

Séquence 1

Sons et musique

Sommaire

1. Prérequis de la séquence
2. Acoustique musicale
3. Les instruments de musique
4. Récepteurs et émetteurs sonores
5. Sons et architecture
6. Fiche de synthèse

1

Prérequis de la séquence

Objectifs d'apprentissage

- ▶ Savoir qu'une onde sonore est une onde mécanique progressive longitudinale.
- ▶ Définir la célérité d'une onde mécanique progressive.
- ▶ Connaître et exploiter la double périodicité temporelle et spatiale d'une onde sonore progressive sinusoïdale.
- ▶ Connaître la relation entre période temporelle T et fréquence f de l'onde sinusoïdale.

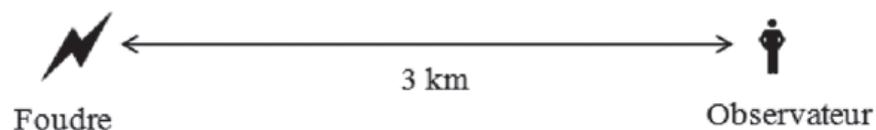
A

Pour débiter le chapitre

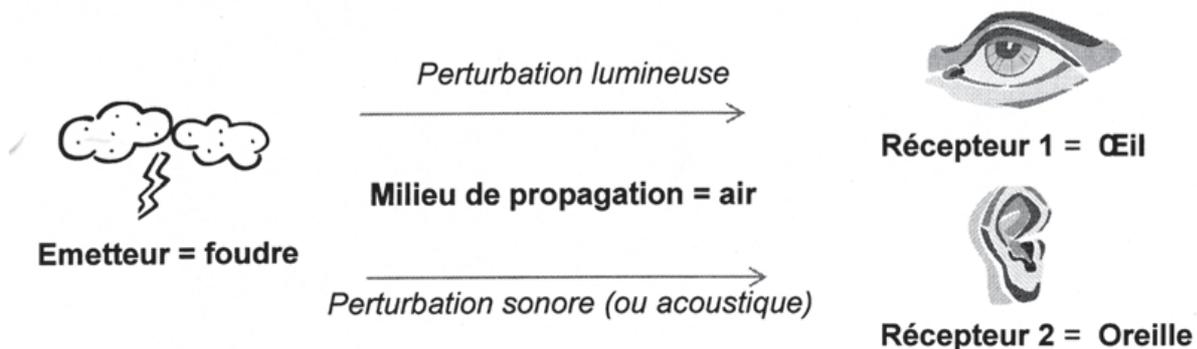
1. Émission, propagation et réception d'une perturbation

Exemple de l'éclair et du tonnerre

L'éclair et le tonnerre sont émis simultanément en un même lieu par la foudre.



L'observateur **voit** l'éclair 10^{-5} s après l'émission et **entend** le tonnerre 9 s plus tard.



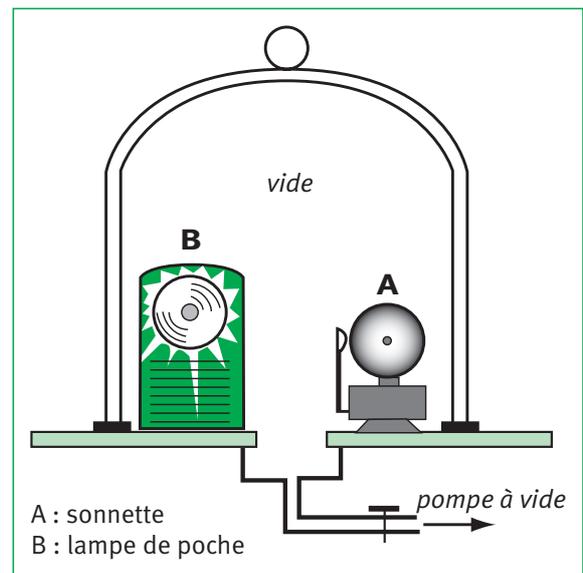
Une perturbation (sonore, lumineuse...) modifie temporairement et localement les propriétés du milieu dans lequel elle se propage c'est-à-dire une grandeur physique caractéristique du milieu (pression, champ électromagnétique...). La propagation d'une perturbation n'est jamais instantanée. On a toujours la séquence dans le temps : émission, propagation, réception.

2. Les perturbations mécaniques et les perturbations électromagnétiques

Expérience On place une sonnette et une lampe de poche allumée sous une cloche à vide. La sonnette émet des perturbations sonores tandis que la lampe de poche émet des perturbations lumineuses. À l'aide de la pompe, on raréfie l'atmosphère sous la cloche.

Observations Les perturbations sonores sont de moins en moins audibles tandis que les perturbations lumineuses restent parfaitement visibles.

Interprétation La perturbation sonore a besoin d'un milieu matériel (ici l'air) pour se propager alors que la perturbation lumineuse peut se propager dans le vide.



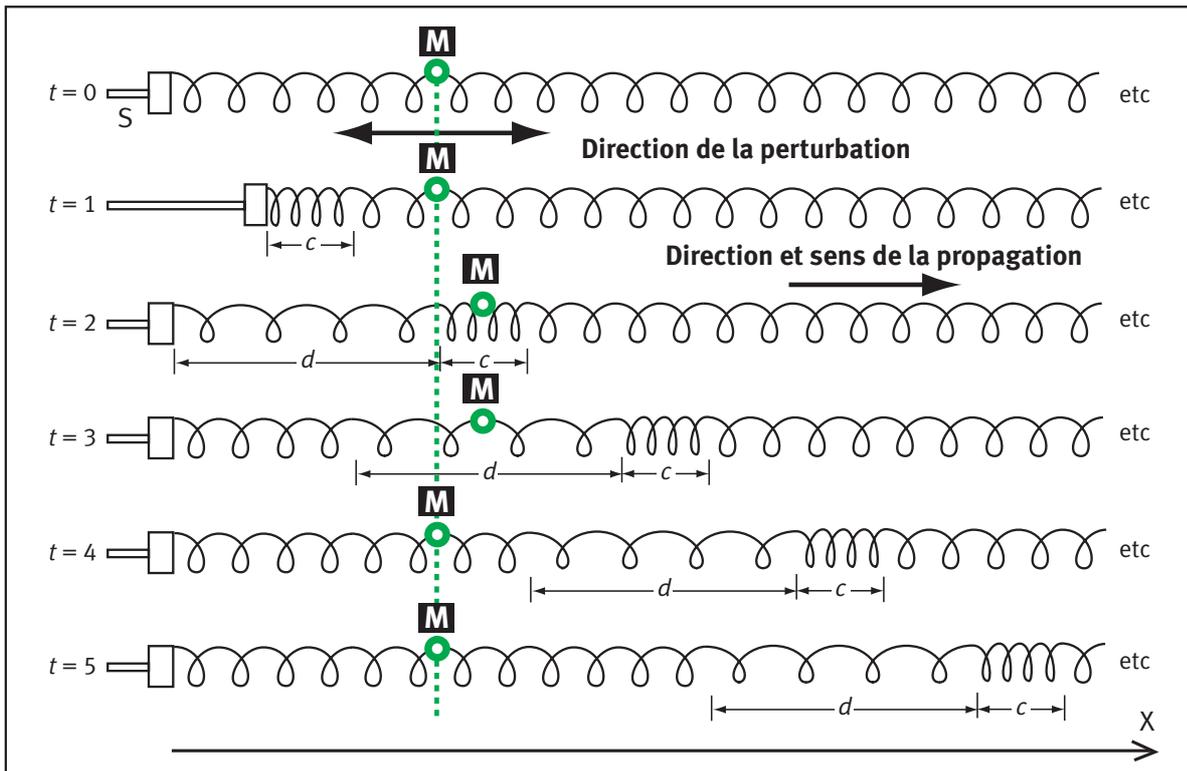
On peut distinguer les perturbations dites mécaniques nécessitant un milieu matériel de propagation et les perturbations électromagnétiques pouvant se propager dans le vide. La perturbation sonore appartient à la catégorie des perturbations mécaniques tandis que la perturbation lumineuse appartient à la catégorie des perturbations électromagnétiques.

B Pour apprendre

1. L'onde sonore progressive

a) Propagation d'une perturbation mécanique le long d'un ressort

Expérience Un long ressort est tendu horizontalement. On comprime manuellement quelques spires à une de ses extrémités puis on les lâche rapidement.



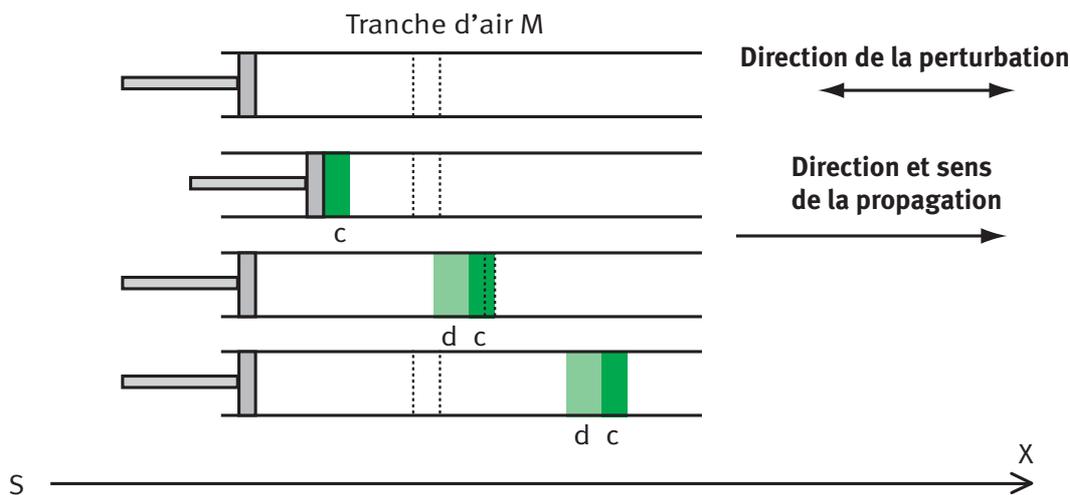
Observations De proche en proche, une perturbation constituée d'une zone de compression c (spires rapprochées) suivie d'une zone de dilatation d (spires écartées) se propage au sein du milieu matériel (ressort). Seuls les points du milieu, tel M , atteints par la perturbation sont en mouvement. En l'absence de perturbation, ils sont immobiles. Après le passage de la perturbation, le milieu se retrouve exactement dans l'état où il était auparavant.

- Interprétation**
- ▶ La perturbation se propage dans un milieu matériel (ressort) **sans transport de matière**. On dit qu'on a affaire à une **onde mécanique progressive**.
 - ▶ Chaque point du ressort subit un déplacement **parallèle** à la direction de propagation. On dit que l'onde mécanique progressive est **longitudinale**.
 - ▶ Le milieu matériel retrouve son état initial après avoir été temporairement modifié. On dit que le milieu matériel (le ressort) est **élastique**.

Remarque Lorsqu'un point d'un milieu de propagation subit un déplacement **perpendiculaire** à la direction de propagation, on dit que l'onde est **transversale**.

b) Propagation d'une perturbation mécanique sonore dans un tuyau d'air

Expérience On considère un tuyau rempli d'air. À l'aide d'un piston (ou membrane de haut-parleur), on crée une perturbation à l'une des extrémités du tuyau.



Observations De proche en proche, une perturbation constituée d'une zone de compression *c* (molécules de l'air rapprochées) suivie d'une zone de dilatation *d* (molécules de l'air écartées) se propage au sein du milieu matériel (air). Seule la tranche d'air, telle *M*, atteinte par la perturbation subit un mouvement (attention, dans une tranche, les molécules de l'air sont toujours en mouvement = mouvement brownien). Après le passage de la perturbation, le milieu (l'air) se retrouve exactement dans l'état où il était auparavant.

Interprétation ▶ La perturbation se propage dans un milieu matériel (air) **sans transport de matière**. On dit qu'on a affaire à une **onde mécanique progressive**. Ici, il s'agit plus particulièrement d'une onde mécanique **sonore progressive de compression-dilatation** ou tout simplement **onde sonore progressive**.

Une onde sonore est une onde mécanique progressive longitudinale de compression-dilatation.

- ▶ Chaque tranche d'air subit un déplacement **parallèle** à la direction de propagation. On dit que l'onde mécanique sonore progressive est **longitudinale**.
- ▶ Le milieu matériel retrouve son état initial après avoir été temporairement modifié. On dit que le milieu matériel (l'air) est **élastique**.

Test 1 **Différencier ondes transversales et ondes longitudinales**

- 1 Définir de la manière la plus complète possible une onde mécanique progressive.
- 2 Compléter les cases blanches du tableau avec les expressions suivantes :

Onde sonore, onde le long d'une corde, onde lors de la compression-dilatation d'un ressort, onde à la surface de l'eau.

	Ondes à une dimension	Ondes à deux dimensions	Ondes à trois dimensions
Ondes longitudinales			
Ondes transversales			

c) Célérité d'une onde sonore

La célérité V d'une onde mécanique progressive est le quotient de la distance M_1M_2 (en m) parcourue par l'onde, par la durée $\Delta t = t_2 - t_1$ (en s) du parcours :

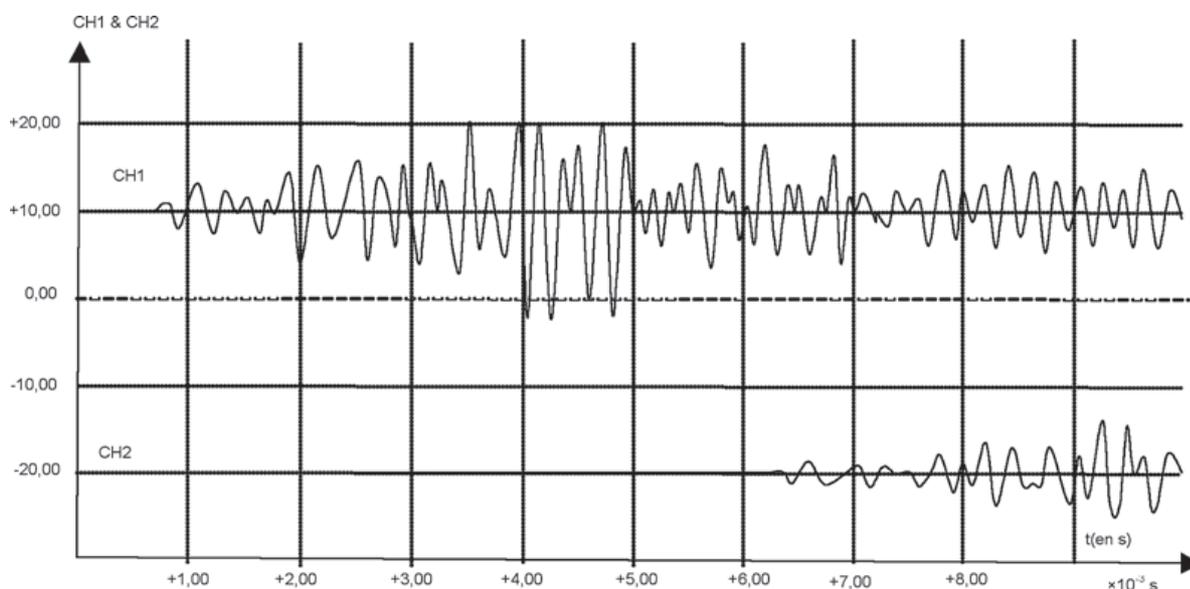
$$V = \frac{M_1M_2}{\Delta t}$$

Sa valeur est mesurée en m/s.

Test 2 Mesure de la célérité du son dans l'air

Deux microphones avec amplificateurs intégrés M_1 et M_2 , situés à une distance $M_1M_2 = d = 1,89$ m l'un de l'autre, sont respectivement reliés aux voies 1 (CH1) et 2 (CH2) d'un oscilloscope à mémoire. On réalise l'enregistrement d'un clap ci-dessous.

Déterminer la célérité V du son dans l'air à la température de l'expérience.



d) Influence de la nature du milieu matériel de propagation

Célérité du son dans différents milieux matériels de propagation à 20 °C

Milieu matériel	Air	Hélium	Hydrogène	Eau	Glycérine	Cuivre	Bois	Acier	Aluminium	Granit
Célérité (en m/s)	340	970	1 230	1 500	2 000	3 600	3 800	5 000	5 100	6 000

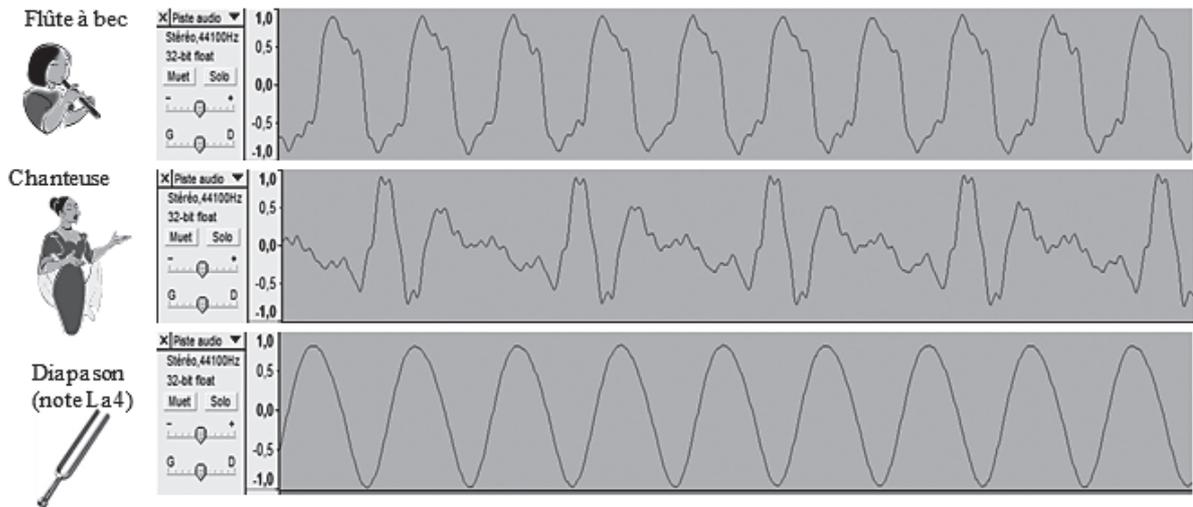
La célérité des ondes sonores dépend du milieu de propagation. Elle est plus importante dans les solides et les liquides que dans l'air.

2. L'onde sonore sinusoïdale

a) Exemples d'ondes sonores progressives périodiques

À l'aide d'un microphone et d'une carte son d'un ordinateur, on a réalisé ci-dessous l'enregistrement du son émis au cours du temps par différentes sources sonores émettant une **note continue**.

Quelle est la particularité des ondes sonores émises ?



L'onde mécanique (ici sonore) émise par chacune des sources se propage dans l'air. Au point M, à la distance SM de la source S, le microphone permet d'enregistrer une courbe **périodique**. On dit que l'onde émise par chacune des sources est une **onde mécanique progressive périodique**.

Dans le cas du diapason, l'onde mécanique progressive émise est dite **sinusoïdale**.

b) Définition

Une **onde progressive** est dite **périodique** si la perturbation reçue en chaque point du milieu matériel de propagation est une fonction périodique du temps, c'est-à-dire si la perturbation reçue se répète identique à elle-même à intervalles de temps identiques.

c) Double périodicité temporelle et spatiale de l'onde sonore

Période temporelle T

La période temporelle T de l'onde progressive périodique est la plus petite durée au bout de laquelle un point du milieu de propagation se retrouve dans le même état vibratoire.

La période temporelle de l'onde sonore sinusoïdale est reliée à sa fréquence f par la relation :

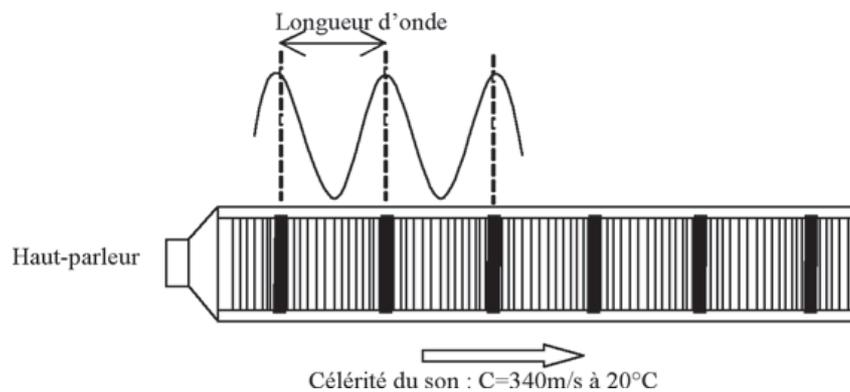
$$f = \frac{1}{T}$$

T s'exprime en secondes (s)

f s'exprime en hertz (Hz)

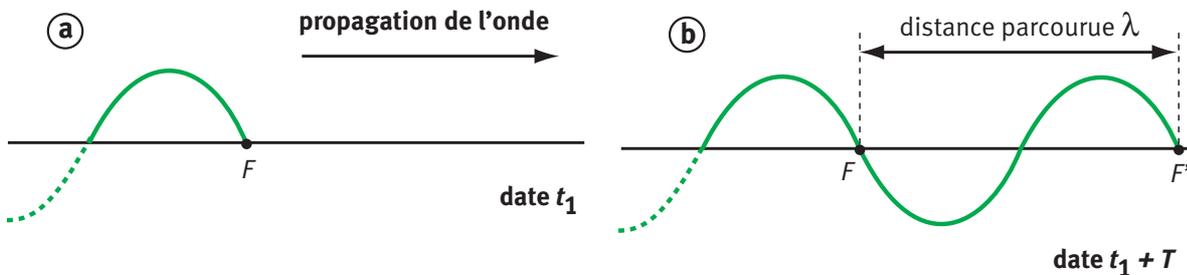
Période spatiale λ

La plus petite distance séparant deux points du milieu matériel de propagation ayant le même état vibratoire est la période spatiale λ , encore appelée longueur d'onde et exprimée en mètres (m).



Relation entre λ et T

À la date t_1 , l'onde a atteint le point F . À la date $t_1 + T$, l'onde a atteint le point F' : les points F et F' vibrent en phase, leur distance est égale à une longueur d'onde λ .



On a donc $FF' = V \times T$ et $FF' = \lambda$, donc :

La longueur d'onde λ est la distance parcourue par l'onde pendant la période T :

$$\lambda = V \cdot T$$

λ s'exprime en mètres (m)

T s'exprime en secondes (s)

V , la célérité, s'exprime en m/s

Test 3 Longueur d'onde et période temporelle

On considère une onde sonore progressive sinusoïdale se propageant dans l'air à la vitesse de 340 m/s à une température de 20 °C.

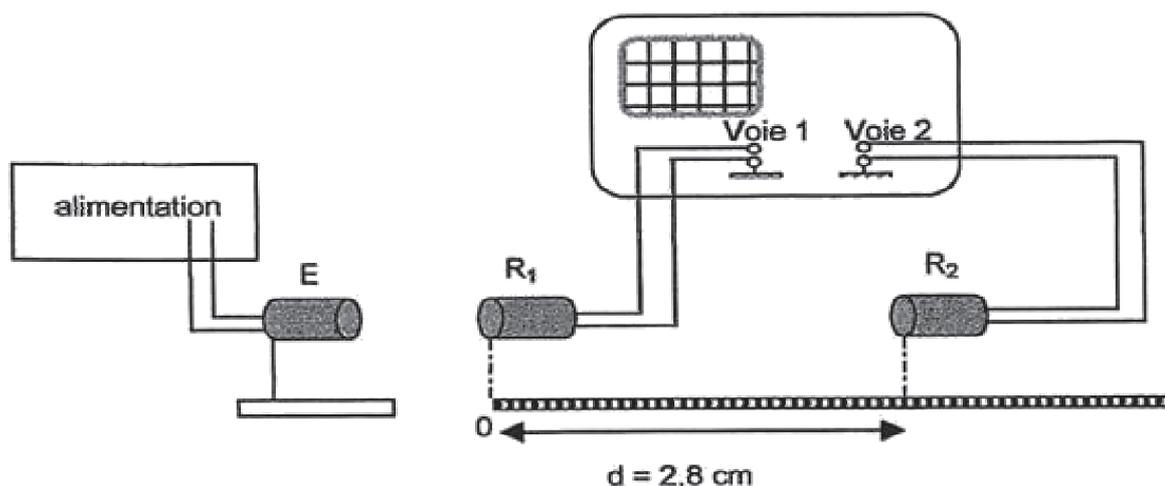
- 1 Calculer la longueur d'onde λ pour une onde de fréquence $f = 440$ Hz.
- 2 Calculer la fréquence f et la période temporelle T de l'onde sinusoïdale de longueur d'onde $\lambda = 0,50$ m.

Test 4 Célérité des ultrasons

Au cours d'une séance de travaux pratiques, un élève dispose du matériel suivant :

- ▶ un émetteur d'ultrasons E et son alimentation électrique ;
- ▶ deux récepteurs d'ultrasons R_1 et R_2 ;
- ▶ un oscilloscope ;
- ▶ une règle graduée.

Il réalise le montage suivant :

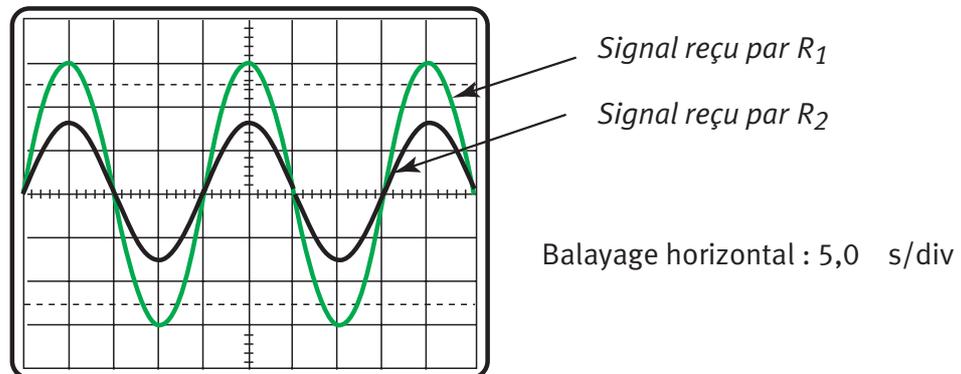


L'émetteur E génère une onde ultrasonore progressive sinusoïdale qui se propage dans l'air jusqu'aux récepteurs R_1 et R_2 . L'émetteur et les deux récepteurs sont alignés.

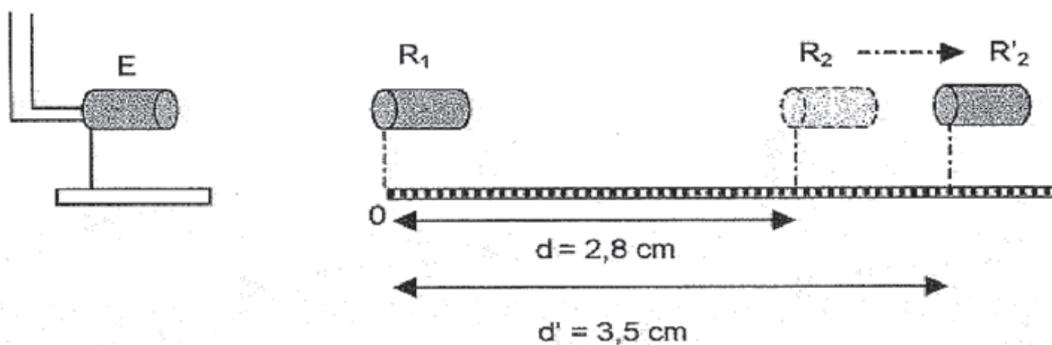
Le récepteur R_1 est placé au zéro de la règle graduée.

Les signaux captés par les récepteurs R_1 et R_2 sont appliqués respectivement sur les voies 1 et 2 d'un oscilloscope pour être visualisés sur l'écran de celui-ci.

Lorsque le récepteur R_2 est situé à $d = 2,8$ cm du récepteur R_1 , les signaux reçus par les deux récepteurs sont en phase. On observe l'oscillogramme ci-dessous sur l'écran.

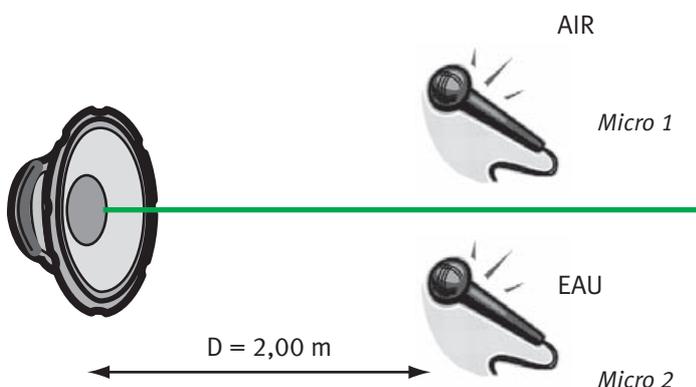


L'élève éloigne lentement R_2 le long de la règle ; il constate que le signal reçu par R_2 se décale vers la droite. Il continue à éloigner R_2 jusqu'à ce que les signaux reçus par R_1 et R_2 soient à nouveau en phase. Soit R'_2 la nouvelle position occupée par R_2 . Il relève la distance d' séparant désormais R_1 de R'_2 : $d' = 3,5$ cm.



- ❶ Déterminer la fréquence f des ultrasons émis.
- ❷ Déterminer la longueur d'onde λ des ultrasons.
- ❸ Calculer la célérité V des ultrasons dans l'air.

Test 5 Détermination de la vitesse du son dans l'eau



Une source sonore émet un son très court à l'interface eau-air. On dispose deux microphones superposés à une distance $D = 2,00$ m de la source.

Le premier microphone atteint est sous-marin. On mesure la durée séparant la détection du son par les deux microphones, on obtient $\Delta t = 4,46$ ms.

Dans les conditions de l'expérience, la célérité du son dans l'air est de : $V_{\text{air}} = 344$ m/s.

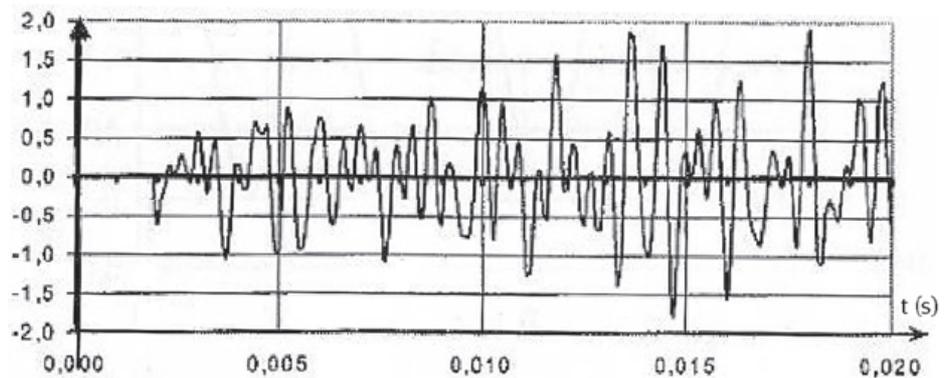
- ❶ Pourquoi existe-il un décalage entre les deux détections de l'onde émise ?
- ❷ Exprimer le retard τ_e de l'onde sonore entre la source et le microphone sous-marin. De même pour le retard τ_a entre la source et le microphone aérien.
- ❸ Exprimer Δ_t en fonction des retards τ_e et τ_a .
- ❹ Déterminer l'expression puis la valeur numérique de la célérité V_{eau} de l'onde sonore dans l'eau.

Test 6 Mesure de la célérité d'un son émis par une cymbale

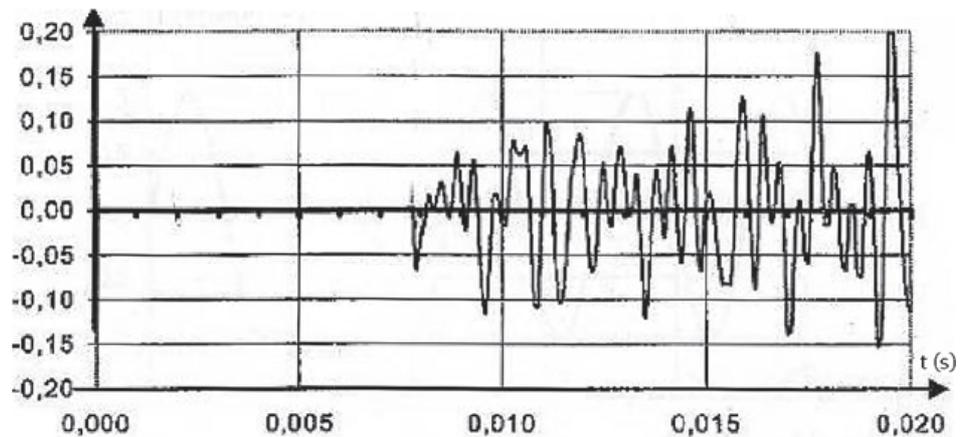
Trois microphones M_1 , M_2 et M_3 sont alignés de telle manière que les distances M_1M_2 et M_2M_3 valent respectivement 2,00 m et 3,00 m. Les signaux électriques correspondant aux sons reçus par les microphones sont enregistrés grâce à un ordinateur. On donne un coup de cymbale devant le premier micro M_1 puis on lance immédiatement l'enregistrement. La température de la pièce est de 18 °C.

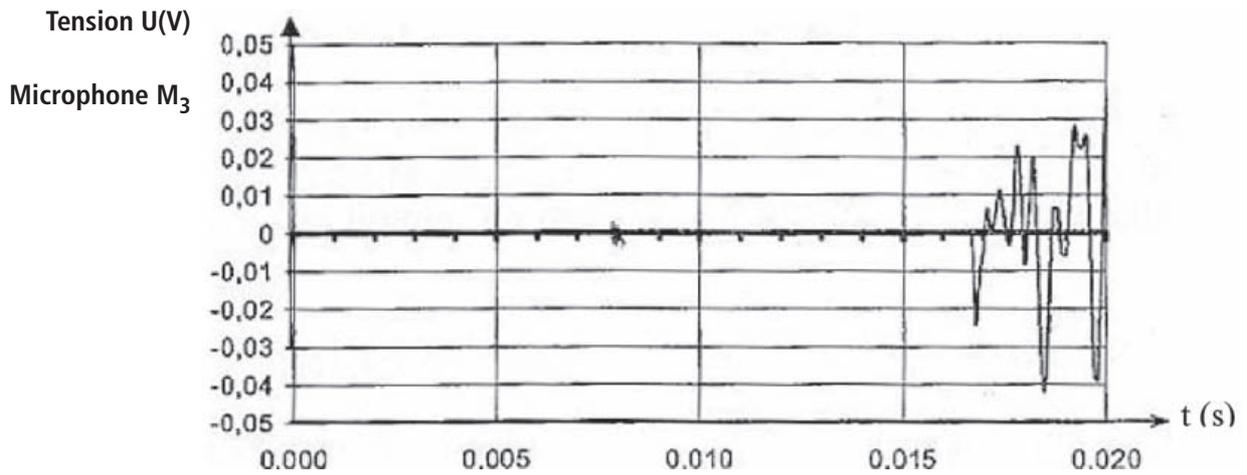
Les courbes obtenues sont représentées ci-après :

Tension U(V)
Microphone M_1



Tension U(V)
Microphone M_2

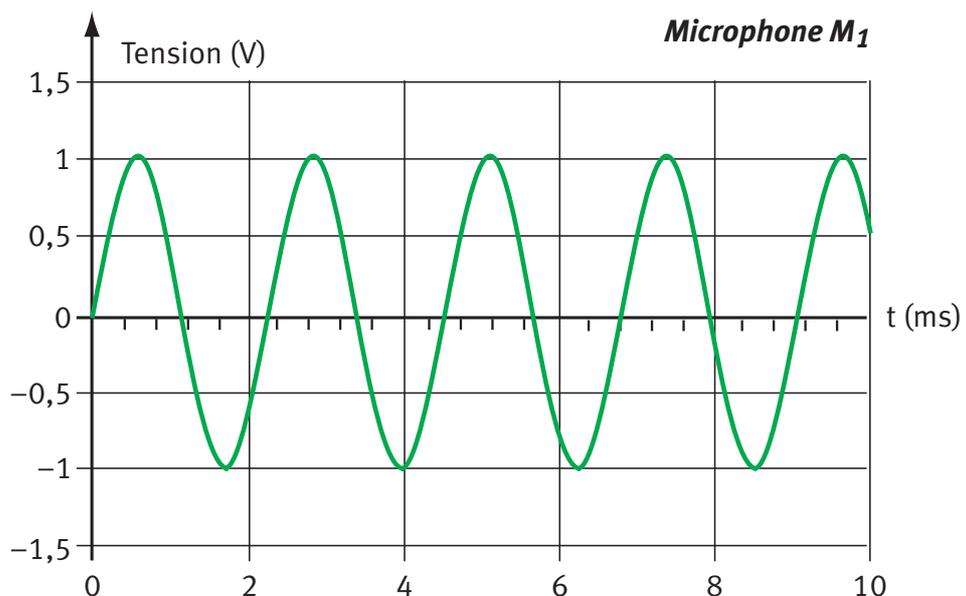


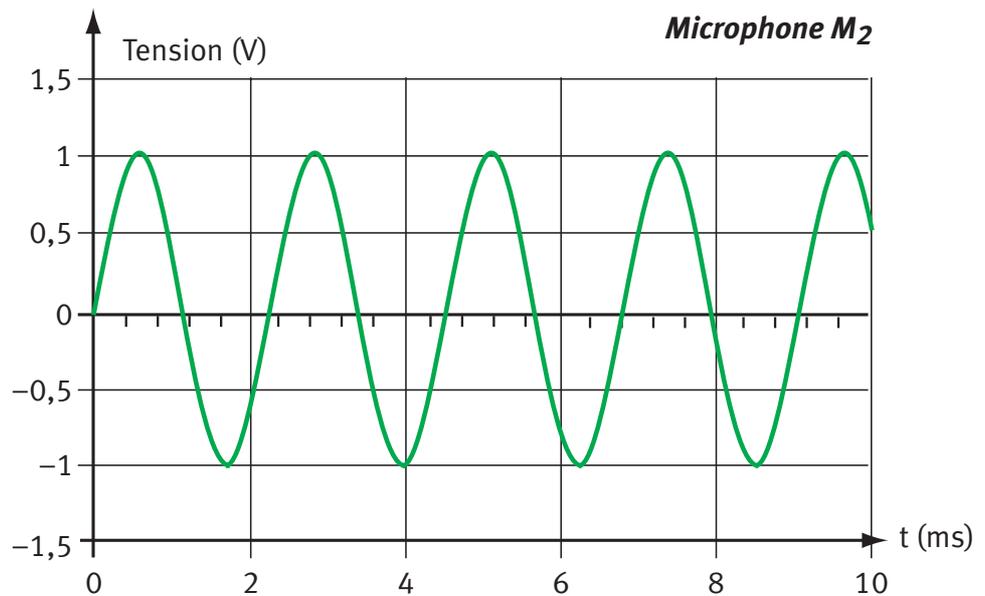


- ❶ Comment peut-on déterminer la célérité de l'onde sonore à l'aide des courbes obtenues ?
- ❷ Effectuer le calcul de la célérité de l'onde sonore pour la distance M_1M_2 puis pour la distance M_2M_3 .
- ❸ Les résultats obtenus sont-ils cohérents ?

Test 7 Mesure de la célérité d'une onde sonore sinusoïdale

On dispose de deux microphones M_1 et M_2 à la même distance d d'un diapason. Un enregistrement, grâce à une carte d'acquisition reliée à un ordinateur, permet d'obtenir les courbes représentées ci-dessous. On remarque que les signaux sont en phase.





- 1 Déterminer la période T puis la fréquence f du son émis par le diapason.
On éloigne le microphone M_2 peu à peu jusqu'à ce que les courbes soient de nouveau en phase. On réitère l'opération jusqu'à compter cinq positions pour lesquelles les courbes sont à nouveau en phase. La distance d entre les deux microphones est alors égale à 3,86 m.
- 2 Pourquoi compte-t-on plusieurs retours de phase plutôt qu'un seul ?
- 3 Définir la longueur d'onde. Déduire sa valeur numérique de l'expérience précédente.
- 4 Calculer alors la célérité V de l'onde.



Pour conclure

Une onde sonore est une onde mécanique progressive longitudinale de compression-dilatation se propageant sans transport de matière à la célérité V qui dépend des propriétés du milieu de propagation.

Dans le cas d'une onde sonore sinusoïdale, l'onde parcourt une distance correspondant à la longueur d'onde λ (ou période spatiale) pendant une durée correspondant à la période temporelle T de l'onde.

2

Acoustique musicale

Objectifs d'apprentissage

- ▶ Savoir définir un son et distinguer un son pur d'un son complexe.
- ▶ Connaître les trois qualités associées à un son la hauteur, l'intensité et le timbre.
- ▶ Connaître le principe de la synthèse et de l'analyse d'un son musical complexe.
- ▶ Distinguer le spectre d'un son musical de celui d'un bruit.

Avertissement

Toutes les notions abordées dans le cours ne sont pas à connaître car elles sont tirées de documents à exploiter. Par contre, vous devez être capables de réaliser les activités et exercices. Certaines connaissances nécessaires à la compréhension des sujets traités sont rappelées dans les résumés de chapitre.

A

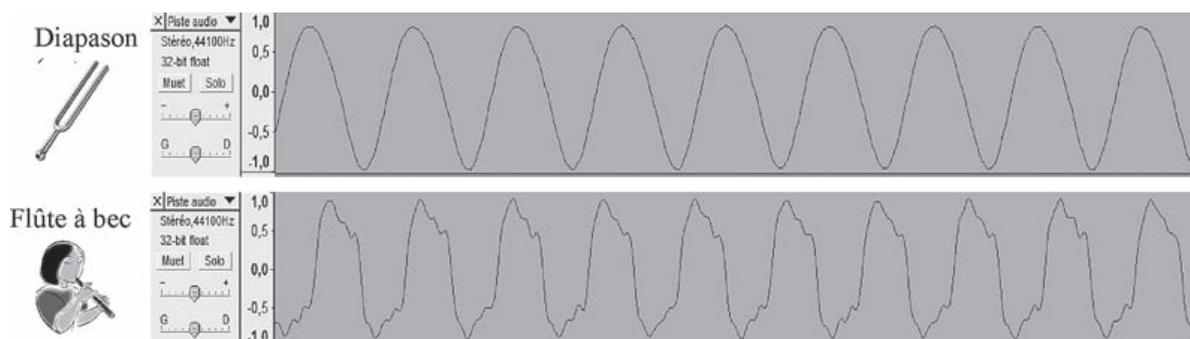
Pour débiter le chapitre

1. Qu'est-ce qu'un son ?

Le **son** est une onde produite par la vibration mécanique d'un support fluide (air, eau...) ou solide et propagée grâce à l'élasticité du milieu environnant sous forme d'ondes longitudinales dites **ondes sonores** ou acoustiques. Un son musical est un son possédant certaines propriétés harmoniques que nous allons découvrir dans ce chapitre.

2. Son pur et son musical complexe

Comparons les sons émis par un diapason et par un instrument de musique (exemple de la flûte à bec). Le diapason et la flûte à bec émettent la même note, par exemple un **la₃**. À l'aide d'un microphone et d'une carte son d'un ordinateur, on a réalisé l'enregistrement de sons émis au cours du temps par les deux sources sonores émettant une **note en continu**. Le logiciel utilisé est le gratuitiel Audacity. Nous vous encourageons à le télécharger par Internet.



- Avec le diapason, on observe une sinusoïde à l'écran.
- Avec la flûte à bec, on observe une courbe complexe. Cependant, on peut constater qu'elle est périodique, de même période que la sinusoïde.

Le son émis par le diapason est qualifié de son pur, alors que le son émis par l'instrument de musique est un son musical complexe.

Activité 1 La « pureté » d'une voix célèbre

Maria Callas, surnommée la « Bible de l'opéra », était une cantatrice américaine qui a bouleversé l'art lyrique du xx^e siècle. Elle demeure aujourd'hui encore l'une des cantatrices les plus célèbres pour la pureté de sa voix et reste l'icône même de la « diva ».

Ci-dessous, une note chantée par cette célèbre chanteuse. Le son est-il pur ou complexe ?

Maria Callas



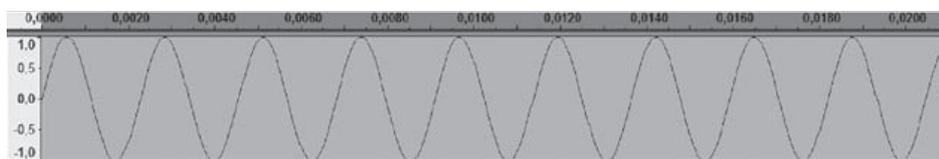
B Pour apprendre

1. Les qualités associées à un son musical

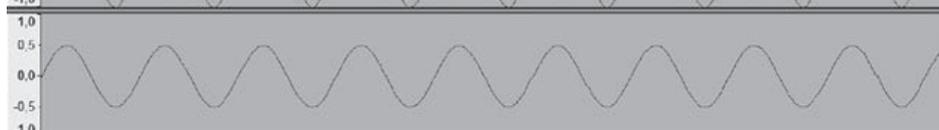
a) L'intensité

Selon la frappe du maillet sur le diapason, on peut produire un son plus ou moins intense.

Son très intense



Son peu intense



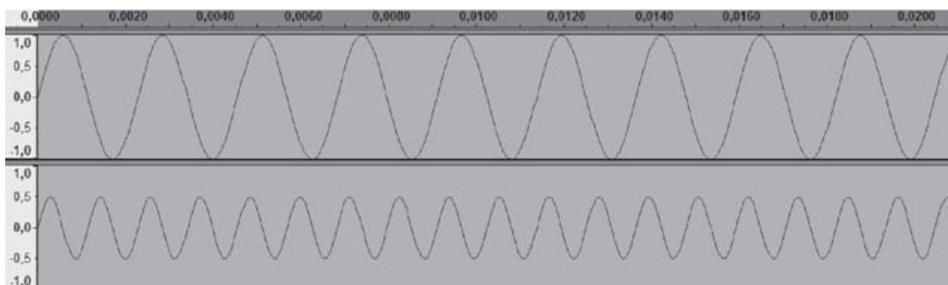
L'amplitude du signal visualisé est d'autant plus importante que le son est plus intense.

L'intensité d'un son est la qualité liée à l'amplitude de l'onde sonore.

b) La hauteur

Les notes d'une gamme (do, ré, mi, fa...) sont différemment perçues par l'oreille. Elles sont plus ou moins graves ou aiguës : on dit qu'elles ont des hauteurs différentes. Avec le logiciel Audacity, on peut générer des sons purs avec des fréquences différentes.

Son grave
 $f = 440 \text{ Hz}$



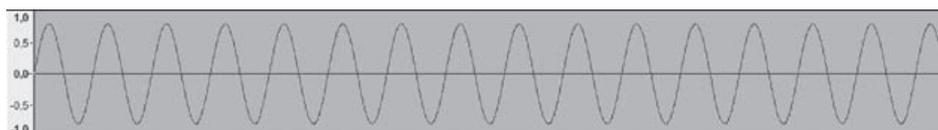
Son aigu
 $f = 880 \text{ Hz}$

La hauteur d'un son est la qualité liée à la fréquence de l'onde sonore. Plus la fréquence est élevée, plus le son perçu est aigu et, inversement, plus la fréquence est faible, plus le son perçu est grave.

c) Le timbre

Avec le logiciel Audacity, on peut générer des sons ayant la même fréquence ($f = 440 \text{ Hz}$), la même intensité mais des formes d'onde différentes.

Son pur
(sinusoïdal)



Son complexe
(carré)



Son complexe
(dents de scie)



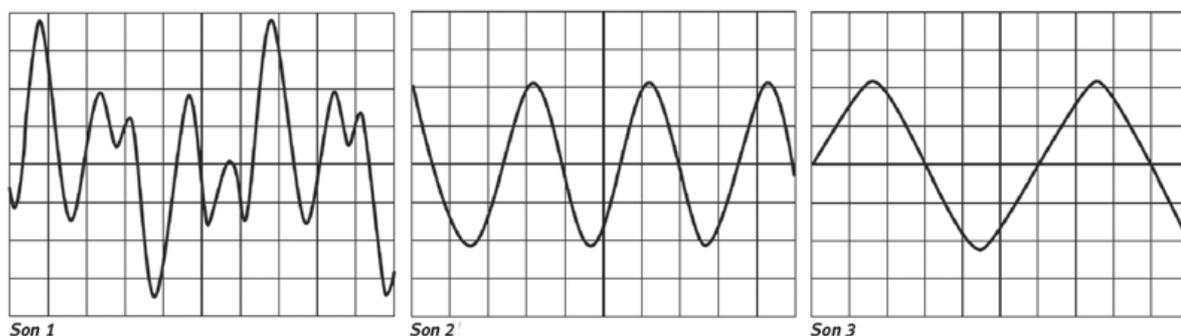
L'oreille permet de distinguer les différentes ondes sonores.

Le timbre est la qualité du son qui permet à l'oreille de différencier des sons de même hauteur et de même intensité. Il dépend de la forme d'onde de l'onde sonore.

Activité 2 Étude de sons enregistrés

On visualise à l'oscilloscope numérique trois sons émis par trois sources sonores différentes (son 1, son 2 et son 3). La sensibilité de balayage est, dans les trois cas, de : $s = 0,50 \text{ ms/div}$.

- 1 Déterminer la période T puis la fréquence de chaque son visualisé.
- 2 Deux sons ont la même hauteur mais pas le même timbre : dire lesquels en justifiant votre réponse.
- 3 Quel est le son le plus aigu ?
- 4 Quel est le son que l'on peut qualifier de son pur ? Justifier.
- 5 Le son 1 correspond-il à un son complexe ou à un son pur ? Justifier.



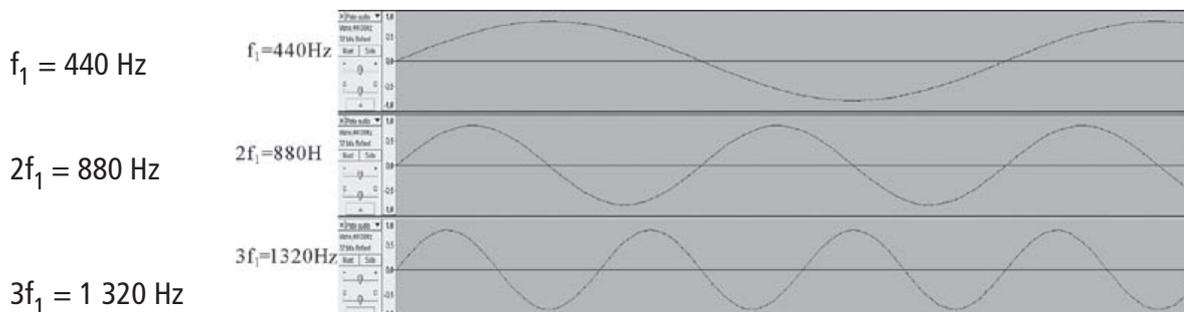
3. Son musical complexe

Comment réaliser expérimentalement la synthèse d'un son complexe ?

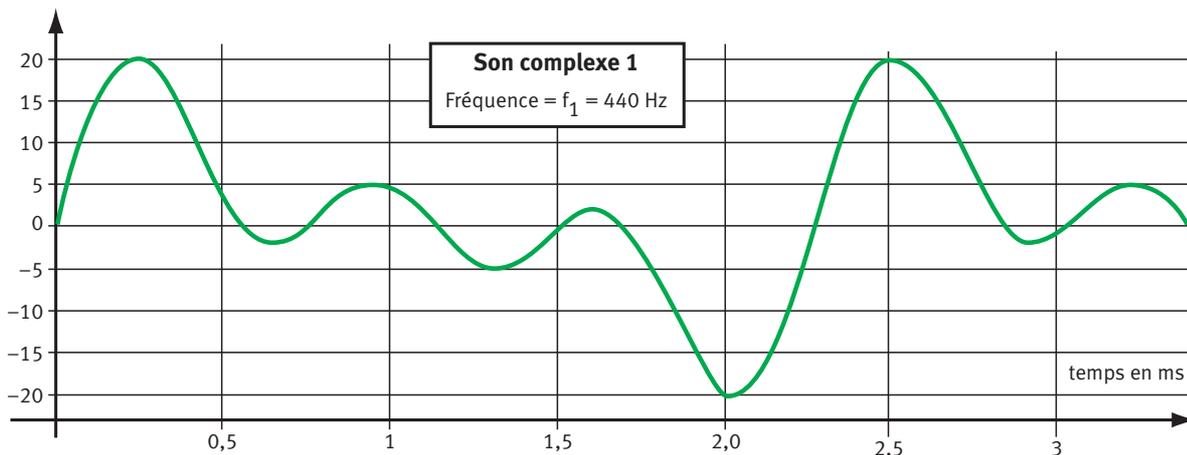
a) Synthèse d'un son musical complexe

On dispose d'un logiciel permettant de générer des sons purs (ondes sonores sinusoïdales) et de les superposer. On peut alors visualiser la forme d'onde du son résultant tout en l'écouter à l'aide d'un haut-parleur.

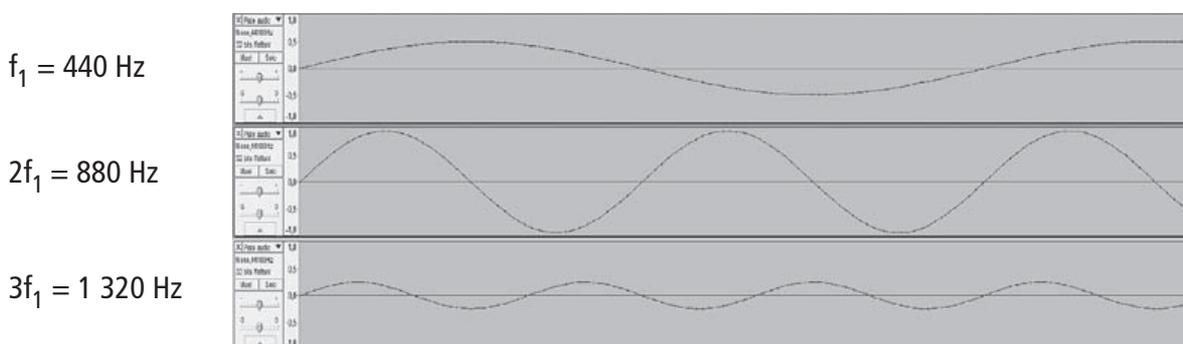
Réalisons la somme de trois ondes sinusoïdales de fréquences $f_1 = 440 \text{ Hz}$, $2f_1$ et $3f_1$ et ayant une même intensité.



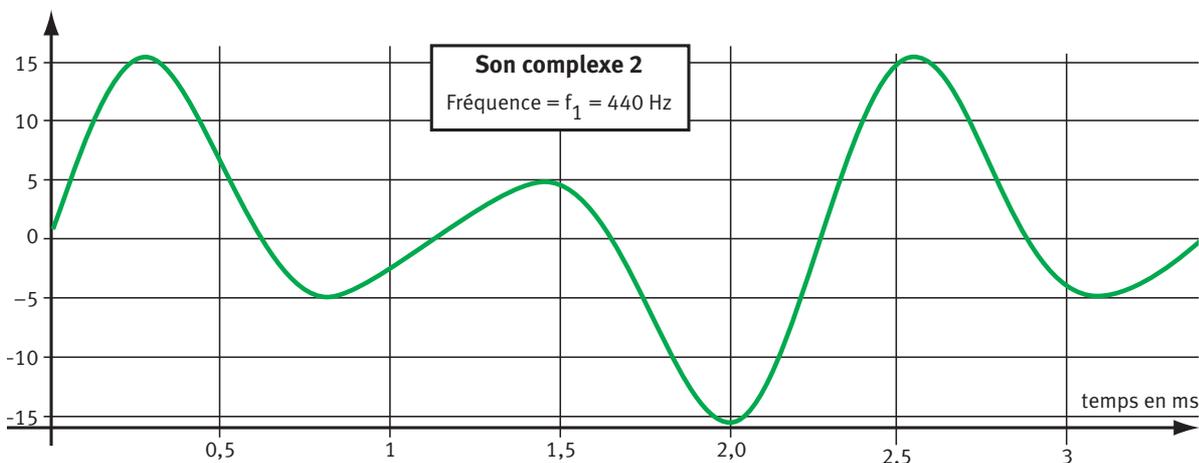
Le son résultant est périodique, de fréquence $f_1 = 440 \text{ Hz}$ mais le signal visualisé n'est pas sinusoïdal : il s'agit d'un son complexe !



Modifions les amplitudes des trois ondes sinusoïdales composant le signal complexe.



Le son émis par le haut-parleur garde la même hauteur (même fréquence f_1) mais le timbre varie. La forme d'onde du signal complexe change.



b) Les harmoniques

Les ondes sonores sinusoïdales de fréquences multiples de la fréquence f_1 , composant le son musical complexe, sont appelés **harmoniques**. L'onde sonore de fréquence f_1 est appelé le **premier harmonique** ou encore le **fondamental**.

Les ondes sonores sinusoïdales de fréquence $f_2 = 2f_1$, $f_3 = 3f_1$, $f_4 = 4f_1 \dots$ sont les 2^e, 3^e, 4^e... harmoniques du son complexe résultant de fréquence f_1 .

Le **mathématicien Joseph Fourier** (1768-1830) démontra que :

Les sons complexes de fréquence f_1 , de même hauteur, mais de timbres différents, résultent de la superposition d'harmoniques de fréquences multiples de f_1 .

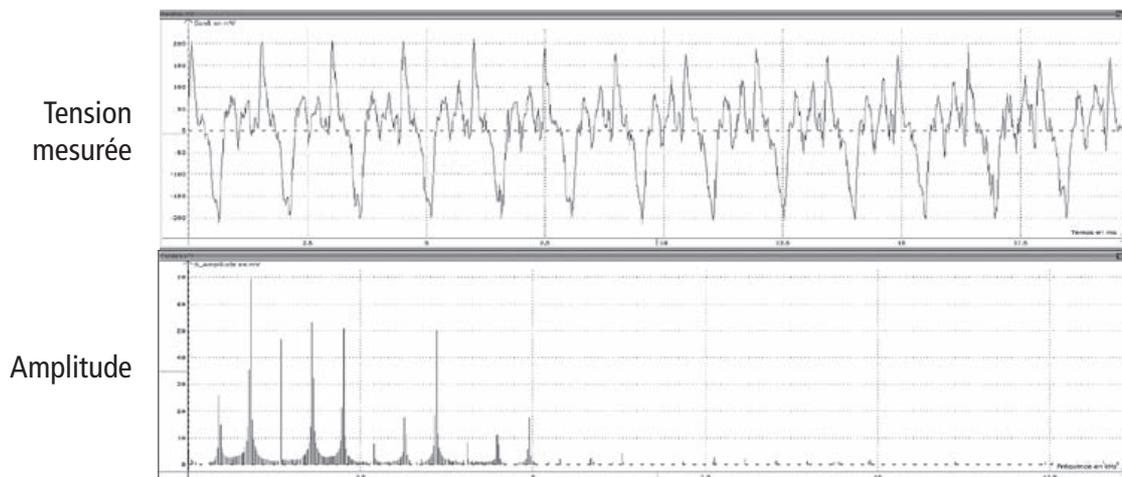
$$f_n = n \times f_1 \quad (n = 1, 2, 3 \dots)$$

f_n est la fréquence de l'harmonique de rang n et f_1 , la fréquence du fondamental (ou 1^{er} harmonique).

Remarque Les instruments de musique comme la guitare, le violon, le piano... possèdent une cavité résonante qui favorise certains harmoniques et en supprime d'autres. De ce fait, pour un son complexe de fréquence f_1 , tous les harmoniques ne sont pas obligatoirement présents dans le spectre. Il arrive même que le fondamental ne soit pas présent.

Activité 3 Étude d'une note (le la3) jouée au violon

La forme d'onde indique que le son du violon est un son complexe (car non sinusoïdal).



Le son émanant d'un violon est donc très riche en harmoniques. Les principaux harmoniques mesurés sont :

	f_1	f_2	f_3	f_4	f_5	f_6	f_7	f_8	f_9	f_{10}	f_{11}
Fréquence f (Hz)	440		1320	1760	2 200		3 080	3 520	3 960	4 400	4 840
Rapports f_n/f_1	1,00					6,00					

- 1 Quelle est la fréquence du son complexe ?
- 2 Quel est l'harmonique ayant l'amplitude la plus élevée ? Quelle est sa fréquence ?
- 3 Compléter le tableau ci-dessus.

C

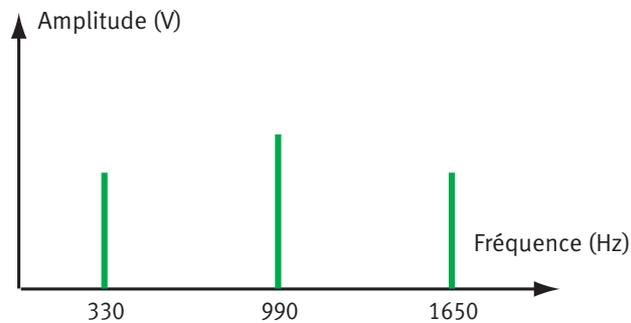
Pour conclure

1. Conclusion du chapitre

Analyse harmonique d'un son musical complexe (spectre de Fourier)



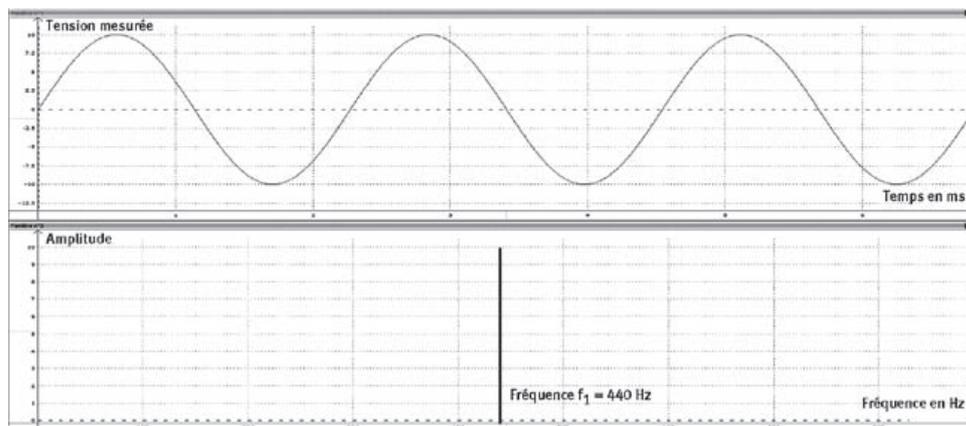
On réalise l'enregistrement d'un son grâce à un système constitué d'un micro + amplificateur + interface d'acquisition + ordinateur. Le signal enregistré est analysé avec un logiciel spécifique. On obtient alors un **spectre dit de Fourier**.



Le spectre dit de Fourier est un diagramme représentant l'amplitude des harmoniques en fonction de leur fréquence. Ne comportant que certaines fréquences, il est dit discontinu.

Cas d'un son pur (diapason 440 Hz)

Tension mesurée

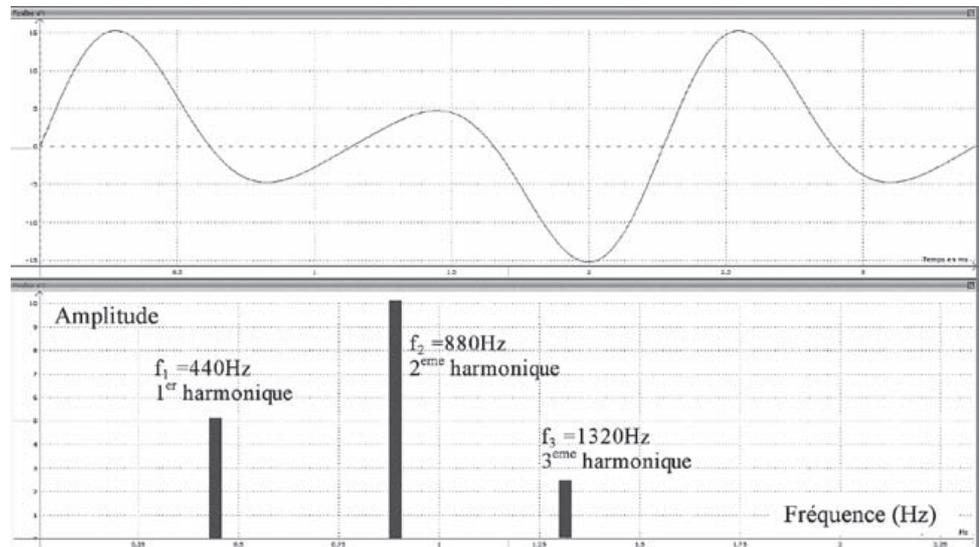


Le son pur analysé fait apparaître un seul harmonique de fréquence $f_1 = 440$ Hz (segment vertical). La longueur du segment est proportionnelle à l'amplitude de l'harmonique correspondant.

Le son est pur lorsque son spectre ne fait apparaître qu'un seul harmonique.

Cas d'un son complexe de fréquence 440 Hz

Tension mesurée



Le son complexe analysé fait apparaître trois harmoniques de fréquence f_1 , $f_2 = 2f_1$ et $f_3 = 3f_1$.

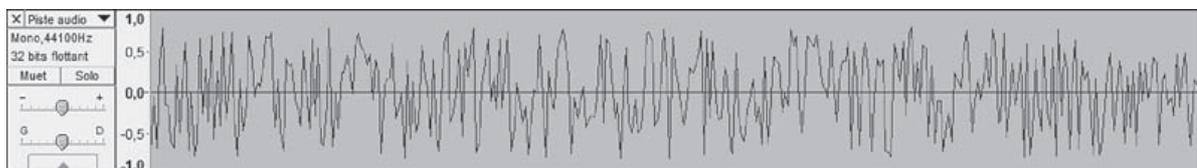
Le son est complexe lorsque son spectre fait apparaître plusieurs harmoniques dont les fréquences sont des multiples entiers de la fréquence du fondamental.

$$f_n = n \times f_1 \quad (n = 1, 2, 3 \dots)$$

f_n est la fréquence de l'harmonique de rang n et f_1 , la fréquence du fondamental (ou 1^{er} harmonique).

Analyse d'un bruit

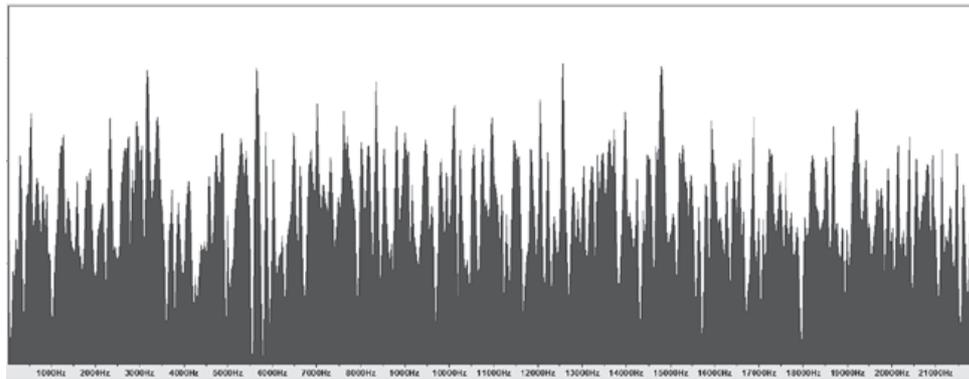
Un bruit ne possède pas de fréquence précise. La forme d'onde du son correspondant n'est pas périodique. C'est ce qui le différencie d'un son musical.



Le souffle émis par un poste de radio qui n'est pas accordé sur une station émettrice est un exemple de bruit blanc. Un bruit est fait de la superposition d'ondes de fréquences sans rapport entre elles, qu'on appelle des **sons partiels**.

Le spectre d'un bruit blanc comporte toutes les fréquences ; il est dit continu.

Amplitude



2. Exercices d'apprentissage

Exercice 1 Un trombone émet la note ré₃ (587 Hz). La note mi₂ (330 Hz) est émise par un piano.

- 1 Quelle est la qualité du son associée à la fréquence d'une note ?
- 2 Quelle est la note la plus grave ?
- 3 Quelle est la note de plus grande hauteur ?

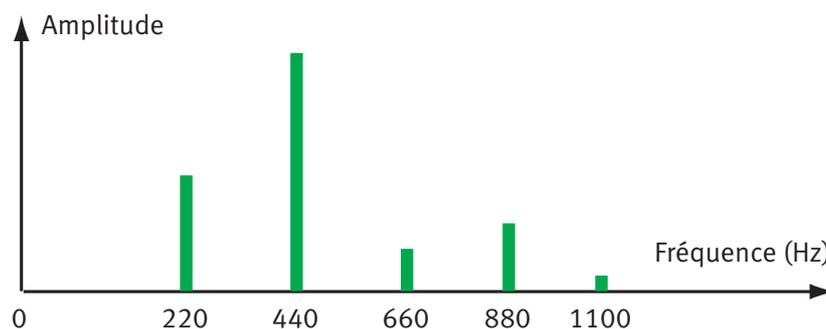
Exercice 2 **Fondamental et harmoniques**

Une flûte émet une note (ré₃) de fréquence 294 Hz (fréquence du fondamental).

- 1 Quelle est la fréquence de l'harmonique « 2 » de ce son ?
- 2 L'un des harmoniques du son émis a une fréquence de 1 176 Hz. De quel harmonique s'agit-il ?

Exercice 3 **Analyse d'un son**

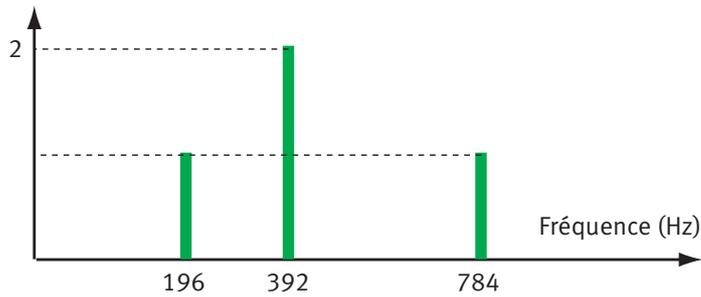
On a obtenu le spectre d'un son émis par un tuyau d'orgue :



- 1 Quelle est la fréquence f_1 du fondamental ?
- 2 Quelle est la fréquence du troisième harmonique ?
- 3 Quelle est la fréquence qui détermine la hauteur de ce son ?
- 4 Quelle est la fréquence de l'harmonique de plus grande amplitude ?

Exercice 4 Analyse d'un son

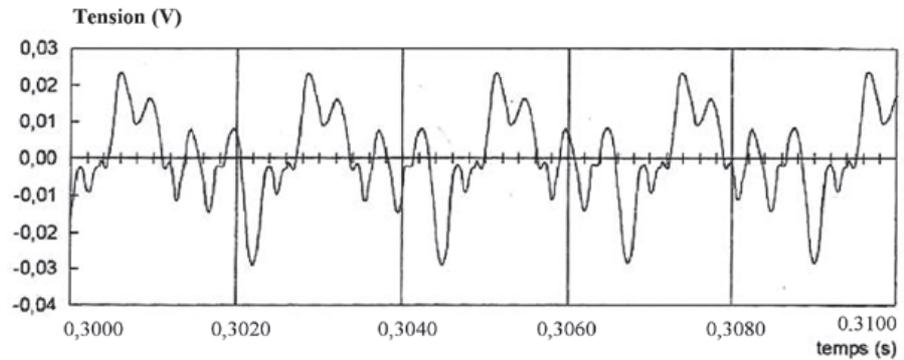
On donne ci-dessous le spectre d'une note jouée par un violoncelle :



- 1 Quelle est la fréquence f_1 du fondamental ?
- 2 Quels sont les harmoniques inférieurs à 1600 Hz absents de ce spectre ?
- 3 Combien de sons purs composent ce spectre ?

Exercice 5 Note jouée par un violon

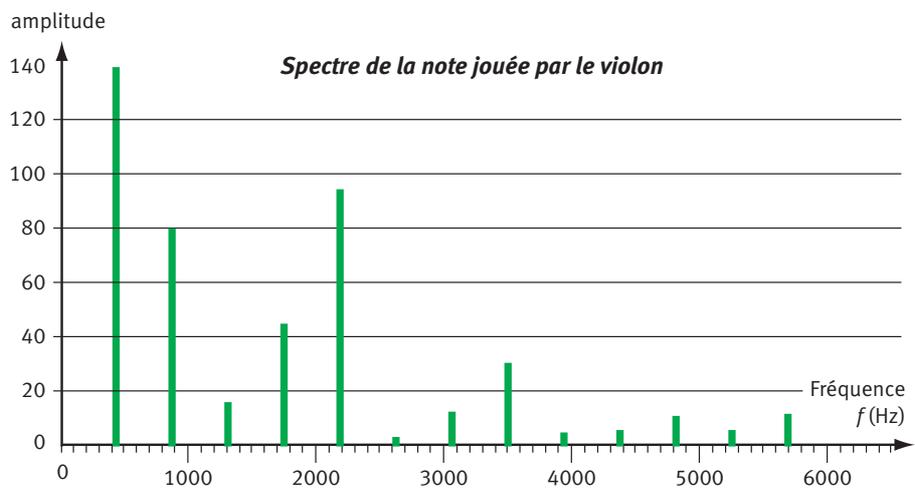
Lors d'un concert, on enregistre une note jouée par un violon à l'aide d'un microphone et d'un oscilloscope. L'oscillogramme obtenu est reproduit ci-dessous.



- 1 Déterminer la fréquence fondamentale f_1 de la note captée.
- 2 En déduire la note de musique jouée en s'aidant du tableau ci-dessous :

Note	do ₃	ré ₃	mi ₃	fa ₃	sol ₃	la ₃	si ₃	do ₄
f (Hz)	262	294	330	349	392	440	494	523

- 3 En s'aidant du spectre en fréquence de la note captée ci-dessous, calculer les valeurs des fréquences des harmoniques de rang 2 et de rang 13 de cette note.



3

Les instruments de musique

Objectifs d'apprentissage

- ▶ Savoir qu'un instrument de musique doit vibrer et émettre.
- ▶ Étudier la vibration d'une corde tendue entre deux points fixes.
- ▶ Étudier la vibration d'une colonne d'air.
- ▶ Étudier la vibration d'une percussion.
- ▶ Connaître l'existence des modes propres de vibration et exploiter les relations exprimant la quantification des modes.
- ▶ Connaître le principe de fonctionnement des instruments électroniques.

Avertissement

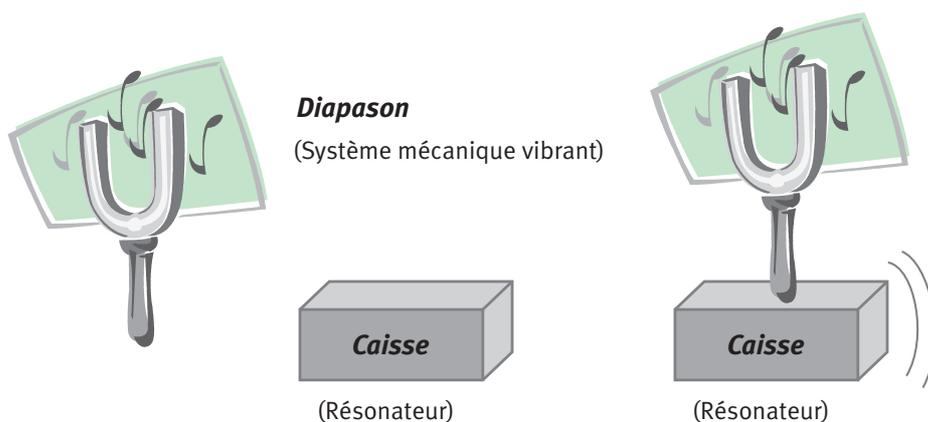
Toutes les notions abordées dans le cours ne sont pas à connaître car elles sont tirées de documents à exploiter. Par contre, vous devez être capables de réaliser les activités et exercices. Certaines connaissances nécessaires à la compréhension des sujets traités sont rappelées dans les résumés de chapitre.

A

Pour débiter le chapitre

1. Comment un instrument de musique acoustique produit-il un son musical ?

Considérons le son émis par un diapason.



Un diapason (système mécanique vibrant) est frappé puis laissé en l'air tout en étant tenu à la main ; le son émis est peu intense.

Si le diapason est relié à sa caisse de résonance (résonateur), le son devient intense et très audible. Les vibrations sont donc transmises au résonateur qui les transmet à l'air.

Pour produire un son, un diapason ou tout instrument de musique doit remplir deux rôles : vibrer et émettre.

Le résonateur permet au son d'être émis convenablement ; il permet un couplage efficace avec l'air.

(Système mécanique vibrant)
ou exciteur



Résonateur



Air

Le résonateur permet le couplage entre le système mécanique et l'air

2. Généralisation aux différents instruments de musique acoustique

Comme pour le diapason, tous les instruments de musique acoustiques possèdent un **système mécanique vibrant** appelé **exciteur** qui se trouve être :

		
<p>Instruments à cordes (guitare...)</p>	<p>Instruments à vent (flûte...)</p>	<p>Instruments à percussion (tambour...)</p>

- ▶ une **corde** dans les instruments à cordes (guitare, violon, banjo, harpe...) ;
- ▶ une **anche** (libre ou battante) ou un **biseau** dans les **instruments à vent** (orgue acoustique à tuyaux, flûte à bec, clarinette, hautbois...) ;
- ▶ une **membrane tendue** (peau, boyau, tissu, matière plastique) ou un **matériau dur** (bois, métal, argile, verre...) dans les instruments à percussion (djembé, tambour, xylophone, triangle, timbale, woodblock, crécelle...).

La vibration étant généralement trop faible pour être audible, il est nécessaire de l'amplifier : c'est le rôle de la caisse de résonance ou **résonateur**. Dans chaque

cas, le système vibrant est associé à un système assurant le couplage avec l'air : **caisse de résonance** pour les instruments à cordes et pour les instruments à percussion, **tuyaux** pour les instruments à vent.

L'air contenu dans le résonateur, mis en résonance, produit l'onde sonore ou acoustique.

Activité 4 Classification des instruments de musique

Au XIX^e siècle, on commença une classification systématique des instruments de musique. Le mode de classification le plus utilisé est celui de Sachs-Hornbostel (1914). Les instruments mécaniques ou acoustiques forment quatre grands groupes : les idiophones (instruments à percussion sans membrane), les membranophones (instruments à percussion avec membrane tendue), les cordophones (instruments à cordes) et les aérophones (instruments à vent).

À quelle famille appartiennent les instruments de musique suivants : castagnettes, timbale à pédale, piano, mandoline, banjo, trombone, cor anglais, scie musicale, harmonica.

Activité 5 Excitateur et résonateur des instruments de musique

Rechercher quel est le système mécanique vibrant (ou excitateur) et quel est le résonateur assurant le couplage avec l'air pour les instruments de musique suivants : grosse caisse, guimbarde, violon, hautbois, trompette, clarinette, flûte à bec.

Activité 6 Les deux catégories d'éléments constitutifs d'un instrument de musique

Classer les mots suivants en deux catégories que vous préciserez : membrane de tambour, anche de saxophone, corps de violon, corps d'un tuyau d'orgue, corde de harpe, languette d'acier de la guimbarde, lame en bois dur de xylophone.

3. La gamme musicale tempérée

a) Gamme et octave

C'est au début du XI^e siècle, en recherchant à la fois un système de notation (qui est à l'origine de la portée) et un système de codification des intervalles musicaux, que Guy d'Arezzo aurait imaginé ce que l'on désigne aujourd'hui par le mot « gamme ». Partant des « tétracordes » des Grecs, qui s'en servaient pour diviser l'octave en deux parties (par exemple, dans le mode dit dorien : *mi, ré, ut, si/la, sol, fa, mi*), Guy d'Arezzo ajouta une note supplémentaire, plus basse que la dernière, et qu'il désigne par la lettre grec *gamma*, d'où vint le mot « gamme ». Enfin, alors que les notes étaient, jusqu'à Guy d'Arezzo, choisies dans les premières lettres de l'alphabet, c'est à lui qu'on attribue le procédé mnémotechnique par lequel on les nomme maintenant dans les pays latins à partir des syllabes initiales d'un hymne à saint Jean-Baptiste :

Ut queant laxis

Resonare fibris

Mira gestorum

Famuli tuorum

Solve polluti

Labii reatum

Sancte Iohannes

Chromatisme ascendant :

Do – do# – ré – ré# – mi – fa – fa# – sol – sol# – la – la# – si

Chromatisme descendant :

Si – si \flat – la – la \flat – sol – sol \flat – fa – mi – mi \flat – ré – ré \flat – do

Soit $f_1, f_2 \dots f_{12}$ les hauteurs successives séparées par un intervalle d'un demi-ton. Nous avons donc sur une octave (12 demi-tons) :

$$f_{12} / f_1 = (f_{12} / f_{11}) \times (f_{11} / f_{10}) \times \dots \times (f_2 / f_1) = 2 = (t_{1/2})^{12}.$$

On en déduit que le rapport de fréquences entre deux demi-tons voisins est :

$$t_{1/2} = 2^{\frac{1}{12}} \approx 1,06$$

Lorsqu'on passe d'une note de fréquence f_n à la note de fréquence f_{n+1} placée un demi-ton au-dessus, ces fréquences vérifient :

$$\frac{f_{n+1}}{f_n} = 2^{\frac{1}{12}}$$

En musique, le diapason est un outil de musicien donnant la hauteur / fréquence d'une note repère conventionnelle, en général le « la », afin que celui-ci accorde ou étalonne son instrument.

En 1953, la Conférence internationale de Londres a fixé la hauteur absolue du la₃ à 440 Hz.

Remarque L'oreille est très sensible au rapport des hauteurs (fréquences) de deux notes. À partir de ces rapports rationnels entre les fréquences des sons consonants, on peut construire une **gamme musicale dite naturelle**. Celle-ci présente néanmoins un inconvénient majeur : l'intervalle entre deux notes de hauteur voisine n'est pas constant ! Un musicien ne peut donc pas modifier d'un même intervalle la hauteur de toutes les notes d'une œuvre pour la transposer dans une tonalité différente.

Pour cette raison, la **gamme tempérée** a été construite afin de se rapprocher de la gamme naturelle !

Activité 7 Fréquence de la gamme tempérée

Élaborée au $xvii^e$ siècle par Werckmeister (1645-1706) pour faciliter la transposition des partitions des instruments à cordes aux instruments à clavier, la gamme tempérée a particulièrement inspiré J.-S. Bach (1685-1750) et J.-P. Rameau (1683-1764) qui ont contribué à sa diffusion.

- 1 Calculer les fréquences de la gamme do majeur sachant que la fréquence du la₃ est $f(\text{la}_3) = 440$ Hz

Note latine	Do ₃	Ré ₃	Mi ₃	Fa ₃	Sol ₃	La ₃	Si ₃
Fréquence (Hz)						440	

- ② Calculer la fréquence du do_4 qui est la note située à l'octave du do_3 .
- ③ Calculer les fréquences des altérations (dièse ou bémol) suivantes : $\text{do}\sharp_3$; $\text{ré}\sharp_3$; $\text{sol}\flat_3$; $\text{la}\flat_3$ et la_3 .

B Pour apprendre

1. Les instruments de musique acoustique

a) Les instruments à cordes



Les instruments à cordes comme la guitare, le violon... ont des cordes tendues et fixées aux deux extrémités.

1. Vibration d'une corde tendue

1.1. Production d'un son par un instrument à cordes (régime libre)

Lorsqu'un guitariste pince une corde de sa guitare, cette corde entre en vibration. Elle est le siège d'**oscillations** dites **libres**. Les vibrations sont transmises à la caisse de résonance puis à l'air environnant.

Le son émis par une corde a la même fréquence que les vibrations de cette corde.

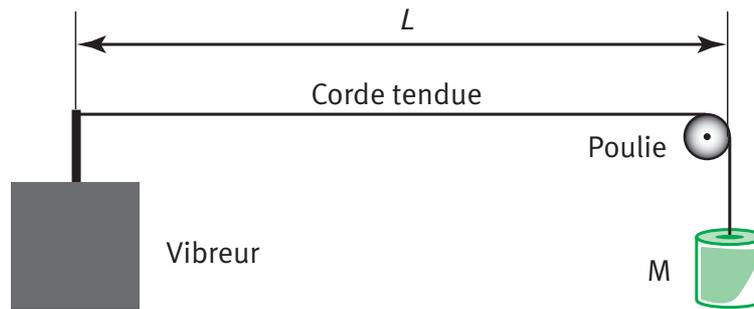
1.2. Modes de vibration d'une corde tendue (régime forcé)

Si on impose une vibration sinusoïdale de fréquence f à une corde tendue (par exemple par l'intermédiaire d'un vibreur), celle-ci ne vibre que pour certaines valeurs bien déterminées de la fréquence correspondant aux **modes propres de vibration** de la corde tendue.

Activité 8 (expérimentale)

Vibrations en régime forcé d'une corde tendue

Pour modéliser une corde de guitare fixée aux deux extrémités, on utilise le dispositif suivant :



Expérience

Un vibreur, accroché à l'extrémité d'une corde horizontale de longueur $L = 1,00$ m, oscille verticalement à la fréquence f . Cette corde passe dans la gorge d'une poulie pour être tendue à son autre extrémité par une masse de valeur M . Le vibreur est alimenté à l'aide d'un GBF qui délivre une tension alternative sinusoïdale de fréquence f réglable. On se propose d'étudier les oscillations périodiques qui résultent de l'excitation de la corde par le mouvement du vibreur (oscillations dites forcées).

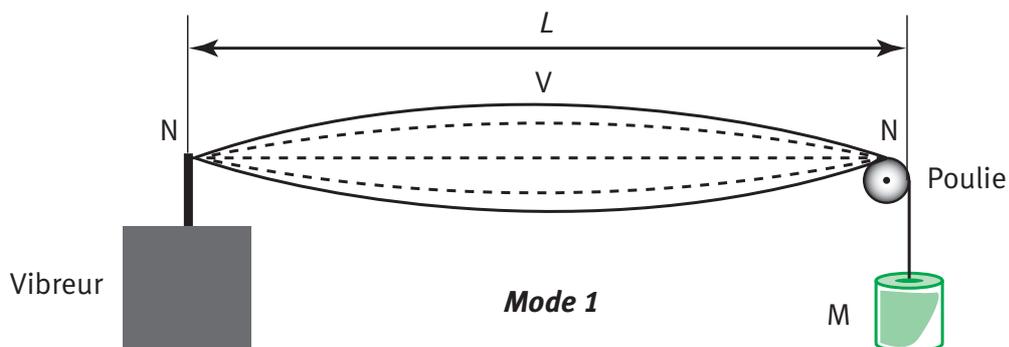
Mesures

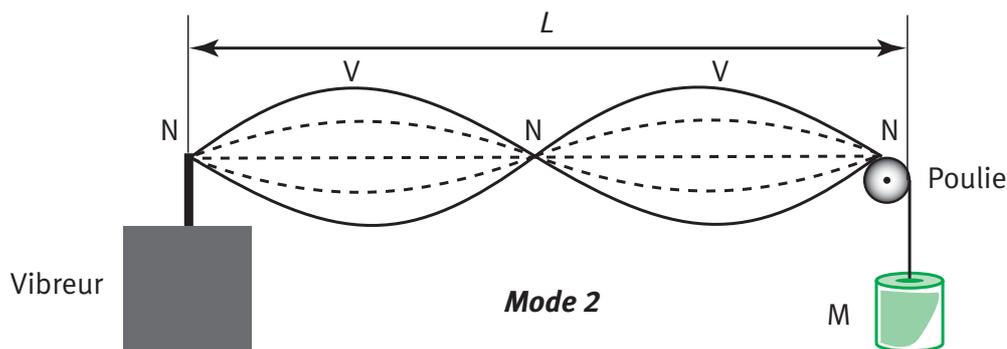
On augmente la fréquence f du GBF et on note successivement les fréquences f_1, f_2, f_3 et f_4 permettant d'obtenir les modes propres de vibration (visualisation de fuseaux amples). Les fréquences $f_1, f_2, f_3, f_4, \dots$ sont aussi appelées fréquences propres de vibration de la corde ou harmoniques.

Nombre de fuseaux n mode propre de vibration	1	2	3	4
Fréquence (Hz)	$f_1 = 22$	$f_2 = 44$	$f_3 = 66$	$f_4 = 88$

Observations

Dans chaque mode propre, on observe que certains points sont constamment immobiles (**nœuds de vibration = N**) tandis que d'autres vibrent avec une grande amplitude (**ventres de vibration = V**). Des fuseaux apparaissent.



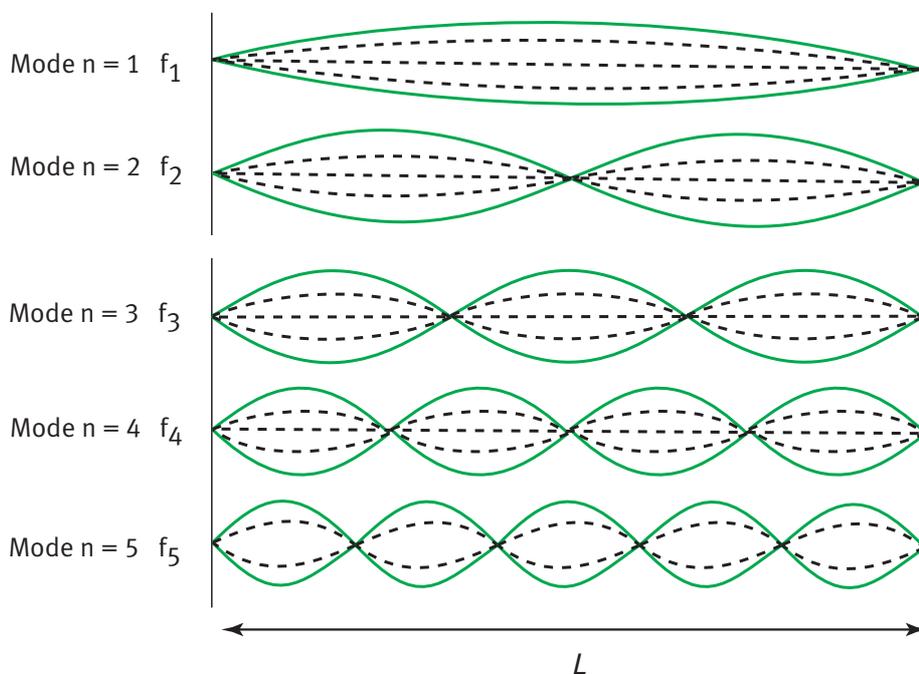


- ❶ Déduire des résultats précédents une relation entre f_1 et les autres fréquences f_n ($n = 1, 2, 3, \dots$). Pourquoi parle-t-on de « quantification » des fréquences ?
- ❷ Faire le schéma de la corde lorsque $n = 3$ (mode propre n° 3). Repérer dans chaque cas les ventres « V » et les nœuds « N » de vibration de la corde.
- ❸ Le mouvement vibratoire de la corde dans un mode n donné correspond à une onde dite stationnaire. Cette onde dite stationnaire correspond-elle à une onde transversale ? Longitudinale ? Justifier.

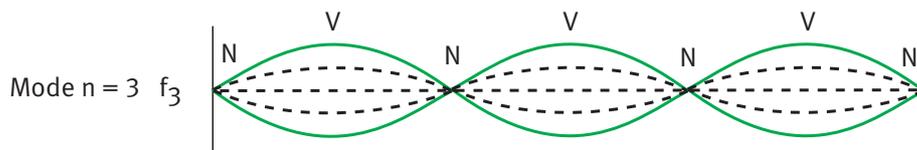
Si on impose une vibration sinusoïdale de fréquence f à une corde tendue (par exemple par l'intermédiaire d'un vibreur), celle-ci ne vibre que pour certaines valeurs bien déterminées de la fréquence.

Les fréquences f_n ($n = 1, 2, 3, \dots$) bien déterminées correspondent aux modes propres de vibrations de la corde.

On observe que la vibration s'effectue à l'intérieur de fuseaux dont le nombre augmente avec la fréquence.



Dans chaque mode de vibration de la corde, **les points immobiles sont appelés nœuds (N) de vibration et les lieux de déformation maximale sont les ventres (V) de vibration.**



Chaque mode propre correspond à un harmonique. Les fréquences des harmoniques sont des multiples de la fréquence du fondamental. On dit que **les fréquences sont quantifiées** :

$$f_n = n \times f_1 \quad \text{où } n = 1, 2, 3 \dots$$

Remarque Si on laisse vibrer librement la corde, après l'avoir frappée ou pincée, le son complexe obtenu possède des harmoniques dont les fréquences sont celles des modes propres de la corde.



Le son émis par le violon comporte quatre harmoniques :

$$f_1 = 195 \text{ Hz} ; f_2 = 2 \times f_1 = 390 \text{ Hz} ; f_3 = 3 \times f_1 = 585 \text{ Hz} ; f_4 = 4 \times f_1 = 780 \text{ Hz}$$

Une vibration libre d'une corde d'un instrument à cordes est une combinaison de différents modes propres.

Activité 9 Vibrations d'une corde tendue de guitare

Une corde tendue entre deux points fixes vibre à la fréquence de 200 Hz en formant quatre fuseaux.

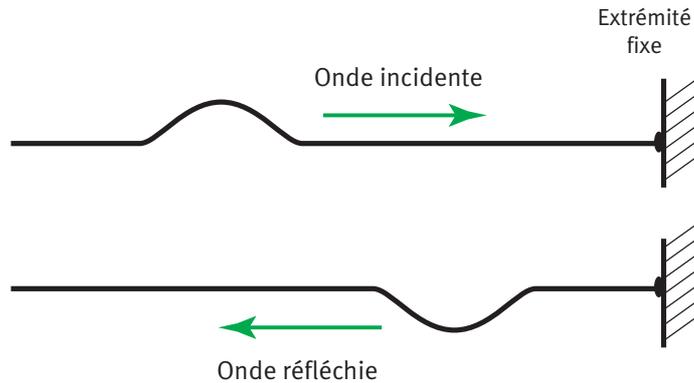
- ① Combien présente-t-elle de ventres et de nœuds ?
- ② Que se passe-t-il si on pose le doigt au milieu de la corde ?
- ③ Pour quelles fréquences verra-t-on 1 fuseau ? 3 fuseaux ? 5 fuseaux ?
- ④ Que se passe-t-il à la fréquence de 225 Hz ?

2. Interprétation ondulatoire : ondes stationnaires

La corde d'une guitare est un milieu vibrant limité. Observons ce qui se passe lorsqu'une onde parvient aux extrémités de la corde.

2.1. Réflexion d'une onde sur un obstacle fixe

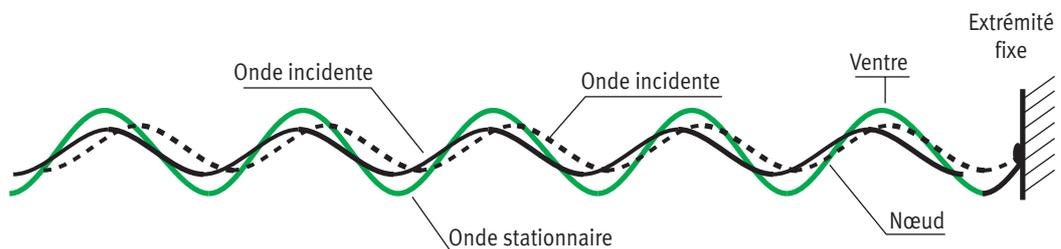
La figure ci-après montre qu'une onde transversale se propageant le long d'une corde et qui se réfléchit sur l'extrémité fixe de cette corde.



Lorsqu'une onde transversale se réfléchit à l'extrémité fixe d'une corde, il apparaît une onde réfléchie, de forme renversée, qui se propage à la même vitesse mais de sens contraire par rapport à l'onde incidente.

2.2. Réflexion d'une onde transversale périodique sinusoïdale sur un obstacle fixe : onde stationnaire

Une onde sinusoïdale incidente qui se réfléchit sur l'obstacle fixe forme une onde réfléchie. La superposition de l'onde incidente et de l'onde réfléchie forme une onde stationnaire.

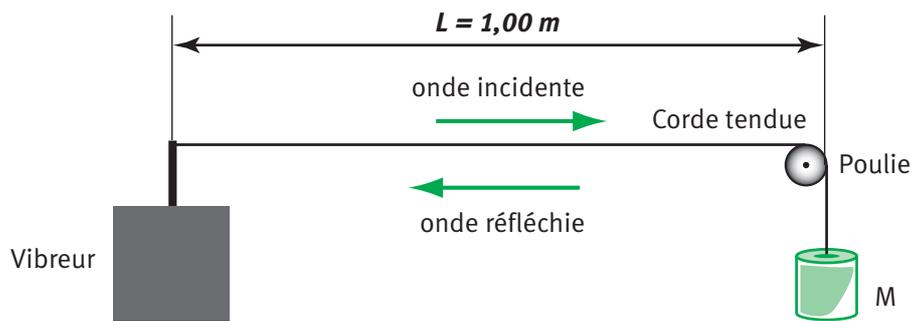


Simulation : site Internet de Gilbert Gastebois
<http://gilbert.gastebois.pagesperso-orange.fr/>

La superposition d'une onde progressive sinusoïdale de fréquence f et de l'onde réfléchie sur un obstacle fixe fait apparaître une onde stationnaire de même fréquence f . Cette onde stationnaire présente des nœuds et des ventres de vibration.

2.3. Réflexion d'une onde transversale périodique sinusoïdale sur deux obstacles fixes

Dans le cas d'une guitare, la corde est fixée aux deux extrémités. Le dispositif ci-dessous modélise une corde de guitare fixée aux deux extrémités. Lorsqu'une onde se propage sur cette corde, elle est réfléchie de nombreuses fois aux extrémités. Dans certaines conditions, on obtient des **ondes stationnaires**. On dit que **la corde entre en résonance**.



Activité 10 (expérimentale)

Vibrations en régime forcé d'une corde tendue

On relève les fréquences propres de vibration de la corde (ou fréquences des ondes stationnaires) ainsi que les longueurs des fuseaux des différents modes de vibration. La longueur de la corde tendue est $L = 1,00 \text{ m}$.

Nombre de fuseaux n mode propre de vibration	1	2	3	4
Fréquence (Hz)	$f_1 = 22$	$f_2 = 44$	$f_3 = 66$	$f_4 = 88$
Longueur d'un fuseau (m)	1,00	0,50	0,33	0,25

- Compléter le tableau ci-dessus en précisant la fréquence f_3 des ondes stationnaires ainsi que la longueur d'un fuseau dans le mode 3.
- Une onde mécanique sinusoïdale est caractérisée par une période temporelle T et une période spatiale λ appelée longueur d'onde. À quoi correspond la longueur d'un fuseau dans les différents modes propres de vibration ?
- En déduire une relation générale entre L , n et λ_n (λ_n : longueur d'onde dans le mode n) traduisant la condition qui permet d'avoir des ondes stationnaires dans le mode n ?

La distance entre deux nœuds consécutifs N ou entre deux ventres consécutifs V de l'onde stationnaire est égale à la demi-longueur d'onde de l'onde incidente.

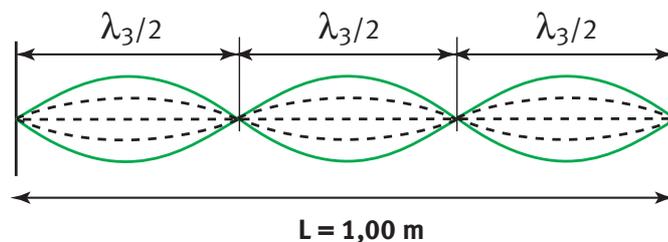
Condition d'onde stationnaire : une onde sinusoïdale se propageant le long d'une corde, de longueur L , fixée aux deux extrémités, donne naissance à une onde stationnaire de longueur d'onde λ_n de n fuseaux si :

$$L = n \times \frac{\lambda_n}{2} \text{ où } n = 1, 2, 3, \dots$$

Exemple

Dans le mode 3

$$L = 3 \times \frac{\lambda_3}{2}$$



Activité 11

Fréquence du fondamental

- Rappeler la relation entre la longueur d'onde λ_n , la célérité V et la fréquence f_n de l'onde incidente en condition d'onde stationnaire dans le mode n .

- 2 Déterminer la relation entre la fréquence f_n du mode propre n en fonction de V et L .
- 3 En déduire la fréquence f_1 du fondamental en fonction de V et L .

Fréquence du fondamental : la fréquence fondamentale (en Hz) d'une corde de longueur L (en m) est :

$$f_1 = \frac{V}{2 \times L}$$

avec V la célérité des ondes transversales sur cette corde exprimée en m/s.

3. Paramètres de vibration de la corde tendue

3.1. Célérité V de l'onde progressive sur la corde tendue

La célérité V de l'onde progressive le long de la corde dépend des propriétés du milieu c'est-à-dire de l'inertie du milieu (résistance au déplacement = masse μ par unité de longueur de la corde...) et de la rigidité du milieu (résistance à la déformation = tension T de la corde...).

$$V = \sqrt{\frac{T}{\mu}}$$

T : tension en N (newtons) et μ : masse linéique en kg/m

3.2. Expression de la fréquence du fondamental en fonction des différents paramètres

Activité 12 Fréquence du fondamental en fonction des paramètres T et μ

Déterminer l'expression de la fréquence f_1 du fondamental en fonction de la longueur L de la corde, de la tension T de la corde et de la masse linéique μ de la corde.

Les fréquences propres f_n d'une corde dépendent de la tension T de la corde, de sa masse linéique μ et de la sa longueur L .

$$f_n = \frac{n}{2 \times L} \times \sqrt{\frac{T}{\mu}}$$

T : tension en N (newtons) et μ : masse linéique en kg/m

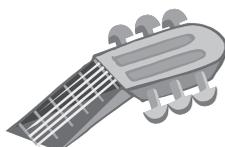
f_n : en Hz (hertz) et L en m (mètres)

Remarque

On constate que le son produit est plus aigu ($f \uparrow$) si la corde est plus courte ($L \downarrow$), si elle est plus tendue ($T \uparrow$) ou si elle est plus légère ($\mu \downarrow$).

En pratique, on observe des instruments à cordes avec :

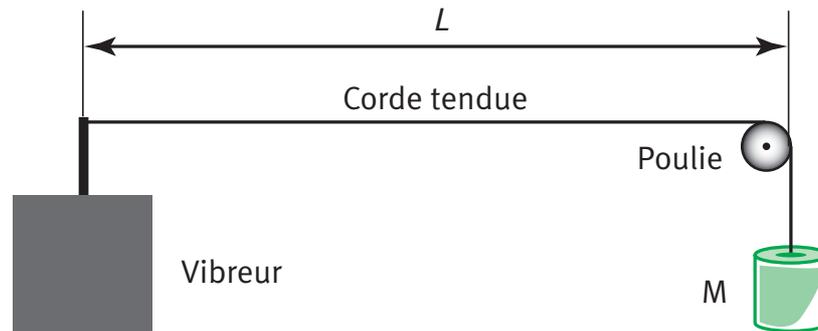
- ▶ des cordes de longueur différente (harpe...) → Le paramètre L varie.
- ▶ des cordes de nature différente (la guitare, le violon...) → Le paramètre μ varie.
- ▶ des tensions différentes pour accorder → Le paramètre T varie.



Activité 13 Masse linéique d'une corde tendue

On considère le dispositif suivant où un vibreur crée une onde sinusoïdale sur une corde tendue. Pour une longueur L de la corde et une masse M accrochée à celle-ci, la fréquence du mode fondamental est égale à 12 Hz ($g = 9,81$ N/kg).

- 1 La longueur de la corde est $L = 1,00$ m. Quelle est la célérité V de propagation d'une onde sur cette corde ?
- 2 La masse M accrochée à la corde est égale à $M = 25$ g. Quelle est la tension T de la corde ? En déduire la masse linéique μ de la corde.



b) Les instruments à vent

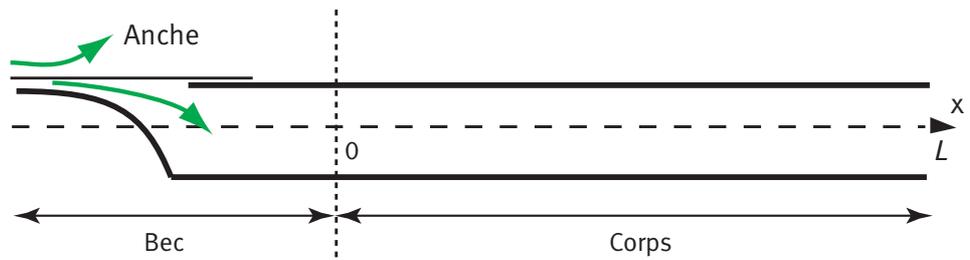
1. Généralités



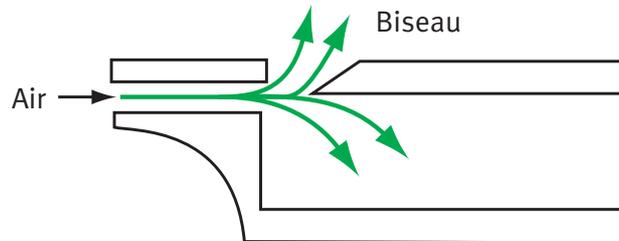
Les instruments à vent sont des instruments de musique qui produisent le son par de l'air mis en vibration dans un corps sonore (résonateur). On dit que la colonne d'air de l'instrument est excitée.

On peut classer les instruments à vent selon le système exciteur :

- ▶ **Instruments à anche lippale** (trompette, cor, trombone...) : le son est produit par la tension élastique des lèvres de l'exécutant, qui met en vibration la colonne d'air de l'instrument.
- ▶ **Instruments à biseau** (flûte à bec, tuyau d'orgue à embouchure de flûte...) : un jet d'air est envoyé sur une arête (le biseau), qui le divise. Des tourbillons se forment alors. Une partie du jet d'air est envoyé à l'extérieur, l'autre entre dans l'instrument et se trouve renforcée par la colonne d'air vibrante du tuyau, ce dernier servant de résonateur.
- ▶ **Instruments à anche battante simple** (clarinette, saxophone...) : le son est produit par une anche qui ferme périodiquement l'arrivée de l'air dans l'embouchure en forme de bec, mettant ainsi en vibration la colonne d'air de l'instrument.



Vue en coupe schématique de la clarinette



Vue en coupe schématique de la flûte à bec

- ▶ **Instruments à anche battante double** (hautbois, cornemuse...) : l'anche double se compose de deux fines lamelles de roseau fixées sur un petit tube de métal et dont les extrémités s'entrechoquent, entraînant une vibration de l'air dans le corps de l'instrument.
- ▶ **Instruments à anche libre** (harmonica, accordéon...) : les sons sont produits grâce à des anches métalliques qui vibrent librement dans une colonne d'air.

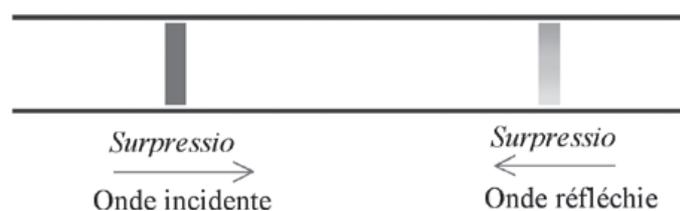
Pour obtenir des sons intenses, les systèmes excitateurs doivent être couplés à une colonne d'air contenue dans le **résonateur** de l'instrument à vent.

2. Vibration d'une colonne d'air

Dans le cas des instruments à vent à embouchure de flûte, l'ouverture au niveau du biseau est assez importante. Cette extrémité du tube de l'instrument se comporte comme une extrémité ouverte. On parle alors de colonne d'air ouverte/ouverte.

Dans le cas des instruments à vent à anche, l'extrémité au niveau de l'anche est fermée alors que l'autre extrémité est en général ouverte. On parle alors de colonne d'air ouverte/fermée.

Lorsqu'une colonne d'air d'un tuyau sonore entre en vibration, elle est le siège d'un phénomène d'**ondes stationnaires**. Pour interpréter le phénomène, il faut appliquer le principe de superposition d'**ondes incidentes et réfléchies** dans un milieu à une dimension et il faut tenir compte de conditions aux limites : comme pour les instruments à cordes, seules certaines vibrations forcées sont alors amplifiées dans le résonateur par un **phénomène de résonance**.



2.1. Modes de vibration d'une colonne d'air ouverte/ouverte (régime forcé)

Activité 14 (expérimentale)

Vibrations en régime forcé d'une colonne d'air ouverte/ouverte

On a réalisé le montage ci-dessous : un GBF alimente un haut-parleur avec une tension sinusoïdale de fréquence f . La membrane du haut-parleur en mouvement vibratoire force l'air du tube de longueur $L = 0,627$ m, ouvert aux deux extrémités, à vibrer longitudinalement (vibrations forcées). Un micro explorateur, sensible à la pression sonore, est relié à un ordinateur *via* une interface numérique d'acquisition. Il détecte des vibrations locales de pression $p(x,t)$ ou surpression. Un maximum d'amplitude de la tension visualisée correspond à un maximum de $p(x,t)$ et un minimum de l'amplitude correspond à un minimum de pression $p(x,t)$.



On augmente la fréquence f du GBF et on relève les fréquences f_n ($n = 1, 2, 3, \dots$) pour lesquelles la colonne d'air entre en résonance. Pour chaque valeur de f_n , on entend un son intense, ce qui se traduit par une valeur maximale de l'amplitude du signal aux bornes du microphone.

	f_1	f_2	f_3	f_4	f_5	f_6	f_7	f_8	f_9
Fréquence f (Hz)	255	517	765	1 020		1 530	1 785	2 040	2 295
Rapports f_n/f_1					5,00				

- 1 Compléter le tableau en calculant les rapports f_n/f_1 et la fréquence f_5 .
- 2 En déduire une relation entre f_n et f_1 . Y a-t-il une analogie avec les instruments à cordes ?

Si on impose une vibration sinusoïdale de fréquence f à une colonne d'air ouverte aux deux extrémités (par exemple par l'intermédiaire d'un haut-parleur), celle-ci ne vibre que pour certaines valeurs bien déterminées de la fréquence.

Les fréquences f_n ($n = 1, 2, 3, \dots$) bien déterminées correspondent aux modes propres de vibrations de la colonne d'air ouverte/ouverte. Chaque mode propre correspond à un harmonique. Les fréquences des harmoniques sont des multiples de la fréquence du fondamental. On dit que les fréquences sont quantifiées :

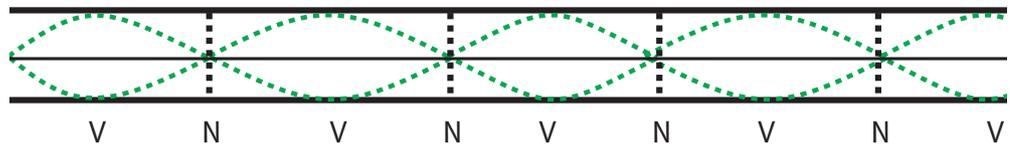
$$f_n = n \times f_1 \quad \text{où } n = 1, 2, 3, \dots$$

Ce résultat est analogue à celui obtenu avec la vibration d'une corde tendue.

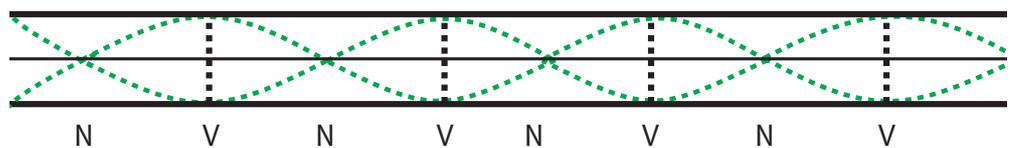
Par analogie et pour chaque mode de vibration de l'air, les points immobiles sont appelés nœuds (N) de vibration et les lieux de déformation maximale sont les ventres (V) de vibration.

Les microphones sont sensibles à la pression et non à la vibration des molécules d'air. Aux ventres de pression correspondent des nœuds de vibration (si la surpression est élevée, les molécules vibrent faiblement) et, inversement, aux nœuds de pression correspondent des ventres de vibration (si la surpression est faible, les molécules vibrent fortement).

Ventres et nœuds de **pression** de l'air



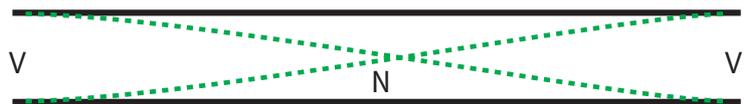
Ventres et nœuds de **vibration** de l'air



La distance entre deux nœuds consécutifs N ou entre deux ventres consécutifs V de l'onde stationnaire est égale à la demi-longueur d'onde de l'onde sonore incidente.

Exemples

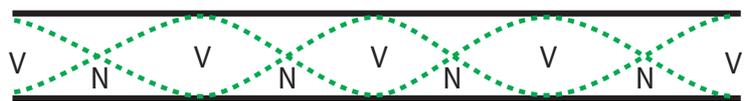
Mode 1 f_1



Mode 2 f_2



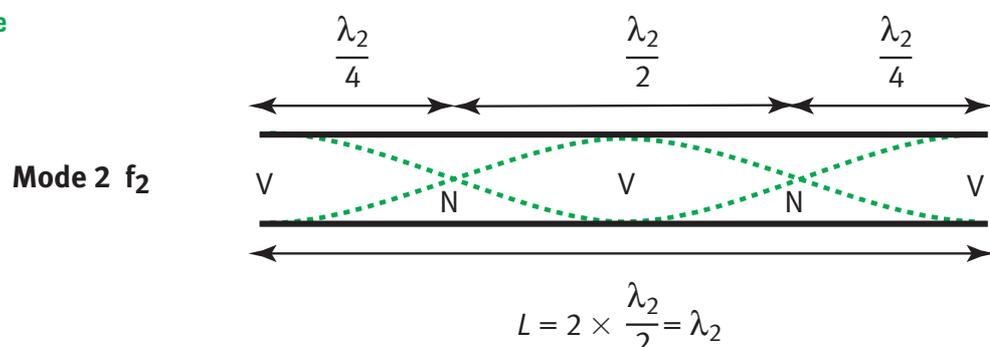
Mode 4 f_4



Condition d'onde stationnaire : une onde sinusoïdale se propageant dans une colonne d'air ouverte aux deux extrémités et de longueur L donne naissance à une onde stationnaire de longueur d'onde λ_n si :

$$L = n \times \frac{\lambda_n}{2} \quad \text{où } n = 1, 2, 3 \dots$$

Exemple



Activité 15
(expérimentale)

Fréquence du fondamental

- ① Rappeler la relation entre la longueur d'onde λ_1 , la célérité V et la fréquence f_1 de l'onde incidente en condition d'onde stationnaire dans le mode 1 fondamental.
- ② Dans le mode 1, quelle est la relation entre λ_1 et L ?
- ③ En déduire la fréquence f_1 du fondamental en fonction de V et L .

Fréquence du fondamental : la fréquence fondamentale (en Hz) d'une colonne d'air ouverte/ouverte de longueur L (en m) est :

$$F_1 = \frac{V}{2 \times L}$$

avec V la célérité des ondes sonores longitudinales dans l'air exprimée en m/s.

Remarque

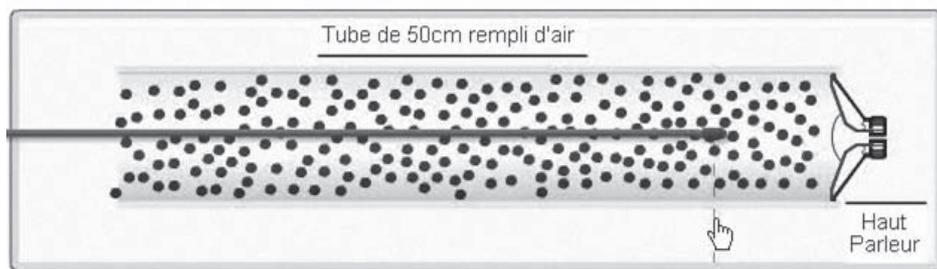
Dans des instruments comme la flûte à bec, on appelle « lumières » les trous percés le long du tube. Poser les doigts sur ces « lumières » permet de modifier la longueur L de la colonne d'air. Ce qui a une conséquence sur la fréquence du fondamental de chaque note et donc sur la hauteur du son.

2.2. Modes de vibration d'une colonne d'air ouvert/fermé (régime forcé)

Activité 16
(expérimentale)

Vibrations en régime forcé d'une colonne d'air ouverte/fermée

Dans cette expérience, on utilise un tuyau de 50 cm de longueur ouvert à une extrémité. La seconde extrémité est fermée par un haut-parleur qui émet un son pur (sinusoïdal) sur une plage de fréquences allant de 140 à 1 400 Hz. Le micro électret a une bande passante de 50 Hz à 12 000 Hz largement suffisante. Sur le dispositif, des sorties analogiques permettent de visualiser le signal reçu par le micro ainsi que la fréquence f du son.

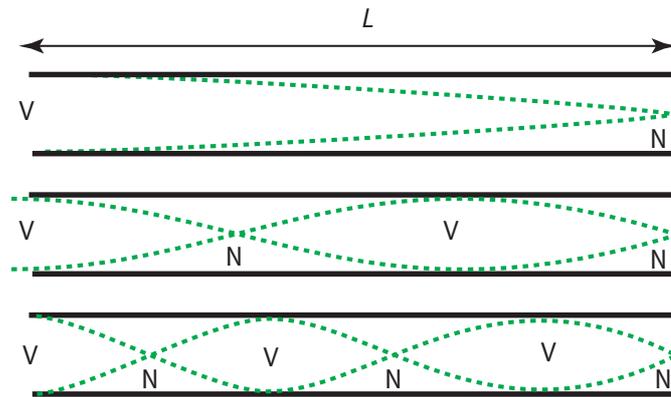


On fait varier la fréquence f du son et on repère les fréquences f_n de résonance (lorsque le son devient plus intense ou lorsque l'amplitude du signal sinusoïdal atteint des valeurs maximales).

Les résultats obtenus sont dans le tableau suivant :

	f_1	f_2	f_3	f_4	f_5
Fréquence f (Hz)	163	489	815		
Rapports f_n/f_1				7,00	9,00

Le relevé de la position des ventres et des noeuds de pression a donné les résultats suivants :



- ❶ Compléter le tableau en calculant les rapports f_n/f_1 ainsi que les fréquences f_4 et f_5 .
- ❷ En déduire une relation entre f_n et f_1 (on prendra n le mode de vibration).
- ❸ Trouver une relation entre la longueur L et la longueur d'onde λ_n dans le mode n de vibration.

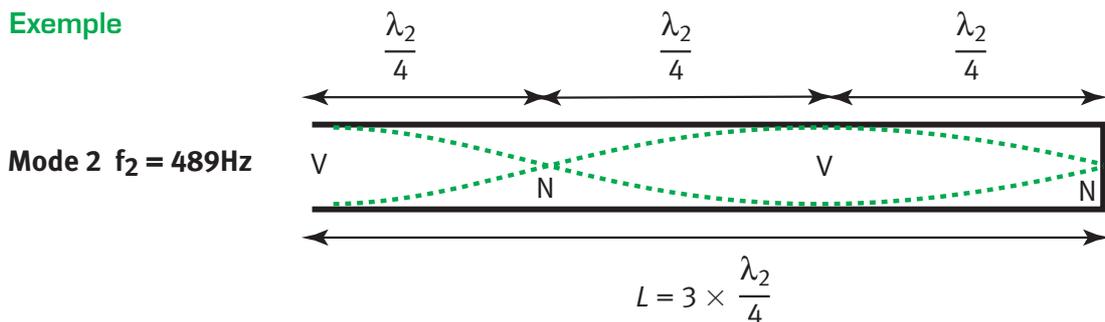
Les fréquences f_n ($n = 1, 2, 3, \dots$) bien déterminées correspondent aux modes propres de vibrations de la colonne d'air ouverte/fermée. Chaque mode propre correspond à un harmonique. Les fréquences des harmoniques sont des multiples IMPAIRS de la fréquence du fondamental. On dit que les fréquences sont quantifiées :

$$f_n = (2n-1) \times f_1 \quad n = 1, 2, 3, \dots$$

Condition d'onde stationnaire : une onde sinusoïdale se propageant dans une colonne d'air de longueur L ouverte à une extrémité et fermée à l'autre donne naissance à une onde stationnaire de longueur d'onde λ_n si :

$$L = (2n-1) \times \frac{\lambda_n}{4} \quad \text{où } n = 1, 2, 3, \dots$$

Exemple



Activité 17 Fréquence du fondamental

- ❶ Rappeler la relation entre la longueur d'onde λ_1 , la célérité V et la fréquence f_1 de l'onde incidente en condition d'onde stationnaire dans le mode 1 fondamental.
- ❷ Dans le mode 1, quelle est la relation entre λ_1 et L ?
- ❸ En déduire la fréquence f_1 du fondamental en fonction de V et L .

Fréquence du fondamental : la fréquence fondamentale (en Hz) d'une colonne d'air ouverte/ouverte de longueur L (en m) est :

$$f_1 = \frac{V}{4 \times L}$$

avec V la célérité des ondes sonores longitudinales dans l'air exprimée en m/s.

Dans les instruments à vent, pour obtenir des sons de hauteurs différentes, on modifie la longueur de la colonne. En pratique, on observe :

- ▶ des tubes de longueurs différentes (flûte de Pan, tuyaux d'orgues...),
- ▶ des ouvertures sur la colonne (flûte, saxophone, clarinette...),
- ▶ des coulisses (trombone...),
- ▶ des pistons (trompettes, cor...),
- ▶ des tampons permettant de fermer à une extrémité une colonne d'air (tuyaux d'orgues bouchés...).

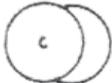
Remarque Pour une même longueur L et dans les mêmes conditions (température...), la fréquence du fondamental pour un tuyau ouvert/ouvert est le double de la fréquence du fondamental pour un tuyau ouvert/fermé. Dans le mode fondamental, la colonne d'air du tuyau ouvert/ouvert vibre donc une octave au-dessus.

c) Les instruments à percussion

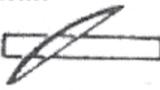
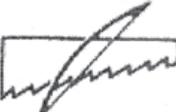
Un **instrument à percussion** – souvent appelé percussion tout court au féminin – est un instrument de musique dont l'émission sonore résulte de la **frappe** ou du **grattage** d'une membrane ou d'un matériau résonant. Ils ont probablement constitué les tout premiers instruments de musique et font partie intégrante de la plupart des genres musicaux (classique, jazz, rock, pop...).

1. Classification des instruments à percussion

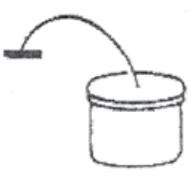
Au XIX^e siècle, on commença une classification systématique des instruments de musique. Le mode de classification le plus utilisé est celui de **Sachs-Hornbostel** (1914). Parmi les instruments à percussion, on distingue :

Percussion directe		Percussion indirecte	
Entrechoc	Choc direct	Secouement	Raclerment
1-Bâtons 	1-Baguettes 	1-Cadres 	1-Râpes 
2-Disques 	2-Tuyaux 	2-Volumes 	2-Roues 
	3-Disques 	3-Suspension 	
	4-Volumes 		

- Les **idiophones** : ce sont des instruments qui produisent des sons par leurs propres vibrations sans le concours d'une colonne d'air, d'une membrane ou d'une corde. Ils sont faits de matériaux durs (bois, argile, pierre, métal ou verre) pour assurer leur propre rayonnement acoustique. La classification des instruments groupe les idiophones selon la manière dont ils produisent le son ou dont on en joue : **idiophones frappés, pincés, frottés ou à air**.

Pincement	Friction	Soufflement
1-Languette 	1-Baguettes 	1-Baguettes 
2-Lamelles 	2-Scie 	2-Volumes 
	3-Verres 	

- Les **membranophones** : ce sont des instruments qui produisent un son à l'aide d'une membrane tendue en parchemin, en peau ou en matière synthétique, que l'on fait vibrer par percussion (tambours à percussion), par friction (tambours à friction) ou par soufflement (mirlitons). Ce sont les tambours à percussion qui forment le groupe le plus important.

Percussion	Friction	Soufflement
1-Cuvette 	1-Baguettes 	1-Membrane 
2-Cylindre 	2-Cordelette 	2-Tubes 
3-Cadre 		

Activité 18 Idiophones ou membranophones ?

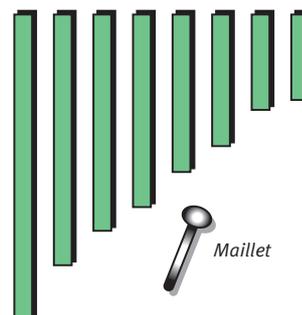
Préciser si les instruments ci-après appartiennent aux idiophones ou aux membranophones : timbales, castagnettes, grosse caisse, paire de cymbales, xylophone, triangle, métallophone, woodblock, scie musicale, crécelle et bongo.

2. Étude d'une percussion par choc direct (régime libre)

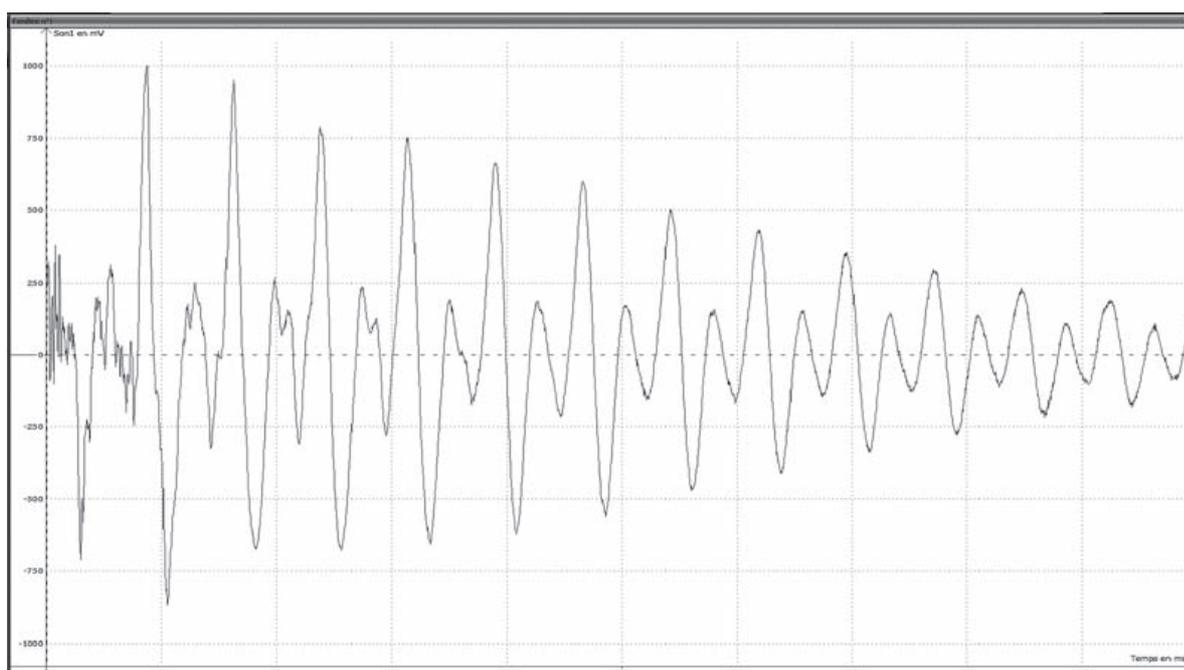
Activité 19 (expérimentale)

Tubaphone formé de tubes en plastique

On dispose d'une série de tubes en matière plastique de différentes longueurs L servant à former un tubaphone – instrument appartenant à la famille des idiophones. On procède à l'enregistrement de sons générés par un coup porté à l'aide d'un maillet (percussion par choc direct) sur les différents tubes à une température de 23 °C à l'aide d'un microphone relié à un ordinateur *via* une carte d'acquisition. Pour chacun des tubes, on a obtenu l'enregistrement d'un son complexe de fréquence f_1 (fréquence du fondamental) dont l'enveloppe fait apparaître trois phases du son : l'attaque du son, le corps du son et l'extinction.



- 1 L'oscillogramme ci-dessous correspond au son généré par un choc direct sur le tube de longueur $L = 62,7\text{ cm}$. Déterminer la période T_1 puis la fréquence f_1 du son fondamental (échelle : 5 ms/carreau).



- 2 On a procédé de la même manière pour les différents tubes. Les résultats figurent dans le tableau suivant :

Longueur L (m)	0,627	0,554	0,492	0,462	0,409	0,362	0,320	0,300
Fréquence f_1 du son complexe (ou fondamental) (Hz)		292	327	348	396	432	479	524
Note	Do3							

- 2.1. Compléter le tableau en faisant apparaître la fréquence déterminée en ① pour le tuyau de longueur $L = 62,7$ cm tout en indiquant la note de musique la plus proche correspondante en s'aidant du tableau des fréquences de la gamme tempérée. Obtient-on les notes d'une gamme ?

Note	Octave				
	1	2	3	4	5
Do	65,4064	130,813	261,626	523,251	1046,50
Do# Ré _b	69,2957	138,591	277,183	554,365	1108,73
Ré	73,4162	146,832	293,665	587,330	1174,66
Ré _b Mi _b	77,7817	155,563	311,127	622,254	1244,51
Mi	82,4069	164,814	329,628	659,255	1318,51
Fa	87,3071	174,614	349,228	698,456	1396,91
Fa# Sol _b	92,4986	184,997	369,994	739,989	1479,98
Sol	97,9989	195,998	391,995	783,991	1567,98
Sol La _b	103,026	207,652	415,305	830,609	1661,22
La#	110,000	220,000	440,000	880,000	1760,00
La Si _b	116,541	233,082	466,164	932,328	1864,66
Si	123,471	246,949	493,883	987,767	1975,53

- 2.2. On pose $Y = f_1$ et $X = 1/L$. Représenter graphiquement Y en fonction de X . Quel modèle mathématique $Y = f(X)$ conviendrait pour traduire de manière satisfaisante l'évolution de Y en fonction de X ?
- 2.3. Considérons un modèle linéaire du type $Y = a \times X$. En utilisant un tableur-grapheur, déterminer le coefficient directeur a de la droite modèle.
- 2.4. Procéder à une analyse dimensionnelle du modèle utilisé. Quelle est l'unité $[a]$ de a ?
- 2.5. Dans les conditions de l'expérience, la célérité du son V est approximativement de $3,4 \cdot 10^2$ m.s⁻¹. Quelle relation simple peut-on écrire reliant a et V ?
- 2.6. Dédurre de la question précédente une relation entre f_1 , V et L .

Fréquence du fondamental : la fréquence fondamentale (en Hz) du son généré par un choc direct sur un tube d'un tubaphone de longueur L (en m) est :

$$f_1 = \frac{V}{2 \times L}$$

avec V la célérité des ondes sonores longitudinales dans l'air exprimée en m.s⁻¹.

Remarque Sur le même principe que le tubaphone, le xylophone est un ensemble de lames en bois dur (palissandre) de différentes longueurs permettant de générer les notes d'une gamme. La plupart des xylophones actuels sont disposés en clavier. Leur étendue actuelle va de Do₄ au Do₇.

3. Lignes nodales d'une plaque pour percussion – Figures de Chladni

Ernst Florens Friedrich Chladni (1756–1827) a étudié, vers 1780 à Leipzig, les vibrations des plaques circulaires et carrées. Les plaques étaient généralement maintenues en leur centre et excitées sur un bord par un archet de violon. Les modes de vibrations étaient identifiés en saupoudrant la surface de la plaque par du sel ou du sable : ces particules se réfugiaient dans les zones où les vibrations étaient nulles (lignes nodales). Chladni fit une démonstration en 1808 à Paris devant l'Académie des sciences et l'Empereur. Ce dernier fut tellement impressionné qu'il offrit un prix d'un kilo d'or à la première personne qui pourrait expliquer les fameuses figures. Celles-ci sont extraites de son livre (*Entdeckungen ueber die Theorie des Klanges*) publié en 1787.

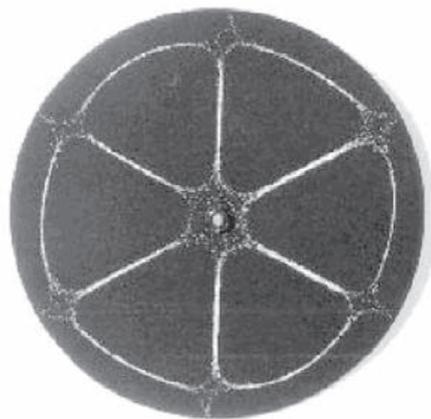
Le problème vibratoire présente des propriétés de symétrie :

- ▶ symétrie de révolution, ou axisymétrie, pour une plaque circulaire,
- ▶ symétrie par rapport à une médiane et/ou une diagonale pour la plaque carrée.

En conséquence, les modes propres de la plaque vérifiant ces symétries sont susceptibles d'être excités et donc mis en évidence. Les nœuds et ventres de vibration sont constitués :

- ▶ de cercles concentriques pour la plaque circulaire (voir figure 1),
- ▶ de figures géométriques variées, mais symétriques, pour la plaque carrée (voir la figure 2).

La résonance d'un mode de vibration de flexion de la plaque est observée lorsque, au voisinage d'une fréquence (la fréquence propre de ce mode), l'amplitude de la flexion de la plaque présente un maximum.



À la résonance d'un mode de vibration de plaque, les nœuds de vibration de ce mode peuvent être visualisés en saupoudrant sur la plaque un peu de sable fin. Sur les ventres de vibration, les grains de sable sont éjectés, alors que le sable peut se concentrer aux nœuds de flexion de la plaque.

On obtient alors des lignes appelées « lignes nodales » (ensemble de nœuds immobiles) ou figures de Chladni qui fournissent une représentation du mode de vibration de flexion.

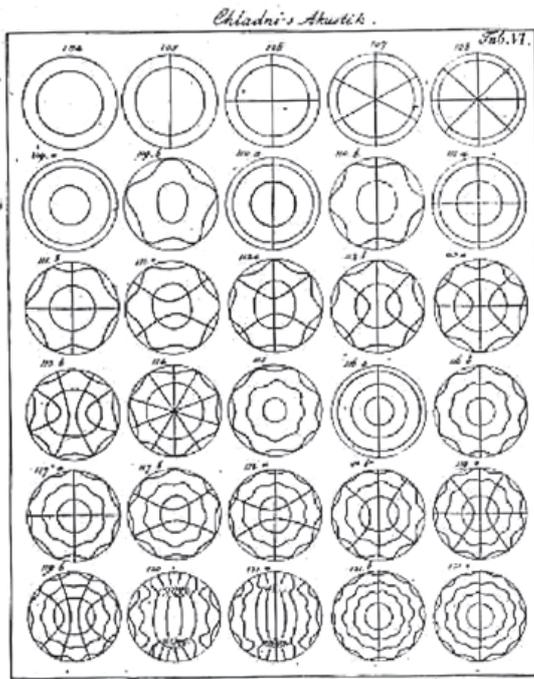


Figure 1

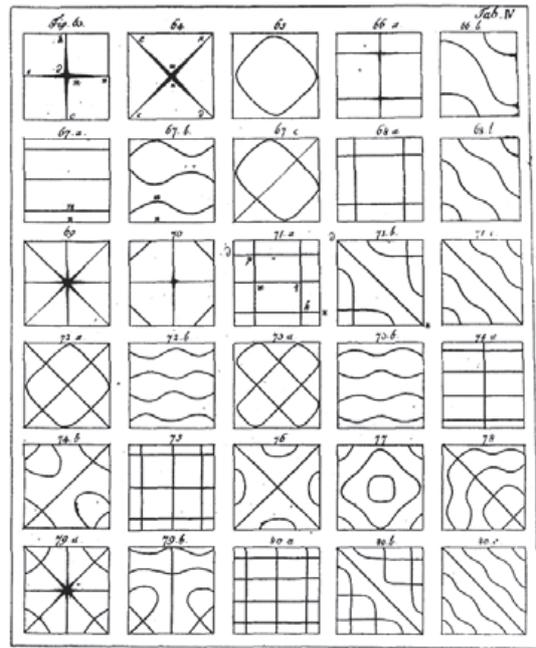
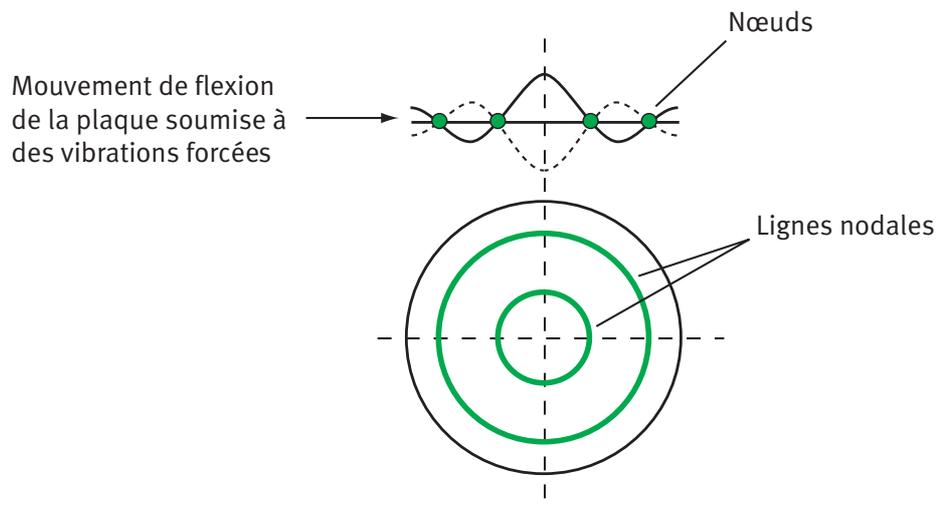


Figure 2

Site Internet : Physique de tous les jours

<http://questions2physique.wordpress.com/>



Contrairement à une corde tendue ou une colonne d'air, qui sont des systèmes unidimensionnels, les vibrations d'une plaque circulaire modifient les deux dimensions de la surface plane. Un mode propre de surface est donc caractérisé par deux nombres n et m . Le mode est noté (n,m) .

Pour les plaques circulaires (disques), Chladni proposa en 1802 une loi pour obtenir approximativement la fréquence propre du mode :

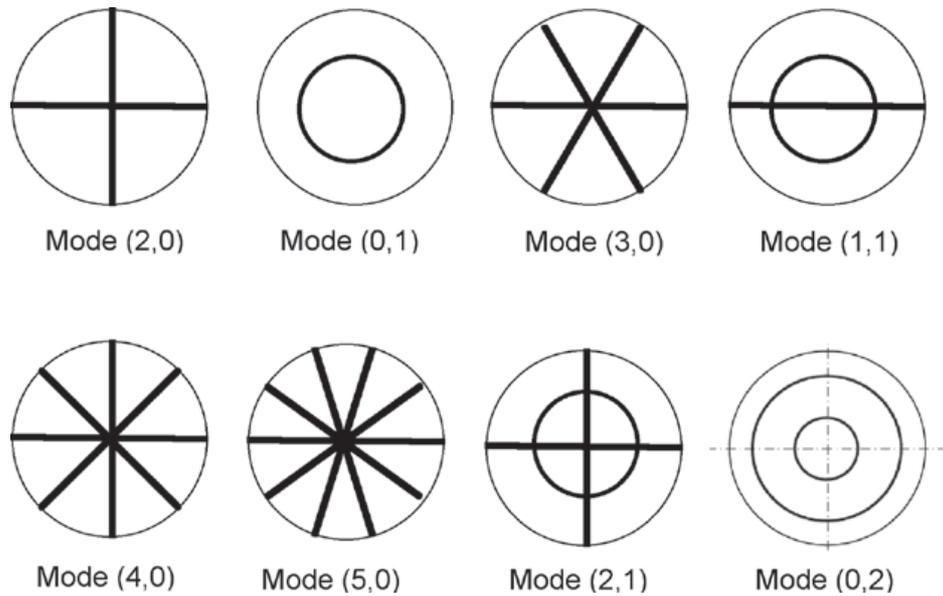
$$f \approx C (m + 2n)^2$$

m est le nombre de cercles

n : le nombre de lignes passant par le centre

C : une constante

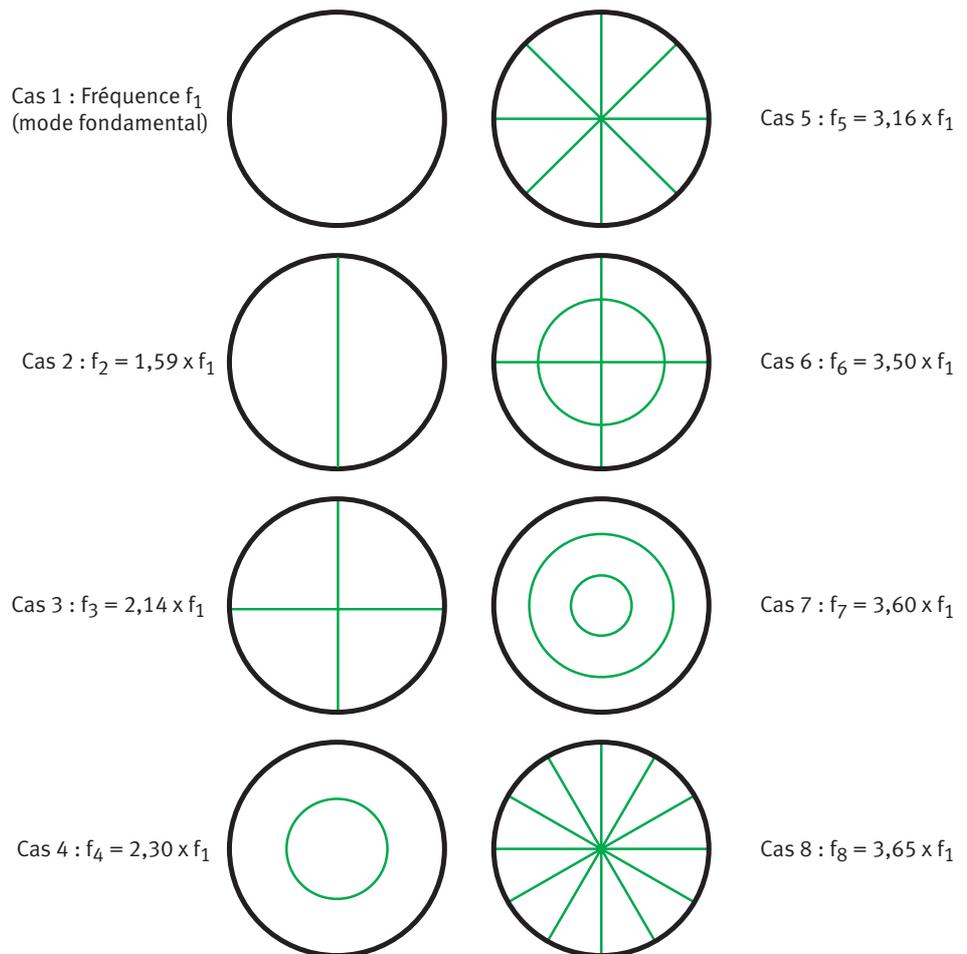
Figures de Chladni pour différents modes de vibration d'une plaque circulaire



Activité 20 Modes propres de vibration d'une timbale

On souhaite étudier les modes propres de vibration d'une timbale. Un dispositif excitateur est constitué d'un bras touchant presque la peau tendue. Il fait vibrer un petit aimant situé sous la peau. Ce dispositif permet de faire vibrer la peau de l'instrument. En modifiant la fréquence, on peut alors visualiser les modes propres de vibrations à l'aide d'une poudre noire qui se rassemble sur les lignes nodales (cercles, lignes droites...) où l'amplitude de vibration est nulle (ensemble de nœuds N immobiles). Contrairement à une corde tendue, une colonne d'air qui représente des systèmes unidimensionnels, les vibrations de la peau modifient les deux dimensions de la surface plane (système bidimensionnel). Un mode propre de surface est donc caractérisé par deux nombres n et m . Le mode est noté (n,m) où n est le nombre de lignes passant par le centre et m est le nombre de cercles.

- 1 À quel famille d'instruments à percussion appartient la timbale ?
- 2 Comment le timbalier de l'orchestre fait-il résonner son instrument : par percussion ? Par friction ? Ou par soufflement ?
- 3 La peau de la timbale est tendue. Peut-on considérer que tout le périmètre de la peau correspond à des nœuds quel que soit le mode ? Justifier.
- 4 Préciser les modes de vibration pour chacune des huit situations représentées ci-dessous. Donner les modes sous la forme (n,m) .



2. Les instruments électroniques

Un instrument de musique électronique est un instrument de musique qui utilise un ou plusieurs circuits électroniques pour produire des sons.

a) Historique

L'Américain Cahill construisit le premier « orgue électronique » vers 1900. Il se servit d'alternateurs comme générateurs sonores. Parmi les premières curiosités, il y eut l'« éthérophone » de Thérémin (1924) qui émet un son glissando quand la main s'approche de l'appareil et les « ondes musicales » de Martenot (1928). Après la Seconde Guerre mondiale, la production des instruments électroniques augmenta en même temps que la musique électronique d'une part et la musique légère d'autre part. On chercha, en vain, à imiter les instruments traditionnels. Toutefois, les instruments électroniques peuvent susciter la recherche de nouvelles sonorités et de nouvelles possibilités d'expression.

b) L'enveloppe d'un son

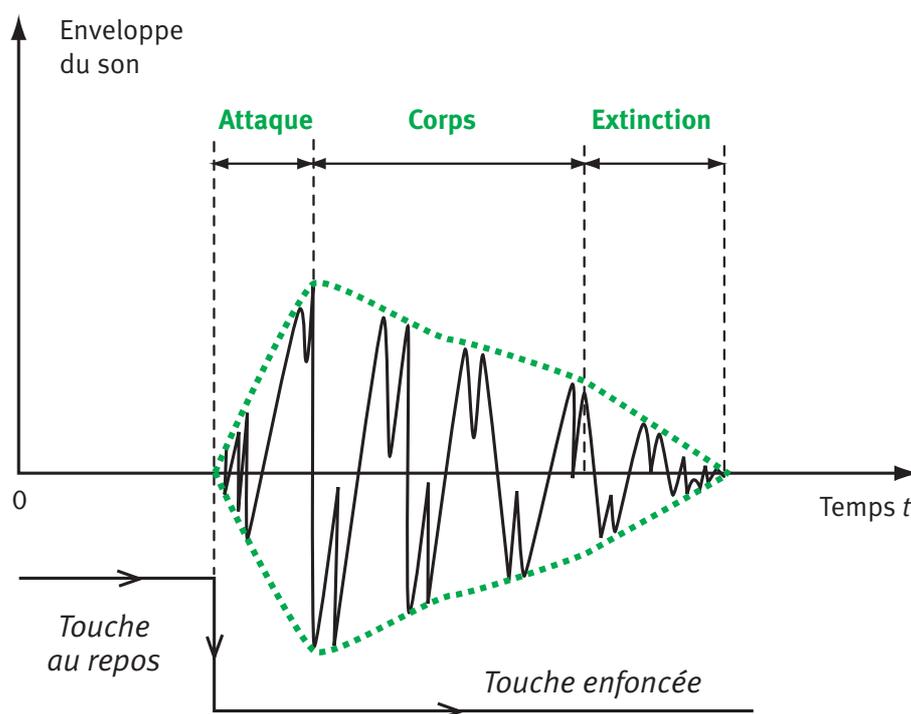
Actuellement, avec des dispositifs électroniques (ou synthétiseurs), on reproduit les sons issus d'instruments de musique acoustique (piano, guitare, clavecin, flûte...) et on fabrique d'autres sons.

Pour reproduire une note d'un instrument de musique quelconque, il ne suffit pas de superposer différents harmoniques convenablement choisis. Le résultat serait décevant car le son d'une telle synthèse serait sans chaleur, sans caractère. En effet, le signal périodique résultant d'une telle superposition (ou synthèse) des différents harmoniques correspond à une note de musique permanente. En réalité, la note émise par un instrument n'est pas permanente (elle a un début et une fin) et son oscillogramme n'est pas périodique sur la totalité de sa durée. Son amplitude passe de zéro à une valeur maximale, maintenue temporairement, puis revient à zéro : on la décompose en **attaque**, **corps de la note** et décroissance ou **extinction**. On appelle enveloppe la courbe représentant l'amplitude en fonction du temps.

L'attaque et l'extinction constituent ce que l'on appelle les **transitoires du son**. Elles permettent à l'auditeur de reconnaître mieux l'instrument.

Pour reproduire fidèlement, avec son caractère, une note jouée par un instrument de musique acoustique, l'instrument électronique doit reproduire non seulement le corps de la note, mais aussi les transitoires et donc l'enveloppe du son.

Exemple d'une touche enfoncée au piano



On distingue plusieurs phases dans l'enveloppe d'un son : l'attaque, le corps, l'extinction.

c) Classification des instruments électroniques

Les instruments de musique électroniques se classent en deux groupes :

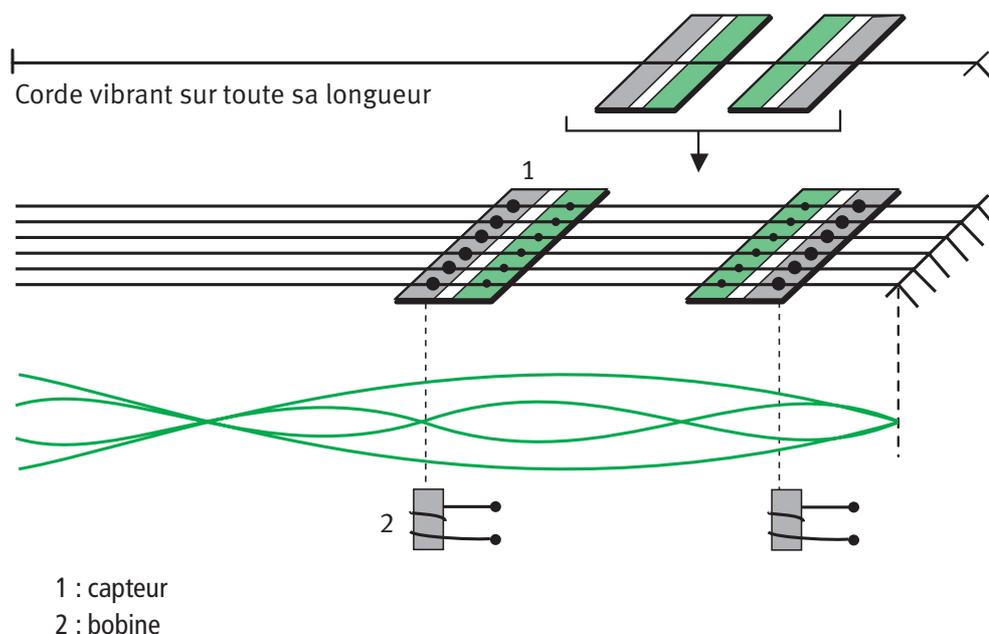
- ▶ Les **instruments électromécaniques** : il s'agit d'instruments mécaniques d'origine traditionnelle amplifiés avec des dispositifs électroniques (exemples : la guitare électrique sans caisse de résonance, l'orgue Hammond, le piano Fender...).
- ▶ Les **instruments électroanalogiques** : il s'agit souvent d'instruments de facture nouvelle, souvent à clavier (orgues électroniques).

Ces deux groupes ont en commun le rayonnement acoustique par haut-parleur.

d) Les instruments électromécaniques

Les instruments électro-mécaniques sont des instruments qui transforment, au moyen d'un micro, les vibrations mécaniques en oscillations électriques qui sont traitées ensuite par un amplificateur et éventuellement des filtres pour aboutir à un haut-parleur.

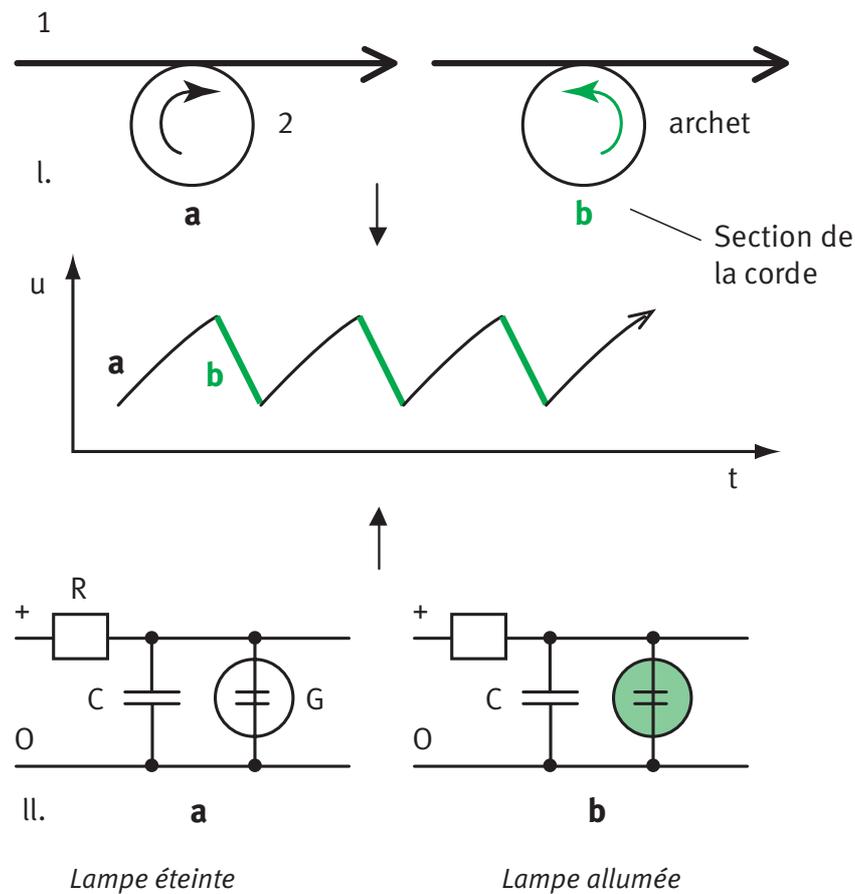
Basé sur le phénomène d'induction électromagnétique, un vibreur créé (par exemple : la corde d'une guitare) peut induire dans la bobine appelée cosse une tension alternative fonction des vibrations mécaniques, qui est captée, transformée et conduite à l'amplificateur et au groupe de haut-parleurs. La forme des capteurs et leur position par rapport aux vibreurs influencent le timbre. Ainsi, avec les cordes, on place les capteurs sous les nœuds de vibration (moins d'harmoniques) ou sous les ventres (plus d'harmoniques). C'est pourquoi les guitares électriques, par exemple, ont souvent deux capteurs, ou plus, que l'on peut connecter selon le timbre voulu. L'éloignement du noyau de la bobine par rapport à la corde joue aussi un rôle, et il est variable.



e) Les instruments électroanalogiques

Ce sont des instruments où l'on a éliminé le vibreur mécanique (corde...) pour le remplacer par des générateurs électroniques oscillants – oscillateurs – qui produisent directement un signal électrique périodique. Ces générateurs sont d'abord à base de lampes, bobines, condensateurs, puis à base de transistors et enfin à base de circuits intégrés. Ces signaux sont combinés, modulés entre eux, traités par divers filtres et circuits pour s'efforcer de se rapprocher de la richesse et de la complexité des sons produits par les instruments mécaniques ou électromécaniques.

Ces instruments utilisent des oscillateurs purement électroniques. Ils produisent directement une oscillation électrique, dont les paramètres dépendent de ceux du générateur.

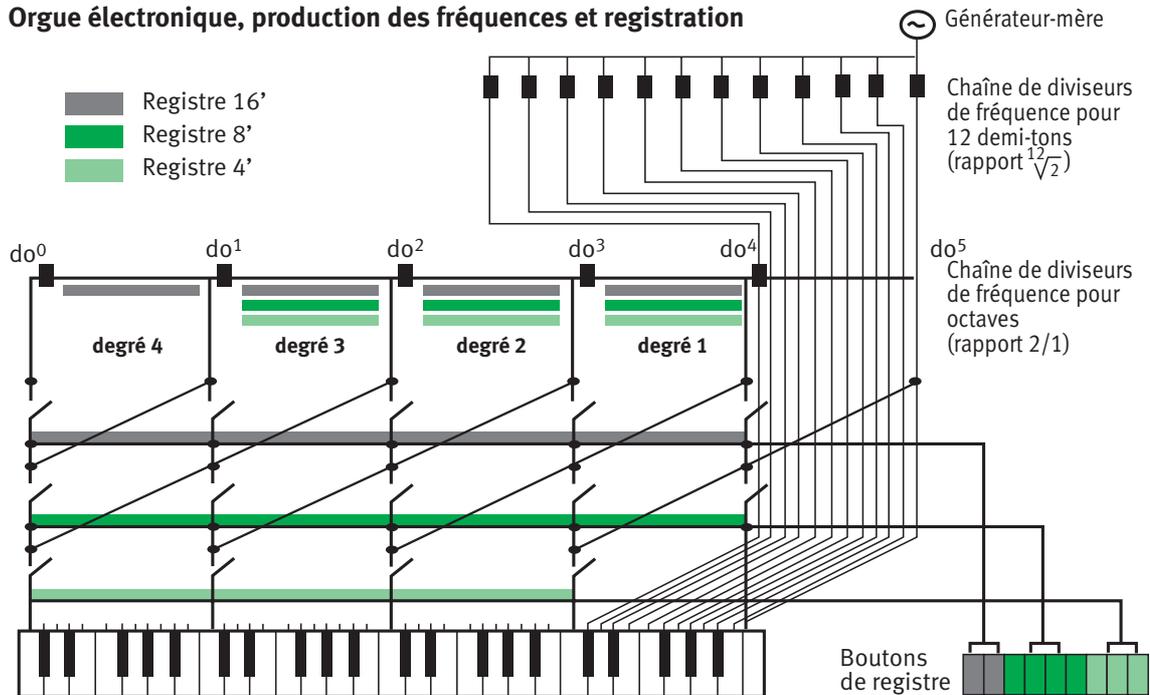


Les plus fréquents sont les générateurs BF (basse fréquence) dont le plus ancien est l'oscillateur à lampe à incandescence : un condensateur C est chargé lentement (a) sur une résistance R jusqu'à ce que l'on atteigne la tension d'allumage d'une lampe à incandescence G connectée parallèlement. Avec l'allumage de la lampe, la tension retombe brusquement (b) et la lampe s'éteint. Le processus se répète périodiquement. On obtient une oscillation dite de relaxation riche en harmoniques, comme avec les cordes frottées (2) à qui l'archet (1) impose des tensions de torsions (les cordes adhèrent au crin de l'archet, se tordent en suivant le mouvement jusqu'à ce que la tension soit trop forte et qu'elles se détachent tout à coup). Dans le diagramme, l'oscillation de relaxation ressemble à une « courbe en dents de scie ». La vitesse de recharge du condensateur par la résistance détermine la

fréquence et une variation de 6 % environ représente un demi-ton. La gamme peut être obtenue avec une série de résistances correspondantes avant le générateur RC ou avec plusieurs générateurs ou avec des diviseurs de fréquences.

Parmi ces instruments, le plus courant est l'orgue électronique. Il se compose d'unités isolées et d'un dispositif de jeu (pour sélectionner le timbre du son) comprenant plusieurs éléments tels que l'interrupteur, les boutons, les registres et les touches (claviers pour les mains dit *manuel*, clavier pour les pieds dit *pédalier*).

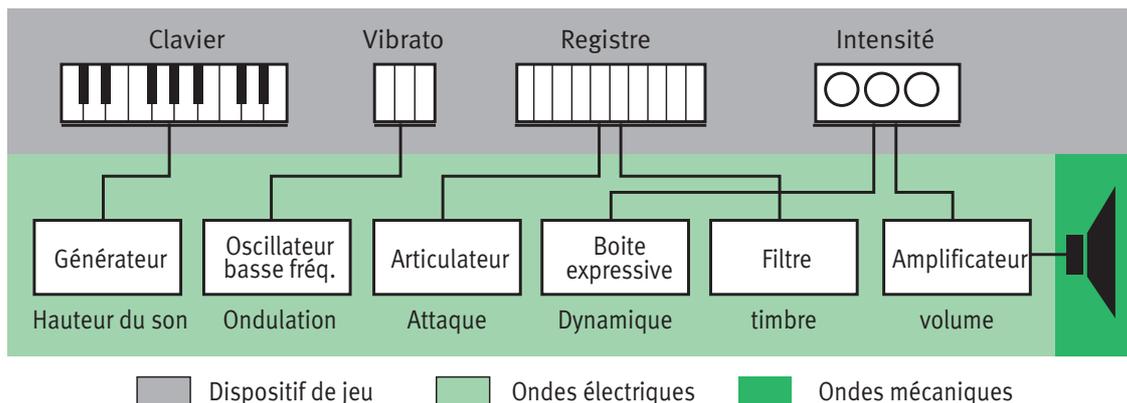
Orgue électronique, production des fréquences et registration



La série des unités commence avec le ou les générateurs (également des oscillateurs) de fréquences sonores. Les instruments à générateurs électroniques ont rarement un générateur propre pour chaque note, mais un seul pour chacun des douze demi-tons de l'octave supérieure. On obtient les fréquences des autres octaves à l'aide de diviseurs de fréquence qui divisent chaque fois les fréquences de base dans le rapport 2/1 (chaque octave étant un degré de division). La sonorité de l'ensemble de l'échelle dépend de celle des douze générateurs-mères.

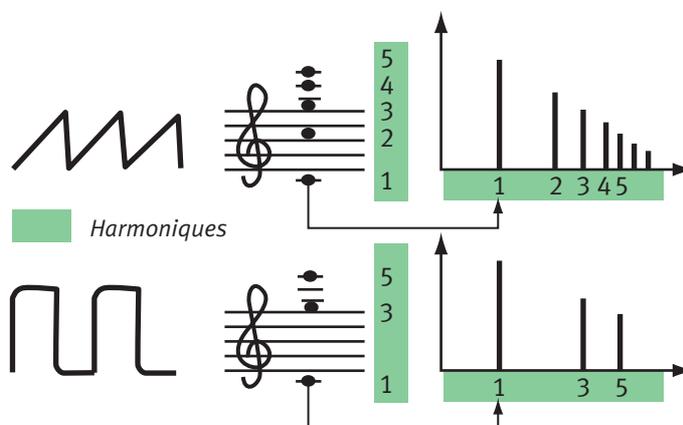
Il est plus économique d'utiliser un seul générateur-mère pour toutes les fréquences. Il donne la fréquence la plus haute dont on obtient, par une première chaîne de diviseurs, les fréquences des 11 demi-tons restants de l'octave supérieure, et par une seconde chaîne les demi-tons des autres octaves. En changeant la fréquence du générateur-mère, on modifie tout l'accord de l'instrument (ce qui est pratique pour la transposition). Les fréquences sont reliées aux touches par octave, au moyen de la registration comme pour l'orgue mécanique (16' = 16 pieds, 8' = 8 pieds, 4' = 4 pieds...).

Unités d'un orgue électronique



Les unités d'un orgue électronique sont :

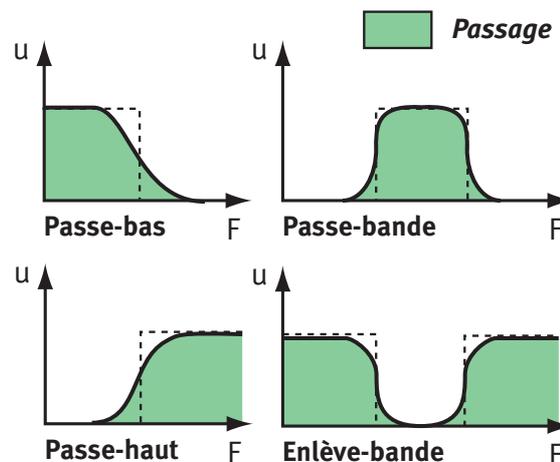
- ▶ Le **générateur** permettant de sélectionner la hauteur (ou fréquence) du son.
- ▶ L'**oscillateur basse fréquence** : il délivre une fréquence de 3 à 10 Hz qui interfère avec la fréquence normale. Cela donne un vibrato.
- ▶ L'**articulateur** : il imite le profil dynamique des instruments naturels. Les sons percussifs du piano ou de la basse à cordes, par exemple, ont un transitoire d'attaque court et un transitoire d'extinction long ; les sons entretenus des cordes frottées ou des vents ont des transitoires différents encadrant une phase stable. Comme le timbre d'un son dépend de ces transitoires d'attaque et d'extinction, l'articulateur joue donc un rôle important pour le timbre.
- ▶ La **boîte expressive** : elle modifie l'amplitude moyenne et, par conséquent, la dynamique du son.
- ▶ Le **groupe de filtres** : il est principalement responsable du timbre car il influe sur le spectre harmonique. La courbe en dents de scie du générateur est relativement riche en harmoniques. En revanche, les signaux rectangulaires correspondent à un son privé d'harmoniques pairs, par exemple au timbre d'une clarinette dans le registre grave. On obtient artificiellement différents spectres harmoniques en additionnant des sons sinusoïdaux (synthèse additive, ce qui est rare) ou, inversement, en filtrant à volonté un spectre riche en harmoniques (synthèse soustractive).



Courbe en dent de scie et rectangulaire

Les filtres électriques servent à atténuer ou à éliminer des fréquences déterminées et à en laisser passer d'autres. Techniquement, il s'agit de circuits RC (résistor-condensateur), LC (bobine-condensateur) ou de filtres actifs qui combinent les filtres RC avec des éléments amplificateurs. On distingue quatre sortes de filtres :

- ▶ Passe-haut : coupe les basses fréquences et laisse passer les hautes fréquences (timbre des instruments à archet) ;
- ▶ Passe-bas : fonctionnement inverse (timbre des instruments à vent) ;
- ▶ Passe-bande : combinaison d'un passe-haut et d'un passe-bas de sorte que seules les fréquences moyennes peuvent passer (bande large) ;
- ▶ Enlève-bande (ou coupe-bande) : fonctionnement inverse du passe-bande.



Les filtres sont groupés en combinaisons bien déterminées. Ils sont mis en service par des registres qui portent souvent un nom d'instrument qui en rappelle la sonorité (« violoncelle », « hautbois »...).

D'autres unités pouvant être connectées par des registres produisent des effets spéciaux comme la réverbération, l'attaque prolongée (sustain), le battement dû à une modulation mécanique du timbre (leslie), etc. On peut aussi programmer des séquences rythmiques dans différents tempos.

Les **amplificateurs** et les **haut-parleurs** renforcent, restituent et transforment les oscillations électriques en vibrations mécaniques c'est à dire en sons.

Activité 21 Synthèse de documents

Un instrument de musique électronique est un instrument de musique qui utilise un ou plusieurs circuits électroniques pour produire des sons. En s'aidant des documents de la partie 2. Les instruments électroniques, répondre aux questions suivantes :

- 1 Quel est le principal intérêt des instruments électroniques par rapport aux instruments dits acoustiques ?
- 2 Pour reproduire le son d'un instrument acoustique quelconque, est-il suffisant de superposer différents harmoniques convenablement choisis ?

- 3 Quels sont les deux catégories d'instruments électroniques ? Quel dispositif ont-ils en commun et permettant leur rayonnement acoustique ?
- 4 Parmi les instruments suivants, lesquels sont des instruments électromécaniques et lesquels sont des instruments électroanalogiques : la thérémine, le violon électroacoustique, la flûte électrique avec port USB, le violon électrique (dit « muet »), la trompette électronique, le piano électroacoustique, la guitare électrique et le piano électronique ?
- 5 Dans un instrument électroanalogique, qu'est-ce qui joue le rôle de l'excitateur des instruments acoustiques ?
- 6 Dans un instrument électroanalogique, qu'est-ce qui joue le rôle du résonateur permettant de sélectionner les harmoniques du son des instruments acoustiques ?



Pour conclure

1. Conclusion du chapitre

Que ce soit pour les instruments à cordes, les instruments à vent ou les instruments à percussion (instruments de musique acoustique), un excitateur associé à un résonateur doit entrer en vibration pour émettre un son. Si on impose une vibration sinusoïdale de fréquence f à un excitateur (colonne d'air, corde tendue, lame d'un xylophone, membrane d'un tambour...), celui-ci ne vibre que pour certaines valeurs bien déterminées de la fréquence appelée fréquences propres de vibration. Ces fréquences sont quantifiées et correspondent à des modes propres de vibration.

Les modes propres sont caractérisés :

- ▶ soit par un nombre entier n dans le cas de systèmes unidimensionnels (corde tendue, colonne d'air...) : c'est en général le cas des instruments à cordes et à vent ;
- ▶ soit par deux nombres entiers n et m dans le cas de systèmes bidimensionnels (peau tendue...) : c'est en général le cas des membranophones.

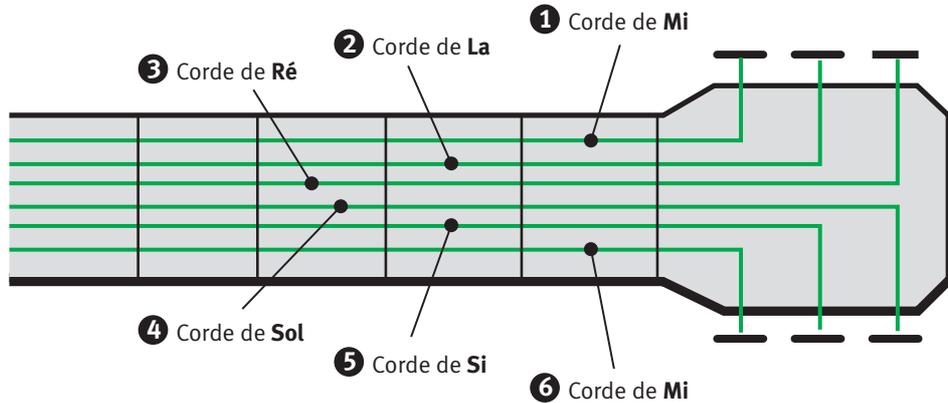
Contrairement aux instruments de musique acoustique, les instruments de musique électronique utilisent un ou plusieurs circuits électroniques pour produire des sons. Les instruments électroniques se subdivisent en deux groupes : les électromécaniques et les électroanalogiques. Ces deux groupes ont en commun le rayonnement acoustique par haut-parleur.

2. Exercices d'apprentissage

Instruments à cordes

Exercice 6 Guitare

La guitare possède six cordes numérotées de 1 à 6, de longueur $L = 642 \text{ mm}$. Le joueur a la possibilité de réduire la longueur de la corde en appuyant sur des cases situées sur le manche de la guitare.



La fréquence de vibration et la note émise par chaque corde à vide, de longueur $L = 642 \text{ mm}$, sont indiquées dans le tableau suivant :

Corde	1	2	3	4	5	6
f (Hz)	82,4	110,0	146,8	196	246,9	329,5
Note	Mi	La	Ré	Sol	Si	Mi

L'élève réalise un montage consistant à placer la corde n° 1 (métallique) au voisinage d'un aimant et à y imposer le passage d'un courant électrique alternatif de fréquence réglable. La corde vibre alors à la même fréquence que celle du courant.

Il constate que le mouvement de la corde a une faible amplitude sauf pour certaines valeurs de la fréquence :

$$f_1 = 82,4 \text{ Hz} ; \quad f_2 = 2 \times f_1 \quad f_3 = 3 \times f_1 \quad f_4 = 4 \times f_1 \dots$$

Ces fréquences particulières permettent d'obtenir un système d'ondes stationnaires : suivant le cas, il observe un ou plusieurs fuseaux.

- 1 Quel est le nom du mode de vibration correspondant à f_1 ? Quel aspect présente la corde lorsqu'on lui impose cette fréquence de vibration ? Faire un schéma.
- 2 Déterminer la célérité V .
- 3 Quel est le nom des autres modes de vibration ? Quel aspect présente la corde lorsqu'on lui impose la fréquence f_3 ? Faire un schéma.

Donnée La fréquence fondamentale (en Hz) d'une corde de longueur L (en m) est :

$$f_1 = \frac{V}{2 \times L}$$

Exercice 7

avec V la célérité des ondes transversales sur cette corde exprimée en m/s.

Cordes de guitare

Les fréquences fondamentales des cordes d'une guitare sont : mi1 ; la1 ; ré2 ; sol2 ; si2 ; mi3. L'indice est relatif au numéro de l'octave considérée.

- 1 Déterminer la fréquence correspondant à chacune des six cordes sachant que lorsque deux notes sont dans un intervalle de n demi-tons, leurs fréquences vérifient :

$$\frac{f_2}{f_1} = 2^{\frac{n}{12}}$$

La fréquence du la3 est 440 Hz.

- 2 À l'aide des données fournies dans le tableau ci-dessous, déterminer les tensions nécessaires pour que la guitare soit parfaitement accordée (mode fondamental) lorsqu'elle est équipée de cordes en acier.

Données Longueur d'une corde : $L = 63 \text{ cm}$; masse volumique de l'acier : $\rho = 7\,800 \text{ kg/m}^3$.

Corde n°	1	2	3	4	5	6
Note fondamentale	Mi1	La1	Ré1	Sol2	Si2	Mi3
Diamètre D (mm)	1,12	0,89	0,70	0,55	0,35	0,25
T(N)						

$$f_n = \frac{n}{2 \times L} \times \sqrt{\frac{T}{\rho}}$$

Exercice 8 Mode fondamental d'une corde vibrante

Une corde vibre entre ses deux extrémités fixes en un seul fuseau à la fréquence 200 Hz ; sa longueur vaut 1,00 m.

- 1 Exprimer et calculer la célérité V des ondes dans la corde.
- 2 Quelle serait la fréquence propre du mode fondamental de vibration de la corde si on quadruplait la tension T de la corde ?

Exercice 9 Contrebasse

Une contrebassiste veut accorder son instrument : une corde, de longueur 80 cm, doit émettre le la2 (fréquence de 220 Hz). La masse linéique μ de la corde est 5 g/m.

Quelle tension T doit lui donner ?

Instruments à vent

Exercice 10 Tuyau sonore

La célérité du son dans l'air est $v = 340 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ à $15 \text{ }^\circ\text{C}$.

Tuyaux sonores à embouchure de flûte

Les tuyaux sonores à embouchure de flûte équipent en partie les tuyaux d'orgues.

Un tuyau sonore à embouchure de flûte comprend un biseau. L'air vient frapper ce biseau, il en découle une mise en oscillation de la colonne d'air à l'intérieur du tuyau. Ces tuyaux sont considérés comme des tuyaux ouverts au niveau de l'embouchure. L'autre extrémité du tuyau peut être :

- ▶ soit ouverte, le tuyau sonore est alors un tuyau ouvert aux deux extrémités ;
- ▶ soit fermée, le tuyau est alors ouvert à une extrémité, fermé à l'autre.

À une extrémité ouverte est toujours situé un ventre de vibration noté V.

À une extrémité fermée est toujours situé un nœud de vibration noté N.

1. Tuyau sonore ouvert aux deux extrémités

Un tuyau sonore de longueur L ouvert aux deux extrémités émet à $T = 15 \text{ }^\circ\text{C}$ un son de fréquence $f = 262 \text{ Hz}$. L'état vibratoire du mode fondamental du tuyau peut être représenté de la manière suivante :



- À quel type d'ondes appartient le mode de vibration de la colonne d'air ?
- Parmi les caractéristiques suivantes d'un son : intensité, hauteur, timbre, quelle est celle qui correspond à la fréquence du son ?
- Dans le cas d'une corde tendue entre deux points fixes, donner la relation entre la distance qui sépare deux ventres ou deux nœuds successifs en fonction de la longueur d'onde. Sachant qu'elle reste valable dans le cas du tuyau sonore, en déduire la relation entre L , v , et f .
- Justifier l'affirmation suivante d'un élève : « À un tuyau sonore long correspond un son grave. »
- Exprimer, en fonction de f , la longueur L_2 du tuyau qui émettrait un son dont le fondamental correspondrait à l'harmonique de rang 2 du tuyau de longueur L . En déduire la relation entre L_2 et L .

2. Tuyau sonore fermé à une extrémité

Soit un tuyau à embouchure de flûte de longueur L_0 , mais fermé à l'autre extrémité.

Ce tuyau est représenté ci-dessous dans le mode fondamental :

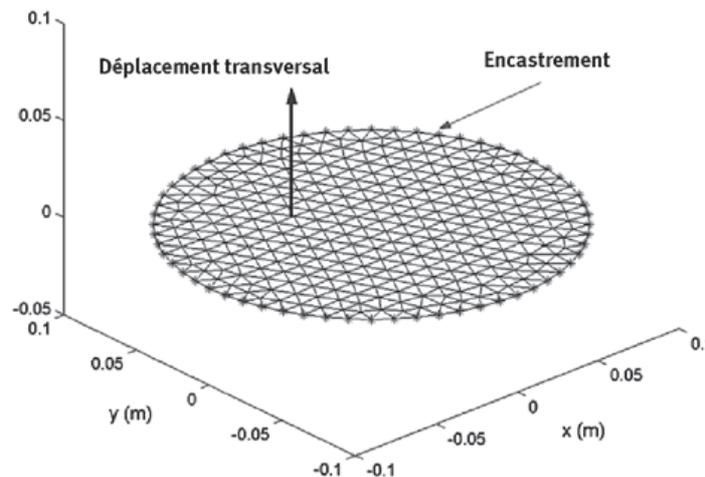


- a) Par analogie avec une corde tendue entre deux points fixes, exprimer la fréquence f_0 du mode fondamental émis par ce tuyau en fonction de v et L_0 .
- b) Un élève affirme : « Un tuyau ouvert aux deux extrémités sonne avec une fréquence double de celle d'un tuyau de même longueur, fermé à une extrémité. » Est-ce vrai ou faux ? Justifier la réponse.

Instruments à percussion

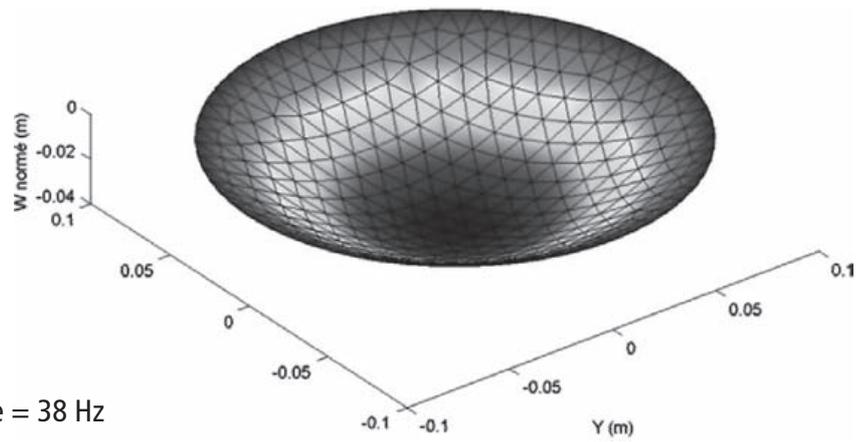
Exercice 11 Modes de vibration d'un djembé

Le **djembé** est un instrument de percussion africain, composé d'un fût de bois en forme de calice sur lequel est montée une peau de chèvre ou d'antilope tendue à l'aide d'un système de tension (originellement des chevilles en bois ou des cordes en peau maintenant le plus souvent des cordes synthétiques et des anneaux en fer à béton), que l'on joue à mains nues et dont le spectre sonore très large génère une grande richesse de timbre. La forme évasée du fût viendrait de celle du mortier à piler le grain.

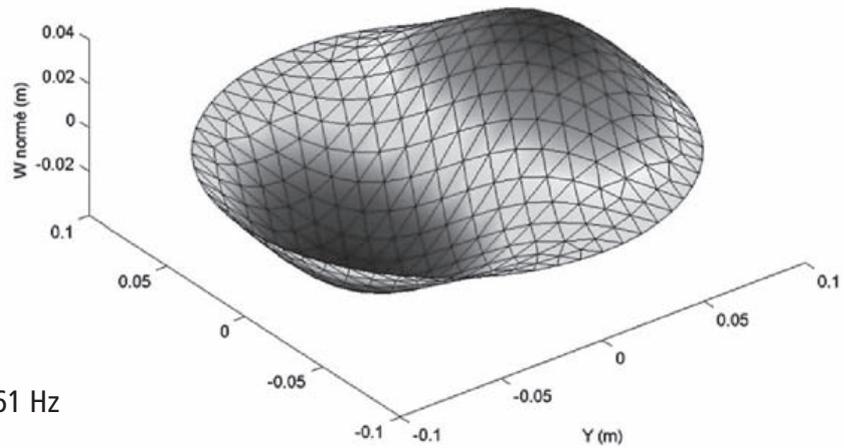


Avec un dispositif exciteur, on excite la membrane de l'instrument. Pour certaines fréquences appelées fréquences propres, la membrane entre en résonance. Les multiples réflexions de l'onde incidente bidimensionnelle engendrent une onde stationnaire. À l'aide d'un logiciel, on peut simuler les vibrations de la membrane. Pour chaque fréquence propre, des points de la membrane sont immobiles. Il s'agit de nœuds. L'ensemble des nœuds forme les lignes nodales ou figures de Chladni.

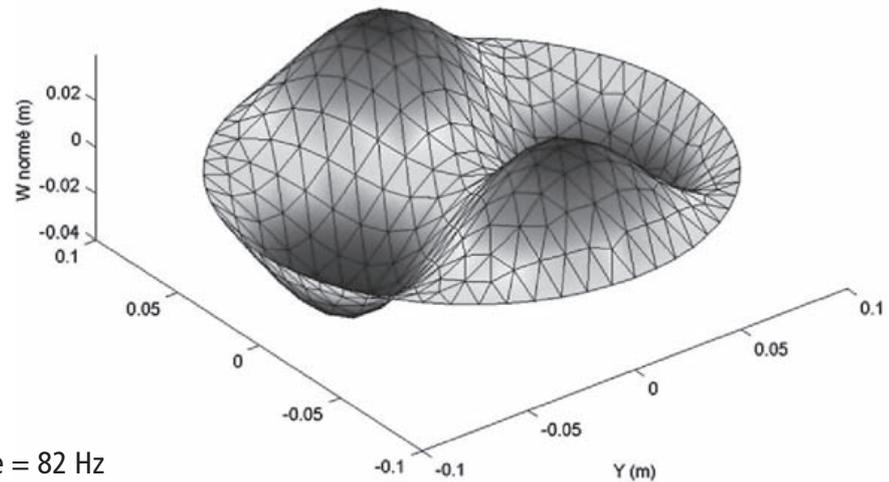
- 1 Pour chacune des figures ci-dessous, représenter la figure de Chladni correspondante.



Fréquence = 38 Hz



Fréquence = 61 Hz



Fréquence = 82 Hz

- 2 Préciser les modes de vibration pour chacune des trois situations représentées ci-dessus. Donner les modes sous la forme (n,m) où n est le nombre de droites et m le nombre de cercles. On rappelle que le périmètre circulaire de la membrane du djembé est une ligne nodale.

Exercice 12 Friction d'une tige

Peut-on produire un **son très aigu** à la limite du supportable **avec une simple tige en aluminium** ? Grâce à la physique des ondes sonores, c'est parfaitement possible. Cette expérience étonne un grand nombre de personnes, les physiciens eux-mêmes !

Dans une tige métallique, on peut avoir plusieurs mouvements de vibration qui engendrent un son.

- L'onde est transversale : la tige oscille autour de son axe. Déformer une tige selon ce mouvement demande peu de force. La vibration est de faible énergie, d'où un son de basse fréquence (note grave).

C'est le même phénomène qui se produit quand un marteau frappe une plaque de xylophone.



- L'onde est longitudinale : la tige se contracte et se dilate le long de son axe. Il faut plus d'énergie pour imposer ce mouvement à la tige. La vibration demande plus d'énergie, d'où un son de fréquence élevée (note aiguë). C'est le phénomène qui se produit quand un archet glisse sur la corde d'un violon.



[...] On peut ainsi, à l'aide de plusieurs tiges, fabriquer un instrument de musique à condition de respecter les contraintes imposées par la **gamme tempérée de Bach**.

Une gamme musicale est déterminée par les écarts de fréquence entre les notes qui composent la gamme. Il existe un grand nombre de gammes selon leur origine culturelle.

La gamme utilisée dans la musique occidentale est basée sur « la gamme au tempérament égal » ou encore « gamme tempérée » de Jean-Sébastien Bach.

D'après le site : www.scienceamusante.net

Dans cet exercice, l'onde est longitudinale et se propage à la vitesse v dans la tige. La section des tiges est un paramètre constant dans tout l'exercice.

La tige est le siège d'ondes stationnaires. Elle se comporte comme une colonne d'air de longueur L ouverte aux deux extrémités. Elle oscille à la fréquence f_0 dans son mode fondamental. Son état vibratoire peut alors être représenté de la manière suivante :



1. Une tige qui siffle

1.1. La tige est le siège d'ondes stationnaires.

1.1.1. L'onde est longitudinale. Donner une définition de ce type d'onde.

1.1.2. Qu'appelle-t-on une onde stationnaire ?

1.1.3. Quelle relation existe-t-il entre le mode fondamental et les autres harmoniques ?

1.1.4. Définir ce qu'on appelle un nœud de vibration.

1.1.5. On note λ la longueur d'onde du son de fréquence f . Exprimer λ en fonction de la longueur L de la tige.

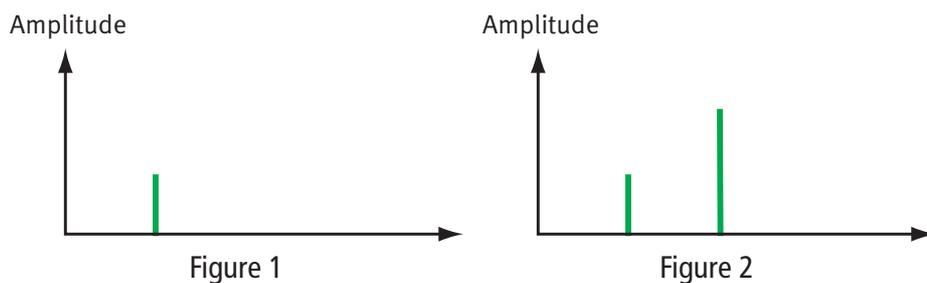
1.2. À l'aide d'un microphone, on visualise sur l'écran d'un oscilloscope une tension électrique, image du mouvement vibratoire de la tige.

1.2.1. Qu'appelle-t-on hauteur d'un son ?

1.2.2. La tige est en aluminium.

La fréquence du mode fondamental est égale à 2093 Hz.

Parmi les spectres en fréquence proposés en figure 1 et figure 2 ci-dessous, lequel correspond au son émis, sachant qu'il s'agit d'un son pur ?



1.3. La vitesse de propagation v du son à l'intérieur d'un matériau dépend de certains paramètres, notamment de la masse volumique de ce matériau.

Répondre par « vrai » ou « faux » aux affirmations ci-dessous, en justifiant son choix.

1.3.1. Affirmation 1 : Les tiges de même matériau et de longueurs différentes donnent des notes différentes : la note est plus grave quand la tige est plus longue.

1.3.2. Affirmation 2 : La tige en aluminium donne une note plus aiguë que la tige en laiton de même longueur.

On donne les valeurs de la vitesse du son dans l'aluminium et le laiton.

Matériau	v (m/s)
Aluminium	voisine de 4 190
Laiton (70% Cu, 30% Zn)	voisine de 3 470

2. Des tiges musicales

Dans la gamme de Bach, il y a 12 notes séparées chacune d'un intervalle appelé « demi-ton » (voir figure 3).

La fréquence f_0 est la fréquence de la note « do » donnée par la tige n° 0 de longueur L_0 .

La fréquence f_{12} est la fréquence de la même note à l'octave supérieure. Cette note sera donnée par la tige n° 12 de longueur L_{12} .

Par définition de l'octave, $f_{12} = 2 \cdot f_0$

Par conséquent, si k est le rapport de fréquences de deux notes consécutives, k est égal à $2^{1/12}$.

k est appelé intervalle ou degré ou demi-ton. Il est indépendant du couple de notes qui se suivent, d'où le nom de « gamme tempérée » ou « tempérament égal » pour cette gamme (tempérament = accord).

	$\xrightarrow{1/2 \text{ ton}} \xrightarrow{1/2 \text{ ton}} \xrightarrow{1/2 \text{ ton}}$												
Fréquence (Hz)	$f_0 = 2093$	f_1		2637		2793		3136		3520		3951	4186
Note	do	do #	ré	ré #	mi	fa	fa #	sol	sol #	la	la #	si	do
Numéro de la tige	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Longueur de la tige	L_0	L_1	L_2	L_3	L_4	L_5	L_6	L_7	L_8	L_9	L_{10}	L_{11}	L_{12}

Figure 3 : une octave divisée en douze intervalles ou demi-tons

- 2.1. Rappeler la relation qui existe entre la longueur L d'une tige, la vitesse v de propagation de l'onde dans la tige et la fréquence f du son émis.
- 2.2. La tige numéro 0 a pour longueur $L_0 = 1,00$ m. Elle vibre dans son mode fondamental à la fréquence $f_0 = 2093$ Hz (voir figure 3). Par définition de la gamme tempérée de Bach, la fréquence f_1 de la tige n° 1 de longueur L_1 est donnée par la relation $f_1 = 2^{1/12} f_0$. Montrer que la longueur L_1 s'écrit : $L_1 = L_0 / 2^{1/12}$.
- 2.3. Ces relations s'écrivent pour la tige n : $f_n = 2^{n/12} f_0$ et $L_n = L_0 / 2^{n/12}$. En s'aidant du tableau ci-dessous, quelle serait la fréquence de la tige la plus courte ? Retrouve-t-on la valeur donnée pour la définition de l'octave, donnée page précédente ?

n	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
$2^{n/12}$	1,00	1,06	1,12	1,19	1,26	1,33	1,41	1,50	1,59	1,68	1,78	1,89	2,00
$2^{-n/12}$	1,00	0,94	0,89	0,84	0,79	0,75	0,71	0,67	0,63	0,60	0,56	0,53	0,50

Instruments électroniques

Exercice 13 Diapason électronique

Un groupe d'élèves musiciens souhaite réaliser un diapason électronique capable d'émettre des sons purs, en particulier la note la_3 (note la du troisième octave). Cette note sert de référence aux musiciens pour accorder leurs instruments.

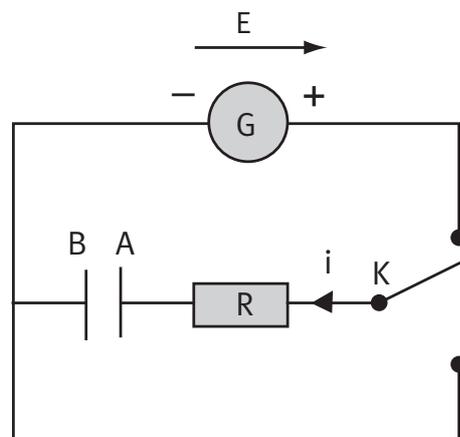
Un son pur est une onde acoustique sinusoïdale de fréquence donnée. Il peut être obtenu par excitation d'un haut-parleur à l'aide d'une tension électrique sinusoïdale de même fréquence.

Le circuit électrique qui permet d'obtenir une tension sinusoïdale est constitué d'une bobine, d'un condensateur et d'une résistance (voir figure 1).

Les élèves réalisent le circuit oscillant permettant d'émettre les sons de la gamme tempérée (gamme musicale élaborée par J.S. Bach et couramment utilisée en Occident).

Document : Octave 3 de la gamme tempérée

Note	do	ré	mi	fa	sol	la	si
Fréquence (en Hz)	262	294	330	349	392	440	494



G : Générateur de tension constante $E = 12\text{ V}$

R : Résistance du conducteur ohmique $R = 1000\ \Omega$

C : Capacité du condensateur $C = 1,0\ \mu\text{F}$

L : Inductance réglable de la bobine (résistance r négligeable)

A. Réalisation d'oscillations électriques

Les élèves utilisent un condensateur caractérisé par sa capacité C et une bobine caractérisée par son inductance L . Le condensateur est chargé sous la tension E du générateur puis les élèves basculent l'interrupteur K en position 2. Cet instant est choisi comme nouvelle origine des temps.

- 1 La tension u aux bornes du condensateur évolue en fonction du temps de la manière présentée en figure 2. Comment peut-on qualifier les oscillations électriques observées ?
- 2 Quel est le dipôle responsable de l'amortissement ?
- 3 Les élèves pensent que le circuit ainsi réalisé n'est pas utilisable. Indiquer la raison qui leur permet de faire cette constatation.

B. Entretien des oscillations

En feuilletant leur manuel de physique, les élèves constatent qu'il est possible d'ajouter, au circuit précédent, un dispositif qui entretient les oscillations.

- 1 Expliquer, en une phrase, le rôle de ce dispositif, d'un point de vue énergétique.

- 2 Sachant que les paramètres L et C du circuit précédent n'ont pas été modifiés, représenter, sur la figure 3, la courbe $u = f(t)$ obtenue après entretien des oscillations.
- 3 Dans le cas d'un tel oscillateur, l'expression de la période propre T_0 du circuit oscillant est donnée par : $T_0 = 2\sqrt{LC}$. Calculer sa valeur, sachant que le condensateur a une capacité $C = 1,0 \mu\text{F}$ (F : farad) et que l'inductance L de la bobine vaut ici $0,100 \text{ H}$ (H : henry).
- 4 En déduire la fréquence f_0 de la tension obtenue.

C. Onde sonore

Le circuit oscillant est relié à un haut-parleur convertissant cette onde électrique en onde sonore de fréquence f_0 . Les élèves souhaitent accorder leurs instruments en émettant la note la_3 à l'aide du circuit précédent.

- 1 La fréquence précédemment obtenue est-elle un son de l'octave 3 de la gamme ?
- 2 Quels paramètres peut-on changer pour modifier la valeur de la fréquence émise ?
- 3 Sachant que les élèves ne disposent pas d'autre condensateur que celui du circuit initial, calculer la valeur de l'autre paramètre qui permettra d'obtenir la note la_3 .
- 4 On règle à présent ce paramètre sur 232 mH : déterminer la nature de la note alors émise par le diapason.

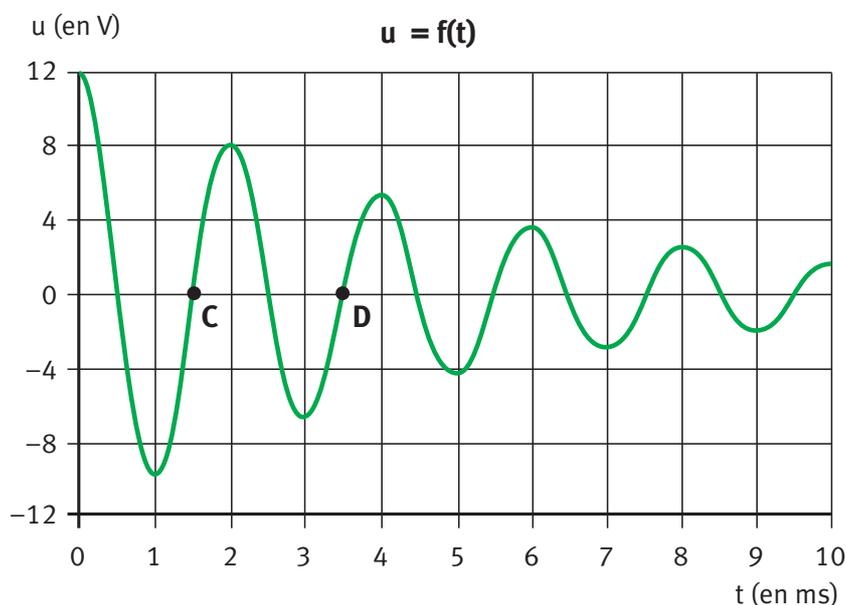
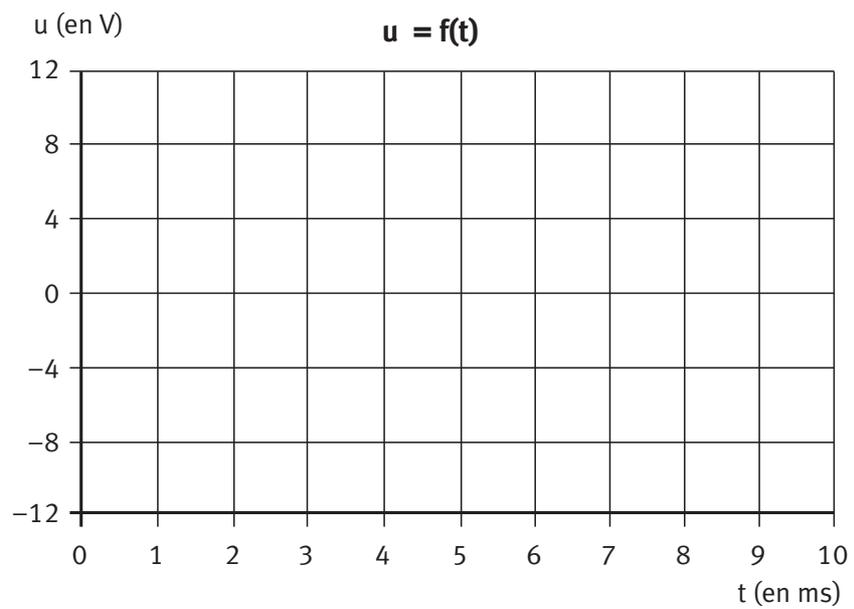


Figure 2



4

Récepteurs et émetteurs sonores

Objectifs d'apprentissage

- ▶ Connaître des éléments d'acoustique physiologique.
- ▶ Être capable de décrire un microphone et d'expliquer son fonctionnement.
- ▶ Connaître le mécanisme phonatoire.
- ▶ Être capable de décrire un haut-parleur et d'expliquer son fonctionnement.

Avertissement

Toutes les notions abordées dans le cours ne sont pas à connaître car elles sont tirées de documents à exploiter. Par contre, vous devez être capables de réaliser les activités et exercices. Certaines connaissances nécessaires à la compréhension des sujets traités sont rappelées dans les résumés de chapitre.

A

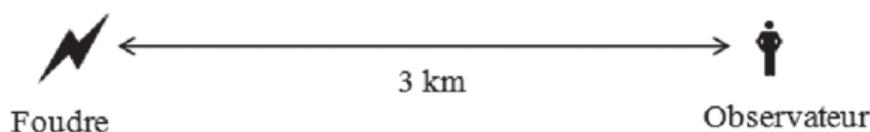
Pour débiter le chapitre

1. Émission, propagation et réception

Le son est une énergie produite par la vibration d'un objet : **l'énergie acoustique**. C'est un émetteur sonore (corde vocale, haut-parleur...) qui est à l'origine de la vibration. Ensuite, cette vibration se transmet par l'intermédiaire du milieu de propagation (l'air, l'eau, un métal...) sous forme d'ondes jusqu'à un récepteur sonore (l'oreille, un microphone...).

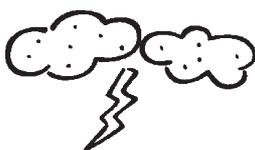
La propagation du son n'est jamais instantanée. On a toujours la séquence dans le temps : émission, propagation, réception.

Exemple Le tonnerre correspond à l'onde sonore émise par la foudre.



Situé à 3 km, un observateur entend le tonnerre 9 s après l'impact de la foudre.

Émetteur = foudre



ÉMISSION

Milieu de propagation = air

→
*PROPAGATION d'une onde sonore
(ou acoustique)*



RÉCEPTION

2. Le milieu de propagation et célérité

La propagation du son n'est possible que dans un milieu dit « élastique », c'est-à-dire que le son a besoin d'un vecteur de transmission pour se diffuser. La propagation peut se faire dans l'air, dans un liquide ou dans un milieu solide. En l'absence d'un milieu de propagation, les ondes sonores ne peuvent pas se déplacer, c'est pourquoi les sons ne se propagent pas dans le vide. On dit que l'onde sonore est une onde mécanique.

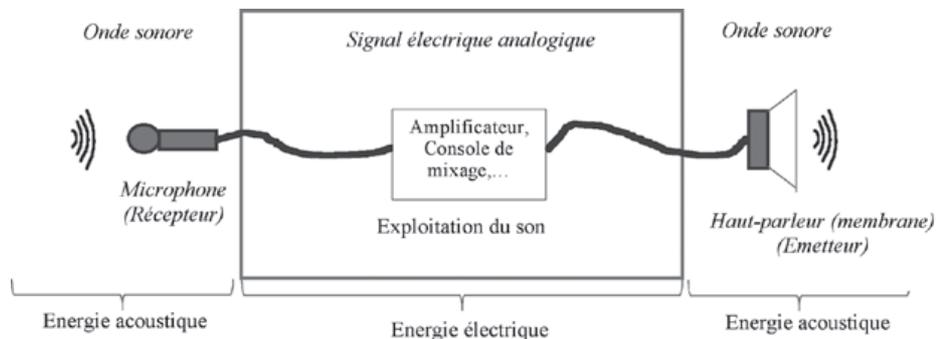
La célérité V des ondes sonores dépend du milieu de propagation. Plus le milieu dans lequel se propage le son est dense, plus sa célérité est élevée. Ainsi, elle est plus importante dans les solides et les liquides que dans l'air.

Célérité du son dans différents milieux matériels de propagation à 20 °C

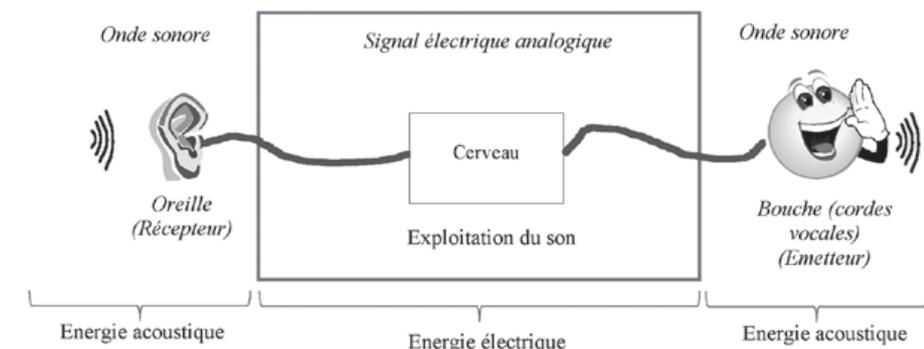
Milieu matériel	Air	Hélium	Hydrogène	Eau	Glycérine	Cuivre	Bois	Acier	Aluminium	Granit
Célérité (en m/s)	340	970	1 230	1 500	2 000	3 600	3 800	5 000	5 100	6 000

3. La chaîne sonore analogique

Dans l'exemple ci-dessous, le son qui transporte de l'énergie acoustique est transformé par le microphone (récepteur) en énergie électrique. L'énergie électrique est ensuite exploitable par les consoles de mixage, l'amplificateur audio... Puis l'énergie électrique est transformée en énergie acoustique par le haut-parleur (émetteur). Le microphone et le haut-parleur sont des convertisseurs d'énergie.



L'être humain est une chaîne sonore analogique :



B

Pour apprendre

1. Les récepteurs sonores

a) L'oreille

1. Description et fonctionnement

L'oreille est un récepteur de vibrations sonores. Elle comporte trois parties :

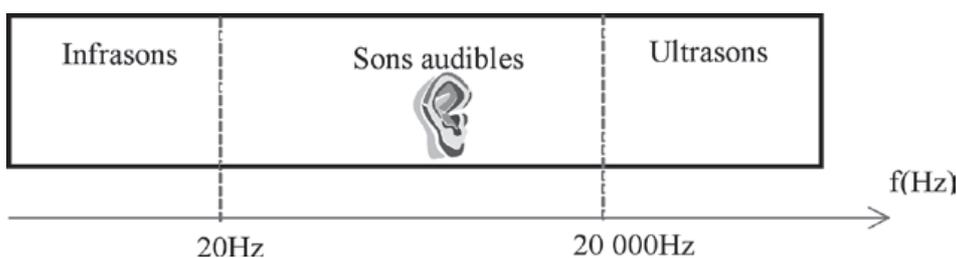
- ▶ **L'oreille externe** : le pavillon capte les sons et les achemine au **tympan**, par le conduit auditif ; le tympan vibre alors sous l'effet des variations de pression dues aux ondes sonores.
- ▶ **L'oreille moyenne** : les **osselets** transmettent à la fenêtre ovale les vibrations du tympan, en les amplifiant trente fois environ.
- ▶ **L'oreille interne** : ces vibrations sont communiquées au liquide contenu dans la **cochlée** (organe en colimaçon). Les cellules ciliées de la cochlée, alors excitée, engendrent des messages nerveux (influx nerveux) qui parviennent au cerveau.

L'oreille externe (tympan) capte les vibrations sonores. L'oreille moyenne les transmet et les amplifie. L'oreille interne les convertit en influx nerveux qui parvient au cerveau.

2. Fréquences audibles

Une oreille humaine normale perçoit les sons de fréquences comprises entre environ 20 Hz et 20 000 Hz.

Cette limite supérieure diminue à mesure que l'âge augmente. Les adultes ne dépassent pas 15 000 Hz et les personnes âgées 12 000 Hz. Ces limites s'appliquent naturellement aux personnes qui ont une « bonne oreille ».



Les ondes sonores de fréquence $f < 20 \text{ Hz}$ correspondent aux **infrasons**.

Les ondes sonores de fréquence $f > 20\,000 \text{ Hz}$ correspondent aux **ultrasons**.

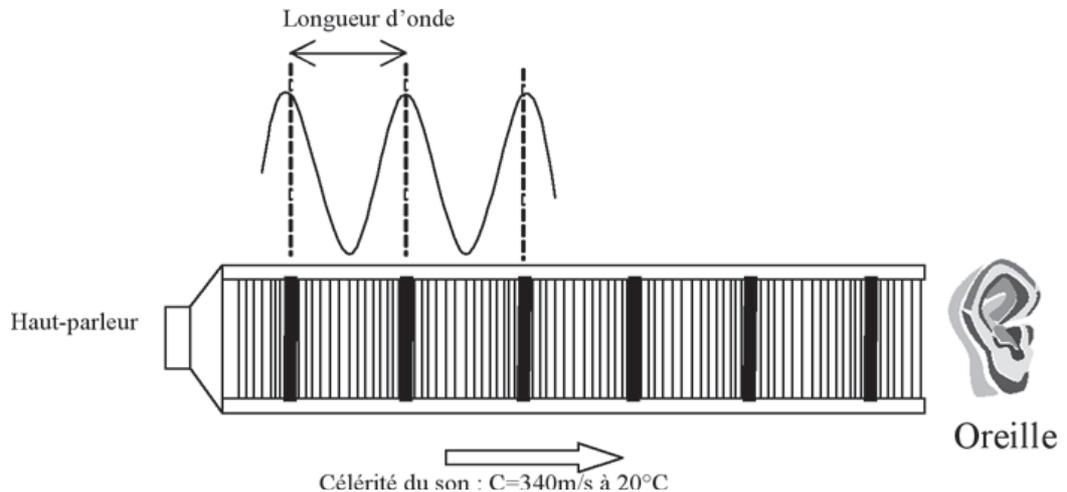
Activité 22 Domaine audible

Les ondes sonores sinusoïdales audibles par l'homme ont des fréquences comprises entre 20 Hz et 20 000 Hz. Les instruments de musique traditionnels produisent des sons dont les fréquences sont comprises entre environ 30 Hz et 5 000 Hz.

Déterminer les longueurs d'ondes limites dans l'air :

- ▶ des sons audibles par l'homme,
- ▶ des sons musicaux émis par ces instruments.

Donnée Vitesse du son à 20 °C : $V = 340 \text{ m/s}$



3. Sensation auditive – Intensité acoustique

La sensation auditive dépend de l'intensité I des sons reçus. Les ondes sonores transportent de l'énergie (acoustique) dont une partie est reçue par la surface du tympan.

On appelle intensité acoustique (ou intensité sonore), notée I , la puissance acoustique reçue par unité de surface de récepteur. Elle se mesure en watts par mètre carré (symbole : W/m^2).

$$I = \frac{P}{S}$$

I : intensité acoustique (W/m^2)

P : puissance acoustique (W)

S : surface traversée (m^2)

L'oreille est un récepteur de très grande sensibilité, détectant des sons dont l'intensité acoustique est comprise entre 10^{-12} W/m^2 (seuil d'audibilité) et 10^2 W/m^2 (seuil de douleur) pour des ondes sonores de 1000 Hz.

4. Niveau d'intensité acoustique

La sensation auditive n'est pas proportionnelle à l'intensité acoustique. Dans une salle où fonctionne un haut-parleur, l'installation d'un second haut-parleur identique ne change guère la sensation auditive : l'intensité acoustique double, mais l'auditeur n'entend pas un son deux fois plus fort. Aussi a-t-il été défini une grandeur liée à la sensation auditive de l'oreille ; elle est appelée niveau d'intensité acoustique.

Le niveau d'intensité acoustique L (*Level* = « niveau » en anglais) est mesuré en décibels (symbole dB) avec un sonomètre et est défini par la relation suivante :

$$L = 10 \log \frac{I}{I_0}$$

$I_0 = 10^{-12} \text{ W/m}^2$ (seuil d'audibilité)

L'intensité acoustique est une grandeur additive alors que le niveau d'intensité acoustique L n'est pas une grandeur additive ! Le niveau d'intensité acoustique L est calculé pour une fréquence donnée du son.

Remarque Décibel : unité donnée en hommage à Graham Bell (1847-1922), inventeur du téléphone en 1876.

Activité 23 Intensité acoustique et niveau d'intensité acoustique

L'intensité acoustique I varie comme l'inverse du carré de la distance d entre l'émetteur et le récepteur :

$$I = \frac{k}{d^2}$$

k étant une constante.

Une personne, habitant à 1 km d'un aéroport, reçoit une intensité acoustique $I_1 = 10^{-3} \text{ W/m}^2$.

- 1 Donner la valeur du niveau d'intensité acoustique L_1 .
- 2 Calculer, en dB, la diminution ΔL de niveau d'intensité acoustique si cette personne déménage pour se trouver à 10 km de l'aéroport.

Activité 24 Puissance acoustique

Une personne en conversation émet une puissance acoustique moyenne de 10^{-6} W , se propageant dans toutes les directions de l'espace.

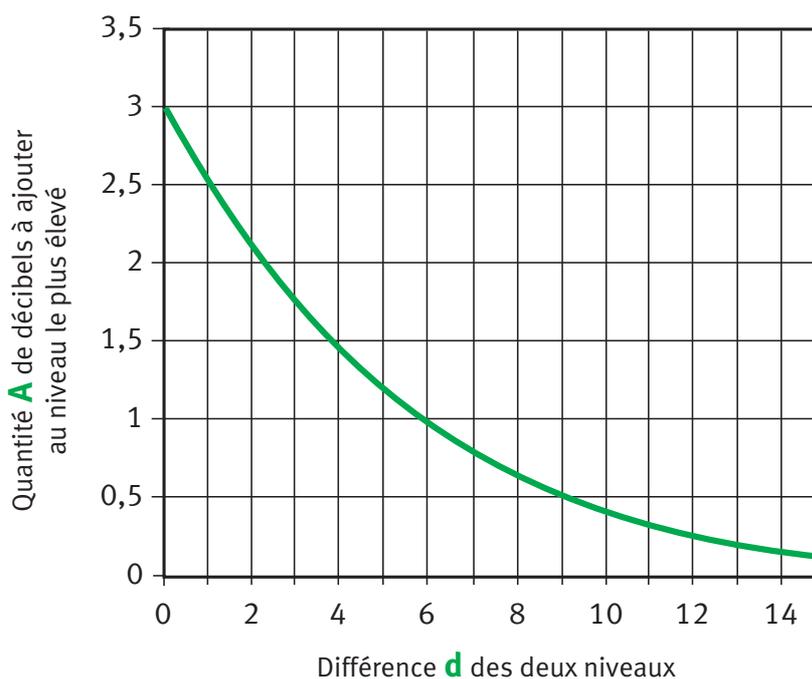
- 1 Quelle est l'intensité acoustique à 1 m de cette personne ? à 10 m ?
- 2 Quelle est la diminution du niveau d'intensité acoustique correspondant ?

Activité 25 Niveau d'intensité acoustique

- 1 Calculer le niveau sonore L du seuil de douleur ($I = 25 \text{ W/m}^2$).
- 2 Quel est le niveau sonore de deux instrumentistes jouant chacun à 60 dB ?
- 3 Quel est le niveau sonore L d'un orchestre de 80 musiciens jouant chacun à 60 dB ?
- 4 Quel est le niveau sonore d'un trio dans lequel les instrumentistes jouent respectivement à 50, 60 et 70 dB ?

Si on veut éviter des calculs faisant intervenir des logarithmes, on utilise des tableaux ou des abaques pour additionner deux niveaux sonores dont on connaît la différence arithmétique « d » en décibels.

Composition de deux niveaux sonores en décibels



d en dB	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
A en dB	3	2,5	2,1	1,8	1,5	1,2	1	0,8	0,6	0,5	0,4	0,33	0,26

Exemple d'utilisation 1

Si on veut calculer le niveau résultant du fonctionnement de deux sources de bruit qui produisent en un point d'écoute des niveaux sonores respectivement de 50 dB et 60 dB, on peut procéder de la façon suivante :

L'écart « d » entre les deux niveaux d'intensité est de $60 \text{ dB} - 50 \text{ dB} = 10 \text{ dB}$. D'après l'abaque ou le tableau, la quantité $A = 0,4 \text{ dB}$ correspond à la valeur à ajouter au niveau le plus élevé. Le niveau d'intensité acoustique résultant est donc : $60 \text{ dB} + 0,4 \text{ dB} = 60,4 \text{ dB}$.

Exemple d'utilisation 2

Si on veut calculer le niveau résultant du fonctionnement de trois sources de bruit qui produisent en un point d'écoute des niveaux sonores respectivement de 50, 56 et 59 dB, on peut procéder de la façon suivante :

On « ajoute » les deux premiers niveaux, soit 50 et 56 dB. L'écart est de 6 dB, et le niveau à ajouter à 56 dB, le plus élevé des deux, est de 1 dB. Il en résulte un niveau de $56 + 1 = 57 \text{ dB}$. Il suffit de lui combiner le troisième niveau de 59 dB. L'écart « d » de 57 à 59 dB est de 2 dB, il faut donc ajouter 2,1 dB à 59 pour avoir le niveau résultant du fonctionnement des trois sources. Le résultat est de $59 + 2,1 = 61,1 \text{ dB}$ qu'on arrondit à 61 dB. Notons qu'il est d'usage d'effectuer les calculs en tenant compte des dixièmes de décibel et d'arrondir le résultat final au décibel le plus proche.

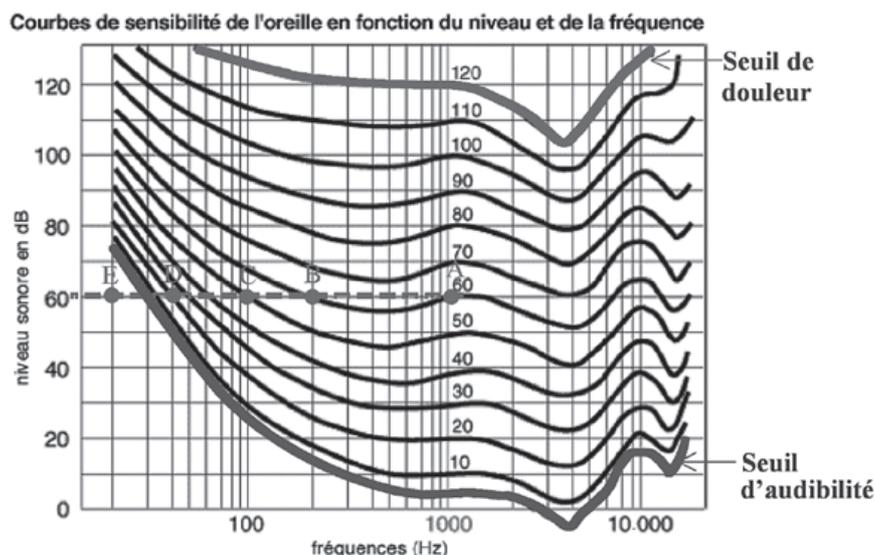
Activité 26 Niveau d'intensité acoustique et abaque

En utilisant l'abaque $A = f(d)$ ci-dessus, déterminer le niveau d'intensité acoustique d'un trio dans lequel les instrumentistes jouent respectivement à 50 dB, 50 dB et 55 dB.

5. Courbes de sensibilité de l'oreille

Les courbes dites de **Fletcher & Munson**, du nom des deux scientifiques qui les ont établies à l'aide de mesures effectuées sur un large panel d'individus, illustrent le fait que la sensibilité de l'oreille n'est pas identique à toutes les fréquences. Ces courbes, aussi appelées « isosoniques », représentent la sensibilité moyenne de l'oreille pour une plage de fréquences audibles.

D'une manière générale, l'oreille est moins sensible aux fréquences graves et aiguës qu'aux fréquences médianes, comprises entre 1 KHz et 5 KHz, qui sont naturellement favorisées par notre oreille.



Source : site son-video.com <http://www.son-video.com/Conseil/HomeCinema/Sub/Sub4.html>

Un son émis par un haut-parleur de niveau d'intensité acoustique de 60 dB est perçu comme un son de 60 dB (ou phones) à 1000 Hz (point A). Ce même son est toujours perçu comme un son de 60 dB à 200 Hz (point B). Par contre, ce son sera perçu comme un son de 50 dB à 100 Hz (point C), 20 dB à 40 Hz (point D). Ce son n'est plus audible à 20 Hz (point E).

Activité 27 Sensibilité de l'oreille humaine

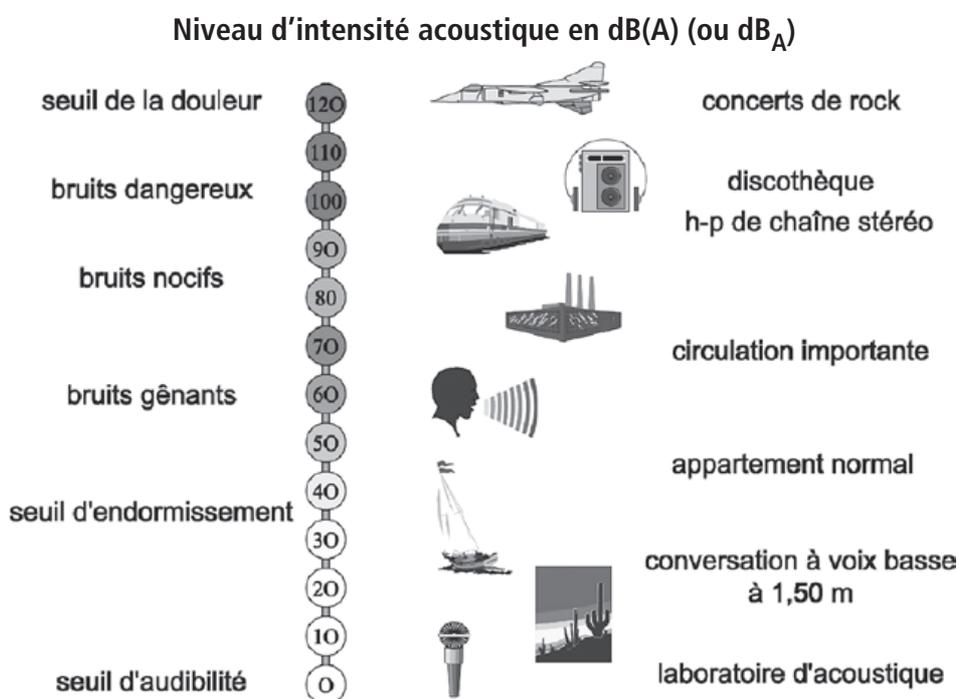
À partir du diagramme de Fletcher & Munson montrant les limites de la sensibilité de l'oreille en fonction de la fréquence du son perçu, répondre aux questions suivantes :

- 1 Pour quelles fréquences la sensibilité de l'oreille humaine est-elle la plus grande ?
- 2 Un son de fréquence 40 Hz et de niveau sonore 40 dB peut-il être entendu par une oreille humaine ?
- 3 L'intensité sonore d'un chuchotement est $I = 10^{-10} \text{ W/m}^2$. Quel est le domaine de fréquences audibles par une oreille humaine d'un son de cette intensité ?
- 4 Quelle est la valeur moyenne du niveau sonore correspondant au seuil de douleur ?

6. L'échelle de bruit et le décibel A dB(A)

L'oreille n'a pas la même sensibilité aux différentes fréquences : elle est plus sensible dans les médiums que dans les aigus et les graves. Pour que la mesure sonore effectuée à l'aide d'un sonomètre corresponde à ce qu'entend l'oreille, on pondère les valeurs mesurées (niveau physique en dB) en appliquant à l'appareil de mesure, un filtre A qui ajoute aux niveaux de bruit relevés des décibels dans les médiums et en retranche au fur et à mesure qu'on s'en éloigne vers les basses ou vers les aigus. Ainsi, **le dB_A** (niveau physiologique) **est l'unité de mesure obtenue avec la pondération A** qui est utilisée pour les mesures de bruit de l'environnement et qui traduit la sensibilité de l'oreille humaine. Le sonomètre est, avec ce filtre A, une oreille artificielle.

Ce tableau donne une idée de ce que notre oreille perçoit en rapport avec les valeurs mesurées en dB(A) (ou dB_A) :



Source : Dossier de presse du Plan National d'Action contre le Bruit, octobre 2003, ministère de l'Écologie et du Développement durable.

Calcul du niveau d'intensité acoustique en dB_A

On calcule le niveau pondéré en dB_A d'un bruit par bandes d'octaves : six octaves avec les fréquences médianes suivantes : 125 Hz, 250 Hz, 500 Hz, 1 000 Hz, 2 000 Hz et 4 000 Hz.

FREQUENCES MEDIANES DES INTERVALLES DE TIERS D'OCTAVE (en Hz)																	
100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000	5000
125			250			500			1000			2000			4000		
FREQUENCES MEDIANES DES INTERVALLES D'OCTAVE (en Hz)																	

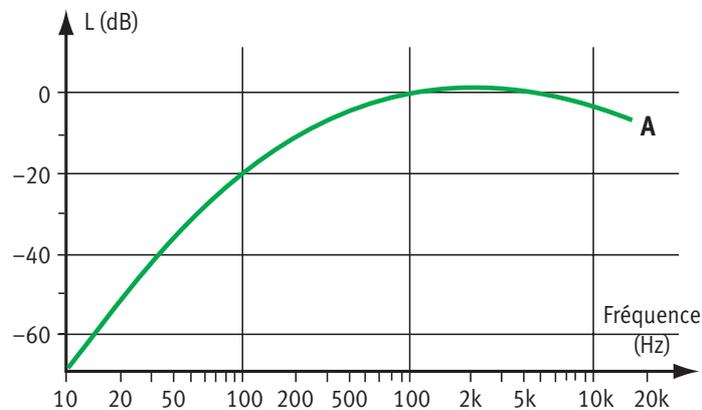
Fréquences médianes (Hz)	125	250	500	1 000	2 000	4 000
Niveau physique $L_1, L_2 \dots$ (dB)	71	70	66	69	68	59
Pondération à appliquer (dB)	-16,1	-8,6	-3,2	0	+1,2	+1,0
Niveau physiologique (dB_A)	54,9	61,4	62,8	69	69,2	60

Soit $I_{1A}, I_{2A} \dots$ les intensités sonores pondérées dans les différentes bandes d'octave et $L_{1A}, L_{2A} \dots$ les niveaux d'intensité correspondants :

$$L_{1A} = L_1 - 16,1 \text{ dB} = 71 - 16,1 \text{ dB} = 54,9 \text{ dBA}$$

$$L_{2A} = L_2 - 8,6 \text{ dB} = 70 - 8,6 \text{ dB} = 61,4 \text{ dBA}$$

$$L_{3A} = L_3 - 3,2 \text{ dB} = 66 - 3,2 \text{ dB} = 62,8 \text{ dBA}$$



Puisque $L_{1A} = 10 \times \log \frac{I_{1A}}{I_0}$, on a :

$$I_{1A} = I_0 \times 10^{\frac{L_{1A}}{10}} = I_0 \times 10^{5,49} = 3,1 \times 10^{-7} \text{ W.m}^{-2}$$

On procède de même pour $I_{2A}, I_{3A} \dots$

L'intensité sonore totale pondérée I_A est égale à la somme des intensités des différentes bandes d'octave :

$$I_A = I_{1A} + I_{2A} + I_{3A} + \dots$$

Le niveau d'intensité acoustique global L_A s'écrit alors :

$$L_A = 10 \times \log \frac{I_A}{I_0}$$

Numériquement, on obtient :

$$L_A = 10 \times \log[10^{5,49} + 10^{6,14} + 10^{6,28} + 10^{6,90} + 10^{6,92} + 10^{6,00}] = 73 \text{ dB}_A$$

Remarque Le spectre du bruit analysé ci-dessus est limité alors qu'un bruit a souvent des fréquences en dehors des bandes d'octaves considérées... mais celles-ci sont souvent négligeables pour le calcul d'intensité globale pondérée A car on sort du domaine de sensibilité de l'oreille.

7. Stéréophonie

L'audition par les deux oreilles permet de situer la direction d'une source sonore, donc de la localiser dans l'espace. La stéréophonie est un système de restitution sonore qui recrée l'impression résultant de la répartition des sources sonores dans l'espace. L'enregistrement stéréophonique consiste à placer plusieurs (au moins deux) microphones, par exemple l'un à gauche et l'autre à droite de la scène. Les signaux captés par les deux microphones sont enregistrés et traités séparément. La reproduction du son en stéréophonie nécessite alors deux enceintes acoustiques. Chacune d'elles restitue l'enregistrement du microphone correspondant et doit être placée de part et d'autre de l'auditeur.

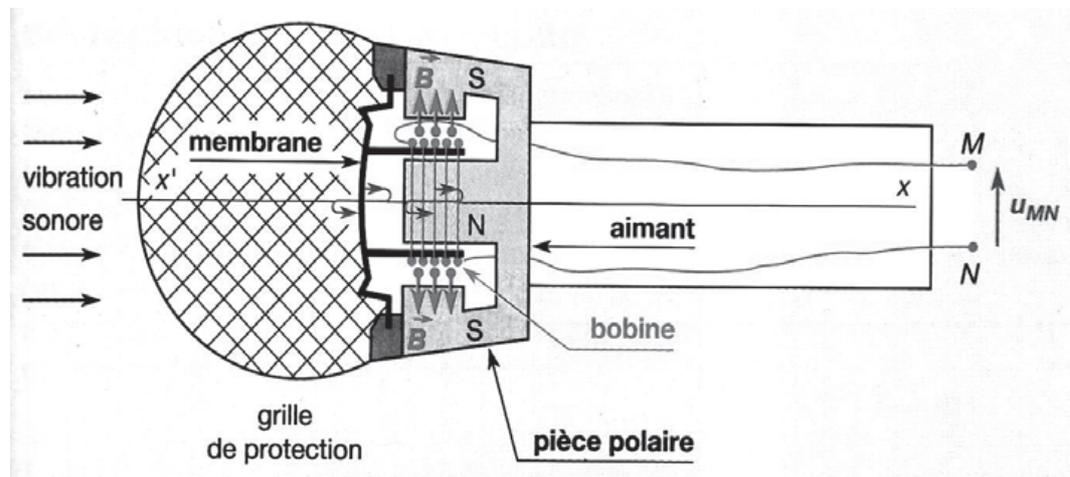
b) Le microphone

1. Historique

Un instituteur pour sourds-muets, **Graham Bell**, fut le véritable père du téléphone. Il réalisa, en 1876, une capsule à induction utilisable comme microphone et comme écouteur. La qualité pour la parole était parfaitement admissible. En 1878, **Hughes** construisit le premier microphone à charbon. La sensibilité de cet élément, sinon sa qualité, donna à l'invention de Bell le coup de pouce nécessaire à l'extension foudroyante du téléphone.

2. Structure d'un microphone

Comme l'oreille, un microphone est un récepteur de vibrations sonores. Il existe plusieurs types de microphones (microphones électrodynamique, électrostatique, à électret...). Par la suite, nous étudierons le microphone électrodynamique.



Un microphone électrodynamique comporte essentiellement :

- ▶ Une **membrane** rigide, très légère (de 50 à 100 mg), fixée sur son pourtour ; elle comporte des ondulations lui permettant de se déformer ;
- ▶ Un **aimant** ;
- ▶ Une **bobine** très légère, possédant quelques dizaines de spires seulement et pouvant coulisser dans l'entrefer de l'aimant.

3. Propriétés d'un microphone

Un micro convertit un signal sonore en un signal électrique (tension électrique) c'est-à-dire que l'énergie acoustique est transformée en une énergie électrique.

Le microphone est un convertisseur d'énergie, encore appelé transducteur.

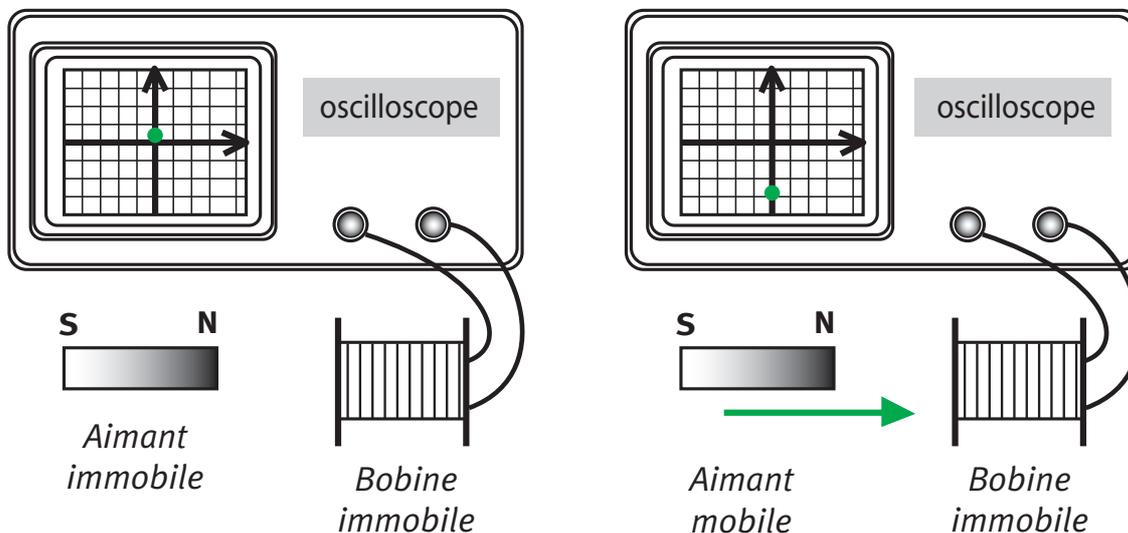
L'avantage d'un signal électrique par rapport à un signal acoustique est qu'il est stockable (lecteur-enregistreur CD ou à bande, carte SD, clé USB...) et exploitable par les appareils audio. Le signal électrique de sortie d'un microphone résultant de la conversion est de très faible puissance. Pour qu'il soit exploitable par les appareils audio, ce signal doit être amplifié.

4. Le phénomène d'induction

Lorsqu'on parle devant un microphone relié à un oscilloscope, le spot dévie.

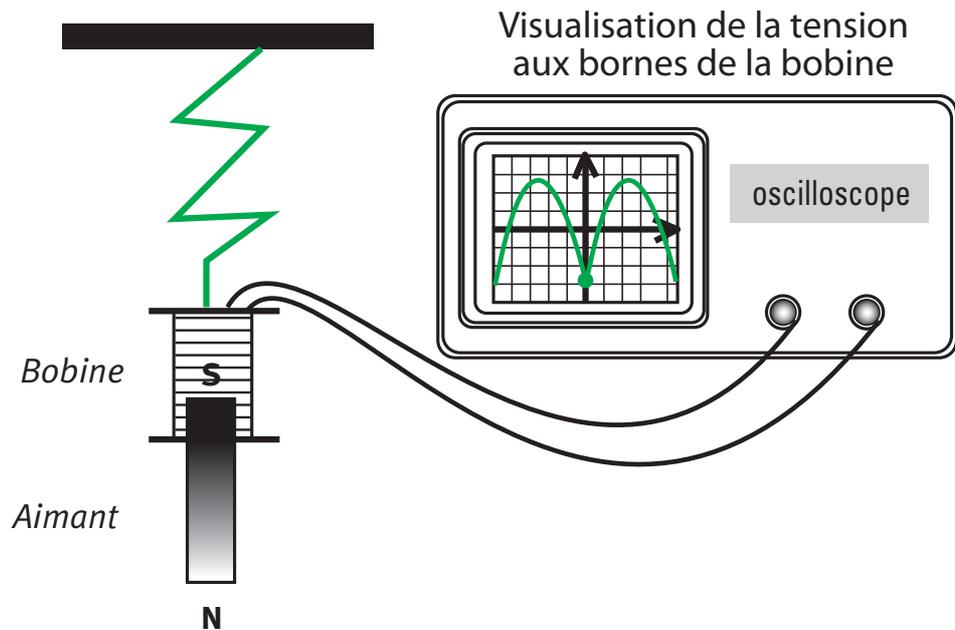
La tension variable qui apparaît aux bornes de la bobine du microphone est-elle due aux déplacements de la membrane lorsque celle-ci vibre sous l'effet des ondes sonores ?

Expérience 1 On prend une bobine formée d'un grand nombre de spires que l'on relie, par des fils souples, à un oscilloscope. On déplace rapidement l'aimant source d'un champ magnétique au voisinage de la bobine : une tension apparaît à ses bornes tant que l'aimant est en mouvement. On observe le même effet lorsqu'on déplace la bobine devant l'aimant.



Expérience 2 On suspend la bobine à un ressort et on la fait osciller au voisinage de l'aimant. On constate que la tension induite dans la bobine a la même période (même fréquence) que le mouvement de la bobine.

Le déplacement d'une bobine au voisinage d'un aimant source d'un champ magnétique (ou l'inverse) fait apparaître une tension électrique entre les bornes de la bobine : c'est le phénomène d'induction électromagnétique.

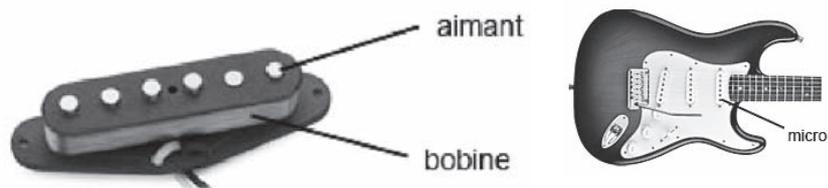


Dans un microphone électrodynamique, les ondes sonores provoquent les oscillations de la membrane. Celles-ci sont communiquées à la bobine placée dans l'entrefer de l'aimant. Une tension induite variable dans le temps apparaît alors aux bornes de la bobine.

Le microphone convertit ainsi un signal sonore ou acoustique en un signal électrique grâce au phénomène d'induction.

Remarque Le micro d'une guitare est composé :

- ▶ de six aimants, un par corde, qui engendrent un champ magnétique ;
- ▶ d'une bobine de fil électrique (très fin) enroulé autour de l'aimant.



L'aimant et la bobine sont fixes, ni l'un ni l'autre ne se déplace au cours du temps, ce qui différencie le micro de guitare des micros de chant, notamment. Pour simplifier l'explication, nous parlerons d'un micro à un aimant, mais le principe reste le même pour une vraie guitare 6 cordes / 6 aimants. Comment la vibration de la corde est-elle transformée en signal électrique par le micro de la guitare électrique ? Pour appliquer le principe d'induction (bobine/aimant), il faut soit un déplacement de l'aimant devant la bobine, soit un déplacement de la bobine devant l'aimant. Or, dans le cas d'un micro de guitare, l'aimant et la bobine sont fixes. La corde est placée à proximité de l'aimant. Le champ magnétique aimante partiellement la corde. Si on déplace la corde devant l'aimant, le

champ magnétique de ce dernier varie. Si on considère le micro entier (ensemble aimant/bobine), déplacer la corde devant le micro revient à déplacer l'aimant devant la bobine. Ainsi, on peut se ramener au phénomène d'induction dans un micro « classique » : l'aimant se déplace au cours du temps devant la bobine.

5. Caractéristiques d'un microphone

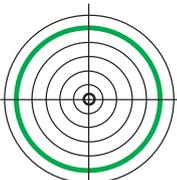
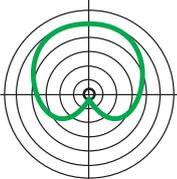
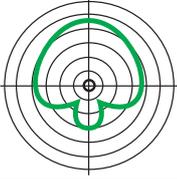
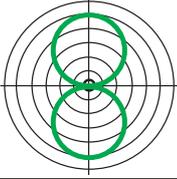
Unité : Pa = pascal

- ▶ la **sensibilité** σ : c'est une indication liant la tension de sortie et la surpression acoustique p_a (ou variation de pression acoustique). Elle s'exprime en $\mu\text{V}/\text{Pa}$ ou en $\mu\text{V}/\mu\text{bar}$ ($1\mu\text{V}/\mu\text{bar} = 10\mu\text{V}/\text{Pa}$).

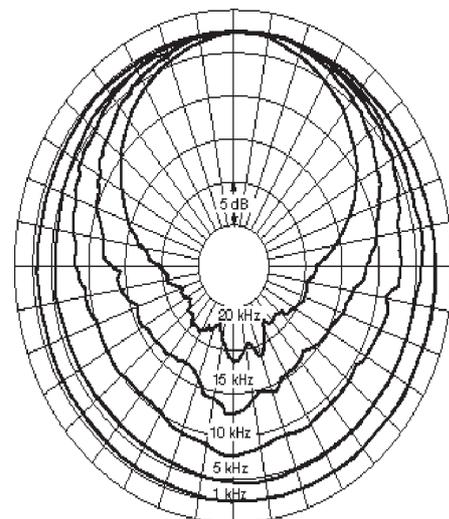
Par exemple, un microphone de sensibilité $5\mu\text{V}/\text{Pa}$ engendre une tension de sortie d'amplitude $1\mu\text{V}$ pour une surpression acoustique d'amplitude $0,2\text{ Pa}$.

- ▶ la **directivité** : il existe plusieurs types de directivités. Les microphones sont conçus afin de présenter une réponse directionnelle spécifique qu'on appelle diagramme polaire. Celui-ci représente l'amplitude de la sortie du microphone pour différents angles d'incidence de l'onde sonore. La distance d'un point du diagramme au centre (considéré comme la position de la membrane du microphone) est habituellement exprimée en décibels, avec 0 dB représentant la réponse du microphone pour un angle 0° à 1 kHz . Plus un point du diagramme polaire est éloigné du centre du graphe et plus le niveau de sortie correspondant est élevé pour cet angle. Par exemple, le microphone omnidirectionnel réagit de la même façon quelle que soit la direction de provenance des sons.

Exemple de diagrammes polaires

Omnidirectionnelle	
Cardioïde	
Hypercardioïde	
En 8	

On constatera donc en général un renflement à largeur décroissante au fur et à mesure que la fréquence augmente.



Source : site Le chant du signe
<http://xaviercollet.com/>

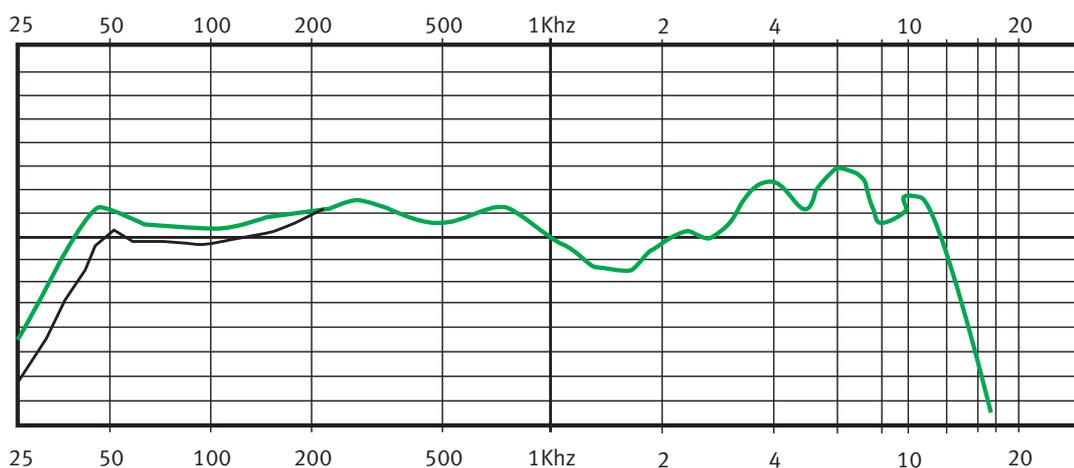
Omnidirectionnel : ce type de microphone est sensible aux sons provenant de toutes les directions de l'espace sonore. Il est destiné aux prises de son d'ambiance donnant une bonne reproduction naturelle et fidèle de l'espace acoustique. Cela est dû à sa réponse en fréquence linéaire quel que soit l'angle de captation. Ce type de microphone entraîne souvent des effets larsens sur scène.

Cardioïde : ce microphone capte surtout vers l'avant, moins sur les côtés, et atténue fortement les sons venant de l'arrière. C'est le microphone le plus souvent rencontré en sonorisation car il permet d'isoler une source sonore de l'espace sonore environnant. Il est très adapté à la scène car il diminue le risque d'accrochage aux larsens lorsqu'on l'oriente dans le sens opposé aux retours de scène.

Supercardioïde : ce microphone capte surtout vers l'avant, moins sur les côtés que le microphone cardioïde, et atténue les sons venant de l'arrière mais forme un lobe arrière. C'est un microphone souvent rencontré en sonorisation pour son caractère plus isolant que le cardioïde. Il est très adapté à la scène car il diminue le risque d'accrochage aux larsens lorsqu'on l'oriente à 120° par rapport aux retours de scène.

Bidirectionnel : ce microphone capte surtout les sons venant de l'avant et de l'arrière, qui sont fortement atténués par la capsule, moins sur les côtés. Il est souvent utilisé pour la prise de son d'un duo musical.

- **La courbe de réponse (ou bande passante)** : elle indique les variations de la sensibilité du capteur en fonction de la fréquence (bande passante). En mesure courante, elle s'effectue en champ libre ou en chambre sourde dite « anéchoïque » avec une incidence de 0 degré par rapport au capteur. Cette source correspond à un niveau de référence identique pour toutes les fréquences. La source est située à une distance de référence du capteur (le plus souvent = 1m). Ces mesures peuvent être complétées par des mesures à 90 et 180 degrés pour les micros omnidirectionnels.



Des enregistrements hi-fi nécessitent des microphones à large bande passante (30 Hz-15 000 Hz).

- **Le bruit de fond (en dB(A))** : même en l'absence de son, un microphone engendre une tension. Le niveau de bruit de fond est une donnée exprimée en dB(A) qui sert à mesurer le bruit de fond induit électroniquement par les

composants du microphone. Pour en rendre compte, on indique le niveau d'intensité acoustique qu'il faudrait pour générer un voltage de tension similaire à celui (indésirable) généré par le microphone. Des valeurs inférieures à 15 dB(A) sont caractéristiques d'un microphone particulièrement silencieux.

- ▶ **La plage dynamique** : elle désigne l'amplitude des intensités sonores qu'un microphone peut reproduire, c'est-à-dire celle qui existe entre le son le plus bas (le bruit de fond du microphone) et le plus fort.

Exemples

- ▶ Microphone-diaphragme de 16 mm – Bruit de fond = 15 dB(A) et plage dynamique : 120 dB.
- ▶ Microphone-diaphragme de 24 mm – Bruit de fond = 7 dB(A) et plage dynamique : 119 dB.

La plage dynamique est supérieure pour les microphones à petites membranes.

6. Avantages et inconvénients du microphone électrodynamique

Les avantages

Les micros dynamiques ont de nombreux avantages par rapport à d'autres types de micros :

- Ils sont relativement peu chers à fabriquer et très robustes, ce qui veut dire qu'on les utilise aussi bien sur scène, en studio ou en reportage.
- Ils sont également à même de tolérer des niveaux de pression acoustique extrêmement élevés.
- Ils n'ont pas besoin d'alimentation, le micro lui-même ne contenant aucun circuit électronique.

Les inconvénients

- Faible sensibilité aux hautes fréquences. Le mouvement du diaphragme est, jusqu'à un certain point, freiné par la masse de la bobine qui lui est attachée. Plus le diaphragme essaie de se mouvoir rapidement, plus l'inertie de la bobine le contrarie, entraînant ainsi une perte de sensibilité aux hautes fréquences. En pratique, un micro dynamique conventionnel est conçu pour fonctionner efficacement jusqu'à 16 kHz, fréquence au-delà de laquelle sa sensibilité aura tendance à chuter de manière significative.
- Le signal électrique délivré en sortie est faible, ce qui nécessite une amplification importante.

Si les sons que l'on doit capter sont modérément forts et proches du micro, cela ne constitue pas un problème, mais des sons faibles et/ou distants exigeront souvent une amplification telle que le résultat deviendra trop bruyant. C'est pour cette raison que le micro dynamique est rarement employé pour enregistrer des instruments comme la guitare acoustique, par exemple, car il est difficile de positionner le micro suffisamment près de l'instrument pour capter un niveau de son raisonnable sans compromettre le rendu de son timbre global.

Activité 28 Microphone

Un microphone porte les indications suivantes :

- ▶ Modèle électrodynamique.
- ▶ Réponse en fréquences : 200 Hz à 8 000 Hz.
- ▶ Sensibilité : $s = 140 \text{ mV/Pa}$.



- 1 Nommer les parties essentielles de ce microphone.
- 2 Quel est le phénomène mis en œuvre pour son fonctionnement ?
- 3 Que signifie l'indication « réponse en fréquences : 200 Hz à 8 000 Hz ».
- 4 Les bornes du microphone sont reliés aux entrées d'un oscilloscope. Le microphone est placé devant un haut-parleur émettant un son. L'oscillogramme obtenu est représenté ci-dessus.
 - A. Déterminer la fréquence des vibrations sonores captées par le microphone.
 - B. Calculer l'amplitude de la surpression (variation de pression) détectée par ce microphone.

Données Sensibilité verticale : 2 mV/div ; balayage : 100 $\mu\text{s/div}$.

2. Les émetteurs sonores

a) La voix ou le mécanisme phonatoire

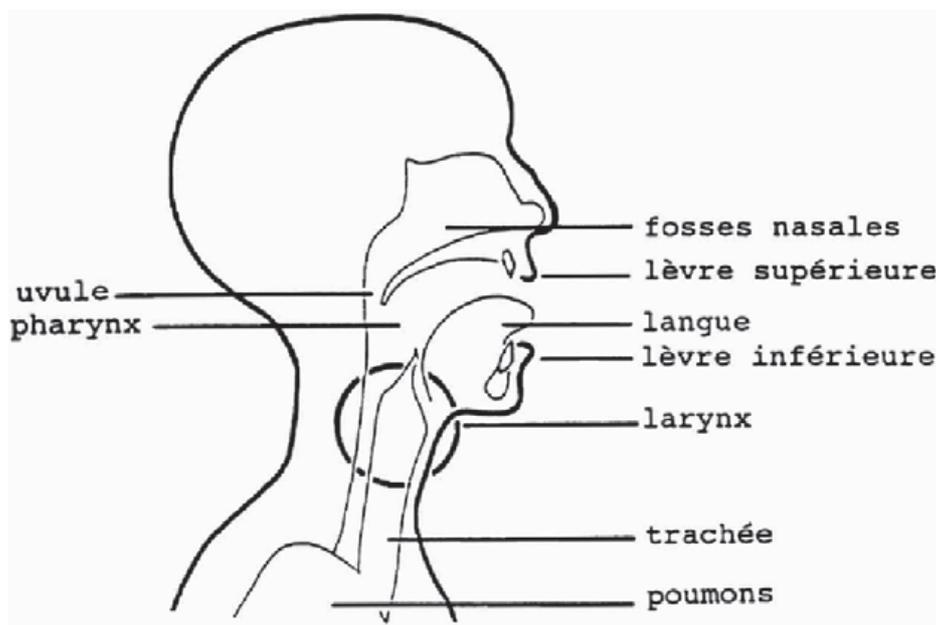
1. Les organes de la phonation

Le mécanisme phonatoire se compose *grosso modo* de trois parties :

- ▶ l'appareil respiratoire ;
- ▶ les cordes vocales ;
- ▶ la cavité bucco-pharyngale.

L'appareil respiratoire fonctionne comme un soufflet en fournissant l'énergie de départ sous forme d'un souffle d'air. Les cordes vocales agissent comme un

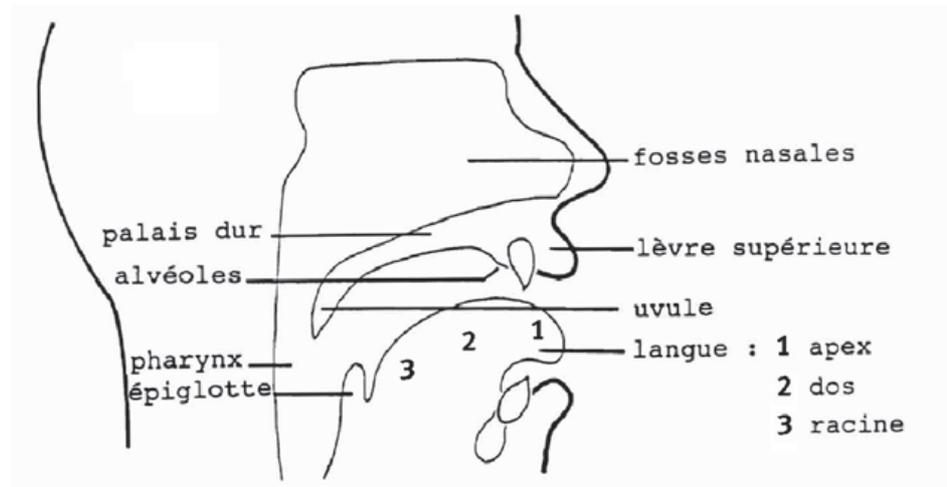
générateur de sons (excitateur). Pour la production des consonnes, la langue, les lèvres et les dents interviennent aussi et transforment ce souffle d'air en énergie sonore. Enfin, la cavité bucco-pharyngale, constituée du pharynx et de la bouche, a comme fonction d'amplifier cette énergie sonore (résonateur).



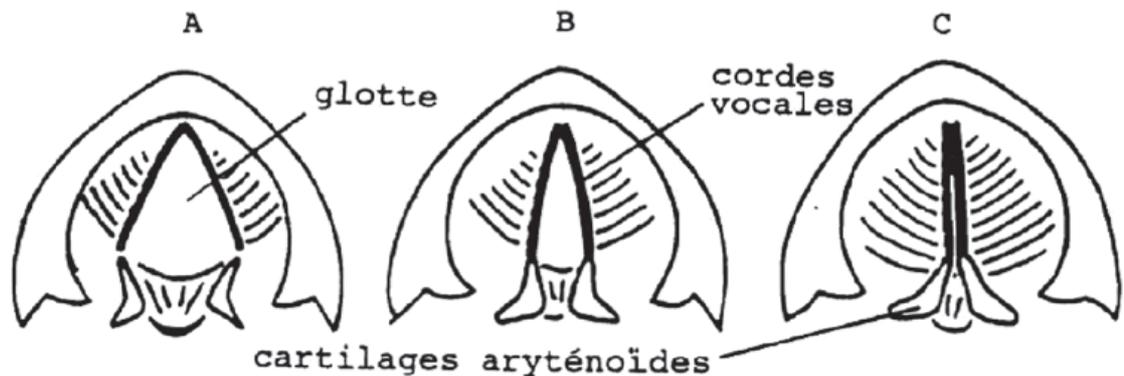
Vue de l'appareil phonatoire : l'air chassé par les poumons arrive par la trachée, traverse le larynx (partie entourée d'un cercle), puis le pharynx, et sort par la bouche ou par le nez si l'uvule (ou voile du palais) est abaissée.

Le mécanisme phonatoire est comparable aux instruments de musique. Tout instrument comporte, en effet, l'équivalent de ces trois composantes : un fournisseur primaire d'énergie, l'archet ou la baguette, par exemple, qui transmet à la corde du violon ou à la membrane du tambour une certaine énergie ; un générateur d'énergie sonore, que constituent la corde ou la peau qui vibreront sous l'action de l'archet ou des battements de la baguette ; enfin, un résonateur pour amplifier le son, c'est-à-dire la caisse du violon ou du tambour.

Dans la phonation, tout débute par l'action des poumons. Ceux-ci libèrent, à un rythme qui est sous le contrôle volontaire du locuteur, un souffle d'air, lequel passe par la trachée et traverse le larynx. Le larynx transforme alors le souffle en son glottique (ou laryngé). C'est, en effet, à l'intérieur du larynx, organe constitué de cartilages réunis entre eux par des ligaments et des muscles, que logent les cordes vocales. Celles-ci sont en fait des fibres musculaires contrôlées par des muscles qui ont comme fonction de les tendre, de les dilater, de les rétrécir ou encore de les allonger. Selon le type d'action des muscles et des cartilages sur les cordes vocales, l'espace entre elles peut être plus ou moins large, ou complètement fermé. C'est dans cet espace que passent les souffles d'air produits par l'expiration. On appelle glotte cette zone entre les cordes vocales. Lorsque la glotte est largement ouverte, elle permet la respiration et aucun son n'est engendré ; lorsqu'elle n'est que faiblement ouverte, elle produit le chuchotement ; et quand elle est complètement fermée, il y a phonation.



Vue de la cavité bucco-pharyngale : la cavité bucco-pharyngale fonctionne comme un résonateur. Chaque articulateur (langue, lèvres et uvule) modifie par son mouvement la forme de cette cavité, transformant ainsi le son glottique ou le souffle d'air en sons vocaliques ou consonantiques variés.

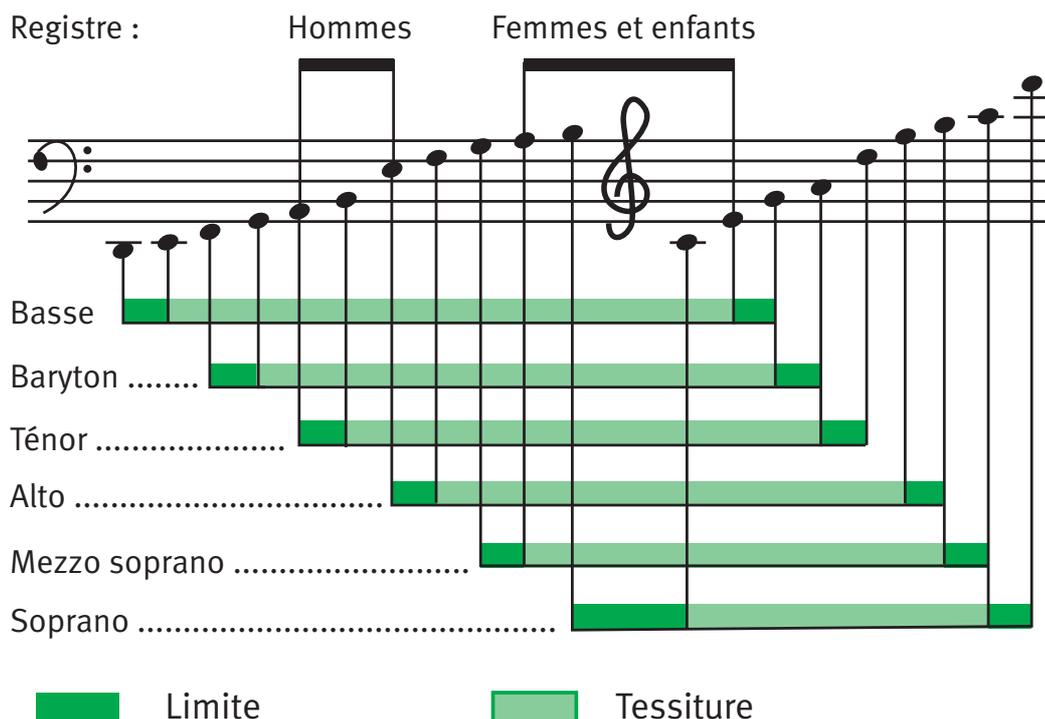


Coupe latérale du larynx, représentant trois positions différentes des cordes vocales : a) Glotte ouverte pour la respiration ; b) Glotte entrouverte pour la voix chuchotée ; c) Glotte fermée par l'accolement des cordes vocales pour la phonation.

Lorsque la glotte est fermée, l'accolement des cordes vocales constitue un obstacle à l'écoulement normal du souffle d'air venu des poumons, ce qui a pour conséquence de créer une pression sous la glotte (fermée). Lorsque cette pression, dite sous-glottique, atteint une force suffisamment grande, les cordes vocales cèdent et laissent passer la bouffée d'air. Après le passage de cet air, les cordes vocales reprennent rapidement leur position d'origine sous l'action de leur masse, de leur tension et de leur élasticité. Ce cycle de pression-relâchement recommence aussitôt que la pression sous-glottique s'est reconstituée. L'alternance des ouvertures et fermetures des cordes vocales est tellement rapide que l'on dit que les cordes vocales vibrent ! Ce que l'on appelle la fréquence du son, c'est le nombre de mouvements d'ouverture-fermeture de la glotte. Si, par exemple, les cordes vocales s'ouvrent et se referment 440 fois par seconde, la fréquence du son généré est de 440 Hz. La hauteur du son correspond alors au la₃.

2. Le registre parlé

Le registre parlé couvre près d'une quinte (5 tons) et diffère d'une octave chez les hommes, les femmes et les enfants. Les fréquences propres des zones de résonance se situent au-dessus de 1200 Hz. Elles seules sont entendues dans la voix chuchotée alors que, dans la parole ou dans le chant, la fréquence propre du larynx et celles des autres résonateurs se conjuguent. La cavité buccale est la plus importante des zones de résonance car chaque individu peut contrôler son ouverture et la position de la langue, notamment pour le timbre des voyelles.



3. La qualité de la voix

Le timbre de la voix dépend du nombre d'harmoniques :

- ▶ Moins de 9 : la voix est sourde.
- ▶ Plus de 14 : elle est stridente.

Les voix sont classées en différentes tessitures qui peuvent se chevaucher :

- ▶ Basse (du mi¹ au fa³)
- ▶ Ténor (du do² au do⁴)
- ▶ Alto (du fa² au sol⁴)
- ▶ Soprano (du do³ au do⁵).

Les fréquences de la voie humaine se situent entre 200 Hz et 8 000 Hz.

b) Les enceintes acoustiques

1. Les principaux éléments d'une enceinte acoustique

Une enceinte acoustique comprend :

- ▶ **un ou plusieurs haut-parleurs** afin de couvrir au mieux toute la plage des **fréquences audibles** entre 16 Hz et 20000 Hz ;
- ▶ **un filtre passif** qui dirige vers chaque haut-parleur la plage de fréquence pour laquelle il a été construit : graves, médiums, aigus ;
- ▶ **une ébénisterie** (caisse) qui reçoit le ou les haut-parleurs et **le filtre**. C'est la pièce la plus difficile à réaliser. En effet, elle ne doit pas introduire de **distorsions de la musique**, pour toute la **plage de fréquence**, ni coloration particulière ; elle doit être suffisamment amortie pour ne pas vibrer.

Ce sont ces trois éléments qui font partie des grands points à aborder lors de la fabrication d'une paire d'enceintes acoustiques haute-fidélité.

Par la suite, on s'intéressera plus particulièrement aux haut-parleurs.

2. Le haut-parleur : un transducteur électroacoustique

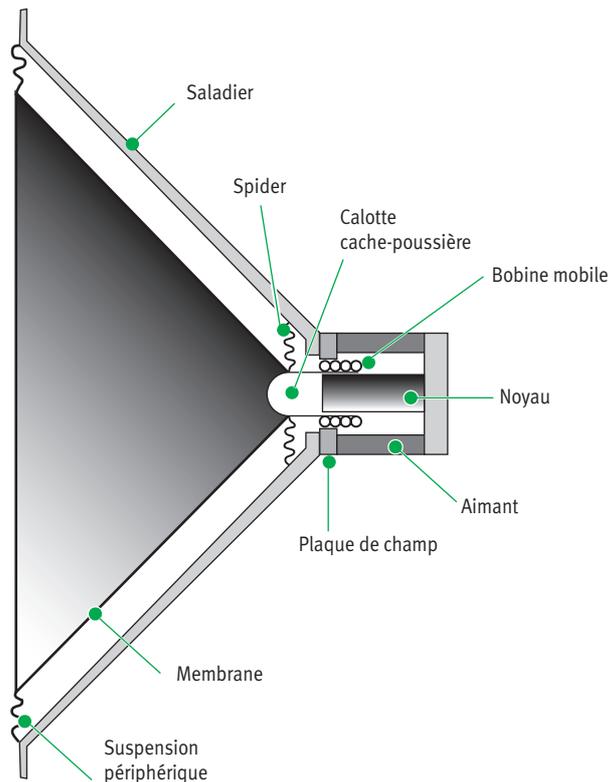
Le haut-parleur électrodynamique est un double transformateur d'énergie. Il reçoit l'énergie électrique, sous la forme de puissance modulée fournie par l'amplificateur audio. Il la transforme, tout d'abord, en énergie mécanique ; c'est le rôle de la bobine mobile se déplaçant dans l'entrefer d'un aimant permanent. Cette énergie mécanique est transformée, à son tour, en énergie acoustique par l'action de la membrane reliée à la bobine mobile.



3. Description d'un haut-parleur électrodynamique

Un haut-parleur électrodynamique se compose :

- ▶ d'**une culasse** formant le circuit magnétique, comprenant un aimant permanent annulaire généralement en ferrite de baryum ;
- ▶ d'**une bobine** mobile placée dans l'entrefer de la culasse ; elle est légère, rigide et indéformable. Son enroulement est relié à la sortie d'un amplificateur ;
- ▶ d'**une membrane** solidaire de la bobine mobile en son centre et fixée, sur sa périphérie, au saladier ou châssis du haut-parleur, d'une façon très souple. Pour rayonner de l'énergie acoustique dans l'air, la membrane doit déplacer les molécules gazeuses voisines qui opposent une résistance au mouvement ; c'est la charge acoustique du haut-parleur ;
- ▶ d'**un saladier** ou **châssis** du haut-parleur et support de la membrane. Il doit être rigide, ne pas vibrer et usiné avec précision ;



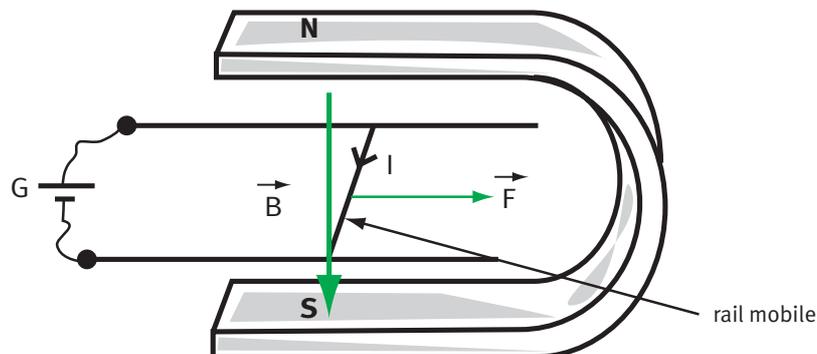
- d'un **spider** extérieur qui maintient la bobine mobile au centre de l'entrefer. Il permet les déplacements d'avant en arrière sans les freiner et interdit les mouvements latéraux. Il est en tissu pressé imprégné avec des ondulations concentriques.

4. Principe de fonctionnement

Expérience des rails de Laplace

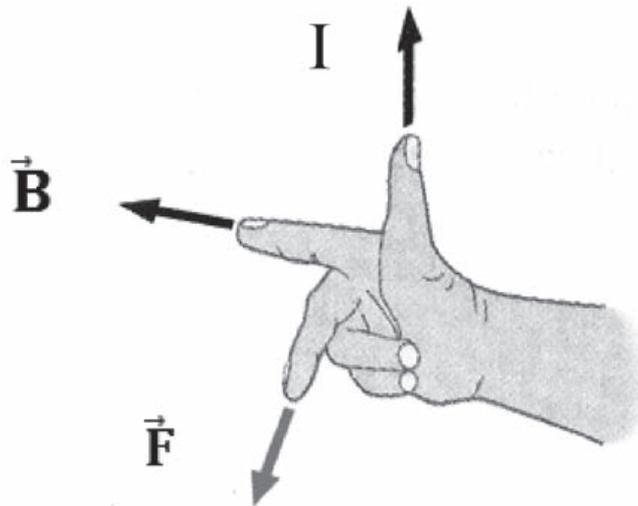
L'expérience du rail de Laplace est constituée de deux rails parallèles fixes alimentés par des conducteurs et une source continue. Le circuit est fermé par un rail mobile conducteur susceptible de rouler sur les deux rails parallèles. Le rail mobile est placé entre les branches d'un aimant en U, source d'un champ magnétique uniforme représenté par le vecteur \vec{B} .

Lorsque le circuit est alimenté, le rail mobile se déplace sous l'action d'une force appelée **force de Laplace** et notée \vec{F} .



La direction de cette force s'inverse si on inverse la polarité de l'aimant, donc le champ magnétique. De même, si les polarités de l'alimentation sont inversées, donc le sens du courant électrique dans le rail mobile, le sens de la force de Laplace est inversé. Par contre, le rail ne subit aucune force si le champ magnétique est placé dans la direction du courant ou dans celle des rails fixes.

La direction et le sens de la force de Laplace sont donnés par la règle des 3 doigts :



Une portion de circuit électrique parcourue par un courant et placée au voisinage d'un aimant convenablement orienté est soumise à une force électromagnétique appelée force de Laplace. **Le sens de la force électromagnétique s'inverse en même temps que le sens du courant et est donné par la règle des 3 doigts.**

La valeur F de la force de Laplace est proportionnelle à l'intensité I du courant :

$$F = k \times I$$

F en newtons (N)

I en ampères (A)

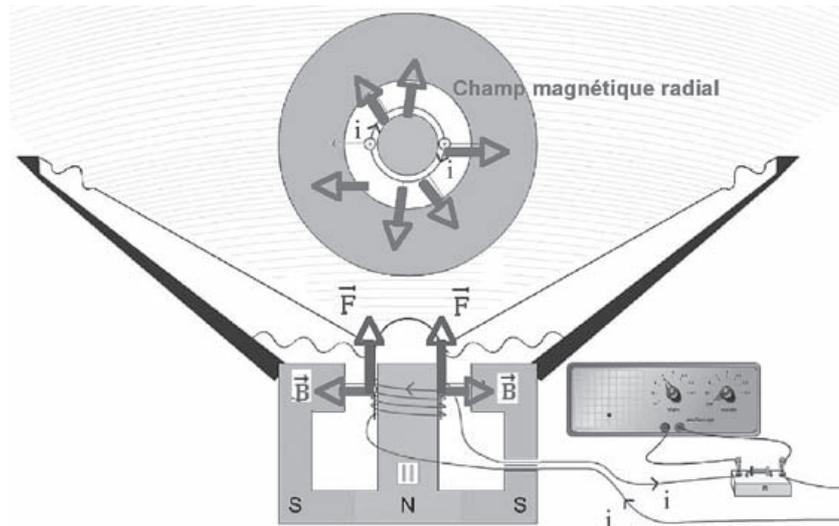
k : coefficient de proportionnalité dépendant de la bobine, de l'aimant et de la géométrie du dispositif en newtons par ampère (en N/A).

Remarque Cette loi de proportionnalité reste valable si l'intensité du courant est variable comme dans la bobine d'un haut-parleur où l'intensité est notée i .

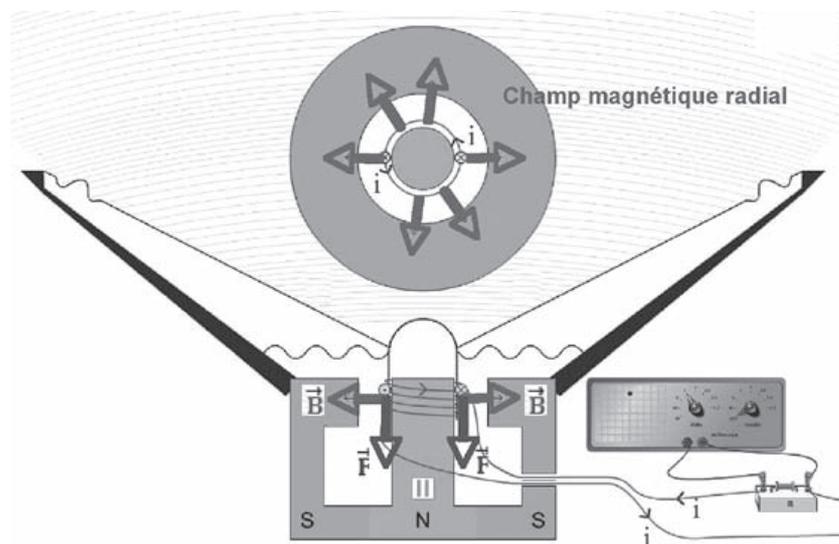
Origine du mouvement de la membrane d'un haut-parleur

Dans un haut-parleur, la bobine parcourue par un courant est soumise à une force électromagnétique appelée force de Laplace due à l'aimant. Cette force est à l'origine du mouvement de la bobine communiqué à la membrane qui fait vibrer l'air.

Mouvement de la membrane vers le haut



Mouvement de la membrane vers le bas



Source : site Physique chimie au lycée et au collège

Simulation: <http://gwenaelm.free.fr/2008-9/articles.php?lng=fr&pg=1363>

Le sens de déplacement de la membrane dépend du sens du courant dans la bobine. Lorsque le haut-parleur est alimenté par un courant alternatif, le sens du courant, donc le sens du déplacement de la membrane, s'inverse à chaque alternance, et la membrane vibre.

Activité 29 Le haut-parleur

Une bobine de haut-parleur subit une force électromagnétique de valeur $F = 1,35 \text{ N}$ quand elle est parcourue par un courant continu d'intensité $I = 0,25 \text{ A}$.

On fait maintenant circuler un courant sinusoïdal de période $T = 2,5 \text{ ms}$ et d'amplitude $I_m = 0,50 \text{ A}$.

- 1 Comment varie, en fonction du temps, la force F ?
- 2 Quelle est la valeur maximale de cette force F ?

5. Principales caractéristiques d'un haut-parleur

Les enceintes acoustiques comportent plusieurs haut-parleurs qui constituent les éléments déterminants des chaînes haute-fidélité ; la qualité de la réception sonore en dépend fortement.

- **Puissance nominale** : la puissance nominale d'un haut-parleur est la valeur maximale de la puissance électrique moyenne qu'il peut recevoir d'un amplificateur. Elle est notée P_e et s'exprime en watts (W).
- **Puissance acoustique** : en vibrant, la membrane du haut-parleur met en mouvement l'air environnant et lui communique une puissance vibratoire appelée puissance acoustique. Elle est notée P_a et s'exprime en watts (W).
- **Rendement** : le rapport η de la puissance acoustique P_a à la puissance électrique nominale P_e désigne le rendement du haut-parleur :

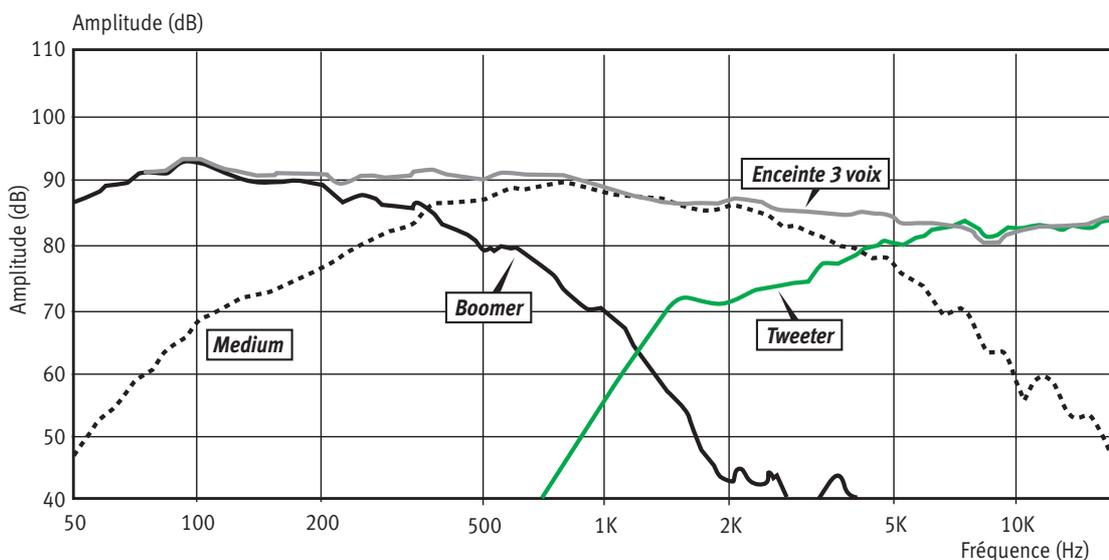
$$\eta = \frac{P_a}{P_e} .$$

Remarque Le rendement global des enceintes acoustiques n'est pas élevé : il est de l'ordre de 5 % pour les meilleures et jusqu'à 0,5 % pour les moins bonnes. Une partie importante de la puissance est dissipée en chaleur dans les haut-parleurs et dans le filtre.

Courbes de réponse en fréquences (bande passante)

La bande passante d'un seul haut-parleur ne couvrant pas celle de l'oreille, il est courant d'utiliser des enceintes à trois voies qui comportent trois haut-parleurs :

- Un **tweeter** : il s'agit d'un haut-parleur de petite dimension (5 cm de diamètre) reproduisant les aigus, pour des fréquences de quelques kHz à 20 kHz.
- Un **médium** : il s'agit d'un haut-parleur de dimension moyenne (de 5 à 12 cm de diamètre) reproduisant les médiums, pour des fréquences de 500 Hz à quelques kHz.
- Un **boomer** : il s'agit d'un haut-parleur de grande dimension (de 15 à 30 cm de diamètre) reproduisant les graves, pour des fréquences de 40 Hz à 1 kHz.



Activité 30 Courbe de réponse en fréquence

Pour déterminer la bande passante d'un haut-parleur, on utilise un GBF délivrant une tension sinusoïdale d'amplitude constante dans le domaine de fréquences [500 Hz ; 10 000 Hz] et un sonomètre gradué en décibel.

Le sonomètre étant placé 50 cm devant le haut-parleur, les résultats suivants ont été obtenus :

f (Hz)	500	1 000	1 500	2 000	2 500	3 000
L (dB)	42	50	60	70	72	75

f (Hz)	3 500	4 000	4 500	5 000	5 500	6 000
L (dB)	75	75	72	70	62	48

① Représenter graphiquement L(dB) en fonction de la fréquence f (Hz).

Échelle : abscisse : 1 cm → 500 Hz et ordonnée 1 cm → 10 dB.

② Déterminer la bande passante pour un niveau d'intensité acoustique supérieur à 70 dB.

Activité 31 Rendement d'un haut-parleur

Calculer le rendement η du haut-parleur dont les caractéristiques sont données sur la fiche des caractéristiques.

Caractéristiques du haut-parleur :

- ▶ Diamètre de la bobine (mm) : 26
- ▶ Nature du fil de la bobine : cuivre
- ▶ Nature de la membrane : fibre de verre
- ▶ Nature de la suspension : caoutchouc
- ▶ Impédance nominale (Ω) : 8
- ▶ Puissance nominale (W) : 50
- ▶ Puissance acoustique (W) : 10
- ▶ Bande passante 4 dB : 45 Hz-5 kHz



Pour conclure

1. Conclusion du chapitre

Le microphone et l'oreille humaine sont deux récepteurs d'ondes sonores. Que ce soit le diaphragme du microphone ou le tympan de l'oreille, les deux éléments sont mis en vibration par une onde acoustique afin de transformer une énergie acoustique en énergie électrique.

On appelle intensité acoustique (ou intensité sonore), notée I , la puissance acoustique reçue par unité de surface de récepteur. Elle se mesure en watts par mètre carré (symbole : W/m^2).

$$I = \frac{P}{S}$$

I : intensité acoustique (W/m^2)

P : puissance acoustique (W)

S : surface traversée (m^2)

Le niveau d'intensité acoustique L (*Level* = « niveau » en anglais) est mesuré en décibels (symbole dB) avec un sonomètre et est défini par la relation suivante :

$$L = 10 \log \frac{I}{I_0}$$

$I_0 = 10^{-12} W/m^2$ (seuil d'audibilité)

Le mécanisme phonatoire de l'homme et le haut-parleur sont deux émetteurs d'ondes. Que ce soit les cordes vocales ou la membrane du haut-parleur, les deux éléments peuvent être mis en vibration pour émettre une onde acoustique en transformant une énergie mécanique en énergie acoustique.

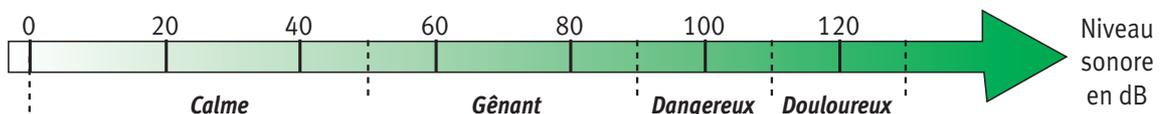
2. Exercices d'apprentissage

Exercice 14 Haut-parleur

L'espace intérieur d'une verrière a été sonorisé.

La puissance acoustique d'un haut-parleur installé est de 4 W. La commission de sécurité effectue les tests à 10 m de la source.

- 1 Calculer l'intensité acoustique à 10 m d'un haut-parleur.
- 2 Sachant que l'intensité acoustique est de $3,2 \times 10^{-3} W/m^2$. Calculer le niveau sonore du son émis à 10 m.
- 3 Parmi les propositions suivantes, choisir et recopier la conclusion de la commission de sécurité :
 - ▶ Le niveau sonore est élevé mais acceptable.
 - ▶ Le niveau sonore est reposant.
 - ▶ Le niveau sonore est dangereux.



Exercice 15 Machine à bois

Une machine à bois produit un niveau d'intensité acoustique de $L = 85$ dB à une distance $r = 1$ m.

- 1 Calculer l'intensité acoustique I correspondante.
- 2 Calculer la puissance acoustique P de cette source.

- 3 En fait, l'utilisateur se trouve à $r' = 0,50$ m de la source sonore. Quel est le niveau d'intensité acoustique L' auquel il est soumis ?
- 4 Dans ces conditions, le port d'un casque antibruit est-il inutile, conseillé ou obligatoire ?
- 5 Si deux machines identiques à la précédente fonctionnent simultanément, quel sera le niveau d'intensité acoustique produit à l'endroit où il valait 85 dB pendant le fonctionnement d'une seule machine ?

Réglementation L'employeur doit mettre à disposition des casques dès que le niveau d'intensité acoustique dépasse 85 dB. Le port du casque devient obligatoire si L dépasse 90 dB.

Exercice 16 Niveau d'intensité acoustique

Partie A

- 1 Une source S émet un son dont la longueur d'onde dans l'air à 20 °C est λ . La célérité du son dans l'air à cette température étant v_0 , exprimer littéralement la fréquence f du son et calculer sa valeur.

$$\lambda = 77,27 \text{ cm et } v_0 = 340 \text{ m/s}$$

- 2 Quelle est la fréquence f du son situé une octave au-dessus du précédent ?
- 3 La puissance de la source S est de $6,00 \cdot 10^{-3}$ W. Calculer, en décibels, le niveau d'intensité acoustique L_1 en un point M situé à $4,9$ m de S . On suppose que la source est ponctuelle, que l'espace est libre et isotrope, et que la propagation s'effectue sans dissipation d'énergie.
- 4 On s'éloigne de la source suivant la direction SM et, à une distance x de M , on enregistre une diminution du niveau d'intensité acoustique de $3,0$ dB. Calculer la valeur de x .

Partie B

Dans un atelier, l'analyse du bruit d'une machine au sonomètre a donné les résultats suivants :

f (en Hz)	125	250	500	1 000	2 000	4 000
L_1 (en dB)	65	70	75	68	57	53

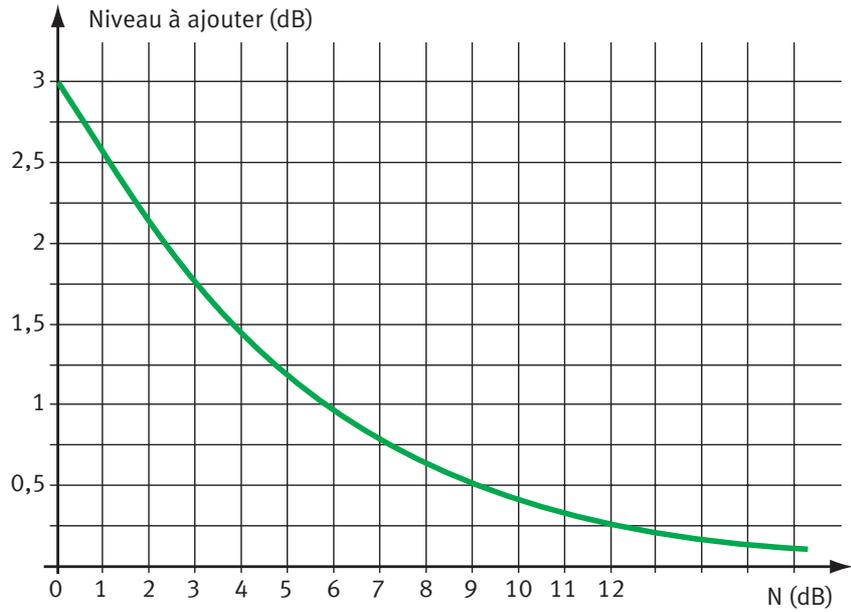
En appelant L_{11} , L_{12} , L_{13} , L_{14} , L_{15} , L_{16} , les différentes valeurs du niveau d'intensité acoustique dans chacune des bandes de fréquences précédentes, donner l'expression littérale du niveau d'intensité sonore global L_1 de ce bruit, puis calculer numériquement L_1 .

Donnée $I_0 = 10^{-12} \text{ W/m}^2$

Exercice 17 Utilisation raisonnée d'un abaque

On peut calculer rapidement le niveau sonore résultant de deux sources sans passer par le calcul des intensités. Un abaque permet ce calcul rapide.

Un local est soumis à trois bruits dont les niveaux sonores sont 65 dB, 70 dB et 60 dB.



- ❶ Calculer, à l'aide de l'abaque, le niveau sonore résultant des deux premiers bruits puis le niveau sonore total.
- ❷ Le résultat aurait-il été le même en combinant les deux derniers niveaux d'abord ?
- ❸ Quel est le niveau sonore résultant de deux sources sonores de même niveau ? de trois sources sonores de même niveau ?

Exercice 18 Courbes d'égalie sonie

La sonie définit l'intensité de la sensation sonore (niveau d'intensité physiologique).



Il ne faut pas confondre l'intensité de la sensation avec le niveau d'intensité sonore (niveau d'intensité physique). Le second a une définition objective, la première repose sur des « sensations » et est donc subjective.

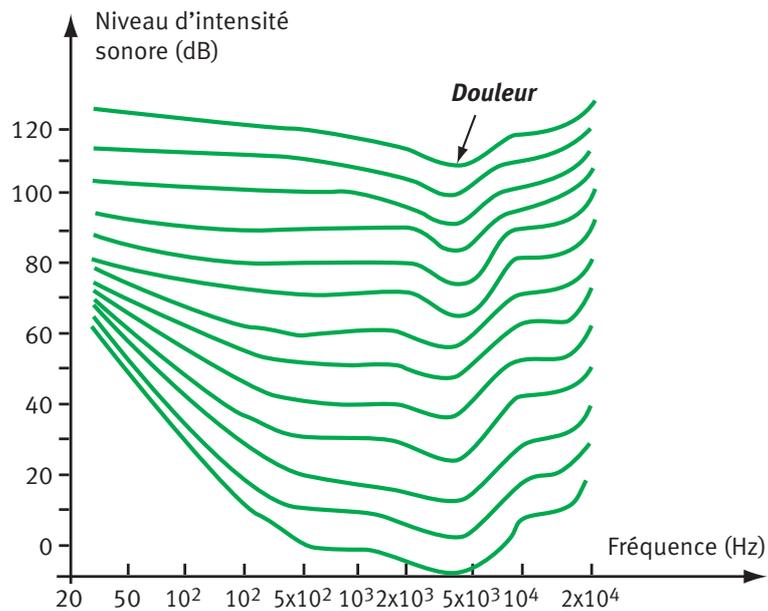


fig. : Courbes d'égalie sonie

On sélectionne une personne à l'ouïe fine et on lui fait entendre des sons de 20 Hz à 20 000 Hz au seuil d'audibilité (on obtient la courbe indiquée par une flèche).

- 1 À partir de quel niveau d'intensité acoustique un son de 50 Hz sera-t-il perçu par cette personne ? Répondre à la même question pour 200 Hz, 1 000 Hz et 10 000 Hz.
- 2 Quelles sont les fréquences des sons de niveau d'intensité sonore 40 dB qui ont même sonie que le son de 1000 Hz à 40 dB ?
- 3 Quel est le niveau d'intensité sonore d'un son de 100 Hz qui a la même sonie que le son de 1 000 Hz à 40 dB ?
- 4 En prenant pour référence le son de 1000 Hz à 110 dB, comment évolue la sonie des sons à ce niveau d'intensité sonore lorsque la fréquence varie de 20 Hz à 2 000 Hz ? de 2 000 Hz à 5 000 Hz, au-delà de 5 000 Hz ?

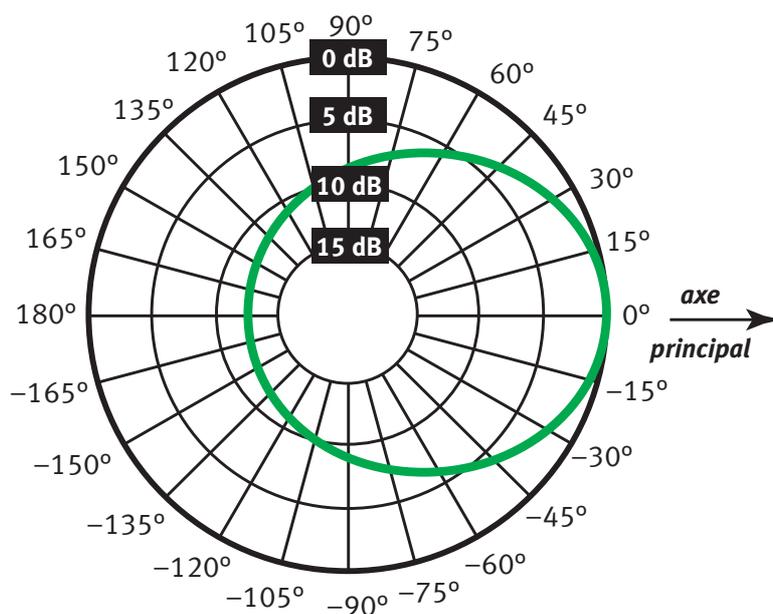
Exercice 19 Haut-parleur électrodynamique

On considère un haut-parleur émettant une onde sonore qui se propage librement : les ondes sont sphériques. Le niveau d'intensité acoustique mesuré à 1 m du haut-parleur, sur l'axe principal, est $L_1 = 110$ dB.

On rappelle que le zéro de l'échelle dB correspond à une intensité acoustique de 10^{-12} W/m².

Le diagramme d'émission du haut-parleur est donné ci-après ; on suppose qu'il est utilisable pour toutes les fréquences audibles.

- 1 Quel est le niveau acoustique L_{50} mesuré à 50 m du haut-parleur sur son axe principal ?
- 2 Quel est le niveau acoustique mesuré à 50 m du haut-parleur dans une direction faisant un angle de 60° avec l'axe principal ?
- 3 À quelle intensité acoustique ce niveau correspond-il ?



5

Sons et architecture

Objectifs d'apprentissage

- ▶ Connaître le phénomène de réverbération et les traitements acoustiques passifs permettant d'ajuster les durées de réverbération.
- ▶ Être capable de calculer la durée de réverbération d'une salle.
- ▶ Savoir ce qu'est l'acoustique active.
- ▶ Connaître l'intérêt d'une salle sourde.

A

Pour débiter le chapitre

Activité 32

Historique de l'acoustique architecturale

Dès l'Antiquité, on a cherché une bonne audition de la musique ou de la parole. Si les théâtres en bois, cloisonnés, offraient aux dires de Vitruve (architecte romain du 1^{er} siècle av. J.-C) une résonance valable, ceux en pierres restaient insuffisants, en particulier pour les sons graves ; aussi avait-on imaginé, en Grèce, de placer des résonateurs accordés, en bronze ou en poterie, dans des logettes aménagées sous les gradins.

Au Moyen Âge, les églises ont connu des essais du même genre, des pots ou vases acoustiques et des lambris, des surfaces disposées pour mieux assurer la diffusion des sons.

Quand les théâtres et les salles de concerts se sont multipliés, les structures en bois et l'emploi localisé de matières absorbantes ou réfléchissantes ont fourni de bons résultats.

Après la Première Guerre mondiale, l'emploi de matériaux nouveaux et surtout la sonorisation des salles ont provoqué une étude plus systématique, rendue désormais plus possible par des appareils de mesure. On peut ainsi déterminer sur maquette les formes, les dimensions et l'équipement le plus favorable, et calculer la durée de résonance en fonction de l'emplacement des sources sonores.

Grand Larousse Universel, Vol. 1, page 85.

- 1 Qu'appelle-t-on l'acoustique architecturale passive lors du traitement acoustique des salles ?
- 2 Quel est le rôle des pots ou vases acoustiques utilisés déjà à l'époque de Vitruve ?
- 3 À quoi correspond la « durée de résonance » ?
- 4 Le terme de résonance est-il vraiment approprié ? Quel autre terme aurait-on pu employer ?

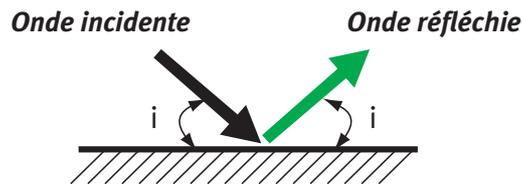
B

Pour apprendre

1. L'écho ou la réverbération

1.1. Réflexion sur un obstacle d'une onde sonore

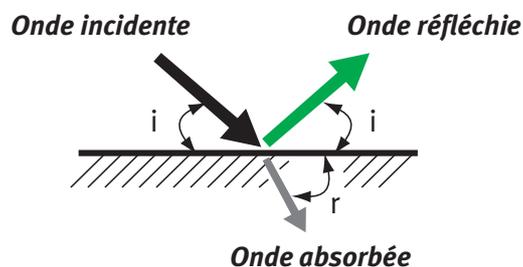
La réflexion, c'est un des comportements d'une onde sonore qui rencontre un obstacle. Lorsque l'onde arrive sur l'obstacle, elle fait avec lui un angle i , appelé **angle incident**. L'onde « rebondit » sur l'obstacle, on dit qu'elle est **réfléchie**. Elle repart avec un angle réfléchi de même valeur i que l'angle incident.



1.2. Absorption par un obstacle d'une onde sonore

1.2.1. Présentation du phénomène

Les ondes sonores ne sont pas toujours totalement réfléchies par les obstacles. En fonction de la fréquence de l'onde incidente et des caractéristiques des matériaux, les obstacles absorbent une quantité plus ou moins importante d'énergie. Une partie de l'onde incidente est absorbée, on l'appelle **onde absorbée**, alors que la partie restante est réfléchie par la paroi.



Une partie de l'onde est réfractée à l'intérieur de l'obstacle, l'angle avec la paroi est appelé **angle de réfraction**, sa valeur « r » est une fonction du matériau (coefficient d'absorption et épaisseur) et de la longueur d'onde de l'onde incidente.

En schématisant : « Onde incidente = Onde réfléchie + Onde absorbée ».

Ou, dit autrement : « Onde réfléchie = Onde incidente – Onde absorbée ».

En choisissant les matériaux en fonction de leur coefficient d'absorption, nous allons pouvoir corriger le comportement acoustique de la salle.

Par contre, il faut garder à l'esprit que l'épaisseur de la paroi joue également un rôle primordial : si un voile léger suffit en général pour absorber les extrêmes aigus et éviter qu'ils ne réfléchissent, plusieurs mètres d'épaisseur peuvent être nécessaires pour absorber des signaux inférieurs à 50 Hz.

1.2.2. Coefficient d'absorption d'un matériau

On appelle coefficient d'absorption α d'un matériau, le rapport :

$$\alpha = \frac{\text{énergie absorbée}}{\text{énergie incidente}}$$

α est sans dimension

α dépend de la nature du matériau et de la fréquence de l'onde incidente sur la paroi.

- Si α est égal à 1, cela signifie que la paroi a absorbé la totalité de l'énergie et que rien n'est réfléchi : le matériau est absorbant.
- Si α est égal à 0, cela signifie que la paroi a réfléchi la totalité de l'énergie et que rien n'est absorbé : le matériau est réverbérant.

Exemple Laine de verre collée (épaisseur : 40 mm, 70 kg/m³) : $\alpha = 0,97$ pour une onde sonore de fréquence 4 000 Hz et $\alpha = 0,29$ pour une onde sonore de fréquence 125 Hz. La laine de verre absorbe peu les sons aux basses fréquences. Par contre, elle absorbe presque toute l'onde incidente à 4 000 Hz.

Valeurs des coefficients d'absorption α pour différents matériaux et à différentes fréquences

MATÉRIAU	Fréquence (Hz)					
	125	250	500	1 000	2 000	4 000
Béton	0,02	0,02	0,02	0,03	0,04	0,04
Plâtre	0,02	0,03	0,04	0,05	0,03	0,03
Verre 3 (mm)	0,08	0,04	0,03	0,03	0,02	0,02
Placage de bois						
a) épaisseur 8 (mm) avec vide d'air de 30 (mm) 5 (kg/m ²)	0,25	0,22	0,04	0,03	0,03	0,08
b) épaisseur 16 (mm) avec vide d'air de 50 (mm) 10 (kg/m ²)	0,18	0,12	0,10	0,09	0,08	0,07
Polyuréthane (e = 30 mm, 30 kg/m ³)	0,03	0,15	0,48	0,65	0,82	0,81
Laine de verre collée épaisseur (40 mm, 70 kg/m ³)	0,29	0,52	0,69	0,89	0,96	0,97
Rideau épais et plissé en velours...	0,14	0,35	0,55	0,72	0,70	0,65
PVC	0,02	0,03	0,03	0,04	0,06	0,05
Caoutchouc	0,03	0,04	0,06	0,06	0,06	0,06
PVC sur sous-couche (5 mm)	0,02	0,09	0,31	0,12	0,06	0,03
Parquet bois collé	0,04	0,04	0,05	0,06	0,06	0,06
Parquet bois sur lambourde	0,15	0,11	0,10	0,07	0,06	0,06
Moquette bouclée (4 mm)	0,01	0,03	0,05	0,11	0,32	0,66
Moquette sur thibaude (5,5 + 8(mm))	0,04	0,10	0,31	0,70	0,93	0,74
Marbre	0,01	0,01	0,02	0,02	0,03	0,03
Absorption totale $S \cdot \alpha$ (m²)						
Fauteuil avec revêtement velours	0,14	0,23	0,35	0,39	0,37	0,38
Avec revêtement plastique	0,09	0,13	0,15	0,15	0,11	0,07
Personne assise 0.15	0,23	0,56	0,78	0,88	0,89	
Personne debout	0,15	0,23	0,61	0,97	1,14	1,14

1.2.3. Coefficient d'absorption moyen d'une salle

On se contente le plus souvent de prendre le coefficient moyen du matériau. Si les parois d'une salle sont constituées de n surfaces ($S_1, S_2, S_3 \dots$) recouvertes de matériaux différents de coefficients d'absorption respectifs ($\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3 \dots$), le coefficient d'absorption moyen $\bar{\alpha}$ de la salle est :

$$\bar{\alpha} = \frac{\alpha_1 S_1 + \alpha_2 S_2 + \alpha_3 S_3 + \dots}{S_1 + S_2 + S_3 + \dots}$$

$\bar{\alpha}$ est sans dimension

$\bar{\alpha}$ dépend de l'état d'occupation ou d'agencement du local (présence de fauteuils, de meubles, personne debout...) puisque toutes les surfaces contenues dans ce local entrent en jeu dans le calcul.

Exemples $\bar{\alpha} \approx 0,05$ pour un local nu

$\bar{\alpha} \approx 0,3$ pour un local bien meublé

Activité 33 Coefficient d'absorption moyen

On considère une salle de longueur $L = 8,0$ m, de largeur $l = 8,0$ m et de hauteur $h = 2,7$ m. Le sol est recouvert d'un parquet bois collé, les murs sont en béton recouvert de peinture blanche et le plafond est plâtré.

- 1 Calculer, pour un son de fréquence 1000 Hz, le coefficient d'absorption moyen $\bar{\alpha}$ de la salle.
- 2 Refaire le calcul pour un son de fréquence de 250 Hz. À quelle fréquence les éléments de la salle absorbent-ils le mieux le son ?

1.2.4. Surface d'absorption équivalente

Le terme $A = \alpha_1 S_1 + \alpha_2 S_2 + \alpha_3 S_3 + \dots$ a la dimension d'une surface ; on l'appelle **surface d'absorption équivalente** du local.

$$A = \sum_i \alpha_i S_i = \alpha_1 S_1 + \alpha_2 S_2 + \alpha_3 S_3 + \dots = \bar{\alpha} \times (S_1 + S_2 + S_3 + \dots)$$

A est exprimé en « m² » (ou en « m² Sabine »).

Activité 34 Surface d'absorption équivalente

On considère une salle de longueur $L = 8,0$ m, de largeur $l = 8,0$ m et de hauteur $h = 2,7$ m. Le sol est recouvert d'un parquet bois collé, les murs sont en béton recouvert de peinture blanche et le plafond est plâtré.

Calculer pour un son de fréquence 500 Hz, la surface d'absorption équivalente A de la salle (en m² Sabine).

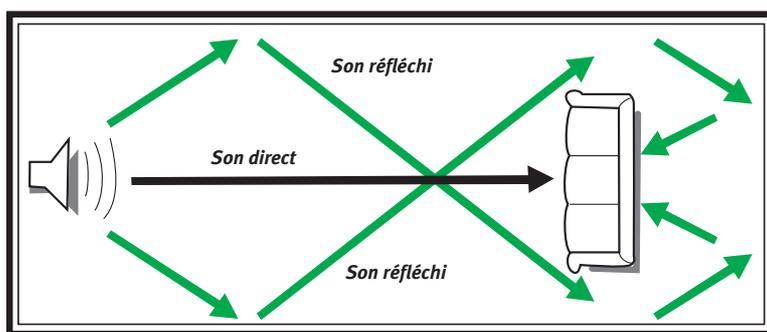
1.3. La réverbération

1.3.1. Présentation

L'onde « directe » est celle qui se propage en ligne droite des haut-parleurs vers l'auditeur. Ce son est celui qui met le moins de temps pour parcourir la distance séparant la zone d'émission de la zone d'audition. Mais le son n'est pas unidirectionnel : certaines ondes se réfléchissent sur les parois, la distance parcourue est plus grande ; elles arrivent donc aux oreilles de l'auditeur avec un temps de retard par rapport à l'onde « directe ».

Si ce temps de retard est de l'ordre de quelques millisecondes (ms), l'auditeur ne perçoit qu'un seul son. Au contraire, si les ondes réfléchies arrivent aux oreilles de l'auditeur avec un temps de retard supérieur à 30 millisecondes (> 30 ms) environ et qu'en plus l'intensité sonore est du même ordre de grandeur que l'onde principale, l'auditeur distingue clairement deux (ou plusieurs) sons. C'est cet effet qui est à l'origine de l'écho ou du phénomène de réverbération bien connu. C'est ainsi que, dans certaines vallées de montagne ou dans certains édifices religieux, il est possible de distinguer clairement plus de sept échos.

L'écho (ou réverbération) est un phénomène naturel présent partout et en tous lieux.



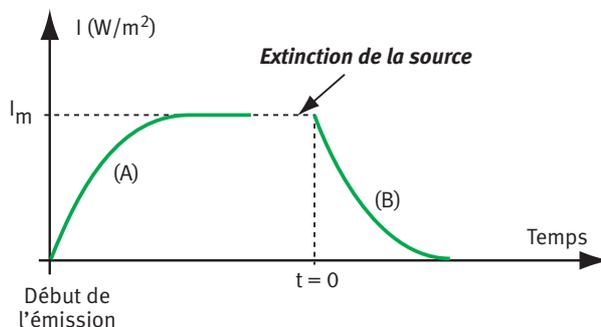
L'intensité acoustique totale I d'une salle est, en chaque point, la somme de l'intensité I_d rayonnée directement par la source sonore et de l'intensité acoustique réverbérée I_r .

$$I = I_d + I_r$$

I , I_d et I_r s'expriment en W/m^2 .

1.3.2. Évolution temporelle de l'intensité sonore après arrêt de l'émission

Dans un local de forme régulière et ayant une absorption uniforme, l'établissement de l'intensité sonore (A) comme sa décroissance après arrêt de la source (B) obéissent à des lois exponentielles :



(A) L'intensité sonore s'établit de façon exponentielle, après le début de l'émission, en suivant un régime transitoire puis un régime permanent.

(B) L'intensité sonore décroît de façon exponentielle, après l'extinction de la source sonore.

1.3.3. Temps de réverbération

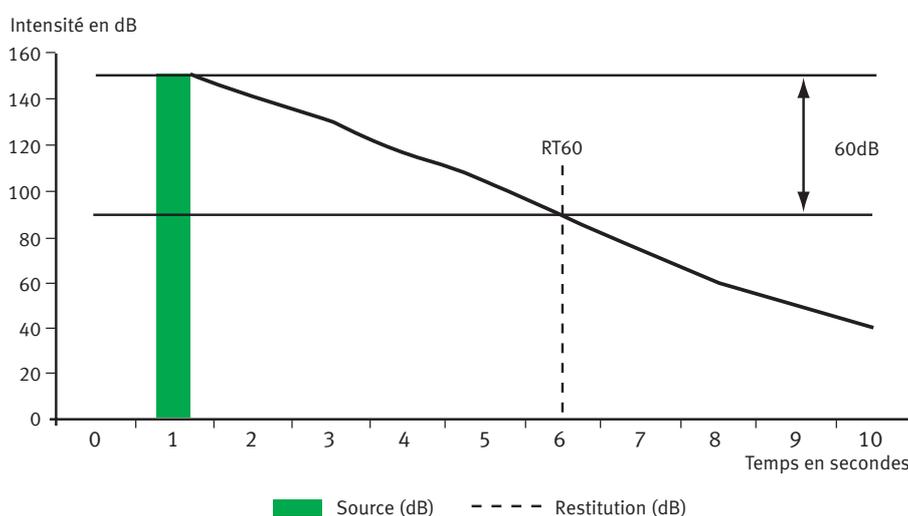
On constate facilement que la réverbération est très importante dans de grands locaux dont les surfaces sont constituées de matériaux lisses, durs, rigides, plans (comme le béton, les pierres, le carrelage, les plaques métalliques, le verre) et vides, sans ou avec peu de meubles ou de personnes. Par exemple : églises, salles de sports, halls commerciaux d'aspect brut, stations de métro anciennes, gares...

On appelle « temps de réverbération » du local la durée T_r nécessaire pour que l'intensité sonore diminue de 60dB après extinction de la source.

Remarque Le temps de réverbération est noté RT60 dans les publications anglo-saxonnes (RT pour *Reverberation Time*).

Si l'on enregistre la variation du signal sonore en un point du local après l'émission de l'impulsion, on constate :

- ▶ une décroissance qui peut, en première approximation, être assimilée à une droite ;
- ▶ que la pente de cette droite ne dépend (presque) pas du point de mesure, elle est (presque) constante en tous points ;
- ▶ que le coefficient directeur (pente) dépend en général (beaucoup) de la fréquence.



Source : Les amis du forum d'Atoll http://amfoot.free.fr/acoust_reverb.php

Le RT60, temps de réverbération à -60 dB, est le critère d'acoustique des salles le plus répandu.

Quelques ordres de grandeur :

Salle	Pièce meublée	Salle de concerts	Pièce vide	Grand hall
T_r (s)	0,5	0,8 à 1,5	2 à 2,5	8 à 12

1.3.4. Calcul du temps de réverbération – Formule de Sabine

Si le coefficient d'absorption moyen de la salle est faible ($\bar{\alpha} < 0,2$), le temps de réverbération peut être calculé à l'aide de la formule de Sabine :

$$T_r = 0,16 \times \frac{V}{A}$$

T_r : durée de réverbération (en s) ; V : volume de la salle (en m^3) ; A : surface d'absorption équivalente (en m^2)

Activité 35 Durées de réverbération

- 1 À l'aide de la formule de Sabine, calculer la durée de réverbération de chaque salle.
- 2 On attribue, instinctivement, une durée de réverbération importante à une salle de grandes dimensions. Est-ce judicieux ?

Dimensions (m)	Coefficient d'absorption moyen
Salle (1) : $8 \times 8 \times 2,7$	0,040
Salle (2) : $5 \times 5 \times 2,7$	0,040
Salle (3) : $15 \times 12 \times 2,7$	0,060

1.3.5. Autre expression du temps de réverbération – Formule empirique d'Eyring

Si la salle a un coefficient d'absorption important $\bar{\alpha} > 0,2$, la formule de Sabine donne de mauvais résultats et il est préférable d'employer la **relation empirique d'Eyring** pour calculer le temps de réverbération :

$$Tr = -0,16 \times \frac{V}{S \times \ln(1 - \bar{\alpha})}$$

Tr : durée de réverbération (en s)

V : volume de la salle (en m^3)

$S = S_1 + S_2 + S_3 + \dots$: surface totale de la salle (en m^2)

$\bar{\alpha}$: coefficient d'absorption moyen de la salle (sans dimension)

2. Traitement acoustique des salles

Le traitement acoustique d'une salle consiste à lui donner une forme et une durée de réverbération favorables à une bonne diffusion et écoute sonore. On obtiendra une durée de réverbération optimale en mettant en œuvre sur les parois de la salle des matériaux de coefficients d'absorption appropriés. Ce traitement est en général précédé d'une étude comportant plusieurs étapes.

2.1. Durée optimale de la réverbération

Dans le cas de salles de volume compris **entre 100 et 1 000 m^3** l'expérience a montré qu'une valeur optimale du temps de réverbération T_{op} peut être obtenue par la relation suivante :

$$T_{op} = 0,50 \times \left(\frac{V}{30} \right)^{1/3}$$

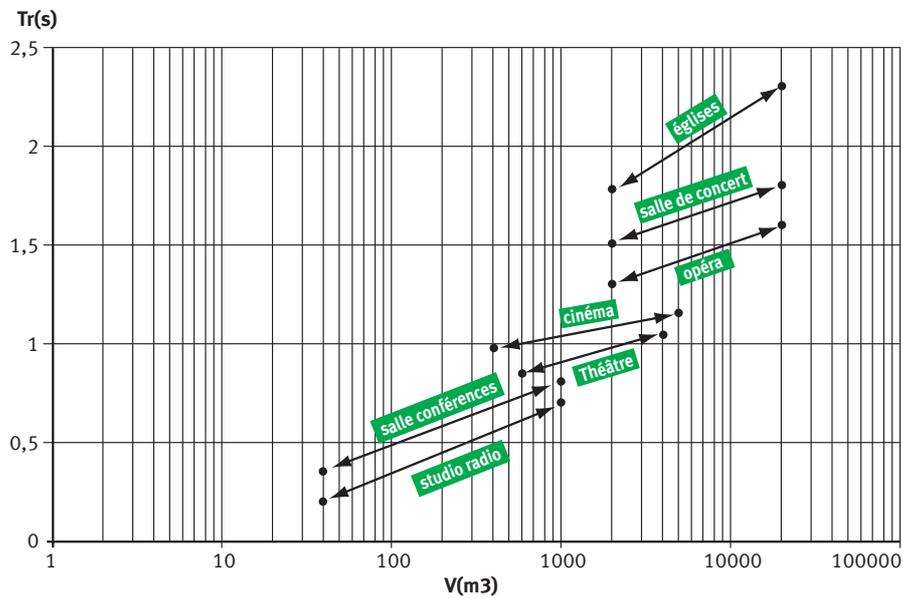
T_{op} : durée optimale en secondes (s)

V : volume de la salle en m^3

Cette durée de réverbération pourra être sujette à variations selon la destination de la salle.

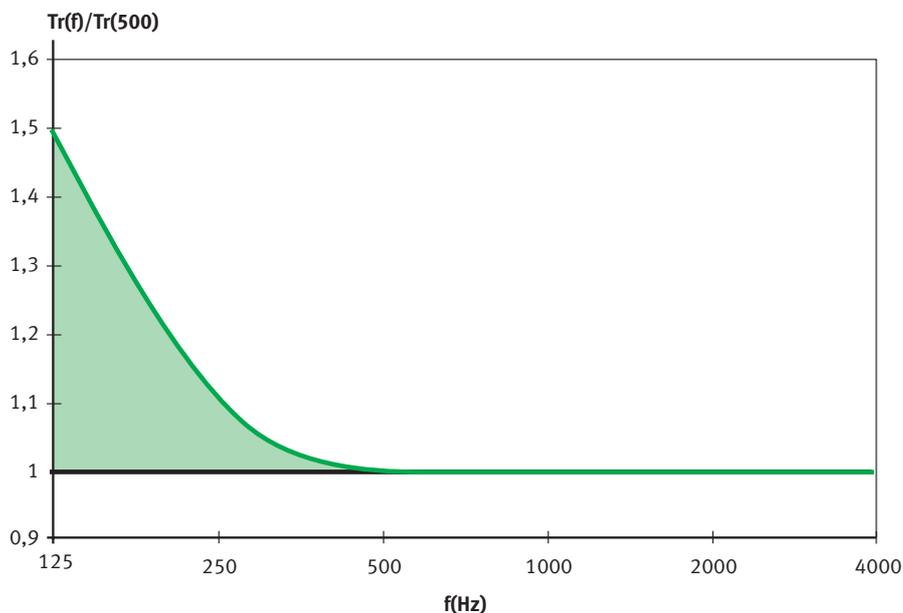
Ainsi, pour un studio d'enregistrement, on aura plutôt tendance à diminuer quelque peu cette valeur. Au contraire, pour un auditorium, on cherchera à l'accroître légèrement.

Temps de réverbération optimal aux fréquences moyennes (500 Hz-1000 Hz) en fonction du volume de la salle



On peut aussi tenter, dans certains cas, de prendre des durées de réverbération différentes selon les fréquences afin de mieux prendre en compte la destination de la salle.

Variation souhaitée de la réverbération Tr par rapport à la valeur de la réverbération à 500 Hz



À 125 Hz, on souhaite par exemple une durée de réverbération 1,5 fois supérieure à celle obtenue pour des sons de fréquence 500 Hz :

$$Tr(125 \text{ Hz}) = 1,5 \times Tr(500 \text{ Hz}).$$

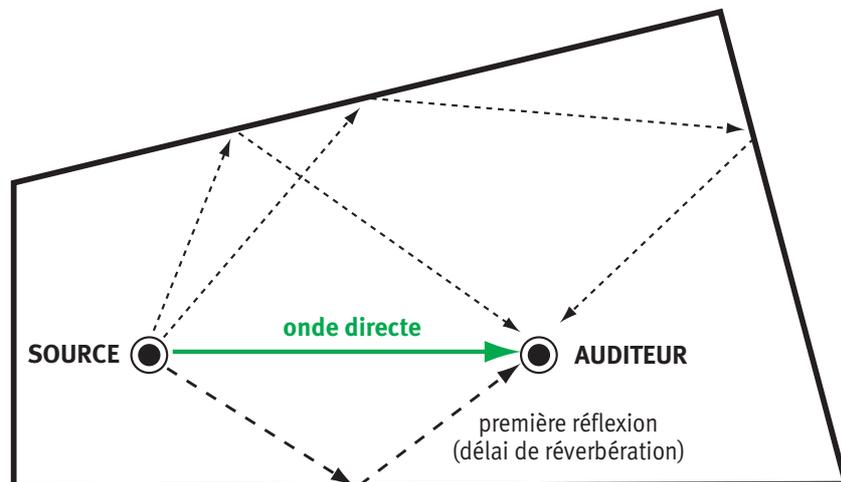
Activité 36 Durée optimale de réverbération

On considère une salle de conférences ayant un volume de 600 m^3 . Calculer la durée optimale T_{op} de réverbération.

2.2. Étude de la forme d'une salle

2.2.1. L'épure géométrique

L'épure géométrique consiste, pour un emplacement de la source donné, à étudier le cheminement des rayons sonores. Les points d'impact des rayons réfléchis du premier ordre sont alors déterminés sur la surface représentant le lieu des points d'écoute. Les points d'impact doivent être bien répartis sur cette surface et les différences de trajet entre onde réfléchie et onde directe doivent être les plus courts possibles. Cela impose parfois de placer des surfaces réfléchissantes proches des sources. L'épure sera utilisée pour étudier la forme du plafond en traçant les rayons issus de la source dans un plan vertical de symétrie de la salle. On peut aussi procéder de la même façon pour étudier la forme des parois verticales en réalisant des tracés analogues dans un plan horizontal.



Cette étude présente quelques restrictions :

- ▶ elle est limitée à la première réflexion sur les parois ;
- ▶ elle ne prend pas en compte l'absorption des parois, ce qui rend impossible le calcul de l'énergie sonore produite aux différentes réflexions ;
- ▶ elle ne considère pas les effets de diffraction du son sur les obstacles pouvant exister à l'intérieur de la salle.

2.2.2. Les logiciels d'acoustique architecturale

À partir d'une description de la géométrie 3D de la salle, des propriétés d'absorption des matériaux des parois et de la définition des sources (localisation, niveau de puissance), ces logiciels permettent de déterminer notamment les temps de réverbération RT60 (ou T_r) et les principaux critères caractérisant la qualité acoustique d'une salle.

Les méthodes numériques utilisées sont dérivées d'un algorithme de lancer de rayon incident. L'onde acoustique est représentée par une série de rayons émis

depuis la source et qui sont suivis dans leur multiple réflexion dans le volume de la salle. Chaque rayon apporte sa contribution énergétique au niveau du récepteur.

Exemple de calculateur du temps de réverbération dans une salle en 3D :

http://www.rt60.net/calc_rt60.htm

2.2.3. Le modèle réduit

Il sera en général préférable de procéder à une étude sur maquette (échelle 1/10^e à 1/30^e) en laboratoire. On place sur le sol des produits absorbants pour simuler l'absorption des sièges et des occupants de la salle. En un point à l'intérieur de cette maquette, une suite d'impulsions sonores est produite à une fréquence élevée (parfois ultrasonore) pour vérifier des conditions de similitude. Ces impulsions sont captées en différents points et leur forme est observée sur oscilloscope. Si l'amplitude des impulsions ne varie pas de façon régulière et décroissante en fonction de la distance par rapport à la source, il faut rechercher l'origine du défaut en plaçant ou déplaçant certains éléments absorbants sur les parois, ou bien en corrigeant la forme du local.

2.3. Choix des matériaux absorbants

Du choix des matériaux mis en œuvre sur les diverses parois dépend la qualité du traitement de la salle. Si l'on prend différents types de matériaux dont les absorptions se complètent, le traitement sera plus facile à trouver et l'absorption sera plus régulière à toutes les fréquences audibles.

On classe les matériaux en trois catégories :

- ▶ matériaux fibreux,
- ▶ panneaux fléchissants,
- ▶ résonateur.

Pour les locaux de logements courants normalement meublés, le temps de réverbération est de l'ordre de 0,50 à toutes les fréquences.

Ce qui se traduit par une constante du temps de réverbération au-delà de 500 Hz et par un accroissement dans les graves.

2.3.1. Les matériaux fibreux ou poreux

Ce sont des matériaux constitués de pores ouverts : laines de verre, feutres, moquettes, mousses.

Une partie des ondes acoustiques incidentes est absorbée par ces pores. Ils absorbent préférentiellement aux fréquences élevées (de 200 à 4 000 Hz).

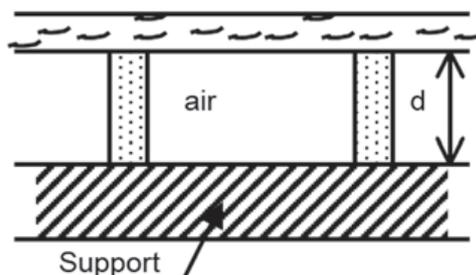
2.3.2. Les panneaux fléchissants

Ce sont des plaques de faible épaisseur montées en membrane sur des liteaux fixés sur un support rigide (et massif), un mur porteur par exemple. Ces membranes ont des fréquences f_0 de résonance souvent faible :

$$f_0 = \frac{600}{\sqrt{m \times d}}$$

m = masse surfacique de la membrane (kg/m²)

d = épaisseur de la lame d'air en cm.



Lorsqu'une onde heurte la membrane à une fréquence voisine de la résonance, il se produit une absorption par l'intermédiaire de la lame d'air jouant le rôle de ressort. Ces produits présentent une absorption sélective autour de f_0 . Ils sont utilisés pour les basses fréquences (125 à 500 Hz).

2.3.3. Les résonateurs

Un résonateur est un dispositif composé d'un goulot de section S et de longueur L lié à un corps de volume d'air V .

La fréquence de résonance d'un tel système encore appelé « résonateur de Helmholtz » est donné par :

$$f_0 = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{S}{V \times L}}$$

c : vitesse du son (343 m/s à 20 °C)

S : surface de la section du goulot (m²)

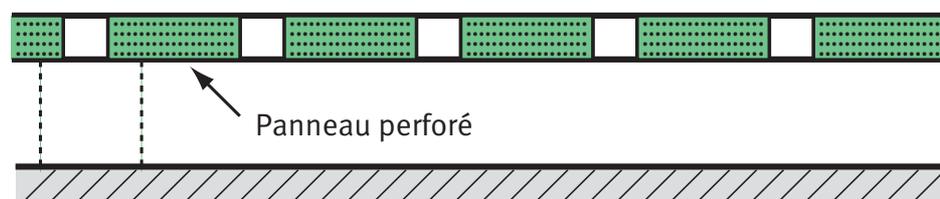
L : longueur du goulot (m)

V : volume du corps du résonateur

Lorsqu'une onde met en vibration l'air contenu dans le goulot, il y a dissipation d'énergie par frottement dans le col du goulot, ce qui se traduit par une absorption d'autant plus importante que la fréquence de l'onde est voisine de la fréquence de résonance.

Ce dispositif absorbe préférentiellement les fréquences médianes (de 500 à 2000 Hz).

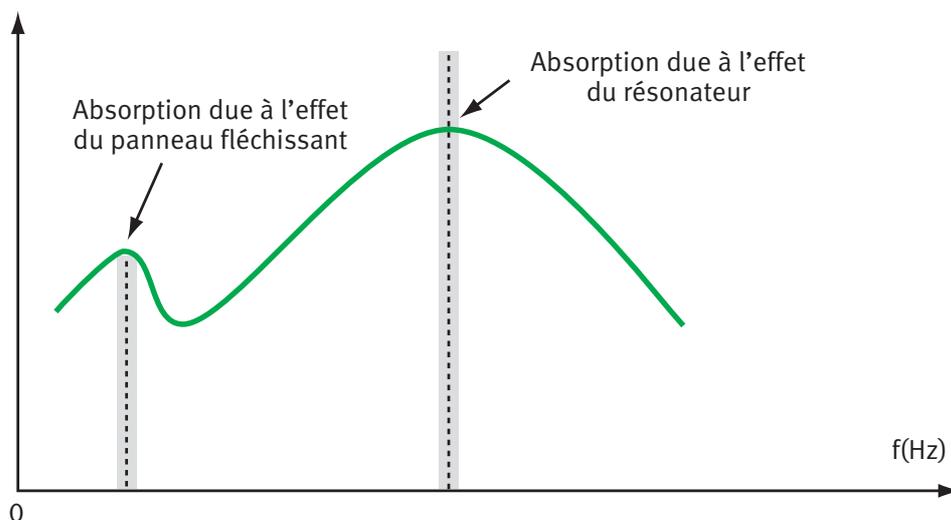
Un exemple courant de résonateur se compose d'un panneau perforé disposé à une certaine distance d'un mur :



Ce type de panneau se comporte à la fois comme une série de résonateurs auxquels on associe à chaque perforation un certain volume d'air entre le mur et le panneau, comme des panneaux fléchissants, si la plaque perforée est souple.

De tels dispositifs donnent une courbe d'absorption comme celle reproduite ci-dessous :

Courbe type d'absorption d'un panneau perforé



3. Acoustique active

Il s'agit de contrôler l'acoustique d'une salle grâce à l'électroacoustique et l'électronique. L'acoustique active permet de corriger certains défauts de la salle et de lui conférer une variabilité. Ainsi, l'utilisateur adapte, à la demande, l'acoustique à chaque type de spectacle.

Cette technique a vu le jour vers 1965, avec l'objectif initial de prolonger la durée de réverbération des salles pour pouvoir y accueillir des concerts dans de bonnes conditions.

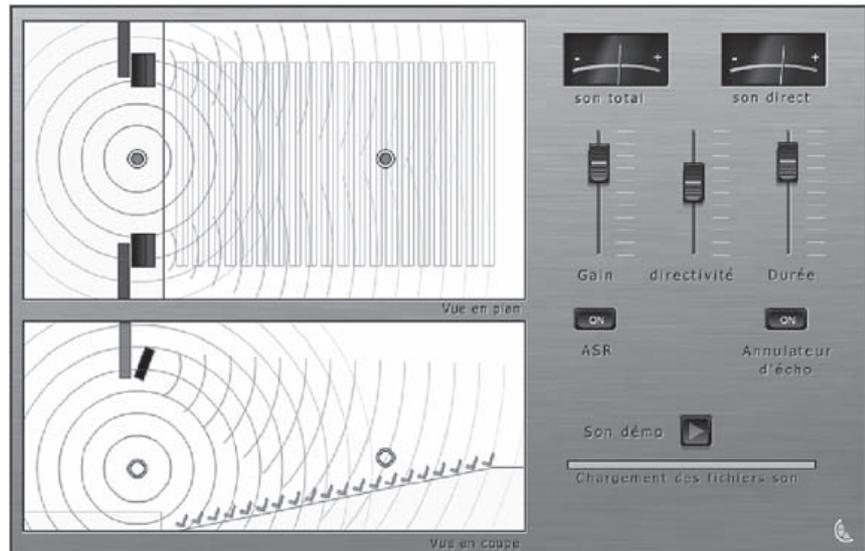
Avec le développement des processeurs numériques DSP, plusieurs systèmes actifs ont par la suite été proposés mettant en œuvre des techniques sophistiquées de traitement du signal et capables de contrôler d'autres aspects de l'acoustique, comme le renforcement du son direct.

D'une pression du doigt, l'utilisateur sélectionne l'acoustique la mieux adaptée pour chaque type de spectacle : théâtre, opéra, symphonique, jazz, conférence... Pour chaque acoustique, l'auditeur garde l'impression d'une acoustique naturelle : il ne détecte pas la présence du système actif.

On peut obtenir avec la technique active une variabilité acoustique beaucoup plus efficace et plus flexible que celle obtenue avec les moyens passifs.

L'acoustique active ne doit pas être assimilée à la sonorisation traditionnelle où l'auditeur est conscient de la présence de la sonorisation.

- Pour l'exploitant d'une salle, l'acoustique active présente donc l'intérêt d'optimiser l'exploitation de son équipement.
- Pour les usagers de la salle (sur scène comme en salle), elle assure un grand confort acoustique.
- Pour les architectes et acousticiens, elle est un moyen efficace de se libérer de certaines contraintes acoustiques. Par exemple, une géométrie ou un type de matériaux qui ne procurerait pas les nécessaires réflexions du son.

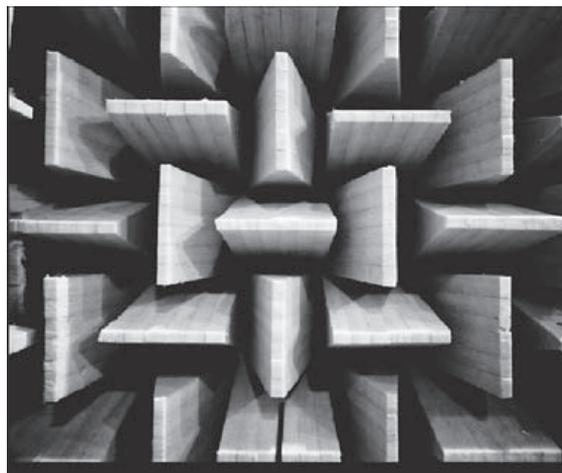


Le simulateur réflecteur sonore actif (ASR) interactif illustre le fonctionnement des réflecteurs sonores actifs utilisés dans les systèmes actifs.

Source : <http://www.activeaudio.fr/wp-content/uploads/simu/Simulateur%20ASR.html>

4. Salle sourde ou anéchoïque

Une salle sourde ou anéchoïque est une salle d'expérimentation dont les parois absorbent les ondes sonores ne provoquant donc pas d'écho pouvant perturber les mesures acoustiques. La salle anéchoïque acoustique (aussi appelée salle sourde) est une chambre recouverte de dièdres (parfois de polyèdres) constitués généralement d'un matériau poreux (mousse polymère, fibres de verre) absorbant les ondes sonores. La qualité de l'absorption est fonction de la taille de ces dièdres et des propriétés du matériau utilisé. Ce type de chambre permet de recréer artificiellement des conditions dites de « champ libre » (le son se propage sans réflexion).



Source : www.ircam.fr Dièdres de laine de verre tapissant les parois (plafond, sol, murs) © Olivier Panier des Touches, 2005.

De telles chambres peuvent servir aux essais de directivité ou de sensibilité d'un microphone comme à la mesure de la bande passante d'un haut-parleur. Elles servent également à positionner les sources de bruits les plus fortes d'une machine, ou à mesurer la puissance acoustique en s'affranchissant du bruit extérieur. On trouve plus fréquemment des salles semi-anéchoïques, dont la particularité est d'avoir un plancher réfléchissant, recréant donc des conditions de champ semi-libre. Ce dernier type est plus courant, en particulier dans l'industrie automobile, car il permet les essais sur du matériel lourd (moteur, véhicule complet), ainsi que l'intégration dans le sol de bancs sur rouleaux. En outre, les salles semi-anéchoïques sont de construction plus aisée.



Pour conclure

En appliquant la théorie de la propagation des ondes aux vibrations sonores, on touche à un domaine déjà fort bien maîtrisé depuis l'Antiquité, celui de l'acoustique des salles. Pour amplifier un son, les Grecs se servaient des propriétés physiques des matériaux, de la connaissance qu'ils avaient acquise sur les phénomènes d'absorption et de réflexion des sons, et construisaient des théâtres et amphithéâtres en leur donnant une forme particulière. Les constructions où devaient se produire des orateurs ou des musiciens avaient une acoustique très étudiée. Le théâtre d'Épidaure est ainsi un témoin de l'avancement des connaissances des Grecs en acoustique dès le IV^e siècle av. J.-C.

Les connaissances en acoustique des salles au temps de la Grèce antique étaient cependant avant tout empiriques. Ce domaine de connaissance restera très longtemps presque entièrement basé sur l'expérience, se développant au fil des essais aboutissant parfois à des échecs, parfois à de grandes réussites pouvant ensuite servir de modèle pour les salles suivantes. Le physicien américain Wallace Clement Sabine est généralement considéré comme le père de l'acoustique des salles en tant que domaine scientifique. C'est en 1900 qu'il publie l'article *Reverberation* qui pose les bases de cette science toute jeune.

Même si la durée de réverbération est un critère important en acoustique des salles, Sabine était cependant déjà conscient qu'elle n'est pas suffisante à elle seule pour décrire toute la qualité acoustique d'une salle et qu'il existait d'autres facteurs à prendre en compte (puissance sonore, sensation d'espace et d'enveloppement sonore, clarté, chaleur apportée par la coloration des timbres par une salle...).

Aujourd'hui, le développement de l'acoustique active permet d'améliorer le traitement acoustique des salles (acoustique passive) voire de pallier des défauts de conception quant aux qualités acoustiques de certaines architectures.

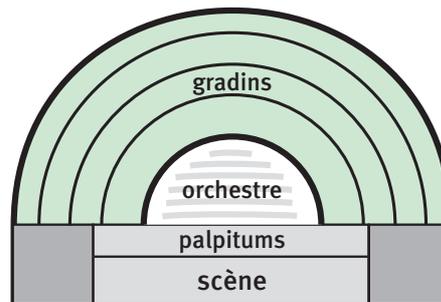
Exercices d'apprentissage

Exercice 20 La physique au service de l'architecture

Le théâtre antique d'Aspendos (à 50 km d'Antalya, en Turquie) est le mieux conservé de toute l'Asie Mineure. Construit au II^e siècle après J.-C., sa célébrité

est due à son excellent état de conservation, mais aussi à son acoustique remarquable qui, comme l'ensemble des théâtres antiques, révèle la réussite de son architecte. Les spectateurs assis au dernier rang de ce théâtre, doté d'une capacité d'accueil de 15 000 personnes, peuvent en effet entendre très distinctement les paroles d'un acteur situé sur la scène à une distance de plusieurs dizaines de mètres !

Cet exercice a pour objectif de comprendre comment les architectes ont réussi, par ce type de construction, à obtenir de tels résultats acoustiques.



Partie A : Généralités

- 1 Le son est une onde mécanique progressive. Définir le terme souligné.
- 2 Dans un espace, à combien de dimensions se propage une onde sonore ?

Partie B : Simulation d'un théâtre à l'aide d'une maquette

1. Utilisation d'un émetteur ultrasonore

Un émetteur ultrasonore est utilisé pour réaliser cette simulation.

On rappelle les informations suivantes :

- les sons audibles par l'oreille ont une fréquence f comprise entre 20 Hz et 20 kHz,
- lorsque la fréquence f est supérieure à 20 kHz, on parle d'ultrasons,
- ordre de grandeur de la célérité des sons émis par la voix et des ultrasons dans l'air dans les conditions habituelles : $v = 340 \text{ m.s}^{-1}$.

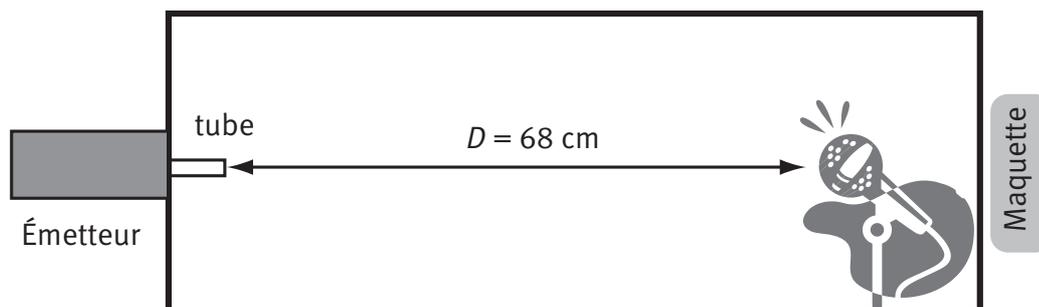
- 1.1. Définir en une phrase ce qu'est la longueur d'onde λ .
- 1.2. Donner la relation existant entre la longueur d'onde λ , la célérité v et la fréquence f d'une onde.
- 1.3. Dédire, de ce qui précède, que la longueur d'onde des ultrasons est inférieure à celle des sons moyens de la voix. Justifier précisément la réponse.
- 1.4. Justifier alors l'intérêt d'utiliser ce type d'ondes dans le cadre d'une simulation avec une maquette.
- 1.5. Définir ce qu'on appelle un milieu dispersif.
- 1.6. L'air est-il un milieu dispersif pour les ondes sonores et ultrasonores ? Justifier la réponse.

2. Influence d'un plafond

Les salles de concerts couvertes n'ont pas la même acoustique que les théâtres en plein air. On se propose dans cette partie d'étudier l'impact d'un plafond recouvrant totalement la salle de concerts sur l'acoustique de cette salle.

Pour cela, on utilise une maquette rectangulaire dont le couvercle est amovible. Une des parois latérales est traversée par un tube, relié comme précédemment à un émetteur ultrasonore. La longueur d'onde du son émis est là encore réduite dans le rapport indiqué par l'échelle de la maquette. Sur la paroi opposée est disposé un microphone (voir schéma 2 ci-après).

Schéma 2



L'expérience consiste à envoyer, pendant un temps très court (1 ms), un top d'émission (au niveau de l'extrémité du tube). Un microphone est situé à une distance D du tube.

Un oscilloscope permet de recevoir d'abord l'émission arrivant directement, puis tous les échos successifs. Le top est reçu avec un retard τ par rapport au top émis.

On réalise trois expériences :

Expérience ❶ avec le couvercle

Expérience ❷ avec un couvercle recouvert de moquette

Expérience ❸ sans couvercle

Les résultats obtenus sont présentés en annexe.

2.1. À l'aide des données de l'énoncé (la célérité v des ultrasons dans l'air n'ayant pas changé – voir partie B – 1), évaluer le retard τ entre l'émission et la réception du top par le microphone.

2.2. Comparer les résultats des trois expériences en termes d'amortissement de l'écho.

2.3. Parmi les trois expériences, quelle est la situation la plus intéressante d'un point de vue acoustique ? Justifier la réponse.

2.4. Justifier alors que le plafond des salles de concerts est toujours recouvert de dalles alvéolées constituées d'un matériau très absorbant.

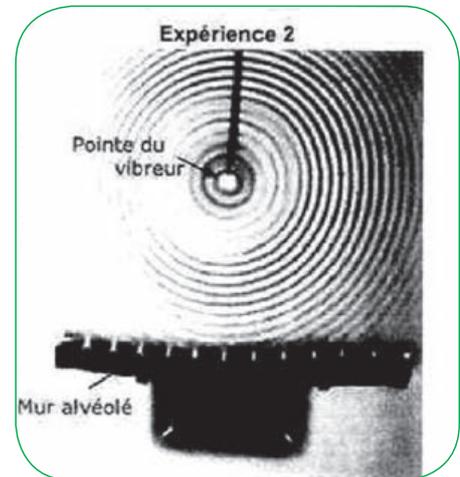
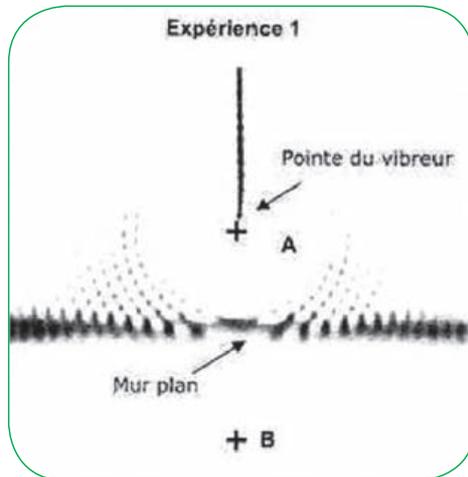
3. Rôle du mur : simulation à l'aide d'une cuve à ondes

La propagation des ondes et leur comportement quand elles rencontrent une surface réfléchissante peuvent être assez bien matérialisés au moyen d'une cuve à ondes.

Un vibreur muni d'une pointe frappe verticalement, avec une fréquence connue, la surface de l'eau contenue dans une cuve à ondes.

Expérience 1 On réalise l'expérience en plaçant un mur plan. On constate la présence d'échos. Tout se passe comme s'il y avait une deuxième source.

Expérience 2 On utilise cette fois-ci un mur alvéolé. On obtient les images ci-après (vues de dessus) :



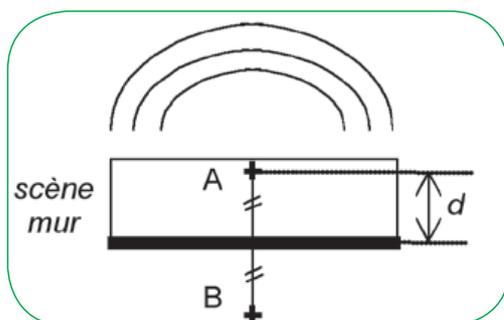
Une image agrandie de l'expérience 2 (cliché) est représentée en annexe.

- 3.1. Les ondes créées par le vibreur à la surface de l'eau sont-elles longitudinales ou bien transversales ? Justifier.
- 3.2. Dans le cas de l'expérience 1, l'onde émise au point A rencontre le mur plan, ce qui génère une onde réfléchie qui semble provenir de B, symétrique de A par rapport au plan formé par le mur.

Celle-ci se superpose alors à l'onde incidente issue de A.

En comparant les images de deux expériences, expliquez en quoi un mur plan est gênant pour la réception sonore dans les gradins.

- 3.3. À l'aide du cliché reproduit en annexe et en tenant compte de l'échelle du document, déterminer, le plus précisément possible, la valeur de la longueur d'onde λ en expliquant brièvement la méthode employée.
- 3.4. En analysant les expériences 1 et 2, justifier la forme du pulpitum (voir schéma 1 de l'énoncé) ainsi que la présence de niches et de colonnes dans le mur des théâtres antiques.



- 3.5. Les ondes réfléchies par le mur ne pouvant être totalement évitées, l'essentiel est que tous ces échos n'arrivent pas avec un trop grand retard. En effet, ce sont les consonnes qui forment l'armature de la parole. Leur durée d'émission est très courte, de l'ordre de 1/25 seconde. Pour qu'elles ne se juxtaposent pas, il faut que leur écho arrive avant la fin de leur émission.

- 3.5.1. Si l'orateur est placé en A, à une distance d du mur formant le fond de la scène, exprimer la distance AB en fonction de d .
- 3.5.2. En déduire l'expression en fonction de d et de v du retard Δt entre l'onde sonore émise par l'orateur au point A et l'onde réfléchie par le mur, qui semble issue du point B.
- 3.5.3. En utilisant les informations du texte d'introduction de la question 3.5., déterminer la profondeur maximale d_{\max} de la scène qui permet à la parole de rester nettement compréhensible. Pour faciliter le calcul numérique, on considérera une célérité des ondes sonores égale à $350 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$.

Conclusion

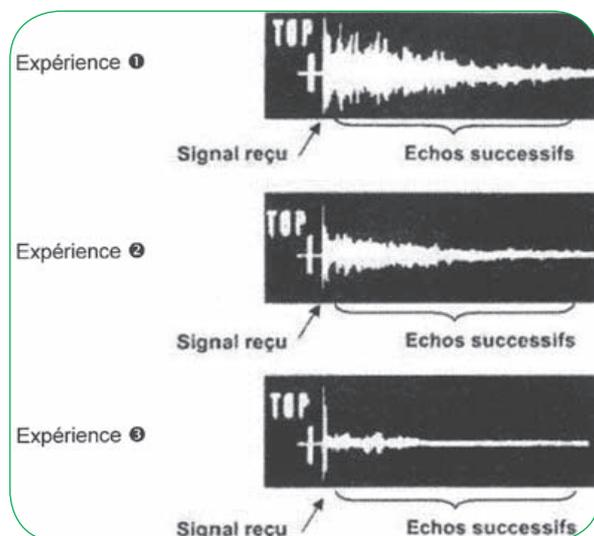
Une condition importante est aussi que les rayons n'arrivent pas affaiblis. Si les spectateurs étaient disposés dans un plan horizontal, leurs rangées successives absorberaient les ondes sonores et une faible énergie arriverait au dernier rang. Une inclinaison des gradins de 30° environ et croissante vers le haut empêche cette absorption.

Toutes ces remarques imposent les conditions suivantes :

- ▶ Orchestre réfléchissant et bien dégagé.
- ▶ Hauteur faible de la scène et profondeur généralement inférieure à 6,50 m.
- ▶ Inclinaison moyenne des gradins de 30° environ.

Ainsi, la bonne audition en ces points n'avait pas échappé aux architectes de l'époque, et il est remarquable que tout cela ait été fait sans l'emploi des moyens modernes d'investigation (microphones, haut-parleurs, oscilloscopes...) mais uniquement en utilisant l'oreille et la géométrie.

Annexes



Exercice 21 Auditorium

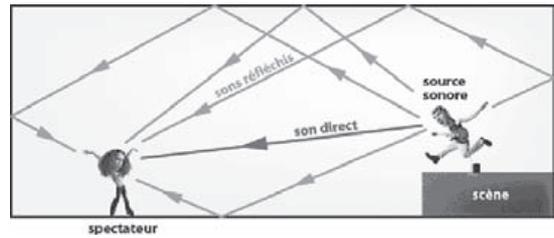
Un auditorium a les dimensions suivantes :

Longueur $L = 40$ m

Largeur $l = 20$ m

Hauteur $h = 5$ m

Les revêtements du sol et des murs ont le même coefficient d'absorption acoustique $\alpha = 0,25$.



- 1 Le plafond a un coefficient d'absorption acoustique α' . Le temps de réverbération mesuré dans le local est $T_r = 0,80$ s.

On rappelle la formule de Sabine : $T_r = \frac{4P}{A}$ où V est le volume du local et A l'aire d'absorption équivalente du local. Calculer α' .

- 2 L'aire d'absorption équivalente du local est $A = 800$ m². Le local contient une source émettant uniformément dans toutes les directions une puissance sonore $P = 0,10$ W.

En tout point de l'auditorium, l'intensité sonore globale I est la somme de deux termes :

- ▶ Intensité du champ direct (venant directement de la source) : $I_d = \frac{P}{4\pi r^2}$ à la distance r de la source.
- ▶ Intensité du champ réverbéré (provenant des réflexions sur les parois) : $I_r = \frac{4P}{A}$ en tout point du local.

A. À quelle distance r_1 de la source a-t-on $I_d = I_r$?

B. Calculer, à cette distance r_1 , l'intensité sonore globale I_1 et le niveau d'intensité acoustique correspondant. On rappelle que l'intensité sonore correspondant au seuil d'audition est $I_0 = 10^{-12}$ W/m².

C. Calculer en un point situé à 12,6 m de la source sonore le niveau d'intensité sonore global L_2 .

D. Quel niveau d'intensité sonore L_2' obtiendrait-on en ce point si on ne tenait pas compte des ondes sonores directes ?

E. Est-il acceptable, pour le calcul du niveau d'intensité sonore, de négliger les ondes sonores directes pour $r \geq 12,6$ m ?

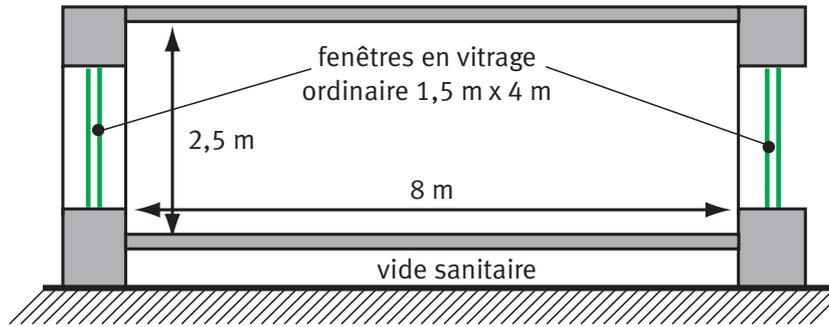
Exercice 22 Transformation d'un local

Une mairie désire transformer un local d'un seul tenant en office de tourisme. Avant aménagement, elle demande une expertise du local afin d'apporter des améliorations. Les dimensions du local sont précisées sur les schémas ci-dessous.

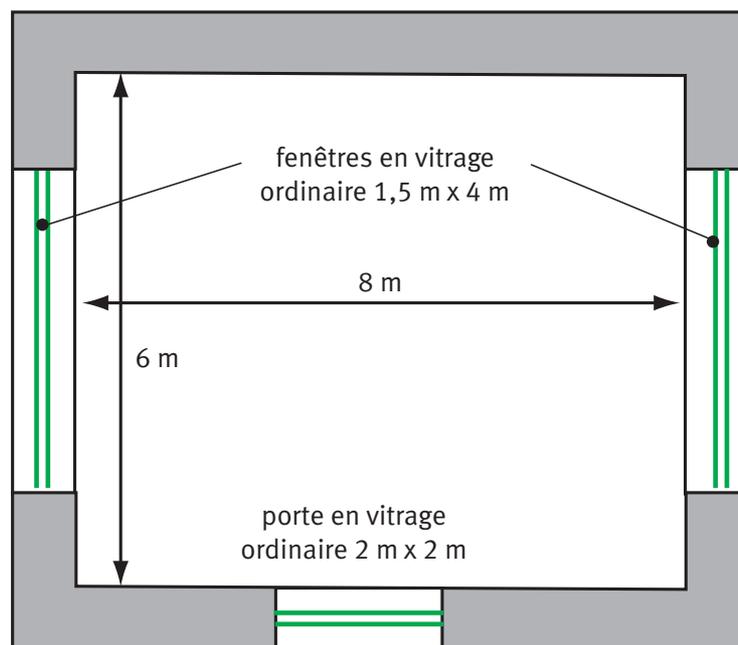
On donne les coefficients d'absorption α , à la fréquence de 1000 Hz, des matériaux revêtant la surface du local :

- ▶ Les murs sont en béton : $\alpha_1 = 0,040$
- ▶ La porte et les fenêtres en verre ordinaire : $\alpha_2 = 0,120$
- ▶ Le sol et le plafond en bois : $\alpha_3 = 0,070$

Vue de profil



Vue de dessus



- 1 On rappelle la formule de Sabine permettant le calcul du temps de réverbération d'un local : $Tr = 0,16 \times \frac{V}{A}$

Donner la signification du temps de réverbération d'un local ainsi que l'unité de chaque terme de la formule.

- 2 En présentant les calculs sous forme de tableau comportant notamment les colonnes $\alpha_1 S$ et αS , déterminer la surface équivalente d'absorption A du local.
- 3 Calculer le temps de réverbération Tr du local.
- 4 Ce temps de réverbération étant excessif, l'expert préconise de le ramener à 0,5 s en revêtant le plafond de dalles acoustiques.
 - a) Quelle doit être la nouvelle surface équivalente d'absorption A' ?
 - b) En déduire le coefficient d'absorption α' des dalles acoustiques pour obtenir cette correction.

6

Fiche de synthèse

A

Résumé

- ▶ Une onde sonore est une onde mécanique progressive longitudinale de compression-dilatation se propageant sans transport de matière à la célérité V qui dépend des propriétés du milieu de propagation.
- ▶ Dans le cas d'une onde sonore sinusoïdale, l'onde parcourt une distance correspondant à la longueur d'onde λ (ou période spatiale) pendant une durée correspondant à la période temporelle T de l'onde.

$$\lambda = V \cdot T$$

λ s'exprime en mètres (m)

T s'exprime en secondes (s)

V , la célérité, s'exprime en m/s

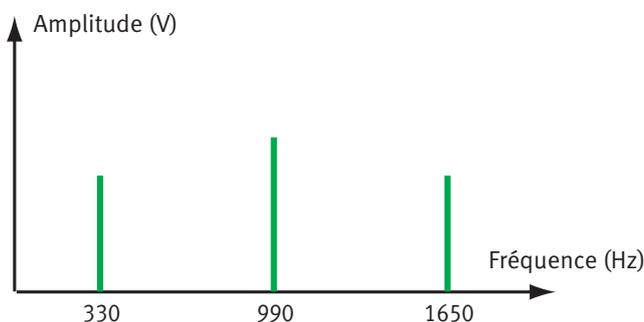
- ▶ Les qualités associées à un son musical sont : l'intensité liée à l'amplitude, la hauteur liée à la fréquence et le timbre lié à la forme d'onde de l'onde sonore.

Les sons complexes de fréquence f_1 , de même hauteur, mais de timbres différents, résultent de la superposition d'harmoniques de fréquences multiples de f_1 .

$$f_n = n \times f_1 \quad (n = 1, 2, 3 \dots)$$

f_n est la fréquence de l'harmonique de rang n et f_1 , la fréquence du fondamental (ou 1^{er} harmonique).

Le spectre dit de Fourier est un diagramme représentant l'amplitude des harmoniques en fonction de leur fréquence. Ne comportant que certaines fréquences, il est dit discontinu.



Le son est pur lorsque son spectre ne fait apparaître qu'un seul harmonique.

Le son est complexe lorsque son spectre fait apparaître plusieurs harmoniques dont les fréquences sont des multiples entiers de la fréquence du fondamental.

- ▶ Que ce soit pour les instruments à cordes, les instruments à vent ou les instruments à percussion (instruments de musique acoustique), un excitateur associé à un résonateur doit entrer en vibration pour émettre un son. Si on impose une vibration sinusoïdale de fréquence f à un excitateur (colonne d'air, corde tendue, lame d'un xylophone, membrane d'un tambour...), celui-ci ne vibre que pour certaines valeurs bien déterminées de la fréquence appelées fréquences propres de vibration. Ces fréquences sont quantifiées et correspondent à des modes propres de vibration.

Les modes propres sont caractérisés :

- ▶ Soit par un nombre entier n dans le cas de systèmes unidimensionnels (corde tendue, colonne d'air...) : c'est en général le cas des instruments à cordes et à vent.
- ▶ Soit par deux nombres entiers n et m dans le cas de systèmes bidimensionnels (peau tendue...) : c'est en général le cas des membranophones.

Contrairement aux instruments de musique acoustique, les instruments de musique électronique utilisent un ou plusieurs circuits électroniques pour produire des sons. Les instruments électroniques se subdivisent en deux groupes : les électromécaniques et les électroanalogiques. Ces deux groupes ont en commun le rayonnement acoustique par haut-parleur.

- ▶ Le microphone et l'oreille humaine sont deux récepteurs d'ondes sonores. Que ce soit le diaphragme du microphone ou le tympan de l'oreille, les deux éléments sont mis en vibration par une onde acoustique afin de transformer une énergie acoustique en énergie électrique.

On appelle intensité acoustique (ou intensité sonore), notée I , la puissance acoustique reçue par unité de surface de récepteur. Elle se mesure en watts par mètre carré (symbole : W/m^2).

$$I = \frac{P}{S}$$

I : intensité acoustique (W/m^2)

P : puissance acoustique (W)

S : surface traversée (m^2)

Le niveau d'intensité acoustique L (*Level* = « niveau » en anglais) est mesuré en décibels (symbole dB) avec un sonomètre et est défini par la relation suivante :

$$L = 10 \times \log \frac{I}{I_0}$$

$I_0 = 10^{-12} W/m^2$ (seuil d'audibilité)

Le mécanisme phonatoire de l'homme et le haut-parleur sont deux émetteurs d'ondes. Que ce soit les cordes vocales ou la membrane du haut-parleur, les deux éléments peuvent être mis en vibration pour émettre une onde acoustique en transformant une énergie mécanique en énergie acoustique.

- ▶ La durée de réverbération est un critère important en acoustique des salles. Sabine était cependant déjà conscient que la durée de réverbération n'est pas suffisante à elle seule pour décrire toute la qualité acoustique d'une salle et

qu'il existait d'autres facteurs à prendre en compte (puissance sonore, sensation d'espace et d'enveloppement sonore, clarté, chaleur apportée par la coloration des timbres par une salle...).

On appelle « temps de réverbération » du local la durée T_r nécessaire pour que l'intensité sonore diminue de 60 dB après extinction de la source.

Si le coefficient d'absorption moyen de la salle est faible ($< 0,2$), le temps de réverbération peut être calculé à l'aide de la formule de Sabine :

$$T_r = 0,16 \times \frac{V}{A}$$

T_r : durée de réverbération (en s)

V : volume de la salle (en m^3)

A : surface d'absorption équivalente (en m^2)

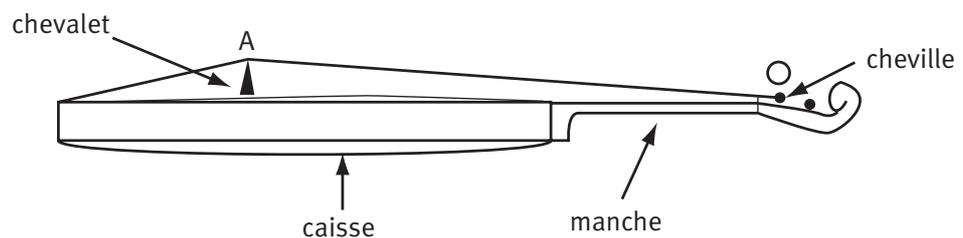
Aujourd'hui, le développement de l'acoustique active permet d'améliorer le traitement acoustique des salles (acoustique passive) voire de pallier des défauts de conception quant aux qualités acoustiques de certaines architectures.

B

Exercices de synthèse

Exercice 1 Cordes de violon

Le violon possède quatre cordes, que l'on frotte avec un archet.



La nature et la tension des cordes sont telles qu'en vibrant sur toute leur longueur ($AO = L = 55,0$ cm), elles émettent des notes dont les caractéristiques sont données ci-dessous :

numéro de la corde	1	2	3	4
note	sol ₂	ré ₃	la ₃	mi ₄
fréquence du son fondamental (en Hz)	$f_1 = 196$	$f_2 = 294$	$f_3 = 440$	f_4

Données Une onde progressive se propage le long d'une corde tendue entre deux points fixes à la célérité : $V = \sqrt{\frac{T}{\mu}}$ avec T la tension de la corde et μ sa masse linéique.

Chaque corde du violon a une tension et une masse linéique qui lui sont propres.

On admet qu'un diapason émet un son de fréquence unique 440 Hz.

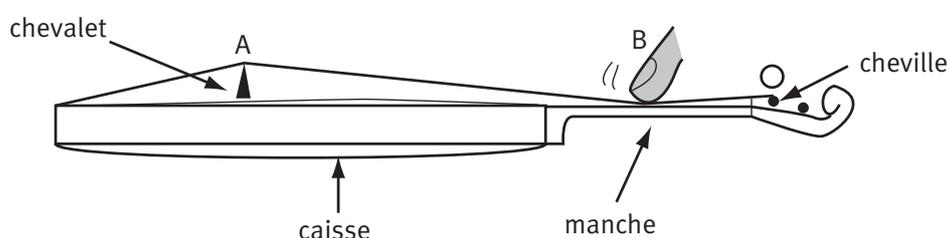
- 1 Un élève fait vibrer une corde tendue de son violon en la pinçant. Il observe un fuseau.

- 1.1. Celui-ci est-il dû à l'existence d'ondes longitudinales ou transversales ? Justifier en définissant le terme choisi.
- 1.2. À partir des connaissances du cours, montrer que la longueur L de la corde vibrante est liée à la longueur d'onde λ par la relation : $L = \lambda/2$.
- 1.3. Les vibrations de la corde sont transmises à la caisse en bois du violon. Quel est le rôle de cette caisse ?

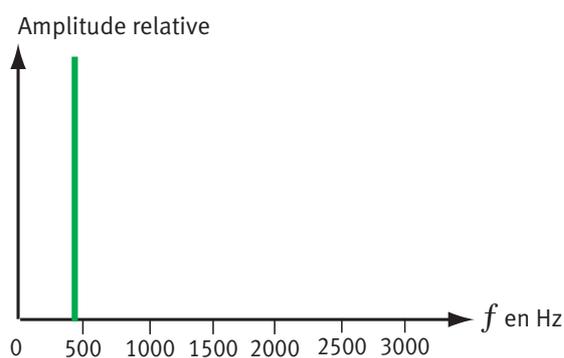
- 2 L'élève accorde son violon. Pour chaque corde successivement, il règle la tension T de celle-ci afin qu'elle émette un son correspondant à une fréquence donnée dans le tableau ci-avant. Pour cela, il tourne une cheville. Il s'intéresse d'abord à la corde « la3 » et règle la hauteur du son en utilisant un diapason (440 Hz).

La masse linéique de la corde « la3 » étant $\mu = 0,95 \text{ g.m}^{-1}$, calculer la tension de la corde après cette opération.

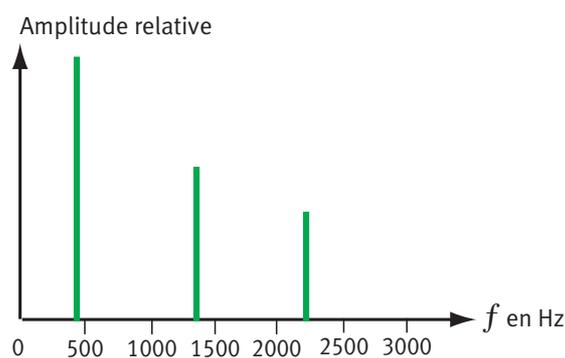
- 3 Pour jouer une note « la3 » sur la corde « ré3 », l'élève appuie en un point B de celle-ci :



- 3.1. En admettant que cette opération ne change pas la tension de la corde « ré3 », quelle grandeur le violoniste modifie-t-il ?
- 3.2. À quelle distance d du chevalet l'élève appuie-t-il sur la corde pour que la note émise ait pour fréquence fondamentale 440 Hz ?
- 4 En classe, le son émis par la corde « la3 » du violon et le son émis par un diapason 440 Hz sont captés par un microphone relié à l'ordinateur. Un logiciel permet d'établir les spectres des fréquences reproduits ci-dessous :



spectre n°1



spectre n°2

- 4.1. Identifier chacun des spectres en justifiant la réponse.
- 4.2. Pour le spectre correspondant au violon, entre les fréquences 0 et 3 000 Hz, quelles sont les fréquences des harmoniques manquants ?

Exercice 2 Autour de l'oreille

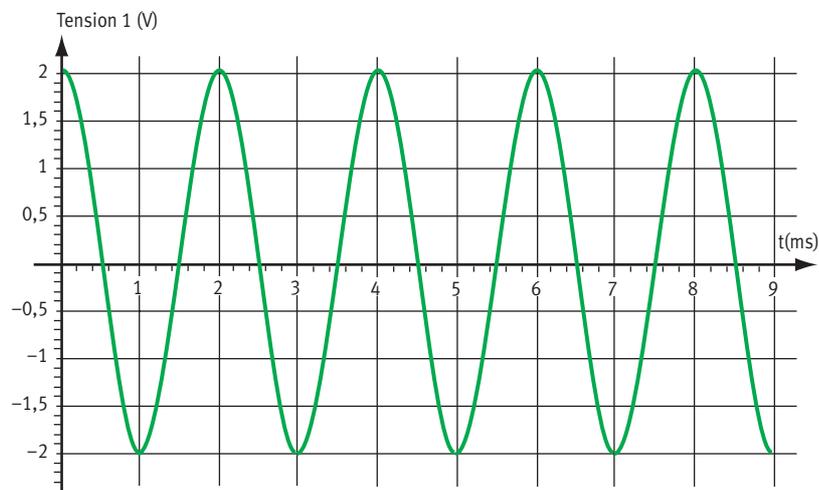
On se propose dans cet exercice de travailler sur le détecteur sonore que constitue l'oreille chez l'être humain. L'objectif étant de comprendre ses principales caractéristiques à travers des exemples simples.

1. Quelques caractéristiques du son

L'oreille sert à détecter les sons. Pour le musicien, le son possède quatre qualités ou paramètres que sont la hauteur, l'intensité, le timbre et la durée. Dans toute la suite de l'exercice, on ne s'intéressera qu'aux trois premiers paramètres à savoir la hauteur, l'intensité et le timbre d'un son.

1.1. Donner la définition de la hauteur d'un son.

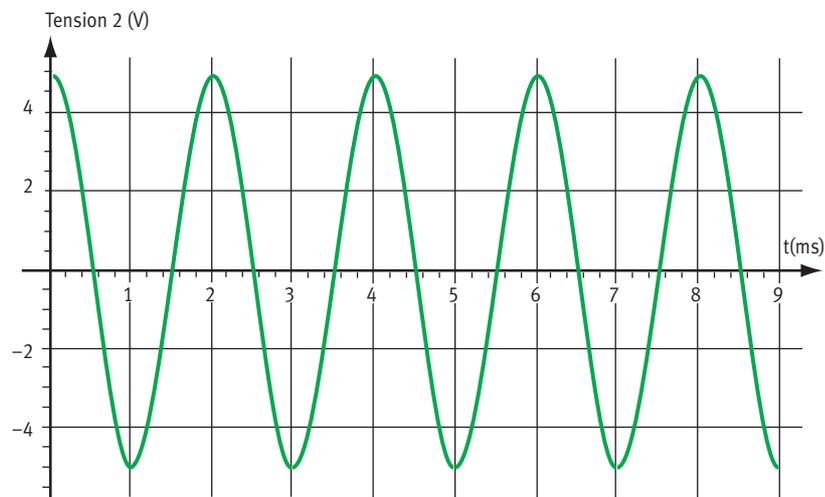
Le document qui suit présente l'enregistrement, à l'aide d'un logiciel d'acquisition adapté, du son produit par un haut-parleur alimenté par un générateur de fréquence.



Enregistrement n°1

1.2. Déterminer la hauteur du son enregistré.

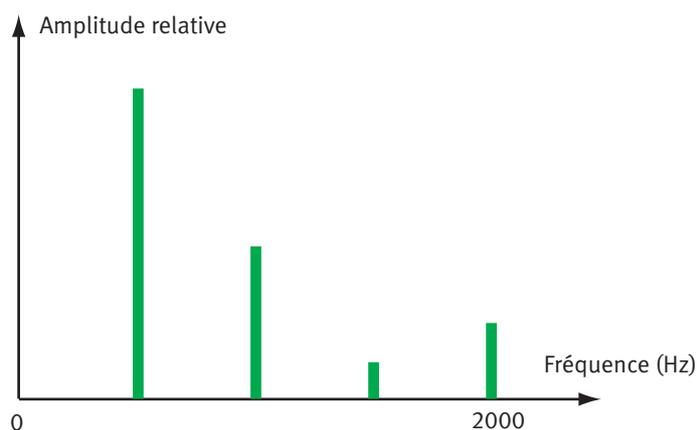
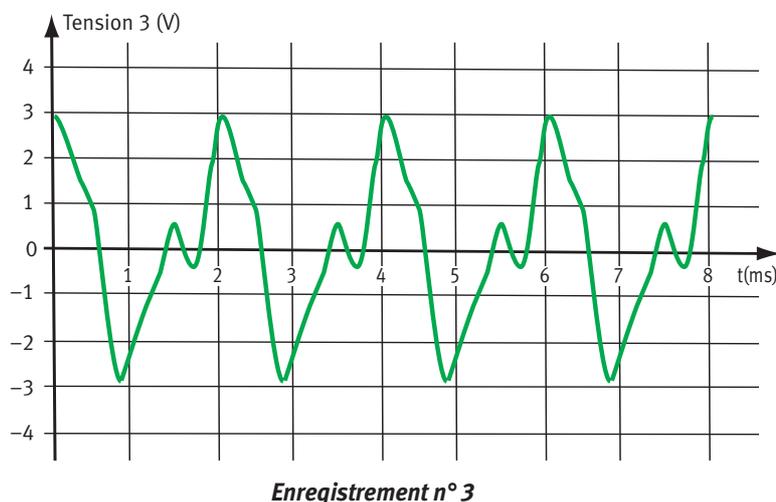
On effectue un autre enregistrement du son émis par le haut-parleur en modifiant un réglage au niveau du générateur de fréquences :



Enregistrement n°2

1.3. Quelle modification l'expérimentateur a-t-il effectuée pour obtenir ce nouvel enregistrement ? Quel paramètre du son, parmi les trois proposés par l'énoncé, a varié dans ce nouvel enregistrement ? Justifier votre réponse.

Le document suivant présente l'enregistrement du son produit par un synthétiseur et son analyse spectrale :



1.4. En utilisant cette analyse spectrale et en justifiant la démarche, montrer que la valeur de la hauteur du son émis lors de cet enregistrement est identique à celle des enregistrements 1 et 2.

1.5. Quelle différence présente le son de l'enregistrement 3 par rapport aux enregistrements 1 et 2 ?

Quel paramètre du son est ainsi mis en évidence ? Justifier votre réponse.

2. Le détecteur oreille

Intensité sonore et niveau sonore

On s'intéresse maintenant aux caractéristiques de l'oreille quant à ses capacités à discerner la hauteur de deux sons, ainsi qu'à la différence de niveau sonore entre deux sons.

On rappelle que l'intensité d'un son notée I est caractérisée par son niveau sonore noté L . la relation qui relie ces deux paramètres est la suivante :

$$L = 10 \log \left(\frac{I}{I_0} \right)$$

Où I_0 est une intensité de référence, à savoir l'intensité minimale que peut détecter une oreille humaine normale. On donne : $I_0 = 1,0 \cdot 10^{-12} \text{ W.m}^{-2}$. Le niveau sonore L d'un son est donc, en quelque sorte, une comparaison par rapport à la référence I_0 .

On considère un son dont le niveau sonore $L = 50 \text{ dB}$.

2.1. Montrer, en utilisant la définition du niveau sonore, que l'intensité I du son correspondant vaut $I = 1,0 \cdot 10^{-7} \text{ W.m}^{-2}$.

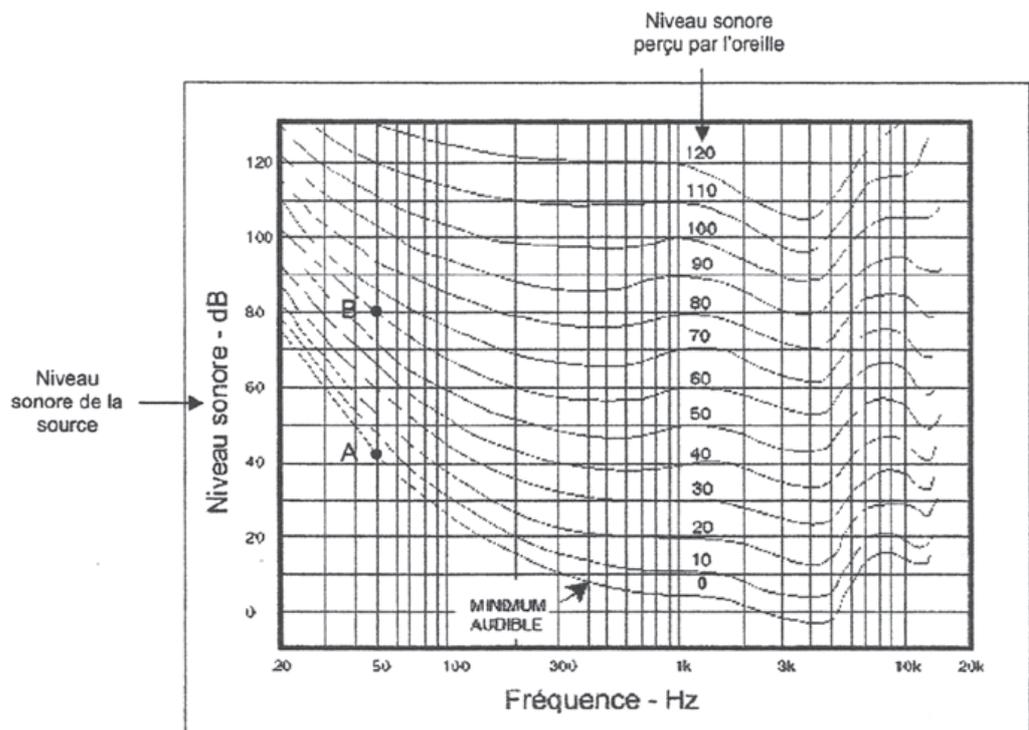
Superposition des sources sonores

On considère maintenant une source sonore d'intensité sonore I_1 et de niveau sonore L_1 . Si l'on considère la superposition de deux sources sonores identiques à la précédente, il en résulte une intensité sonore I_2 double de la précédente soit $I_2 = 2 I_1$. On note L_2 le niveau sonore résultant de la superposition de ces deux sources sonores identiques.

2.2. En utilisant la définition du niveau sonore, montrer que la relation entre les deux niveaux sonores L_1 et L_2 est : $L_2 = L_1 + 3 \text{ dB}$.

2.3. La sensibilité de l'oreille

La sensibilité de l'oreille, c'est-à-dire sa capacité à entendre, ne sera pas la même selon la hauteur du son parvenant à l'oreille de l'auditeur. D'autre part, un son émis par une source avec un certain niveau sonore ne sera pas perçu par l'oreille avec ce même niveau sonore. Ces différentes caractéristiques sont résumées dans le diagramme suivant appelé diagramme de Fletcher et Munson.



Ce diagramme montre des courbes d'isotonie (même niveau sonore perçu par l'oreille) en fonction de la hauteur du son. La courbe de niveau 0, nommée sur ce graphe « MINIMUM AUDIBLE », indique le niveau sonore minimal que doit posséder un son pour que celui-ci puisse être audible.

Si l'on considère par exemple un son de hauteur 50 Hz, l'oreille ne pourra le détecter que si son niveau sonore vaut environ 42 dB (point A sur le diagramme).

De même, un son de niveau sonore 80 dB et de hauteur 50 Hz ne sera perçu au niveau de l'oreille qu'avec un niveau sonore de 60 dB (point B sur le diagramme).

2.3.1. En analysant le diagramme de Fletcher et Munson, on constate, à la lecture de l'axe des abscisses, que le domaine des fréquences audibles par l'oreille humaine se situe environ entre 20 Hz et 20 kHz.

Où se situent ce qu'on appelle couramment les sons aigus ? Même question concernant les sons graves ?

2.3.2. Sur le diagramme, placer le point sur la courbe de niveau 0 qui permette de justifier que la sensibilité maximale de l'oreille se situe autour de 4 000 Hz.

On considère deux sons de même niveau sonore 60 dB : l'un de fréquence 50 Hz et l'autre de fréquence 100 Hz.

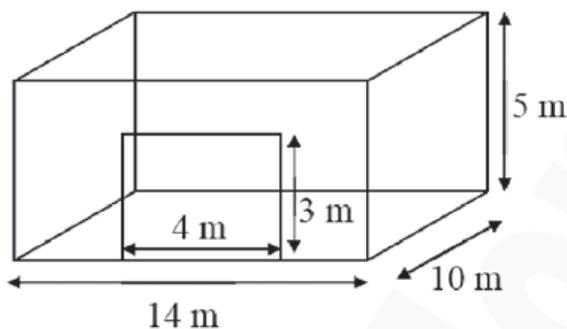
2.3.3. En utilisant le diagramme de Fletcher et Munson, déterminer avec quel niveau sonore sera perçu chacun de ces sons par l'oreille. On montrera, par un tracé sur le diagramme de Fletcher et Munson, les points représentatifs de ces deux sons.

2.3.4. Parmi ces deux sons, lequel sera perçu avec le plus d'intensité par l'oreille ?

Exercice 3 Aménagement d'une cantine

Ce sujet porte sur l'étude de l'aménagement intérieur d'une cantine. Pour l'ensemble des salles constituant la cantine, l'isolation vis-à-vis de l'extérieur est secondaire. Les contraintes proviennent essentiellement ici des émissions et propagations de bruits internes aux locaux.

Selon la législation, la durée de réverbération dans les locaux meublés non occupés doit être comprise entre 0,60 s et 1,20 s dans des intervalles d'octaves centrés sur 500, 1 000 et 2 000 Hz.



① Qu'appelle-t-on durée de réverbération Tr d'un local ?

② On donne la formule de Sabine $Tr = 0,16 \times \frac{V}{A}$.

Préciser la signification de chacun des termes Tr , V et A ainsi que leur unité.

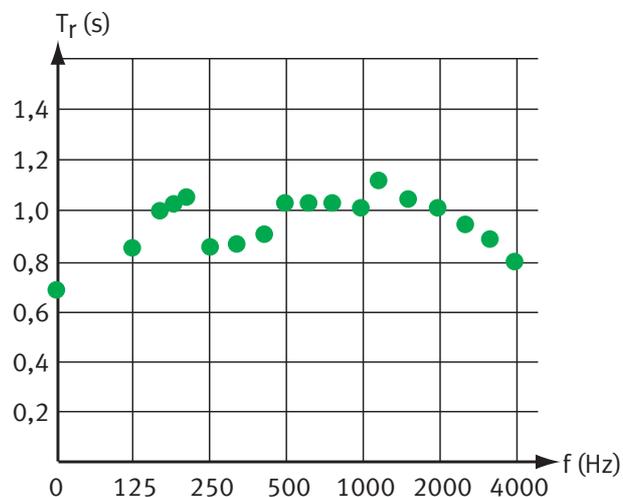
On s'intéresse à une des salles de restauration de grand volume. La porte d'entrée vitrée a une dimension de 3 m × 4 m. Les murs latéraux et le plafond sont en béton. Le sol est carrelé.

Pour les différents matériaux, les valeurs numériques (à 1 kHz) des coefficients d'absorption α sont données dans le tableau ci-dessous :

Matériau	Coefficient d'absorption
Béton	$\alpha_B = 0,03$
Carrelage	$\alpha_C = 0,04$
Vitre	$\alpha_p = 0,12$
Protisol	$\alpha_p = 1$

- 3 Pour le cas où aucun aménagement acoustique n'a été réalisé, calculer la durée de réverbération pour cette salle vide à 1kHz. Le cadre législatif est-il respecté ?
- 4 On cherche à ramener le temps de réverbération à 1s à la fréquence de 1kHz. Pour ce faire, on décide de recouvrir une partie du plafond avec de la laine de roche Protisol.
 - A. Calculer la nouvelle valeur numérique de la surface d'absorption équivalente A' .
 - B. Exprimer A' en fonction des coefficients d'absorption et des différentes surfaces.
 - C. En déduire l'expression littérale S_p de la surface de plafond à traiter pour réaliser cette amélioration numérique.
- 5 L'entreprise chargée de la partie acoustique a réalisé des essais à la réception du chantier pour confirmer les calculs de bureau d'étude.
 - A. À l'aide du graphique ci-dessous, peut-on dire que le cahier des charges législatif est respecté ?
 - B. Les mesures ont été effectuées au sein d'un local vide. Que se passe-t-il une fois que l'on a ajouté les tables et les chaises ?

Relevé des durées de réverbération réalisées au centre de la salle en fonction des fréquences médianes des bandes d'octave

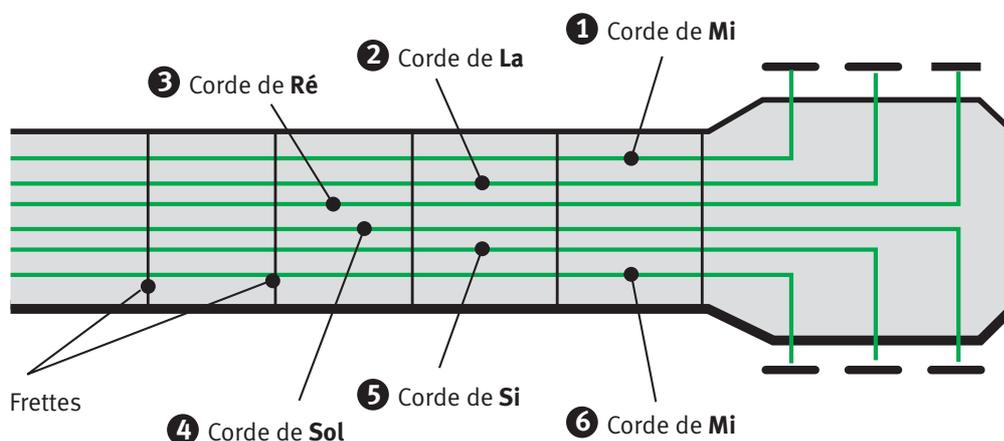


Problème scientifique

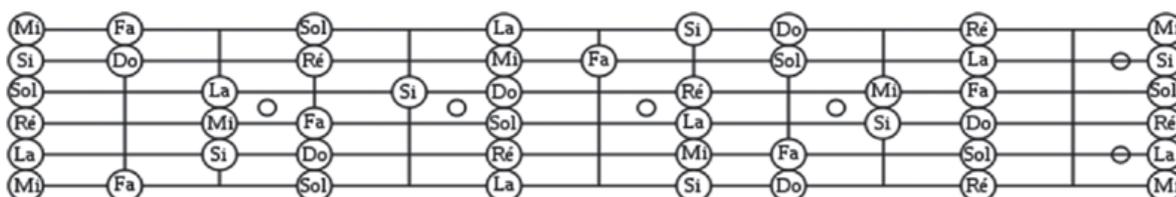
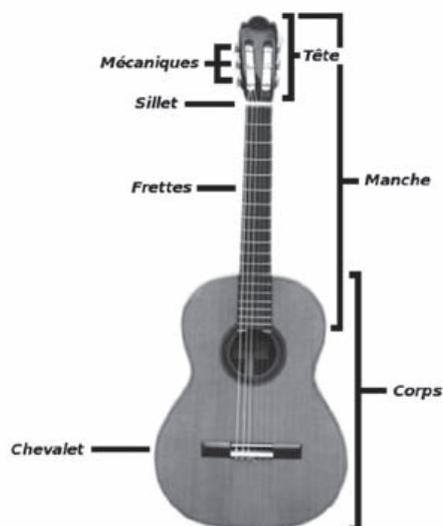
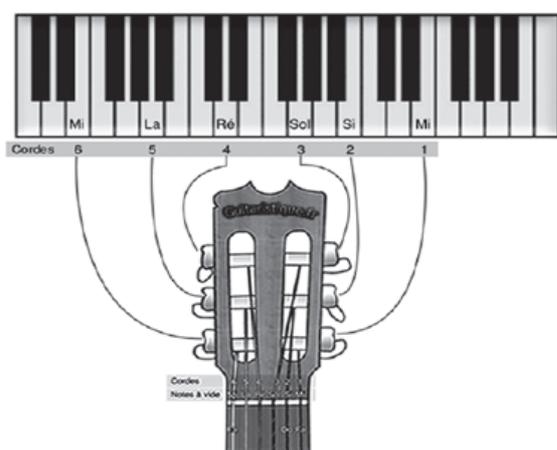
« Pourquoi les frettes d'une guitare ne sont-elles pas régulièrement espacées ? »

Document n° 1 : Frettes et cases d'une guitare

En observant le manche d'une guitare, on constate que les frettes (les barres de métal sur le manche d'une guitare) ne sont pas régulièrement espacées.



Une « case » est l'espace qu'il y a entre deux frettes. Elle correspond à un demi-ton.



Une guitare comporte en fait six cordes. Sur le manche, les cases (ou touches) sont numérotées 1, 2, 3, 4, 5, 6... à partir de la tête de l'instrument. Une corde est à vide lorsqu'elle n'est pas appuyée contre le manche au niveau d'une case. À vide, les cordes vibrent à la fréquence f_0 sur la longueur L_0 (distance entre le sillet et le chevalet) ; appuyée contre la case n , une corde vibre sur la longueur L_n à la fréquence f_n .

L_1 correspond à la distance entre la première frette et le chevalet lorsqu'un doigt est positionné sur une corde de la première case (case 1) ; L_2 correspond à la distance entre la deuxième frette et le chevalet lorsqu'un doigt est positionné sur une corde de la deuxième case (case 2), etc. On considère que d_n est la distance entre les frettes délimitant la case n . Ainsi, la distance d_0 correspond à la distance entre le sillet et la frette 1, la distance d_1 correspond à la distance entre la frette 1 et la frette 2, etc. Pour la guitare ci-dessus, la longueur à vide d'une corde est $L_0 = 48,5$ cm.



Document n° 2 : Modèle de la corde vibrante

La corde vibrante est le modèle physique permettant de représenter les mouvements d'oscillation d'un fil tendu. On supposera ici qu'il est tenu par ses deux extrémités. [...] Ce modèle permet de comprendre les sons émis par les instruments à cordes (guitare, violon...). Considérons une corde maintenue par ses deux extrémités. Dans le mode de vibration le plus simple, dit « fondamental », elle forme à chaque instant un arc, et la flèche de cet arc varie de manière périodique (la courbure augmente, puis diminue, puis s'inverse, puis augmente dans l'autre sens...).

La fréquence f du fondamental varie comme l'inverse de la longueur. Ainsi, si l'on divise la longueur par deux, on multiplie la fréquence par deux c'est-à-dire que l'on monte d'une octave. On remarque ainsi que la douzième frette d'une guitare se trouve au milieu de la corde (puisque une octave fait douze demi-tons dans la gamme tempérée). Avec V la vitesse des ondes se propageant sur la corde (en m/s) et L la longueur d'une corde, la fréquence du fondamental exprimée en hertz (Hz) est :

$$f = \frac{V}{2L}$$

La vitesse V de l'onde sonore sur la corde dépend de la masse linéique μ de la corde (kg/m) et de la tension T de la corde (en N).

Document n° 3 : Gamme tempérée

La hauteur d'une note de musique correspond à la fréquence de l'onde sonore périodique associée à cette onde. Dans le cas d'une guitare, cette fréquence correspond à la fréquence du mode de vibration dit du « fondamental » de la corde vibrante.

Dans la gamme tempérée usuellement utilisée de nos jours, lorsqu'on passe d'une note de fréquence f_n à la note de fréquence f_{n+1} placée un demi-ton au-dessus, ces fréquences vérifient :

$$\frac{f_{n+1}}{f_n} = r \quad \text{où} \quad r = 2^{\frac{1}{12}} \approx 1,06$$

La gamme étant composée de 12 demi-tons, deux notes sont à l'octave l'une de l'autre si le rapport de leurs fréquences vaut 2 : par exemple, la note la4 (880 Hz) est à l'octave supérieure de la note la3 (440 Hz) car $880/440 = 2$.

Situation problème

Pourquoi les frettes d'une guitare ne sont-elles pas régulièrement espacées ?

Pour répondre à cette problématique, on s'appuiera sur les documents mis à disposition afin de déterminer l'expression de la distance d_n entre les frettes

de la case n en fonction de L_0 , l'indice n et $r = 2^{\frac{1}{12}}$ (on raisonnera sur une des six cordes en considérant que le fait d'appuyer sur une corde ne modifie pas la tension de la corde). En déduire les valeurs manquantes du tableau ci-dessous :

Case n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	11	13	16
d_n (cm)	2,7					2,0						