

CFA/VISHNO 2016

Savoir et Faire dans l'Harmonisation des Tuyaux d'Orgue

D. Steenbrugge

Associatie Universiteit Gent, Prinses Clementinalaan, 15, 9000 Gent, Belgique
d.steenbrugge@gmail.com



LE MANS

Pour des raisons variées l'harmonisation des tuyaux d'orgue est généralement mal documentée. Apparemment il y a un manque d'outils adéquats à cette effet et la question surgit si cette lacune pourrait être comblée avec l'aide de l'analyse acoustique, qui a marquée de grands progrès au sujet des instruments à vent ce dernier demi-siècle. Comme certains paramètres géométriques du tuyau ont une influence considérable mais aussi très sensitive sur le son produit et sont pour cela incommodes à utiliser, des paramètres supplémentaires plus robustes sont discutés. Des expériences initiales sont faites avec des tuyaux à bouche de type principale. La pression alimentaire est incluse comme paramètre externe et mesurée avec le tuyau placé à son endroit d'origine. Des mesures anémométriques sont ensuite effectuées sur un banc d'essai sous les mêmes conditions de vent afin d'enregistrer l'orientation et le profile de vitesse du jet d'air. Réponses passives et actives du résonateur sont mesurées et le régime opérationnel de la boucle fermée est déterminé, l'ensemble des indices constituant un synopsis du tuyau aussi en se qui concerne ses caractéristiques sonores. Il est conclu que certains paramètres non dimensionnels permettent de décrire au moins certains aspects fondamentales de l'harmonisation des tuyaux, même si dans beaucoup de cas les facteurs d'orgues qui l'ont accompli étaient guidés par des conceptions que nous ne redécouvriront peut-être jamais.

1 Introduction

L'harmonisation des tuyaux d'orgues comporte certains réglages qui interagissent mutuellement. Un des plus grands facteurs d'orgues de l'histoire, lorsqu'il évoque le problème de la détermination de la hauteur de la bouche dans une de ses publications – un des rares textes d'ailleurs jamais écrits par un facteur d'orgue – déclare : 'Lorsqu'un son paraît douteux, on est dans l'incertitude de savoir si cela vient des parois de la lumière, ou de la hauteur de la bouche, etc. On tâtonne de mille façons : on agrandit la bouche, on enfonce ou l'on repousse la paroi inférieure de la lumière, on fait des dents ; et très souvent, en tâtonnant ainsi, on finit par agrandir la bouche au delà des limites convenables, le son perd sa pureté, et comme il n'est plus possible de diminuer la hauteur de la bouche, à moins de souder de nouveau ce que l'on pourrait avoir enlevé de trop, on laisse le plus souvent le tuyau dans cet état au préjudice de la qualité du son.' [1]. Pour cette raison l'harmonisation est considérée comme un art, faisant appel à des sensibilités et des compétences particulières permettant d'organiser mentalement les développements sonores qui résultent des manipulations opérées aux tuyaux. Ainsi chaque harmoniste acquiert son métier durant de longues années de pratique et il semble que son savoir-faire devient tellement sophistiqué qu'il lui devient difficile de l'extérioriser et de le transmettre à d'autres. Les grands traités sur la facture d'orgues se limitent aux régulations primaires nécessaires à faire sonner le tuyau et à éliminer les défauts grossiers.

En conséquence de tout ceci on pourrait se demander si l'étude de l'état des tuyaux permettrait de découvrir l'utilisation de méthodes d'harmonisation rigoureuses, ou bien si ces ajustements, qui donc interagissent mutuellement et sont appliqués de manière itérative, donnent plutôt lieu à une certaine diversité dans la configuration de chaque tuyau d'un registre.

Cette question est à la base de cette contribution, elle est abordée en évaluant certains paramètres émergent des modèles physiques existants des instruments à vent, et ce en faisant des mesures acoustiques appropriées sur les tuyaux et en vérifiant si ces paramètres sont en mesure de caractériser certains comportements communs à tous les tuyaux. Le but étant de contribuer à une documentation plus approfondie et appropriée d'instruments existants, ces mesures doivent préférablement pouvoir être faites in situ et avec des instruments assez simples. Dans ce qui suit

uniquement les paramètres jugés les plus pertinents seront présentés et évalués à l'aide des résultats de mesures prises avec des tuyaux expérimentales à géométrie continuellement variable. Ensuite un bref aperçu sera tenté comment on aborde l'harmonisation d'une série de tuyaux, et puis, comme illustration, les résultats de quelques séries préliminaires de mesures sur les tuyaux d'un instrument existant seront présentés et commentés.

2 Paramètres d'harmonisation

Les paramètres non-dimensionnels présentés dans la suite sont définis en utilisant les grandeurs suivants du tuyau: longueur L , rayon a , épaisseur de la lumière b , hauteur de la bouche l , l'offset de la lèvres supérieure par rapport à l'axe du jet h_0 (h_0 représente la distance latéral entre la position de l'axe du jet et celle de la lèvres supérieure, mouvements vers l'extérieur choisis positives), vitesse du jet V (au centre du jet à la sortie de la lumière) (les symboles suivent pour la plupart les conventions habituelles (cfr. [2])). Les résultats de mesures utilisés dans les évaluations de cette section ont tous été obtenus avec des tuyaux de taille moyenne (principales) à géométrie variable, c'est à dire que dans ces tuyaux l , h_0 , et f sont continuellement variables par des moteurs à pas permettant une résolution de l'ordre de $10\mu\text{m}$.

2.1 Hauteur de la bouche

La sonorité du tuyau est influencé de plusieurs façons par l . D'abord l influence l'inharmonicité des résonances passives, les résonances les plus basses étant abaissées par les corrections des terminaisons. Ces corrections Δ diminuent à partir d'une valeur à basse fréquence Δ^0 jusqu'à 0 pour une valeur de ka [2] qui correspond à plusieurs dizaines de résonances pour la plupart des tuyaux. Le rapport entre ces corrections en diminution et L détermine les déviations des fréquences des résonances successives:

$$\frac{f_{np}}{f_{mp}} = \frac{n(1 + (\frac{\Delta^0}{L} K(m \frac{\Delta^0}{L})))}{m(1 + (\frac{\Delta^0}{L} K(n \frac{\Delta^0}{L})))}$$

avec $n, m > 0$ et $K()$ une fonction qui décrit la dépendance des corrections de la fréquence (à savoir : Δ dépend de la fréquence comme $k\Delta^0 = 2\pi n\Delta^0/L$ avant de devenir 0 [2]). En conséquence l'influence de la hauteur de la bouche sur les fréquences des résonances passives peut être décrite par un paramètre d'inharmonicité g [2] qui sera défini ici en accentuant les grandeurs impliquées dans l'harmonisation:

$$g = \frac{\Delta^0}{L} \approx \frac{a^{3/2}}{l^{1/2} L}$$

en assumant que la largeur de la bouche est égal à 1/4 jusqu'à 1/5 de la circonférence. Figure 1 montre les fréquences des résonances passives relatives à celle de la fondamentale pour plusieurs valeurs de a , L et l en fonction de g :

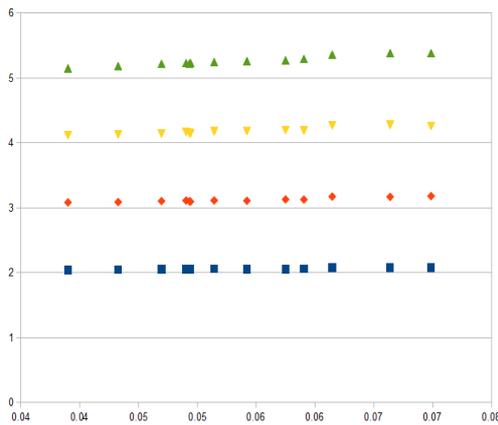


Figure 1 Valeurs des fréquences des résonances passives relatives à celle de la première vs g pour plusieurs valeurs de a , L , l

Ces valeurs ont été mesurées en injectant du 'bruit blanc' dans une extrémité du tuyau muet et en mesurant le spectre intérieur avec un microphone miniature placé près de l'autre extrémité. On observe que les inharmonicités, par résonance, forment une fonction assez nette de g . Figure 2 montre les rapports de fréquences entre résonances successives pour les mêmes cas que la figure précédente:

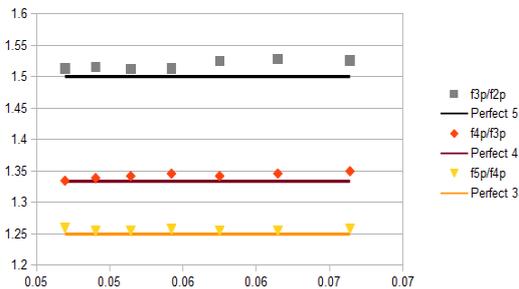


Figure 2 Valeurs relatives des fréquences des résonances passives $(n+1)$ par rapport à (n) vs g

On observe que, comme prévu, l'harmonicité diminue quand les fréquences augmentent.

L'influence aussi le contenu spectral des impulsions d'air qui entrent le tuyau: il devient plus riche en harmoniques en diminuant du fait que le profil transversal de la vitesse du jet d'air devient plus angulaire en se rapprochant de la lumière. La caractérisation de cet important phénomène sera étudié dans un papier dédié.

2.2 Offset de la lèvre supérieure

Si la lèvre supérieure se trouve dans l'axe du jet non-perturbé, l'excitation du tuyau contiendra principalement des harmoniques impaires. Le déplacement transversal de cette lèvre (ou bien un changement d'orientation de l'axe du jet) entraîne les variations spectrales familières [2] comme représentées dans la figure 3 en fonction du paramètre h_0/l .

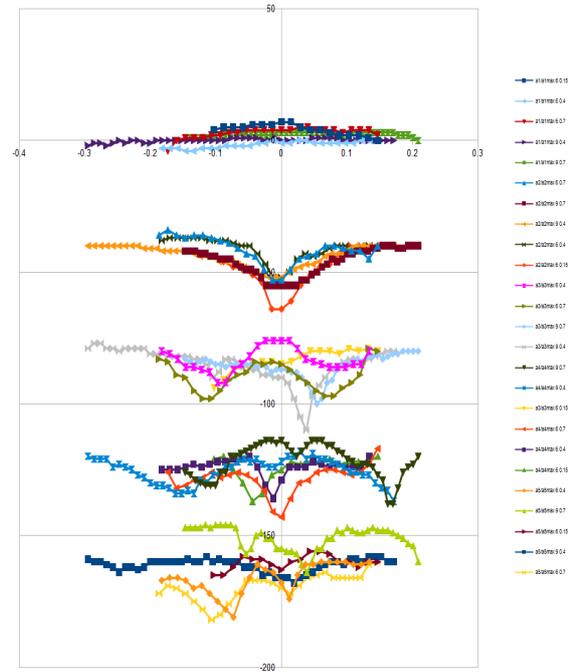


Figure 3 Amplitudes des harmoniques 1-5 vs h_0/l pour plusieurs valeurs de h_0 , l et b

Ainsi représentées, les évolutions des harmoniques pour différents h_0 , l et b tendent à se recouvrir par harmonique, par conséquent ce paramètre caractérise l'influence de h_0 et l sur le spectre de la source d'énergie sonore. Pour mieux les distinguer les amplitudes des harmoniques du rang n ont été déplacés verticalement avec $-40(n-1)$ dB. Cette figure peut être comparé avec les résultats d'une modélisation analytique représentés dans la figure suivante [3]:

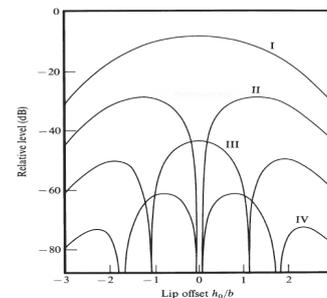


Figure 4 Amplitudes des harmoniques vs h_0/b [3]

On remarque que la consigne habituelle d'orienter le jet un peu en dehors de la lèvre supérieure correspond à une zone où tous les harmoniques sont relativement bien représentés.

Outre l'influence sur le contenu spectral h_0/b détermine en grande partie la durée et la nature transitoire initiale.

2.3 Vitesse du jet

Afin d'accommoder les changements de phase dans la boucle fermée causés par des changements de vitesse du jet V , la fréquence d'oscillation change légèrement. Les fréquences des harmoniques, qui se trouvent au environs des résonances passives du tuyau, si le tuyau n'est pas trop large, peuvent se déplacer autour de ces dernières ce qui implique une amplification modifiée de ces harmoniques. Cet effet est le plus prononcé dans les tuyaux de moyenne taille car dans ceux de petite taille (les gorges) les harmoniques coïncident plus régulièrement avec les résonances passives et dans ceux de grande taille (les flûtes) les résonances passives s'éloignent très rapidement des harmoniques avec des coïncidences devenant rares. Le changement de phase qui est à la base de ces effets peut être décrit par le 'Intonationsnummer' I [4], exprimé en termes appartenant à la géométrie du tuyau. Il en résulte une expression qui démontre que I exprime une relation entre les délais caractéristiques hydrodynamiques $l/(V(b/l)^{1/2})$ et acoustiques $2L/c$:

$$I = \frac{2LV\sqrt{b}}{cl\sqrt{l}}$$

Figure 5 montre l'intervalle entre la première harmonique et la première résonance passive en fonction de I pour plusieurs combinaisons de valeurs de V , l , L et b dans un seul tuyau à géométrie variable (pour rappel il s'agit d'un tuyau de taille moyenne):

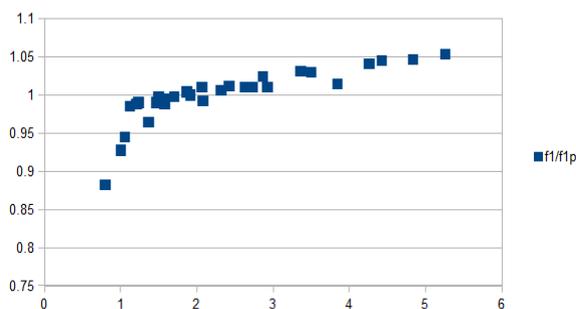


Figure 5 Fréquence de la première harmonique relative à celle de la première résonance passive vs I

Les régimes dans lesquelles la fréquence opérationnelle se trouve tout près de celle de la première résonance passive, et pour la plupart un peu au-dessus, ont tous une valeur de I entre 1.5 et 2.5, là où Ising préconise une valeur de 2 comme 'optimale' pour des principales. Les valeurs en dehors de cette région représentent plutôt des cas qui dépassent les ajustements utilisables pour des tuyaux principales.

A part son influence sur le régime opérationnelle du tuyau il ne faut pas oublier que l influence aussi les résonances passives, tel que décrit avant, et ce dans le sens contraire de la fréquence opérationnelle et ses harmoniques.

L'autre influence que V exerce sur les harmoniques se manifeste par des flux d'air plus importants quand V augmente et qui provoquent des oscillations du jet de plus grande amplitude. Il en résulte des amplitudes plus importantes des harmoniques et le rapprochement à plus de saturation augmente en plus les harmoniques élevés. Cet effet et le paramètre approprié qui pourrait caractériser ceci, en occurrence aussi I , n'est pas traité dans cette contribution.

3 La pratique de l'harmonisation

En général on procède à l'harmonisation avec des tuyaux un peu trop longs et l trop bas, le dernier ayant certaines valeurs établies. On met d'abord au point un certain nombre de tuyaux répartis sur l'étendu du registre. Ils serviront de référence pour les suivants qui seront choisis de manière à ce que les intervalles entre-eux deviennent de plus en plus petits. Le plus grand problème c'est l'influence contradictoire exercé par L et l : diminuer L implique en principe de diminuer l , ce qui n'est pas possible. En pratique on diminue L et augmente l en alternance sur plusieurs tuyaux, pas à pas, en s'orientant à tout moment au tuyau de référence qui à cet instant paraît le plus satisfaisant ([5] pp.63-66,71-72, [6] pp.425-428, [7] pp.247-259, [8] pp.273-283). Le résultat de cette procédure reste souvent un peu vague, car on ne peut ajuster que dans un sens, d'où la nécessité d'une expérience et une sensibilité exceptionnelle pour atteindre le meilleur résultat possible. Pendant cette phase, comme l est en rapport avec V (voir le paramètre I), on règle aussi les caractéristiques principales du jet d'air, surtout par rapport au volume. Suivant la méthode utilisée, on ajuste f et/ou l'ouverture du pied. Ces derniers ajustements sont moins hasardeux car ils fonctionnent dans les deux sens. Ceci est aussi possible avec d'autres éléments, comme ceux décrits par le paramètre h_0/l , et pour cette même raison ceux-là seront appliqués plus tard dans la procédure, permettant aussi de corriger dans une certaine mesure certaines inégalités substantielles.

Dans la section décrivant les paramètres d'harmonisation l a été souvent mentionné et impliqué. Avec les dimensions du résonateur c'est la grandeur qui détermine le plus l'identité du tuyau, en imposant aussi les limites de la pression d'alimentation. Il est d'autant plus remarquable que les traités sur la facture d'orgue, ainsi que les facteurs d'orgues eux-mêmes, à part la mention de règles très générales et établies, n'élaborent que très peu sur le rôle et la détermination de l . Pourtant l est une des dimensions les plus importantes à distinguer différents styles de facture, ce qui fera l'objet d'études à suivre.

4 Évaluation des paramètres d'harmonisation sur un registre existant

Afin d'illustrer l'usage des paramètres d'harmonisation leur valeurs ont été calculés en utilisant des mesures de la géométrie et de l'alimentation d'une série de tuyaux de type

principale ayant des longueurs entre 4' et 1' d'un orgue existant relativement neuf (Verschueren, 1975).

Figure 6 montre le rapport entre les fréquences des résonances passives et celle la première résonance en fonction de g (voir la Figure 1 pour comparaison).

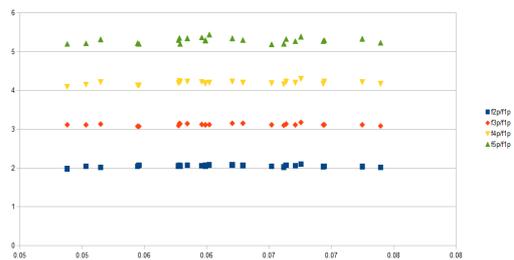


Figure 6 Valeurs des fréquences des résonances passives relatives à celle de la première vs g

Une correspondance entre les intervalles d'inharmonicité et g n'est pas observé dans cette série de tuyaux, même pas en fonction des fréquences. Pour caractériser l'inharmonicité les tuyaux de type principale il faudra utiliser un paramètre plus précis.

Pour toutes les illustrations proposées dans cette section des instruments de mesure aussi élémentaires que possible ont été utilisés, essentiellement une source de 'bruit blanc' couvrant les fréquences mesurées, un analyseur de spectre pour la bande audio (à la limite un app), des règles avec des résolutions appropriées et un appareil de mesure de pression d'air ou bien plus précis et plus utile: un système d'anémométrie pour mesurer les configurations du jet.

Figure 7 montre les valeurs de h_0/l pour ces mêmes tuyaux.

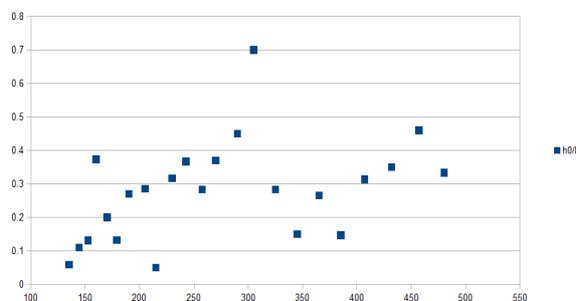


Figure 7 Valeurs de h_0/l vs f pour une série de tuyaux type principale 4' à 1'

La valeur de h_0 a été obtenue en mesurant, à l'aide d'anémométrie, l'angle du jet avec le tuyau alimenté mais rendu muet, en tenant compte aussi de l'offset entre les lèvres supérieure et inférieure. On constate que les tuyaux ont tous un jet orienté vers l'extérieur, si bien qu'il y a pas mal de déviations qui se trouvent loin en dehors de la région de changements rapides dans le contenu spectral (approximativement $-0.15 < h_0/l < 1.5$, voir figure 4).

Figure 8 montre les valeurs du paramètre I de tous les tuyaux étudiés (voir la Figure 5 pour comparaison). On constate qu'en général les tuyaux sonnent à une fréquence fondamentale plus élevée que la première résonance passive. Cependant il reste de grandes variations dans I , dues surtout à la variabilité de V qui est contrôlé, purement par audition, par le rapport entre b et l'ouverture du pied. Les mêmes valeurs de I , maintenant en fonction de f dans la

figure 9, ne montrent pas d'évolution en fonction de f , ce qui est pourtant attendu étant donné que l ne diminue pas aussi vite que L .

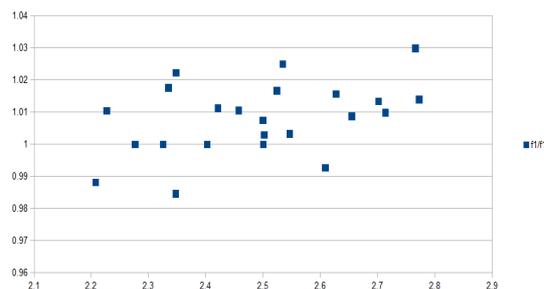


Figure 8 Fréquence opérationnelle relative à celle de la première résonance passive vs l pour la série de tuyaux cfr. Figure 7

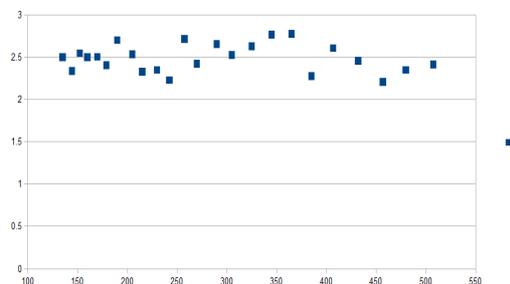


Figure 9 I vs f pour la série de tuyaux cfr. Figure 7

5 Conclusions

Quelques paramètres ont été proposés qui caractérisent la production du son dans des tuyaux à bouche en ce qui concerne leur harmonisation. Ils ont été validés à l'aide de tuyaux expérimentales à géométrie variable en concluant que chacun d'eux caractérise certains aspects de la production sonore du tuyau. La détermination de leur valeur dans des tuyaux normales constituant un registre d'orgue révèle des variations considérables, ce qui suggère une variabilité considérable dans la procédure appliquée pendant l'harmonisation. Cette variabilité peut rester camouflée d'une part due à la circonstance que certains effets des manipulations pendant l'harmonisation peuvent se compenser, et d'autre part par les tentatives de l'appareil auditif, même chez les oreilles les plus vigilantes, d'intégrer les perceptions sonores afin d'obtenir un maximum de cohérence. Apparemment il existe une plus grande diversité dans le régime de fonctionnement des tuyaux formant un ensemble que l'oreille ne le soupçonnerait. Par ailleurs, dans pas mal de cas une certaine individualité propre à chaque tuyau est fort apprécié, comme le témoigne l'estimation qu'on a pour ces anciens instruments qui portent encore des vestiges de leur harmonisation d'origine. L'application des paramètres proposés ici peut aider à mieux comprendre et apprécier le travail mis dans ces

instruments, et par conséquent contribuer à mieux les conserver.

Références

- [1] Cavallé-Coll A., *Etudes Expérimentales sur les Tuyaux d'Orgues*, Typographie de E.Plon Paris 1895
- [2] Fletcher N.H. & Rossing T., *The Physics of Musical Instruments*, Springer 1991
- [3] Fletcher N.H. & Douglas L.M., *Harmonic generation in organ pipes, recorders and flutes*, J.Acoust.Soc.Am. **68**, 767-771, 1980
- [4] Ising H., *Erforschung und Planung des Orgelklanges*, Walcker-Hausmitteilung nr 42, 1971
- [5] Monette L.G., *The Art of Organ Voicing*, New Issues Press, Kalamazoo, Michigan 1992
- [6] Dom Bedos de Celles, *L'Art du Facteur d'Orgues*, (facsimile 1778) Kassel / New York, Bärenreiter, 1963-65
- [7] Toepfer J.G., *Die Orgel*, Erfurt 1843
- [8] Ellerhorst W., *Handbuch der Orgelkunde*, Verlagsanstalt Benziger&Co, Einsiedeln Schweiz 1936