



Fontaine équatoriale et PRE

Christine Amory-Mazaudier

*LPP, CNRS/Ecole Polytechnique/Sorbonne Université/Université Paris-Sud/Observatoire de Paris
The Abdus Salam International Centre of Theoretical Physics, T/ICT4D*

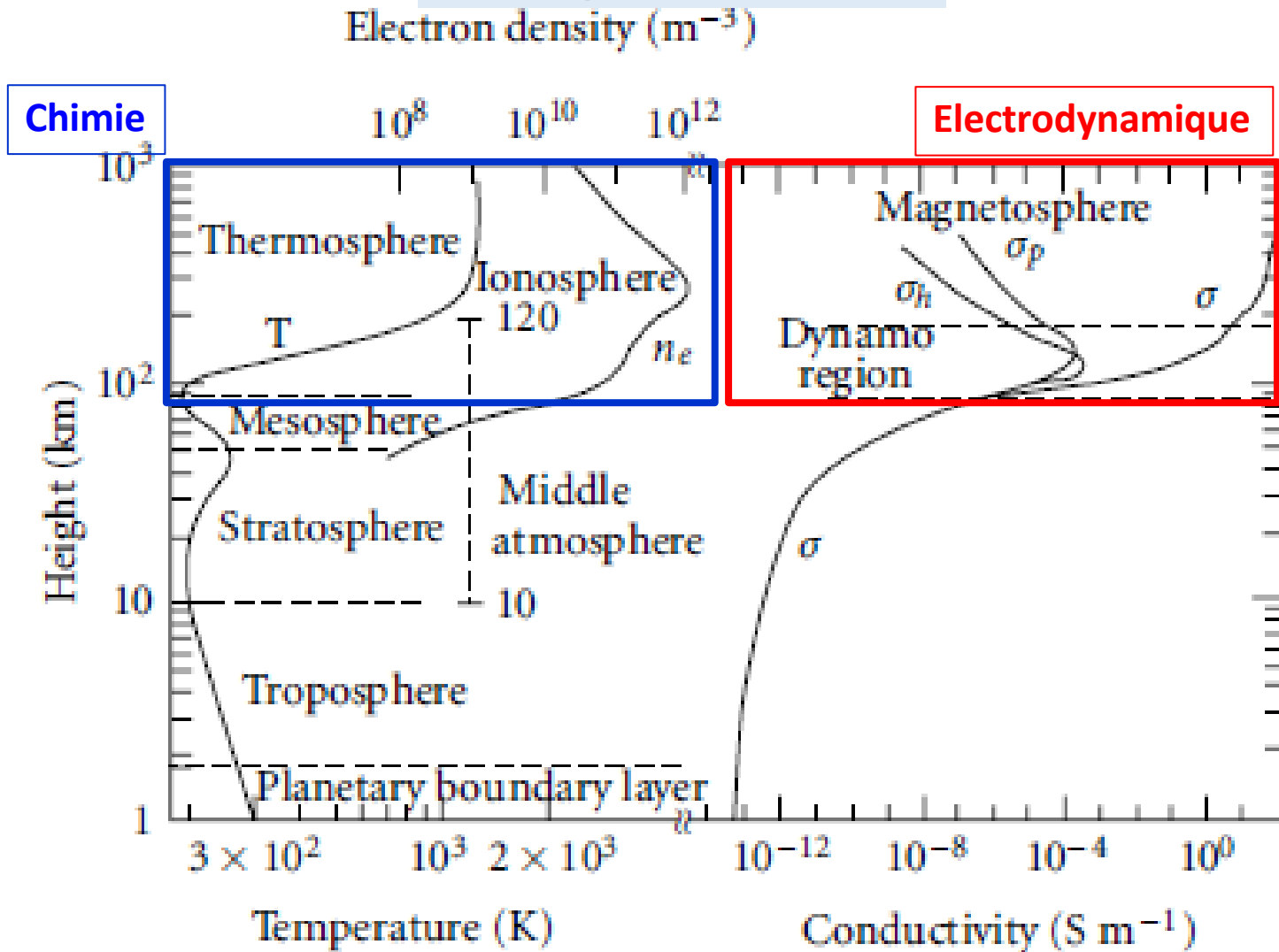
christine.amory@lpp.polytechnique.fr

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

Plan de l'exposé

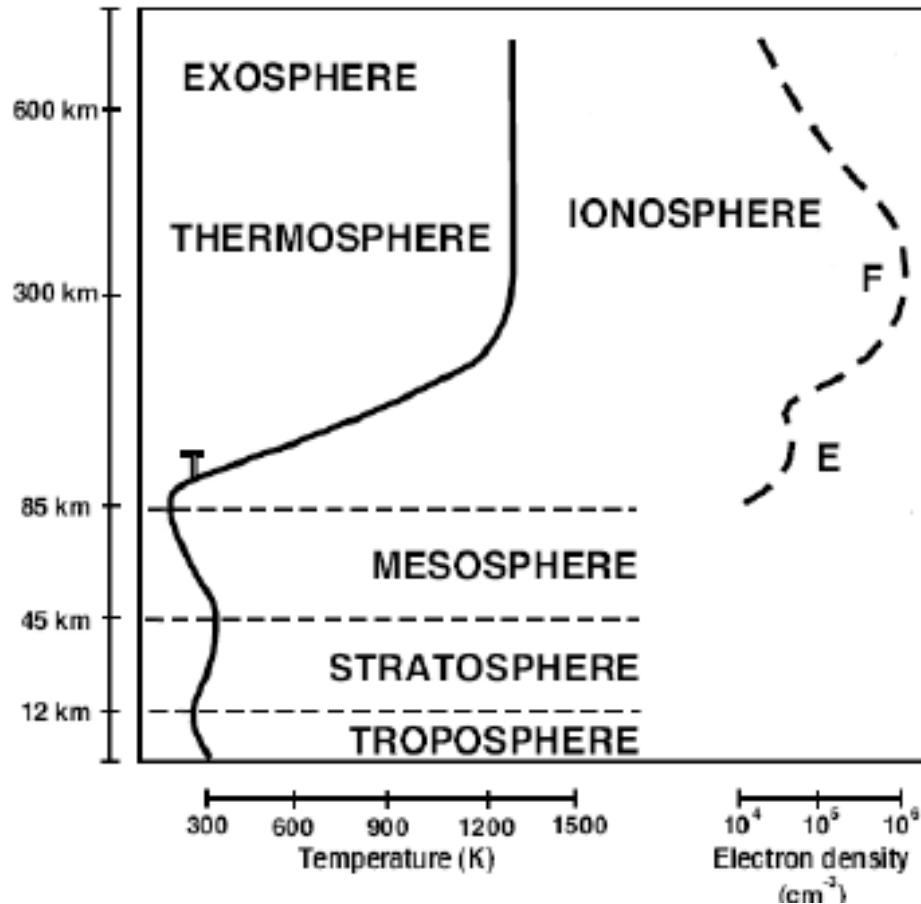
- Caractéristiques de l'Ionosphère Equatoriale :
 - Fontaine Equatoriale et EEJ de jour
 - PRE :Pre Reversal Enhancement (augmentation de $E \times B$ avant le coucher du soleil
- Ionosphere :
 - Le Plasma ionosphérique
 - Equation de continuité
 - Equations de mouvement des électrons et des ions
- Conclusion
 - Fontaine Equatoriale : le transport de l'ionisation
 - Pre Reversal Enhancement => observations ROCSAT

Vue générale



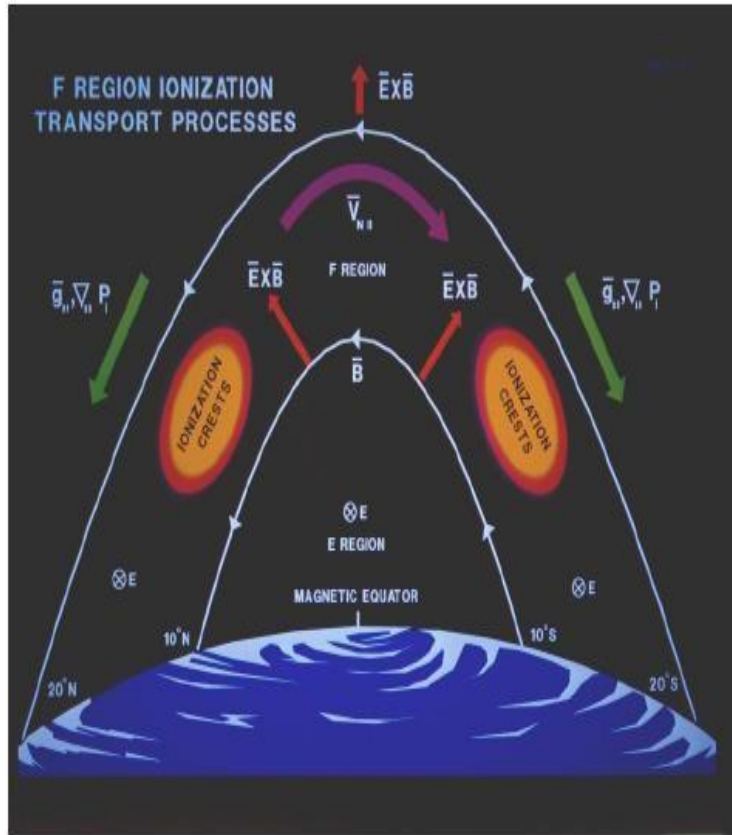
Région E $100 > h < 150$ km

Région F₂ $150 \text{ km} > h < \sim 800$ km



L'ionosphère est la partie ionisée de l'atmosphère
1 atome sur 1 000 000 est ionisé

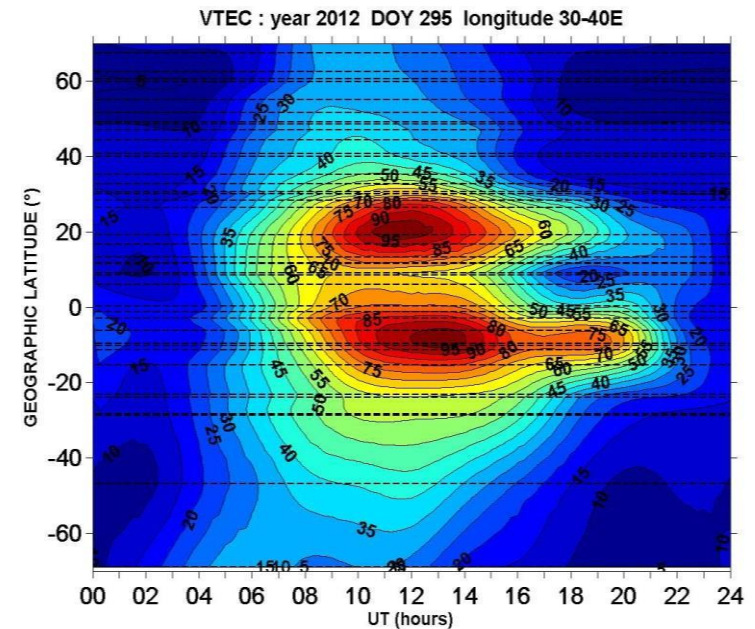
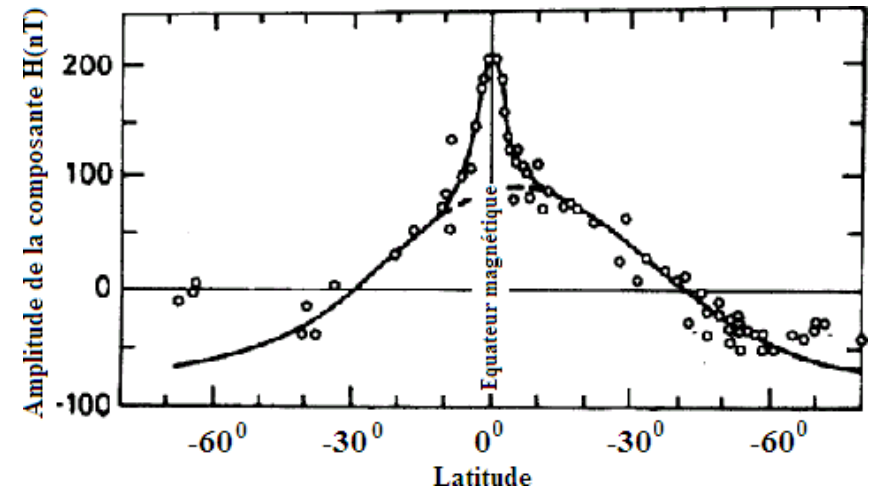
REGION EQUATORIALE



FONTAINE EQUATORIALE

Vitesse verticale $E \times B$
 E_y vers l'Est \Rightarrow le plasma monte
 E_y vers l'Ouest \Rightarrow le plasma descend

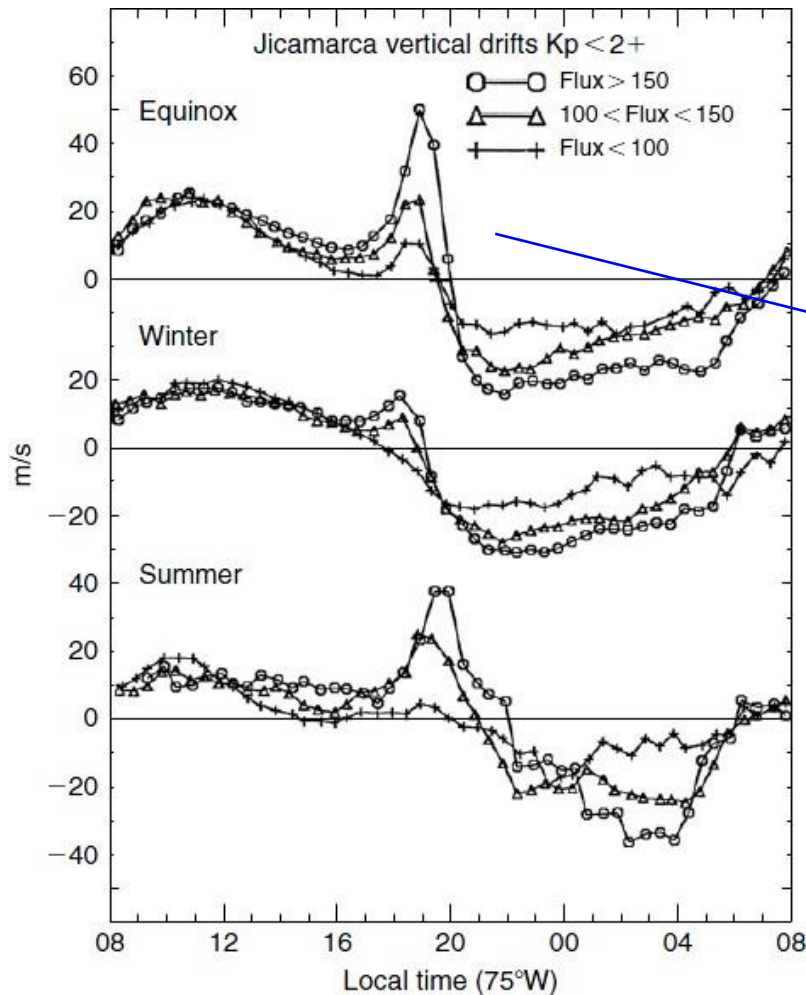
Electrojet equatorial (Jacobs, 1990)



Carte du TEC en Afrique de l'Est

Amory-Mazaudier et Fleury, 2013

PRE : Pre Reversal Enhancement



Bulles de plasma équatoriale

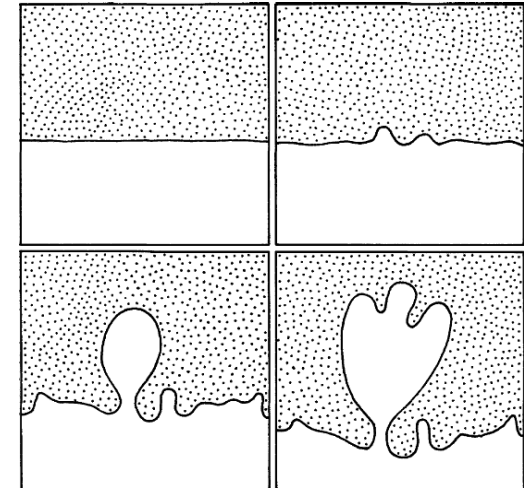


Figure montrant le développement de l'instabilité de plasma Rayleigh Taylor, un fluide lourd fluid [...] au dessus d'un fluide plus léger
 Kelley, M.C., (1989), the Earth Ionosphere, ed. Academic Press, San Diego.

Vitesses verticales du plasma mesurées à Jicamarca durant les équinoxes (Mars-Avril, Septembre-Octobre), été (Mai-août), hiver (Novembre-Février) pour trois valeurs du flux solaire

Fejer, et al., Average vertical and zonal F region drifts over Jicamarca, Journal of Geophys. Res, Vol. 96, N° A8, page 13901-13906, 1991

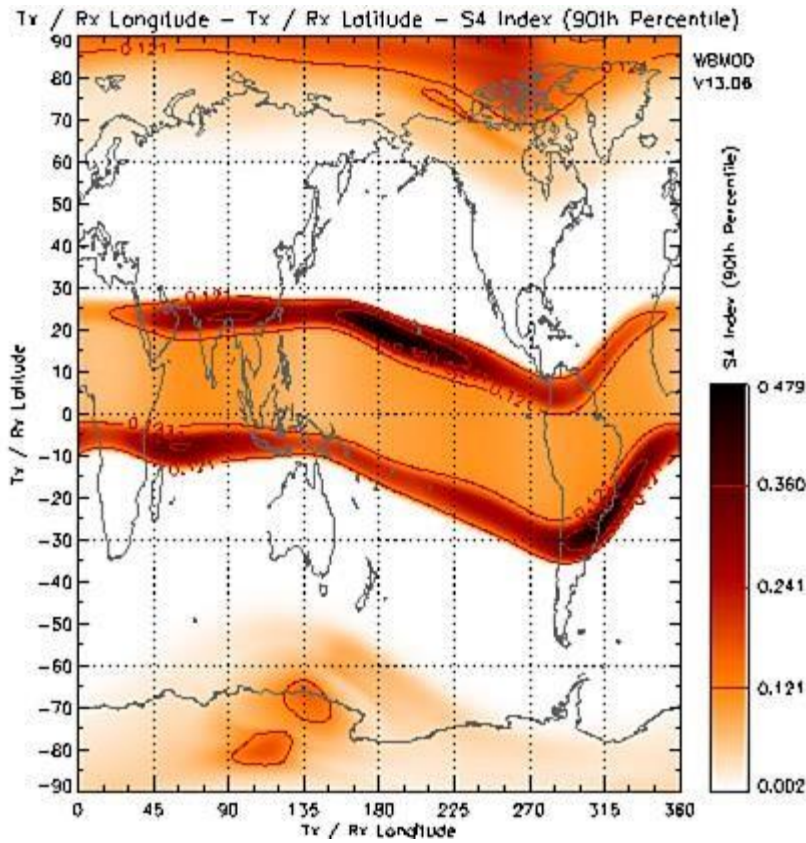
Les scintillations sont un phénomène régulier

Les scintillations ionosphériques sont des modifications rapides du signal radio causées par des petites structures dans l'ionosphère

Processus physiques : Instabilités de Plasma

Indice de scintillation

$$s4 = \sqrt{\frac{\langle I^2 \rangle - \langle I \rangle^2}{\langle I \rangle^2}}$$



Indice de scintillation à L1 (1575.42 MHz) /GPS, en

assumant un temps local 23.00 à toutes les longitudes

(site <http://www.sws.bom.gov.au>)

“Les scintillations ionosphériques existent principalement à l'équateur et aux hautes latitudes. Elles peuvent aussi exister aux basses latitudes avec une intensité plus faible.

Les scintillations ionosphériques sont maximum aux crêtes de l'anomalie équatoriale vers les latitudes $\sim 15^\circ$ de chaque côté de l'équateur magnétique.

Equation de continuité

$$\frac{\partial N_r}{\partial t} = \underbrace{P(N_r) - L(N_r)}_{\text{Chimie}} - \underbrace{\nabla \cdot (N_r \vec{V}_r)}_{\text{transport}}$$

- Production: absorption des émissions électromagnétique (+ precipitation en zone aurorale)
- Pertes : attachement et recombinaison
- Dans l'ionosphère, aux altitudes basses, la perte des électrons se fait par l'attachement : un électron s'attache à un neutre pour former un ion négatif (region E)
- Dans l'ionosphere aux hautes altitudes, la recombinaison est la cause principale de perte des électrons (region F)
- Transport: Equation du mouvement

EQUATION : Mouvement

Equation générale $\vec{F} = m\vec{\gamma} = m \frac{d\vec{V}}{dt}$

$$\sum \vec{F} = \vec{F}_e + \vec{F}_m + \vec{F}_p + \vec{F}_g + \vec{F}_{cin} + \vec{F}_{cei}$$

F_e : force électrique

F_m : force magnétique

F_p : Pression

F_g : Gravité

F_{cin} : Collisions ion-neutre

F_{cei} : Collisions electron-neutre

Equations de mouvement des ions et électrons

Equation des ions :

$$m_i \frac{d\vec{V}_i}{dt} = 0 = m_i \vec{g} - \frac{1}{N_i} \vec{\nabla}(N_i k T_i) + e(\vec{E} + \vec{V}_i \wedge \vec{B}) - m_i \nu_{in} (\vec{V}_i - \vec{U}) - m_e \nu_{ei} (\vec{V}_i - \vec{V}_e)$$

Equation des électrons:

$$m_e \frac{d\vec{V}_e}{dt} = 0 = m_e \vec{g} - \frac{1}{N_e} \vec{\nabla}(N_e k T_e) - e(\vec{E} + \vec{V}_e \wedge \vec{B}) - m_e \nu_{en} (\vec{V}_e - \vec{U}) - m_e \nu_{ei} (\vec{V}_e - \vec{V}_i)$$

- Terme 1: Gravité, m est la masse, g est l'accélération de la gravité.
- Terme 2: Gradient de pression. N et T: sont respectivement la concentration et la température des particules chargées. k: constante de Boltzmann.
- Terme 3: Force de Lorentz, e: charge élémentaire, signe "+" pour les ions et signe "-" pour les électrons, B et E sont les intensités des champs électrique et magnétique.
- Termes 4,5: Force de collisions, m est la masse et V est la Vitesse de la particule chargée, ν : fréquence de collisions avec les neutres.

Collisions

- Collisions élastiques

Lors du choc la somme des énergies et impulsions des 2 particules ne change pas; il y a transfert d'énergie d'une particule à l'autre qui dépend de la masse relative des particules. L'énergie cinétique est **conservée**

- Température d'un gaz est une mesure de l'énergie moyenne des particules

en mouvement; les collisions sont des processus de thermalisation

- Exemple du processus de Thermalisation: introduction d'un gaz froid (T_f) dans un gaz chaud (T_c).... Par collision on arrive à une température d'équilibre T' entre T_f et T_c

- Collisions inélastiques

Lors du choc une partie de l'énergie cinétique d'une particule est totalement ou en partie convertie en énergie interne dans une au moins des particules.

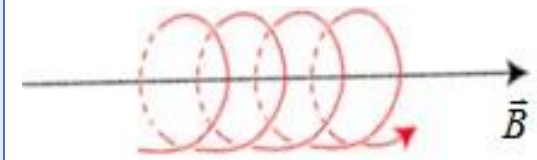
L'énergie cinétique n'est **pas conservée**.

- Saut de l'atome, de la molécule ou des ions dans un niveau d'énergie supérieure

Mouvement : Gyrofréquence

La gyrofréquence est la fréquence angulaire du mouvement circulaire de l'électron (ou de l'ion) dans le plan perpendiculaire à la direction de l'induction magnétique.

La trajectoire de l'électron (ou de l'ion) est une hélice d'axe parallèle à l'induction magnétique.



Gyrofréquence des électrons: $\Omega_e = \frac{eB}{m_e}$

Gyrofréquence des ions: $\Omega_i = \frac{eB}{m_i}$

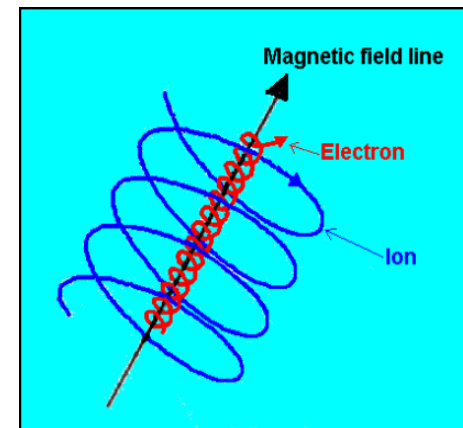
- e : charge d'un électron (unité: Coulomb, C)
- B : l'amplitude du champ magnétique (unité: Tesla, T)
- m_e : masse d'électron (unité: kg)
- m_i : masse d'ion (masse repos d'ion) (unité: kg)

Le sens de rotation des électrons est déterminé par les doigts de la main droite le pouce pointe dans la direction du champ magnétique. La direction de l'ion négatif est la même que celle de l'électron, La direction de l'ion positif est opposé.

La relation de la gyrofréquence d'électron et d'ion:

$$\Omega_i = \frac{m_e}{m_i} \Omega_e$$

Parce que $m_i \gg m_e$, le rayon de giration autour du champ magnétique est beaucoup plus grand pour l'ion que l'électron.



Fréquences de collisions et gyrofréquences

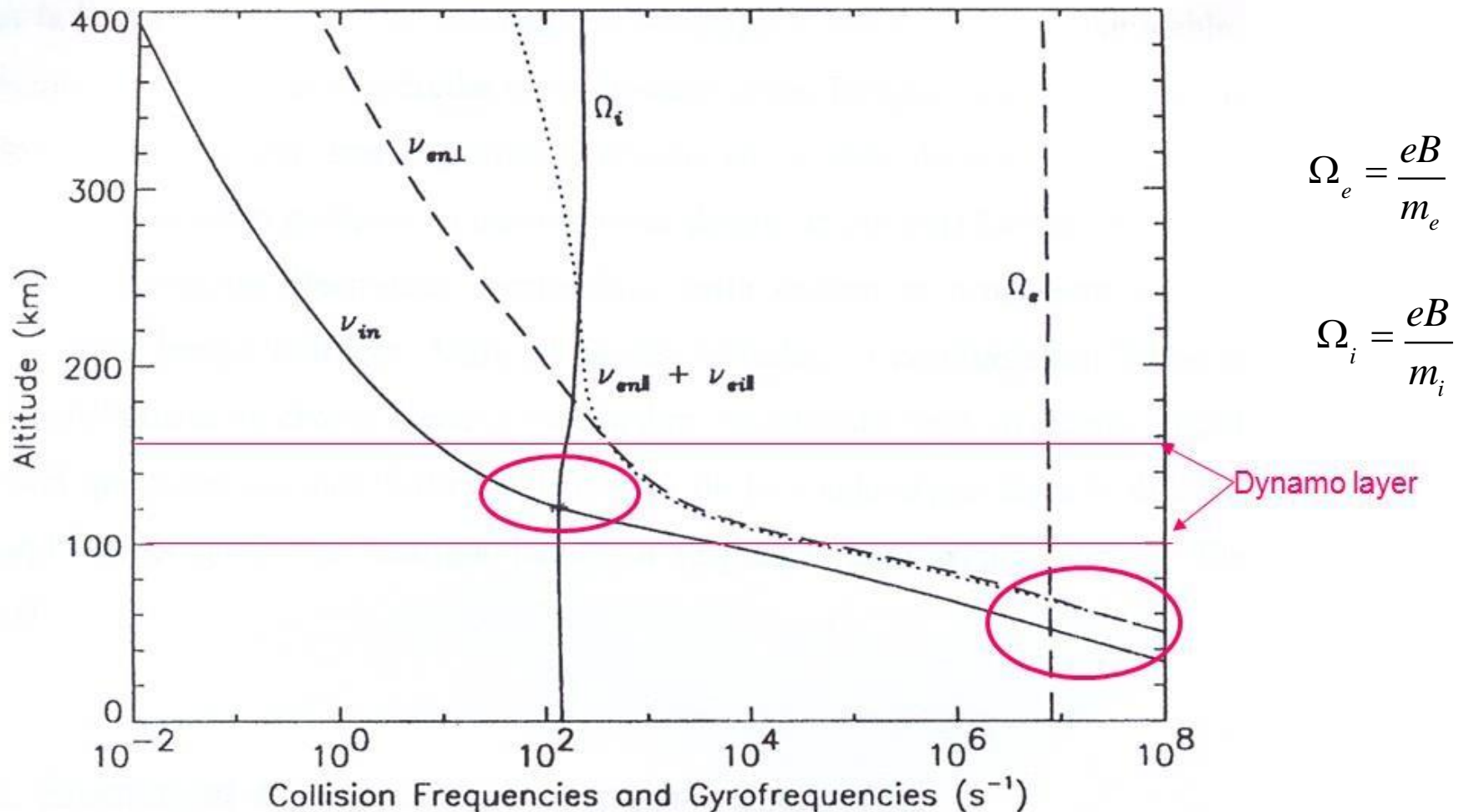


Figure de Richmond, 1995 , book of atmospheric electricity, vol II edited by Volland

Equation de mouvement/ **E region**

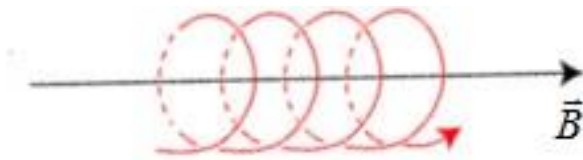
$$[v_{in} \sim \Omega_i, v_{en} \ll \Omega_e]$$

$$100\text{km} > h < 150\text{ km}$$

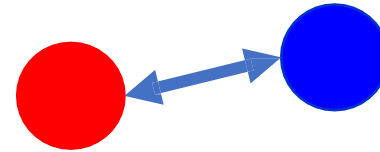
Dans la direction perpendiculaire au champ magnétique

IONS

$$e(\vec{E} + \vec{V}_{i\perp} \wedge \vec{B}) = m_i \gamma_{in\perp} (\vec{V}_{i\perp} - \vec{V}_{n\perp})$$

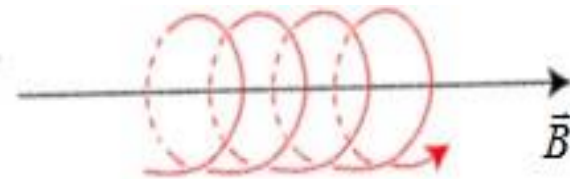


Force de Lorentz



Collisions ions neutres

ELECTRONS $e(E + V_{e\perp} \wedge B) = 0$



Force de Lorentz

$$V_{i\perp} \neq V_{e\perp}$$

$$\vec{j} = N_e e (\vec{V}_{i\perp} - \vec{V}_{e\perp})$$

Densité de courants électriques

Les densités de courant électrique

Expression générale de la densité de courant électrique :

$$\vec{J} = \sum_q N_q e_q \vec{V}_q$$

N_q : densité de la particule q (N / m^3)

e_q : charge de la particule q (C)

\vec{V}_q : Vitesse de la particule

Dans l'ionosphère :

$$\vec{J} = N_e e (\vec{V}_i - \vec{V}_e)$$

N_e : densité électronique (N/m^3)

e : charge de l'électron (C)

$\vec{V}_{j,e}$: vitesse des ions et électrons (m/s)

Equations de mouvement / F-Region 150 km > h < ~800 km

$$[v_{in} \ll \Omega_i, v_{en} \ll \Omega_e]$$

Dans la direction perpendiculaire au champ magnétique

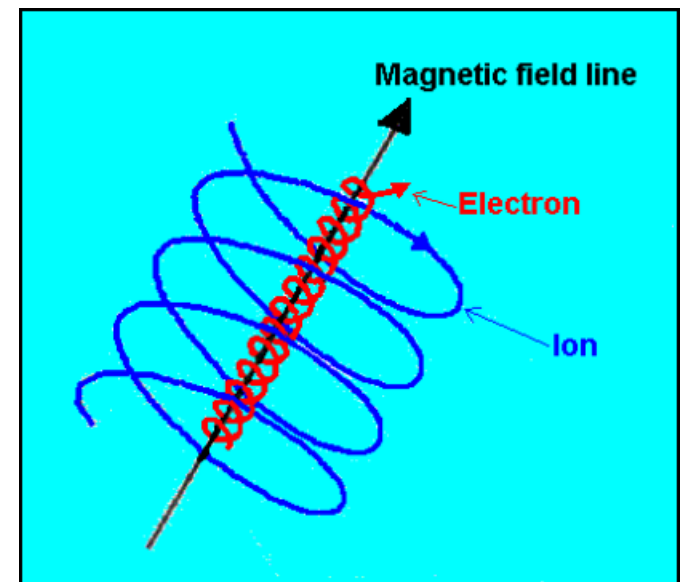
$$\Omega_e = \frac{eB}{m_e} \quad \Omega_i = \frac{eB}{m_i}$$

La force de Lorentz pour les ions et les électrons

$$\vec{V}_{i\perp} = \vec{V}_{e\perp} = \frac{\vec{E} \times \vec{B}}{B^2}$$

$$\vec{j} = N_e e (\vec{V}_{i\perp} - \vec{V}_{e\perp}) = 0$$

Pas de courants électriques ionosphériques



Equations de mouvement

Dans la direction parallèle au champ magnétique

$$\text{IONS} \quad 0 = m_i \vec{g} - \frac{1}{N_i} \vec{\nabla} (N_i k T_i) - m_i \nu_{in} (\vec{V}_{i//} - \vec{V}_{n//})$$

$$\vec{V}_{i//} = \vec{V}_{n//} + \vec{V}_{d//} \quad \vec{V}_{d//} : \text{Diffusion ambipolaire}$$

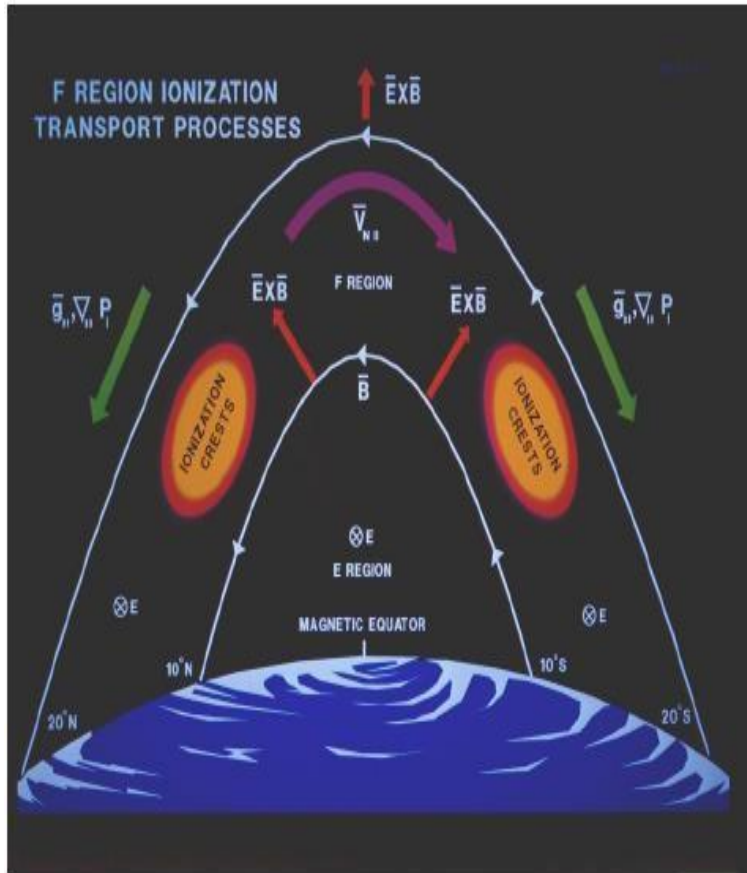
$$\text{ELECTRONS} \quad 0 = m_e \vec{g} - \frac{1}{N_e} \vec{\nabla} (N_e k T_e) - e \vec{E}_{//} - m_e \nu_{en} (\vec{V}_{e//} - \vec{V}_{n//})$$

$$\vec{V}_{e//} = \vec{V}_{n//} + \vec{V}_{d//} - \frac{\vec{J}_{//}}{N_e \cdot e}$$

En dessous de 180 km la diffusion ambipolaire est négligeable

$$\vec{V}_{i//} \cong \vec{V}_{n//}$$

A l'équateur le champ magnétique est horizontal



Direction perpendiculaire à B
verticale

Altitudes basses : Région E ($h < 150$ km)

$$e(\vec{E} + \vec{V}_{i\perp} \wedge \vec{B}) = m_i \nu_{in\perp} (\vec{V}_{i\perp} - \vec{V}_{n\perp})$$

$$e(\vec{E} + \vec{V}_{e\perp} \wedge \vec{B}) = 0$$

Altitudes hautes : Région F ($150 \text{ km} < h < \sim 800$ km)

$$\vec{V}_{i\perp} = \vec{V}_{e\perp} = \frac{\vec{E} \times \vec{B}}{B^2}$$

Direction parallèle à B

$$\vec{V}_{i//} = \vec{V}_{n//} + \vec{V}_{d//}$$

$$\vec{V}_{e//} = \vec{V}_{n//} + \vec{V}_{d//} - \frac{J_{//}}{N_e \cdot e}$$

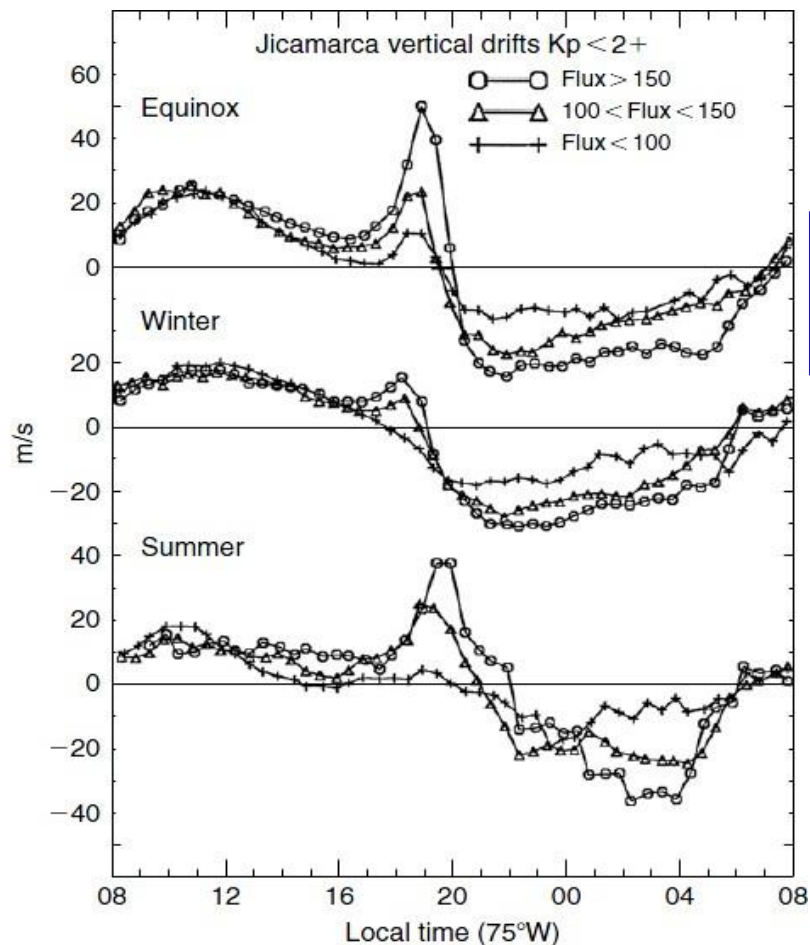
$$\vec{V}_{i//} = 0$$

En dessous de 180 km pas de diffusion ambipolaire

Sondeur à diffusion incohérente/ Jicamarca /Pérou

Paramètre électrodynamique: vitesse des ions

$$\vec{V}_{i\perp} = \vec{V}_{e\perp} = \frac{\vec{E} \times \vec{B}}{B^2}$$



Champ électrique vers l'est => mouvement vers le haut
Champ électrique vers l'Ouest => mouvement vers le bas

$$1\text{mV/m} = 25\text{ m/s}$$

Vitesse Moyenne de la Vitesse des ions
mesurées à Jicamarca Durant les équinoxes
(Mars-Avril, September-October), été (Mai-
Août), hiver (Novembre-Février) pour 3 valeurs
de flux solaires

Fejer, et al., Average vertical and zonal F region drifts
over Jicamarca, Journal of Geophys. Res, Vol. 96, N° A8,
page 13901-13906, 1991

Satellite ROCSAT: Vitesse verticale

Fejer et al., JGR, VOL. 113, A05304, doi:10.1029/2007JA012801, 2008

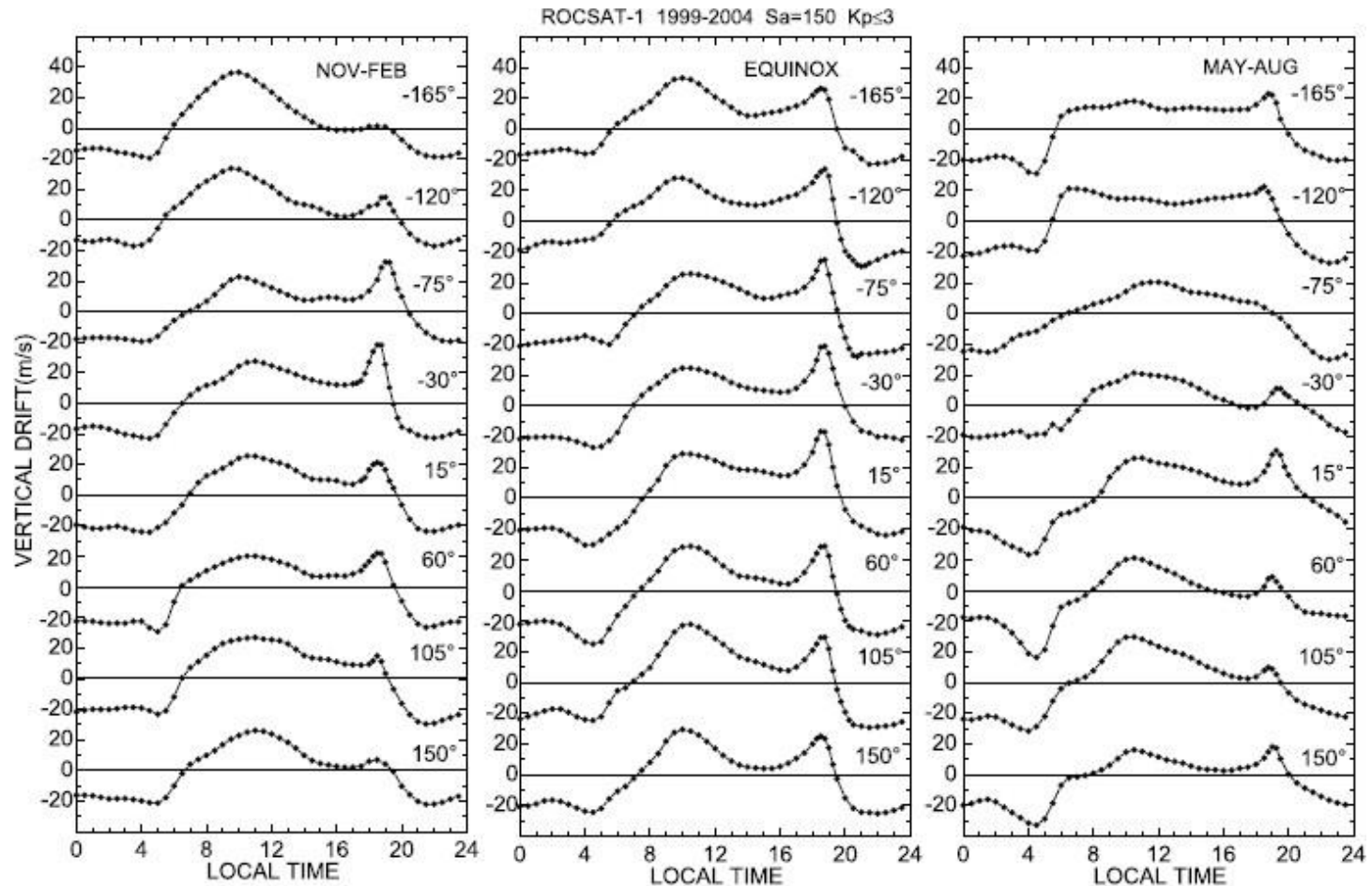


Figure 3. Local time and longitude dependence of quiet time equatorial vertical drifts (positive upward) in eight longitudinal sectors for moderate solar flux conditions.

Dans un autre exposé des observations de la Fontaine équatoriale et des instabilités du plasma à l'origine des scintillations du système GNSS vous seront présentées.