

IDÉES DE PHYSIQUE

Les mélodies du café soluble et de l'hélium

On peut modifier un bruit ou une voix en jouant sur les paramètres qui déterminent la vitesse de propagation du son.

Jean-Michel COURTY et Édouard KIERLIK

La voix d'un scaphandrier en plongée profonde, qui respire un mélange à base d'hélium, devient aiguë et nasillarde ; lors de la préparation d'une boisson instantanée, café ou chocolat, la hauteur du son émis par la cuillère qui frappe la tasse change progressivement. À quoi sont dues ces modifications sonores ? Elles ne proviennent pas du raccourcissement d'une corde, comme pour un violon, ou d'un changement de la longueur active d'un tuyau, comme pour une flûte. Tant pour le plongeur que pour la tasse, c'est le changement de la vitesse du son qui est à l'œuvre.

Un air d'effervescence

Allons en cuisine pour expérimenter cet effet et comprendre son origine. Prenons un verre cylindrique et tapotons le fond avec une petite cuillère alors qu'il est encore vide. Répétons l'expérience après avoir rempli le verre d'eau. Le son émis est plus aigu. Pourquoi ?

En tapotant le fond du verre, nous mettons en vibration à la fois le matériau constituant les parois du verre et le fluide – air ou eau – qu'il contient. Ce sont les vibrations de ce fluide qui vont nous intéresser.

Supposons le verre haut et étroit (ce n'est pas essentiel pour l'expérience, mais cela simplifie l'explication). On a alors un tuyau ouvert à une extrémité et fermé à l'autre, semblable à de nombreux instru-

ments de musique. Mise en mouvement par le choc de la petite cuillère contre le verre, la colonne de fluide ne vibre qu'à certaines fréquences, les fréquences de résonance. Dans notre cas d'un tube ouvert-fermé, il s'agit des multiples impairs de la fréquence fondamentale, égale au quotient de la vitesse du son dans le fluide sur quatre fois la hauteur du tube.

Pour un verre haut de dix centimètres et rempli d'air, la fréquence fondamentale est de l'ordre de 800 hertz. La vitesse du son dans l'eau, 1 500 mètres par seconde, étant près de cinq fois plus élevée que dans l'air

(330 mètres par seconde), les fréquences de vibration sont dans le même rapport. Ainsi, avec un verre plein d'eau, les vibrations ont une fréquence de 3,8 kilohertz et le son émis est plus aigu de plus de deux octaves.

Versons maintenant dans le verre plein d'eau un peu de poudre de pastille effervescente écrasée et agitions avec la petite cuillère en prenant soin de faire tinter le verre en même temps. Lorsque les premières bulles apparaissent, le son émis devient plus grave, bien plus grave même qu'avec le verre vide. Puis, à mesure que les bulles disparaissent, le son remonte progressivement dans les

aigus jusqu'à rejoindre le son du verre plein (voir la figure 1).

Qualitativement, on comprend que la présence des bulles a modifié la vitesse du son dans le fluide, et donc la fréquence de vibration de celui-ci. Mais comment se fait-il que la note entendue soit plus grave que celle du verre plein d'air et que celle du verre plein d'eau ? La fréquence du son émis par le mélange ne devrait-elle pas être une sorte de moyenne des deux ?

Pour comprendre ce qui se passe, nous devons analyser plus en détail les paramètres qui influent sur la vitesse à laquelle se propage le son. Considérons un long ressort à boudin, modèle macroscopique qui aide à visualiser les phénomènes



1. LORSQU'ON AGITE LA CUILLÈRE dans un verre d'eau où l'on a immergé un cachet effervescent, la hauteur du son produit diminue avant d'augmenter. La présence des bulles modifie la compressibilité du liquide et, de ce fait, la vitesse du son dans ce milieu – d'où les changements de la hauteur du bruit créé par la cuillère.

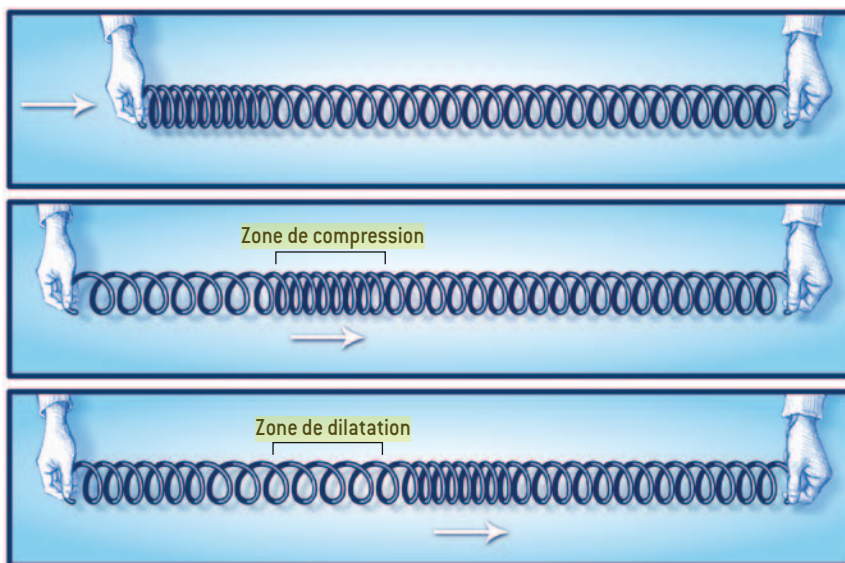
physiques en jeu (voir la figure 2). À une extrémité, créons une onde en poussant rapidement le ressort et en ramenant la main à sa position initiale. Lorsque nous poussons, le ressort ne se déplace pas en bloc. Notre main comprime les premières spires, ce qui transmet la force que nous exerçons aux spires suivantes, lesquelles vont se mettre en mouvement et comprimer la suite du ressort. L'ébranlement se propage ainsi de proche en proche.

Masse volumique, compressibilité et vitesse du son

La vitesse de propagation dépend de l'efficacité avec laquelle la force est transmise de proche en proche et de la facilité à mettre en mouvement la matière dont est fait le ressort. Plus le milieu est compressible, moins la force correspondant à une compression donnée est importante et moins le ressort se met rapidement en mouvement. Par ailleurs, plus le ressort est massif, plus son inertie est élevée et moins rapide est sa mise en mouvement.

Plus précisément, la vitesse du son dans un fluide (où les molécules remplacent les spires du modèle) est inversement proportionnelle à la racine carrée du produit de la masse volumique et de la compressibilité. L'air étant environ 800 fois moins dense que l'eau, mais environ 15 000 fois plus compressible dans des conditions normales de pression, on retrouve le fait que le son s'y propage à une vitesse près de cinq fois inférieure.

Qu'advient-il dans de l'eau faiblement gazeuse ? La présence des bulles d'air ne change pas beaucoup la masse volumique du mélange ; avec 0,5 pour cent de bulles en volume, sa densité reste pratiquement égale à celle de l'eau pure (1 kilogramme par litre). Les bulles, en revanche, ont un impact majeur sur la compressibilité. Sous pression modérée, l'eau liquide est peu compressible, donc change à peine de volume, mais ce n'est pas le cas des bulles. Si l'on augmente la pression de 20 pour cent, le volume des bulles diminue d'autant à température fixée, et le



Dessins de Bruno Vacaro

2. LA PROPAGATION DU SON DANS UN FLUIDE est analogue à la propagation d'une onde de compression le long d'un ressort à boudin. Moins le ressort est raide, plus il est compressible, et moins l'onde se propage rapidement. De même, plus le ressort est massif, moins l'onde est rapide. De façon analogue, la vitesse du son dans un fluide est inversement proportionnelle à la racine carrée du produit de sa compressibilité par sa masse volumique.

volume du mélange est réduit de 0,1 pour cent. Cela paraît peu : la compressibilité est alors 200 fois inférieure à celle de l'air, mais 75 fois supérieure à celle de l'eau pure ! La masse volumique étant presque inchangée, la vitesse du son est divisée par neuf environ et il en est de même de la fréquence fondamentale dans le verre cylindrique.

Nous sommes désormais en mesure d'interpréter l'expérience. Au tout début, le morceau de pastille effervescente libère des bulles dans l'eau. La vitesse du son chute tant que la concentration de bulles augmente, c'est-à-dire tant qu'il apparaît plus de bulles qu'il n'en disparaît à la surface. La fréquence fondamentale devient plus grave et ne remonte vers celle du verre rempli d'eau plate qu'une fois l'effervescence terminée.

En pratique, il faut mettre peu de matériau effervescent pour produire la variation de fréquence sonore la plus spectaculaire. L'effet s'obtient aussi en préparant un café ou un chocolat instantané : quand vous tapotez sur le verre, l'air piégé sur la poudre se libère et crée les bulles responsables du changement de son.

Plutôt que de modifier la compressibilité du fluide, on peut jouer sur son inertie.

LES AUTEURS



Jean-Michel COURTUY et Édouard KIERLIK sont professeurs de physique à l'Université Pierre et Marie Curie, à Paris. Leur blog : <http://blog.idphys.fr>

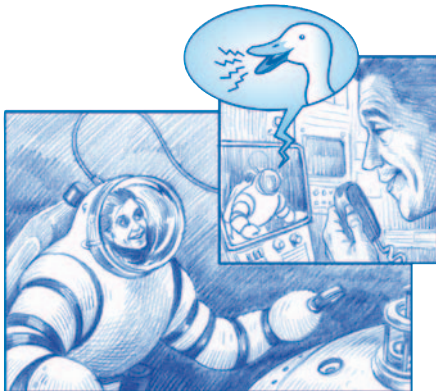
BIBLIOGRAPHIE

G. Planinsic et E. Etkina, **Bubbles that change the speed of sound**, *Physics Teacher*, vol. 50, pp. 458-460, 2012.

F. S. Crawford, **The hot chocolate effect**, *American Journal of Physics*, vol. 50(5), pp. 398-404, 1982.

Retrouvez les articles de J.-M. Courty et E. Kierlik sur www.pourlascience.fr





3. DANS L'HÉLIUM, la vitesse du son est environ le triple de ce qu'elle est dans l'air. De ce fait, les fréquences de résonance d'un instrument ou d'un conduit vocal sont décalées vers l'aigu. C'est pourquoi la voix d'une personne inhalant de l'hélium, ou un mélange à base d'hélium, est déformée et fait penser à celle d'un canard.

Des gaz de compositions différentes ont presque la même compressibilité, mais des masses volumiques différentes. On peut refaire l'expérience précédente en choisissant notre bouche et notre gorge comme récipient jouant le rôle de résonateur, nos cordes vocales comme producteur de son, et divers gaz comme fluide.

Si l'on inhale de l'hélium, gaz environ sept fois moins dense que l'air et où la vitesse du son est d'environ 970 mètres par seconde, les fréquences de résonance dans nos conduits vocaux s'élèvent alors dans l'aigu pour donner une voix nasillarde caractéristique, proche de celle de Donald Duck ! L'hexafluorure de soufre (SF_6) – un gaz inerte, incolore et inodore – est cinq fois plus dense que l'air et la vitesse du son y vaut 146 mètres par seconde. Si l'on en inspire, la voix devient plus grave.

Sur Internet, de multiples vidéos illustrent ces effets. Au-delà de l'aspect ludique, ce phénomène a des conséquences pour les plongeurs des profondeurs (au-delà de quelques dizaines de mètres). Pour éviter qu'il y ait trop d'azote dissous dans le sang, ce composant de l'air est remplacé en partie ou totalement par de l'hélium. Un mélange utilisé est par exemple le trimix, constitué de dioxygène, de diazote et d'hélium dans des proportions telles (25 pour cent d'hélium) que la voix en est effectivement modifiée (voir la figure 3).

Cela ne facilite pas la communication, indispensable pour des questions de sécurité. Le problème est suffisamment sérieux pour que les ingénieurs développent des logiciels de traitement de la parole, afin de corriger ces voix de canards des profondeurs et rétablir leur intégrité.

LA MARCHÉ DES SCIENCES

Découvertes, inventions, aventures savantes au fil de l'Histoire

Aurélie Luneau
14h-15h / chaque jeudi

franceculture.fr

SCIENCE & GASTRONOMIE

Pelures toxiques

Le mythe de la bonne nature fait oublier que les végétaux comestibles, telle la pomme de terre, savent se défendre contre leurs agresseurs.

Hervé THIS

Dans la grande guerre du « bio » contre la chimie, tout parti que l'on prend est mauvais. D'un côté, critiquer les pratiques du bio, ou même seulement l'agriculture biodynamique, c'est être considéré comme un suppôt de l'industrie chimique ; certes, cette dernière a ses défauts, mais elle produit les spécialités qui permettent d'éviter efficacement les dégâts des ravageurs. De l'autre, critiquer l'industrie, c'est se voir accusé de faire partie d'un groupe obscurantiste. Dans les deux cas, les arguments détaillés ne sont pas de mise.

Il ne reste donc qu'un parti, celui de la science quantitative. Sans chercher à convaincre, elle produit des faits, lesquels peuvent être proposés à ceux qui peuvent les écouter, ceux dont le jugement n'est pas aveuglé par les raisons économiques (la chimie, c'est une grosse industrie ; le bio, c'est un énorme marché). Tout ce préambule pour arriver à des dosages effectués sur les pommes de terre, et qui montrent que nous ferions bien de ne pas oublier leur origine botanique et les hésitations d'antan concernant leur consommation.

Commençons par les hésitations : quand Antoine Parmentier milita pour introduire la pomme de terre dans l'alimentation des Français, un peu avant la Révolution, l'Académie de médecine refusait les tubercules, qui étaient même accusés de donner la lèpre. Parmentier, toutefois, avait voyagé en Allemagne, comme pharmacien des armées, et il avait vu que la plante résistait mieux que le blé aux climats froids, tels ceux associés à un petit âge glaciaire.

À force d'études, de repas prosélytes où le roi de France fut un allié, la pomme de terre s'introduisit, mais on gardait quelques doutes. Et l'on évitait soigneusement de manger la peau, surtout pour les pommes de terre verdies ou germées. Tout cela semble oublié, et nombre de chefs étoilés font aujourd'hui des frites, par exemple, en conservant la peau, qui ajoute un croustillant agréable. Un exemple de conseil : « Les pommes de terre cuites avec leur peau, qu'elles soient préparées à la vapeur, bouillies ou encore cuisinées au four à micro-ondes ou en robe des champs, conservent davantage de vitamines, de minéraux et de goût que celles qui sont épluchées. La différence au niveau gustatif est énorme ! Les qualités nutritionnelles également ! De plus, cuire les pommes de terre avec la peau facilite la vie. »

Que penser de ces indications, données de surcroît sur un site Internet « santé » ? Lisons les résultats des études récentes d'A. Aziz, T. Shibamoto et leurs collègues des Universités de Faisalabad (Pakistan) et de Davis (États-Unis). Ces chimistes se sont intéressés à deux glycoalcaloïdes (ce sont des défenses de la plante contre les ravageurs) présents dans la partie superficielle des pommes de terre : la solanine et la chaconine.

Ces deux composés sont thermorésistants : ils restent actifs après cuisson des pommes de terre, et résistent même à 285 °C. Ils provoquent gastro-entérites, diarrhées, vomissements, fièvres, modifications de la pression sanguine, syndromes neurologiques, et peuvent même tuer l'homme ou l'animal. Les autorités sanitaires ont

proposé une limite de consommation de 200 milligrammes par kilogramme de pommes de terre : il a été montré que, quand la concentration en solanine est supérieure à 140 milligrammes par kilogramme, l'alcaloïde provoque un goût amer, une sensation de brûlure et, pour l'espèce humaine, la dose fatale est de trois à six milligrammes par kilogramme de poids corporel.

Cette valeur est-elle parfois atteinte ? Évidemment, dans des études aussi importantes socialement et économiquement, le protocole expérimental a été soigné. Ainsi, le jour de l'analyse, les tubercules ont été lavés, pelés à l'aide d'un économe domestique, qui retirait précisément les quelque trois millimètres sous la surface où les glycoalcaloïdes sont présents. Après une heure de cuisson dans l'eau bouillante, les pelures ont été analysées, les glycoalcaloïdes dosés... et les chimistes ont alors observé que la concentration limite recommandée était dépassée pour toutes les pommes de terre testées ! Que feront de cette information les chefs étoilés qui, parfois adeptes du bio et des produits « naturels », cuisent les pommes de terre avec leur peau ? ■



Hervé THIS est chimiste dans le Groupe INRA de gastronomie moléculaire, professeur à AgroParisTech et directeur scientifique de la Fondation Science & Culture Alimentaire (Académie des sciences).

Retrouvez les articles de H. This sur www.pourlascience.fr

