

## 4. Électromagnétisme

**4.5. Propagation et rayonnement**  
**B – Un exemple de milieu dispersif : un plasma**

## Table des matières

1. Qu'est-ce qu'un plasma ?	2
2. Propagation d'une onde électromagnétique dans un plasma	2
2.1. Modélisation du plasma dilué . . . . .	2
2.2. Modélisation de l'OPPM . . . . .	2
2.3. Mouvement des charges du plasma . . . . .	2
2.4. Équation de propagation du champ électromagnétique . . . . .	2
2.5. Solution de l'équation de propagation . . . . .	3
3. Dispersion	3
3.1. Paquet d'ondes . . . . .	3
3.2. Vitesse de phase et de groupe . . . . .	3

## Introduction

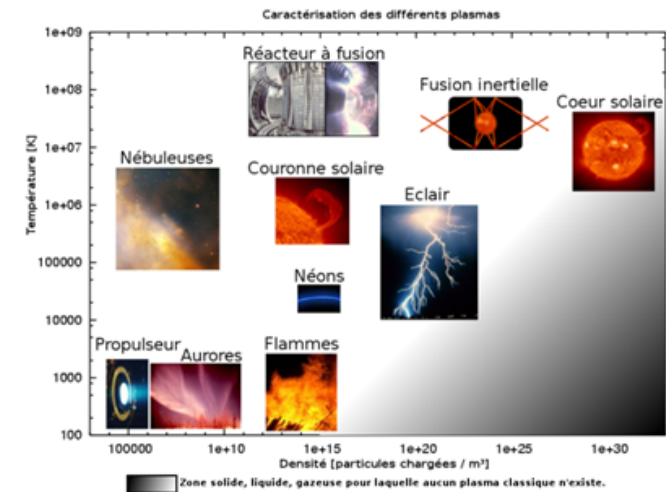
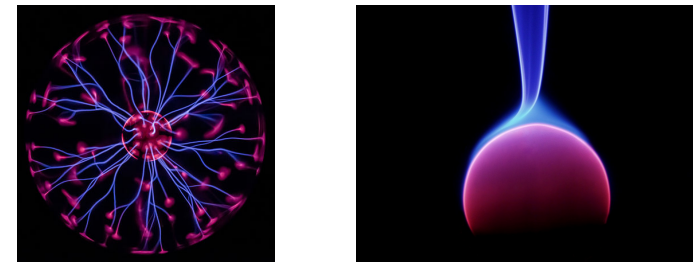


FIGURE 1 – Divers plasmas  
([http://education.francetv.fr/rdv\\_sciences/dossier4\\_matiere/plasma01.htm](http://education.francetv.fr/rdv_sciences/dossier4_matiere/plasma01.htm))



(a) Vue globale

(b) Électrode centrale

FIGURE 2 – Lampe à plasma

## 1. Qu'est-ce qu'un plasma ?

Le **plasma** est un état dilué de la matière analogue à un gaz, mais constitué d'un **bain de particules chargées, électrons et ions positifs**, en proportions égales et donc **globalement neutre**.

Le plus simple des plasmas est celui d'hydrogène, formé d'électrons et de protons libres en concentration égale.

Pour observer cet état particulier de la matière où les électrons ne sont plus liés à un atome, il faut maintenir une température élevée dans le milieu. Pour avoir un plasma d'hydrogène complètement ionisé il faut par exemple chauffer le gaz hydrogène au delà de 20 000 K ( $\approx 2$  eV). Le plasma est un état de la matière extrêmement répandu dans l'univers. **99% de la matière de l'univers est sous forme de plasma plus ou moins dense**. Un plasma peut également se former à basse température si la source d'ionisation lui est extérieure. C'est le cas de l'**ionosphère**, cette couche élevée de l'atmosphère terrestre qui, bien que froide, subit en permanence un intense bombardement ionisant de particules venant du soleil. Les **auroras polaires** sont l'une des manifestations de ce plasma. À une autre échelle, on trouve également des plasmas dans les tubes fluorescents (improprement appelés néons), les propulseurs spatiaux et ils sont couramment utilisés dans l'industrie notamment en micro électronique.

Le champ d'étude de la physique des plasmas est donc vaste et interdisciplinaire : astrophysique, physique atomique, physique nucléaire, météorologie...

Depuis 1955, de vastes programmes de recherche se sont donnés pour objectif, la production d'énergie par **fusion thermonucléaire contrôlée**. Là encore, le plasma est omniprésent et la motivation initiale du programme "interactions ions-plasma" était liée à l'étude du dépôt d'énergie sur les cibles destinées au confinement inertiel par ions lourds et plus particulièrement au ralentissement d'ions lourds dans le plasma dense et chaud qui entoure la cible de fusion.

## 2. Propagation d'une onde électromagnétique dans un plasma

### 2.1. Modélisation du plasma dilué

- Plasma constitué
  - d'**ions positifs** : charge  $+e$  et masse  $M$  ;
  - d'**électrons** : charge  $-e$  et masse  $m_e$ .
- Plasma globalement **neutre** : autant d'ions que d'électrons. Densité volumique  $n_0$  uniforme à l'équilibre.
- **Plasma dilué** : on néglige les interactions entre les particules chargées (électron/électron, ion/ion, électron/ion). Ceci est d'autant plus vrai que  $n_0$  est faible. La figure 1 donne quelques exemples de densité de particules. On fera souvent référence à l'ionosphère dans laquelle  $n_0 < 10^{12} \text{ m}^{-3}$  (plasma dilué).

### 2.2. Modélisation de l'OPPM

On s'intéresse à la propagation dans le plasma d'une OPPM électromagnétique dont le champ électrique s'écrit en notation complexe

$$\vec{E}(M, t) = \vec{E}_0 \exp(i(\omega t - \vec{k} \cdot \vec{r}))$$

On suppose l'OPPM transverse donc  $\vec{E}_0$  est orthogonal à  $\vec{k}$ .

Les grandeurs imposées par la source émettrice de l'onde sont

- la pulsation temporelle  $\omega$  ;
- la direction et le sens de propagation fixés par la direction et le sens de  $\vec{k}$ .

En revanche, on ne connaît pas le module d'onde  $k = \|\vec{k}\|$  puisqu'ici, l'OPPM ne se propage pas dans le vide mais dans le plasma. Un des objectifs de la suite de l'étude est justement de trouver ce module d'onde.

### 2.3. Mouvement des charges du plasma

On montre que la vitesse des électrons en régime forcé s'écrit

$$\vec{v}_- = \frac{ie}{m_e \omega} \vec{E}$$

On en déduit que le vecteur densité de courant volumique est

$$\vec{j}(M, t) = \gamma \vec{E} \quad \text{où} \quad \gamma = -i \frac{n_0 e^2}{m_e \omega}$$

On montre aussi que la densité volumique de charge est nulle

$$\rho(M, t) = 0$$

### 2.4. Équation de propagation du champ électromagnétique

On déduit de ce qui précède que l'équation de propagation vérifiée par  $\vec{E}$  est

$$\Delta \vec{E} - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} = \frac{\mu_0 n_0 e^2}{m_e} \vec{E}$$

ainsi que l'équation de dispersion

$$k^2 = \left(\frac{\omega}{c}\right)^2 \left(1 - \left(\frac{\omega_p}{\omega}\right)^2\right) \quad \text{où} \quad \omega_p = \sqrt{\frac{n_0 e^2}{m_e \epsilon_0}}$$

## 2.5. Solution de l'équation de propagation

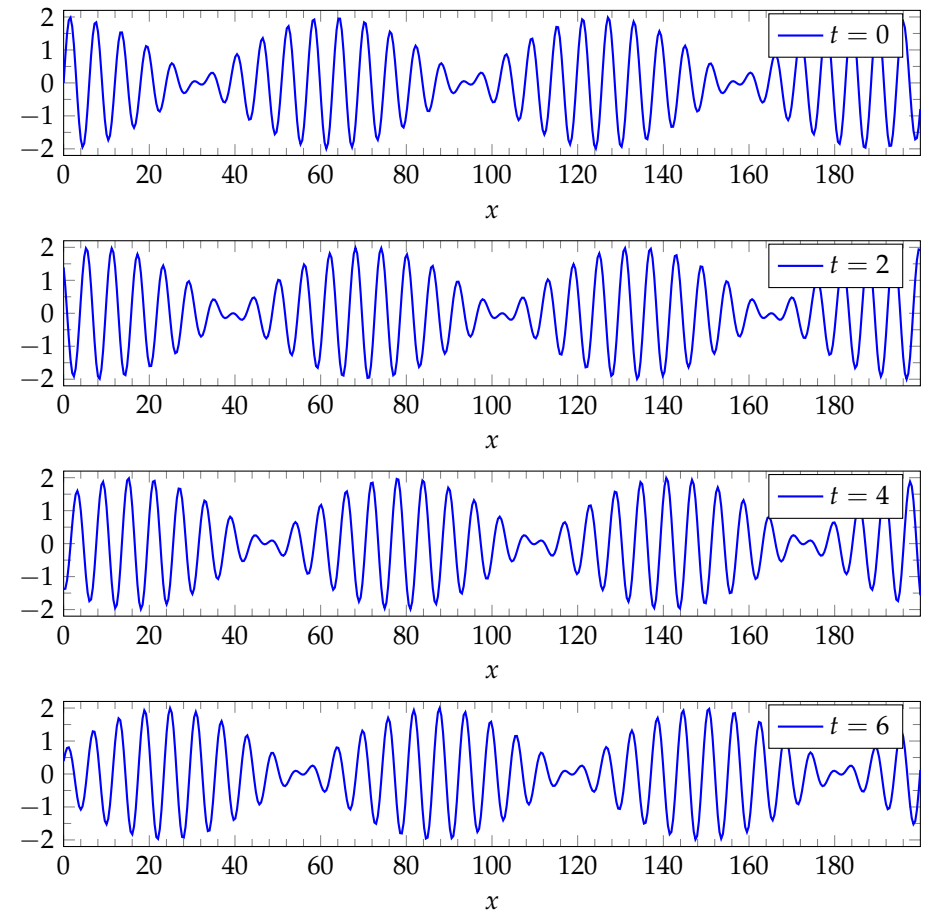
## 3. Dispersion

## 3.1. Paquet d'ondes

## 3.2. Vitesse de phase et de groupe

## Annexe

## Paquet d'onde élémentaire : paquet de deux ondes

FIGURE 3 –  $x \mapsto \sin(x - 1, 8t) + \sin(1, 1(x - 2t))$  à différents instants

### Paquet d'ondes gaussien

Sur la figure 5, on visualise la représentation d'un paquet d'ondes gaussien dans un milieu dispersif de relation de dispersion  $k(\omega) = \alpha\omega^2$ .

Ce paquet d'onde est constitué d'une superposition d'un nombre fini d'OPPM de pulsations temporelles proches de  $\omega_0$ . On pourrait aussi superposer un nombre infini d'OPPM.

On a choisi  $\omega_0 = 240 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$  et  $\alpha = 1,74 \times 10^{-5} \text{ s}^2 \cdot \text{m}^{-1}$ .

1. Quelle est la vitesse de phase pour la pulsation moyenne du paquet d'onde ?
2. Quelle est la vitesse de groupe de ce paquet d'ondes ?
3. Mesurer les positions du maximum du signal aux cinq instants proposés et en déduire une vitesse de propagation du paquet d'onde.
4. Conclure.
5. La figure 4 fournit un zoom sur le paquet d'ondes à l'instant  $t = 6 \text{ s}$ . Comparer les oscillations spatiales à l'avant et à l'arrière du paquet d'ondes. Expliquer les différences.

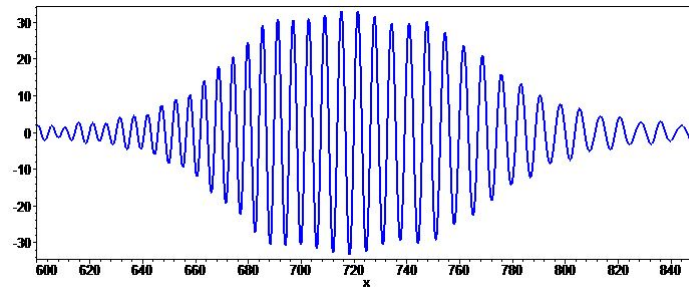


FIGURE 4 – paquet d'ondes gaussien à  $t = 6 \text{ s}$

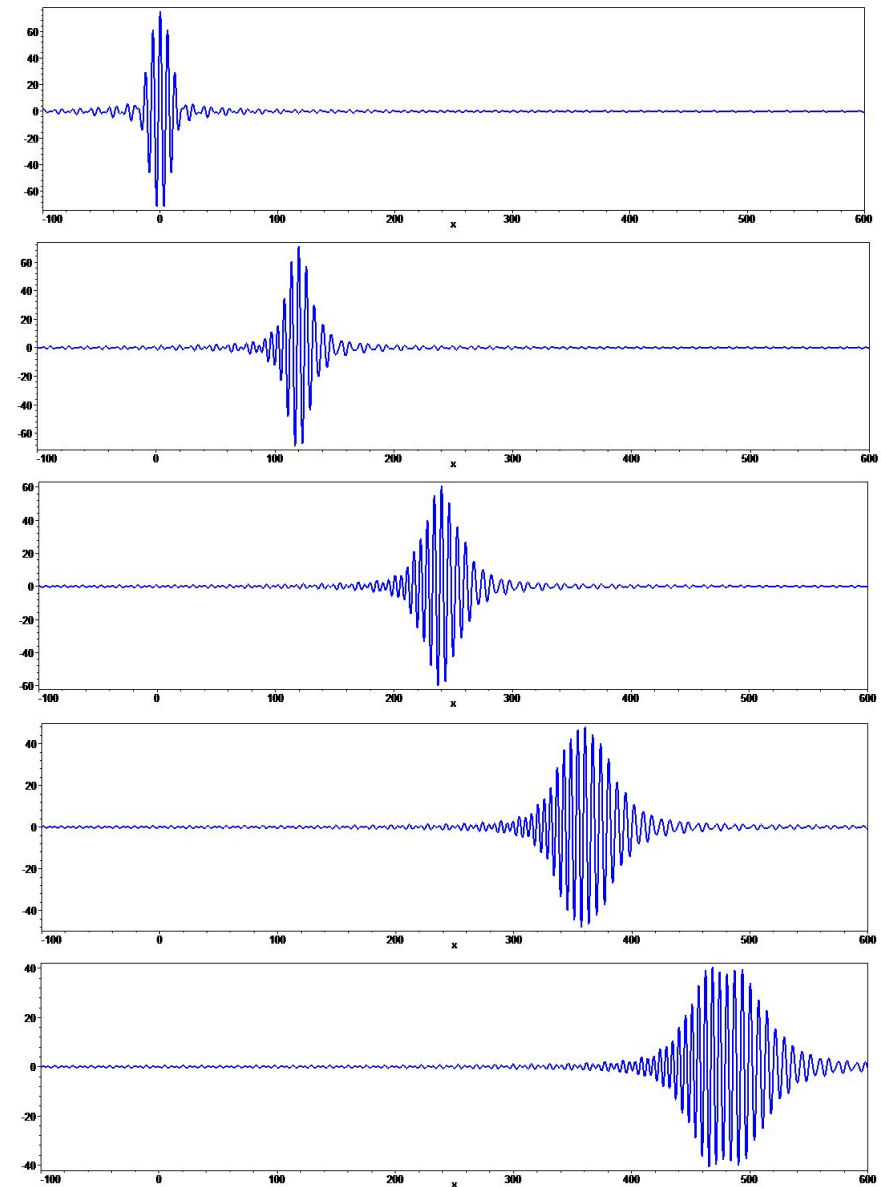


FIGURE 5 – Propagation d'un paquet d'ondes gaussien dans un milieu dispersif (instants  $t = 0, t = 1, t = 2, t = 3, t = 4$  en secondes.  $x$  est en mètres.)