

Figure – L'état plasma parmi les différents états usuels. Cliché, obtenu par une différence de potentiel de 4 kV entre deux béciers remplis d'eau. Cliché de A. Breuille, Y. Cardot, T. De Warren et A. Relave, Olympiades de physiques 2023.



Définition :

Un plasma est un gaz conducteur composé d'atomes ou de molécules partiellement ou complètement ionisés mais qui reste globalement électriquement neutre.

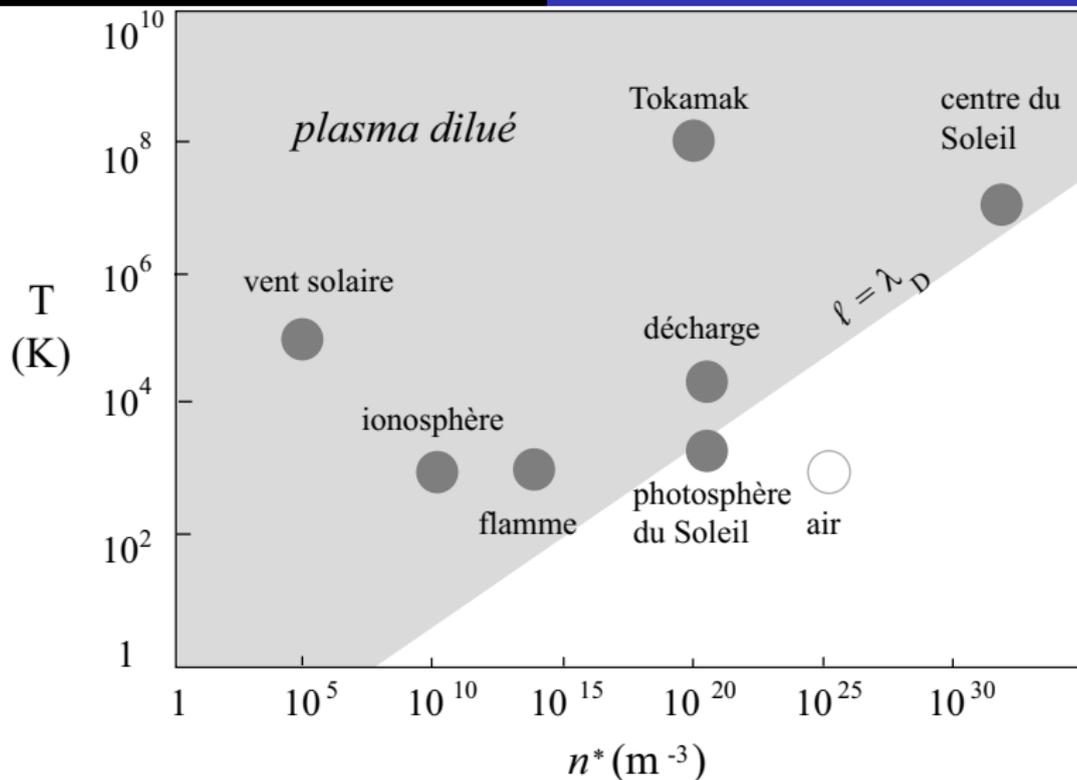


Figure – Quelques densités de plasmas.



Définition :

Un plasma est dit **peu dense** ou **dilué** lorsque le libre parcours moyen est grand devant la distance caractéristique d'écrantage des effets électromagnétiques : $l \gg \lambda_D$.

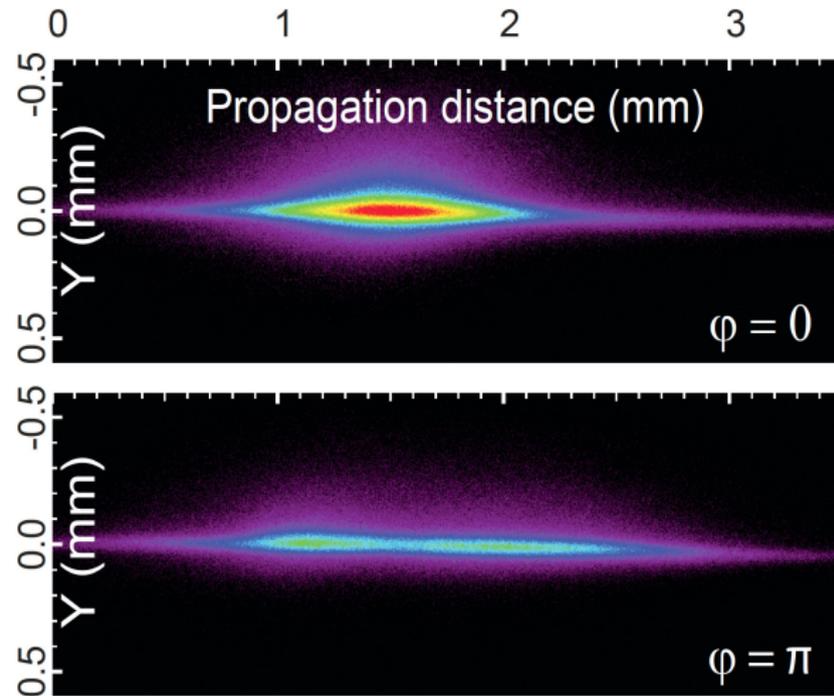


Figure – Observation de différents régimes de propagation d'un laser dans un plasma. D'après Béjot *et al*, Phys. Rev. A **92**, 053417 (2015). ©(2024) aps.



Définition :

Un plasma est **froid** lorsque l'agitation thermique ne permet pas la ionisation du gaz.

Exemple 1

Calculer la température pour qu'un électron soit relativiste. Les plasmas cités dans la figure sont ils relativistes ou non ? On pourra considérer que la vitesse moyenne des électrons suit une distribution de Maxwell-Boltzmann :

$$\frac{1}{2}mv^2 = \frac{3}{2}k_B T$$

Données : Masse de l'électron $m = 9,1 \cdot 10^{-31}$ kg ; constante de Boltzmann $k_B = 1,38 \cdot 10^{-23}$ J · K⁻¹ ; vitesse de la lumière $c = 3,00 \cdot 10^8$ m · s⁻¹.

 **Exemple 2** À partir des équations de Maxwell et de l'expression de la densité de courant $\vec{j} = \frac{-n^* e^2}{im\omega} \vec{E}$, montrer qu'avec un champ électrique transverse, le champ magnétique dans un plasma satisfait l'équation suivante en représentation complexe

$$\frac{\omega_p^2 - \omega^2}{c^2} \vec{B} = \Delta \vec{B}$$

on explicitera la valeur de ω_p .

 **Exemple 3** La ionosphère est constituée d'une couche de plasma ionisé de densité moyenne $n^* = 10^{12} \text{ m}^{-3}$ située entre 100 et 600 km d'altitude. La communication avec un satellite GPS au delà de cette couche s'effectue à la fréquence $f = 1,6 \text{ GHz}$ (bande L1).

- 1 - Calculer la fréquence plasma correspondante. Le plasma est-il transparent pour la fréquence utilisée ?
- 2 - Sachant que $k^2 = (\omega^2 - \omega_p^2)/c^2$, justifier que la vitesse de phase puisse être approchée par : $v_\phi \approx c/(1 - \omega_p^2/2\omega^2)$.
- 3 - Exprimer puis calculer la différence de temps de parcours entre une onde dans le vide et une onde dans une couche $L = 500 \text{ km}$ de plasma.
- 3 - En fonction de la journée, la densité du plasma fluctue, quelle est l'erreur maximale commise en distance si l'on ne tient pas compte de ces fluctuations.

Données : $\omega_p^2 = n^* e^2 / m \epsilon_0$, $e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$, $\epsilon_0 = 8,87 \cdot 10^{-12} \text{ SI}$,
 $m = 9,1 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$

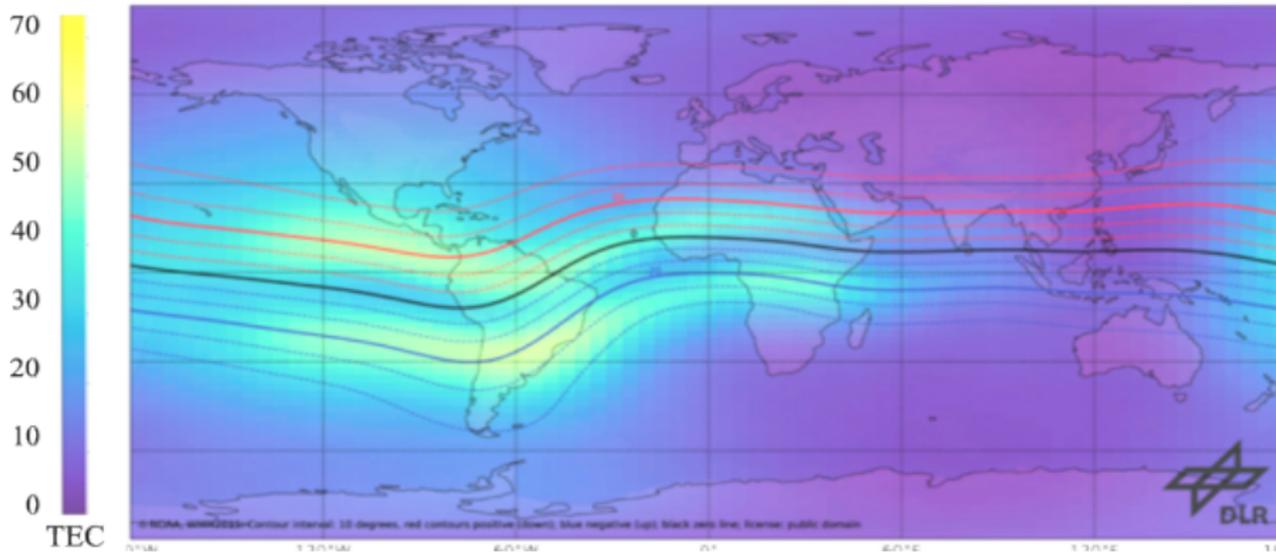


Figure – Effet cumulé de la concentration des électrons du plasma sur la propagation des ondes électromagnétiques (TEC). D'après Vasyljev *et al*, *Modeling of ionospheric scintillation*, J. Space Weather Space Clim. **12**, 22 (2022), .

 **Exemple 4** On considère la superposition de deux OPPMs polarisées selon \vec{e}_z et se propageant selon (Ox) . Soient $k_1 = k(\omega_1)$ et $k_2 = k(\omega_2)$, les vecteurs d'onde réels de deux OPPM de pulsations ω_1 et ω_2 et de même amplitude A . On notera les valeurs moyennes $\omega_0 = (\omega_1 + \omega_2)/2$ et $k_0 = (k_1 + k_2)/2$, les écarts de pulsation et fréquences seront notées $\delta\omega = \omega_1 - \omega_2$, $\delta k = k_1 - k_2$. On supposera que $\delta\omega \ll \omega_0$ et $\delta k \ll k_0$.

- 1 - Proposer une forme pour le champ $\vec{E}(x, t)$ de l'onde résultante.
- 2 - Montrer que l'amplitude de l'onde résultante est le produit de deux fonctions progressives dont on identifiera les vitesses et les périodes spatiales.
- 3 - Représenter l'allure de l'amplitude en fonction de x pour un instant donné.

Données : $\cos p + \cos q = 2 \cos \frac{p+q}{2} \cos \frac{p-q}{2}$

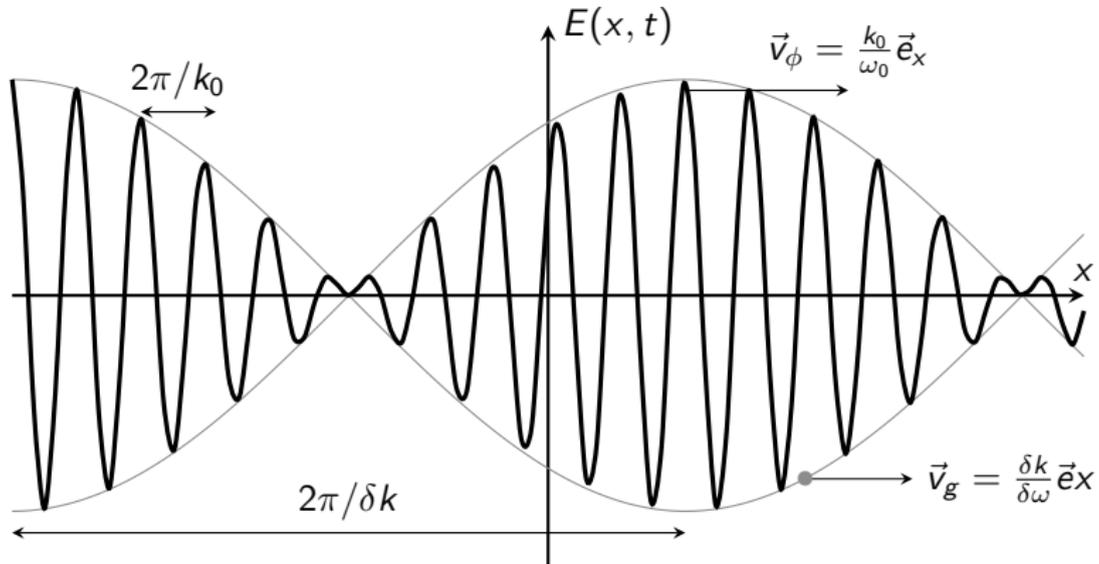


Figure – Superposition de deux OPPMs de vecteurs d'onde proches, l'enveloppe se déplace à \vec{v}_g tandis que l'intérieur se déplace à \vec{v}_ϕ .



Définition :

Pour un paquet d'ondes centré sur k_0 et d'étalement $\Delta k \ll k_0$, on définit la vitesse de groupe correspondant à la vitesse de l'enveloppe du paquet d'ondes :

$$v_g = \frac{d\omega}{dk}(k = k_0)$$

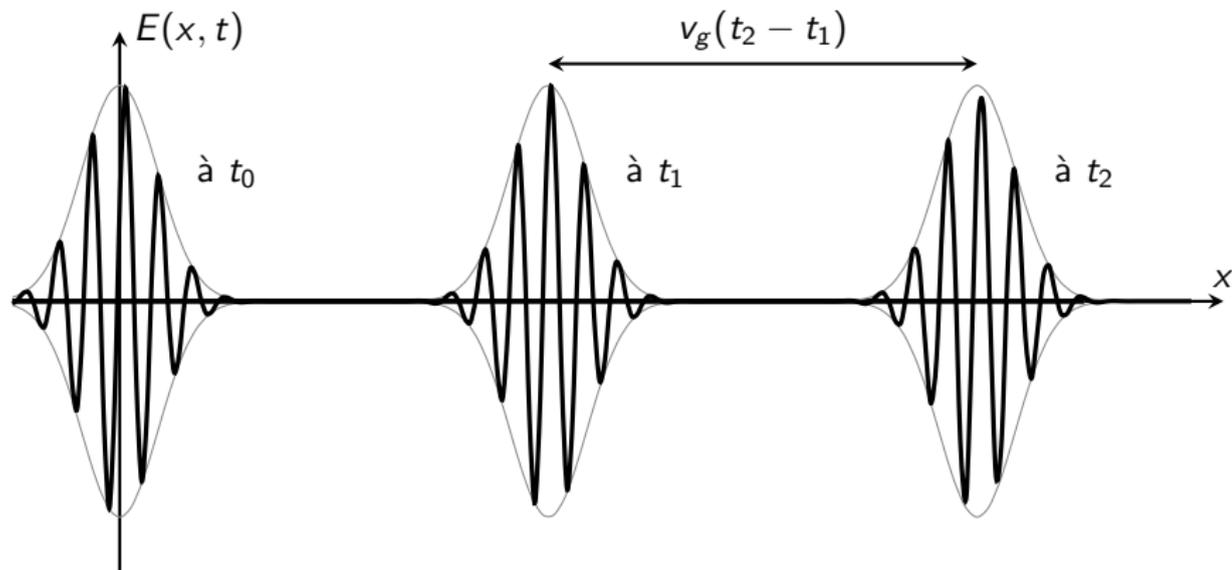


Figure – Propagation sans déformation d'un paquet d'onde lors de sa propagation dans un milieu **non**-dispersif.

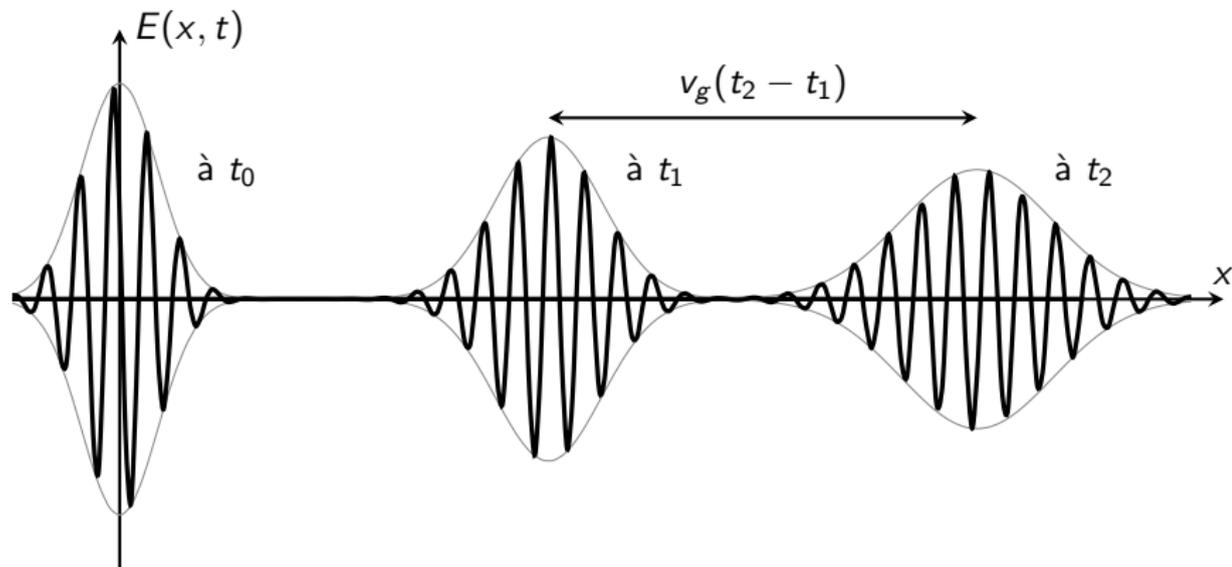


Figure – Étalement d'un paquet d'onde lors de sa propagation dans un milieu dispersif.

 **Exemple 5** On considère un pulse de durée τ et de fréquence centrale f_0 traversant la ionosphère terrestre assimilée à un plasma de fréquence $f_p = 9,00$ MHz.

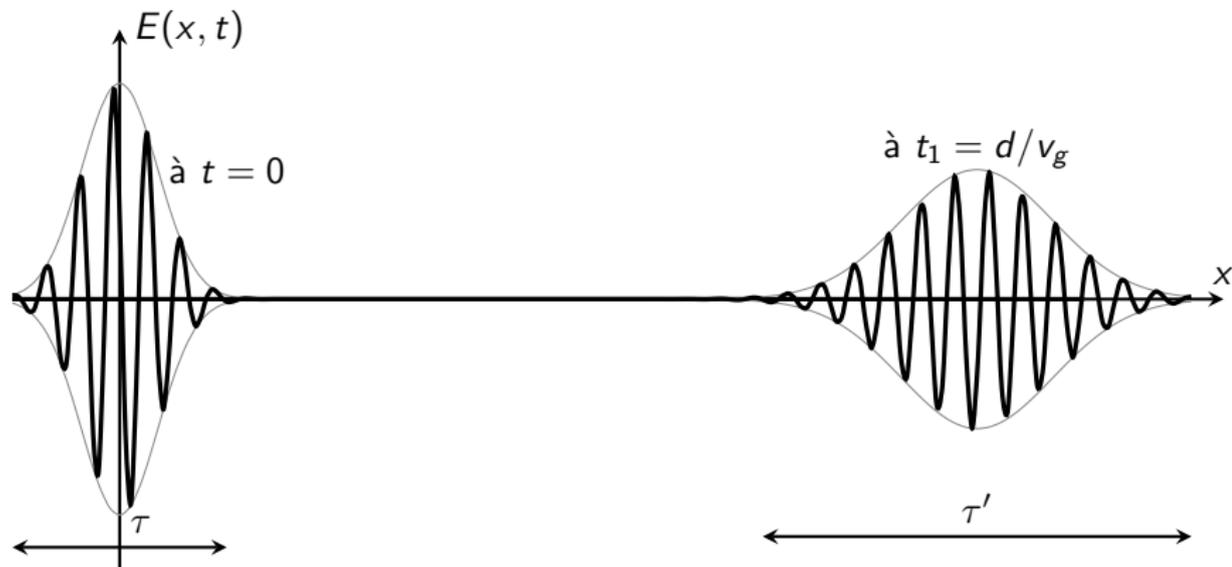
1 - Déterminer la densité n_e du plasma sachant que $f_p = 89.9\sqrt{n_e/10^{20}}$ GHz, où n_e s'exprime en m^{-3} .

2 - Déterminer la valeur de la fréquence centrale f_0 telle que le pulse traverse le plasma avec une vitesse $c/2$ où $c = 3,00 \cdot 10^8$ m \cdot s $^{-1}$.

3 - Soit f_{min} et f_{max} les composantes spectrales minimale et maximale du pulse. On admet que la durée du pulse vérifie $f_{max} - f_{min} = 1/\tau$. Déterminer les fréquences hautes et basses du spectre d'un pulse de $\tau = 5 \mu s$.

4 - Quelle sera la durée τ' de ce pulse après une traversée de 100 km des couches F de la ionosphère ?

Données : relation de dispersion du plasma : $\omega^2 = \omega_p^2 + k^2 c^2$.

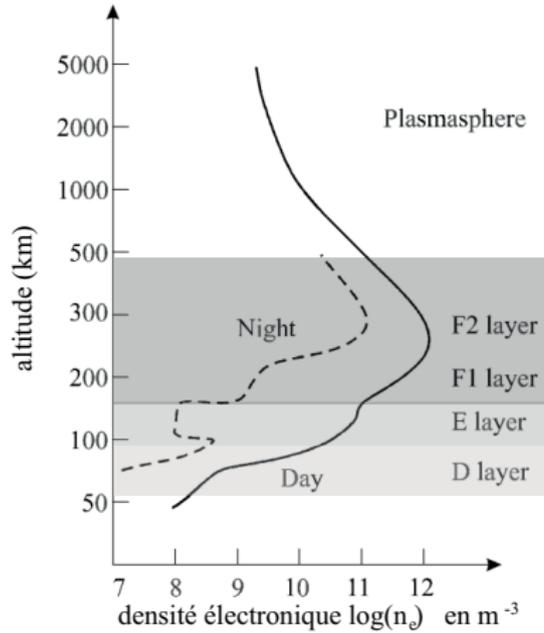




Définition :

Une onde plane **évanescence** est une onde dont une composante du vecteur d'onde est **imaginaire pure**^a $k = \pm i\kappa$ L'amplitude de l'onde diminue alors exponentiellement selon cette direction ($e^{-\kappa x}$) avec la distance caractéristique $1/\kappa$.

a. Le signe est choisi de sorte que l'onde ne diverge pas dans le milieu.



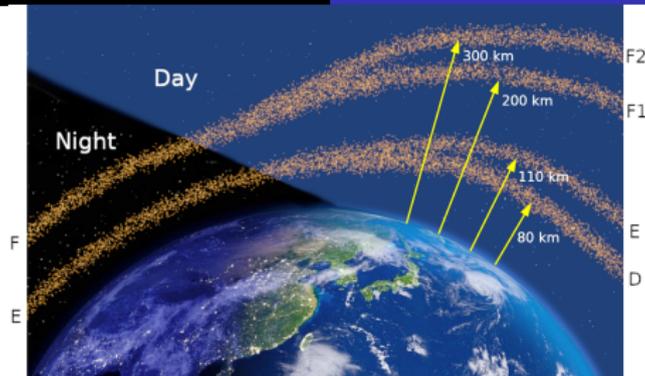


Figure – Densité électronique dans la ionosphère, évolution en fonction du jour et de la nuit. (Image de Carlos Molina,).