

Son et audition

Calculatrices autorisées.

L'oreille se compose de trois parties : l'oreille externe, l'oreille moyenne et l'oreille interne. Les deux premières assurent le transfert des ondes sonores à l'oreille interne. L'oreille interne, ou cochlée, transforme ce stimulus en influx nerveux (cf. document 1).

I Ondes acoustiques et oreille externe

I.A - Équation des ondes acoustiques

On s'intéresse à la propagation unidimensionnelle (selon Ox) d'ondes sonores dans un fluide. Un fluide, supposé parfait et soumis aux seules forces de pression, est caractérisé à l'équilibre par des valeurs uniformes P_0 de la pression et ρ_0 de la masse volumique. Du point de vue thermodynamique, ses évolutions sont considérées comme isentropiques, auxquelles correspond le coefficient de compressibilité χ_s . Le passage d'une onde sonore crée une perturbation et le fluide se déplace en de petits mouvements autour de l'équilibre, les champs de pression et de masse volumique devenant : $P(x, t) = P_0 + p(x, t)$ et $\rho(x, t) = \rho_0 + \mu(x, t)$.

I.A.1. Qu'appelle-t-on approximation acoustique ? Quel est l'ordre de grandeur de la surpression p pour des ondes acoustiques dans l'air ?

I.A.2. Écrire et linéariser les équations locales de la mécanique des fluides et l'équation traduisant l'hypothèse thermodynamique effectuée. Établir l'équation de propagation des ondes acoustiques pour la surpression. Quelle est la célérité c de ces ondes ?

I.A.3. Dans le modèle du gaz parfait, établir la loi de variation de la célérité avec la température. Calculer c dans l'air dans les conditions normales de pression ($P_0 = 1,0 \times 10^5$ Pa) à la température de 290 K.

I.A.4. La célérité des ondes acoustiques dans l'eau est de l'ordre de 1500 m.s^{-1} . Qu'est ce qui peut expliquer cette différence par rapport à celle trouvée dans l'air ?

I.A.5. Alors que l'on n'a aucun problème à localiser l'origine d'un son aérien, on est incapable, la tête sous l'eau, de déterminer dans quelle direction se situe un bateau dont on entend le bruit d'hélice. Pourquoi ?

I.A.6. À partir des mêmes équations précédentes, on peut établir l'équation

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{1}{2} \rho_0 v^2 + \frac{1}{2} \chi_s p^2 \right) + \text{div} (p\vec{v}) = 0$$

Quelle est la signification physique de cette équation ? Identifier et interpréter chacun de ses termes. Que représente notamment le flux de $p\vec{v}$ à travers une surface ? Citer une équation analogue dans un autre domaine de la physique.

I.B - Impédance et intensité acoustique

I.B.1. On considère une onde plane progressive pour laquelle la surpression et la valeur algébrique de la vitesse des particules de fluide dans la direction de propagation ne dépendent que de la variable $t - x/c$ et s'écrivent donc sous la forme $p(x, t) = p(t - x/c)$ et $v(x, t) = v(t - x/c)$. On définit l'impédance acoustique liée à une telle onde comme le quotient $Z = p/v$. Dans un fluide illimité, montrer que cette impédance ne dépend que des caractéristiques du fluide et l'exprimer en fonction de la masse volumique ρ_0 et de la célérité c . Calculer Z pour l'air et pour l'eau dans les conditions des questions précédentes.

I.B.2. On considère maintenant une onde plane progressive monochromatique de pulsation ω : $p(x, t) = p_0 e^{j(\omega t - kx)}$. On définit l'intensité d'une onde acoustique par la valeur moyenne de la norme du vecteur $p\vec{v}$. Exprimer l'intensité I de cette onde en fonction de p_0 , ρ_0 et c .

I.B.3. On définit le niveau d'intensité acoustique en dB comme $I_{\text{dB}} = 10 \log(I/I_0)$, où I_0 est l'intensité acoustique correspondant au seuil d'audition. Quelle serait l'amplitude de déplacement de l'onde sonore incidente au seuil d'audition et au seuil de la douleur pour un son de fréquence 440 Hz ?

I.C - L'oreille externe

I.C.1. Le pavillon de l'oreille concentre l'énergie sonore. Pourquoi ?

I.C.2. Pour une onde sonore progressive dans un tuyau rempli d'air, on souhaite réaliser une impédance nulle à l'une de ses extrémités et une impédance infinie à l'autre. Proposer les configurations correspondantes. Quelle est la nature de l'onde résultant de la superposition des ondes incidente et réfléchi ?

I.C.3. Le canal auditif externe, tube d'environ 3 cm de long, joue le rôle de caisse de résonance dépendant de la fréquence. Autour de quelle fréquence le son sera-t-il particulièrement amplifié ? Conclure.

I.D - Protection acoustique

On s'intéresse à la protection auditive d'un tromboniste (documents 2, 3 et 4).
La réponse à ces questions nécessite d'y consacrer un temps suffisant. Le candidat devra préciser la manière dont il extrait les informations des différents documents. La qualité de la démarche et des explications sera évaluée tout autant que le résultat final.

I.D.1. En assimilant le trombone à un tuyau sonore de section constante, compléter le tableau 1.

Position de la coulisse	1	2	3	4	5	6	7
Fréquence de la note (Hz)	115,2						
Longueur du tuyau (m)	2,950	3,126					4,174

Tableau 1

I.D.2. Décrire la structure des ventres et des noeuds de pression et de vitesse dans un trombone produisant une note pure, de fréquence f fixée.

I.D.3. Quelle est la gamme de fréquences correspondant à la tessiture du trombone à coulisse ?

I.D.4. Pourquoi est-il nécessaire à un tromboniste de se protéger les oreilles ? Quel type de protection est adapté quand il s'entraîne seul chez lui ? Quand il joue avec un orchestre symphonique ?

II Le rôle de l'oreille moyenne

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 en comprendre l'utilité.

II.A - Onde acoustique et conditions aux limites

Une onde acoustique incidente plane progressive harmonique se propage dans la direction de l'axe Ox d'un tuyau cylindrique. Une surface plane de masse négligeable sépare l'espace en deux régions occupées par deux fluides parfaits. Le fluide 1 occupe l'espace s'étendant de $-\infty$ à $x = 0$ et le fluide 2 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 . Une partie de l'onde acoustique incidente est réfléchi à l'interface entre les deux milieux alors qu'une autre est transmise.

II.A.1. Quelles relations les grandeurs liées aux ondes acoustiques présentes dans les deux milieux doivent-elles vérifier à la traversée de l'interface ?

II.A.2. Déterminer les coefficients de réflexion r et de transmission t pour la suppression de l'onde acoustique incidente en fonction de Z_1 et Z_2 .

II.A.3. Déterminer R et T , coefficients de réflexion et de transmission relatifs à l'intensité sonore I en fonction de Z_1 et Z_2 .

II.A.4. Calculer R et T au passage de l'air à l'eau. Quelle est la chute de niveau d'intensité acoustique correspondant au passage de l'air à l'eau ?

II.A.5. Conclure sur l'utilité de la chaîne d'osselets.

II.B - La chaîne d'osselets

L'oreille moyenne est un amplificateur de pression qui est schématisé figure 1 : les articulations des osselets sont modélisées par des bras de levier, autour d'une liaison pivot (correspondant à l'ancrage de l'enclume). Les longueurs d_1 et d_2 des bras de levier diffèrent du fait des longueurs inégales des osselets et sont telles que $d_1/d_2 \approx 1,3$.

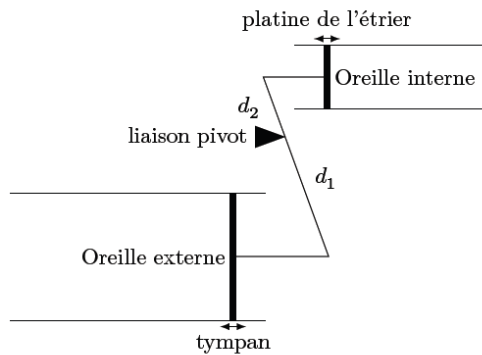


Figure 1 — Schématisation de l'oreille moyenne

II.B.1. Sachant que la surface de la platine de l'étrier est environ 20 fois inférieure à celle du tympan, déterminer l'amplification de pression théorique correspondant.

II.B.2. À quel gain cela correspond-t-il pour le niveau d'intensité acoustique ?

Données numériques

Permittivité diélectrique du vide	$\epsilon_0 = 8,85 \times 10^{-12} \text{ F.m}^{-1}$
Perméabilité magnétique du vide	$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ H.m}^{-1}$
Constante des gaz parfaits	$R = 8,31 \text{ J.K}^{-1}.\text{mol}^{-1}$
Constante d'Avogadro	$N_A = 6,02 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$
Constante de Boltzmann	$k_B = 1,38 \times 10^{-23} \text{ J.K}^{-1}$
Masse molaire de l'air	$M_{air} = 28,8 \text{ g.mol}^{-1}$
Rapport des capacités thermiques massiques isobares et isochores de l'air	$\gamma = C_p/C_v = 1,40$

Document 1 — L'oreille : un organe fragile et complexe

D'après : Suva (<http://www.suva.ch>) « Musique et troubles de l'ouïe »

Oreille externe

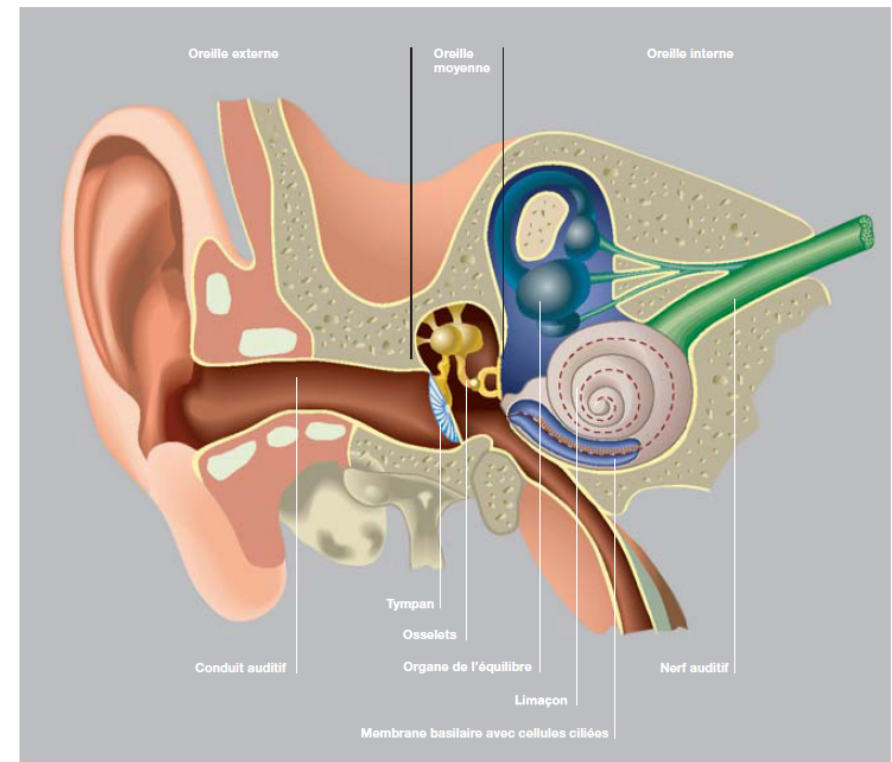
Elle se compose du pavillon de l'oreille (qui aide à localiser les sources sonores) et du conduit auditif. Ce dernier se termine par le tympan, qui réagit aux variations de pression comme la membrane d'un microphone.

Oreille moyenne

Les vibrations du tympan sont amplifiées dans l'oreille moyenne, puis transmises à l'oreille interne par trois osselets (le marteau, l'enclume et l'étrier). Le marteau est relié au tympan et l'étrier à la « platine de l'étrier » qui transmet la vibration au liquide de la cochlée.

Oreille interne

L'oreille interne abrite le limaçon (cochlée), de la taille d'un petit pois. Rempli d'un liquide, celui-ci est partagé en deux dans le sens de la longueur par la membrane basilaire.



Cellules ciliées

Les sons font vibrer la membrane basilaire de manière sélective : les plus aigus sont captés sur la partie antérieure, tandis que les graves pénètrent au fond du limaçon. Ce mode de fonctionnement est comparable à celui d'un analyseur de fréquence. La membrane basilaire est tapissée d'environ 5000 cellules ciliées, des capteurs qui transforment les vibrations sonores en impulsions électriques transmises aux nerfs auditifs. Les 20 000 cellules ciliées externes jouent également un rôle important : véritables amplificateurs, elles permettent d'adapter la réaction de la membrane en fonction du signal à traiter.

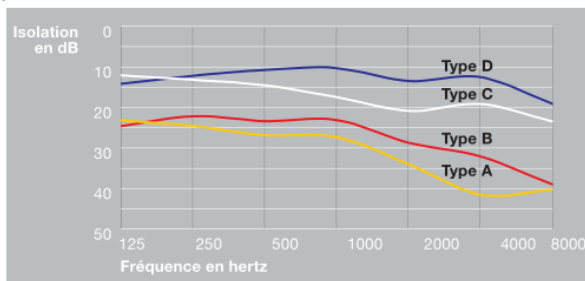
La parfaite coordination de ces éléments autorise des performances extraordinaires

- l'intensité acoustique correspondant au seuil d'audition est $I_0 = 1 \times 10^{-12} \text{ W.m}^{-2}$, celle correspondant au seuil de la douleur $I_s = 1 \text{ W.m}^{-2}$;
- la gamme de fréquence allant de 20 Hz à 10 ou 20 kHz (selon l'âge) recouvre trois décades. À cela s'ajoute une excellente capacité de résolution, l'oreille distingue des signaux qui restent confus pour un analyseur sophistiqué, tels que la mélodie d'un instrument au sein d'un orchestre ;
- l'ouïe dispose également d'une capacité de localisation très développée, qui lui permet d'identifier la provenance d'un cliquetis dans l'air à 3° près.

Document 2 — Protectors d'ouïe

D'après : Suva (<http://www.suva.ch>) « Musique et troubles de l'ouïe »

Les protecteurs d'ouïe ont désormais conquis le public, des fosses d'orchestre à la Street Parade. Le manque d'homogénéité de l'atténuation des fréquences hautes et basses altère la sonorité. On en trouve de différents types et à différents prix, du moins cher (tampons auriculaires en mousse de type A) au plus cher (protections otoplastiques de type D).



Document 3 — Le trombone

D'après : <http://fr.wikipedia.org> et <http://dictionnaire.metronimo.com>

Le trombone est un instrument de musique à vent et à embouchure de la famille des cuivres clairs. Le terme désigne implicitement le trombone à coulisse caractérisé par l'utilisation d'une coulisse télescopique. Le trombone à coulisse est réputé pour être l'un des instruments les plus difficiles, mais également l'un des plus puissants d'un orchestre. Le trombone peut jouer des variations de nuances (intensités mesurées à 20 cm en sortie du trombone) allant d'une nuance pp (pianissimo = très faible) correspondant à 85 dB à une nuance ff (fortissimo = très fort) correspondant à 115 dB.

Le trombone peut, par variation de la position de la coulisse, émettre des sons de hauteurs différentes. On construit la version ténor en sib, en lui donnant, dans sa première position, c'est-à-dire, celle où la coulisse ne fonctionne pas, pour note fondamentale le sib de 115,2 Hz et pour longueur théorique 2,950 m. Les allongements produisent six autres positions, dont le son est chaque fois abaissé d'un demi-ton. Les allongements de la coulisse sont obtenus par les mouvements du bras droit, la main gauche servant avec les lèvres à exercer le degré de pression nécessaire pour obtenir les harmoniques.

Position de la coulisse	Fondamentale
1	sib
2	la
3	lab ou sol#
4	sol
5	solb ou fa#
6	fa
7	mi



On calcule les allongements d'après les différences de longueur de tube qui correspondent à la production des sons fondamentaux. Pour un trombone ténor avec une première position, sib, d'une longueur de 2,950 m la deuxième, la (soit un demi-ton en dessous), a une longueur de 3,126 m et la septième de 4,174 m. Grâce aux fréquences harmoniques que l'on peut tirer de l'instrument pour chaque position de coulisse, la tessiture (gamme de fréquences) du trombone s'étend sur trois octaves et une quinte.

Une octave est l'intervalle séparant deux sons dont la fréquence fondamentale du plus aigu est le double de celle du plus grave (entre deux do contigus par exemple). La quinte est l'intervalle séparant deux sons dont les fréquences fondamentales sont dans le rapport 2/3. Le ton sépare deux sons dont les fréquences sont dans le rapport 8/9.

Document 4 — Limites d'exposition au bruit ; niveau sonore audible

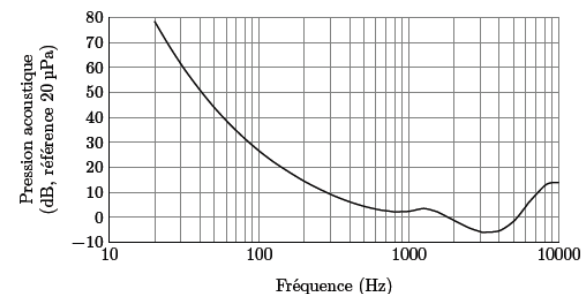
D'après : Centre canadien d'hygiène et de sécurité au travail

Le tableau ci-dessous donne les limites d'exposition au bruit en milieu de travail exprimées sous forme de durées maximales d'exposition admissibles pour un niveau de référence de 85 dB et un coefficient d'équivalence de 3 dB.

Niveau sonore (dB)	Durée quotidienne maximale admissible	Niveau sonore (dB)	Durée quotidienne maximale admissible
85	8 heures	97	30 minutes
88	4 heures	100	15 minutes
91	2 heures	103	7 minutes
94	1 heure	106	3 minutes

D'après : norme ISO 389-7:2005

La courbe ci-dessous donne le seuil d'audition pour un individu otologiquement normal, âgé de 18 à 25 ans. Elle correspond à l'écoute binaurale en champ libre d'un son pur (onde plane progressive sinusoïdale) dont la source se trouve directement en face de l'auditeur. Le niveau de pression acoustique est mesuré, en l'absence de l'auditeur, à la position qu'aurait dû occuper le centre de sa tête.



Étude de la mécanique de l'audition humaine

Nous nous proposons d'étudier les principaux mécanismes qui entrent en jeu dans l'audition. L'oreille humaine se décompose en trois parties (Figure 1) que nous allons étudier successivement.

- Les différentes parties de ce problème sont indépendantes et peuvent donc être traitées séparément.
- Certaines questions ne requièrent aucun calcul : vous serez alors évalué(e) sur la qualité de votre argumentation et votre sens physique.

Tout au long de ce problème, les grandeurs physiques sinusoïdalement oscillantes seront représentées par une grandeur complexe notée $\underline{x}(t) = X_m e^{-i\omega t}$.

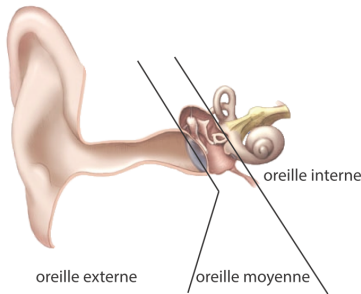


FIGURE 1 - Schéma de l'oreille humaine

I. L'oreille externe : un pavillon acoustique

On considère l'air comme un fluide initialement au repos, c'est-à-dire tel que les champs de vitesse, de pression et de masse volumique s'écrivent :

$$\vec{v}(\vec{r}, t) = \vec{0} \quad P(\vec{r}, t) = P_0 \quad \rho(\vec{r}, t) = \rho_0$$

En présence d'une petite perturbation ces champs deviennent :

$$\vec{v}(\vec{r}, t) \neq \vec{0} \quad P(\vec{r}, t) = P_0 + p(\vec{r}, t) \quad \rho(\vec{r}, t) = \rho_0 + \rho_a(\vec{r}, t)$$

Et on fera l'hypothèse de petites perturbations par rapport à l'équilibre, c'est-à-dire $p/P_0 \ll 1$ et $\rho_a/\rho_0 \ll 1$.

L'oreille externe se comporte comme un pavillon acoustique qui intercepte les ondes des plans acoustiques se propageant dans l'air pour les amener jusqu'au tympan. Pour comprendre son utilité, nous modélisons l'oreille externe par un tuyau circulaire d'axe z et dont la section $S(z)$ varie en fonction de l'abscisse z (Figure 2). On s'intéresse alors au volume d'air situé entre les abscisses z et $z + dz$.

1

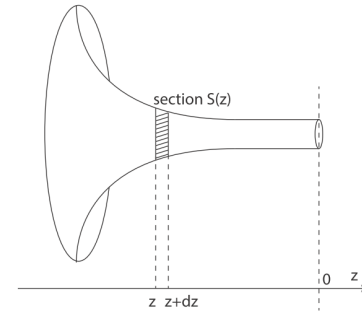


FIGURE 2 - Schéma du pavillon acoustique

1. On souhaite établir l'équation qui régit la propagation dans ce conduit. Pour cela on suppose tout d'abord que les différentes grandeurs physiques ne dépendent spatialement que de la variable z . Dans quelle condition cette hypothèse sera vérifiée ?
2. Dans ce cadre, quelles conditions une transformation thermodynamique doit-elle satisfaire pour pouvoir être considérée comme isentropique ? Nous nous placerons dorénavant dans cette situation.
3. Donner alors la définition de la compressibilité, notée χ_0 , d'un fluide subissant une transformation satisfaisant cette condition.
4. En déduire une relation, après linéarisation, qui relie $p(z, t)$, $\rho_a(z, t)$, ρ_0 et χ_0 .
5. Exprimer la variation de masse du volume d'air situé entre les abscisses z et $z + dz$ pendant un intervalle de temps dt .
6. Linéariser l'équation précédente pour obtenir l'équation de conservation de la masse dans le conduit considéré.
7. Appliquer la relation fondamentale de la dynamique à l'élément de volume compris entre les abscisses z et $z + dz$ (*remarque* : on n'oubliera pas de prendre en compte les forces de pression dues au changement de section).
8. Linéariser l'équation précédente et ne garder que les termes d'ordre 1.
9. À partir des équations précédentes, obtenir l'équation de propagation des ondes vérifiée par la vitesse particulaire, v , dans un tel conduit :

$$\frac{\partial^2 v}{\partial t^2} - c^2 \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{1}{S} \frac{\partial S v}{\partial z} \right) = 0 \quad \text{où} \quad c^2 = \frac{1}{\rho_0 \chi_0}$$

On considère désormais que la section du conduit a un profil exponentiel du type : $S(z) = S_0 e^{-\frac{z}{\delta}}$.

10. Obtenir l'équation d'onde vérifiée par la vitesse particulaire dans cette géométrie.
11. Quelle différence a-t-on par rapport à une équation d'onde en espace libre dans un fluide homogène ?

2

12. En déduire la relation de dispersion des ondes en cherchant une solution sous la forme $\underline{v}(z, t) = v_0 e^{ikz - i\omega t}$ (k étant éventuellement complexe, que l'on notera $k = k' + ik''$).

13. A quelle condition a-t-on une solution dont le nombre d'onde est imaginaire pur ? Est-ce vérifié pour les fréquences caractéristiques de la parole (100 Hz - 1 kHz), dans le cas de l'oreille humaine où l'on considère que la longueur caractéristique du pavillon est $\delta = 5$ mm ? On rappelle $c_{\text{air}} = 340$ m.s⁻¹.

14. *Application numérique.* On considère une onde plane venant de $z = -\infty$ dans ce conduit. Au niveau de l'entrée de l'oreille ($z \approx -30$ mm), l'amplitude est celle du seuil de l'audition, soit $v_1 = 50$ nm.s⁻¹. Évaluer la vitesse particulière à 1 kHz au niveau du tympan ($z = 0$) ? (*remarque* : on donne $e^6 \approx 400$ et on ne gardera que la solution de plus forte amplitude au lieu de faire la superposition de 2 solutions).

15. Tracer l'allure de la solution $v(z, t)$ retenue pour la fréquence de 1 kHz en fonction de z , à un instant t où cette vitesse est extrême.

16. Conclure quant au rôle de l'oreille externe dans ce modèle.

II. L'oreille moyenne

Les cellules sensorielles de l'audition sont situées dans l'oreille interne et baignent dans un milieu aqueux, alors que l'oreille externe est quant à elle située dans l'air. Il faut donc que les ondes acoustiques aériennes soient transformées en ondes se propageant dans un milieu aqueux.

Afin de fixer les ordres de grandeur, nous considérons ici une onde plane monochromatique de pulsation ω qui arrive en incidence normale sur une interface infinie entre deux milieux fluides, définis par leurs célérités c_1 et c_2 et leurs masses volumiques ρ_1 et ρ_2 . L'interface sera prise comme le plan Oxy .

17. On note p_i , p_r et p_{tr} la pression des ondes incidente, réfléchi et transmise, v_i , v_r et v_{tr} les vitesses particulières associées. En appliquant les relations de continuité à l'interface, donner les expressions des coefficients de réflexion $r = \frac{p_r}{p_i}$ et transmission $\tau = \frac{p_{tr}}{p_i}$ en pression.

18. Exprimer les coefficients de réflexion R et de transmission T des puissances acoustiques en fonction de p_i , p_r , p_{tr} , v_i , v_r et v_{tr} . Calculer R et T .

19. *Application numérique.* Calculer l'intensité acoustique transmise à l'interface air/eau. On

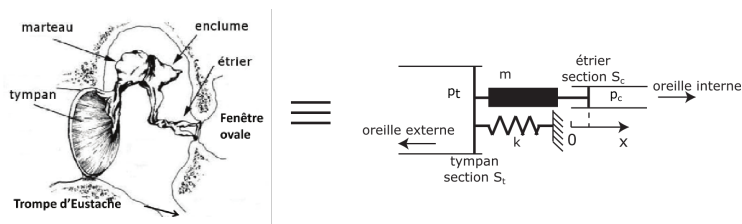


FIGURE 3 - On modélise l'oreille moyenne (à gauche) par un système masse-ressort qui relie rigidement un piston du côté de l'oreille externe de section S_e à un autre piston du côté de l'oreille interne de section S_i . On note $x(t)$ l'abscisse de ce second piston à l'instant t .