

---

**Physique : Interrogation n°3**

---

**Jeudi 9 Mars****Durée : 1h30**

---

Barème indicatif : exercice 1 sur 12 points, exercice 2 sur 8 points.

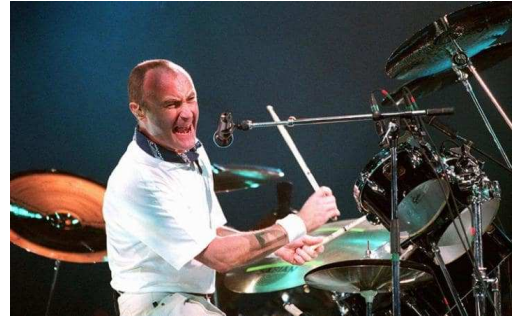
Le sujet est constitué de deux exercices indépendants

Document autorisé : une feuille de synthèse RECTO manuscrite originale

Calculatrice autorisée : type collègue non programmable

**Exercice 1 : Transmission des ondes acoustiques dans l'oreille**

*Le célèbre chanteur Phil Collins (ci-contre), a arrêté il y a peu sa carrière à cause de graves problèmes auditifs causés par ses nombreuses tournées et son rôle de batteur dans le groupe Génésis. Il existe différents types de surdités telles que la surdité de transmission ou de perception (neurosensorielle). Le but de cet exercice est de comprendre ce qu'est une surdité de transmission et le rôle de l'oreille moyenne dans la structure de l'oreille humaine.*



*Les ondes sonores captées par l'oreille externe font vibrer le tympan, qui mobilise la chaîne d'osselets de l'oreille moyenne. L'oreille moyenne transfère ainsi le son du milieu aérien (oreille externe) au milieu liquide de la cochlée (oreille interne). Nous allons comprendre l'utilité d'un tel système et plus particulièrement de la chaîne d'osselets. Nous développerons un modèle de transmission des ondes sonores tout d'abord simplifié sans osselet (partie A) et en présence d'osselets (partie B).*

**Partie A – Interface air/liquide**

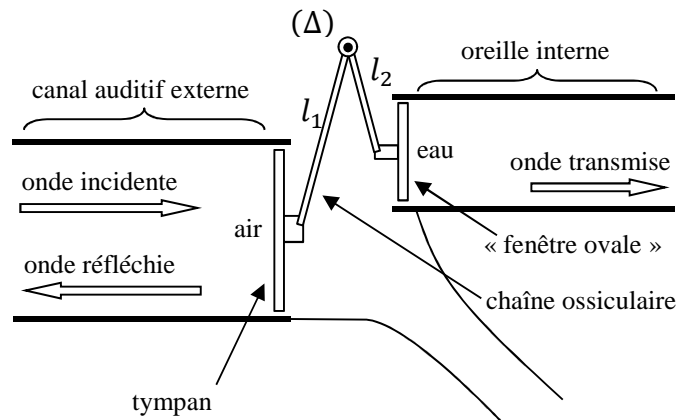
*On propose de calculer la fraction de puissance sonore totale transmise d'un milieu aérien à un milieu liquide (que l'on assimilera à de l'eau) à travers une simple membrane.*

*Une onde acoustique incidente plane progressive harmonique se propage dans la direction de l'axe  $Ox$  d'un tuyau cylindrique. Une membrane de surface plane et de masse négligeable sépare l'espace en deux régions occupées par deux fluides parfaits. Le fluide 1 (air) occupe l'espace s'étendant de  $-\infty$  à  $x = 0^-$  et le fluide 2 (eau) l'espace s'étendant de  $x = 0^+$  à  $+\infty$ . Les impédances acoustiques seront notées  $Z_1$  et  $Z_2$  et la célérité des ondes acoustiques s'y propageant  $c_1$  et  $c_2$ .*

- A.1)** Quelles relations les grandeurs liées aux ondes doivent elles vérifier à la traversée de l'interface ? On utilisera les indices  $i$ ,  $r$  et  $t$  désignant respectivement les ondes incidente, réfléchie et transmise.
- A.2)** Définir et calculer les coefficients de réflexion et de transmission  $r_v$  et  $t_v$  pour les vitesses des particules.
- A.3)** On donne  $Z_1 = 4,2 * 10^2$  SI et  $Z_2 = 1,5 * 10^6$  SI. Exprimer puis calculer les coefficients de transmission et de réflexion en puissance (totale)  $T$  et  $R$  à l'interface. Commenter vos résultats.

## Partie B – La chaîne d’osselets

Nous modélisons maintenant la transmission du son par l’oreille moyenne entre le tympan de l’oreille externe et la « fenêtre ovale » de l’oreille interne. L’oreille moyenne est un amplificateur de pression qui est schématisé sur la figure ci-contre : les articulations des osselets sont modélisées par des bras de levier en rotation autour d’une liaison pivot d’axe  $(\Delta)$ . Les longueurs des osselets étant différentes, les longueurs  $l_1$  et  $l_2$  des bras de levier sont telles que  $l_1/l_2 \approx 20$ . Le tympan est une membrane d’aire  $S_1 = 60 \text{ mm}^2$  et la fenêtre ovale une membrane d’aire  $S_2 = 3 \text{ mm}^2$ .



Nous allons montrer que ces rapports de leviers et de surfaces font du système tympano-ossiculaire un véritable adaptateur d'impédance qui assure un transfert quasi intégral de la puissance sonore à l'oreille interne. On considérera, les déplacements étant petits, que **les bras de levier sont quasiment orthogonaux à la direction de propagation des ondes.**

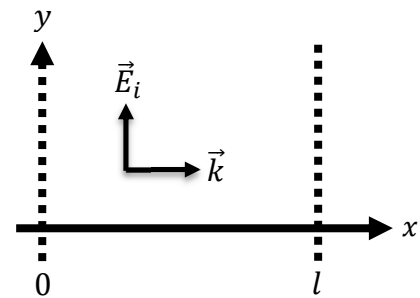
- B.1)** La chaîne ossiculaire est considérée comme un unique solide en rotation autour de  $(\Delta)$  à la vitesse angulaire  $\Omega$ . L'étrier est l'osselet relié à la fenêtre ovale située à la distance  $l_2$  de  $(\Delta)$ , la vitesse de la fenêtre ovale vaut donc  $l_2\Omega$ . De même le marteau est l'osselet relié au tympan situé à la distance  $l_1$  de  $(\Delta)$ , la vitesse du tympan vaut donc  $l_1\Omega$ . Ecrire la relation entre  $v_i$ ,  $v_r$  et  $v_t$  et les longueurs  $l_1$  et  $l_2$  (1<sup>ère</sup> équation de continuité).
- B.2)** En négligeant le moment d'inertie  $J$  de la chaîne ossiculaire, établir une deuxième équation de continuité établissant une relation entre  $p_i$ ,  $p_r$  et  $p_t$  : pour ce faire, on exprimera tout d'abord la force de pression de l'air exercée sur le tympan ainsi que celle exercée sur la fenêtre ovale ; ensuite on appliquera le principe fondamental de la dynamique en rotation faisant intervenir le moment des forces  $J \frac{d\Omega}{dt} = \sum M(\vec{F}) \sim 0$ , car le moment d'inertie  $J$  est considéré négligeable .
- B.3)** Exprimer le coefficient de transmission  $t'_v$  pour les vitesses des particules.
- B.4)** En déduire que le coefficient de transmission en puissance  $T'$  de l'oreille externe à l'oreille interne vaut  $T' = \frac{4W_1W_2}{(W_1+W_2)^2}$  avec  $W_1 = Z_1S_1l_1^2$  et  $W_2 = Z_2S_2l_2^2$  ; **cette question sera notée en bonus.**
- B.5)** Justifier alors par une application numérique que le système tympano-ossiculaire se comporte comme un véritable adaptateur d'impédance.

Sans ce système, la quasi-totalité de l'énergie sonore serait perdue. Un mauvais fonctionnement des osselets est grave et entraîne une perte d'audition dite « surdité de transmission ».

## Exercice 2 : Ondes électromagnétiques dans un four micro-ondes

Dans un four micro-ondes, le chauffage des aliments est lié à l'énergie thermique créée par l'oscillation des molécules d'eau qui les constituent. Celles-ci sont mises en mouvement par la présence d'un rayonnement électromagnétique dans la cavité du four. Les ondes électromagnétiques sont générées à l'aide d'un dispositif appelé magnétron et se propagent jusqu'à la cavité du four à travers un guide d'ondes. Une fois dans la cavité, elles sont piégées dans un volume délimité par les conducteurs qui forment les parois de la cavité. Pour simplifier l'étude du comportement de l'onde dans le four, on se restreindra à un modèle où la direction de propagation des ondes ne s'effectue que selon une seule dimension de la cavité.

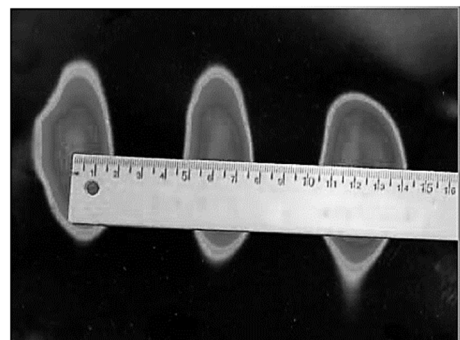
On considère une onde électromagnétique harmonique plane, progressive et uniformément polarisée rectilignement selon l'axe  $\vec{u}_y$ , d'amplitude  $E_{i0}$  et de vecteur d'onde angulaire  $\vec{k} = k\vec{u}_x$  où  $k$  est un réel positif. Cette onde se propage dans un milieu limité par deux plans conducteurs parfaits non chargés en  $x = 0$  et  $x = l$ , comme représenté sur la figure ci-contre.



Le milieu a les caractéristiques du vide, et les ondes se propagent à la vitesse  $C = 3 * 10^8$  m/s.

- 1) Donner l'expression complexe du champ électrique  $\vec{E}_i$  décrit ci-dessus. Justifier en deux ou trois phrases l'existence d'une onde électromagnétique de même fréquence et d'amplitude  $E_r$  se propageant dans la direction opposée.
- 2) A l'aide d'une démonstration détaillée, calculer l'onde résultante  $\vec{E}$  dans la cavité et donner l'expression réelle du champ  $\vec{E}$ .
- 3) Caractériser complètement l'onde résultante à partir du champ  $\vec{E}$ . En particulier, donner les fréquences possibles pour l'existence de cette onde en fonction de  $l$  et des propriétés du milieu.
- 4) Application numérique : le magnétron génère une onde électromagnétique de fréquence  $f$  égale à 2,45 GHz. Quelle doit être la longueur minimum  $l$  de la cavité pour que l'on puisse y placer une assiette de 26 cm de diamètre ?

Une expérience a été réalisée en plaçant du papier thermochrome (c'est-à-dire changeant de couleur sous l'effet de la chaleur) dans un four micro-ondes en ayant pris soin de retirer auparavant le plateau tournant. La figure ci-contre montre les zones du papier qui ont été chauffées au cours de l'expérience.



- 5) La nature de l'onde précédemment calculée est-elle compatible avec le résultat de l'expérience ?
- 6) En connaissant la fréquence de l'onde émise par le magnétron (2,45 GHz) et en utilisant les informations de l'illustration, retrouver la valeur de la vitesse de propagation de la lumière dans l'air.
- 7) A votre avis, quelle est l'utilité du plateau tournant dans le four micro-ondes ?