

Devoir test de physique n° 6

Cet énoncé comporte deux problèmes. Durée : 4 heures. L'utilisation d'une calculatrice est autorisée.

Problème 1 Transmission d'énergie électrique sans fil

L'électricité de demain pourra-t-elle se passer de fils électriques ? La nécessité actuelle de supprimer les fils et réduire l'encombrement, ou encore la multiplication des appareils électriques à faible consommation contribuent au développement des techniques et dispositifs de transmission d'énergie sans fil, inspirés des travaux pionniers de Nikola Tesla au début du XX^e siècle. Les applications sont nombreuses et touchent divers domaines (voir figure 1) : de l'usage domestique (recharge d'appareils avec batteries, alimentation de petits appareils courants) au monde industriel (recharge de voitures électriques, applications diverses de la transmission de puissance, pour les trains par exemple), en passant par la médecine (apport d'énergie électrique aux implants, sans effectuer d'opérations chirurgicales lourdes).



FIGURE 1 – Quelques applications de la transmission d'énergie sans fil, de gauche à droite : recharge de téléphone portable, recharge sans fil d'une voiture Nissan Leaf[®], pacemaker.

Il existe aujourd'hui différents moyens de transmission de puissance sans fil. Citons notamment le couplage inductif non résonant en champ proche, le couplage inductif résonant en champ proche (voir figure 2) et le rayonnement en champ lointain (voir figure 3). Les caractéristiques, avantages et inconvénients de ces techniques sont donnés dans le tableau ci-après. Nous développerons dans cette partie certains aspects du couplage inductif, non résonant puis résonant.



FIGURE 2 – À gauche : couplage inductif non résonant en champ proche ; à droite : couplage inductif résonant en champ proche.



FIGURE 3 – Quelques dispositifs de rayonnement en champ lointain, de gauche à droite : antenne à forte directivité, diode laser, antenne micro-onde.

Mentionnons que le transfert de puissance sans fil par couplage résonant a été récemment mis en évidence par l'équipe de recherche dirigée par Marin Soljačić, au *Massachusetts Institute of Technology* (MIT), en réalisant une transmission de puissance de 60 W avec une distance de 2 m séparant les deux

bobinages, permettant d'allumer une ampoule (voir figure 2). Ces travaux performants ont donné lieu à une publication dans la revue Science en 2007. C'est à cette occasion que le terme « witrlicity », contraction de Wireless Electricity, est apparu.

	Couplage non résonant	Couplage résonant	Rayonnement
Matériel nécessaire	bobines	bobines	antenne à grande directivité
Type de champ	magnétique	magnétique	électrique
Distance de transmission	faible	faible/moyenne	moyenne/grande
Puissance transmissible	faible	moyenne	moyenne/grande
Interactions avec le milieu	faible	faible	forte
Sécurité	élevée	élevée	potentiellement dangereux

TABLE 1 – Comparaison des différentes techniques.

COUPLAGE INDUCTIF NON RÉSONANT

A / Étude des bobines utilisées

Pour établir un couplage inductif non résonant entre une bobine émettrice et une bobine réceptrice, on peut utiliser des solénoïdes ou des bobines « plates » 2D (voir figure 4).



FIGURE 4 – Bobines utilisées.

Considérons tout d'abord le cas d'un solénoïde de longueur ℓ et d'axe de révolution Oz , comportant N spires circulaires jointives de rayon a , et parcourues par un courant d'intensité variable $i(t)$. On fait l'hypothèse d'être dans le cadre de l'Approximation des Régimes Quasi Stationnaires (ARQS) : on calcule le champ magnétique créé par des courants variables $i(t)$, comme en magnétostatique par le théorème d'Ampère.

A1. Rappeler les équations locales de Maxwell relatives au champ magnétique \vec{B} . Comment se simplifient-elles dans l'ARQS ?

A2. Dans le cadre de l'ARQS, indiquer comment on passe de l'équation locale concernée au théorème d'Ampère.

On suppose dans la suite le solénoïde « infini » et on cherche à exprimer le champ magnétique $\vec{B}(M)$ en tout point M de l'espace, repéré par ses coordonnées cylindriques (r, θ, z) . On admet que le champ magnétique est identiquement nul à l'extérieur du solénoïde.

A3. Sous quelle(s) condition(s) l'approximation d'un solénoïde « infini » vous semble-t-elle légitime ?

A4. En invoquant des arguments de symétrie et d'invariance de la distribution de courants, déterminer la direction du champ $\vec{B}(M)$, ainsi que la (ou les) coordonnée(s) dont dépend(ent) son module.

A5. En précisant le contour d'Ampère choisi, montrer tout d'abord que le champ magnétique est uniforme à l'intérieur du solénoïde. En choisissant un second contour d'Ampère, déterminer le champ magnétique à l'intérieur du solénoïde en fonction de ℓ , N et $i(t)$.

Intéressons-nous à présent au cas d'une bobine « plate », constituée (pour simplifier) de N spires circulaires identiques, d'axe de révolution Oz et de rayon a , placées dans le plan $z = 0$ et parcourues par un courant d'intensité $i(t)$. On se place à nouveau dans le cadre de l'ARQS et on considère un point M de l'axe Oz , de cote $z > 0$.

A6. Préciser, en justifiant votre réponse, la direction du champ magnétique $\vec{B}(M)$ au point M .

A7. Que dire du plan d'équation $z = 0$ d'un point de vue des courants ? Qu'en déduire d'un point de vue du champ magnétique ? En déduire une relation simple entre $B_z(-z)$ et $B_z(z)$.

On donne l'expression du champ magnétique créé par la bobine « plate » au point M :

$$B_z(z) = \frac{\mu_0 N i(t) a^2}{2(z^2 + a^2)^{3/2}}.$$

A8. Représenter l'allure de la fonction $B_z(z)$. Exprimer le champ magnétique maximal $B_{z,\max}$, et déterminer à quelle distance $z_{1/2}$ de la spire le champ magnétique vaut $B_{z,\max}/2$, en fonction de a .

On donne sur la figure 5 les cartes de champ du solénoïde et de la bobine « plate », simulées à l'aide du logiciel FEMM (*Finite Element Method Magnetics*).

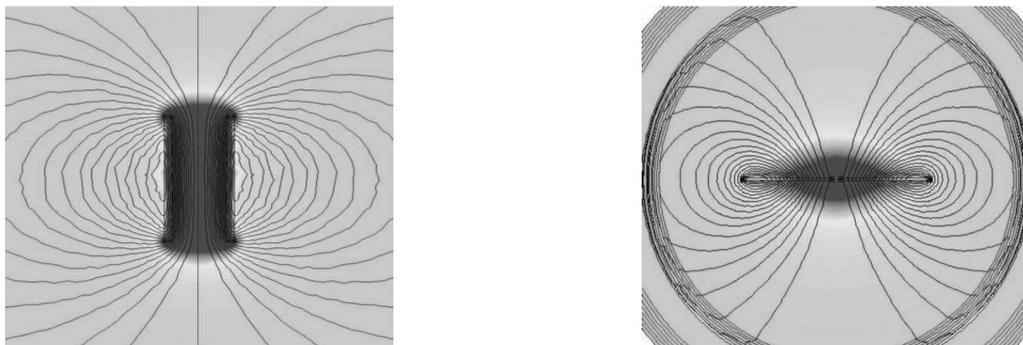


FIGURE 5 – Cartes de champ du solénoïde (à gauche) et de la bobine « plate » (à droite).

A9. Justifier les symétries et/ou antisymétries observées sur chacune de ces cartes de champ.

A10. Sur la carte de champ du solénoïde, on remarque que les lignes de champ se resserrent au sein du solénoïde et qu'elles y sont approximativement parallèles. Que peut-on déduire de ces observations topologiques ? Quelle propriété, relative au flux du champ \vec{B} , permet de le confirmer ?

B / Transfert de puissance : rendement de Yates

Modélisons à présent le transfert inductif de puissance entre deux bobines, comme celles représentées sur la figure 6.



FIGURE 6 – À gauche : système de transmission classique (émetteur et récepteur) utilisé dans les chargeurs sans fil actuels. À droite : schéma et notations utilisées.

Une bobine émettrice « plate », de résistance électrique R_1 et d'inductance propre L_1 , comportant N_1 spires circulaires de rayon a , est parcourue par un courant d'intensité :

$$i(t) = I_0 \cos(\omega t)$$

imposé par un générateur (non représenté sur la figure 6).

B1. Définir et exprimer la puissance instantanée reçue par la bobine émettrice de la part du générateur, notée $P_{\text{reçue}}$, en fonction de L_1 , R_1 , de l'intensité $i(t)$ et de sa dérivée di/dt . En déduire la moyenne temporelle de cette puissance $\langle P_{\text{reçue}} \rangle$ en fonction de R_1 et I_0 .

Considérons également une bobine réceptrice « plate », de résistance électrique R_2 , d'inductance propre L_2 et comportant N_2 spires circulaires de rayon b , située à une distance d de la bobine émettrice. On cherche à définir et exprimer le rendement de transfert de puissance entre les deux bobines, dans le cas d'un alignement parfait. On rappelle l'expression du champ magnétique créé par la bobine émettrice en un point $M(z)$ de l'axe Oz :

$$\vec{B} = \frac{\mu_0 N_1 i(t) a^2}{2 (z^2 + a^2)^{3/2}} \vec{u}_z.$$

Pour simplifier, on suppose ce champ magnétique uniforme dans le plan de la bobine réceptrice.

B2. Exprimer le flux Φ du champ magnétique créé par la bobine émettrice à travers la bobine réceptrice, en fonction de $i(t)$, a , b , d , N_1 et N_2 .

B3. Le courant $i(t)$ étant variable, il apparaît une force électromotrice (fem) $e(t)$ aux bornes de la bobine réceptrice. Quel phénomène est ainsi mis en évidence ? Donner l'équation locale de Maxwell à l'origine de celui-ci.

B4. Après avoir nommé la loi utilisée, exprimer la fem $e(t)$ en fonction de I_0 , ω , t , a , b , d , N_1 et N_2 . On négligera le flux magnétique propre du circuit récepteur devant le flux extérieur.

B5. En négligeant l'inductance propre L_2 de la bobine réceptrice, en déduire la puissance reçue par cette dernière de la part de la bobine émettrice, notée $P_{\text{géné}}$, puis sa moyenne temporelle $\langle P_{\text{géné}} \rangle$ en fonction de I_0 , ω , a , b , d , N_1 , N_2 et R_2 .

On définit le rendement de transmission de puissance par le quotient :

$$\eta = \frac{\langle P_{\text{géné}} \rangle}{\langle P_{\text{reçue}} \rangle}.$$

B6. Montrer que le rendement peut se mettre sous la forme :

$$\eta = k \frac{\mu_0^2 N_1^2 N_2^2 a^4 b^4 \omega^2}{R_1 R_2 (d^2 + a^2)^3}$$

avec k un coefficient sans dimension à expliciter. Ce résultat constitue la loi de Yates.

C / Modélisation du couplage : inductance mutuelle

On propose dans cette sous-partie une modélisation plus générale du couplage magnétique, s'affranchissant des hypothèses faites dans la sous-partie précédente. Le couplage est quantifié par l'inductance mutuelle M entre les deux bobines, d'inductances propres respectives L_1 et L_2 (voir figure 7).

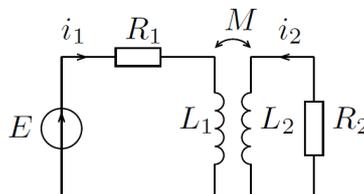


FIGURE 7 – Circuits couplés par mutuelle inductance.

- C1.** Rappeler la définition de M , ainsi que sa dimension.
- C2.** En appliquant la loi des mailles dans chacun des deux circuits, établir le système d'équations électriques couplées vérifiées par les intensités $i_1(t)$ et $i_2(t)$.
- C3.** Montrer que ce système d'équations conduit au bilan de puissance

$$Ei_1 = R_1i_1^2 + R_2i_2^2 + \frac{d\mathcal{E}_{\text{mag}}}{dt}$$

avec \mathcal{E}_{mag} une quantité à exprimer en fonction de L_1 , L_2 , M , i_1 et i_2 . Interpréter ce bilan.

- C4.** On pose la variable adimensionnée $x = i_1/i_2$. Mettre \mathcal{E}_{mag} sous la forme

$$\mathcal{E}_{\text{mag}} = \frac{1}{2} i_2^2 P(x)$$

où $P(x)$ est un polynôme d'ordre 2 que l'on explicitera.

- C5.** En admettant que \mathcal{E}_{mag} est une quantité positive, montrer que l'inductance mutuelle vérifie une inégalité de la forme $M \leq M_{\text{max}}$. Exprimer son majorant M_{max} en fonction de L_1 et L_2 .
- C6.** Connaissez-vous d'autres applications de tels circuits couplés par mutuelle induction dans les domaines de l'industrie et de la vie courante ? Deux applications détaillées sont attendues.

D / Résultats expérimentaux

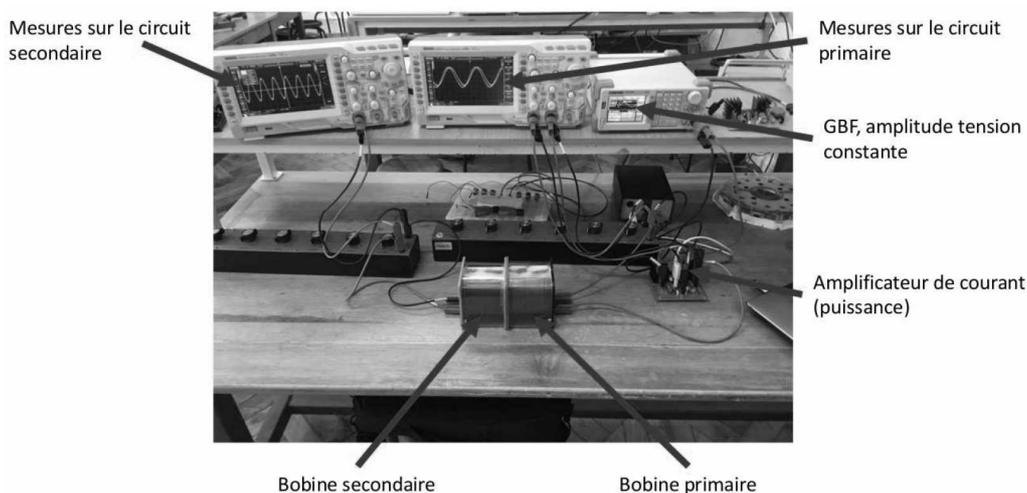


FIGURE 8 – Photographie légendée du montage expérimental.

On cherche à tester expérimentalement, à partir de matériel usuel de travaux pratiques (voir figure 8), la prédiction théorique de Yates obtenue à la question **B6** :

$$\eta = k \frac{\mu_0^2 N_1^2 N_2^2 a^4 b^4 \omega^2}{R_1 R_2 (d^2 + a^2)^3}$$

Un générateur basse fréquence (GBF), délivrant un signal sinusoïdal de fréquence f , alimente un circuit composé d'une bobine émettrice d'inductance $L = 0,86$ mH, dite « bobine primaire », et d'une résistance. Un amplificateur de courant permet d'augmenter la puissance fournie à la bobine émettrice. On place à une distance d de la bobine émettrice une bobine réceptrice identique, dite « bobine secondaire », mise en série avec une résistance. Deux oscilloscopes permettent de mesurer les puissances moyennes reçues par les bobines émettrice et réceptrice. Les bobines étant accolées, on étudie

tout d'abord la variation du rendement η avec la fréquence f imposée par le GBF, tous les autres paramètres demeurant constants (voir figure 9).

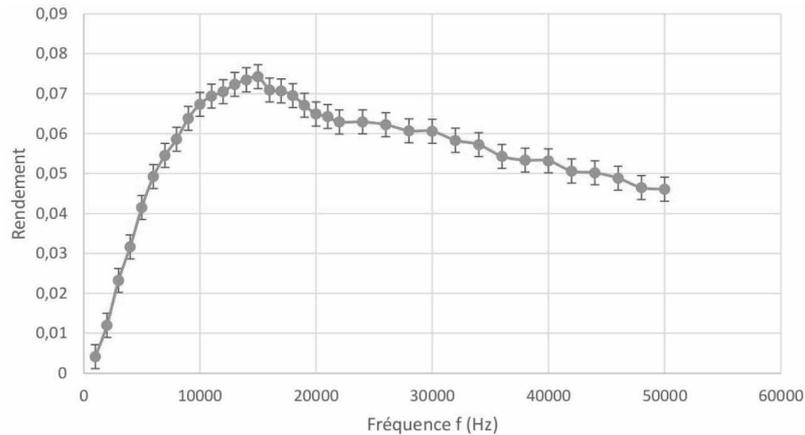


FIGURE 9 – Évolution du rendement en fonction de la fréquence.

D1. Estimer le rendement expérimental maximal η_{\max} , ainsi que la fréquence f_{\max} à laquelle celui-ci est atteint.

D2. Quel comportement en fréquence pouvait-on prévoir par la loi théorique de Yates ? Ce comportement est-il vérifié expérimentalement ? On pourra distinguer le cas des basses et hautes fréquences.

En réalité, chaque bobine souffre d'effets capacitifs associés aux différents matériaux isolants séparant les spires. On propose de déterminer un ordre de grandeur de cette capacité parasite C_p .

D3. Rappeler l'expression de la pulsation propre ω_0 d'un oscillateur électronique LC en fonction de L et C .

D4. En supposant que le rendement soit maximal pour la pulsation ω_0 , en déduire la valeur de C_p .

On cherche ensuite à sonder expérimentalement l'influence d'un désalignement des bobines sur le rendement. Les résultats sont présentés sur la figure 10.

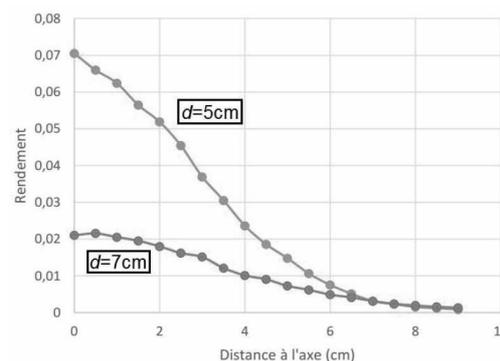
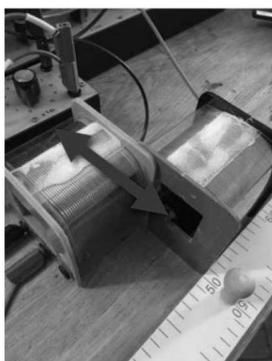


FIGURE 10 – Évolution du rendement en fonction du désalignement entre les bobines. Chaque série de mesures est effectuée à écartement longitudinal entre bobines d fixé.

D5. Interpréter l'évolution observée. Justifier qualitativement que l'effondrement du rendement soit plus important lorsque d est petit.

On sonde enfin l'influence de l'orientation relative des bobines sur le rendement. Les résultats sont reportés sur la figure 11.

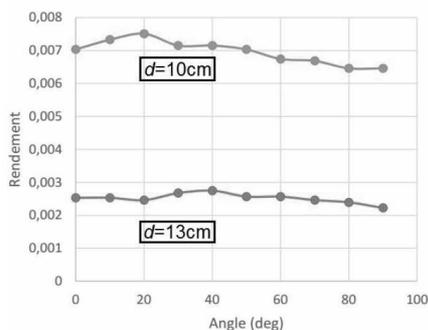


FIGURE 11 – Évolution du rendement en fonction de l'angle entre les bobines.

D6. Commenter les résultats obtenus. Proposer une justification qualitative, en lien avec les cartes de champ représentées sur la figure 5, permettant de comprendre le contraste avec les résultats obtenus à la question **D5**.

Problème 2 Des ondes pas toujours harmoniques

De nombreux phénomènes ondulatoires sont étudiés en cours, mais on se limite la plupart du temps à l'étude des Ondes Planes Progressives Harmoniques (OPPH). Celles-ci ont le mérite d'être facilement étudiables, mais ne permettent pas de modéliser le transport d'information. Par exemple, une onde radio FM n'est pas harmonique mais contient plusieurs fréquences selon l'information qu'on veut propager. Il en va de même pour les sons, les autres ondes électromagnétiques...

Après la vue, l'ouïe est le deuxième sens le plus développé chez l'homme, même si de nombreux animaux ont une ouïe beaucoup plus fine que la nôtre. C'est le sens qui nous permet de profiter de la beauté de la musique, de transmettre de nombreuses informations, mais aussi celui qui est agressé par de nombreuses nuisances sonores, au point que cette pollution est reconnue au même titre que celles de l'eau, de l'air, ou la pollution lumineuse.

Nous commencerons cette partie par une mise en équation, puis nous conduirons l'étude d'une onde harmonique, ensuite nous étudierons différents aspects de l'acoustique musicale : spectre d'un instrument, problèmes pouvant survenir pendant des concerts, gestion d'une école de musique, isolation acoustique.

Les sous-parties sont globalement indépendantes, mais il est conseillé de lire les sous-parties précédentes avant d'en entamer une nouvelle.

On négligera la pesanteur dans toute cette partie.

Le référentiel terrestre sera considéré comme galiléen.

L'air sera considéré comme un gaz parfait diatomique non visqueux de rapport

$$\gamma = \frac{c_p}{c_v} = 1,40 \text{ et de masse molaire } M = 29,0 \text{ g.mol}^{-1}.$$

On donne la constante des gaz parfaits : $R = 8,31 \text{ J.mol}^{-1}.\text{K}^{-1}$.

La célérité des ondes sonores sera notée c .

La température en Kelvin T et celle en degrés Celcius θ sont reliées numériquement par $T = \theta + 273$.

On donne les courbes d'audibilité et de douleur de l'oreille humaine sur la figure 1. Y sont tracées également des courbes isophoniques, qui relient les points de même sensation d'intensité sonore pour l'oreille humaine.

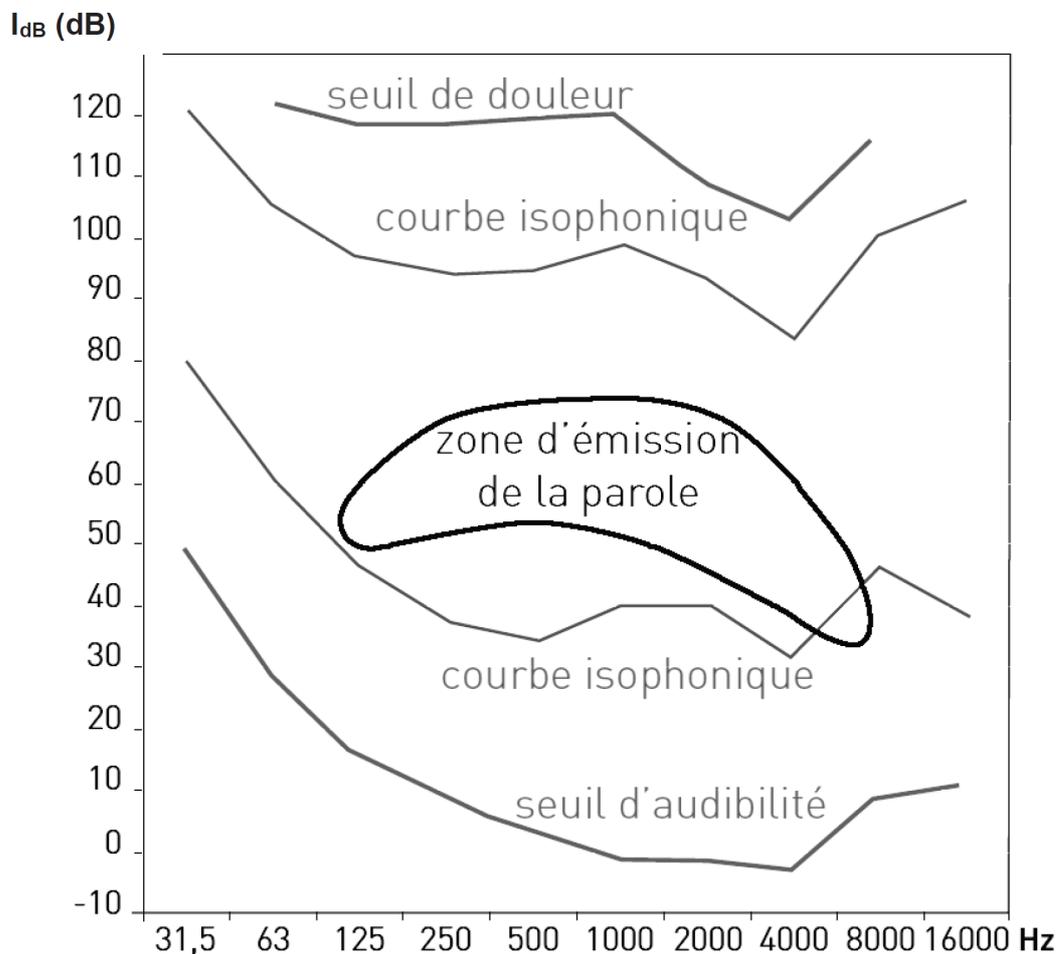


Figure 1 – Courbes de sensibilité de l'oreille humaine
(Intensité sonore en dB en fonction de la fréquence en Hz)

A / Mise en équation

Nous allons travailler dans cette sous-partie avec des ondes unidimensionnelles, c'est-à-dire des champs ne dépendant que de la coordonnée d'espace x et du temps t .

Au repos, l'air peut être décrit par les champs de pression $P_0 = 1,00$ bar, de masse volumique μ_0 et de vitesse $\vec{v}_0 = \vec{0}$, tous uniformes. L'onde sonore est une perturbation de cet état d'équilibre, où les champs deviennent :

- champ de pression : $P(x,t) = P_0 + p(x,t)$ où p est la surpression ;
- champ de masse volumique : $\mu(x,t) = \mu_0 + \rho(x,t)$;
- champ de vitesse : $\vec{v}(x,t) = \vec{0} + v(x,t) \vec{u}_x$.

L'approximation acoustique consiste à considérer que les termes de perturbation p/P_0 , ρ/μ_0 et v/c sont des infiniment petits d'ordre 1.

A1. Écrire l'équation d'Euler (équation de Navier–Stokes sans terme de viscosité) dans l'air. La linéariser en expliquant convenablement les simplifications faites, et montrer qu'on

obtient l'équation notée (E) :
$$\mu_0 \frac{\partial v}{\partial t} = -\frac{\partial p}{\partial x}.$$

A2. Écrire l'équation de conservation de la masse (ou équation de continuité). La linéariser. L'équation linéarisée sera notée (M).

A3. Lors du passage d'une onde sonore, les transformations de l'air sont supposées adiabatiques réversibles. On introduit χ_s le coefficient de compressibilité isentropique de l'air. Rappeler l'expression de χ_s en fonction de la pression P et du volume V d'une particule de fluide, puis en fonction de la pression P et de la masse volumique du fluide μ .

Linéariser cette expression dans le cadre de l'approximation acoustique, et montrer qu'on obtient l'équation notée (T) :
$$\rho = \chi_s \mu_0 p.$$

A4. En utilisant les équations (E), (M) et (T), retrouver l'équation de propagation de l'onde

sonore à une dimension vérifiée par p $\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2}$ Donner l'expression de c .

Expliquer comment on peut passer à l'équation d'une onde sonore tridimensionnelle.

A5. Déterminer l'expression de c pour un gaz parfait et sa valeur numérique pour l'air à $\theta = 20,0$ °C.

B / Étude d'une onde sonore harmonique

B1. On étudie une onde unidimensionnelle dont le champ de surpression complexe s'écrit $\underline{p}(x,t) = p_0 \exp [j(\omega t - kx)]$.

Justifier clairement que cette onde est plane, progressive, harmonique, et préciser dans quel sens elle se propage. On donnera la définition de chaque terme et on précisera pour chacun pourquoi on peut l'attribuer à cette onde.

B2. Établir la relation de dispersion pour cette onde. Qu'en déduire ?

B3. On cherche le champ de vitesse complexe sous la forme $\underline{v}(x,t) = \underline{v}_0 \exp [j(\omega t - kx)]$, avec $\underline{v} = \underline{v} \vec{u}_x$.

Montrer qu'on peut écrire $\underline{p}(x,t) = Z \underline{v}(x,t)$. Préciser l'expression de Z et donner son nom.

B4. Déterminer l'expression de Z pour un gaz parfait.

En déduire sa valeur numérique pour l'air à $T = 20,0$ °C et $P_0 = 1,00$ bar.

B5. On définit l'intensité sonore par la valeur moyenne $I = \langle p v \rangle$.

Vérifier que I a bien la dimension d'une puissance surfacique.

B6. On définit l'intensité sonore en décibels comme $I_{dB} = 10 \log \left(\frac{I}{I_0} \right)$, où I_0 est l'intensité de référence et vaut $I_0 = 1,00 \cdot 10^{-12}$ W.m⁻².

Justifier la différence avec le gain en décibels en électricité, défini par $G_{dB} = 20 \log \left(\frac{u_s}{u_e} \right)$ où u_s et u_e sont respectivement les tensions de sortie et d'entrée du montage.

B7. On veut ici vérifier si l'approximation acoustique est justifiée, même pour un son très intense d'intensité I_M .

Déterminer les expressions de p_0 et de v_0 , amplitudes de la pression et de la vitesse, en fonction de I_M notamment.

Donner un ordre de grandeur de l'intensité en décibels d'un son très intense, en déduire l'intensité I_M correspondante puis p_0 et v_0 et conclure.

C / Spectre d'un instrument de musique

Les instruments de musique n'émettent pas des sons harmoniques comme ceux des sous-parties A et B. Nous allons dans cette sous-partie étudier le son d'un instrument à vent.

C1. Quelle est la différence entre le spectre d'un son créé par un instrument de musique (une flûte par exemple) et le spectre d'un bruit ? On rappelle qu'un bruit est un signal où toutes les fréquences sont présentes.

Expliquer pourquoi on peut utiliser les résultats des ondes harmoniques (sous-partie B) pour l'étude des sons des instruments.

C2. La figure 2 ci-dessous donne l'acquisition d'un son émis par un violon (figure 2.a) et son spectre (figure 2.b).

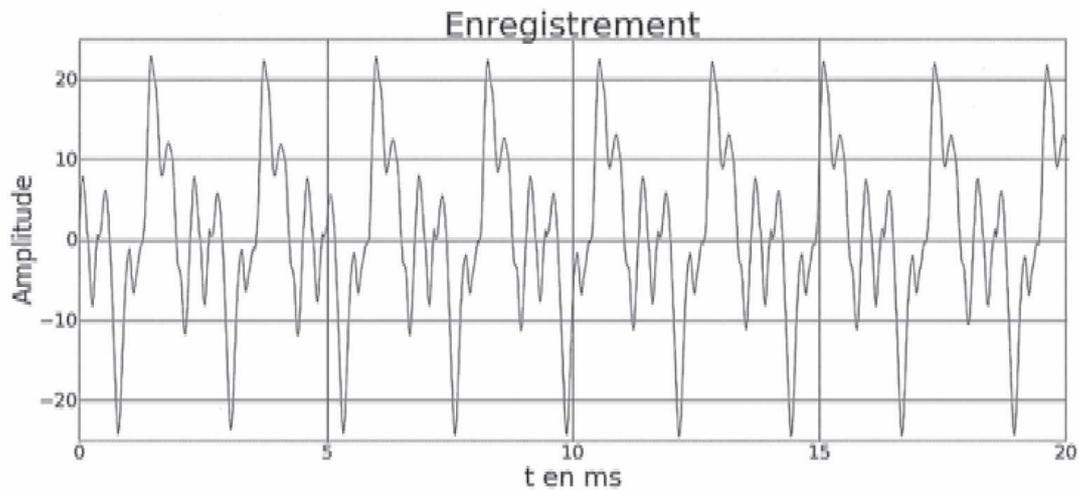


Figure 2.a - Enregistrement d'un son émis par un violon
(l'amplitude est graduée en unité arbitraire)

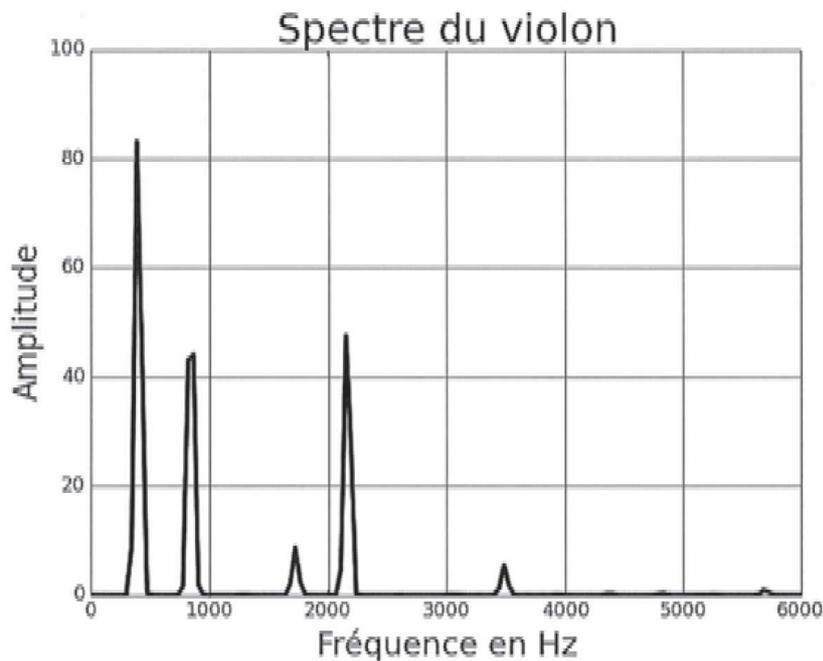
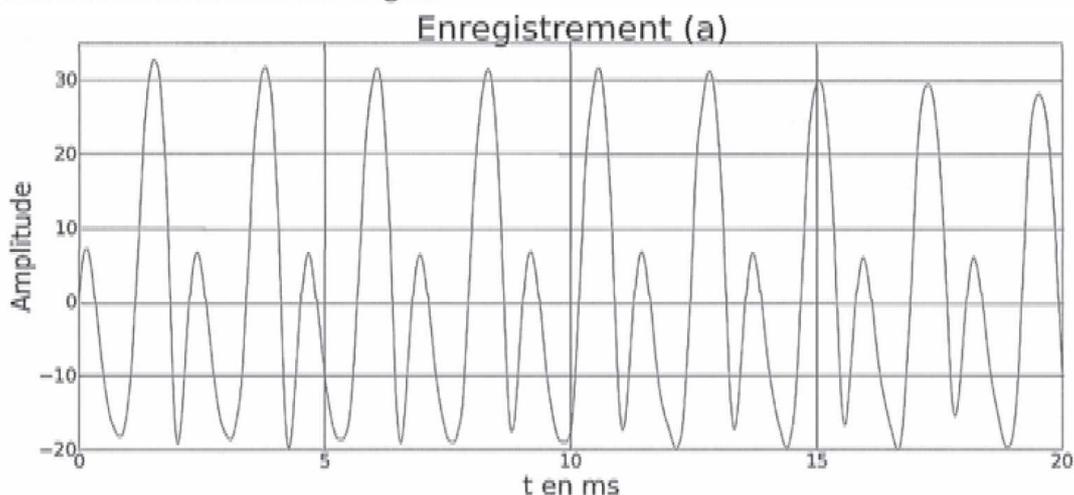


Figure 2.b – Spectre du même son émis par le violon
(l'amplitude est graduée en unité arbitraire)

C2a. Mesurer la fréquence de la note et sa période en expliquant votre démarche, notamment en complétant les figures ci-dessus. Les résultats sont-ils compatibles entre les deux figures ?

La figure 3.a ci-dessous donne les acquisitions de deux sons (émis par une flûte (a) et par un harmonium (b)) qui correspondent à la même note. La figure 3.b. donne le spectre de ces deux instruments mais ils ont été mélangés.



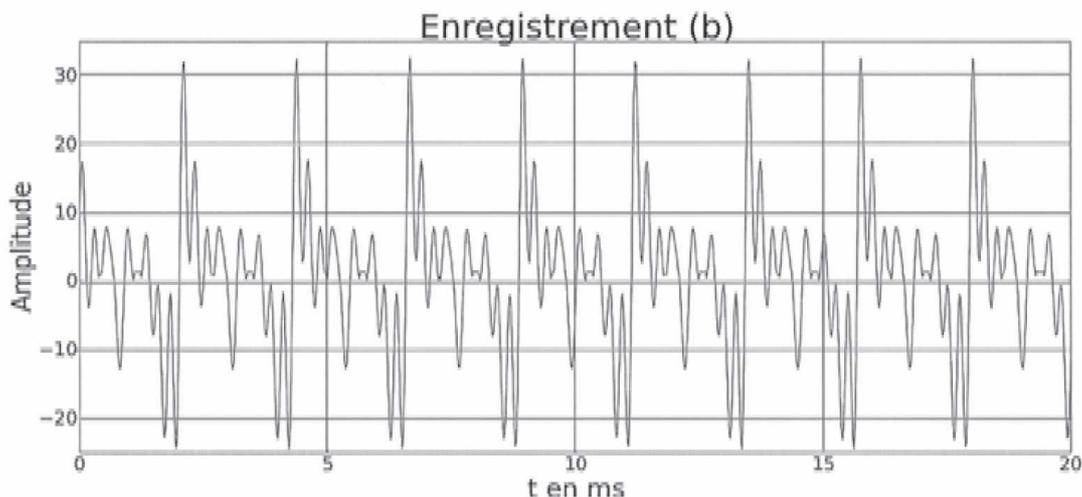


Figure 3.a - Enregistrements de sons émis par une flûte (a) et par un harmonium (b)
(l'amplitude est graduée en unité arbitraire)

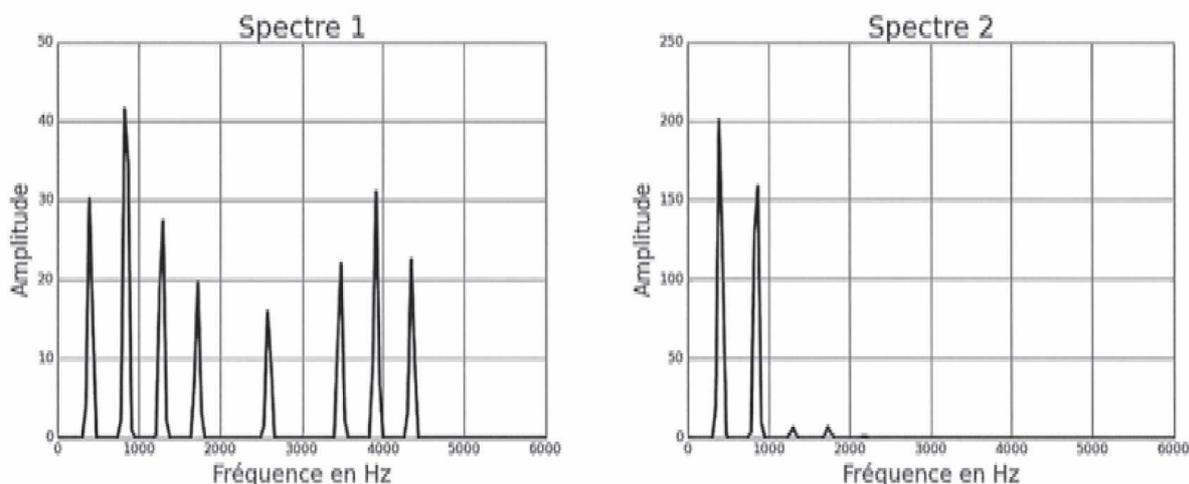


Figure 3.b - Spectres correspondants
(l'amplitude est graduée en unité arbitraire)

C2b. Attribuer à chaque spectre (1 et 2) son instrument (flûte (a) ou harmonium (b)) en justifiant ce choix.

D / Problèmes à résoudre lors de concerts

Les questions qui sont posées dans cette sous-partie demandent de l'initiative de la part du candidat. Les pistes de recherche doivent être indiquées même si elles n'aboutissent pas. Le barème tiendra compte du temps nécessaire pour répondre à de telles questions et les valorisera. On pourra utiliser la figure 1 et tous les résultats précédemment obtenus.

D1. Au cours d'un concert, dès que le chanteur passe devant le haut-parleur, il se met à y avoir un sifflement très désagréable.
Expliquer l'apparition de ce sifflement.

D2. Les enfants d'une classe participent à un concours de chant en plein air où les parents de plusieurs dizaines d'écoles les écoutent sur un terrain de sport de largeur 50 m. Pour que tout le monde entende, un micro enregistre leur chanson et un haut-parleur le restitue et l'amplifie pour les parents.

À quelle distance des haut-parleurs doit-on placer le premier rang ?

D3. Lors d'un concert de piano-chant, le chant du soliste fait 65 dB, tandis que la musique du piano atteint 80 dB. Par conséquent, on n'entend pas le chant du soliste.

Le chef de chœur vous demande alors combien il faudrait de chanteurs pour qu'on entende le chant.

Répondre à sa question.

F / Isolation acoustique

Bien sûr, on ne peut pas faire un concert n'importe où n'importe comment : il y a une réglementation sur les nuisances sonores et les pièces doivent être insonorisées. On s'intéresse ici à l'isolation acoustique d'une pièce où des musiciens font leurs répétitions. On prendra $c = 3,4 \cdot 10^2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ pour les applications numériques.

F1. On considère les deux instruments ci-dessous : une flûte piccolo, de longueur 33 cm et un trombone, dont le tube a une longueur totale de 2,7 m.



Figure 4 – Piccolo (en haut) et trombone (en bas)

F1a. Estimer la fréquence minimale pour chaque instrument en faisant une analogie avec la corde vibrante. Expliquer pourquoi c'est la fréquence minimale.

F1b. Les notes les plus jouées de chaque instrument s'étagent sur 2 octaves. Sachant qu'une octave correspond à un doublement de fréquence, déterminer la fréquence maximale de chaque instrument.

On travaillera désormais avec 125 Hz pour un instrument et 1000 Hz pour l'autre.

F2. Les musiciens répètent dans un garage dont toutes les parois sont en parpaing (blocs de béton), la porte du garage ayant été condamnée dès le début des répétitions. Les voisins s'étant plaints du bruit, une étude acoustique a été réalisée : l'intensité sonore chez les voisins atteint 55 dB pour le piccolo et 60 dB pour le trombone. Or, on peut considérer qu'un bruit est gênant quand il est situé au-dessus de la courbe isophonique la plus basse des deux dans la figure 1.

Est-il nécessaire d'effectuer des travaux d'isolation phonique quand c'est la flûte qui est jouée ? Quand c'est le trombone ? Justifier.