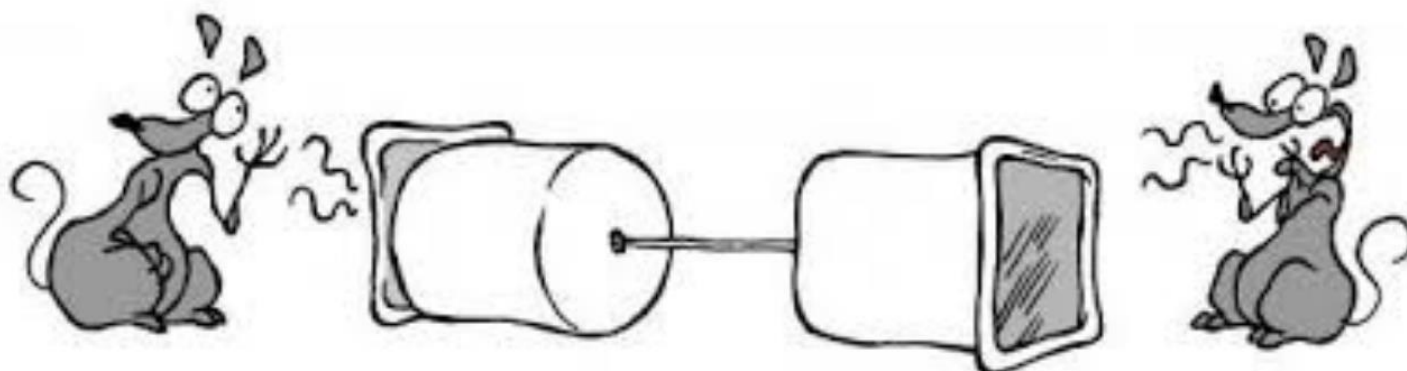


Pas sourd comme un pot !



PRÉSENTÉ PAR :

**Arthur BOUTIN-NOEL
Emma CARLIN
Zion DIALLO
Archibald FRIOT
Anaëlle MAGUER
Ylan SIGRIST**

ENCADRÉ PAR :

**Jean-Brice MEYER
Tristan CLÉMENT
Aurélie ELIE**

Résumé :

Vous en avez marre de passer des heures sur votre téléphone et de perdre du temps ? Quoi de mieux que de revenir à l'appareil le plus rudimentaire pour communiquer à distance, le *yaourtophone* ; vous savez, ces deux pots de yaourt reliés par une ficelle qu'on utilisait étant petits. Nous nous sommes alors demandés si ça fonctionnait vraiment, si oui, comment. Puis, de fil en aiguille, de nombreuses autres questions ont fait surface... Comment optimiser la communication à travers de ce dispositif ? Et, au fait, qu'est-ce que cela peut bien vouloir dire, une "communication optimale" dans notre cas ? Est-ce que le matériau du fil reliant les pots est important ? Et celui des pots ? Qu'en est-il de leur configuration géométrique ? Comment décrire qualitativement et quantitativement l'onde qui se propage d'un pot à l'autre ? Une chose est certaine : ce projet nous a donné (et nous donne toujours) du fil à retordre...

Sommaire :

I – Le yaourtophone – Présentation du dispositif – Caractéristiques	Page 3
1) Un peu d'histoire :	Page 3
2) Communiquer par le biais d'une ficelle... est-ce possible ?	Page 4
3) Quelles sont les caractéristiques du dispositif ?	Page 6
 II – Comment rendre le yaourtophone le plus efficace ?	 Page 13
1) Influence de la tension de la ficelle	Page 13
2) Le yaourtophone est-il plus efficace si le son produit à l'émission est de forte amplitude ?	
3) Influence de la nature du fil	Page 17
4) Influence du pot	Page 19
 Conclusion	 Page 20

Bibliographie – webographie :

« Micrographia, ou quelques descriptions physiologiques de corps minuscules faites à la loupe, avec observations et recherches à ce sujet », Livre de Robert Hooke

Ondes stationnaires :

https://physique.cmaisonneuve.qc.ca/svezina/nyc/note_nyc/NYC_XXI_Chap%201.12a.pdf

Introduction :

Alors que les smartphones ont envahi la planète, reposant sur la propagation d'ondes électromagnétiques, nous avons souhaité revenir à l'âge de pierre... enfin... disons plutôt à l'âge de la ficelle.

En effet, avant de pouvoir communiquer via les technologies actuelles, différents systèmes existaient. Il existait, par exemple, des langages utilisant les signaux de fumée ou les pales des moulins à vent, qui en fonction de leur aspect, pouvaient prévenir la population à distance d'événements importants. Dans ces deux exemples, la vue était alors sollicitée. Mais il a aussi existé une communication filaire sans mettre en jeu les ondes électromagnétiques. Il s'agit du téléphone à ficelle, que nous pouvons appeler le yaourtophone. C'est le nom qu'on lui donne habituellement car son utilisation aujourd'hui est essentiellement faite par les enfants à l'aide de pots de yaourt et de ficelles. Cela dit, on trouve également ce dispositif de yaourtophone dans un laboratoire de renommée très locale : le labo de physique du LP2I, dans lequel le club sciences est hébergé !

Il s'y trouve car cette année, pour notre année de terminale, nous voulions faire un projet de science tout en nous amusant. Nous avons donc eu l'idée de retourner dans notre enfance (ce qui est une manière de dire aussi que nous n'en sommes pas sortis), et d'étudier ce dispositif de façon scientifique.

Quelles sont ses caractéristiques et comment faire pour avoir un yaourtophone performant ?

Ce sont les principales questions auxquelles nous allons tenter de répondre en menant une démarche expérimentale.

I – Le yaourtophone – Présentation du dispositif - Caractéristiques

1) Un peu d'histoire :

Le yaourtophone, avant d'être un jeu, fut une véritable expérience scientifique qui a très probablement participé à l'histoire des télécommunications. Dans la littérature scientifique, on attribue cette étude à Hooke, qui publia, en 1665, dans un livre intitulé « Micrographia, ou quelques descriptions physiologiques de corps minuscules faites à la loupe, avec observations et recherches à ce sujet » :

« Et comme les verres ont grandement favorisé notre vue, il n'est pas improbable qu'on trouve de nombreuses inventions mécaniques pour améliorer nos autres sens, l'ouïe, l'odorat, le goût, le toucher. Il n'est pas impossible d'entendre un murmure à une distance d'un furlong, cela ayant déjà été fait ; et peut-être la nature de la chose ne rendrait-elle pas cela plus impossible, même si ce furlong était multiplié par dix. Et bien que certains auteurs célèbres aient affirmé qu'il est impossible d'entendre à travers la plus fine plaque de verre de Moscovie, je connais cependant un moyen par lequel il est assez facile d'entendre quelqu'un parler à travers un mur d'un mètre d'épaisseur. On n'a pas encore examiné à fond jusqu'à quel point les otocoustiques peuvent être améliorés, ni quels autres moyens il peut y avoir d'accélérer notre audition, ou de transmettre le son à travers d'autres corps que l'air : car comme ce n'est pas le seul moyen, je peux assurer au lecteur que j'ai, à l'aide d'un fil distendu, propagé le son à une distance très considérable en un instant, ou avec un mouvement apparemment aussi rapide que

celui de la lumière, du moins incomparablement plus rapide que celui qui se propageait au même moment dans l'air ; et cela non seulement en ligne droite ou directe, mais en une ligne courbée sous plusieurs angles... ».

2) Communiquer par le biais d'une ficelle... est-ce possible ?

Et bien réalisons le dispositif suivant et testons : figure 1



figure 1 : le yaourtophone de façon subjective

Nous pouvons répondre par « oui » ! Ecoutez !

Mais effectivement, la réponse donnée ici fait plus appel à une force de persuasion qu'à une preuve scientifique. Alors complétons le dispositif par des capteurs dépourvus de conscience humaine (même si l'actualité nous fait parfois penser que certaines oreilles ne cachent aucune conscience humaine...) – figure 2

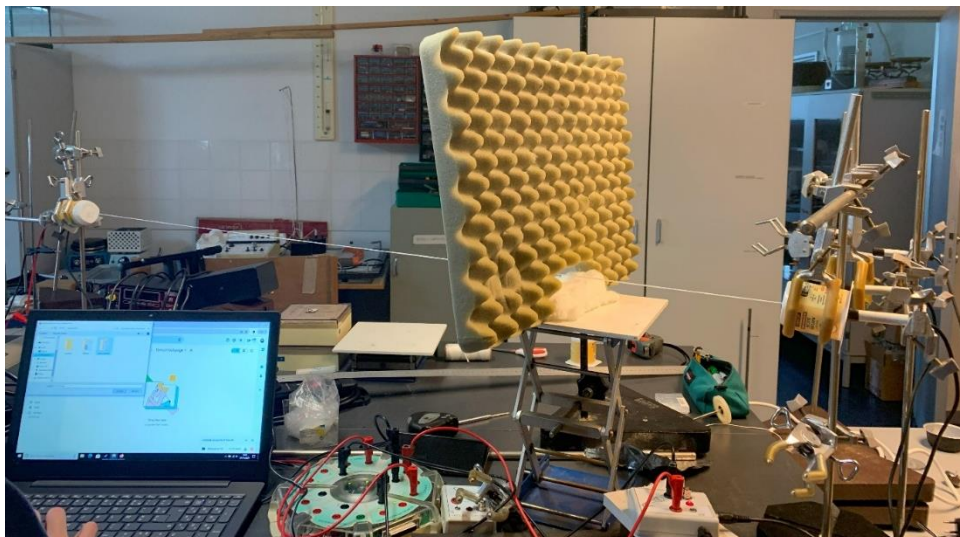
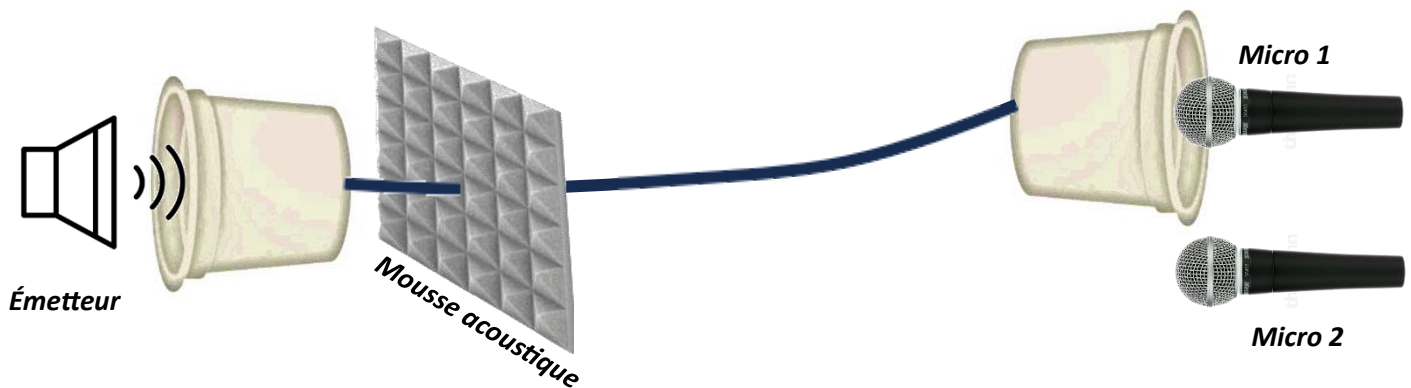


figure 2 : le yaourtophone de façon objective

Nous avons alors parlé côté émetteur en disant « J'aime la physique et je voudrais en faire mon métier » en exagérant sur la prononciation (mais pas sur le fond de la phrase), et avons recueilli le signal sonore enregistré par le micro 1 et le micro 2.

L'idée est donc double : prouver de façon objective que le dispositif fonctionne, et voir s'il est plus efficace pour certaines consonnances que pour d'autres. Une fois les sons enregistrés, nous les avons analysés avec le logiciel Latis Pro.

Remarques :

- Le fait de placer de la mousse acoustique permet de minimiser l'amplitude de l'onde sonore qui pourrait se propager par l'air depuis l'émetteur vers les micros.
- La comparaison est possible si les deux micros ont les mêmes performances. De ce fait, même si les micros étaient deux modèles identiques, nous avons alors préalablement vérifié cela en disposant les deux micros côte à côte en face d'un émetteur, et nous avons analysé les signaux recueillis. L'expérience a confirmé que leurs performances sont bien équivalentes.

Voici l'évolution de l'amplitude sonore enregistrée par 3 micros à différents endroits lors de la prononciation de la phrase : figure 3

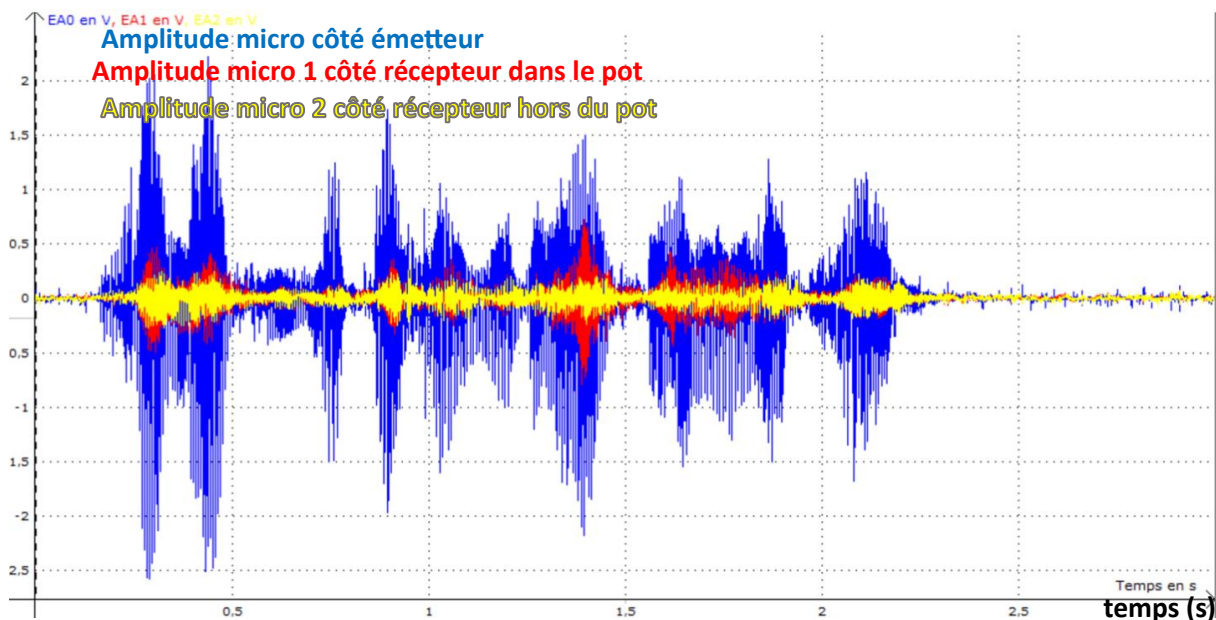


figure 3 : comparaison entre les amplitudes sonores des micro dans le pot récepteur, et à côté du pot récepteur : le dispositif permet bien la transmission des sons, mais n'a pas la même efficacité pour les différentes consonnances

Dans l'enregistrement ci-dessus, le signal à l'émetteur est en bleu, le signal en rouge est celui reçu dans le pot et celui en rose, le signal reçu par le micro à l'extérieur du pot. On remarque que le signal reçu à l'intérieur du pot possède une amplitude plus importante que celui reçu hors du pot ce qui montre donc bien l'efficacité du dispositif. De plus, on observe qu'entre les dates $t = 1,3$ et $1,5$ s, la différence d'amplitude entre les signaux rouge et rose est plus importante, ce qui indique que le dispositif est plus efficace pour certaines consonnances que pour d'autres.

Conclusion :

Maintenant que nous avons prouvé que le dispositif fonctionne, nous pouvons étudier ses performances, ses limites, ce qu'on pourrait alors appeler les caractéristiques de ce moyen de télécommunication.

3) Quelles sont les caractéristiques du dispositif ?

Nous avons recensé différentes caractéristiques, dont l'une est mentionnée dans le livre de Hooke cité en introduction : la vitesse à laquelle se propage l'information, la bande passante du dispositif, et s'il s'agit d'un système globalement dispersif ou pas.

A –Quelle est la célérité des ondes et la nature des ondes qui se propagent ?

a) Mesure de la célérité des ondes :

Pour mesurer la célérité des ondes, nous avons cette fois-ci émis un clap bref en tapant deux morceaux de bois l'un contre l'autre et nous avons enregistré le son capté par le micro situé au niveau de l'émetteur, ainsi que celui capté par le micro 1 situé dans le pot. L'exploitation de ces signaux est alors réalisée avec le logiciel Latis pro. figure 4

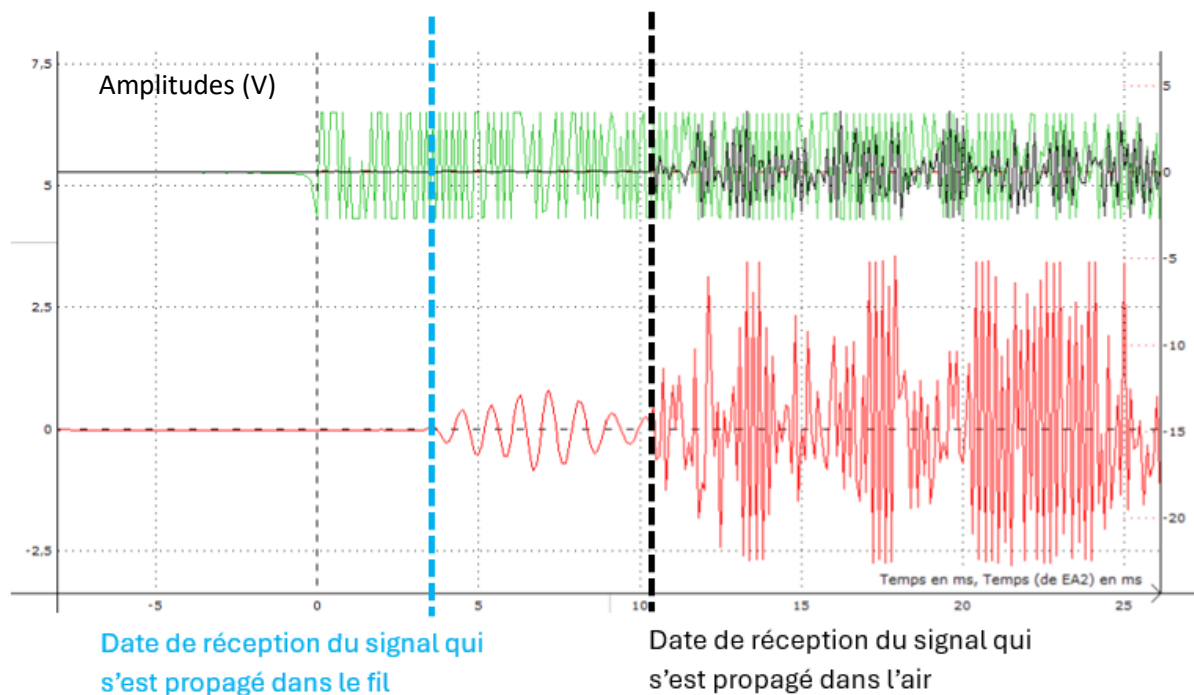


figure 4 : mesure de la célérité des ondes dans le fil

En vert : signal sonore enregistré au niveau de l'émetteur

En noir : signal sonore enregistré par le micro 2 à côté du pot récepteur

En rouge : signal sonore enregistré par le micro situé dans le pot récepteur

On peut donc identifier :

- Le moment où le micro 1 capte le son qui s'est propagé dans l'air, puisque le micro 2 le capte en même temps (pointillés noirs sur la figure).
- Le moment où le micro 1 capte le son qui s'est propagé dans le fil (pointillés bleus).
- $t = 0$ correspond à la date à laquelle le signal part du pot émetteur.

L'exploitation indique alors une durée de $\Delta t_2 = 10,30$ ms pour que le signal parcourt une distance $D = 3,63$ m dans l'air, et une durée $\Delta t_1 = 3,83$ ms pour parcourir cette même distance via le yaourtophone.

Avec de telles durées, nous mesurons une célérité des ondes sonores dans l'air égale à $c = 352$ m/s.

Quant à la célérité du signal via le yaourtophone, elle vaut $9,48 \cdot 10^2$ m/s. Comme les microphones sont situés à la sortie des pots, que la profondeur des pots est $x = 6,5$ cm, et que la longueur de la ficelle est de $3,51$ m, on peut préciser que la célérité de l'onde dans la ficelle est :

$$c_{fil} = \frac{d}{\Delta t_1 - \frac{2x\Delta t_2}{D}} = \frac{3,51}{3,83 \cdot 10^{-3} - \frac{2 \times 0,065 \times 10,33 \cdot 10^{-3}}{3,51 + 2 \times 0,065}} = 1,01 \cdot 10^3 \text{ m/s}$$

On comprend donc parfaitement la phrase écrite par Hooke concernant la vitesse de propagation du signal dans le yaourtophone, même si on reste tout de même bien loin de la célérité de la lumière. Et pour cause, il s'agit ici d'ondes mécaniques et non pas d'ondes électromagnétiques.

Commentaire :

Nous savons que pour une corde de guitare, la célérité des ondes dépend de la tension de la corde : plus la tension de la corde est grande, plus la fréquence de vibration fondamentale de la corde est élevée. Et comme la longueur d'onde du mode propre ne change pas, la célérité est alors plus grande. Il est possible qu'il en soit de même concernant le yaourtophone. Cela dit, il nous semble qu'il y a une grande différence entre la corde de guitare et le fil du yaourtophone. En effet, les ondes qui s'établissent dans une corde de guitare sont des ondes transversales alors que les ondes sonores sont des ondes longitudinales. Mais finalement, est-ce bien le cas ? Est-ce que le fil transporte des ondes longitudinales ? On peut se poser la question car il n'est pas évident que de la ficelle puisse propager des perturbations qui se présentent comme des compressions / elongations de ce milieu particulier.

b) Nature des ondes se propageant dans le fil : transversales ou longitudinales ?

Et bien pour le savoir, il suffit de mesurer ou de calculer la célérité des ondes transversales dans la ficelle. Et pour cela, nous pouvons utiliser le fait que le mode fondamental de vibration transversale a une longueur d'onde $\lambda = 2d$ (où d est la longueur de la ficelle), et que la fréquence du mode fondamental est :

$$F = \frac{1}{2d} \sqrt{\frac{T}{\mu}}$$

Ainsi, la célérité des ondes transversale sur la corde est :

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

Nous avons alors pris une ficelle de longueur $d = 2,50$ m entre les pots de yaourt, et nous avons accroché une masse de 100 g à une extrémité de la ficelle, ce qui soumet donc la corde à une tension $T = 0,981$ N. (voir figure 5). Nous avons par ailleurs mesuré sa masse linéique $\mu = 3,738 \cdot 10^{-4} \text{ kg/m}$.

Avec de telles valeurs, nous trouvons une célérité égale à 51,5 m/s pour les ondes transversales

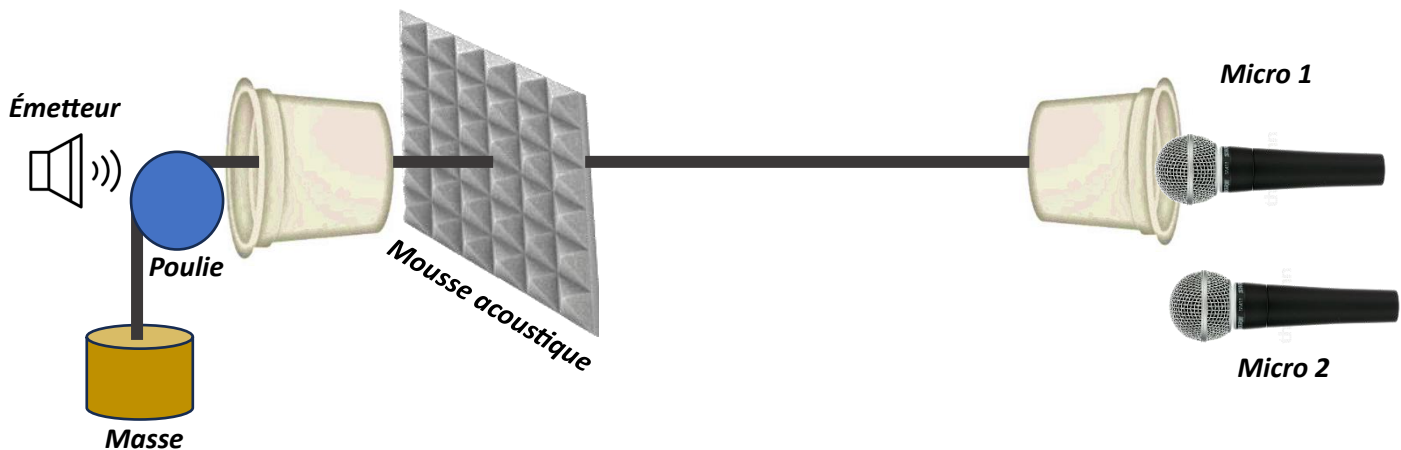


figure 5 : les ondes sont-elles transversales ou longitudinales ?

Nous avons pu vérifier expérimentalement cette valeur en soulevant légèrement la corde en son centre (pour exciter davantage le mode fondamental transversale), puis en la lâchant pour la laisser vibrer. En analysant la vidéo de l'expérience, nous avons pu mesurer que la fréquence du mode fondamental de la corde est 10,4 Hz. Et comme

$$F = \frac{1}{2d}c$$

On obtient $c = 2dF = 2 \times 2,5 \times 10,4 = 52,0 \text{ m/s}$!

Comme nous avons changé la longueur de la corde ainsi que la tension par rapport aux conditions établies dans le paragraphe 2) A – a) , nous avons à nouveau mesuré la célérité des ondes sonores qui se propagent dans le fil tendu à 0,981N pour la comparer à la célérité des ondes transversales, et nous avons trouvé $1,1 \cdot 10^3 \text{ m/s}$.

La comparaison de ces célérités montre clairement que l'onde qui se propage dans le fil n'est pas une onde transversale. Il s'agit donc d'ondes longitudinales.

Intéressons-nous maintenant à une autre caractéristique très importante d'un système de communication : la bande passante du yaourtophone.

2) Quelle est la bande passante du yaourtophone ?

Pour répondre à cette question, nous avons émis des sons purs dans le pot émetteur, avec des fréquences comprises entre 100 et 3500 Hz, en incrémentant la fréquence de 100 Hz entre chaque

mesure. Nous avons alors relevé les niveaux sonores L_e en décibels au niveau de l'émetteur et au niveau du pot récepteur L_r à l'aide d'un sonomètre. figure 6

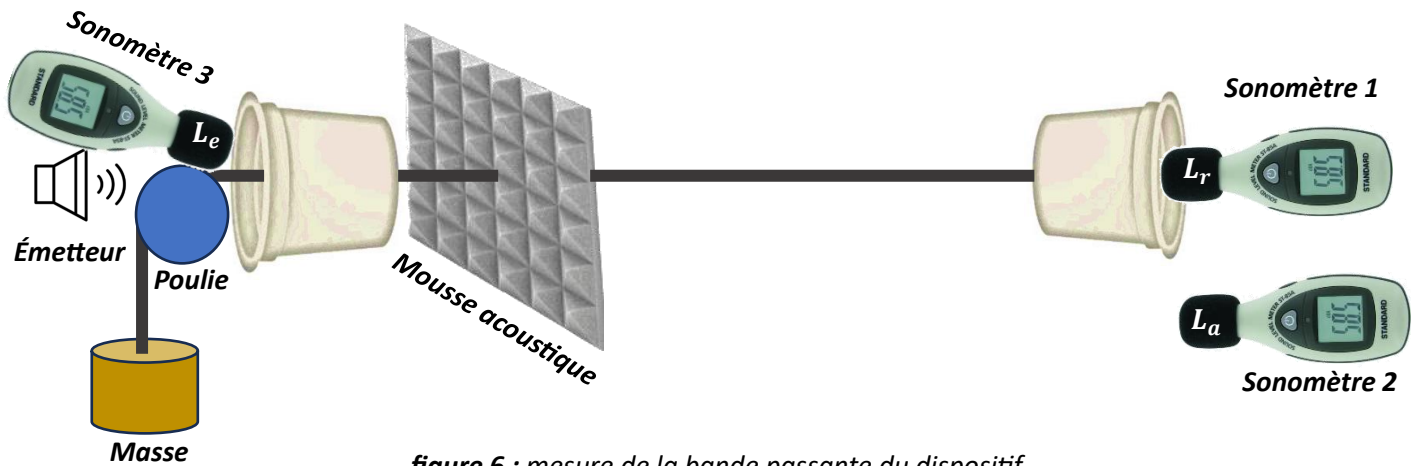


figure 6 : mesure de la bande passante du dispositif

Nous pouvons alors faire une représentation de la bande passante du yaourtophone en traçant la différence $L_e - L_r$ en fonction de la fréquence F .

MAIS... Il fallait aussi tenir compte du fait qu'une partie des ondes reçues par le microphone dans le pot pouvaient s'être propagées dans l'air et non via la ficelle. De ce fait, nous avons également positionné un sonomètre hors du pot récepteur pour mesurer le niveau sonore L_a des ondes passant dans l'air. En effet, l'intensité sonore mesurée dans le pot est la somme de l'intensité sonore du son qui s'est propagé via la ficelle, plus l'intensité sonore du son qui s'est propagé dans l'air.

En appelant I_r l'intensité de l'onde reçue dans le pot, I_a l'intensité sonore captée par le micro à l'extérieur du pot et I_f la partie de l'intensité sonore correspondant uniquement à l'onde transmise par la ficelle, captée par le micro à l'intérieur du pot, on peut écrire que :

$$I_r = I_f + I_a$$

$$L_f = 10 \log \left(10^{\frac{L_r}{10}} - 10^{\frac{L_a}{10}} \right)$$

Et pour pouvoir évaluer la bande passante, nous avons alors tracé $L_e - L_f$ en fonction de la fréquence. Voici le résultat obtenu : figure 7

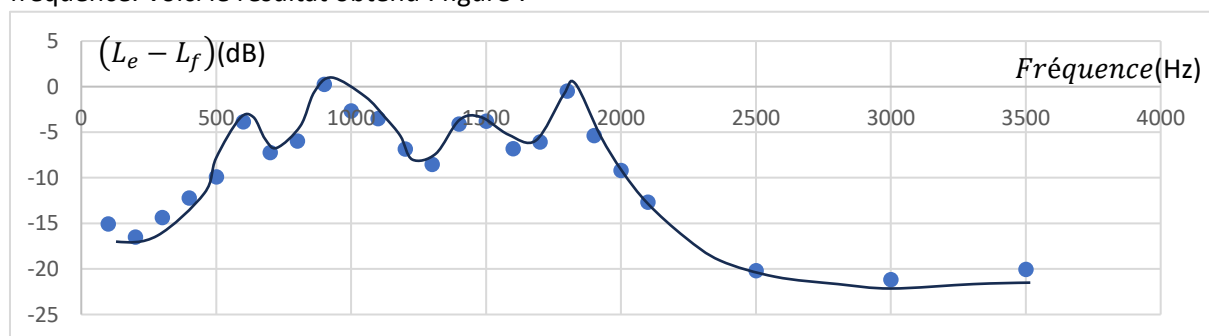


figure 7 : bande passante du dispositif

On peut donc estimer que la bande passante va environ de 500 à 2000 Hz, ce qui en soit n'est pas le plus pratique, car pour le genre masculin, la voix est plutôt comprise entre 100 et 200 Hz alors qu'une femme parle généralement entre 200 et 300 Hz.

Commentaires :

- Les sonomètres utilisés ont une bande passante de 31,5 à 8 kHz (donnée constructeur).
- La bande passante que nous avons mesurée est celle du dispositif dans sa globalité. Nous avons voulu avoir une idée de la bande passante uniquement de la ficelle. Pour cela, nous avons cherché à savoir si les pots de yaourt amplifiaient des fréquences plus que d'autres, afin de comprendre leur contribution au niveau de la bande passante du dispositif. Normalement, pour un tube de longueur $L = 6,5$ cm, ouvert à une extrémité, et fermé à l'autre, le tube résonne à une fréquence fondamentale :

$$F = \frac{c}{4L} = \frac{340}{4 \times 0,065} = 1,4 \cdot 10^3 \text{ Hz}$$

Mais vu la géométrie du pot, avec un diamètre pratiquement aussi grand que sa profondeur, il doit y avoir une différence entre la fréquence de résonance théorique valable pour un tube de faible diamètre par rapport à la longueur et la fréquence de résonance du pot de yaourt pour lequel ce n'est pas le cas. Alors nous avons tracé la courbe de réponse expérimentale du pot de yaourt en envoyant un son de fréquence variable à l'intérieur du pot et en mesurant l'amplitude sonore en sortie. Et pour bien identifier les fréquences amplifiées par le pot de celles émises par l'émetteur, nous avons préalablement mesuré l'amplitude du signal émis par le haut-parleur en fonction de la fréquence, sans la présence du pot (figure 8). Les enregistrements figure 8 représentent les analyses de Fourier de ces deux signaux.

Et les résultats sont très intéressants, car ils montrent que le pot a tendance à amplifier des fréquences comprises entre 850 et 1150 Hz. En revanche, il n'amplifie pas les fréquences comprises entre 500 et 800 Hz, ni de 1100 à 3500 Hz. On peut donc affirmer que ces parties-là de la bande passante sont davantage dues aux caractéristiques de la ficelle qu'au pot. C'est très intéressant d'avoir pu étudier la ficelle indépendamment du reste du dispositif pour ensuite comparer à d'autres matériaux.

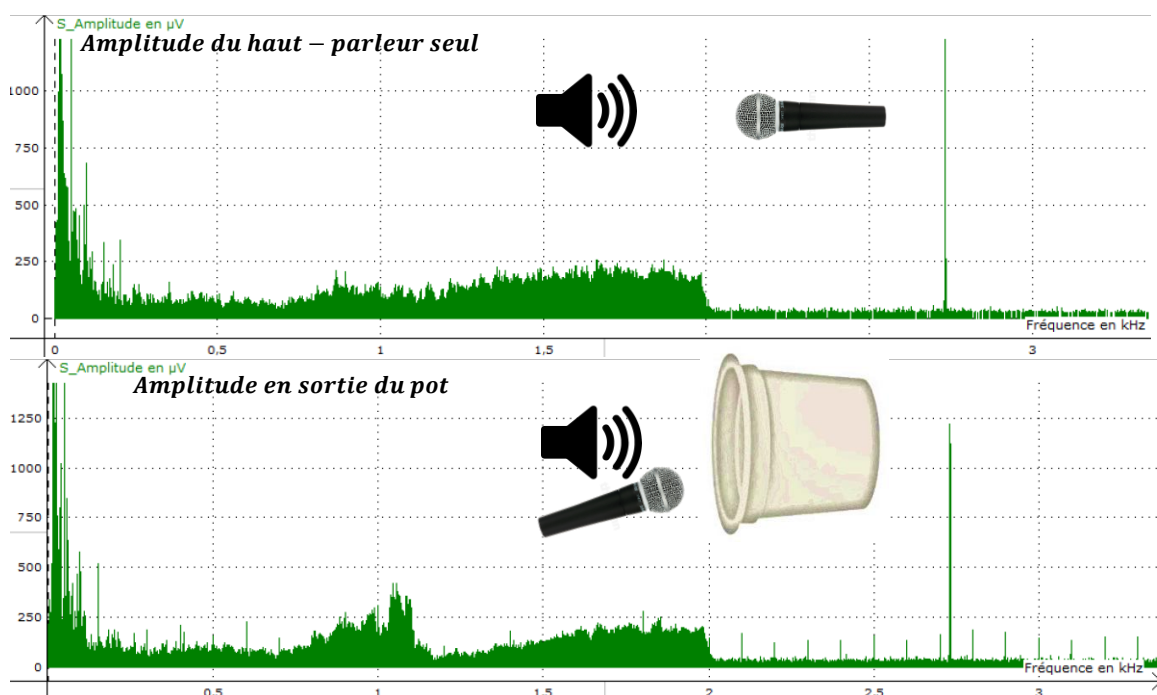


figure 8 : Comparaison de :

- l'amplitude du haut-parleur seul en fonction de la fréquence (en haut)
- à la réponse du pot récepteur (en bas)

Voyons maintenant si ce dispositif est dispersif pour la transmission des ondes sonores.

3) Est-ce que le yaourtophone est dispersif pour les ondes sonores ?

Il faut savoir si deux ondes de fréquences différentes se propagent avec des célérités différentes. Le problème, c'est qu'on ne peut pas faire un son pur et très bref. Alors nous avons eu une autre idée : Nous allons émettre un son pur en continu côté yaourt émetteur, et nous allons tenter de visualiser le signal le long de la ficelle ainsi que le signal émis, mais comment ? Nous avons pensé qu'il était possible de visualiser le signal le long de la ficelle en accrochant une autre ficelle de très petite taille (10 cm), reliée à un troisième pot dans lequel se trouve un micro 2, comme le montre le schéma suivant : figure 9

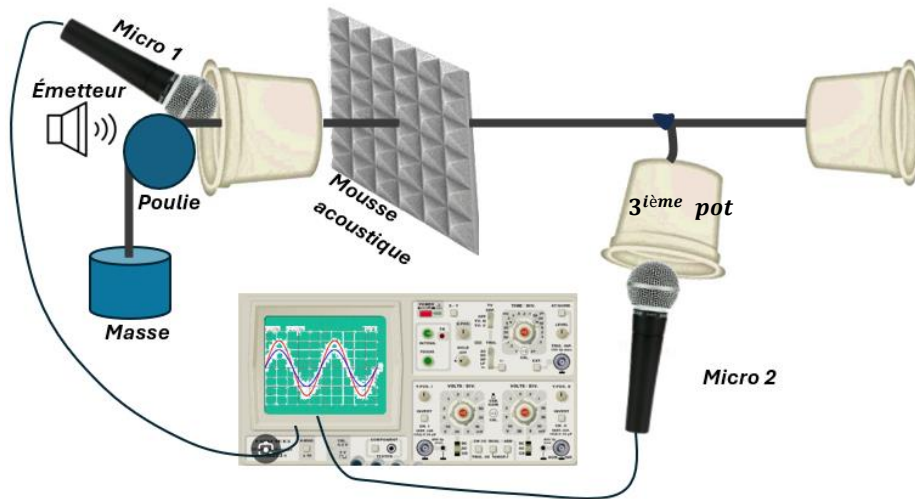


figure 9 : Dispositif pour savoir si le milieu est dispersif

L'idée est de chercher une position du 3^{ème} pot de telle sorte que le signal soit en phase avec celui de l'émetteur, puis on recule ce troisième pot. Le signal du 3^{ème} pot se déphase par rapport à celui de l'émetteur. Puis, on continue de reculer le 3^{ème} pot pour rechercher la nouvelle position à laquelle le signal revient en phase avec celui de l'émetteur. La distance entre les deux positions en phase correspond donc à la longueur d'onde de l'onde, ce qui nous permettra de déterminer la célérité puisqu'on connaît les fréquences des ondes envoyées dans la ficelle (figure 10).

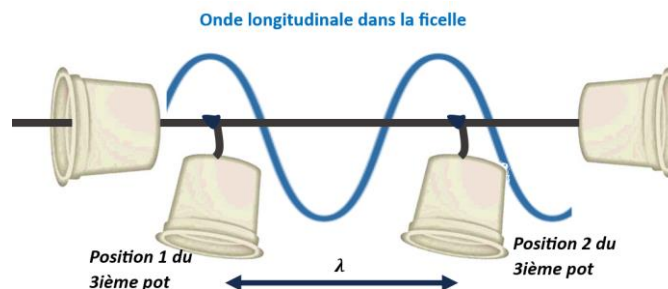


figure 10 : mesure de la longueur d'onde

Alors avant de se lancer dans cette expérience, il faut avoir une idée des longueurs d'onde le long de la ficelle : sachant que $\lambda = c/F$, en travaillant avec des ondes entre 500 et 1100 Hz, et une célérité que nous avons mesurée égale à 1100 m/s, les longueurs d'ondes peuvent atteindre des valeurs supérieures à 2m. Pour pouvoir alors voir plusieurs longueurs d'onde le long de la ficelle, nous avons choisi de

travailler avec une ficelle de longueur 7m au bout de laquelle nous avons fait pendre une masse de 300g. Cette masse nous assurait ainsi de garder une tension constante dans la corde.

Et ça fonctionne ! on récupère bien un signal sonore dans ce troisième pot, que l'on peut ainsi envoyer vers un oscilloscope pour chercher les positions successives où le signal sera en phase avec celui de l'émetteur (figure 11).



figure 11 : A gauche : signal du pot 3 en phase avec l'émetteur – Au milieu, signal du pot 3 en opposition de phase avec le signal émetteur. A droite, dispositif expérimental avec table mobile portant le pot 3

Mais problème : voici les résultats obtenus : Connaissant la fréquence et mesurant la longueur d'onde, nous avons mesuré la célérité dans la troisième colonne :

Fréquence (Hz)	Longueur d'onde mesurée (m)	$c = \lambda F$
635	3,26	$2,07 \cdot 10^3$
885	2,65	$2,35 \cdot 10^3$
1050	2,19	$2,30 \cdot 10^3$

Les célérités que l'on trouve sont beaucoup trop grandes par rapport à ce que nous avons pu mesurer auparavant. Nous avons refait nos mesures sans que cela change. En fait, soit la méthode que nous utilisons n'est pas bonne d'un point de vue expérimental, soit il se passe autre chose dans le fil, comme par exemple la possibilité qu'il y ait une partie des ondes qui fassent des ondes stationnaires au sein de la ficelle. Et dans ce cas-là, il devient beaucoup plus délicat de lier les endroits où les deux signaux visualisés sont en phase, à la longueur d'onde du signal. Nous n'avons pas alors pu aller au bout de notre étude sur l'aspect dispersif ou non du dispositif.

Par contre, cela nous a donné envie de vérifier s'il y avait des ondes stationnaires au sein de la ficelle. Car si c'est le cas, ce serait un mauvais point pour ce système de communication.

4) Est-ce que le yaourtophone est le siège d'ondes stationnaires ?

Si c'est le cas, alors il doit exister des longueurs de corde pour lesquelles, conformément à un phénomène de résonance, une fréquence sonore conduisent à une amplitude maximale au niveau du pot récepteur. Pour le savoir, nous avons pris une ficelle de 7m de long, nous avons fait pendre une masse de 300 g à une extrémité, et nous avons envoyé successivement 4 signaux purs de fréquences différentes. Nous avons alors mesuré l'amplitude sonore dans le pot récepteur. Une fois ces 4 mesures réalisées, nous avons coupé la ficelle afin de réduire sa longueur et nous avons à nouveau envoyé les 4 signaux purs, et ainsi de suite. Voici alors les amplitudes sonores que nous avons mesurées au niveau du pot récepteur, en fonction de la longueur de la ficelle, pour l'ensemble des fréquences testées :

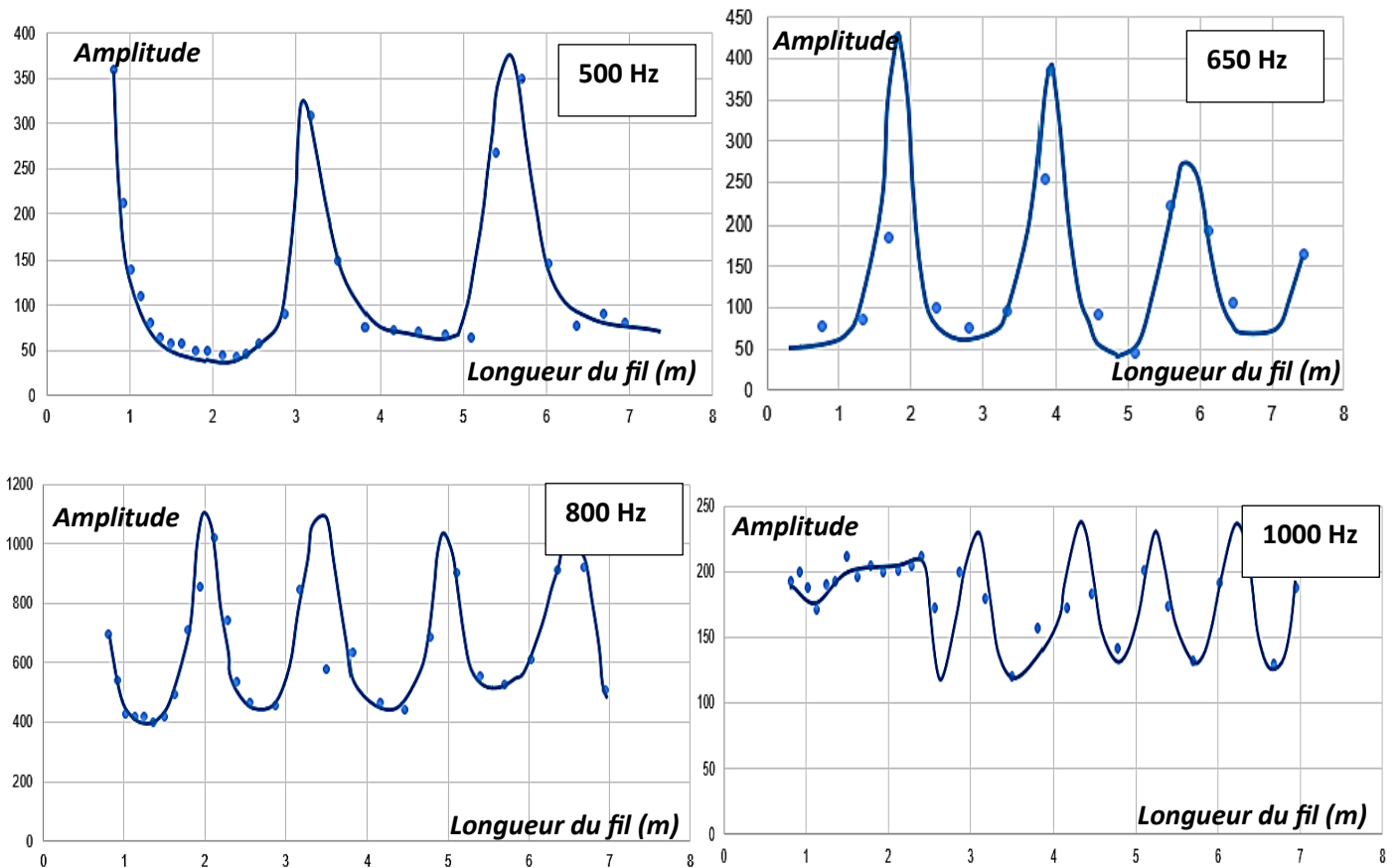


figure 12 : est ce que le yaourtophone est siège d'ondes stationnaires ? Mesure de l'amplitude sonore dans le pot récepteur en fonction de la longueur de la ficelle pour 4 fréquences différentes du son émis

Conclusion, ce comportement semble bien indiquer qu'il existe des fréquences d'ondes sonores qui conduisent à des amplitudes maximales en certains endroits de la ficelle, ce qui indique la présence de modes propres de vibration de la corde, donc d'ondes stationnaires. Cela dit, l'exploitation de ces ondes stationnaires reste compliquée, probablement due au fait que le taux d'ondes stationnaires doit être faible. Si les ondes stationnaires dominaient dans le dispositif, la distance entre 2 amplitudes maximales serait égale non pas à la longueur d'onde, mais à $\frac{1}{2}$ longueur d'onde, ce qui ne permettrait pas de retrouver des valeurs cohérentes pour la célérité des ondes. En effet, pour les 4 fréquences étudiées, on aurait alors des célérités calculées trop élevées :

Fréquence (Hz)	Longueur d'onde (m)	Célérité (m/s)
500	$2,5 \times 2$	$2,6 \cdot 10^3$
650	2×2	$2,6 \cdot 10^3$
800	$1,5 \times 2$	$2,4 \cdot 10^3$
1000	1×2	$2,0 \cdot 10^3$

Nous venons de passer en revue plusieurs caractéristiques du yaourtophone. Nous sommes maintenant prêts à faire varier certains d'entre elles, à modifier le dispositif, pour voir comment le rendre optimal, ou au moins, pour savoir comment cela va affecter ses performances.

II – Comment rendre le yaourtophone le plus efficace ?

1) Influence de la tension de la ficelle

Nous nous sommes demandés si, comme pour une corde de guitare, et bien que les ondes soient ici longitudinales et non transversales, la tension avait une influence sur la célérité des ondes. Pour le vérifier, nous avons refait l'expérience présentée au paragraphe I – 2) A – a) , sauf que cette fois-ci, nous avons accroché une masse variable à l'extrémité de la ficelle. Nous avons alors fait varier la valeur de la masse pour modifier la tension de la corde, avec des masses allant de 10g à 1kg. Pour chacune des masses, nous avons réalisé 10 mesures, de sorte à pouvoir calculer une incertitude sur les mesures de la célérité. Voici alors les résultats obtenus :

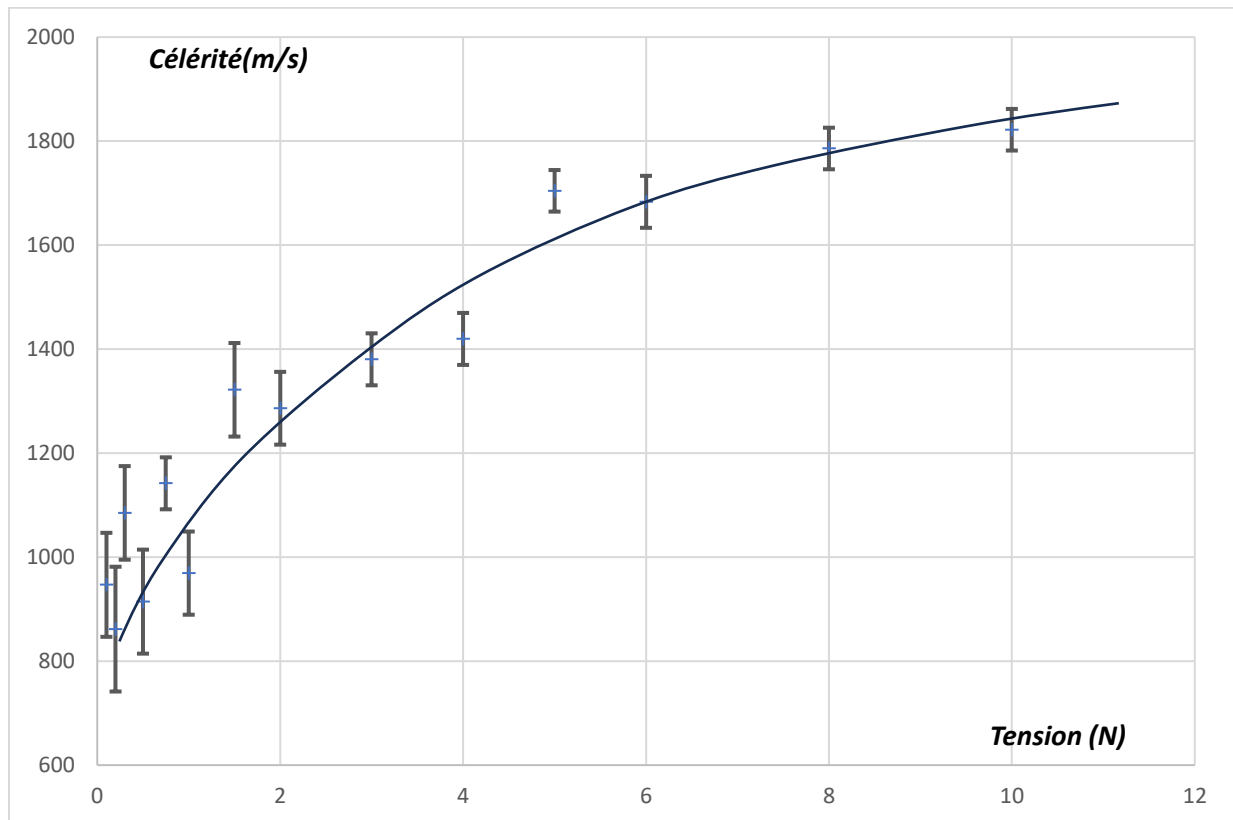


figure 13 : célérité des ondes en fonction de la tension de la ficelle

Les résultats montrent clairement une dépendance envers la masse. Une modélisation par une loi de puissance semble alors le plus approprié, et on obtient $c(T) = 1,2 \cdot 10^3 \times T^{0,18}$.

Une ficelle plus tendue aura donc le mérite de propager l'information plus rapidement. Mais est-ce que cela affectera également d'autres paramètres, en particulier la bande passante ?

En faisant un balayage en fréquence de 100 à 3000 Hz avec 2 tensions différentes, l'une à 100g, l'autre à 300 g, nous obtenons les résultats suivants : figures 15 et 16

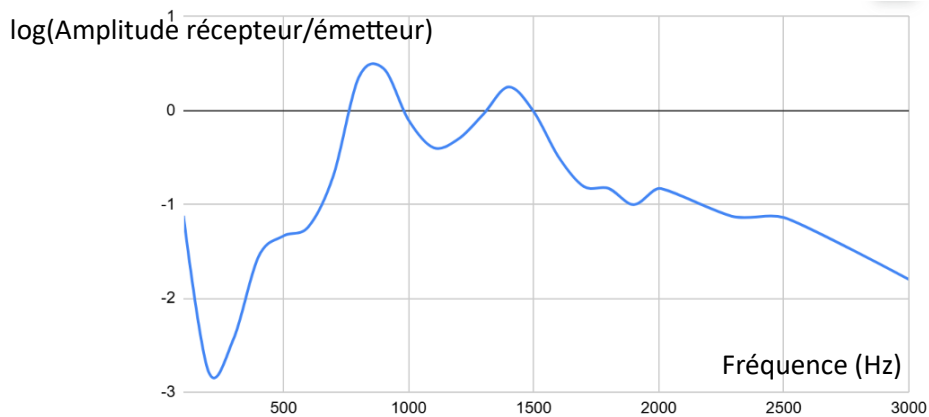


figure 15 : Bande passante pour tension de 1N

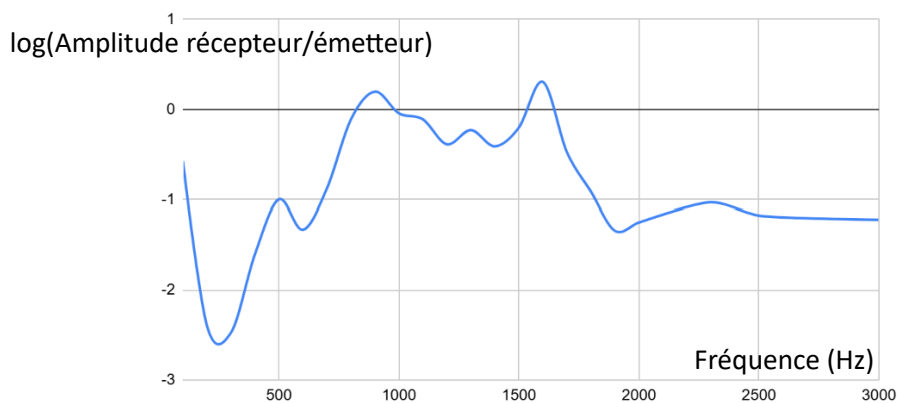


figure 16 : bande passante pour tension de 3 N

On constate alors que la tension influence peu, voire pas l'amplitude du signal. Ayant réalisé cette étude récemment, nous n'avons à ce jour réalisé cette mesure uniquement pour 2 tensions différentes, et nous devons donc faire de même pour d'autres tensions pour confirmer la conclusion établie.

2) Le yaourtophone est-il plus efficace si le son produit à l'émission est de forte amplitude ?

La question posée est en fait de savoir s'il est utile de s'égosiller dans le pot émetteur ou non pour que le son à l'arrivée soit de plus grande amplitude. Et si oui, peut-on avoir une idée d'une limite ?

Pour le savoir, nous avons produit un son avec une certaine amplitude, que nous avons envoyé dans le mot émetteur. Nous avons fait varier cette amplitude depuis une valeur initiale à cette valeur multipliée par 10, et nous avons relevé l'amplitude reçue par un micro placé dans le pot de yaourt.

Voici les mesures réalisées : en bleu, nous pouvons observer l'amplitude du signal émis au cours du temps, nommée EA0 dans le logiciel Latis pro, et en rouge l'amplitude du signal reçu au cours du temps dans le pot récepteur, nommée EA1. figure 17

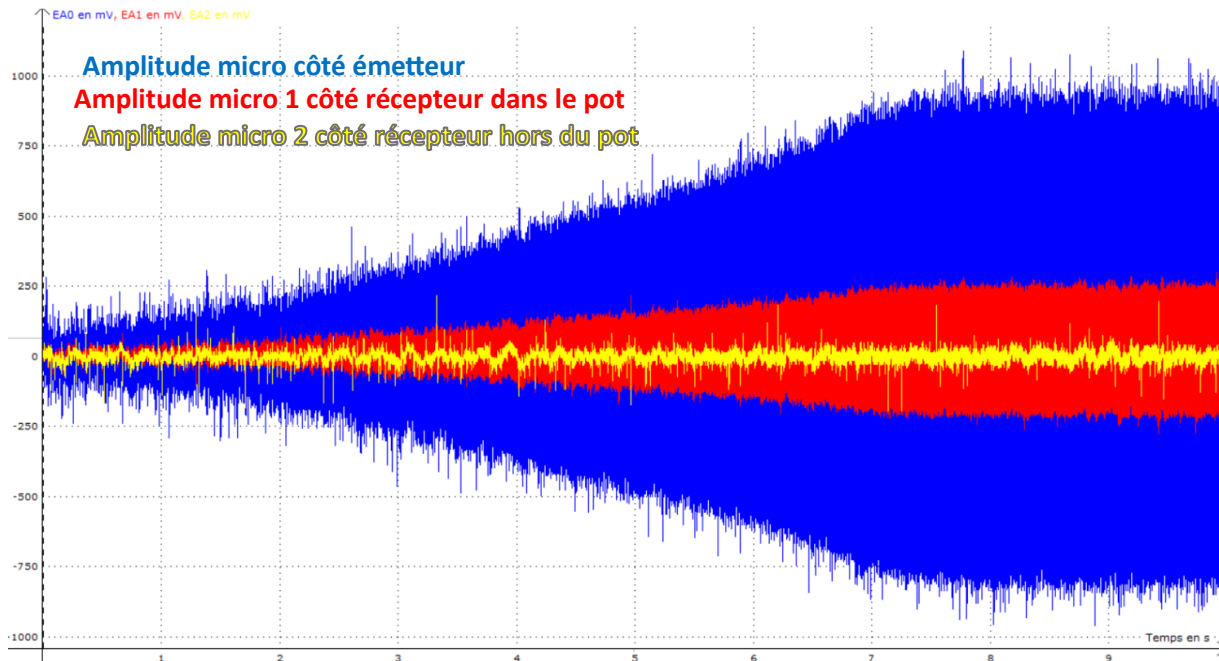


figure 17 : Amplitude sonore du récepteur en fonction de l'amplitude sonore de l'émetteur

A partir de cette courbe, nous avons décidé de tracer l'**amplitude EA1** en fonction de **EA0**. Voici ce que nous obtenons : figure 17 bis

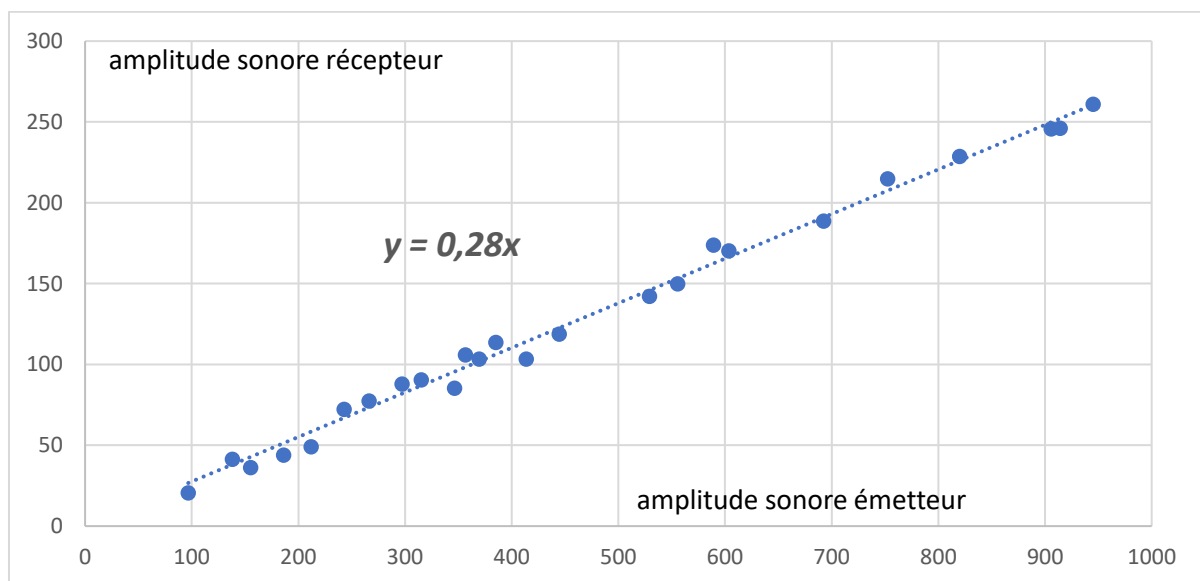


figure 17 bis : Amplitude sonore du récepteur en fonction de l'amplitude sonore de l'émetteur

La courbe linéaire montre alors une parfaite proportionnalité entre le signal reçu et le signal émis. Nous n'avons pas pu atteindre de limite car pour un son émis avec trop d'intensité, le micro dans le pot aurait été affecté par le signal issu de l'émetteur en passant par l'air et non par le fil.

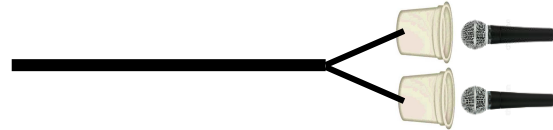
Nous pouvons conclure que, dans la gamme d'amplitude étudiée, le milieu se comporte de façon linéaire en termes d'amplitude. Il peut donc être intéressant de parler fort pour bien se faire entendre.

En fait, cette étude que nous venons de faire à propos de l'amplitude du signal reçu dans le pot récepteur nous a amené à la question suivante :

Est-ce que si on met deux écouteurs, l'amplitude est divisée par 2 ?

Nous avons réalisé l'expérience : dans un temps, nous avons mesuré l'intensité sonore reçue dans le pot récepteur avec un fil composé de 8 brins principaux, et nous avons tracé le rapport de l'amplitude sonore reçue divisée par l'amplitude sonore émise, en fonction de la fréquence (voir courbe rouge sur la figure 18).

Puis nous avons divisé l'extrémité de la ficelle en 2, de sorte que 4 brins aillent dans un pot, et 4 autres brins aillent dans un autre pot, comme le montre le schéma ci-contre :



Nous avons mesuré l'intensité sonore reçue dans les 2 pots récepteurs, et nous avons tracé la somme des rapports de l'amplitude sonore reçue divisée par l'amplitude sonore émise, en fonction de la fréquence (voir courbe bleue sur la figure 18).

Le résultat est donc cohérent avec la conservation de l'énergie.

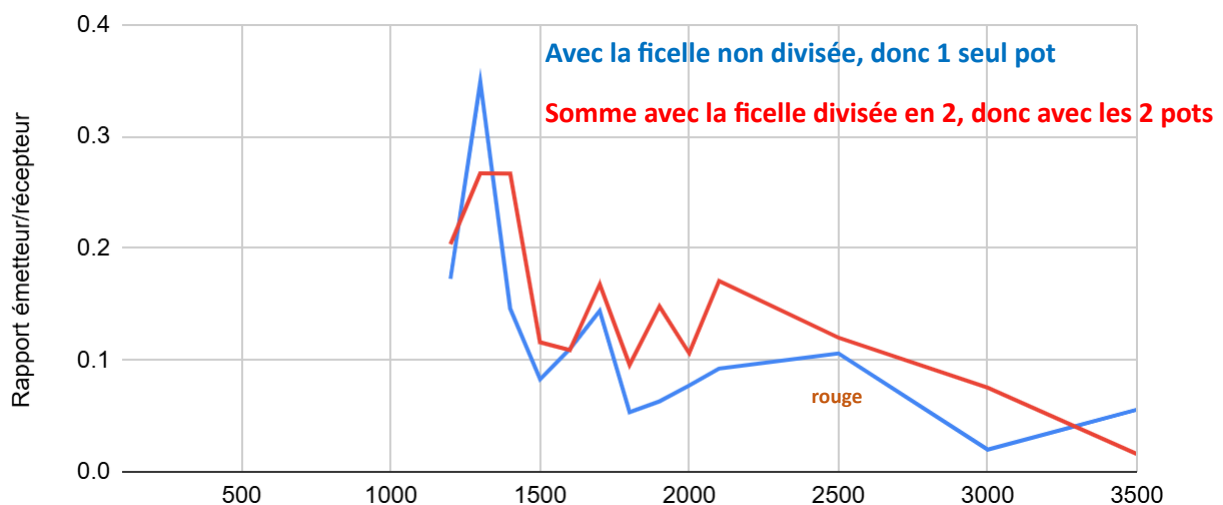


Figure 18 : la somme des amplitude sonores issue des 2 micros (en bleu) est égale à deux fois l'amplitude sonore issue de la ficelle non divisée (en rouge)

en effet, la courbe représentative de la somme de l'amplitude du signal reçu par les deux récepteurs reliés chacun à 4 brins de la ficelle correspond environ à celle reçue avec un seul récepteur relié à 8 brins de la ficelle. Nous pouvons en conclure qu'ajouter un deuxième récepteur divise l'amplitude du signal et que le yaourtophone ne permettra donc pas de communiquer avec une assemblée de personnes.

Voyons maintenant ce qu'il se passe si on modifie la nature du fil qui relie les deux pots.

3) Influence de la nature du fil transportant l'information

Nous avons tenté de remplacer la ficelle par du fil de pêche, par du fil de cuivre et de la ficelle de plus gros diamètre.

a) Influence de la nature du fil sur la célérité des ondes :

Les expériences ont été réalisées avec une seule tension de corde égale à 3N, avec 10 mesures pour chaque matériau dans le but de faire une valeur moyenne. Voici les valeurs trouvées :

Fil de pêche :

$$c = (1,38 \pm 0,18) \cdot 10^3 \text{ m/s}$$

On trouve une valeur très similaire à celle trouvée avec la ficelle. Il est intéressant toutefois de noter que cette même célérité est ici obtenue avec un fil de pêche de diamètre 0,4 mm contre 1,0 mm pour

la ficelle. Nous pensons alors que c'est la plus grande densité du fil de pêche par rapport à la ficelle qui permet de toujours avoir une grande célérité de communication.

Ficelle de plus gros diamètre :

$$c = (1,19 \pm 0,09) \cdot 10^3 \text{ m/s}$$

Il est assez étonnant de voir que, pour la ficelle de plus gros diamètre, la célérité soit légèrement inférieure (d'environ 200 m/s) à celle trouvée avec le fil avec lequel nous avons fait toutes nos mesures précédentes. Intuitivement, nous aurions plutôt tendance à dire que plus le diamètre du fil est grand, plus l'information peut circuler facilement. Cette mesure étant récente, nous vérifierons si la nature des 2 ficelles utilisées est identique.

Câble en cuivre de section 1,5 mm² :

$$c = (4,18 \pm 0,44) \cdot 10^3 \text{ m/s}$$

La célérité obtenue avec le câble de cuivre remporte donc haut la main le concours des vitesses. Cela dit, le yaourtophone avec un câble de cuivre est inutilisable car l'amplitude du son que l'on récupère dans le pot récepteur est extrêmement faible. A l'oreille, nous n'entendons pour ainsi dire... rien. Et il n'y a que si l'on cogne directement le fil de cuivre dans le pot émetteur que l'on parvient à entendre quelque chose dans le pot récepteur.

Conclusion : il semble en fait que le paramètre principalement mis en jeu, concernant la vitesse à laquelle se propage les ondes dans le matériau soit son module d'Young. En effet, nous avons pu lire que le cuivre a un module d'Young de l'ordre de 110 à 120 GPa, alors que le fil de pêche (ici en nylon) à un module d'Young de l'ordre de 2 à 4 GPa. La ficelle en coton que nous utilisons a également un module d'Young de l'ordre du GPa.

b) Influence de la nature du fil sur la bande passante :

Voici la bande passante que l'on obtient pour un yaourtophone composé de 2 pots de yaourt et du fil de pêche.

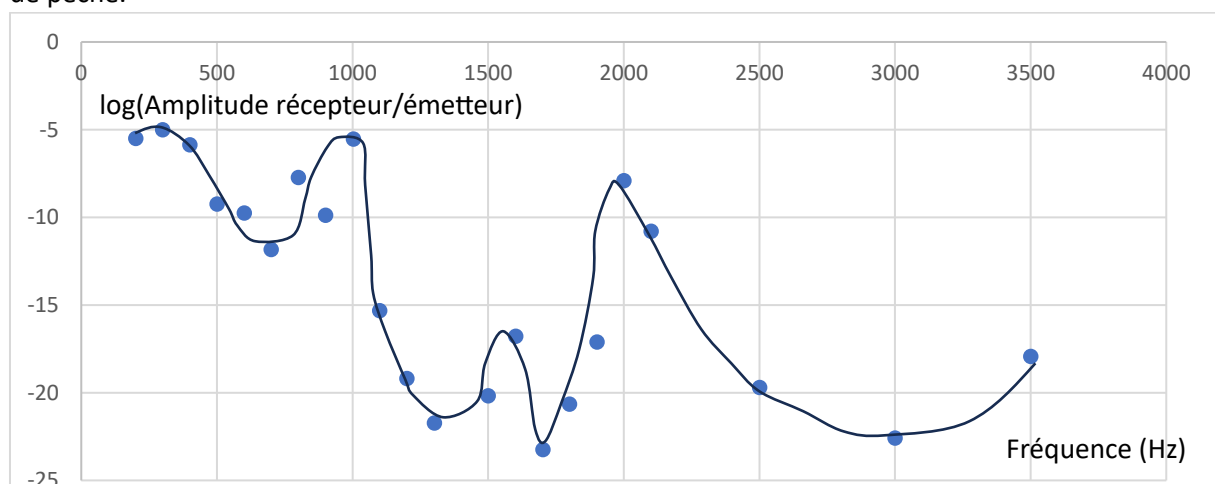


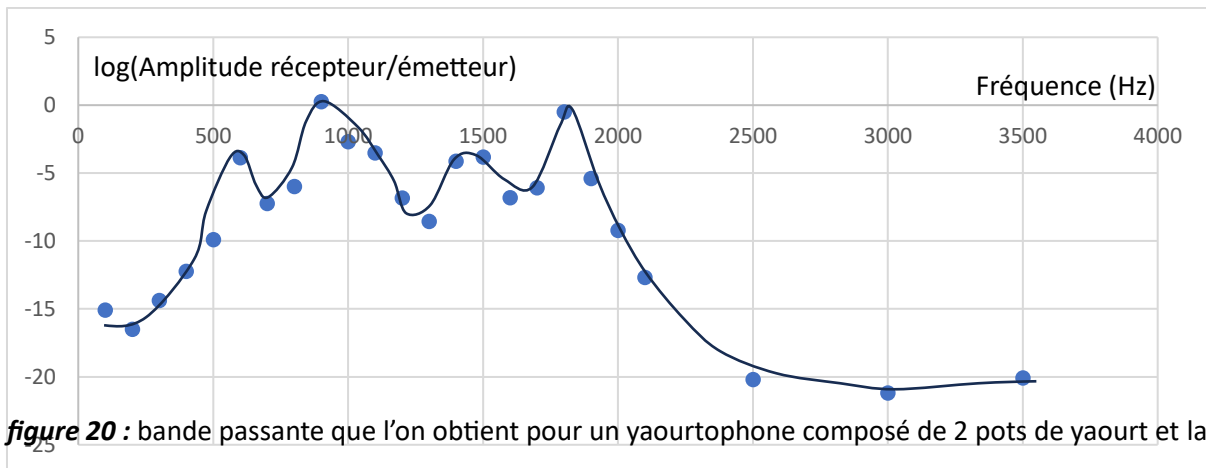
figure 19 : bande passante que l'on obtient pour un yaourtophone composé de 2 pots de yaourt et du fil de pêche

Puisque le but est d'étudier plus précisément l'influence du fil de pêche comparé à la ficelle, on peut se rappeler des caractéristiques du pot uniquement à l'aide des figures 8 : le pot a tendance à résonner pour des fréquences comprises entre 200 et 500 Hz mais aussi 850 et 1100 Hz. Cela peut ici

correspondre au pic encadré sur la figure ci-dessus. Dans ce cas-là, on en déduit que le fil transmet particulièrement bien les fréquences comprises entre 200 et 500 Hz mais aussi 850 et 1100 Hz, ce qui est beaucoup plus pratique que ce que l'on a pu observer avec la ficelle dans l'idée de transporter la voix humaine.

La comparaison de la bande passante obtenue avec le fil de pêche et avec la ficelle nous donne également une autre idée.

Pour rappel, voici la bande passante obtenue avec la ficelle :



On remarque que ces bandes passantes sont assez complémentaires. L'idée nous est alors venue de mettre à la fois une ficelle et un fil de pêche entre les deux pots de yaourt, pour augmenter la bande passante du dispositif. On aurait ainsi un dispositif analogue à une enceinte contenant plusieurs haut-parleurs possédant chacun une bande passante différente. Nous essaierons de faire cela par la suite. Par contre, comme les signaux ne se propagent pas à la même célérité dans ces deux matériaux, il faudra ajuster les tensions pour que cela ne conduise pas à une déformation du signal.

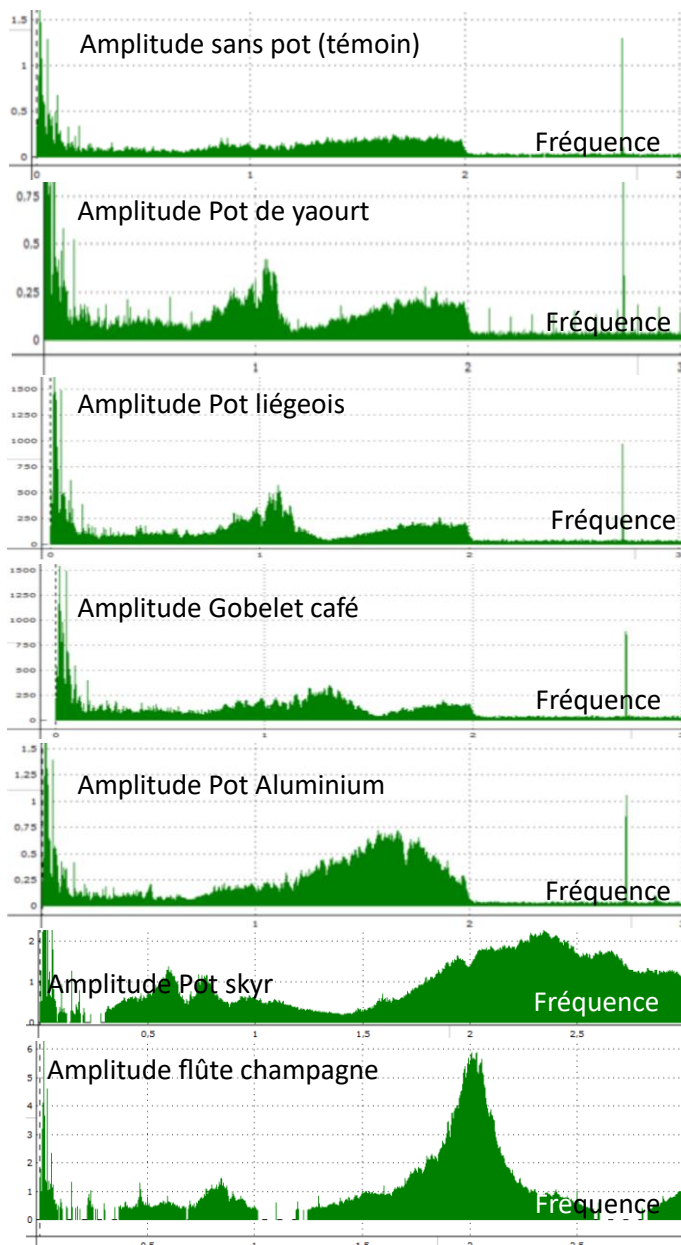
4) Influence du pot :

Nous nous sommes beaucoup attardés sur le fil, mais il ne faut pas oublier que dans la chaîne de transmission du son, il y a le pot. Or, on l'a vu dans le cas du pot de yaourt (figure 8) celui-ci peut amplifier certaines fréquences. L'idéal serait qu'il amplifie en réalité toutes les fréquences de la même manière. En effet, si dans la chaîne de transmission, une bande de fréquence de faible largeur est amplifiée, cela vient nuire à la qualité du signal récupéré dans le pot récepteur.

Nous avons alors testé différents pots, dont les caractéristiques géométriques sont les suivantes :



Type de Pot	Profondeur (cm)	Diamètre du haut (cm)	Diamètre du bas (cm)
Pot de yaourt Super U	6,5	5,7	4,7
Pot en aluminium	3,8	7,5	6,2
Pot liégeois	7,9	5,7	4,4
Gobelet pour café	6,3	6,0	4,5
Pot Skyr	9.8	11.5	8.7



En envoyant dans le pot une onde sonore dont on fait varier la fréquence entre 0 et 2000 Hz, un microphone placé en sortie du pot récupère un signal dont voici la transformée de Fourier :

Le pot a donc bien une importance non négligeable car celui étudié ici amplifie bien une large bande de fréquences, entre environ 1300 et 1900 Hz pour le pot en aluminium, et une bande plus étroite comprise entre environ 800 et 1200 Hz pour le pot liégeois. Malheureusement, ces bandes de fréquences ne nous intéressent pas, car bien trop élevées par rapport aux fréquences de la voix. Comme nous pouvons le voir, le pot de skyr, de par sa taille plus grande, permet d'amplifier des fréquences plus faibles, mais toujours pas assez faibles par rapport à celles de la voix. Mais le grand diamètre du pot de skyr risque tout de même de ne pas être bien adapté à la taille de l'oreille pour récupérer une bonne intensité sonore.

figure 21 : Etude de la résonance des pots seuls

Conclusion

Nous pouvons d'ores et déjà attester que ce phénomène existe réellement, et qu'il est bien plus complexe que l'on pourrait le croire de prime abord. Nous nous sommes intéressés aux caractéristiques qui influent sur le fonctionnement du système, et avons étudié de nombreux aspects d'un point de vue physique, tels que la nature des ondes ou même leur célérité. De plus, nous avons découvert que ce système était en fait un milieu non dispersif, mais aussi le siège d'ondes stationnaires.

Notre but a ensuite été de découvrir quels paramètres étaient propices à la meilleure communication possible, que ce soit le rôle que joue la tension de la ficelle, ou l'importance de l'amplitude du signal émis, mais également à quel point les caractéristiques du fil et des pots étaient déterminantes dans le fonctionnement du système. Nos objectifs sont dorénavant tous tracés : nous aimerions approfondir notre recherche sur les caractéristiques susceptibles d'améliorer la communication, notamment en nous intéressant au module d'Young du fil utilisé, pour voir si sa rigidité influe sur les performances du dispositif. Nous avons également des échanges prévus avec un ingénieur issu de télécom sudParis, ce qui nous permettra d'avoir un aperçu plus général des qualités d'un moyen de communication et ce qui nous ouvrira sans doute de nouvelles perspectives.