

# Ondes dans les plasmas

**Niveau:** L2

**Prérequis:**

- ⇒ Équations de Maxwell
- ⇒ Ondes électromagnétiques dans le vide
- ⇒ Mécanique du point
- ⇒ Équations différentielles en notation complexe
- ⇒ Vitesses de phase et de groupe

# Introduction





# Définition

**Plasma** : Milieu composé d'atomes ou de molécules partiellement ou complètement ionisés mais qui reste globalement électriquement neutre. Obtenus par exemple pour un matériau porté à haute température

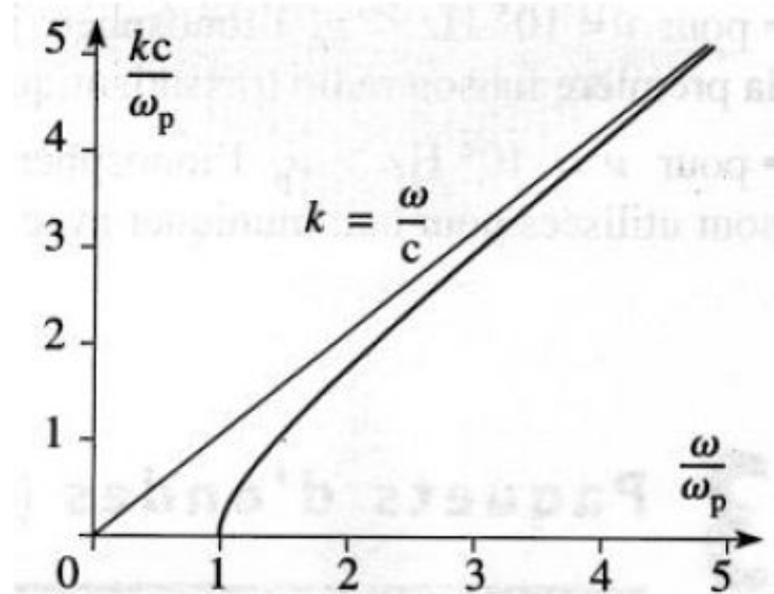
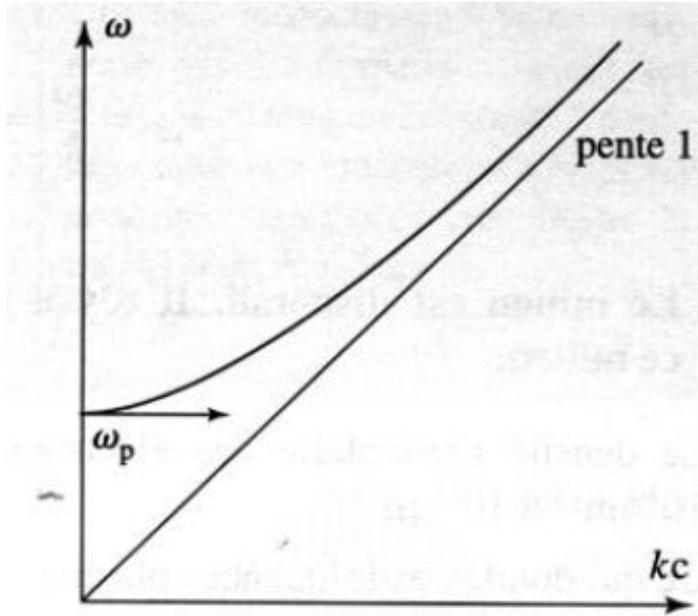
Parfois appelé "4ème état de la matière"

## **Exemples :**

- ⇒ Ionosphère terrestre
- ⇒ Foudre
- ⇒ Néons
- ⇒ Coeur des étoiles



# Relation de dispersion et pulsation plasma





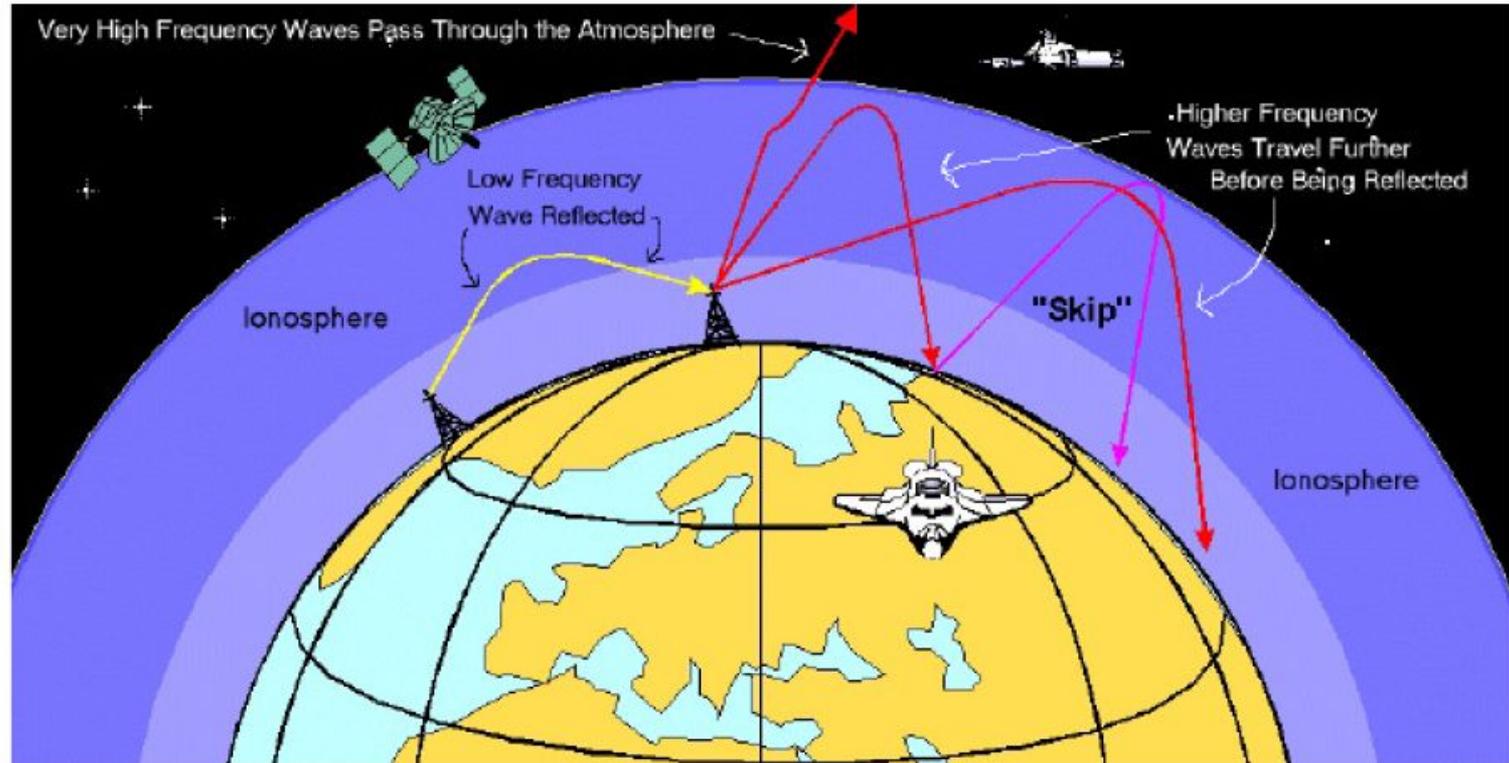
# Ionosphère

## Quelques ordres de grandeurs :

L'ionosphère est la partie de la haute atmosphère (75 à 250 km d'altitude en plusieurs couches) où les gaz sont ionisés par le rayonnement cosmique et par le vent solaire. La densité particulaire des électrons dans l'ionosphère est de l'ordre de  $10^{10} \text{ m}^{-3}$  à  $10^{12} \text{ m}^{-3}$  et la fréquence plasma de l'ordre de  $\nu_p = 10^7 \text{ Hz}$ .

- Pour  $\nu = 10^5 \text{ Hz} < \nu_p$ , l'ionosphère joue le rôle de réflecteur : ceci explique la 1<sup>ère</sup> liaison radio transatlantique réalisée par Marconi en 1901. Ainsi des ondes radio en modulation d'amplitude peuvent atteindre des points très éloignés sur le globe.
- Pour  $\nu = 10^8 \text{ Hz} > \nu_p$ , l'ionosphère est « transparente ». Ces fréquences sont utilisées pour communiquer avec les satellites.

# Ionosphère



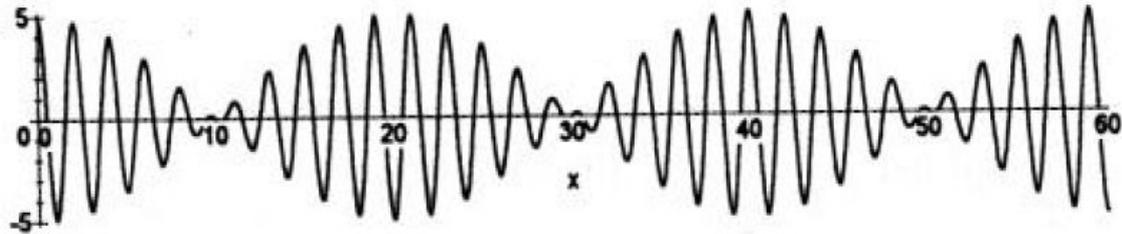
[Source: Nasa - GSFC]



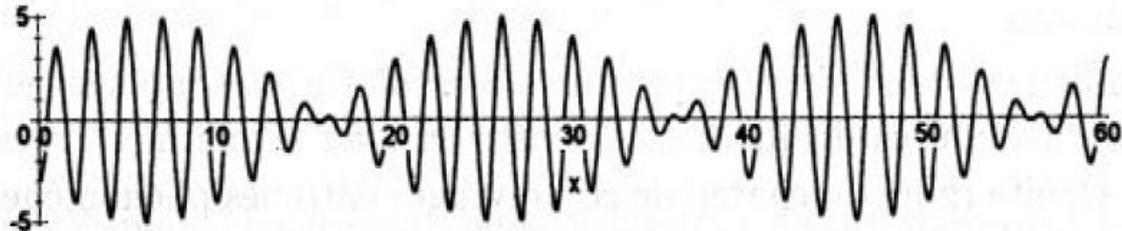
# Propagation de 2 ondes

$$\theta(x, t) = A \cos(\omega_1 t - k_1 x) + A \cos(\omega_2 t - k_2 x) = 2A \cos\left(\frac{\delta\omega}{2} t - \frac{\delta k}{2} x\right) \cos(\omega_0 t - k_0 x)$$

$t = 0$

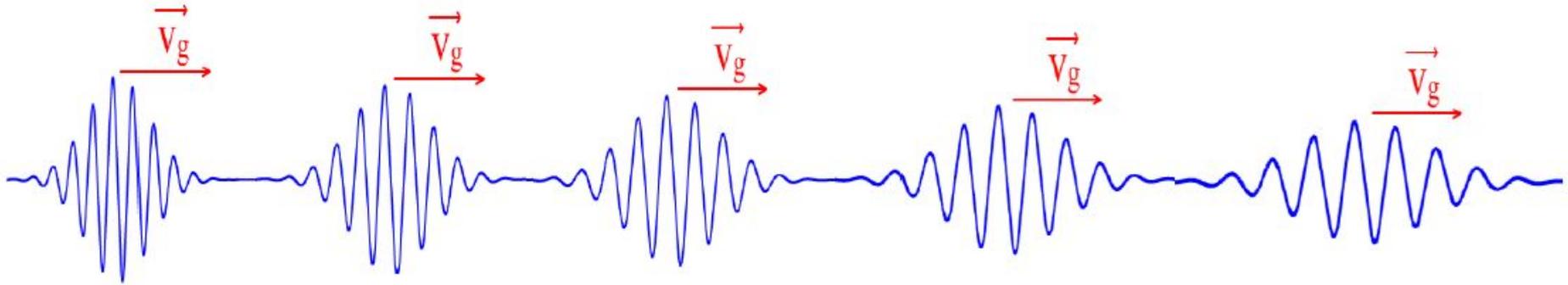


$t > 0$





# Paquets d'ondes



Paquet d'ondes avec déformation



# Conclusion



# Ondes évanescentes

Si  $\omega < \omega_p$ , alors  $k$  est imaginaire pur :

$$k = \pm i \sqrt{\frac{\omega_p^2 - \omega^2}{c^2}} = \pm i k''$$

Le champ électrique de l'onde s'écrit alors sous la forme :

$$\underline{\vec{E}} = \underline{\vec{E}}_0 e^{i(\omega t)} e^{\mp k'' x} \quad \text{soit} \quad \vec{E} = \vec{E}_0 e^{\mp k'' x} \cos(\omega t + \varphi_0)$$

# Plan de la leçon:

## I) Propagation d'une onde électromagnétique

- a) Cadre de l'étude
- b) Equations de Maxwell
- c) Relation de dispersion
- d) Structure de l'onde

## II) Paquets d'ondes et vitesse de groupe

- a) Propagation de 2 ondes de fréquences voisines
- b) Généralisation au cas d'un paquet d'ondes