

Mots-clefs « auditorium », « salle sourde », « acoustique active » et « réverbération ».

## 1 Activité documentaire : les instruments à percussion (20 minutes)

On peut classer les instruments en trois familles qui sont les instruments à cordes, à vent et à percussion. Dans le cas des instruments à percussion, une membrane ou un matériau résonnant constitue le système excitateur qui fait vibrer l'instrument. Un instrument à percussion joue-t-il une note de musique ?

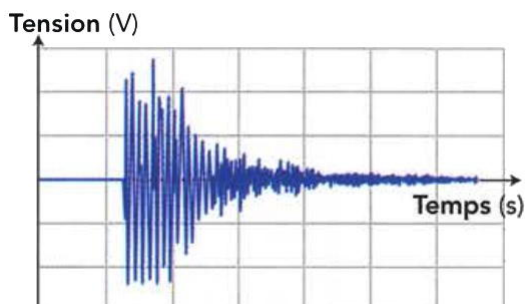
### Document 1 – Spectre inharmonique

La plupart des instruments à percussion produisent des sons qui ne sont pas périodiques. Dans ce cas, l'énergie sonore est répartie sur des fréquences dont les valeurs n'ont pas de relations entières ou fractionnaires entre elles. On dit que l'on a un spectre « inharmonique ». Ce type de spectre n'engendre pas de sensation de hauteur bien nette, voire, comme c'est le cas pour certaines cloches, peut évoquer plusieurs hauteurs simultanément.

### Document 2 – La caisse claire



La caisse claire est un des éléments principaux d'une batterie. Sur la caisse, en bois ou en métal, on fixe deux membranes, une de percussion et l'autre de résonance. Voici une représentation en fonction du temps du signal électrique à la sortie d'un microphone, correspondant au son émis par une caisse claire de batterie :

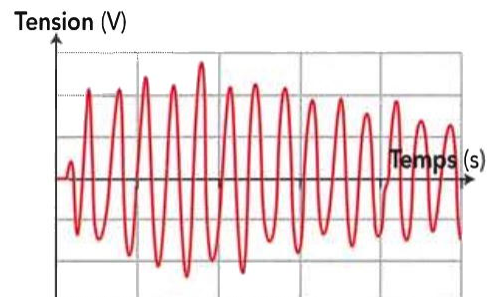


### Document 3 – La timbale



La timbale est formée d'une membrane circulaire ; cette « peau » est aujourd'hui fabriquée en mylar, un polymère synthétique. Elle est tendue sur une coque (ou fût) de forme quasi hémisphérique. Pour produire le son recherché, le timbalier frappe sur la peau avec une ou plusieurs « mailloches ». Un petit trou situé dans le fond du fût de la timbale garantit que lorsque l'instrument est au repos, les pressions de part et d'autre de la membrane sont égales (sinon, la peau serait trop tendue et vibrerait mal sous la frappe du timbalier).

Les timbales ont une fonction rythmique, bien sûr, mais elles ont aussi une couleur musicale. Les timbales engendrent une sensation de hauteur - un coup de timbale est perçu comme plus ou moins aigu — qui, sans être aussi nette que celle d'une flûte ou d'un piano, n'en est pas moins réelle. Voici le signal électrique à la sortie d'un microphone correspondant au son émis par une timbale :



Lorsqu'on joue de la timbale, on constate que cette sensation de hauteur est d'autant plus perceptible que le coup porté sur la peau est proche du bord (si l'on frappe la membrane au centre, on obtient un son plus sourd).

- a. Les instruments à percussion présentés dans les différents documents émettent-ils des sons musicaux ?

## 2 Activité documentaire : critères de qualité acoustique d'une salle (1 h)

Lors de sa propagation, une onde sonore subit des phénomènes de réflexion, diffraction, diffusion ou absorption par les parois des obstacles qu'elle rencontre (murs, plafonds, mobilier, etc.).

La superposition de l'onde directe et des ondes réfléchies contribue à la qualité du son perçu. Une salle qui a une bonne qualité acoustique.

Quels paramètres doivent être pris en compte pour obtenir une bonne acoustique ?

### Document 1 – Les murs du son

« Pour avoir une bonne acoustique, écrivait Charles Garnier après avoir achevé l'Opéra, une salle doit être large ou étroite, haute ou basse, en bois ou en pierre, ronde ou carrée, et ainsi de suite. [...]

Dès qu'il y a une symétrie, explique Manuel Melon, qui enseigne l'acoustique au Cnam, en général ce n'est pas très bon. Car certaines fréquences sont favorisées par rapport à d'autres, le son paraît plus fort ici que là. Les salles parallélépipédiques rectangles, hexagonales, ovoïdes, ne sont pas favorables." Pourtant, les meilleures salles européennes, le Concertgebouw d'Amsterdam ou le Musikverein de Vienne, sont de vraies boîtes à chaussures. Ce genre de salle parallélépipédique peut très bien marcher, répond Eckhard Kahle, grand acousticien qui prépare l'auditorium de Bordeaux. Mais une salle symétrique, nue, avec des murs en béton brut, non. La boîte à chaussures est une forme de départ idéale, même pour une grande salle : tout y est prévisible, calculable, c'est du billard. Seulement, il faut y ajouter des balcons qui cassent les murs parallèles, et d'autres éléments de ce genre, des panneaux légèrement inclinés...



À Vienne (photo), ce sont des moulures, des cariatides, des stucs qui assurent la diffusion du son. [...]

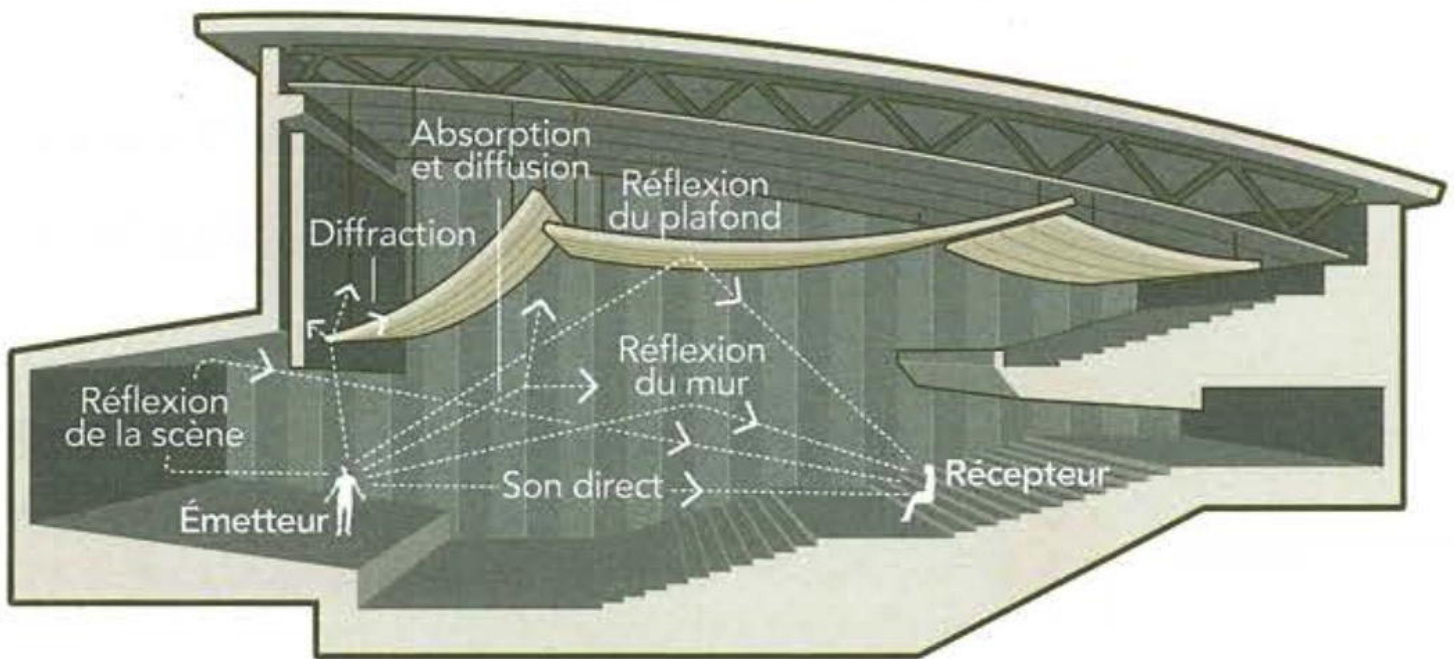
La question est que le son parvienne à l'auditeur directement, mais aussi après s'être réfléchi plus ou moins au fond de la scène, au plafond, sur les murs latéraux, et même au fond de la salle. La superposition de ces sources, dans le cerveau, apporte l'"effet de salle", la conscience du lieu.

Mais il n'est pas question d'entendre deux fois le même son, comme à Pleyel ; ni de l'entendre trop différemment selon sa position dans la salle ; ni d'entendre mieux les aigus que les graves. La nature des matériaux, et leur coefficient d'absorption, de réflexion, font varier cette diffusion.

C'est la première partie du casse-tête : le nombre de paramètres.

Deuxième partie : il faut savoir ce qu'on va faire d'une salle. [...] La quadrature du cercle, c'est l'opéra. Commins explique : "C'est le cas le plus complexe. Il faut tenir compte de la musique de l'orchestre, et de la voix. Et des chanteurs, qui doivent aussi avoir une perception claire de l'orchestre ! Il faut donc que le son soit prolongé, pour l'orchestre, mais qu'il soit aussi très clair, pour que les chanteurs soient compréhensibles. Donc on renforce le son aussi tôt que possible pour que sa clarté soit préservée. "Souvent l'on adopte des compromis (bon marché) ou des salles modulables (plus chères) où l'on peut couvrir et découvrir la fosse d'orchestre, hausser son plancher, modifier la nature des murs en faisant tourner des panneaux articulés (comme à l'Ircam), et même ajouter discrètement des haut-parleurs au fond, sans parler des abat-sons, des rideaux. [...]"

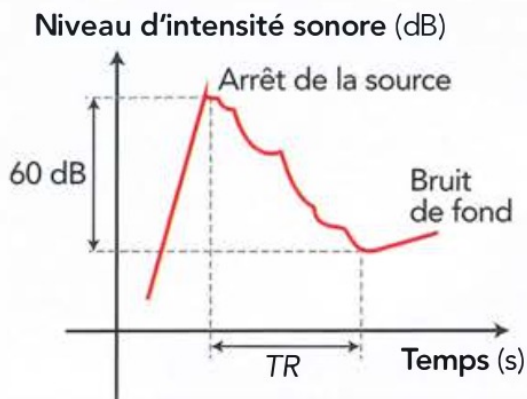
## Document 2 – Profil d'un auditorium



### Document 3 – Durée de réverbération

Dans une salle de spectacle, un auditeur perçoit le son direct, mais aussi celui des ondes sonores ayant subi une multitude de réflexions sur les parois des obstacles qu'elles rencontrent. Ce son est qualifié de son réverbéré.

La durée de réverbération, notée TR (car parfois encore appelée temps de réverbération), correspond à la durée au bout de laquelle le niveau d'intensité sonore a diminué de 60 dB après que la source sonore a cessé d'émettre.



La durée de réverbération est directement liée au volume acoustique  $V$  et à la surface d'absorption équivalente  $A$  de la salle. On définit la surface d'absorption équivalente  $A$  par la surface de la paroi d'un matériau parfaitement absorbant (100 % d'absorption) ayant la même absorption acoustique que le local considéré :

$$A = \sum_i \alpha_i S_i$$

où  $\alpha_i$  représente le coefficient d'absorption du matériau de surface  $S_i$ .

Dans la plupart des situations, la durée de réverbération se calcule par la formule de Sabine :

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

TR s'exprime en secondes (s) ; la surface  $A$  est exprimée en mètre-carré ( $m^2$ ) et le volume  $V$  en mètre-cube ( $m^3$ ).

Cette formule est valable si l'énergie réverbérée est uniformément répartie dans la salle.

### Document 4 – Musique, parole et réverbération

L'absence de réverbération dans une salle provoque un rendu sec et dur de la musique ; on recherche toujours une prolongation du son pour une bonne qualité musicale. Une bonne salle de musique présente une durée de réverbération de 1,0 à 2,5 secondes.

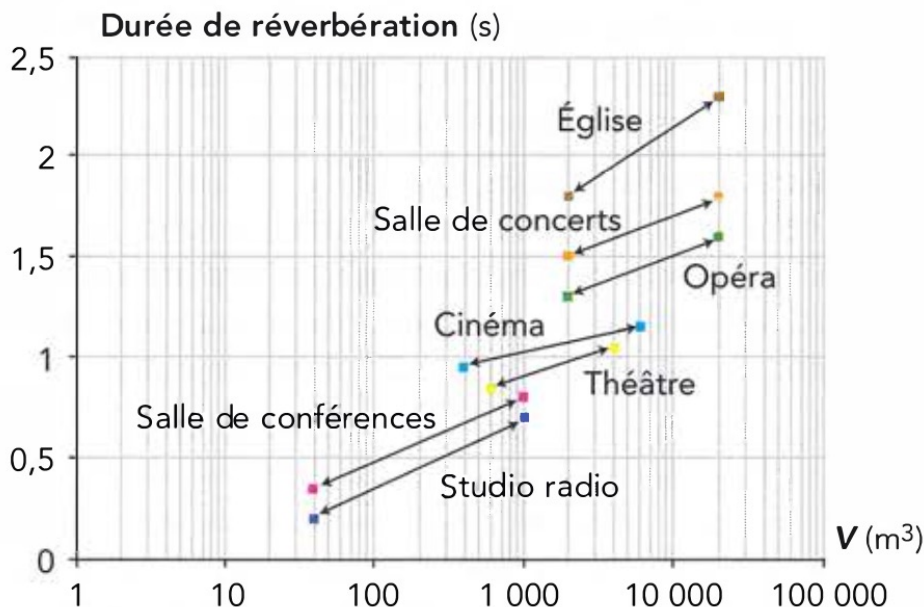
Les orgues, présentes dans les églises, imposent de longues durées de réverbération afin d'avoir une bonne qualité de son.

La réverbération n'est, en général, pas souhaitée par un orateur. Elle doit être courte pour une bonne compréhension du texte ; au maximum 0,8 seconde.

Au-delà, les syllabes se chevauchent et l'intelligibilité diminue.



## Document 5 – Exemples de durées de réverbération



Durées de réverbération typiques, pour des fréquences moyennes (500 à 1 000 Hz).

**b.** Faire le bilan des phénomènes physiques qui interviennent au cours de la propagation d'un son dans une salle. Définir chacun de ces phénomènes.

**c.** Quels sont les phénomènes responsables de la décroissance de l'intensité sonore ?

**d.** Quelle est la conséquence pour la perception d'un son par un auditeur ?

**e.** Commenter, en argumentant, la phrase « La boîte à chaussures est une forme de départ idéale » (document 1).

**f.** Comment peut-on expliquer que le phénomène de réverbération nuise à l'intelligibilité de la parole ?

**g.** De quelles grandeurs dépend la durée de réverbération ?

**h.** Bilan : À partir de l'ensemble des documents, faire une synthèse des paramètres à prendre en compte pour obtenir une bonne acoustique et expliquer la nécessité de disposer de salles de conceptions différentes selon l'utilisation.

### 3 Activité documentaire : matériaux actifs (20 minutes)

Afin d'optimiser la bonne diffusion et l'écoute sonore, il faut donner à une salle une forme convenable et une durée de réverbération favorable. En quoi l'acoustique active peut-elle être une réponse à la conception de salles de spectacles ?

#### Document 1 – Moduler l'acoustique et corriger les problèmes

##### Les techniques passives

Elles consistent à modifier la durée de réverbération en jouant sur l'absorption acoustique. Elles font appel à des moyens mécaniques qui se révèlent souvent lourds, bruyants et, de surcroît onéreux. Citons, par exemple, les réflecteurs, les panneaux mobiles ou les rideaux absorbants, les éléments scéniques comme les décors ou les conques d'orchestre, et même parfois les parois et les plafonds mobiles.

##### Les techniques actives

Ces techniques ont été développées en 1965, avec l'objectif initial de prolonger la durée de réverbération des salles

pour pouvoir y accueillir des concerts dans de bonnes conditions. Elles apportent à la salle les composantes acoustiques qui lui font défaut, en utilisant des systèmes électroacoustiques constitués de microphones, de filtres, d'amplificateurs et de haut-parleurs. D'une pression du doigt, on sélectionne les paramètres les mieux adaptés pour chaque type de spectacle : théâtre, opéra, conférence, etc. Pour chaque ambiance, l'auditeur garde l'impression d'une acoustique naturelle : il ne détecte pas la présence du système actif. On peut obtenir avec ces techniques une variabilité beaucoup plus efficace et flexible que celle obtenue avec les moyens passifs :

- pour l'exploitant d'une salle, l'acoustique active présente l'intérêt d'optimiser l'utilisation de son équipement ;
- pour les usagers (sur scène comme en salle), elle assure un grand confort acoustique ;

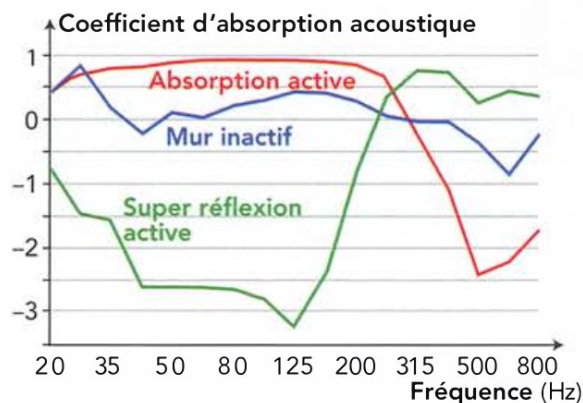
- pour les architectes et acousticiens, elle est le moyen de se libérer de certaines contraintes acoustiques, par exemple, une géométrie ou un type de matériaux qui ne procureraient pas les nécessaires réflexions du son.

## Document 2 – Acoustique active et réverbération

L'électronique associée à un mur actif permet de modifier son coefficient d'absorption acoustique,  $\alpha$ , et donc sa durée de réverbération, TR. La surface équivalente d'absorption, A, d'une salle est liée aux coefficients d'absorption,  $\alpha_i$ , des surfaces  $S_i$  qui la composent par la relation :

$$A = \sum_i \alpha_i S_i$$

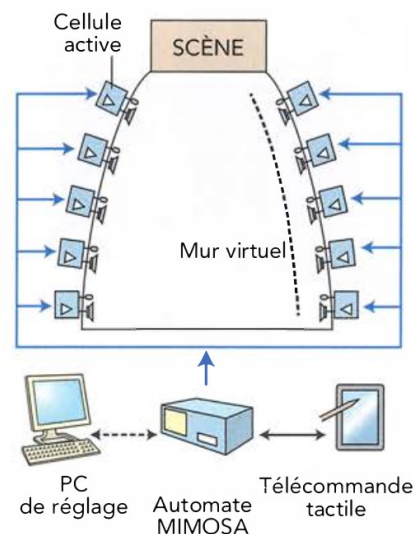
Dans la plupart des cas, la durée de réverbération est calculée par la relation de Sabine ; Grâce à ces dispositifs électroacoustiques, il est même envisageable d'obtenir des coefficients d'absorption négatifs.



## Document 3 – Un exemple d'acoustique active

« Carmen® , contrôle actif de la réverbération par mur virtuel à effet naturel, est une technique active totalement originale, conçue par les chercheurs du CSTB (Centre scientifique et technique du bâtiment). Elle est fondée sur un concept essentiel : pour les musiciens comme pour les spectateurs, la salle équipée de Carmen® doit respecter les lois naturelles de l'acoustique afin de préserver les couleurs sonores des instruments et la localisation des artistes. Le principe de Carmen® repose sur la création de murs virtuels actifs constitués d'un ensemble de cellules à réaction quasi locale, réparties autour de la salle, sur les murs et au plafond.

Chaque cellule capte et restitue en temps réel les sons comme s'ils étaient naturellement réfléchis. Une unité de traitement numérique spécialement développée effectue l'ensemble du traitement des signaux en temps réel. Cette architecture permet un contrôle facile et précis de tous les paramètres acoustiques et préserve la cohérence spatio-temporelle du champ sonore.



Chaque mur est constitué de plusieurs cellules actives ; un système complet en comporte de vingt à quarante. L'enrichissement du champ sonore s'obtient à partir de l'interaction entre les cellules, à l'image de ce qui se passe dans une salle de spectacle, où la réverbération se construit par le jeu des réflexions successives sur les parois.

[...] D'un spectacle à l'autre, les durées de réverbération souhaitables varient énormément : de 0,8 à 1,2 seconde pour un concert de jazz et de 1,8 à 2,5 secondes pour une symphonie romantique.

[... ] Ainsi, toutes les salles de spectacle peuvent instantanément moduler leurs caractéristiques acoustiques en fonction du spectacle. »

**i .** Critiquer l'affirmation écrite dans le document 2 : « Le son est pur ».

**j .** Expliquer les adjectifs « passive » et « active » qualifiant l'acoustique.

**k .** Comment peut être modifiée la durée de réverbération d'une salle en fonction des réglages d'un mur actif ?

**l .** Bilan : Commenter, en argumentant, l'expression « procédé révolutionnaire » pour qualifier l'acoustique active.

## 4 Exercices pour la séance n° 10

9.1 N° 3 p. 103 – Instruments à percussion

9.2 Exercice résolu n° 1 p. 118 – Auditorium

9.3 N° 4 p. 121 – Un réfectoire en salle de spectacles

9.4 N° 5 p. 121 – Aménagement d'un auditorium

## 5 Correction des exercices (séance n° 8)

### 8.1 N° 4 p. 84 – Reconnaissance vocale

Les quatre mots ne diffèrent que par leur voyelle. D'après le texte, le repérage des formants permet d'identifier les voyelles. Les formants correspondent à de fortes amplitudes, donc à des zones sombres sur les spectrogrammes fournis. En cas d'ambiguïté, on examine le reste des spectrogrammes (les autres composantes d'amplitude assez forte sont les zones colorées moins sombres qu'au niveau des formants).

On compare les spectrogrammes des quatre voyelles à ceux du document 4 et on déduit l'identification des quatre mots :

Spectrogrammes de référence	Formants	Autres composantes d'amplitude assez forte
Voyelle « i »	F <sub>1</sub> (200 Hz), F <sub>2</sub> (350 Hz)	Vers 500 Hz
Voyelle « è »	F <sub>1</sub> (200 Hz), F <sub>2</sub> (350 Hz), F <sub>3</sub> (450 Hz), F <sub>4</sub> (620 Hz), F <sub>5</sub> (800 Hz)	De 1000 à 2500 Hz tous les 150 Hz environ
Voyelle « o »	F <sub>1</sub> (200 Hz), F <sub>2</sub> (350 Hz), F <sub>3</sub> (450 Hz), F <sub>4</sub> (620 Hz), F <sub>5</sub> (800 Hz)	Dans le domaine 0-1000 Hz, mais aucune au-delà
Voyelle « ou »	F <sub>1</sub> (200 Hz), F <sub>2</sub> (350 Hz), F <sub>4</sub> (620 Hz)	Vers 600 et 800 Hz

Spectrogrammes à attribuer	Formants	Autres composantes d'amplitude assez forte
A	F <sub>1</sub> (200 Hz), F <sub>2</sub> (350 Hz)	Vers 600, 800, 1000 et 1150 Hz
B	F <sub>1</sub> (200 Hz), F <sub>2</sub> (350 Hz), F <sub>3</sub> (450 Hz), F <sub>4</sub> (620 Hz), F <sub>5</sub> (800 Hz)	De 1000 à 2500 Hz tous les 150 Hz environ
C	F <sub>1</sub> (200 Hz), F <sub>2</sub> (350 Hz), F <sub>3</sub> (450 Hz), F <sub>4</sub> (620 Hz), F <sub>5</sub> (800 Hz)	Dans le domaine 0-1000 Hz, mais aucune au-delà
D	F <sub>1</sub> (200 Hz), F <sub>2</sub> (350 Hz)	Vers 500 Hz

Grâce aux formants, on attribue le spectrogramme B au mot « lait » et le spectrogramme C au mot « lot ». Grâce aux formants et au reste du spectrogramme, on attribue le spectrogramme D au mot « lit ». Par élimination, on en déduit que le spectrogramme A est celui du mot « loup ».

### 8.2 N° 6 p. 85 – Forum de discussion

Canardoc ne répond pas à la question posée, mais sa réponse est importante en termes de sécurité.

La réponse de Chocopops est maladroite dans sa formulation, car ce n'est pas la perception de la fréquence qui est modifiée. Une fréquence n'est pas perçue, une onde sonore de fréquence l'est. Sa réponse est, de plus, incomplète, car elle ne précise rien sur la longueur d'onde qui intervient dans la relation entre  $v$  et  $f$ .

La réponse de Vince est totalement fautive : les cordes vocales vibrent, mais rien ne se fixe dessus.

La réponse de Titi du 33 est rigoureuse d'un point de vue scientifique. Elle s'appuie sur la relation :

$$\lambda = \frac{v}{f}$$

où  $\lambda$  est la longueur d'onde des ondes sonores (ici fixée par les dimensions de la caisse de résonance),  $v$  leur célérité et  $f$  leur fréquence.

La réponse de Zazou ne précise en rien en quoi la voix serait plus aiguë. De plus, le gaz inhalé l'est à température ambiante, il ne s'agit donc pas d'un problème de refroidissement.

### 8.3 N° 5 p. 85 – Directivité d'un haut-parleur

Le niveau d'intensité sonore  $L$  est donné par la relation :

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

Avec la valeur donnée à 1 m du niveau d'intensité sonore, on déduit l'intensité sonore  $I$  à 1 m sur l'axe principal du haut-parleur :

$$I = I_0 \cdot 10^{\frac{L}{10}} = 1,0 \cdot 10^{-1} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$$

On cherche l'intensité sonore à la distance  $d' = 50$  m de la source.

Lorsqu'une source émet de la même façon dans toutes les directions, l'intensité sonore est uniformément répartie sur une surface sphérique. Cette intensité varie donc comme l'inverse du carré de la distance à laquelle on se trouve de la source, elle est divisée par quatre lorsque la distance double.

Dans la situation de l'exercice, l'émission n'est pas la même dans toutes les directions. Cependant, dans une direction donnée, la relation précédente est toujours valable : l'intensité varie comme l'inverse du carré de la distance.

$$I' = \frac{0,1}{50^2} = 4 \times 10^{-5} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$$

Le niveau d'intensité sonore  $L'$  correspondant est donné par la relation :

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

$$L' = 10 \times \log \frac{4,0 \times 10^{-5}}{1,0 \times 10^{-12}}$$

$$L' = 76 \text{ dB}$$

À cette même distance, mais dans une direction faisant un angle de  $60^\circ$  avec l'axe principal, il y a une perte de 6 dB (voir le diagramme d'émission du haut-parleur). Conclusion : le niveau d'intensité sonore, à 50 m de la source et dans une direction repérée par  $\theta = 60^\circ$ , est donc de 70 dB.

#### 8.4 N° 2 p. 102 – L'harmonie selon le père Blaise (résolu)

1. Une octave est définie comme un intervalle de sons musicaux dont les fréquences limites sont dans un rapport de 2. La fréquence d'un  $\text{Do}_3$  est égale à deux fois la fréquence d'un  $\text{Do}_2$ , ces deux notes étant séparées d'une octave. Dans la gamme tempérée, l'octave est divisée en douze intervalles égaux appelés demi-tons. Deux notes séparées d'une octave sont séparées de 12 demi-tons.

Une quinte juste est définie comme un intervalle de sons musicaux dont les fréquences limites sont dans un rapport de  $3/2$ . Dans la gamme tempérée, le  $\text{La}_2$ , de fréquence 220 Hz, est à la quinte du  $\text{Ré}_2$ , de fréquence 147 Hz. Ces deux notes et de façon générale deux notes à la quinte sont séparées de 7 demi-tons.

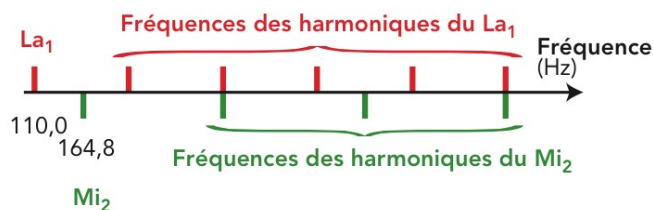
Une tierce majeure est définie comme un intervalle de sons musicaux de 4 demi-tons et dont les fréquences limites sont dans un rapport de  $5/4$ .

On parle d'harmonie entre deux sons lorsque le rapport des fréquences de leur fondamental est simple. Certains harmoniques de ces deux sons sont communs. Plus il y a d'harmoniques communs entre ces deux sons, plus ils sont harmonieux.

Un son correspondant à un  $\text{Fa}_2$  dont le fondamental a une fréquence  $f_{\text{Fa}_2} = 174,6 \text{ Hz}$  dans la gamme tempérée peut avoir des harmoniques de fréquences égales à  $2f_{\text{Fa}_2}$ ,  $3f_{\text{Fa}_2}$ ,  $4f_{\text{Fa}_2}$ , etc. Le  $\text{Fa}_3$  à l'octave du  $\text{Fa}_2$  a un fondamental de fréquence  $2f_{\text{Fa}_2} = 349,2 \text{ Hz}$  et des harmoniques de fréquences égales à  $4f_{\text{Fa}_2}$ ,  $6f_{\text{Fa}_2}$ , etc.

Le fondamental et tous les harmoniques du  $\text{Fa}_3$  ont des fréquences de valeurs identiques à celles de certains harmoniques du  $\text{Fa}_2$ . Ces deux sons sont très harmonieux.

Si on représente le fondamental et les harmoniques de deux sons à la quinte juste l'un de l'autre, par exemple, le  $\text{La}_1$  dont la fréquence du fondamental est de 110 Hz et le  $\text{Mi}_2$  dont la fréquence du fondamental est de 164,8 Hz, on constate que le 3<sup>e</sup> et le 6<sup>e</sup> harmoniques du  $\text{La}_1$  ont les mêmes fréquences que les 2<sup>e</sup> et 4<sup>e</sup> harmoniques du  $\text{Mi}_2$ . Ces deux sons à la quinte sont harmonieux. L'harmonie est moins importante que pour deux notes à l'octave, car elles ont moins d'harmoniques en commun.



Par un raisonnement analogue, deux notes séparées d'une tierce majeure ont en commun le 5<sup>e</sup> harmonique de la note la plus basse et le 4<sup>e</sup> de la note la plus haute.

2. On réalise l'acquisition de plusieurs sons à l'aide d'un microphone et d'une carte d'acquisition, par exemple. On compare leurs spectres en fréquences. Si les spectres en fréquences ont des harmoniques en commun (de même fréquence), les sons correspondant à ces spectres sont harmonieux.

#### 6.4 DM1 (exercice 6.4) – Les frettes d'une guitare

1. Le document 2 donne la formule reliant la fréquence  $f$  du fondamental émis par une corde, à sa longueur  $L$ , sa tension  $T$  et sa masse linéique  $\mu$  :

$$f = \frac{1}{2L} \sqrt{\frac{T}{\mu}} \quad (1)$$

On constate sur cette formule que si on diminue la longueur  $L$  ou la masse linéique  $\mu$ , ou si on augmente la tension  $T$ , la fréquence émise augmente.

2. Entre le Sol et le La de la même octave, le document 3 indique un écart de deux demi-tons. Autrement dit, il y a entre le Sol et le La un Sol dièse ou un La bémol, deux notes qui sont confondues dans la gamme tempérée.

Le document 3 indique aussi que pour passer d'une note à la suivante, de fréquence plus élevée, le guitariste bloque cette corde sur la case qui suit immédiatement, de façon à raccourcir la corde.

Par conséquent, pour passer du Sol au La, le guitariste devra déplacer son doigt de deux cases, ou tout au moins bloquer la deuxième case si il est en train de jouer la corde de Sol, à vide.

3. Le document 3 indique une fréquence de  $f_{\text{La}_3} = 440 \text{ Hz}$  pour le  $\text{La}_3$ . Notons  $f_{\text{Do}_3}$  la fréquence du  $\text{Do}_3$  et  $f_{\text{Do}_4}$  celle du  $\text{Do}_4$ . Une simple lecture du tableau proposé, en onzième et quatorzième ligne, permet d'écrire :

$$\begin{cases} f_{\text{La}_3} = (2)^{\frac{9}{12}} \times f_{\text{Do}_3} = 1,682 \times f_{\text{Do}_3} \\ f_{\text{Do}_4} = 2 \times f_{\text{Do}_3} \end{cases}$$

$$\Rightarrow \begin{cases} f_{\text{Do}_3} = \frac{f_{\text{La}_3}}{(2)^{\frac{9}{12}}} = \frac{440}{1,682} = 262 \text{ Hz} \\ f_{\text{Do}_4} = 2 \times f_{\text{Do}_3} = 262 \times 2 = 523 \text{ Hz} \end{cases}$$

4. Notons  $f$  la fréquence émise par la corde à vide et  $f_n$  la fréquence émise par la corde bloquée sur la case  $n$ . Les fréquences émises par la corde lorsque l'on appuie sur la première case, la seconde, la troisième et la quatrième sont :

$$f_1 = (2)^{\frac{1}{12}} \times f = 1,059 \times f$$

$$f_2 = (2)^{\frac{2}{12}} \times f = 1,122 \times f$$

$$f_3 = (2)^{\frac{3}{12}} \times f = 1,189 \times f$$

$$f_4 = (2)^{\frac{4}{12}} \times f = 1,260 \times f$$

On généralise facilement pour la case de rang  $n$  :

$$f_n = (2)^{\frac{n}{12}} \times f \quad (2)$$

L'expression (1) permet d'écrire :

$$f = \frac{1}{2L} \sqrt{\frac{F}{\mu}} \Leftrightarrow L = \frac{1}{2f} \sqrt{\frac{F}{\mu}} \quad (3)$$

Notons  $L_n$  la longueur de la corde, reliée à  $f_n$  par :

$$f_n = \frac{1}{2L_n} \sqrt{\frac{F}{\mu}} \Leftrightarrow L_n = \frac{1}{2f_n} \sqrt{\frac{F}{\mu}} \quad (4)$$

En remplaçant l'expression de  $f_n$  dans (4) par (2) :

$$L_n = \frac{1}{(2)^{\frac{n}{12}} \times 2f} \sqrt{\frac{F}{\mu}} \quad (5)$$

En remplaçant l'expression (3) dans (5) :

$$L_n = \frac{L}{(2)^{\frac{n}{12}}} \quad (6)$$

La corde a une longueur totale  $L$ , et une longueur partielle  $L_n$  quand elle est bloquée par la  $n^{\text{ième}}$  frette. Par conséquent, la distance  $d_n$  de la  $n^{\text{ième}}$  frette est :

$$d_n = L - L_n = \left(1 - \frac{1}{(2)^{\frac{n}{12}}}\right)L$$

On effectue l'application numérique pour les quatre premières frettes :

$$d_1 = \left(1 - \frac{1}{2^{\frac{1}{12}}}\right) \times 65,2 = 3,6 \text{ cm}$$

$$d_2 = \left(1 - \frac{1}{2^{\frac{2}{12}}}\right) \times 65,2 = 7,1 \text{ cm}$$

$$d_3 = \left(1 - \frac{1}{2^{\frac{3}{12}}}\right) \times 65,2 = 10,4 \text{ cm}$$

$$d_4 = \left(1 - \frac{1}{2^{\frac{4}{12}}}\right) \times 65,2 = 13,5 \text{ cm}$$

En guise de vérification, en première analyse, on peut remarquer que les frettes sont de plus en plus rapprochées. En seconde analyse, on mesure au double-décimètre la longueur totale de la corde (14,4 cm sur la photo) et la position des quatre premières frettes (respectivement, 0,8 cm, 1,5 cm, 2,2 cm et 2,9 cm), et on divise les quatre dernières par la première pour tenir compte de l'échelle de la photographie :

$$d_1 = \frac{0,8}{14,4} \times 65,2 = 3,6 \text{ cm}$$

$$d_2 = \frac{1,5}{14,4} \times 65,2 = 6,8 \text{ cm}$$

$$d_3 = \frac{2,2}{14,4} \times 65,2 = 10 \text{ cm}$$

$$d_4 = \frac{2,9}{14,4} \times 65,2 = 13 \text{ cm}$$

Les résultats concordent relativement bien malgré les fortes incertitudes sur les mesures, puisque 0,1 mm d'erreur sur la mesure au double décimètre nous fait une erreur de :

$$\frac{0,1}{14,4} \times 65,2 = 0,5 \text{ cm}$$

sur les évaluations des longueurs à partir de la photographie. On remarque que les valeurs calculées sont bien toutes dans l'intervalle d'erreur.

## 6 Le barème curseur pour la notation (en vue du DS n° 2)

<b>Argumentaire satisfaisant</b> Problématique respectée ET Bonne mise en relation des arguments avec la problématique ET Argumentaire correctement rédigé		<b>Argumentaire satisfaisant</b> Problématique non prise en compte OU Une mise en relation maladroite OU Une rédaction maladroite		<b>Aucun argumentaire</b> Uniquement des idées juxtaposées sans lien entre elles ni lien avec la problématique posée
Les éléments scientifiques (connaissances issues des différents champs disciplinaires) sont solides (complets et pertinents)	Des éléments scientifiques (connaissances issues des différents champs disciplinaires) incomplets	Des éléments scientifiques solides (connaissances issues des différents champs disciplinaires) bien choisis	Des éléments scientifiques (connaissances issues des différents champs disciplinaires) incomplets ou mal choisis	Des éléments scientifiques (connaissances issues des différents champs disciplinaires) corrects
8	6	5	3	2 ou 1