

## Influence de la température sur la justesse d'un instrument à vent

Joël Gilbert<sup>1</sup>, Luisa M Lebos Ruiz<sup>1</sup>, Samuel Gougeon<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Laboratoire d'Acoustique de l'Université du Maine – UMR CNRS 6613

Avenue Olivier Messiaen – 72085 Le Mans cedex 9 – France, courriel : joel.gilbert@univ-lemans.fr

<sup>2</sup> Laboratoire de Physique de l'Etat Condensé de l'Université du Maine – UMR CNRS 6087

Avenue Olivier Messiaen – 72085 Le Mans cedex 9 – France courriel : samuel.gougeon@univ-lemans.fr

### Résumé

Les instrumentistes à vent soufflent de l'air chaud qui entraîne un champ de température non uniforme le long de leur instrument. Une conséquence pratique est que le musicien doit "chauffer" avant de se produire afin que le régime stationnaire thermique soit atteint s'assurant ainsi que la justesse de l'instrument n'évolue pas, ou peu, en cours de performance. La justesse des instruments à vent peut être prédite à partir de la détermination des fréquences de résonance. Lorsqu'elles sont calculées, une hypothèse de température uniforme est généralement retenue. L'objectif de cette étude est d'évaluer l'erreur induite sur la justesse par cette hypothèse. Des profils de température d'un trombone à coulisse sont relevés par thermographie infrarouge. Les fréquences de résonance sont alors calculées pour différents profils de température (profil mesuré, profil thermique uniforme à la température moyenne par exemple). Elles sont ensuite comparées afin d'estimer l'erreur induite par l'hypothèse de température uniforme. Il apparaît finalement que cette hypothèse est raisonnable pour estimer la justesse de l'instrument.

### Introduction

La justesse des instruments à vent est évaluée à partir du calcul ou de la mesure des fréquences de résonance. En pratique les calculs ou les mesures sont souvent effectués en supposant un profil de température uniforme. Or les instrumentistes soufflent de l'air chaud qui entraîne un champ de température non uniforme le long de leur instrument que l'on peut supposer stationnaire après une durée de « chauffé » de l'ordre du quart d'heure.

L'objectif de cette étude est d'évaluer l'erreur induite sur la justesse d'un trombone à coulisse par l'hypothèse de température uniforme par rapport à une situation réaliste de profil de température non uniforme. Si la littérature sur le sujet n'est pas abondante, l'étude bénéficie néanmoins des travaux antérieurs de Coltman [1] et de van Walstijn *et al* [2].

Après cette courte introduction, le document est organisé comme suit. L'estimation expérimentale de profils de température par thermographie infra-rouge est décrite. Le principe du calcul des fréquences de résonance correspondant à une perce avec profil de température non-uniforme est ensuite présenté. Les résultats pour différents profils de température (profil mesuré, profil thermique uniforme à la température moyenne, ...) sont ensuite comparés afin d'estimer l'erreur induite par l'hypothèse de température uniforme. Puis les éléments marquants de cette

étude préliminaire sont rappelés dans un bref paragraphe de conclusion.

### Evaluation expérimentale des températures

#### Thermographie infrarouge

L'estimation expérimentale du profil curviligne des températures le long du trombone à partir de l'embouchure a été effectuée par thermographie infrarouge [3] à l'aide d'une caméra thermique. Cette technique de mesure à distance permet d'éviter la pose de multiples thermocouples, faisant ainsi l'économie d'un appareillage complexe. Les problèmes de couplage thermique thermocouple (dur) sur tube (dur et courbé) sont en outre évités, de même que la perturbation des températures par les thermocouples eux-mêmes et leur connectique. Les difficultés inhérentes à la thermographie IR doivent cependant être considérées. En particulier, la température apparente d'un corps fait référence au rayonnement infrarouge reçu de celui-ci par unité de surface émettrice. Or la puissance thermique rayonnée par le corps dépend non seulement de sa température réelle recherchée, mais également, de manière sensible, de son état de surface, lequel est souvent méconnu ou changeant. Cette dépendance est quantifiée par l'émissivité infrarouge  $\epsilon$  de la surface ici opaque. Les valeurs d'émissivité publiées dans la littérature concernent principalement des matériaux communs, et donnent le plus souvent des fourchettes assez larges. La surface du trombone étant recouverte d'un vernis de nature inconnue, il fut nécessaire de préalablement estimer l'émissivité du métal vernis. En portant une partie du trombone à une température hors équilibre connue, l'émissivité utilisée pour le thermogramme est alors ajustée ; la valeur de  $\epsilon$  égalisant température apparente et température réelle est alors une bonne estimation de la valeur effective. Cette estimation est cependant affectée d'un autre revers constitué par d'éventuelles réflexions parasites de sources thermiques environnant l'instrument. La diffusion du rayonnement de longueur d'onde  $\lambda$  par une surface de rugosité ou poli donné variant en  $\lambda^{-3}$ , l'infrarouge est beaucoup moins diffusé que la lumière visible. Par ailleurs, la réflectivité de Fresnel des matériaux est souvent plus forte en infrarouge qu'en lumière visible. Chacun de ces deux facteurs augmente notablement la probabilité d'avoir des reflets sur les thermogrammes. Le reflet du trombone sur la table mélaminée mâte sur laquelle il est posé en témoigne en figure 1. Malgré un environnement plus frais, des reflets thermiques sont également visibles sur le trombone froid et sur le saxophone soprano thermographiés en figure 2. L'émissivité et la réflectivité étant complémentaires pour des surfaces opaques, le rapport signal / bruit des thermogrammes se dégrade rapidement lorsque l'émissivité

diminue. La maîtrise de l'environnement thermique est donc déterminante, notamment concernant la position des opérateurs qui constituent d'importantes sources infrarouges parasites.

La caméra thermique FLIR S60 utilisée travaille dans la bande spectrale infrarouge 8-14 $\mu$ m. La résolution thermique apparente vaut  $\sim 0,1^\circ\text{C}$ . La résolution spatiale sur le trombone est de l'ordre de 4mm sur une vue globale de l'instrument (figure 1). Cette résolution a cependant été sous-échantillonnée à la main en définissant un parcours curviligne approché le long du tube (profil en figure 3). Les fluctuations non négligeables du profil obtenu entre les abscisses 300 et 1400mm et au delà de 2000mm sont probablement attribuables à des fluctuations d'émissivité de la surface du tube (traces visibles sur des thermogrammes plus détaillés), alors que seules deux émissivités ont été considérées et mesurées : Celle de l'embouchure constituée d'un matériau spécifique d'émissivité assez forte, et celle du reste du tube, d'émissivité moyenne plus faible.

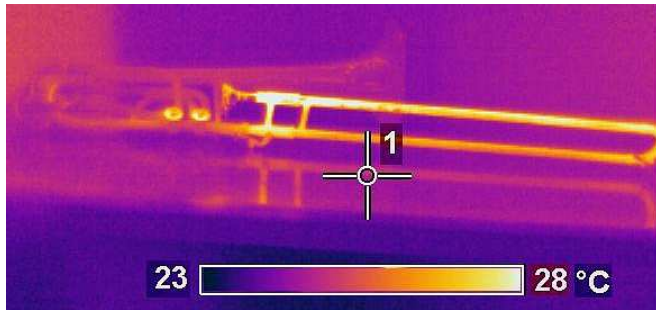


Figure 1: Thermogramme infra-rouge typique d'un trombone à coulisse (températures apparentes).

## Profils de température

La photographie IR exploitée pour l'estimation du profil de température (Figure 2), a été réalisée aussitôt après qu'un instrumentiste ait joué le trombone à coulisse. La « chauffe » de l'instrument est suffisamment longue, un quart d'heure, pour supposer que le régime stationnaire thermique a été atteint. Deux sources de chaleur sont identifiables : Le souffle de l'instrumentiste, et le contact de ses mains sur l'instrument.

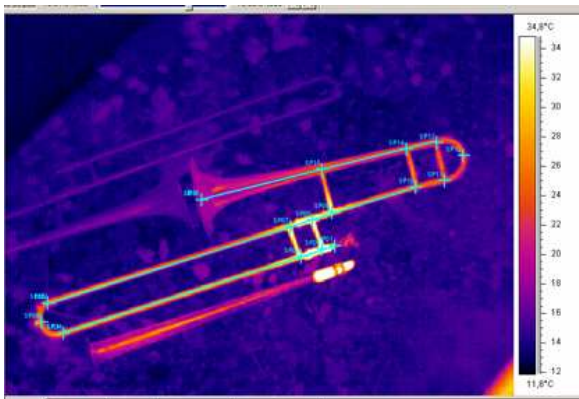


Figure 2: photographie infra-rouge de trois instruments de musique. Un trombone à coulisse « froid », un trombone à coulisse « chauffé » et un saxophone soprano « chauffé » (de haut en bas).

Une première analyse de trombones « chauffés », voir les Figures 1 et 2, conduit à deux observations : (1) le profil de température est une fonction décroissante de la colonne d'air allant de l'embouchure (entrée) au pavillon (sortie), (2) une remontée locale de la température est observable en sortie de coulisse ; elle est attribuable à un pont thermique par la potence depuis l'embouchure chaude, et au contact de la main sur la potence.

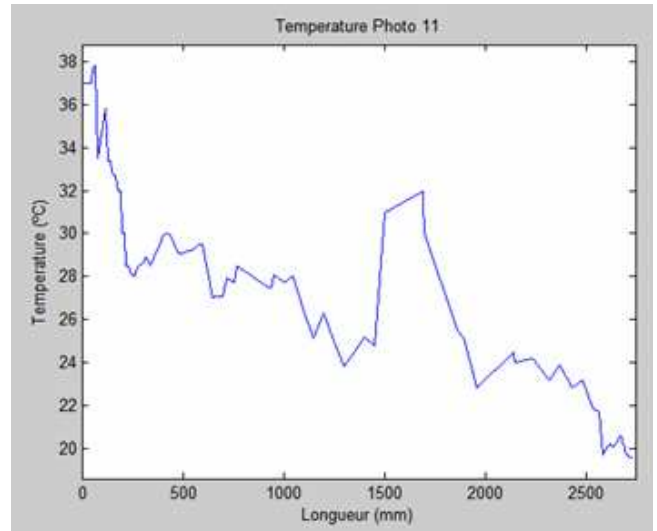


Figure 3: profil de température extrait de la photographie infra-rouge du trombone « chauffé » présenté Figure 2 ( $x=0$  correspond à la sortie de l'embouchure). Le creux vers 2000mm est probablement attribuable à une fuite thermique via la potence de coulisse.

En utilisant les hypothèses explicitées au chapitre « Caméra infra-rouge » de ce document (émissivité 0.35, températures limites imposées à  $37^\circ\text{C}$  et  $20^\circ\text{C}$ ), un profil de température de l'instrument « chauffé » (Figure 2) a été estimé. Ce profil mesuré est présenté Figure 3. Il est à la base des calculs de fréquence de résonance détaillés dans la suite du document.

## Fréquences de résonance

### Méthode de calcul

Les fréquences de résonance sont estimées à partir du calcul de l'impédance d'entrée  $Z_e$  de l'instrument à vent considéré. Pour cela, la méthode classique des matrices de transfert a été utilisée. Cette approche a été largement discutée dans la littérature ; on pourra consulter par exemple la référence [4] où des impédances d'entrée calculées et mesurées d'instruments à vent de type cuivre sont comparées.

La perce du trombone est assimilée à une succession de portions de cylindre. A la  $n^{\text{ième}}$  portion est associée une matrice de transfert  $[M^{(n)}]$  permettant de relier les pression  $p_e$  et débit  $u_e$  acoustique d'entrée d'une part, en fonction des pression  $p_s$  et débit  $u_s$  acoustique de sortie d'autre part :

$$\begin{pmatrix} p_e^{(n)} \\ u_e^{(n)} \end{pmatrix} = [M^{(n)}] \begin{pmatrix} p_s^{(n)} \\ u_s^{(n)} \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} \cosh(\Gamma L) & Z_c \sinh(\Gamma L) \\ \frac{1}{Z_c} \sinh(\Gamma L) & \cosh(\Gamma L) \end{bmatrix} \begin{pmatrix} p_s^{(n)} \\ u_s^{(n)} \end{pmatrix}, \quad (1)$$

où  $L$  est la longueur de la portion de cylindre considérée,  $Z_c$  l'impédance caractéristique ;  $\Gamma$  est la constante de propagation définie par l'équation (2) :

$$\Gamma = j \frac{\omega}{c_0} (1 + \varepsilon), \quad (2)$$

où  $\omega$  est la pulsation,  $c_0$  la vitesse de propagation du son en espace libre (hypothèse fluide parfait),  $\varepsilon$  est le coefficient correctif prenant en compte les effets visco-thermiques, absorption et dispersion. Le coefficient  $\varepsilon$  est exprimé à partir du nombre de cisaillement  $S_h$ , rapport de l'épaisseur de la couche limite visqueuse  $\xi$  et du rayon  $R$  du cylindre, du nombre de Prandtl de  $P_r$ , et de  $\gamma \equiv C_p / C_v$ , selon les relations (3) et (4) :

$$\varepsilon = S_h \frac{1-j}{\sqrt{2}} \left( 1 + \frac{\gamma-1}{\sqrt{Pr}} \right), \quad (3)$$

$$\text{avec } S_h = \frac{\xi}{R} = \sqrt{\frac{\nu}{\omega}} \frac{1}{R}. \quad (4)$$

On suppose  $|\varepsilon| \ll 1$  (hypothèses des tuyaux larges). La matrice de transfert de l'instrument complet est obtenu par produit des matrices de transfert associées aux  $N$  portions de cylindre disposées en cascade :

$$\begin{pmatrix} p_e \\ u_e \end{pmatrix} = [M^{(1)}]_x [M^{(2)}]_x \dots [M^{(N)}] \begin{pmatrix} p_s \\ u_s \end{pmatrix} = [M] \begin{pmatrix} p_s \\ u_s \end{pmatrix}. \quad (5)$$

L'impédance d'entrée  $Z_e = p_e / u_e$  est exprimée en fonction des 4 éléments de la matrice  $M$ , et de l'impédance de rayonnement  $Z_r = p_s / u_s$  comme suit :

$$Z_e = \frac{p_e}{u_e} = \frac{M_{11} Z_r + M_{12}}{M_{21} Z_r + M_{22}}. \quad (6)$$

Dans le cadre de cette étude, les fréquences de résonance sont définies comme étant les fréquences particulières pour lesquelles le module de l'impédance d'entrée présente un maximum local.

### Prise en compte du profil de température dans le calcul

La plupart des paramètres du modèle sont fonction de la température. L'impédance d'entrée, et par conséquent les fréquences de résonance sont particulièrement sensible à une variation de température par l'intermédiaire de la vitesse du son  $c_0$  et de la masse volumique  $\rho$ . Leur dépendance en température est décrite par les relations (7) et (8) qui suivent :

$$c_0(T) = 331.45 \sqrt{\frac{T}{273.16}}, \quad (7)$$

$$\rho(T) = 1.2929 \left( \frac{273.16}{T} \right), \quad (8)$$

où la température  $T$  est exprimée en degrés Kelvin.

Considérant un résonateur cylindrique à la température  $T$ , Coltman [1] a montré théoriquement qu'une variation de

température  $\Delta T$  sur une portion  $\Delta x$  localisée en l'abscisse  $x$  d'un cylindre est équivalente à la correction de longueur  $dx$  suivante :

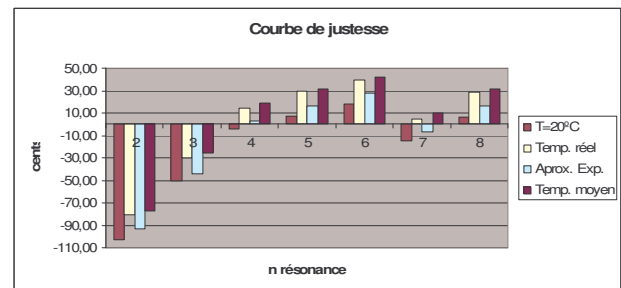
$$dx = -\frac{\Delta T}{T} \Delta x \cos^2(kx). \quad (9)$$

S'il est possible d'utiliser l'approche de Coltman pour traiter un cas d'école tel que le résonateur conique avec un profil de température variant linéairement [5], seule une approche numérique permet d'appréhender un instrument tel que celui traité dans le présent document. En pratique, le profil de température considéré est discrétisé spatialement de manière à affecter une température  $T^{(n)}$  à chaque élément, portion de cylindre, de la perce de l'instrument lors du calcul de l'impédance d'entrée.

### Résultats

Les calculs d'impédance d'entrée ont été effectués pour quatre configurations. Il s'agit d'une perce de trombone à coulisse avec quatre profils de température différents : deux profils à température uniforme, 20°C (température ambiante) et 28°C (température « moyenne » calculée à partir du profil mesuré), un modèle approchant le profil de température mesuré et le profil mesuré lui-même (Figure 3).

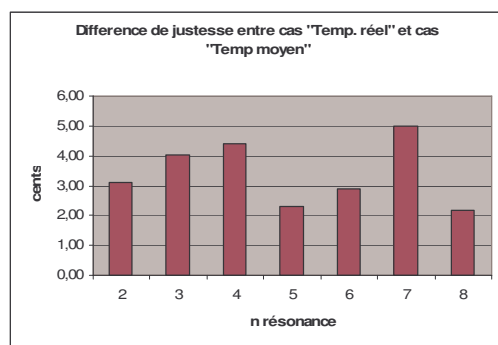
Les fréquences de résonance extraites des calculs d'impédances d'entrées sont représentées dans un diagramme de justesse (Figure 4). Plus précisément les fréquences de résonance n°2 à n°8 de chacun des quatre calculs  $y$  sont exprimées en « cents » par rapport une série de fréquences de référence : fréquences théoriques des notes Sib2, Fa3, Sib3, Ré4, Fa4, Lab4 et Sib4 correspondant à la gamme tempérée avec La4 à 440 Hz.



**Figure 4:** Diagramme de justesse des fréquences de résonance correspondant aux quatre profils de température étudiés, la gamme tempérée faisant référence.

Sans surprise le cas température uniforme 20°C implique une sous-estimation des fréquences de résonance. Une première observation des autres cas de figure conduit à noter : (1) le cas température uniforme 28°C donne des fréquences de résonance proches du cas « mesuré », (2) les fréquences de résonance associées au profil exponentiel avec pic n'approchent pas mieux les résultats du cas « mesuré ». Pour affiner l'analyse comparative des cas température moyenne 28°C et cas « mesuré », la justesse relative est présentée Figure 5. Pour chacune des sept résonances, l'écart de fréquence est inférieur à 5 cents. Ainsi il apparaît que l'erreur induite par l'hypothèse de température uniforme égale à la température moyenne (28°C) du profil de température mesuré est de l'ordre de 5 cents, valeur

inférieure au seuil différentiel de fréquence de l'oreille humaine. Cette hypothèse est donc raisonnable pour estimer la justesse de l'instrument.



**Figure 5:** diagramme de justesse relatif (différence exprimées en cents) des fréquence de résonance entre les profils de température « mesuré » et « moyen (28°C) ».

## Conclusion

Bien qu'affectée de difficultés méthodologiques non négligeables, la thermographie infrarouge du trombone à coulisse a permis de préciser l'étendue de la propagation thermique dans le tube après chauffage, ainsi que l'influence notable de la puissance de la coulisse sur le profil thermique exploitable. Des calculs de fréquences de résonance ont été effectués pour le profil réel, le profil moyen uniforme, ainsi que pour un profil moyen plus froid. Il apparaît finalement que l'hypothèse de température uniforme égale à la température moyenne du profil de température mesuré est raisonnable pour estimer la justesse de l'instrument. Cette conclusion est cohérente avec les résultats de travaux effectués sur un cornet à bouquin dans [2]. Reste que cela mériterait encore d'être testé avec d'autres instruments à vent.

## Remerciements

Les auteurs tiennent à remercier François Gautier (LAUM) et Franck Teissier (ITEMM) pour leur coopération.

## Références

- [1] J.W. Coltman. Acoustical analysis of the Boehm flute. *J. Acoust. Soc. Am.* 65 (1979), 499.
- [2] M.O. van Walstijn, J.S. Cullen, D.M. Cullen. Modeling visco-thermal wave propagation in wind instrument air columns. *International Symposium of Musical Acoustics*, Edinburgh (1997).
- [3] Journées d'études Thermogram'2003 : Thermographie instrumentale et industrielle. Actes édités par l'Institut de la thermographie, France.
- [4] R. Caussé, J. Kergomard, X. Lurton. Input impedance of brass musical instruments. Comparison between experiment and numerical models. *J. Acoust. Soc. Am.* 75 (1984), 241.
- [5] J. Gilbert. Etude théorique et expérimentale de l'influence du bec sur la courbe d'impédance d'entrée du saxophone. Rapport de stage de DEA d'Acoustique appliquée, Université du Maine, Le Mans, 1986.