

Mots-clefs « *acoustique active* », « *instruments à percussion* » et « *instruments électroniques* ».

1 Activité documentaire : les instruments à percussion

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 ?

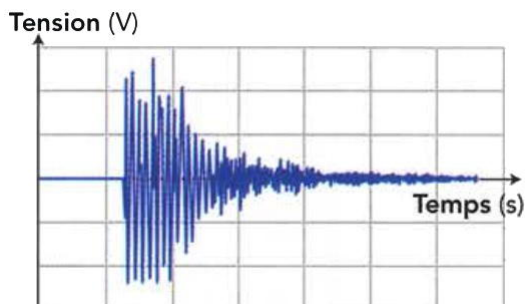
Document 1 – Spectre inharmonique

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

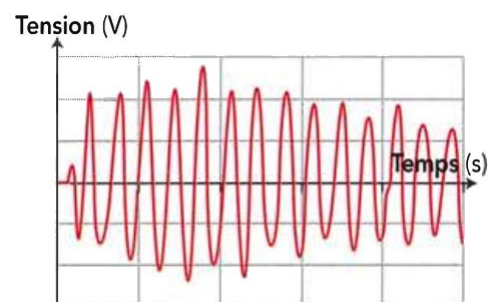
La timbale est formée d'une membrane circulaire ; cette « peau » est aujourd'hui fabriquée en mylar, un polymère

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 : matériaux actifs

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 :

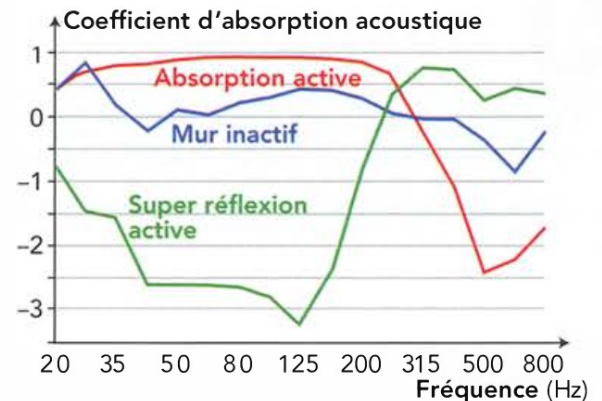
- pour l'exploitant d'une salle, l'acoustique active présente l'intérêt d'optimiser l'utilisation de son équipement ;
- pour les usagers (sur scène comme en salle), elle assure un grand confort acoustique ;
- pour les architectes et acousticiens, elle est le moyen de se libérer de certaines contraintes 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

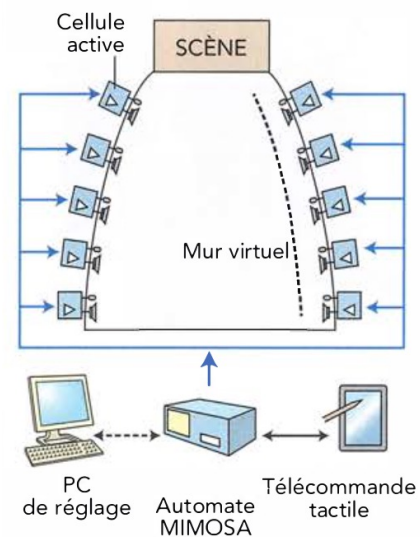
L'électronique associée à un mur actif permet de modifier son coefficient d'absorption acoustique, α , et donc sa durée de réverbération, TR . La surface équivalente d'absorption, A , d'une salle est liée aux coefficients d'absorption, α_i , des surfaces S_i qui la composent par la relation :

$$A = \sum_i \alpha_i S_i$$

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 spatiotemporelle 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. »

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

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

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

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

3 Activité documentaire : l'isolation phonique

Un logement situé au-dessus d'un bar, dans une rue bruyante ou entouré par des voisins musiciens, doit avoir une isolation phonique parfaite. Pour prévoir le couplage acoustique entre une salle et son entourage, les acousticiens et architectes utilisent des indices d'affaiblissement.

Document 1 – Quelques définitions

L'**indice d'affaiblissement** R d'une paroi est la différence entre le niveau sonore incident et le niveau sonore transmis par la paroi :

$$R = L_{\text{incident}} - L_{\text{transmis}}$$

R s'exprime en dB. L'indice d'affaiblissement total de parois superposées est égal à la somme des indices d'affaiblissement de chacune des parois :

$$R_{\text{mur}} = \sum R_{\text{parois}}$$

Il y a **couplage acoustique** entre deux salles lorsqu'une salle réceptrice reçoit de l'énergie sonore d'une salle émettrice. La différence entre le niveau sonore dans la salle émettrice et le niveau sonore dans la salle réceptrice s'appelle **indice d'affaiblissement brut** D , mesuré en dB.

$$D = R + 10 \cdot \log \left(\frac{A}{S} \right)$$

R est l'indice d'affaiblissement de la paroi de surface S ;

A est l'absorption de la salle réceptrice, en mètre carré (m^2), dont la définition a été donnée lors de la séance précédente.

Plus cet indice est élevé, meilleure est l'isolation phonique.

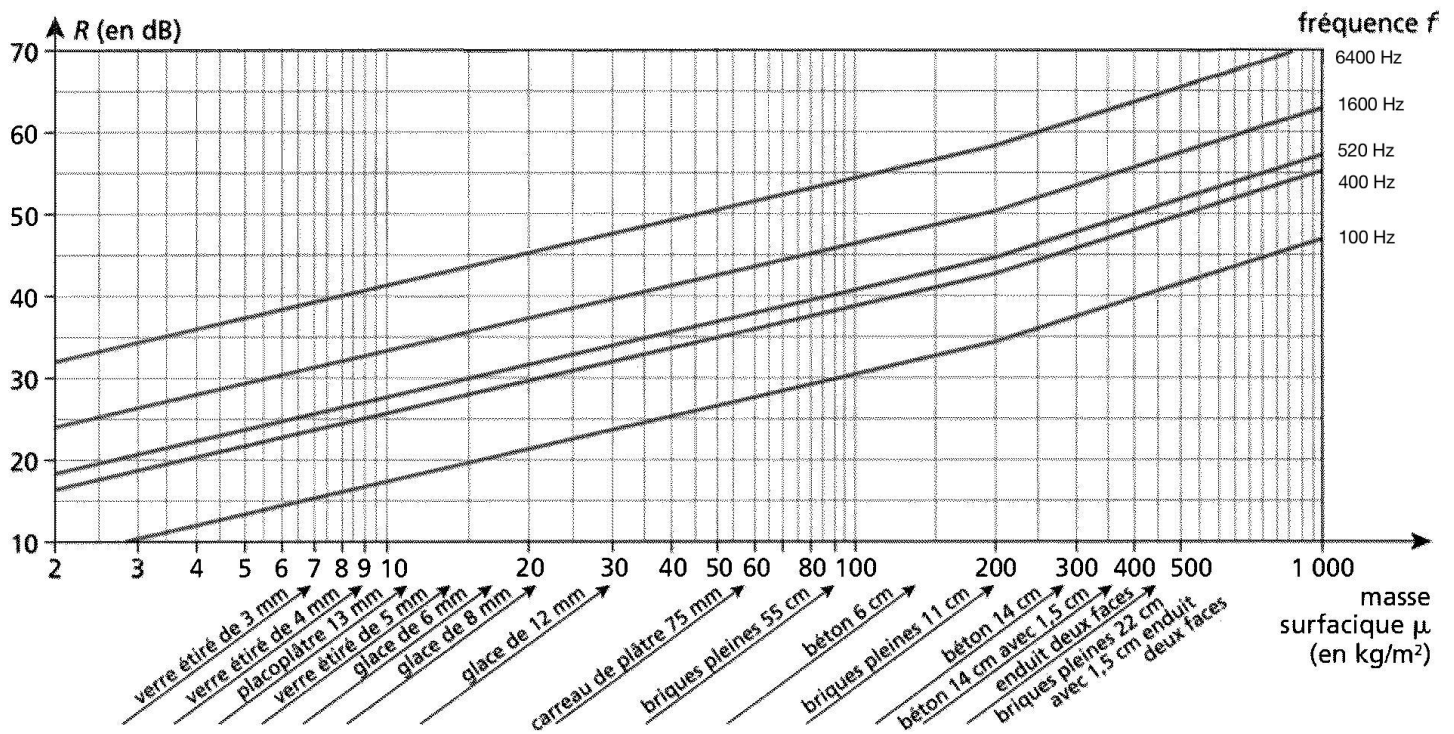
Document 2 – Abaque des indices d'affaiblissement R

Une abaque permet de représenter l'évolution d'une grandeur en fonction de deux paramètres. L'abaque ci-dessous permet de trouver l'indice d'affaiblissement R en fonction de la fréquence f du son et de la masse surfacique μ (masse de la paroi par unité de surface). L'exemple de quelques matériaux courants dans la construction est indiqué.

Ainsi, pour un son de fréquence égale à 520 Hz, l'indice d'affaiblissement R d'une paroi en briques pleines de 11 cm d'épaisseur vaut 45 dB.

f. Sur l'abaque, effectuer un tracé pour mettre en évidence l'exemple précédent.

g. Justifier que 14 cm de béton permette, à la même fréquence, de doubler l'intensité sonore I absorbée.



h. Calculer la longueur d'onde λ d'une onde sonore de 400 Hz. Justifier alors l'emploi de la masse surfacique (en kilogramme par mètre-carré) plutôt que la masse volumique (en kilogramme par mètre-cube) comme paramètre d'influence de la valeur R .

i. Le raisonnement précédent est-il toujours valable à 5 kHz ?

j. Pourquoi perçoit-on mieux les graves que les aiguës au travers d'une paroi ?

k. Pour améliorer l'isolation phonique d'une pièce d'absorption $A = 40 \text{ m}^2$, un habitant change la fenêtre composée d'une vitre en verre de 4 mm d'épaisseur et de surface $S = 3,0 \text{ m}^2$. En considérant que le bruit de la rue est émis à 400 Hz, calculer la valeur de D de la pièce de l'ancienne fenêtre.

4 Activité expérimentale : l'isolation phonique

4.1 Matériel disponible



On cherche à mettre en évidence expérimentalement les lois évoquées ci-dessus.

Pour ces expériences, on dispose :

- d'un caisson acoustique jouant le rôle de chambre

sourde ;

- d'un haut-parleur relié à un GBF comme source sonore ;
- d'un sonomètre permettant de mesurer le niveau d'intensité sonore ;
- de plaques de matériaux différents.

Attention : toutes les mesures seront effectuées avec le caisson fermé.

4.2 Vérification de la loi des masses

- Positionner sonomètre et haut-parleur, émettre un son à une fréquence de 1000 Hz ;
- Relever la valeur affichée au sonomètre ;
- Recommencer la manipulation en intercalant une plaque de différents matériaux ;
- Recommencer avec deux plaques ;
- Consigner les résultats dans un tableau.

4.3 Vérification de la loi masse-ressort-masse

- Proposer un protocole expérimental permettant de vérifier la loi « masse-ressort-masse ».
- Réaliser l'expérience avec l'accord du professeur.
- Consigner les résultats dans un tableau.

4.4 Influence de la fréquence

- Proposer un protocole expérimental de montrer que l'affaiblissement acoustique dépend de la fréquence du son.
- Réaliser l'expérience avec l'accord du professeur.

- Consigner les résultats dans un tableau.

1. Classer les matériaux testés, du meilleur au moins bon isolant acoustique.

Vérifient-ils la loi des masses ?

m. Quel est le meilleur matériau ressort dans la loi « masse-ressort-masse » ?

n. Dans les expériences proposées, définir les différentes sources d'erreur à prendre en compte.

o. Pourquoi dans les doubles vitrages « phoniques » utilise-t-on des vitres d'épaisseurs différentes ?

5 Activité documentaire : principe d'un synthétiseur

Depuis l'apparition des premiers synthétiseurs à la fin du XIX^e siècle, la musique électrique ou électronique n'a cessé de se développer. Aujourd'hui, les ordinateurs permettent des fonctionnalités très étendues, mais le principe reste quasiment le même que celui des synthétiseurs à clavier : un son est produit par un oscillateur (analogique ou numérique), puis traité de différentes manières. Découvrons le principe d'un synthétiseur.

Document 1 – Zeth, un logiciel de synthèse sonore



Ce logiciel est un freeware disponible sur le site suivant :

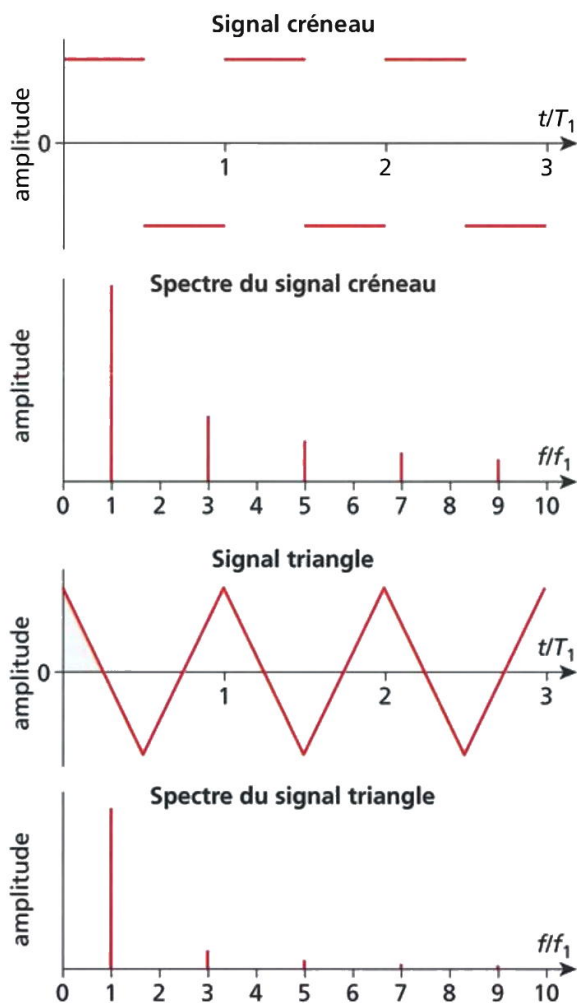
<http://www.dskmusic.com/dsk-zeth/>

Ce logiciel possède trois oscillateurs. Pour chacun, il est possible de régler, entre autres, la forme du signal, l'amplitude et la fréquence, et d'assigner ou non un filtre (défini dans la zone entourée en bleu). Plusieurs tihres sont possibles : passe-bas (LP sur le logiciel), passe-haut (HP) et passe-bande (BP).

Document 2 – Signaux et spectres

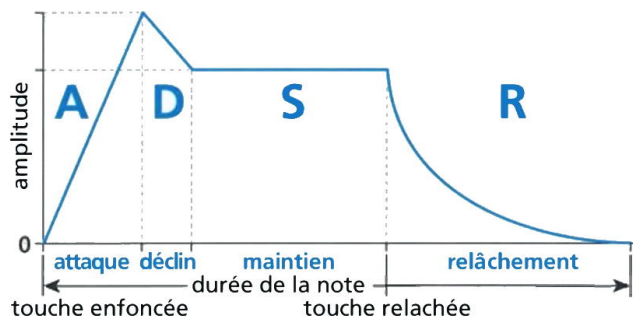
L'analyse de Fourier est un outil mathématique permettant de faire le lien entre un signal périodique et son spectre en fréquences. Un signal sinusoïdal de période T_1 ne comporte, dans son spectre, qu'un pic à la fréquence $f_1 = 1/T_1$. Les représentations temporelles et les spectres

en fréquences de deux autres signaux simples, créneau et triangle, sont donnés page suivante.



Document 3 – Enveloppe d'un son

Pour créer un son musical ressemblant à celui d'un instrument de musique, les instruments électroniques ne doivent pas se contenter de produire un son périodique de spectre donné. Ils doivent tenir compte également de l'évolution au cours du temps, pour une note donnée, du timbre et de l'amplitude du son. Ainsi, l'enveloppe d'un son musical est souvent découpée en quatre zones nommées A, D, S et R : l'attaque (*attack* en anglais), le déclin (*decay*), le maintien (*sustain*) et le relâchement (*release*).



Le timbre du son peut varier au cours de ces quatre étapes. Les synthétiseurs permettent de filtrer ou d'amplifier chaque zone séparément.

Document 4 – Synthèses numériques d'un son

La synthèse additive d'un son consiste à créer un signal par superposition de signaux sinusoïdaux de fréquences données. La synthèse soustractive, elle, utilise des filtres pour supprimer des fréquences dans le spectre de sons complexes produits par des oscillateurs (par exemple signaux créneau, triangle ou dents de scie).

- p. En vous appuyant sur vos connaissances des sons musicaux et en utilisant les documents présentés, vous rédigerez un texte de synthèse expliquant le mode de production d'un son musical par un synthétiseur ou un ordinateur. Vous détaillerez en particulier le principe de la synthèse additive et celui de la synthèse soustractive. Votre texte sera agrémenté d'un ou plusieurs schémas explicatifs.

6 Correction des exercices de la séance n° 8

8.1 À bâtons rompus

1. Formule de Sabine $TR = 0,16 \cdot V/A$, pour la réponse impulsionnelle d'une salle (temps nécessaire pour que le niveau sonore baisse de 60 dB).
2. L'écho est une réflexion simple, juste un aller-retour. La réverbération est la somme de toutes les réflexions.
3. Oppressante.
4. Meubler la pièce, recouvrir les murs, etc.
5. Oui.
6. TR plus important pour Notre Dame de Paris que pour l'Opéra Bastille. Les deux lieux n'ont pas la même vocation !

8.2 Échos en tout genre

1. Pour aller jusqu'au mur puis revenir, le son met un temps :

$$t = 2\frac{d}{c}$$

On suppose que le son direct parvient instantanément de la bouche à l'oreille. On entend un écho si :

$$2\frac{d}{c} > 50 \text{ ms} \Rightarrow d > 8,5 \text{ m}$$

2. Le son direct, de l'acteur au spectateur, parcourt 15 m, tandis que la réflexion parcourt 25 m. Ce trajet supplémentaire de 10 m correspond à un retard de :

$$t = \frac{d}{c} = \frac{10}{340} = 29 \text{ ms}$$

L'écho n'est donc pas perçu, et on peut enlever sans crainte la tenture. On peut montrer que l'écho risque d'être perçu si la profondeur de la scène est supérieure à 8,5 m.

3. Considérons une rangée située à la distance d de la falaise. L'écho parcourt une distance supplémentaire égale à $2d$. L'écho est perceptible s'il arrive 50 ms après le son direct. Mais ce temps ne correspond plus forcément à une distance de 8,5 m, puisqu'il faut tenir compte de la variation de la célérité avec la température.

Calculons le temps nécessaire pour parcourir la distance $2d$, en tenant compte de l'effet de la température. À 10 °C, la célérité du son vaut :

$$c = 20\sqrt{T} = 20 \times \sqrt{283} = 336 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$$

Le durée t pour parcourir la distance $2d$ vaut :

$$t = 2\frac{d}{c} \Leftrightarrow d = \frac{ct}{2}$$

Avec $t = 50 \text{ ms}$, toutes les rangées à plus de $d = 8,4 \text{ m}$ seront gênées par l'écho.

À 30 °C, la célérité du son vaut :

$$c = 20\sqrt{T} = 20 \times \sqrt{303} = 348 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$$

Cette fois-ci, les rangées à plus de $d = 8,7 \text{ m}$ seront gênées par l'écho.

Pour tout l'exercice, on pose les symboles suivants :

Longueur de la salle : $L = 15,00$ m ;

Largeur de la salle : $l = 8,00$ m

Hauteur sous plafond de la salle : $h = 3,50$ m

1. Le volume de la salle est égal à :

$$V = L \times l \times h = 15,00 \times 8,00 \times 3,50 = 420 \text{ m}^3.$$

D'après le document n°1, une salle de restauration d'un volume supérieur à 250 m^3 doit avoir un temps de réverbération moyen TR inférieur à 1,2 s. Or le temps de réverbération du réfectoire est égal à 2,0 s, donc il est nécessaire de le diminuer.

2.

	Surface (m ²)	Matériau
Plafond	$L \times l = 120 \text{ m}^2$	Plâtre
Sol	$L \times l = 120 \text{ m}^2$	Carrelage
Portes	$2 \times 2,00 \times 3,00 = 12,0 \text{ m}^2$	Bois
Fenêtres	$6 \times 6,00 = 36,0 \text{ m}^2$	Verre
Murs (ouvertures non comprises)	$2 \times L \times h + 2 \times l \times h - 12,0 - 36,0 =$ $2 \times 15,00 \times 3,50 + 2 \times 8,00 \times 3,50 - 12,0$ $- 36,0 =$ 113 m^2	Plâtre

3. Sur la feuille de brouillon :

Analysons le problème :

- La valeur du TR après les travaux doit respecter la législation (voir question 1 + document 1). TR est trop élevé, on doit le diminuer.
- TR est inversement proportionnel à A : ainsi, pour diminuer TR, on doit augmenter A.
- La valeur de A dépend de la nature des différents matériaux ainsi que des surfaces. Ces informations sont connues de la question 2.
- Lors des travaux, seul le plafond est modifié. Afin d'augmenter la valeur de A, seul le coefficient α du plafond est augmenté.
- Les matériaux ont des prix différents ; ce facteur doit être pris en compte également.

Sur la copie :

Le temps de réverbération doit être au maximum égal à 1,2 s (d'après le document n°1), déterminons la surface d'absorption équivalente minimale :

D'après le document 2 : $TR = 0,16 \times \frac{V}{A}$

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

$A = 0,16 \times \frac{420}{1,2} = 56 \text{ m}^2$ ainsi, la valeur de la surface équivalente d'absorption A doit être supérieure à 56 m^2 .

Expression de la surface A d'absorption équivalente de la salle :

D'après le document 2 : $A = \sum \alpha_i \times S_i$

Dans notre cas :

$$A = \alpha_{\text{plafond}} \times S_{\text{plafond}} + \alpha_{\text{sol}} \times S_{\text{sol}} + \alpha_{\text{portes}} \times S_{\text{portes}} + \alpha_{\text{fenêtres}} \times S_{\text{fenêtres}} + \alpha_{\text{murs}} \times S_{\text{murs}} + A_M$$

Déterminons la valeur minimale de α_{plafond} qui permette d'obtenir une valeur de A au moins égale à 56 m^2 .

$$\alpha_{\text{plafond}} \times S_{\text{plafond}} = A - (\alpha_{\text{sol}} \times S_{\text{sol}} + \alpha_{\text{portes}} \times S_{\text{portes}} + \alpha_{\text{fenêtres}} \times S_{\text{fenêtres}} + \alpha_{\text{murs}} \times S_{\text{murs}} + A_M)$$
$$\alpha_{\text{plafond}} = \frac{A - (\alpha_{\text{sol}} \times S_{\text{sol}} + \alpha_{\text{portes}} \times S_{\text{portes}} + \alpha_{\text{fenêtres}} \times S_{\text{fenêtres}} + \alpha_{\text{murs}} \times S_{\text{murs}} + A_M)}{S_{\text{plafond}}}$$

Remplaçons les coefficients d'absorption acoustique par les valeurs données dans le document n°4 :

$$\alpha_{\text{plafond}} = \frac{56 - (0,020 \times 120 + 0,15 \times 12 + 0,18 \times 36 + 0,030 \times 113 + 12,5)}{120}$$

$$\alpha_{\text{plafond}} = 0,24525 = 0,25 \text{ avec deux chiffres significatifs}$$

Choix du matériau :

- S'il s'agit juste de diminuer le temps de réverbération, tous les matériaux peuvent convenir, car les 5 isolants proposés ont un coefficient d'absorption acoustique supérieur à celui du plâtre (0,030).
- Pour diminuer le temps de réverbération afin de se mettre en règle avec la législation (document n°1), le coefficient d'absorption acoustique α du matériau doit être au moins égal à 0,25, donc seul l'isolant n°1 ne convient pas.
- L'isolant choisi ainsi que la pose ont un coût : on préférera choisir le matériau le moins coûteux des quatre matériaux possibles. Donc **l'isolant n°2** est le matériau donnant le meilleur compromis isolation / prix (40 €/m² pour l'isolant n°2 contre 180 €/m² pour l'isolant n°5).

7 Exercice pour la séance n° 10

Avant la rénovation d'une salle de classe, on réalise une étude acoustique afin d'améliorer ses qualités sonores.

À la suite d'une telle étude, des travaux sont programmés pour diminuer le temps de réverbération. Le technicien, responsable de l'étude, préconise de diminuer le volume de la pièce en fabriquant un faux plafond constitué d'un matériau isolant acoustique. Cette rénovation se fera sans occulter les fenêtres de façon à conserver un maximum de clarté, tout en ramenant le temps de réverbération à sa limite inférieure préconisée par l'arrêté du 25 avril 2003.

L'objectif de cet exercice est de vérifier si ces travaux vont permettre de respecter les contraintes évoquées précédemment.

Document 1. Éléments d'acoustique

Noté TR , le temps de réverbération d'une salle est la durée, exprimée en seconde, au bout de laquelle le niveau sonore a diminué de 60 dB quand la source sonore est arrêtée.

On le calcule théoriquement à l'aide de la formule de Sabine :

$$TR = 0,16 \cdot \frac{V}{A} \quad \text{avec :} \quad \begin{cases} V : \text{volume de la salle en m}^3 \\ A : \text{surface d'absorption équivalente de la salle en m}^2 \end{cases}$$

La surface d'absorption équivalente d'une salle se détermine en faisant la somme des surfaces d'absorption équivalentes des différents éléments constitutifs et présents dans la salle :

$$A_{\text{salle}} = \sum A_i$$

La surface d'absorption équivalente d'un matériau i dépend de la surface S_i (en m^2) qu'il occupe et de son coefficient d'absorption acoustique du matériau α_i selon la relation :

$$A_i = \alpha_i \cdot S_i$$

Document 2. Extrait de l'arrêté du 25 avril 2003

D'après l'arrêté du 25 avril 2003 relatif à la limitation du bruit dans les établissements d'enseignement pour un local dont le volume est inférieur à 250 m^3 , le temps de réverbération doit être compris entre 0,4 s et 0,8 s. Pour un local dont le volume est supérieur, il sera compris entre 0,6 s et 1,2 s.

Document 3. Caractéristiques de la salle de classe

La salle étudiée est un parallélépipède rectangle de longueur 7,50 m et de largeur 7,30 m. Le plafond initial est à 4,10 m. Le haut des fenêtres est à 2,80 m du sol. Le temps de réverbération avant travaux est de 1,1 s.

Éléments architecturaux à prendre en compte	Caractéristiques			Surface d'absorption équivalente A
	Matériau	Surface	Dimensions	
Mur	plâtre	non communiquée	non communiquées	non communiquée
Sol	carrelage	54,8 m ²	7,30 m × 7,50 m	1,09 m ²
Plafond	plâtre	54,8 m ²	7,30 m × 7,50 m	1,64 m ²
Faux plafond	Isolant acoustique	54,8 m ²	7,30 m × 7,50 m	35,6 m ²
Deux fenêtres	verre	6,0 m ² de surface totale	2 × (2,00 m × 1,50 m)	0,60 m ²
Une porte	bois	1,93 m ²	2,15 m × 0,90 m	0,39 m ²
Mobilier scolaire				25 m ²

Question préliminaire

Quels sont les paramètres qui permettent de réduire le temps de réverbération ? Préciser dans quel sens ils doivent varier.

Problème

À quels travaux est-il nécessaire de procéder, dans la salle de classe, sans pour autant occulter les fenêtres, afin de ramener ses caractéristiques acoustiques aux normes en vigueur ?

Le candidat répondra à l'aide d'un raisonnement clairement exposé en détaillant les calculs nécessaires à la résolution du problème. Il est invité à porter sur la copie toute démarche même si cette dernière n'est pas menée jusqu'au bout car elle sera évaluée.