

# Des éruptions solaires aux perturbations de l'environnement terrestre: genèse et déroulement d'un orage géomagnétique, application à la météorologie de l'espace

**Jean-Claude Cerisier**

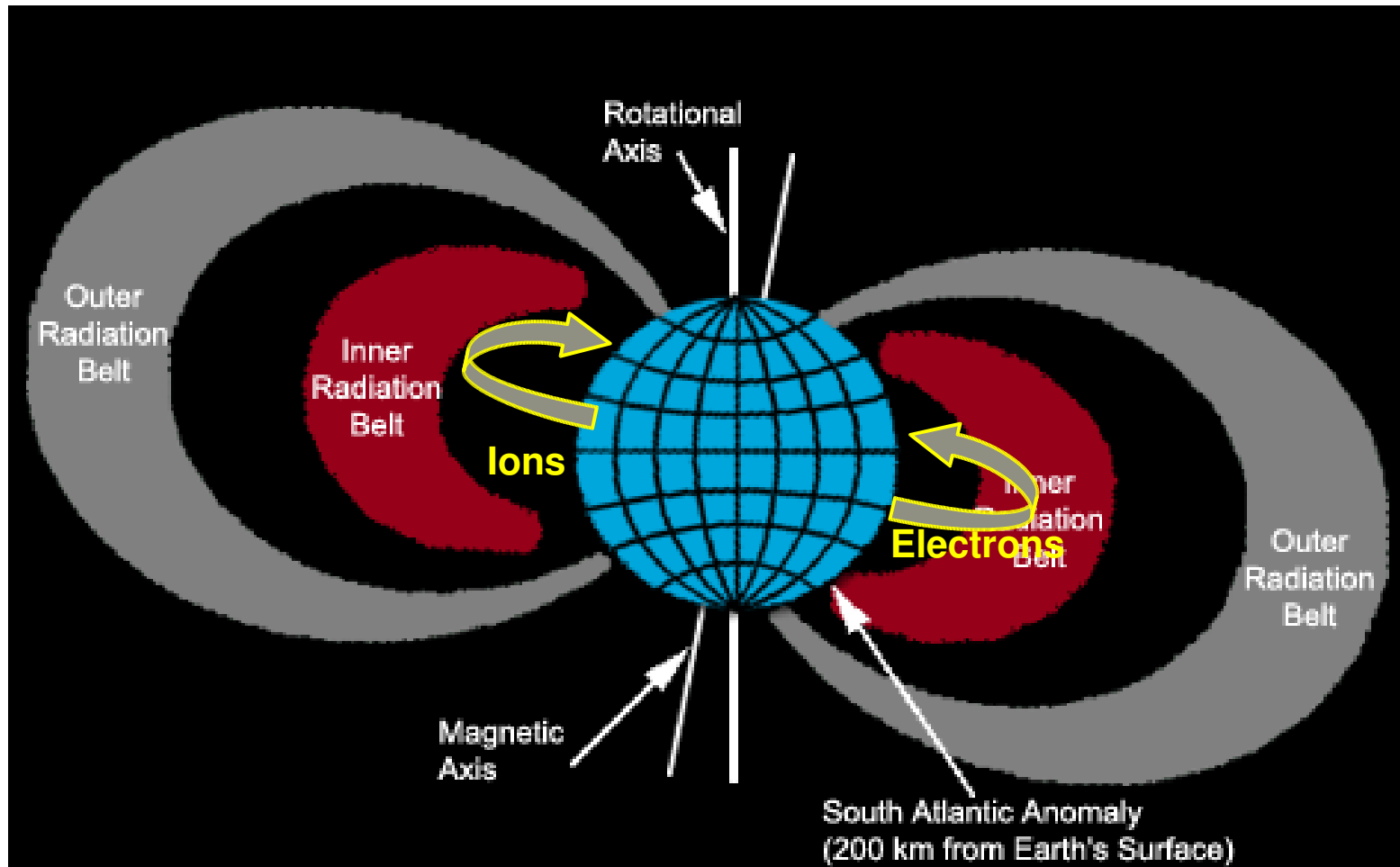
Université Pierre & Marie Curie, Paris VI  
Institut Pierre-Simon Laplace  
Centre d'Etude des Environnements Terrestre et Planétaires

Avec la collaboration de :

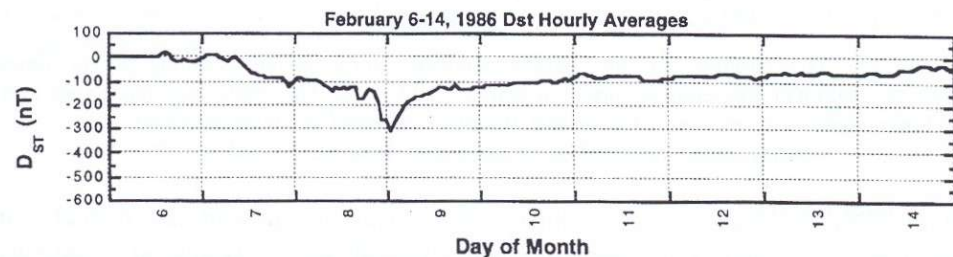
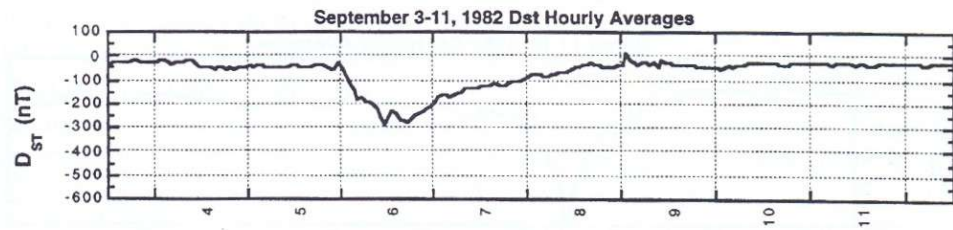
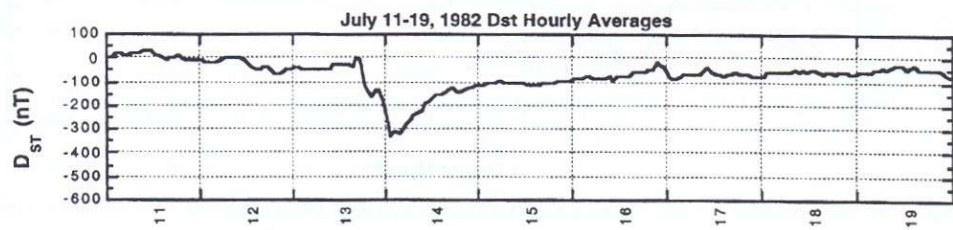
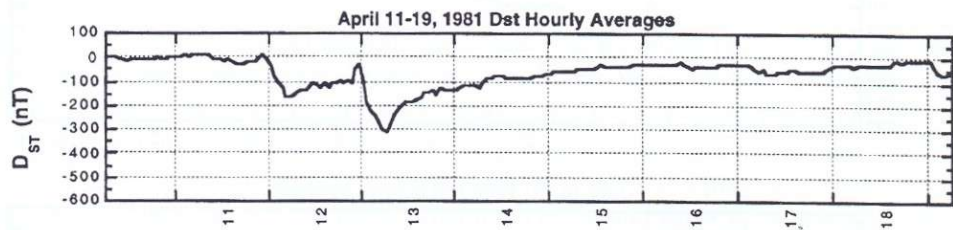
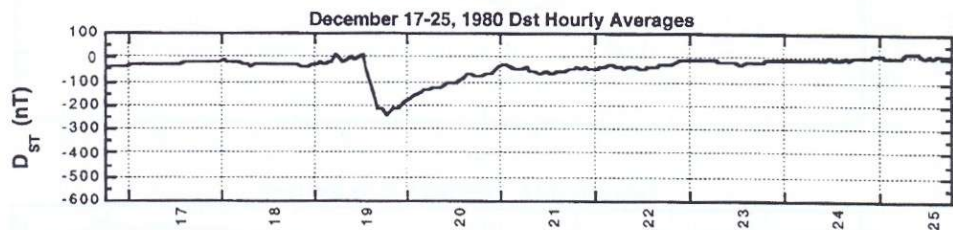
C. Hanuise, K. Bocchialini, F. Auchère, S. Bruinsma, N. Cornilleau -Werhlin, N. Jakowski, C. Lathuillere, M. Menvielle, J.-J. Valette, N. Vilmer, J. Watermann, P. Yaya

- Qu'est-ce qu'un orage magnétique ?
- L'orage du 29/05/2003
  - Composante solaire et interplanétaire
  - Composante magnétosphérique
  - Conséquences pratiques
- Application en météorologie de l'espace
  - Court terme - moyen terme - long terme
- Conclusions

# Le courant annulaire



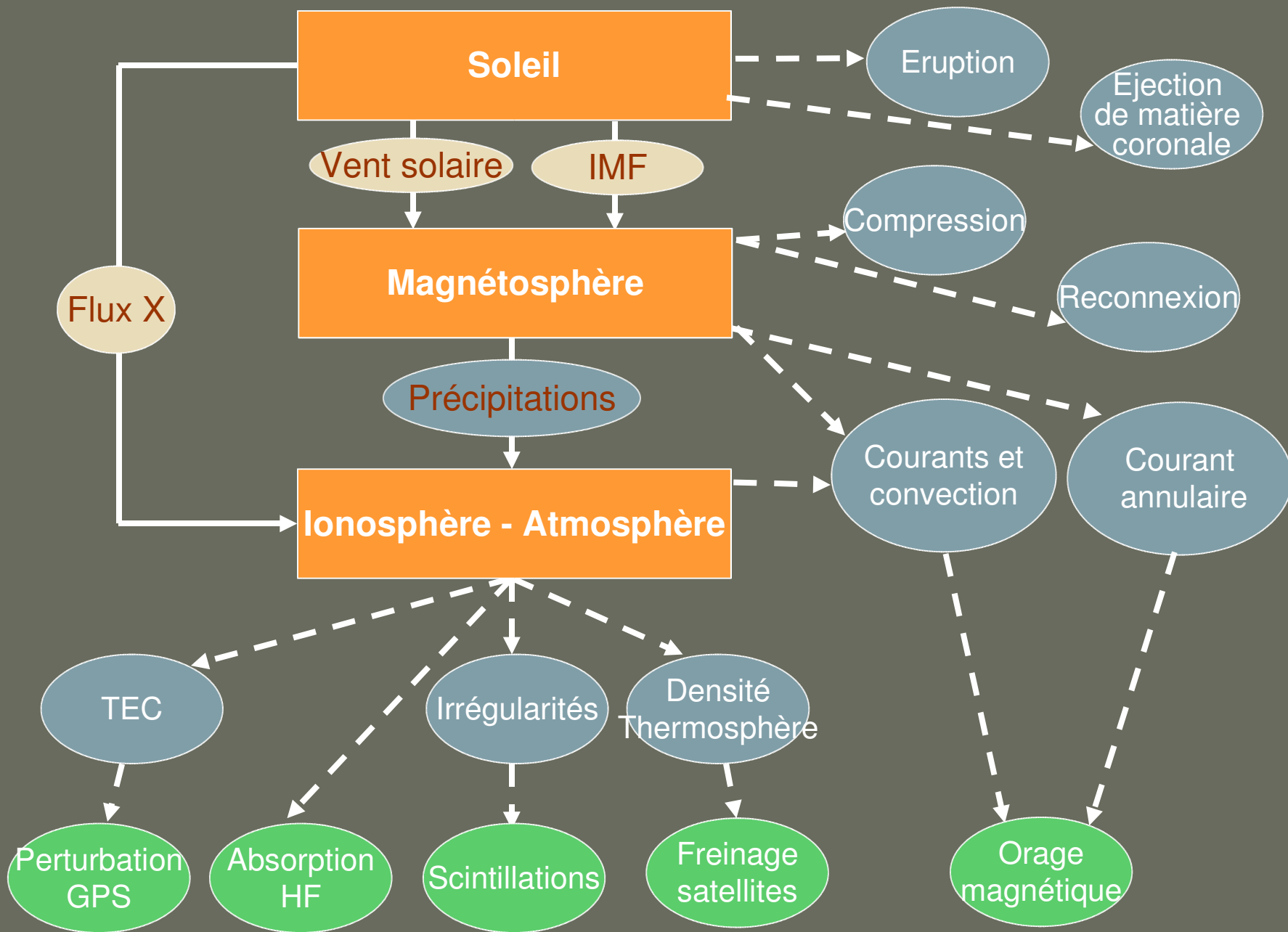
# Indicateur de l'orage magnétique : Dst



Profils du Dst lors des orages intenses (période 1980-86)

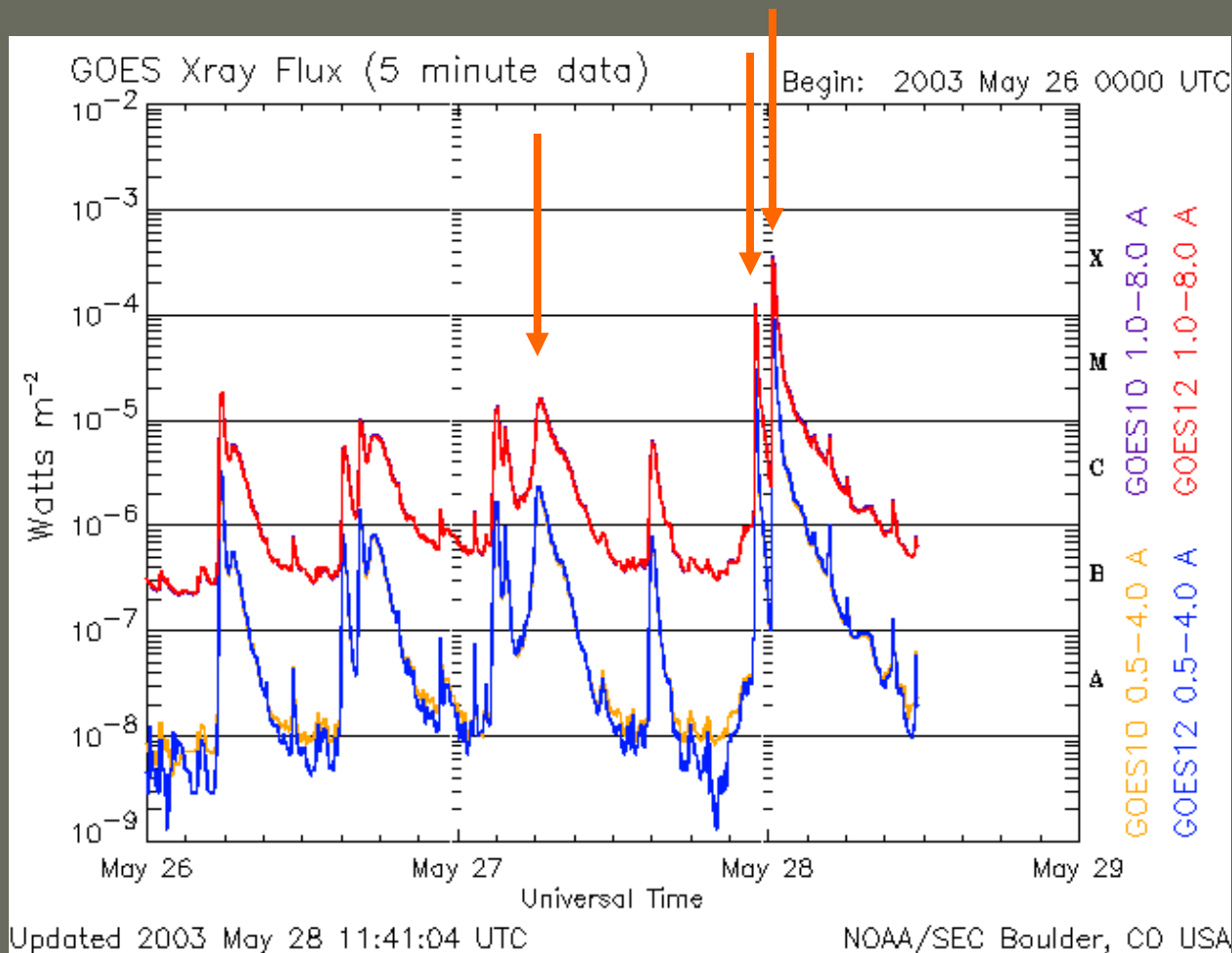
Dst = moyenne de la composante horizontale du champ magnétique de stations de moyenne et basse latitude. **Les valeurs négatives du Dst indiquent le développement du courant annulaire** (courant est-ouest dans le plan équatorial dû à la dérive des électrons et des ions dans le champ magnétique dipolaire)

# Orage magnétique : la chaîne de processus

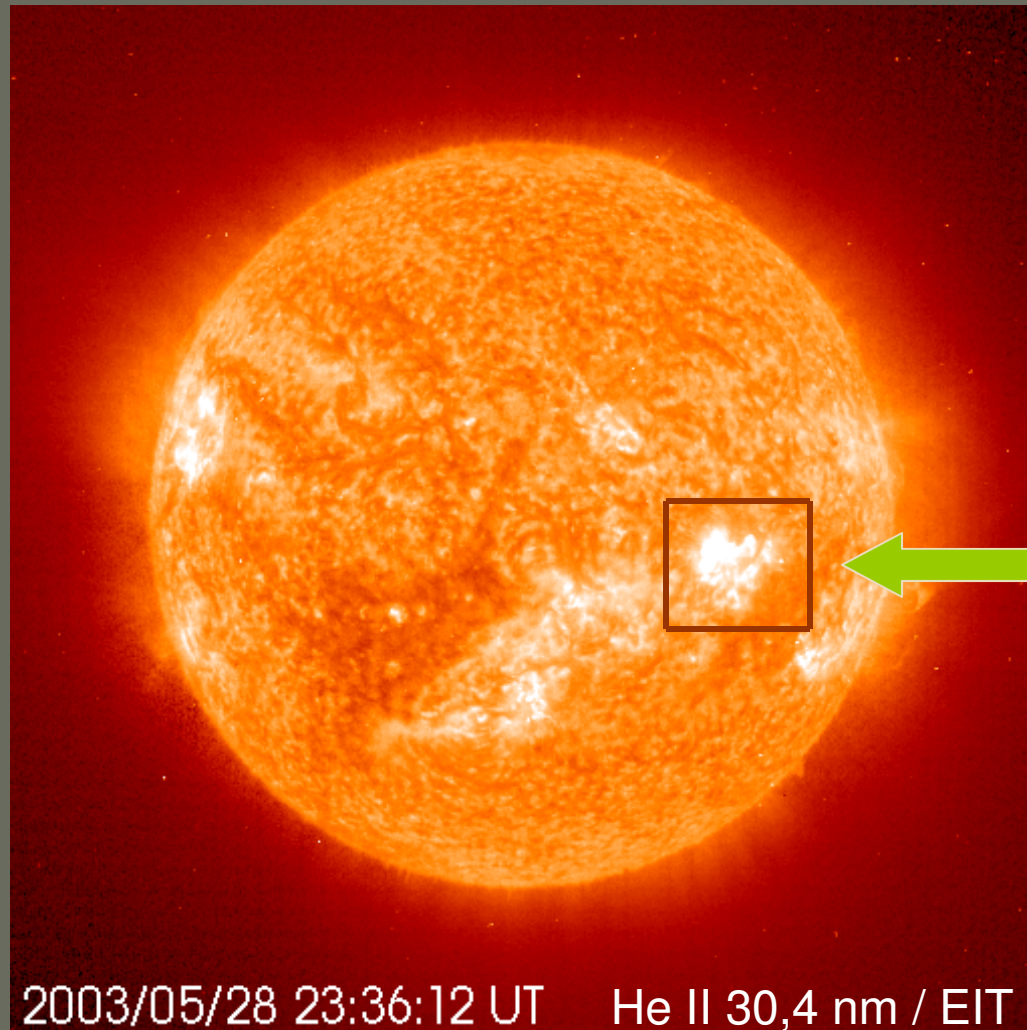


# Campagne MEDOC et orage de Mai 2003

Activité solaire intense du 26 au 29 Mai (30 éruptions)



# Le contexte : les observations SOHO /

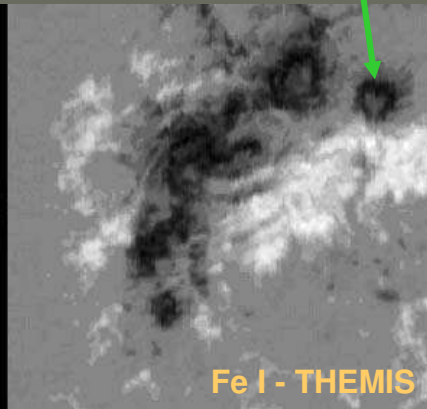
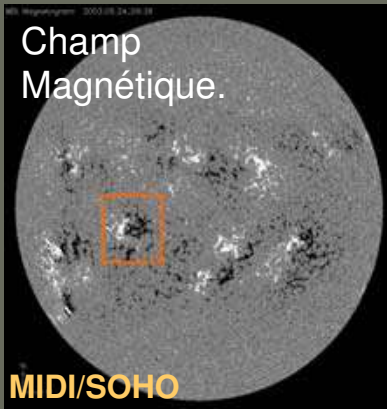


Région active  
(AR10365)

2003/05/28 23:36:12 UT He II 30,4 nm / EIT

# La source solaire : images of AR 10365

## Photosphère



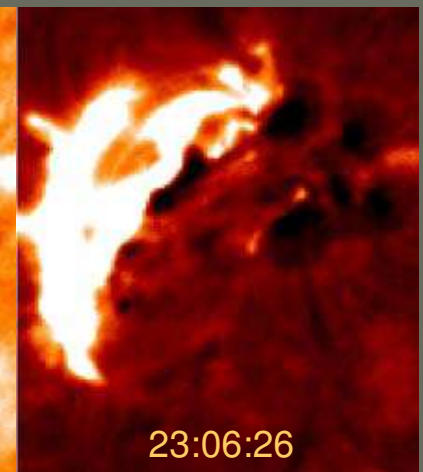
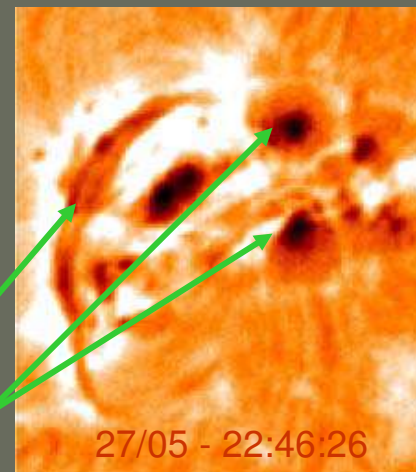
27/05 – 06:58 UT

- Structure magnétique complexe
- Plusieurs lignes d'inversion
- Emergence de flux à l'est de AR 10365 le 24/05, devenant aussi important que la région active

- Intensité maximale de  $H\alpha$  à 23:06 TU le 27/5
- Correspond à l'éruption X1.2 observée à 23:10 TU par GOES

## Chromosphère

$H\alpha$

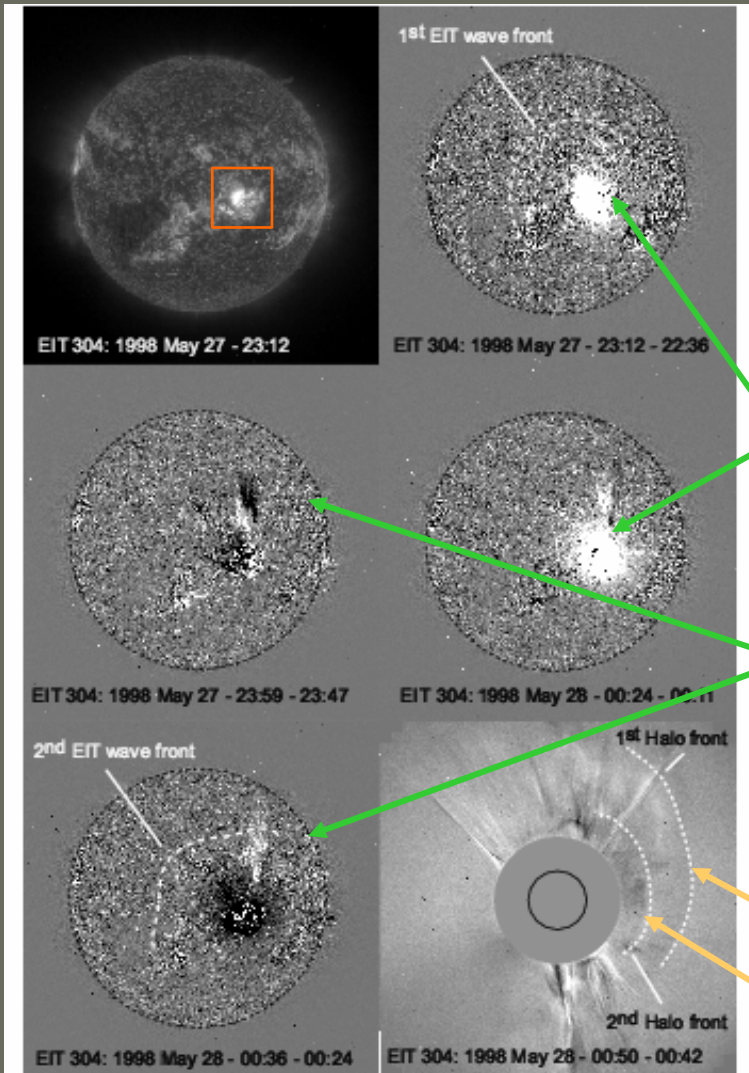


BBSO



# La source solaire : halo CMEs

## Couronne (EIT – LASCO / SOHO)



HeII 30.4 nm

- Augmentation du flux de 15-20 % lors de l'éruption
- Ejection de plasma froid venant du filament en éruption au dessus de AR
- Propagation d'ondes EIT à  $V=1000$  km/s

Eruption

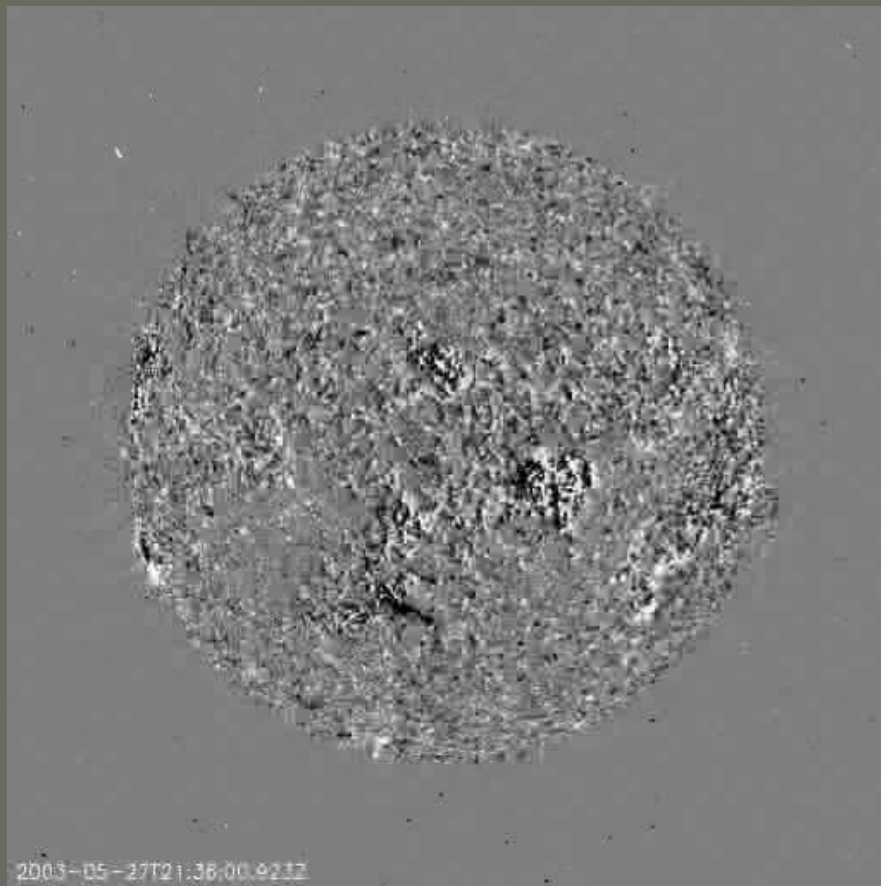
Ejection du filament

- 3 CME halos vus par LASCO:
  - (a) 27/05 - 06:50 UT,  $V=509$  km/s M1.6 à 06:26 UT
  - (b) 27/05 - 23:50 UT,  $V=960$  km/s X1.3 à 23:07 UT
  - (c) 28/05 - 00:50 UT,  $V=1370$  km/s X3.6 à 00:27 UT

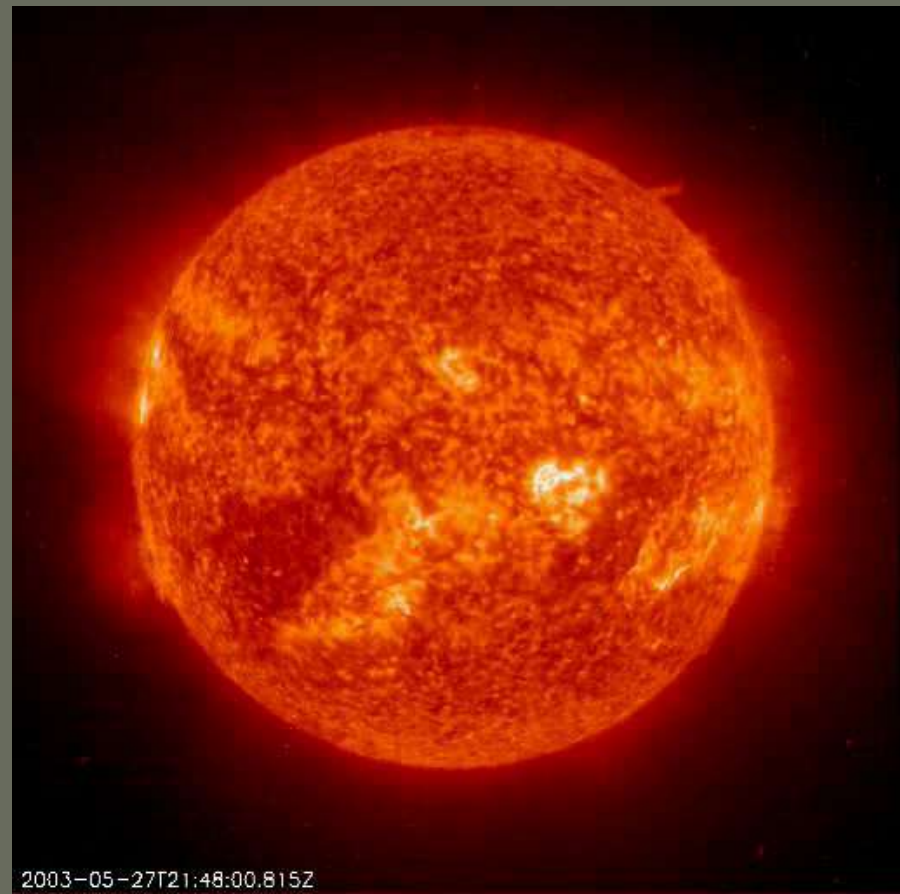
Halo CME fronts seen by LASCO

# SOHO EIT HeII 30.4 nm

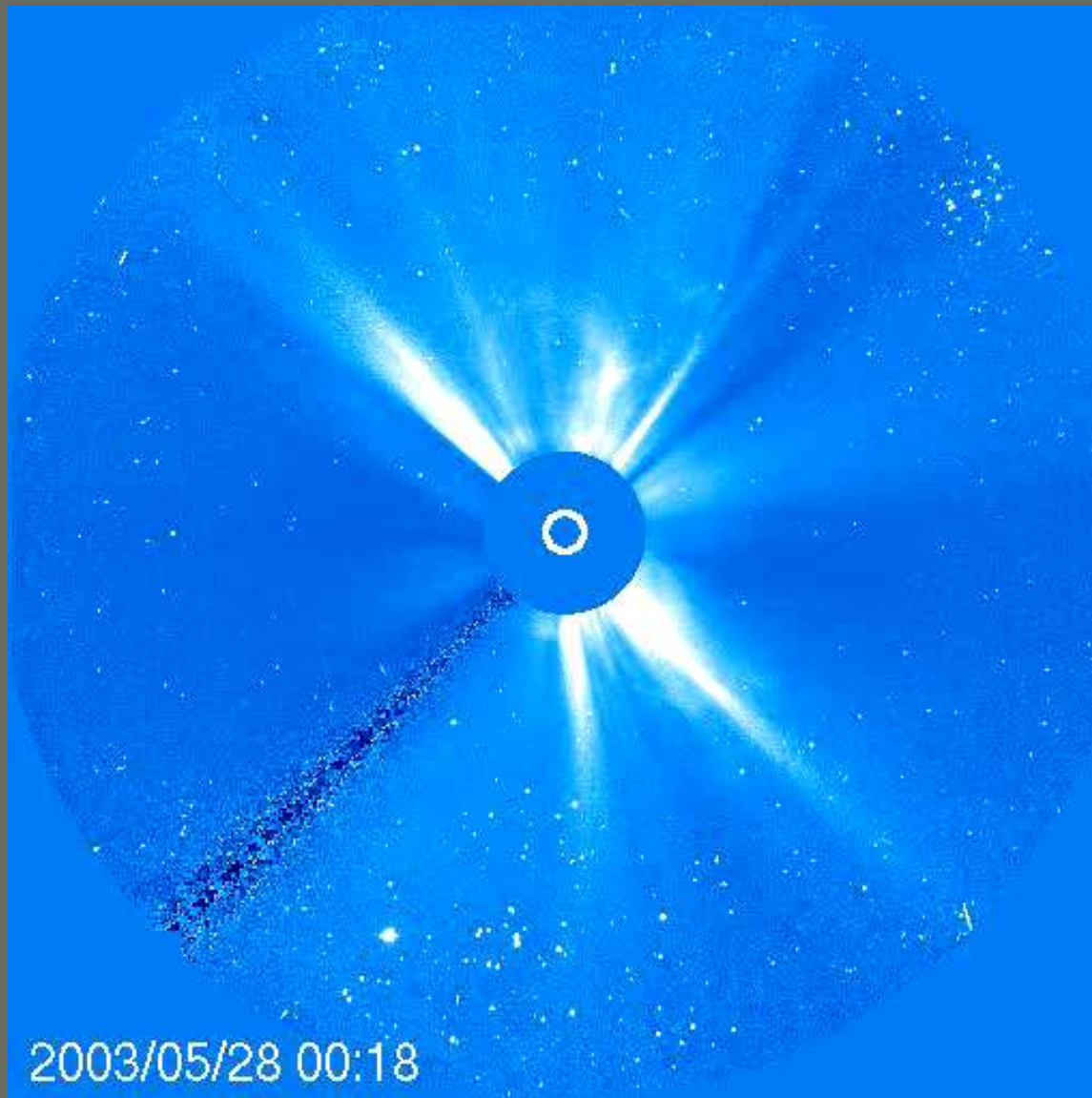
Diff



HeII -30.4



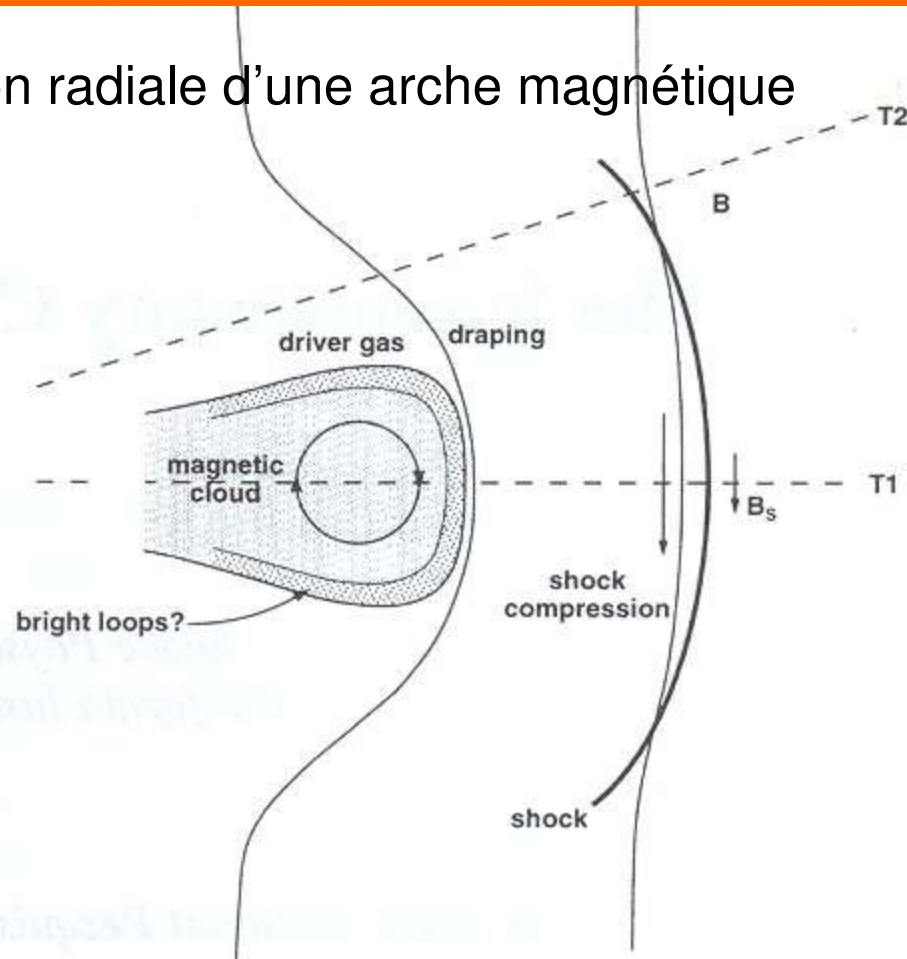
# SOHO/LASCO-C3



2003/05/28 00:18

# Nuage magnétique orage de Mai 2003

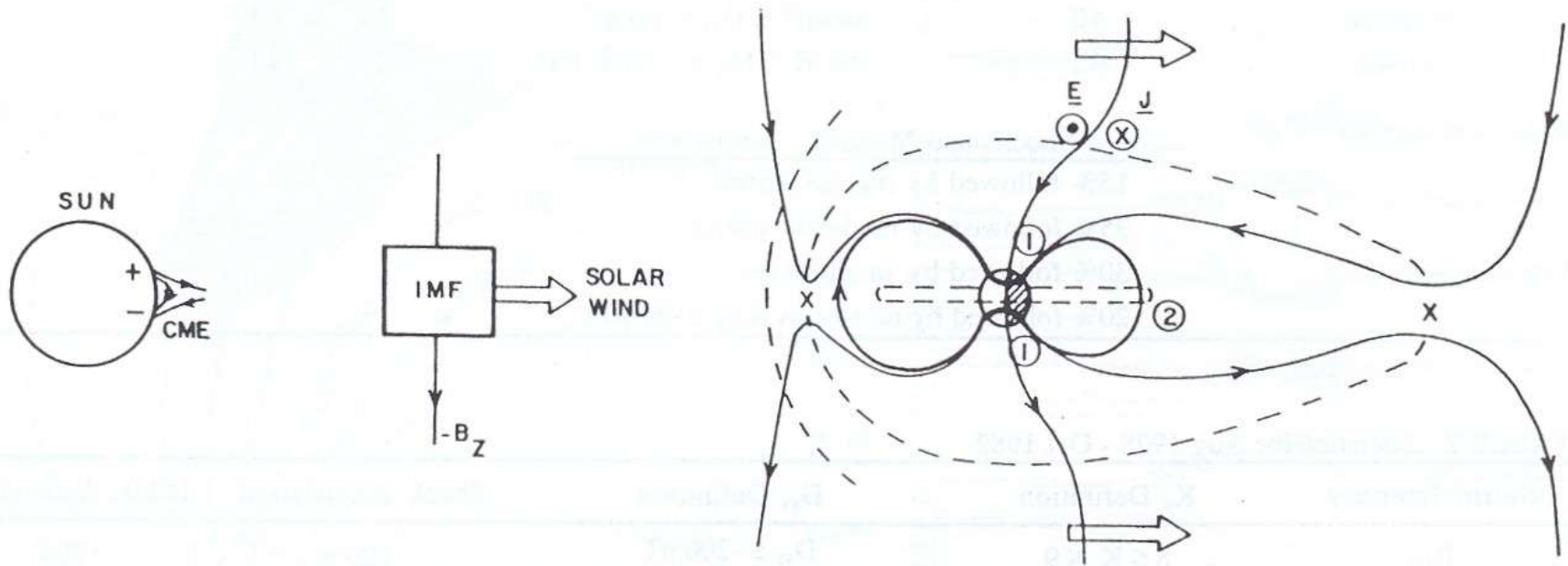
Expansion radiale d'une arche magnétique



T1: Crossing at the center of the shock/magnetic cloud structure

T2: Crossing off-center of the shock/magnetic cloud structure  
(missing the driver gas)

# Orage magnétique et reconnexion sur la face avant de la magnétosphère



CME: CORONAL MASS EJECTION

IMF: INTERPLANETARY MAGNETIC FIELD

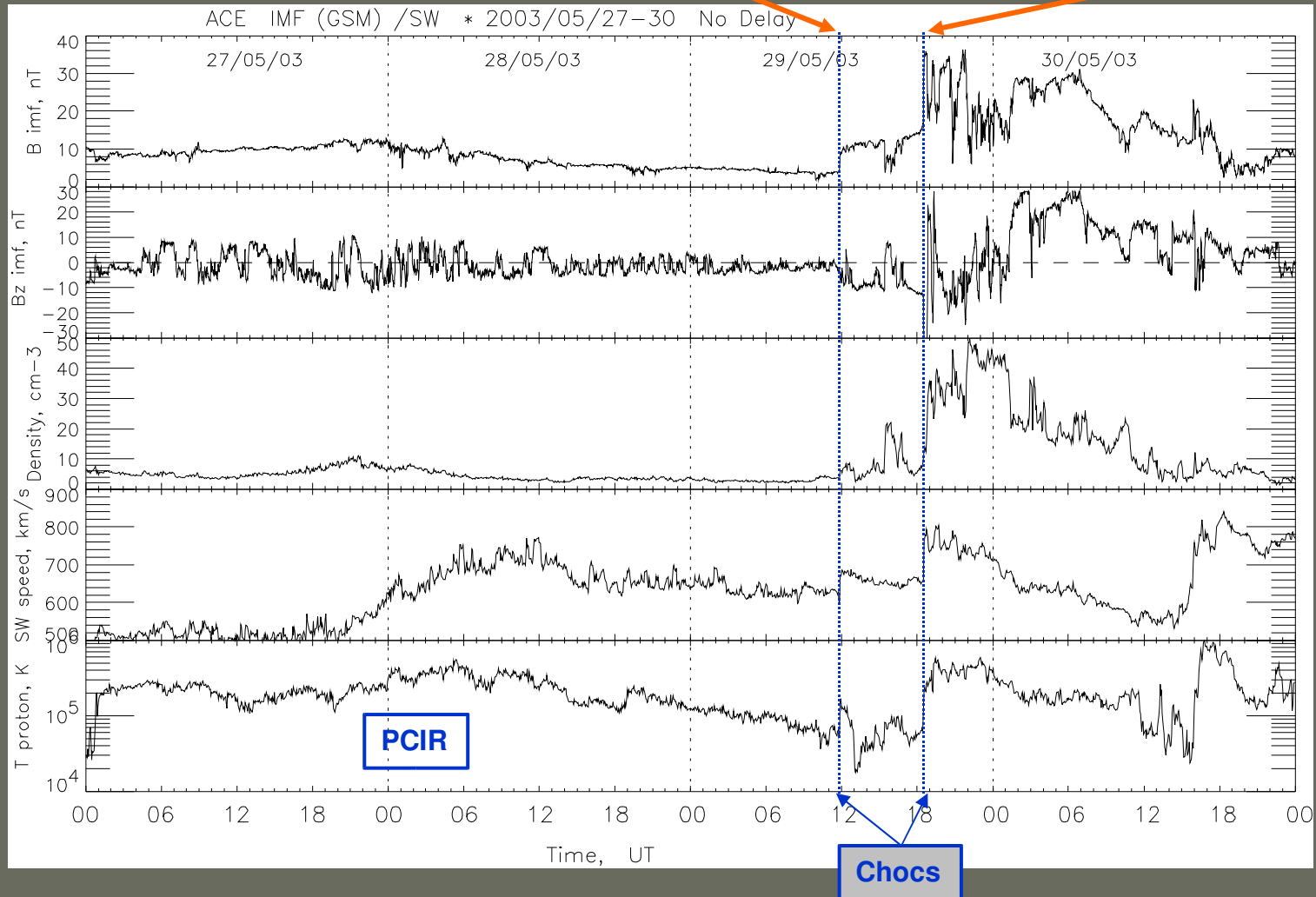
$-B_z$ : SOUTHWARD COMPONENT OF IMF

E: SOLAR WIND'S ELECTRIC FIELD  
 J: MAGNETOPAUSE CURRENTS  
 E · J: MAGNETOSPHERIC DYNAMO  
 X: RECONNECTION REGIONS  
 ①: AURORAL DISSIPATION  
 ②: RING CURRENT DISSIPATION

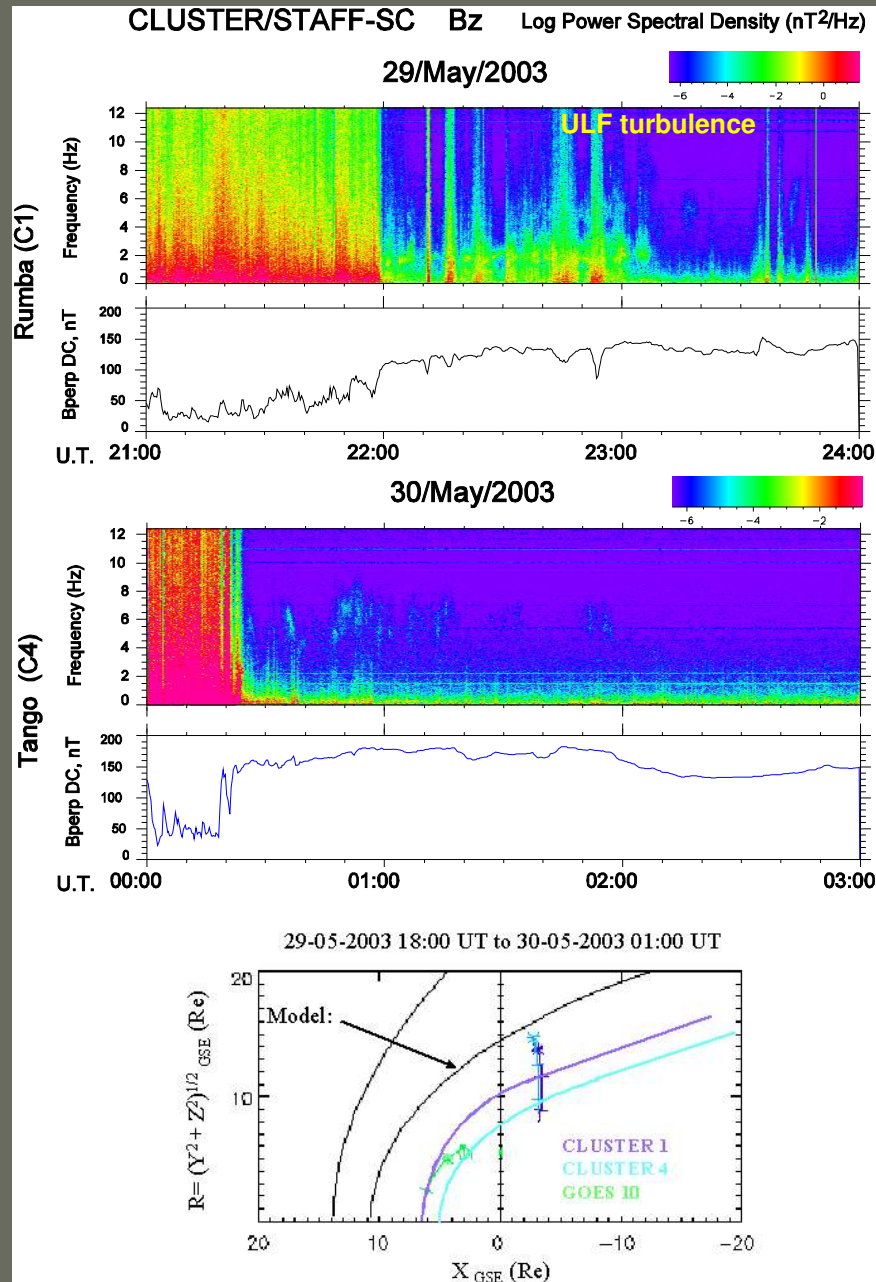
# La source solaire : couplage avec le vent solaire

Halo CME  
06:50 – 27/05

Halos CME  
23:50 – 27/05 + 00:50 – 28/05



# Compression de la magnétosphère



Satellite	UT	X, Y, Z GSM (Re)	Rs
GOES 10	29/05/03 19:00	5.49, -3.13, 0.94	6.30
Cluster C1	29/05/03 22:00	-3.47, -4.84, -9.59	6.63
Cluster C2	30/05/03 00:12	-2.67, -1.29, -8.15	5.10
Cluster C4	30/05/03 00:20	-3,05, -2.30, -8.05	5.01

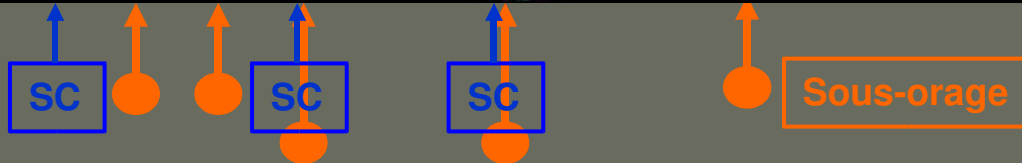
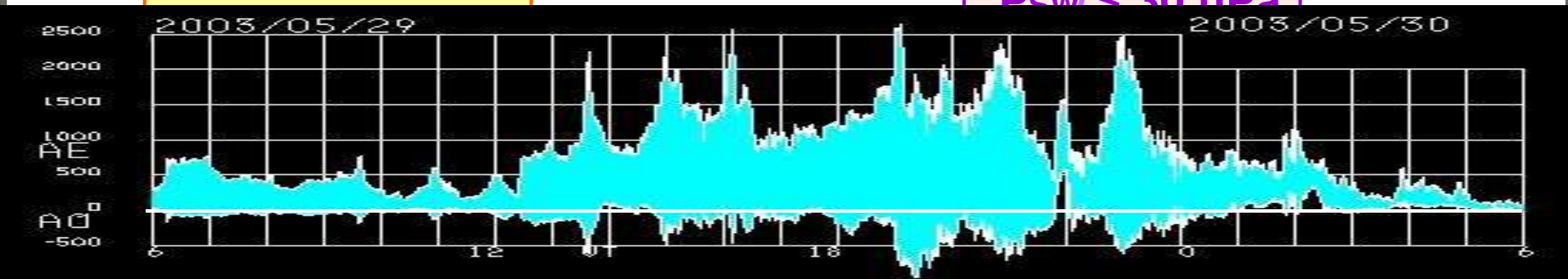
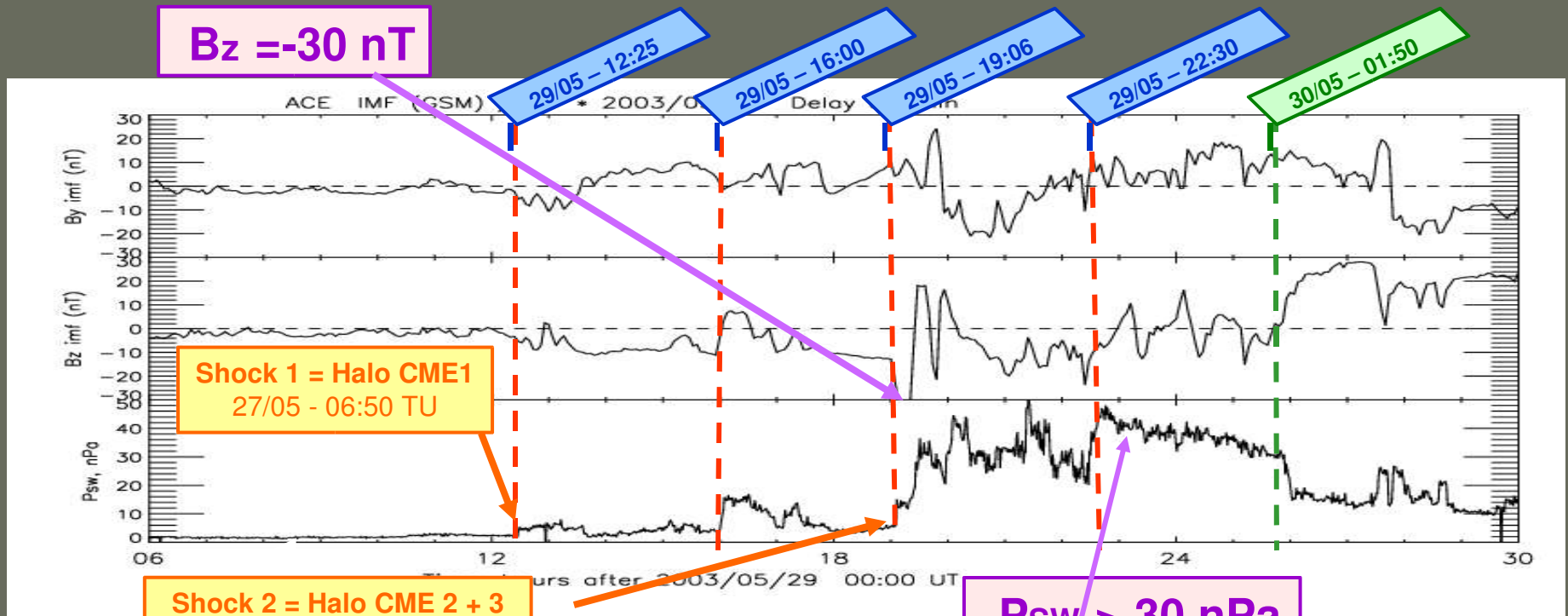
Distance du point sub-solaire de la magnétopause déduite du modèle de Sibeck et al. (1991)

# Les indices magnétiques

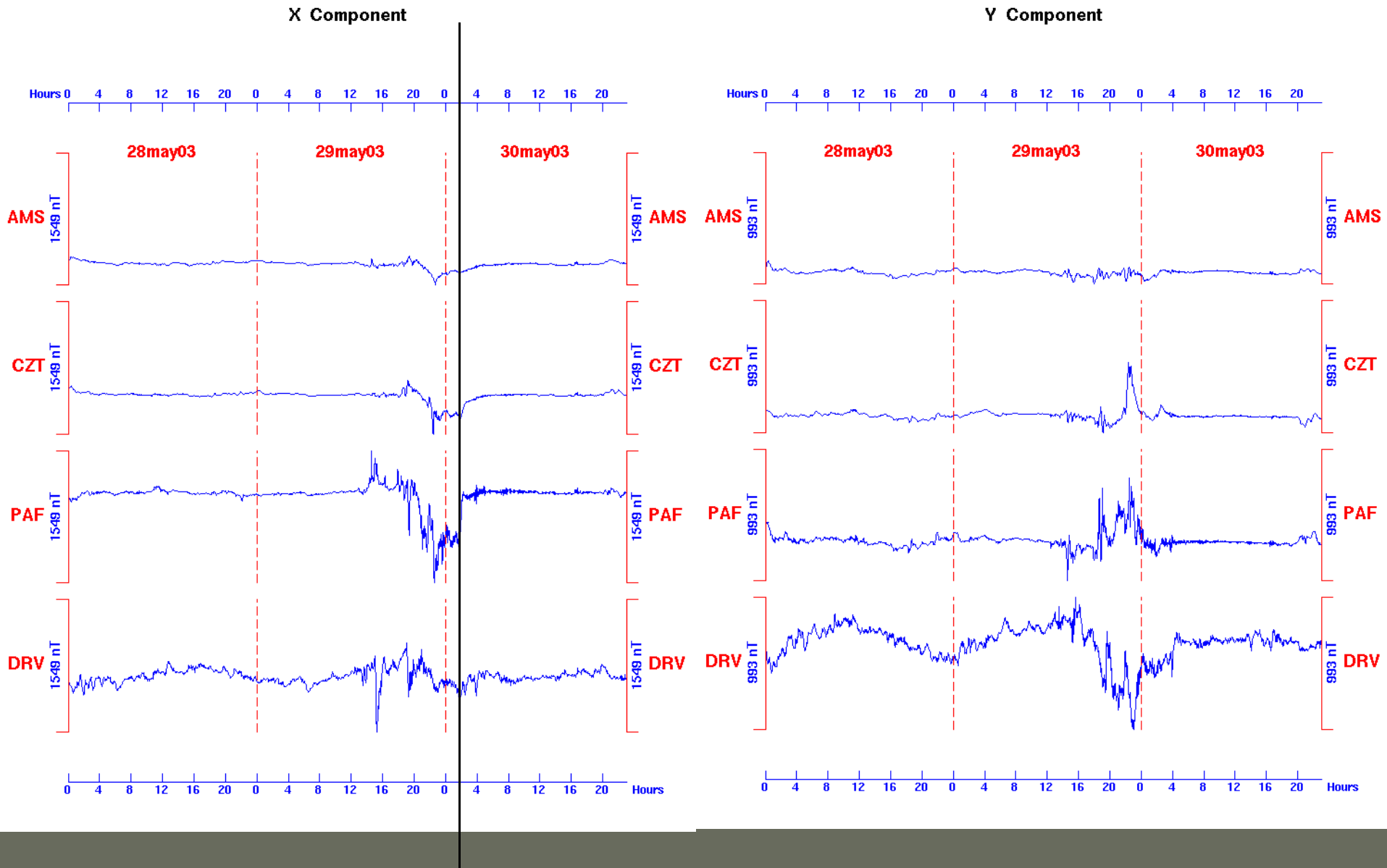
- Dst (symH) = courant annulaire (ceintures)
- PC = énergie V.S. → magnétosphère (convection et courants parallèles)
- AE (AU / AL) = intensité des électrojets auroraux
- Kp, aa (indices globaux)



# Couplage vent solaire - magnétosphère

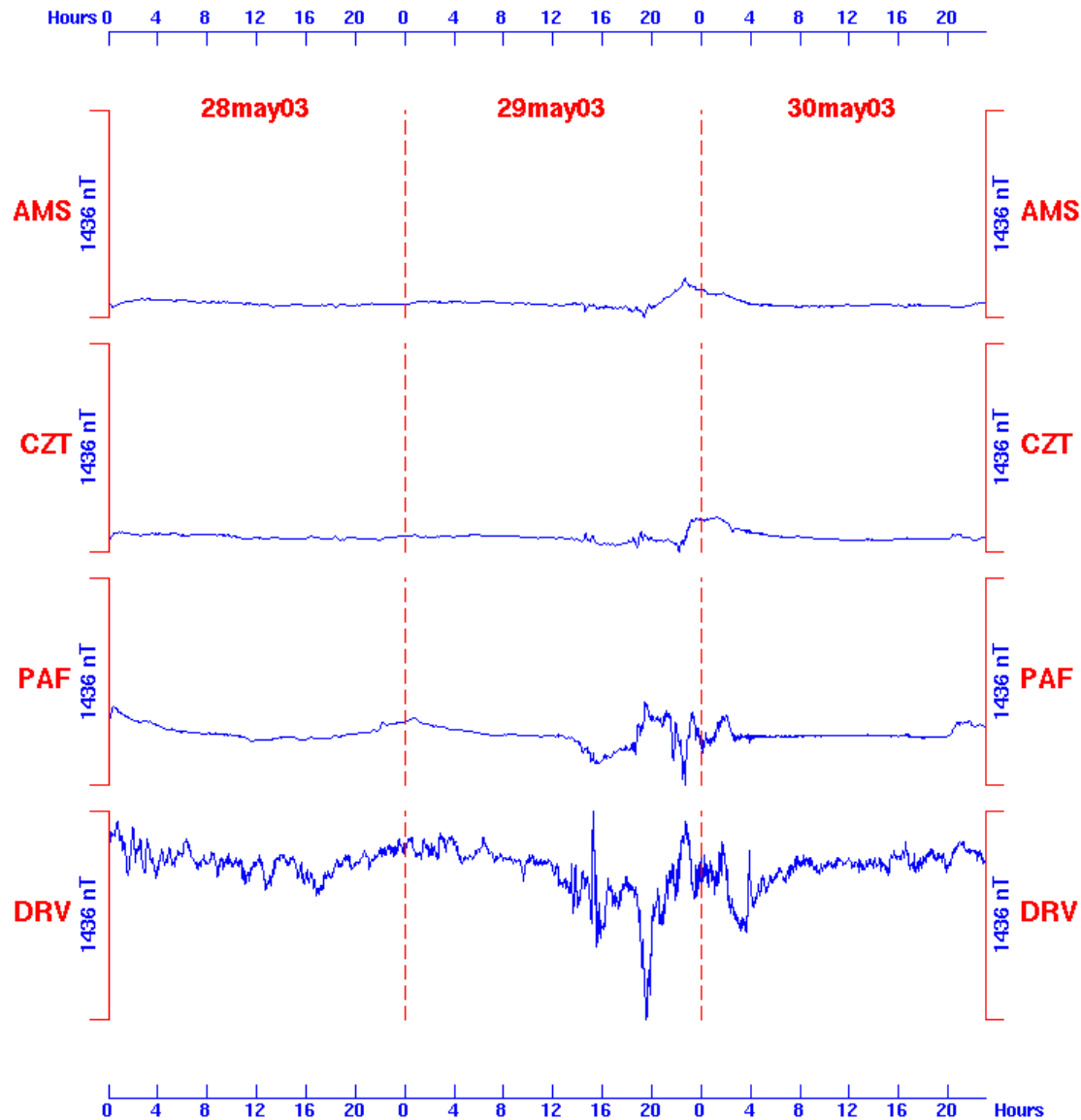


# Couplage vent solaire - magnétosphère

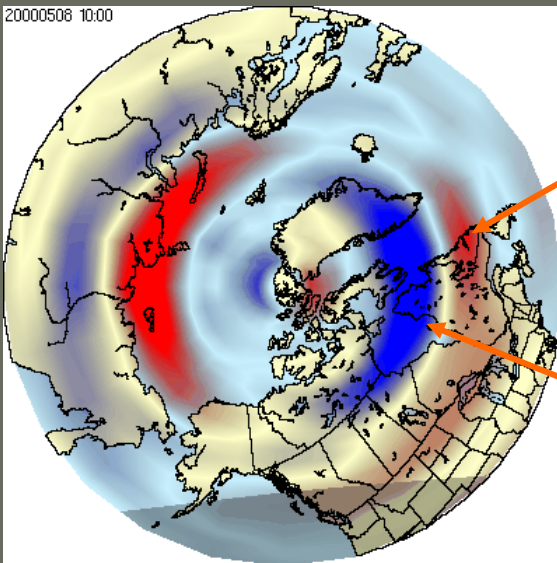
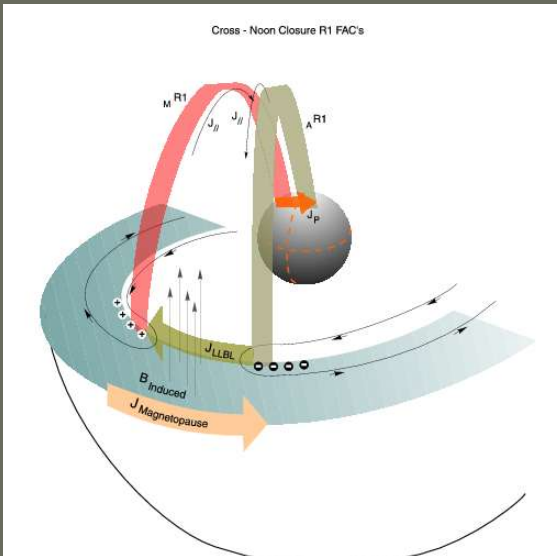


# Couplage vent solaire - magnétosphère

## Z Component

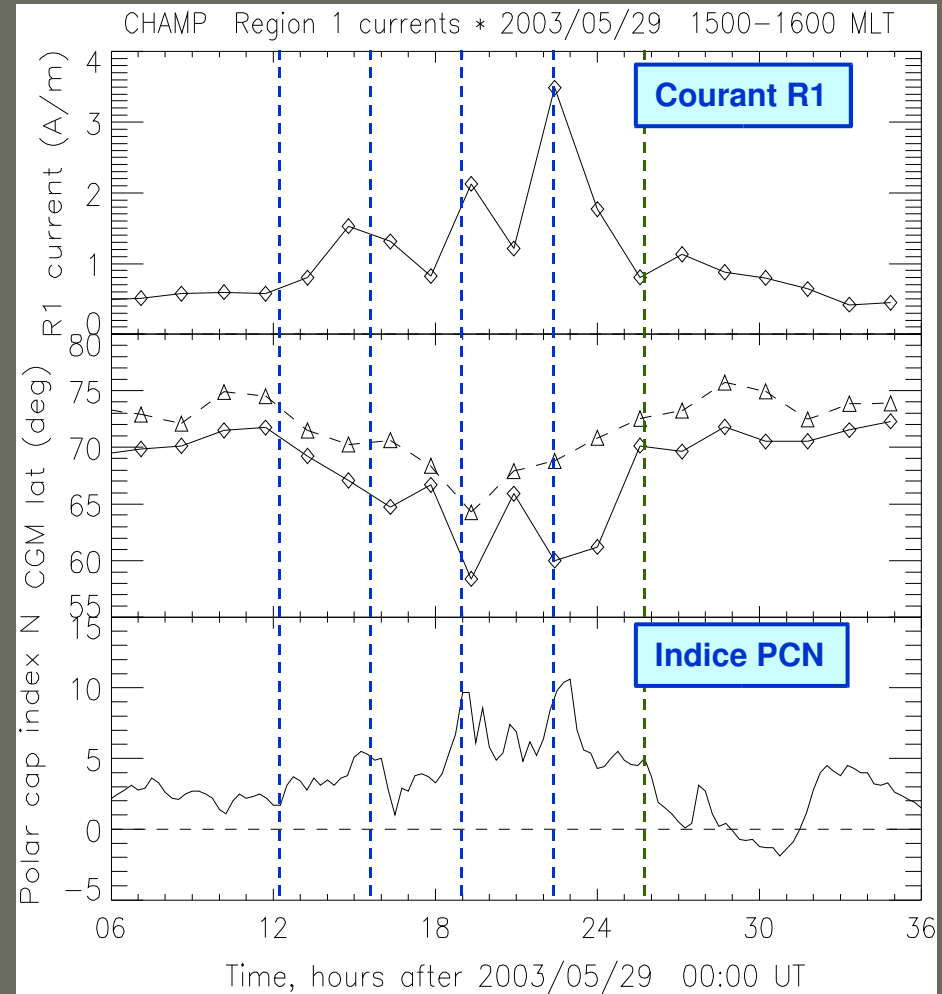


# Couplage magnétosphère – ionosphère: courants alignés



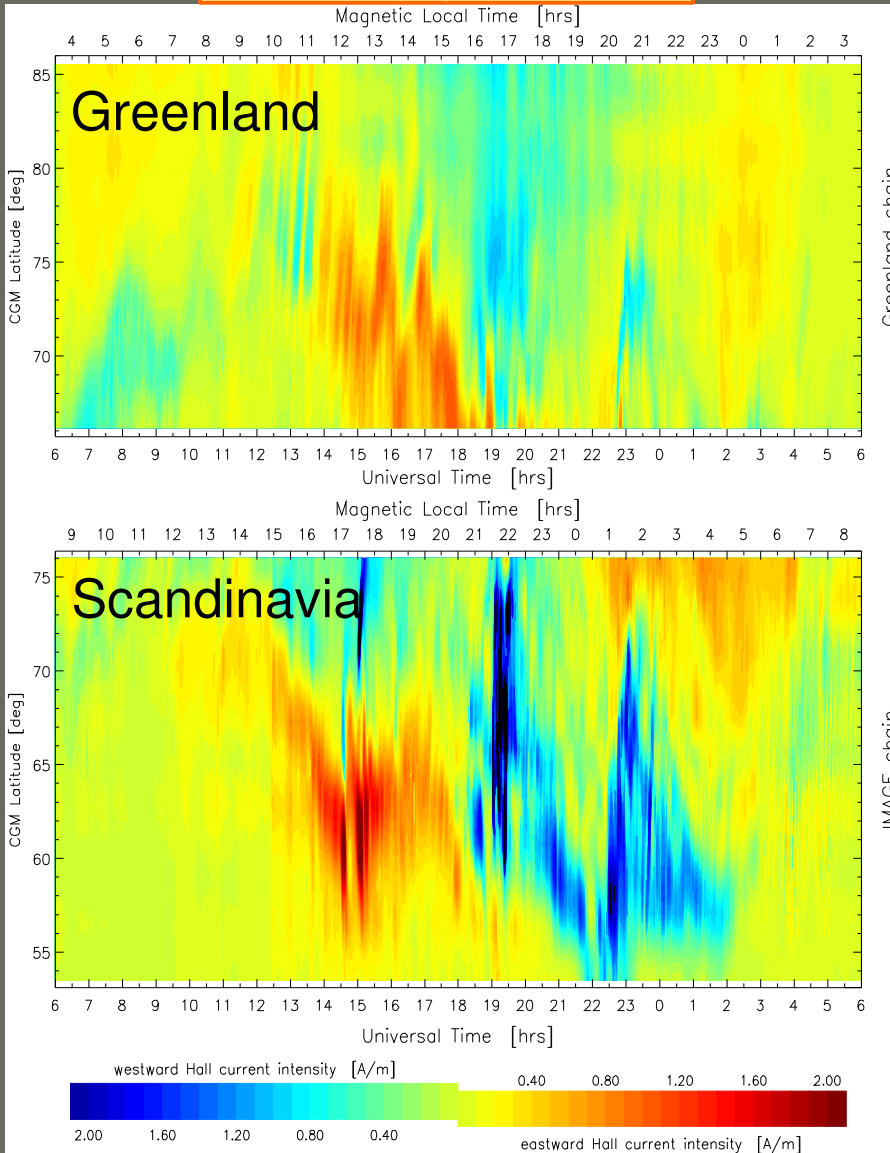
Région 2

Région 1



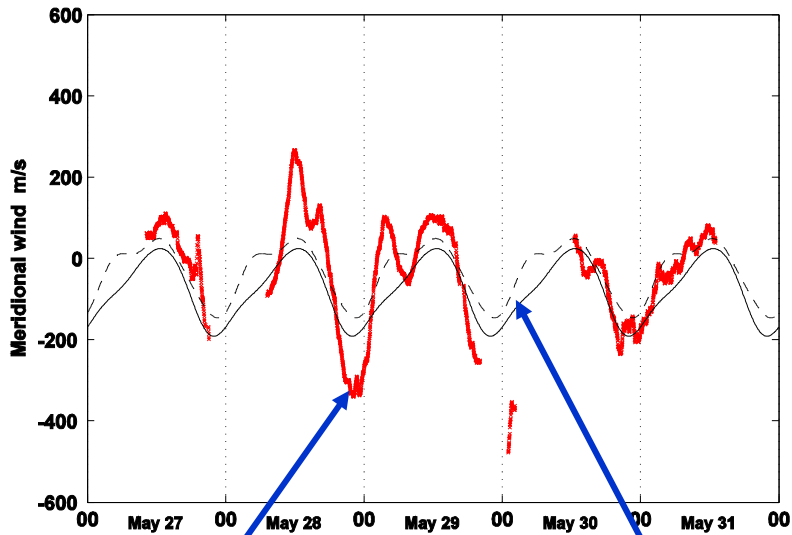
# Couplage magnétosphère – ionosphère

## Courants ionosphériques



# Réponse de la Thermosphère

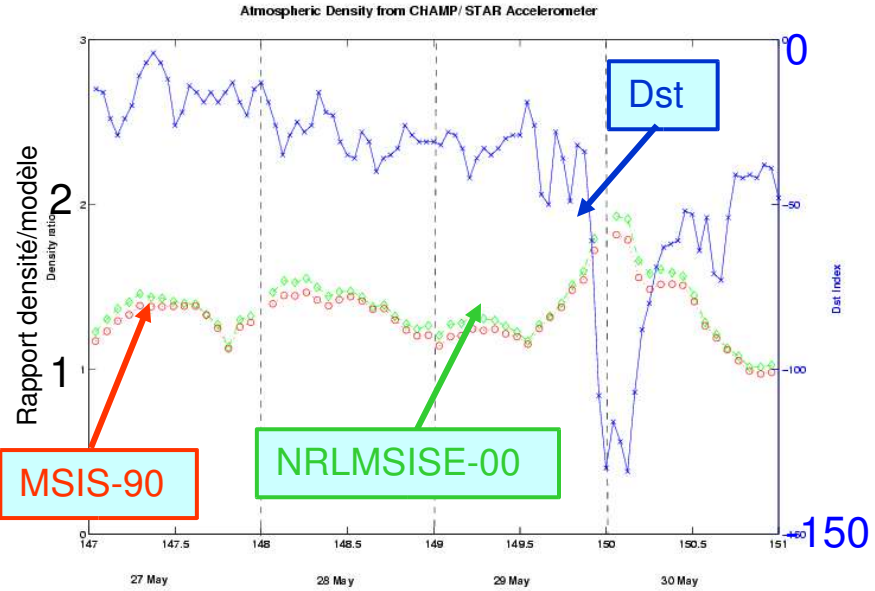
## Vent méridien



EISCAT  
250 km

Modèle

## Densité atmosphérique (CHAMP/STAR)



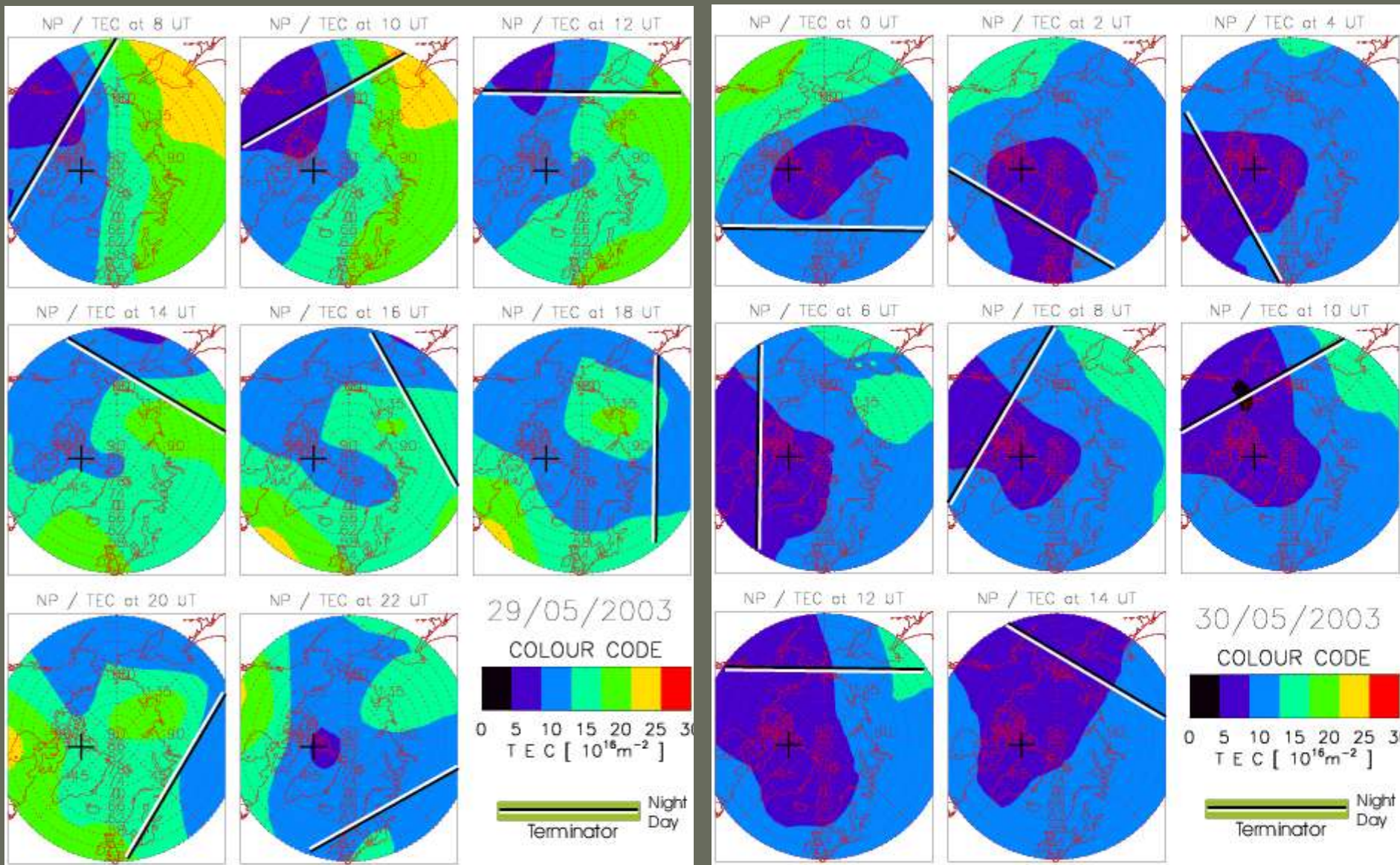
MSIS-90

NRLMSISE-00

Dst

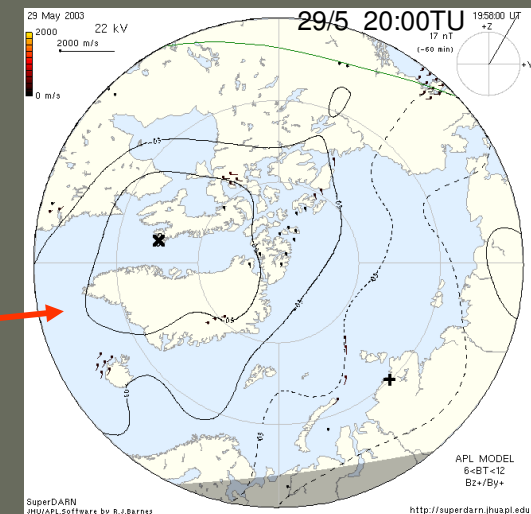
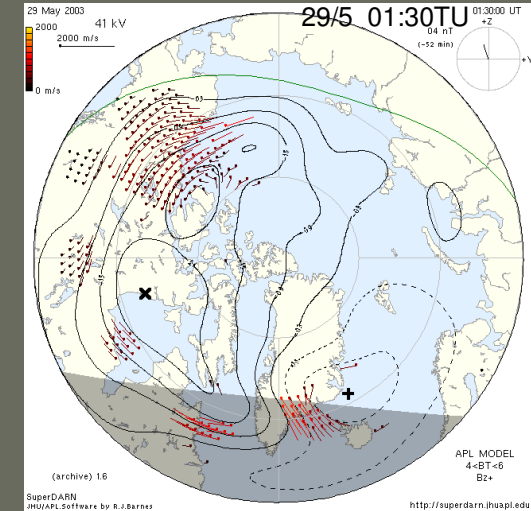
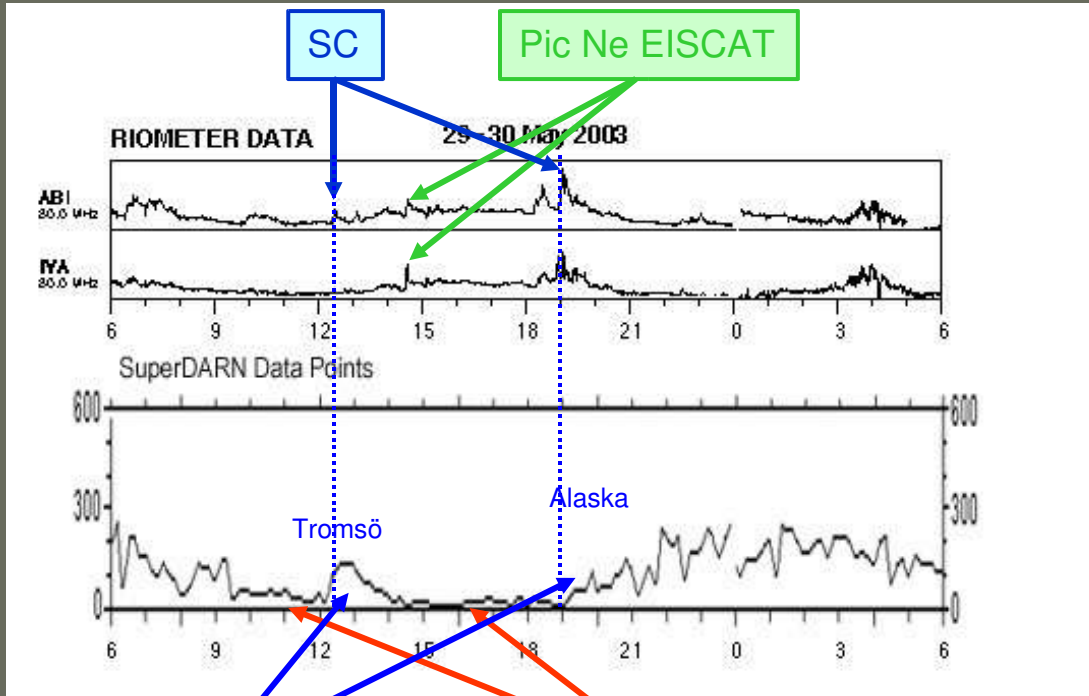
Effets atmosphériques :  
Chauffage Joule  
Entraînement par les ions

# Réponse ionosphère \* Contenu Electronique Total (TEC)



# Absorption radio HF

## Convection SuperDARN



Radars HF : Apparition des échos due à l'impulsion de pression

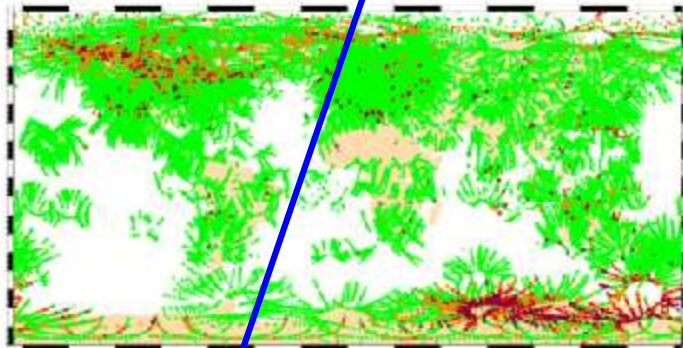
Blackout radio



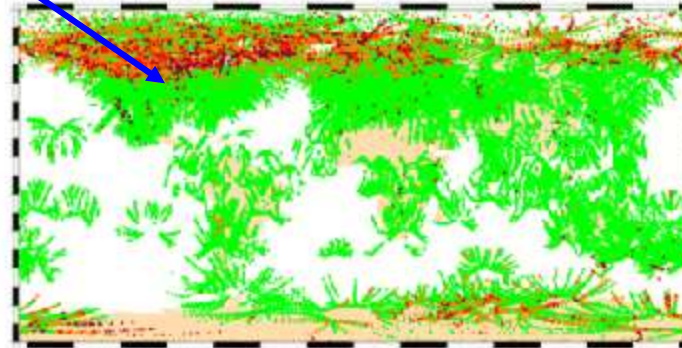
# Scintillations ionosphériques

Expansion de la zone aurorale  
vers l'équateur

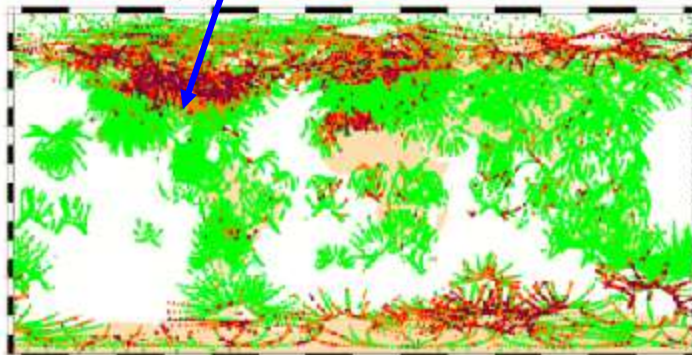
(a) 29/05/03 06:00 12:00



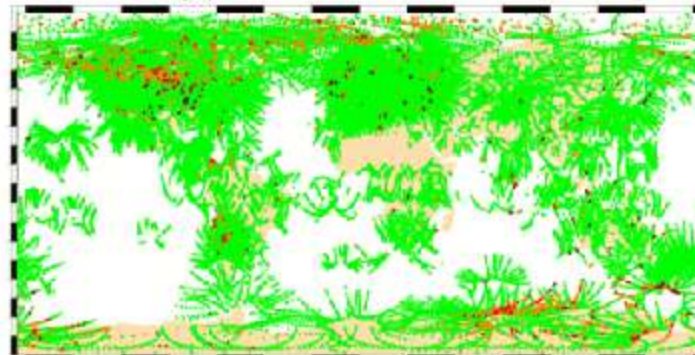
(b) 29/05/03 12:00 18:00



(c) 29/05/03 18:00 24:00



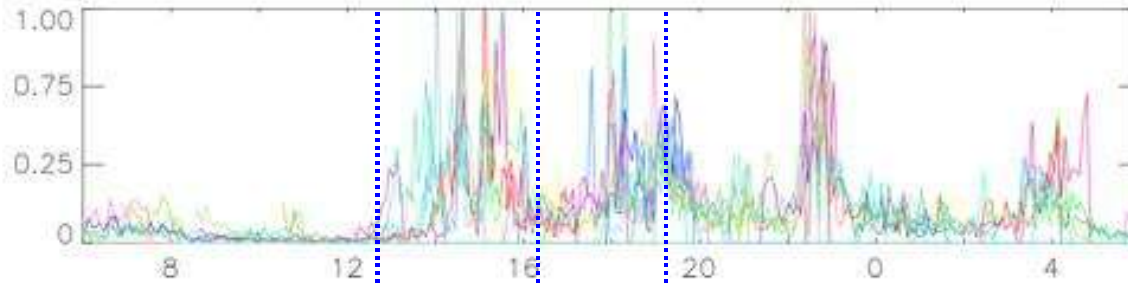
(d) 30/05/03 06:00 12:00



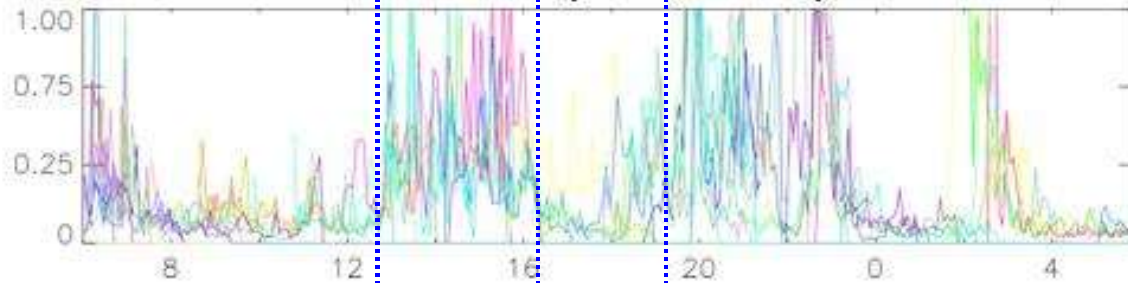
# Scintillations ionosphériques

29/05/2003

**Kiruna (68°N, 21°E)**

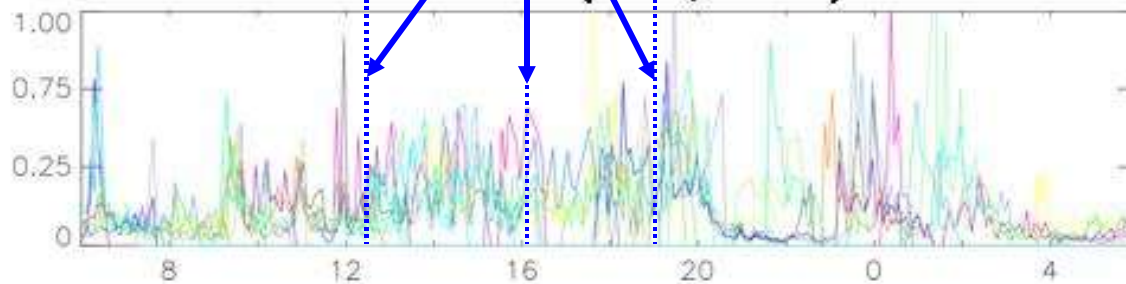


**Churchill (59°N, 266°E)**



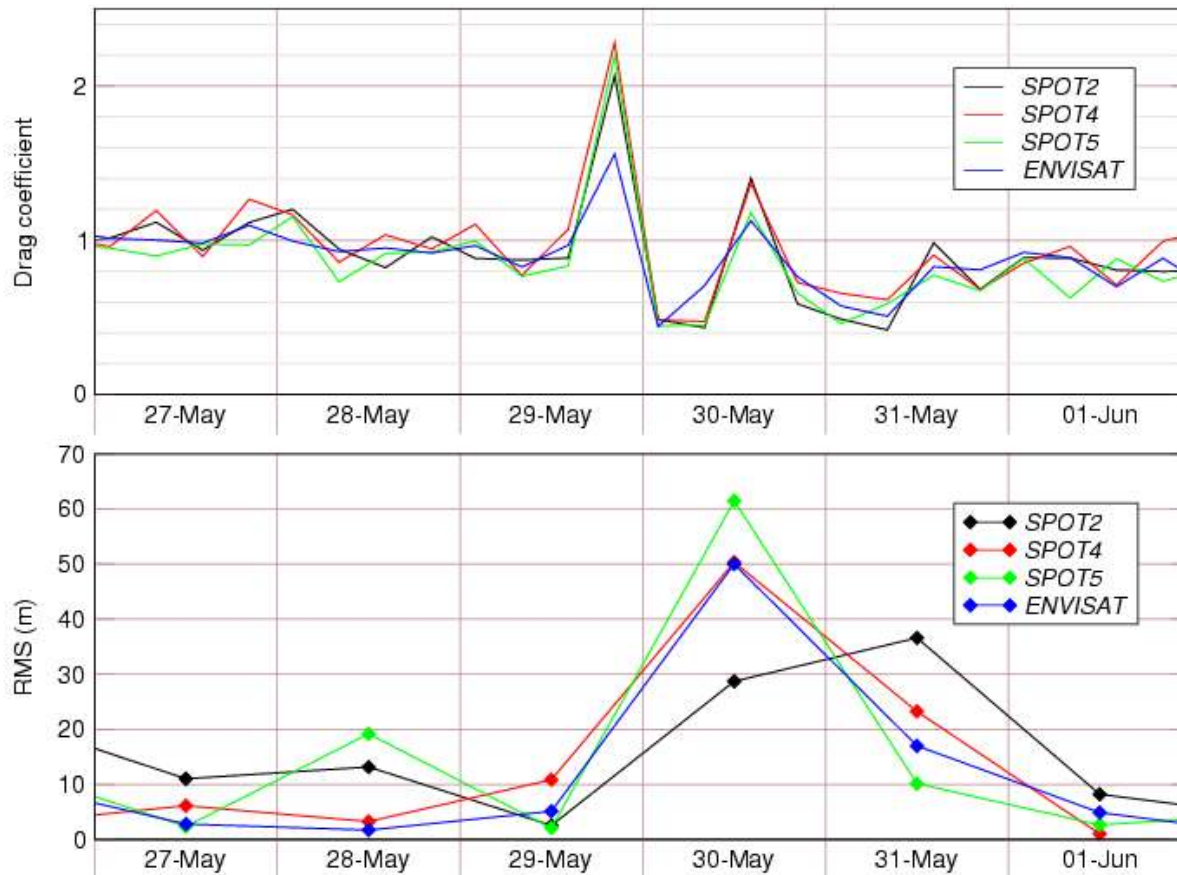
SC

**Fairbanks (65°N, 212°E)**



# Effet sur l'orbite des satellites

- Augmentation de la force de frottement due à l'augmentation de la densité atmosphérique



Coefficient de frottement estimé lors de la restitution d'orbite (modèle DTM-94)

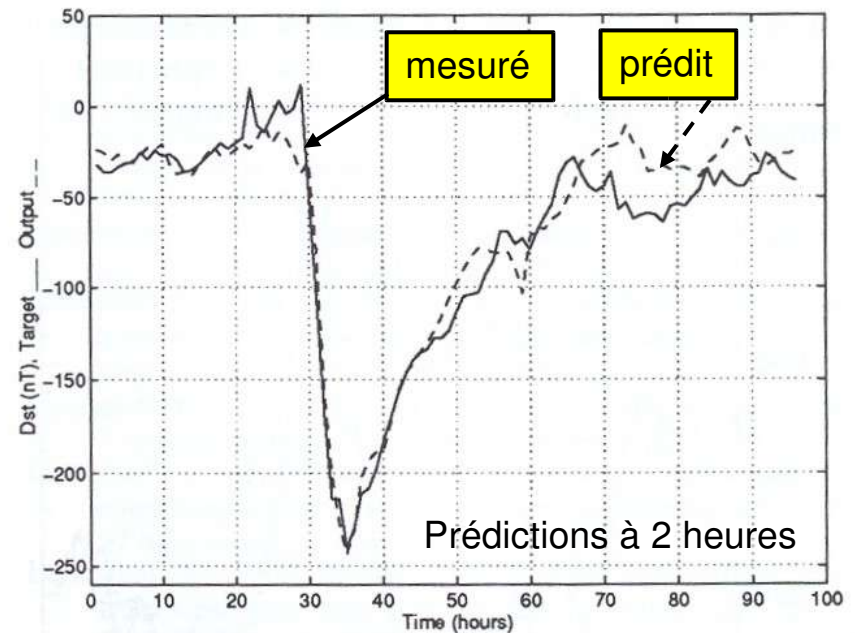
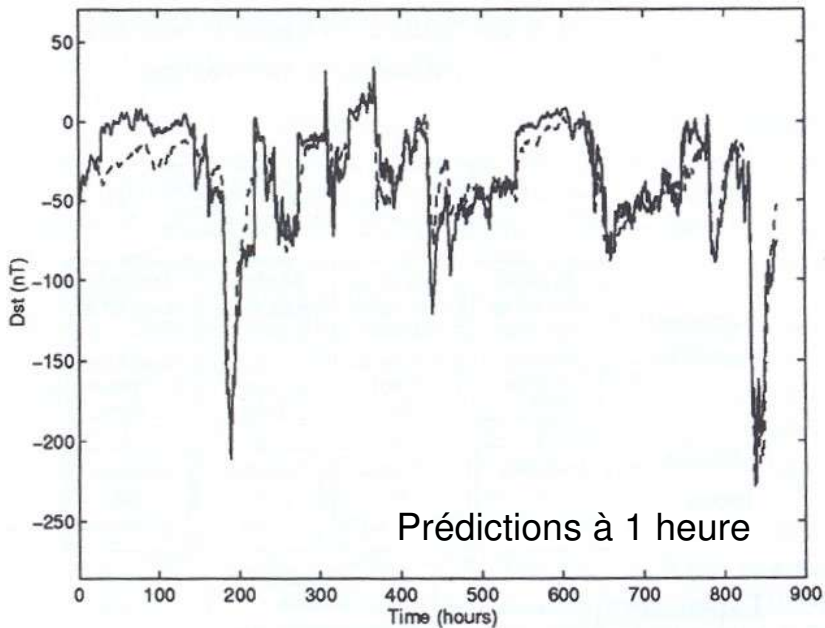
Différence entre l'orbite prévue et l'orbite réelle

# Comparaison Mai / Octobre 2003

Storms /2003	May 29	October 29	October 31	November 20
Storm intensity: Maximum Dst (nT)	-130	-363	-401	-472
Source Flare Intensity	X3.6	X17.2	X11	M3.2
Magnetic cloud at ACE  B  (nT) observed	35	50	40	56
Initial CME velocity (km/s)	1370	1785	1948	1660
ACE SW velocity (km/s)	750	2000	1500	730
Estimated delay (hours)	36	19	19	46
Maximum AE (nT)	2500	3500	3000	2500
Maximum Kp / am	9 <sub>+</sub> / 388	9 <sub>0</sub> / 551	9 <sub>0</sub> / 592	9 <sub>0</sub> / 499

- Les 4 échelles de temps qui définissent 3 niveaux de prévision
  - $T_{em}$  (soleil-magnétosphère) ~8mn : pas prévisible
  - $T_{vS}$  (L1-magnétosphère) ~1h : court terme
  - $T_{vS}$  (soleil-magnétosphère) ~1j : moyen terme
  - Rotation synodique ~1mois : long terme

# Orages magnétiques : prévision

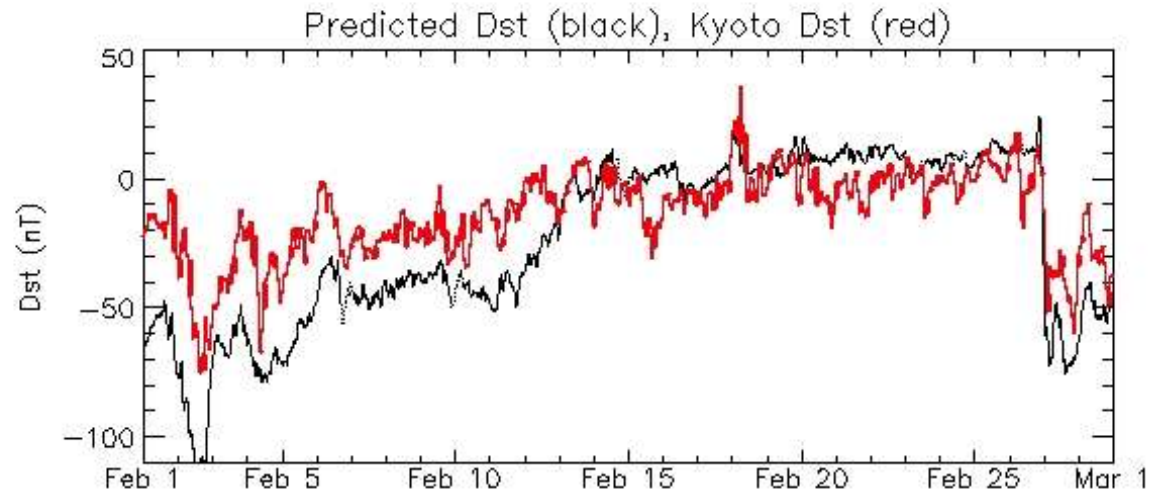


Prédiction du Dst à partir de mesures des paramètres du vent solaire au point de Lagrange par technique de réseaux neurones

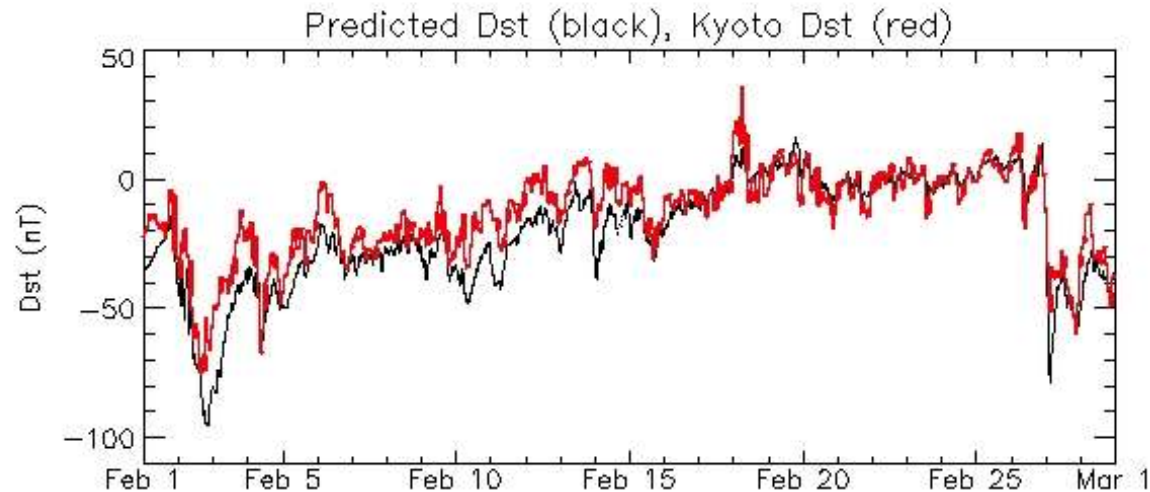
D'après Wu and Lundstedt, GRL, 23, 319, 1996 et JGR, 1996

# Orages magnétiques : prévisions court terme

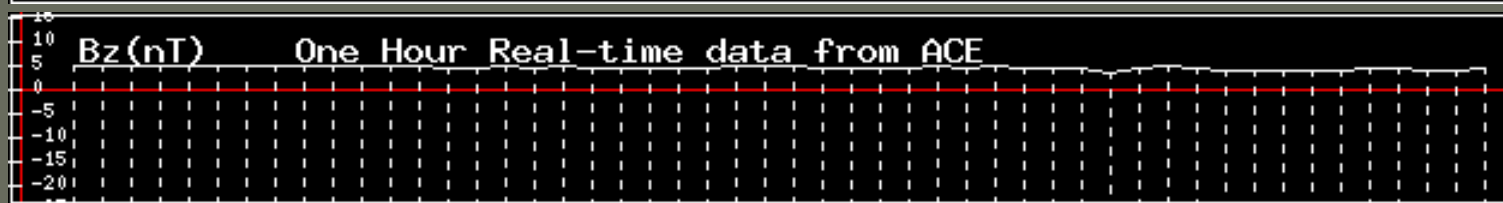
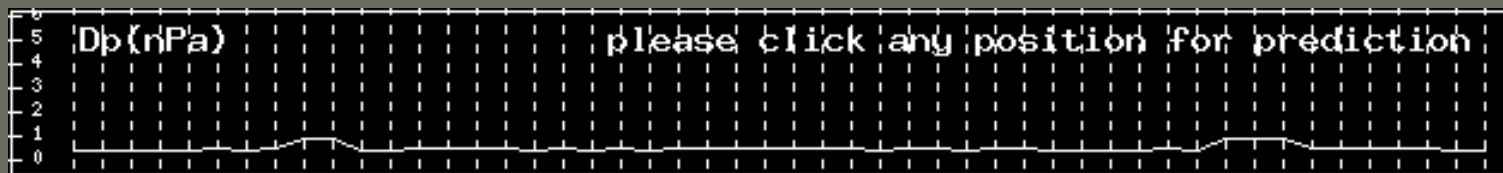
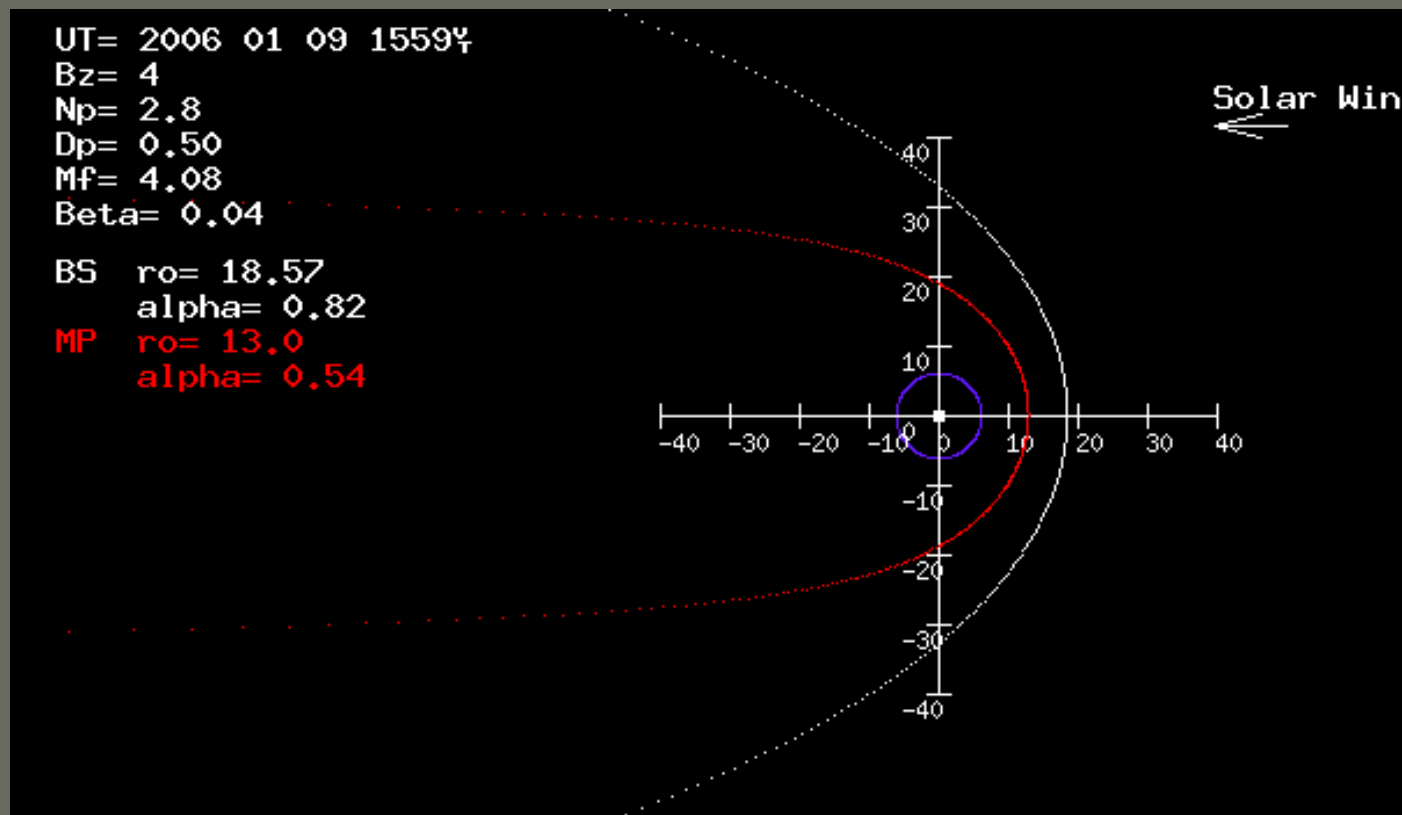
Input : ACE  
real-time data



Input : ACE  
Level 2 data



# Orages magnétiques : prévisions court terme





# Orages magnétiques : prévisions court terme

## Apport d'énergie à la magnétosphère

$$\epsilon = 2 \cdot 10^7 \cdot V_i \cdot B^2 \cdot \sin(\theta/2)^4$$

Watt,

B en nT

$V_i$  en km/s

$\theta$  IMF clock angle

## Intense Storm:

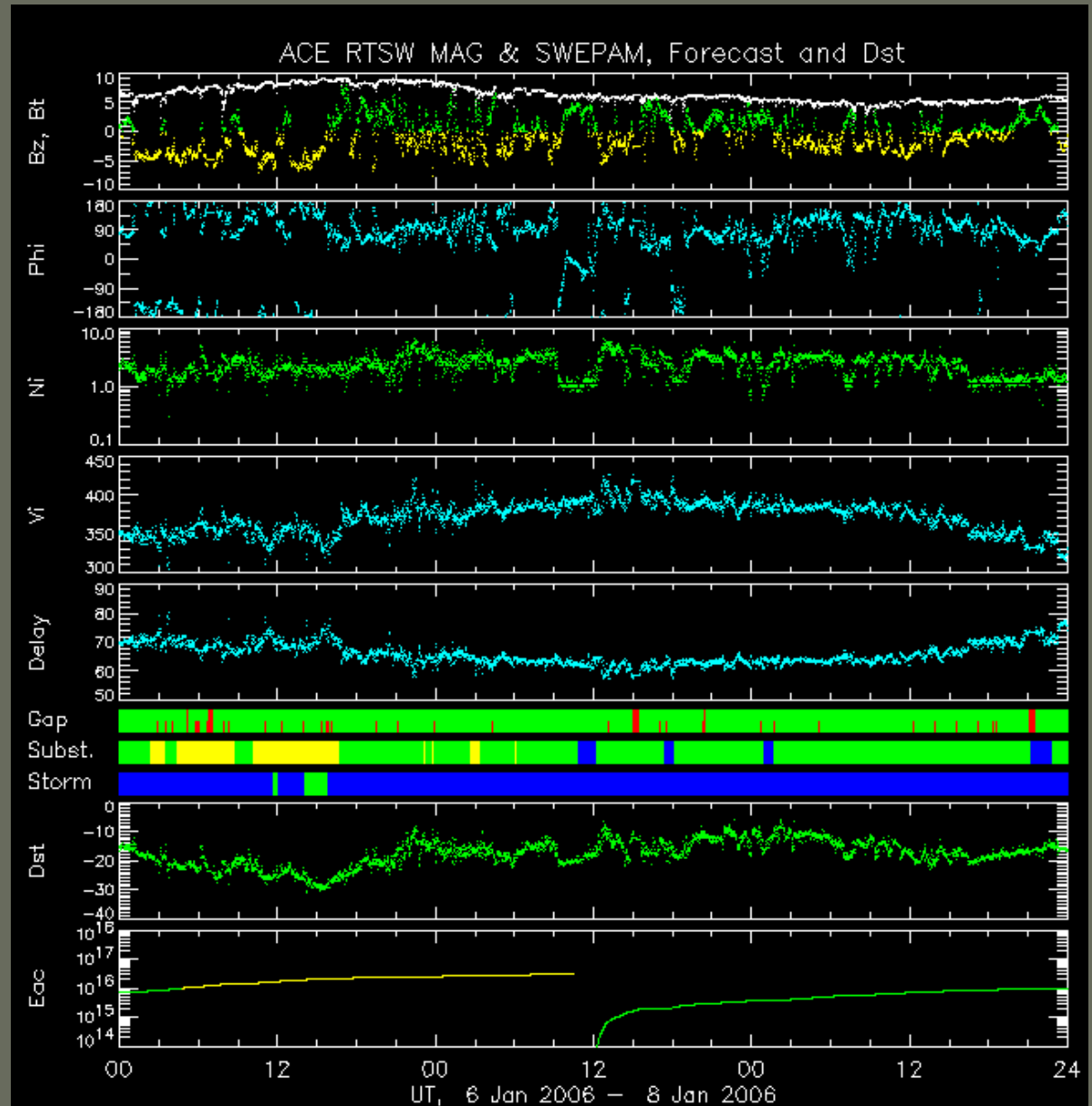
$$E_{180} = 10^{16} - 10^{17} \text{ J.}$$

$$-50 \text{ nT} < D_{st} < -200 \text{ nT.}$$

## Major storm:

$$E_{180} > 10^{17} \text{ J.}$$

$$D_{st} < -200 \text{ nT.}$$



- Moyen terme : alerte basée sur l'observation d'éruptions dans les zones actives et de halo CME (SOHO-GOES-Themis)
- Long terme : alerte basée sur l'existence de zones actives potentiellement sources d'éruptions et de halo CME (SOHO – Themis)

# Orages magnétiques : Conclusion

- Résultent d'une chaîne de processus trouvant leur origine au niveau du soleil
- CMEs à la source de l'orage magnétique
  - Associés à une région active (88% des cas)
  - Associés à l'éjection de filaments (94 %des cas)
- A 1 UA
  - Augmentation de la pression du vent solaire : compression de la magnétosphère
  - Nuage magnétique : Fortes variations de l'IMF (Reconnexion magnétique)
- Dans la magnétosphère
  - Renforcement du champ électrique magnétosphérique. Impact direct sur la circulation du plasma (convection) et du système de courants magnéto-ionosphériques
  - Orage magnétique intense ( $Dst = -131$  nT)
  - Effet Joule : Fort impact sur l'ionosphère et la thermosphère
- Perturbations variées du milieu spatial : Conséquences sur de nombreuses activités (Flux X,  $\gamma$ , particulaires destructeurs satellites, GPS,...)