

## Seuils d'oscillation de la clarinette : validité de la représentation excitateur-résonateur

Didier Ferrand<sup>1</sup>, Christophe Vergez<sup>1</sup>, Fabrice Silva<sup>1</sup>

<sup>1</sup> LMA CNRS Marseille, {ferrand,vergez,silva}@lma.cnrs-mrs.fr

Depuis Helmholtz, le fonctionnement des instruments entretenus est représenté par un système bouclé faisant apparaître un bloc excitateur et un bloc résonateur. Dans le cas de la clarinette étudiée ici, l'excitateur désigne l'anche modulant le débit d'air entrant et le résonateur le corps de l'instrument. Si cette représentation est communément admise, se pose la question de la séparabilité de ces deux blocs et de l'observabilité des grandeurs physiques qui les lient. Dans le cadre de l'étude du seuil d'oscillation, nous inspectons la validité de cette représentation indépendamment de toute modélisation des blocs : les seuils mesurés sont comparés avec ceux obtenus par la théorie des oscillateurs dans laquelle sont introduites les valeurs expérimentales des paramètres du modèle.

Les pressions de seuil et les fréquences émergentes obtenues en (3) et (4) sont comparées. L'interprétation des différences fait intervenir les difficultés d'accéder exactement expérimentalement au point de bifurcation (indépendamment de la qualité du contrôle), la caractérisation expérimentale incomplète du système excitateur (en particulier, le débit d'anche n'est pas mesuré), et les incertitudes qui pèsent sur la mesure d'impédance d'entrée d'une clarinette du fait de la géométrie du bec. Toutefois, l'exploitation directe des mesures permet de s'affranchir d'incertitudes qui seraient introduites par une modélisation paramétrique des éléments excitateur et résonateur.

## 1 Introduction

Le principe de fonctionnement de la clarinette a été l'objet de nombreux travaux. En particulier, les conditions de mise en auto-oscillation (désignées par la suite comme *seuil d'oscillation*), ont été étudiées [1] et des comparaisons entre modèle et expérience sont disponibles [2]. Ce dernier travail fait apparaître des écarts jusqu'à 50% dont l'origine reste inexpliquée. De plus, Silva *et coll.* [3] montrent que la prise en compte de phénomènes supplémentaires dans les modèles ne permet pas d'expliquer pleinement l'écart.

Ce travail est consacré aux difficultés liées à la comparaison entre seuils d'oscillations mesurés et déduits d'un modèle. Les difficultés sont de natures différentes :

- Difficultés d'estimation de paramètres élémentaires constituant le modèle mathématique (ouverture au repos, la raideur et l'amortissement de l'anche, l'influence du débit d'anche, l'impédance du résonateur).

- Difficultés d'exploitation d'un modèle : l'écart entre seuils mesurés et estimés devrait idéalement être évalué en fonction de deux éléments, d'une part la sensibilité du seuil estimé en fonction des paramètres du modèle, d'autre part les incertitudes partielles associées aux estimations de chaque paramètre.

- Difficulté d'accéder expérimentalement au point de bifurcation, indépendamment de la qualité du pilotage de l'expérience (notion de ralentissement critique à la bifurcation, voir [4]).

Dans cet article, nous présentons d'abord en section 2 le modèle de clarinette considéré et rappelons comment trouver les seuils d'oscillation. Seuil mesuré sur bouche artificielle et seuil donné par le modèle à partir

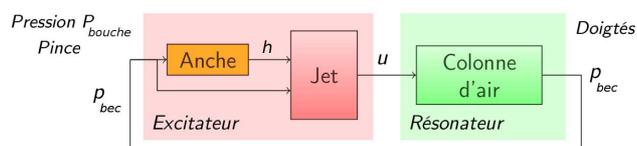


FIGURE 1 – Schéma bloc : fonctionnement de la clarinette.

de l'estimation des paramètres sont comparés en section 3. Nous montrons enfin en section 4 comment une approche par blocs du fonctionnement de l'instrument permet de mieux prévoir le seuil d'oscillation.

## 2 Modèle et seuils d'oscillation

Il est possible de représenter le fonctionnement d'une clarinette par la mise en série avec rétroaction d'un excitateur et d'un résonateur, ou, en séparant comportement mécanique de l'anche et écoulement, par un schéma à trois blocs (Fig. 1).

### 2.1 Modélisation

Le modèle classiquement retenu dans la littérature considère que le comportement mécanique de l'anche est décrit par un système linéaire du second ordre de pulsation propre  $\omega_r$  et d'amortissement  $q_r$  soumis à une différence de pression entre les deux faces de l'anche (on

pose  $p = p_{bouche} - p_{bec}$ ) avec une raideur apparente  $K$  :

$$\frac{1}{\omega_r^2} \frac{d^2 h}{dt^2} + \frac{q_r}{\omega_r} \frac{dh}{dt} + (h(t) - h_0) = -\frac{p(t)}{K}, \quad (1)$$

soit, en fréquentiel,  $H(\omega) = -D(\omega)P(\omega)/K$ . Le débit d'air entrant s'exprime en fonction de la différence de pression  $p$  entre la bouche et le bec, et la section du canal d'anche  $Wh$  (comme justifié dans [5]) :

$$u(t) = Wh(t)\sqrt{2p/\rho}. \quad (2)$$

Le corps de l'instrument (remplacé ici par un tuyau cylindrique) agit comme un résonateur acoustique de longueur  $L$  caractérisé par son impédance d'entrée :

$$P_{bec}(\omega) = U(\omega)Z_e(\omega). \quad (3)$$

et son impédance caractéristique  $Z_c$  (ondes planes).

## 2.2 Conditions d'auto-oscillation

On s'intéresse ici à la condition (ponctuelle) de mise en auto-oscillation. La pression minimale pour qu'un son puisse émerger de l'état d'équilibre correspond, pour les systèmes à oscillations entretenues, au seuil d'instabilité du régime statique (associé ici au seuil d'oscillation). Cette condition, connue sous le nom de critère de Barkhausen en théorie des oscillateurs, s'exprime par la relation suivante qui fait intervenir l'impédance du résonateur  $Z_e(\omega)$  et l'admittance de l'excitateur linéarisé  $Y_a(\omega)$  dépendante du point de fonctionnement [1] :

$$1 = Z_e(\omega)Y_a(\omega) \quad (4)$$

Avec le modèle présenté ci-dessus, on a :

$$Y_a(\omega) = \zeta\sqrt{\gamma} \left( D(\omega) - \frac{1-\gamma}{2\gamma} \right) \quad (5)$$

avec  $\zeta = Z_c W \sqrt{\frac{2h_0}{\rho K}}$ , et  $\gamma = p_{bouche}/Kh_0$  paramètre de bifurcation dans cette étude.

## 3 Aspects expérimentaux

### 3.1 Mesure du seuil (bouche artificielle)

On utilise une bouche artificielle asservie en pression [6] pour détecter la bifurcation du régime statique vers le régime oscillant selon deux approches : augmentation quasi-statique de la pression bouche  $p_{bouche}$  asservie jusqu'à détection de l'émergence puis diminution (le tout en 250 s), ou alors régulation de l'amplitude des oscillations de la pression dans le bec  $p_{bec}$  sur de faibles valeurs conduisant  $p_{bouche}$  à se placer automatiquement au voisinage du seuil d'oscillation. Le seuil absolu est inaccessible à la mesure (les constantes de temps  $\gamma$  sont infinies) mais l'intérêt de l'utilisation d'une bouche artificielle asservie est manifeste car on peut piloter des trajectoires aussi lentes et régulières que souhaitées. La première approche (Fig 2, gauche) fournit des seuils de 3.8 kPa en montée et 3.4 kPa en descente, tandis que la seconde (Fig 2, droite) conduit à un seuil voisin de celui constaté en rampe ascendante.

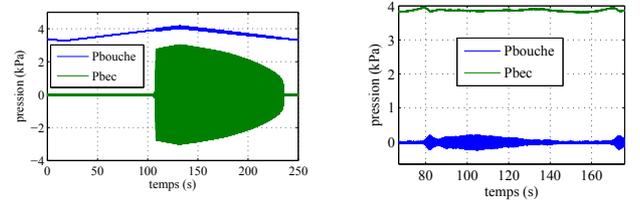


FIGURE 2 – Mesure de seuil : par rampes de  $p_{bouche}$  (à gauche) ou asservissement de  $p_{bec}$  (à droite).

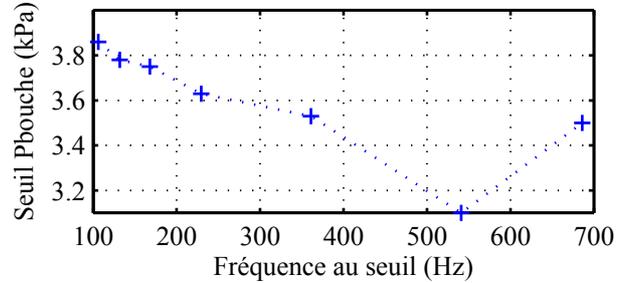


FIGURE 3 – Seuils d'oscillation pour différentes longueurs de résonateur

La différence entre seuils en montée et en descente peut être associée à l'hystérésis d'ouverture du canal (Fig 4), au temps caractéristique de croissance de l'oscillation qui tend vers l'infini au seuil, ou à l'existence éventuelle de deux seuils distincts pour les régimes statique et oscillant. On considère une marge d'erreur de l'ordre de 0.4 kPa sur la mesure du seuil effectif.

La figure 3 montre les résultats de mesures de seuils pour diverses longueurs de résonateurs cylindriques. Le seuil diminue avec la longueur du résonateur car les pertes visco-thermiques se réduisent. Pour la plus petite longueur de résonateur, le seuil est plus élevé à cause de l'influence de l'anche [2, 3].

### 3.2 Identification paramétrique

Pour la confrontation théorie/expérience, les paramètres à injecter dans le modèle sont estimés par l'exploitation de la section d'ouverture du canal, de la caractéristique débit-pression, ainsi que de la dynamique de l'anche et de l'impédance du résonateur.

#### 3.2.1 Excitateur : comportement quasi-statique

Le bec est équipé d'un phototransistor (associé à une source lumineuse en regard, pour évaluer la section d'ouverture du canal d'anche) et d'un débitmètre.

La figure 4 montre la caractéristique mécanique  $h = f(p)$  obtenue pour des rampes de montée et de descente de pression dans la bouche d'une durée totale de 250 s, manifestant un hystérésis. La valeur maximale donne une ouverture au repos correspondant à  $h_0 = 0.48$  mm. L'hystérésis introduit une incertitude sur l'ouverture au repos et sur la raideur de l'anche, ce qui contribue à des écarts sur la valeur estimée du seuil. Cependant on considère une loi quasi-statique linéaire, avec une raideur  $K$  constante avant placage (pour  $p_{bouche} \sim 6$  kPa).

Sur la figure 5, on présente pour une montée quasi-statique de pression le signal d'ouverture issu du photo-

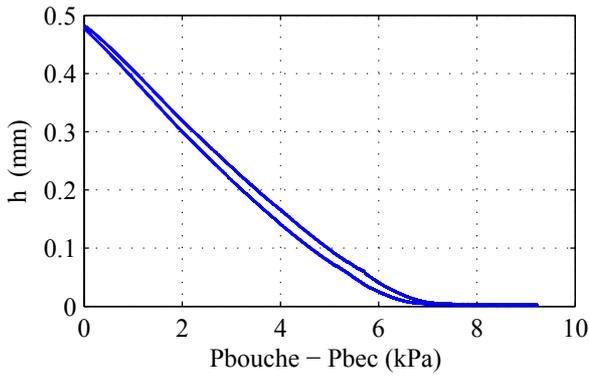


FIGURE 4 – Hauteur du canal d’anche lors d’un cycle quasi-statique de la pression dans la bouche

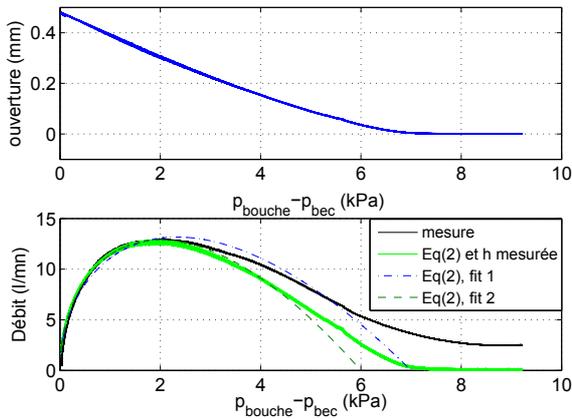


FIGURE 5 – Caractéristiques statiques ouverture-pression et débit-pression.

transistor, en haut, et plusieurs versions du débit, en bas : mesure, Eq. (2) avec ouverture donnée par le photo transistor, Eq. (2) avec pour pression de placage 7 kPa et  $W = 11.0$  mm mesuré (courbe notée « fit 1 ») et Eq. (2) avec pour pression de placage 6 kPa et  $W = 11.6$  mm ajusté pour avoir un débit maximum de 12.9 L/min au tiers de la pression de placage (courbe notée « fit 2 »). On constate un écart entre la mesure et le modèle donné par Eq.(2) plus important semble-t-il que celui constaté par Dalmont *et coll.* [7].

Si l’on suppose un comportement basses fréquences de l’excitateur (modèle dit *d’anche sans masse*), l’admittance  $Y_a(\omega)$  s’identifie à l’opposé de la pente de cette caractéristique débit-pression (et est indépendant de la fréquence). Aussi selon que l’on exploite directement les valeurs mesurées ou l’ajustement sur un des modèles présentés, on constate un écart pouvant aller jusqu’à plusieurs dizaines de pourcents, avec une forte répercussion sur le seuil estimé théoriquement.

### 3.2.2 Dynamique de l’anche

La fonction de transfert  $D(\omega)$  entre pressions et ouverture du canal peut être obtenue en utilisant une excitation indépendante [8, 10] (avec l’inconvénient d’une faible amplitude de la pression injectée dans le bec) ou à partir des signaux  $p(t)$  et  $h(t)$  mesurés en cours de jeu (un point de  $D(\omega)$  par fréquence de jeu). La

réponse fréquentielle de l’anche avec lèvres ne présentant que des résonances faibles en module, l’estimation des paramètres  $\omega_r$  et  $q_r$  d’un oscillateur à 1 ddl s’avère plus aisée à partir de la courbe de déphasage de  $D(\omega)$  (cf Fig. 6). En pratique, compte tenu des fréquences émergentes constatées lors de la mise en auto-oscillation, on ne considère le comportement dynamique que dans une bande de fréquences autour de la première fréquence de résonance acoustique, où un modèle d’oscillateur à 1 ddl est ajusté. Cette méthode est néanmoins insuffisamment robuste et aboutit à des fréquences de résonance  $f_r = \omega_r/2\pi$  comprises entre 1000 et 1900 Hz. Une conclusion importante est que l’anche est loin d’être un simple système du 2<sup>nd</sup> ordre et que cette divergence laisse pressentir la présence d’autres modes de déformation [9].

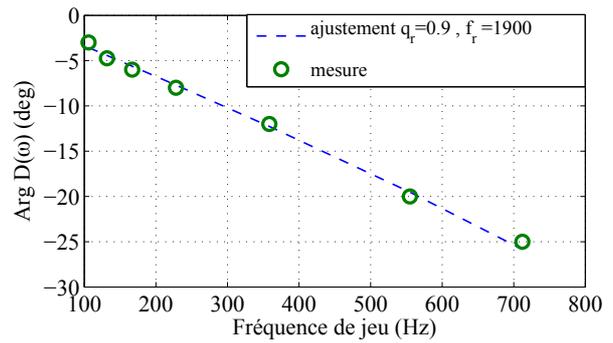


FIGURE 6 – Estimation du modèle ( $\omega_r$ ,  $q_r$ ) à partir du déphasage entre  $p(t)$  et  $h(t)$  mesuré à différentes fréquences de jeu.

### 3.2.3 Impédance d’entrée du résonateur

Le pont d’impédance [11] fournit une mesure de l’impédance d’entrée du corps de l’instrument (avec bec équivalent, cf Fig. 7 avec pour référence l’impédance 1 kPa/1 L/min, unités utilisées par le reste de la chaîne d’acquisition) sur laquelle est ajusté un modèle de lorentziennes :

$$Z_e(\omega) = \sum \frac{Z_n}{1 + jQ_n(\omega/\omega_n - \omega_n/\omega)}. \quad (6)$$

Cependant la mesure de l’impédance d’entrée ne peut être réalisée à l’heure actuelle qu’avec un volume équivalent au bec ce qui diffère de la situation de jeu, et qui est une première source d’erreur.

## 3.3 Confrontations modèle/expérience

L’utilisation du modèle avec les valeurs numériques obtenues expérimentalement (correspondant à la courbe notée « fit 2 » en figure 5 et aux paramètres d’anche estimés en figure 6,  $Z_e$  donnée par Eq. (6)) conduit à un seuil d’oscillation de 2.4 kPa, bien inférieur au seuil mesuré (entre 3.4 kPa et 3.8 kPa). L’écart entre seuil mesuré et estimé est dû à la fois aux incertitudes sur les valeurs des paramètres estimés et à la pertinence du modèle. Une étude de sensibilité aux paramètres reliant incertitude sur les paramètres à l’incertitude du seuil estimé par le modèle permet de faire le bilan des diverses contributions et concentrer les efforts sur les sources d’erreur les plus importantes. À défaut d’informations

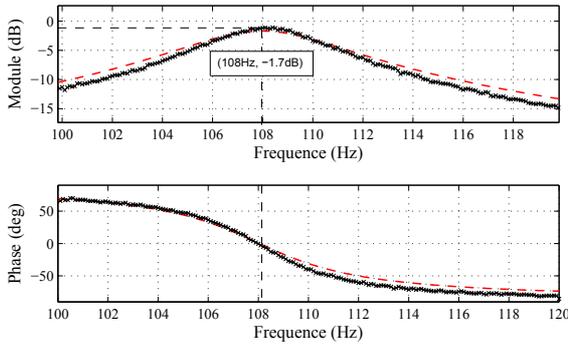


FIGURE 7 – Impédance dimensionnée du résonateur, autour du 1<sup>er</sup> pic de résonance (mesure 'x', modèle '-').

supplémentaires, on adopte pour les paramètres une distribution de probabilité uniforme entre des valeurs extrêmes estimées. La propagation des incertitudes amène à une incertitude relative sur le résultat de l'ordre de 50%. La valeur annoncée d'un seuil à 2.4 kPa n'est donc pas très significative. D'autre part, la sous-estimation systématique du seuil estimé suggère que les modélisations partielles adoptées sont inadaptées. Dans la suite, on adopte une approche « boîte noire », afin de valider la représentation excitateur/résonateur tout en évitant les erreurs liées à la modélisation simplifiée des phénomènes intrinsèques aux éléments.

## 4 Représentation par blocs

On se pose maintenant la question de la validation de la représentation excitateur/résonateur (cf Fig. 1) avec un nombre minimal d'hypothèses sur le modèle sous-jacent.

### 4.1 Principe général

On cherche à égaliser, en module et en phase, les quantités représentatives des deux blocs globalement selon la condition de Barkhausen (Eq. (4)), c'est-à-dire rechercher les valeurs de  $p_{bouche}$  et  $\omega$  qui assurent  $Y_a(p_{bouche}, \omega)Z_e(\omega) = 1$ , après identification non paramétrique des blocs. Cela est fait grâce à une résolution graphique qui consiste à tracer dans le diagramme de Bode (module/phase) l'impédance d'entrée mesurée  $Z_e(\omega)$  ainsi qu'un réseau de courbes  $Y_a(p_{bouche}, \omega)$  paramétré en  $p_{bouche}$ . L'intersection, à la fois en module et en phase, donne les valeurs  $\omega_{seuil}$  et  $p_{bouche,seuil}$ .

### 4.2 Difficultés pratiques de la méthode

L'application de ce principe nécessite d'avoir une connaissance suffisamment précise de  $Y_a(p_{bouche}, \omega)$  et  $Z_e(\omega)$ . Outre les limitations déjà évoquées liées à la mesure d'impédance, la caractérisation de  $Y_a(p_{bouche}, \omega)$  est également partielle :

- la faible bande passante du capteur de débit ne permet pas d'accéder au comportement fréquentiel de l'excitateur complet. Seule la dynamique de l'anche est mesurable.

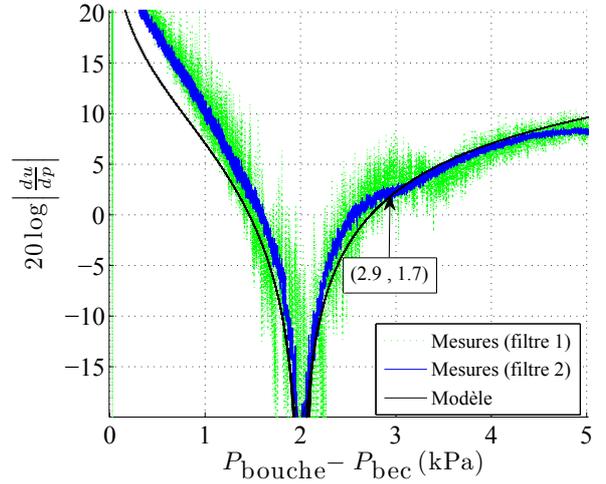


FIGURE 8 – Gain statique équivalent de l'excitateur (Eq. 8)

- le module statique de l'excitateur est obtenu par mesure de la pente de la caractéristique débit-pression.

Le problème est de savoir comment réinjecter la dynamique d'anche dans la mesure de l'excitateur. Une solution est proposée en 4.3.

## 4.3 Exploitation des mesures

### 4.3.1 Gain statique équivalent de l'excitateur

Une expression ad-hoc de la relation débit-pression est ajustée au voisinage du seuil mesuré :

$$u \sim \alpha h \sqrt{p} + \theta \text{ avec } h = h_0 - \kappa p \quad (7)$$

avec les valeurs numériques  $\alpha = 3$ ,  $h_0 = 3$ ,  $\kappa = 0.5$  et  $\theta = 4.5$  (cf Fig 8), et le gain équivalent de la partie excitateur (exprimé en dB par rapport à la référence 1 kPa/1 L/min) est obtenu par différentiation de cette expression

$$Y_a = -\frac{du}{dp} = \alpha \kappa \sqrt{p} - \frac{\alpha(h_0 - \kappa p)}{2\sqrt{p}}. \quad (8)$$

L'application du critère de Barkhausen avec une approximation statique de l'excitateur, qui a alors une phase nulle ou égale à  $\pi$ , implique que le seuil soit atteint à une des fréquences où le résonateur est purement résistif, soit 108 Hz pour la plus forte résonance qui a ici un module de -1.7 dB (cf. Fig 7). La pente +1.7 dB de l'excitateur est quant à elle obtenue pour une pression d'alimentation de 1.9 kPa (cf. Fig. 8), soit une réduction de l'écart de 100 Pa par rapport à l'estimation du seuil par modèles physiques.

### 4.3.2 Introduction de la dynamique de l'anche

L'admittance de l'excitateur a toutefois été estimée ci-dessus de manière quasi-statique soit en-dehors de la bande de fréquence intervenant dans la déstabilisation du régime statique. Si on introduit le comportement fréquentiel de l'anche dans l'expression (7) par

$$h = h_0 - \kappa(d * p) \text{ soit } H(\omega) = -\kappa D(\omega)P(\omega), \quad (9)$$

la linéarisation du couplage non linéaire (oscillations de  $p_{bec}$  de faible amplitude comparées à  $p_{bouche}$ ) donne une admittance de l'excitateur sous la forme :

$$Y_a(\omega) = G_1 D(\omega) - G_2 \text{ avec} \quad (10)$$

$$G_1 = \alpha \kappa \sqrt{p_{bouche}} \quad \text{et} \quad G_2 = \frac{\alpha (h_0 - \kappa p_{bouche})}{2\sqrt{p_{bouche}}} \quad (11)$$

Des exemples de valeur sont données ci-dessous :

$p_{bouche}$ (kPa)	$G_1$	$G_2$
3.8	5.85	0.85
3.0	5.20	1.30

Avec un oscillateur à 1 ddl pour l'anche ( $q_r = 1$  et  $f_r = 1$  kHz), la valeur du paramètre de bifurcation  $p$  qui vérifie le critère de Barkhausen avec dynamique d'anche est de 3.0 kPa, soit un gain de 2.3 dB pour l'excitateur. Il est intéressant de noter que le déphasage introduit par l'anche (de l'ordre de  $10^\circ$ ) implique que le seuil d'oscillation est atteint à une fréquence de 107.5 Hz qui n'est pas une fréquence de résonance acoustique et que le gain de l'excitateur est supérieur à la valeur estimée dans le cas statique. La prise en compte du comportement dynamique de l'excitateur réduit encore l'écart entre seuil mesuré et seuil théorique de 100 Pa, mais sans l'annuler.

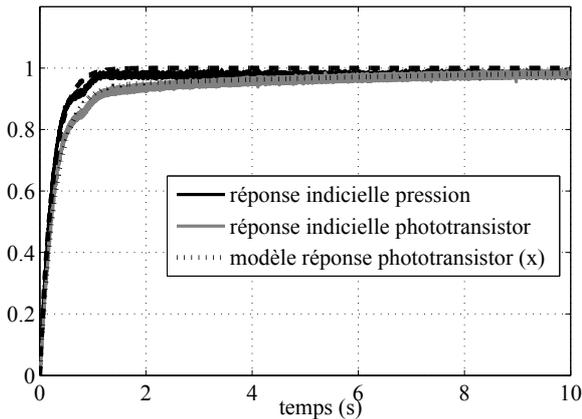


FIGURE 9 – Réponses indicielles en pression et en ouverture.

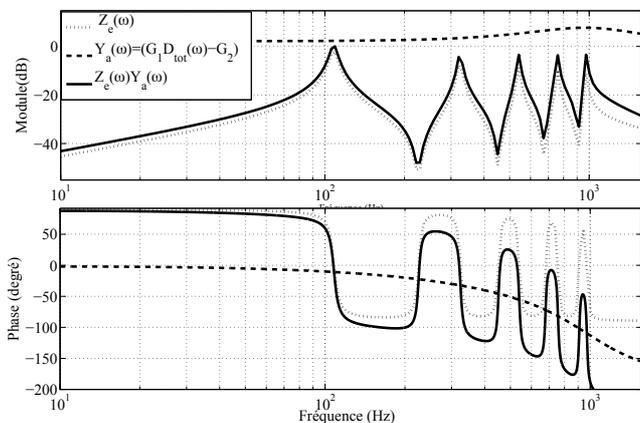


FIGURE 10 – Diagramme de Bode et critère de Barkhausen : cas avec dynamique d'anche pour 3.6 kPa (ce qui correspond au seuil d'oscillation)

### 4.3.3 Dynamique basse fréquence de l'excitateur

Dans cette section, la dynamique basse fréquence de l'excitateur est identifiée sans référence explicite à un modèle physique. Les réponses indicielles en pression et en ouverture sont présentées en figure 9, et la fonction de transfert basse fréquence  $D_{bf}(\omega)$  du rapport  $H(\omega)/P(\omega)$  est identifiée sous la forme d'une fraction à 2 zéros et 3 pôles. Cette fonction de transfert traduit correspond à des temps de relaxation (grands devant la période de la note) relatifs à l'anche mais aussi à la lèvre de la bouche artificielle.

La fonction de transfert mécanique  $D_{tot}(\omega)$  est alors le produit de  $D_{bf}(\omega)$  et de la fonction de transfert  $D(\omega)$ . L'application du critère de Barkhausen conduit alors à un seuil estimé  $p = 3.6$  kPa pour une fréquence émergente de 107.4 Hz (cf. Fig. 10). L'apport principal de la fonction de transfert  $D_{bf}(\omega)$  est une réduction de 3 dB environ du gain dans une bande de fréquence autour de la fréquence de jeu, ce qui explique le seuil plus élevé (et plus conforme au seuil mesuré sur bouche artificielle) auquel aboutit l'application du critère de Barkhausen.

## 5 Conclusion

L'exercice qui consiste à prévoir la pression à partir de laquelle une clarinette se met à jouer est ardu. Mieux vaut minimiser le nombre de paramètres à estimer dans un modèle, sinon des écarts du même ordre de grandeur que ceux obtenus par Wilson et Beavers sont observés [2]. En revanche, en caractérisant indépendamment les blocs excitateurs et résonateurs, on peut parvenir à retrouver les conditions d'émergence de l'auto-oscillation ( $p_{bouche}$  au seuil estimée de 3.6 kPa contre une marge admissible donnée par les expériences entre 3.4 et 3.8 kPa).

Pour la note choisie (grave) il est intéressant de noter que la qualité de l'estimation du seuil dépend de la prise en compte de la dynamique basse fréquence de l'excitateur (et surtout la perte de gain correspondante dans la fonction de transfert mécanique). Inversement, le résultat est très peu sensible à l'estimation des paramètres ( $\omega_r, q_r$ ) liés à la résonance d'anche.

La démarche présentée dans cet article doit être validée pour d'autres configurations (longueurs de résonateurs, fréquences et amortissements d'anche ...). La procédure de caractérisation des blocs excitateurs et résonateur mériterait d'être améliorée, en particulier pour permettre la mesure des impédances et fonctions de transferts sans démonter l'instrument de la bouche artificielle.

## Remerciements

Nous remercions J. Kergomard pour des discussions stimulantes. Une partie du travail présenté a été mené au sein du projet ANR CONSONNES.

## Références

- [1] Fletcher N.H. “Autonomous vibration of simple pressure-controlled valves in gas flows”. *J. Acous. Soc. Am.* 93 (4), 2172–2180 (1993).
- [2] Wilson T.A., Beavers G.S. “Operating modes of the clarinet”. *J. Acous. Soc. Am.* 56 (2), 653–658 (1974).
- [3] Silva F., Kergomard J., Vergez C., Gilbert J. “Interaction of reed and acoustic resonator in clarinet-like systems”. *J. Acous. Soc. Am.* 124 (5), 3284–3295 (2008).
- [4] Treddice J. R., Lippi G. L., Mandel P., Charasse B., Chevalier A., Picqué B. “Critical slowing down at a bifurcation”. *Am. J. Phys.* 72 (6), 3284–3295 (2004).
- [5] Hirschberg A., Gilbert J., Wijnands A.P.J., Valkering A.M.C. “Musical aero-acoustics of the clarinet”. *J. Phys. IV, Colloque C5 4*, C5–559–568 (1994).
- [6] Ferrand D., Vergez C., “Blowing machine for wind musical instrument : toward a real-time control of the blowing pressure”. *16th IEEE Mediterranean Conf. Control and Automation (MED)* , Ajaccio, France (2008).
- [7] Dalmont, J. P., Gilbert J., Ollivier S. “Nonlinear characteristics of single-reed instruments : quasi-static volume flow and reed opening measurements”. *J. Acoust. Soc. Am.* 114 (4), 2253-2262 (2003).
- [8] Gazengel B., Guimezanes T., Dalmont J.P., Doc J.B., Fagart S., Léveillé Y. “Experimental investigation of the influence of the mechanical characteristics of the lip on the vibrations of the single reed”. *Proc. ISMA*. Barcelona, Spain (2007).
- [9] Guimezanes T. “Étude expérimentale et numérique de l’anche de clarinette”. Thèse Doctorat, Université du Maine - LAUM. (2008).
- [10] Silva F. “Émergence des auto-oscillations dans un instrument de musique à anche simple”. Thèse Doctorat, Univ. Provence - LMA (2009).
- [11] Dalmont J.P., Le Roux J.Ch. “A new impedance sensor for wind instruments”. *Acoustics08*. ASA-EAA-SFA (2008).