

Travaux pratiques numériques d'Acoustique Musicale

Ce document est un énoncé de travaux pratiques numériques d'acoustique musicale. Les activités sont à effectuer en groupes d'un ou deux étudiants pendant une séance de 2h, qui est suivie d'1h de restructuration commune.

Évaluation : l'évaluation repose sur le travail en séance et un compte-rendu de TP à remettre au plus tard le 01/12/2024 à 23h59.

Tom Colinot

Automne 2024

Le modèle physique comme instrument virtuel Application aux instruments à anche simple

Cette séance de travaux pratiques est destinée à permettre aux étudiants de :

- manipuler le son produit par un modèle physique d'instrument en influant sur les paramètres de contrôle du musicien mais aussi les paramètres acoustiques de l'instrument;
- identifier des comportements caractéristiques du système dynamique non linéaire que constitue ce modèle, et les interpréter par rapport aux contraintes que suppose une utilisation musicale;
- tracer le diagramme de bifurcation du modèle, et envisager son utilité pour répondre aux problématiques qui se posent au facteur d'instruments ou au développeur de synthétiseurs.

Situation de problème

Fort de vos connaissances acquises en cours d'acoustique musicale, vous avez pu réaliser un modèle numérique d'instrument auto-oscillant : une clarinette. Reste maintenant à étudier son comportement, et à régler ses multiples paramètres pour s'approcher au mieux d'un instrument de musique utilisable...

Pour des raisons de gain de temps et d'homogénéité entre étudiants, le modèle numérique vous est fourni, ainsi qu'une interface graphique permettant de régler ses principaux paramètres.

Présentation du modèle

On présente ici le modèle d'instrument à anche retenu et implémenté dans le code fourni. Ce modèle simplifié, dont la structure est représentée en Figure 1, est constitué de trois éléments principaux (anche, canal d'anche et résonateur) contrôlés par les paramètres imposés par l'opérateur, que l'on envisage ici comme un musicien.

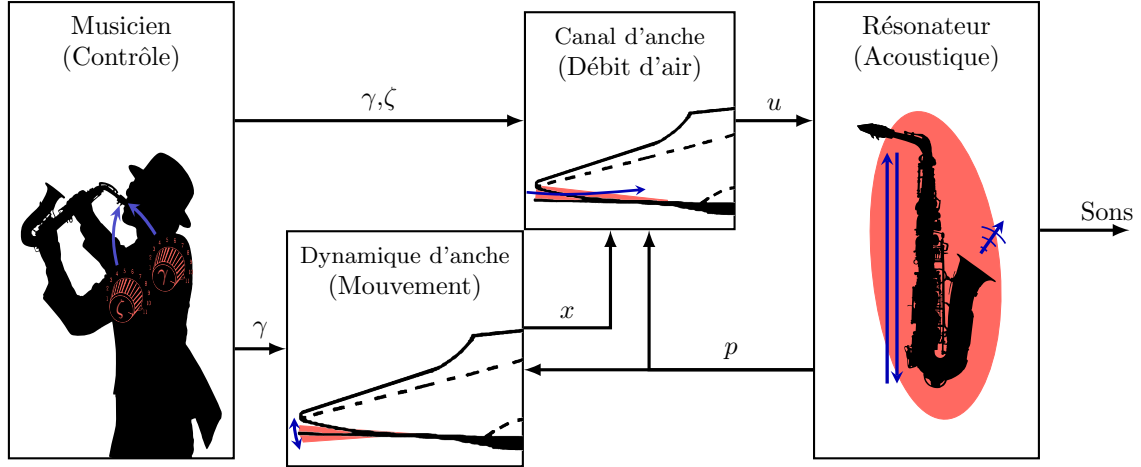


FIGURE 1 – Schéma des éléments principaux du modèle d'instrument à anche retenu.

Paramètres de contrôle et variables physiques, adimensionnement

On considère dans ce modèle d'instrument à anche simple très simplifié que le musicien dispose de deux paramètres de contrôles pour influencer le son produit : la pression dans sa bouche p_m , et la hauteur du canal d'anche au repos H qu'il contrôle à l'aide de sa lèvre inférieure. Dans leurs version adimensionnée [Chaigne and Kergomard, 2008], ces paramètres sont notés γ et ζ , et définis comme

$$\gamma = \frac{p_m}{P_p} \quad \zeta = w H Z_c \sqrt{\frac{2}{\rho P_p}}, \quad (1)$$

où P_p est la pression dite *pression de plaquage statique* nécessaire à fermer entièrement le canal d'anche, w est la largeur effective du canal d'anche, Z_c l'impédance caractéristique du résonateur et ρ la masse volumique de l'air.

On utilisera également les variables physiques adimensionnées de pression p et de débit u à l'entrée de l'instrument définies à partir de leurs contreparties dimensionnées \hat{p} et \hat{u} par

$$p = \frac{\hat{p}}{P_p} \quad u = \hat{u} \frac{Z_c}{P_p}. \quad (2)$$

Système excitateur : canal d'anche, dynamique d'anche

En formulant la loi de Bernoulli sur le canal de l'anche (intervalle entre l'anche et le bec en Figure 2), on obtient une relation liant le débit entrant dans l'instrument u à la différence de pression entre l'entrée de l'instrument et la bouche du musicien $p - \gamma$, ainsi que l'écart de l'anche par rapport à sa position d'équilibre x , sous la forme :

$$u = F_{\gamma, \zeta}(p, x) = \zeta \frac{1 + x + |1 + x|}{2} \text{sign}(\gamma - p) \sqrt{|\gamma - p|} \quad (3)$$

La position de l'anche x est modélisée par un oscillateur amorti à un degré de liberté actionné par l'écart de pression $p - \gamma$, c'est à dire

$$\frac{\ddot{x}}{\omega_r^2} + \frac{q_r \dot{x}}{\omega_r} + x = p - \gamma, \quad (4)$$

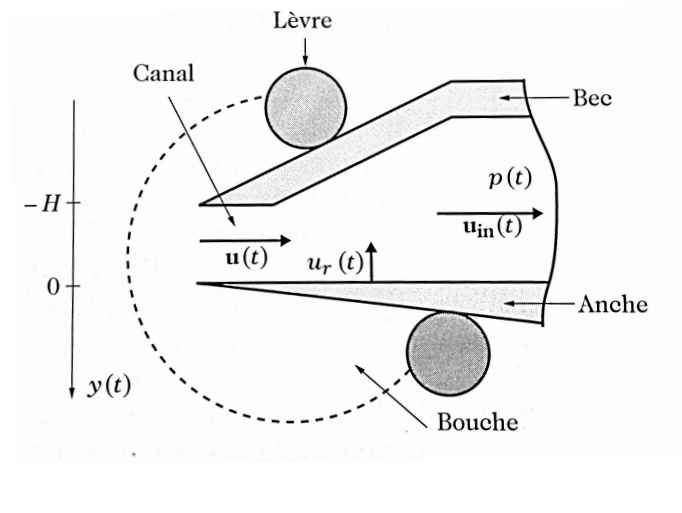


FIGURE 2 – Schéma du bec et de l'anche, issu de [Chaigne and Kergomard, 2008]. Ici, les grandeurs u_r et u_{in} ne sont pas utilisées.

où ω_r et q_r sont les paramètres de l'oscillateur, respectivement pulsation propre et amortissement. Bien que ces paramètres puissent être considérés comme des paramètres de contrôles imposés en partie par le musicien, ils sont fixés ici à $\omega_r = 2\pi \times 2500 \text{ rad.s}^{-1}$ [Guillemain et al., 2005] et $q_r = 1$, dans un souci de réduction de l'espace à explorer.

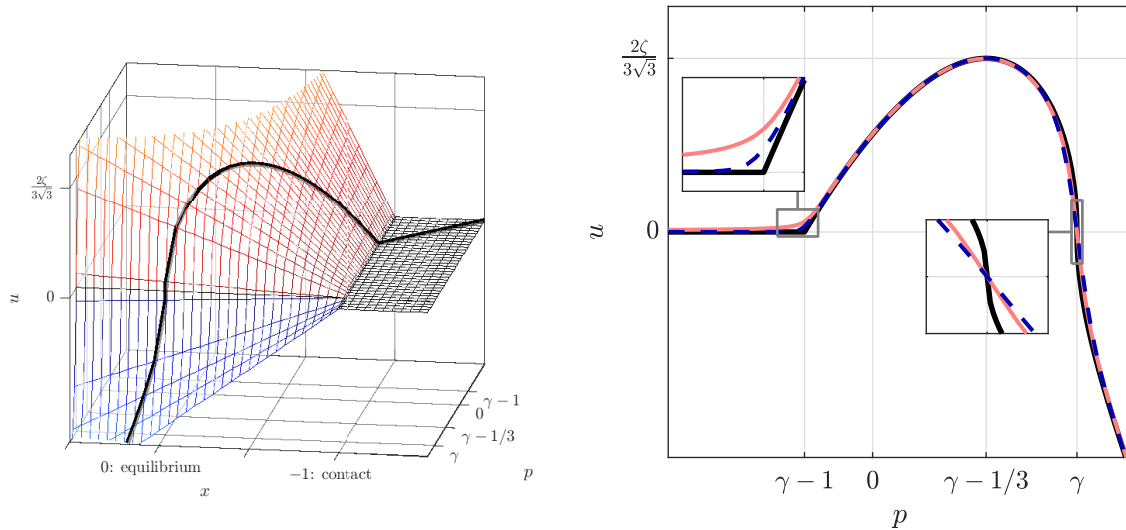


FIGURE 3 – Caractéristiques non linéaire : à gauche, caractéristique complète Eq. (3); à droite réduction pour $x = p - \gamma$ Eq. (5) et régularisation en rouge.

Pour mieux visualiser le comportement du canal d'anche, on peut étudier le cas statique, c'est à dire si $\dot{x} = 0$ et $\ddot{x} = 0$. L'équation (4) devient alors $x = p - \gamma$ que l'on peut injecter dans l'équation (3). On obtient ainsi la relation

$$u = F_{\gamma, \zeta}(p) = \zeta \frac{1 + p - \gamma + |1 + p - \gamma| \text{sign}(\gamma - p) \sqrt{|\gamma - p|}}{2}. \quad (5)$$

Pour des raisons liées à l'implémentation numérique, on utilise une régularisation des fonctions discontinues de la caractéristique (3) où l'on remplace les valeurs absolues par une fonction semblable

$$|\bullet| \leftarrow \sqrt{\bullet^2 + \eta},$$

où η est le paramètre de régularisation. La fonction $\sqrt{\bullet^2 + \eta}$ vaut $|\bullet|$ pour $\eta = 0$, et elle est \mathcal{C}^∞ pour $\eta > 0$. Ce paramètre prend une valeur strictement positive faible, fixée ici à $\eta = 10^{-6}$.

Système résonateur : réponse acoustique de la colonne d'air

Le résonateur est représenté par son impédance acoustique d'entrée. Cette grandeur linéaire donne la réponse en pression p à l'entrée du résonateur à partir de l'excitation en débit u fournie par le canal d'anche, soit dans le domaine fréquentiel

$$Z(\omega) = \frac{P(\omega)}{U(\omega)}. \quad (6)$$

L'opération de convolution que l'on pourrait déduire directement par transformée de Fourier inverse de l'Eq. (6) étant extrêmement coûteuse en calcul, on utilise une approximation de l'impédance comme une somme de modes, c'est à dire de filtre résonants d'ordre 2. Selon les notations de [Gilbert et al., 2020], on note cette impédance

$$Z(\omega) = \sum_{m=1}^N Z_m \frac{j\omega\omega_m/Q_m}{\omega_m^2 + j\omega\omega_m/Q_m - \omega^2}, \quad (7)$$

où les paramètres du mode m sont trois nombre réels : son amplitude Z_m , sa pulsation ω_m et son facteur de qualité Q_m . Dans le cas présent, on utilise une expression équivalente (voir par exemple [Taillard et al., 2018]) où

$$Z(\omega) = \sum_{m=1}^N \frac{C_m}{j\omega - s_m} + \frac{C_m^*}{s - s_m^*}. \quad (8)$$

Les paramètres du mode m sont alors un pôle complexe $s_m = \alpha_m + j2\pi f_m$ et un résidu C_m que l'on considère ici comme réel. Dans le cas présent, les paramètres acoustiques du résonateurs accessibles sont les fréquences modales f_m et les résidus modaux C_m . Les amortissements modaux α_m sont fixés. Le modèle simplifié utilisé ici ne comporte que trois modes. Les valeurs initiales des paramètres modaux sont inspirés de ceux extraits d'une mesure d'impédance d'entrée de clarinette.

Références

- [Chaigne and Kergomard, 2008] Chaigne, A. and Kergomard, J. (2008). *Acoustique des instruments de musique*. Belin.
- [Gilbert et al., 2020] Gilbert, J., Maugeais, S., and Vergez, C. (2020). Minimal blowing pressure allowing periodic oscillations in a simplified reed musical instrument model : Bouasse-benade prescription assessed through numerical continuation. *Acta Acustica*, 4(6) :27.
- [Guillemain et al., 2005] Guillemain, P., Kergomard, J., and Voinier, T. (2005). Real-time synthesis of clarinet-like instruments using digital impedance models. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 118(1) :483–494.
- [Taillard et al., 2018] Taillard, P.-A., Silva, F., Guillemain, P., and Kergomard, J. (2018). Modal analysis of the input impedance of wind instruments. application to the sound synthesis of a clarinet. *Applied Acoustics*, 141 :271–280.

1 Premiers sons

Cette première section vise à explorer l'effet des deux paramètres de contrôle γ et ζ sur le type de son produit par le modèle.

Pour pouvoir utiliser les indications quantitatives de l'énoncé, les paramètres modaux (fréquences et résidus modaux) doivent conserver leurs valeurs par défaut : $f_1 = 220$ Hz, $f_2 = 660$ Hz, $f_3 = 1100$ Hz, $C_1 \simeq 620$, $C_2 \simeq 580$, $C_3 \simeq 500$.

1. Pour $\zeta = 0.5$, quelle est (environ) la valeur minimale de γ pour laquelle un son est produit ? On la note $\gamma_m(\zeta = 0.5)$.
2. En rappelant la définition du paramètre γ , expliquer rapidement la signification de la valeur γ_m du point de vue du musicien. Note : on pourra considérer ici la pression de plaquage statique P_p comme constante.
3. Pour $\gamma = 0.5$, quelle est (environ) la valeur minimale de ζ pour laquelle un son est produit ? On la note $\zeta_m(\gamma = 0.5)$.
4. Expliquer rapidement, en termes de contrôle du musicien, la signification de ζ_m . Note : on pourra considérer ici comme des constantes la pression de plaquage statique P_p et les paramètres physiques du milieu et du résonateur.

2 Dynamique

Pour pouvoir utiliser les indications quantitatives de l'énoncé, les paramètres modaux (fréquences et résidus modaux) doivent conserver leurs valeurs par défaut : $f_1 = 220$ Hz, $f_2 = 660$ Hz, $f_3 = 1100$ Hz, $C_1 \simeq 620$, $C_2 \simeq 580$, $C_3 \simeq 500$.

1. En faisant varier successivement les curseurs γ et ζ , trouver quelques points (γ_m, ζ_m) en dessous desquels aucun son n'est produit.
 - (a) Tracer sur un graphique, dans le plan (γ, ζ) , les points (γ_m, ζ_m) , puis les relier à main levée.
 - (b) Comment se comporte le modèle au dessus de cette courbe ? En-dessous ?
2. On cherche ici un deuxième seuil d'oscillation en γ , pour $\zeta = 0.1$.
 - (a) Pour $\zeta = 0.1$, quelle est (environ) la valeur minimale de γ pour laquelle un son est produit ?
 - (b) Existe-t-il une valeur maximale de γ au delà de laquelle aucun son n'est produit ? Si oui, que vaut-elle (environ) ?
 - (c) Cette valeur de γ correspond-elle à une valeur particulière de pression dans la bouche du musicien p_m ? Proposer alors une explication quant au mécanisme de disparition des oscillations au delà de cette valeur.
3. Pour $\zeta = 0.2$, explorer le comportement du système autour de $\gamma = 1$.
 - (a) Quelle est la valeur la plus élevée de γ pour laquelle une oscillation stable peut être obtenue ? On la note γ_{max} .
 - (b) Une fois dépassée la valeur γ_{max} , jusqu'à quelle valeur faut-il diminuer γ pour retrouver un régime oscillant stable ? On la note γ_p .
 - (c) Le système a des comportements différents selon que l'on parcourt cette région en augmentant γ ou en le diminuant. Comment s'appelle ce phénomène, très général en dynamique non linéaire ?
 - (d) Comment s'appelle le type de bifurcation où l'apparition et la disparition des oscillations sont associées à un hystérésis ?
4. Représenter, sur un diagramme, l'allure de l'amplitude du son en fonction de la valeur de γ pour $\zeta = 0.2$. Matérialiser par des flèches les amplitudes obtenues lors du parcours du diagramme dans le sens croissant et dans le sens décroissant.
5. Comment varie la taille de l'intervalle entre γ_p et γ_{max} lorsque ζ diminue ? Peut-on trouver une valeur de ζ où cet intervalle est de longueur nulle ?
6. En faisant varier les paramètres modaux et les paramètres de contrôle, rechercher un signal non périodique. Décrire ce signal en termes de contenu spectral et d'enveloppe temporelle. Indication : les signaux non périodiques apparaissent plus facilement pour $\zeta > 1.5$.

3 Fréquence de jeu, justesse

1. Pour γ fixé, dans quel sens varie la fréquence des oscillations quand ζ augmente ?
2. Pour quelques couples de valeur (γ, ζ) , relever la fréquence fondamentale des oscillations (il est possible d'utiliser un outil externe, comme un autre logiciel ou un accordeur). Comparer ces fréquences fondamentales à la première fréquence modale.
3. Ajuster les fréquences modales et les résidus modaux pour obtenir la note suivante : $A_3 = 220$ Hz. Décrire la stratégie employée.

4 Timbre et géométrie du résonateur

Explorer les situations où les fréquences modales sont liées à la premières comme suit :

- Configuration 1 : $f_2 \simeq 3f_1, f_3 \simeq 5f_1, \dots$
- Configuration 2 : $f_2 \simeq 2f_1, f_3 \simeq 3f_1, \dots$

1. Existe-t-il une différence de timbre entre ces deux configurations ?
2. Examiner et commenter le spectre de sons produits dans ces deux configurations, en particulier l'amplitude de différentes harmoniques.
3. Donner un exemple d'instrument à anche dont les fréquences de résonances respectent la configuration 1, et un exemple qui respecte la configuration 2. Que dire de la géométrie de leurs résonateurs ?

5 Jouabilité et justesse des registres supérieurs

On se propose de modéliser un doigté du second ou troisième registre. Pour ce type de doigté, la fréquence fondamentale attendue est proche de la deuxième (resp. troisième) fréquence modale : elle correspond à un son du second (resp. troisième) registre.

Important : pour cette section, vous pouvez utiliser le tracé automatique du diagramme de bifurcation. Appuyez sur le bouton *Reset bifurcation diagram* pour le faire apparaître, puis enclencher le bouton *Draw bifurcation diagram* pour tracer des points sur le diagramme. N'oubliez pas de le réinitialiser (*Reset*) de temps en temps pour qu'il reste lisible !

1. En manipulant les paramètres modaux et les paramètres de contrôles, rechercher un signal de deuxième registre ($f_0 \simeq f_2$), puis un signal de troisième registre ($f_0 \simeq f_3$). Décrivez votre stratégie.
2. On cherche à produire du second registre ($f_0 \simeq f_2$). En reprenant la configuration de second registre trouvée à la question précédente, effectuer des "attaques" de notes : passer brusquement de $\gamma = 0$ à $\gamma > 0$. Toutes les valeurs de γ testées mènent-elles à un second registre ?
3. Faire varier ζ et répétez l'exercice. Dans votre configuration, trouve-t-on des valeurs de ζ qui favorisent l'émission de second registre ? Si oui, lesquelles ?
4. Ajuster les paramètres modaux afin d'assurer que le plus d'attaques possibles mènent à un second registre juste (autour de $A_4 = 440$ Hz) dont le timbre soit à votre goût. On pourra décider de limiter l'optimisation à un intervalle de ζ , à annoncer. Décrire la stratégie employée.

6 Conclusion

En vous appuyant des exemples concrets tirés de vos expérimentations avec le modèle numérique, discutez la question suivante :

Dans quelle mesure est-il possible de régler indépendamment la dynamique, la justesse et le timbre d'un modèle d'instrument auto-oscillant ?