

# Ionosphère des hautes latitudes et les couplages VS-M-I

# Equilibre énergétique de l'ionosphère

Ionosphère hors équilibre thermodynamique  
→ dissociation des températures :  $T_n < T_i < T_e$

Échanges par processus locaux et transports.  
Ne peuvent être décrits que par un modèle cinétique.

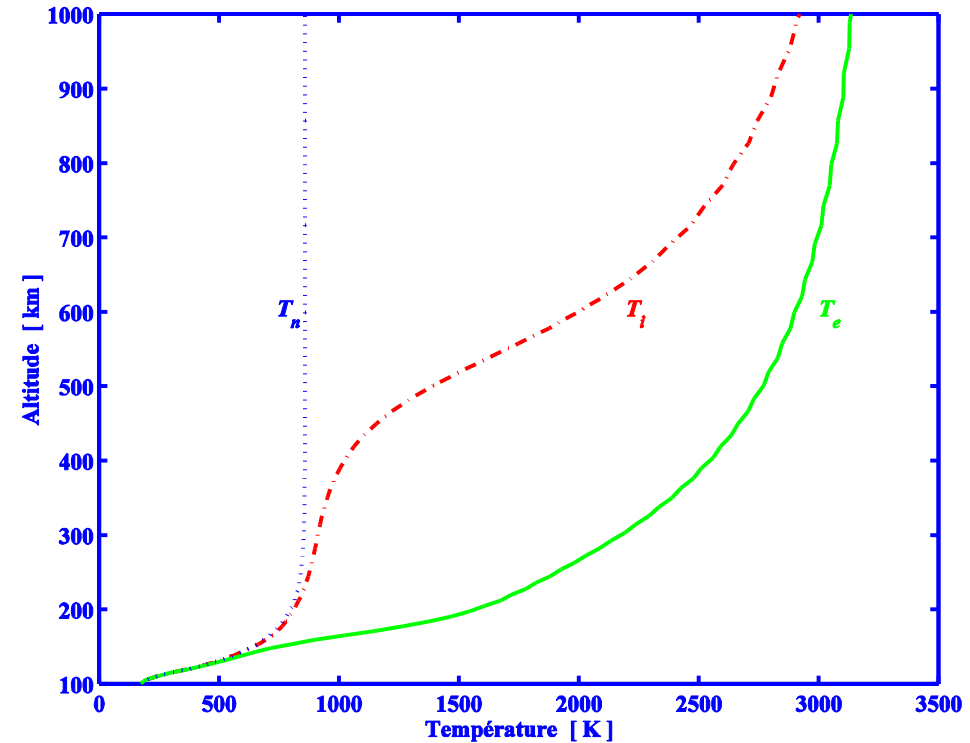


Figure I-23 : profils verticaux typiques des température neutre (pointillé), ionique (tirets) et électronique (trait plein) pour une ionosphère diurne

# Equilibre énergétique de l'ionosphère

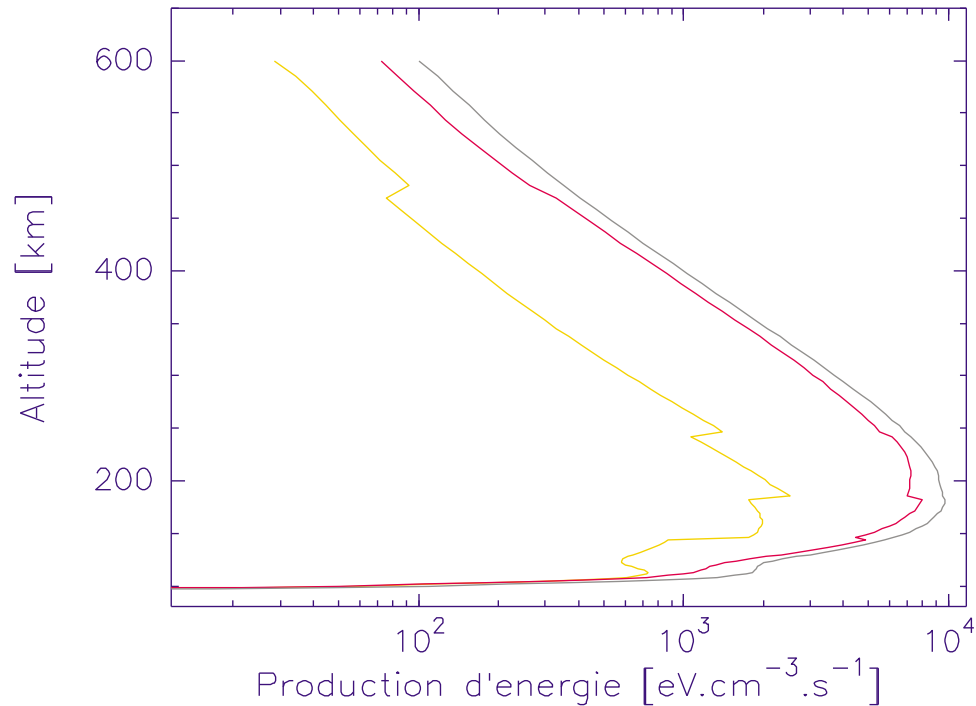
## *Les électrons*

2 populations électroniques:

- Les suprathermiques d'énergie élevés ( $> \text{qq eV}$ )
  - population primaire soit introduit dans l'atmosphère, soit produit par ionisation.
  - grand libre parcours moyen
- Les thermiques ( $\sim 1\text{eV}$ )
  - population thermalisée ayant subie des collisions.
  - libre parcours moyen faible

# Équilibre énergétique de l'ionosphère

## *Chauffage électronique*



Plusieurs mécanismes

- interaction électrons thermiques-électrons suprathermiques → friction et donc chauffage.
- interaction électrons-neutres → très faible devant le premier mécanisme car  $T_e > T_n$ .

**Chauffage ionosphérique. Le terme de peau est en trait jaune, et le terme de friction en trait rouge. La somme est en trait gris.**

# Équilibre énergétique de l'ionosphère

## *Refroidissement électronique*

- transfert d'énergie des électrons vers les niveaux vibrationnels et rotationnels de N<sub>2</sub> et O<sub>2</sub>, ainsi que transfert vers une transition de structure fine de O
- transfert d'énergie vers des niveaux électroniques de O<sub>2</sub> (états métastables à 0.98eV et 1.63eV), O(état métastable O(<sup>1</sup>D) à 1.96eV mais peu de N<sub>2</sub>(seuil à 2.37eV trop haut pour les e<sup>-</sup> thermiques).
- collisions avec les neutres et les ions.
- Termes de transport

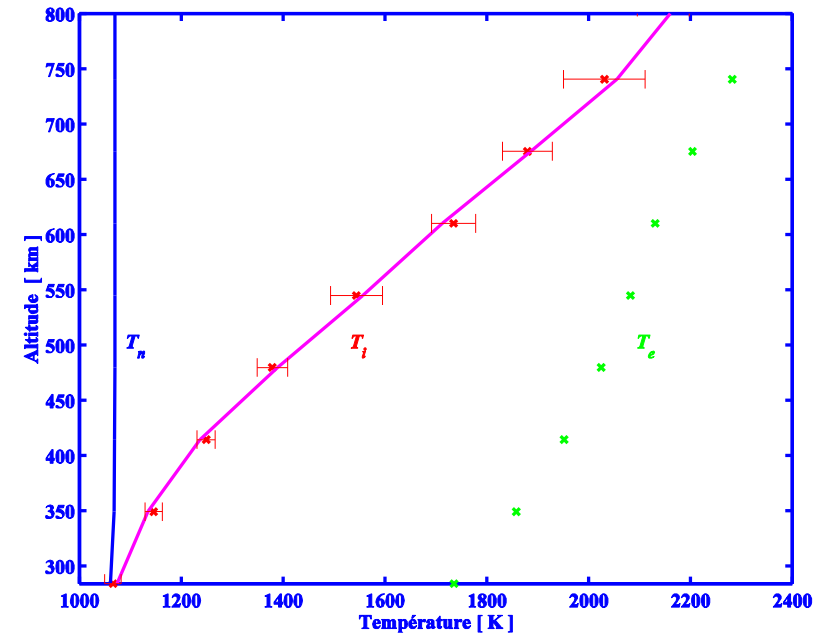
# Équilibre énergétique de l'ionosphère

## *Les ions*

Bilan plus facile à établir.

- Pas d'excitation interne des molécules
  - Collisions élastiques
  - Peu de mobilité donc peu de phénomènes de transports
- bilan local, on peut écrire:

$$T_i = \frac{\nu_{ie}}{\nu_{ie} + \nu_{in}} T_e + \frac{\nu_{in}}{\nu_{ie} + \nu_{in}} T_n$$



ajustement d'un profil mesuré de température ionique par la formule I-188 pour estimer la concentration neutre et la température exosphérique : les données sont repérées par des croix (vert pour la température électronique, rouge pour la température ionique) et on a tracé les barres d'erreurs pour la température ionique. On a reporté sur la figure la température neutre estimée (courbe bleu) ainsi que le résultat de l'ajustement sur la température ionique (courbe magenta).

# Couplages magnétosphère-ionosphère

## *Précipitations électroniques*

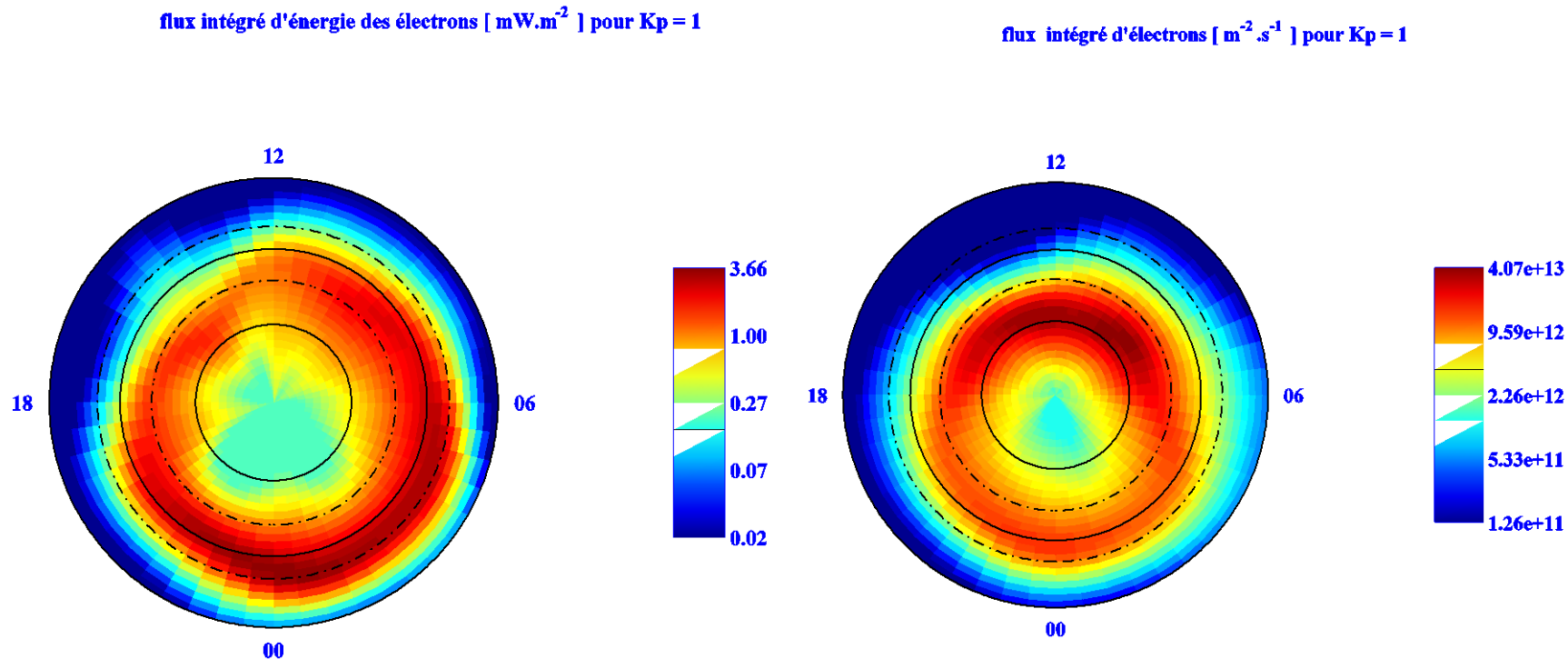
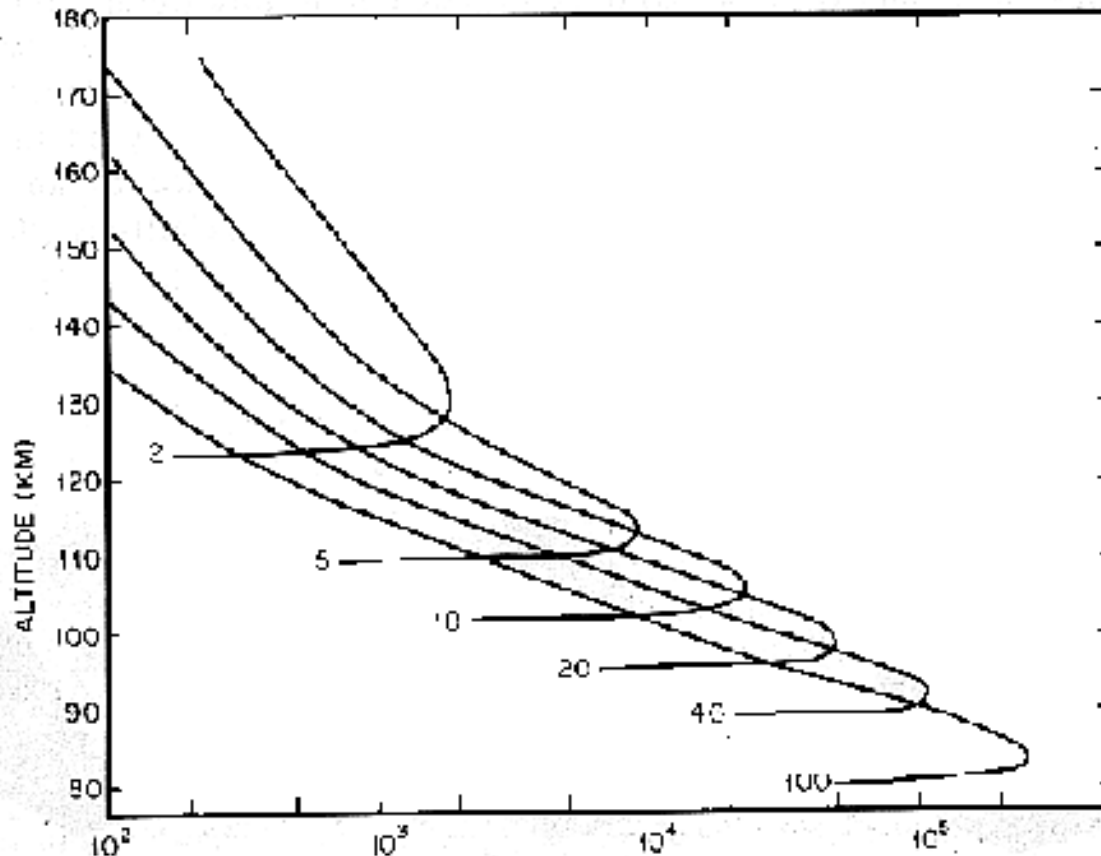


Figure I-2 : Cette figure montre l'ovale auroral pour Kp = 1 dans le modèle statistique basé sur les observations de Dynamics Explorer (Hardy D.A., M.S. Gussenhoven , and E. Holeman, A statistical model of auroral electron precipitation., *J. Geophys. Res.*, 90, A5, 4229-4248, 1985). En haut, on voit le flux d'énergie intégré, en mW.m<sup>-2</sup>. Le dessin du bas représente le flux intégré de particules [s<sup>-1</sup>.m<sup>-2</sup>]. On retrouve les différences décrites dans le texte, en particulier sur les lieux d'intensification des flux.

# Interaction magnétosphère-atmosphère

## *Précipitations électroniques*



Profils verticaux des taux d'ionisations normalisés pour différents flux d'électrons monoénergétiques précipitants dans l'atmosphère le long des lignes de champ magnétique. Les énergies précipitantes sont indiquées auprès de chaque courbe (en keV). L'axe horizontal représente les productions, en cm<sup>-3</sup>.s<sup>-1</sup>.



# Les émissions lumineuses

- Un traceur de l'atmosphère
  - Concentrations
  - Températures
  - Vents
- Pb instrumentaux importants
  - Météo
  - Difficulté de mesurer l'atmosphère diurne
- Unités
  - 1 Rayleigh (R) =  $10^6 \text{ ph.cm}^{-2}\text{s}^{-1}$

# Les émissions lumineuses

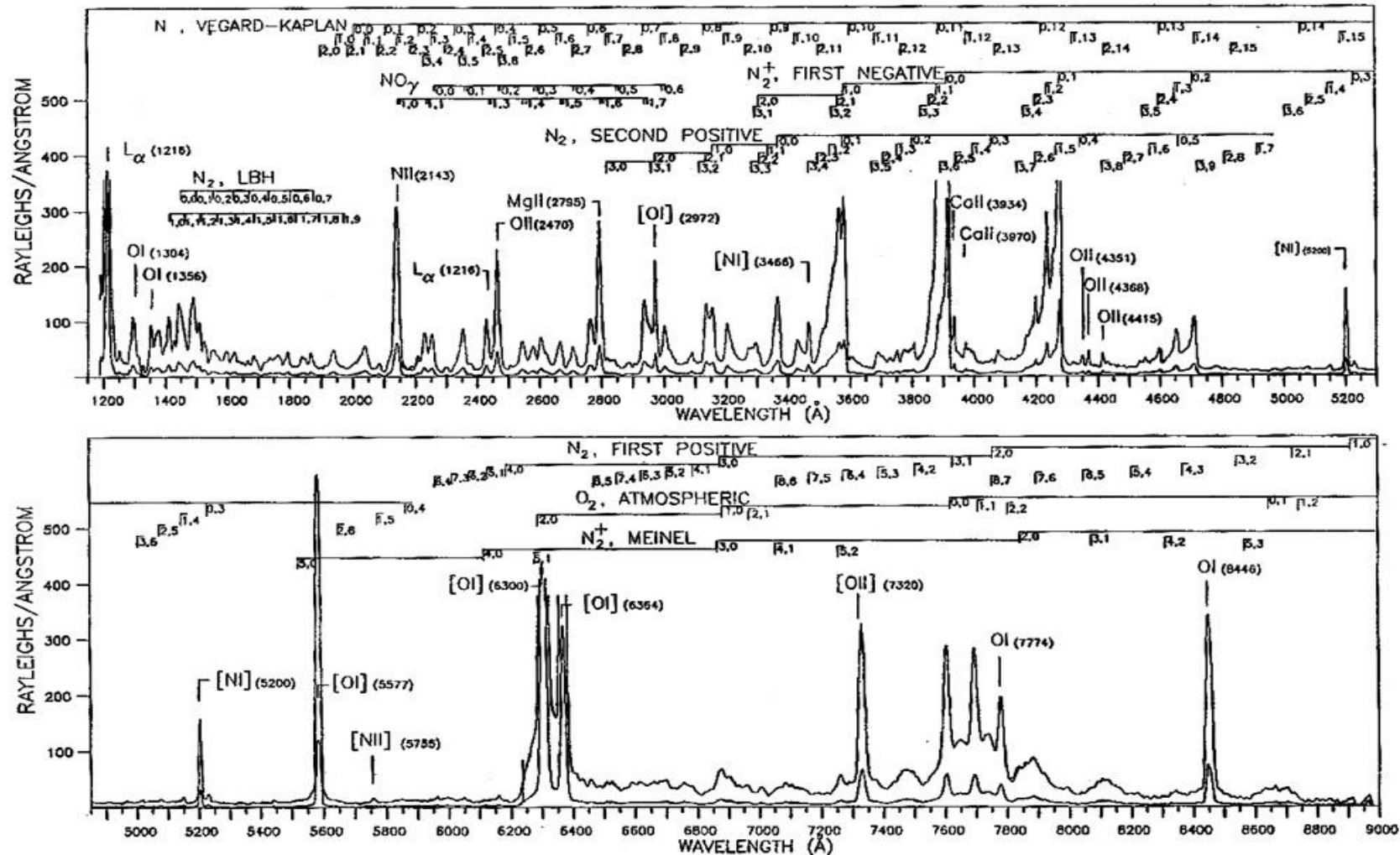


Figure VII-1 : ce spectre correspond au ciel diurne à moyenne latitude, pour des conditions solaires peu actives ( $f_{10.7}$  de l'ordre de 80) et un angle solaire zénithal de  $48^\circ$  (Broadfoot et al., N<sub>2</sub> triplet band systems and atomic oxygen in the dayglow, *J. Geoph. Res.*, vol 102, p 11567-11584, 1997)

# Les émissions lumineuses

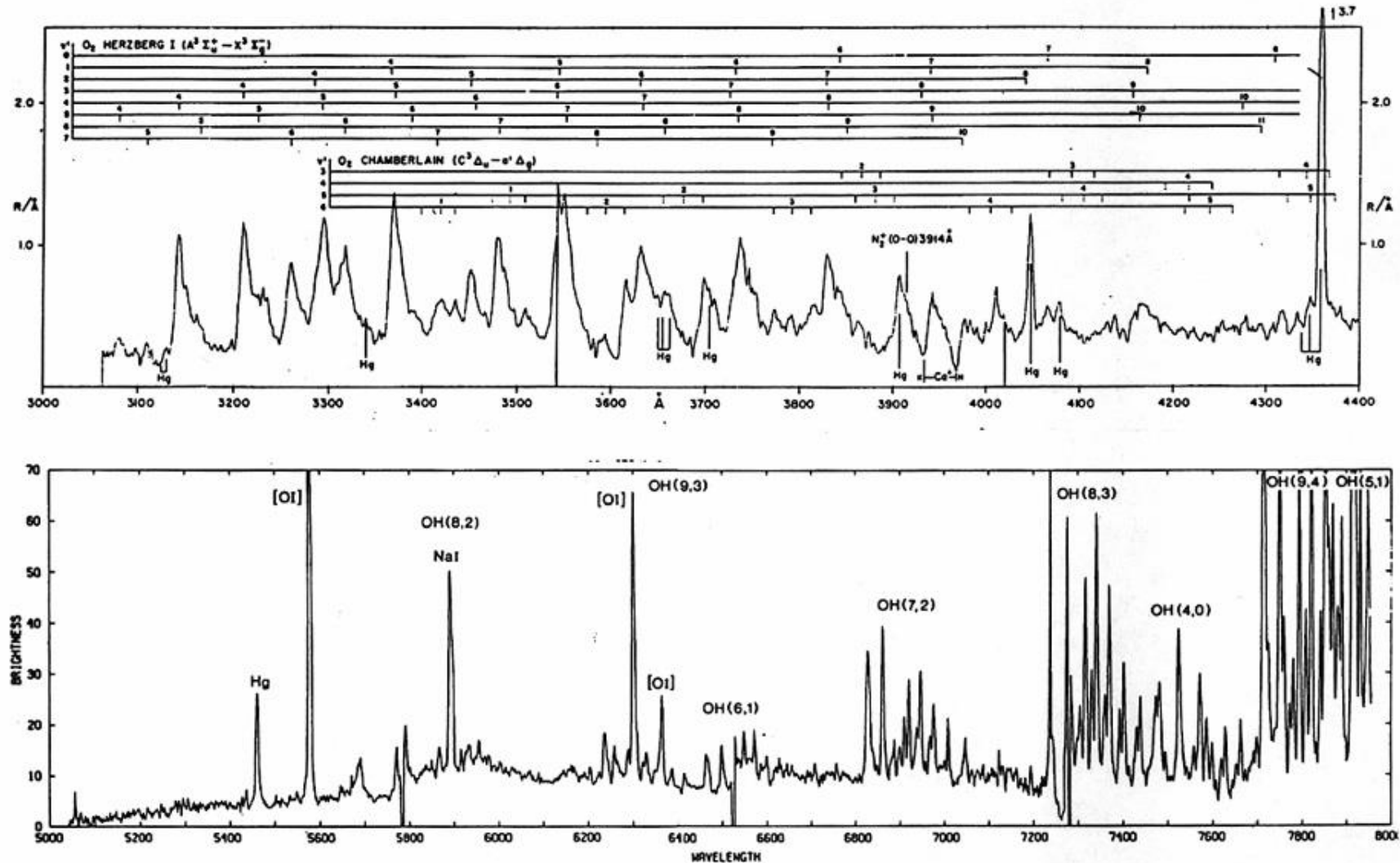
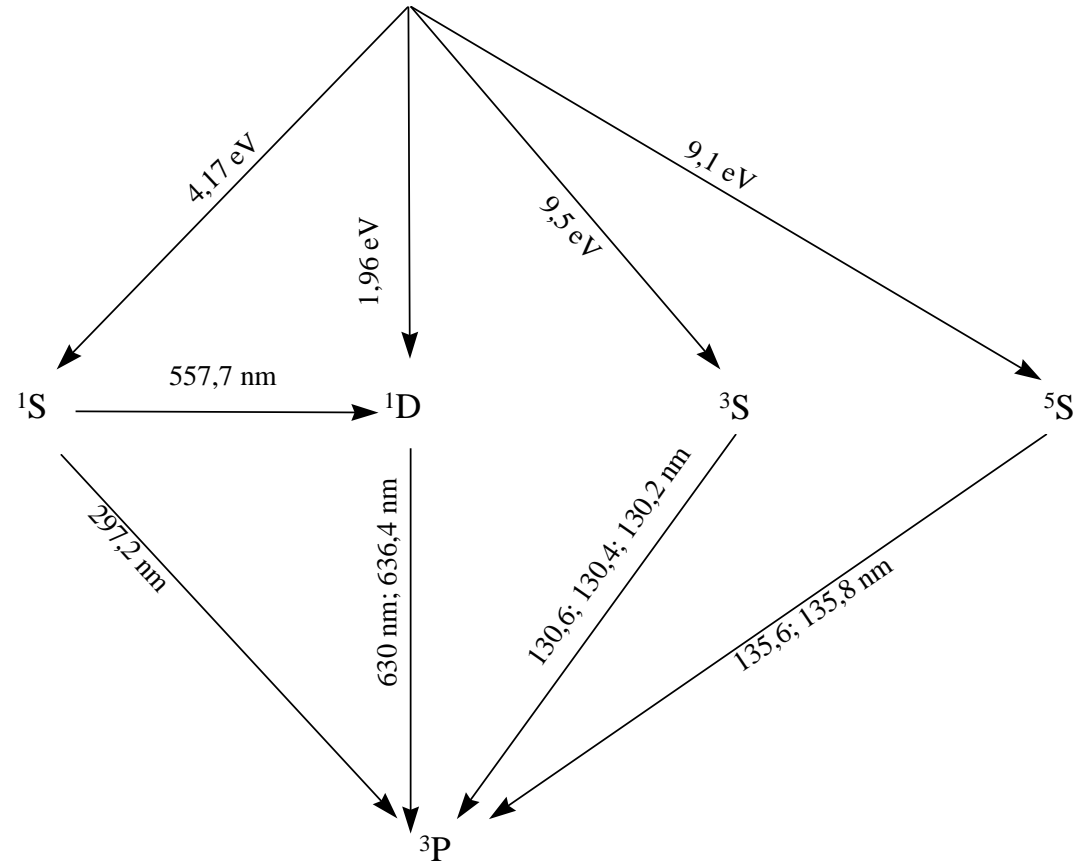


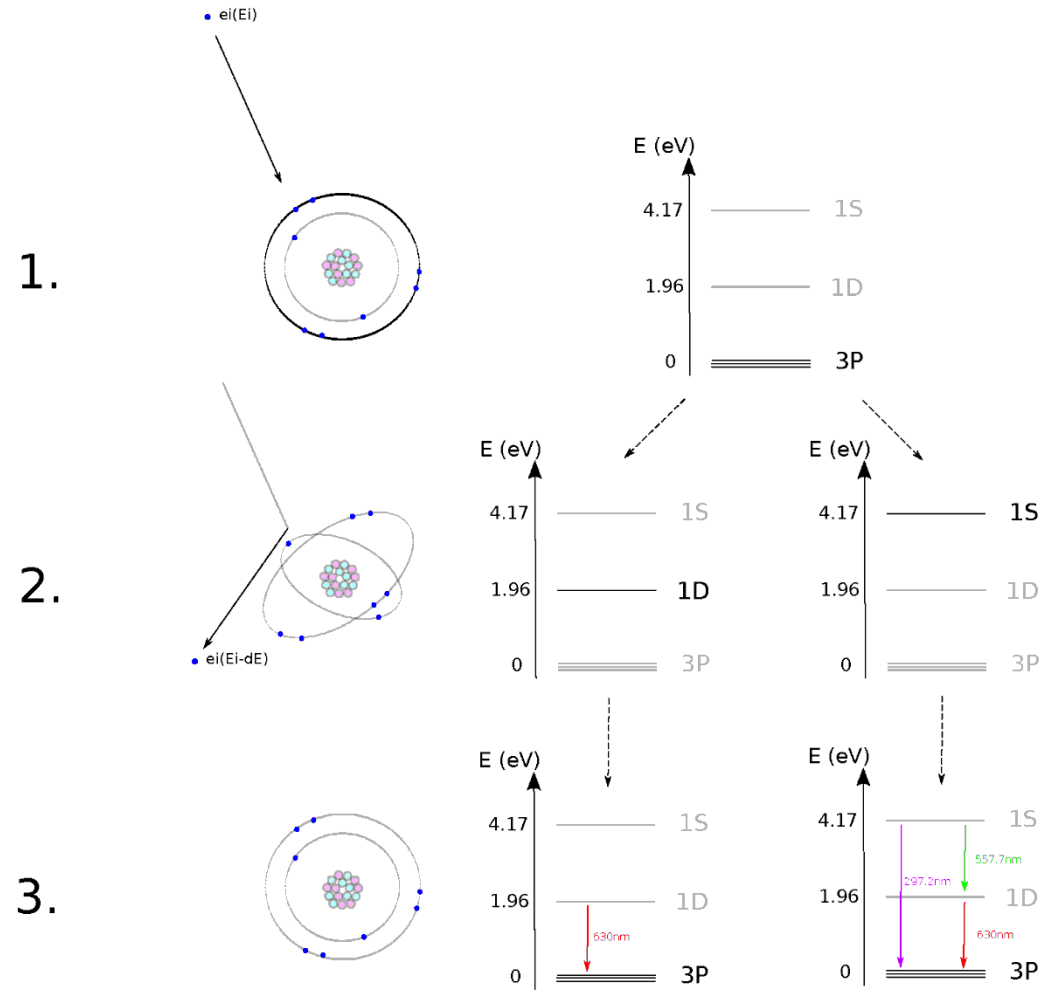
Figure VII-2: spectre du ciel nocturne (Issu de Rees, 1989 ; acquis par Broadfoot et co-auteurs)

# Les émissions lumineuses

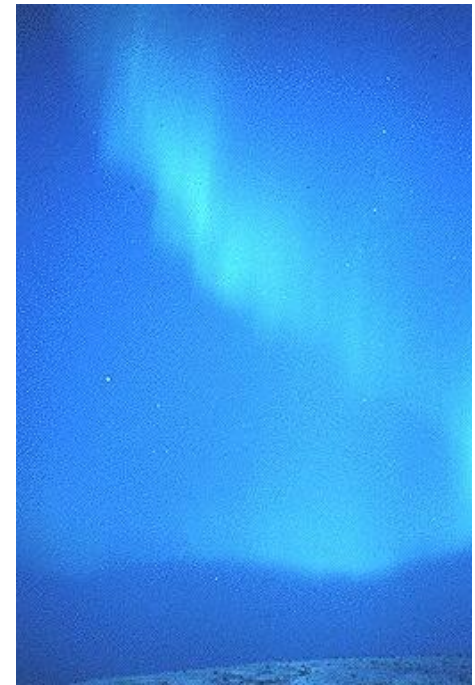


**Figure VII-3 :** principales voies d'excitations et de désexcitation de l'oxygène atomique. Au sommet du graphe, l'oxygène dans son état fondamental subit une collision ou absorbe un photon. Il est conduit vers un état excité. Le long des flèches qui mènent à l'état excité, nous avons fait figurer les seuils d'énergie. L'oxygène est rendu ensuite à l'état fondamental éventuellement via d'autres états excités par l'émission d'un photon, dont la longueur d'onde est notée le long de la flèche.

# Les émissions lumineuses



# Les émissions lumineuses





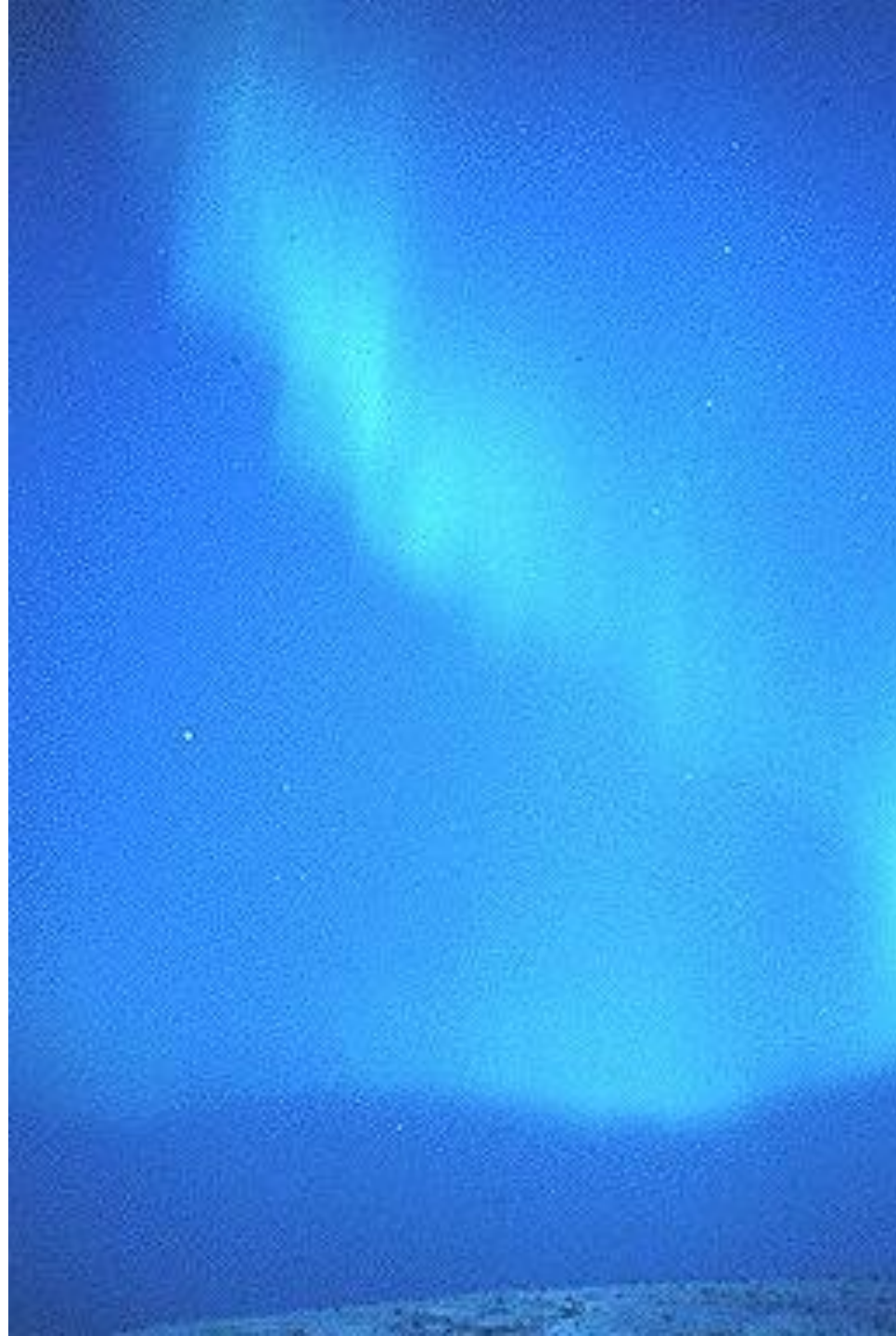
































© 2000 Laboratoire de Planétologie de Grenoble - France



© 2000 Laboratoire de Planétologie de Grenoble - France



© 2000 Laboratoire de Planétologie de Grenoble - France



© 2000 Laboratoire de Planétologie de Grenoble - France













© 2000 Laboratoire de Planétologie de Grenoble - France



© 2000 Laboratoire de Planétologie de Grenoble - France

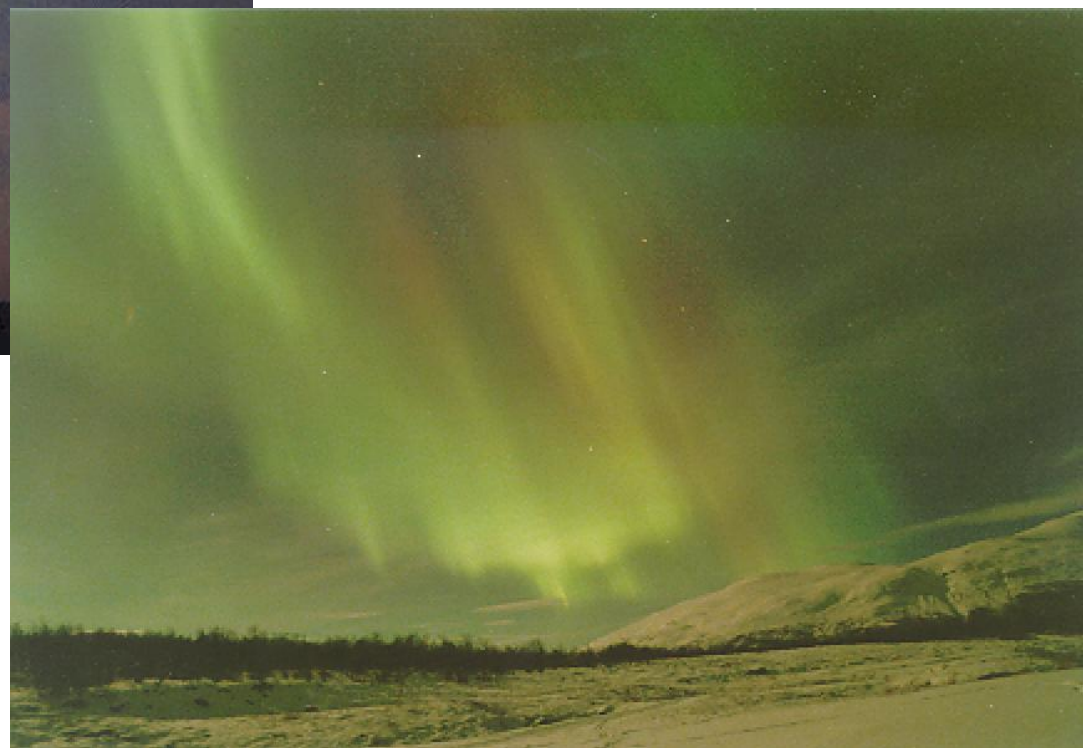


© 2000 Laboratoire de Planétologie de Grenoble - France





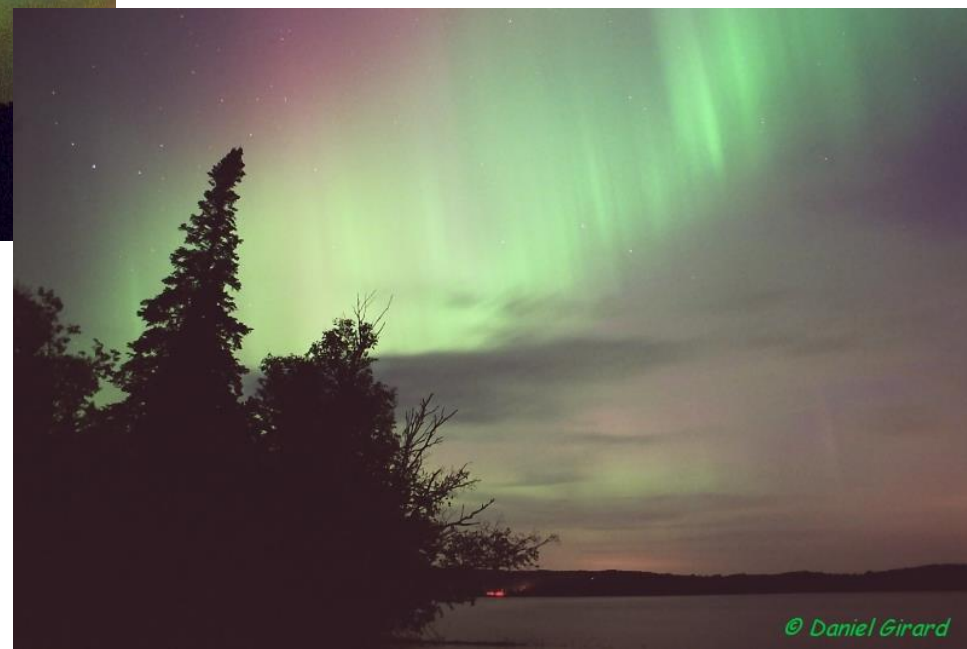






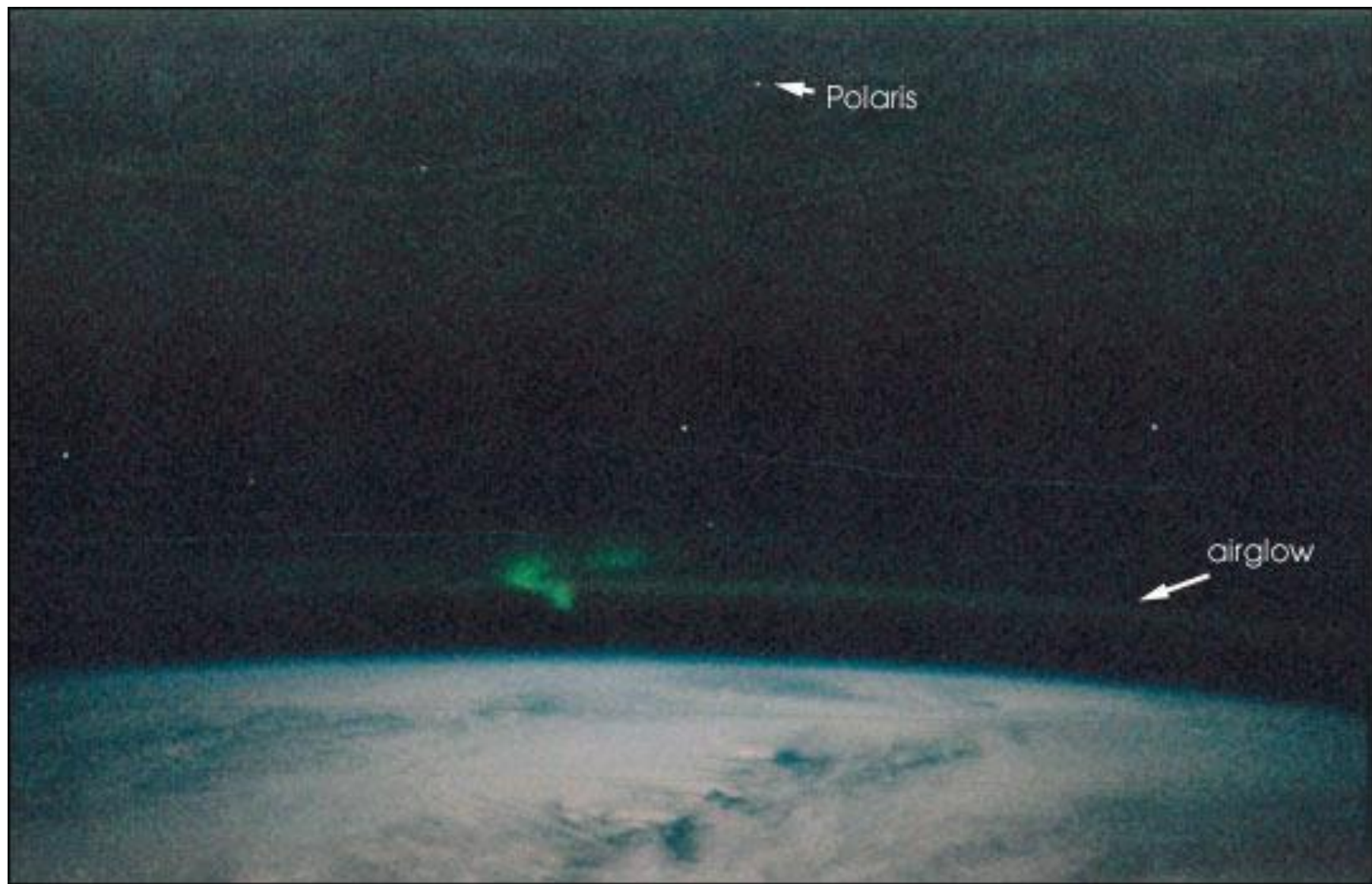








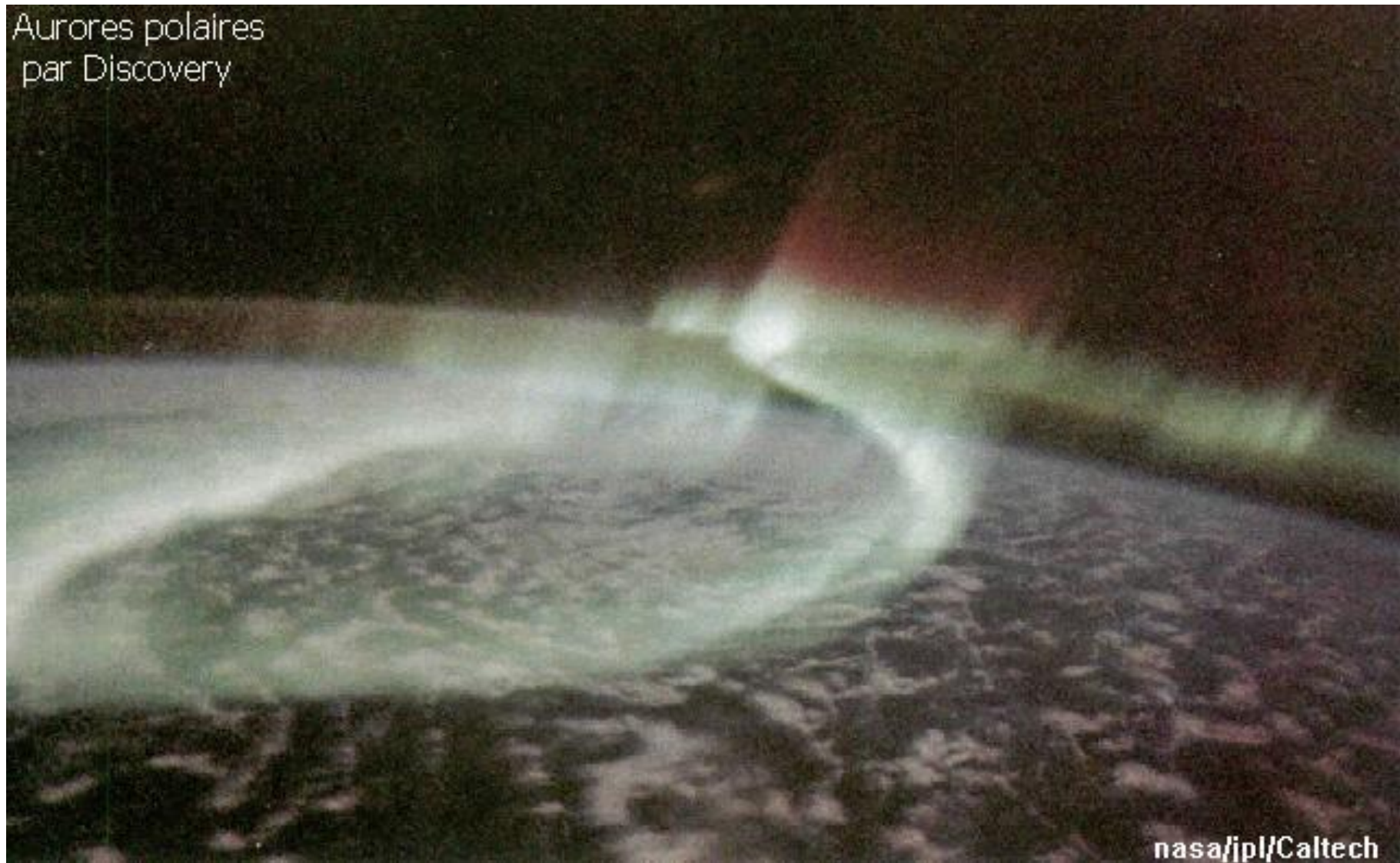






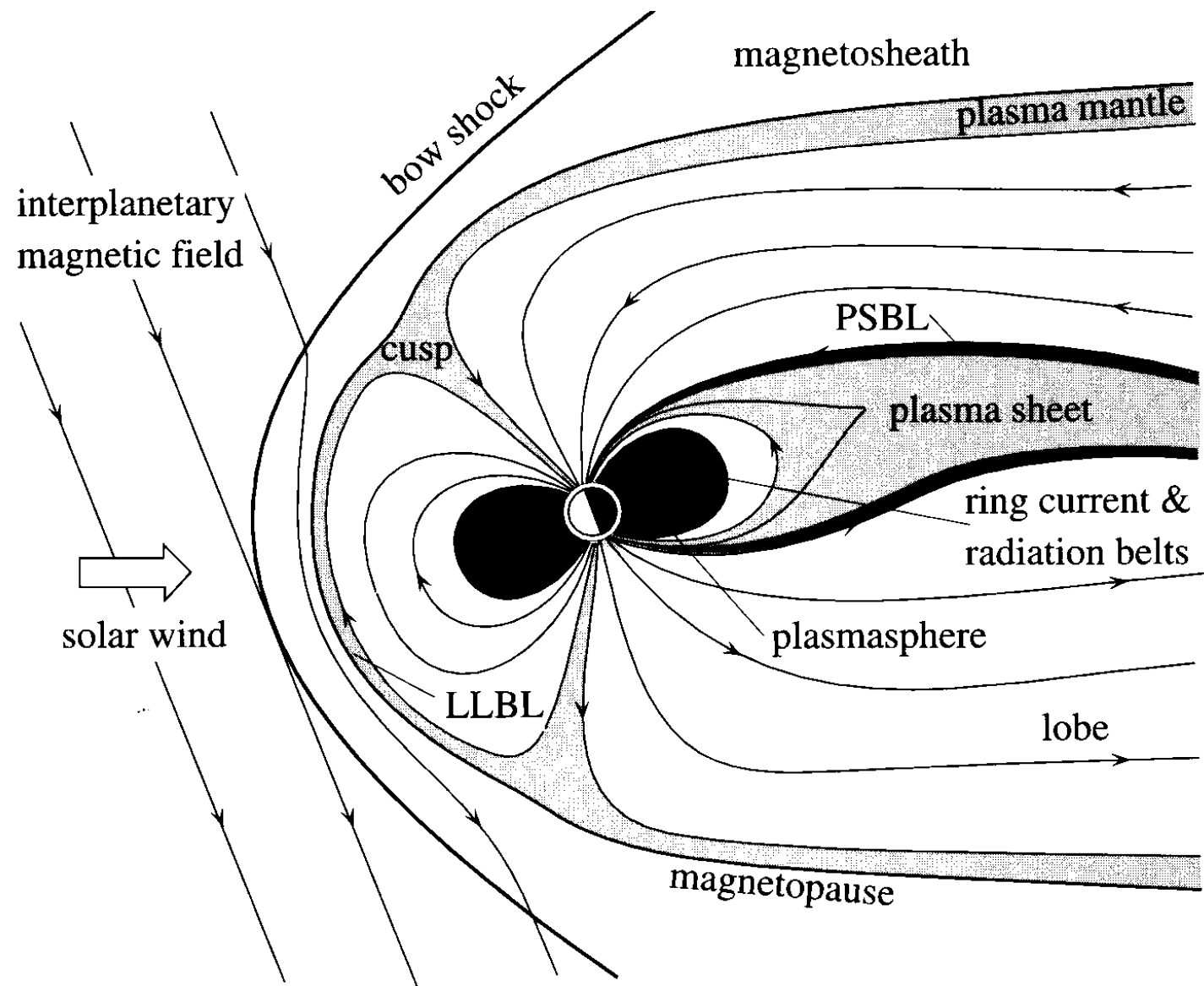


Aurores polaires  
par Discovery

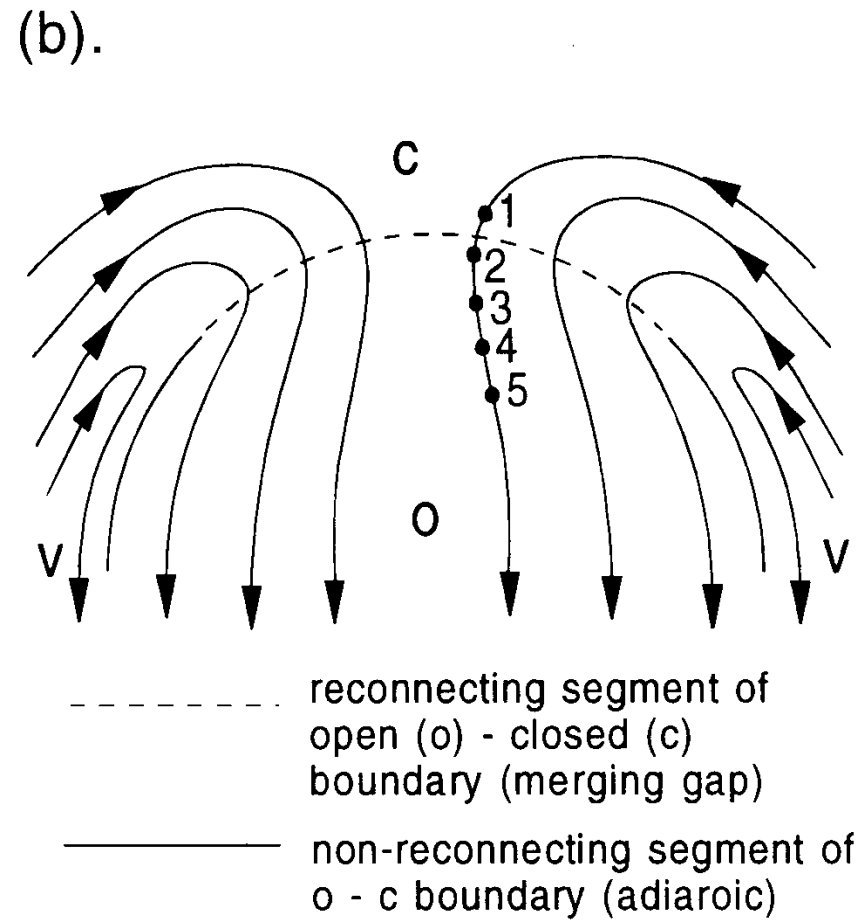
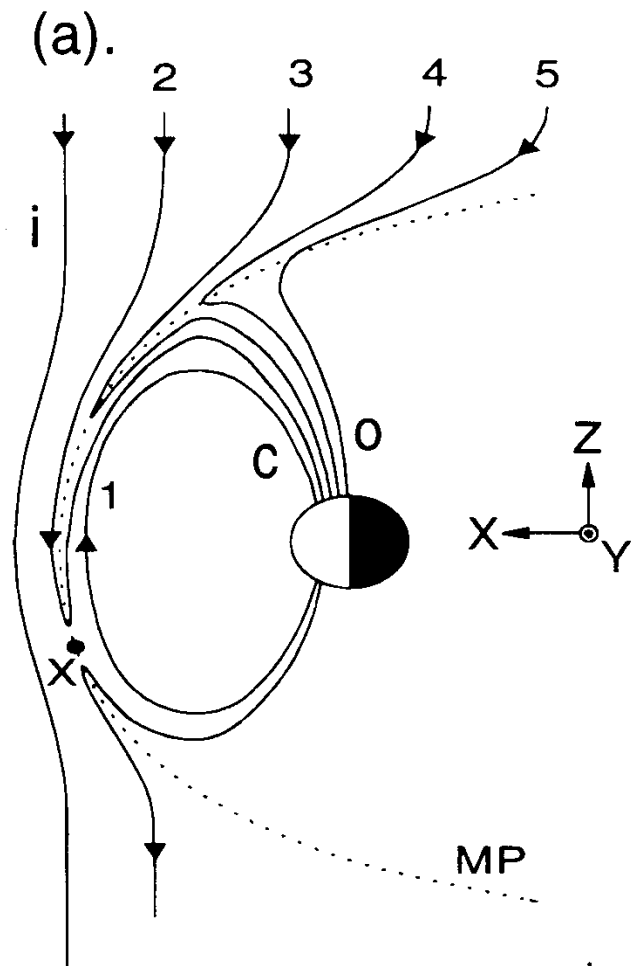


[nasa/jpl/Caltech](#)



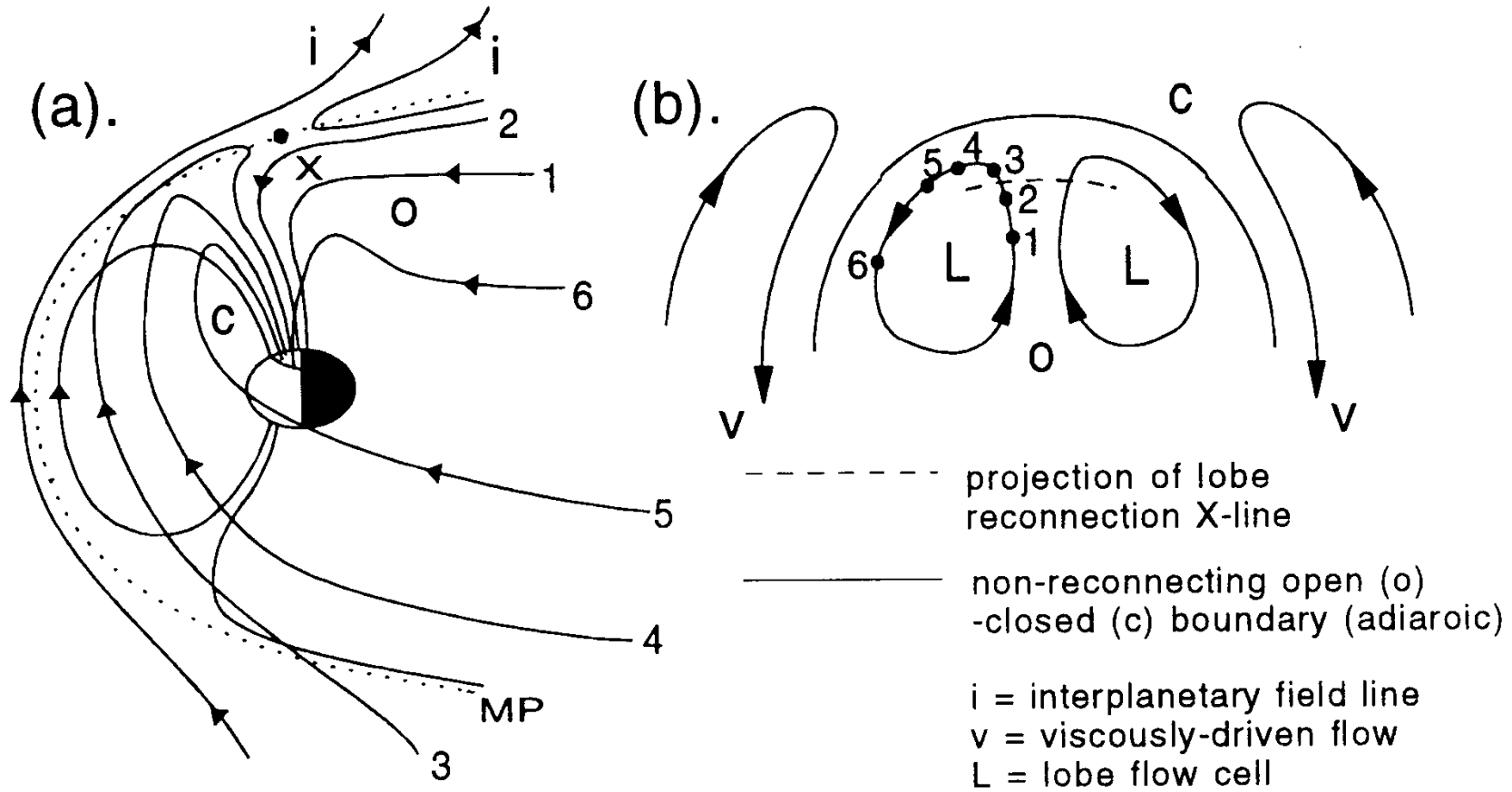


# IMF Sud

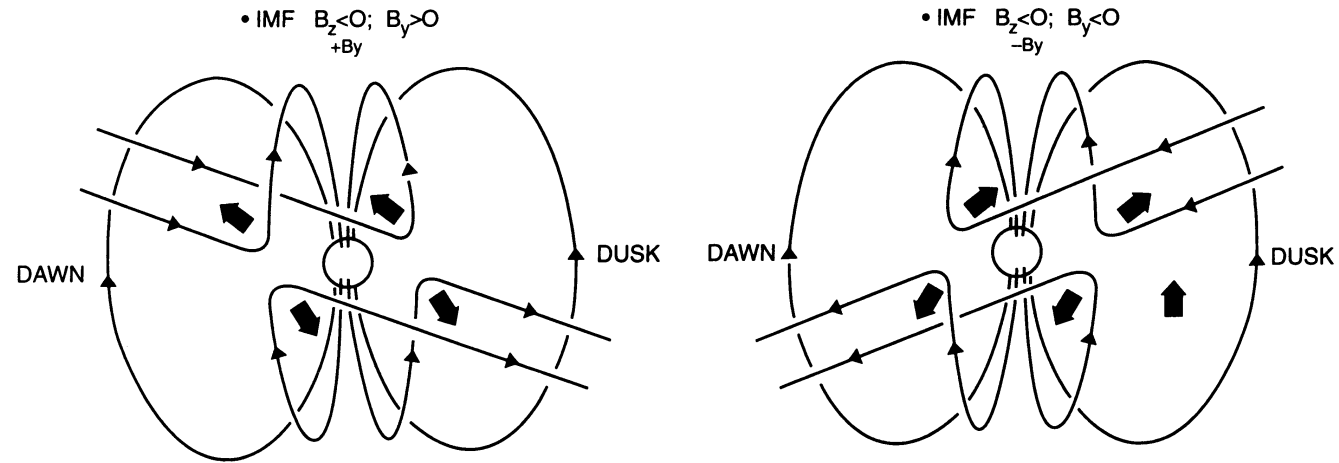


i = interplanetary field lines; v = viscous - driven flows

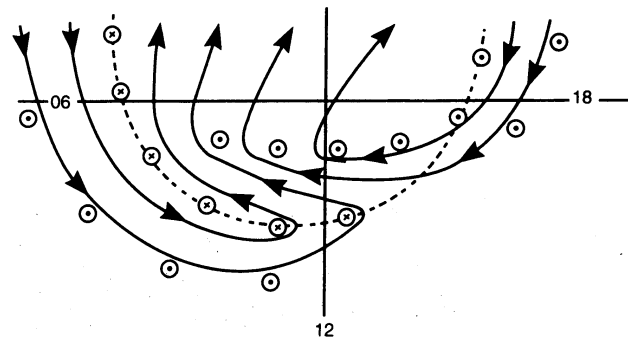
# IMF nord



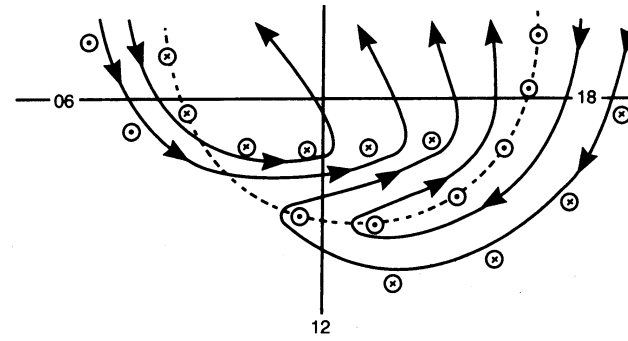
# Rôle de IMF-By



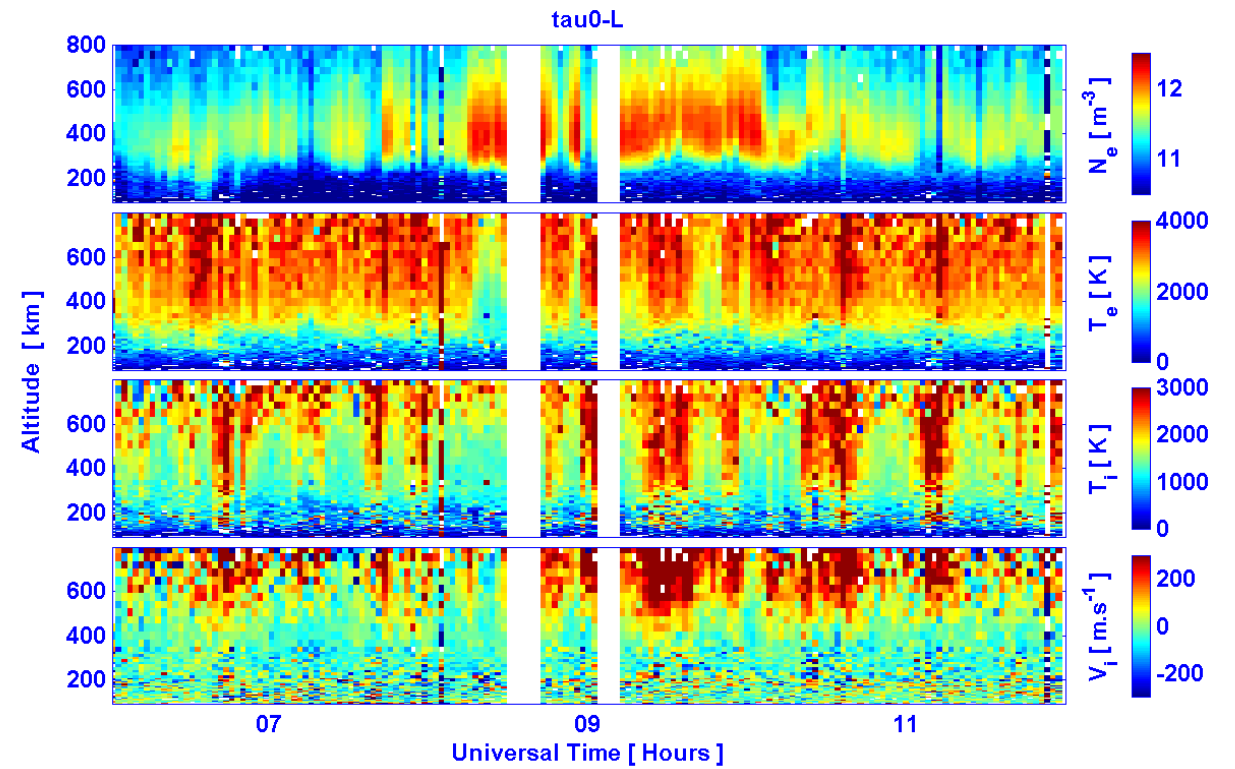
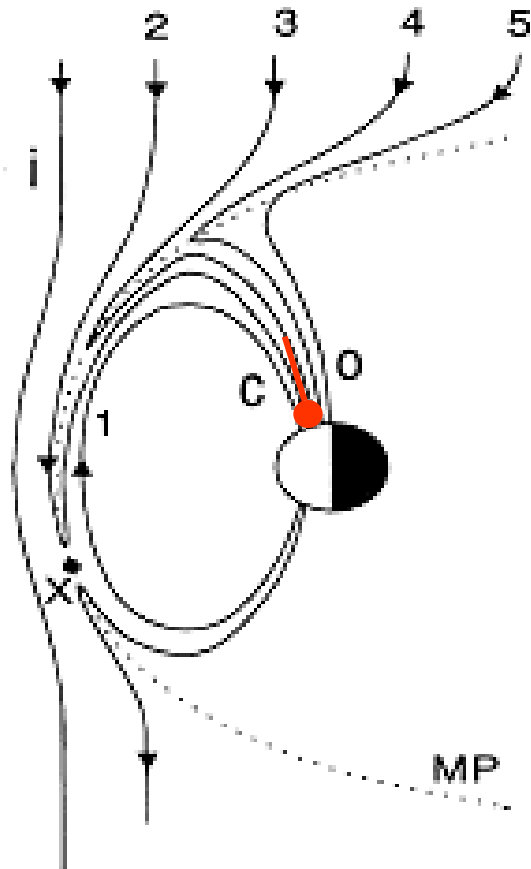
(a) IMF  $B_y > 0$



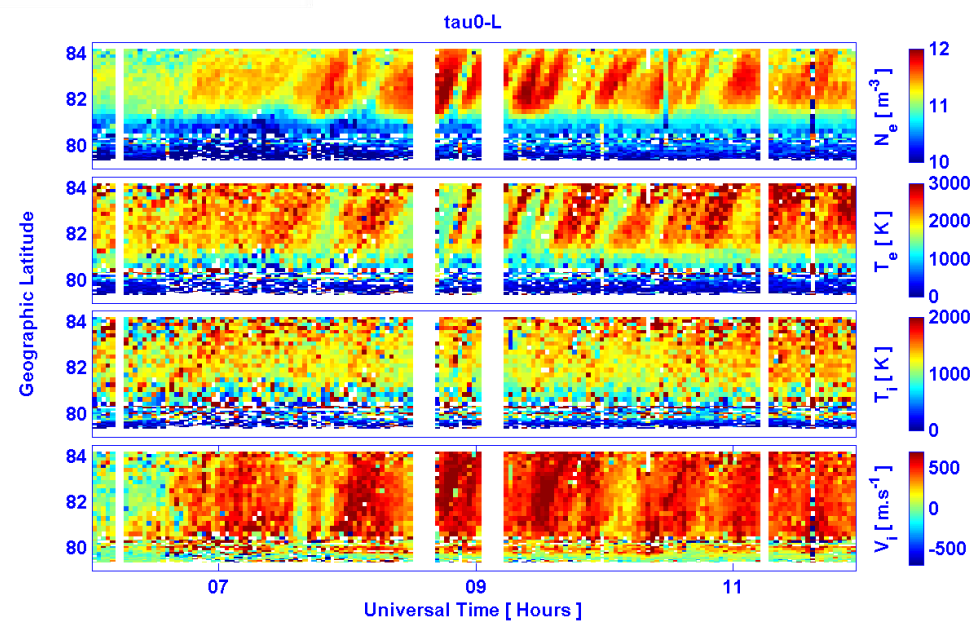
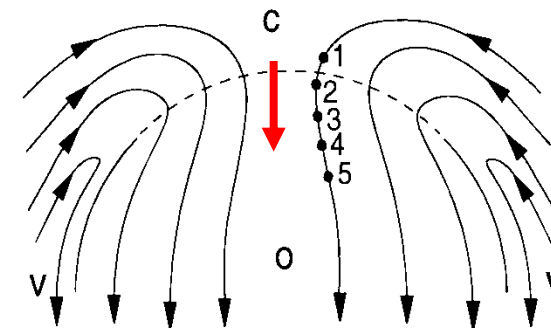
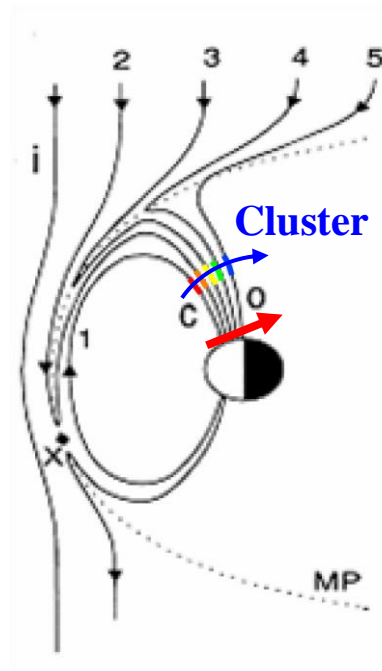
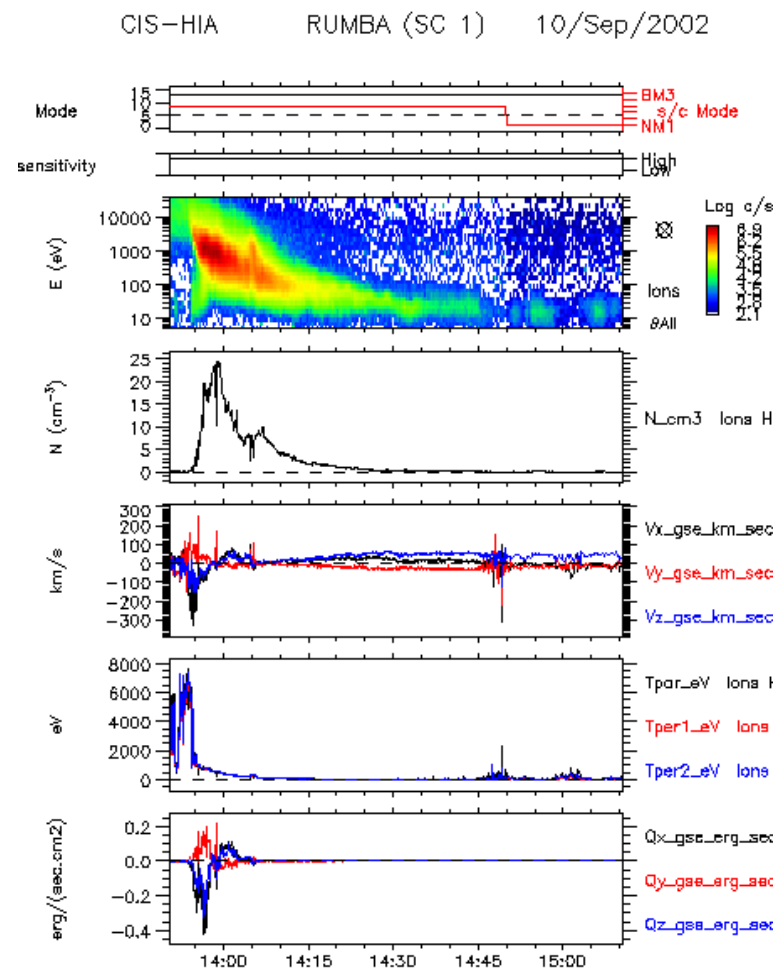
(b) IMF  $B_y < 0$



# Effets ionosphériques



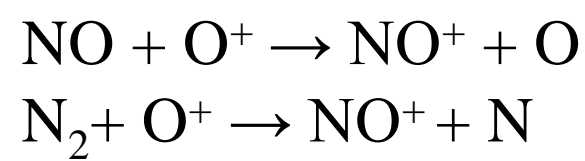
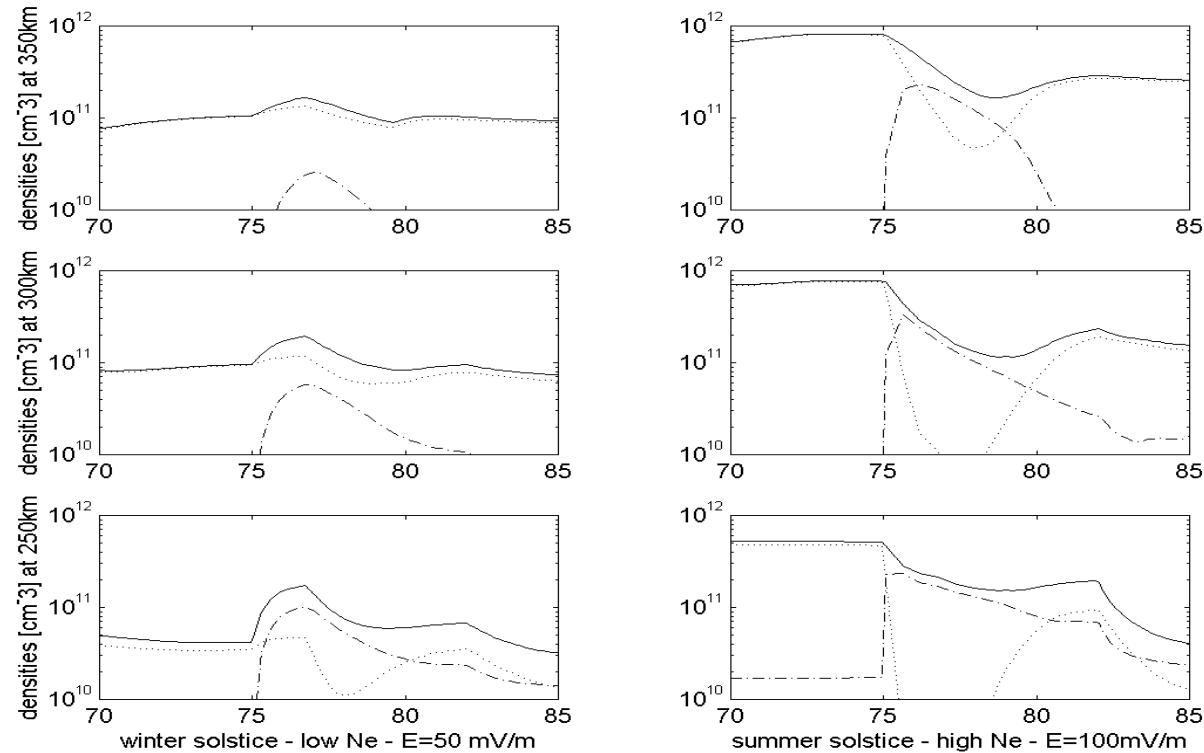
# IMF sud



## **Empreinte ionosphérique: précipitations vs. convection**

- Les précipitations d'électrons de basses énergies ( $\sim 70\text{eV}$ ) augmentent rapidement la température électronique et augmentent lentement la densité électronique en région F ( $\sim 300\text{km}$ ).
- Les forts champs électriques de convection chauffent la population ionique par chauffage Joule ce qui induit un changement explosif de la chimie de  $\text{NO}^+$  et d' $\text{O}^+$ .

# Effet net convection/précipitation



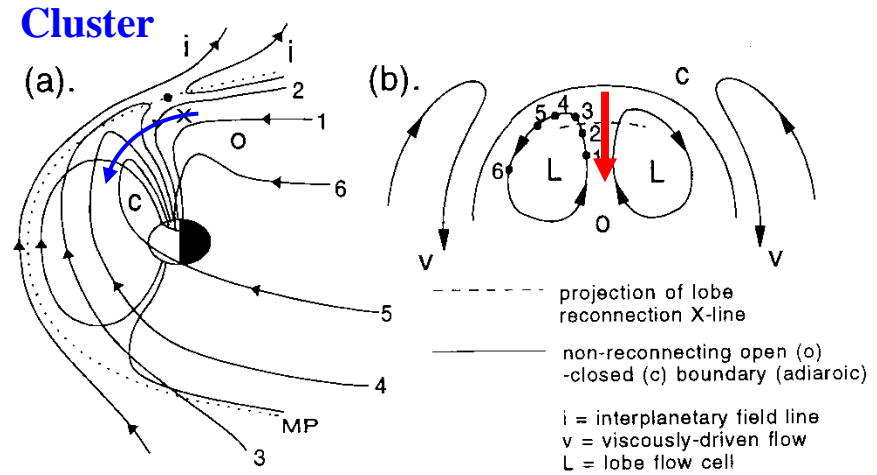
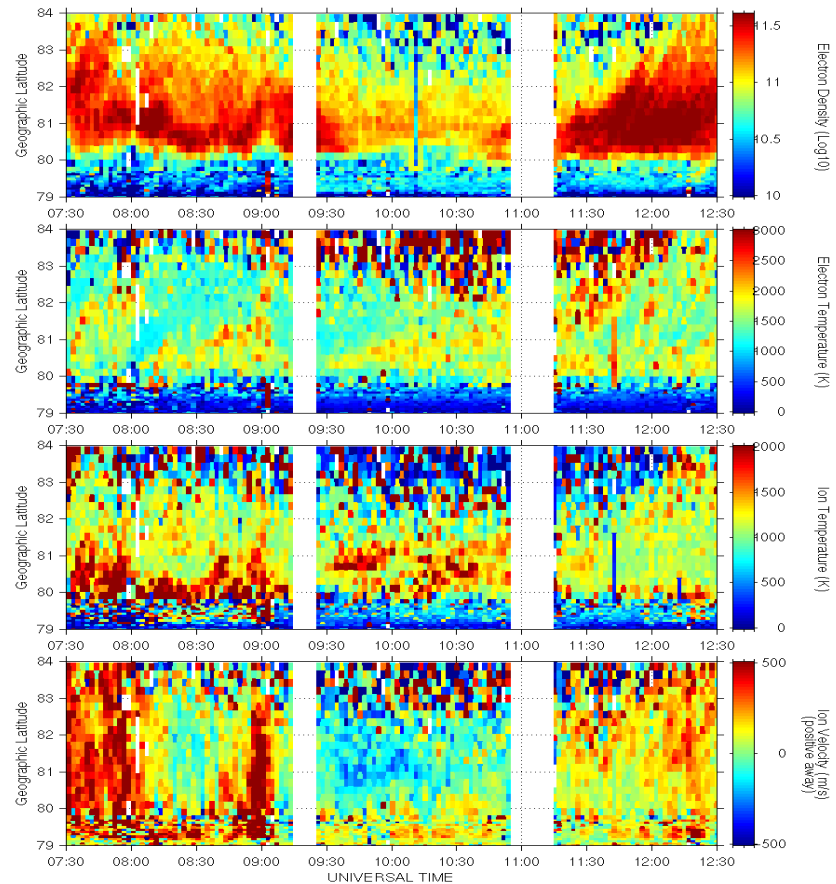
taux de reaction  $\propto T_i$



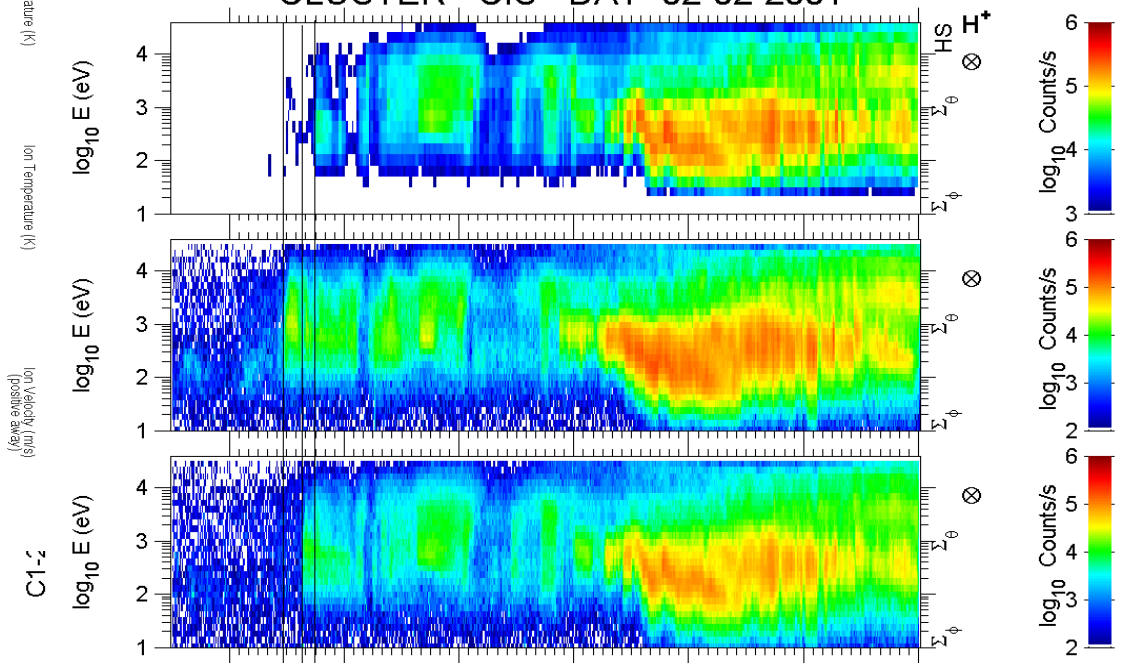
taux de reaction  $\propto 1/T_e$



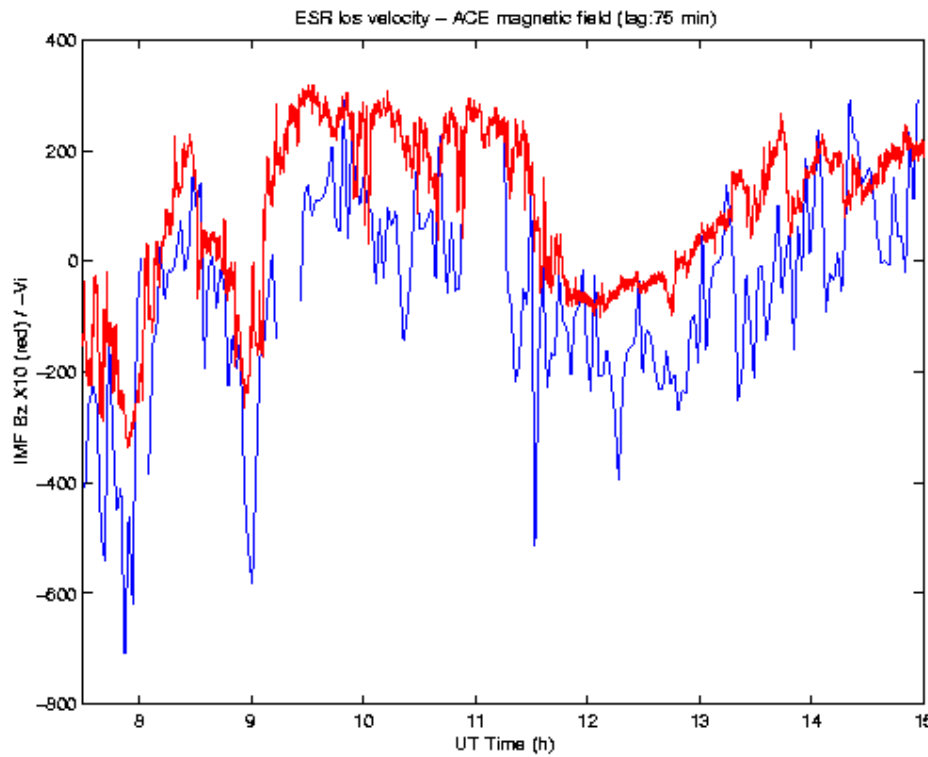
# IMF nord



CLUSTER - CIS - DAY=02-02-2001

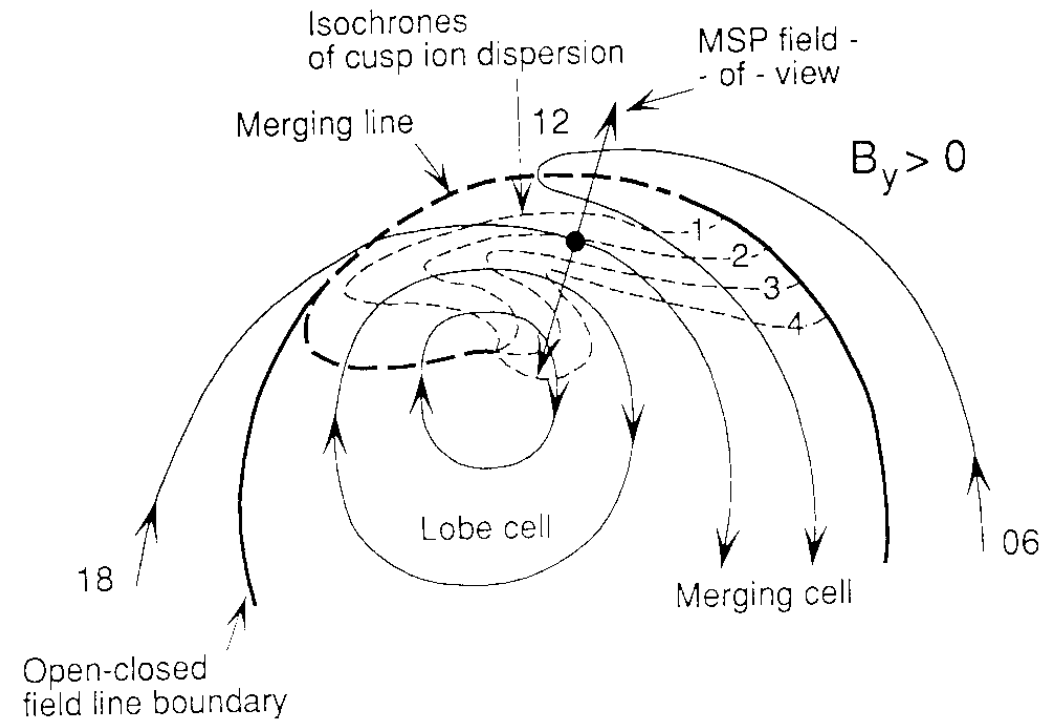
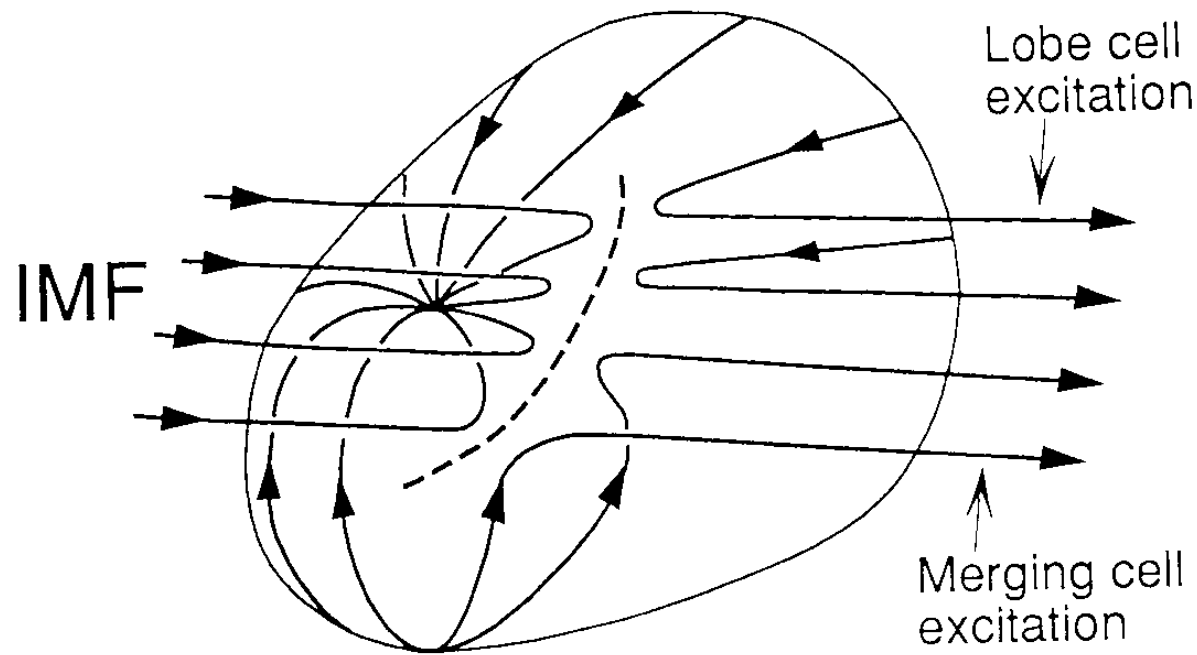


## IMF vers le nord: $B_z / -V_i$

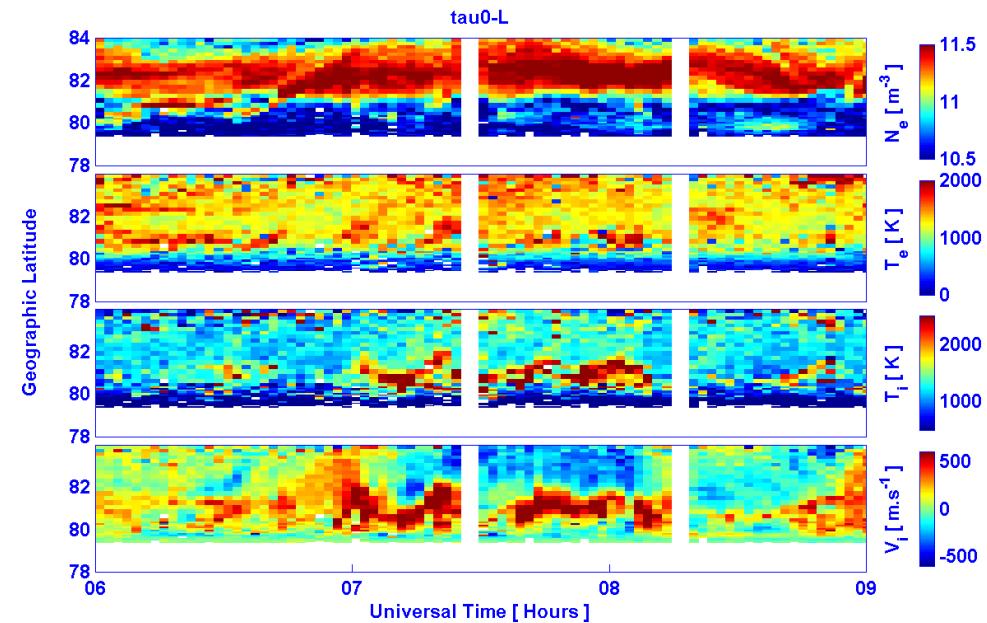
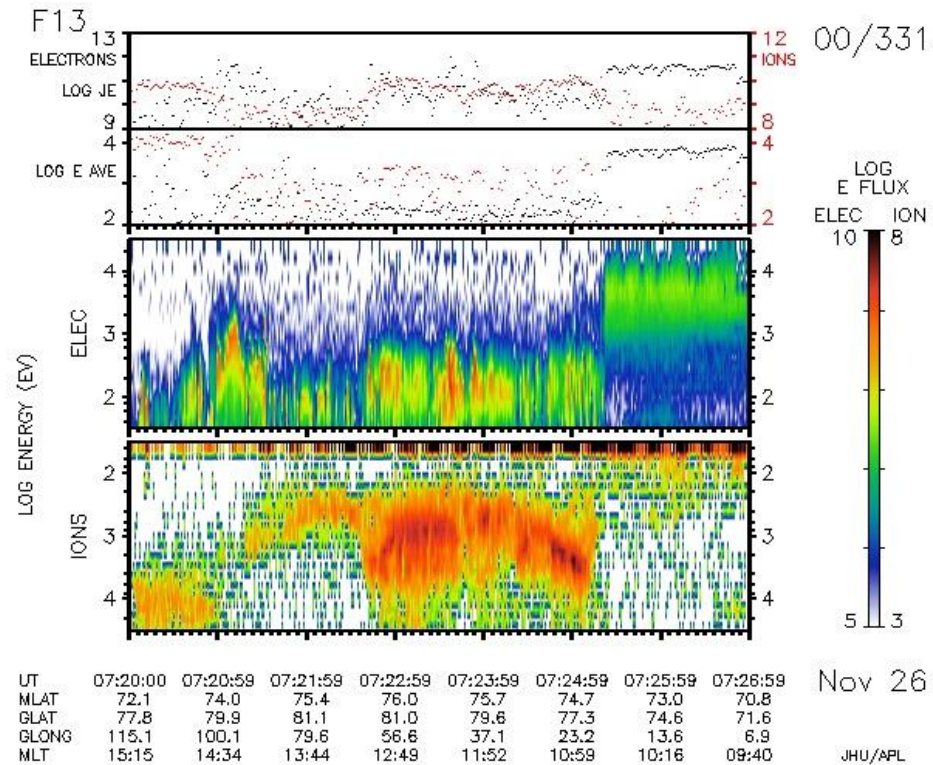
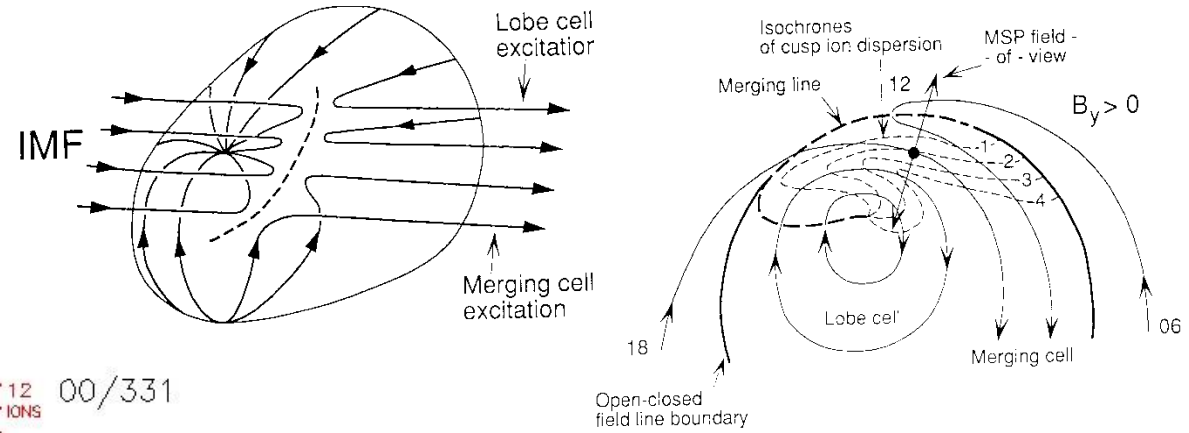


- Bonne correlation  $B_z / -V_i$
- Convection anti-solaire pour IMF  $B_z < 0$  due à la reconnexion entre les cornets polaires
- Convection solaire pour IMF  $B_z > 0$  due à la reconnexion dans les lobes.

# IMF dominé par $B_y$



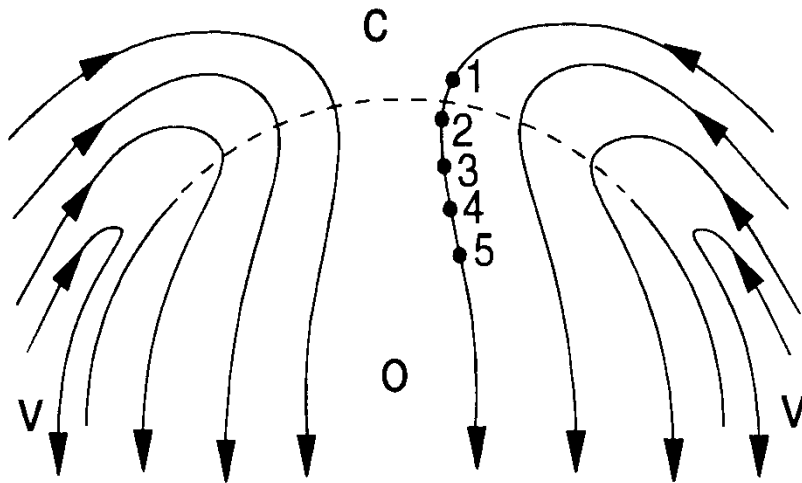
# IMF dominé par $B_y$





# Ionosphères

polaire | équatoriale



# Ionosphères

## polaire | équatoriale

- ionisation primaire par UV et précipitations e-, p+

- Chauffage par flux UV et précipitation, friction.

- Dynamique dominée par la convection ( $E \times B$  horizontale)

- Echappement d'ions

- ionisation primaire par UV et particules haute énergie

- Chauffage par flux UV,

- Dynamique dominée par les vents neutres.

- $B$  horizontal  $\rightarrow E \times B$  vertical !

- Fontaine équatoriale