ÉPREUVE D'ANALYSE DE DOCUMENTS SCIENTIFIQUES

FILIÈRE PSI – 2026

Dossier 07

Ce dossier est constitué d'un texte de vulgarisation scientifique sur l'acoustique de l'orgue.

Dans votre exposé, qui durera environ 15 minutes et qui synthétisera le contenu du dossier, vous chercherez à montrer comment les connaissances que vous avez acquises en physique vous permettent de comprendre et d'expliquer les éléments présentés dans le dossier.

On veillera lorsque cela est possible à justifier les résultats numériques ou théoriques annoncés et à ne pas se contenter de répéter ou de paraphraser le texte.

Quand le dossier comporte des figures, vous les interpréterez de façon critique pour les mettre en perspective avec le texte.

Remarques

- L'usage de la calculatrice est interdit pendant la phase de préparation.
- Les textes peuvent être annotés pendant la période de préparation. Mais, à l'issue de l'épreuve, tous les documents (brouillons, transparents, et textes) doivent être impérativement remis à l'examinateur.
- Les candidates et candidats sont invités à éviter d'écrire leur présentation en tout petits caractères, peu lisibles lors de la présentation devant l'examinateur.
- Le dossier proposé est constitué de reproductions de textes ou d'extraits de textes scientifiques d'origines variées. Ces documents, comme tout document scientifique, peuvent être critiqués, voire contenir des erreurs. Si tel est le cas, cela ne doit pas gêner le/la candidat(e) au cours de sa préparation. Au contraire, il/elle pourra le mentionner au cours de l'exposé ou de la discussion avec l'examinateur.
- Certains textes ont subi des coupes partielles ; avant l'établissement stable de l'image sur la tablette, le texte coupé peut apparaître brièvement : ce phénomène parasite est à ignorer. De même, l'élimination de pages complètes peut introduire une discontinuité dans la numérotation des pages du document final.

LES AUTEURS



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

UN BON TUYAU POUR LE FACTEUR



Dans un orgue, la note d'un tuyau ne dépend pas que de sa longueur, mais aussi de son diamètre. Un paramètre indispensable pour les facteurs d'orgues chargés d'accorder et d'harmoniser ces instruments.

Le samedi 7 décembre 2024, la cathédrale de Notre-Dame de Paris a rouvert ses portes cinq ans après l'incendie qui a ravagé l'édifice. L'orgue a de nouveau retenti après que les 8 000 tuyaux de l'instrument ont été entièrement démontés, nettoyés et remontés avant d'être accordés.

Pour ce faire, le facteur d'orgue Pascal Quoirin a dû composer avec une étrangeté : des tuyaux de longueurs différentes produisant la même note ! Pourtant, on apprend dans les cours de physique que la note produite par un tuyau est directement reliée à sa longueur. C'est que la note produite par un tuyau dépend aussi de son diamètre. Les facteurs d'orgue le savent depuis longtemps, et en tiennent compte. Les physiciens ont pris plus de temps pour expliquer cette « correction d'embouchure »…

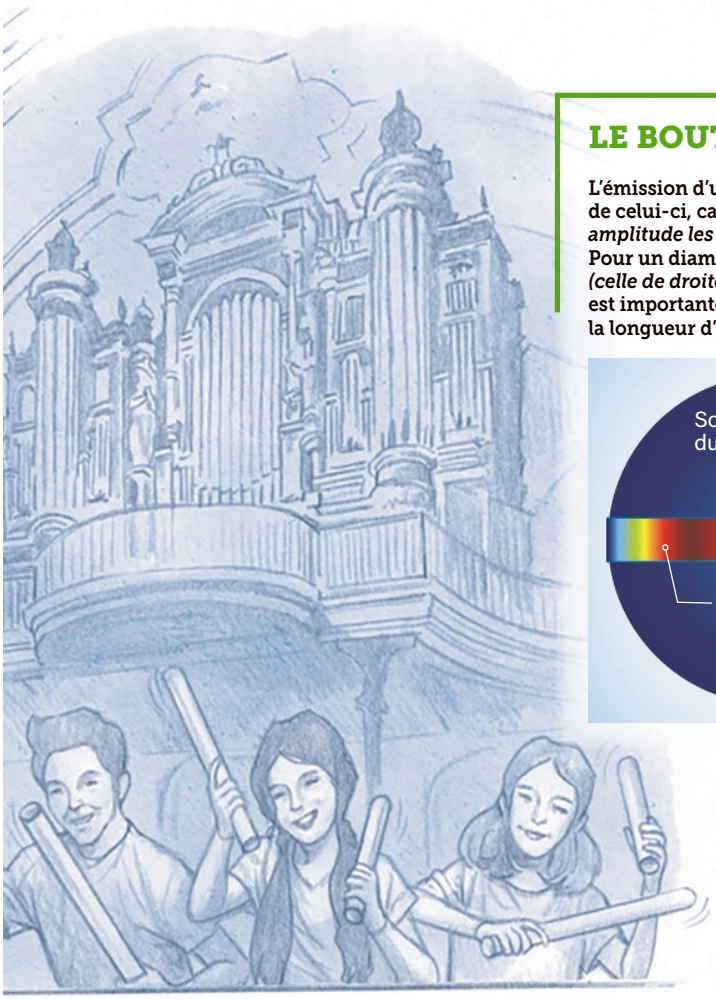
UN TUYAU IDÉAL

Prenons d'abord le tuyau le plus simple possible, celui des *boomwhackers* : ces tubes de plastique cylindriques, creux et ouverts aux deux extrémités produisent une note lorsqu'on les frappe. Plus le tuyau est long et plus la note est grave. Comment relier l'un à l'autre, sachant que chaque note est définie par une fréquence, c'est-à-dire par le nombre de fois qu'un motif sonore est répété périodiquement par seconde ? Répondre requiert de comprendre comment le son (des variations rapides de la pression de l'air, dites « pression acoustique ») se propage et quels sont les effets des parois et de la géométrie sur celui-ci.

Pour faire simple, négligeons l'effet de la viscosité de l'air. De plus, les extrémités étant ouvertes, la pression de l'air intérieur y est égale à la pression atmosphérique. La pression acoustique s'annule donc aux extrémités du tube. On en déduit alors que les sons « favorisés » par le tuyau, appelés « résonances acoustiques », sont les sons périodiques dont les fréquences sont des multiples entiers d'une fréquence fondamentale (qui détermine la hauteur de la note perçue), égale au rapport entre la vitesse du son dans l'air ambiant et le double de la longueur du tuyau. Ce sont ces sons qui seront émis préférentiellement lorsque le tuyau sera excité acoustiquement.

On peut vérifier ces prédictions en mesurant les fréquences des sons de deux

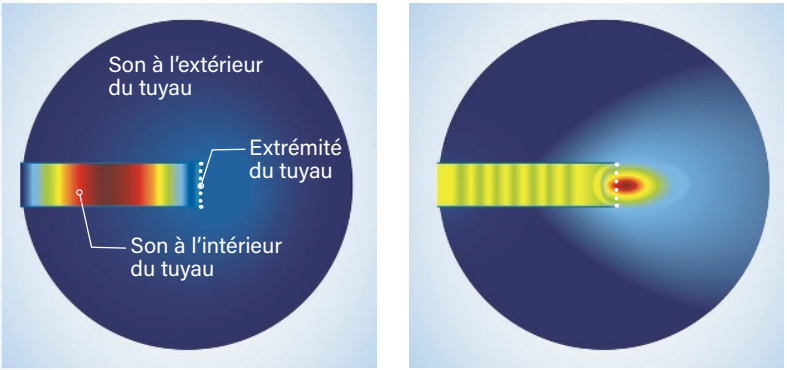
© Illustrations de Bruno Vacaro



Les tuyaux réservent des surprises quand par exemple les trois d'un orgue portatif *(à gauche)*, de longueurs différentes, donnent tous la même note (mais pas avec le même timbre…). De même, les *boomwhackers* des enfants *(ci-dessus)* émettent des notes qui ne correspondent pas uniquement à leur longueur.

LE BOUT DU TUNNEL

L'émission d'un son à l'extrémité d'un tuyau *(le pointillé blanc)* dépend du diamètre de celui-ci, car l'onde sonore, c'est-à-dire la pression acoustique *(les valeurs de son amplitude les plus élevées sont en rouge et les plus basses en bleu sombre)*, sort. Pour un diamètre donné, plus la fréquence de l'onde sonore incidente est élevée *(celle de droite est 10 fois supérieure à celle de gauche)*, plus l'émission est importante et directionnelle. On doit tenir compte de cet effet pour ajuster la longueur d'un tuyau et obtenir la note voulue.



boomwhackers censés produire un *do*. On obtient respectivement 263 et 524 hertz (Hz), très proches des valeurs officielles pour le do^3 (261,63 Hz) et le do^4 (523,25 Hz), l'exposant indiquant l'octave. Pourtant, les longueurs de ces tuyaux étaient de 62,5 et 30 centimètres : avec la formule précédente, on calcule que les fréquences fondamentales (avec une vitesse du son de 344 mètres par seconde) sont égales à 275 et 573 Hz, distinctes des fréquences mesurées. Et l'écart est significatif à l'oreille ! Notre tuyau ne serait pas du tout accordé.

LA CORRECTION DE DOM BÉDOS

En fait, nous oublions un point fondamental : nous entendons une note quand nous frappons le *boomwhacker*. C'est donc qu'il émet un son. Or cette transmission vers l'extérieur d'une partie des vibrations internes n'est possible que si la pression acoustique n'est pas rigoureusement nulle à la frontière entre l'intérieur et l'extérieur. Il est alors plus fructueux d'imaginer cette surface comme une interface entre deux milieux sur laquelle l'onde sonore va être réfléchie ou transmise. Une situation qu'on retrouve souvent en physique avec les ondes électromagnétiques. Dans notre cas, après les travaux pionniers de Lord Rayleigh en 1877, il faut attendre 1948 pour que les physiciens Harold Levine et Julian Schwinger fournissent des expressions exactes du coefficient de réflexion et de la structure de l'onde sonore transmise au loin par le tuyau ouvert. Le paramètre essentiel est le rapport du périmètre du tuyau sur la longueur d'onde du son.

Quand il est petit devant 1, tout se passe comme si pour l'onde intérieure le tuyau était rallongé à chaque extrémité d'une quantité égale à 0,6133 fois son rayon. C'est la « correction d'embouchure » discutée dès le XVIII^{e} par Dom Bédos de Celles. Concrètement, pour calculer les fréquences des résonances, il faut supposer la longueur du tuyau augmentée de 0,6133 fois son diamètre. Pour

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

nos deux *boomwhackers*, de diamètre identique de 4,4 centimètres, on obtient respectivement de 263,5 et 525,5 Hz en très bon accord avec les valeurs mesurées.

Quelles conséquences pour les instruments de musique qui utilisent des tuyaux cylindriques ? Comme en première approximation la longueur d'onde de la composante fondamentale du son est égale au double de la longueur du tuyau ouvert des deux côtés, notre paramètre correspond au quotient du périmètre du tuyau sur deux fois sa longueur. Pour une longueur donnée, plus le tuyau est large et plus la correction sera importante.

En pratique, sur la plupart des instruments, dotés de tuyaux bien plus longs que larges, on peut estimer que le paramètre est bien inférieur à 1 pour le fondamental… mais pas forcément pour tous ses multiples, ses harmoniques. Cela change la correction de longueur qui chute avec la fréquence et la structure de l'onde sonore transmise, qui augmente en intensité avec la fréquence et qui perd son isotropie (*voir figure page précédente*). Conclusion : les harmoniques ne le sont plus (au sens où ils ne sont plus multiples de la fréquence fondamentale), ils sont plus aigus qu'attendu et émis plus efficacement. Le timbre de l'instrument est modifié.

LA BOUCHE ET LE BOURDON

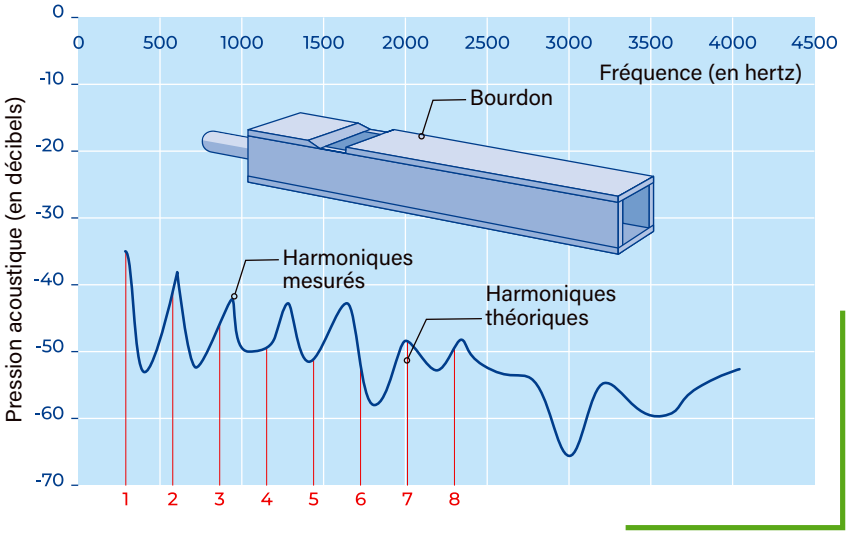
Pour éviter ces complications, pourquoi ne pas se contenter de tuyaux de faible diamètre ? Déjà parce que cela réduirait considérablement l'énergie émise… Ensuite parce que cela introduit de nouveaux effets dus à la viscosité de l'air. En effet, les variations de pression à l'intérieur du tuyau provoquent des mouvements localisés de l'air. Comme l'air au contact des parois est immobile, le profil des vitesses de l'air dans une section du tuyau n'est plus uniforme : on s'aperçoit que la vitesse varie uniquement dans une petite épaisseur d'air au voisinage de la paroi et, à cause du frottement entre les couches d'air qui glissent les unes sur les autres – ce qu'on appelle justement la « viscosité » –, cela dissipe de l'énergie acoustique. De plus, l'onde sonore s'accompagne aussi de variations de température et de pertes d'énergie par transfert thermique entre l'air et les parois. Dans les deux cas, ces phénomènes sont plus accentués quand le diamètre du tuyau est plus petit : ils modifient à la fois la vitesse du son dans le tuyau et la perte d'énergie. Si la variation de la vitesse du son est en pratique très faible dans les instruments, tel n'est pas le cas des pertes d'énergie qui peuvent être aussi importantes le long du tuyau qu'aux extrémités. Et comme tout cela dépend bien évidemment de la fréquence, cela affecte le timbre.

Enfin, on a rarement des tubes cylindriques. Ainsi, les tuyaux des bourdons en bois, un type d'orgue aux sonorités plus sourdes, ont souvent une section carrée. En plus, les tuyaux d'orgue dits « à bouche » présentent une ouverture latérale (la bouche) et à l'intérieur, un biseau qui bouche presque entièrement le tuyau et laisse un tout petit espace pour la circulation de l'air, un peu comme dans une flûte. Ce qui se passe au niveau de la bouche est très complexe compte tenu de la géométrie et la correction qu'elle apporte aux résonances et à l'émission du son souvent plus importante que celle due à l'extrémité ouverte du tuyau. Mieux vaut s'en remettre à des mesures (*voir figure ci-dessus*) qu'à des calculs pour faire des prédictions.

Le cumul de tous ces effets explique que pour obtenir une même note, on a le choix parmi une grande variété de tuyaux (les organistes parlent de « jeu »), avec chacun son timbre caractéristique. Le grand orgue de Notre-Dame de Paris a 115 de ces jeux ! Parfait pour le *Magnificat* de Jean-Sébastien Bach. ■

LA NOTE DU BOURDON

L'effet des extrémités sur la note d'un tuyau *(ici, celui de section carrée d'un bourdon)* est révélé par les mesures de la pression acoustique à sa sortie. Dans ce cas, le diamètre n'est pas du tout négligeable par rapport à la longueur, et donc sur la note, en sus de l'effet de la bouche. De fait, on constate un décalage des pics *(en bleu)* correspondant aux harmoniques réels par rapport aux valeurs théoriques *(en rouge)*.



BIBLIOGRAPHIE

N. H. Fletcher et T. D. Rossing, *The Physics of Musical Instruments*, Springer-Verlag, 1998.

H. Levine et J. Schwinger, On the radiation of sound from an unflanged circular pipe, *Phys. Rev.*, 1948.

M. Brillouin, Tuyaux sonores. Correction due à l'embouchure, *J. Phys. Theor. Appl.*, 1906.

M. Brillouin, Sur les tuyaux sonores, *J. Phys. Theor. Appl.*, 1887.

Exemple de sujets – Epreuve d'ADS Physique, Filière PSI

Il s agit ici d un texte de vulgarisation extrait du magazine *Pour la science* (numéro 569, mars 2025, pages 80-82) et écrit par Jean-Michel Courty et Edouard Kierlik. Ce texte lie un phénomène concret – l accord des orgues – à des notions fondamentales du programme de physique. Les candidat.e.s pourraient commencer par situer très brièvement le problème dans son contexte historique, en évoquant la restauration de l orgue de Notre-Dame et l'étrange observation des facteurs : des tuyaux de tailles différentes produisant la même note. Il est judicieux d expliquer ensuite pourquoi cette situation contredit l intuition initiale, selon laquelle la hauteur d un son dépendrait uniquement de la longueur du tuyau, en introduisant l idée que le diamètre joue un rôle clé, souvent méconnu en dehors des cercles spécialisés. Pour illustrer, on peut mentionner l exemple des boomwhackers, ces tubes colorés utilisés en pédagogie, dont les notes ne correspondent pas exactement aux prédictions basées sur leur longueur seule, comme le montre la figure de la page 80 avec un facteur d orgue comparant trois tuyaux d orgue portatif de longueurs différentes mais produisant la même note à 571 Hz (les unités n apparaissent pas sur la figure, mais il n est pas difficile de les deviner s agissant de notes de musique).

Pour approfondir l analyse, les candidat.e.s pourraient détailler comment la physique des ondes sonores dans un tuyau ouvert aux deux extrémités conduit à une première approximation, en essayant de retrouver les valeurs attendues données dans le texte. Ensuite, ils pourraient évoquer pourquoi cette approche reste insuffisante. En effet, l extrémité ouverte ne se comporte pas comme un nœud de pression parfait, car la pression acoustique n y est pas strictement nulle – sans quoi le son ne pourrait pas s'échapper. Ce phénomène relève d un problème de transmission d ondes entre deux milieux, comparable à ce qui se produit en électromagnétisme, comme l'évoque l article. Sans trop s y attarder, les candidat.e.s pourraient brièvement décrire ce mécanisme, qui n est pas le cœur du sujet. Le fait que l extrémité ouverte ne représente pas un nœud de pression acoustique se traduit par un allongement effectif du tuyau, connu sous le nom de correction d embouchure. Cette correction, empiriquement pressentie dès le XVIIIe siècle par Dom Bédos et théorisée plus tard, permet de comprendre pourquoi les facteurs d orgue ajustent la taille de leurs tuyaux en fonction de leur diamètre. Les candidat.e.s pourraient aussi noter que cette correction devient d autant plus importante que le diamètre du tuyau est grand par rapport à sa longueur. La correction dépend aussi de la fréquence, ainsi pour un diamètre donné, en fonction de la fréquence l onde sonore qui sort du tuyau peut être plus ou moins directionnelle, comme le montre la figure intitulée « Le bout du tunnel ». Dans cette figure, on peut voir la pression acoustique en échelle de couleur allant du bleu (valeurs basses) au rouge (valeurs élevées) et notamment l'émission du son à l extrémité d un tuyau. Cette figure illustre bien comment l onde sonore qui sort du tuyau est plus directionnelle lorsque la fréquence augmente. Le résultat est que la correction est d autant plus importante que la fréquence est élevée, ce qui a un impact sur les harmoniques et donc sur le timbre d un

instrument. Dans cette figure, il faut bien faire la différence entre le tuyau de gauche et celui de droite et relier la figure au texte qui la décrit (on peut lier la fréquence au nombre de nœuds à l intérieur du tuyau).

Un bon point à soulever serait les limites des modèles théoriques présentés dans l article. Les candidat.e.s pourraient discuter des effets de viscosité de l air et des échanges thermiques avec les parois, qui, bien que souvent négligés dans les cours classiques, jouent un rôle non négligeable, surtout pour les petits diamètres. Il est également intéressant d aborder la complexité des tuyaux réels, comme ceux des bourdons, dont la section carrée ou la présence d une bouche latérale introduisent des comportements qui nécessitent des ajustements empiriques. La figure intitulée « La note du bourdon » présente des mesures de pression acoustique à la sortie d un bourdon et révèle un décalage entre les pics théoriques et réels des harmoniques, ce qui permet de visualiser concrètement comment la géométrie affecte le son produit. Ces éléments montrent que la physique appliquée doit souvent composer avec des imperfections que les modèles idéaux ne capturent pas, ce qui ouvre la voie à une réflexion critique sur les hypothèses sous-jacentes.

On pourrait aussi élargir la discussion aux autres instruments à vent, comme la flûte ou la clarinette, où des phénomènes similaires se produisent, avec des corrections spécifiques liées à leur géométrie particulière. Par exemple, la flûte traverse, dont l embouchure est latérale, ou la clarinette, fermée à une extrémité, illustrent comment la forme et la manière dont l air est mis en vibration influencent la note produite. Ces comparaisons permettent de montrer que les principes physiques sous-jacents sont universels, même si leurs applications varient selon les instruments.

Pour conclure, les candidat.e.s pourraient résumer en expliquant comment ce texte illustre la démarche scientifique : partir d un modèle simple, en identifier les limites, puis l enrichir pour coller à la réalité. Il est utile de rappeler que la physique ne se réduit pas à des formules, mais implique aussi une réflexion sur leurs domaines de validité.

Lors de leurs exposés et de leurs réponses aux questions, les candidat.e.s doivent veiller aux ordres de grandeur et aux concepts fondamentaux de la mécanique des ondes et des fluides, ainsi qu'à la représentation des grandeurs acoustiques. Par exemple, il est important de comprendre le décibel et son lien avec la pression acoustique, de connaître l'équation de d Alembert, de savoir dériver les expressions des fréquences propres des tuyaux ou des cordes selon leurs conditions aux limites, ou encore de maîtriser la notion de viscosité, avec ses dimensions, ses unités et ses ordres de grandeur selon les milieux, ainsi que le nombre de Reynolds, son interprétation et intérêt pour la transition vers des régimes turbulents.