

# Les ondes MHD

# Les équations de la MHD idéale

$$\begin{cases} \partial_t (n) + \nabla \cdot (n\mathbf{v}) = 0 \\ \partial_t (nm\mathbf{v}) + \nabla \cdot (nm\mathbf{v}\mathbf{v} + p\bar{\bar{\mathbf{I}}}) = \mathbf{j} \times \mathbf{B} \end{cases}$$

$$\mathbf{j} = \nabla \times (\mathbf{B}) / \mu_o$$

$$\mathbf{E} = -\mathbf{v} \times \mathbf{B}$$

Loi d'Ohm de la MHD idéale

## Différentes lois d'Ohm

$$\mathbf{E} = -\mathbf{v} \times \mathbf{B}$$

MHD idéale

$$\mathbf{E} = -\mathbf{v} \times \mathbf{B} + \left[ \begin{array}{c} \mathbf{j} \\ \sigma \\ \mathbf{j} \times \mathbf{B} \\ ne \end{array} \dots \right]$$

MHD résistive

MHD Hall et  
approche hybride

## MHD non-idéale

# Méthode

Ecriture des équations de la dynamique

**Équations MHD**

Ecriture des équations de Maxwell simplifiées et de la loi d'Ohm

linéarisation

Perturbations monochromatiques

Résolution en fonction de  $v_1$

## Systeme linéarisé

$$\frac{n_1}{n_o} = \mathbf{k} \cdot \frac{\mathbf{v}_1}{\omega}$$

$$-\omega \mathbf{v}_1 + \mathbf{k} \frac{p_1}{n_o m} = \frac{1}{\mu_o n_o m} (\mathbf{k} \cdot \mathbf{B}_o \mathbf{B}_1 - \mathbf{k} \mathbf{B}_o \cdot \mathbf{B}_1)$$

$$\frac{p_1}{p_o} = \gamma \frac{n_1}{n_o}$$

$$\mathbf{B}_1 = \mathbf{k} \cdot \frac{\mathbf{v}_1}{\omega} \mathbf{B}_o - \mathbf{k} \cdot \mathbf{B}_o \frac{\mathbf{v}_1}{\omega}$$

## Onde d'Alfven

$$\frac{n_1}{n_o} = \mathbf{k} \cdot \frac{\mathbf{v}_1}{\omega} = 0$$

$$-\omega \mathbf{v}_1 + \mathbf{k} \frac{p_1}{n_o m} = \frac{1}{\mu_o n_o m} (\mathbf{k} \cdot \mathbf{B}_o \mathbf{B}_1 - \mathbf{k} \mathbf{B}_o \cdot \mathbf{B}_1)$$

$$\frac{p_1}{p_o} = \gamma \frac{n_1}{n_o} = 0$$

$$\mathbf{B}_1 = \mathbf{k} \cdot \frac{\mathbf{v}_1}{\omega} \mathbf{B}_o - \mathbf{k} \cdot \mathbf{B}_o \frac{\mathbf{v}_1}{\omega}$$

## Systeme linéarisé

$$\frac{n_1}{n_o} = \mathbf{k} \cdot \frac{\mathbf{v}_1}{\omega}$$

$$-\omega \mathbf{v}_1 + \mathbf{k} \frac{p_1}{n_o m} = \frac{1}{\mu_o n_o m} (\mathbf{k} \cdot \mathbf{B}_o \mathbf{B}_1 - \mathbf{k} \mathbf{B}_o \cdot \mathbf{B}_1)$$

$$\frac{p_1}{p_o} = \gamma \frac{n_1}{n_o}$$

$$\mathbf{B}_1 = \mathbf{k} \cdot \frac{\mathbf{v}_1}{\omega} \mathbf{B}_o - \mathbf{k} \cdot \mathbf{B}_o \frac{\mathbf{v}_1}{\omega}$$

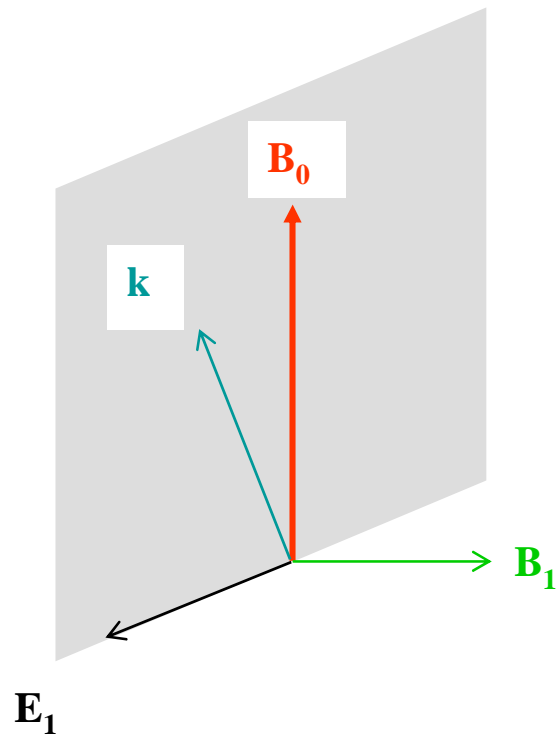
# Relation de dispersion des modes MHD

$$\begin{vmatrix} \omega^2 - k_{\perp}^2 c_s^2 - k^2 V_A^2 & 0 & -k_{//} k_{\perp} c_s^2 \\ 0 & \omega^2 - k_{//}^2 V_A^2 & 0 \\ -k_{//} k_{\perp} c_s^2 & 0 & \omega^2 - k_{//}^2 c_s^2 \end{vmatrix} = 0$$

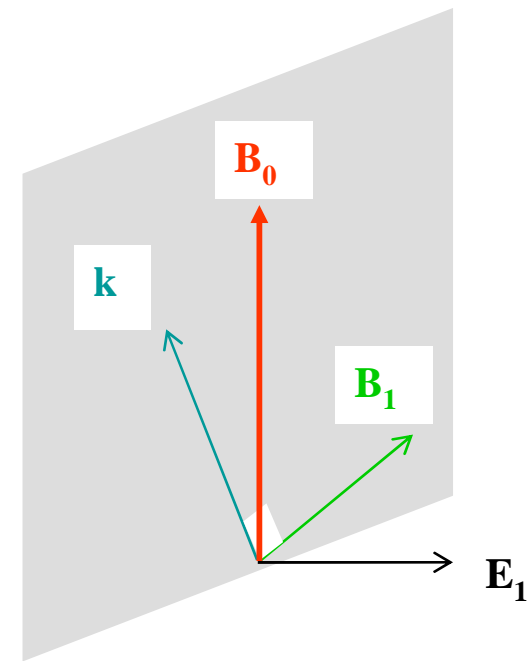


# Polarisation des modes ioniques

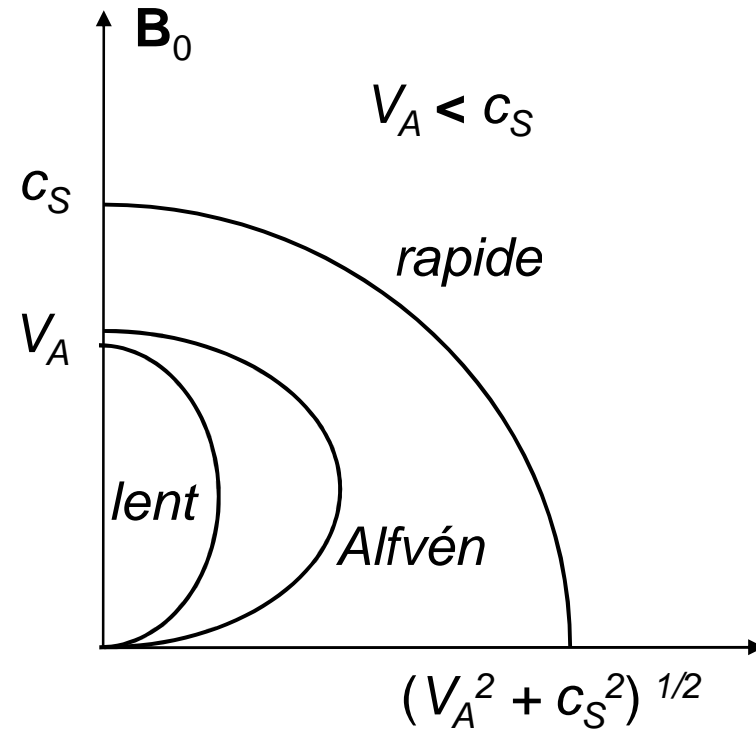
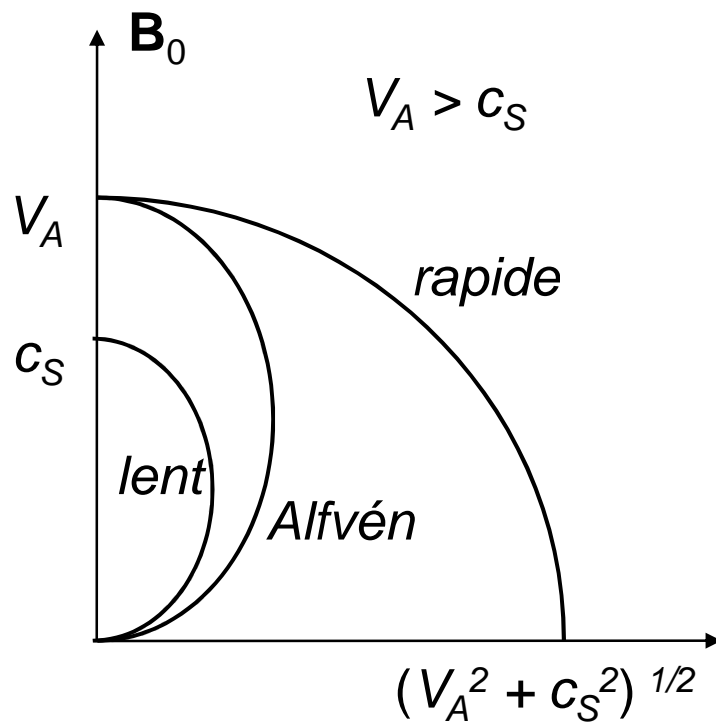
Mode d'Alfven



Modes compressionnels



# Vitesse de phase des 3 modes MHD en fonction de l'angle de propagation



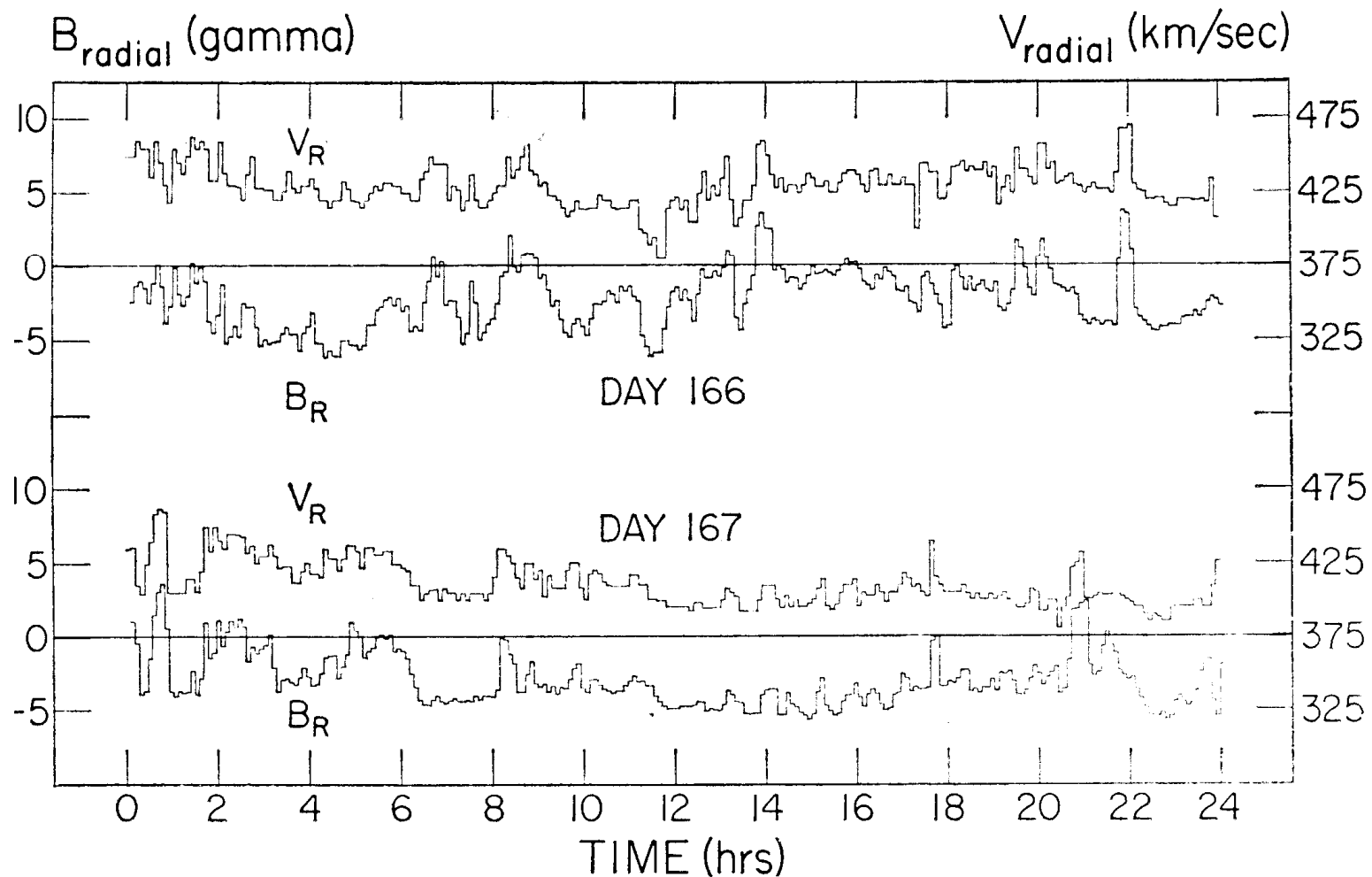
# Comparaison des données de champ magnétique et de vitesse dans le vent solaire

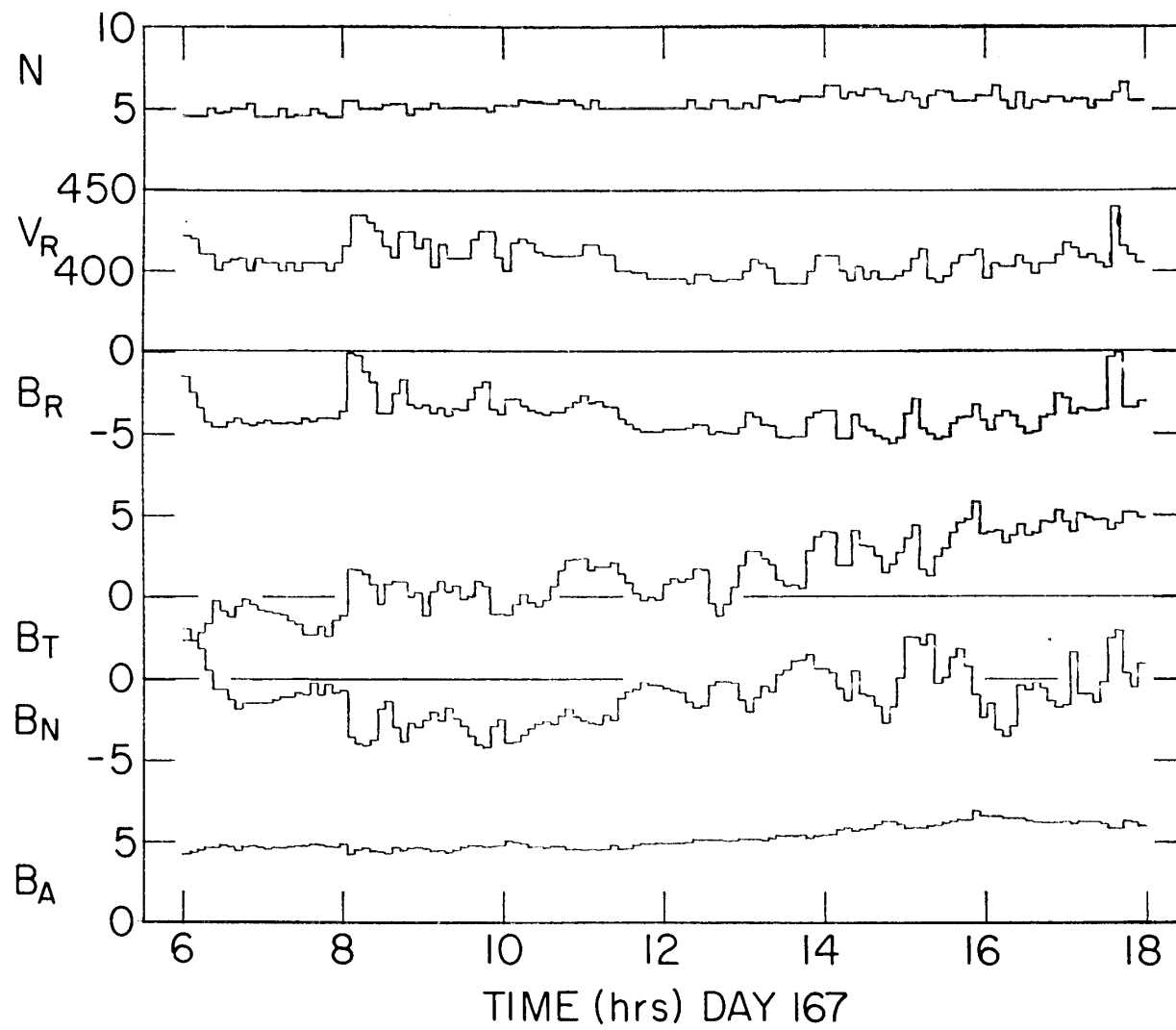
Mariner 5 (1967)

Belcher, Davis and Smith (JGR, 1969)

Belcher and Davis (JGR, 1971)

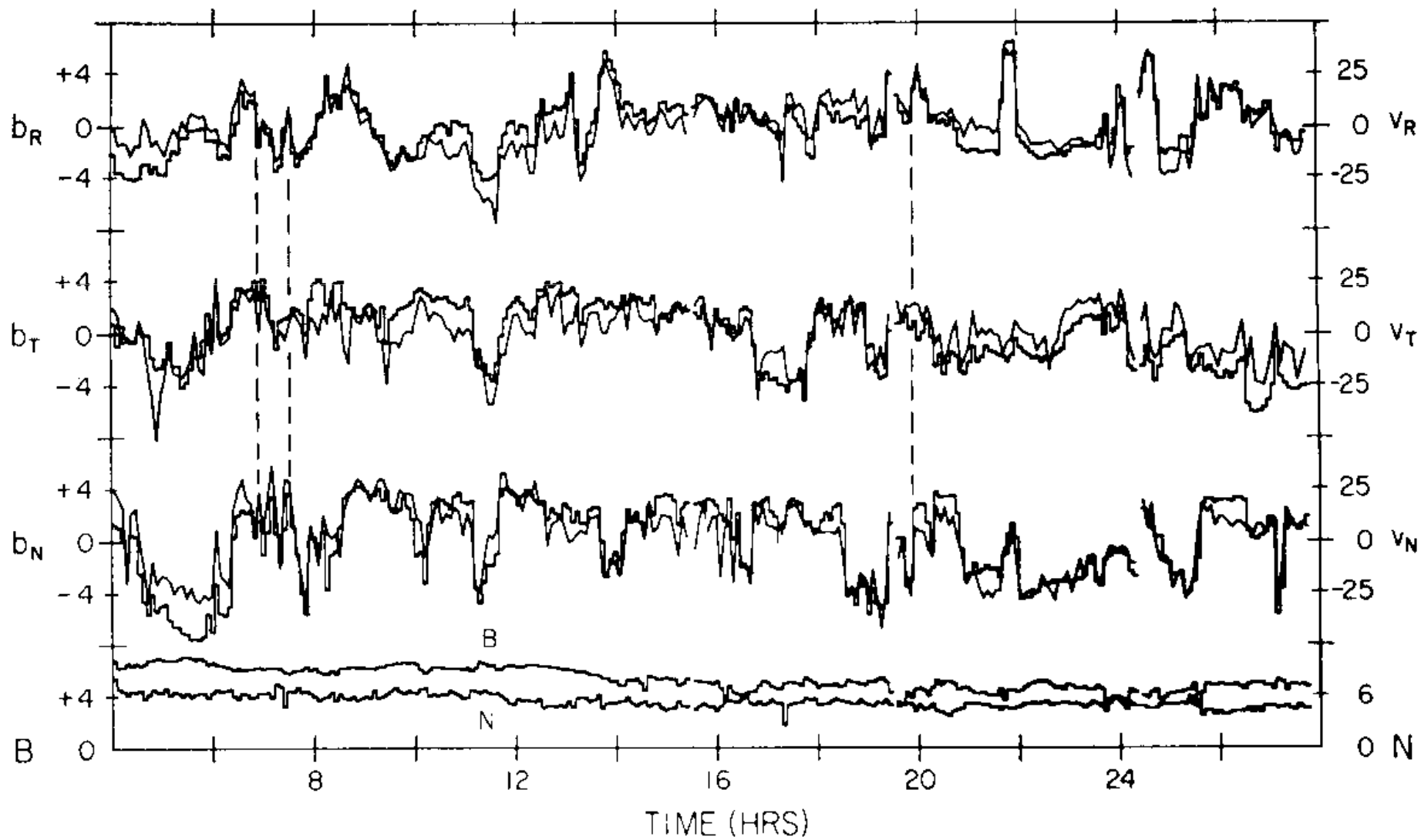
Coordonnées R,T,N (radiale, dans le plan de l'écliptique, vers le nord)





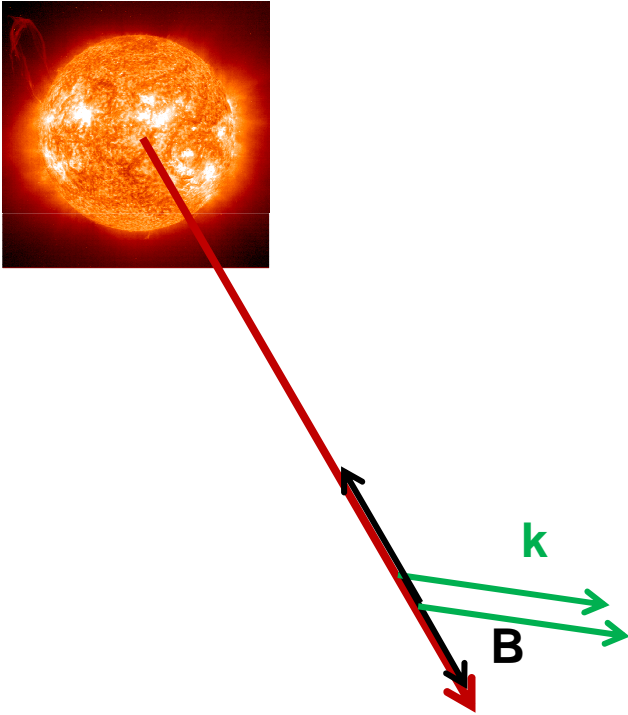
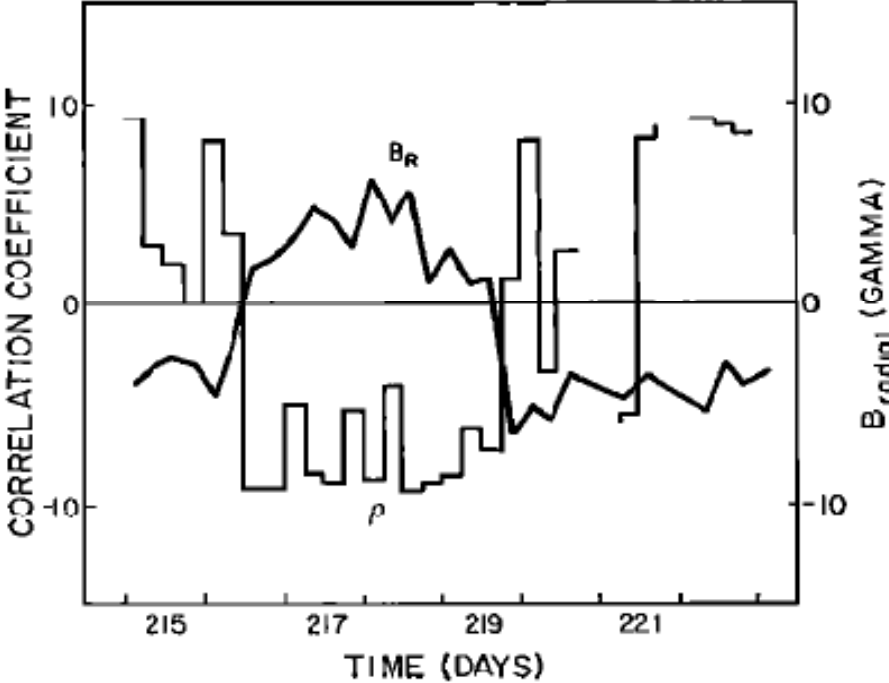
**B(nT)**

**V(kms<sup>-1</sup>)**



# Sens de propagation des ondes

$\rho$  coefficient de corrélation entre  $V_R$  et  $B_R$



Propagation toujours dans le sens sortant du Soleil