

COUPLAGE HAUTES LATITUDES – BASSES LATITUDES

I. CAS DE LA PENETRATION DU CHAMP ELECTRIQUE DE CONVECTION
MAGNETOSPHERIQUE DES HAUTES LATITUDES VERS LES BASSES
LATITUDES

II. CAS DE LA PERTURBATION DYNAMO IONOSPHERIQUE

Dr Komenan Zacharie ZAKA

*Laboratoire des Sciences de la Matière et l'Energie Solaire (LASMES)
UFR SSMT, Université FHB Cocody, Abidjan, Côte d'Ivoire*

SOMMAIRE

L'OBJECTIF DE CE COURS EST DE VOUS PRESENTER LES PRINCIPAUX MECANISMES PAR LEQUELS LES CHAMP ET COURANT ELECTRIQUES DES HAUTES LATITUDES AFFECTENT LES BASSES LATITUDES

- ▶ ORIGINE DES SYSTEMES DE COURANT ELECTRIQUE DANS L'ENVIRONNEMENT TERRESTRE: LES DEUX DYNAMOS
- ▶ LA PENETRATION DU CHAMP ELECTRIQUE DE CONVECTION MAGNETOSPHERIQUE
- ▶ LA PERTURBATION DYNAMO IONOSPHERIQUE

ORIGINE DES SYSTEMES DE COURANT ELECTRIQUE

▶ DEUX EFFETS DYNAMOS:

LA DYNAMO IONOSPHERIQUE RÉGULIÈRE

LA DYNAMO VENT SOLAIRE
MAGNÉTOSPHÈRE



SYSTÈMES DE COURANTS CIRCULANT

DANS LA MAGNÉTOSPHÈRE ET DANS L'IONOSPHERE



VARIATIONS DU CHAMP MAGNÉTIQUE
TERRESTRE

LA DYNAMO IONOSPHERIQUE REGULIERE

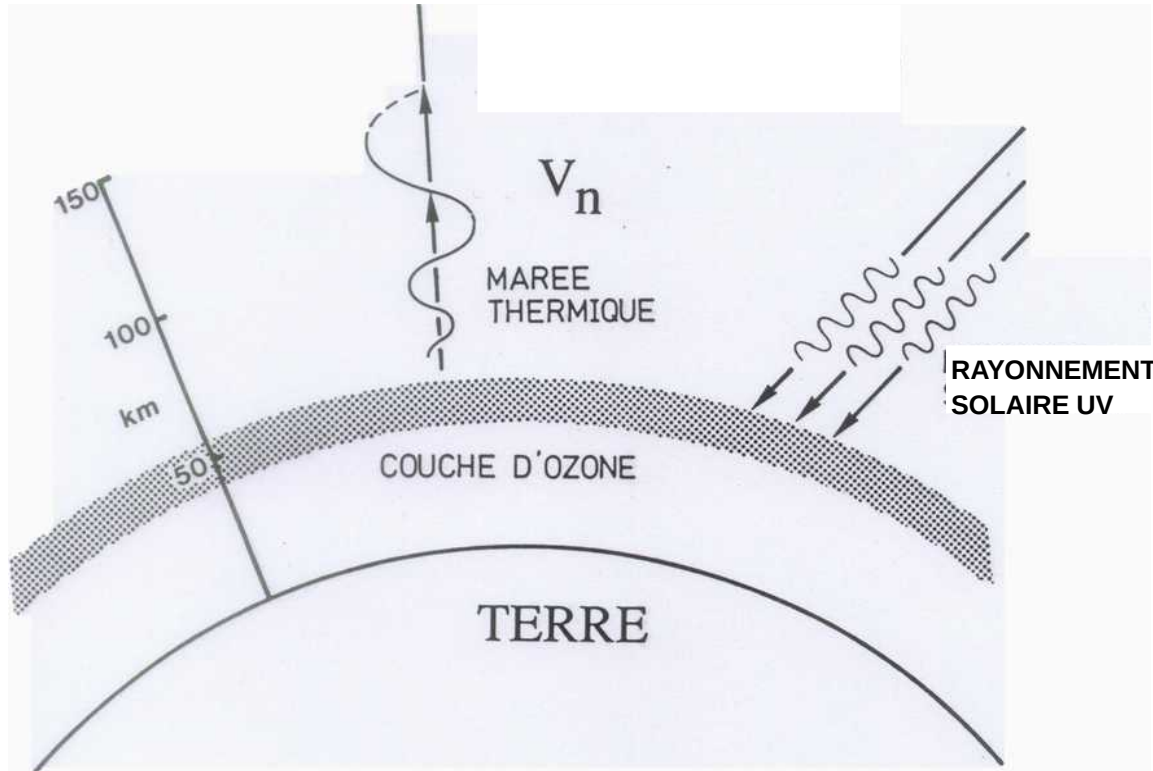


FIGURE 2: SOURCE PRINCIPALE DES COURANTS ELECTRIQUES IONOSPHERIQUES: LES MAREES ATMOSPHERIQUES (Evans, Rev. Geophys. Space Phys., 16, 195, 1978)

- L'absorption du rayonnement solaire UV par l'ozone et la vapeur d'eau de la stratosphère et l'oxygène moléculaire de la basse thermosphère engendre des oscillations de l'atmosphère neutre organisées à l'échelle planétaire (marées thermiques).
- Dans la région dynamo (90-160 km) l'atmosphère neutre majoritaire entraîne à travers les lignes de force du champ magnétique une partie du fluide ionisé sous l'action des collisions créant une vitesse différentielle entre ions et électrons source primaire des courants dynamo (J_d)

COURANT DYNAMO : $J_d = \sigma (V_n \wedge B)$

- La charge d'espace ainsi créée engendre le E_p qui tend à créer un courant J_p opposé à celui qui le génère

COURANT DE POLARISATION : $J_p = \sigma E_p$

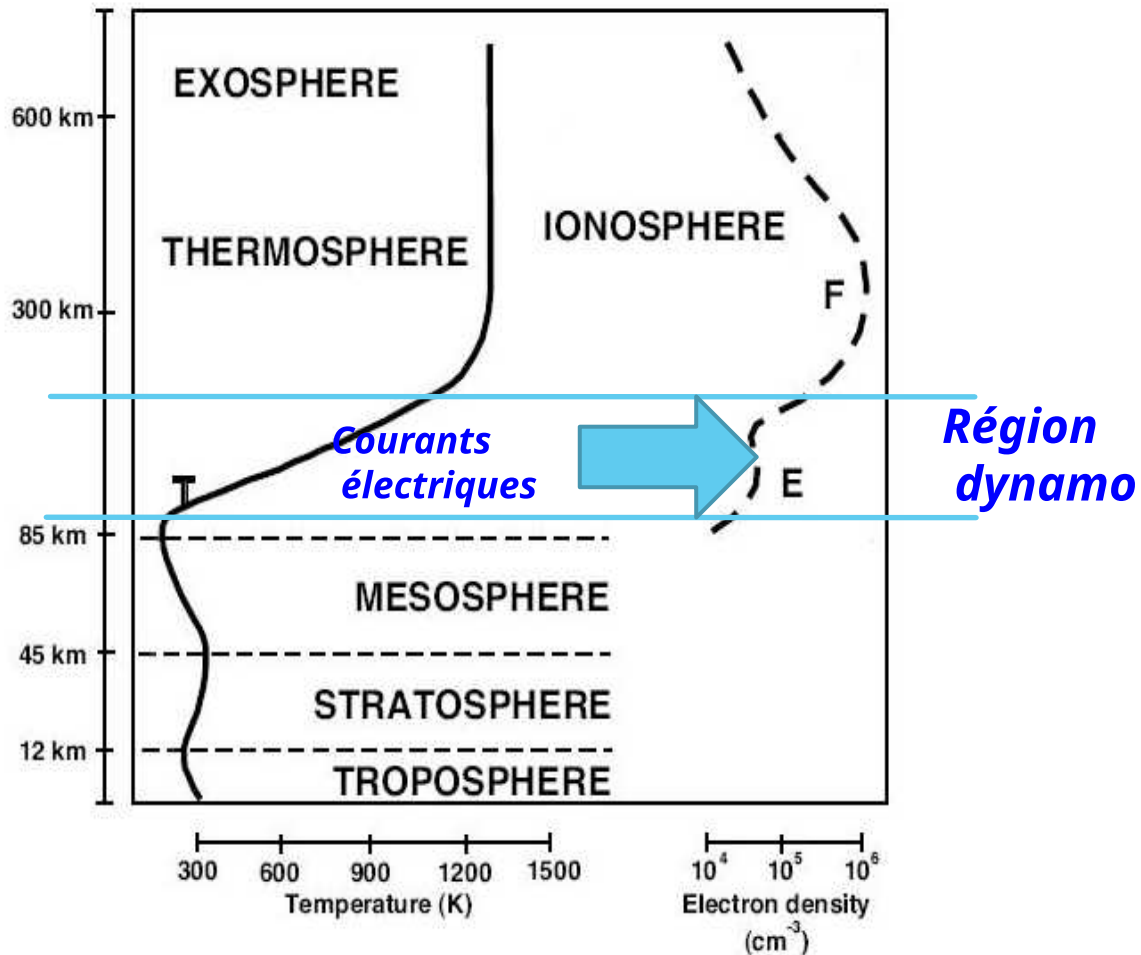
LA LOI D'OHM IONOSPHERIQUE : $J = \sigma (E_p + V_n \wedge B)$

σ : la conductivité électrique de la région dynamo

LA DYNAMO IONOSPHERIQUE REGULIERE

Processus diurne dans la région E de l'ionosphère (90km – 150km) entraîne la circulation de courants ionosphériques réguliers S_q ou S_R , produits essentiellement en période de calme magnétique et responsables de la variation régulière diurne du champ magnétique terrestre

L'ENVIRONNEMENT TERRESTRE



L'ionosphère résulte de la photo-ionisation des espèces chimiques atmosphériques par Les rayons solaires

Effet magnétique :

La loi d'Ampère :

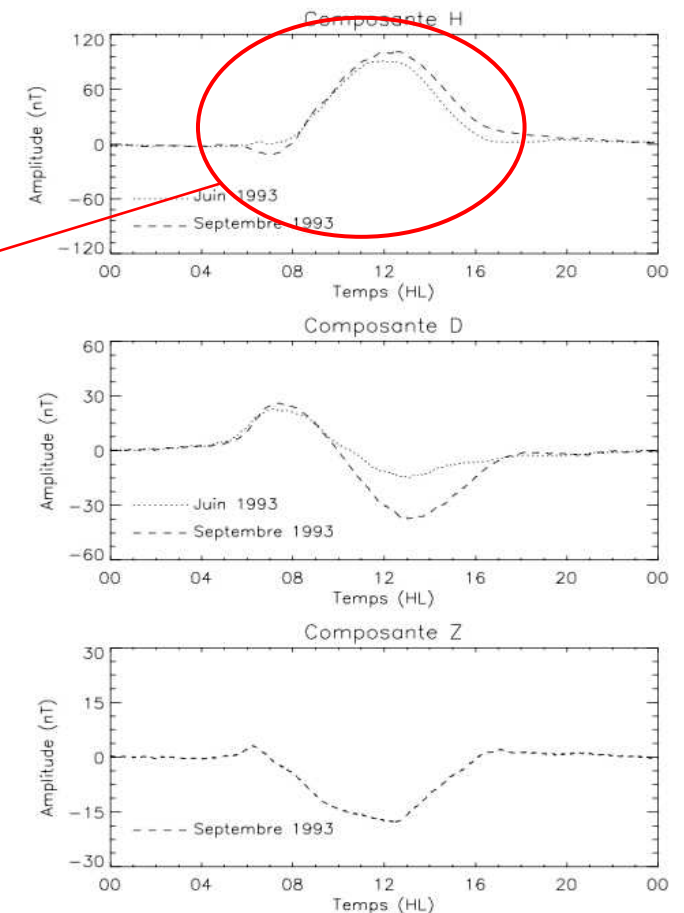
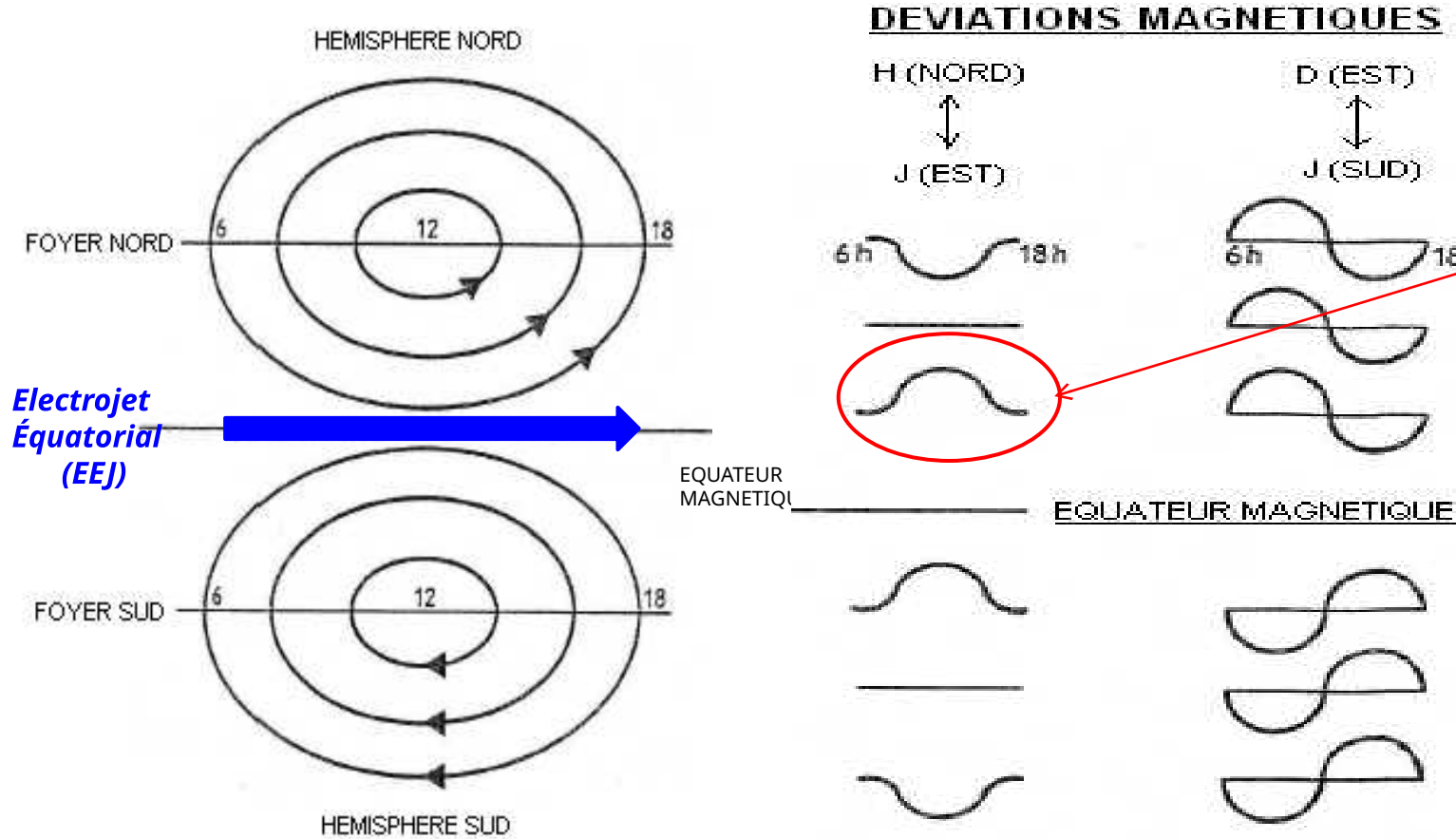
$$\Delta B = \left(\frac{2\pi}{10f} \right) J$$

LA DYNAMO IONOSPHERIQUE REGULIERE

- ❑ Le système de courant équivalent S_q associé à la dynamo ionosphérique

- ❑ Les déviations magnétiques correspondantes

- ❑ Variations S_q du champ Magnétique terrestre à SIKASSO (0,37°N), (équateur magnétique)



Le système de courant S_q 'ideal'

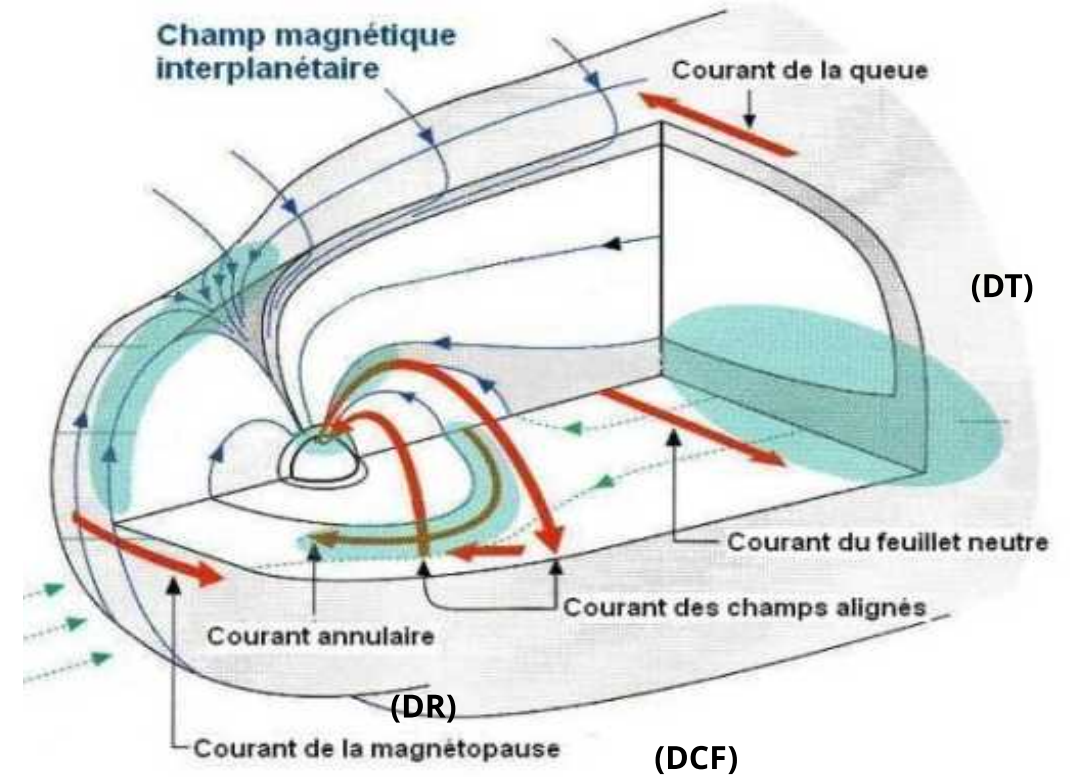
LA DYNAMO VENT SOLAIRE – MAGNETOSPHERE

SYSTEMES DE COURANT GENERES DANS LA MAGNETOSPHERE

Chapman Ferraro (DCF), Courant annulaire (DR)

Quatre de la magnétopause (DT)

$$E_c = -V_{sx} B_i$$

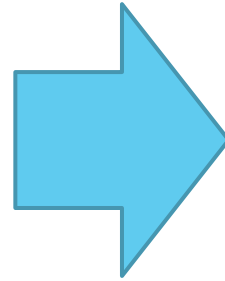
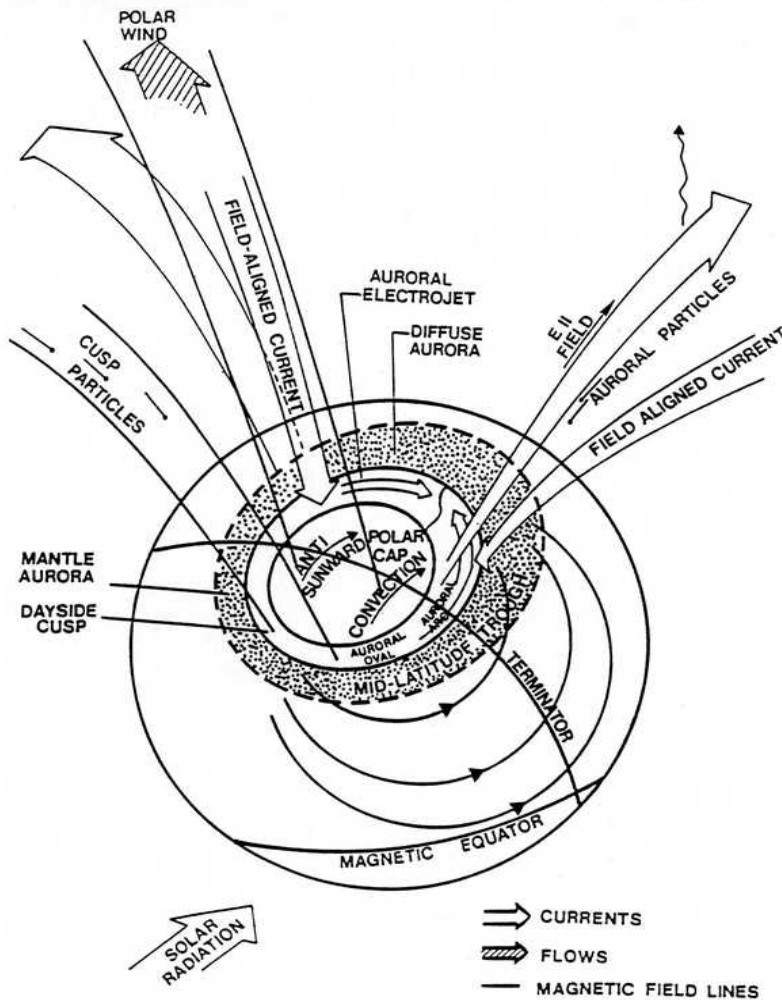


COURANT DES CHAMPS ALIGNES
qui alimente les électrojets auroraux

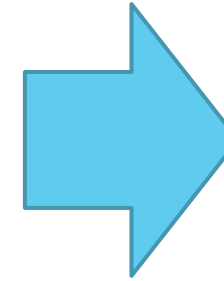
LA DYNAMO VENT SOLAIRE – MAGNETOSPHERE

DANS L'IONOSPHERE

Précipitation de particules, apparition de champ et courants électriques dans l'ionosphères des hautes latitudes



**INTENSIFICATION DES
ELECTROJETS
AURORAUX**



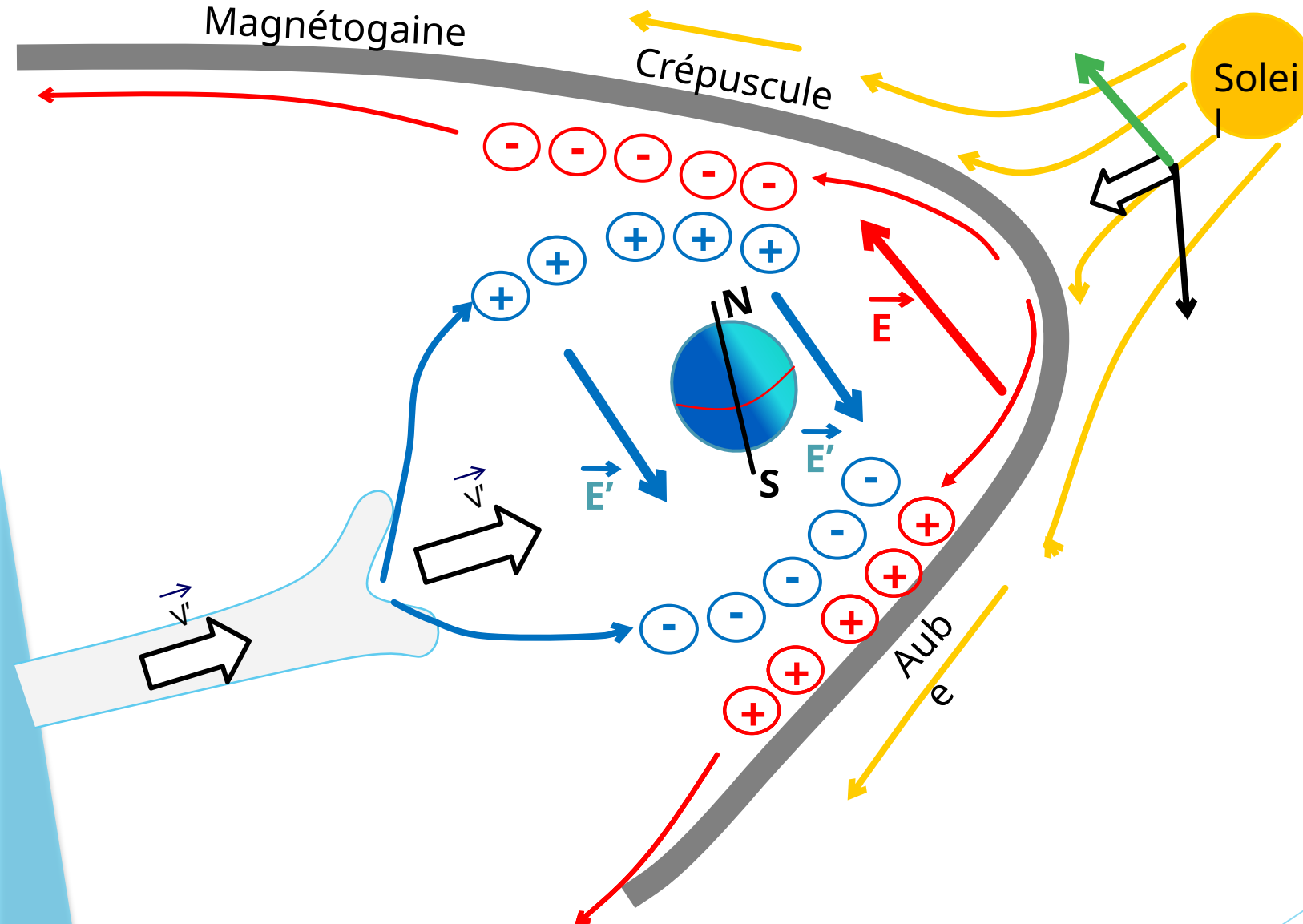
**COURANTS
DP1, DP2,**

Durant les périodes de calme magnétique, ces courants restent confinés dans la calotte polaire.

Pendant les périodes d'orage magnétique, ces courants très intenses dans l'ionosphère aurorale ne restent pas confinés dans cette région, mais s'étendent vers l'équateur.

LA DYNAMO VENT SOLAIRE – MAGNETOSPHERE

CHAMPS ELECTRIQUES DE CONVECTION MAGNETOSPHERIQUE



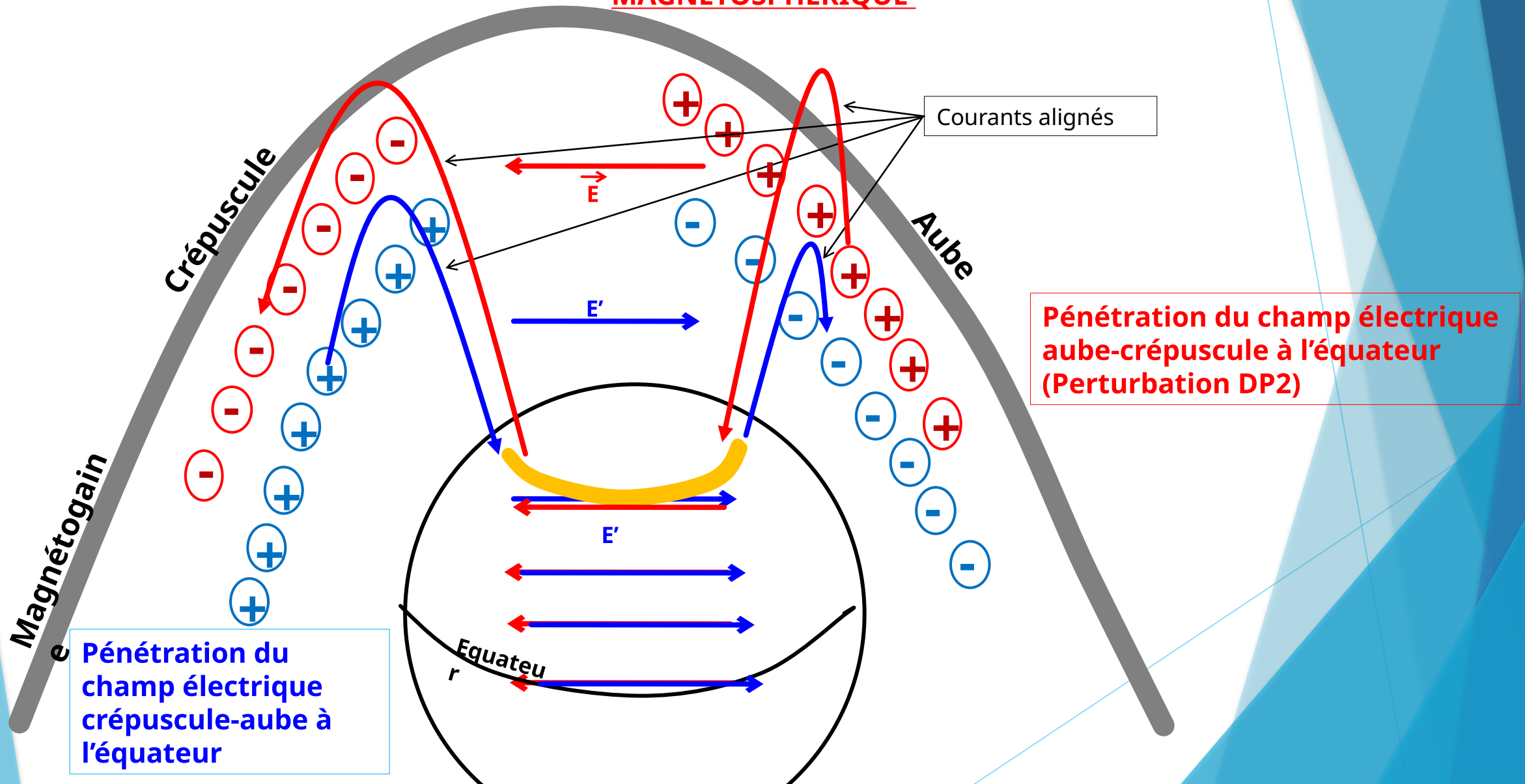
Avant l'installation du CE
secondaire (\vec{E}'), le champ
électrique primaire de
convection

Magnétosphérique (\vec{E})
influence

l'ensemble de l'ionosphère. Il y a
extension directe de la
convection magnétosphérique
des hautes latitudes vers les
basses latitudes et l'équateur.
Lorsque le CE secondaire est
établi, il tend à diminuer
l'influence du CE primaire aux
basses latitudes et à l'équateur,
le temps mis par le champ

LA DYNAMO VENT SOLAIRE – MAGNETOSPHERE

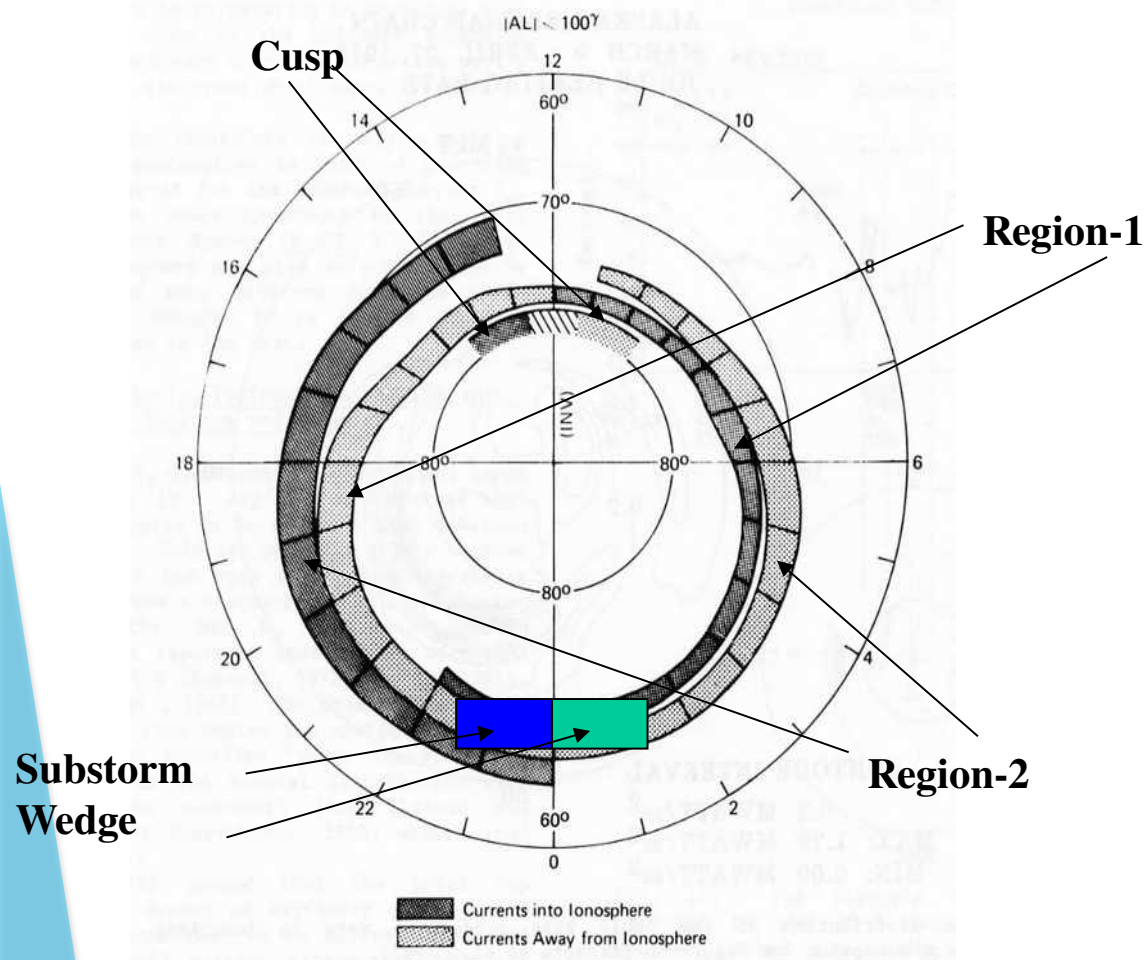
MECANISME DE LA PENETRATION DU CHAMP ELECTRIQUE DE CONVECTION MAGNETOSPHERIQUE



LA DYNAMO VENT SOLAIRE – MAGNETOSPHERE

MECANISME LA PENETRATION DIRECTE DU CHAMP ELECTRIQUE DE CONVECTION MAGNETOSPHERIQUE: LES COURANTS ALIGNES

Distribution moyenne en TML et en latitude des courants alignés de grandes échelles (*Lijima et poterma, 1976*)



- ▶ - Etat stationnaire: Les courants alignés de la Région-2 tendent à accroître le CE aux hautes latitudes et à le diminuer aux basses latitudes: c'est l'effet d'écran (*shielding effect*)
- ▶ - Lors des variations rapides des perturbations, les courants de la Région-2 peuvent tarder pour répondre à la nouvelle variation du potentiel de la calotte polaire: ➡
- ▶ 1/ Saut brusque du potentiel polaire ➡ croissance lente du CE secondaire en hautes latitudes / en basses latitudes ; augmentation abrupte suivie d'une décroissance prompte ➡ pénétration du CE impliquant les courants de la Région-2
- ▶ 2/ Chute brusque du potentiel polaire: le CE des hautes latitudes va décroître ➡ le CE des basses latitudes subit une décroissance abrupte puis augmente pour atteindre un état stationnaire ➡ pénétration directe du CE des hautes vers les basses latitudes (*Overshielding*). Ce phénomène est associé à l'inversion vers l'Ouest de la direction du CE des basses latitudes observée lors du

LA CAMPAGNE AIEE

AIEE: Année Internationale de l'Electrojet Equatorial

24 mois de mesures continues (octobre 92 à novembre 94) / magnétomètres, ionosondes et radars
Courtes périodes de campagne intensive de mesures radar à Korhogo /avril - juin 93 /oct-nov 94
Lancement de fusées

3 secteurs de longitude :

Asie : $< 60^{\circ} \text{ E} - 190^{\circ} \text{ E} >$

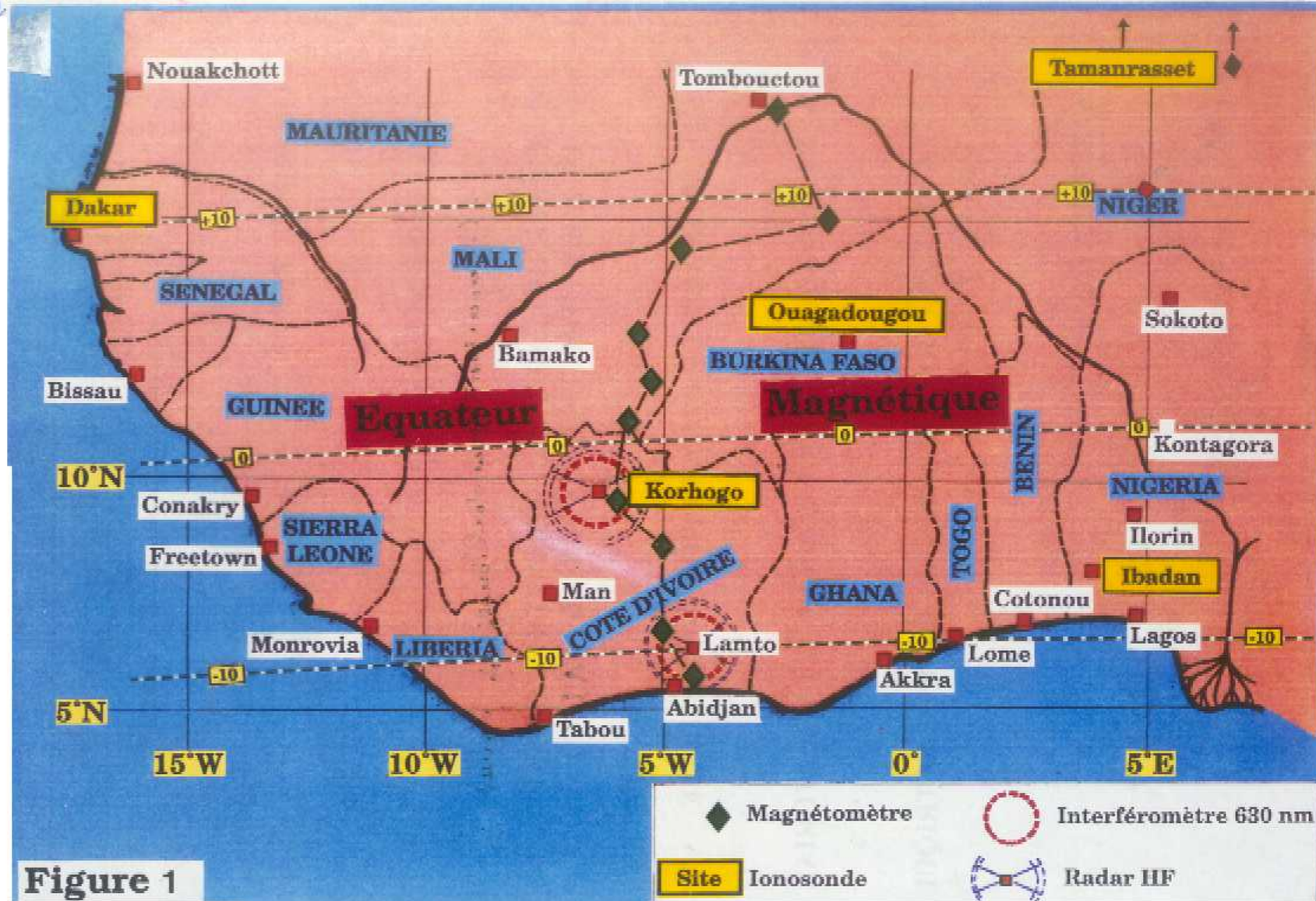
Amérique : $< 190^{\circ} \text{ E} - 330^{\circ} \text{ E} >$

Europe – Afrique : $< 330^{\circ} \text{ E} - 60^{\circ} \text{ E} >$

OBJECTIFS

Faire progresser la compréhension des mécanismes de la Dynamo
ionosphérique
Etude de la variabilité jour à jour du jet équatorial
Perturbations dynamiques de grandes échelles

LA CAMPAGNE AIEE

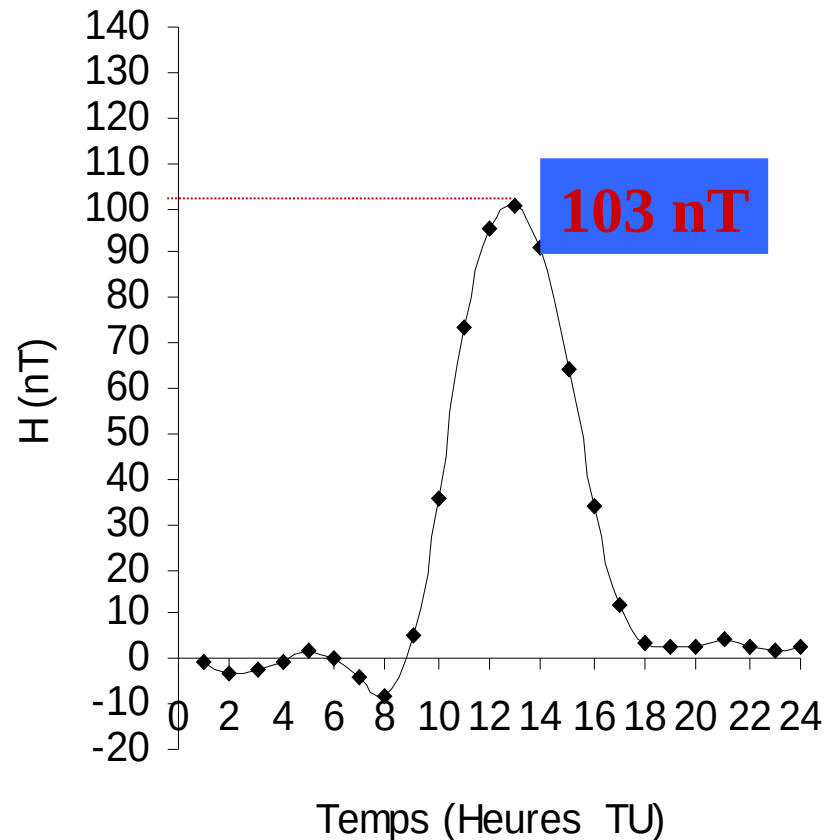


Position géographique des stations magnétiques, des ionosondes et du radar HF. Les stations magnétiques sont établies le long du méridien 5°Ouest au travers de l'équateur magnétique déterminé par le modèle IGRF 1993. La légende ci-dessous indique le code de chaque instrument

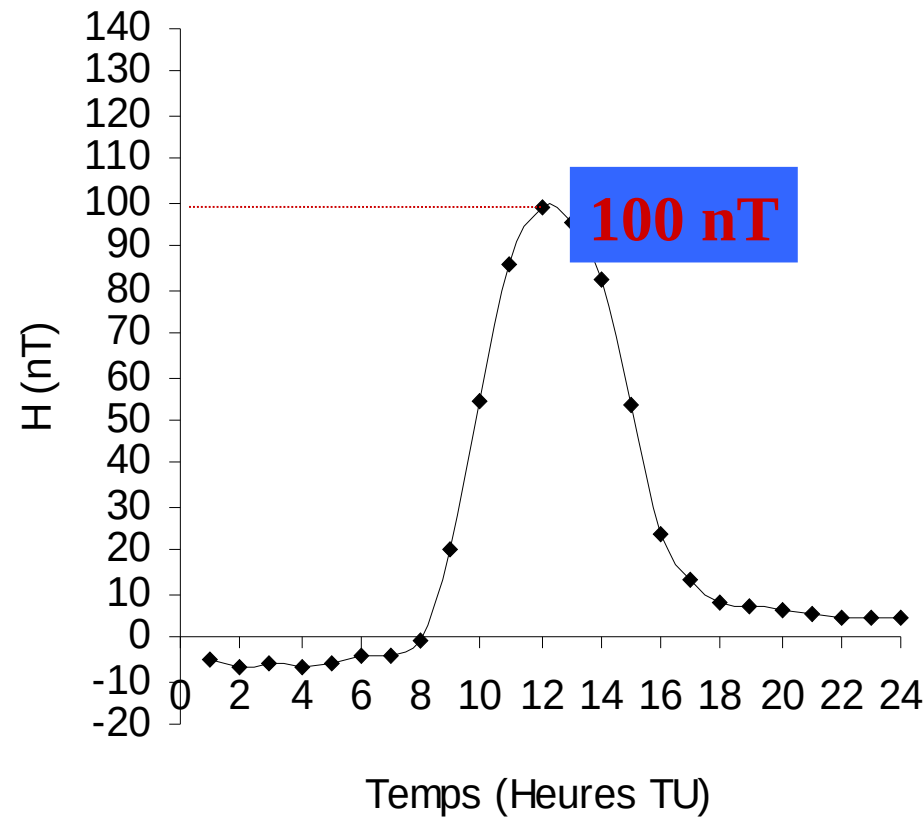
VARIABILITE JOUR A JOUR DE L'ELECTROJET EQUATORIAL

Variations diurnes du $S_R(H)$ le 24 et 25 mai 1993. Nota: $*$ = $10^{-22} \text{Wm}^{-2}\text{Hz}^{-1}$

e / 24 mai 1993, $A_p=3$, $F_{10,7}=100,9^*$

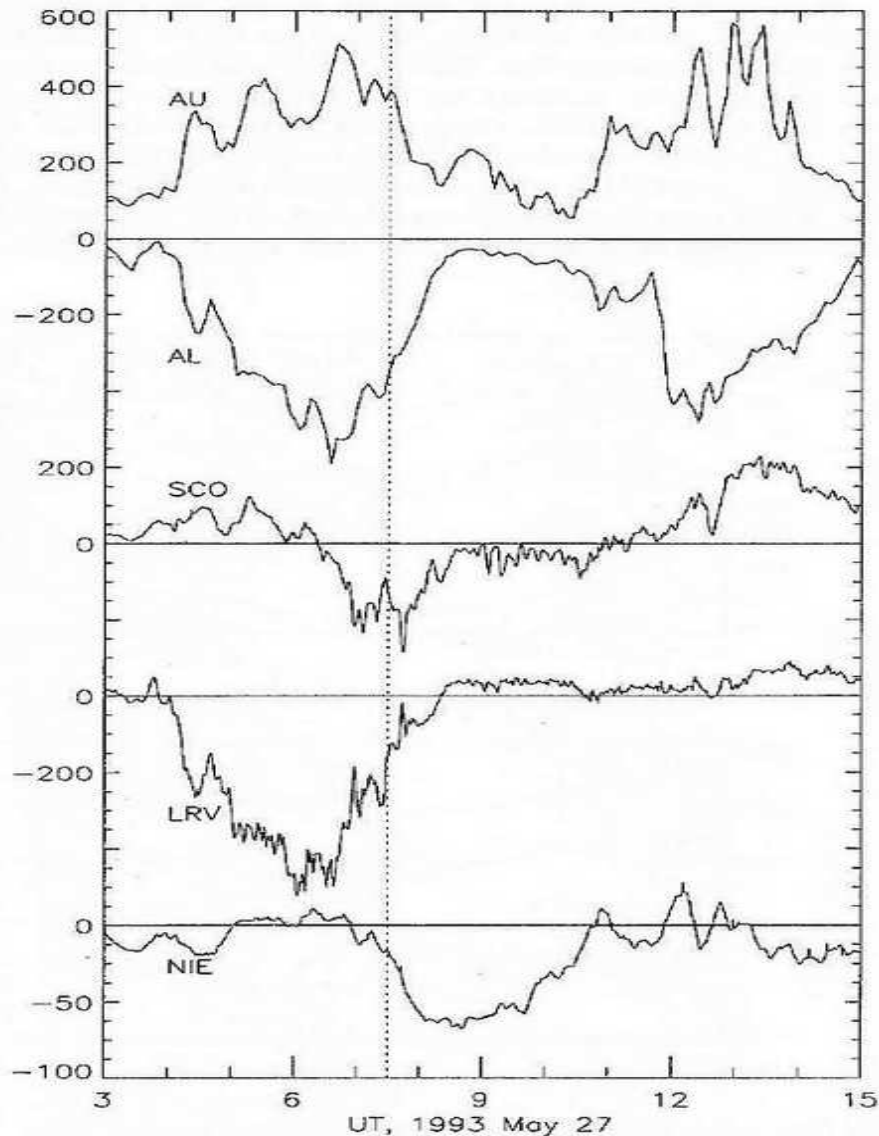


f / 25 mai 1993, $A_p=2$, $F_{10,7}=102,4^*$



- Ces variations apparaissent presque régulières,
- Evolution en forme de cloche: croissance monotone après le lever du soleil (autour de 08h00 TU), maxi autour du midi local, décroissance monotone pour atteindre la valeur nulle aux heures du coucher du soleil (18-18h30 TU)

ETUDE DE CAS: 27 mai 1993



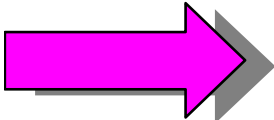
72°lat.mag.

65° lat.mag.

-1° lat. mag.

- ▶ Les indices **AU** et **AL** indiquent que des **électrojets Est** et **Ouest** intenses étaient présents dans la zone auroral entre environ 0400 et 0800UT
- ▶ **LRV** était sous l'électrojet **Ouest**
- ▶ L'électrojet **Ouest** était du côté équatorial de **LRV** jusqu'à 0600 environ mais s'est déplacé vers le Nord pour s'établir en partie sur **SCO** entre 0600 et 0800UT.
- ▶ La décroissance commence à **NIE** autour de 0730 UT juste au moment les activités en zones aurorales (à travers les indices AU et AL) commencent à s'estomper. Cette décroissance suggère que la ddp de la calotte polaire aurait rapidement chuté.
- ▶ Nota: pour ces trois stations autour 70° de Longitude Magnétique, le Temps Magnétique Local (MLT) est égal au Temps Universel (UT)

Chute de potentiel



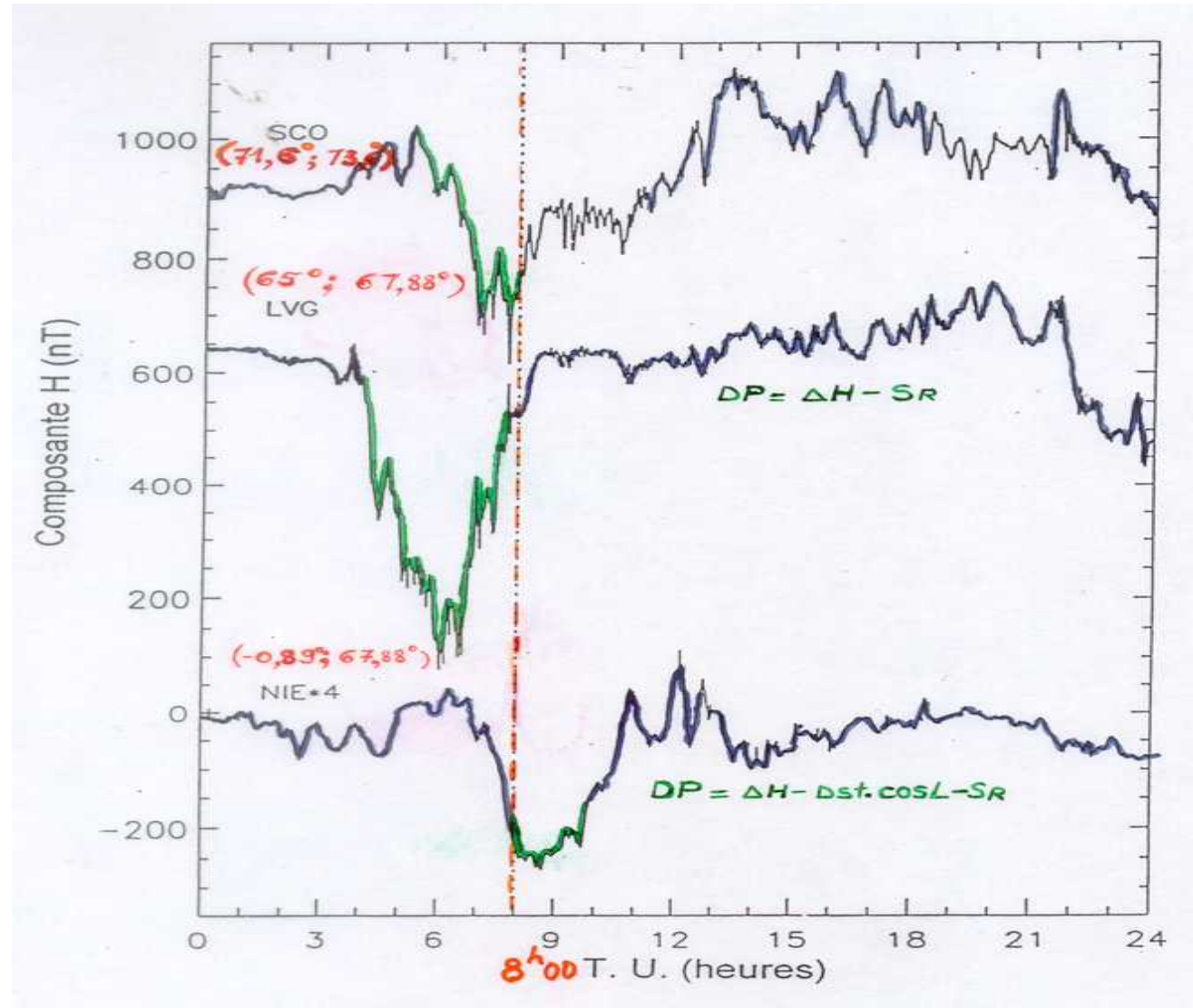
Temps (UT)	Potentiel (kV)
04:14	087
05:05	095
05:56	101
06:47	121
{ 07:38	104 {
08:29	066 }
08:33	062
11:06	105
11:57	087
12:48	099
13:39	100

38 kV

Chute de potentiel estimée lors du passage du Satellite du Programme Météorologique de la Défense (DMSP aéronef F8 et F11) traité par *Hairston et al. 1998*

ETUDE DE CAS: 27 mai 1993

Pénétration directe du champ électrique de convection des hautes latitudes à l'équateur

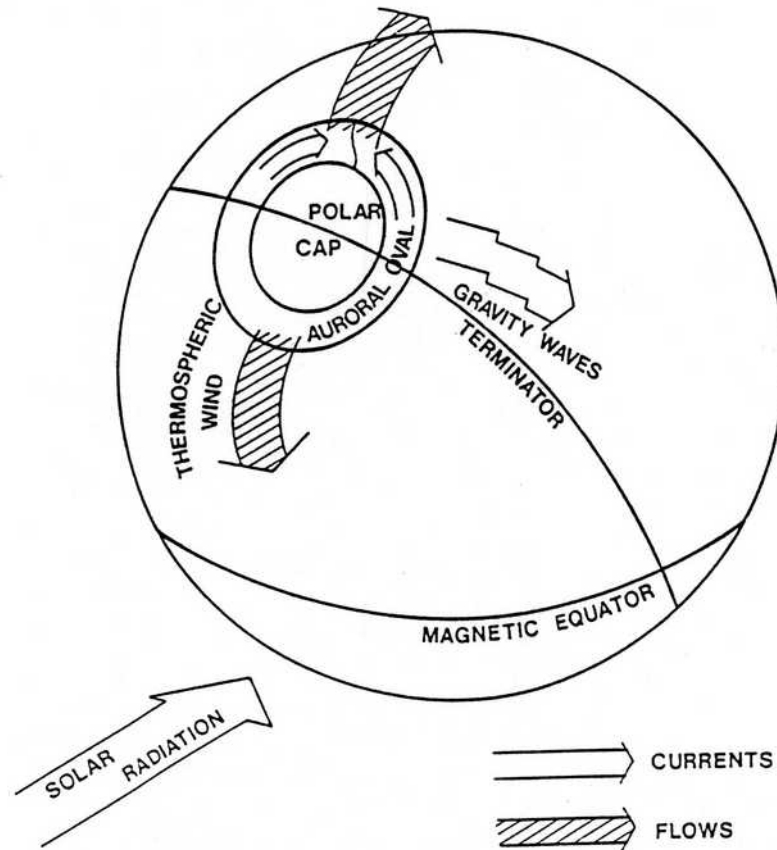


ETUDE DE CAS: 27 mai 1993

- La forte perturbation Ouest du champ magnétique de l'EEJ le 27 mai 1993 possède des caractéristiques qui peuvent être associés à un phénomène de pénétration du champ électrique de convection magnétosphérique à l'équateur
- Les fluctuations magnétiques (période [25-75mn]) se révèlent cohérente à toutes les latitudes ente l'équateur et la zone aurorale sans retard de phase détectable. Leur amplitudes diminuent au fur et à mesure depuis la zone aurorale jusqu'aux basses latitude et sont amplifiées à l'équateur: ce qui confirme qu'elles résultent d'un courant ionosphérique planétaire.

LA DYNAMO VENT SOLAIRE – MAGNETOSPHERE

MECANISME DE LA PERTURBATION DYNAMO IONOSPHERIQUE



l'intensification des électrojets auroraux par les courants des champs alignés transfère au gaz neutre de l'énergie thermique par l'intermédiaire du chauffage joule et de l'impulsion à travers le transfert de quantité de mouvement. Cela engendre des ondes de gravités et des vents thermosphériques en direction de l'équateur (cellule de Hadley) entre les pôles et l'équateur aux altitudes de la région F (*Testud and Vasseur, 1969; Richmond and Roble, 1979*).

Chauffage Joule : $Q = J \cdot E$ (90%)

Transfert de quantité de mouvement : $J \times B$ (10%)

LA DYNAMO VENT SOLAIRE – MAGNETOSPHERE

MECANISME DE LA PERTURBATION DYNAMO IONOSPHERIQUE

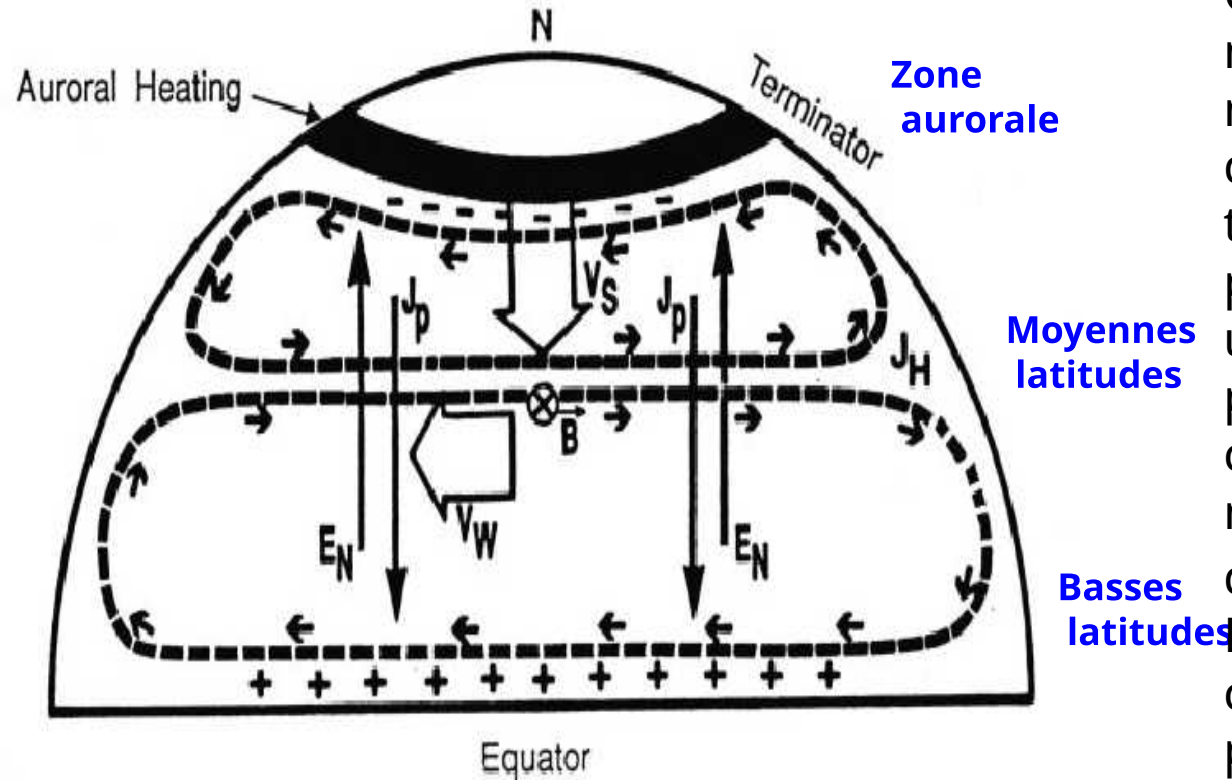


Schéma du mécanisme de la perturbation dynamo ionosphérique (Blanc and Richmond, 1980),

(Mazaudier and Venkateswaran, 1990)

$$J_p = \sigma_p (V \wedge B) \quad J_H = \sigma_H (E \wedge B / B^2)$$

Ces vents s'étendent de la zone aurorale vers les moyennes et basses latitudes (Mazaudier et al., 1985). Aux moyennes latitudes, sous l'action de la force de Coriolis due au mouvement de rotation de la Terre, la circulation thermosphérique méridionale en direction de l'équateur produit une circulation zonale vers l'Ouest et entraîne une partie du fluide ionisée. Le mouvement des particules chargées vers l'ouest, en combinaison avec la composante verticale descendante du champ magnétique terrestre, produit un courant Pedersen (J_p) en direction de l'équateur (sous l'action des forces de Lorentz). En retour, le courant Pedersen accumule les charges positives à l'équateur (et les électrons vers les pôles) jusqu'à ce qu'un champ électrique en direction des pôles soit établi, opposé à la circulation du courant Pedersen. Ce champ électrique en direction du pôle donne naissance à un intense courant Hall (J_H) qui circule vers l'Est et un autre courant Pedersen en direction des pôles.

LA DYNAMO VENT SOLAIRE – MAGNETOSPHERE

MECANISME DE LA PERTURBATION DYNAMO IONOSPHERIQUE

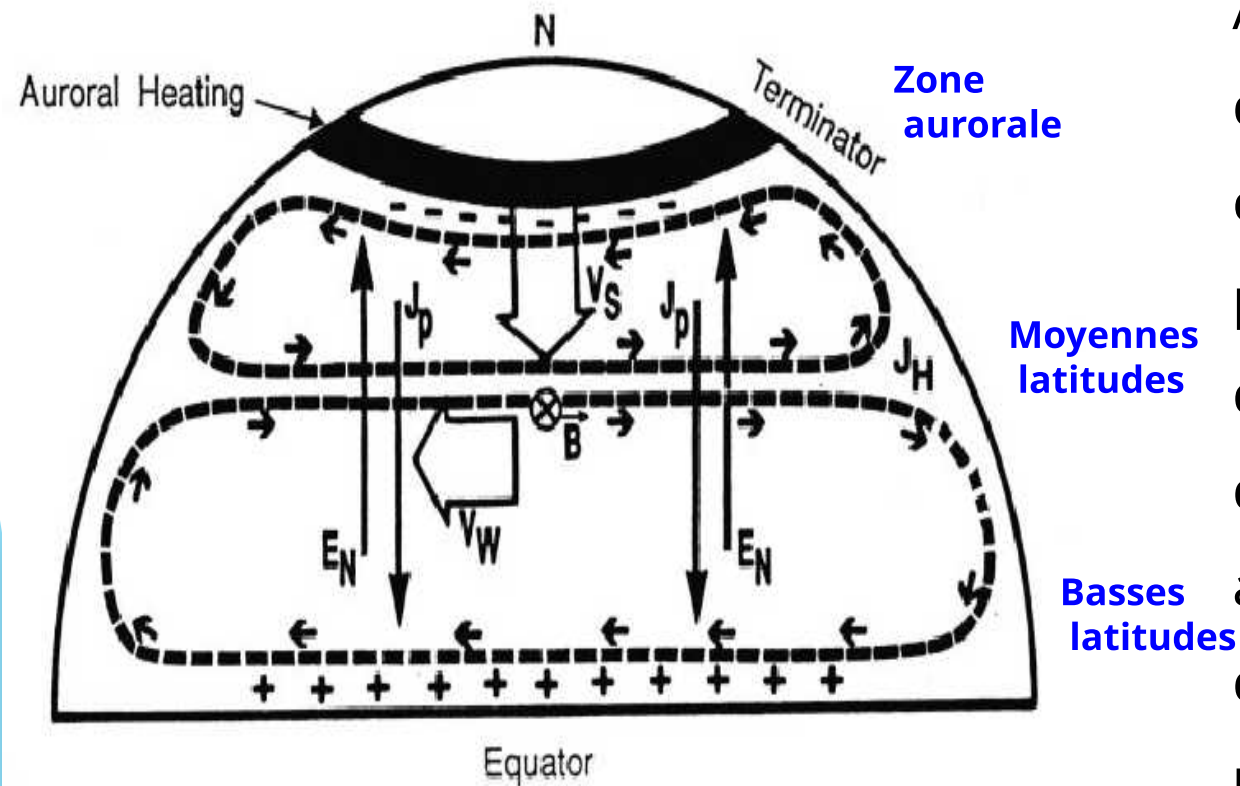


Schéma du mécanisme de la perturbation
dynamo ionosphérique (Blanc and Richmond,
1980),
(Mazaudier and Venkateswaran, 1990)

Aux moyennes latitudes, le courant Pedersen en direction de l'équateur conduit par le vent compense le courant Pedersen en direction des pôles engendré par le champ électrique de sorte que le courant résultant est le courant Hall en direction de l'Est. Le courant Hall est interrompu au terminus (au crépuscule) et donne naissance à deux vortex de courant. Aux basses latitudes, on a un vortex de courant de perturbation "anti-Sq" entraînant la circulation d'un courant en direction de l'Ouest dans la région équatoriale, opposé à la circulation vers l'Est de l'électrojet normal.

CAS DE PERTURBATION DYNAMO IONOSPHERIQUE

❑ 5 périodes d'orage étudiées

- N°1 : 10-11 juin 1993
- N°2 : 20-21 septembre 1993
- N°3 : 5-6 octobre 2000
- N°4 : 31 mars- 1^{er} avril 2001
- N°5 : 24-25 Novembre 2001

❑ Paramètres observés:

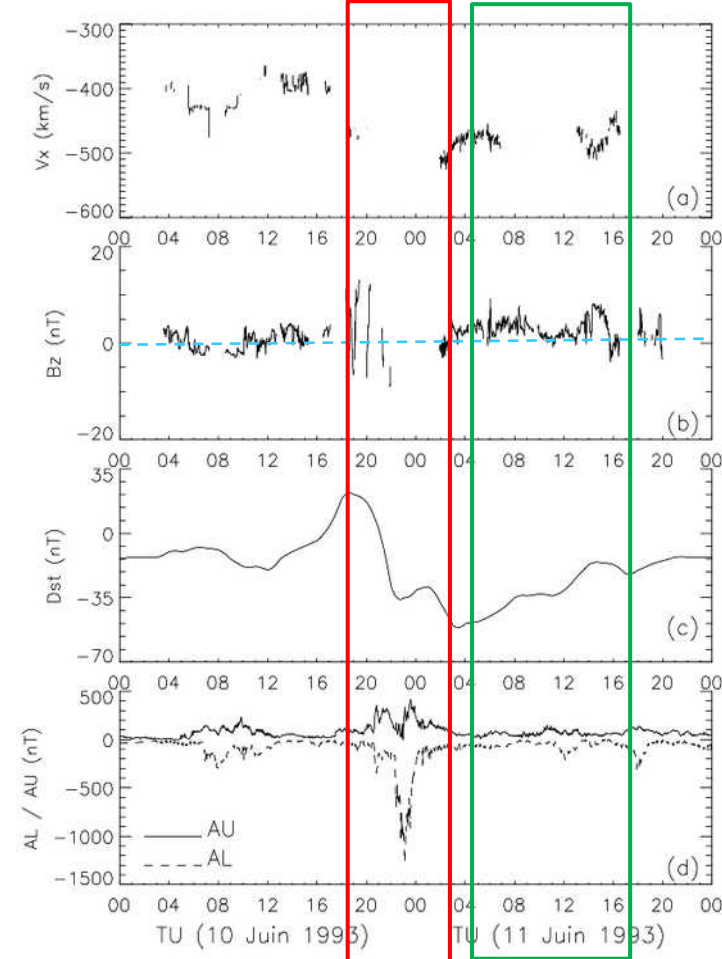
- *Vx : Vitesse du vent solaire (Perturbation du vent solaire)*
- *Bz : Composante verticale du champ magnétique interplanétaire*
- *Dst: indice magnétique (Développement du courant annulaire)*
- *AU, AL: indices auroraux (Intensité de l'activité aurorale)*
- *Composante horizontale H du champ magnétique terrestre (Electrojet équatorial)*

❑ Identifier les perturbations **Ddyn** des champs et courants électriques dues au mécanisme de la perturbation dynamo ionosphérique selon les critères définies par *Le-Huy et Amory-Mazaudier (2005)*

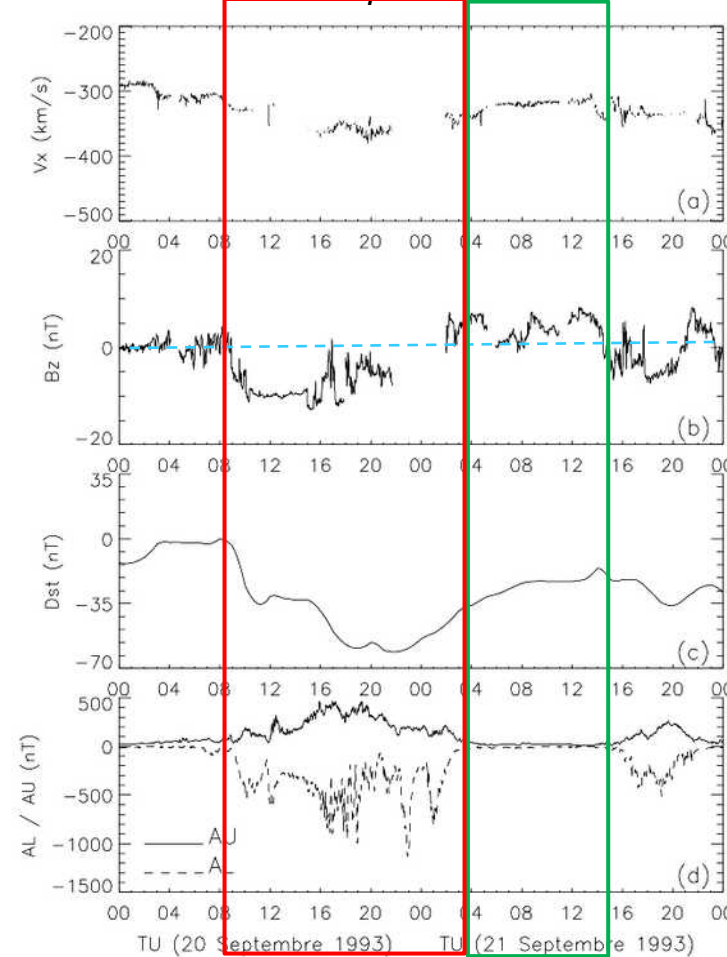
CAS DE PERTURBATION DYNAMO IONOSPHERIQUE

● Variation des paramètres V_x , B_z , Dst, AU et AL

10-11 juin 1993



20-21 septembre 1993



 Phase active de l'orage

- Augmentation de V_x
- Sens de B_z fluctue entre le Nord et le Sud
- Grandes amplitudes de AU et AL

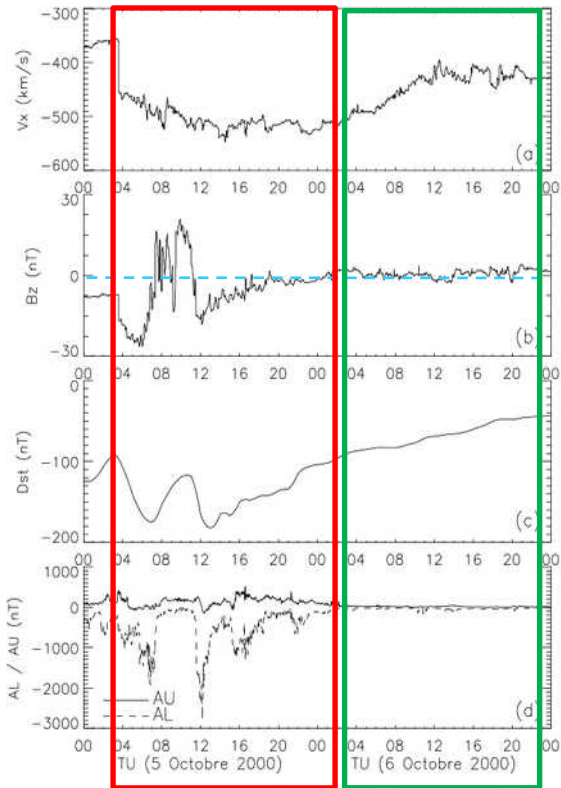
 Phase de recouvrement de l'orage

- V_x diminue
- B_z n'est plus orientée vers le Sud
- très faible amplitude de AU et AL

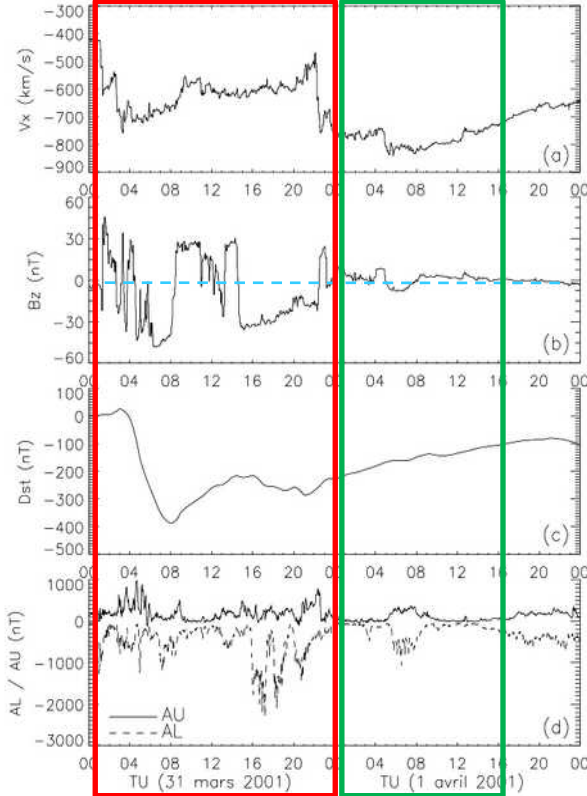
CAS DE PERTURBATION DYNAMO IONOSPHERIQUE

Variations des paramètres V_x , B_z , Dst, AU et AL

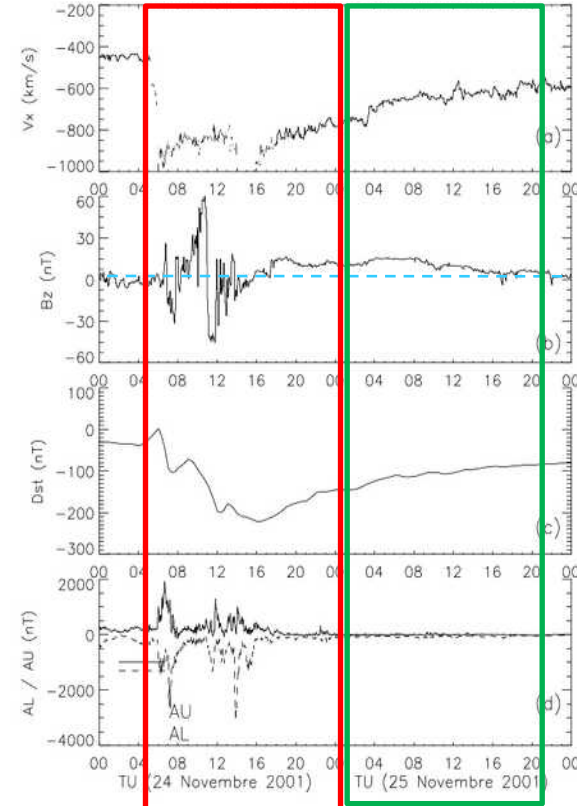
5-6 octobre 2000



31 mars-1 avril 2001



24-25 novembre 2001



 Phase active de l'orage

- Augmentation de V_x
- Sens de B_z fluctue entre le Nord et le Sud
- Grandes amplitudes de AU et AL

 Phase de recouvrement de l'orage

- V_x diminue
- B_z n'est plus orientée vers le Sud
- très faible amplitude de AU et AL

CAS DE PERTURBATION DYNAMO IONOSPHERIQUE

● Variation des paramètres V_x , B_z , Dst AU et AL

□ Interprétations des observations

➤ Dans la phase principale des orages

-Augmentation de V_x et orientation de B_z vers le Sud

→ Ecoulement des particules chaudes du vent solaire vers le plan équatorial de la magnétosphère

→ Intensification du courant annulaire

-Grandes amplitudes des indices AU et AL

→ Intensification des électrojets auroraux

→ Chauffage joule dans la zone aurorale,

➤ Dans la phase de recouvrement des orages

Très faible amplitude de AU et AL → forte baisse de l'activité aurorale

→ effet de la pénétration du champ électrique de convection magnétosphérique négligeable

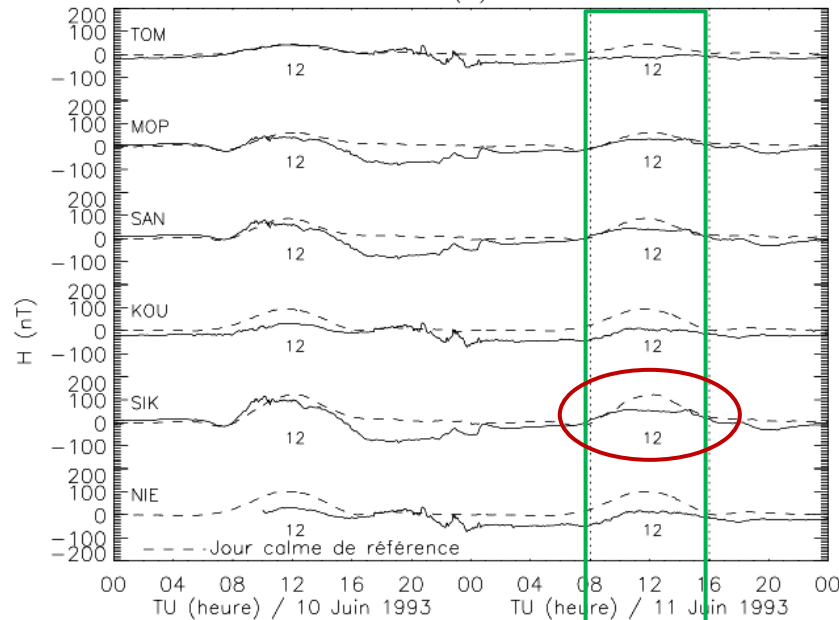
→ Perturbation **Ddyn** (s'il y a perturbation)

CAS DE PERTURBATION DYNAMO IONOSPHERIQUE

● Variation de la composante H du champ magnétique terrestre

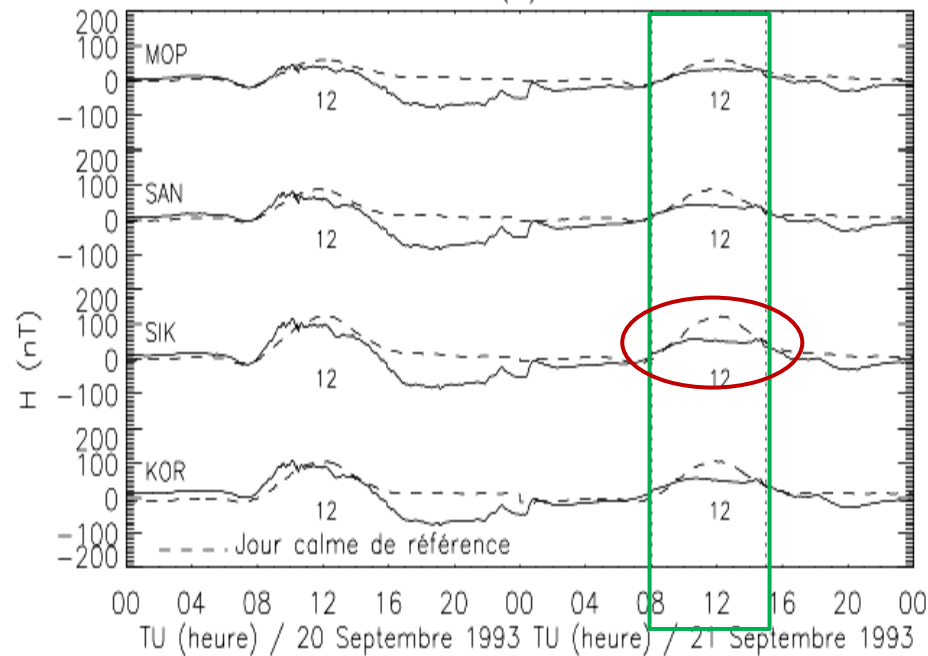
10-11 juin 1993

(a)



20-21 septembre 1993

(b)



- Baisse de l'amplitude de H dans toutes les stations, le jour calme après la période active des orage, dans la phase de recouvrement (entre 08h-16h)
- Baisse de l'amplitude de H est plus importante à SIK (lat. mag.=0.37°N), à l'équateur magnétique

CAS DE PERTURBATION DYNAMO IONOSPHERIQUE

- **Variation de la perturbation de la composante H (DP)**

Expression de DP

$$\Delta H = S_R(\text{régulière/calme}) + D(\text{irrégulière/perturbée})$$

$$DR + DCF + DP + DT$$

Phase de recouvrement : l'effet des courants DCF et DT négligeable

$$\longrightarrow \Delta H = S_R + DR + DP \longrightarrow DP = \Delta H - DR - S_R$$

avec $DR = Dst \times \cos(L)$ (L : latitude magnétique du lieu)

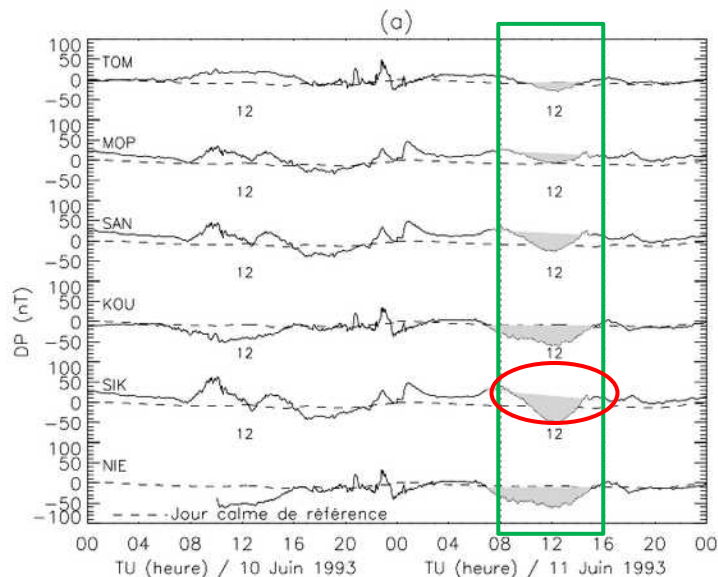


$$DP = \Delta H - Dst \times \cos(L) - S_R$$

CAS DE PERTURBATION DYNAMO IONOSPHERIQUE

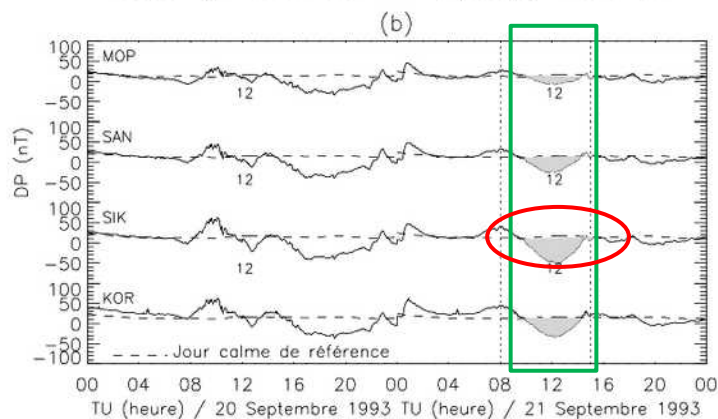
● Variation de la perturbation de la composante H (DP)

Période 1
(10-11 juin 1993)



Dans la période correspondant à l'atténuation de l'amplitude de la composante H, on a une déviation vers le Sud de DP dans toutes les stations équatoriales.

Période 2
(20-21 Septembre 1993)



La déviation DP est maximale à SIK, à l'équateur magnétique.

CAS DE PERTURBATION DYNAMO IONOSPHERIQUE

● Interprétation des observations

Dans chaque période d'orage étudiée

Phase principale des orages

- Intensification de l'activité aurorale
- ➡ Effet de pénétration du champ électrique de convection magnétosphérique importante
- ➡ Chauffage Joule auroral

Phase de recouvrement des orages

- Forte baisse de l'activité aurorale (presque nulle dans certains cas)
- ➡ Effet de pénétration du champ électrique de convection magnétosphérique négligeable
- Atténuation de l'électrojet équatorial

➡ Signature magnétique du mécanisme de la perturbation
dynamo ionosphérique à l'équateur (Blanc et Richmond, 1980)

VARIATION LONGITUDINALE PERTURBATION DYNAMO IONOSPHERIQUE

Caractérisation de l'activité aurorale des orages et amplitude de la perturbation Ddyn

Période	Début de l'activité aurorale et durée	Maximum de AU et AL (≥ 1000 nT) et heure	Amplitude de Ddyn à l'équateur
N°1	<u>Début</u> : 10 juin à 20h <u>Durée</u> : 7 heures	<i>Pas de valeur pour AU</i> AL : 1283 nT à 23h08 TU (le 10 juin)	50 nT (Afrique)
N°2	<u>Début</u> : 20 septembre à 09h00 TU <u>Durée</u> : 18 heures	<i>Pas de valeur pour AU</i> AL : 1000 nT à 18h57 TU, 1135 nT à 22h56 TU (le 20 septembre)	65 nT (Afrique)
N°3	<u>Début</u> : 5 octobre à 03h27 TU <u>Durée</u> : 18 heures	<i>Pas de valeur pour AU</i> AL : 2000 nT à 07h TU, 3000 nT à 12h TU, (le 5 octobre)	45 nT (Asie), Afrique et Amérique, pas de Ddyn
N°4	<u>Début</u> : 31 mars à 01h00 TU <u>Durée</u> : 21 heures	<i>Pas de valeur pour AU</i> AL : 2000 nT à 17h (le 31 mars)	Pas de Ddyn en Asie 154 nT (Afrique) 80 nT (Amérique)
N°5	<u>Début</u> : 24 novembre à 05h57 <u>Durée</u> : 11 heures	AU : 1500 nT à 07h et 12h TU 1000 nT à 14h TU AL : 1000 nT à 07h et 11h TU, 3100 nT à 14h TU	110 nT (Asie) 113 nT (Afrique) 108 nT (Amérique)

VARIATION LONGITUDINALE PERTURBATION DYNAMO IONOSPHERIQUE

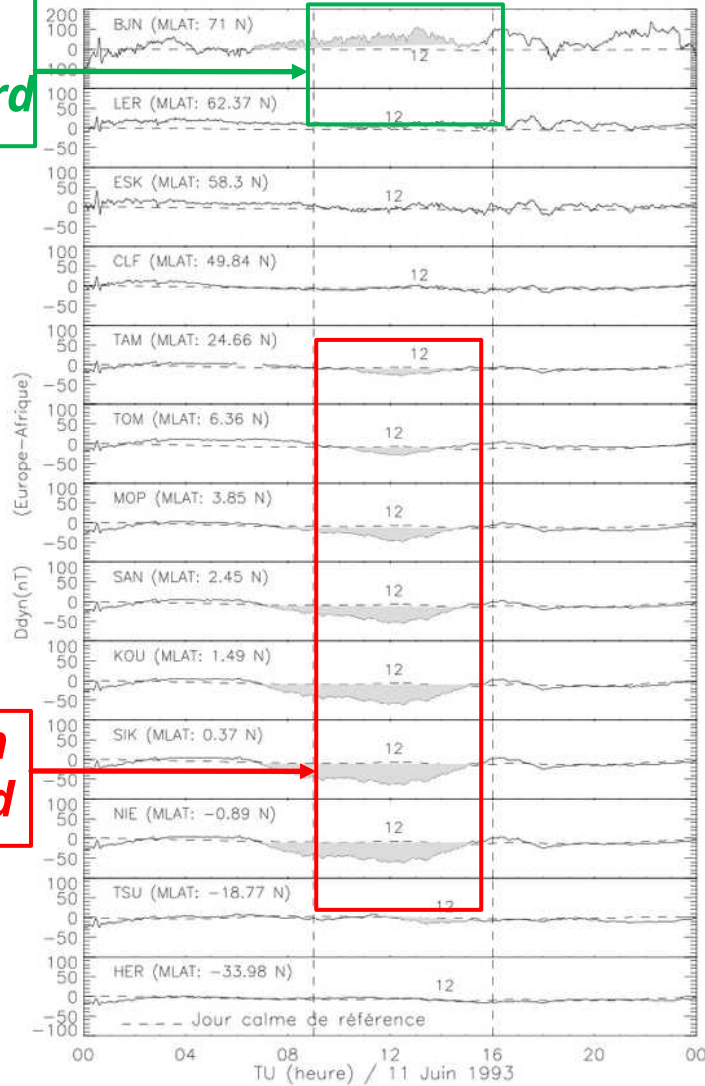
Les facteurs dominants

- ❑ L'amplitude de l'activité aurorale
- ❑ La durée de l'activité aurorale
- ❑ La fin de l'activité aurorale

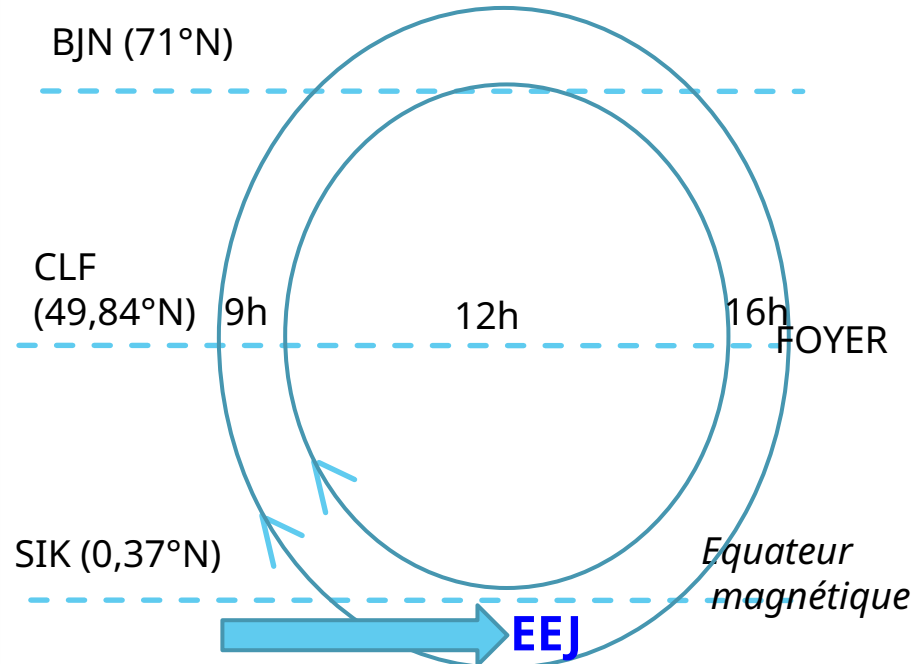
VARIATION LONGITUDINALE PERTURBATION DYNAMO IONOSPHERIQUE

1993

Déviaton
Ddyn Nord

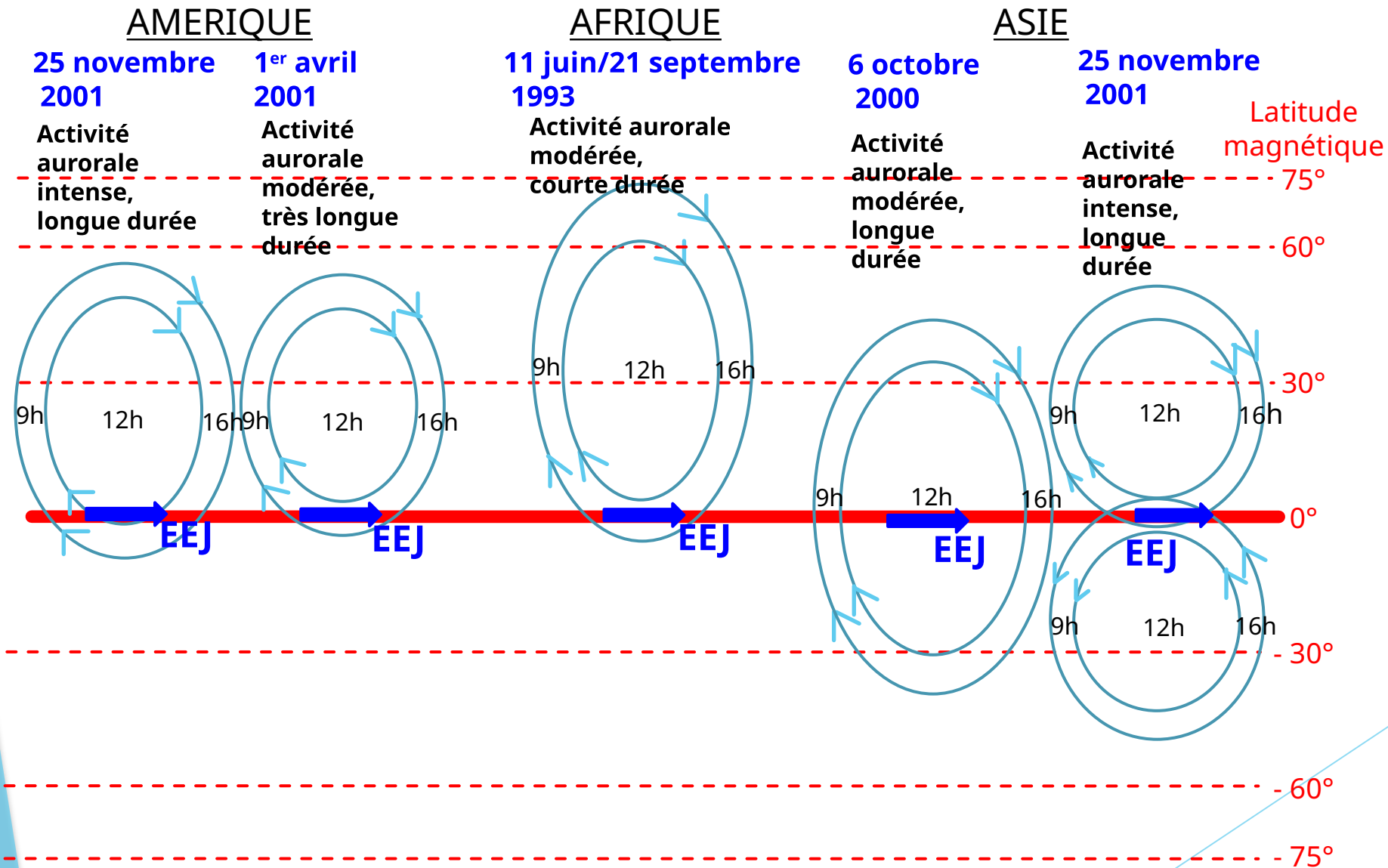


Déviaton
Ddyn Sud



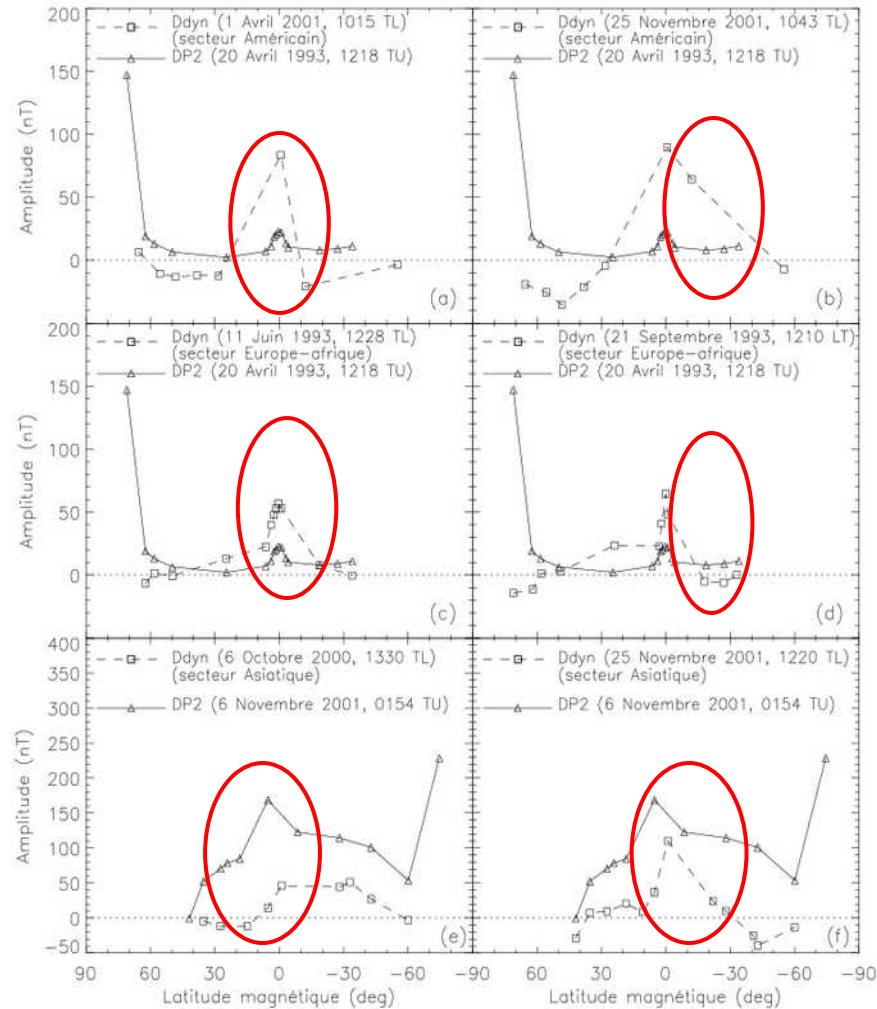
Large cellule de courant anti-Sq
Foyer: moyennes latitudes (50°N)

VARIATION LONGITUDINALE PERTURBATION DYNAMO IONOSPHERIQUE



VARIATION LONGITUDINALE PERTURBATION DYNAMO IONOSPHERIQUE

Profils longitudinaux des perturbations Ddyn et DP2



- ❑ Similarité de ces profils dans la zone équatoriale:
- Amplification des perturbations
- Amplitude de Ddyn supérieure à celle de DP2 dans les secteurs Américain et Africain
- Cas contraire dans le secteur Asiatique

CAS DE PERTURBATION DYNAMO IONOSPHERIQUE

❑ L'étude de la perturbation dynamo ionosphérique D_{dyn} a montré que:

- L'occurrence de la perturbation D_{dyn} dans les différents secteurs de longitude est liée à l'ampleur de l'activité aurorale pendant les orages
- *Au basses latitudes,*
 - D_{dyn} Sud est associée à un courant de perturbation Ouest
 - D_{dyn} est maximale à l'équateur magnétique due à la conductivité de Cowling
- La cellule de courant anti-Sq associée à D_{dyn} montre un courant EST aux moyennes latitudes et un courant OUEST aux basses latitudes
- Le courant EST est établi à des latitudes plus élevées pour un orage magnétique modéré et est observé à des latitudes plus basses pour un orage magnétique intense avec une longue activité aurorale

Une dissymétrie de la perturbation D_{dyn} entre les hémisphères Nord et Sud

D_{dyn} et DP2 exhibent des comportements similaires aux basses latitudes

En fonction de l'intensité de l'orage, le pic d'amplitude de D_{dyn} à l'équateur est supérieur à celui de DP2 et contrairement

CAS DE PERTURBATION DYNAMO IONOSPHERIQUE

MODÉLISATION DES CHAMPS ET COURANTS ÉLECTRIQUES PERTURBÉS

● **Le modèle TIEGCM (Thermosphere-Ionosphere Electrodynamics General Circulation Model)**

Paramètres d'entrée

- ✓ Le quantième du jour
- ✓ La densité du flux des radiations solaires : F10.7
- ✓ La puissance hémisphérique relative à la précipitation des particules dans la zone aurorale
- ✓ La différence de potentiel électrostatique de la calotte polaire
- ✓ les marées

Paramètres de sortie

- Les champs et courants électriques ionosphériques globaux avec les perturbations magnétiques associées
- la composition du système Ionosphère-Thermosphère, la densité, la température et la vitesse des ions ainsi que celles des particules neutres entre 97 km et 500 km d'altitude environ.

JE VOUS REMERCIE