



## OEM dans les plasmas

Propagation des OEM dans les plasmas

Comportement du champ électromagnétique en "basse fréquence"

Réflexion des OEM sur un plasma

# OEM dans les plasmas

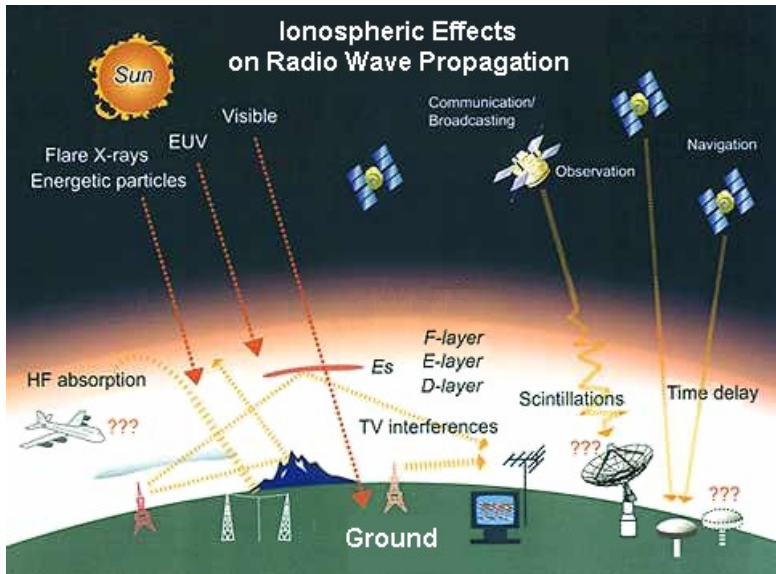
# Problématique

OEM dans les plasmas

Propagation des OEM dans les plasmas

Comportement du champ électromagnétique en "basse fréquence"

Réflexion des OEM sur un plasma





OEM dans  
les plasmas

Propagation  
des OEM  
dans les  
plasmas

Comportement  
du champ  
électromag-  
nétique en  
"basse  
fréquence"

Réflexion des  
OEM sur un  
plasma

1

# Propagation des OEM dans les plasmas



## Description d'un plasma

Un plasma est un gaz peu dense totalement ionisé constitué de cations de charge  $e$  et de masse  $m_i$  et d'électrons de charge  $-e$  et de masse  $m_e$ .

Au repos les nombres volumiques d'électrons et de cations ont la même valeur  $n_0$ , de telle sorte que le plasma est localement neutre.

On étudie la propagation dans le plasma d'une onde électromagnétique plane progressive transversale se propageant dans la direction  $\vec{u}_x$ , décrite par un champ électrique de la forme

$$\vec{E}(x, t) = E_0 \cos(\omega t - kx) \vec{u}_y$$

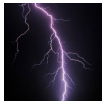
et un champ magnétique  $\vec{B}(x, t)$  de valeur moyenne temporelle nulle.

OEM dans les plasmas

Propagation des OEM dans les plasmas

Comportement du champ électromagnétique en "basse fréquence"

Réflexion des OEM sur un plasma



OEM dans  
les plasmas

Propagation  
des OEM  
dans les  
plasmas

Comportement  
du champ  
électromagnétique en  
"basse  
fréquence"

Réflexion des  
OEM sur un  
plasma

Cette onde met en mouvement les charges : on note  $\vec{v}_e(M, t)$  la vitesse de l'électron qui passe au point M à l'instant  $t$  et on suppose que la moyenne temporelle  $\langle \vec{v}_e(M, t) \rangle$  est nulle en tout point M.

On néglige toute autre force que les forces électromagnétiques.

# Neutralité du plasma en présence de l'OEM



OEM dans les plasmas

.....  
.....

Propagation des OEM dans les plasmas

.....  
.....

Comportement du champ électromagnétique en "basse fréquence"

.....  
.....

Réflexion des OEM sur un plasma

.....  
.....  
.....  
.....



# Expression du champ magnétique

OEM dans les plasmas

.....

.....

Propagation des OEM dans les plasmas

.....

Comportement du champ électromagnétique en "basse fréquence"

.....

.....

Réflexion des OEM sur un plasma

.....

.....

.....

.....

# Approximation non relativiste



OEM dans  
les plasmas

.....  
.....

Propagation  
des OEM  
dans les  
plasmas

.....  
.....

Comportement  
du champ  
électromagnétique en  
"basse  
fréquence"

.....  
.....

Réflexion des  
OEM sur un  
plasma

.....  
.....  
.....  
.....



# Comparaison courant d'ions / courant d'électrons



OEM dans les plasmas

.....  
.....

Propagation des OEM dans les plasmas

.....  
.....

Comportement du champ électromagnétique en "basse fréquence"

.....  
.....

Réflexion des OEM sur un plasma

.....  
.....

.....  
.....



OEM dans  
les plasmas

.....  
.....

Propagation  
des OEM  
dans les  
plasmas

.....  
.....

Comportement  
du champ  
électromagnétique en  
"basse  
fréquence"

.....  
.....

Réflexion des  
OEM sur un  
plasma

.....  
.....  
.....  
.....



# Équation de Maxwell dans un plasma dilué



OEM dans  
les plasmas

.....  
.....

Propagation  
des OEM  
dans les  
plasmas

.....  
.....

Comportement  
du champ  
électroma-  
gnétique en  
"basse  
fréquence"

.....  
.....

Réflexion des  
OEM sur un  
plasma

.....  
.....  
.....  
.....



OEM dans  
les plasmas

.....  
.....

Propagation  
des OEM  
dans les  
plasmas

.....  
.....

Comportement  
du champ  
électromagnétique en  
"basse  
fréquence"

.....  
.....

Réflexion des  
OEM sur un  
plasma

.....  
.....  
.....  
.....

# Équation de propagation du champ électrique



OEM dans les plasmas

.....  
.....

Propagation des OEM dans les plasmas

.....  
.....

Comportement du champ électromagnétique en "basse fréquence"

.....  
.....

Réflexion des OEM sur un plasma

.....  
.....  
.....  
.....

# Relation de dispersion des ondes transversales



OEM dans les plasmas

Propagation des OEM dans les plasmas

Comportement du champ électromagnétique en "basse fréquence"

Réflexion des OEM sur un plasma

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....



OEM dans  
les plasmas

.....

.....

Propagation  
des OEM  
dans les  
plasmas

.....

.....

Comportement  
du champ  
électromagnétique en  
"basse  
fréquence"

.....

.....

Réflexion des  
OEM sur un  
plasma

.....

.....

.....

.....





# Vitesse de phase

OEM dans les plasmas

.....  
.....

Propagation des OEM dans les plasmas

.....

Comportement du champ électromagnétique en "basse fréquence"

.....  
.....

Réflexion des OEM sur un plasma

.....  
.....  
.....  
.....

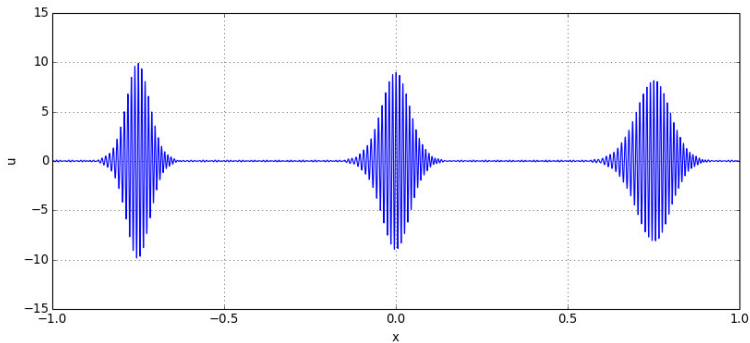
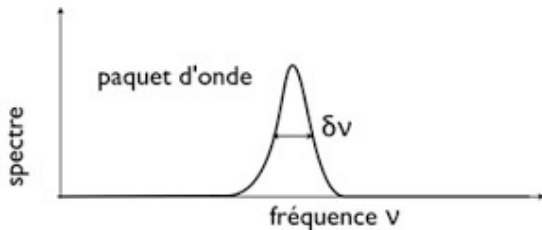
# Vitesse de groupe

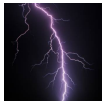
OEM dans les plasmas

Propagation des OEM dans les plasmas

Comportement du champ électromagnétique en "basse fréquence"

Réflexion des OEM sur un plasma





OEM dans les plasmas

Propagation des OEM dans les plasmas

Comportement du champ électromagnétique en "basse fréquence"

Réflexion des OEM sur un plasma

## Expression de la vitesse de groupe

Pour une propagation faiblement dispersive sans absorption,

$$v_g = \frac{d\omega}{dk}$$

Cette vitesse correspond à la vitesse de déplacement de l'enveloppe d'un paquet d'ondes.

.....

.....

.....

.....



OEM dans  
les plasmas

.....  
.....

Propagation  
des OEM  
dans les  
plasmas

.....  
.....

Comportement  
du champ  
électromagnétique en  
"basse  
fréquence"

.....  
.....

Réflexion des  
OEM sur un  
plasma

.....  
.....  
.....  
.....



# Vitesse d'énergie

OEM dans les plasmas

.....  
.....

Propagation des OEM dans les plasmas

.....

Comportement du champ électromagnétique en "basse fréquence"

.....  
.....

Réflexion des OEM sur un plasma

.....  
.....  
.....  
.....



OEM dans  
les plasmas

.....  
.....

Propagation  
des OEM  
dans les  
plasmas

.....  
.....

Comportement  
du champ  
électromagnétique en  
"basse  
fréquence"

.....  
.....

Réflexion des  
OEM sur un  
plasma

.....  
.....  
.....  
.....



OEM dans  
les plasmas

.....  
.....

Propagation  
des OEM  
dans les  
plasmas

.....  
.....

Comportement  
du champ  
électromagnétique en  
"basse  
fréquence"

.....  
.....

Réflexion des  
OEM sur un  
plasma

.....  
.....  
.....  
.....



# Représentation graphique $v_\varphi$ et $v_g$

OEM dans  
les plasmas

Propagation  
des OEM  
dans les  
plasmas

Comportement  
du champ  
électromagnétique en  
"basse  
fréquence"

Réflexion des  
OEM sur un  
plasma





OEM dans  
les plasmas

.....  
.....

Propagation  
des OEM  
dans les  
plasmas

.....  
.....

Comportement  
du champ  
électromagnétique en  
"basse  
fréquence"

.....  
.....

Réflexion des  
OEM sur un  
plasma

.....  
.....  
.....  
.....



OEM dans  
les plasmas

Propagation  
des OEM  
dans les  
plasmas

Comportement  
du champ  
électromagnétique en  
"basse  
fréquence"

Réflexion des  
OEM sur un  
plasma

2

## Comportement du champ électromagnétique en "basse fréquence"



# Expression du champ électrique pour $\omega < \omega_p$

OEM dans les plasmas

Propagation des OEM dans les plasmas

Comportement du champ électromagnétique en "basse fréquence"

Réflexion des OEM sur un plasma

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....



OEM dans  
les plasmas

.....  
.....

Propagation  
des OEM  
dans les  
plasmas

.....  
.....

Comportement  
du champ  
électroma-  
gnétique en  
"basse  
fréquence"

.....  
.....

Réflexion des  
OEM sur un  
plasma

.....  
.....  
.....  
.....



## OEM dans les plasmas

Propagation des OEM dans les plasmas

Comportement du champ électromagnétique en "basse fréquence"

Réflexion des OEM sur un plasma



# Aspect énergétique

OEM dans les plasmas

.....  
.....

Propagation des OEM dans les plasmas

.....  
.....

Comportement du champ électromagnétique en "basse fréquence"

.....  
.....

Réflexion des OEM sur un plasma

.....  
.....

.....  
.....



OEM dans  
les plasmas

Propagation  
des OEM  
dans les  
plasmas

Comportement  
du champ  
électroma-  
gnétique en  
"basse  
fréquence"

Réflexion des  
OEM sur un  
plasma

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....



OEM dans  
les plasmas

Propagation  
des OEM  
dans les  
plasmas

Comportement  
du champ  
électromag-  
nétique en  
"basse  
fréquence"

Réflexion des  
OEM sur un  
plasma

3

Réflexion des OEM sur un plasma



# Indice d'un plasma

## Définition

$$\underline{n} = \frac{k}{k_0}$$

Autres formes possibles :

.....

.....

.....

.....

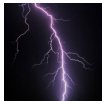
.....

OEM dans les plasmas

Propagation des OEM dans les plasmas

Comportement du champ électromagnétique en "basse fréquence"

Réflexion des OEM sur un plasma



## Exemple du plasma ionosphérique

Calculer l'indice du plasma ionosphérique de densité électronique  $n_0 = 1 \times 10^{12} \text{ m}^{-3}$  pour une fréquence  $f = 14 \text{ MHz}$ .

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

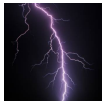
.....

OEM dans les plasmas

Propagation des OEM dans les plasmas

Comportement du champ électromagnétique en "basse fréquence"

Réflexion des OEM sur un plasma



OEM dans les plasmas

Propagation des OEM dans les plasmas

Comportement du champ électromagnétique en "basse fréquence"

Réflexion des OEM sur un plasma

Une onde de pulsation  $\omega > \omega_p$  est émise depuis le sol et arrive sur l'ionosphère avec un angle de  $30^\circ$ . En utilisant les lois de Descartes, montrer qu'il existe une fréquence  $f_0 > f_p = \frac{\omega_p}{2\pi}$  en dessous de laquelle l'onde est totalement réfléchi. Quelle est l'expression de  $f_0$  dans le cas d'une incidence normale ?

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....



OEM dans  
les plasmas

.....  
.....

Propagation  
des OEM  
dans les  
plasmas

.....  
.....

Comportement  
du champ  
électromagnétique en  
"basse  
fréquence"

.....  
.....

Réflexion des  
OEM sur un  
plasma

.....  
.....  
.....  
.....



OEM dans les plasmas

Propagation des OEM dans les plasmas

Comportement du champ électromagnétique en "basse fréquence"

Réflexion des OEM sur un plasma

La communication par ondes hertziennes avec des satellites artificiels utilise les propriétés de transparence du plasma ionosphérique alors qu'au contraire les télécommunications terrestres en grandes ondes utilisent la réflexion des OEM sur l'ionosphère.

Quelle bande passante de fréquences vous paraît adaptée à la transmission terrestre des ondes radio ? Et pour les communications avec les satellites ?

.....

.....

.....

.....



OEM dans  
les plasmas

.....  
.....

Propagation  
des OEM  
dans les  
plasmas

.....  
.....

Comportement  
du champ  
électromagnétique en  
"basse  
fréquence"

.....  
.....

Réflexion des  
OEM sur un  
plasma

.....  
.....  
.....  
.....