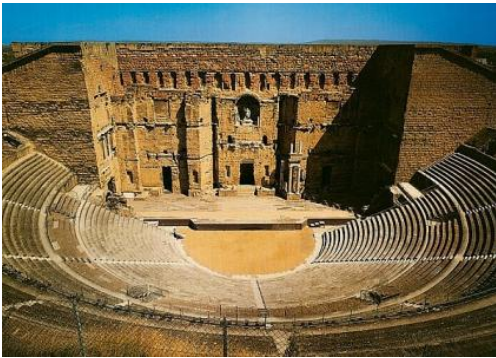


1 Activité documentaire : l'acoustique des théâtres antiques (30 minutes)

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. »

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 ! »

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 grégoromain. 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

- 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 expérimentale : réduction des bruits des transports (1 heure)

2.1 Document n°1 : situation problème



Murs antibruit en polychlorure de vinyle (PVC).

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 ?

« 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

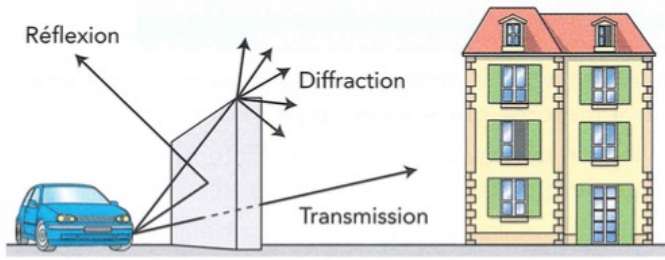


Schéma de principe d'un mur antibruit.

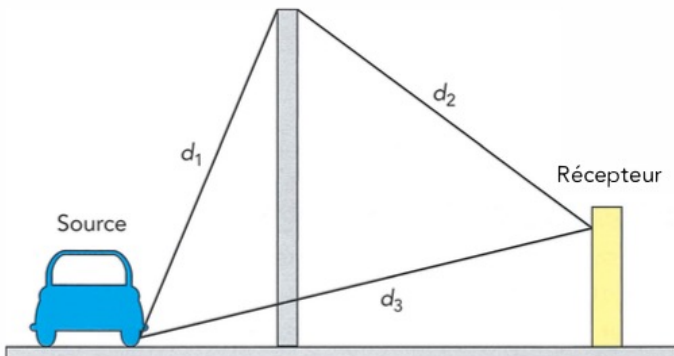
Les murs antibruit placés entre la source du bruit et les bâtiments exposés permettent de réduire les nuisances sonores de 8 à 12 dB.

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 de l'énergie sonore de l'onde diffractée est proportionnelle à la différence de marche entre le chemin direct sans écran et le trajet diffracté. Ainsi, 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 Principe des émetteurs-récepteurs d'ultrasons

On cherche à mettre en évidence expérimentalement les informations données dans les documents précédents.

Pour ces expériences, on dispose de modules émetteurs-récepteurs à ultrasons, des plaques identiques de matériaux différents (bois, polystyrène expansé, PMMA, plaque de plâtre), d'une vingtaine de kapla (jeu de construction très célèbre dont le principe repose sur l'utilisation de petites plaques de bois) et d'une interface d'acquisition SYSAM-SP5 reliée à l'ordinateur via le logiciel Latis Pro.

Une salve d'ultrasons est une brève perturbation sonore, de fréquence 40 kHz. Cette fréquence est inaudible (20 Hz à 20 kHz pour le domaine audible).

Les ultrasons sont émis par un émetteur E (ci-dessous, à gauche) et détectés par un (ou plusieurs) récepteur R (à droite), qui délivre(nt) une tension proportionnelle au déplacement des tranches d'air mises en mouvement lors de la propagation de l'onde.



FIGURE 1

Le dispositif permet d'émettre des salves soit de façon périodique, soit de façon continue, en fonction du réglage de l'émetteur.

2.6 Branchements de l'émetteur et des récepteurs

- Prévoir six fils, trois de couleur rouge, trois de couleur noire (en plus du câble adaptateur déjà distribué).

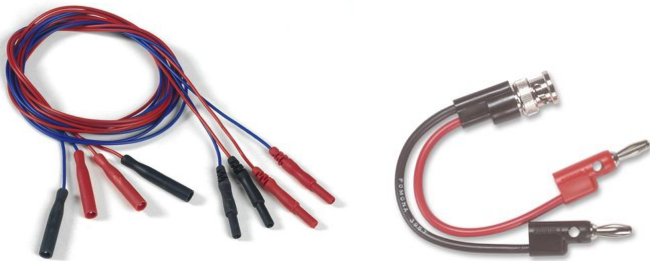


FIGURE 2

- S'assurer que l'interface de mesure est branchée & connectée à un port USB de l'ordinateur.

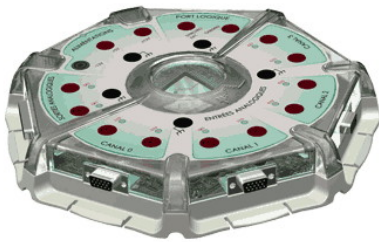


FIGURE 3

- L'émetteur doit être alimenté en 15 V (flèche 1 de la figure 4 ci-dessous).



FIGURE 4

Connecter sa borne rouge au +15 V et sa borne noire au 0 V de l'alimentation, montrée en figure 5.

L'interrupteur de l'alimentation doit rester sur « Arrêt » jusqu'à la vérification par le professeur !

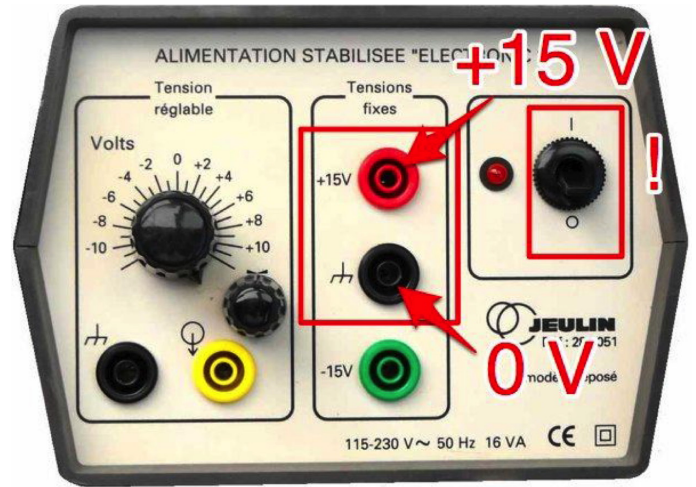


FIGURE 5

- Brancher le câble adaptateur sur la prise BNC (flèche 2, figure 4) de l'émetteur. Brancher la prise rouge sur la voie EA0 de l'interface de mesure, et la prise noire sur une masse de l'interface.

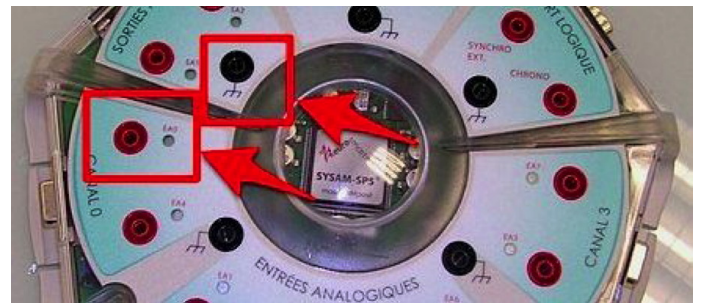


FIGURE 6

- Sur l'émetteur, choisir le mode « Continu » (interrupteur indiqué par la flèche 3 de la figure 4).
- Brancher l'un des deux récepteurs : fil rouge sur la voie EA1, fil noir sur une masse.

Appel du professeur pour vérification !

- Mettre en marche l'alimentation et l'émetteur (interrupteur indiqué par la flèche 4 de la figure 4).

2.7 Réglages de Latis Pro conseillés

- Ouvrir le logiciel Latis Pro (raccourci sur le bureau).
- Cliquer sur les voies EA0 et EA1 pour les activer.

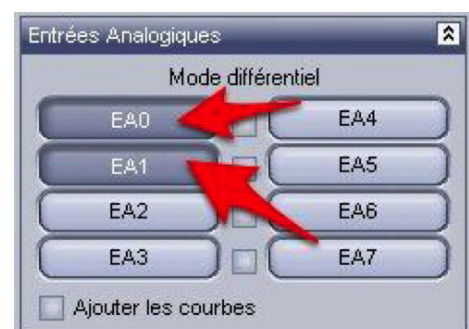


FIGURE 7

- En ordonnée du graphique (Fenêtre n°1), retirer la voie EA0. Pour cela, faire un clic-droit sur la légende EA0, et cliquer sur « Retirer » :



FIGURE 8

- Ouvrir les propriétés de la courbe EA1. Pour cela, faire un clic-droit sur la légende EA1, et cliquer sur « Propriétés » :

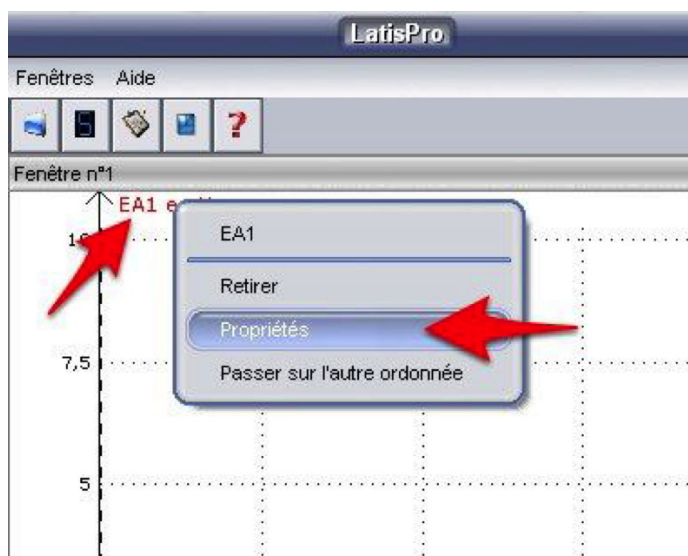


FIGURE 9

- Cliquer sur « Style » :

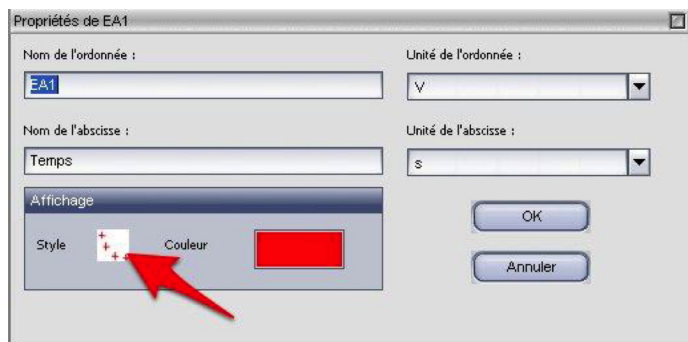


FIGURE 10

- Choisir « Trait » :

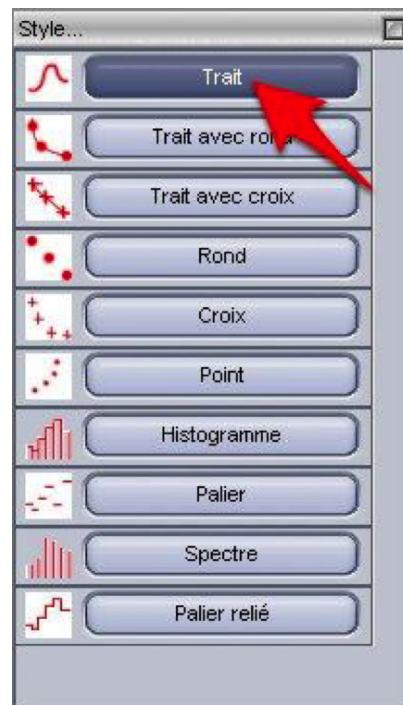


FIGURE 11

- Valider par « OK » :

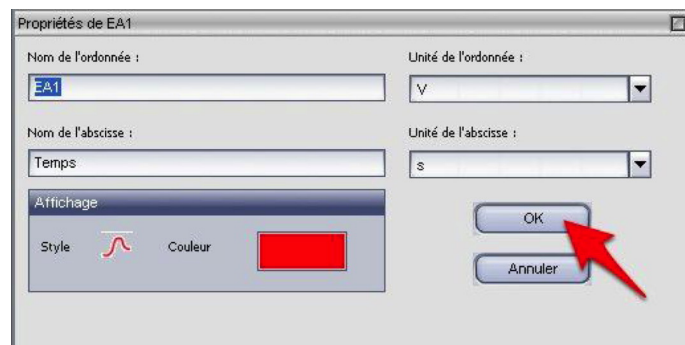


FIGURE 12

- À gauche, sous « Acquisition », changer le nombre de points à mémoriser pour 500 :



FIGURE 13

- Changer de même la durée totale d'acquisition pour 0,2 ms :



FIGURE 14

Inutile de modifier le temps d'échantillonnage T_e , le logiciel le règle automatiquement.

- Cocher la case « Mode permanent » :

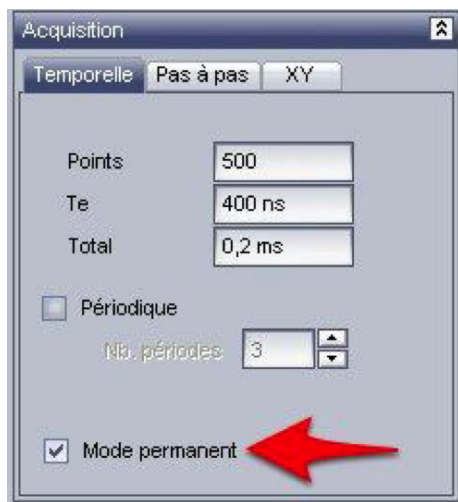


FIGURE 15

- En dessous, sous « Déclenchement », cliquer pour dérouler le menu :



FIGURE 16

- Sélectionner la voie EA0 comme source de déclenchement :

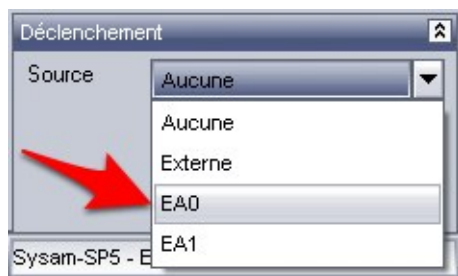


FIGURE 17

- Changez le seuil de déclenchement pour 1 V :

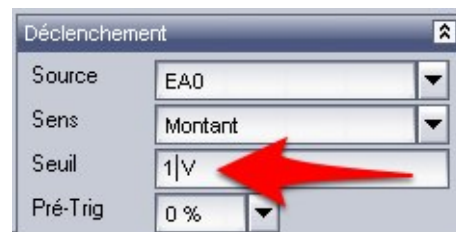


FIGURE 18

- Vous êtes maintenant prêt(e) !

2.8 Réglage de l'émetteur conseillé

- Lancez l'acquisition en cliquant sur la neuvième icône de la barre des menus, ou en utilisant le raccourci « F10 » :



FIGURE 19

- Placer le récepteur sur la règle, face à l'émetteur, au niveau de la graduation 0 cm.

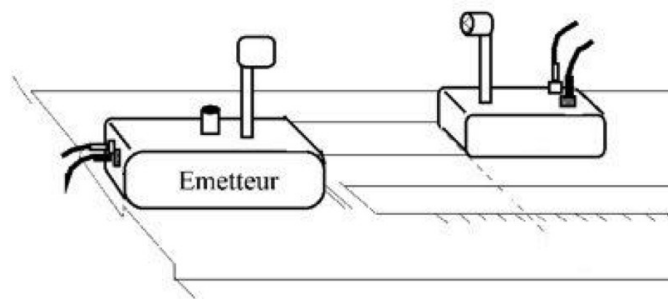


FIGURE 20

- Tourner le réglage de fréquence (bouton n°5 montré sur la figure 4) de l'émetteur, afin d'obtenir un signal d'amplitude maximale au niveau du récepteur (signal EA0). On place ainsi l'émetteur en *résonance* mécanique, qui a lieu à une fréquence de résonance bien précise. Ce réglage permet d'obtenir un signal émis, et donc reçu, maximum.

Ne plus toucher à ce réglage par la suite !

Pour arrêter l'acquisition, appuyer sur la touche « Echap ».

- Une fois l'acquisition arrêtée, lancer un zoom automatique par un clic-droit à n'importe quel endroit de la « Fenêtre n°1 », et en cliquant sur « Calibrage » :

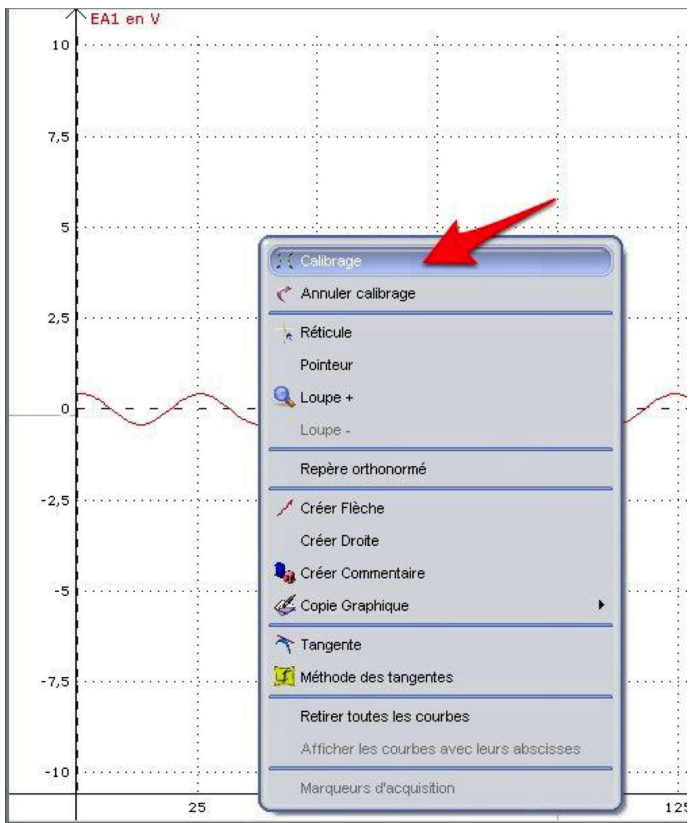


FIGURE 21

- Relancer l'acquisition, puis l'arrêter (touche « Echap »), dès que le résultat est satisfaisant.

2.9 Propositions de mesures d'atténuation

- Réaliser les mesures proposées à l'aide des matériaux à disposition, y inclus une vingtaine de Kapla. Recopier

ou compléter les mesures proposées ci-dessous à titre purement indicatif.

- Matériau n°1 : A =
- Matériau n°2 : A =
- Matériau n°3 : A =
- Matériau n°4 : A =

2.10 Influence de la hauteur du mur antibruit

- Proposez un protocole. À titre indicatif, recopier ou compléter les mesures proposées ci-dessous.

- Mesure n°1 : A = N =
- Mesure n°2 : A = N =
- Mesure n°3 : A = N =
- Mesure n°4 : A = N =
- Mesure n°5 : A = N =

- Utiliser le logiciel pour tracer la représentation graphique de l'atténuation A en fonction de N et pour la modéliser.

3 Exercices (pour la séance n°5)

RÉVISION ET RÉSUMÉ

Extrémités Lorsqu'une onde progressive arrive à l'extrémité d'une corde, elle peut être absorbée, ou se réfléchir en changeant de signe (extrémité fixe) ou sans changement de signe (extrémité libre).

Stationnaire En tenant compte des réflexions sur les extrémités, une onde progressive se recouvre elle-même pour former une onde stationnaire.

On peut ainsi interpréter une onde stationnaire comme la superposition d'une onde progressive incidente et d'une onde progressive réfléchie.

Condition La condition d'existence d'une onde stationnaire de longueur d'onde λ sur une corde de longueur L tendue entre deux points fixes, est :

$$L = n \frac{\lambda}{2}$$

Quantification De la formule précédente et de la relation :

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

où l'on a noté v la célérité des ondes sur la corde, on déduit la quantification des fréquences des ondes stationnaires :

$$f_n = n f_1 \quad \text{avec} \quad f_1 = \frac{v}{2L}$$

L'expression de f_1 n'a pas à être mémorisée, il faut savoir la retrouver.

Analogie Tous les résultats énoncés pour la corde se retrouvent de façon totalement analogue dans le cas d'une colonne d'air.

EXERCICES

5.1 Diapasons (3 min) Expliquez pourquoi les caisses de résonance sur lesquelles sont montés les diapasons sont d'autant plus grandes que la fréquence de la note émise

par le diapason est basse.

5.2 N°2 p. 120 – Écho créé par un mur de scène (10 min)

5.3 N°7 p. 123 – Quand les galeries chuchotent (10 min)

5.4 Corde de banjo (10 min)

- a. Calculer la célérité d'une onde sur une corde de banjo (schéma ci-dessous) de masse $m = 1,1$ g, de longueur 54 cm, tendue par une force de 71 N.
- b. En déduire la fréquence du son fondamental.

Donnée : la célérité v d'une onde le long d'une corde de masse linéique μ (rapport de la masse de la corde en kg sur la longueur de la corde en m) tendue entre deux points par une force de valeur F s'écrit :

$$v = \sqrt{\frac{F}{\mu}}$$

5.5 Onde stationnaire dans un tuyau (20 min)

Un tuyau sonore de longueur L est ouvert à ses deux extrémités. Devant l'une d'elles, on place un haut-parleur relié à un GBF délivrant une tension sinusoïdale de fréquence réglable.

On modifie la fréquence du GBF en partant d'une valeur très faible et on note les valeurs pour lesquelles le son est nettement audible dans le tuyau. Ces valeurs sont consignées dans le tableau suivant.

f (Hz)	142	283	425	567	708	850
----------	-----	-----	-----	-----	-----	-----

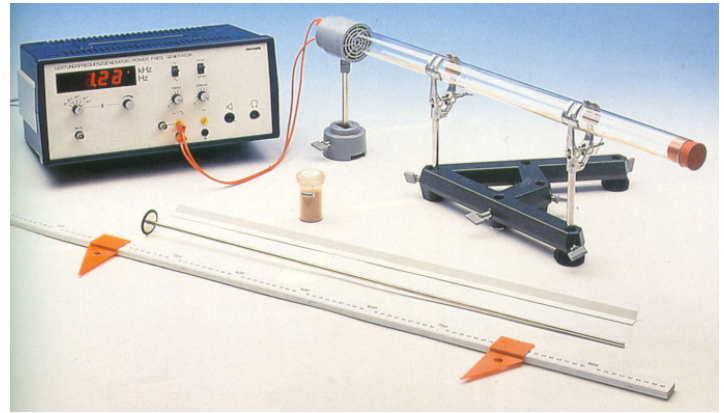
On admet qu'à chacune de ses extrémités, la colonne d'air présente un ventre de vibration.

- a. Quelle est la fréquence du fondamental pour ce tuyau ?
- b. Représenter sur un schéma les positions des ventres et des nœuds de vibration pour $f = 425$ Hz.
- c. Sachant que pour cette expérience, la célérité du son dans l'air vaut $v = 340$ m · s⁻¹, calculer la longueur du tuyau.
- d. On chauffe le tube et l'air qu'il contient. La température de ce dernier passe de $T = 298$ K à $T' = 330$ K. Sachant

que la célérité de l'onde dans l'air est proportionnelle à \sqrt{T} , comment varient les fréquences du tableau précédent ?

- e. Calculer, à $T' = 330$ K, la fréquence du mode fondamental.

5.6 Tube de Kundt (10 min)



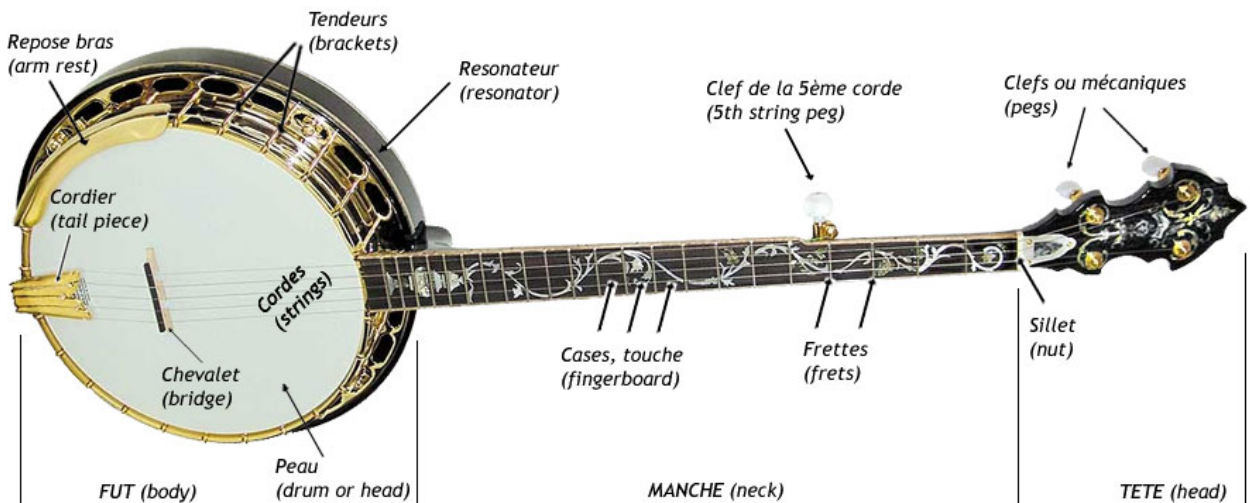
Dispositif expérimental.

Un tube de Kundt est composé d'un tube horizontal dans lequel repose une poudre fine et légère. Le tube est fermé à ses deux extrémités par des bouchons dont l'un est relié à une tige métallique. En frottant cette dernière, on crée une onde sonore dans l'air du tube et la poudre, agitée par l'onde, se répartit en petits tas régulièrement espacés.



Résultat avec de la poudre de lycopode.

- a. Les tas correspondent-ils à des nœuds ou des ventres de vibration ? Expliquer.
- b. Les tas sont séparés de 11,0 cm. La célérité du son dans l'air valant $v = 340$ m · s⁻¹, calculer la fréquence de l'onde.



(termes américains)