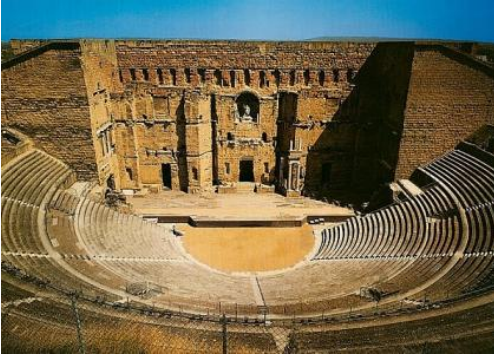


Mots-clefs « Auditorium », « Réverbération » et « Isolation phonique ».

1 Activité documentaire : l'acoustique des théâtres antiques (30 minutes)

L'acoustique extraordinaire des théâtres antiques grecs ou romains, véritables auditorium, n'est certainement pas due au hasard. Leur architecture permet-elle d'expliquer ces prodiges acoustiques ?

1.1 Document n° 1 : des vases aux théâtres



Le théâtre antique d'Orange est l'unique théâtre antique d'Europe à avoir conservé son mur de représentation.

« Il faudra faire, selon les proportions mathématiques, des vases d'airain qui soient en rapport avec l'étendue du théâtre ; leur grandeur doit être telle que, venant à être frappés, ils rendent des sons qui répondent entre eux à la quarte, à la quinte et aux autres consonances, jusqu'à la double octave. Ensuite, ils devront être placés, d'après les règles établies pour la musique, dans des niches pratiquées entre les sièges du théâtre, de manière qu'ils ne touchent pas le mur, et qu'ils aient un espace vide tout autour et par-dessus. Ils seront renversés et soutenus du côté qui regarde la scène par des coins d'un demi-pied de hauteur au moins ; ces niches auront aux flancs des assises qui forment les degrés inférieurs, des ouvertures longues de deux pieds et hautes d'un demi-pied.

[...] Grâce à cette disposition, la voix, partant de la scène comme d'un centre, s'étendra en rond, viendra frapper les cavités de chaque vase, et prendra plus de force et de clarté, selon la consonance que son degré d'élévation aura avec le vase qui y correspondra.

[...] On dira peut-être qu'il se fait tous les ans à Rome bon nombre de théâtres, sans qu'on tienne compte de ces règles : ce serait une erreur ; tous les théâtres publics sont de bois avec plusieurs planches qui résonnent nécessairement. Qu'on examine les musiciens ; ont-ils à faire entendre des sons élevés ? Ils se tournent vers les portes de la scène dont le retentissement vient aider leur voix. Mais lorsqu'on bâtit un théâtre avec des moellons, des pierres de taille, du marbre, toutes matières solides

qui ne peuvent résonner, c'est alors qu'il en faut faire l'application. »

Extrait de M. VITUNIVS POLLIO, *L'architecture de Vitruve*, traduction de DE BIOL, Livre V §V, 1816.

1.2 Document n° 2 : origine de l'acoustique

« Pour Nico DECLERCQ et Cindy DEKEYSER, du Georgia Institute of Technology, à Atlanta (USA), la qualité acoustique du théâtre d'Épidaure (Grèce, semblable à celui d'Orange, *NdP*) serait liée à la disposition de ses rangées de sièges.

D'après leurs calculs, la succession périodique des marches du théâtre serait géométriquement optimisée pour filtrer les basses fréquences, composante principale du bruit de fond qui masque généralement le son perçu loin de la scène, tout en préservant les hautes fréquences provenant de la voix des acteurs. L'agencement particulier des gradins permettrait ainsi d'atténuer les fréquences inférieures à 500 Hz au profit des fréquences plus élevées.

D'après les chercheurs, le bruit de fond du théâtre d'Épidaure était vraisemblablement dominé par des basses fréquences telles que le bruissement des arbres ou le brouhaha de spectateurs distraits. Le fait de filtrer ces basses fréquences améliorerait l'audibilité de la voix des artistes, riches en hautes fréquences. Comme l'explique DECLERCQ, « La fréquence de coupure est juste là où il faut pour éliminer le bruit de fond que l'on avait sans doute dans cet amphithéâtre à l'époque ».

Le chercheur souligne cependant que la présence de spectateurs assis modifie cet effet acoustique de manière bien plus difficilement prévisible. En effet, le corps humain, non homogène, répercute les ondes sonores différemment suivant la silhouette de chaque spectateur.

L'élimination des basses fréquences s'applique aussi bien au bruit de fond qu'aux voix graves des acteurs. Ceci ne constituerait cependant pas un problème majeur, car le système auditif humain est capable de reconstituer les basses fréquences manquantes. S'appuyant sur un phénomène neurologique, le cerveau humain va reconstruire la source sonore, pour le plus grand plaisir du spectateur ! »

Extrait de A. LEROUXEL, *La brève*, Spectro Sciences et www.la-grece.com

1.3 Document n° 3 : expériences d'acoustiques du Pr. F. CANAC

Pour expliquer l'acoustique des théâtres antiques, le professeur F. CANAC, un acousticien français, a réalisé, en

1965, une série de mesures sur des maquettes.



Étude acoustique du théâtre d'Orange à l'aide d'une maquette.

Afin d'étudier les propriétés sonores de ces architectures réduites, il utilise des ultrasons. La fréquence des ultrasons est choisie de telle sorte que leur longueur d'onde soit réduite avec le même facteur d'échelle que la maquette. Des documents vidéos de ces expériences sont consultables sur le site www.cerimes.fr.

1.4 Document n° 4 : des controverses sur l'acoustique des théâtres antiques

« Depuis quelques années, on assiste à un regain d'intérêt pour l'acoustique des théâtres antiques, dont de nombreux vestiges égayent le paysage méditerranéen de l'Ancien Monde gréco-romain. En général, les articles sur le sujet se basent sur des mesures du champ sonore réalisées dans des théâtres importants, comme ceux d'Épidaure et de Dodone, d'Aphrodisias et d'Aspendos. Parfois, il s'agit simplement de mieux connaître les qualités auditives de ces lieux où l'on monte encore régulièrement des spectacles. Le problème est alors que ces mesures se réalisent le plus souvent en l'absence de tout public, bien que les spectateurs modifient particulièrement l'acoustique de ces architectures de pierre.

Souvent aussi, ces mesures sont un prétexte pour éva-

luer des programmes de simulation basés sur le lancer de rayons, qui tiennent ou non compte de la réflexion diffuse. Il est alors malaisé d'en déduire les propriétés originelles de ces théâtres qui ne sont plus que des ruines, certes parfois dans un état de conservation remarquable, mais dont les revêtements de marbre ont disparu et dont les pierres mêmes sont fortement érodées, ce qui affecte particulièrement les composantes spéculaires et diffuses du son réfléchi. À notre avis, le résultat de ces travaux est qu'on donne trop d'importance à des effets secondaires (réflexions multiples entre la scène et les gradins, ou entre les parties opposées des gradins) qui disparaissent presque complètement lorsque le public s'installe, qui n'expliquent en rien la genèse ni la fonction de ces théâtres, qui tiennent peu compte des motivations de leurs architectes, et qui ne peuvent guère, finalement, nous orienter dans nos propres projets d'architecture. »

Extrait de B. BECKERS et N. BORGIA, *Le modèle acoustique du théâtre grec*, Département génie des systèmes urbains, Université de Technologie de Compiègne, www.heliodon.net

1.5 Questions

- Sur quels phénomènes physiques VITRUVÉ s'appuie-t-il pour améliorer l'acoustique des théâtres ? Quels autres éléments le document 2 met-il en évidence ?
- Quel protocole devrait être mis en œuvre avec la maquette du professeur CANAC pour confirmer l'hypothèse des chercheurs N. DECLERCQ et C. DEKEYSER ? Quelles seraient les observations attendues ?
- Quels nouveaux éléments apporte le document 4 par rapport aux documents précédents ? Comment ces éléments pourraient-ils être étudiés à l'aide de la maquette du professeur CANAC ?
- Bilan – D'après l'ensemble des documents, quels éléments de l'architecture des théâtres antiques contribuent à leur qualité acoustique ?

2 Activité documentaire : réduction des bruits des transports

2.1 Document n° 1 : situation problème

Parmi les moyens utilisés pour réduire le bruit de la circulation automobile ou ferroviaire se propageant dans l'environnement, les murs antibruit constituent souvent un outil efficace, notamment en milieu urbain.

Comment les murs antibruit agissent-ils sur la propagation du son ?



Murs antibruit en polychlorure de vinyle (PVC).

« Circulation routière ou aérienne, engins de chantiers, ateliers de fabrication, concerts, moteurs de tondeuses, les bruits que l'on perçoit ou que l'on génère constituent de véritables nuisances pour l'environnement (l'homme et la faune). Le bruit apparaît aujourd'hui comme la première nuisance environnementale et constitue la préoccupation majeure des populations. »

Extrait du site www.ademe.fr

2.2 Document n° 2 : les murs antibruit

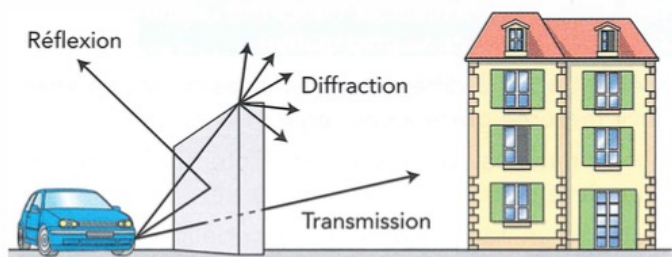


Schéma de principe d'un mur antibruit.

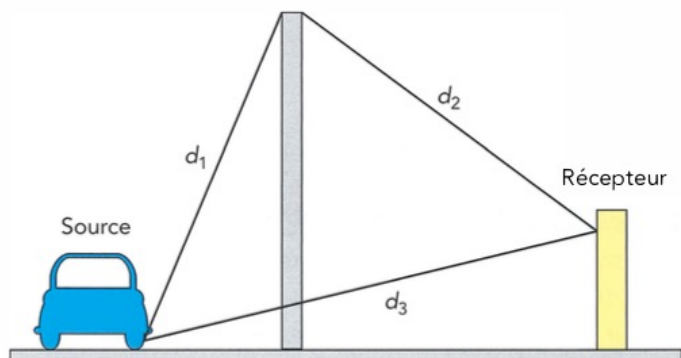
Les murs antibruit placés entre la source du bruit et les bâtiments exposés permettent de réduire les nuisances sonores de 8 à 12 dB.

Les caractéristiques d'un mur antibruit et son implantation doivent prendre en compte les ondes diffractées et transmises du côté des bâtiments et les ondes réfléchies du côté exposé au trafic.

L'atténuation dépend des caractéristiques géométriques du mur, principalement sa hauteur, et de son implantation.

D'après L. SCHRIVER-MAZZUOLI, *Nuisances sonores*, Dunod, collection technique et ingénierie, 2007.

2.3 Document n° 3 : influence de la géométrie



Géométrie d'un mur antibruit.

La géométrie de l'ensemble {source, récepteur, mur} a une influence sur l'atténuation du son. On définit le nombre N comme une caractéristique de la géométrie de l'ensemble {source, récepteur, mur} :

$$N = \frac{2}{\lambda} (d_1 + d_2 - d_3)$$

Pour l'ensemble {source, récepteur, mur} schématisé ci-dessus, le tableau suivant indique l'atténuation A en décibel (dB), réalisée par le mur antibruit, en fonction de N et pour une longueur d'onde λ fixée.

N	0	1	2	3	4	5
A (dB)	5,0	13	16	18	19	20

2.4 Document n° 4 : influence de la nature des matériaux

Le choix des matériaux et des techniques utilisés est très varié pour pouvoir s'adapter à différentes infrastructures. On trouve ainsi :

- des écrans métalliques, par exemple, en acier (d'épaisseur 1,5 mm), ou en aluminium (d'épaisseur 2,5 mm) ayant une bonne longévité, mais souvent inesthétiques ;
- des écrans en béton (d'épaisseur de 10 à 15 cm) ayant une bonne surface massive et une bonne flexibilité sur le plan architectural, d'une esthétique qui pose débat (certains adorent...) ;
- des écrans en bois imputrescible (4 cm d'épaisseur) s'intégrant bien dans le paysage, mais dont la durée de vie est limitée ;
- des écrans transparents, en verre ou en plastique (polycarbonate ou polyméthacrylate de méthyle, ou PMMA d'épaisseur de 10 à 16 mm), généralement placés en milieu urbain ;
- des écrans en polychlorure de vinyle (PVC) opaques ayant une excellente absorption acoustique, une bonne résistance aux UV et une durée de vie élevée ;
- des écrans en briques ;
- des buttes de terre ou des écrans végétalisés (succession de jardinières en plastique recyclé remplies de terre et munies d'un système d'irrigation ou végétaux sur des panneaux en laine de roche, par exemple) sont également utilisés comme écrans acoustiques sur les autoroutes. Ils s'harmonisent bien avec le paysage ;
- des barrières végétales seules, mais qui ne sont pas assez efficaces : une épaisseur de 60 m d'arbres ne génère qu'une atténuation de 5 à 6 dB.

D'après L. SCHRIVER-MAZZUOLI, *Nuisances sonores*, Dunod, collection technique et ingénierie, 2007.

2.5 Questions

- e. Classer les différents types de matériaux, du plus réfléchissant au plus absorbant.
- f. Quels phénomènes physiques permettent d'expliquer que le son est perçu derrière le mur antibruit ?
- g. Justifier que, derrière un même mur antibruit, les sons graves sont davantage perçus que les sons aigus.
- h. Quels sont les autres facteurs pouvant influencer l'efficacité d'un mur antibruit ?

3 Correction de l'exercice de la séance 9 Rénovation d'une salle de classe

Question préliminaire

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

$$TR = 0,16 \times \frac{V}{A} \quad \text{avec} \quad A = \sum_1 A_i \times \alpha_i$$

La diminution du temps de réverbération passe par une diminution du volume (plafond surbaissé, par exemple) et surtout par une augmentation de la surface d'absorption équivalente. Pour augmenter cette dernière, une solution possible consiste à recouvrir certaines surfaces (parois, plafond) à l'aide d'un isolant acoustique dont le coefficient d'absorption acoustique est plus important que celui du matériau initial.

Résolution du 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 volume initial de la salle est $V = L \cdot \ell \cdot h$

$$V = 7,5 \times 7,3 \times 4,1 = 224,475 \text{ m}^3 = 2,2 \times 10^2 \text{ m}^3$$

L'énoncé (présentation en début d'exercice) précise "Cette rénovation se fera ... en ramenant le temps de réverbération **à sa limite inférieure préconisée par l'arrêté**", soit $TR = 0,4 \text{ s}$ pour une salle de volume inférieur à 250 m^3 .

Nous allons déterminer les caractéristiques architecturales de la salle pour qu'elle possède le temps de réverbération ciblé après traitement.

- Certaines surfaces resteront inchangées : le sol, les fenêtres, la porte et le mobilier pour une surface d'absorption équivalente notée A' .

$$A' = A_{(\text{sol})} + A_{(\text{fenêtres})} + A_{(\text{porte})} + A_{(\text{mobilier})}$$
$$A' = 1,09 + 0,60 + 0,39 + 25 = \mathbf{27,08 \text{ m}^2}.$$

- Le plafond sera complètement traité : sa surface d'absorption équivalente est donnée dans le document n°3 : $A_{(\text{plafond})} = 1,64 \text{ m}^2$.
- Les informations de surface équivalente des murs ne sont pas connues. Elles seront déterminées à partir de la situation initiale de la salle :

Le TR vaut initialement $1,1 \text{ s}$.

$$TR = 0,16 \times \frac{V}{A} \Rightarrow A_{\text{initial}} = 0,16 \times \frac{V}{TR}$$

$$A_{\text{initial}} = 0,16 \times \frac{224,475}{1,1} = 32,65 \text{ m}^2 = 33 \text{ m}^2$$

$$A_{\text{initial}} = A_{(\text{murs})} + A_{(\text{sol})} + A_{(\text{fenêtres})} + A_{(\text{porte})} + A_{(\text{mobilier})} + A_{(\text{plafond})}$$

$$\Rightarrow A_{(\text{murs})} = A_{\text{initial}} - A_{(\text{sol})} - A_{(\text{fenêtres})} - A_{(\text{porte})} - A_{(\text{mobilier})} - A_{(\text{plafond})}$$

$$\Rightarrow A_{(\text{murs})} = A_{\text{initial}} - A' - A_{(\text{plafond})}$$

$$\Rightarrow A_{(\text{murs})} = 32,65 - 27,08 - 1,64 = 3,93 \text{ m}^2$$

On peut en déduire la surface des murs (penser à retirer porte et fenêtres)

$$S_{(\text{murs})} = (L \times h) \times 2 + (\ell \times h) \times 2 - S_{(\text{fenêtres})} - S_{(\text{porte})}$$

$$S_{(\text{murs})} = (7,5 \times 4,1) \times 2 + (7,3 \times 4,1) \times 2 - 6,0 - 1,93 = 113 \text{ m}^2$$

Le coefficient d'absorption acoustique du matériau qui constitue les murs est $\alpha_{(\text{murs})} = \frac{A_{(\text{murs})}}{S_{(\text{murs})}}$.

$$\alpha_{(\text{murs})} = \frac{3,93}{113} = 3,47 \times 10^{-2}$$

Remarque : On peut aussi remarquer que les murs sont en plâtre tout comme le plafond. Alors on peut utiliser les valeurs relatives au plafond pour trouver le coefficient d'absorption acoustique des murs.

$$\alpha_{(murs)} = \frac{A_{(murs)}}{S_{(murs)}}$$

$$\alpha_{(murs)} = \frac{1,64}{54,8} = 2,99 \times 10^{-2}$$

Le résultat final avec cette valeur est très proche de celui que nous obtenons avec le $3,47 \times 10^{-2}$

On peut maintenant revenir au problème posé et évaluer la surface équivalente des murs après traitement. Attention, consécutivement au traitement de la salle, on **modifie la hauteur des murs et on diminue leur surface !!!**

$$S'_{(murs)} = (7,5 \times h) \times 2 + (7,3 \times h) \times 2 - 6,0 - 1,93 = 29,6 \cdot h - 7,93$$

La surface d'absorption équivalente des murs (et celle de la salle) est donc fonction de h

$$A'_{(murs)} = S'_{(murs)} \times \alpha$$

$$A'_{(murs)} = (29,6 h - 7,93) \times 3,47 \times 10^{-2} = 1,03 h - 0,27$$

Surface d'absorption équivalente de la salle traitée :

$$A_{(salle traitée)} = A' + A_{(faux-plafond)} + A'_{(murs)}$$

$$A_{(salle traitée)} = 27,08 + 35,6 + (1,03 h - 0,27) = 1,03 h + 62,4$$

$$TR = 0,16 \times \frac{V_{(salle traitée)}}{A_{(salle traitée)}}$$

$$0,4 = 0,16 \times \frac{7,5 \times 7,3 \times h}{1,03 h + 62,4}$$

$$\Rightarrow h = 2,99 \text{ m} = \mathbf{3,0 \text{ m}}$$

Cette hauteur, supérieure à 2,80 m, est conforme à la contrainte de maintenir la surface vitrée.

Remarque :

Pour la salle avant travaux de volume $2,2 \times 10^2 \text{ m}^3$, le temps de réverbération préconisé doit être compris entre 0,4 s et 0,8 s.

On peut remarquer qu'il suffit de couvrir le plafond sans modifier le volume de la salle pour rendre la salle conforme à l'arrêté.

$$A_{\text{initial}} = \underbrace{A_{(murs)} + A_{(sol)} + A_{(fenêtres)} + A_{(porte)} + A_{(mobilier)}}_{A_{(surfaces inchangées)}} + A_{(plafond)}$$

$$A_{\text{initial}} = A_{(surfaces inchangées)} + A_{(plafond)}$$

Avant traitement $\Rightarrow A_{\text{initial}} = A_{(surfaces inchangées)} + A_{(plafond)}$

$$A_{\text{initial}} = A_{(surfaces inchangées)} + 1,64$$

Le temps de réverbération est donné par la relation :

$$TR_{(initial)} = 0,16 \times \frac{V}{A_{\text{initial}}}$$

$$TR_{(initial)} = 0,16 \times \frac{224,475}{A_{(surfaces inchangées)} + 1,64} = 1,1 \text{ s}$$

$$A_{(surfaces inchangées)} + 1,64 = 0,16 \times \frac{224,475}{1,1}$$

$$A_{(surfaces inchangées)} = 0,16 \times \frac{224,475}{1,1} - 1,64$$

$$\Rightarrow A_{(surfaces inchangées)} = 31,0 \text{ m}^2$$

Après traitement $\Rightarrow A_{\text{initial}} = A_{(surfaces inchangées)} + A_{(faux plafond)}$

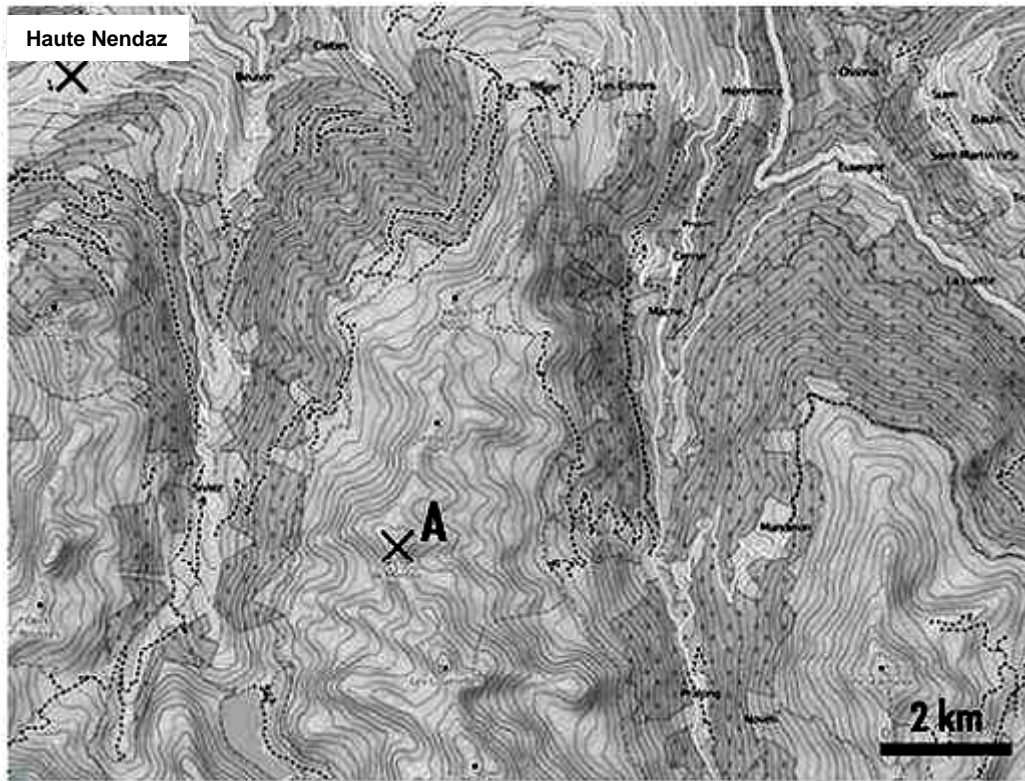
$$A_{\text{initial}} = 31,0 + 35,6 = 67 \text{ m}^2$$

$$TR_{(initial)} = 0,16 \times \frac{224,475}{31,0 + 35,6} = 0,54 \text{ s} \qquad 0,4 \leq TR_{(initial)} \leq 0,8 \text{ s}$$

4 Exercice pour la séance 11

Le Cor des Alpes

Chaque année, au mois de juillet, se déroule le festival international du cor des Alpes à Haute Nendaz, en Suisse. Cet instrument folklorique était jadis utilisé par les bergers pour communiquer entre eux.



Un berger, situé au sommet d'une colline (point A sur la carte) joue la note la plus grave de son cor des Alpes. Son instrument a une longueur de 3,4 m.

Pourra-t-on l'entendre à Haute Nendaz si le niveau d'intensité sonore est de 100 dB à un mètre de l'instrument ?

Hypothèses de travail :

- L'amortissement de l'onde n'est pas pris en compte : la dissipation d'énergie au cours de la propagation est négligeable.
- Le rayonnement de la source est supposé isotrope.

L'analyse des données ainsi que la démarche suivie seront évaluées et nécessitent d'être correctement présentées. Les calculs numériques seront menés à leur terme avec rigueur. Il est aussi nécessaire d'apporter un regard critique sur le résultat et de discuter de la validité des hypothèses formulées.

Donnée :

- Intensité acoustique de référence : $I_0 = 1,0 \times 10^{-12} \text{ W.m}^{-2}$

Document 1. Valeurs de la célérité du son dans l'air en fonction de la température

Température en °C	10	20	30	40
Célérité en m.s^{-1}	337	343	349	355

Document 2. Un instrument à vent : le cor des Alpes

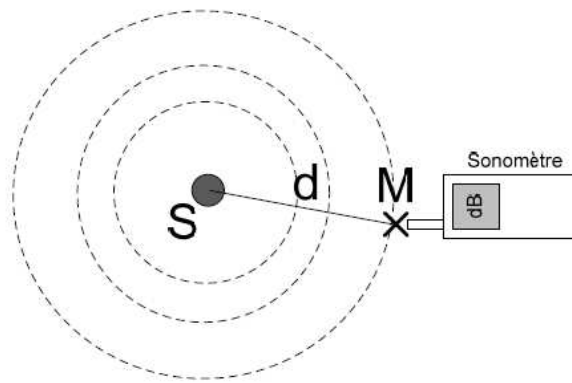
Lorsque l'on souffle dans un cor des Alpes pour la première fois, il semble impossible d'en sortir un seul son harmonieux. Mais avec un peu de pratique, on peut apprendre à produire jusqu'à vingt-deux notes, ceci sans utiliser ni valve ni bouton. La gamme de notes réalisable sur cet instrument dépend d'abord de sa géométrie, puis du talent de celui qui en joue. Les premiers cors des Alpes datent du 14^{ème} siècle, ils étaient traditionnellement utilisés par les gardiens de troupeaux pour communiquer entre eux sur des distances d'une dizaine de kilomètres. Cet instrument de la famille des cuivres est fait d'une seule pièce de bois, un tube recourbé à son extrémité et mesurant en général de deux à quatre mètres de long. Pour en jouer, le musicien souffle dans une embouchure. La note la plus grave est atteinte lorsque la longueur d'onde de l'onde sonore associée à la note est égale à deux fois la longueur du cor.



Document 3. L'intensité sonore d'une source isotrope

Pour une source isotrope (c'est-à-dire émettant la même énergie dans toutes les directions) de puissance P , l'intensité sonore I au point M dépend de la distance d à la source et s'exprime de la façon suivante :

$$I = \frac{P}{4\pi d^2} \quad \text{avec } I \text{ en } \text{W.m}^{-2} ; P \text{ en } \text{W} ; d \text{ en m}$$



Document 4. Seuil d'audibilité humaine en fonction de la fréquence

Le graphique suivant indique les valeurs minimales de niveau d'intensité sonore audible en fonction de la fréquence.

