



mutation et confronté aux défis du réchauffement climatique, de la sixième extinction de masse, de la pollution croissante. Ainsi, l'argyronète nous invite à nous adapter à de nouveaux environnements.

Il s'agit de s'intéresser à l'infime, à ce que l'on néglige le plus souvent, et donc à ces petites araignées, mais aussi, au travers d'autres œuvres, aux poussières, aux particules cosmiques, aux fréquences radio... L'objectif est de mieux saisir et comprendre le monde, l'habiter et en fin de compte le préserver.

Pour développer ses créations, Tomás Saraceno s'entoure de biologistes, d'astrophysiciens, de philosophes, d'éthologues,

de sociologues... exerçant dans des institutions prestigieuses. Ensemble, ils mènent des projets à la frontière de la science et de l'art. Ainsi, le film *The Politics of Solar Rhythms (Cosmic Levitation)*, réalisé en collaboration avec l'équipe de Heinrich Jaeger, de l'université de Chicago, montre des particules de poussières s'agréant sous l'effet de vibrations.

Autre exemple. Dans l'une des vitrines de l'exposition, on découvre *Aerocene Float Predictor* («prédicteur de vol aérocène»), un outil permettant de planifier un voyage dans les airs avec la seule force du vent, sans hélium ni hydrogène ou batterie électrique.

Sans qu'il y soit fait référence, les araignées qui pratiquent le *ballooning* ont déjà inventé leur propre aérocène: en laissant au vent un fil de soie, elles sont emportées sur parfois plusieurs centaines de kilomètres de distance. Pour voir le monde différemment, les araignées ont tant de choses à nous apprendre! ■

Carte blanche à Tomás Saraceno, « On Air », palais de Tokyo, Paris, jusqu'au 6 janvier 2019.
www.palaisdetokyo.com/fr/evenement/air



L'auteur a récemment publié:
Pollock, Turner, Van Gogh, Vermeer et la science...
(Belin, 2018).

LES AUTEURS



JEAN-MICHEL COURTY et ÉDOUARD KIERLIK
professeurs de physique à Sorbonne Université, à Paris

QUAND LES VERRRES CHANTENT

En frottant avec le doigt le bord d'un verre, on fait vibrer ses parois. Cela produit un son très pur, que les musiciens peuvent exploiter.

Qui n'a pas, lors d'une soirée, fait chanter des verres de cristal en frottant un doigt mouillé sur leurs bords supérieurs? Le son obtenu, aérien et délicat, a d'incontestables qualités musicales. Des amateurs ont d'ailleurs depuis longtemps fabriqué des instruments à partir de séries de verres ou de bols, et des compositeurs écrit des partitions pour ces «harmonicas de verre». Mais qui dit son pense onde acoustique et vibrations. Qu'est-ce qui vibre ici et sur quoi peut-on agir pour produire des notes de la hauteur voulue? Ouvrons nos buffets et partons à la découverte de la physique du chant des verres.

Précisons d'abord qu'un verre n'est pas un tuyau de flûte de pan: le son émis ne résulte pas de la vibration de la colonne d'air qu'il contient, mais de la vibration de ses parois. Celles-ci agissent sur l'air environnant comme des membranes de haut-parleur ou des lames vibrantes.

Pour comprendre comment le verre vibre, effectuons une première expérience: frottons un verre en cristal avec un doigt ou tapotons-le avec une petite cuillère. Nous obtenons des notes qui, à l'oreille, ont la même hauteur.

DES FLEXIONS DE LA PAROI

Qu'est-ce que cela indique? La petite cuillère frappe perpendiculairement au bord du verre (selon le diamètre passant par le point d'impact) tandis que le doigt frotte longitudinalement (selon le périmètre). Les mêmes notes étant produites, il faut en conclure que le verre vibre selon ces deux directions à la fois (*voir l'encadré page ci-contre*). D'ailleurs, en posant le doigt, même légèrement, sur le verre qui chante, le son s'assourdit très rapidement quel que soit l'endroit où l'on a posé le doigt. Cela signifie qu'il n'existe pas sur le bord du verre un nœud de vibration, c'est-à-dire une zone exempte de mouvement: s'il y en avait une, y déposer le doigt n'affecterait pas la vibration.

Deux instruments à base de verres: l'harmonica de verre de Benjamin Franklin (à gauche), et un ensemble de verres de diverses tailles plus ou moins remplis.

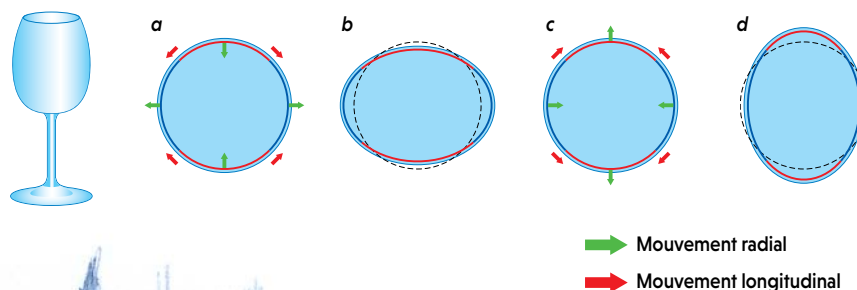


Réalisons une seconde expérience avec une grande tasse munie d'une anse. Plaçons-la devant nous de telle sorte que l'anse soit située à l'opposé de notre position et appelons «Nord» (N) la direction qu'elle indique. Tapotons alors la tasse avec la cuillère dans les directions N, O, S ou E (*voir l'encadré page 90*).

Nous obtenons une même note, ce qui suggère que ces quatre points cardinaux vibrent de façon identique. Re commençons en frappant cette fois aux points NE, SE, SO ou NO. On produit une autre note, plus aiguë que la précédente! Et si nous frappons la tasse à tout

FLEXIONS ELLIPTIQUES

Quand un verre circulaire est frotté du doigt ou frappé avec une cuillère, il vibre et son bord se déforme périodiquement en gardant un périmètre constant. Le cycle de vibration est ici montré à quatre instants successifs. Le bord se déforme de façon elliptique selon deux axes perpendiculaires, et l'on voit qu'aux vibrations radiales s'ajoutent des vibrations longitudinales (visibles aux points séparant les arcs bleus et rouges).



autre endroit, nous entendons une superposition de ces deux notes.

Cela montre que la tasse peut vibrer de deux façons différentes – on parle de deux « modes de vibration ». Les nœuds de vibration radiale (points où l'amplitude de vibration est nulle) de l'un des modes sont les ventres de vibration radiale (points où l'amplitude est maximale) de l'autre mode. En frappant au point N, on excite le ventre radial du mode 1, mais comme il s'agit du nœud radial du mode 2, ce dernier n'est pas excité. La situation est inverse si c'est le point NE qui est frappé.

Ces expériences ne nous disent évidemment pas tout. D'autres propriétés sont à remarquer. D'abord, les modes de vibration du verre ou de la tasse correspondent à des déformations en flexion et non en compression. Autrement dit, vu de dessus, le bord circulaire du verre se déforme à périmètre constant.

Ensuite, pour un mode donné, la déformation du cercle compatible avec nos observations est une ellipse, dont l'un des deux axes passe par le point d'impact de la cuillère; le petit axe et le grand axe de l'ellipse alternent au cours de la vibration.

Enfin, toutes les sections transversales du verre se déforment de la même façon, mais pas forcément avec la même amplitude: la hauteur du verre a donc ici très peu d'effet sur la note produite.

Ces éléments permettent d'élucider deux de nos observations. D'une part, à cause de la conservation du périmètre, on comprend pourquoi les nœuds de vibration radiale vibrent longitudinalement, en >

Les auteurs ont récemment publié:
En avant la physique !,
une sélection de leurs
chroniques (Belin, 2017).



> suivant l'évolution au cours du temps du quart de cercle qui les joint (voir l'encadré page précédente); c'est même à ces endroits que les vibrations longitudinales sont les plus fortes. Ainsi, les points N, E, S et O sont des ventres de vibration radiale et des nœuds de vibration longitudinale, tandis que les points NE, SE, SO et NO sont des ventres longitudinaux et des nœuds radiaux. Les points intermédiaires présentent les deux types de vibration, conformément à notre intuition à l'issue de notre première expérience.

D'autre part, on comprend l'origine des deux notes de la tasse. Dans le mode 1, l'anse de la tasse est sur un ventre de vibration radiale, tandis que dans le mode 2, elle est sur un ventre de vibration longitudinale dont le calcul montre que l'amplitude est deux fois inférieure à celle du ventre radial. La mise en mouvement de la masse de l'anse diffère donc dans les deux cas: elle est plus forte dans le mode 1, et donc plus sensible à sa masse. En revanche, la force de rappel, due à la «raideur» de la paroi, est la même dans les deux cas. Par conséquent, comme pour tout oscillateur, plus la masse est élevée, plus la période des vibrations est longue et plus la note est grave.

DES NOTES DIFFÉRENTES SELON LE DIAMÈTRE, L'ÉPAISSEUR...

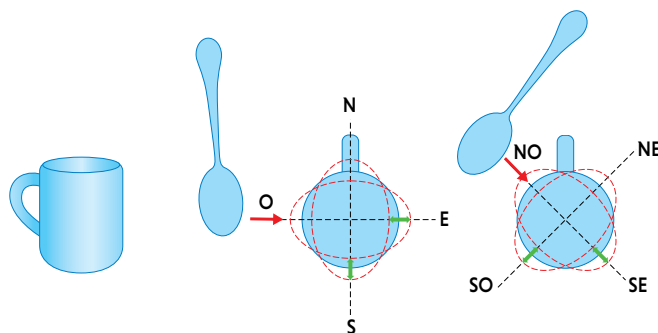
Comment faire des notes différentes afin de réaliser une gamme musicale complète? On peut varier plusieurs paramètres: le diamètre des verres, leur épaisseur et leur contenu. Si l'on augmente le diamètre du verre, on augmente la distance que l'onde de flexion doit parcourir lorsqu'elle fait un tour du verre. Or pour obtenir une onde stationnaire sur le pourtour, il faut que la durée du tour soit égale à la période de la vibration, donc à l'inverse de la fréquence. La théorie de l'élasticité montre que la vitesse des ondes de flexion varie comme la racine carrée de la fréquence. On en déduit que la fréquence du son est proportionnelle à l'inverse du carré du diamètre du verre. Plus le verre est grand, plus la note est grave!

Par ailleurs, si l'on augmente l'épaisseur du verre, la masse mise en mouvement augmente proportionnellement, mais, en même temps, on augmente la «raideur» de la paroi, qui varie comme le cube de l'épaisseur. Ainsi, la raideur croît plus vite que la masse, et la fréquence est proportionnelle à l'épaisseur: plus le verre est épais, plus la note est aiguë.

Ces deux ingrédients ont suffi à l'illustre Benjamin Franklin pour concevoir un harmonica de verre original. Des bols

UNE ANSE, DEUX MODES DE VIBRATION

En tapotant avec une cuillère une tasse dotée d'une anse, le bord du récipient se met à vibrer selon deux modes possibles. Si l'on tapote aux points cardinaux N, O, S ou E, le mode de vibration excité est celui dont l'un des axes est aligné avec l'anse (qui se trouve donc sur un ventre de vibration radiale). Si l'on frappe la tasse aux points NE, SE, SO ou NO, l'anse se trouve sur un nœud de vibration radiale. Cela correspond à un autre mode de vibration, qui produit une note différente. Si la cuillère frappe un point intermédiaire, les deux modes de vibration sont excités.



en cristal ou en verre de diamètres et d'épaisseurs bien choisis sont imbriqués les uns dans les autres et solidaires d'un axe qu'une pédale ou un moteur fait tourner. Il suffit à l'instrumentiste de mouiller ses doigts, de les poser sur ces bols et les laisser frotter pour faire chanter ces derniers et jouer des partitions conçues pour cet «armonica», comme l'Adagio et Rondo K. 617 de Mozart.

Si l'on ne dispose pas d'un tel instrument, on peut se contenter d'ajouter de l'eau ou tout autre liquide dans nos services de verres. Dans ce cas, les vibrations des parois se transmettent au liquide. Ajouter de l'eau augmente la masse mise en mouvement: plus il y a d'eau dans le verre, plus le son est grave. Mais peut-on être plus précis?

Quand un verre chante, l'amplitude des vibrations est nulle au fond de celui-ci et augmente à mesure que l'on se rapproche du bord supérieur. Autrement dit, l'eau du fond du verre est bien moins mise en mouvement que l'eau située en hauteur. L'effet de l'eau ajoutée est donc d'autant plus important que le verre est déjà rempli: une même quantité d'eau ajoutée à un verre presque plein a beaucoup plus d'effet que si on l'ajoute à un verre presque vide. Pour obtenir les notes successives de la gamme en ajoutant de l'eau à une série de verres identiques, il faudra donc ajouter de moins en moins d'eau pour garder des intervalles musicaux égaux. Mieux vaut alors procéder par tâtonnements, en se munissant d'un accordeur. ■

BIBLIOGRAPHIE

T. D. Rossing, **Acoustics of the glass harmonica**, *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 95(2), pp. 1106-1111, 1994.

T. D. Rossing, **Wine glasses, bell modes, and Lord Rayleigh**, *The Physics Teacher*, vol. 28(9), pp. 582-585, 1990.

A. P. French, **In Vino Veritas : A study of wineglass acoustics**, *American Journal of Physics*, vol. 51(8), pp. 688-694, 1983.

POUR LA SCIENCE

Édition française de Scientific American

**COMPLÉTEZ VOTRE COLLECTION
DÈS MAINTENANT !**



N° 493 (nov. 18)
réf. PL493



N° 492 (oct. 18)
réf. PL492



N° 491 (sept. 18)
réf. PL491



N° 490 (août 18)
réf. PL490



N° 489 (juillet 18)
réf. PL489



N° 488 (juin 18)
réf. PL488



N° 487 (mai 18)
réf. PL487



N° 486 (avril 18)
réf. PL486



N° 485 (mars 18)
réf. PL485



N° 484 (févr. 18)
réf. PL484



N° 483 (janv. 18)
réf. PL483



N° 482 (déc. 17)
réf. PL482

À retourner accompagné de votre règlement à :

Pour la Science – Service VPC – 19 rue de l'Industrie – BP 90053 – 67402 Illkirch Cedex – email : pourlascience@abopress.fr



OUI, je commande des numéros de Pour la Science, au tarif unitaire de 9,90 €.

1 / JE REPORTE CI-DESSOUS LES RÉFÉRENCES à 5 chiffres correspondant aux numéros commandés :

1^{re} réf. _____ 0 1 x 9,90 € = 9,90 €
 2^e réf. _____ x 9,90 € = _____ €
 3^e réf. _____ x 9,90 € = _____ €
 4^e réf. _____ x 9,90 € = _____ €
 5^e réf. _____ x 9,90 € = _____ €
 6^e réf. _____ x 9,90 € = _____ €

TOTAL À RÉGLER _____ €

Groupe Pour la Science – Siège social : 170 bis, boulevard du Montparnasse, CS20012, 75680 Paris Cedex 14 – Sarl au capital de 32000 € – RCS Paris B 311 797 393 – Siret : 311 797 393 000 23 – APE 5814 Z

Offre valable jusqu'au 31/12/2019 en France Métropolitaine uniquement. Pour l'export, rendez-vous sur notre site internet boutique.pourlascience.fr. Les prix affichés incluent les frais de port et les frais logistiques. Les informations que nous collectons dans ce bulletin d'abonnement nous aident à personnaliser et à améliorer les services que nous vous proposons. Nous les utiliserons pour gérer votre accès à l'intégralité de nos services, traiter vos commandes et paiements, et vous faire part notamment par newsletters de nos offres commerciales moyennant le respect de vos choix en la matière. Le responsable du traitement est la société Pour la Science. Vos données personnelles ne seront pas conservées au-delà de la durée nécessaire à la finalité de leur traitement. Pour la Science ne commercialise ni ne loue vos données à caractère personnel à des tiers. Les données collectées sont exclusivement destinées à Pour la Science. Nous vous invitons à prendre connaissance de notre charte de protection des données personnelles à l'adresse suivante : <https://rebrand.ly/charte-donnees-pls>. Conformément à la réglementation applicable (et notamment au Règlement 2016/679/UE dit « RGPD ») vous disposez des droits d'accès, de rectification, d'opposition, d'effacement, à la portabilité et à la limitation de vos données personnelles. Pour exercer ces droits (ou nous poser toute question concernant le traitement de vos données personnelles), vous pouvez nous contacter par courriel à l'adresse protection-donnees@pourlascience.fr.

2 / J'INDIQUE MES COORDONNÉES

☐ M. ☐ Mme

Nom : _____

Prénom : _____

Adresse : _____

Code postal _____ Ville : _____

Téléphone _____

J'accepte de recevoir les offres de Pour la Science ☐ OUI ☐ NON

3 / JE CHOISIS MON MODE DE RÈGLEMENT

☐ Par chèque à l'ordre de Pour la Science

☐ Carte bancaire

N° _____

Date d'expiration _____

Clé (les 3 chiffres au dos de votre CB) _____

Signature obligatoire :



**RETROUVEZ TOUS LES ANCIENS NUMÉROS SUR
BOUTIQUE.POURLASCIENCE.FR**