

Physique des ondes

OND-1: Ondes acoustiques (CCINP 2025 Keenan GALLART et Rania EL MALKI)

La partie de la corde allant du mur de gauche à la poulie, a une longueur de 5,0 m et une masse de 5,0 g.

Au bout de la corde se trouve une poulie parfaite, sans masse et sans frottements, et une masse m , permettant de tendre la corde avec une tension de norme T .

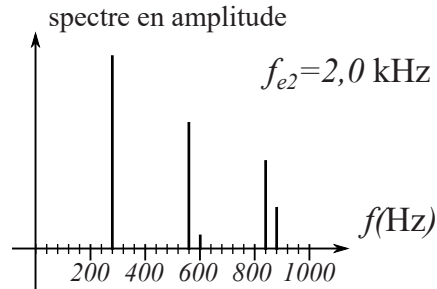
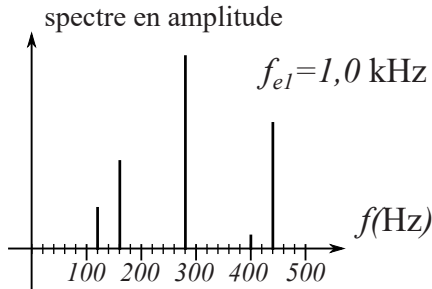
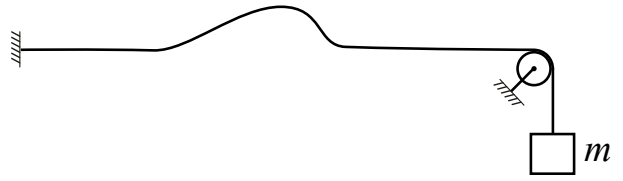
La corde est susceptible de se déplacer transversalement. On note $y(x, t)$ le déplacement, à l'instant t d'un point d'abscisse x de la corde.

Un capteur de mouvement permet d'enregistrer le déplacement transversal $y_0(t)$ du point de la corde d'abscisse x_0 . On a donc $y_0(t) = y(x_0, t)$.

Le signal est numérisé simultanément sur deux cartes d'acquisition, l'une avec la fréquence d'échantillonnage $f_{e1} = 1,0$ kHz, l'autre avec la fréquence d'échantillonnage $f_{e2} = 2,0$ kHz.

Un opérateur frappe la corde, et lance l'acquisition du signal $y_0(t)$. Une FFT est réalisée pour chacune des deux acquisitions, et on obtient la figure ci-dessous.

Au moyen de ces spectres, déterminer la tension T de la corde.



OND-2: Ondes acoustiques (CCINP 2025 Nils BOURGEOIS)

Un cornet acoustique est un dispositif tubulaire ou en forme d'entonnoir qui recueille les ondes sonores et les conduit à l'oreille.

On le considère de bonne qualité, donc la puissance acoustique est la même à l'entrée et à la sortie.

En revanche, l'intensité acoustique est différente :

$$I_{DBsortie} = I_{DBentrée} + 20 \text{ dB.}$$

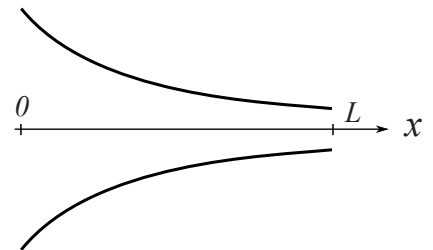
Justifier cette égalité, en exploitant les données ci-dessous.

On note $\vec{v}(x, t) = v(x, t)\vec{e}_x$ le champ des vitesses dans le cornet, et $S(x)$ la section du cornet en fonction de x .

Le cornet est une surface de révolution, de longueur $L = 10$ cm dont le rayon varie avec x , selon la loi exponentielle :

$$R(x) = R_0 \exp(-ax), \text{ avec } a = 23 \text{ m}^{-1}.$$

L'équation aux dérivées partielles vérifiée par $v(x, t)$ est :
$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{1}{S} \frac{\partial(Sv)}{\partial x} \right) - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 v}{\partial t^2} = 0, \text{ avec } c = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \chi_S}}.$$



OND-3: Durée d'un Blackout (CCINP 2025 Swan AMRANI, Mathilde PALLET et Joseph MOUROUX)

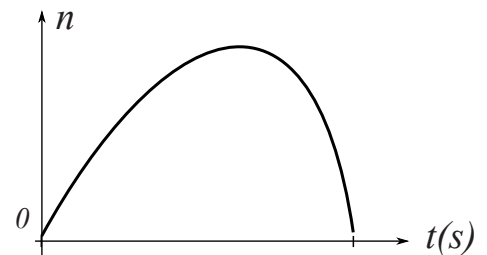
Une sonde spatiale a subi un blackout (perte de contact avec la base de la NASA) lors de sa descente sur la planète Mars. Ceci en raison du réchauffement causé par son entrée dans l'atmosphère martienne. Ce réchauffement a créé un plasma autour de la sonde pendant un certain temps. Une fois la sonde suffisamment ralentie, la création du plasma a cessé. On cherche à savoir combien de temps a duré le blackout.

Le plasma est formé de cations et d'électrons, ces derniers étant bien moins massiques que les cations.

Une onde électromagnétique plane progressive polarisée rectilignement se propage dans le plasma. Son champ électrique est $\vec{E} = \underline{E}_0 e^{i(\omega t - kz)} \vec{e}_x$

On note n le nombre d'électrons par mètre cube, m la masse d'un électron et \vec{v} sa vitesse.

La courbe ci-contre montre comment a évolué n au cours du temps.



1. Rappeler la forme générale de la densité de courant \vec{j} en fonction, notamment, de la densité volumique n d'électrons.

2. Exprimer $\frac{\partial \vec{j}}{\partial t}$ en fonction de n , m , e et \vec{E} .

3. Rappeler les équations de Maxwell dans un plasma.

4. Montrer que la relation de dispersion peut se mettre sous la forme : $k^2 = \frac{\omega^2 - \omega_p^2}{c^2}$, où c est la célérité des ondes électromagnétiques dans le vide. Donner l'expression de ω_p .

5. Que représente ω_p ?

6. Compte tenu de la courbe ci-contre, comment ferait-on pour déterminer la durée du blackout ?

OND-4: Ondes acoustiques (CCINP 2024 Jeanne DORR)

On s'intéresse à des ondes sonores dans un, puis deux fluides.

1. Rappeler les équations permettant d'établir l'équation de propagation des ondes sonores dans un fluide, dans le cadre de l'approximation acoustique, puis rétablir cette équation de propagation.

2. On considère une onde sonore, de fréquence $f = 1.0 \text{ kHz}$ dans un fluide de masse volumique au repos $\mu_0 = 1.2 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$.

La pression au repos est $P_0 = 1.0 \text{ bar}$

La célérité de l'onde est $c_0 = 340 \text{ ms}^{-1}$.

La surpression acoustique de l'onde s'écrit $p_i(x, t) = P_m \cos(\omega t - k_0 x)$, et le champ des vitesses est $\vec{v}_i(x, t) = V_m \cos(\omega t - k_0 x) \vec{e}_x$.

Exprimer puis calculer ω et k_0 .

Exprimer l'impédance acoustique Z_0 du fluide étudié ici.

3. On rappelle que l'intensité acoustique I est la valeur moyenne du produit de la surpression par la vitesse, et que le seuil d'audition est $I_{min} = 1.0 \times 10^{-12} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$.

Exprimer puis calculer V_m et P_m , sachant que le niveau sonore de l'onde est de 70 dB.

4. A présent, il y a deux fluides, non miscibles. Le premier (μ_0, c_0), occupe le demi-espace $x < 0$, tandis qu'un second (μ_1, c_1) occupe le demi-espace $x > 0$.

L'onde étudiée précédemment se propage dans le milieu d'indice 0, dans le sens des x croissants. Il existe une onde transmise :

$$\vec{v}_t(x, t) = \tau V_m \cos(\omega t - k_1 x) \vec{e}_x$$

$$p_t(x, t) = Z_1 \tau V_m \cos(\omega t - k_1 x) = \tau P_m \cos(\omega t - k_1 x).$$

Etablir l'expression de τ en fonction des impédances acoustiques Z_0 et Z_1 des deux milieux.

5. Etablir l'expression du coefficient de transmission pour la puissance sonore ou pour l'intensité sonore.

OND-5: Laser (CCINP 2023 Mathéo GIRARDET, Mathis BEGUET)

Les laser utilisés en travaux pratiques ont une puissance lumineuse $\mathcal{P} = 1.0 \text{ mW}$. Leur longueur d'onde est $\lambda = 633 \text{ nm}$. Le faisceau est quasiment cylindrique, de diamètre $d = 1.0 \text{ mm}$.

On rappelle que $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ H} \cdot \text{m}^{-1}$.

Question : Calculer l'amplitude du champ électrique et du champ magnétique de l'onde.

OND-6: Onde électromagnétique et énergie (CCINP 2023 Adalbert LUTZ)

On considère une onde électromagnétique plane progressive, se propageant dans le vide.

Son champ électrique a pour expression $\vec{E}(\vec{r}, t) = E_m \cos(\omega t - kz) \vec{e}_x$.

1. Quels sont la direction et le sens de propagation de cette onde ?

2. Cette onde est-elle polarisée ? Si oui, comment ?

3. Quelle est l'expression de son champ magnétique ? On justifiera cette expression à l'aide des équations de Maxwell, que l'on rappellera.

4. Rappeler l'expression de la densité volumique d'énergie électromagnétique.

5. On rappelle que le vecteur de Poynting s'écrit $\vec{\pi} = \frac{\vec{E} \wedge \vec{B}}{\mu_0}$. Que représente ce vecteur ? Quelle est sa dimension ? Le vérifier.

6. Etablir l'équation locale de conservation de l'énergie électromagnétique dans le vide.

On donne le formulaire : $\text{div}(\vec{a} \wedge \vec{b}) = \vec{b} \cdot \text{rot} \vec{a} - \vec{a} \cdot \text{rot} \vec{b}$.

OND-7: Corde vibrante verticale (reprend l'esprit d'un exercice de Centrale physique-chimie-info 2023)

Il y avait un script python qu'on pouvait exécuter, pour voir la façon dont l'onde se propageait.

Soit une corde de masse linéique μ , de longueur L , pendue en son extrémité supérieure A . Son extrémité inférieure B est libre. On donne à ce point A un « petit » mouvement horizontal rectiligne sinusoïdal d'amplitude a .

1. Établir la loi de tension $T(z)$ dans la corde en statique (z vertical descendant et $z = 0$ en A).

2. Soit $\xi(z, t)$ le déplacement horizontal de la corde en z à l'instant t . Établir l'équation aux dérivées partielles vérifiée par $\xi(z, t)$.

3. Quelle est la relation de dispersion pour $z \ll L$? Déterminer le nombre d'onde complexe.

OND-8: Tuyau d'orgue (Elie POCHARD CCINP 2022) Problème peu guidé

Un tuyau d'orgue est un tube de section S constante, de longueur $L = 1,0$ m, ouvert à une extrémité et bouché à l'autre.

L'air ambiant est à la température ambiante $T_0 = 20^\circ$ C. On le considère comme un gaz parfait de masse molaire $M = 29 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}$, et de rapport de capacités thermiques massiques $\gamma = 1,4$. La constante des gaz parfaits est $R = 8,31 \text{ J K}^{-1} \text{ mol}^{-1}$.

1. Donner la fréquence du fondamental, puis du premier harmonique présent.
2. Pour la fréquence fondamentale, quelle est l'amplitude des variations de la température si l'amplitude du mouvement des couches d'air est de 1,0 mm à la sortie du tuyau.

OND-9: Bruit d'avion (LSL CCP 2018) Problème ouvert

À quelle altitude un avion doit-il voler pour qu'on ne l'entende pas ?

Données

Niveau sonore d'un Airbus A380 à 10 m : 90 dB

Niveau sonore d'une campagne calme : 30 dB

OND-10: Corde métallique et champ magnétique (LSL Mines-Ponts 2019)

Une corde métallique très fine de masse linéique μ , infiniment souple, est tendue sous la tension T_0 entre les deux extrémités fixes en $x = 0$ et $x = L$.

On étudie ici les déplacements transversaux des points de la corde, dans la direction $\vec{u}_z : z(x, t)$ que l'on suppose petits, de sorte que l'on puisse faire les approximations habituelles.

La corde est parcourue par un courant d'intensité $I(t) = I_0 \cos \omega t$.

Il règne un champ magnétique non uniforme $\vec{B} = B_0 \sin\left(\frac{\pi x}{L}\right) \vec{u}_y$.

1. Établir l'équation aux dérivées partielles que vérifie $z(x, t)$.
2. Déterminer les solutions sous la forme $z(x, t) = Z_m(\omega) \sin\left(\frac{\pi x}{L} + \psi\right) \cos(\omega t + \varphi)$. Déterminer Z_m , φ et ψ .
3. Commenter.

OND-11: Axone (ligne bifilaire), dispersion et absorption (Jules MARTI Mines Ponts 2017)

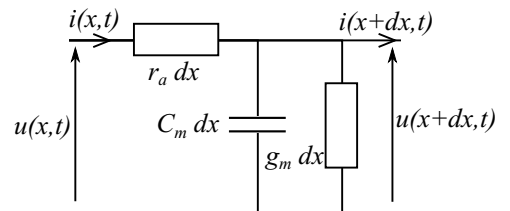
On modélise un axone par le schéma ci-contre. r_a est une résistance linéique, C_m une capacité linéique, et g_m une conductance linéique.

1. Déterminer les équations aux dérivées partielles vérifiées par $i(x, t)$ et $u(x, t)$, puis celle vérifiée uniquement par $u(x, t)$.

2. On suppose que sur cette axone se propage une onde de tension de la forme $u(x, t) = U_0 \exp(j(\omega t - kx))$. Quelle condition doivent vérifier ω , g_m et C_m pour que l'on se ramène à l'équation : $\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = r_a C_m \frac{\partial u}{\partial t}$? À quel domaine de fréquences cela correspond-il ?

3. Comment appelle-t-on une telle équation aux dérivées partielles (en d'autres termes, à quels types de phénomènes est-elle associée?). Donner un exemple d'une autre équation de ce type, en précisant les phénomènes mis en jeux.

4. Établir la relation de dispersion, liant k à ω . Montrer que le milieu est dispersif et absorbant. Déterminer la vitesse de groupe et la vitesse de phase.



OND-12: Son émis par un hélicoptère en vol stationnaire (Centrale 2019)

Un hélicoptère fait du sur-place à quelques dizaines de mètres au-dessus d'un lac gelé sur lequel un promeneur se déplace. Le promeneur entend un son assez grave et dont l'intensité est maximale lorsque l'hélicoptère se trouve dans une direction faisant un angle α proche de 45° avec l'horizontale.

1. Rappeler l'équation d'onde vérifiée par les ondes sonores dans l'air assimilé à un fluide parfait. Rappeler la gamme de fréquences correspondant au domaine audible, ainsi que les longueurs d'onde associées dans l'air.
2. Proposer une forme plausible pour l'onde de surpression émise par l'hélicoptère. Que peut-on dire du champ de vitesse associé au niveau du promeneur ?
3. Justifier que l'observation du promeneur ne peut pas s'interpréter si ce dernier ne perçoit que l'onde lui arrivant directement de l'hélicoptère. Quel(s) phénomène(s) faut-il faire intervenir ?
4. Dans la glace, la propagation des ondes acoustiques est également régie par une équation d'onde de d'Alembert.

On admet que la célérité c' de ces ondes ne dépend que de la masse volumique μ_{gl} de la glace et de son module d'Young E , dont les valeurs sont les suivantes :

- masse volumique : $\mu_{gl} = 917 \text{ kg m}^{-3}$;
- module d'Young : $E = 9,33 \text{ GPa}$.

- a. Par analyse dimensionnelle, donner l'expression de c' en fonction de μ_{gl} et de E .

b. En considérant que les propriétés structurelles des ondes acoustiques sont analogues dans l'air et dans la glace, expliquer pourquoi on peut considérer que la réflexion d'une onde sonore à l'interface air-glace est quasiment totale. (On privilégiera un raisonnement physique plutôt qu'un calcul de coefficient de réflexion.)

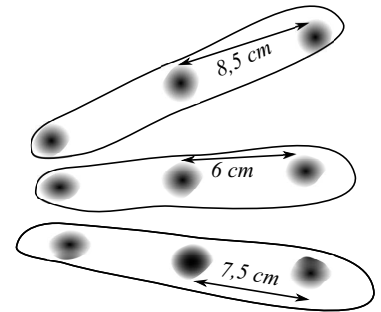
5. Déterminer un ordre de grandeur de la fréquence du son émis par l'hélicoptère.

OND-13: Bananes dans un four à micro-ondes (William BONGUET CCP 2017), pb ouvert

On étudie un four à micro-ondes, dans lequel on bloque la rotation du plateau tournant. On place sur une assiette 3 peaux de bananes. On met en route le four puis on observe la figure ci-contre, sur laquelle on constate que certaines zones sont brûlées.

Question : déterminer un ordre de grandeur de la fréquence de l'oscillateur du four à micro-ondes.

Question bonus de l'examinatrice : lister les incertitudes, et évaluer l'incertitude sur la fréquence.

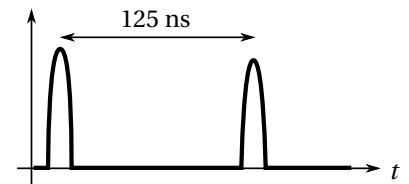


OND-14: Ligne bifilaire (Manon Sudre et Nicolas ARBEZ CCP 2016), pb ouvert

On considère un câble coaxial, de longueur $L = 16\text{ m}$. L'âme est un cylindre métallique d'axe (Oz) et de rayon $R_1 = 0.60\text{ mm}$. Le conducteur extérieur est de rayon intérieur $R_2 = 3.1\text{ mm}$. On rappelle que $\epsilon_0 = \frac{1,0 \cdot 10^{-9}}{36\pi}$. La permittivité relative de l'isolant placé entre les deux conducteurs est $\epsilon_r = 2,3$. Une partie des valeurs numériques données ci-dessus étaient en réalité à déterminer à partir de photos.

1. Dans un premier temps, on se place en régime continu : l'âme centrale est portée à un potentiel V_1 , et porte une charge $+Q$, tandis que le conducteur extérieur est porté au potentiel V_2 , et porte une charge $-Q$. On pose $U = V_1 - V_2$. On note Q_{1m} la charge portée par le conducteur intérieur sur une longueur de $1,0\text{ m}$. On note Γ la capacité linéique du câble, c'est-à-dire $\Gamma = Q_{1m}/U$. Exprimer puis calculer Γ .

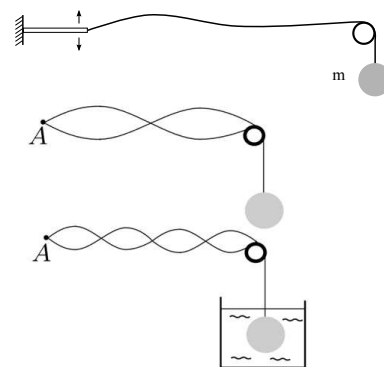
2. On se place à présent en régime dépendant du temps. Un générateur de tension est branché à l'une des extrémités du câble. Il délivre une impulsion de tension. On observe sur un écran d'oscilloscope la tension à l'entrée de la ligne (là où se trouve le générateur), l'autre extrémité étant en circuit ouvert. On observe l'oscillogramme ci-contre. Sachant que chaque tranche dx du câble est modélisée par une inductance Λdx en série, et une capacité Γdx en parallèle, déterminer la valeur Λ de l'inductance linéique de la ligne.



3. Exprimer puis calculer l'impédance caractéristique Z_c de la ligne.

OND-15: Corde de Melde et verre d'eau (Alexis GIRARDEAU CCP 2015), problème ouvert

On considère un dispositif de type corde de Melde : une corde (supposée sans raideur), de masse linéique μ , est reliée d'un côté à une lame vibrante, et de l'autre côté à une masse sphérique $m = 2.00\text{ kg}$ située après une poulie idéale. La lame vibre à une fréquence f fixée et on observe un des modes propres : celui pour lequel il y a 2 ventres de vibrations entre la lame vibrante et la poulie. On prend un gros béccher, on le remplit d'eau pure et on le place de telle sorte que la sphère soit entièrement plongée dans l'eau. Sans rien changer au mouvement de la lame ni à la longueur de la corde, on observe à nouveau un mode propre mais cette fois avec 4 ventres. En déduire le rayon de la sphère et faire l'application numérique.



OND-16: Profondeur d'un puits (Romain MARPAUX CCP 2015), problème ouvert

On cherche à déterminer la profondeur d'un puits, L , de différentes manières.

1. Dans une première expérience, on dispose d'un haut-parleur, d'un générateur basse fréquence, d'un microphone et d'un oscilloscope. Proposer un protocole expérimental permettant de déterminer la profondeur du puits.

2. On nous donne les fréquences de deux pics successifs : 63 Hz et 68 Hz . Déterminer L .

3. On lâche un caillou de masse m à l'entrée du puits. On l'entend toucher le sol au bout de $\Delta t = 2.8\text{ s}$. Déterminer une nouvelle valeur de L . Comment expliquer la différence par rapport à la valeur précédente ?

4. En se penchant au-dessus du puits pour tenter d'en éclairer le fond avec la lampe de poche de son téléphone portable, un étourdi laisse tomber le téléphone dans le puits. Il était alors en mode d'émission sonore et émettait un son pur correspondant au La3, à 440 Hz . Un autre individu, dont l'oreille est juste, évalue la fréquence entendue juste avant le choc du téléphone : entre 405 Hz et 408 Hz . En déduire un encadrement de L .

OND-17: Deux cordes reliées (Nicolas ARBEZ CCP 2015)

On considère un dispositif de type corde de Melde : une corde est tendue le long de l'axe Ox ; elle est fixée à une lame vibrante en $x = 0$, et passe sur une poulie en $x = L$, puis descend vers une masse M à laquelle elle est attachée. L'extrémité en $x = L$ est considérée fixe.

1. On note $y(x, t)$ le déplacement vertical de la corde par rapport au repos. Établir l'équation de propagation des ondes mécaniques dans la corde, supposée sans raideur, de masse linéique μ . Quelle est l'expression de la célérité c ?
2. La lame vibrante oscille à une pulsation ω . Justifier que l'on peut écrire la solution de l'équation de propagation sous la forme $y(x, t) = A \sin(\omega t + \psi_1) \sin(kx + \psi_2)$.
3. On a maintenant deux cordes raccordées par un nœud ponctuel, sans masse, en $x = 0$. La première corde s'étend de $-L_1$ à 0 et la seconde de 0 à L_2 . L'ensemble est tendu grâce à une masse M . Les masses linéiques sont μ_1 et μ_2 , avec $\mu_2 = 4\mu_1$. Quel est le lien entre la célérité c_1 dans la corde 1 et la célérité c_2 dans la corde 2?
4. Quel est le lien entre $y_1(0, t)$ et $y_2(0, t)$?
5. Établir une autre condition aux limites en $x = 0$.
6. Soit une onde incidente $\underline{y}_i(x, t) = A_i \exp(j(\omega t - k_1 x))$. Établir les expressions des ondes réfléchi et transmise puis celles des coefficients de réflexion et de transmission pour le déplacement. Calculer les valeurs numériques de ces coefficients.

OND-18: La houle (Cécile TOINARD Saint-Cyr 2015)

On cherche à mettre en équation la houle dans une zone maritime de grande profondeur. On adopte un modèle 2D, c'est-à-dire qu'aucune grandeur physique ne dépend de y . L'axe Oz est vertical ascendant. On note $P_{eq}(z)$ le champ de pression au repos, lorsque l'eau est immobile, à l'équilibre. La surface libre est alors le plan $z = 0$. On note P_0 la pression atmosphérique. Le champ des vitesses dans l'eau est $\vec{v}(M, t) = v_x(x, z, t) \vec{e}_x + v_z(x, z, t) \vec{e}_z$. L'eau est considérée comme un fluide incompressible, de masse volumique μ . En présence de houle, le champ de pression devient $P(x, z, t) = P_{eq}(z) + p(x, z, t)$, et la surface libre est repérée selon l'axe Oz par $\xi(x, t)$. On admet que dans le cadre de cet exercice, le champ des accélérations peut s'écrire $\vec{a}(M, t) = \frac{\partial \vec{v}}{\partial t}(M, t)$.

1. Établir l'expression du champ de pression $P_{eq}(z)$ à l'équilibre.
2. En présence de houle, quelles sont les 2 équations vectorielles que doit vérifier le champ des vitesses? En déduire 3 équations aux dérivées partielles scalaires.
3. On passe en notation complexe et on adopte le champ de surpression $p(x, z, t) = p_m(z) \exp(j(kx - \omega t))$. Quelles équations complexes peut-on écrire à partir des équations aux dérivées partielles précédentes?
4. Quelle est l'équation différentielle vérifiée par $p_m(z)$? La résoudre, en tenant compte du fait que la profondeur du fond marin est très importante, en faisant intervenir une constante qu'on ne cherchera pas à calculer.
5. On note $x_p(t)$ et $z_p(t)$ les coordonnées d'une particule d'eau, qui se trouve à $t = 0$ en (x_{p0}, z_{p0}) . On admet que les mouvements des particules d'eau sont de "faible amplitude" par rapport à la longueur d'onde, c'est-à-dire que $k|x_p - x_{p0}| \ll 2\pi$ et $k|z_p - z_{p0}| \ll 2\pi$. Montrer que la trajectoire de cette particule est un cercle.

OND-19: Ionosphère et pulsar (Olivier NACHIN Centrale 2018)

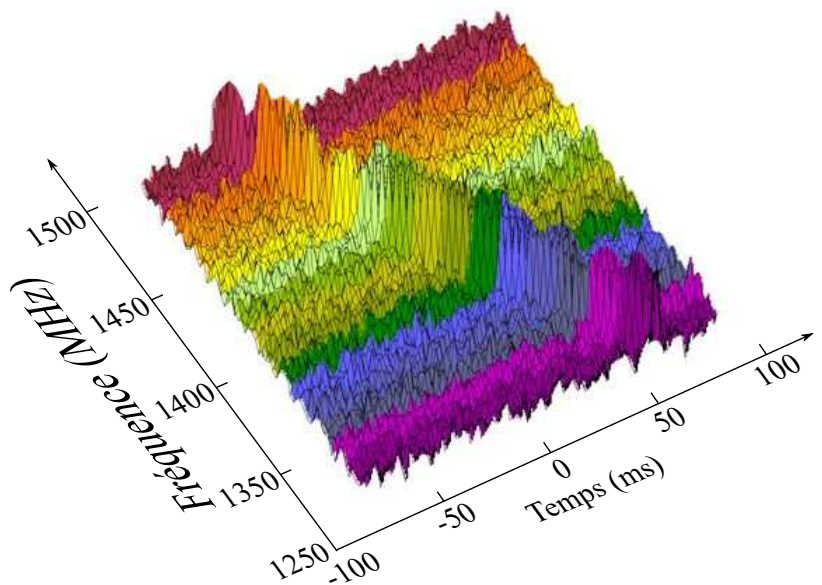
1. Rappeler les hypothèses pour établir la conductivité complexe d'un plasma.

2. Établir la relation de dispersion dans le plasma.

3. Un pulsar émet une impulsion radio en direction de la Terre. La figure ci-contre donne l'amplitude du signal en fonction de la fréquence et du temps. L'origine des temps est fixée arbitrairement au milieu de la plage temporelle, le but de la figure étant de montrer le décalage entre les instants de réception des différentes fréquences présentes dans l'impulsion radio. Les fréquences apparaissant sur la figure sont très grandes devant la fréquence plasma f_p . On suppose que l'ionosphère est une couche homogène d'épaisseur $H = 600$ km. On donne la masse d'un électron : $m_e = 9.11 \times 10^{-31}$ kg.

Exprimer puis calculer le nombre d'électrons par unité de volume dans l'ionosphère.

4. En réalité, le nombre d'électrons par unité de volume n'est pas uniforme. C'est une fonction $n(z)$ de l'altitude z . Montrer que la figure ci-contre permet de déterminer l'intégrale de $n(z)$ sur toute l'épaisseur de l'ionosphère.



POINT FINAL!