

## « PHÉNOMÈNES DE RÉSONANCE »

### PRINCIPE DE L'EXPÉRIENCE

Le lien entre les phénomènes de résonance et les ponts peut être flagrant pour certains et totalement inconnu pour d'autres. Certains vous diront : « Ah, mais oui, c'est le fameux pont qui s'est cassé aux USA » ; ou même pour les plus connaisseurs : « Il parle forcément du pont de Tacoma ». Le phénomène est impressionnant du fait de son ampleur et ses conséquences dévastatrices. Aux Etats-Unis, le 7 novembre 1940, après d'impressionnantes oscillations, le pont de Tacoma s'écroule, sous les yeux médusés de nombreux témoins. Une affirmation souvent colportée est que cet effondrement est dû au phénomène de résonance. La raison est en réalité plus complexe. (Voir [Pont de Tacoma : la contre-enquête | Pour la Science](#))

Notre objectif est de réaliser une maquette d'un pont et de simuler une résonance pour vérifier dans quelle mesure elle peut être rendue coupable de l'effondrement du pont.

### MATÉRIEL

Le matériel nécessaire à cette expérience est en grande partie accessible facilement et à un faible coût.

Voici une liste du matériel dont vous aurez besoin :

- \* Deux dispositifs vibrants/oscillants permettant de faire entrer en résonance le tablier du pont
- \* Un/Des générateur(s) de fréquence permettant de contrôler les dispositifs vibrants/oscillants
- \* Des câblages reliant les dispositifs au(x) générateur(s) (ici, des câbles bananes)
- \* Des plaques de plâtres
- \* Deux encoches fixant la plaque de plâtre aux systèmes oscillants/vibrants
- \* Deux pieds dans lesquels viennent s'encaster les systèmes oscillants/vibrants

Remarques : les pieds ne sont pas obligatoires. Ils sont présents afin de rendre le pont plus réaliste. Il est également possible de rendre le pont esthétique en le décorant et en le plongeant dans un contexte, mais rien de cela ne va influencer la physique de l'expérience...

### ***Fabrication du tablier à partir des plaques de plâtre (plaques de Gyproc) :***

L'expérience permet de déterminer des mesures *idéales* pour le tablier :

- Une épaisseur de plaque de plâtre de 9 millimètres.
- Une longueur de plaque de plâtre allant de 1 mètre à 1,2 mètre.
- Une largeur de plaque de plâtre de 4 centimètres.

Les plaques de Gyproc sont recouvertes de feuilles cartonnées très résistantes. Si l'on veut s'assurer que la plaque puisse céder, il faut légèrement les poncer sur toute sa longueur. De cette manière, nous enlevons simplement de la résistance induite par un matériau.

Assurez-vous que la plaque soit tenue lorsqu'elle est placée sur les dispositifs oscillants/vibrants. Pensez donc à adapter soit les parties extrêmes de la plaque, soit les encoches permettant de maintenir la plaque.

### *Conseils personnels...*

*Pour les dispositifs oscillants, nous avons utilisé un « Vibrator Generator », comme illustré sur la photo ci-contre.*



*Pour l'encoche, nous avons décidé de nous servir d'une « rigole de plâtre », que nous avons coupé à une mesure correspondant au diamètre de nos dispositifs oscillants. Dès lors, nous avons dû légèrement adapter nos plaques afin qu'elles restent stables et fixes dans l'encoche.*



*En ce qui concerne le(s) générateur(s), deux options s'offrent à vous :*

1. *Vous utilisez un seul générateur relié aux deux dispositifs afin d'avoir plus facile à contrôler la fréquence ainsi que la phase des oscillations. Cependant, il faut un générateur suffisamment puissant.*
2. *Vous utilisez deux générateurs reliés chacun à un dispositif. Il faut alors prendre plus de temps pour accorder la phase des oscillations. De plus, il faut s'assurer de faire varier les fréquences en même temps afin de ne pas créer de déphasage. L'avantage est que des générateurs moins puissants suffisent.*

### MODE OPÉRATOIRE

Une fois le montage terminé, l'expérimentation et l'amusement peuvent enfin commencer !

1. Installer les dispositifs oscillants/vibrants en les reliant au(x) générateur(s) à l'aide des câblages.
2. Fixer les encoches dans les dispositifs.
3. Placer la plaque de plâtre dans les encoches
4. Ajuster la fréquence jusqu'à ce que l'amplitude d'oscillation augmente significativement. Une figure d'interférence apparaît sur le pont : des endroits fixes où le tablier oscille très fort et d'autres quasiment pas.
5. Pour briser le pont, il faut augmenter l'amplitude de vibration des oscillateurs.

#### Conseil personnel...

*Afin que le phénomène soit le plus visuel et le plus didactique possible, il faut trouver la première fréquence de résonance du tablier, c'est-à-dire celle qui permet la formation d'un seul ventre de vibration. Dans notre cas, avec les dimensions précitées, elle se situe aux alentours de 5,5 Hertz.*



*Photographie du dispositif. La plaque de plâtre est soutenue par deux encoches métalliques chacune fixée aux oscillateurs. Chaque oscillateur est relié à un générateur de fréquence.*



*Photographie de l'oscillateur sur lequel est fixé une encoche métallique. Elle permet de soutenir la plaque de plâtre.*



*A la fréquence de résonance, l'oscillation du pont est maximale à l'endroit où se trouve le ventre de vibration. Si l'amplitude est suffisante, alors, il cède.*

### RÉSULTATS ET CONCLUSION

L'expérience montre qu'à la fréquence de résonance, la plaque de plâtre finit par céder à l'endroit où l'amplitude d'oscillation est maximale, c'est-à-dire aux ventres de vibration. Toute la difficulté réside dans la détermination d'une fréquence propre du système. Des ondes de natures différentes s'installent sur le pont (transversales et de torsion), ce qui complique la détermination théorique de ces fréquences particulières. L'essai-erreur est donc le seul moyen d'y parvenir.

Les essais menés pour concevoir cette expérience ont été nombreux. Il s'agit pour le moment d'un prototype qui est sujet à amélioration.

### EXPÉRIENCES COMPLÉMENTAIRES

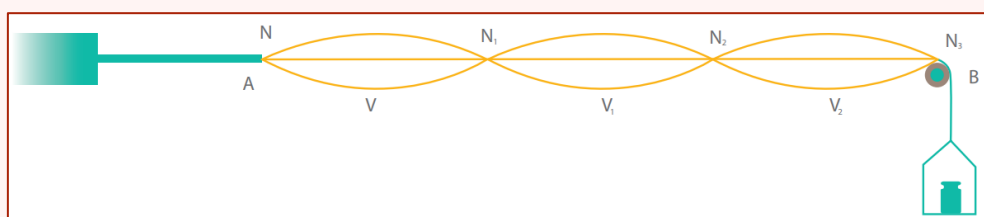
Ci-après sont décrites des expériences complémentaires qui permettent d'aborder dans des situations plus simples les phénomènes de résonance présents dans l'oscillation du pont. Elles ont l'avantage d'être facilement reproductibles et de fournir des observations claires. Les éléments clés de la résonance sont progressivement introduits en partant de la vibration d'un objet à 1D jusqu'à un autre à 3D.

## LA CORDE VIBRANTE

*ONDES STATIONNAIRES À UNE DIMENSION*



Il est relativement difficile d'imposer manuellement à un système une cadence qui soit régulière. Par contre, il est aisé de l'imposer avec un dispositif électrique : dans notre expérience, la membrane d'un haut-parleur va imposer sa fréquence de vibration à une tige métallique qui lui est solidaire. Une des extrémités d'une corde est reliée à cette tige ; l'autre est maintenue fixe (ici par une petite masse) :

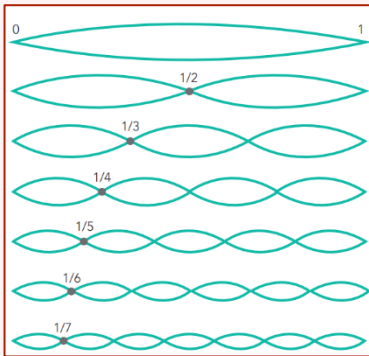


Pour la plupart des fréquences imposées à la tige, la corde oscille de manière désordonnée, instable et aucune figure périodique ne peut s'y installer. Par contre, pour certaines fréquences bien particulières – fréquences de résonance –, la corde dessine des figures stables (voir dessin ci-dessus). La figure obtenue représente ce que l'on appelle une onde stationnaire. On parle d'onde stationnaire<sup>1</sup> lorsque le mouvement s'est généralisé à tout le support et qu'il ne se modifie plus.

Dans ces conditions, une description globale en termes de propagation cesse d'être évidente ; mais on peut décrire l'onde stationnaire comme étant la superposition de deux ondes qui se propagent. La première se propage dans le sens de propagation de la première déformation – l'onde incidente – et la deuxième dans le sens opposé – l'onde réfléchie<sup>2</sup>.

<sup>1</sup> Parler d'onde « stationnaire » ne veut donc pas dire que les différents points du support ne bougent pas. Stationnaire signifie que la forme de l'onde reste figée dans le temps. L'onde semble ne plus progresser dans le milieu, elle donne l'impression de « faire du surplace ».

<sup>2</sup> En réalité, l'onde stationnaire est le résultat de la superposition d'un grand nombre d'ondes, puisqu'une onde incidente se réfléchit plusieurs fois dans le système, en s'amortissant progressivement.



Dans notre système, les deux extrémités de la corde peuvent être considérées comme fixes, ces deux extrémités correspondent donc à des endroits où la corde ne bouge pratiquement pas. On appelle ces endroits des nœuds de vibration. Cette constatation impose que la longueur du support soit donc un nombre entier de fois la demi-longueur d'onde (par définition de la longueur d'onde).

Les points dont l'élongation est maximale sont appelés les ventres de vibration. L'élongation maximale est appelée amplitude.

De part et d'autre d'un nœud, les points vibrent dans des directions opposées.

Les fréquences de résonance sont propres à chaque système. Dans le cas de la corde, elles dépendent de sa longueur, de sa tension, de sa nature. La corde vibrante est le siège d'ondes stationnaires à une dimension. C'est-à-dire que l'onde se propage dans une direction, à savoir celle de la corde.

La fréquence qui donne naissance à la première onde stationnaire est qualifiée de première harmonique ; la deuxième est la deuxième harmonique, la troisième est la troisième harmonique, etc.

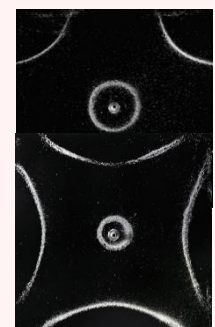
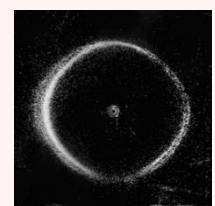
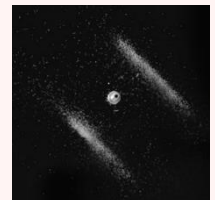
### LES FIGURES DE CHLADNI

#### ONDES STATIONNAIRES À DEUX DIMENSIONS

Il est aussi possible d'observer des ondes stationnaires à deux dimensions. Une plaque horizontale, dont la surface a été préalablement saupoudrée uniformément de sable, est solidarisée avec la membrane d'un haut-parleur dont on peut régler finement la fréquence de vibration via une tige fixée en son centre. Une fois le haut-parleur en fonction, la plaque se met à vibrer verticalement. Pour certaines fréquences de vibration – fréquences de résonance de la plaque –, les grains de sable dessinent des figures stables sur la plaque !

À ces fréquences particulières, propres à la plaque, la superposition des ondes incidentes issues du centre de la plaque – et des ondes réfléchies – renvoyées par les bords de la plaque –, donne naissance à des ondes stationnaires. Ce régime particulier de vibration fait donc apparaître sur la plaque des nœuds et des ventres de vibration.

Les grains de sable qui se trouvent à des endroits qui vibrent sont éjectés et retombent à d'autres endroits. Si ces endroits vibrent aussi, les grains sautent à nouveau ; s'ils ne vibrent pas, les grains s'y déposent et s'y accumulent : les figures observées sur la plaque correspondent donc aux nœuds de vibration et permettent de visualiser les lignes nodales de l'onde stationnaire à deux



FLORIAN GRAVELINE

dimensions. Plus les fréquences de résonance sont élevées, plus la distance entre les nœuds et les ventres diminue et plus les figures observées deviennent complexes.

La forme des lignes nodales dépend de la symétrie de la plaque. Des plaques de formes différentes (carrées, triangulaires, forme d'un violon...) présenteront des lignes nodales de formes différentes.



## LE VERRE DE LA CASTAFIORE

### *ONDES ACOUSTIQUES*

Peut-on réellement casser un verre en chantant ? La Castafiore pourrait-elle faire exploser les vitres du château de Moulinsart par le seul son de sa voix ?

L'expérience des verres chantants est largement connue : il est en effet possible de faire « chanter » un verre contenant un liquide en humectant un doigt et en suivant le bord du verre en le frôlant. Ce son est harmonieux. En frappant légèrement le verre avec le bord d'un ongle, il est aussi possible de produire un son. Ces deux sons émis sont propres au verre utilisé et à la manière dont il est rempli. La fréquence de ces sons correspond exactement à la fréquence de résonance de ce verre.

L'expérience proposée dans l'exposition se fait à plus grande échelle : avec un vase ! La fréquence de résonance du vase est déterminée et ensuite imposée au vase par l'intermédiaire d'un générateur à fréquence ajustable. L'objectif est de battre en brèche l'idée reçue selon laquelle seuls des sons aigus peuvent faire vibrer et casser le verre !





On soumet le vase à des sons de différentes fréquences. Les élèves constatent alors que des sons très aigus - ou très graves - ne produisent aucun effet sur le vase.

Au passage, l'expérience permet d'illustrer la gamme du spectre sonore audible par l'Homme. Ce n'est que lorsque le vase est soumis au son que lui-même émet, par exemple, lorsqu'il est frappé, qu'il se met à vibrer de manière très impressionnante ! L'éclairage du vase avec un stroboscope met en évidence ses déformations spectaculaires.

Certains endroits du bord restent fixes (nœuds de vibration) et d'autres vibrent avec une grande amplitude (ventres de vibration). Un léger décalage en fréquence – ne serait-ce que d'un hertz – au niveau du générateur fait disparaître le phénomène et cela même avec un amplificateur puissant !

Une fois la source extérieure coupée, le verre continue à émettre un son pendant un court moment. Ce son s'atténue avec l'amortissement de la vibration des parois du vase.

Si la source émettrice était suffisamment puissante (mais de même fréquence !), il serait possible de briser le vase : l'amplitude des ventres augmenterait, le verre ne pourrait plus résister aux contraintes et finirait par se briser.

La voix humaine serait-elle capable d'un tel exploit ? A priori, un bon chanteur pourrait se caler sur la bonne fréquence. Mais du fait de son mécanisme de production, la voix humaine n'est pas monochromatique. Dès lors, même si le chanteur émet la bonne fréquence, sa puissance sonore est répartie automatiquement sur plusieurs fréquences, ce qui limite l'énergie envoyée à la fréquence de résonance du verre. Cependant, si la voix était amplifiée par un micro...

