

# Physique aurorale.

Fabrice Mottez (LUTH, Obs. Meudon)

Alain Roux (CETP)



SEMHD, octobre 2006.

# Les aurores polaires dont on va parler

Celles qui nous font du **grand spectacle**. Apparition essentiellement nocturne, sous forme d'arcs (multiples), éclat ~ pleine Lune, brillant dans les gammes optique et UV.



# La lumière des aurores

Due à l'excitation d'atomes d'O et de N par des collisions électroniques.

Altitude 80-400 km,  
dans l'ionosphère,  
longueur qq 100 km,  
largeur <10 km,  
structures fines 100m.



Tout le monde est d'accord pour dire qu'elles sont dues à des électrons précipités, énergie ~1-10 keV.  
D'où vient l'énergie de ces électrons ?

# Les aurores polaires : phénomènes à grande échelle

L'accélération des électrons auroraux : des processus aux petites et aux grandes échelles pour expliquer les structures fines et l'aspect global des aurores.

# L'origine des aurores polaires

Ce qu'on dit dans la plupart des livres de vulgarisation (y compris ceux qu'ont lus les astronomes)

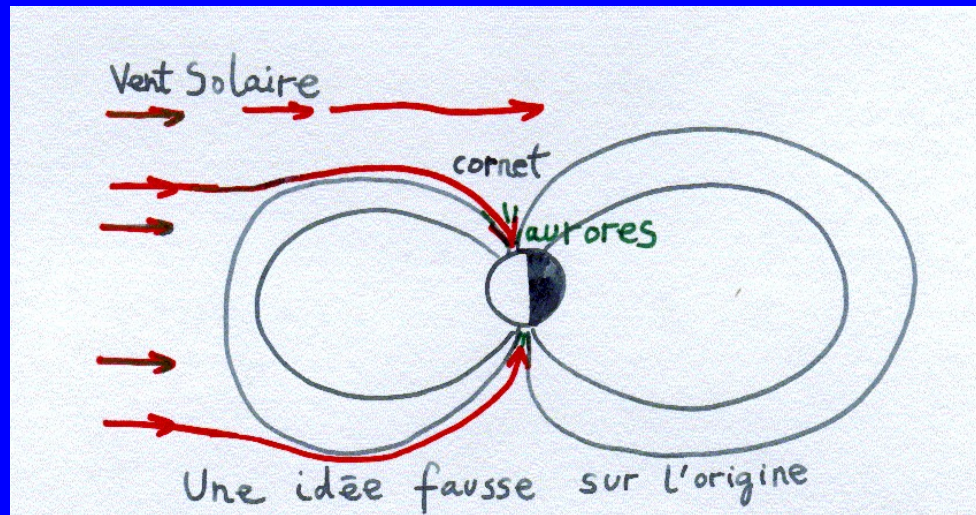
# Les orages magnétiques et les ceintures de radiation

Les variations de pression du vent solaire déclenchent des perturbations du champ magnétique terrestre appelées " orages géomagnétiques ". Le nombre de particules chargées au voisinage de la Terre contenues dans les " ceintures de radiation ", dites de Van Allen, augmente, des particules sont précipitées près des pôles terrestres dans la basse atmosphère et sont à l'origine des " aurores polaires ". (bureau des longitudes)

**R I G O U R E U S E M E N T   F A U X**

# Vent solaire/ cornets polaires / aurores

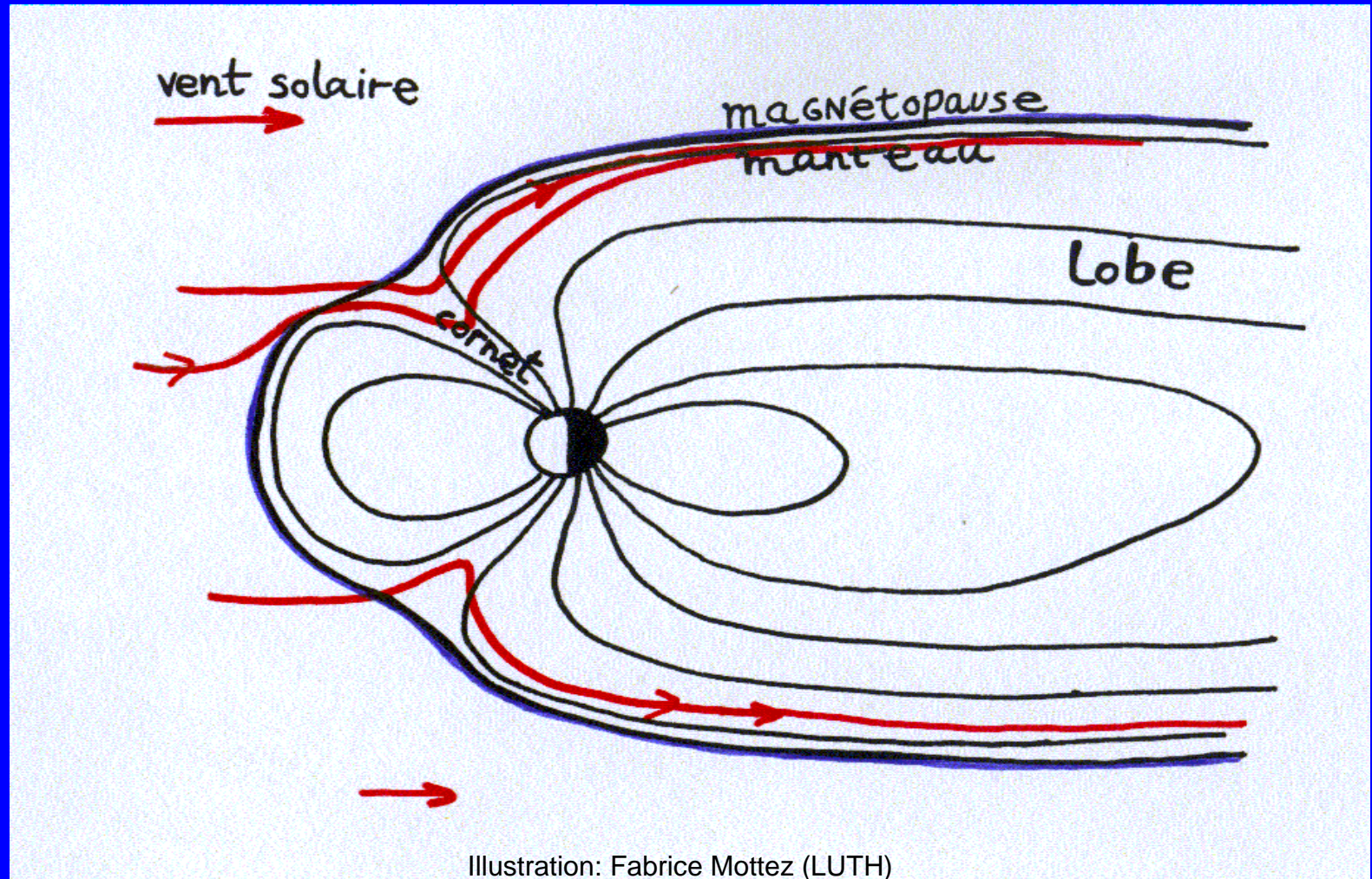
« À proximité de la Terre, les particules énergétiques du vent solaire se mettent à se déplacer en suivant les lignes de force du champ magnétique terrestre, ce qui les attire vers les pôles. Lorsqu'elles pénètrent dans l'atmosphère, elles entrent en collision avec les molécules gazeuses de l'atmosphère et émettent de la lumière visible à l'oeil nu. » (cyber sciences quebec)



**RIGOREUSEMENT FAUX**

Le vent solaire est-il la cause *directe* des aurores ?  
**NON.**

Le vent solaire qui entre dans la magnétosphère  
ne se dirige pas vers la Terre. (effet diamagnétique)





# ...origine des aurores polaires

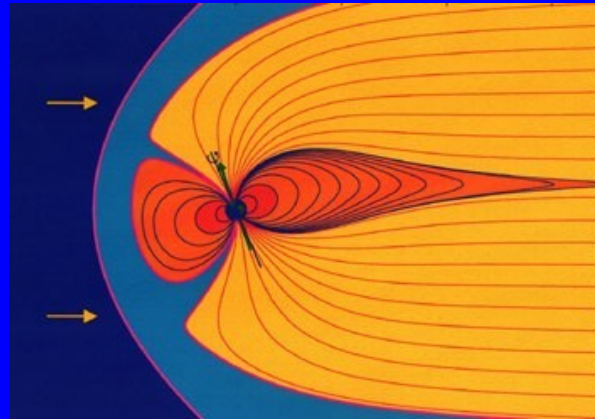
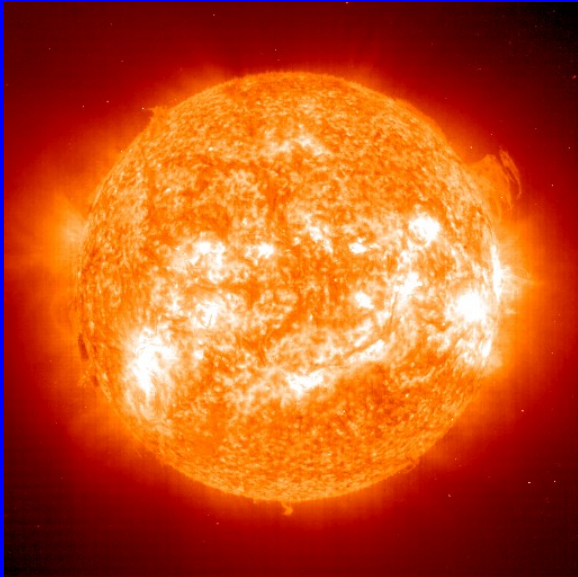
Si l'explication de leur origine était si simple, cela ferait longtemps qu'on aurait cessé de faire de la recherche au sujet des aurores et de la magnétosphère.

CELA DIT...

50 années d'exploration spatiales commencent à nous donner un aperçu des mécanismes en jeu. Ils sont nombreux, pas tous compris, on ne sait lesquels ont les plus grands effets.

# Trois ingrédients

- vent solaire
- champ magnétique terrestre, magnétosphère
- ionosphère ~ sphère conductrice + écran



# Le plasma du vent solaire et de la magnétosphère

Principale propriété :

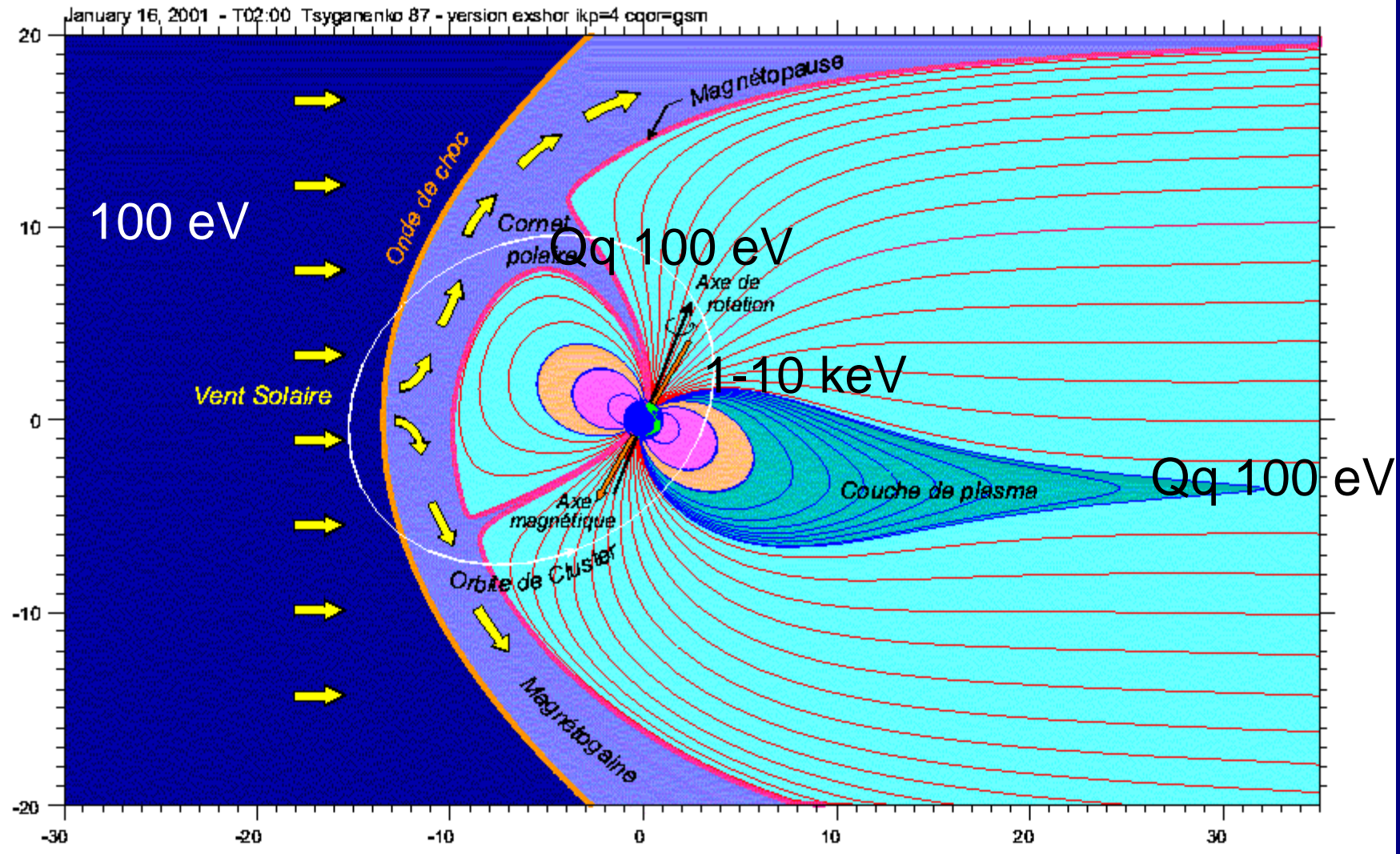
pas de collisions binaires entre les particules.

Conséquences :

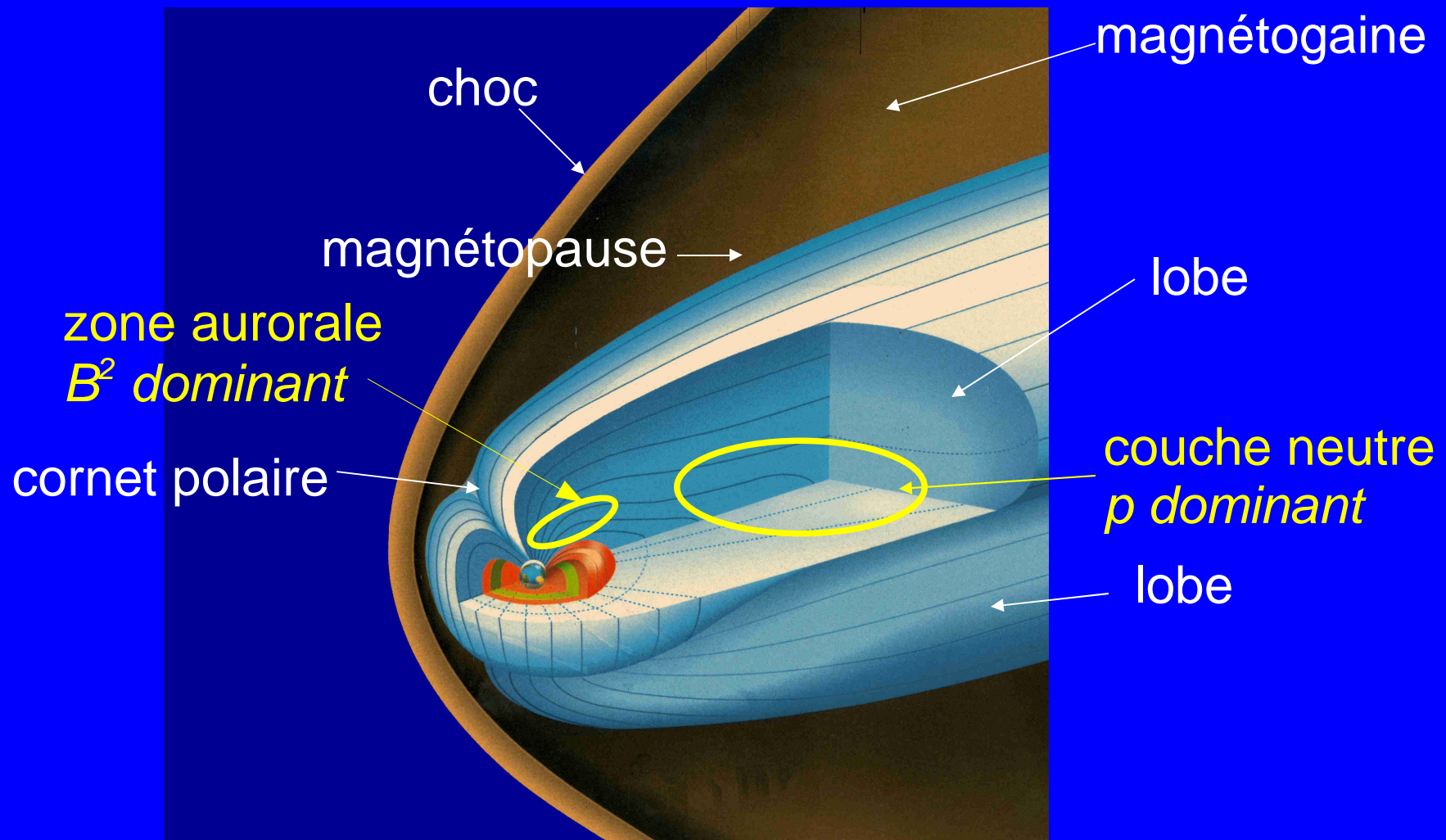
- Pas de chimie.
- Pas d'équilibre thermodynamique local. Plus précisément : rien n'oblige les particules à adopter (même localement) une fonction de distribution gaussienne en vitesses.
- On perd la possibilité de décrire localement le plasma à l'aide d'une densité, d'une vitesse moyenne et d'une température.
- Nécessité, parfois, de recourir aux Eq. de Vlasov-Maxwell.

# Magnétosphère, énergies du plasma

CETP / PR / comagneto - January 18, 16:4, 2001



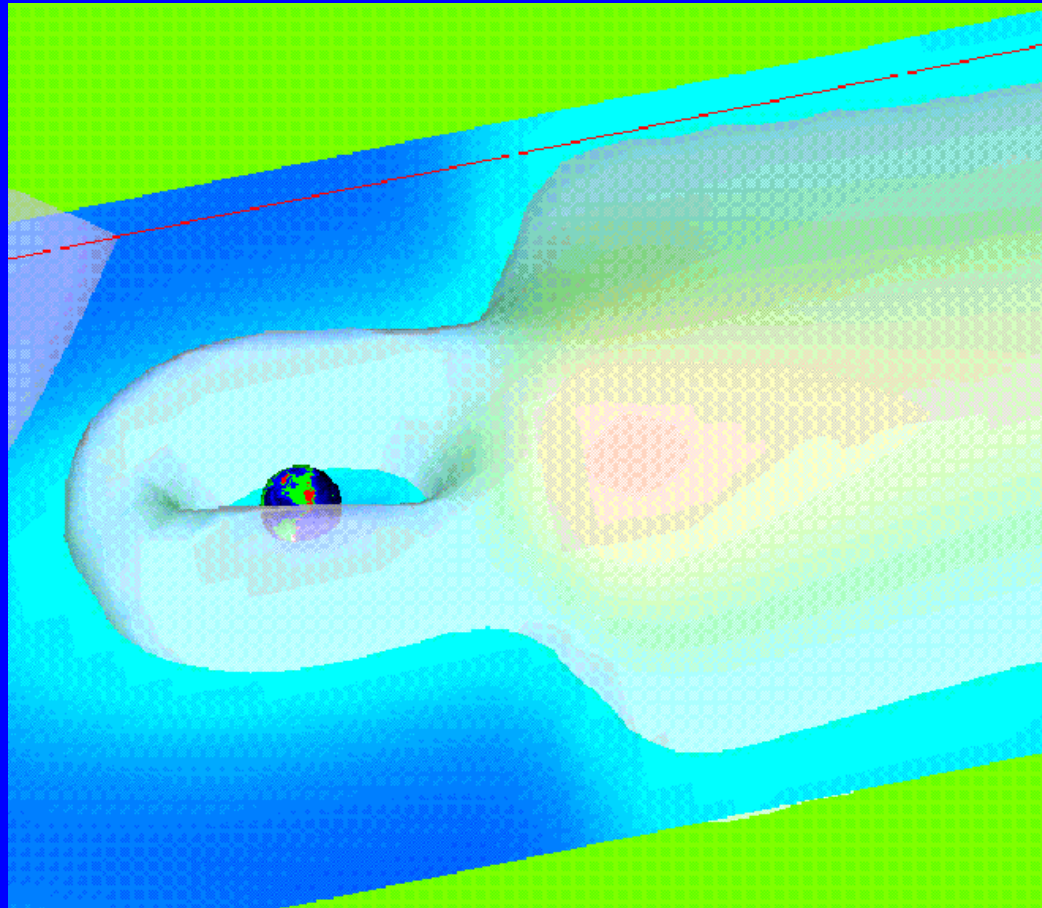
# Deux régions liées à l'accélération aurorale.



Représentation statique standard, en fonction de  $B$ .

# Décrire la magnétosphère en termes de courants électriques

SOLEIL

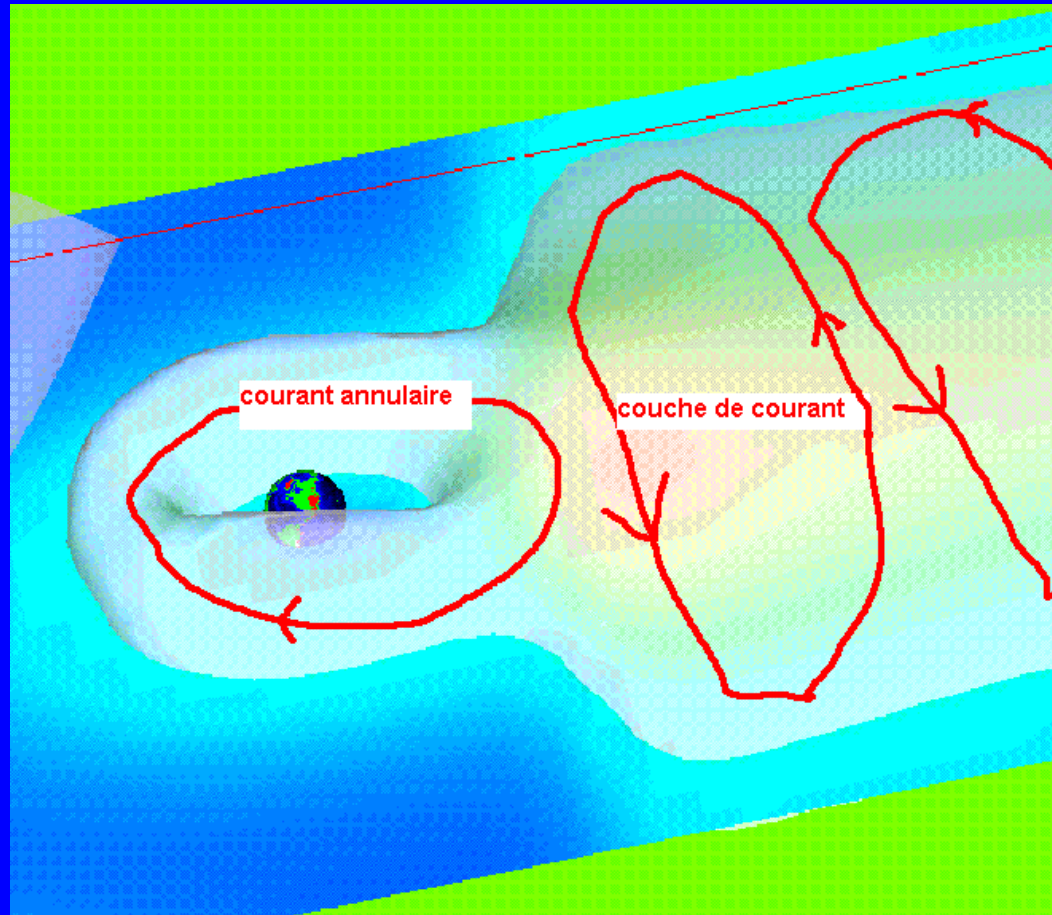


QUEUE

Isocontour de la densité de courant,  
modèle heuristique de Tsyganenko

# Décrire la magnétosphère en termes de courants électriques

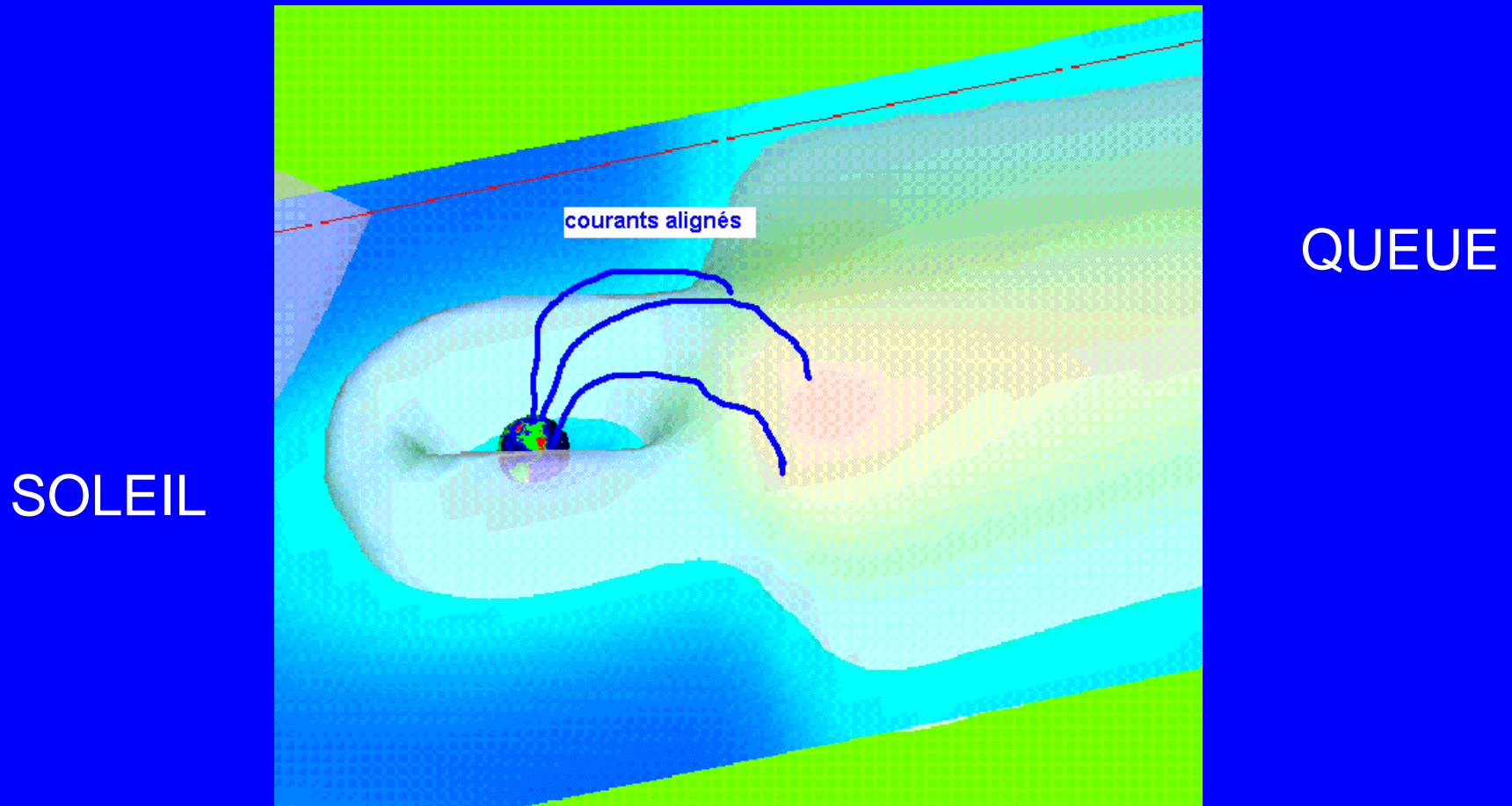
SOLEIL



QUEUE

Isocontour de la densité de courant,  
modèle heuristique de Tsyganenko

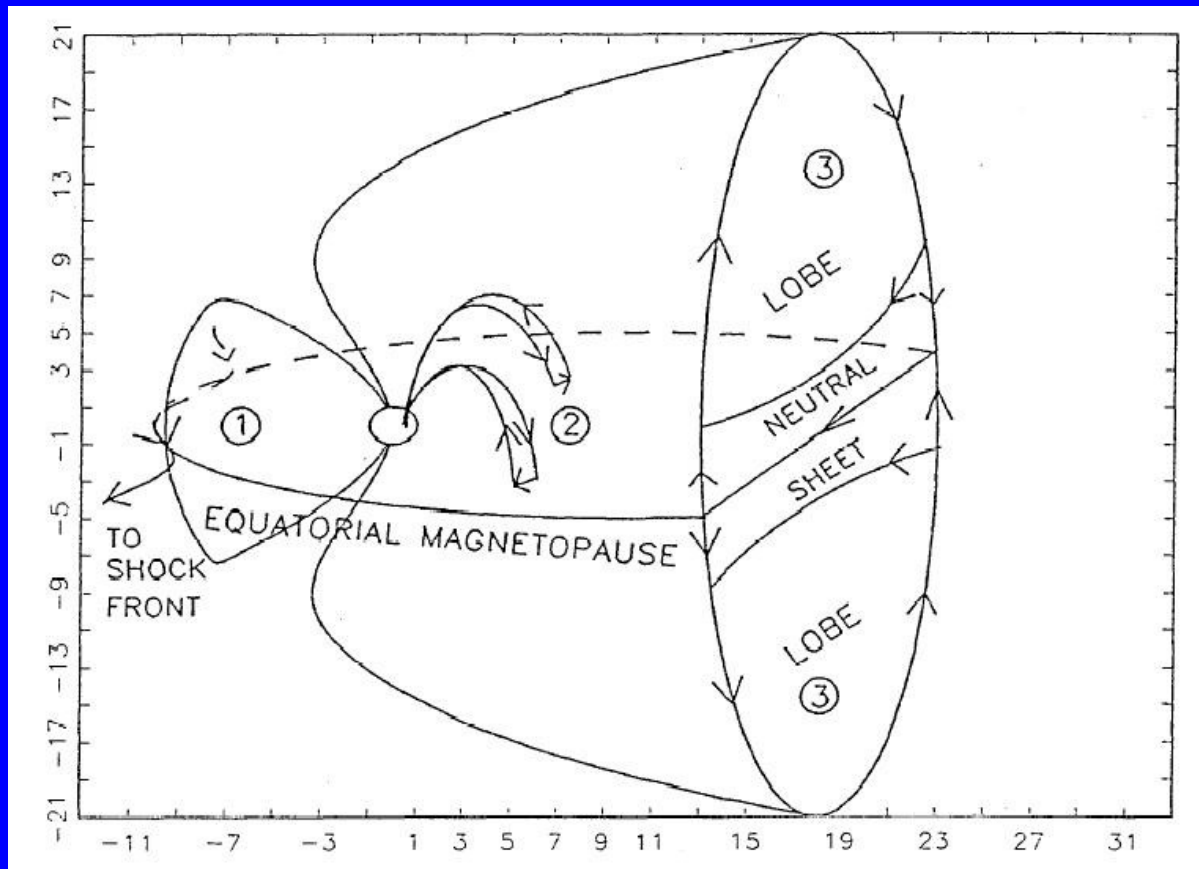
# Décrire la magnétosphère en termes de courants électriques



Les courants alignés sont faibles dans les situations « calmes ». Ils ne font pas partie du modèle de Tsyganenko.



# Décrire la magnétosphère en termes de courants électriques



Les courants alignés sont faibles dans les situations « calmes ». Ils ne font pas partie du modèle de Tsyganenko.

# Le contexte de leur apparition : les sous-orages

Séquence d'événements auroraux, corrélée avec des événements affectant la structure globale de la magnétosphère.

Quatre phases :

- croissance (growth phase)
- déclenchement (break-up)
- expansion (expansion phase)
- recouvrement (recovery phase)

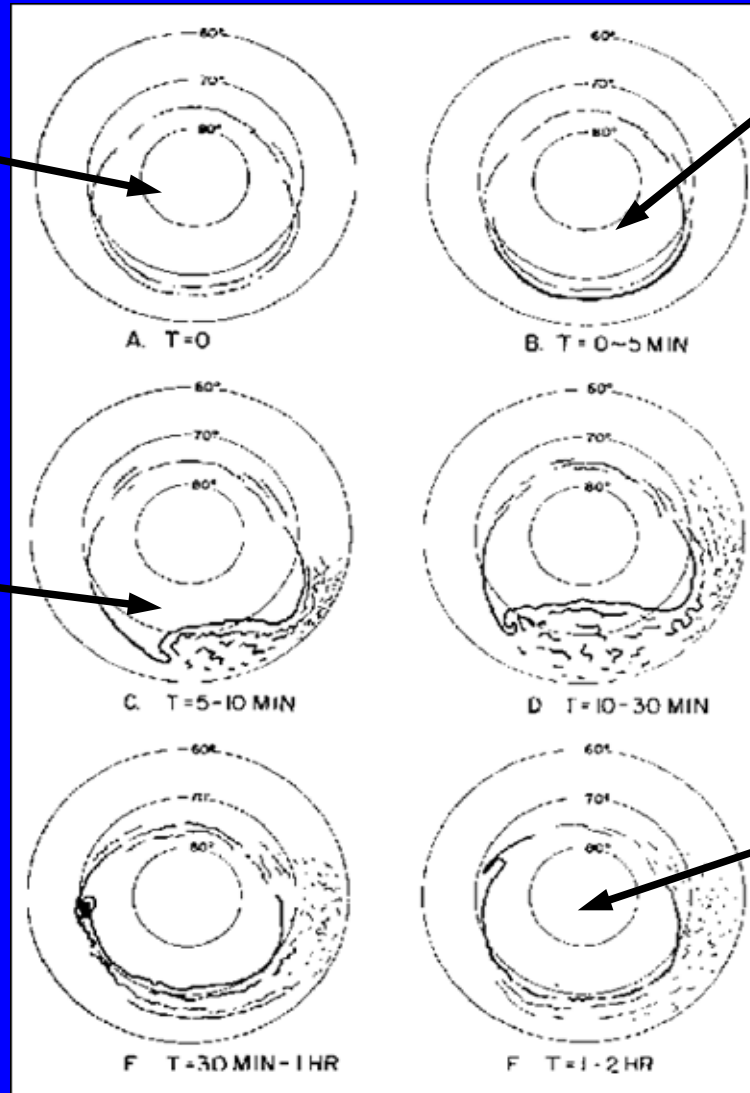
# Les sous-orages auroraux

croissance  
(growth)

déclenchement  
(break-up)

expansion  
(expansion phase)

recouvrement  
(recovery phase)



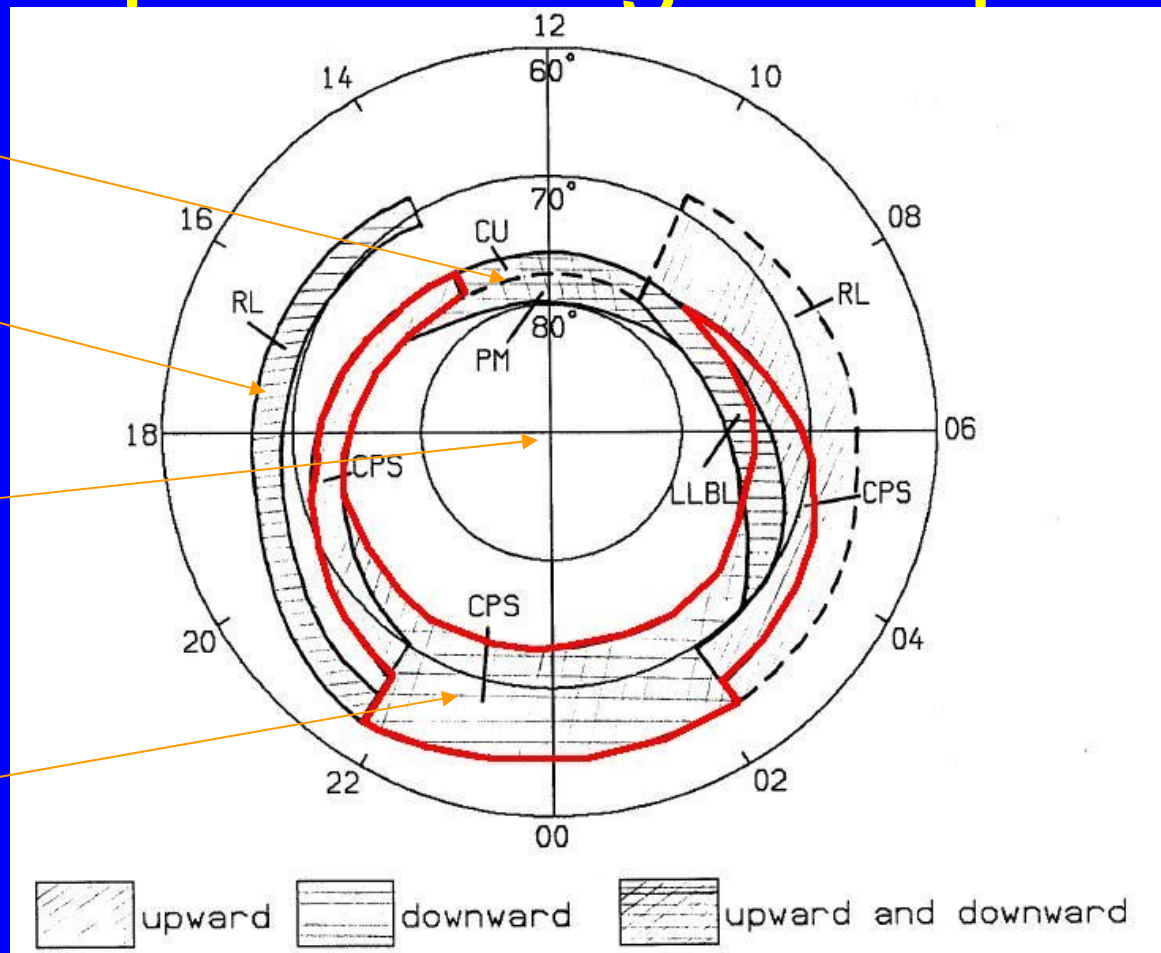
# Connection ionosphère/magnétosphère

Cornet polaire

Lobes

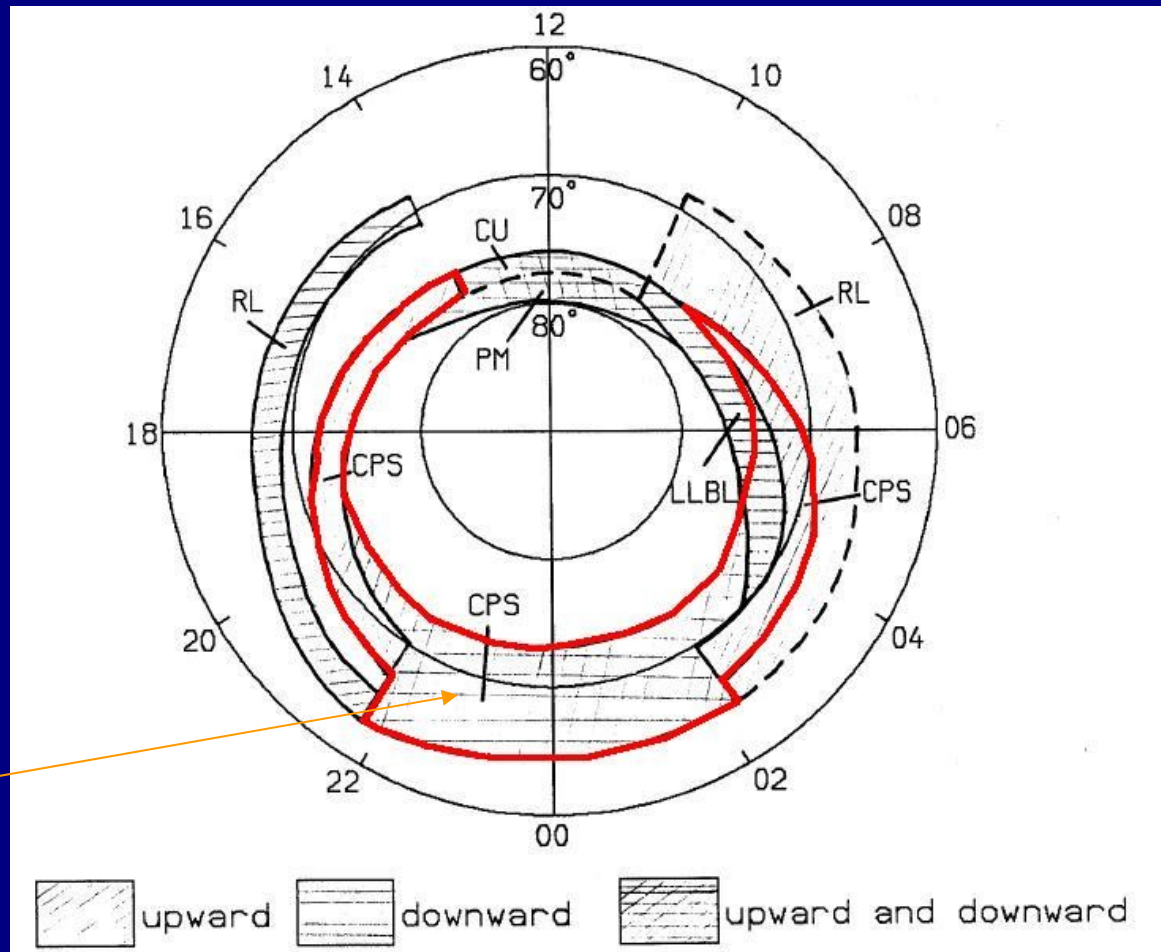
Pôle magnétique

Couche neutre Centrale (CPS)



Carte ionosphérique des pieds des lignes de champ où on mesure des courants alignés, et nom des régions de la Msphère où vont ces lignes.

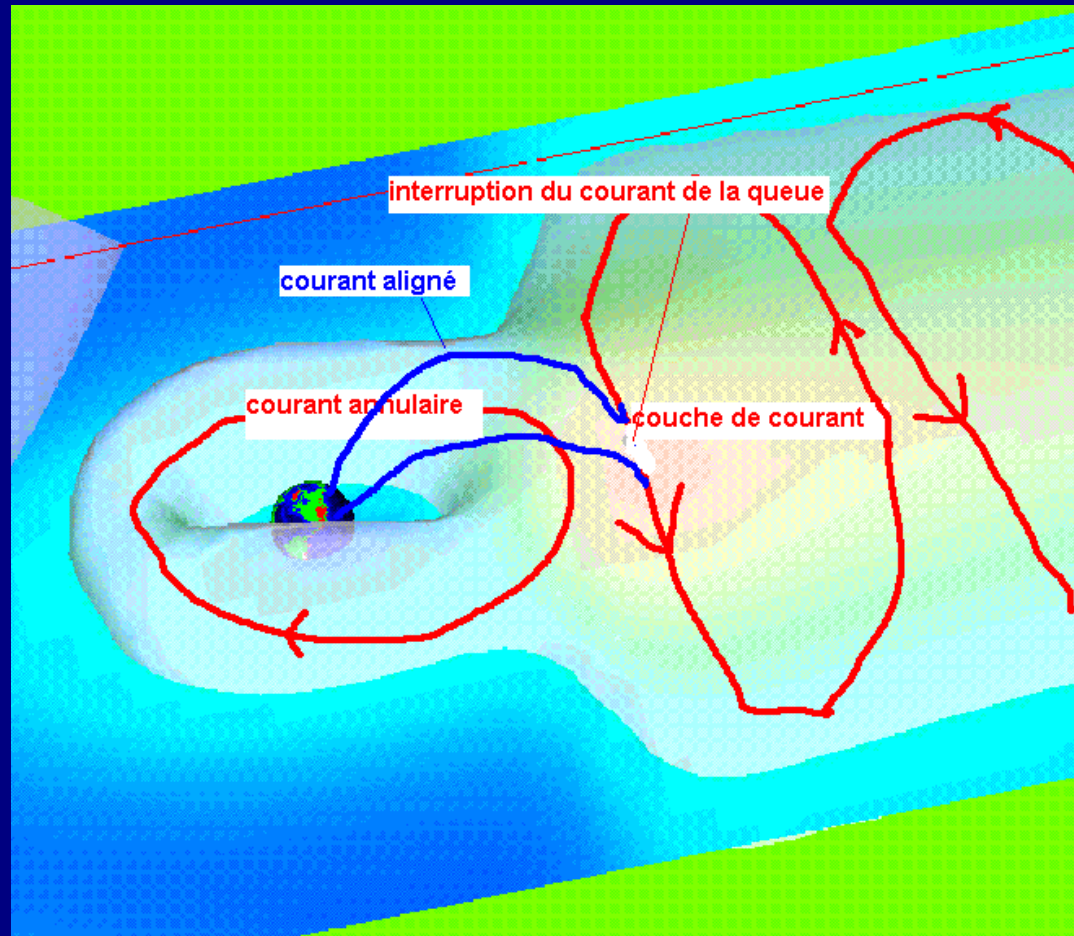
# aurores / courants / accélération



Couche  
neutre  
Centrale  
(CPS)

Les régions de précipitation aurorales les plus brillantes (rouge) sont liées à des courants alignés reliés à la couche neutre.

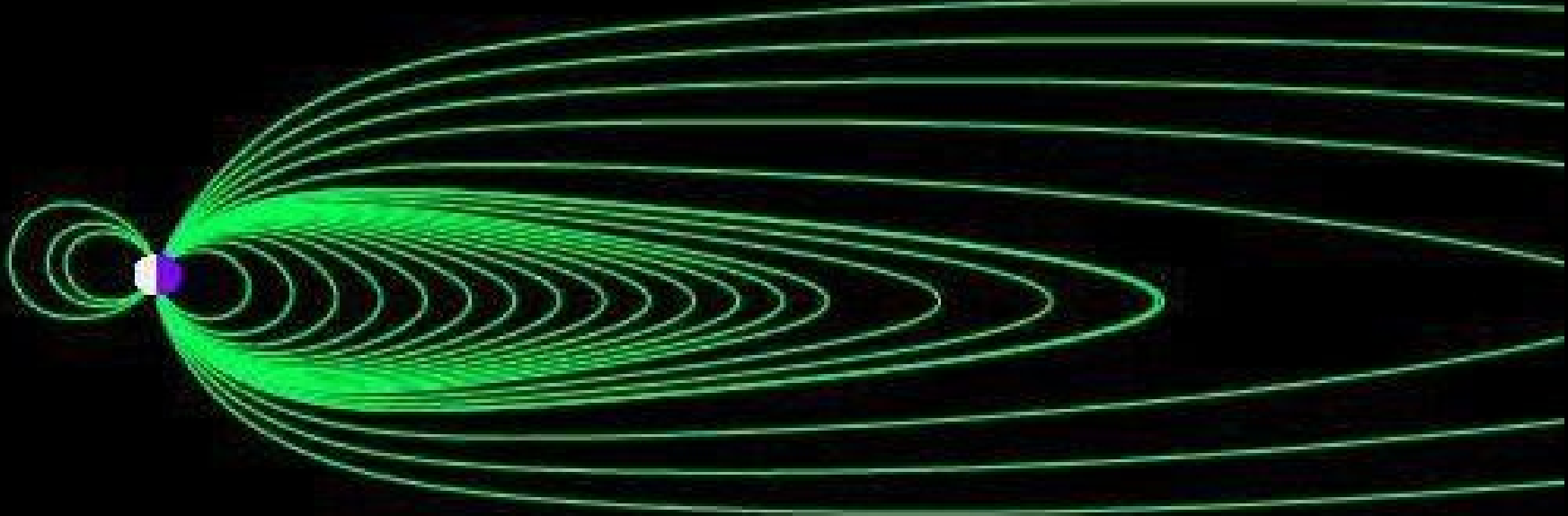
# courants / accélération



Les régions de précipitation aurorales les plus brillantes sont liées à des courants alignés reliés à la couche neutre. Ces courants sont très amplifiés lors des sous-orages.

# Les «cycles» de la magnétosphère (I)

**AU COMMENCEMENT ...**



**champ magnétique de type dipolaire**

# Les «cycles» de la magnétosphère (II)

## PHASE DE CROISSANCE

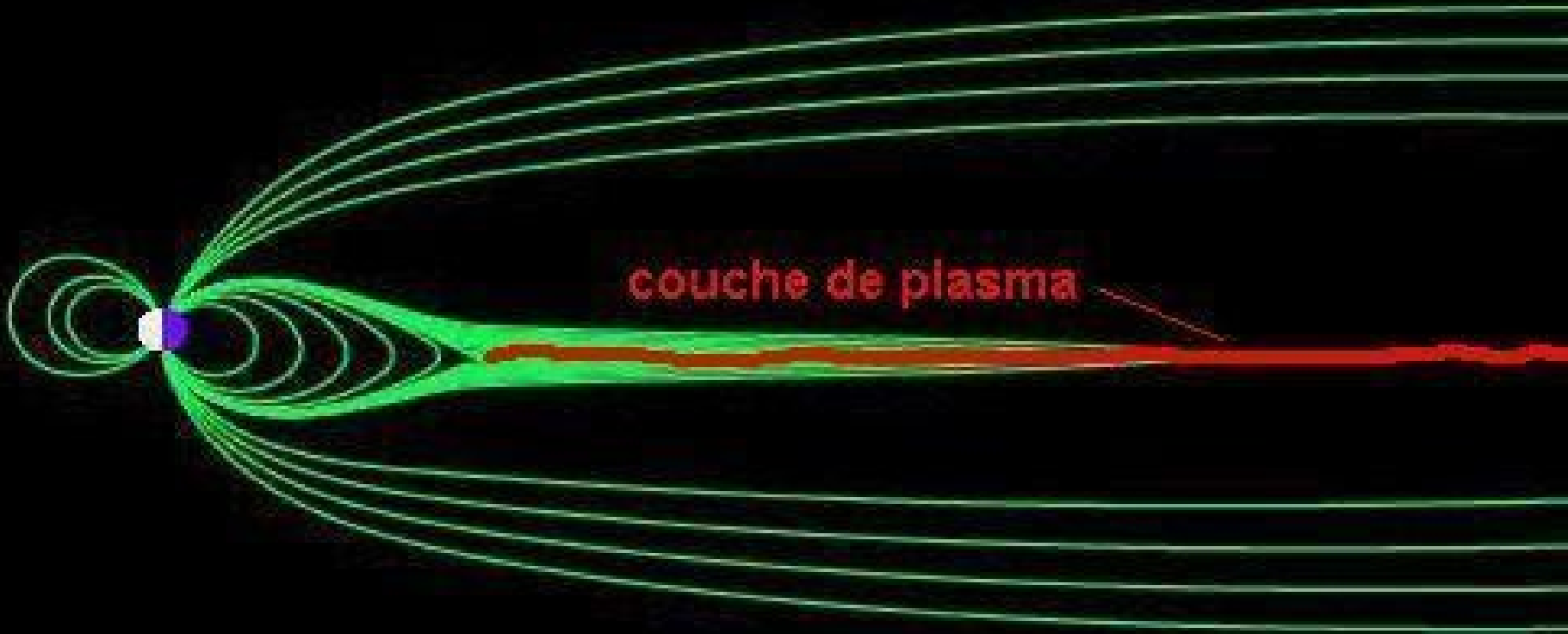


**champ magnétique de type queue**

amincissement de la couche de courant  $\sim r_{\text{Larmor ions}}$  confirmée  
*sans ambiguïté* par les sondes Cluster

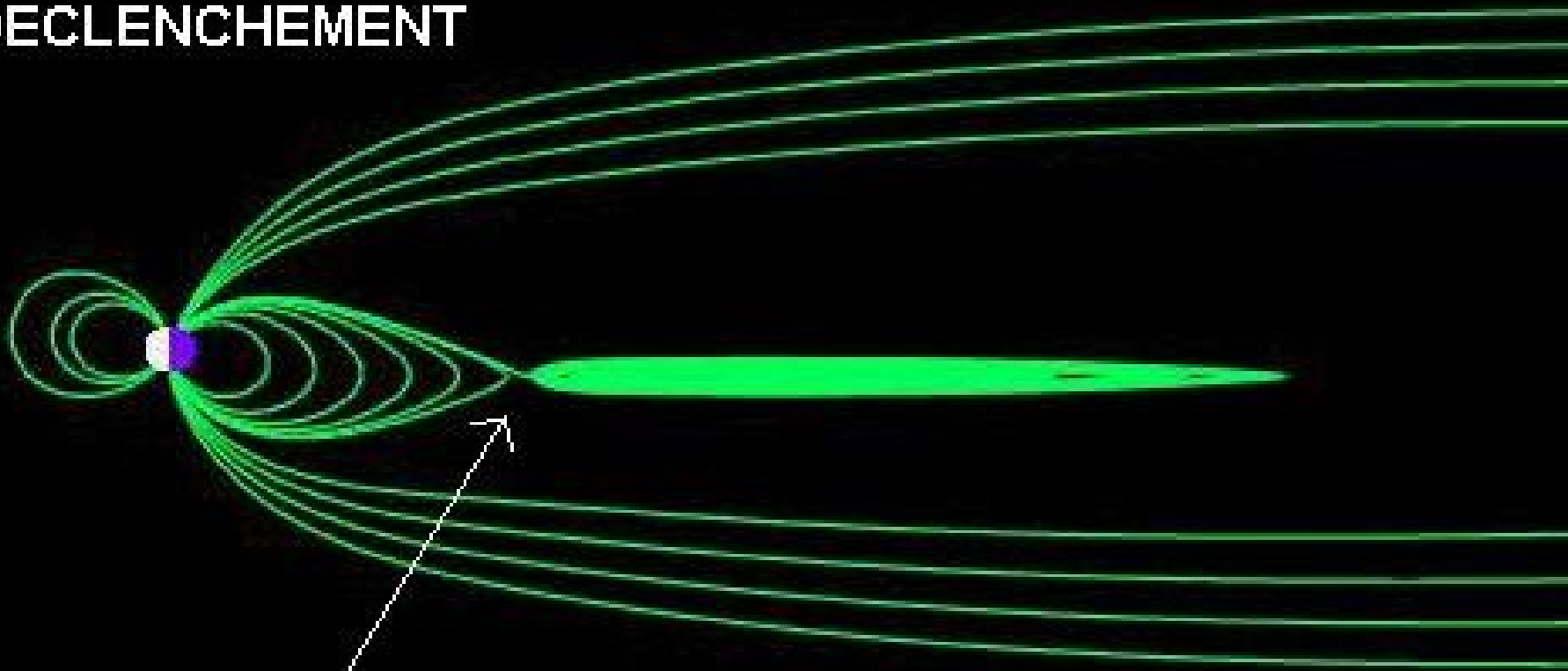


# Les «cycles» de la magnétosphère (II bis)



# Les «cycles» de la magnétosphère (III)

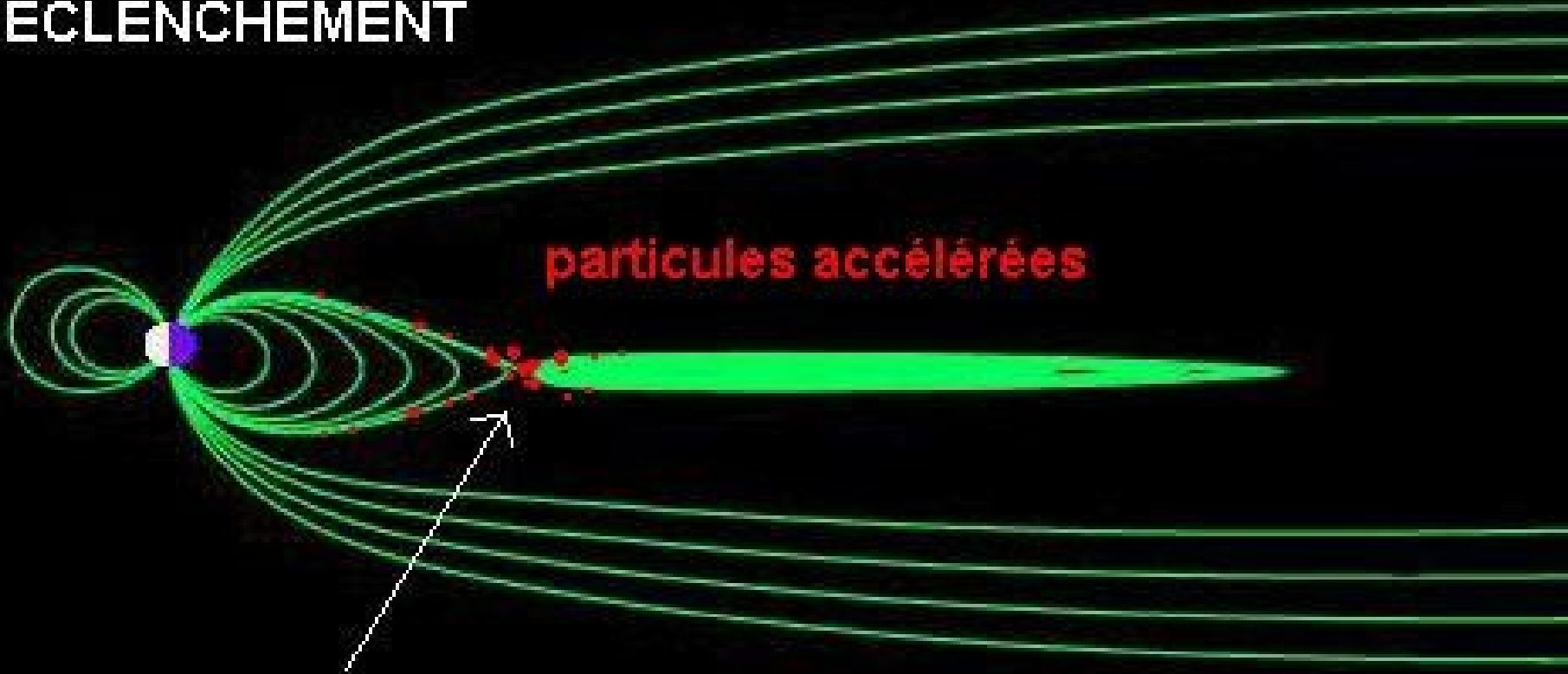
**DECLENCHEMENT**



**interruption de courant**

# Les «cycles» de la magnétosphère (III bis)

## DECLENCHEMENT

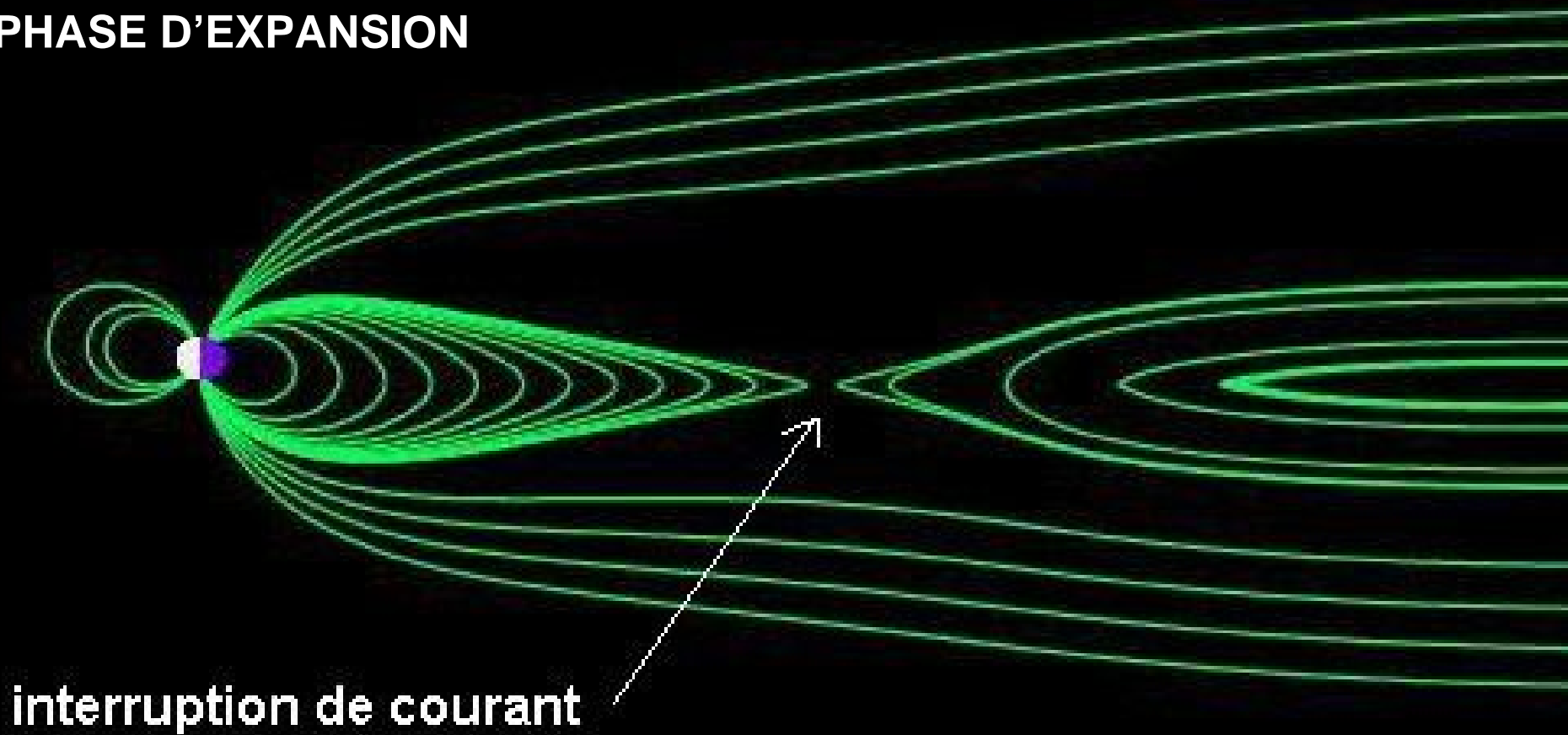


interruption de courant = région d'accélération

Première accélération dans la région d'interruption de courant.  
**Forçage du courant aligné** (il faut bien que la boucle de courant se referme).

# Les «cycles» de la magnétosphère (IV)

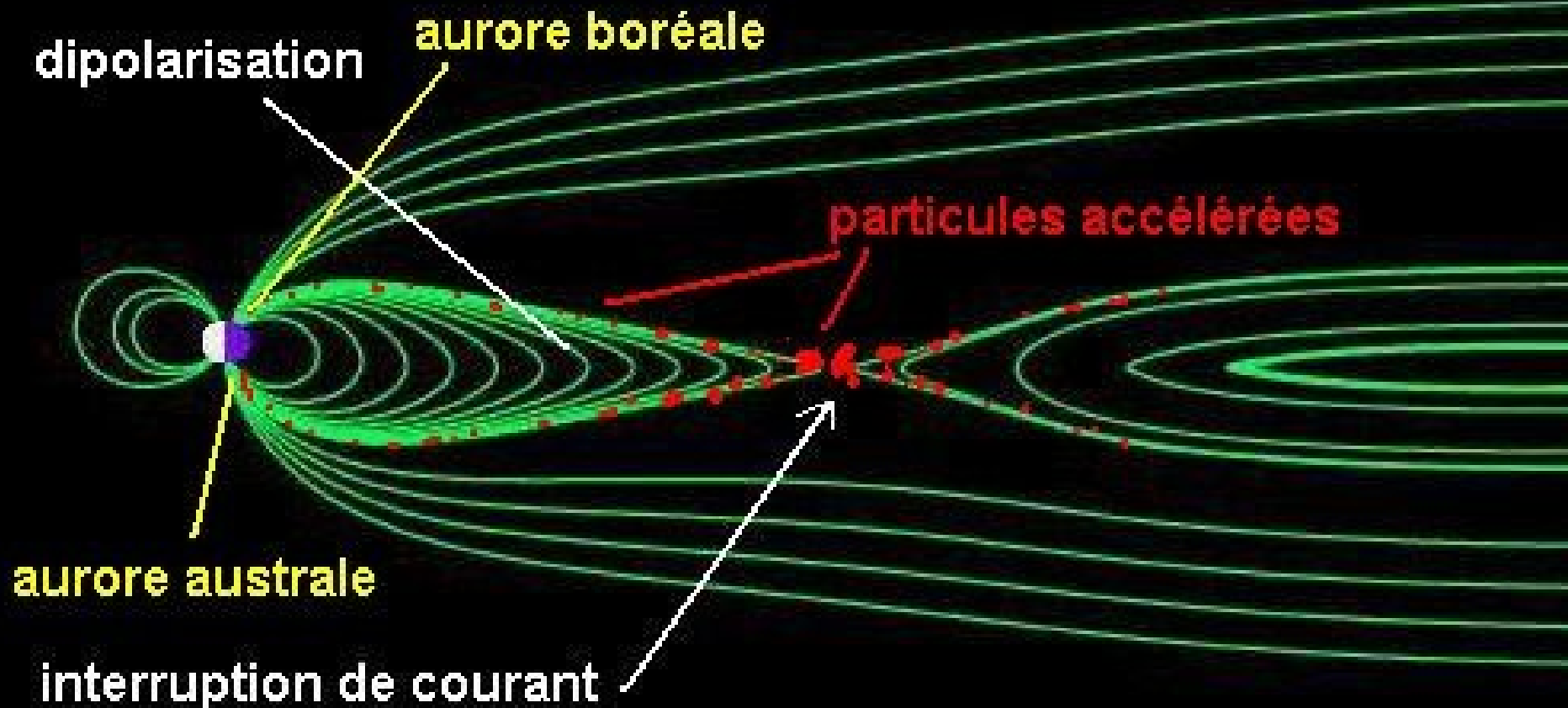
## PHASE D'EXPANSION



interruption de courant

# Les «cycles» de la magnétosphère (IV bis)

## PHASE D'EXPANSION



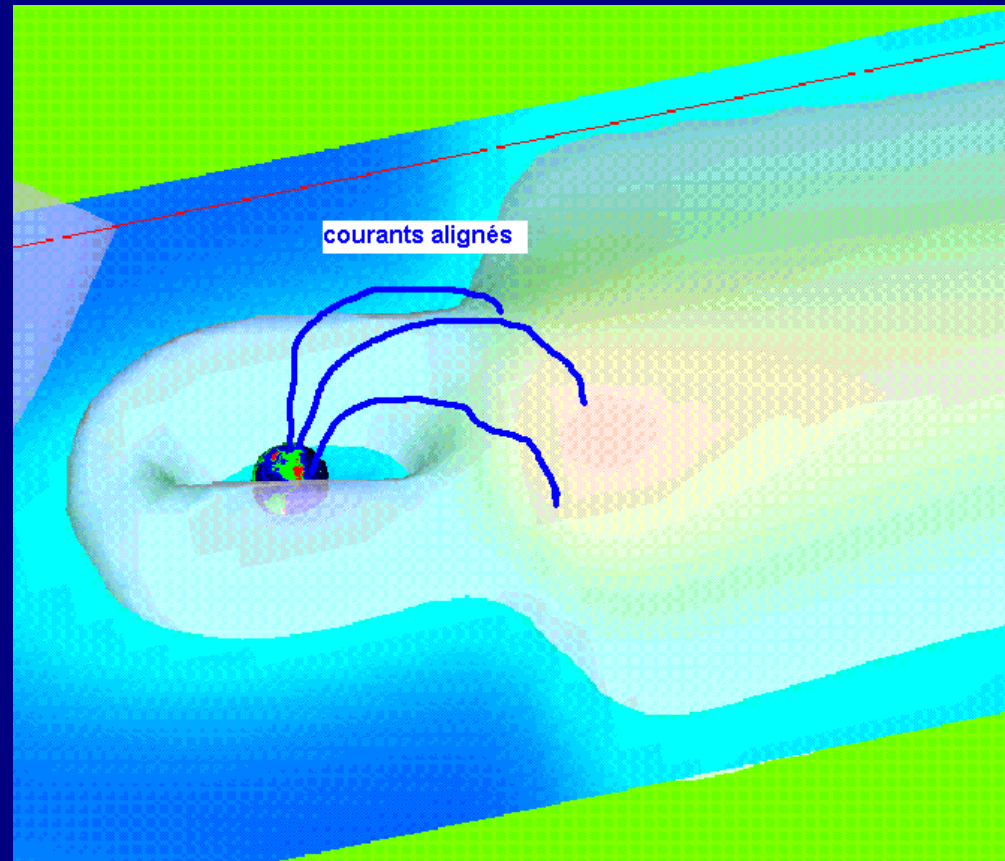
# L'accélération le long des courants alignés

Admettons que les courants alignés soient forcés par des phénomènes dans la couche neutre.

Les aurores ont lieu dans les régions de courant vers le haut.

Y aurait-il une chute de potentiel associée à ce forçage, parallèlement au champ magnétique ?

i.e. Le circuit « ligne de champ » aurait-il une impédance non nulle ?



Quelle est la réponse du plasma au forçage de  $J_{\parallel}$  ?

Accélération ?

# Charges dans un champ e.m. imposé

- Pas d'équation de Maxwell, on part seulement de la force de Lorentz.
- Une des théories les plus simples
- Invariants adiabatiques. Le premier invariant, valable si les dérivées de B sont assez faibles, est le moment magnétique

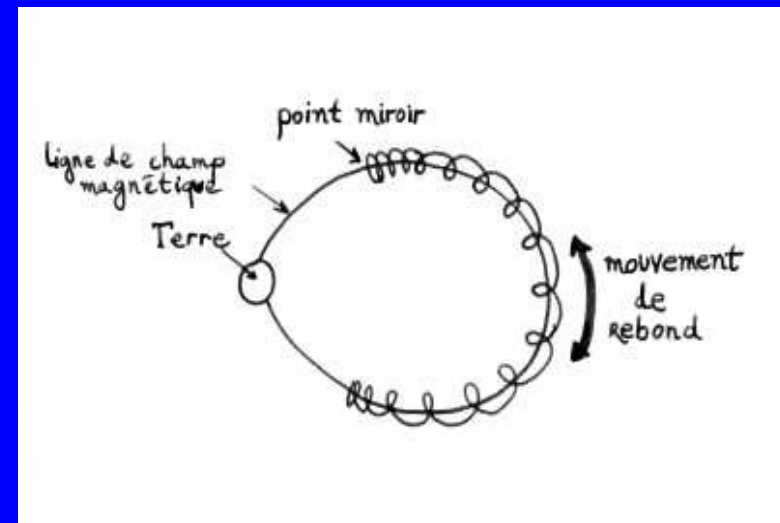
$$\mu = \frac{mv_{\perp}^2}{2B} = \frac{e\rho_L^2\omega_c}{2} = \frac{qv_{\perp}^2}{2\omega_c}$$



# Charges dans un champ e.m. imposé

## Particules piégées, particules précipitées.

- Les zones de champ magnétique fort repoussent les particules chargées.
- Le demi-tour a lieu aux points miroirs. Piégeage.
- Plus l'angle d'attaque est petit, plus le point miroir est bas.
- Si les points miroir se rapprochent les uns des autres : accélération (dite de Fermi). Accélération de Fermi peu importante pour les aurores polaires
- Les particules à l'origine les aurores sont celles qui ne miroitent pas. Elles sont précipitées vers l'ionosphère.



Piégeage aussi valable

pour particules MeV ou plus :

ceintures de radiation/Van Allen,  
situées dans des régions où les lignes  
de champ sont toujours fermées.

# L'accélération le long des courants alignés. Un mécanisme simple.

Les électrons descendent.

Vers le bas, B augmente, l'effet diamagnétique freine les électrons.

Comme le courant est forcé, il se crée, par réaction, un champ électrique qui va accélérer les électrons vers le bas.

B faible



B fort



fort angle d'attaque

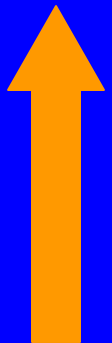
effet miroir

faible angle d'attaque : ils portent  $J_{\parallel}$  à basse altitude. Maintenir  $J_{\parallel} : E_{\parallel}$

$J_{\parallel}$  forcé



Champ électrique



# C'est un mécanisme typiquement « cinétique ».

Le champ électrique associé agit différemment sur les électrons suivant leur angle d'attaque.

La plupart des électrons sont freinés par  $B(z)$ .

sauf les électrons à faible angle d'attaque : ils passent, et  $E_{//}$  les accélère .

Le courant est maintenu grâce à la création d'un faisceau d'électrons précipités.

$$1 \ll e\Delta\Phi/T_I \text{ et } e\Delta\Phi/T_M \ll (B_I/B_M),$$

$$j_{//} \sim -eN_M \sqrt{\frac{T_M}{2\pi m_e}} \frac{e\Delta\Phi}{T_M}.$$

Traiter cet effet en considérant le plasma comme un seul fluide mènerait à un paradoxe : c'est un effet résistif qui permet l'accélération.

# Knight 1972 et travaux récents

Les valeurs obtenues avec le modèle de Knight n'expliquent pas l'amplitude des sauts de potentiel observés (les courants alignés sont insuffisants).

Des simulations [1990-...] montrent que le champ électrique se structure en 1- 3 saut de potentiels, vers 1000-10000km, de qq 100 eV chacun, répartis sur des intervalles d'altitude de moins de 100 km.

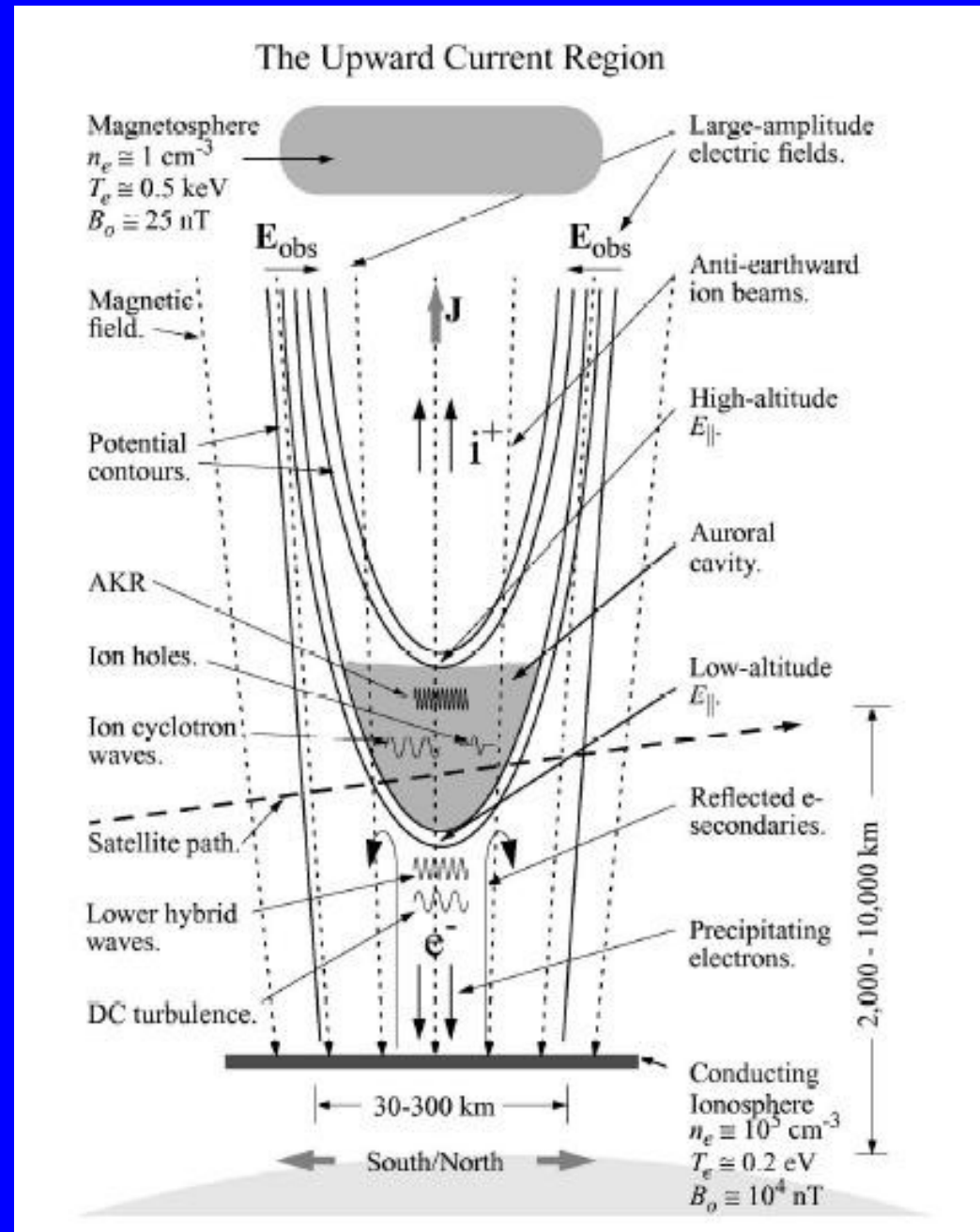
Doubles couches fortes (modèles analytiques 1D)  
Structures de potentiel en « V » (simulations 1D, 2D).

Grande variété de populations / champ électrique :  
passantes, réfléchies, piégées, d'origine ionosphérique ou magnétosphérique.

# Knight 1972 et travaux récents

Structures de potentiel en « V » associées aux courants montants, et les phénomènes associés.

Dans les simulations numériques, les conditions au frontières me paraissent un peu trop « forcées ».



Pourquoi J// ne serait-il pas  
variable ?

# Accélération du plasma par une onde d'Alfvén

- Courant et flux de Poynting portés par une onde d'Alfvén plane en MHD :

$$j_{\parallel} = -\frac{i}{\mu_0} \frac{k_{\parallel} \delta E_{\perp}}{V_A} = -\frac{ik_{\parallel}}{\mu_0} \delta B_{\perp}$$

$$S_{\parallel} = \frac{\delta B_{\perp}^2 V_A}{\mu_0}.$$

- Estimation des flux mesurés, pour des perturbations « variées », comparables à l'énergie qu'il faudrait pour accélérer le plasma.
- Comment transférer l'énergie des ondes d'Alfvén vers le plasma ?

# 1 Global field line oscillations : standing Alfvén waves

- Oscillations of closed field lines (dipolar or tail-like)
- Start from an heuristic B field model.
- Computed the perturbations in the MHD approximation (code TOPO), from a perturbation DF.
- The computation do not provide  $E_{\parallel}$ , but a parallel current density  $j_{\parallel}$ .

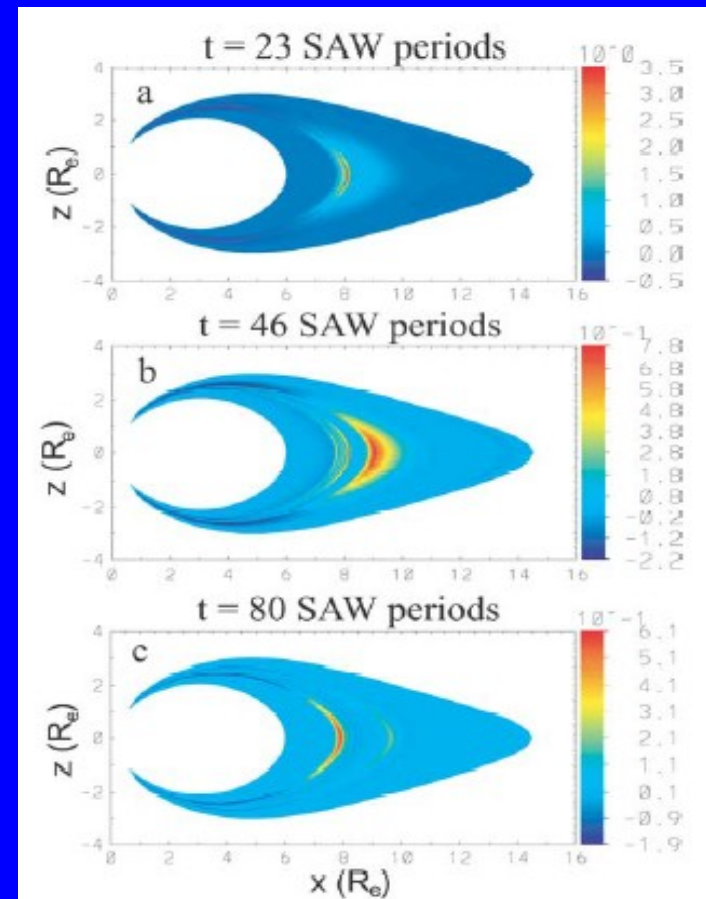


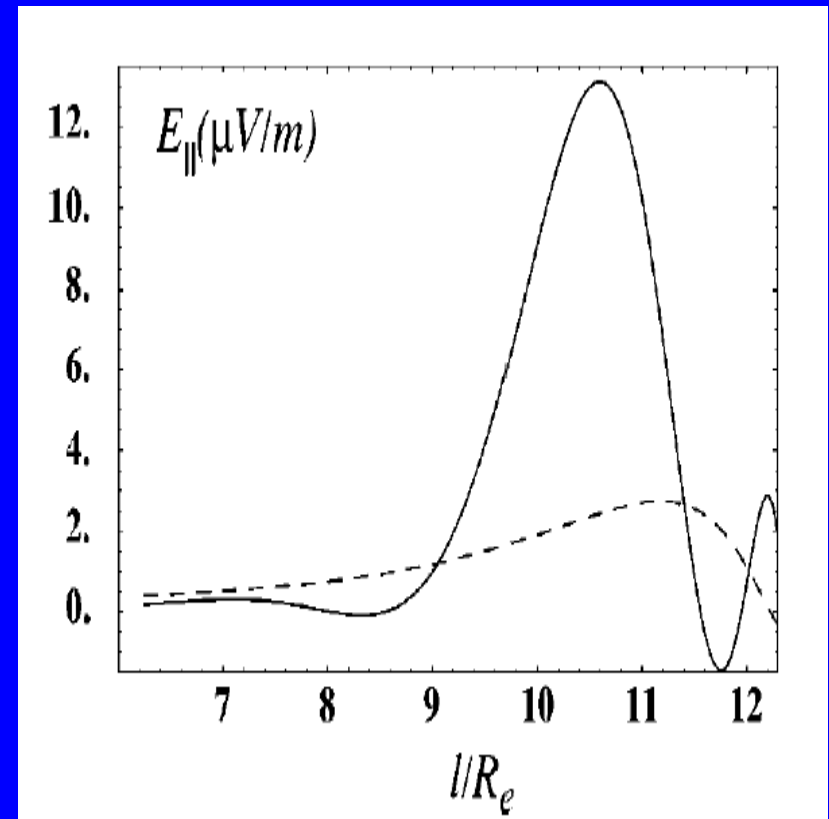
Figure 10. Meridional distribution of density perturbation

[Tikhonchuk 2003]



# Global field line oscillations : standing Alfvén waves

- The MHD approximation do not give a good estimate of  $E_{\parallel}$ .
- Take  $j_{\parallel}$  given by the MHD theory.
- Take a (kinetic theory) electron distribution function  $f(t,v)$  that oscillate with the wave.
- From  $f$ , deduce  $E_{\parallel}(J_{\parallel})$ , and compute how  $E_{\parallel}$  accelerate the electrons.



[Tikhonchuk 2003]

# 2 medium scale Alfvén wave : the Alfvénic resonator.

Typical time scale : 1 second.

The Alfvén velocity  $V_A$  has a maximum at an altitude of 1 or 2 Earth radii. (low density and strong B field.)

A standing Alfvén wave can oscillate in the “resonant cavity” comprised between the ionosphere and the region where  $V_A$  has a maximum value.

# Global oscillations below $4R_E$ ( $\sim 1$ Hz)

- Higher frequencies
- Open field lines oscillations are possible (can be at higher **-auroral-** latitude)
- Kinetic effects at low altitude ( $<4$  RT) along the field line (fit observational data).
- Energy dissipation by resonant interaction with the plasma (Landau damping).
- The transverse wave length must be small (inertial length).
- Wave reflection and dissipation in the ionosphere.
- The ionosphere conductivity that is enhanced by the parallel current associated to the Alfvén wave. Possibility of a resonant interaction. Ionospheric feedback instability [Traktengertz 91, Lysak 91].

Est-il nécessaire d'invoquer le  
mécanisme de Knight i.e. le  
gradient du champ magnétique  
?

# 3 Accélération par des ondes d'Alfvén à plus haute fréquence (10-100 Hz)

- N'invoque pas l'effet décrit par Knight.
- Une partie importante de mes travaux de recherche.
- Permet d'accélérer des particules plus rapides que les ondes d'Alfvén
- Pour expliquer les structures fines des aurores, et leur origine vers 10 000 km d'altitude.
- Il ne suffit pas de calculer  $E_{\parallel}$  pour clore le sujet.
- Une investigation plus poussée de la turbulence associée à l'accélération des électrons

Le seul modèle qui inclut l'onde d'Alfvén, l'apparition du champ électrique, plus l'accélération et la turbulence qui en résultent.

# Accélérer avec le $E_{\parallel}$ d'une onde d'Alfvén

Une onde MHD (Alfvén ou magnéto-sonique) ne porte pas de  $E_{\parallel}$

Mais si on s'écarte un peu de la MHD :  
Onde d'Alfvén inertielle ...

# Acceleration by small scale Alfvén waves: no Knight relation, ion inertia invoked

- Bi-fluid theory, guiding centres (ion polarisation drifts)
- $\beta \ll m_e/m_i$ , the pressure is neglected

$$\omega^2 = \frac{k_z^2 V_A^2}{1 + (k_x c / \omega_{pe})^2}$$

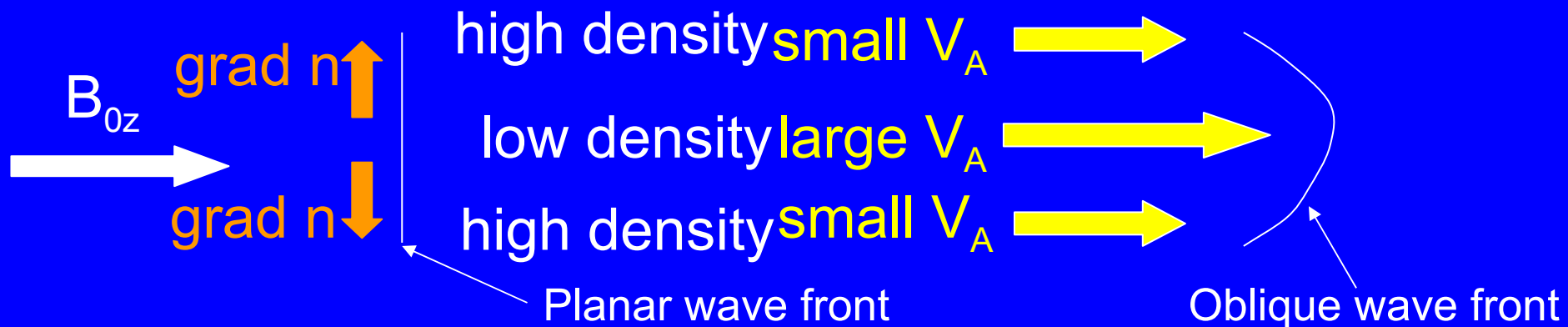
There is a parallel electric field [Goertz]

$$\frac{E_z}{E_x} = \frac{E_{\parallel}}{E_{\perp}} = -\frac{k_x k_z c^2}{k_x^2 c^2 + \omega_{pe}^2}$$

# How to make an Alfvén wave oblique : Alfvén waves + perpendicular density gradients (phase mixing)

parallel propagation  
at  $V_A$  ( $E_{\parallel}=0$ )

$V_A = B/(n^{1/2})$  higher in low  
density region



Oblique wave front  $\Rightarrow E_{\parallel}$

$\Rightarrow$  energy from wave to plasma

$\Rightarrow$  acceleration and turbulence [Génot et al.]



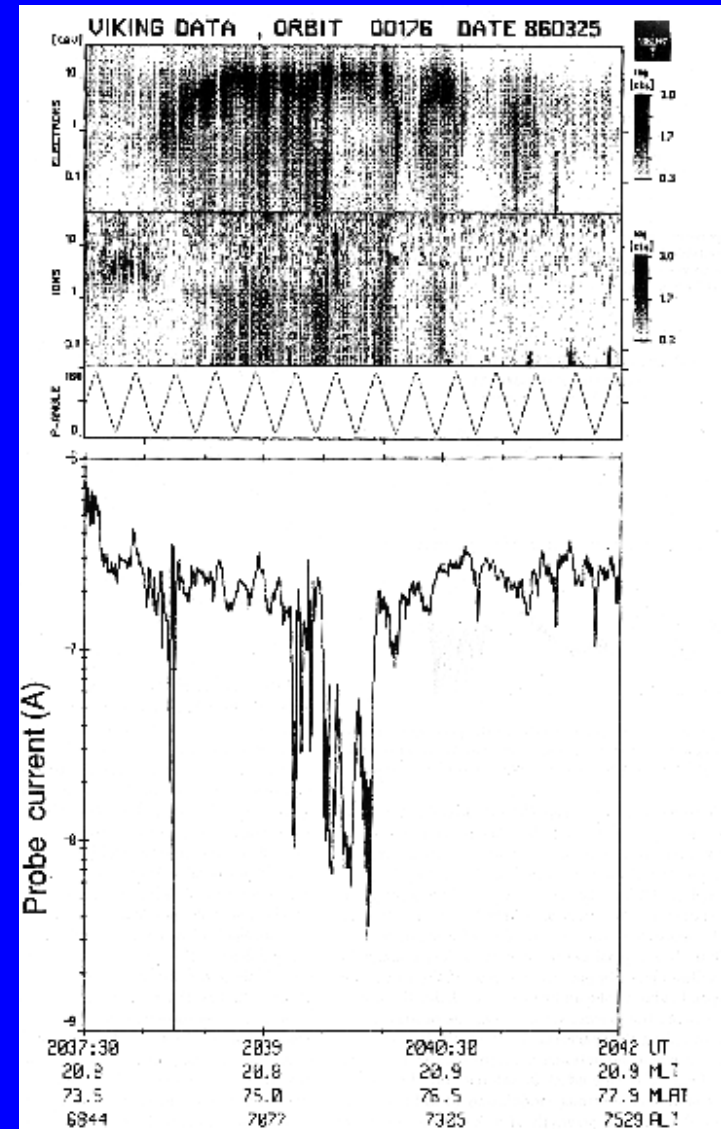
# Deep auroral density depletions

Deep cavities:  $n_{\min} \sim 0.1 n_0$

Size of the gradients  $\sim 2$  km  
i.e. a few ion Larmor radius,  
i.e. a few  $c/\omega_{pe}$ .

=> Strong density gradients

Viking, [Hilgers et al., 1992]



# In the auroral zone, $V_A > V_{te}$

- This is not a resonant process. The wave goes (initially) much faster than most of the particles.
- Because of the long wavelength of the wave, the particles see an electric field for a few milliseconds. This is enough for acceleration.

# The role of acceleration processes in auroral physics. Diversity

**Direct current simulations** : the origin of the potential drop is not really explained, but the structure of the electric field and of the particle distribution functions above auroras (and AKR) are well reproduced.

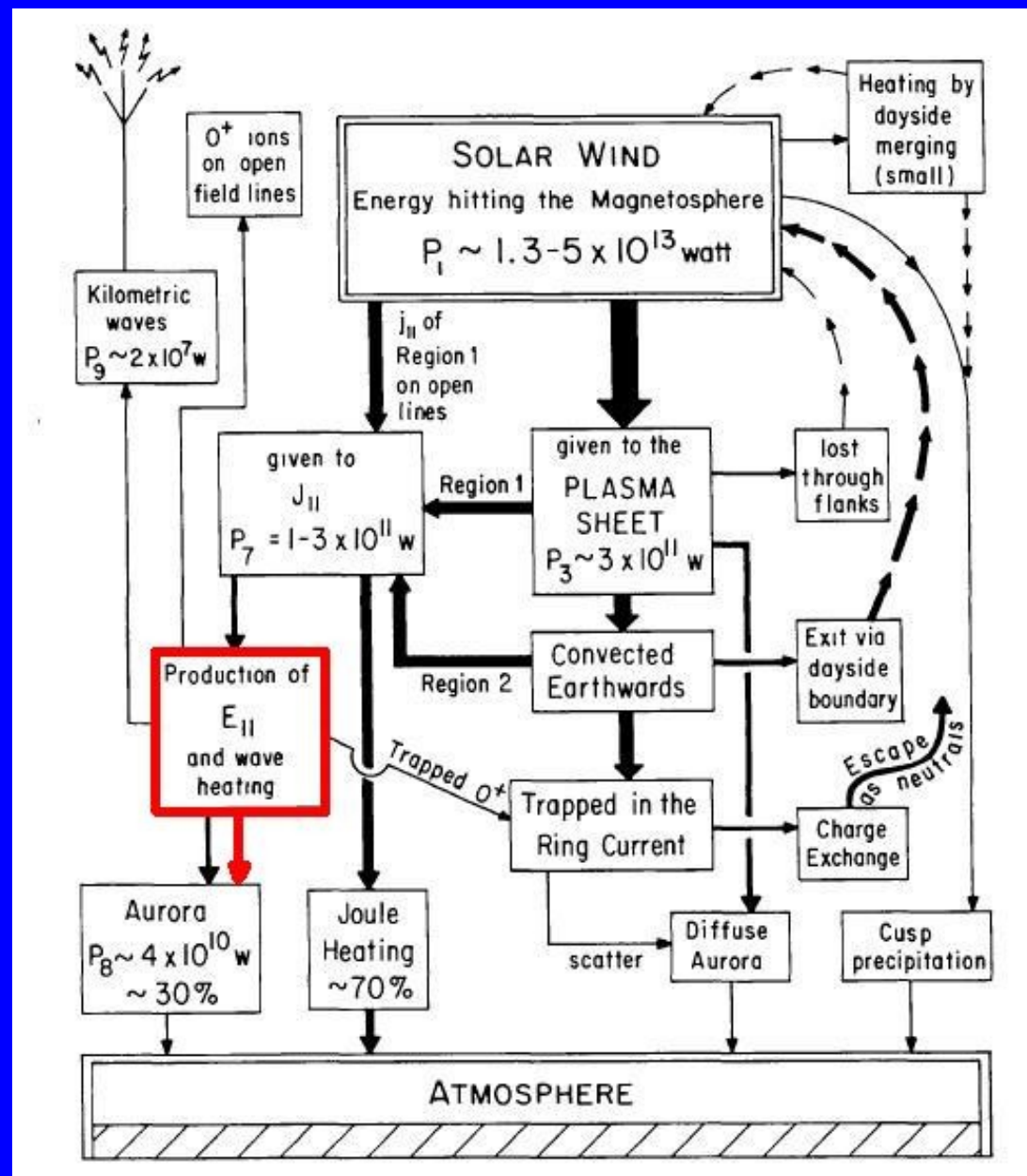
**Global field line oscillations models** : could explain auroras in the growth phase of substorms. (not the bright ones.)

**Alfénic resonator** : could explain fluctuating electron bursts, flickering auroras and auroral arcs motions.

**Inertial AW acceleration** : could explain auroral fine structures (thickness  $\sim 100$  m) and the turbulence observed in the cavities where the AKR is emitted.

# One more thing...

Efficiency of the acceleration processes (producing auroras) in the magnetosphere.



# Conclusion sur l'accélération aurorale

- pas de processus de Fermi, ni par les chocs. Pas de vent.
- En finir avec les explications aberrantes / vulgarisation.
- Intégrée aux processus global des sous-orages
- Forçage par des phénomènes dans la queue de la Msphère. Notamment, forçage des courants alignés  $j_{\parallel}$ .
- Effets de convergence de lignes de champ, de redistribution et de forçage de courants alignés.
- Rôle des ondes (stationnaires ou progressives)  $j_{\parallel} = j_{\parallel}(t)$ .
- Nécessité d'une approche cinétique, car ce n'est pas le plasma dans son ensemble qui est accéléré.

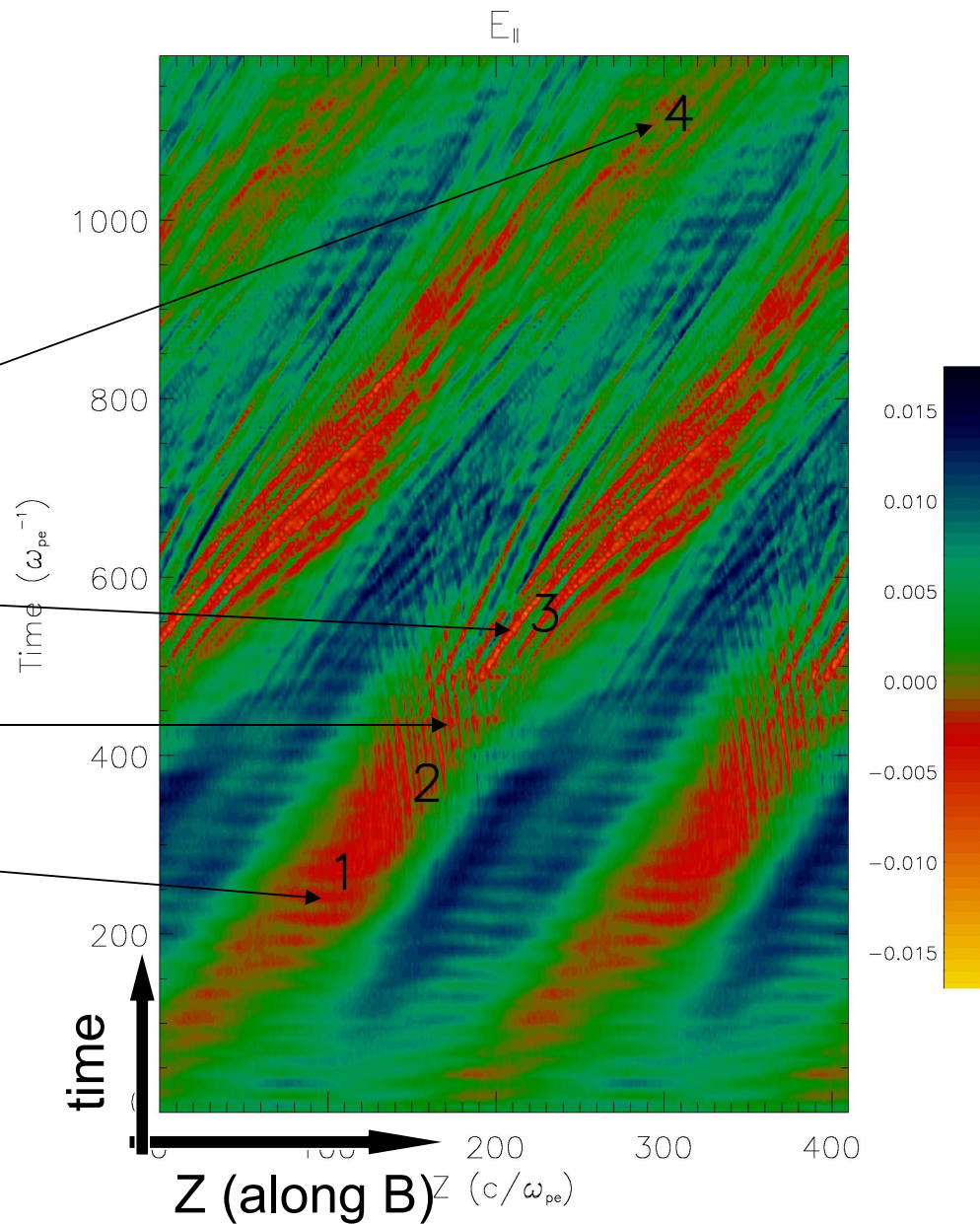
# $E_{\parallel}(t)$ upon a density gradient

Large scale fields

Beam-plasma instability

Buneman instability

Large scale fields  
of the inertial Alfvén wave

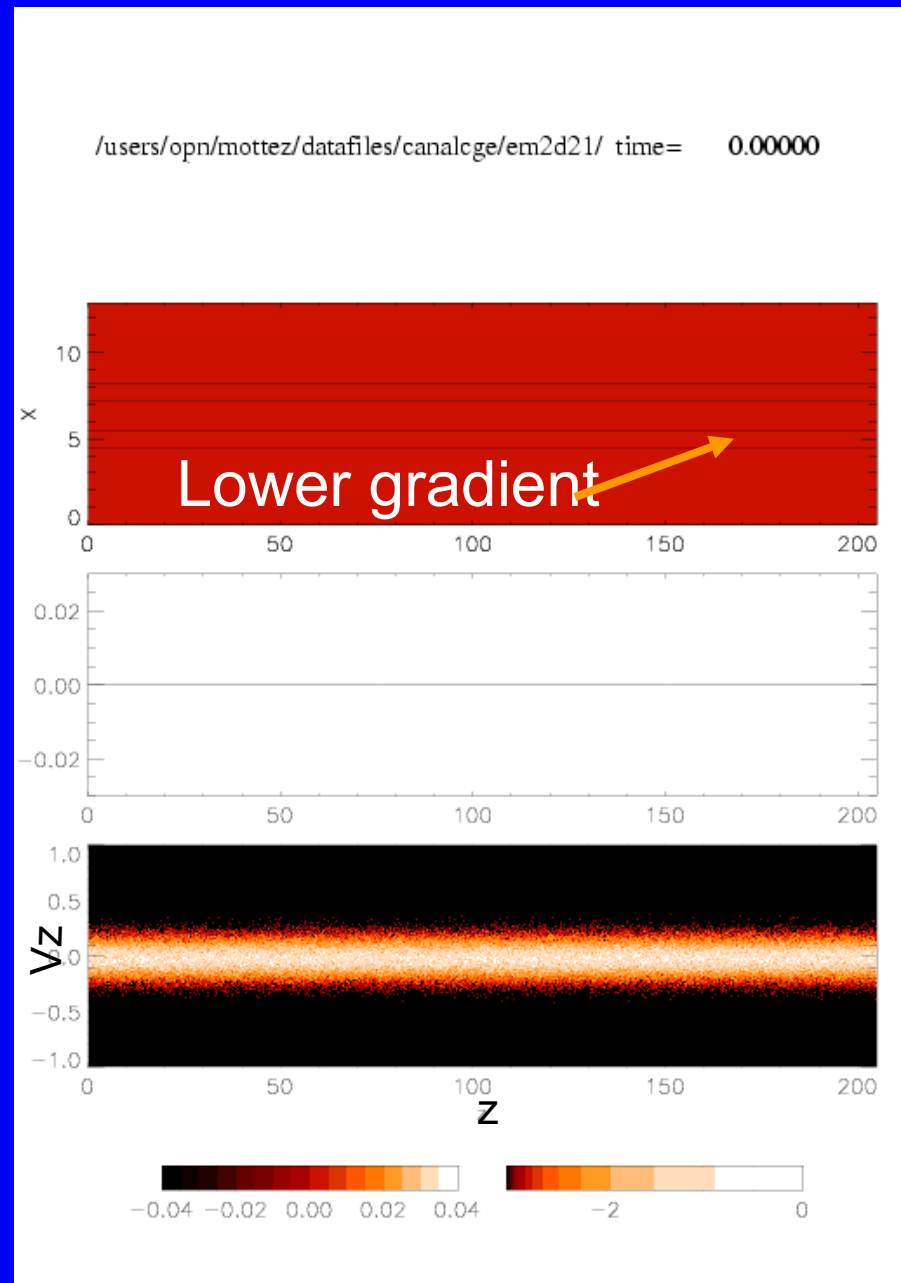


# Particles

$E_z(z,x)$  →

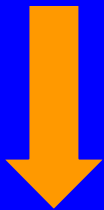
$\langle E_z \rangle(z)$  over the lower channel →

$F_e(z,v_z)$  over the lower channel →



# Large scale electric field and electron halo

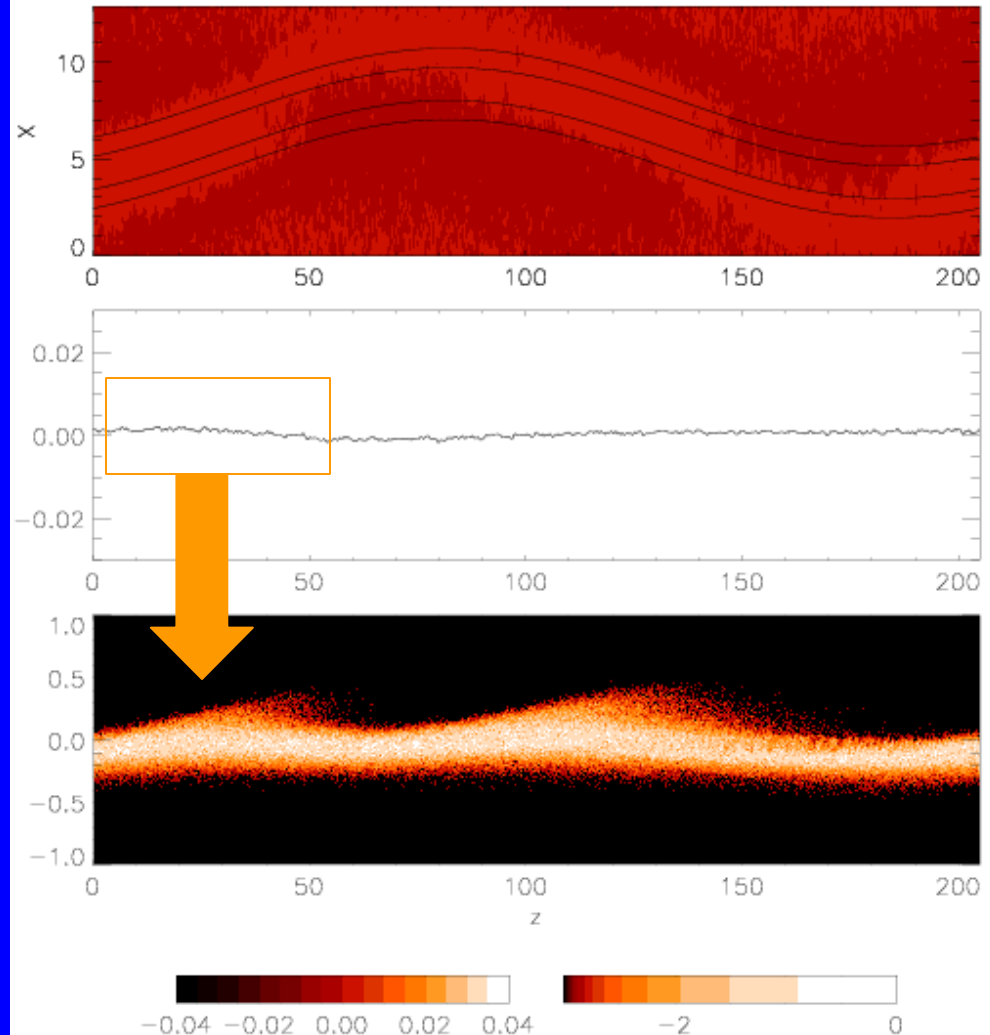
Weak (oblique Alfvén)  $E_{\parallel}$  over large distances



Electron parallel heating : « halo » i.e. tail in the distribution function

Assymetry : propagation of the Alfvén wave / electron velocities

/users/opn/mottez/datafiles/canalce/em2d21/ time= 160.000

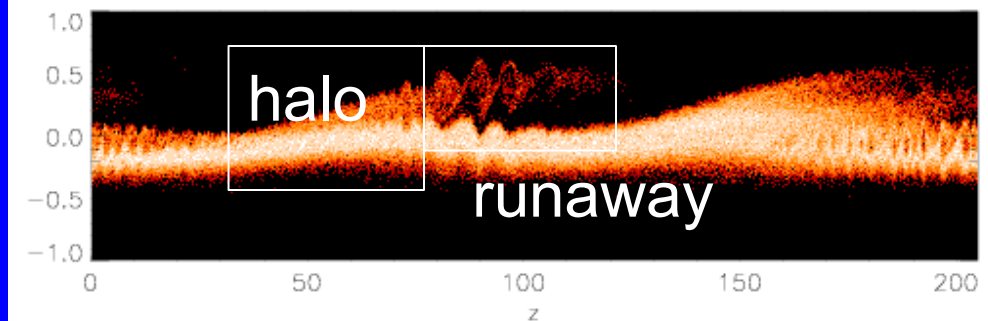
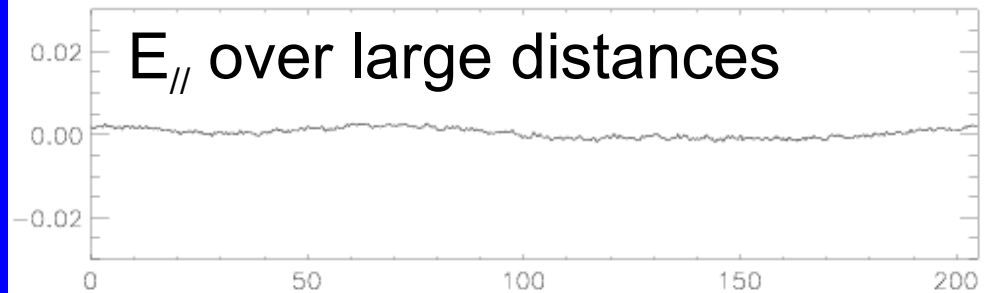
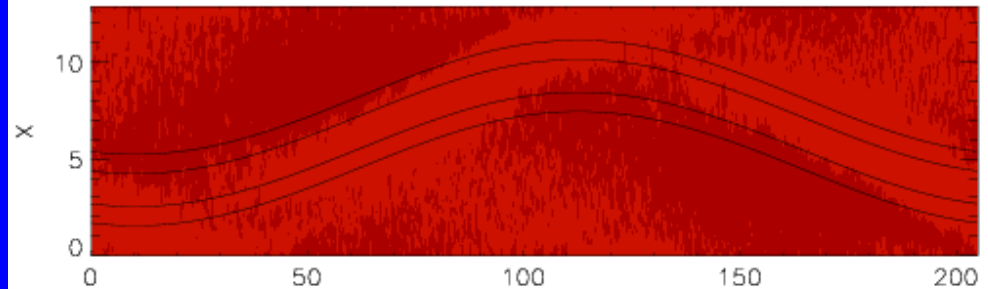




# Runaway electron

Faster electrons from the halo escape first and create an electron beam.

/users/opn/mottez/datafiles/canalce/em2d21/ time= 320.000



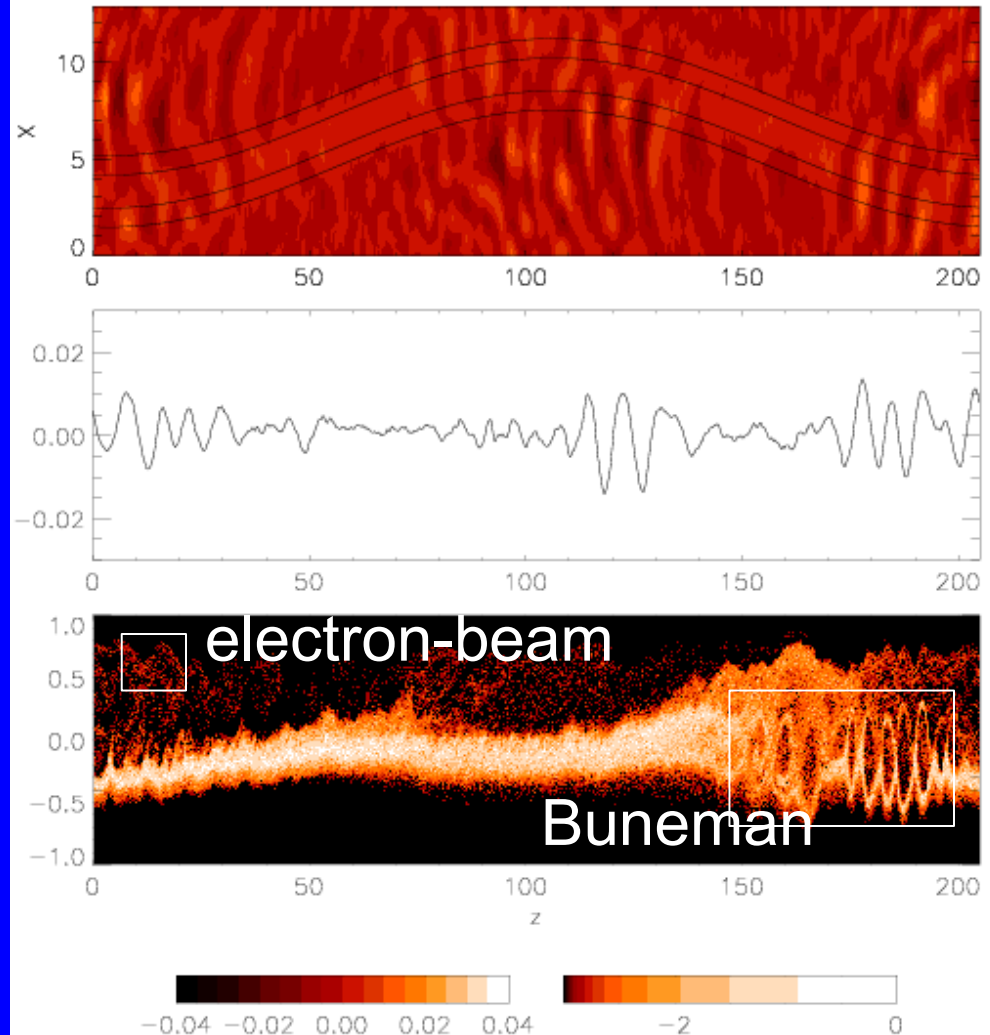
# Beam dynamics

Finite beam in an inhomogeneous plasma.

Backward slow vortices (Buneman)

Fast vortices (beam-plasma)

/users/opn/mottez/datafiles/canalce/em2d21/ time= 800.000



# Electron holes

Spread velocity distribution

Electron holes in both directions

Remaining localized beams

/users/opn/mottez/datafiles/canalcge/em2d21/ time= 1760.00

