

Les instruments à vent

Document 1 : fonctionnement des instruments à vent : le vibreur

Le son des instruments à vent provient de la vibration d'un vibreur mécanique (hanche, lèvres, biseau), vibration qui va être amplifiée par la mise en vibration de la colonne d'air contenue dans un tube couplé au vibreur. Le vibreur peut être de différentes sortes :

- Le biseau simple (flûte de pan, flûte à bec) : le musicien positionne sa bouche au-dessus de l'embouchure de manière à ce que son flux d'air rentre puis sorte (très rapidement) à l'intérieur du tube.

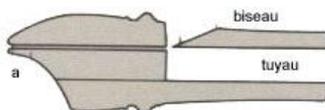
Embouchure d'une flûte traversière



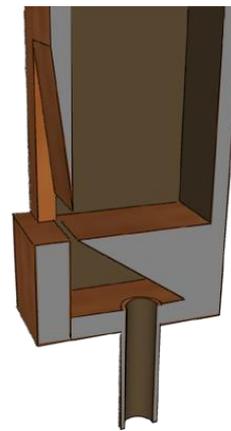
- Le biseau ouvragé (flûte à bec, tuyau d'orgue) : le musicien (ou une machine pour l'orgue) souffle dans un conduit solide (bec) et l'air est envoyé sur une arête biseautée. Le jet entre et sort alors alternativement (très rapidement) à l'intérieur et à l'extérieur du tuyau par une petite ouverture au début du tuyau..



Visualisation du flux d'air venant heurter le biseau

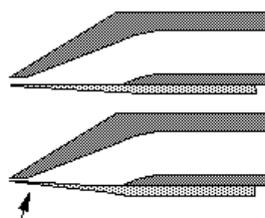


Coupe d'une flûte à bec et tuyau d'orgue (faire figurer le biseau sur le schéma de droite du tuyau d'orgue)



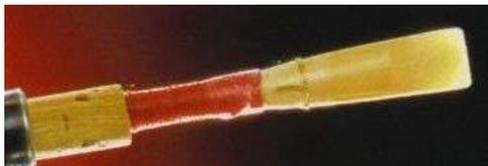
- L'anche simple (clarinette, saxophone) : une fine lamelle, souvent en roseau ou en métal, légèrement souple, est associée à un bec solide. Le musicien met en vibration la lamelle qui fait entrer ou non périodiquement et très rapidement l'air à l'intérieur du tuyau sonore de l'instrument.

Anche avec ouverture et fermeture du tuyau (coupe)



- L'anche double (hautbois, basson, cor anglais) : deux fines lamelles, souvent en roseau ou en métal, légèrement souples parallèles entre elles, sont placées entre les lèvres et dents du musicien et permettent alternativement l'entrée ou non de l'air dans le tube.

Anche double (vue de dessus)



- Les lèvres de l'instrumentiste : dans les instruments de la famille des cuivres (trompette, trombone...), ce sont les lèvres du musicien qui, appuyées sur l'embouchure, se mettent à vibrer permettant alternativement l'entrée ou non de l'air dans le tube.

Lèvres d'une trompettiste et embouchure



Document 2 : classement des instruments à vent

On peut penser classer les instruments à vent suivant le matériau utilisé pour le tube contenant l'air mis en vibration : on trouve des tubes en métal, souvent du cuivre, ou en bois. Cependant, on préfère classer ces instruments suivant leur méthode de production du son (vibreux : anche, lèvres...) et non suivant leur matériaux même si cela fait apparaître certains illogismes...

Famille dite des	Vibreux mécanique	Matériau du tube contenant l'air	exemples
« bois »	biseau	bois	flûte à bec en bois, flûte de pan
		plastique	flûte à bec en plastique
		métal	flûte traversière, orgue
	anche simple	bois	clarinette
		métal	saxophone (parfois mis dans les cuivres...)
	anche double	bois	hautbois, cor anglais, basson
« cuivre »	Lèvres du musicien appuyées sur l'embouchure	métal	Trompette, cor, tuba, hélicon
« instruments mécaniques »	Biseau relié à une soufflerie et non à la bouche	bois	Orgue de barbarie

Document 3 : fonctionnement des instruments à vent : le tuyau sonore

Dans le tuyau vont se mettre en place des ondes stationnaires comme pour les cordes sauf que cette fois-ci, c'est l'air qui rentre en vibration. Le tuyau peut être rectiligne (flûte, clarinette...) ou courbe (trompette, cor). La longueur d'air en vibration est notée L. Comme pour la corde, le tuyau sonore possède différents modes propres. Chaque mode propre va être caractérisé par son nombre de fuseau(x) (*qui peut être ici demi entier*) et la longueur d'onde associée λ .

1) Formules des tuyaux sonores (par cœur)

La période T_{son} du son émis est reliée à la longueur d'onde λ via la célérité des ondes sonores dans le tuyau $c_{\text{onde air}}$ par la relation :

Par la suite, la fréquence f_{son} du son émis est donnée (en fonction de λ et $c_{\text{onde air}}$) par :

La célérité $c_{\text{onde air}}$ dépend de la température du milieu par la relation

$$c_{\text{onde air}} = k \times \sqrt{T}$$

où T est la température absolue en K (Kelvin) (à ne pas confondre avec la période !) et k une constante qui dépend du gaz (pour l'hélium, c'est différent par rapport à l'air ambiant par exemple ; pour vous en convaincre, aller parler dans de l'hélium). On rappelle que la température absolue en K est reliée à la température θ en °C par la relation :

$$T(K) = \theta(^{\circ}C) + 273,15$$

En déduire l'expression de f_{son} en fonction de k, T et λ :

2) Nœuds et ventres (par cœur) :

* A un nœud de pression (points du tuyau où la pression ne varie pas) noté N_P correspond un ventre de vitesse noté V_v (ces mêmes points correspondent aux lieux où les molécules de gaz vibrent avec la plus grande amplitude).

* A un ventre de pression (points du tuyau où la pression varie avec la plus grande amplitude) noté V_P correspond un nœud de vitesse noté N_v (ces mêmes points correspondent aux lieux où les molécules de gaz ne vibrent pas dans le tuyau).

* Entre deux ventres (de pression ou de vitesse) se positionne un fuseau (pour la pression ou pour la vitesse). La longueur d'un fuseau, pour un mode propre donné, a TOUJOURS une longueur égale à $\lambda/2$, λ étant la longueur d'onde du mode propre en question.

* A une extrémité fermée d'un tuyau, les molécules de gaz ne peuvent vibrer : on y rencontre forcément un nœud de vitesse et donc un de pression.

* A une extrémité ouverte d'un tuyau, la pression est fixée par la pression extérieure atmosphérique qui reste constante : on y rencontre forcément un nœud de pression et

3) Extrémité fermée ou extrémité ouverte ? (c'est logique)

Les extrémités correspondant à une anche sont plutôt des extrémités fermées (l'ouverture est en effet très petite).

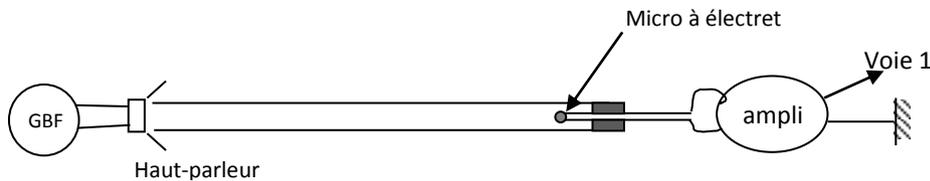
Les extrémités correspondant à une embouchure comme la trompette ou un biseau comme la flûte à bec ou la flûte traversière sont plutôt des extrémités ouvertes (l'ouverture est en effet assez grande).

L'autre extrémité de l'instrument est le plus souvent ouverte (pavillon de la trompette, du tuba, ouverture au bout de la clarinette, de la flute etc.) mais peut parfois être fermée (certaines flûtes de pan, certains tuyaux d'orgue).

Document 4 : dispositif expérimental

Un tube en plexiglas est fermé à une de ses extrémités par un haut-parleur, relié à un GBF : sa membrane oscille (on peut faire varier la fréquence d'oscillation avec le GBF) et va mettre en l'air dans le tuyau. Des ondes vont alors se mettre en place dans le tuyau (car l'onde sonore subit une réflexion à chaque extrémité du tuyau). Pour certaines fréquences du HP vont apparaître les du tuyau sonore.

L'autre extrémité est fermée par un bouchon. Un trou permet de faire passer une canne au bout de laquelle se trouve un petit microphone. Le petit microphone enregistre les perturbations de pression et plus exactement les variations locales de pression ΔP par rapport à la pression atmosphérique moyenne P_A (la pression P au lieu du micro valant $P = P_A + \Delta P$). Cette variation de pression est transformée en une tension. Le microphone est relié à la voie 1 d'un oscilloscope et on visualise la tension à l'écran de l'oscilloscope. Un maximum d'amplitude de tension correspond ainsi à un maximum de ΔP . Le microphone peut se déplacer dans le tube.



Document 5 : fonctionnement succinct d'un oscilloscope

Sur l'écran d'un oscilloscope s'affiche un graphique qui correspond toujours à une tension EN FONCTION DU TEMPS.

Ordonnées : abscisses :

Les positions des deux axes sont fixées par l'expérimentateur avec les boutons positions.

Les échelles des deux axes vertical et horizontal sont fixées par l'expérimentateur à l'aide des deux gros boutons. On dit qu'on change les calibres quand on change d'échelle, ou de « balayage » quand il s'agit de l'axe des temps. En bas de l'écran figure les calibres choisis : ils donnent la valeur de la graduation d'un carreau vertical ou horizontal.

IL FAUT SANS CESSE MODIFIER LES CALIBRES DE MANIERE A AVOIR LA PLUS GRANDE PRECISION A L'ECRAN POUR LE PHENOMENE VISUALISE.

(répondre sur une feuille séparée)

1) Comment s'appelle le phénomène utilisé dans le document 4 afin de visualiser les modes propres du tuyau ? Qui joue le rôle de vibreur ?

2) Le premier mode propre

a) Que pouvez-vous dire des extrémités du tube utilisé dans le dispositif expérimental ? En déduire un schéma du premier mode propre observé.

b) Pour calculer la constante k apparaissant dans l'expression de la célérité du son, on utilise le fait que la célérité dans l'air vaut 340 m.s^{-1} à 15°C . Calculer alors la fréquence théorique $f_{\text{thé}01}$ du 1^{er} mode propre.

c) Dessiner, en la prévoyant, la courbe obtenue à l'écran de l'oscilloscope si le micro à électret est placé au centre du tube, pour ce premier mode propre. Quelle grandeur est reportée en abscisse ? Que va-t-on y voir apparaître comme grandeur caractéristique de l'onde et du premier mode propre ?

d) Dessiner, en la prévoyant, la courbe obtenue à l'écran de l'oscilloscope si le micro à électret est placé à une des extrémités du tube, pour ce premier mode propre.

e) Dessiner, en la prévoyant, la courbe obtenue à l'écran de l'oscilloscope si le micro à électret est placé au quart du tube, pour ce premier mode propre.

3) Le deuxième mode propre

Par rapport au premier mode propre, on rajoute une ventre de pression (et donc un nœud de vitesse).

a) En déduire un schéma du 2^{ème} mode propre pour ce tuyau sonore.

b) Déterminer la fréquence théorique $f_{\text{thé}2}$ du 2^{ème} mode propre.

c) Dessiner, en la prévoyant, la courbe obtenue à l'écran de l'oscilloscope si le micro à électret est placé au centre du tube, pour ce premier mode propre. Quelle grandeur est reportée en abscisse ? Que va-t-on y voir apparaître comme grandeur caractéristique de l'onde et du premier mode propre ?

d) Dessiner, en la prévoyant, la courbe obtenue à l'écran de l'oscilloscope si le micro à électret est placé à une des extrémités du tube, pour ce premier mode propre.

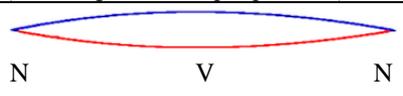
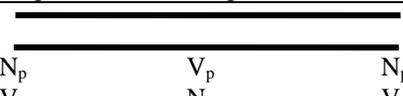
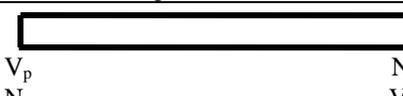
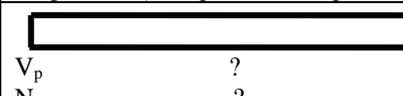
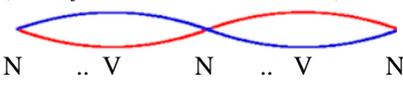
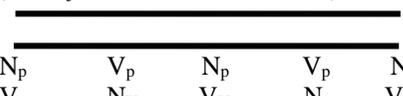
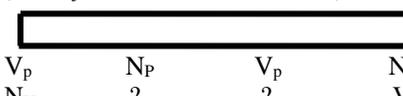
e) Dessiner, en la prévoyant, la courbe obtenue à l'écran de l'oscilloscope si le micro à électret est placé au quart du tube, pour ce premier mode propre.

4) Vérification expérimentale

a) Proposer un protocole complet afin de vérifier expérimentalement la concordance entre la théorie et l'expérience pour l'obtention du 2^{ème} mode propre et l'obtention du 3^{ème} mode propre (le 1^{er} mode propre est difficile à obtenir proprement) (15 min)

b) Mettre en place le protocole après vérification par le professeur.

Document 6 : modes propres des tuyaux sonores et timbre associé : grand récapitulatif à connaître

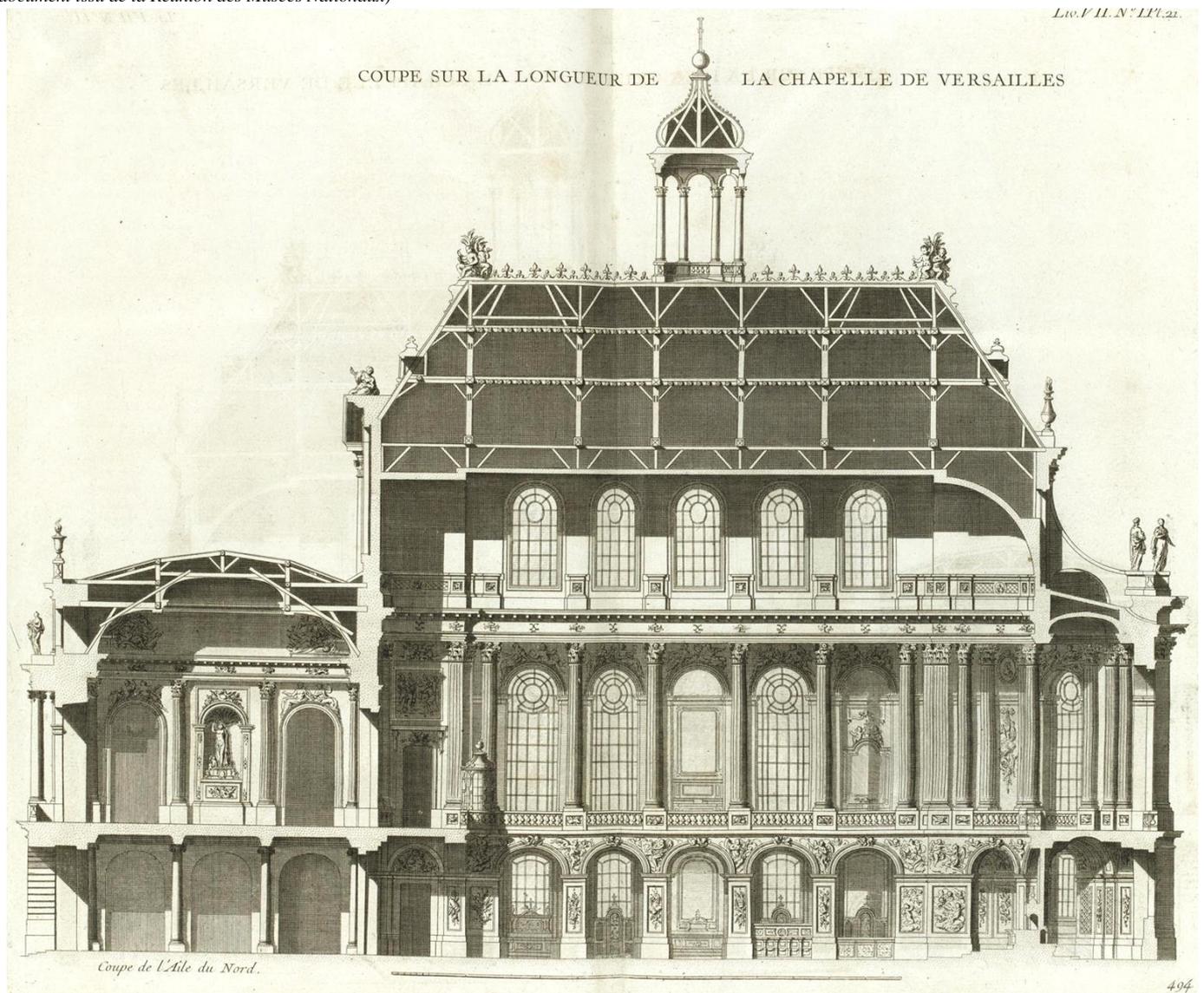
		Instrument à corde Corde de longueur vibrante L (violin, guitare, harpe, piano...)	Instruments à vent Tuyau ouvert aux deux extrémités de longueur L (ex : trompette, flûte)	Instruments à vent Tuyau ouvert à une extrémité, ouvert à l'autre, de longueur L (ex : clarinette...)	Instruments à vent Tuyau fermé aux deux extrémités de longueur L (tube plexi de l'expérience)
1 ^{er} mode propre	Allure, nœuds et ventres				
	Nb de fuseau(x) et expression de λ en fonction de L	1 fuseau donc $\lambda_1 / 2 = L$ et donc $\lambda_1 = 2L$	1 fuseau pour la pression ou 2 ½ fuseaux pour la vitesse donc $\lambda_1 / 2 = L$ et donc $\lambda_1 = 2L$	½ fuseau pour la pression ou pour la vitesse donc ici $(1/2) * (\lambda_1 / 2) = L$ Donc $\lambda_1 = 4L$	2 ½ fuseaux pour la pression ou 1 fuseau pour la vitesse donc et donc $\lambda_1 = \dots L$
	Expression de la fréquence associée à ce mode propre	$f_1 = \frac{c}{\lambda_1} = \frac{c}{2L} \left(= \frac{1}{2L} \sqrt{\frac{F}{\mu}} \right)$	$f_1 = \frac{c}{\lambda_1} = \frac{c}{2L} \left(= \frac{1}{2L} \times k\sqrt{T} \right)$	$f_1 = \frac{c}{\lambda_1} = \frac{c}{4L} \left(= \frac{1}{4L} \times k\sqrt{T} \right)$	$f_1 = \frac{c}{\lambda_1} = \frac{c}{2L} \left(= \frac{1}{2L} \times k\sqrt{T} \right)$
	Correspondance dans le timbre du son de l'instrument	Fondamental, 1 ^{er} harmonique	Fondamental, 1 ^{er} harmonique	Fondamental, 1 ^{er} harmonique	Fondamental, 1 ^{er} harmonique
2 ^{ème} mode propre	Allure, nœuds et ventres	(il faut rajouter un V et un N encore une fois) 	(il faut rajouter un V et un N encore une fois) 	(il faut rajouter un V et un N encore une fois) 	(il faut rajouter un V et un N encore une fois)
	Nb de fuseau(x) et expression de λ en fonction de L	2 fuseaux donc $2 * (\lambda_2 / 2) = L$ et donc $\lambda_2 = L$	2 fuseaux pour la pression ou 1 fuseau + 2* ½ fuseaux pour la vitesse donc $2(\lambda_1 / 2) = L$ et donc $\lambda_1 = L$	3* ½ fuseaux pour la pression ou pour la vitesse donc $3 * (1/2) * (\lambda_2 / 2) = L$ Donc $\lambda_2 = \dots$	
	Expression de la fréquence associée à ce mode propre	$f_2 = \frac{c}{\lambda_2} = \frac{c}{L} \left(= \frac{1}{L} \sqrt{\frac{F}{\mu}} \right) = 2f_1$	$f_2 = \frac{c}{\lambda_2} = \dots$ $= 2f_1$	$f_2 = \frac{c}{\lambda_2} = \dots$ $= ? f_1$	
	Correspondance dans le timbre du son de l'instrument	$f_2 = 2 f_1$ donc ce deuxième mode propre correspond au deuxième harmonique	$f_2 = 2 f_1$ donc ce deuxième mode propre correspond au deuxième harmonique	$f_2 = ? f_1$ donc ce deuxième mode propre correspond au harmonique	
3 ^{ème} mode propre	Allure, nœuds et ventres	(il faut rajouter un V et un N encore une fois)	(il faut rajouter un V et un N encore une fois)	(il faut rajouter un V et un N encore une fois)	
	Nb de fuseau(x) et expression de λ en fonction de L	... fuseaux donc			
	Expression de la fréquence associée à ce mode propre	$f_3 = \dots$			
	Correspondance dans le timbre du son de l'instrumentdonc ce troisième mode propre correspond au harmoniquedonc ce troisième mode propre correspond au harmoniquedonc ce troisième mode propre correspond au harmoniquedonc ce troisième mode propre correspond au harmonique

Problème scientifique : l'orgue de la chapelle royale de Versailles

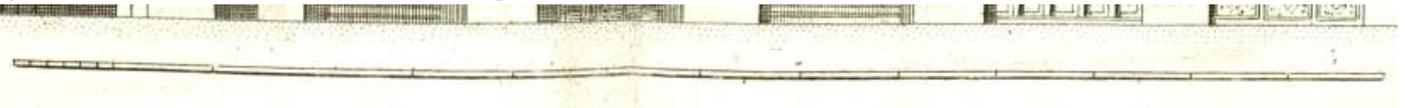
Document 1 : la chapelle du palais de Versailles

La chapelle royale du palais de Versailles est le monument le plus abouti de Versailles, et le moins modifié par l'Histoire. Tout au long du chantier, le projet architectural connut une lente maturation et trouva sa forme définitive grâce à Jules Hardouin-Mansart. Son emplacement définitif fut trouvé en 1687. Le plan de l'édifice était barlong, avec un chevet qui prit rapidement la forme d'un demi-cercle. La chapelle comportait deux niveaux ; au premier étage, une tribune réservée au roi, face à l'autel, bordait l'ensemble du vaisseau. La chapelle était précédée de deux vestibules superposés, qui donnaient accès à l'aile nord. La chapelle fut d'abord conçue pour ne pas excéder la hauteur des toitures du reste du palais. Mais dès janvier 1689, l'édifice était nettement plus élevé. Le clocheton présent initialement fut enlevé au XIX^{ème} siècle.

(document issu de la Réunion des Musées Nationaux)



Agrandissement du centre du bas du document précédent : échelle ancienne en toise



Document 2 : une mesure de longueur sous l'ancien régime

La **toise** est une unité de longueur ancienne utilisée jusqu'en 1799 en France, avant l'adoption du système métrique. Elle correspond *toujours* à *six pieds*. Le mot *toise*, du latin *tendere*, en français *tendre*, signifie « l'étendue des bras », c'est-à-dire l'envergure des [bras](#). Elle a donc comme base la distance entre les bouts des doigts, les deux bras étendus.

A la fin du XVII^{ème} siècle, la valeur du pied du roi est fixée de façon définitive et la valeur d'une toise vaut alors 1949 mm.

Document 3 : fréquences de quelques notes dans la gamme tempérée (en Hz avec 3 CS)

Numéro d'octave	-1	0	1
do (ut)	16,3	32,7	65,4
ré	18,3	36,7	73,4
mi	20,6	41,2	82,4
fa	21,8	43,6	87,3
sol	24,5	49,0	98,0
la	27,5	55,0	110
si	30,9	61,7	123

Lorsqu'on passe d'une octave à l'autre en montant en hauteur, la fréquence de chaque note double : ainsi la fréquence du do_1 est bien le double de celle du do_0 et il en va de même pour toutes les autres notes et toutes les octaves (de l'octave -1 à l'octave 8).

Document 4 : L'orgue de la chapelle de Versailles

Au prix de l'occultation de la fenêtre axiale, la place du buffet d'orgue fut définitivement trouvée : tout en reprenant une idée formulée par le Bernin pour la chapelle du Louvre, cette solution assez audacieuse traduisait assurément le prestige de la musique de la chapelle puisque l'orgue est monté au premier étage, dans l'axe de la chapelle, juste au-dessus du maître-autel.

La réalisation de la partie instrumentale est l'œuvre des facteurs Robert Clicquot et Julien Tribuot. Les tuyaux sont ouverts et les plus grands d'entre eux sont en devanture de l'instrument (voir photographie page suivante)

Document 5 : théorie des tuyaux sonores

La colonne d'air d'un tuyau sonore peut rentrer en résonance suivant différents modes propres. Pour chacun d'eux apparaissent des nœuds et ventres de pression et de vitesse. A un nœud de pression correspond un ventre de vitesse et vice-versa. A une extrémité ouverte est présent un nœud de pression et à une extrémité fermée est présent un nœud de vitesse. Entre deux nœuds successifs se trouve un fuseau dont la longueur correspond à une demi-longueur d'onde du mode propre considéré.

La célérité c des ondes sonores dans le tuyau peut être évaluée par la formule suivante :

$$c = k\sqrt{T}$$

où T est la température absolue en Kelvin ($T = \theta + 273,15$ si θ est en $^{\circ}\text{C}$) et k une constante calculable sachant qu'à 15°C , la célérité des ondes sonores dans l'air est évaluée à $340 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$.

La fréquence fondamentale du son joué par un tuyau correspond à la fréquence de son premier mode propre obtenu pour un minimum de ventre et de nœud possible.



Problème scientifique :

Question préliminaire : évaluer la hauteur d'un des tuyaux d'orgue.

Problème scientifique : à l'aide des documents fournis et de vos connaissances personnelles, évaluez la note du son le plus grave émis par le buffet d'orgue de la chapelle de Versailles.

Note : les questions préliminaires, à l'épreuve du baccalauréat, sont là pour vous guider. Leur réponse doit apparaître en tête du travail rendu. Elles sont en général nécessaires pour répondre au problème posé.