

Lassos d'amore et orgues éoliennes à tuyaux cannelés

Bb Ninob, Avril 2014

Résumé

Il est connu que quand on fait tourner en l'air des tuyaux possédant une rugosité interne périodique et ouverts aux deux bouts, ils émettent des sons harmoniques. Cet article étudie l'effet physique qui fait sonner ces tuyaux, et décrit la construction d'orgues « éoliennes », capables de sonner toutes seules dans un courant d'air.

Introduction

Il est connu que quand on fait tourner en l'air des tuyaux de gainage électrique cannelés ouverts aux deux bouts, ils émettent des sons harmoniques. On trouve quelques bonnes idées d'utilisation de tuyaux cannelés à des fins musicales dans le livre de Bart Hopkins « Musical Instrument Design » (ref.1). Le Professeur Peter Schickele prétend que PDQ Bach aurait utilisé un tel tuyau, sous le nom de « lasso d'amore » dans les « Erotica Variations » (réf. 2). Mauricio Kagel a lui aussi utilisé cet effet sonore dans une de ses compositions.

Je me suis intéressé à l'effet physique qui fait chanter les tuyaux cannelés, et, chemin faisant, j'ai été amené à construire des orgues « éoliennes », capables de sonner toutes seules dans un courant d'air.

Voici d'abord quelques considérations de base sur ces « lassos d'amore » :

- Le son émis dépend de la vitesse de rotation. Plus le tuyau tourne vite, plus il émet des partiels de rang élevé.
- On peut facilement vérifier que la fréquence des sons émis est bien celle d'un tuyau ouvert aux deux bouts. La série harmonique est complète.
- Si le tuyau sonne, c'est parce qu'il est le siège d'une circulation d'air entretenue par la rotation ; le rang du partiel émis dépend en fait de la vitesse de l'air dans le tuyau.
- Quand cette vitesse est telle que le temps de parcours de l'air entre deux reliefs du tube correspond à une période de l'onde sonore associée à un partiel donné, c'est ce partiel qui est émis. J'ai fait ces vérifications en embarquant un tuyau dans une voiture, avec une des extrémités du tuyau passant par la fenêtre et pointée vers l'avant. Le tuyau, de 74.5 cm de long et 2.5 cm de diamètre, donne une série de partiels : lab, lab, mib, lab, do, mib, sol (faux), lab pour des vitesses de la voiture multiples de 13 km/h. Le premier partiel ne sort pratiquement pas, mais le second à $2 \times 13 = 26$ km/h est déjà clairement audible, et les suivants sonnent puissamment, parfois même de façon assourdissante, jusqu'aux partiels 8 ou 9, où le son se teinte de bruits d'écoulement turbulents. Je n'ai pas essayé d'aller au delà, le son cassait les oreilles, et ça devenait dangereux : la voiture allait trop vite !
- A basse vitesse, les modes excités sont de rang bas, et ils sont émis successivement de façon très distincte, pour des plages de vitesse étroites. A haute vitesse, les plages d'émission des différents partiels (de rang élevé) commencent à se rapprocher, voire à se recouvrir au delà du partiel 8 ou 9.

En construisant un faisceau de tubes cannelés accordés sur les notes de la gamme, et en le montant sur une girouette pour le placer dans l'axe du vent, on doit pouvoir faire un anémomètre précis. Peut-être même que la musique du vent irrégulier est belle. Je vais construire ce truc, mais auparavant, il me faut comprendre comment ça marche.

Il est clair que l'espacement entre cannelures est un paramètre important, aussi, je me procure des gaines électriques de différentes dimensions. Voici les dimensions des tuyaux que j'ai pu trouver dans le commerce :

Gris	diamètre intérieur $D = 16\text{mm}$	espacement entre cannelures $\Delta X = 3.2\text{ mm}$
Blanc	20	5.0
Gris clair	25	4.5
Noir	25	5.5
Gris	30	6.2

Ne pas acheter des tuyaux de gainage « plomberie » : extérieurement, ils ressemblent aux tuyaux « électriques », mais leur paroi intérieure est lisse, et ils refusent donc obstinément de sonner.

Je scotche ensemble des longueurs accordées de ces différents tuyaux, je cale ce fagot près de la fenêtre ouverte de la voiture, et je roule. Le fagot chante que c'en est un plaisir, les moindres variations de la vitesse font changer le son, c'est très joli !



L'orgue éolien à tuyaux cannelés

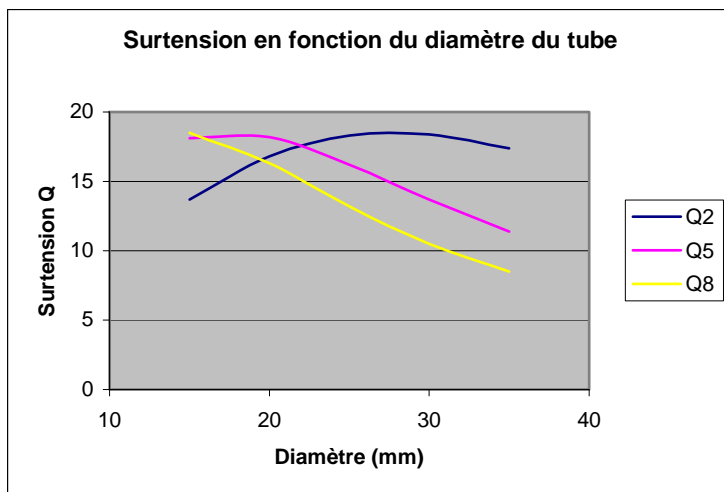
Le rapport diamètre/longueur est crucial

Je constate que les tuyaux très courts ou très longs refusent de sonner. Il semble y avoir un domaine de rapport diamètre sur longueur D/L acceptable, compris entre 0.025 et 0.030, avec un optimum proche de 0.028, soit $D/L = 1/35$. Les tuyaux respectant à peu près cette proportion sonnent fort, avec un optimum autour du partiel n°5. En supposant que le fondamental du tuyau est un do, la série harmonique est :

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
Do	do	sol	do	mi	sol	sib	do	ré	mi	
-----	+++++						-----			
Son faible	Son puissant et stable						son venteux et instable			

Les tuyaux étroits, avec un rapport D/L plus petit que $1/35$ émettront plus facilement les partiels supérieurs, au détriment des partiels graves ; pour les tuyaux larges, ce sera l'inverse.

Ces constatations empiriques s'expliquent très bien si on admet que l'amplitude de l'autoexcitation du tuyau dans le courant d'air dépend de l'amortissement du son dans le tuyau, ou, plus précisément, du coefficient de surtension de chaque mode de vibration de l'air dans le tuyau. Bien que le mécanisme de régénération soit différent, le raisonnement est le même que pour une flûte harmonique : si la perce est trop étroite, la surtension est petite à cause des pertes viscothermiques (dominantes dans le grave); si la perce est trop large, la surtension est petite à cause des pertes par rayonnement (dominantes dans l'aigu). Une surtension élevée (correspondant à un amortissement faible) est obtenue pour les partiels de rang 2 à 8 pour un tube d'élancement D/L de l'ordre de $1/35$: un résultat similaire avait déjà été obtenu dans l'étude sur les flûtes harmoniques (réf. 3). Par conséquent, première conclusion : pour faire sonner le tuyau, il faut minimiser la dissipation, et, pour cela, respecter une proportion bien précise pour le rapport diamètre sur longueur des tubes.



Le coefficient de surtension des partiels 2, 5 et 8 d'un tuyau cannelé de longueur 750 mm en fonction de son diamètre, calculé avec le logiciel Tutt (réf. 4). Les pertes par rayonnement aux extrémités et les pertes viscothermiques ont été prises en compte. Dans le grave (pour le partiel 2), les pertes viscothermiques dominent, surtout pour les tubes de petit diamètre. Dans l'aigu, les pertes par rayonnement dominent, surtout pour les tubes de grand diamètre. L'expérience montre que pour qu'un partiel puisse être émis facilement par un tuyau cannelé, son coefficient de surtension doit dépasser 15 environ. Si l'on veut pouvoir émettre facilement le partiel 2, il faut donc un diamètre supérieur à 18 mm. Si on veut pouvoir émettre jusqu'au partiel 8, il faut un diamètre inférieur à 23 mm. Ce genre de considérations donne la fourchette admissible pour le diamètre d'un « lasso d'amore ».

La vitesse de l'air dans le tuyau

Si on place plusieurs tuyaux de différentes dimensions dans l'axe d'un même courant d'air de vitesse V_{ext} , la vitesse de l'air ne sera pas la même dans tous les tuyaux : en effet, c'est la différence de pression entre les deux

bouts du tube $\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V_{ext}^2$ qui est commune, où V_{ext} est la vitesse de l'air à l'extérieur du tuyau. Pour des tubes

cannelés, il faut s'attendre à des pertes de charge qui ralentissent l'air dans le tuyau, le ralentissement étant d'autant plus fort que le tuyau est plus long et plus étroit. On peut assimiler un tube cannelé « gaine électrique » du commerce à un tuyau rugueux, avec un ratio rugosité sur diamètre de l'ordre de 0.1. Pour ce type de tuyau, l'abaque de Moody (réf.5) donne un coefficient de perte de charge λ_c pratiquement indépendant de V et égal à 0.08. Dans ces conditions, le rapport entre la vitesse de l'air à l'extérieur et à l'intérieur du tube est

$$\frac{V_{int}}{V_{ext}} = \left(\frac{D}{L \cdot \lambda_c} \right)^{1/2} \quad (1).$$

Ce rapport vaut 1 pour une longueur critique L de l'ordre de D / λ_c , soit environ 31 cm pour le tube cannelé de diamètre 25 mm. Pour les tubes plus courts, l'air n'est pratiquement pas ralenti dans le tuyau ; pour les tubes plus longs (comme ceux de l'orgue éolien), le ralentissement obéit à la loi (1). Pour donner un ordre de grandeur, avec un tube de longueur 75 cm, de diamètre 25 mm, le facteur de ralentissement de l'air vaut 0.65. Comme on le verra par la suite, ce facteur est important pour comprendre le fonctionnement acoustique du tuyau.

Les fréquences permises pour les tuyaux cannelés

Expérimentalement, les tubes cannelés sonnent à peu près à des fréquences données par la série harmonique

$$f = \frac{n \cdot c}{2 \cdot (L + 0.7 D)} \quad (2),$$

où n est le rang du partiel, L la longueur du tuyau, D son diamètre et c la vitesse du son dans l'air.

Quand on y regarde d'un peu plus près, les tubes cannelés industriels de gaine électrique que j'ai utilisés sonnent environ un demi-ton plus bas que l'expression ci-dessus, valable en fait seulement pour un tube lisse de même dimensions. L'écart est dû en partie au fait que le tuyau cannelé est plus dissipatif qu'un tube lisse de mêmes dimensions.

Quoi qu'il en soit, l'eq. (2) reste une bonne approximation des fréquences permises, même pour les tubes cannelés. Dans la suite, on utilisera même l'expression encore simplifiée

$$f = \frac{n.c}{2.L} \quad (3).$$

Importance de l'espacement des cannelures

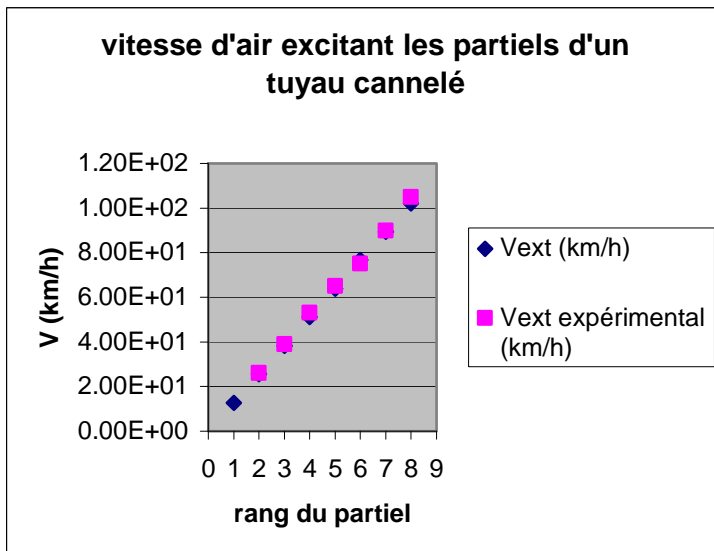
Il paraît vraisemblable que le tuyau sonnera quand l'air dans le tuyau aura parcouru en un temps $T = 1/f$ l'espace entre une, deux ou un nombre entier m de cannelures, d'où une condition supplémentaire sur la relation entre la vitesse de l'air et la fréquence :

$$f = \frac{V_{\text{int}}}{m.\Delta X} \quad (4), \text{ où } \Delta X \text{ est l'espacement entre cannelures.}$$

Mises ensemble, les équations (1), (3) et (4) donnent les relations entre les fréquences produites par le tuyau, ses dimensions et la vitesse du courant d'air dans lequel il est placé. En particulier, le tuyau sonnera sur le partiel de rang n pour des valeurs discrètes de la vitesse de l'air :

$$V_{\text{ext}} = n.\frac{m}{2}.c.\Delta X.\left(\frac{\lambda_c}{L.D}\right)^{1/2} \quad (5).$$

Cette relation est vérifiable expérimentalement : je l'ai fait en embarquant à la fenêtre d'une voiture des tuyaux cannelés de dimensions différentes, et en mesurant au compteur la vitesse à laquelle ils produisent leurs différents partiels. La figure ci-dessous donne l'accord obtenu pour un de ces tuyaux.



Accord théorie-expérience sur les vitesses de l'air excitant les différents partiels d'un tuyau cannelé de longueur $L = 74.5$ cm, de diamètre $D = 2.5$ cm et possédant des cannelures espacées de $\Delta X = 5.5$ mm. Les barres d'erreur de la mesure n'ont pas été représentées, mais la précision expérimentale sur la vitesse est de l'ordre de 10%. La principale source d'incertitude vient de la difficulté de placer les tubes dans une veine d'air non perturbée par la voiture.

Les vitesses expérimentales sont bien reproduites par l'expression (5) à condition de prendre $m = 2$: ce cas semble correspondre à un mode d'autoentretien efficace, produisant des sons puissants. La solution avec $m = 1$ existe aussi et peut être mise en évidence expérimentalement à basse vitesse, mais le son, quoique très pur et beau, est difficilement audible.

La largeur de la plage de vitesse sur laquelle un partiel est excitable est en relation directe avec le coefficient de surtension Q du mode excité. Celui-ci étant typiquement compris entre 15 et 20, la plage en vitesse est de l'ordre de 6% :

$$Q^{-1} = \frac{\Delta f}{f} = \frac{\Delta V}{V} \approx 6\%.$$

Cet effet explique pourquoi à basse vitesse, les modes excités (de rang bas) sont émis successivement de façon très distincte, pour des plages de vitesse étroites. A haute vitesse, les plages d'émission des différents partiels (de rang élevé) commencent à s'élargir, se rapprocher, voire à se recouvrir au delà du partiel 8 ou 9.

L'orgue éolien est donc un véritable compteur de vitesse de l'air extérieur : déjà avec un seul tuyau, on peut connaître « au son » la vitesse de l'air à une dizaine de km/h près. Avec plusieurs tuyaux, la précision peut être encore plus grande !

Fabrication d'orgues éoliennes

Une fois acquise la compréhension des phénomènes, je fabrique des orgues, capables de sonner toutes seules dans des courants d'air. Toujours en utilisant la voiture comme source de courant d'air de vitesse variable, je constate que si je mets ensemble beaucoup de tuyaux de dimensions différentes, le son produit vire rapidement à la cacophonie, surtout à haute vitesse. Pour composer ces orgues, j'ai essayé de nombreuses associations de tuyaux, accordés différemment. La musique produite dépend de la combinaison choisie, chaque « fagot » chante à sa façon. Une formule simple et satisfaisante au plan musical consiste à associer quatre tuyaux :

D=25 mm, $\Delta X= 5.5\text{mm}$, L = 84.5 cm (gaine électrique noire) accordé sur un fa#
D=20 mm, $\Delta X= 5.0\text{mm}$, L = 85.2 cm (gaine électrique blanche) accordé sur le même fa #, mais sonnante à des vitesses différentes du premier
D=25 mm, $\Delta X= 5.5\text{mm}$, L = 74.5 cm (gaine électrique noire) accordé sur un sol#
D=20 mm, $\Delta X= 5.0\text{mm}$, L = 75.2 cm (gaine électrique blanche) accordé sur le même sol#, mais sonnante à des vitesses différentes des trois autres.

L'intervalle d'un ton entre les deux types de tuyaux bouche les trous des séries harmoniques, et donne une gamme diatonique complète, avec des ajouts chromatiques dans l'aigu. Grâce aux différences de pas de cannelures, cette combinaison de tuyaux sonne quelle que soit la vitesse de l'air au delà de 30 km/h. Les battements entre tuyaux accordés sur une même note donnent vie au son. Bref, je suis content, mais il y a d'autres assemblages possibles, qui chanteront une mélodie et des accords différents. Faites des essais, il y en a pour tous les goûts !

Conseil important : si vous embarquez cet orgue en voiture, faites attention à la sécurité : à force d'écouter la musique, de tenir le volant d'une main et l'orgue de l'autre à travers la fenêtre ouverte, j'ai failli me planter ! Attention aussi à ne pas vous flinguer les oreilles : avec des sons purs tenus, l'oreille fatigue vite, et le son peut être diablement puissant à haute vitesse.



L'orgue éolien à tuyaux cannelés embarqué en voiture : mieux que l'autoradio !

J'ai l'intention d'essayer d'autres sources de perturbations acoustiques dans le tuyau, par exemple en plaçant dans le tube des obstacles pour créer des tourbillons de von Karman, dont le caractère périodique permet d'espérer exciter une onde acoustique résonante dans le tuyau.

On peut aussi envisager d'exciter l'onde acoustique avec d'autres formes d'écoulements turbulents, analogues à celui qui se crée entre dents en lèvres quand on siffle. La suite au prochain numéro !

Références

- [1] Bart Hopkins, « Musical Instrument Design », SEE Sharp Press (1996)
- [2] Prof. Peter Schickele, "The definitive biography of PDQ Bach", Random House (1976)
- [3] B. B. Ninob, "Flûtes harmoniques, txistus et autres galoubets", sur le site « La Trompette » <http://la.trompette.free.fr/Ninob/Ninob.php> (2014)
- [4] « Simulation de l'acoustique d'un instrument à vent : le logiciel Tutt », <http://la.trompette.free.fr/Ninob/Ninob.php>
- [5] C.F. Colebrook, « Turbulent flows in pipes, with particular reference to the transition between the smooth and rough pipe laws », J. Inst. Civ.Eng. London, vol 11 p 133 (1939)