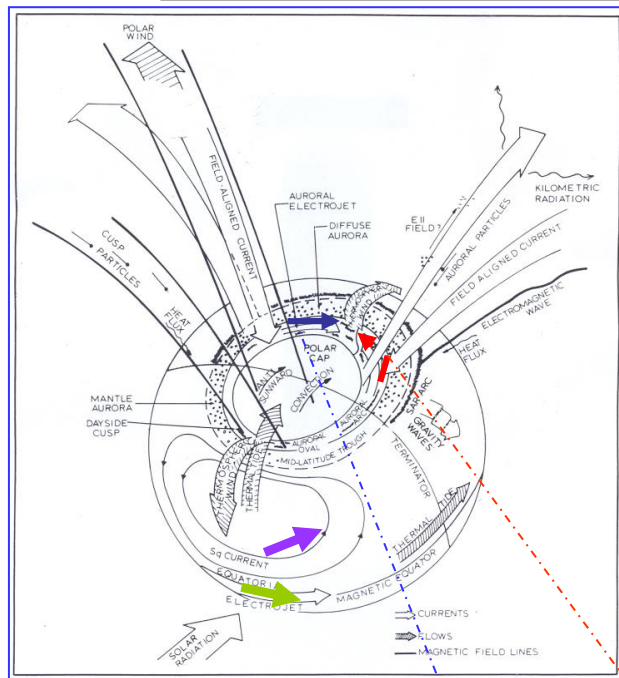
# AU, AL

## LES ELECTROJETS AURORAUX

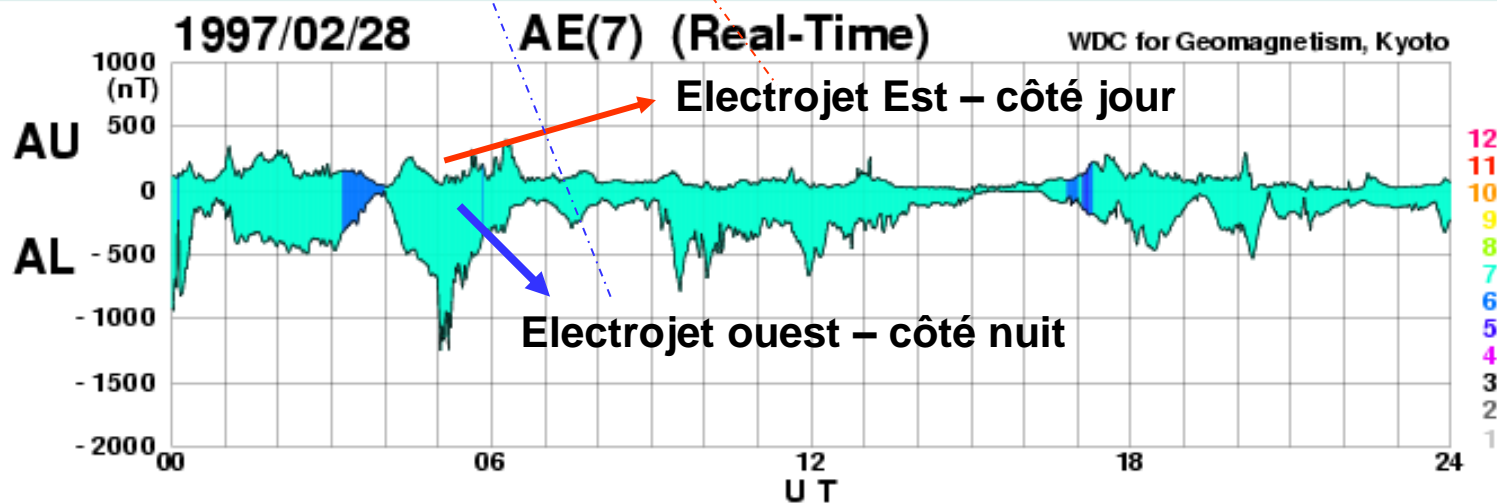


Les composantes  $H$  des stations aurorales sont superposées  
 L'enveloppe supérieure donne l'indice AL électrojet Est,  
 L'enveloppe inférieure donne l'indice AU électrojet Ouest.  
 $AE = (AU + AL) / 2$  et  $A0 = (AU - AL) / 2$ . (Menvielle et al., 2008)

# IONOSPHERE : Electrojets auroraux : indices AU and AL



Les composantes H des stations sont superposées :  
 l'enveloppe supérieure définit l'indice AU, et  
 l'enveloppe inférieure définit l'indice AL  
 $AE = (AU - AL)$  et  $AO = (AU + AL)/2$ .



# Magnetic signatures [PPEF and DDEF]

## Law of Biot and Savart

$$\Delta H = Sq + D_{\text{iono}} + D_{\text{mag}}$$

$\Delta H$ : H component of the Earth's magnetic field measured by magnetometers

Sq : regular variation of the Earth's magnetic field during magnetic quiet days

$D_{\text{iono}}$  : magnetic disturbance due to the ionospheric electric currents

$D_{\text{mag}}$  : magnetic disturbance due to the magnetospheric electric currents (SYM-H, ASYM-H)

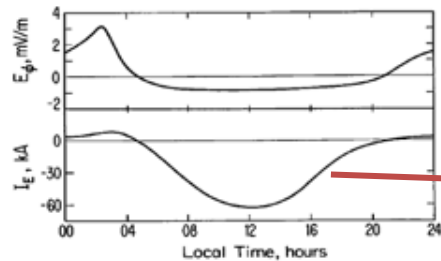
## Disturbed ionospheric electric current

$$D_{\text{iono}} = \Delta H - Sq - D_{\text{mag}}$$

$$D_{\text{iono}} = DP_2 + D_{\text{dyn}}$$

Magnetic variations at three observatories located in three regions (from top to bottom): GUA (Asia), MBO (Africa), and KOU (America) from April 4-10, 2010.

**/Law of Biot and Savart / Disturbed ionospheric current  $D_{iono} = \Delta H - S_q - D_{mag}$**

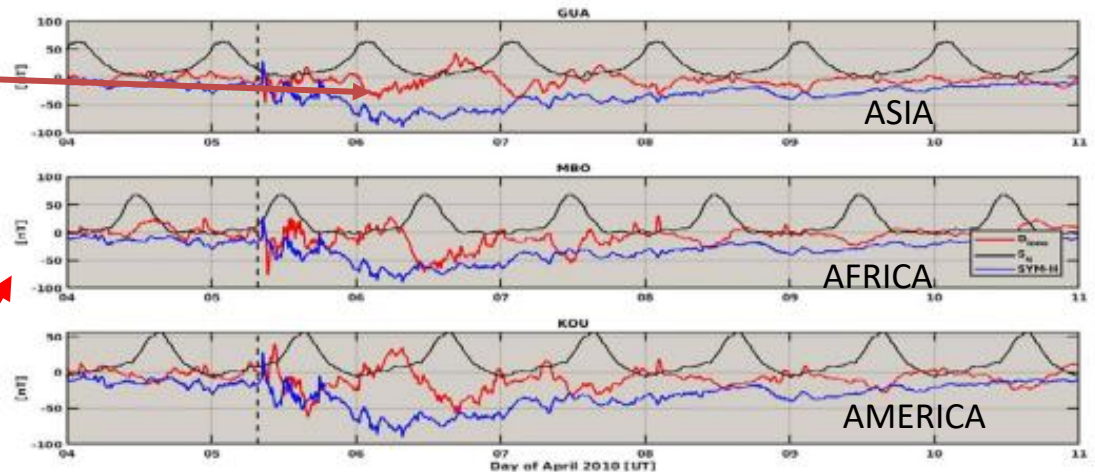


Blanc and Richmond, 1980

Top figure

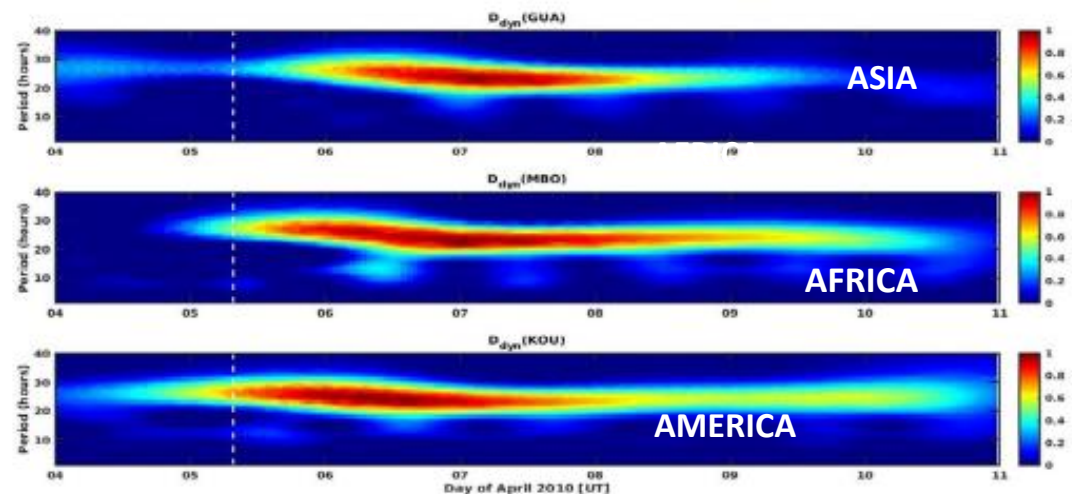
$\Delta H$  measured (blue),  
Regular  $S_q$  variation (black)  
 $D_{iono} = DP_2 + D_{dyn}$  (red)

**reversed from their observed  
normal quiet-day variation.**



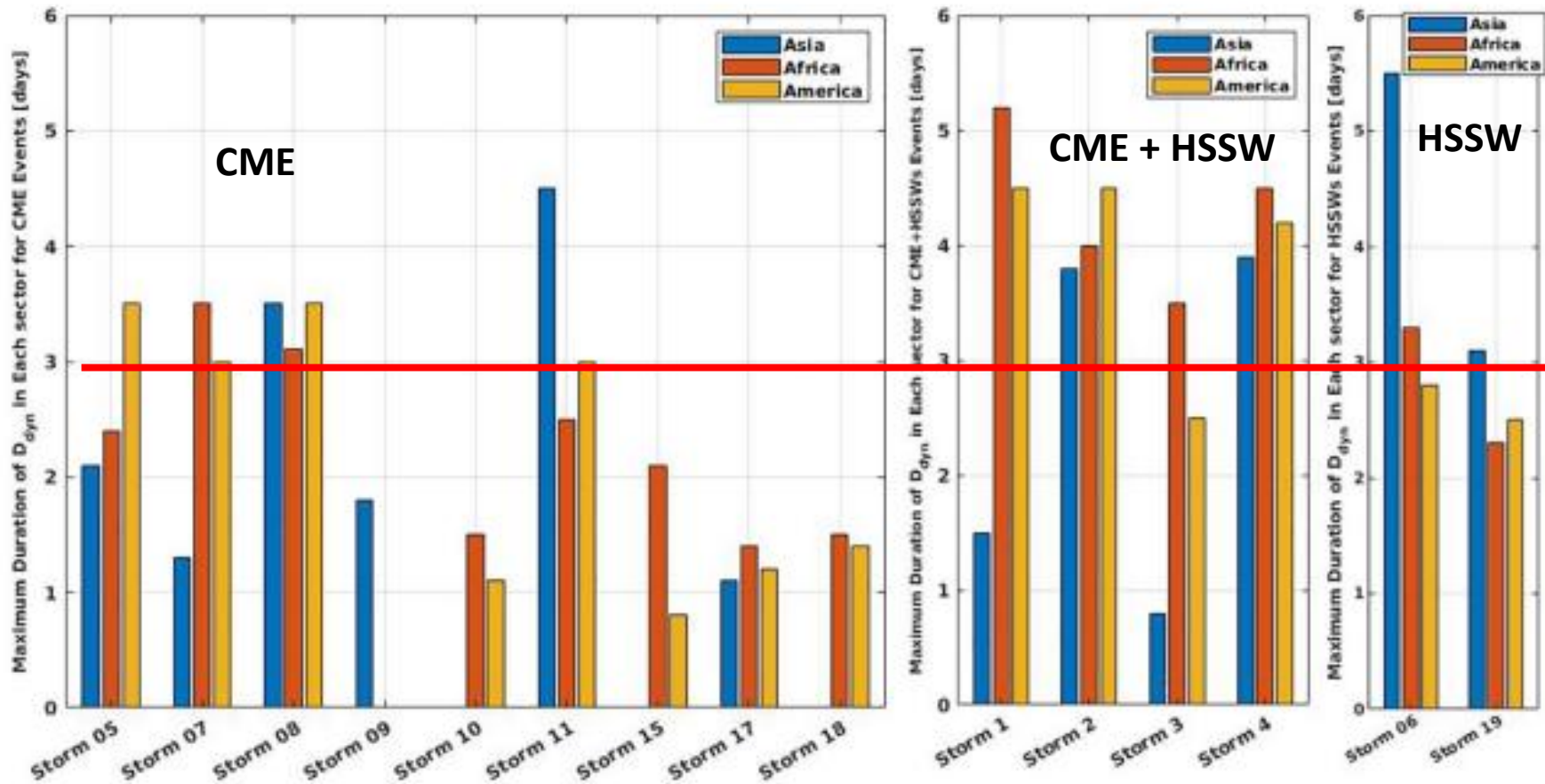
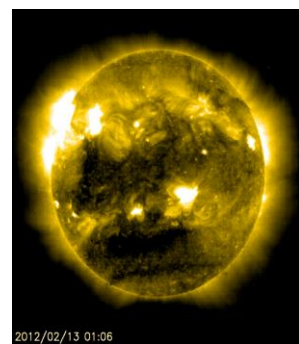
Bottom figure

Disturbance dynamo ( $D_{dyn}$ )  
estimated **using wavelet based  
semblance analysis**. The vertical  
dashed line corresponds to the  
arrival of CME

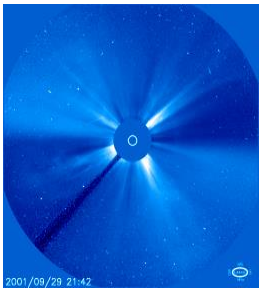




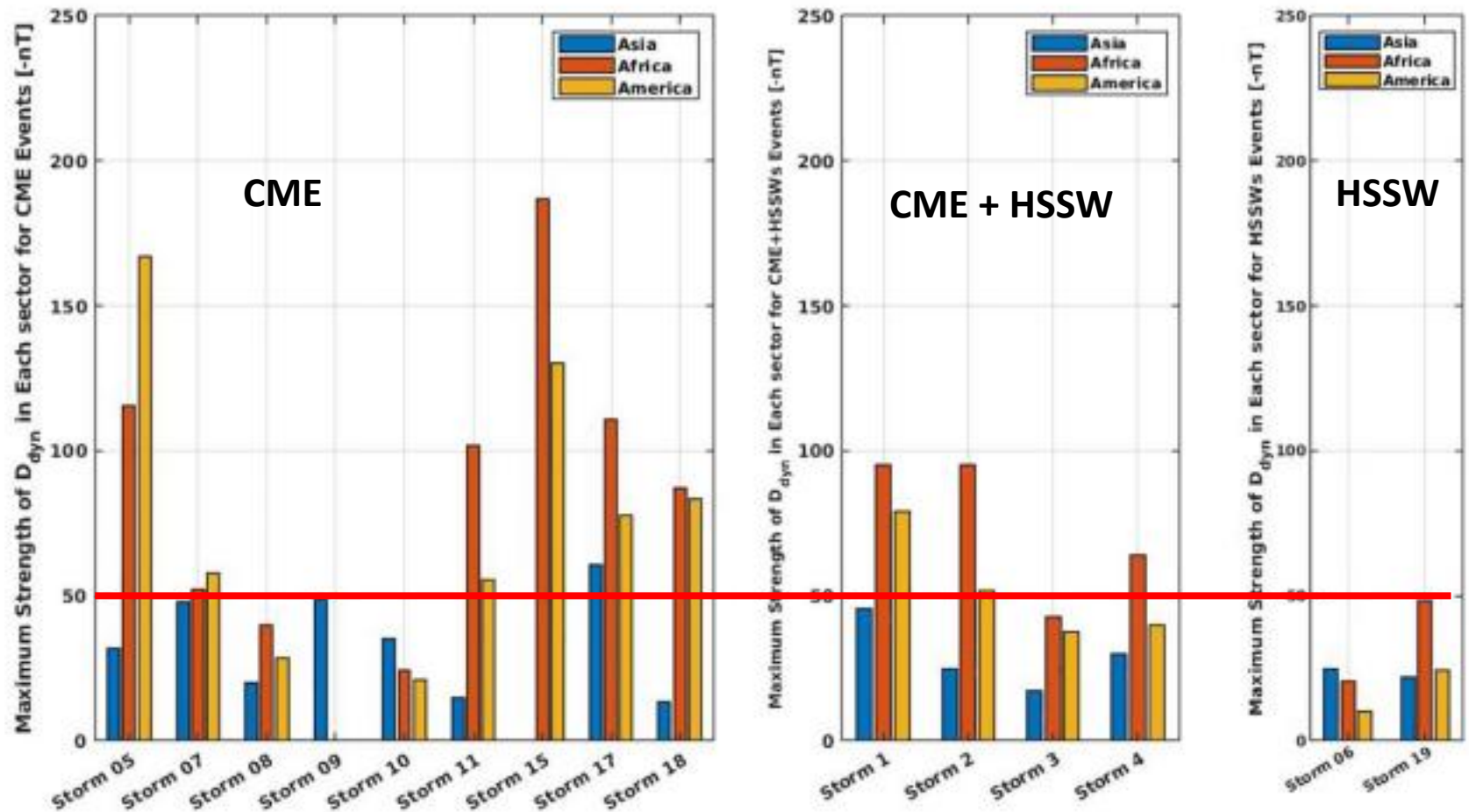
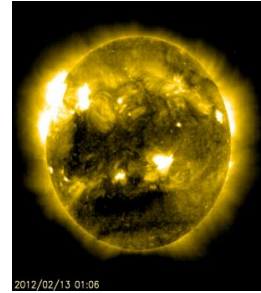
Maximum duration of **D<sub>dyn</sub>** in days during each of the selected storm: (from left to right)



Younas, W., C. Amory-Mazaudier, M. Khan, M. Le Huy, Magnetic signatures of ionospheric disturbance dynamo for CME and HSSWs generated storms, Earth and Space Science, <https://doi.org/10.1029/2021SW002825>



# Maximum strength of **D<sub>dyn</sub>** in nT observed during each storm





## 4 DYNAMOS

### SOLEIL

poloidal /toroidal (Taches solaires)

### MAGNETOSPHERE

Vent Solaire

IMF

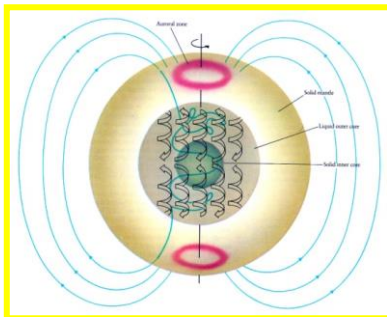
### IONOSPHERE

Champ magnétique – terrestre

Vent neutre

### TERRE

Mouvements du noyau



## SYSTEMES DE COURANT

### MAGNETOSPHERE

Chapman Ferraro

Courant annulaire

Courant dans la queue

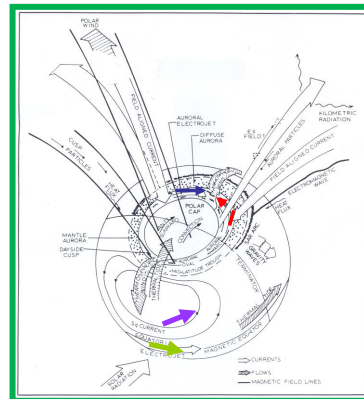
### COURANTS ALIGNES

### IONOSPHERE

Electrojets auroraux

Courants des moyennes latitudes

Electrojet équatorial



## CHAMP MAGNETIQUE TERRESTRE

Variations transitoires

Indices -> perturbation

Dst, SYMH, ASYMH

Aa, Kp, Ap

Km, Am

AU, AL, AE

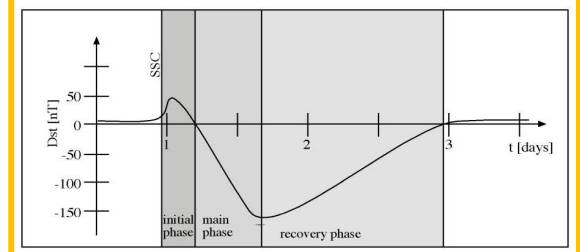
PCN, PCS

Courants équivalents

DP1, DP2, Ddyn

[due to PPEF, DDEF]

$S_R < S_q >, S_q^P$



# References

- Axford W.I., and C.O Hines, A Unifying theory of high latitudes geophysical phenomena and geomagnetic storms, *Can. J. Phys.*, 39, 1433, 1961.
- Amory-Mazaudier, C, Electric Current Systems in the Earth's Environment, *Nigerian Journal of Space Research*, Deutchetz Publishers, Vol. 8 ISSN 0794-4489, pages 178-255 , March 2010.
- Birkeland K., The Norwegian aurora polaries expedition, 1902-1903, Aschlovg, Christania, Norvège 1908.
- Blanc and Richmond, The Ionospheric Disturbance Dynamo (1980), *JGR*, 85, 1669-1686.
- Curto, J-J., C. Amory-Mazaudier, J. M. Torta, M. Menvielle, 1994, "Study of Solar Flare Effects at Ebre : 2. Unidimensional physical integrated model , *J. of Geophys. Research*, A, 12 23289-23296
- Doumbia, V.; K. Boka, N. Kouassi, O. D. F. Grodji, C. Amory-Mazaudier, and M. Menvielle Induction effects of geomagnetic disturbances in the geo-electric field variations at low latitudes, *Ann. Geophys.*, 35, 39–51, 2017, [www.ann-geophys.net/35/39/2017/](http://www.ann-geophys.net/35/39/2017/) doi: 10.5194/angeo-35-39-2017
- Dungey, T.W., Interplanetary magnetic field and the auroral zones, *Phys. Rev. Lett.* 6, 47, 1961.
- Fejer, B.G., M.F. Larsen, and D.T. Farley(1983), Equatorial disturbance dynamo electrifields, *Geophys. Res. Lett.*, 10,537–540, doi: 10.1029/GL010i007p00537
- Kobéa et al., Electrodynamic coupling of high and low latitudes observations on May, 27, 1993, (2000) *JGR*, Vol 105, A10, 22979-22989
- Legrand J.P., M. Le Goff, C. Mazaudier , 1990, On the climatic changes and the sunspot activity during the XVIIth century, *Annales Geophysicae*, 8 (10), 637-644.
- Legrand,. Simon , (1989). Solar cycle and geomagnetic activity: a review for geophysicists. Part I. The contributions to geomagnetic actiIVty of shock waves and of the solar wind. *Annales Geophysicae* 7(6), 565–578
- Le Huy M. & Amory-Mazaudier, 2005. Magnetic signature of the ionospheric disturbance dynamo at equatorial latitudes: "Ddyn", *J. Geophys. Res.*, 110, A10301, doi:10.1029/2004JA010578.
- Le Huy M. & Amory-Mazaudier, 2008. Planetary magnetic signature of the storm wind ionospheric disturbance dynamo currents: "Ddyn", *J. Geophys. Res.*, 113, A02312, doi:10.1029/2007JA012686.
- Nagata, T., S. Kokubun, rep. *Ionosph Space*, Japan, 16, 250, 1962.
- Nishida, A. (1968), Geomagnetic DP2 fluctuations and associated magnetospheric phenomena, *J. Geophys.Res.*, 73, 1795–1803, doi: 10.1029/JA073i005p01795
- Pham Thi Thu, H., C. Amory-Mazaudier, M. Le Huy (2011), Sq field at Phu Thuy – Vietnam during solar cycle 23, *Ann. Geophys.*, 29, 1-17.
- Vasyliunas V. M., 1970. Mathematical models of magnetospheric convection and its coupling to the ionosphere, in *Particles amd Fields in the Magnetosphere*, edited by M. McCormac, pp 60-71, Springer, New York.
- Vasyliunas V. M., 1972. The inter-ralationship of magnetospheric processes, in *Earth's Magnetosphere Processes*, edited by M. McCormac, pp 29-38, Springer, New York
- Zerbo, J-L., C. Amory-Mazaudier, F. Ouattara, 2012, Solar wind and geomagnetism: Toward a standard classification of geomagnetic activity from 1868 to 2009, *Ann. Geophysicae*, 30, 421-426.
- Zerbo, J-L., C. Amory-Mazaudier, F. Ouattara, Geomagnetism during solar cycle 23: Characteristics, 2012, *J. Adv Res* <http://dx.doi.org/10.1016/j.jare.2012.08.010>

# Cas du 10-15 Mai 2024

- SSC
- <https://www.obsebre.es/en/variaciones/rapid>
- Visualiser les indices pour cette période
- <http://isgi.unistra.fr>
- Source solaire catalogue LASCO -CME
- [https://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME\\_list/](https://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME_list/)
- Paramètres du vent solaire
- <http://omniweb>
- Jours Calmes
- <https://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/qddays/>