



Ionosphère **equatoriale**, Aspect magnétique et électrodynamique



Vafi DOUMBIA

Université Félix Houphouët Boigny, Abidjan,
Côte d'Ivoire

Email: vafid@yahoo.fr

Franck GRODJI

franckgrodji@yahoo.fr



**Université Gamal Abdel Nasser
de Conakry**



Ionosphère equatoriale, Aspect magnétique



Vafi Doumbia

Université Félix Houphouët Boigny, Abidjan,
Côte d'Ivoire

Email: vafid@yahoo.fr

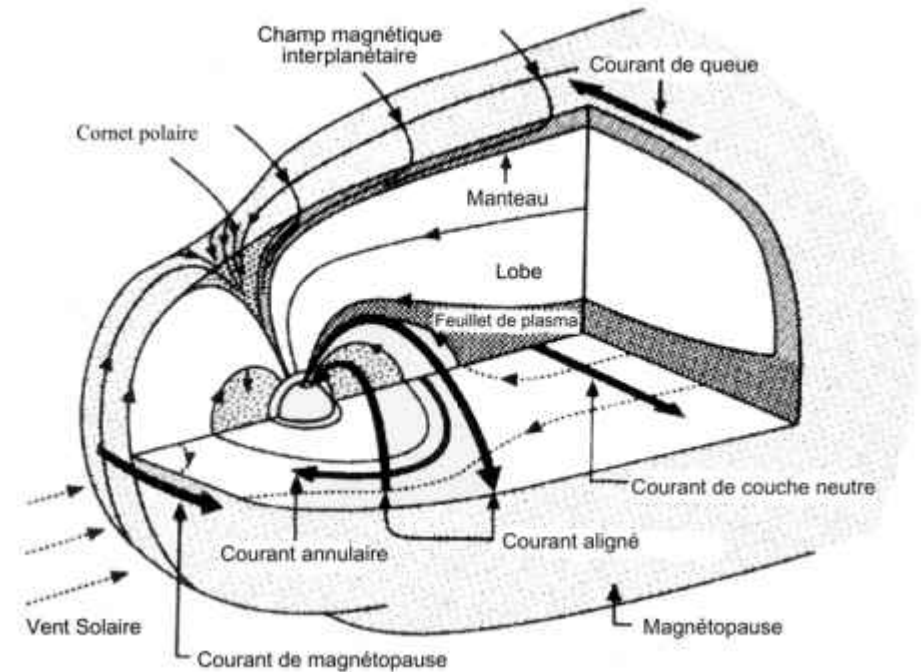
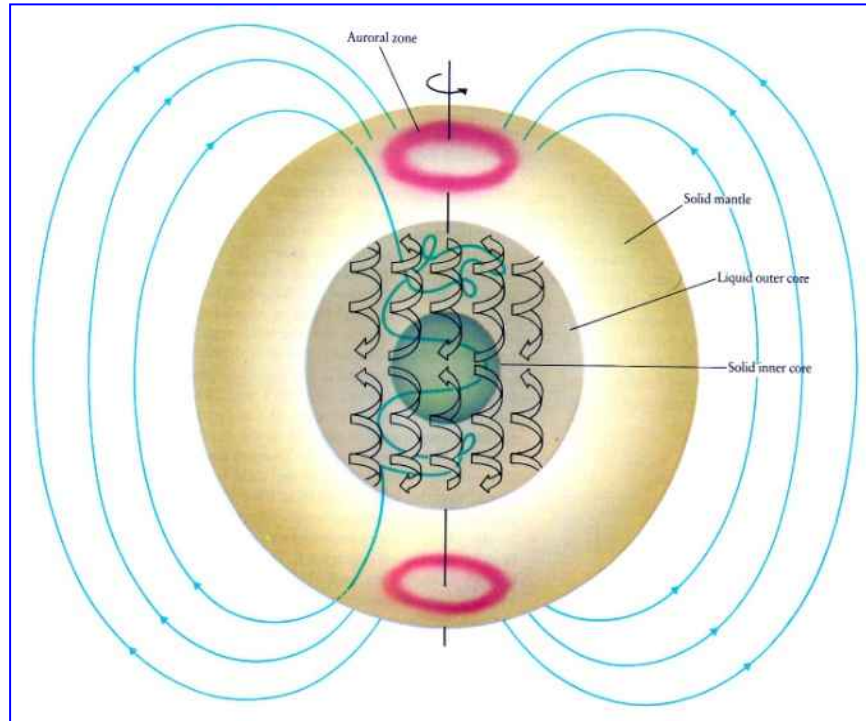
Franck GRODJI

franckgrodji@yahoo.fr



**Université Gamal Abdel Nasser
de Conakry**

I- Champ magnétique Terrestre



$$\mathbf{B} = \mathbf{B}_p + \mathbf{B}_a + \mathbf{B}_e + \mathbf{B}_i$$

Le champ principal géomagnétique généré par le mouvement de la couche fluide du noyau terrestre. Les lignes en bleu du champ magnétique principal ont une structure grossièrement dipolaire. (Figure extraite du livre *Sun and Earth* Herbert Friedman)

I- Champ magnétique Terrestre

I.1 - Variations du champ magnétique terrestre.

En dehors des anomalies **B_a** , qui varie aux échelles de temps géologiques (plusieurs centaines d'années), toutes les autres composantes, à savoir **B_p** , **B_e** et **B_i** , varient à des échelles de temps qui vont de quelques fractions de seconde à plusieurs années.

-Par exemple, la variation du champ principal **B_p** , appelée « variation séculaire », est appréciable à l'échelle d'une année.

Mais les variations les plus importantes, dites variations transitoires, concernent les composantes d'origine externe **B_e** et leurs effets induits **B_i** dans la terre solide.

Les variations transitoires du champ magnétique terrestre sont classées en deux grandes catégories:

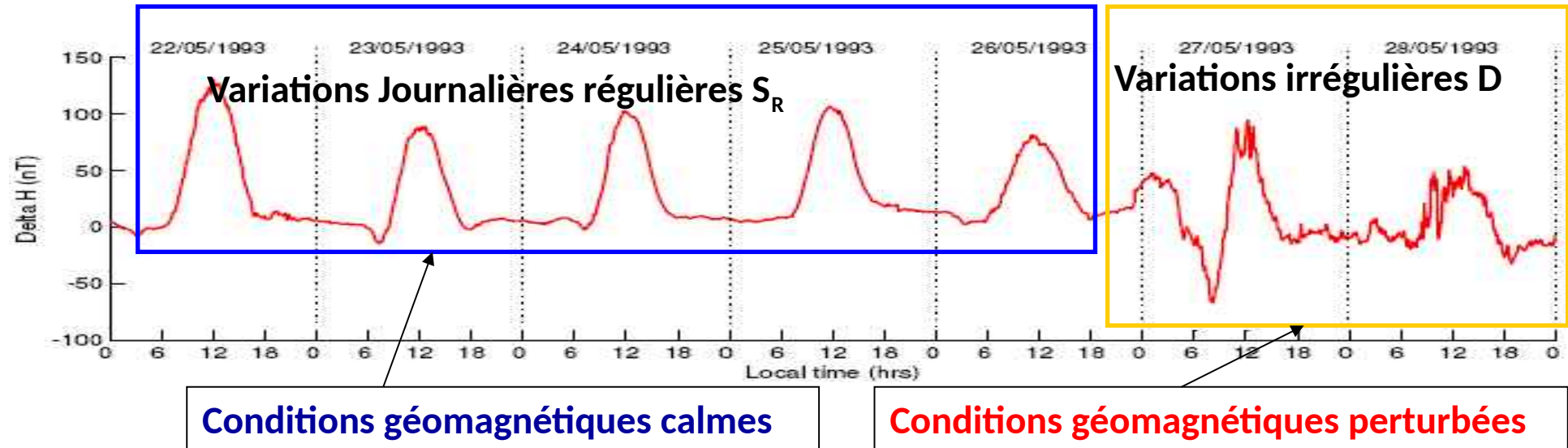
- Les variations journalières** régulières du champ magnétique terrestre

- Les variations irrégulières** ou **perturbées** du champ magnétique terrestre.

Remarque: Au regard des composantes internes **B_p** et **B_a** , les variations transitoires sont considérées comme des perturbations magnétiques.

1. Les variations journalières régulières (S_R)

2. et les variations irrégulières (D)



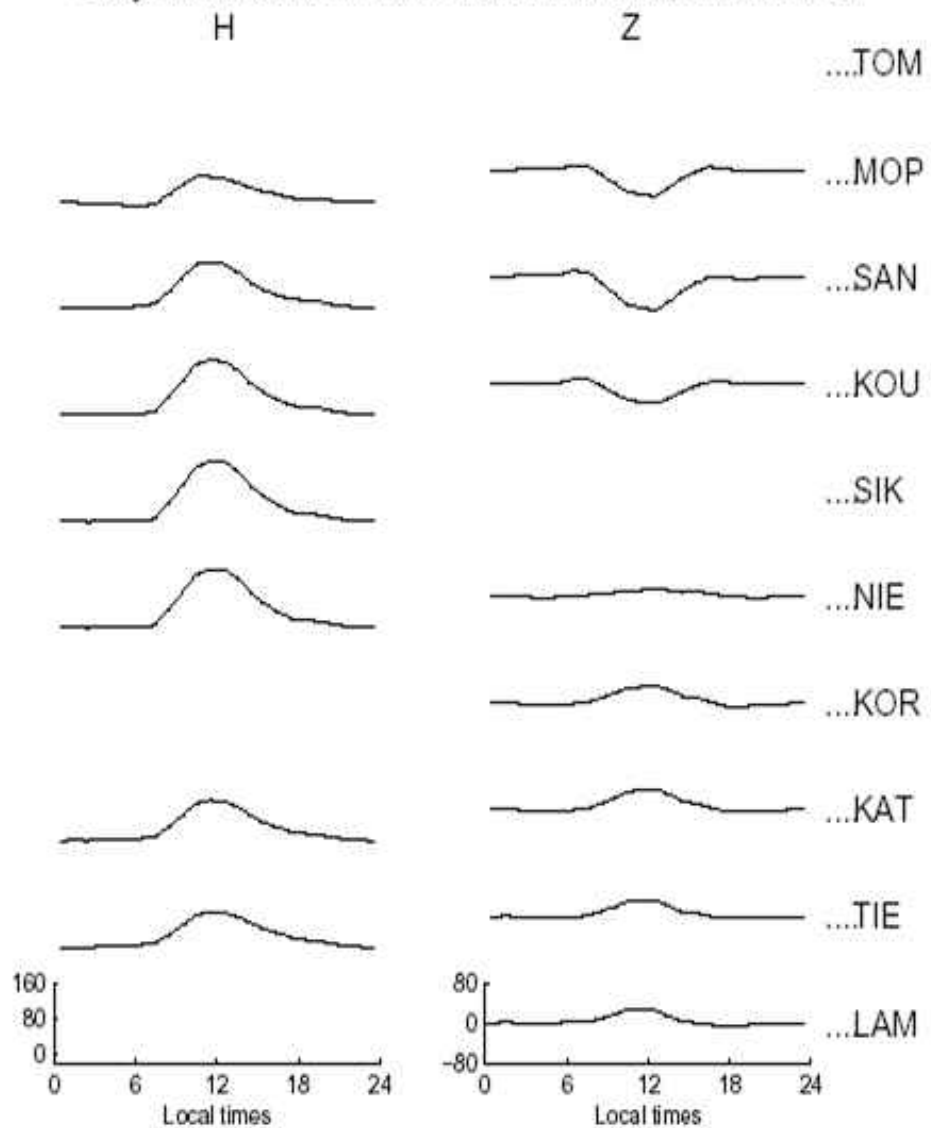
Enregistrement des variations transitoires de la composante horizontale H du champ géomagnétique pendant quelques jours consécutifs à la station de Niellé (Côte d'Ivoire).

I.2- Variations journalières régulières (S_R) au voisinage de l'équateur magnétique

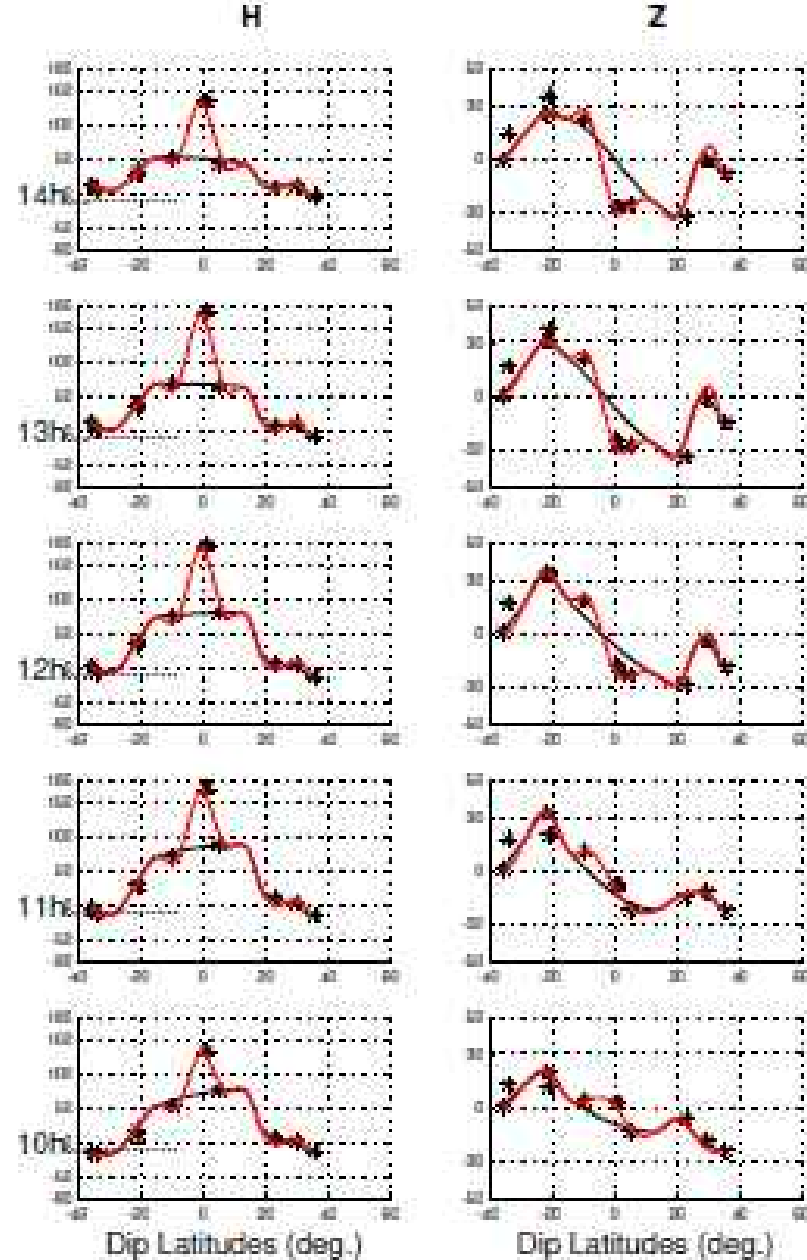
- La variation journalière régulière S_R a été observée en moyennes latitudes dès l'avènement des premiers observatoires en Europe. Graham (1724) a découvert les variations transitoires à partir des observations de Londres en 1722.
- C'est seulement en 1922 que le premier observatoire près de l'équateur magnétique fut installé à Huancayo, au Pérou. C'est de façon inattendue que les premiers enregistrements magnétiques révélèrent une amplitude du S_R de H deux fois et demi plus élevée qu'en moyennes latitudes.
- Et c'est en 1947 que Egedal va démontrer à l'aide de quelques observations, que ce phénomène était lié à l'équateur magnétique. Mais la preuve la plus évidente de ce lien viendra des observations des satellites POGO par Cain et Sweeney (1972).

- Cette amplification du S_R de H fut alors interprétée comme due à un courant intense qui circule de l'Ouest vers l'Est, le long de l'équateur magnétique, à 105km d'altitude environ.
- L'existence et le mécanisme de ce courant furent démontrés par Martyn, en 1948.
- Chapman lui donna le nom « Electrojet Equatorial » en 1951.
- l'électrojet équatorial est considéré comme un supplément de courant qui s'ajoute au système de courant responsable du S_R de moyennes latitudes, à l'équateur magnétique.
- Défini comme circulant de l'Ouest vers l'Est, l'électrojet équatorial est prioritairement caractérisé par ses effets magnétiques sur les composantes H et Z , son effet sur D étant nul par définition.

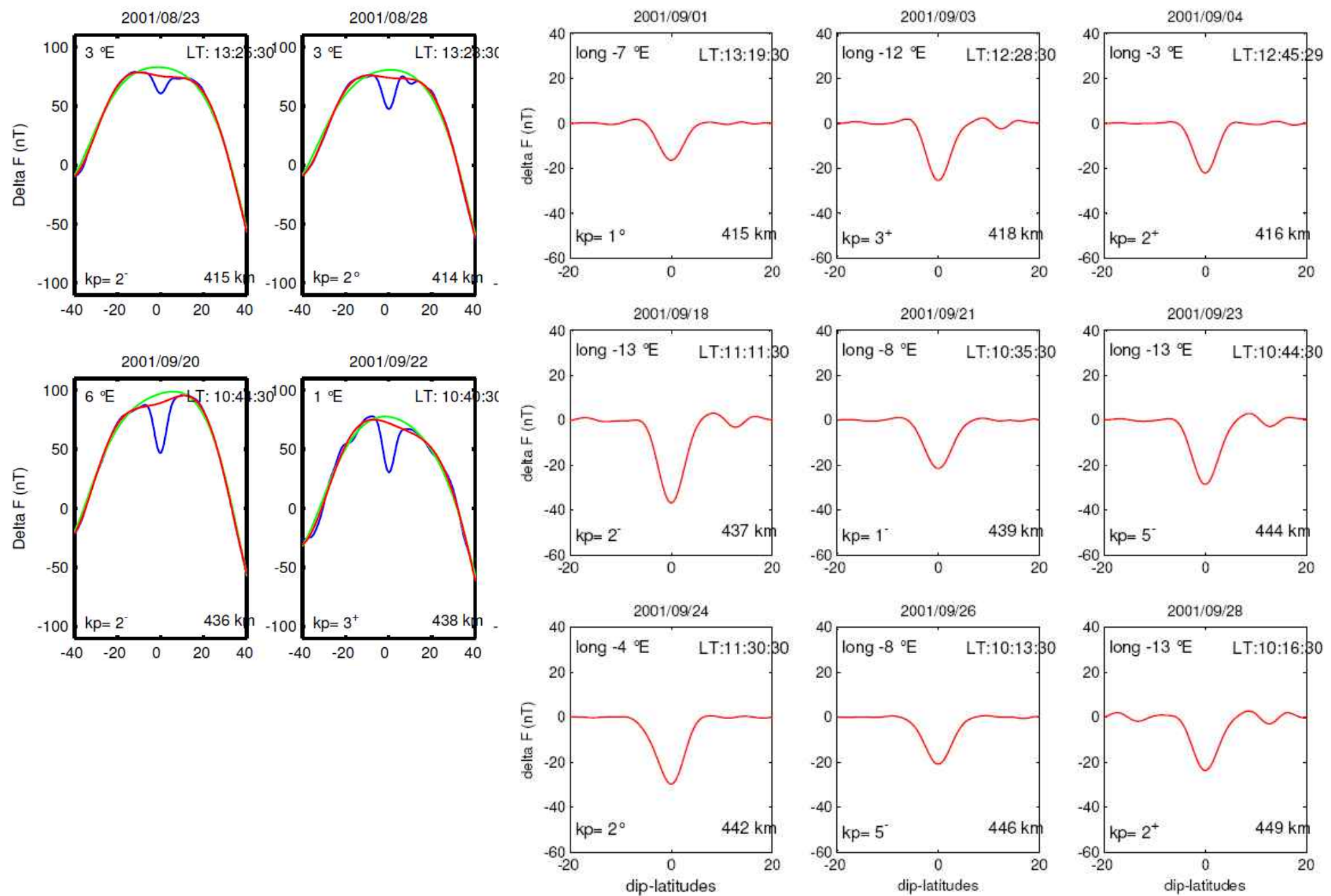
Daily variation of H and Z on the Network, on 28/04/93



-Variations de H et Z en heures locales au sol.



Variations de H et Z en latitude au sol.



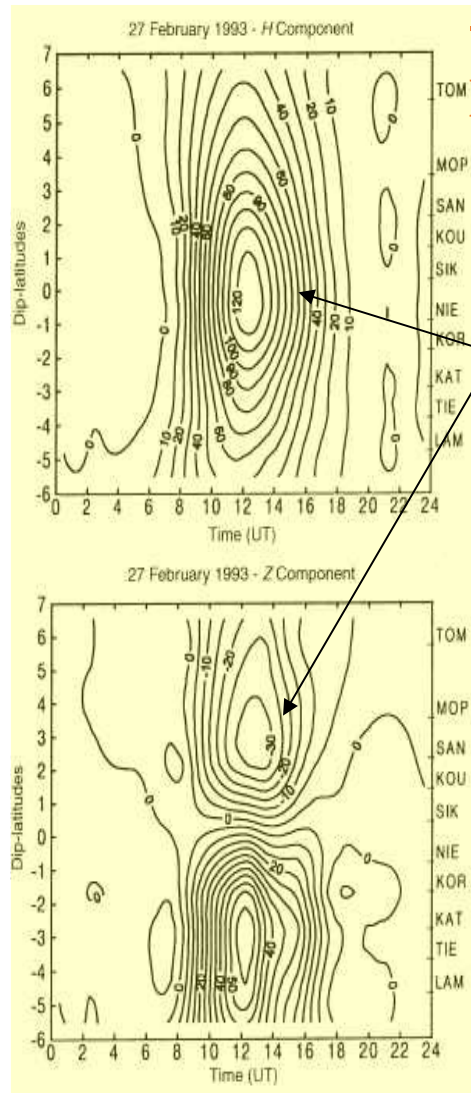
Observations du satellite CHAMP

I.3- Le contre-électrojet

Pendant certains **jours calmes**, à certaines heures, notamment les matin ou le soir, on observe que les profiles en latitude de H et Z sont **inversés au travers de l'équateur magnétique**. Cette inversion a été interprétée par Gouin et Mayaud en 1967 comme l'effet d'un ruban courant circulant vers l'Ouest, qu'ils ont nommé « **Contre-électrojet** ».

I.4- Variations de l'EEJ en heure locale et en longitude

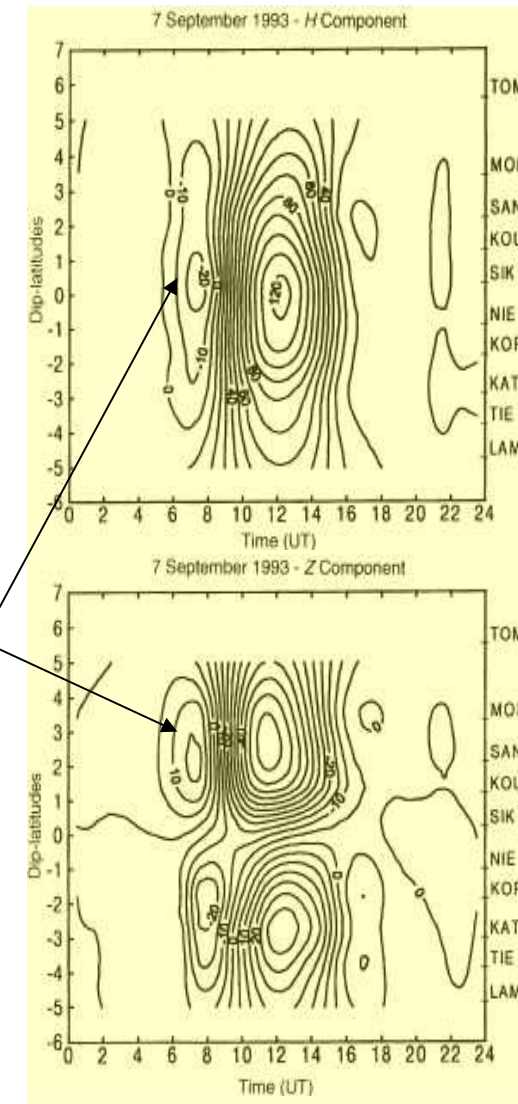
- les cartes de contours de H et Z montrent la variation de l'EEJ en latitude et en heure locale.



Effets d'un ruban de courant circulant vers l'Est:

EEJ

Effets d'un ruban de courant circulant vers l'Ouest: **Contre-électrojet**



Carte de Contours des composantes H et Z des effets magnétiques de l'EEJ.

I.5- Caractéristiques des effets magnétiques de l'électrojet équatorial

- Les composantes **H** et **Z** de la signature magnétique de l'électrojet équatorial se caractérisent par leur variation en **latitude**, bien que leur variation en **heure locale** suit la tendance du S_r planétaire.
- Au sol, les **profils latitudinaux** des deux composantes sont bien marqués au voisinage de l'équateur magnétique, avec une amplitude de H très prononcée, dont le maximum se situe tout près de l'équateur. La composante Z a une structure anti-symétrique par rapport à l'équateur.
- A bord des satellites, l'effet de l'électrojet équatorial se manifeste par une forte dépression de la composante H ou de son effet sur le champ total F à l'équateur.
- du contre électrojet équatorial

Conclusion

L'interprétation des variations journalières régulières nous a conduit à la notion **de courants équivalents**. La question que cela suscite est la suivante:

D'où viennent ces courants ou encore comment ces courants se forment-ils?

C'est pour répondre à ces questions que **les théories de la dynamo ionosphérique** ont été développées.

La deuxième partie du cours sera consacrée à cet aspect, avec un accent sur les courants en basse latitude, c'est-à-dire **l'électrojet équatorial** et les **courants associés**.



Ionosphère **equatoriale**: -Aspect électrodynamique



- **Vafi Doumbia**
- Université Félix Houphouët Boigny, Abidjan,
 - Côte d'Ivoire
- Email: vafid@yahoo.fr

Franck GRODJI

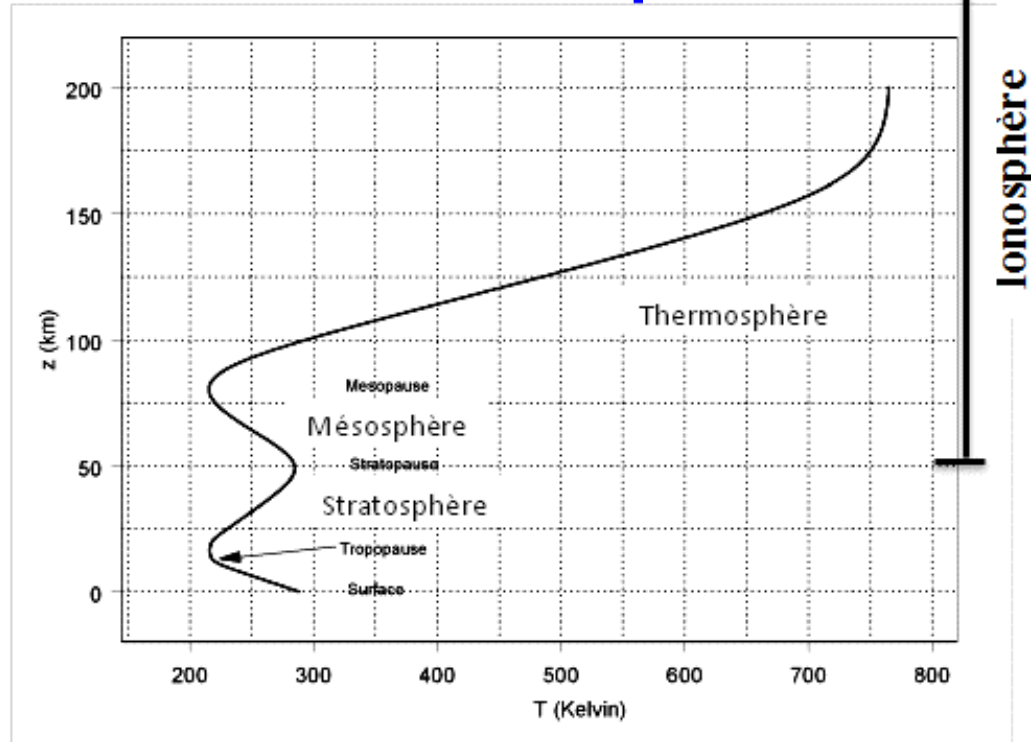
franckgrodji@yahoo.fr



UGANC
*Université Gamal Abdel Nasser
de Conakry*

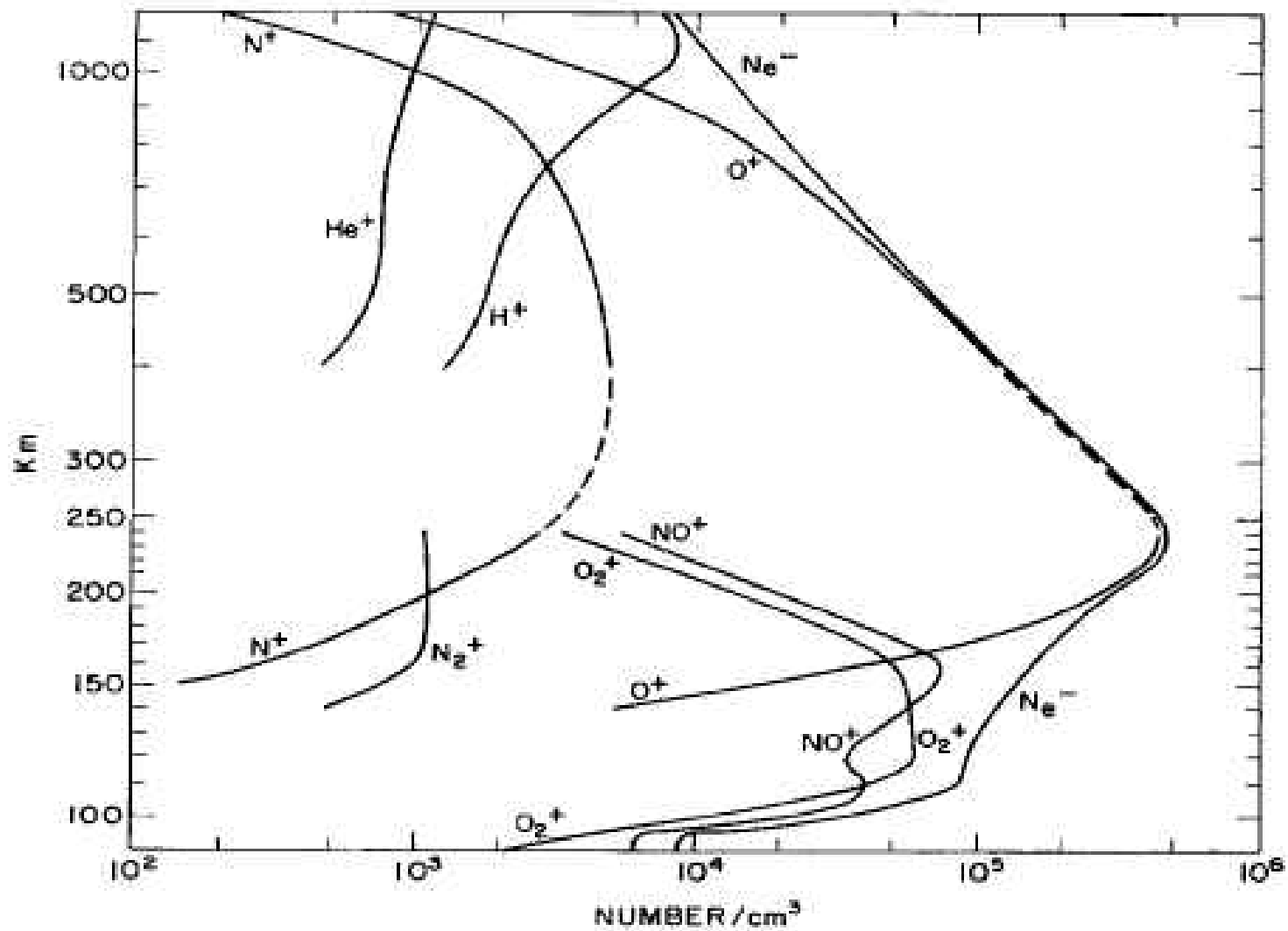
- Les **courants équivalents** déduits des variations journalières régulières du champ magnétique terrestre, montrent qu'il existe bien des courants dans l'ionosphère.
- Quels sont les processus qui concourent à la mise en place de ces courants?
- Pour répondre à cette question il est important d'avoir une idée assez claire de l'ionosphère quant à sa **composition**, à la structure **de la conductivité ionosphérique**, aux **interactions entre les particules** qui composent le plasma ionosphérique et avec le **champ magnétique terrestre**.

II- l'ionosphère



Profil de température de l'atmosphère

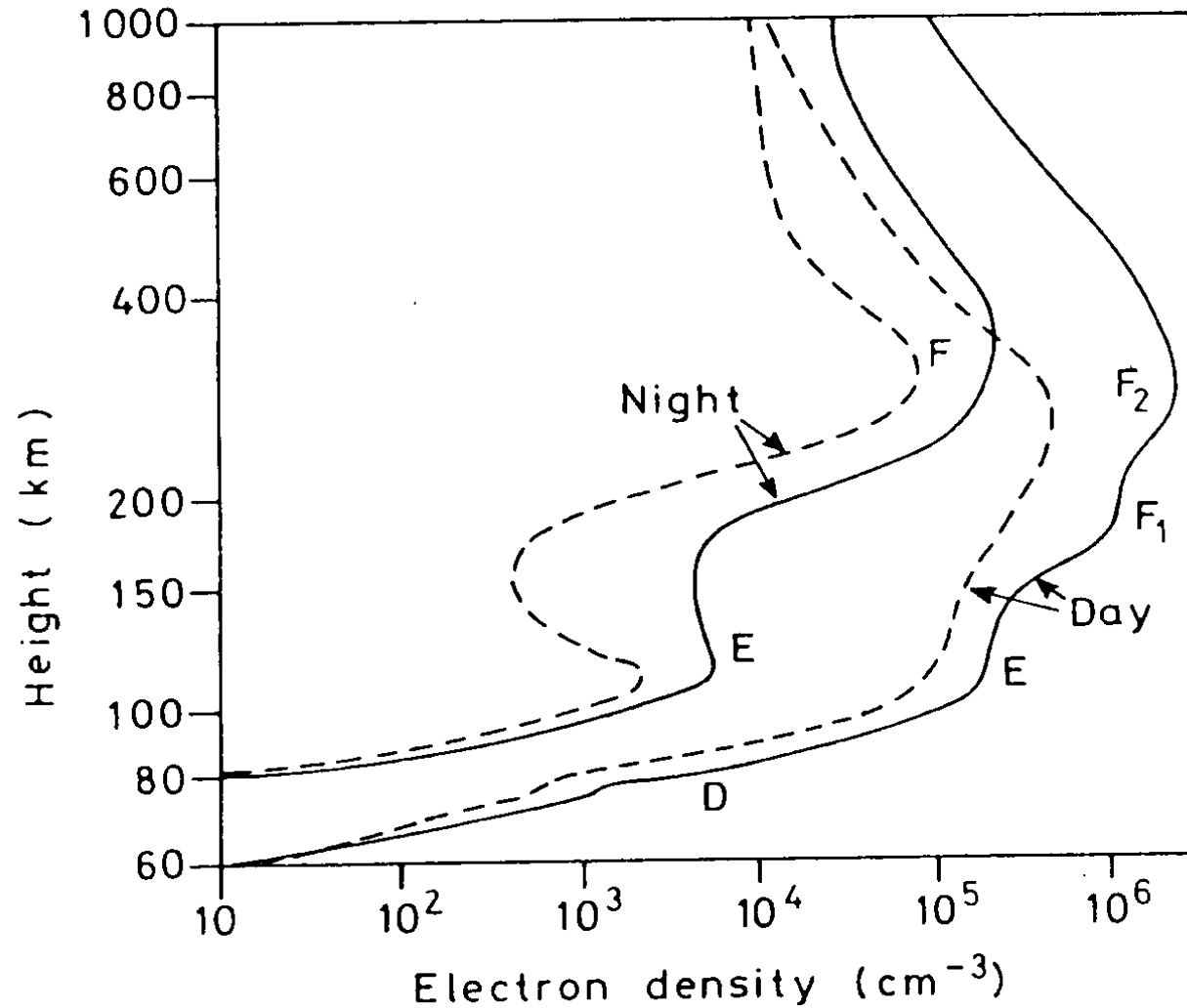
L'ionosphère est la partie partiellement ionisée de la haute atmosphère. Elle se situe au-dessus 50 km d'altitude et coïncide avec la mésosphère et la thermosphère.



Profils verticaux de concentration des électrons et différents ions positifs dans l'ionosphère. Les régions de l'ionosphère sont indiquées à droite de la figure.

Dans l'ionosphère les charges négatives sont portées par les **électrons** dont la densité est égale à celle des ions positifs réunis. Ainsi le gaz ionosphérique est **un plasma de faible densité**, constitué majoritairement de NO^+ , O_2^+ et O^+ et d'électrons en présence d'une **forte densité de gaz neutre**.

II-1 Structure de l'ionosphère



En fonction de la composition de l'atmosphère et des processus dominants, l'ionosphère est subdivisée en couches D, E et F (de jour F se divise en couches F₁ et F₂).

———— Sunspot maximum
----- Sunspot minimum

a- La couche D

La couche D est très **collisionnelle**, les fréquences de collision () électrons-neutres et () ions-neutres ν_{in} sont très élevées, entraînant une forte absorption des ondes radioélectriques HF inférieures à 1 MHz. La recombinaison y est très rapide, de sorte que cette couche ne subsiste pas la nuit lorsque la photoionisation s'est arrêtée.

b- La couche E

La région E est située entre 90 et 150km. Dans la région E, la somme des densités des ions positifs NO^+ et O^+ est approximativement égale à la densité électronique N_e .

- Collision des ions, électrons plus libres.

c- La couche F

La région F de l'ionosphère se situe entre 150 et 600km ou plus. Elle comporte deux sous-couches (F1 et F2) pendant le jour. La couche F1 (150-200km) est formée majoritairement d'ion positif NO^+ et O_2^+ . La couche F2 (200-600km ou plus) qui est la seule à subsister la nuit, est composée d'ion O^+ formé à partir de l'ionisation de l'atome d'oxygène (O) par les rayons EUV de la gamme de 26 à 80nm.

Faible **collision des ions et des électrons**, la région F est dominée par **la diffusion des charges**.

La région F de l'ionosphère est dominée par la diffusion verticale des charges de la couche E vers le haut de jour et vers le bas de nuit depuis la magnétosphère. Ce phénomène de diffusion y maintient la densité électronique élevée à tout moment de la journée. Cette diffusion joue un rôle important dans la dynamo de la région F.

Les théories actuelles de la dynamo ionosphérique ont été élaborées grâce à de nombreuses études (Chapman et Bartels, 1940; Maeda, 1955). Il ressort de ces études que les vents de marée thermosphériques jouent un rôle essentiel dans cette dynamo.

Plusieurs modèles de la dynamo ionosphérique examinent le rôle des vents de marée dans la production de courants et champs électriques et bien d'autres phénomènes tels que la dérive du plasma dans la région F de l'ionosphère (Tarpley, 1970a, b; Rishbeth, 1971a; Richmond et al., 1976; Crain et al., 1993).

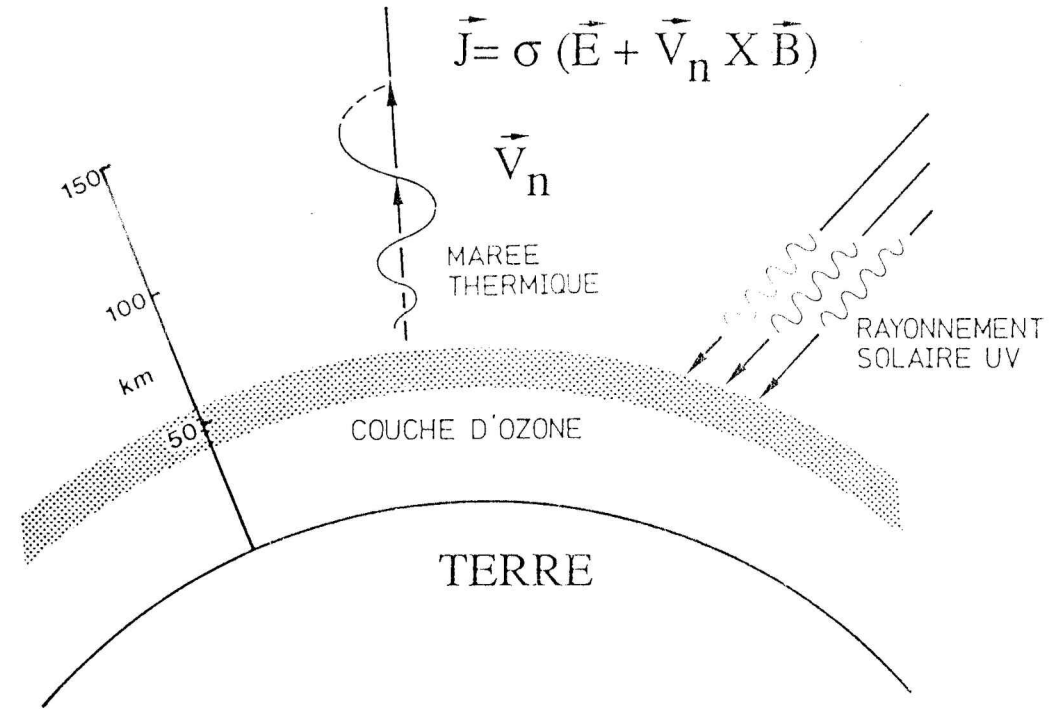
II-2 Théorie de la dynamo ionosphérique

Baignant dans le **champ magnétique terrestre**, le plasma ionosphérique est de fait un **magnétoplasma**, de faible énergie (0.1-1 eV). La circulation de courants dans un tel milieu s'explique par les déplacements des charges au travers des lignes du champ magnétique. En fait les mouvements des charges dans le champ magnétique terrestre donne lieu à une action dynamo (**la dynamo ionosphérique**) qui produit les courants et champs électriques dans l'ionosphère.

Dans cette partie du cours, nous nous intéresserons aux paramètres tels que les vents, le champ électrique, la conductivité ionosphérique, qui sont essentiels dans l'électrodynamique de l'ionosphère.

Les vents de marées atmosphériques

L'absorption de rayonnements solaires ultra-violet (UV) dans l'atmosphère neutre, par les molécules d'ozones (O_3) dans la stratosphère (40-50km) et par l'oxygène moléculaire (O_2) dans la mésosphère (50-90 km) et la basse thermosphère (au-dessus de 90 km), génèrent des oscillations de l'atmosphère neutre organisées à l'échelle planétaire (marées atmosphériques) ou locale (onde de gravité), qui se propagent vers le haut et interfèrent pour donner un système complexe de mouvement de l'atmosphère terrestre. Dans la thermosphère éclairée, l'échauffement dû à l'absorption des rayons UV solaires détend le gaz atmosphérique neutre pour créer des gradients de pression entre le jour et la nuit. La figure 1.8 (Evans, 1978) présente le mécanisme de génération des marées atmosphériques.



. La figure 1.8 Le mécanisme de génération des marées atmosphériques (Evans, 1978).

II-3 Champs électriques dans l'ionosphère

A travers les collisions entre ions et neutres, électrons et neutres, et ions et électrons, les particules chargées sont entraînées à la vitesse d'ensemble du vent neutre. Une particule de charge q , en mouvement dans le champ magnétique terrestre (ambient), subit la force magnétique

$$F = q(V_n \times B)$$

occasionnant ainsi un champ électromoteur (ou champ électrique dynamo) :

$$E_0 = V_n \times B$$

Qui est perpendiculaire à V_n et B

Le plasma ionosphérique étant composé d'ions positifs de charge $q=+e$ et d'électrons de charge $q=-e$, la force F provoque une séparation des charges qui conduit à la formation d'un champ électrique de polarisation E_p . Le champ électrique total qui en résulte est donné par :

$$E = E_p + V_n \times B$$

En moyennes et basses latitudes, les courants circulant dans la couche E de l'ionosphère, sont liés au champ électrique E . La densité de courant j est exprimée par la loi d'Ohm:

$j = \bar{\sigma}(E_p + V_n \times B)$ représente le tenseur de conductivité dans l'ionosphère.

La densité de courant j est maintenue **non divergente** par le champ de polarisation E_p qui assure la continuité du courant. Le champ E_p est irrotationnel, ce qui implique qu'il dérive d'un potentiel électrique ψ . On peut donc écrire:

$$\nabla \cdot j = 0$$

$$\nabla \times E_p = 0$$

$$E_p = -\nabla \psi$$

Les courants de l'ionosphère dépendent de la mobilité des charges. Cette mobilité dépend de l'ensemble des forces qui agissent sur les ions et les électrons, et déterminent la structure de la conductivité électrique dans l'ionosphère.

II-4 Conductivités électriques dans l'ionosphère

Le plasma ionosphérique est couplé au champ électrique E , au champ géomagnétique B et au gaz atmosphérique neutre. La conductivité de ce milieu dépend de la mobilité des charges électriques. Cette mobilité est induite par le bilan des forces qui agissent sur les particules chargées. Les forces susceptibles d'agir sur une particule chargée sont les suivantes:

- force de Lorentz

$$F_{em} = \pm e(E + V_n \times B)$$

force de collision

$$F_c = m \nu (V - V_n)$$

poids (gravitation)

$$P = mg$$

- force de gradient de

pression

$$\vec{F}_p = \frac{1}{N} \vec{\nabla}(NkT)$$

Où e est la charge élémentaire, le signe plus pour les ions positifs et le signe moins pour les électrons;
 m et V sont la masse et la vitesse de la particule chargée, ν sa fréquence de collision avec les neutres et V_n , la vitesse des neutres;
 g est l'accélération de la pesanteur;
 N et T sont respectivement la concentration et la température de la particule chargée, et k , la constante de Boltzmann.

Les collisions entre les électrons ou les ions avec les particules neutres sont caractérisées respectivement par les fréquences de collision ν_{en} et ν_{in} , et entre électrons et ions, caractérisées par les fréquences de collision ν_{ei} et ν_{ie} .

Dans les régions E et F, la concentration des électrons (N_e) est égale à la concentration des ions positifs (N_i).

Pour y calculer le tenseur de conductivité, on doit déterminer la vitesse relative entre électrons et ions. $(V_e - V_i)$ et sont respectivement les vitesses des ions et des électrons.

Lorsque la vitesse relative est connue, la densité de courant est donnée par la relation suivante:

$$j = N_e \cdot e (V_i - V_e)$$

Pour déterminer $(V_i - V_e)$, on considère que les différentes forces sont en équilibre et les équations d'équilibre sont données respectivement par les expressions suivantes:

$$N_e e(E + V_i \times B) - N_e m_i \nu_{in} (V_i - V_n) - N_e m_i \nu_{ie} (V_i - V_e) + N_e m_i g - \nabla(N_e k T_i) = 0$$

$$- N_e e(E + V_e \times B) - N_e m_e \nu_{en} (V_e - V_n) - N_e m_e \nu_{ei} (V_e - V_i) + N_e m_e g - \nabla(N_e k T_e) = 0$$

Dans ces équations, les forces dominantes sont les forces électromagnétiques (F_{em}) et les forces de collision (F_c). Pour simplifier, le **poids** et le **gradient de pression** peuvent être négligés devant F_{em} et F_c . Ces équations sont alors réduites et deviennent :

$$N_e e (E + V_i \times B) - N_e m_i \nu_{in} (V_i - V_n) - N_e m_i \nu_{ie} (V_i - V_e) = 0 \quad (1)$$

$$- N_e e (E + V_e \times B) - N_e m_e \nu_{en} (V_e - V_n) - N_e m_e \nu_{ei} (V_e - V_i) = 0 \quad (2)$$

Ces équations permettent de déterminer la vitesse différentielle entre électrons et ions dans **un repère lié au champ magnétique** B .

Ce repère est défini par les directions suivantes: (i) parallèle au champ magnétique \vec{B} ; (ii) perpendiculaire à \vec{B} et parallèle au champ électrique \vec{E} ; et (iii) à la fois perpendiculaire à \vec{B} et à \vec{E} . En projetant \vec{B} dans ce repère et après différents $(V_n = V_e)$

arrangements, on obtient l'expression de la densité de courant par:

$$\vec{j} = \sigma_0 \vec{E}_{//} + \sigma_P (\vec{E}_{\perp} + \vec{V}_n \times \vec{B}) + \sigma_H \frac{B}{B} \times (\vec{E}_{\perp} + \vec{V}_n \times \vec{B})$$

$E_{//}$ et E_{\perp} sont les projections du champ électrique \vec{E} dans les directions parallèle et perpendiculaire à \vec{B} ; B est le module de \vec{B} .

B

On déduit de l'expression de la densité de courant celles des éléments du tenseur de conductivité .

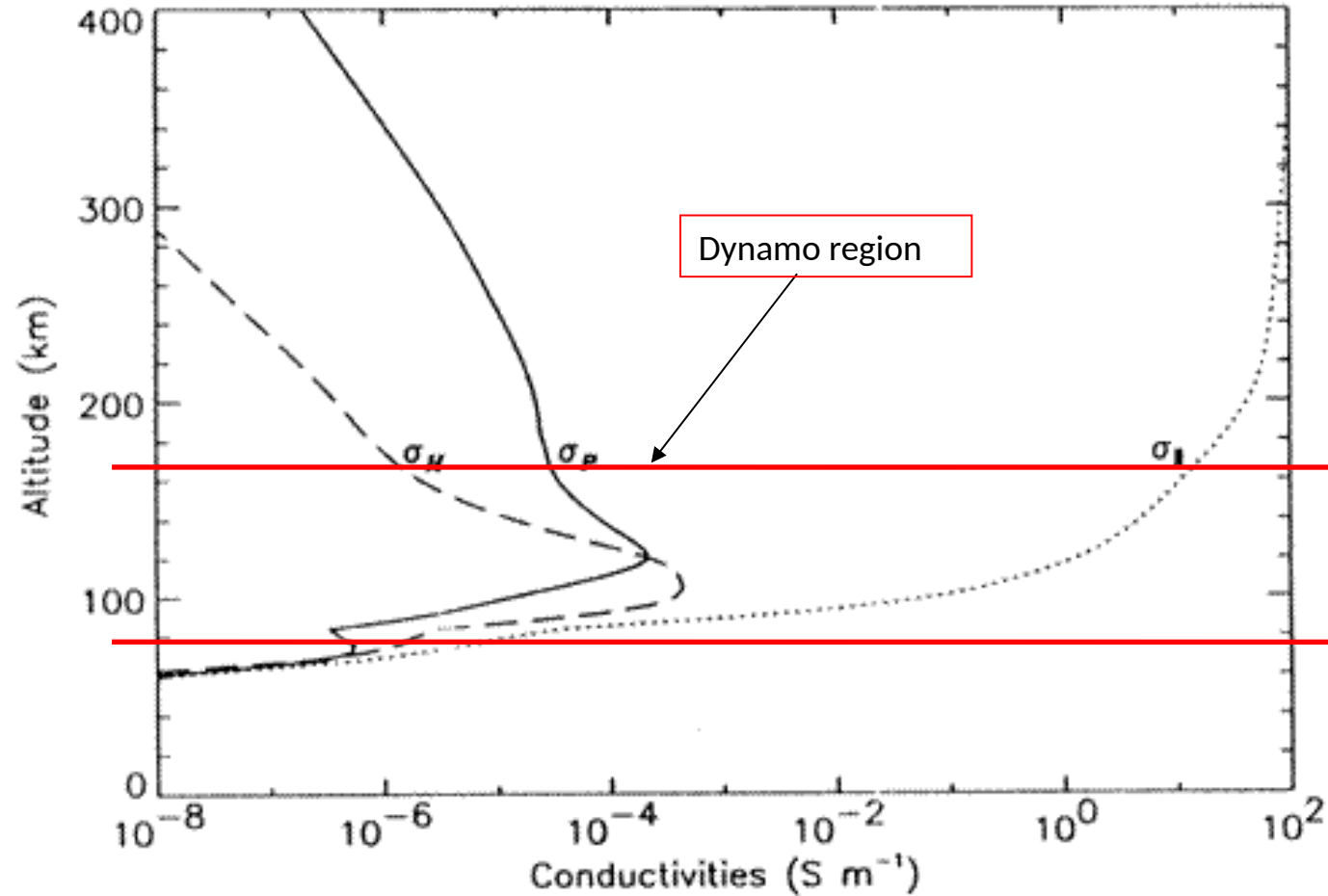
$$\sigma_0 = N_e e^2 \left(\frac{1}{m_e \nu_e} + \frac{1}{m_i \nu_i} \right) \text{ conductivité parallèle}$$

$$\sigma_P = \frac{N_e e}{B} \left(\frac{\nu_e \Omega_e}{\nu_e^2 + \Omega_e^2} + \frac{\nu_i \Omega_i}{\nu_i^2 + \Omega_i^2} \right) \text{ conductivité de Pedersen}$$

$$\sigma_H = \frac{N_e e^2}{B} \left(\frac{\Omega_e^2}{\nu_e^2 + \Omega_e^2} - \frac{\Omega_i^2}{\nu_i^2 + \Omega_i^2} \right) \text{ conductivité de Hall}$$

où $\Omega_e = \frac{eB}{m_e}$ et $\Omega_i = \frac{eB}{m_i}$ sont respectivement les gyrofréquences des électrons et des ions; et $\nu_e = \nu_{en} + \nu_{ei}$

$\nu_i = \nu_{in} + \nu_{ie}$ sont les fréquences effectives de collision des électrons et des ions.



Profils verticaux de conductivité parallèle ($\sigma_{||}$), de Pedersen (σ_P) et de Hall (σ_H), en moyenne latitude, en équinoxe dans les conditions de minimum solaire. (D'après Richmond, 1995a).

Quelque soit l'altitude, σ_0 est supérieur à σ_p et σ_H les valeurs maximales sont situées respectivement à 125km et entre 105 et 110km. Le pique de σ_H est plus fort que celui de σ_p .

$$\sigma_p$$

L'importance des conductivités σ_p et σ_H dans la région E, implique que le courant j_{\perp} est plus important.

II-5 Les courants ionosphériques

La forme générale de la densité de courant ionosphérique

$$\vec{j} = \sigma_0 \vec{E}_{//} + \sigma_P (\vec{E}_{\perp} + \vec{V}_n \times \vec{B}) + \sigma_H \frac{\vec{B}}{B} \times (\vec{E}_{\perp} + \vec{V}_n \times \vec{B})$$

comporte trois; une composante parallèle au champ magnétique

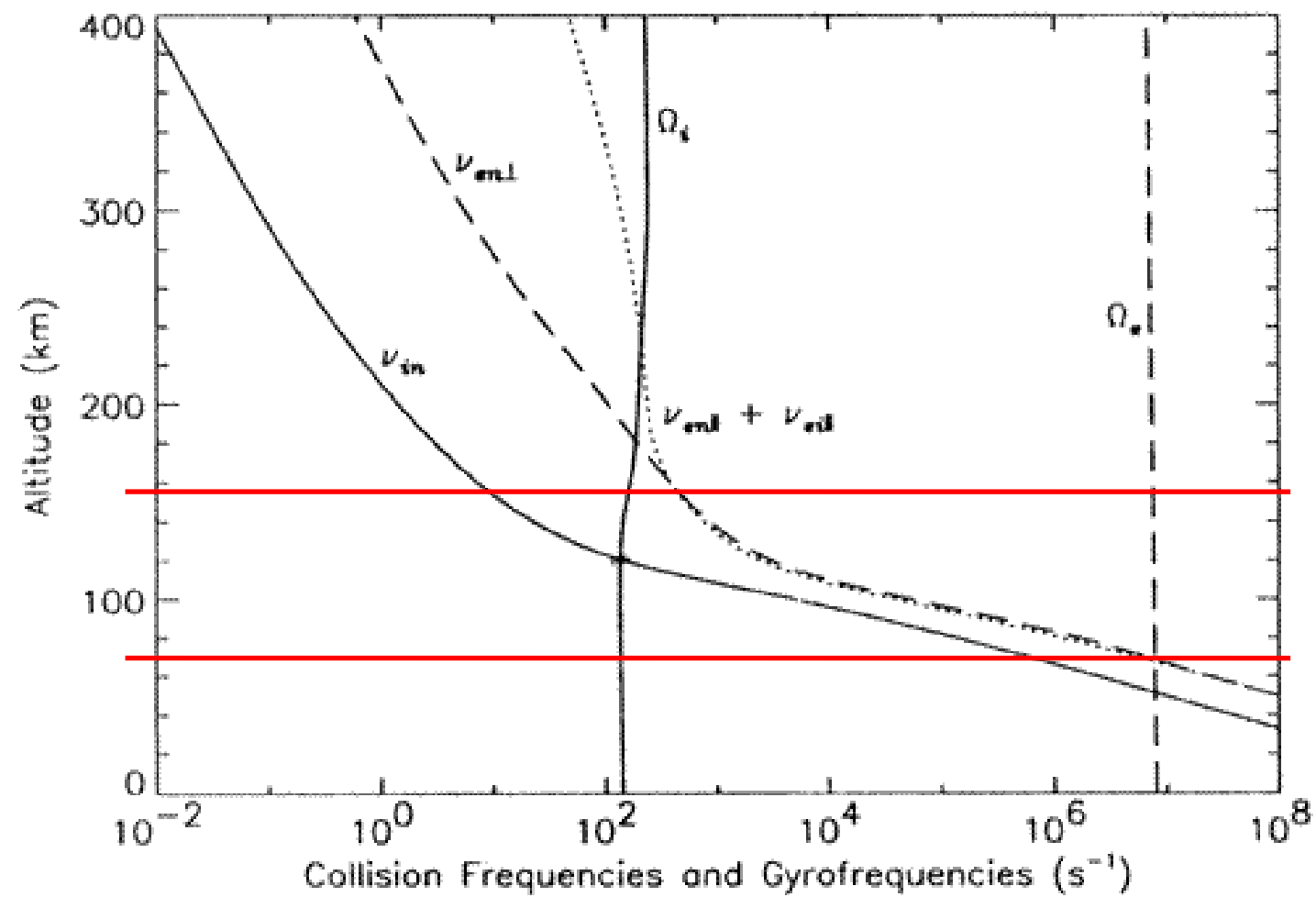
: $j_{//} = \sigma_0 E_{//}$ et une composante perpendiculaire:

Cette dernière comprend les courants de Pedersen et de Hall qui

sont important en région E:

$$\vec{j}_P = \sigma_P (\vec{E}_{\perp} + \vec{V}_n \times \vec{B})$$

$$\vec{j}_H = \sigma_H \frac{\vec{B}}{B} \times (\vec{E}_{\perp} + \vec{V}_n \times \vec{B})$$



Richmond 1995

La fréquence de collision des électrons est inférieure à leur gyrofréquence ($\nu_{en} < \Omega_e$) dans la région E, tandis que celle des ions reste supérieure à leur gyrofréquence ($\nu_{in} > \Omega_i$).

- les électrons peuvent se déplacer le long des lignes de force du champ magnétique (forte) et donner lieu au courant parallèle ;

$$\dot{j}_{//}$$

- les ions sont entraînés par collision avec les neutres au travers du champ magnétique, créant un champ électrique

$\vec{E}_{\perp} + \vec{V}_n \times \vec{B}$ qui génère un courant de Pedersen et un courant de Hall.

$$\vec{j}_P = \sigma_P (\vec{E}_{\perp} + \vec{V}_n \times \vec{B}) \text{ - courant d'ion}$$

$$\vec{j}_H = \sigma_H \frac{\vec{B}}{B} \times (\vec{E}_{\perp} + \vec{V}_n \times \vec{B}) \text{ dérive des électrons.}$$

Dans la région F (au-dessus de 160km), $\nu_{en} \ll \Omega_e$; $\nu_{in} \ll \Omega_i$
 σ_0 est très grande devant σ_P . La composante du courant j_{\perp} y est relativement faible de jour, période où la région E, de plus forte conductivité, tend à la court-circuiter à la base. Le courant aligné représente l'essentiel des courants qui circulent dans la région F.

- Cette région est surtout dominée par la diffusion du plasma. Les champs électrique et magnétique imposent une dérive verticale ($\mathbf{V}_d = \frac{\mathbf{E} \times \mathbf{B}}{B^2}$) aux ions et électrons sans distinction de charges ou masses. On a alors

$V_i - V_e = 0$. Aucune circulation significative de courant n'a lieu dans la région F de jour.

Toutefois, depuis les travaux de Rishbeth (1971a, b), il est établi que des courants de **la dynamo de région F** circulent la nuit. Cela se produit lorsque la **conductivité de région E** n'est plus suffisante pour **court-circuiter la base de la région F**. Il peut alors se développer une polarisation semblable à celle de la région E de jour.

- Plusieurs études font état de cette dynamo de région F qui peut être très importante au maximum solaire où la conductivité de Pedersen présente un maximum au-dessus de 200km (Takeda et Araki, 1985).

Les mécanismes de la dynamo ionosphérique décrits dans cette partie du cours se produisent à toutes les latitudes.

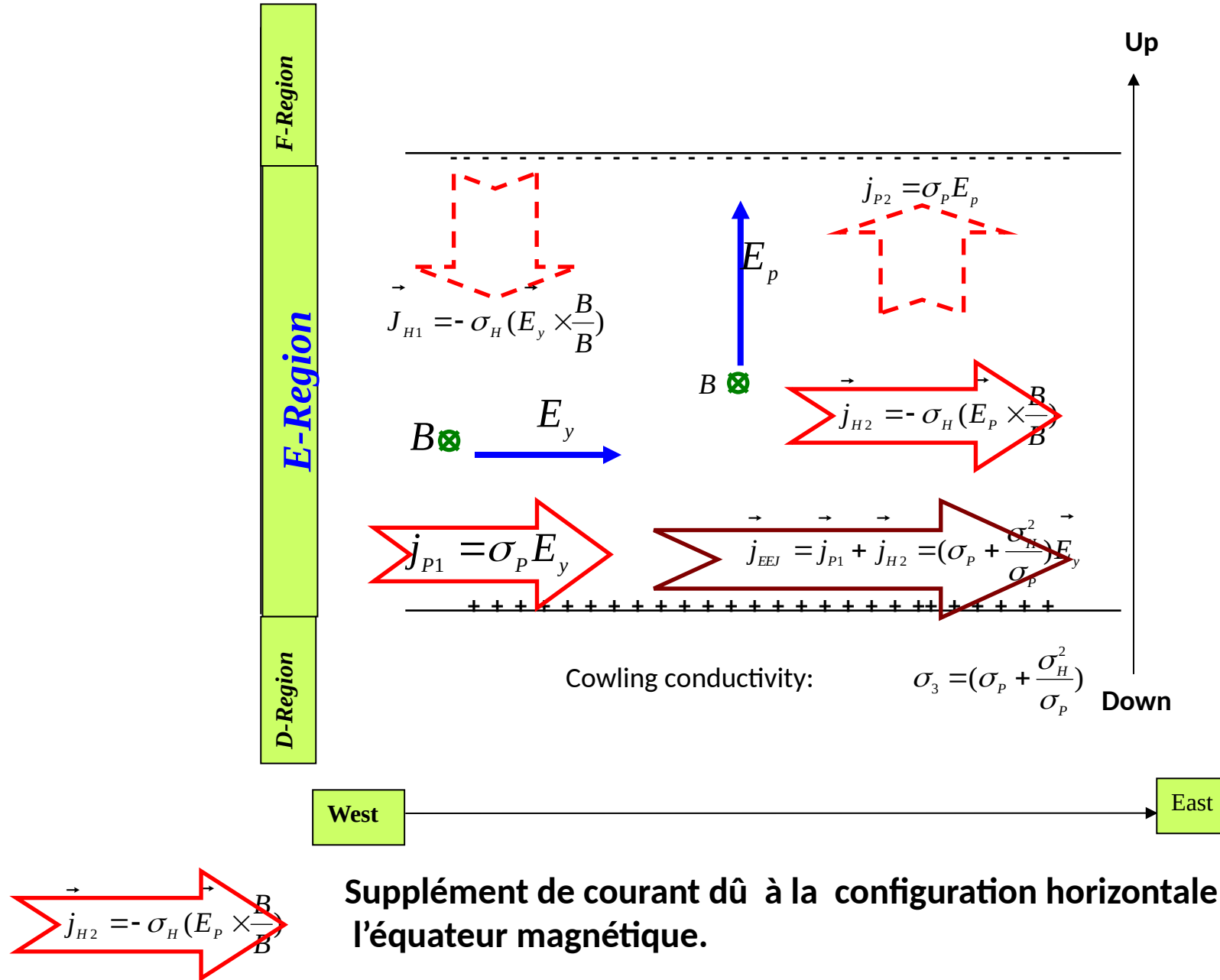
Mais les configurations particulières des champs magnétique et électrique en basses et hautes latitudes, provoquent des mécanismes supplémentaires donnant lieu à des courants intenses.

- En basses latitudes les champs magnétique et électrique sont horizontaux, dirigés respectivement vers le Nord et vers l'Est.

Cette configuration induit une polarisation qui amplifie la conductivité dans la direction Est-ouest, et génère un courant intense à l'équateur magnétique, appelé "**Electrojet équatorial**".

6.2

Mecanisme de l'EEJ



Supplément de courant dû à la configuration horizontale de E_y et B à l'équateur magnétique.

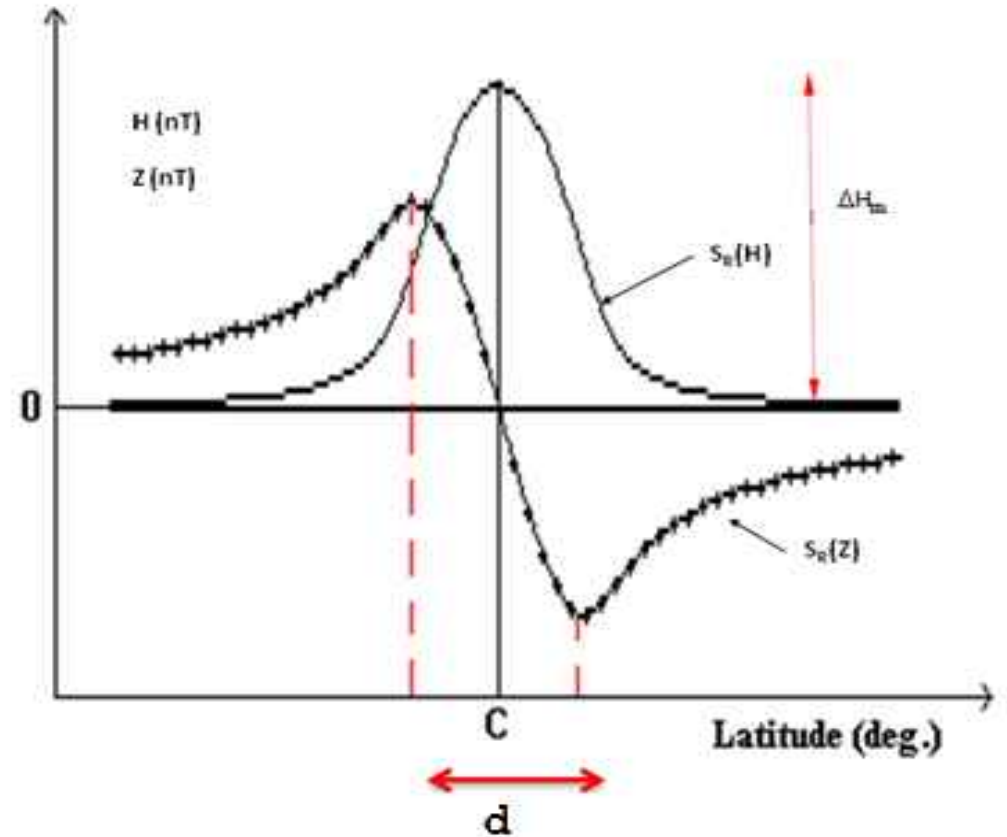
Estimation des Paramètres de l'EEJ

En considérant le ruban de courant comme étant un ruban uniforme, Fambitakoye (1976) a établi une relation plus simple permettant de déterminer l'intensité de courant au centre C de l'électrojet équatorial à partir de la connaissance de la demi-largeur d de l'électrojet équatorial et de l'amplitude maximale ΔH_m du , aux environs de midi. La relation est la suivante :

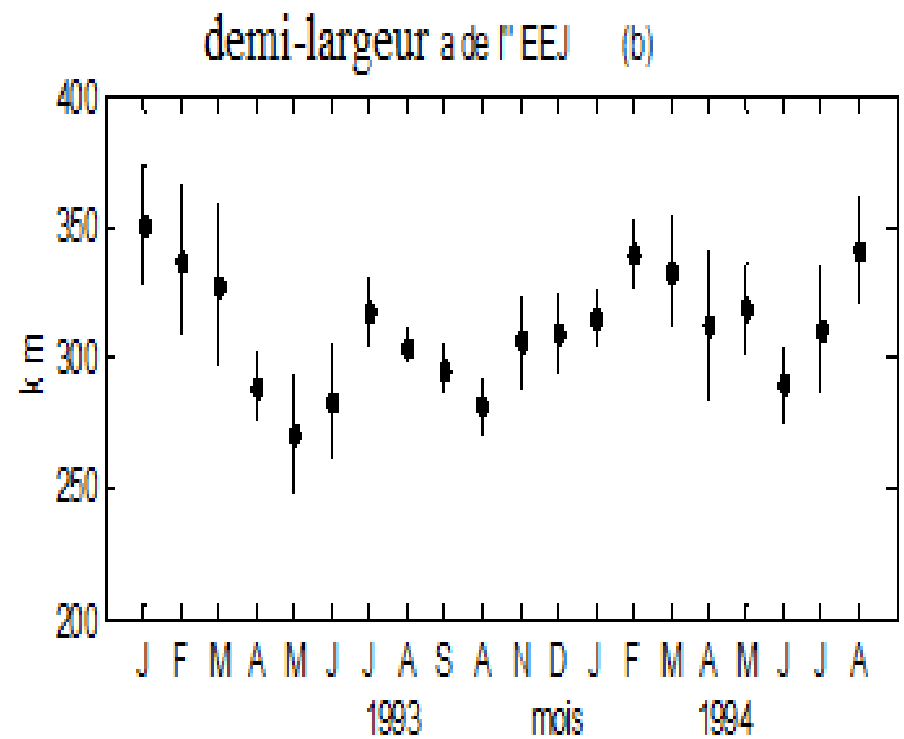
distribution quadratique proche de celle de Richmond (1973)

Avec

On prend $h=105$ km d'altitude



Paramètres de l'électrojet equatorial à Korhogo

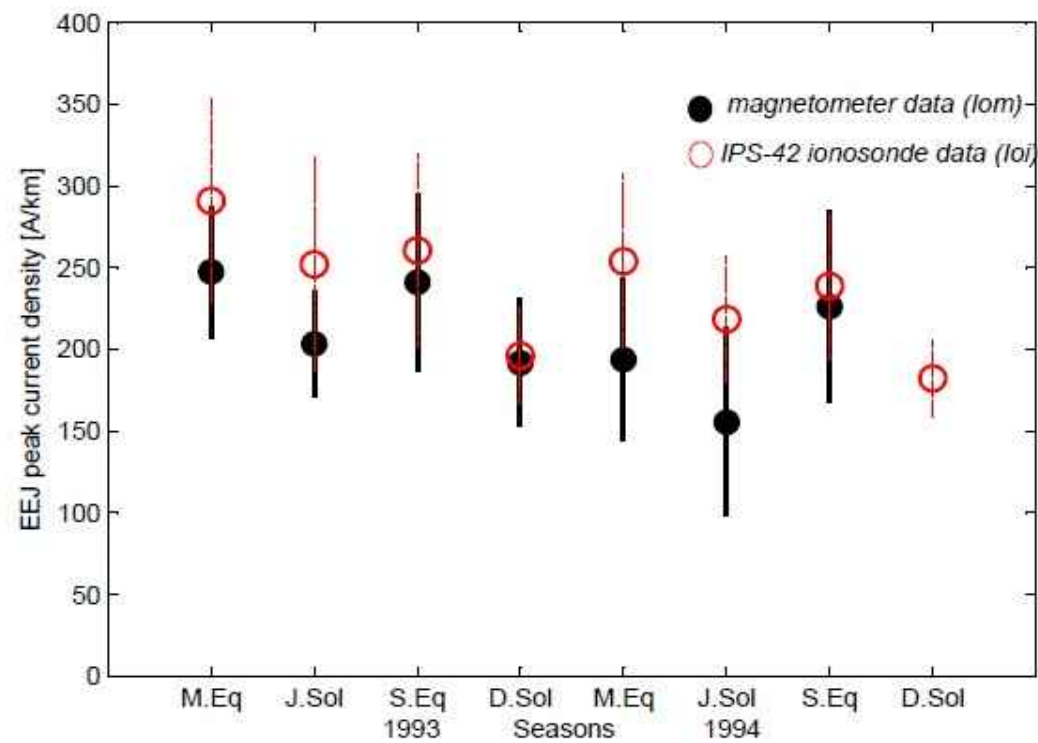


Grodji et al, 2016

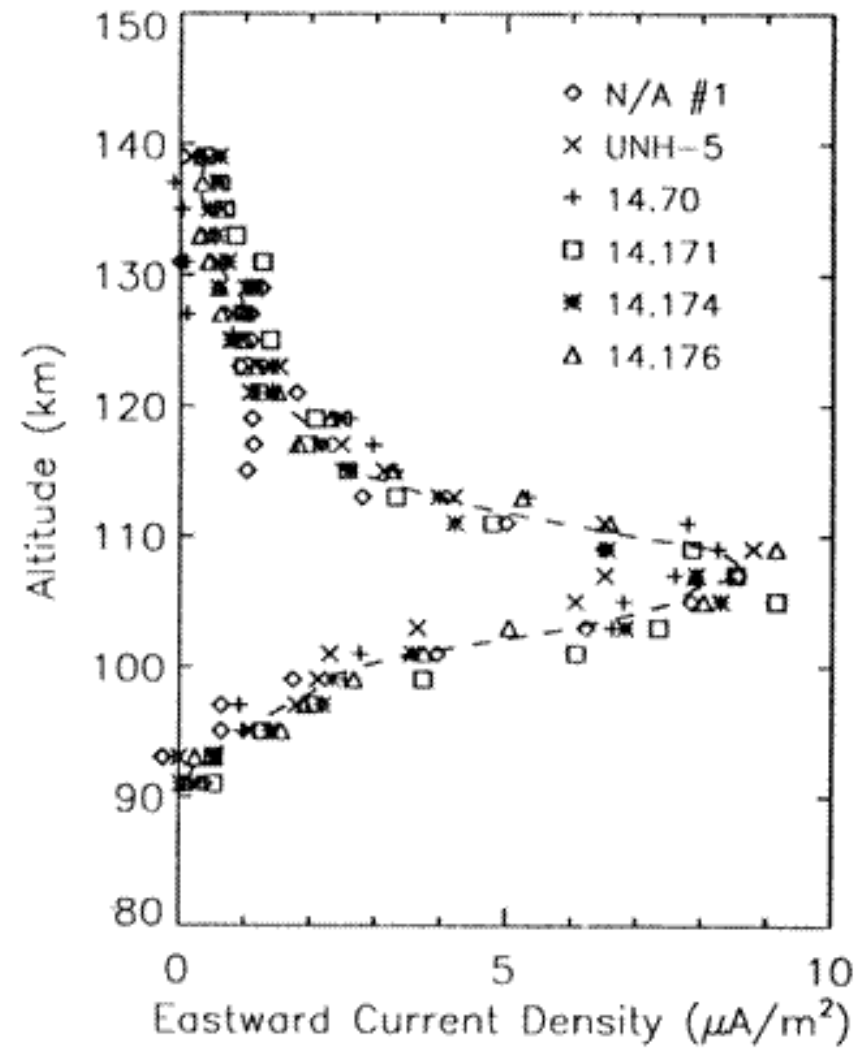
	Solstice Décembre	Equinoxe Mars	Solstice Juin	Equinoxe Septembre
1993	350.35	318.14	290.44	294
1994	310.28	328.14	306.66	340.95

Fambitakoye (1976) : 350 ± 50 km Afrique centrale

Forbush et Casaverde (1961) : 600 km à Huancayo (péru)

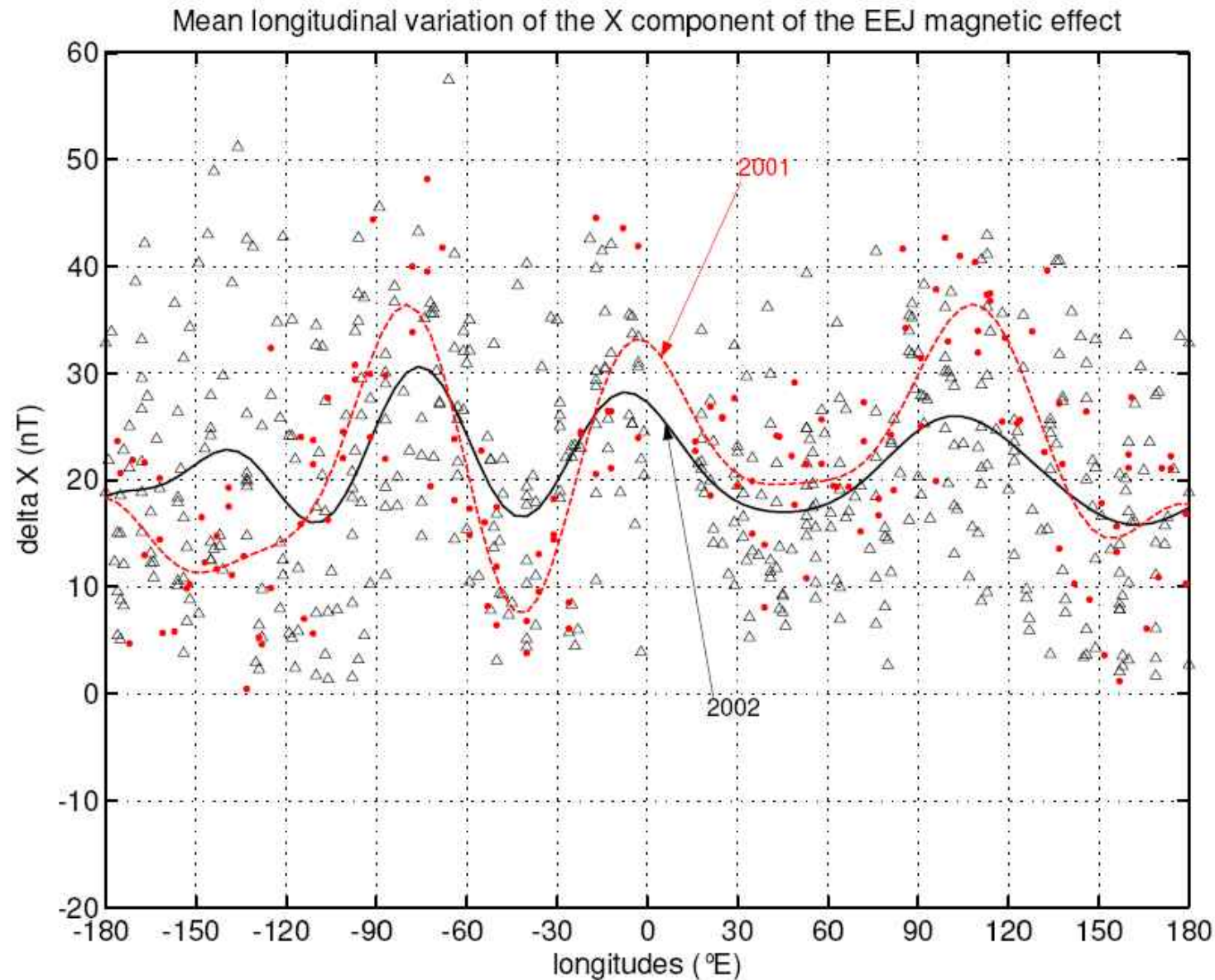


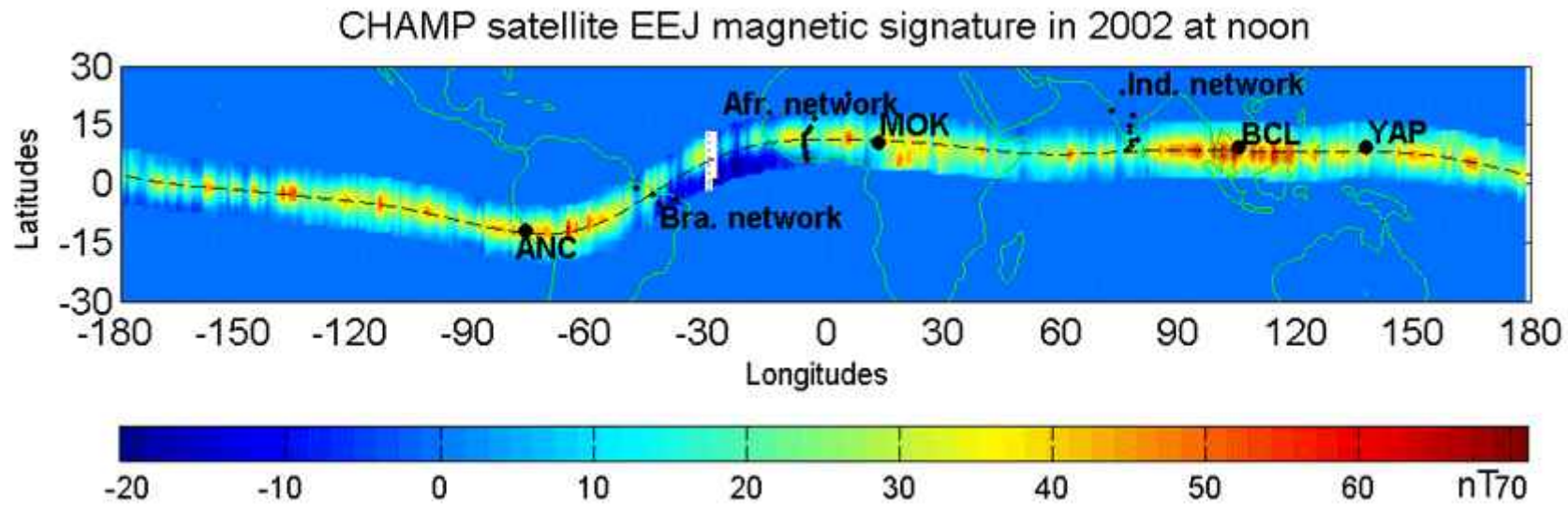
	données Magnétiques	Données Ionosonde	Différences
1993-1994	(A/km)	(A/km)	(A/km)
March equinox	247.46	290.80	43.34
June solstice	203.36	252.03	48.67
September equinox	241.00	260.55	19.55
December solstice	191.64	196.12	4.49
March equinox	193.65	253.93	60.28
June solstice	155.45	218.43	62.98
September equinox	226.15	238.68	12.53



Profil vertical de la densité de courant à l'équateur magnétique au Pérou, à partir des mesures de fusées.

Variation longitudinale de la signature magnétique de l'EEJ à 12LT, observations du satellite CHAMP





Signature magnétique de l'EEJ extraite des observations du satellite CHAMP autour du midi local en 2001.

II.6.3- Courant méridional associé à l'électrojet équatorial

L'hypothèse d'une couche F non conductrice est une approximation simplificatrice de premier ordre. En fait, au voisinage de l'équateur magnétique, la base de la couche F est traversée par des lignes de force qui transitent également par la couche E en basse latitude. Or ces lignes sont dotées d'une forte conductivité parallèle qui favorise la circulation de courants méridionaux dans cette région. D'où l'égalité $\frac{E_p}{E_y} = \frac{\sigma_H}{\sigma_P}$ n'est qu'une approximation de premier ordre. Le champ de polarisation se développe de sorte que la divergence de la densité de courant soit nulle ($\nabla \cdot j = 0$) le long des lignes de force.

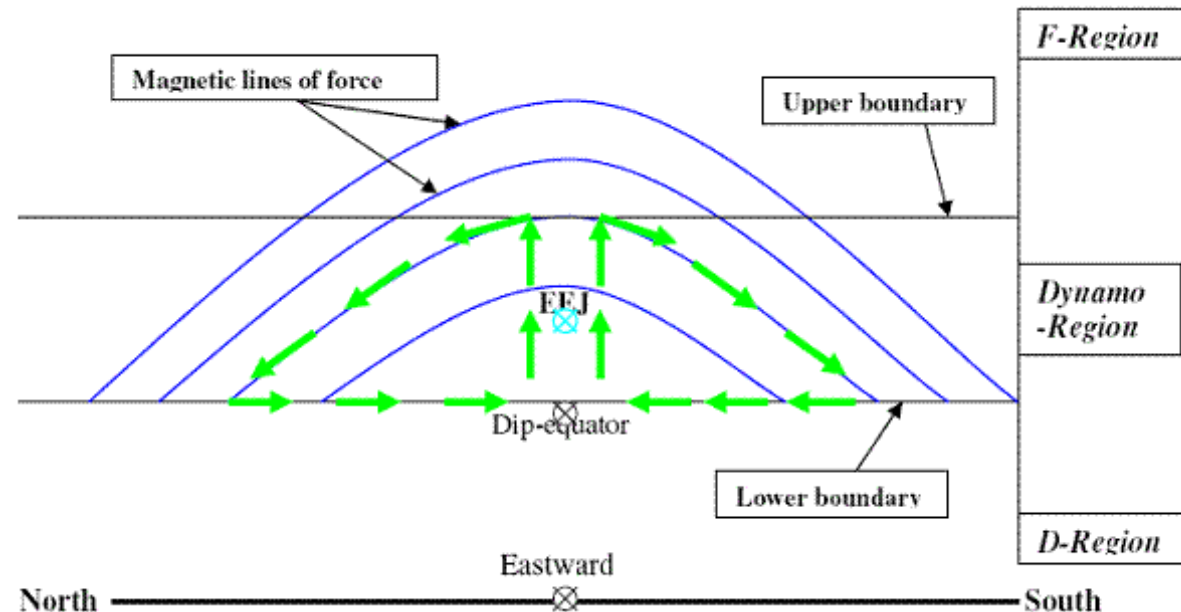
$$\nabla \cdot j = 0$$

Des études ont montré que le champ de polarisation satisfait plutôt la condition suivante:

$$\frac{E_p}{E_y} > \frac{\sigma_H}{\sigma_P}$$

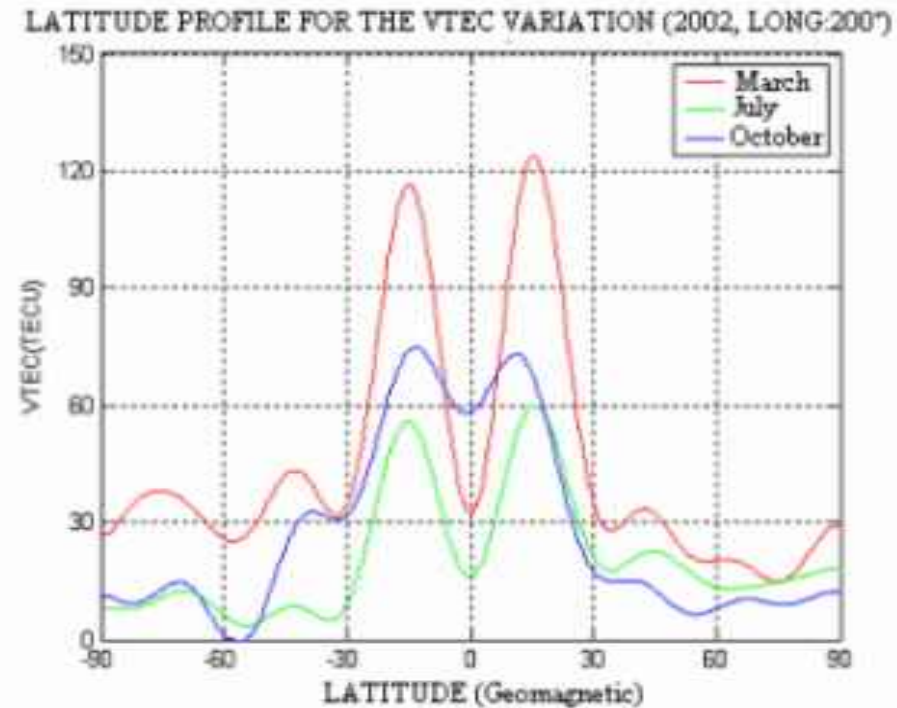
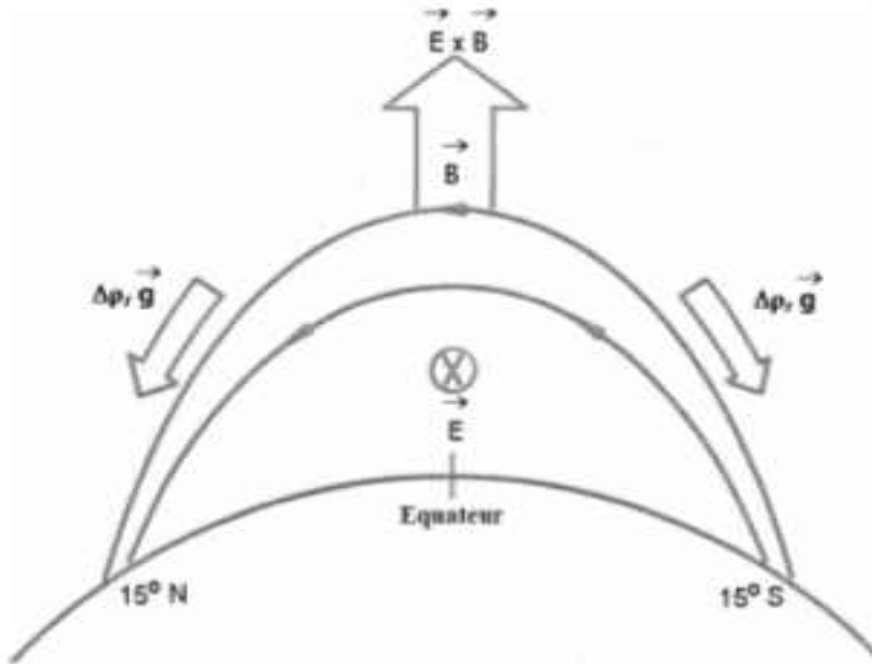
$$\vec{j}_z = \sigma_P \vec{E}_p - \sigma_H \left(\vec{E}_y \times \frac{\vec{B}}{B} \right) > 0$$

$$\frac{E_p}{E_y} = \frac{\int \sigma_H ds}{\int \sigma_P ds}$$



II-8 Autres phénomènes

II-8.1 Anomalie équatoriale (la fontaine équatoriale)



La fontaine équatoriale dérive de deux mécanismes:

- La dérive verticale du plasma ionosphérique
- La diffusion ambipolaire

Chute de la densité électronique du plasma proche de l'équateur
Et une amplification de cette densité électronique au niveau des Tropiques (aux environs de 20° de latitude)

Merci