

CFA/VISHNO 2016

Etude du démarrage du son produit par un instrument de musique thermoacoustique : le thermophone

D.H. Truong^a, C. Weisman^a, D. Baltean Carlès^a, F. Jebali Jerbi^a et J. Rémus^b

^aUniversité Pierre et Marie Curie, LIMSI-CNRS, 4 Place Jussieu, 75252 Paris, France

^bIpotam Mécamusique, 19 rue des Frigos, 75013 Paris, France
weisman@limsi.fr



LE MANS

On s'intéresse dans cette étude à un instrument de musique particulier, où le son est produit par effet thermoacoustique. Cet instrument, créé par J. Rémus et appelé « thermophone » est constitué d'un tube en acier doux, verre ou aluminium, de section circulaire ou rectangulaire, à l'intérieur duquel est positionné judicieusement un « stack » formant un milieu poreux, dont l'une des extrémités est chauffée à l'aide d'une résistance électrique. Lorsque la température de l'extrémité chaude devient suffisamment élevée, le thermophone se met à chanter. Un thermophone s'apparente à un moteur thermoacoustique de type ondes stationnaires, où le gaz utilisé est de l'air atmosphérique. Le résonateur, ouvert au moins à l'une de ses extrémités pour rendre le son audible, est dépourvu d'échangeur froid permettant de maintenir un gradient de température constant dans le stack. Le démarrage du son est le résultat d'une instabilité thermoacoustique. La théorie linéaire de Rott est adaptée pour prendre en compte les particularités du thermophone. L'équation de dispersion est résolue numériquement pour une variété de thermophones existants. Le seuil de l'écart de température entre les extrémités du stack correspondant au démarrage ainsi que la fréquence du mode le plus instable sont déterminés et comparés aux mesures.

1 Introduction

Une auto-oscillation, utilisable comme son musical, peut être produite par effet thermoacoustique en introduisant une source de chaleur localisée dans un tuyau sonore (tuyau d'orgue). En comparaison avec les tuyaux à embouchure de flûte, les sons résultants sont très particuliers, par leur timbre et leur puissance. Ce phénomène de conversion d'énergie thermique en énergie acoustique a jusqu'à présent surtout été étudié pour générer du froid, ou bien comme moteur (machines thermoacoustiques), et plus rarement exploité pour la génération de sons musicaux.

Jacques Rémus, musicien et plasticien [1], constructeur de sculptures et machines musicales, a créé depuis plusieurs années des tuyaux sonores thermo-acoustiques, qu'il a baptisés « thermophones » (Figure 1). Ils sont constitués d'un tuyau en acier doux, verre ou aluminium, de section circulaire ou carrée, ouvert aux deux extrémités (flûte) ou bien ouvert à une extrémité et fermé à l'autre extrémité (bourdon). A l'intérieur du tuyau, se trouve un stack solide (empilement de plaques ou grilles métalliques, ou réseau de canaux rectangulaires en céramique). Le stack est chauffé par une résistance électrique à une extrémité. Lorsque la température de l'extrémité chaude devient suffisamment élevée, le thermophone se met à chanter. Le démarrage du son est le résultat d'une instabilité thermoacoustique. Un thermophone s'apparente donc à un générateur d'ondes thermoacoustique, de type ondes stationnaires, où le gaz utilisé est de l'air atmosphérique. Pour l'instant les thermophones ne sont pas pourvus d'un échangeur froid permettant de contrôler la température de l'autre extrémité du stack, comme les moteurs thermoacoustiques, et celle-ci peut donc varier le long du tube. Le son du thermophone est dominé par la fréquence de résonance fondamentale du tuyau, liée à sa longueur et il dépend bien évidemment de la chaleur apportée et de la géométrie du stack et du résonateur.

Le terme "Thermoacoustique" est peu connu du grand public parce que c'est une science dont les applications ne sont pas encore utilisées de façon industrielle. Malgré ce fait, les machines thermoacoustiques présentent déjà des intérêts majeurs dans beaucoup de domaines tels que la cryogénie, le froid domestique, la production d'électricité.

Le phénomène d'amplification thermoacoustique a été observé, depuis des siècles, par les souffleurs de verre. Il a suscité l'intérêt de la communauté scientifique dès la fin du 18e siècle (expériences de Higgins, Sondhauss et Rijke). Lord Rayleigh (1896) a donné la première explication qualitative du phénomène. D'un point de vue de la modélisation, une avancée significative a été réalisée avec les travaux de Rott (1960-1970) qui a mis les bases de la théorie linéaire de la thermoacoustique, donnant ainsi une

explication aux oscillations de Taconis, phénomène indésirables qui apparaît dans les réservoirs cryogéniques.

La théorie de Rott [2] a été étendue et appliquée au développement des machines thermoacoustiques par Wheatley, Swift et coll. [3].

La production de sons musicaux avec une source de la chaleur dans des tubes inspira en 1873 la réalisation d'un orgue à flamme produit en trois exemplaires, orgue à gaz de coke ou pyrophone en 1873, réalisé par Kastner [4].

Le nom « thermophone » a été utilisé au début du vingtième siècle pour désigner divers appareils comme des thermomètres ou des téléphones, puis il faut attendre les années 1960-70 pour voir apparaître des orgues à flamme développés par divers artistes, comme aux Etats-Unis (Trimpin [5]), en Australie (Langton [6]) ou en France (Moglia [7]). Les caractéristiques des sons de nature thermoacoustique des pyrophones sont souvent dominées par le son des flammes de gaz et sont musicalement à grandes variations de fréquence dues aux variations de chaleur dans les tubes. Des prototypes de laboratoire (Durox [8]) ou des installations artistiques utilisant de l'hydrogène (Oldörp [9]) produisent cependant des sons plus stabilisés. Des tubes expérimentaux, à résistances électriques ou avec des paraboles solaires, en général de petite taille, ont été expérimentés (S.Garrett [10], M.R. Duffey [11]).

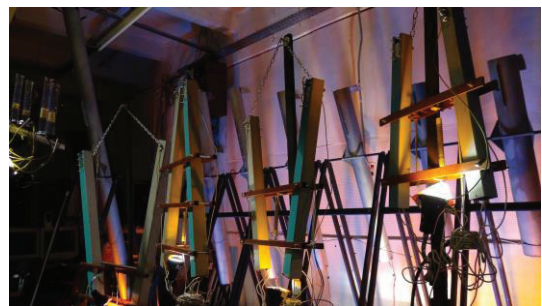


Figure 1 : Thermophones expérimentaux sur supports mobiles, atelier Ipotam Mécamusique, J. Rémus [1].

Dans ce travail on se propose d'étudier les conditions de démarrage de l'instabilité thermoacoustique : température critique et fréquence du mode le plus instable sur trois prototypes de thermophones. Dans la section 2 on présente les dispositifs expérimentaux ainsi que les résultats des mesures effectuées. Dans la section 3 on présente un modèle 1D d'un thermophone, basé sur la théorie linéaire de Rott, adaptée pour prendre en compte les particularités du thermophone. L'équation de dispersion est résolue numériquement pour une variété de thermophones existant

et le seuil de l'écart de température entre les extrémités du stack correspondant au démarrage ainsi que la fréquence du mode le plus instable sont déterminés. Les résultats des prédictions sont analysés et comparés aux mesures dans la section 4.

2 Mesures

2.1 Dispositifs expérimentaux

Principalement, deux dispositifs de géométries différentes sont présentés dans cette étude.

Le dispositif A, référencié PO15, est formé d'un résonateur horizontal en acier doux, de longueur 0,508 m, de section carrée (55×55 mm), fermé en une extrémité et ouvert à l'air libre à l'autre extrémité (Figure 2). A l'intérieur du tube, est inséré un stack constitué en matière céramique (cordiérite) de 6,2 cm de longueur et de diamètre ≈ 55 mm, le long duquel sont percés des pores avec une densité de 64 pores/cm². Une résistance chauffante en nickel-chrome (80%-20%), de $7,4 \Omega$ à froid et de diamètre 0,40mm est fixée sous forme d'un serpentín sur la face du stack à chauffer. Deux thermocouples type K chemisés en acier inox sont encastrés à l'intérieur du stack à quelques millimètres de ses extrémités afin de mesurer les températures T_1 et T_2 des deux faces chaude et froide du stack. Un troisième thermocouple est placé au niveau de l'extrémité ouverte du résonateur afin de mesurer sa température T_3 .

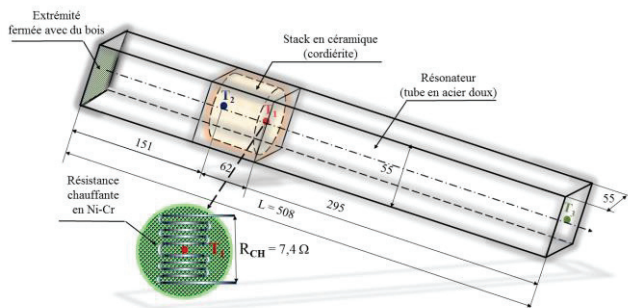


FIGURE 2 : Dispositif A - Thermophone de section carrée, fermé en son extrémité côté chaud (PO15).

Le dispositif B, référencié Diag9, est formé d'un résonateur horizontal en aluminium de section cylindrique, ouvert en ses deux extrémités à l'air libre, de longueur 0,617 m, de 55 mm de diamètre intérieur et de 2,5 mm d'épaisseur (Figure 3). A l'intérieur du tube, est inséré un stack, de même nature (cordiérite) et de mêmes caractéristiques que celui utilisé dans le dispositif A (une porosité correspondant à 64 pores/cm²), mais ayant une longueur de 5 cm. Une résistance chauffante en nickel-chrome de $5,8 \Omega$ à froid et de diamètre 0,40mm est collée à la manière du dispositif A sur la face du stack à chauffer. Là aussi, des thermocouples ont été placés de manière analogue au premier dispositif afin de mesurer les températures T_1 et T_2 sur les faces chaude et froide du stack ainsi la température T_3 au niveau de l'extrémité (côté long) du résonateur.

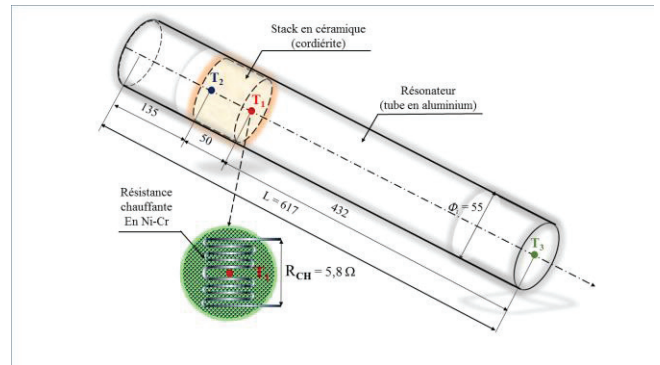


FIGURE 3 : Dispositif B – Thermophone de section cylindrique ouvert en ses deux extrémités (Diag9).

Un troisième dispositif est également étudié expérimentalement. Ce dispositif C (Figure 4), référencié Diag11, est formé d'un résonateur cylindrique en aluminium dont les extrémités sont aussi ouvertes mais ayant une longueur de 0,802 m plus grande que celle du dispositif B et dont la position du stack est décalée un peu plus vers le milieu (la distance entre l'extrémité du tube et celle de l'extrémité froide du stack est de 245 mm). Ce dispositif se distingue des deux premiers par la conception de l'élément chauffant. En effet, celui-ci est formé d'une résistance en nickel-chrome sous forme d'une spirale imbriquée dans une gaine de céramique, le tout formant une matrice chauffante de 12 mm d'épaisseur et venant se coller sur l'extrémité du stack à chauffer. Un quatrième thermocouple (type J) est fixé à l'intérieur de cette matrice permettant de suivre l'évolution de la température de l'élément chauffant T_H à côté de celles de T_1 , T_2 et T_3 .

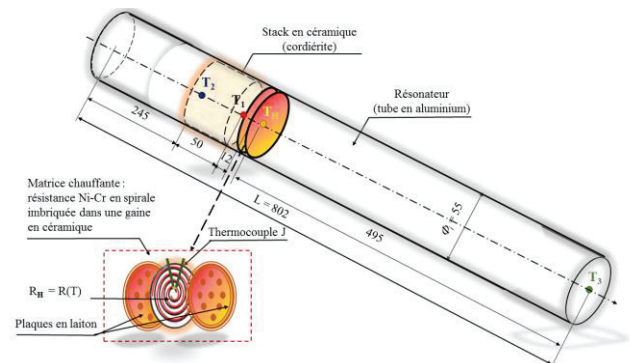


FIGURE 4 : Dispositif C - Thermophone de section cylindrique ouvert en ses deux extrémités et muni d'une matrice chauffante (Diag11).

L'évolution de T_H apporte une information importante sur le phénomène de conversion d'énergie dans un générateur d'onde thermoacoustique d'une manière générale et, particulièrement, dans un thermophone.

2.2 Techniques expérimentales

Dans tous les dispositifs, les mesures des températures sur les faces chaude et froide du stack et celle au niveau de l'extrémité du résonateur, respectivement, T_1 , T_2 et T_3 sont mesurées à l'aide de thermocouples de type K chemisés en acier inox. Seule la température de la matrice chauffante du dispositif C est mesurée à l'aide d'un thermocouple type J. L'alimentation électrique est assurée à l'aide d'un gradateur

de puissance (modulateur de l'intensité de sortie pour projecteur d'éclairage piloté en langage série DMX 512) relié directement à la tension du secteur (230 V~). L'intensité efficace du courant I_{eff} et la tension efficace U_{eff} à la sortie sont mesurées à l'aide d'un multimètre à aiguille Métrix modèle MX 453 et d'un multimètre digital type Fluke. Les valeurs efficaces de l'intensité et de la tension électriques, et de la puissance d'alimentation pour chaque dispositif, sont données dans le tableau 1.

TABLEAU 1 : Paramètres d'alimentation électrique.

Dispositif	I_{eff} (A)	U_{eff} (V)	P (W)
A	4	30	120
B	4,5	23	103,5
C	1,32	147	194,04

La fréquence (convertie en Hz) émise par l'onde est mesurée à l'aide d'un accordeur des facteurs d'instruments de musique type « Korg Master Tune ». Les niveaux de pression acoustique, mesurés à l'aide d'un sonomètre et exprimés en dB SPL, sont définis par $L_p = 20 \log(p/p_0)$, où p est la valeur efficace de la pression acoustique et p_0 (20 μPa) la valeur de référence associée. Signalons que le sonomètre utilisé est pourvu de filtres atténuateurs. Les niveaux délivrés sont alors exprimés en dBA et dBC. Ces niveaux pondérés sont comparables à ceux auxquels l'oreille serait sensible à des fréquences différentes (égales respectivement à 1kHz et 100 Hz). On peut aussi exprimer le niveau de pression acoustique en Pa ou en termes d'intensité acoustique exprimée en $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$.

2.3 Résultats expérimentaux

2.3.1 Températures

La Figure 5 représente les évolutions des températures enregistrées dans le cas du dispositif A (PO15) sur les faces chaude et froide du stack, T_1 et T_2 , au niveau de la section de sortie du résonateur T_3 ainsi que de l'écart de température entre les extrémités du stack, $\Delta T = T_1 - T_2$.

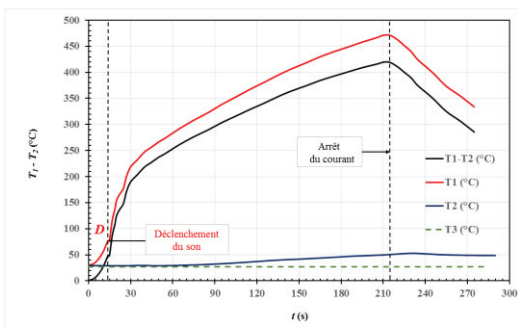


FIGURE 5 : Evolution des températures dans le dispositif A.

Le point D correspondant au déclenchement du son est atteint 14 secondes après la fermeture du circuit électrique. En ce point, la température T_1 ainsi que l'écart de température ΔT augmentent un peu plus rapidement. En particulier, il est important de noter qu'au moment du déclenchement du son, T_1 n'arrête pas de croître.

Parallèlement, on note une augmentation modérée de la température T_2 (jusqu'à environ 52 °C) due à la conduction au travers la paroi du tube. La température T_3 en revanche reste égale à la température ambiante (27,2 °C).

La Figure 6 représente les évolutions des températures enregistrées dans le cas du dispositif B (Diag9). Globalement, le comportement thermique est quasi identique à celui du dispositif A. Notons que pour le dispositif présent, le point D correspondant au déclenchement du son est atteint 22 secondes après la fermeture du circuit électrique. Là aussi, en ce point, la température T_1 ainsi que l'écart de température ΔT augmentent un peu plus rapidement et que, par la même occasion, T_1 n'arrête pas de croître. En revanche, les températures T_2 et T_3 , respectivement, au niveau de l'extrémité froide du stack et la section de sortie du résonateur T_3 varient très peu car le tube est ouvert à l'air ambiant des deux côtés et que l'échauffement reste local.

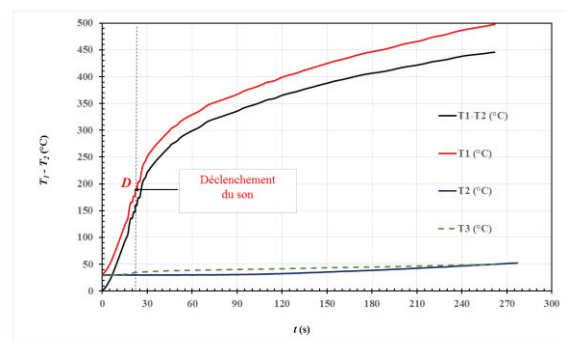


FIGURE 6: Evolution des températures dans le dispositif B.

Pour finir, la Figure 7 représente les évolutions des températures dans le cas du dispositif C (Diag11) enregistrées par le thermocouple J au niveau de la matrice chauffante, sur les faces chaude et froide du « stack », respectivement T_1 et T_2 ainsi que de l'écart de température entre les extrémités du stack, $\Delta T = T_1 - T_2$. La température T_3 enregistrée au niveau de la section de sortie du résonateur n'est pas reportée sur la figure étant donné que ses variations sont restées faibles (entre 28°C avant démarrage du thermophone et 40°C à la fin de l'expérience). Le point D correspondant au déclenchement du son est atteint 106 secondes après la fermeture du circuit électrique. Là aussi, il est important de noter que la température T_1 n'a pas arrêté de croître au moment du déclenchement du son. En revanche, on note une chute nette de la température de la matrice T_H au moment même où le son démarre (T_H est passée de 356°C à 333°C pendant une durée de 40 secondes) pour continuer de croître au-delà de cet intervalle. Manifestement, une partie de la chaleur injectée au niveau de la matrice a été transformée en son, et la température T_1 a continué de croître à l'extrémité chaude du stack par pompage de chaleur au niveau de la matrice qui, à cause de sa grande masse thermique, se comporte comme une source chaude. Remarquons, en même temps, que l'augmentation assez conséquente de la température à l'extrémité froide du stack (T_2 atteint jusqu'à des températures voisines de 150°C) pourrait trouver son explication dans la forte inertie thermique de la matrice qui force le contact avec l'extrémité froide du stack augmentant ainsi les pertes de chaleur par conduction au travers ce dernier. C'est ainsi qu'au bout d'une durée de 180 s, par exemple, l'écart ($T_1 - T_2$) atteint

400 °C pour les deux dispositifs A et B alors qu'il ne dépasse guère 250 °C pour ce dispositif. Ce faible gradient de température entre les extrémités du stack, pourrait par ailleurs faire en sorte que le dispositif C met plus de temps à démarrer.

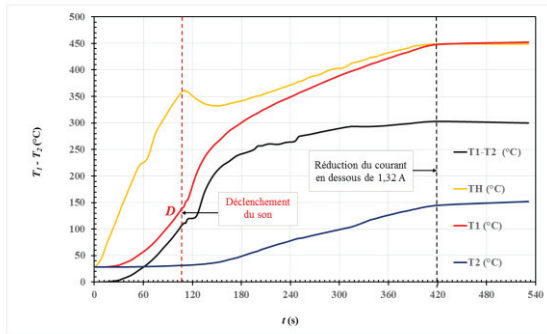


FIGURE 7 : Evolution des températures dans le dispositif C.

2.3.2 Niveau de pression acoustique

Les niveaux de pression acoustique ont été mesurés à la fin de chaque expérience, après le démarrage du son, afin d'estimer l'ordre de grandeur des intensités acoustiques produites par les thermophones. Dans le tableau 2 sont reportés les niveaux de pression acoustique mesurés par le sonomètre en sortie du tube et exprimés en dB SPL pour chacun des trois thermophones en fonction de la fréquence f du son.

TABLEAU 2 : Niveaux de pression acoustique en sortie du tube pour les trois thermophones, en fonction de la fréquence f .

Dispositif	f (Hz)	L_p	
		dBA	dBC
A	178	106,5	114,8
B	276	108	115
C	212	107	115

Les niveaux mesurés en sortie du tube pour les trois thermophones en dBA sont équivalents à une intensité acoustique $I \sim 10^{-1} \text{ W.m}^{-2}$, ce qui est très faible en comparaison avec les machines thermoacoustiques (de l'ordre de 10^4 à 10^5 W.m^{-2}) [3]. Il faut noter cependant que le niveau sonore, du point de vue instrumental, est beaucoup plus élevé que celui d'un instrument à vent de même dimension, en particulier un tuyau d'orgue de même longueur.

3 Modélisation et simulations numériques

La modélisation des thermophones est basée sur la théorie linéaire de Rott [2], qui permet, sous les hypothèses d'une part de l'acoustique linéaire mono-fréquentielle et d'autre part d'écoulement en proche paroi, d'obtenir par intégration sur la direction transversale, une équation d'onde modifiée pour la pression acoustique suivant l'axe, faisant intervenir le gradient de température moyen local, et la géométrie spécifique des différents constituants du

thermophone (tube, stack, résistance) par l'intermédiaire de facteurs de forme [3]. La résolution de cette équation pour un champ de température donné permet d'obtenir une équation de dispersion, et donc les valeurs réelle et imaginaire de la pulsation. Ici on a proposé une simplification des thermophones étudiés, pour obtenir la valeur critique de la température à imposer au niveau de la résistance, ainsi que la fréquence du mode le plus instable.

3.1 Modélisation mathématique

Le modèle de Rott [2] en fluide thermo-visqueux a été établi à partir des équations de Navier-Stokes compressibles (conservation de la masse, de la quantité de mouvement, de l'énergie). Les échelles de référence sont la longueur du tube et un temps acoustique défini comme le rapport de la longueur du tube et de la vitesse du son dans l'air à température ambiante. Toutes les propriétés physiques de l'air (masse volumique, viscosité dynamique et capacité calorifique massique) sont celles correspondant à la température ambiante. L'écoulement est supposé en proche paroi, ce qui permet de faire une approximation de couche limite, et le nombre de Mach est supposé petit, ce qui permet d'écrire les développements asymptotiques de chaque variable. La solution est ensuite recherchée sous forme harmonique en temps (pulsation notée ω), avec pour chaque variable acoustique, en utilisant la notation complexe :

$$\xi(x, y, t) = \text{Re}(\xi_1^{(1)}(x, y)e^{i\omega t}) \quad (1)$$

Les équations de conservation obtenues sont ensuite intégrées sur la section transversale, en tenant compte de la géométrie transverse spécifique de l'élément (stack, tube, échangeur). On obtient alors une équation des ondes modifiée gérant la variation suivant l'axe de l'amplitude de pression acoustique p_1 [3]:

$$\left(\frac{c}{\omega}\right)^2 p_m \frac{d}{dx} \left(\frac{1-f_v}{\rho} \frac{dp_1}{dx} \right) - \left(\frac{c}{\omega}\right)^2 \frac{f_\kappa - f_v}{1-Pr} \frac{1}{T_m} \frac{dp_1}{dx} [1 + (\gamma - 1)f_\kappa] p_1 = 0, \quad (2)$$

où f_v et f_κ sont les facteurs de forme visqueux et thermique respectivement qui dépendent de la géométrie transversale, de la pulsation et de la température moyenne locale, γ est le rapport des chaleurs massiques de l'air, p_m est la pression moyenne, et Pr est le nombre de Prandtl.

La relation entre l'amplitude complexe U_1 de la vitesse débitante et la pression acoustique est donnée par [3]:

$$\frac{U_1}{A} = - \frac{1-f_v}{i\omega\rho} \frac{dp_1}{dx}, \quad (3)$$

où A est l'aire de la section transversale fluide.

3.2 Application au thermophone

La modélisation 1D utilisée pour les thermophones consiste à séparer le tube en 3 éléments (tube, stack, tube). Seuls les thermophones des dispositifs A et B ont été étudiés ici. La résistance étant extrêmement fine, elle est simplement prise en compte au travers de l'imposition du champ de température. Celui-ci est choisi comme constant sur chaque portion de tube (chaud du côté de la résistance et froid de l'autre côté), et variant linéairement le long du stack (voir l'exemple sur la Figure 8 pour un thermophone fermé à une

extrémité et ouvert à l'autre, dispositif A). Le tube est de longueur totale $l_L + l_R$, et le stack de longueur l_{st} .

Des expressions analytiques sont utilisées pour exprimer les facteurs de forme dans le cas de tube à section circulaire ou carrée, et dans le cas d'un stack à canaux rectangulaires [3]. Le stack est considéré comme court devant la longueur d'onde, ce qui impose que la pression acoustique est constante le long du stack.

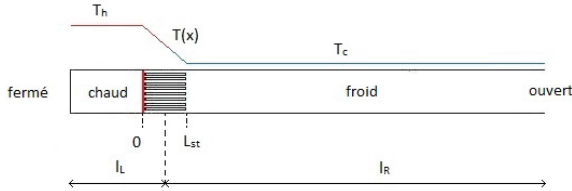


FIGURE 8. Modélisation par morceaux d'un thermophone, dispositif A.

La résolution des équations (2) et (3) est alors analytique par morceaux. Sur les parties de tube encadrant le stack, les amplitudes de pression acoustique et de vitesse peuvent s'exprimer sous forme d'une combinaison d'exponentielles $e^{i\omega h x}$, où h est donné en fonction des facteurs de forme (différents à gauche et à droite du stack) par :

$$h = \sqrt{\frac{1+(\gamma-1)f_K}{1-f_V}} \quad (4)$$

Dans le stack, avec l'hypothèse de stack court, on peut montrer que la vitesse débitante s'exprime par [12] :

$$U_1 = A \exp \left[- \int_{T(x)}^{T_h} \frac{f_K(\theta) - f_V(\theta)}{(1-f_V(\theta))(1-Pr)} \frac{1}{\theta} d\theta \right] \times \{C + \int_{T(x)}^{T_h} \frac{i\omega}{\gamma p_m} [1 + (\gamma-1)f_K(\theta)] p_{1st} \times \exp \left[- \int_{T(x)}^{T_h} \frac{f_K(\theta^*) - f_V(\theta^*)}{(1-f_V(\theta^*)) (1-Pr)} \frac{1}{\theta^*} d\theta^* \right] \frac{L_{st}}{T_c - T_h} d\theta \}, \quad (5)$$

où A est l'aire de la section fluide transversale dans le stack. En appliquant les conditions aux limites et de continuité, on obtient une équation de dispersion. Pour un thermophone fermé/ouvert l'équation obtenue est donnée par :

$$d_{11} \times d_{22} - d_{12} \times d_{21} = 0, \quad (6)$$

où les coefficients d_{11} , d_{22} , d_{12} , d_{21} sont exprimés en fonction des températures et des paramètres géométriques par de longues expressions faisant intervenir des exponentielles d'intégrales sur la température.

Pour un thermophone ouvert aux deux extrémités, l'application des nouvelles conditions aux limites conduit à une équation de dispersion analogue, avec des coefficients légèrement différents.

3.3 Simulation du démarrage du son

Pour chaque configuration géométrique, la température ambiante restant constante, on fait varier la valeur de la température chaude. L'équation de dispersion est formée puis résolue sous Matlab, donnant les parties réelle et imaginaire de la pulsation, avec $\omega = \omega_r + i\omega_i$. On peut ainsi déterminer la température chaude critique T_{herit} , pour laquelle la partie imaginaire est nulle, $\omega_i=0$, qui détermine le seuil entre le régime stable ($\omega_i>0$) et le régime instable ($\omega_i<0$)

pour lequel le thermophone se met à chanter. Un exemple de calcul est présenté sur la Figure 9.

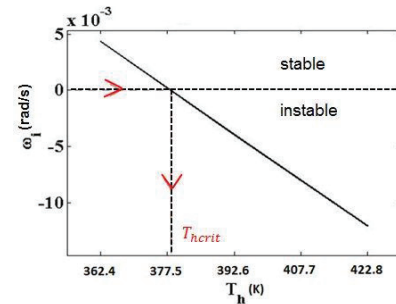


FIGURE 9. Obtention de la température critique.

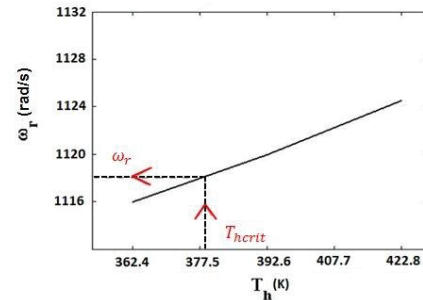


FIGURE 10. Obtention de la fréquence du mode le plus instable.

Pour la valeur obtenue de la température chaude critique, la valeur de la partie réelle ω_r permet de déterminer la fréquence du mode le plus instable (voir Figure 10), c'est-à-dire la fréquence du son obtenu.

4 Analyse des résultats

4.1 Comparaisons mesures/calculs

Les valeurs de la température chaude critique obtenues par calcul ont été comparées aux mesures. Pour le dispositif A (de type fermé/ouvert), la comparaison est bonne, à la fois sur les valeurs de la température de démarrage et sur la fréquence du son.

TABLEAU 3 : Comparaison mesures/calculs.

	T_{herit} (K) Exp	T_{herit} (K) Num	Fréquence (Hz) Exp	Fréquence (Hz) Num
Dispositif A	350	378	170	177
Dispositif B	453	406	275	322

Pour le dispositif B (de type ouvert/ouvert), la comparaison est beaucoup moins satisfaisante. Pour ce thermophone, la résistance chauffante est du côté le plus long du tube, dont l'extrémité est ouverte à l'air ambiant et donc l'hypothèse du modèle qui consiste à imposer la température constante du côté chaud n'est plus valable. Une manière de remédier à ce défaut de modélisation consiste à imposer une variation de température le long du côté du tube en contact avec la résistance chauffée. Cependant, même si l'on impose un gradient constant, la pression acoustique étant variable le long du tube, il n'y a pas de solution analytique. Il faut donc

résoudre numériquement les équations (2) et (3). Ceci fait l'objet du travail en cours.

4.2 Etude paramétrique

Plusieurs études paramétriques ont été menées sur la solution numérique afin de guider la conception de futurs thermophones. Par exemple, la Figure 11 montre l'effet de la variation de la position du stack à l'intérieur du tube, pour le dispositif A. Il existe une position optimale correspondant au gradient de température critique le plus faible.

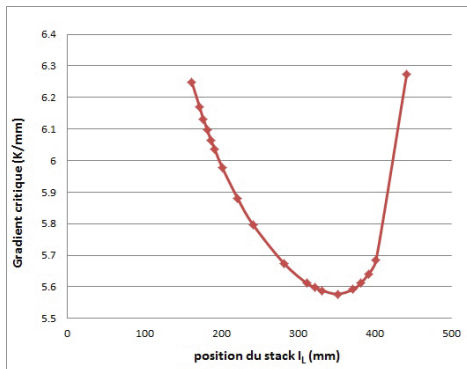


FIGURE 11. Gradient critique en fonction de la position du stack (dispositif A).

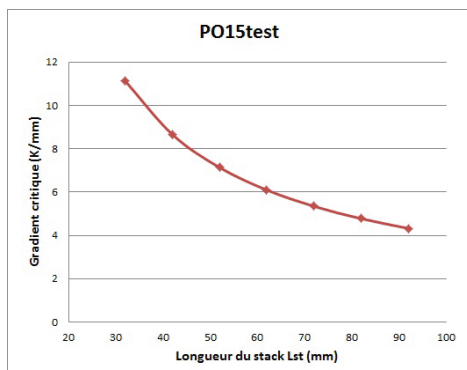


FIGURE 12 : Gradient critique en fonction de la longueur du stack (dispositif A).

La Figure 12 montre que le gradient critique nécessaire diminue lorsque la longueur du stack augmente. Cependant, le modèle suppose le stack court devant la longueur d'onde, et n'est donc applicable que sous cette hypothèse.

TABEAU 4 : Effets de la variation de géométrie sur la température critique et la fréquence f du son (dispositif A)

Tube	stack	$T_{\text{crit}} \text{ (K)}$	$f \text{ (Hz)}$
plaques parallèles	plaques parallèles	384,3	178
	section carrée	392	177
section circulaire	plaques parallèles	351	179
	section carrée	374,5	178
section carrée	plaques parallèles	353,6	179
	section carrée	378	177

Enfin plusieurs calculs ont été effectués en variant les géométries du tube et du stack (Tableau 4), qui montrent de

petites variations à la fois de la température chaude critique et de la fréquence du son.

Conclusion

Le démarrage de plusieurs thermophones a été étudié à l'aide d'une modélisation basée sur la théorie linéaire de la thermoacoustique. Les températures de déclenchement de l'instabilité ont été déterminées ainsi que la fréquence du son produit par le thermophone, en assez bon accord avec les mesures. Une étude paramétrique permettant de guider la conception de futurs thermophones est en cours. Cette étude constitue une première étape dans la caractérisation des thermophones en tant qu'instrument de musique. Le régime établi sera étudié par la suite, de façon à pouvoir maîtriser la variation de la fréquence et de l'intensité du son.

Remerciements

Ce travail a été financé par la fondation Diagonale Paris Saclay dans le cadre d'un projet Art et Sciences 2015.

Références

- [1] J. Rémus. <http://jacques-remus.fr/>
- [2] N. Rott, Damped and thermally driven acoustic oscillations in wide and narrow tubes, *Z. Angew. Math. Phys.* **20**, 230–243 (1969).
- [3] G. W. Swift, Thermoacoustic engines, *J. Acoust. Soc. Am.* **84**, 1145–1180 (1988).
- [4] F. Kastner, <http://blog.sciencemuseum.org.uk/pyrophone1/>
- [5] Trimpin, www.youtube.com/watch?v=wto4R73XBMQ
- [6] S. Langton, <http://pyrophonejuggernaut.com/creator-steve-langton/>
- [7] M. Moglia, http://www.orgue-a-feu.com/?page_id=28
- [8] D. Durox, www.youtube.com/watch?v=rI37T3vA7fM
- [9] A. Oldörp, <http://fonderiedarling.org/e-n%C3%A9nuphar.html>
- [10] S. L. Garrett and S. Backhaus, "The Power of Sound," *American Scientist* **88**, No. 6, 516–526 (2000).
- [11] M. R. Duffey, the Memnon Competition as Interdisciplinary Design Curriculum, *Proc. of the Int. Solar Energy Society Solar World Congress*, Orlando, FL (2005)
- [12] L. Ma, C. Weisman, D. Baltean-Carlès, I. Delbende, L. Bauwens, Effect of a resistive load on the starting performance of a standing wave thermoacoustic engine: A numerical study, *J. Acoust. Soc. Am.* **138** (2), 847–857 (2015)