



PNST, La Londe les Maures, 12-14 Mars 2012

A mechanism for heating electrons in the magnetopause current layer and adjacent regions

Roux¹, **P. Robert**¹, O. Le Contel¹, V. Angelopoulos², U. Auster³,
J. Bonnell⁽⁴⁾, C.M. Cully⁽⁵⁾, R.E. Ergun⁽⁶⁾, and J.P. McFadden⁴

(1) LPP-CNRS, Ecole Polytechnique, route de Saclay, 91128 PALAISEAU CEDEX, FRANCE

(2) IGPP/ESS University of California, Los Angeles, CA, 90095-1567, USA

(3) Institut für Geophysik und extraterrestrische Physik der Technischen University at Braunschweig,, Germany

(4) Space Sciences Laboratory, University of California, Berkeley, 7 Gauss Way, Berkeley, CA, 94720-7450, USA

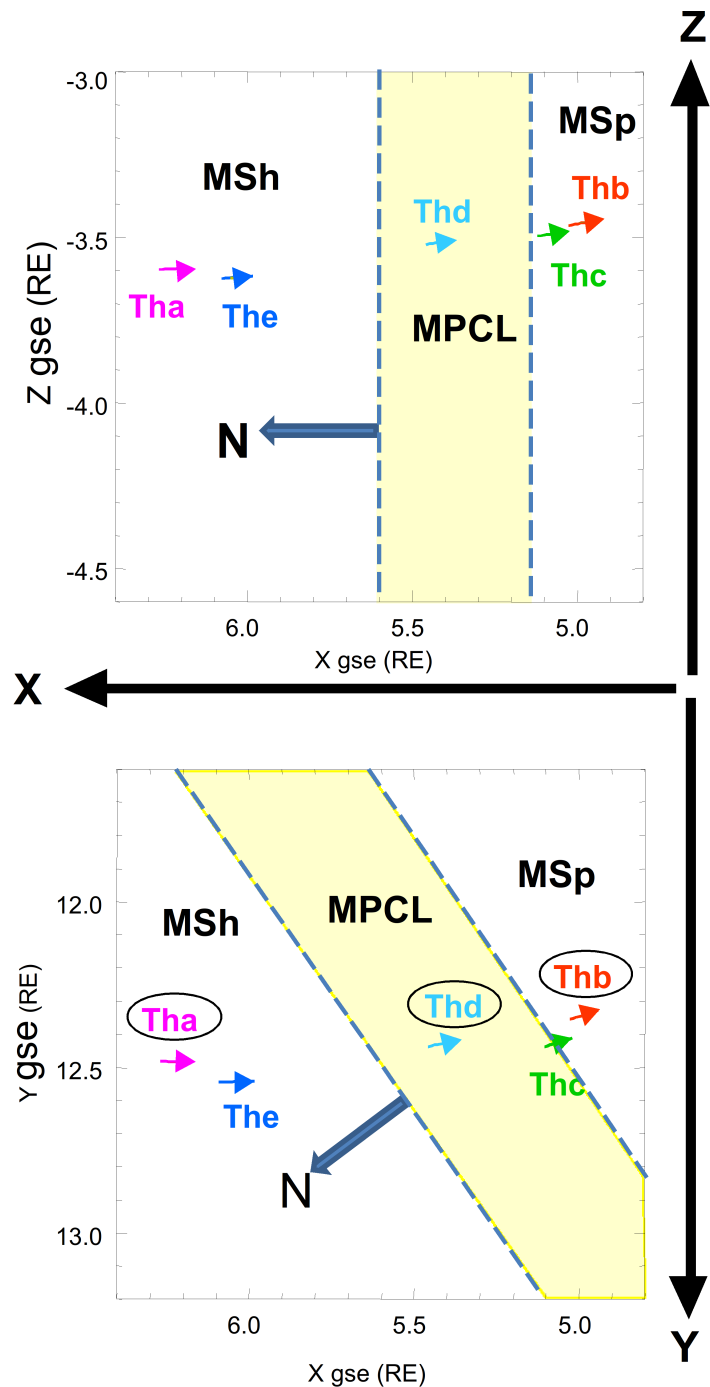
(5) Department of Physics, Umeå University, Umeå, Sweden

(6) Department of Astrophysical and Planetary Sciences, University of Colorado, Boulder, Colorado 80309, USA

1) Introduction

Exemple choisi (20 Mai 2007) car :

- Les 5 satellites sont alignés
- Ils couvrent simultanément la magnétogaine (MSh), la couche de courant (MPCL), et la magnétosphère (MSp)
- Par commodité, on choisira de représenter seulement 3 satellites sur les 5: **Tha**, **Thd**, **Thb**



2) Lien entre le chauffage observé sur les e⁻ et les ondes observées simultanément

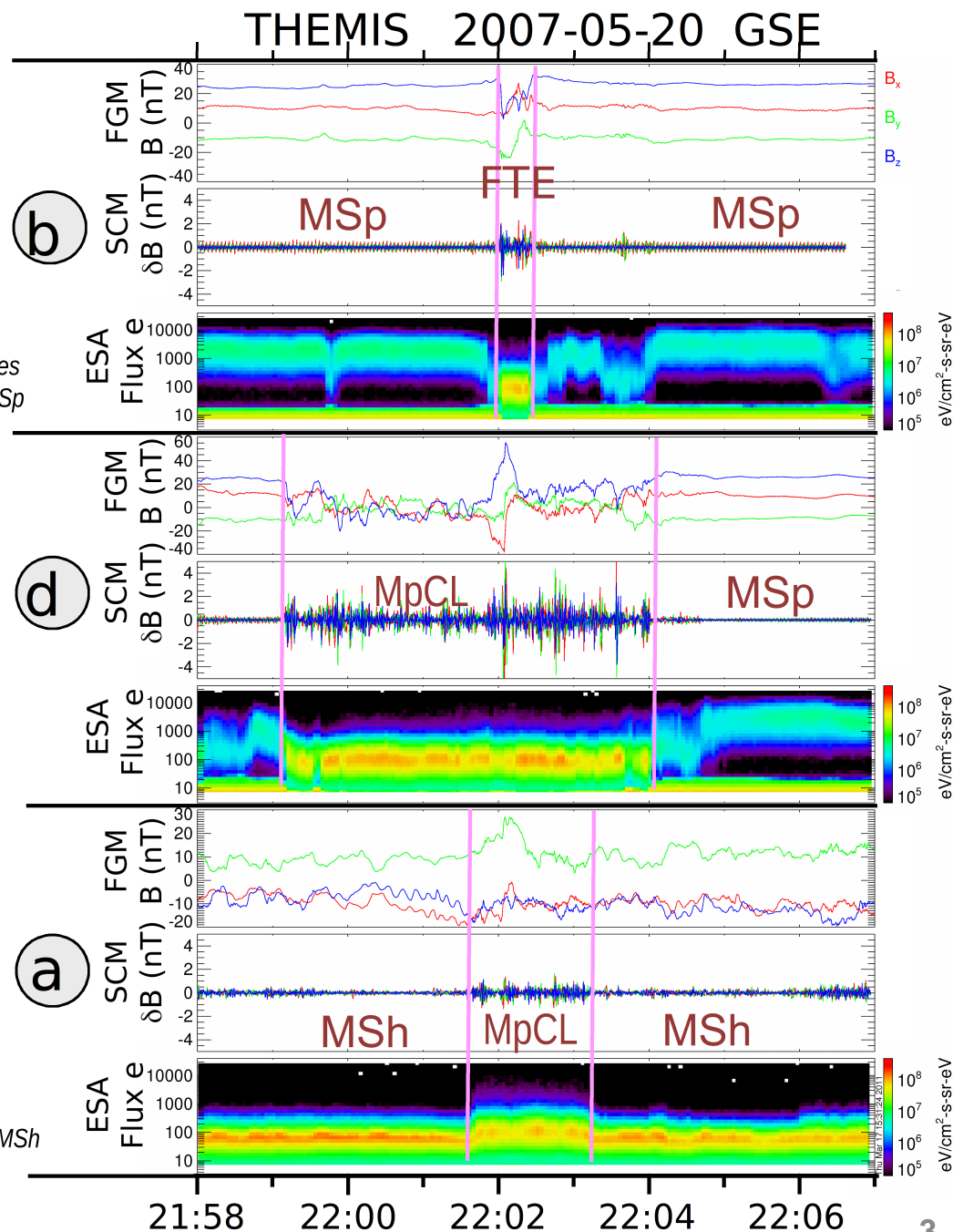
a) Les électrons

- Thb est dans la MSpHERE et fait un bref passage dans la CL (FTE sur B)
- Thd passe 4mn ds la CL.
- Tha est dans la MSheet et fait un bref passage ds la CL
- Les 3 satellites observent dans la CL des électrons de la MSheet chauffés: $T_e \sim 35\text{eV} \Rightarrow 70\text{eV}$ (voir Tha)

➔ **Question 1: Est-ce que les ondes observées simultanément chauffent les électrons ?**

Flux faibles
E fort : MSp

Flux forts
E faible: MSh



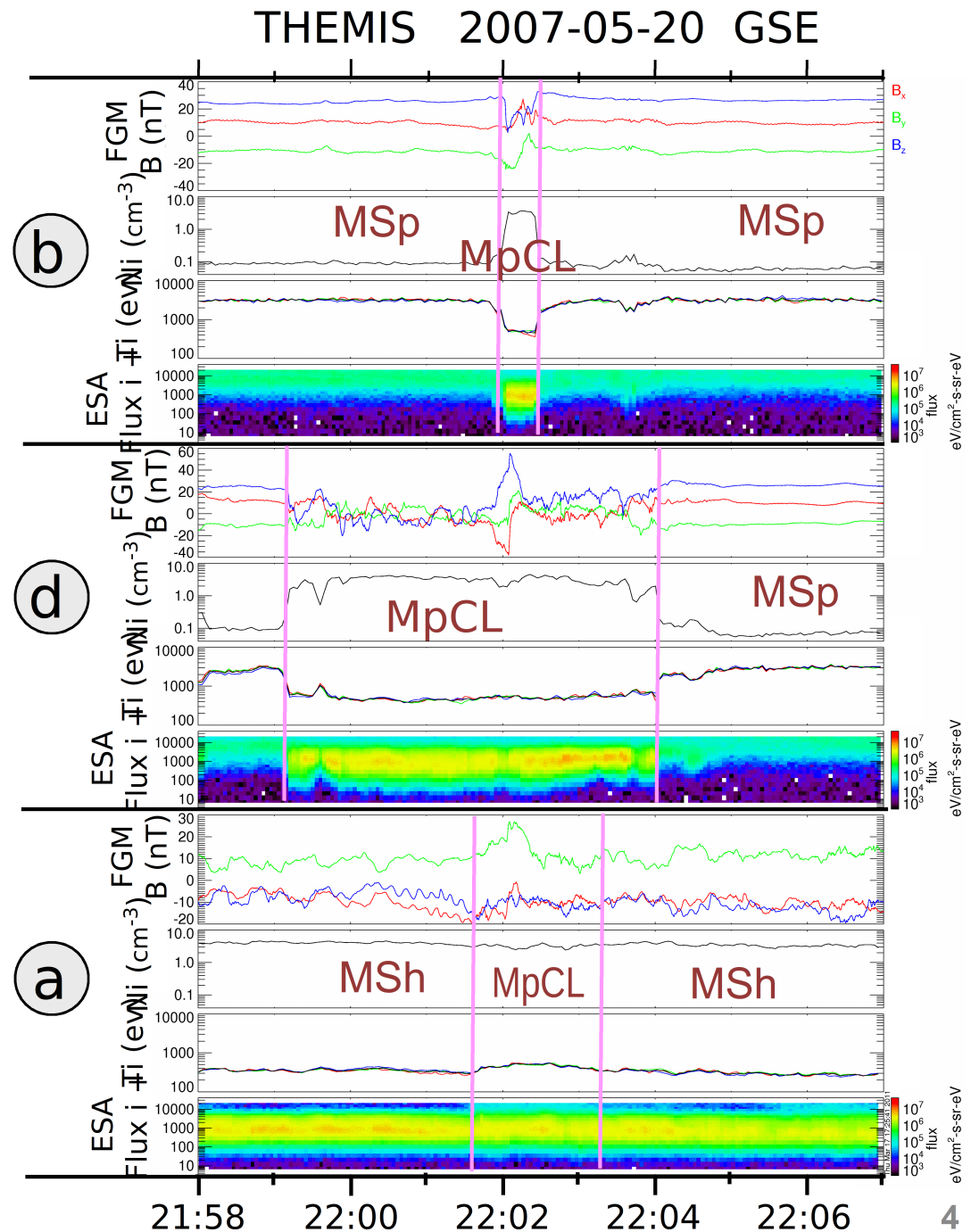
a) Les ions

- Pas de chauffage pendant la traversée de la magnétogaine (voir Tha)
- La température dans la couche de courant (MpCL, Thb, Thd) est la même que celle mesurée dans la MSh (Tha).
- $Ni(MPCL) \sim Ni(MSh)$

➡ Le plasma de la magnétogaine a pénétré dans la couche de courant

➡ Question 2: pourquoi les ondes d'Alfven ($V \sim V_A$) chaufferaient les e^- (+ rapides) plutôt que les ions ($V_i \sim V_A$)?

➡ Question 3: comment caractériser ces ondes ?

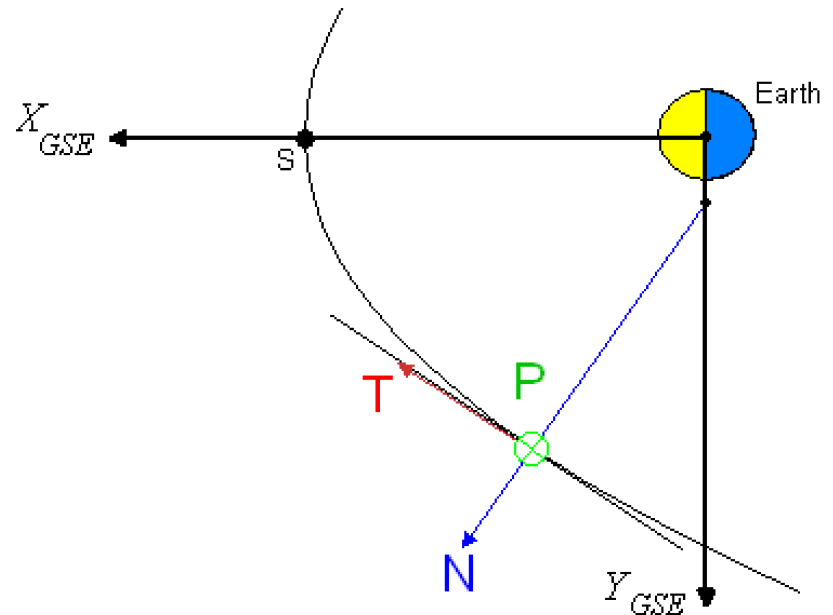


3) Organisation des données: introduction du repère TPN

a) Analyse par MVA sur FGM (Thb) pendant la traversée de la Mp

$\lambda 1$	$\lambda 2$	
$\lambda 3$		
0.985	0.163	0.037
L	M	N
0.434	-0.424	0.795
-0.566	0.558	0.606
-0.701	-0.713	0.002
		G
		S
		E

T	P	N	
0.538	0.829	0.153	L
-0.843	0.534	0.070	M
-0.024	-0.167	0.986	N



- La normale **N** du repère LMN correspond à la normale **N** du TPN

➡ Le repère TPN est pratique car il est le même pour les 5 satellites, et ne dépend pas de la durée de l'échantillon choisi. On va voir qu'il organise bien les données liée à la magnétopause.

➡ Bo tourne dans le plan du paraboloïde ~ MP.

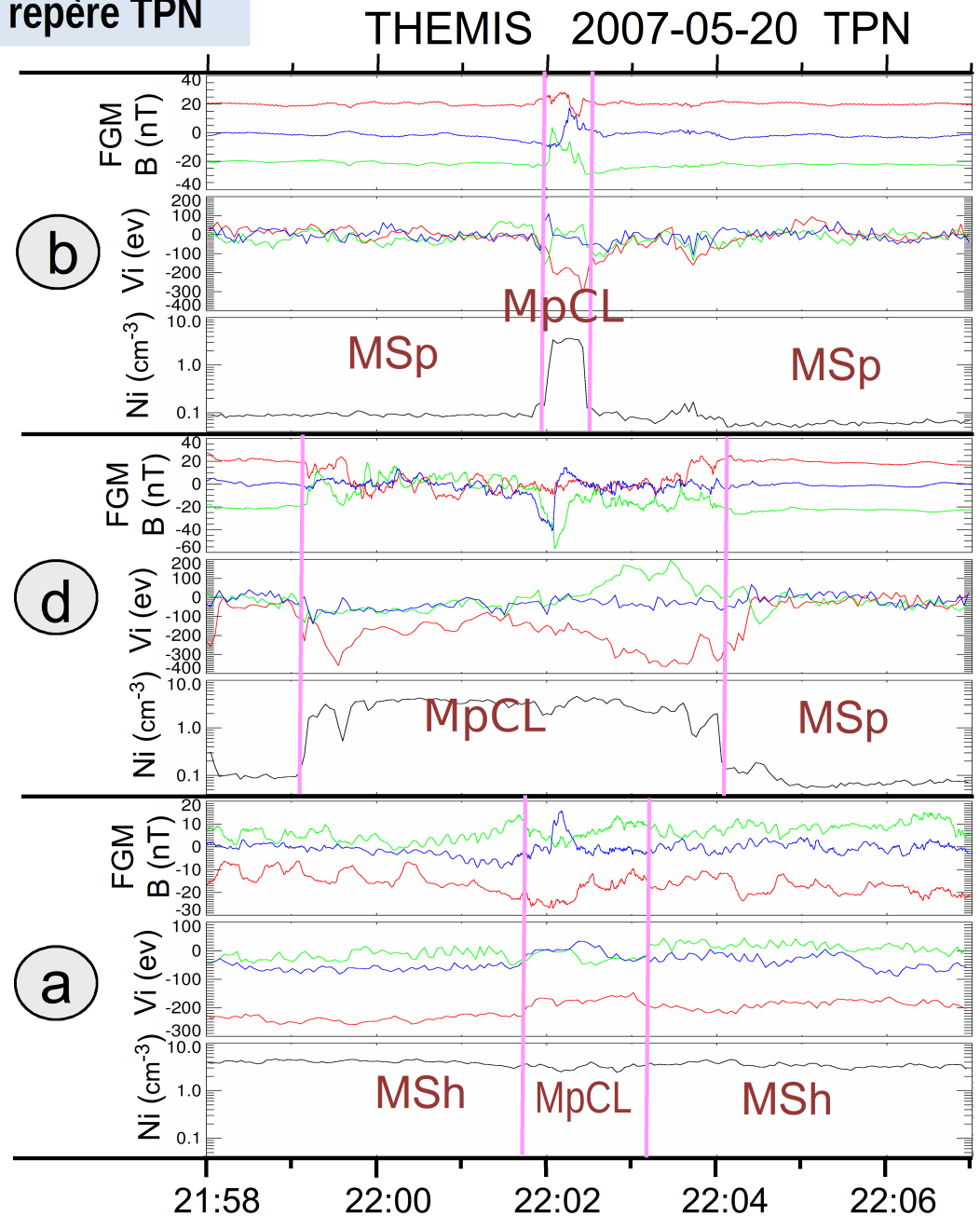
3-b) Organisation des données dans le repère TPN

- $B_N = 0$ de part et d'autre de la MP

→ Le champ continu est dans le plan du paraboloïde

- $V_i = 0$ dans la MSp, mais $V_i \parallel \mathbf{T}$ dans la MSh

→ Les ions s'écoulent azimuthalement dans le plan du paraboloïde



4) Polarisation des ondes sur FGM et SCM

- MVA sur FGM filtré entre 0.8 and 2Hz
- Idem pour SCM entre 0.8 and 4 Hz.
- Resultats en TPN

FGM

$\lambda 1$	$\lambda 2$	
$\lambda 3$		
1.000	0.694	0.523
T	P	N
-0.139	0.066	0.988 Lw
-0.384	-0.923	0.008 Mw
0.913	-0.378	0.153 Nw

SCM

$\lambda 1$	$\lambda 2$	
$\lambda 3$		
1.000	0.826	0.457
T	P	N
-0.079	0.620	0.780 Lw
-0.301	0.731	-0.612 Mw
-0.950	-0.283	0.129 Nw

- La matrice des fluctuations est diagonale dans le TPN pour FGM (et moins net pour SCM)
- Dans les deux cas l'axe N du LMN est le long de l'axe T du TPN

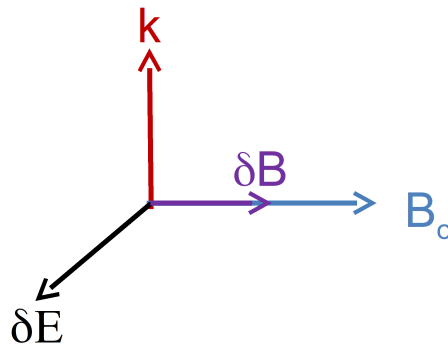
➡ les fluctuations se propagent le long de **T** (et sont ~ le long de **N**)

5) Caractéristiques des ondes

- a- Constat:
- $k \parallel \mathbf{T}$ (et pas seulement $\parallel$ MP), donc azimuthal
 - Pendant une période où $B_0 \sim$ stable, $B_0 \parallel \mathbf{P}$

➡ Donc $k \perp B_0$

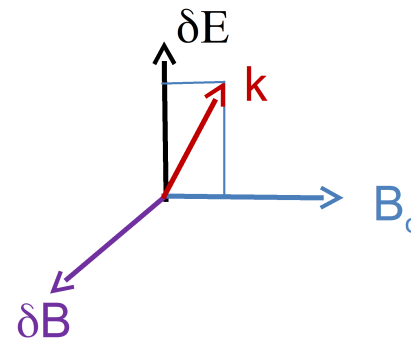
➡ Deux types possibles de polarisation:



Magnetosonore rapide



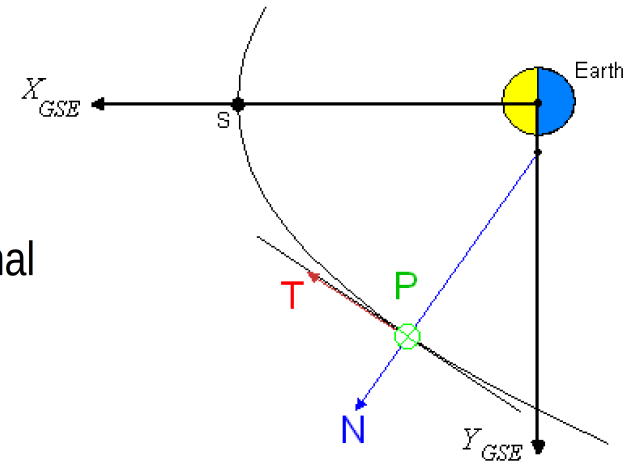
Impossible car δB est le long de N du TPN, et donc δB est $\perp$ à B_0



Shear Alfvén



C'est notre cas car δB a une forte composante $\perp$ à B_0



b- Hypothèse :

- Shear Alfvén classique : $\omega/k_{\parallel} \sim V_A \ll V_e$ (vitesse thermique)
- Mais pour chauffer, on s'attend à un effet Landau avec : $\omega/k_{\parallel} \sim V_e$
- Or on a $V_A \sim 100\text{-}200 \text{ km/s}$

$V_e \sim 2000 \text{ km/s}$ ($T_e \sim 30 \text{ eV}$)
➡ *Comme on a chauffage, ces ondes ne peuvent pas être des Shear Alfvén classiques*

KAWs (cf. les simulations de Howes et al, 2008, Sahraoui et al 2011)

- Onde d'Alfvén cinétique: $\frac{\omega}{k_{\parallel}} = \frac{V_A k_{\perp} \rho_i}{\sqrt{(\beta_p + 2)/(1 + \frac{T_e}{T_i})}}$ $\beta_p \sim 6$ pour $B \sim 10 \text{ nT}$
 $T_e/T_i \sim 1/10$

➡ *Il faudrait gagner un facteur ~ 50 sur $k_{\perp} \rho_i$*

- Utilisation du champ électrique (sur Thc) : $\frac{\omega}{k_{\parallel}} = \frac{\delta E}{\delta B} \gtrsim 2000 \text{ km/s} \simeq V_e$

➡ On a identifié un mode qui peut chauffer les électrons

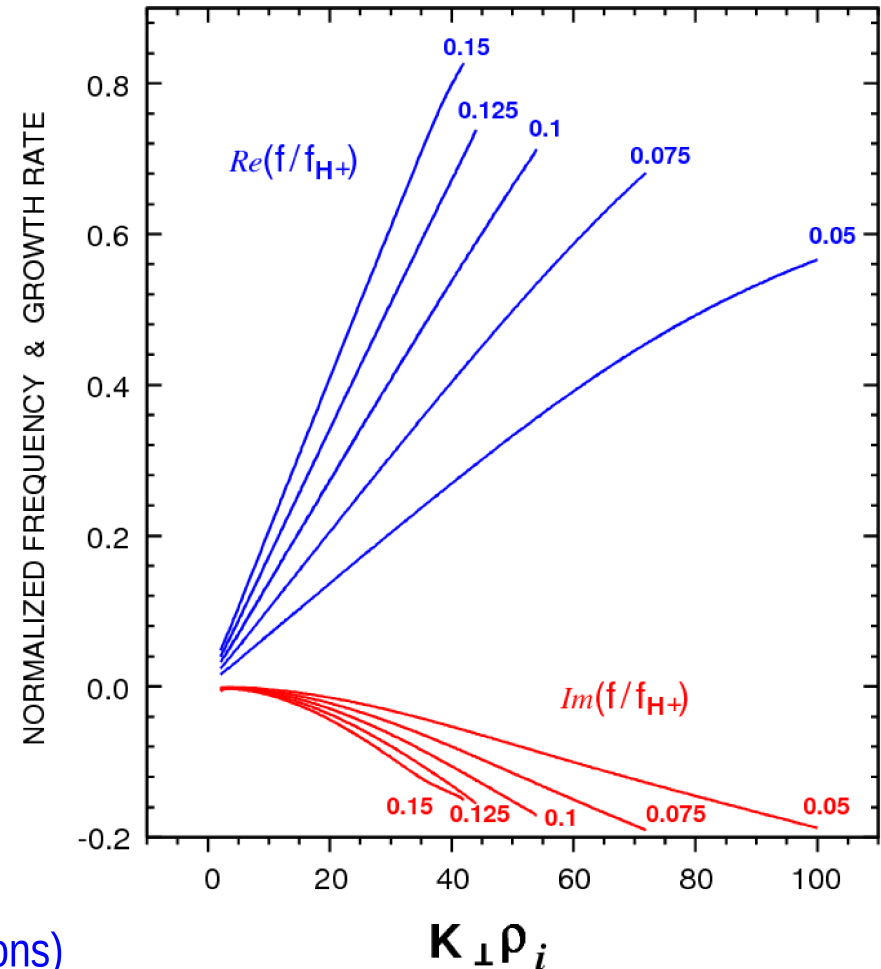
6) Vérifications

a- Calcul par Whamp du taux d'amortissement de ces ondes par effet Landau sur les electrons :

- on rentre $k_{\perp} \rho_i \sim 10 - 100$ ($k_{\perp} \rho_i \gg 1$)
- on rentre $k_{\parallel} \rho_i \sim 0.05 - 0.15$ ($k_{\parallel} \rho_i \ll 1$)
- on cherche les solutions F/F_H+ avec les valeurs fixées par les données:
 $N_i = 4 \text{ cm}^{-3}$, $B \sim 10 \text{ nT}$ ($\beta_p \sim 6$)
 $T_e \sim 36 \text{ eV}$, $T_i \sim 400 \text{ eV}$

➡ on trouve que pour $k_{\perp} \rho_i \sim 1-10$ (échelle des ions) l'amortissement est faible (peu de chauffage des ions)

➡ Mais pour $k_{\perp} \rho_i \sim 20-100$ (échelle des electrons) il y a amortissement, donc chauffage des e^-



➡ Ce mode KAW peut donc chauffer les e^-

Pas de contradiction théorique

b- Verification expérimentale sur les fonctions de distribution des électrons:

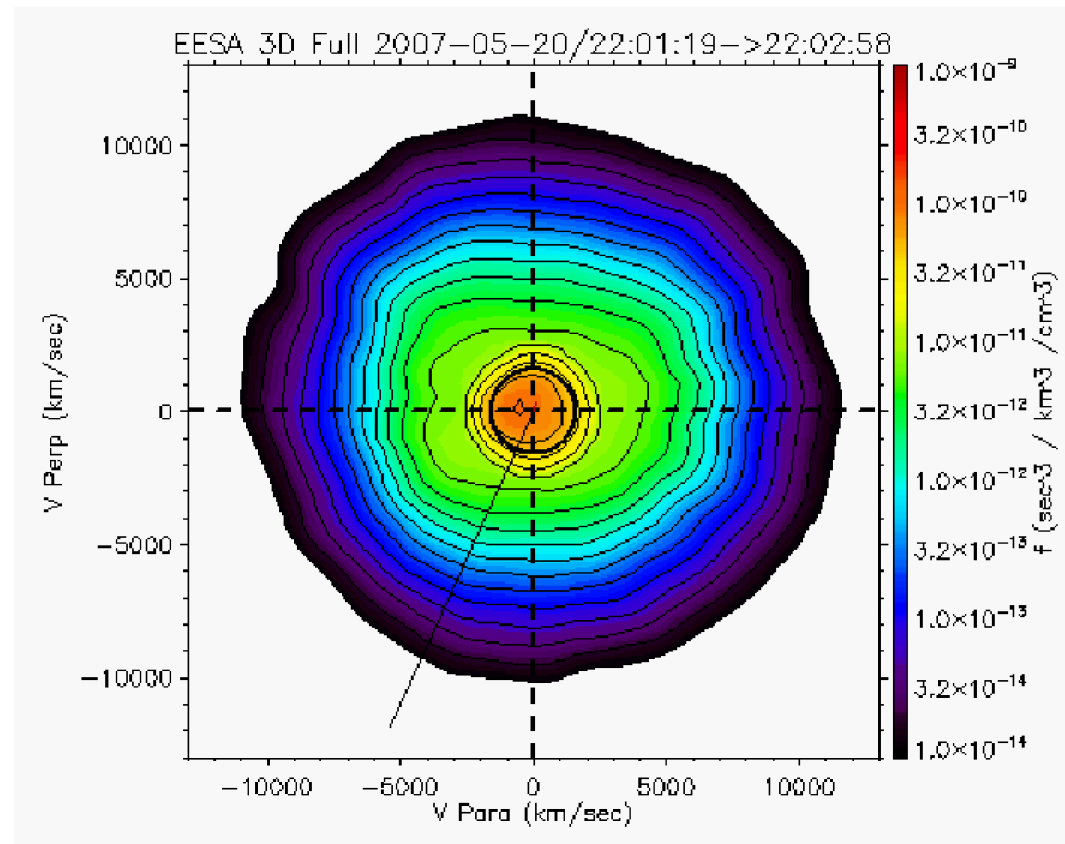
- Les résultats de whamp donne aussi un petit $E_{\parallel}$ ($E_{\parallel} / E_{\perp} \sim 10^{-2}$) qui peut accélérer les e^{-} le long de B

- Ce qu'on peut voir sur les fonctions de distribution des électrons (Thd in the MPCL) $Te_{\parallel} > Te_{\perp}$

➡ L'augmentation de $Te_{\parallel}$ confirme le chauffage des e^{-} en direction $\parallel$ (et anti $\parallel$)

Donc, on a répondu aux questions:

- Les ondes chauffent les électrons et pas les ions
- Ce sont des KAWs



7) Et qu'est-ce qui produit les ondes ?

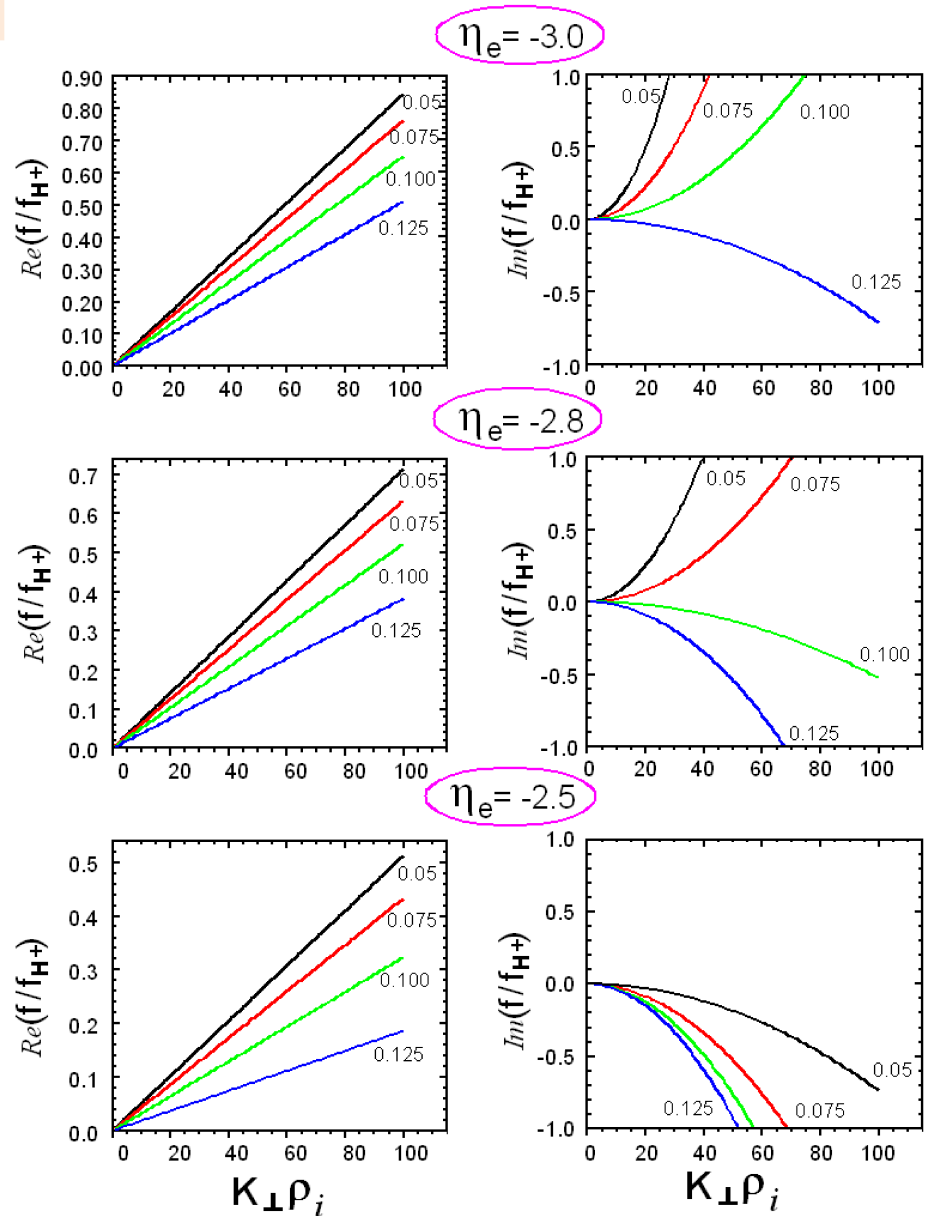
- On a de forts gradients (∇B , ∇N , ∇Te)
- Possibilités d'ondes de dérive
- Littérature: Mikhailovskii (1992) :
Relation de dispersion des KAWs en présence de gradients (∇N , ∇Te , ∇Ti et ∇B)

η_e : échelle $\nabla N / \nabla Te$ $\left\{ \begin{array}{l} \nabla N \text{ outward} \\ \nabla Te \text{ inward} \end{array} \right.$

- On a donc programmé ces calcul pour calculer numériquement les valeurs réelles et imaginaires de f/f_{H+} dans les zones concernées:

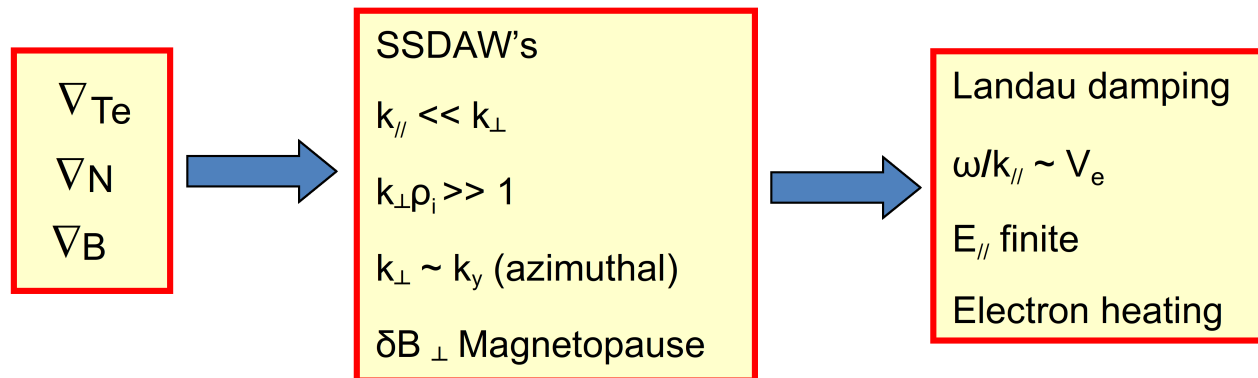
$$\left\{ \begin{array}{l} k_{\perp} \rho_i \sim 0 - 100 \\ k_{\parallel} \rho_i \sim 0.05 - 0.125 \end{array} \right.$$

➔ Pour $\eta_e < -2.5$, on obtient de forts taux de croissance, et de telles ondes peuvent exister dans les conditions expérimentales observées.



8) CONCLUSIONS

- ➔ Des ondes intenses observées dans la MPCL et ses régions adjacentes ont pu être identifiées comme des « Short transverse Scale Alfvén Waves » avec une vitesse de phase parallèle $\frac{\omega}{k_{\parallel}} = \frac{\delta E}{\delta B} \simeq V_e > V_A$
- ➔ Elles peuvent être générées par de forts gradients, qu'elles contribuent à réduire
- ➔ Elles se propagent azimuthalement le long de la MP (paraboloïde), avec une composante magnétique normale.
- ➔ Elles sont absorbées par chauffage des électrons



MERCI !

Fig. 6. This figure shows mainly data from Thc. From top to bottom:

- (a)** the 3 components of the magnetic field,
- (b)** E/B for different frequencies (3 Hz in red, 12 in green, 48 in cyan and 192 Hz in black) and Va (dotted line),
- (c)** Ew the electromagnetic energy,
- (d)** Te for Thc (green) and Tha (magenta).

The bottom panel shows a spectrogram from Thc; the spacecraft moves back and forth from the MSp to the MpCL.

The thin vertical lines and superposed arrows point out the coincidences between sharp gradients in Te and wave bursts.

