



**Rapport de stage de master 2 ATIAM**

**INTERACTION MUSICIEN-INSTRUMENT DANS  
LA FLÛTE À BEC : ÉTUDE DE L'INFLUENCE DE  
LA DYNAMIQUE DU SIGNAL DE PRESSION  
D'ALIMENTATION**

**Rémi Blandin**

**Encadrants : Soizic Terrien et Christophe Vergez**

**Université Pierre et Marie Curie**

**Année universitaire 2012 - 2013**

31 juillet 2013

## Remerciements

*Je tiens à remercier tout particulièrement mes encadrants, Soizic Terrien et Christophe Vergez, pour leur aide et leurs conseils quotidiens.*

*Je tiens également à remercier Marine Sablonnière qui nous a permis de réaliser des mesures sur musicien.*

*Enfin merci aux stagiaires, au doctorants et à tous les autres membres de l'équipe qui participent à sa bonne ambiance.*

## Résumé

Les changements de régimes dans la flûte se manifestent par un changement de fréquence de jeu ou par le passage à un son multiphonique. Ils ont lieu pour certaines valeurs de la pression d'alimentation appelées seuils de changement de régime. Pour contrôler le régime sur lequel ils jouent, les flûtistes peuvent être amenés à modifier ces seuils. Pour y parvenir ils peuvent utiliser différents paramètres de contrôle : l'accord du conduit vocal [2] [13] et la dynamique de pression d'alimentation [20] par exemple. L'objectif est ici d'étudier comment la dynamique de pression d'alimentation peut être utilisée par les flûtistes. Pour cela différents profils de variation de pression d'alimentation sont réalisés avec une bouche artificielle. Ces expériences permettent de mettre en évidence que plus le temps de passage de la pression d'alimentation initiale à la pression d'alimentation final est court, plus les seuils de changement de régime s'écartent des seuils statiques (seuils de changement de régime obtenus en quasi-statique) et plus il s'effectuent rapidement. Ces observations et la comparaison avec des travaux effectués sur le seuil d'oscillation de la clarinette [5] [6] permettent d'établir un modèle de changement de régime pour la flûte. Enfin l'analyse de mesures effectuées sur une musicienne professionnelle, Marine Sablonnière, permet de montrer que les flûtistes obtiennent des décalages des seuils de changement de régime plus importants que ceux obtenus avec la bouche artificielle et qu'ils utilisent d'autres paramètres de contrôle que la pression d'alimentation. Il est difficile d'estimer la part que prend le paramètre étudié vis à vis des autres.

## Abstract

Regime change in recorder manifests as a pitch change or a transition to a multiphonic sound. They occur at particular supply pressure values called regime change thresholds. In order to control on which regime they play, recorder players may be brought to shift these thresholds. To achieve this they can use different control parameters : as an exemple the vocal tract tuning [2] [13] and the supply pressure dynamic [20]. The aim is here to study how the supply pressure dynamic can be used by recorder players. To do this different supply pressure profiles are realised with an artificial mouth. These experiments allow to show that the shorter the time to go from the initial supply pressure to the final supply pressure is, the more the regime change thresholds diverge from the static thresholds (regime change thresholds obtained in quasi-static) and the quicker they occur. These observations and the comparison with works carried out on the clarinet oscillation threshold [5] [6] allow to build a regime change model for recorder. Eventually the analysis of measurements performed on a professional musician, Marine Sablonnière, allow to show that recorder players can obtain higher regime change threshold shifts than those obtained with the artificial mouth and that they use other control parameters than the supply pressure control. It is difficult to estimate the share taken by the studied parameter with respect to the others.

# Table des matières

<b>1</b>	<b>Introduction</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>État de l'art</b>	<b>3</b>
2.1	Fonctionnement de la flûte à bec . . . . .	3
2.2	Les différents régimes de fonctionnement . . . . .	4
2.2.1	Les changements de régime . . . . .	4
2.2.2	Diagrammes de bifurcation . . . . .	5
2.2.3	Analyse de la stabilité avec la théorie de Floquet . . . . .	6
2.3	Outils numériques et expérimentaux . . . . .	6
2.3.1	Modèle physique . . . . .	6
2.3.2	Dispositif expérimental . . . . .	7
<b>3</b>	<b>Étude de l'effet de la dynamique de pression avec une bouche artificielle et un modèle Simulink</b>	<b>9</b>
3.1	Détection des changements de régime . . . . .	9
3.2	Comparaison de différents profils de variation de pression . . . . .	10
3.2.1	Étude de l'effet de la pente de rampes de pression d'alimentation sur les seuils de changement de régime et le retard au changement de régime . . . . .	10
3.2.2	Évolution du diagramme de bifurcation en fonction de la pente de rampes linéaires . . . . .	14
3.2.3	Comparaison de différents profils de variation de la pression d'alimentation . . . . .	15
3.3	Influence de l'évolution précédant le passage du seuil statique . . . . .	17
3.3.1	Influence de la pression initiale . . . . .	17
3.3.2	Effet des variations de pression précédant le passage du seuil statique. . . . .	18
3.4	Conclusions sur les changements de régime . . . . .	20
<b>4</b>	<b>Modélisation des changements de régime</b>	<b>21</b>
4.1	Présentation du modèle . . . . .	21
4.2	Étude de la validité de l'approximation linéaire de la vitesse de changement de régime . . . . .	22
4.3	Observation directe de la vitesse de changement de régime . . . . .	25
4.3.1	Observation directe de la vitesse de changement de régime avec des simulations . . . . .	25
4.3.2	Lien entre la vitesse de changement de régime et la partie réelle maximale des exposants de Floquet . . . . .	29
<b>5</b>	<b>Analyse de mesures effectuées sur une musicienne professionnelle</b>	<b>32</b>
5.1	Déroulement des expériences . . . . .	32
5.1.1	Dispositif expérimental . . . . .	32
5.1.2	Exercices demandés . . . . .	33
5.2	Comparaison avec les seuils mesurés avec la bouche artificielle . . . . .	33
5.3	Contrôle de la justesse des notes . . . . .	35
<b>6</b>	<b>Conclusion</b>	<b>38</b>
<b>A</b>	<b>Diagrammes de bifurcations obtenus expérimentalement</b>	<b>41</b>
<b>B</b>	<b>Comparaison de différents profils de variations de pression</b>	<b>52</b>
<b>C</b>	<b>Paramètres du modèle de changement de régime</b>	<b>56</b>

<b>D Mesures effectuées sur les musiciens</b>	<b>57</b>
D.1 Notes extraites d'un morceau de musique interprété par une flûtiste . . . . .	58
D.2 Crescendos et decrescendos sans changement de registre . . . . .	61
D.3 Contrôle de la justesse des notes . . . . .	66
<b>E Paramètres du modèle Simulink</b>	<b>67</b>

# 1 Introduction

Le stage que j'ai effectué s'est déroulé au LMA (Laboratoire de Mécanique et d'Acoustique) à Marseille. Ce laboratoire est constitué de trois équipes : matériaux et structures, ondes et imagerie, et l'équipe sons au sein de laquelle j'ai effectué mon stage. L'un des thèmes de recherche abordés par cette équipe est l'étude de la physique des instruments de musique, et c'est dans ce cadre que se situe ce travail.

La flûte est un instrument très ancien, mais dont le fonctionnement est néanmoins assez complexe. Les instruments de cette famille qui est très diverse (elle comprends aussi bien la flûte traversière que la flûte à bec, les tuyau d'orque ou des instruments traditionnels comme l'*ocarina* le *galoubet* ou la *flûte irlandaise*) ont tous en commun le fait que l'excitation se fait avec un jet d'air.

L'une des caractéristiques de ces instruments est qu'ils présentent différents régimes de fonctionnement. Lorsque l'on souffle de plus en plus fort dans l'instrument, la note produite change brusquement (elle passe généralement à l'*octave*) : il s'agit d'un changement de régime au cours duquel la fréquence de jeu change. Le fonctionnement de certaines flûtes comme la flûte traversière, le *galoubet* ou la *flûte irlandaise* utilise ce phénomène pour permettre de jouer plusieurs notes avec un même doigté. Sur la flûte à bec (l'instrument étudié au cours de ce stage est une flûte à bec alto Zen On Bressan) chaque note est jouée avec un doigté différent et ce phénomène n'est quasiment utilisé qu'en musique contemporaine pour obtenir des changements de timbre ou des sons *multiphoniques*. Les musiciens cherchent plutôt à l'éviter pour les autres types de musique.

Les changements de régime posent problème pour certains doigtés lorsqu'ils interviennent pour une faible pression d'alimentation (c'est le cas en particulier pour les notes graves). Les musiciens éprouvent alors des difficultés à jouer fort tout en restant sur la note souhaitée. C'est pourquoi ils peuvent être amenés à essayer de faire en sorte qu'ils aient lieu à une pression d'alimentation plus élevée. Il a ainsi déjà été montré que les musiciens expérimentés parviennent à jouer plus fort sans changer de régime que les non-musiciens et une bouche artificielle [20] (dispositif expérimental permettant de faire jouer la flûte sans instrumentiste [15]).

Pour y parvenir ils peuvent agir sur différents paramètres. Des études préliminaires suggèrent qu'en modifiant les propriétés acoustiques de leur conduit vocal ils parviennent à favoriser l'apparition d'une note [2] [13], et qu'en utilisant une certaine dynamique de pression d'alimentation ils parviennent à jouer plus fort une note sans changer de registre [20]. Il utilisent probablement ces deux paramètres et sans doute encore d'autres simultanément.

L'objectif de ce stage est d'étudier l'effet de la dynamique de la pression d'alimentation. Le fonctionnement de la flûte est-il modifié de manière significative lorsque la pression varie par rapport à un mode de fonctionnement quasi-statique ? Les musiciens utilisent-ils la dynamique de pression d'alimentation pour contrôler les changements de régime ? Et dans ce cas quelle part prend-elle vis-à-vis des autres paramètres ?

Quels outils et méthodes utiliser pour mener à bien cette étude ?

- Un dispositif expérimental permettant de contrôler précisément la pression d'alimentation [15], appelé bouche artificielle, permet de fixer tous les autres paramètres de contrôle et d'étudier expérimentalement l'effet de la dynamique de pression d'alimentation.
- L'utilisation d'un modèle physique de production du son (implémenté dans Simulink) permet d'effectuer des simulations en faisant varier la pression d'alimentation et, en comparant avec les mesures, de vérifier si ce modèle très simplifié rend compte de l'effet des variations de ce paramètre.
- Ce modèle permet également de calculer des *diagrammes de bifurcation* (diagramme sur lequel on trace une grandeur caractéristique du fonctionnement de la flûte, la fréquence par exemple, en fonction d'un paramètre, la pression d'alimentation pour cette étude) et de les comparer avec les simulations et les mesures. Que reste-t-il de ces diagrammes, qui sont valables dans des cas quasi-statiques, lorsque la pression d'alimentation varie ?
- Enfin, on peut effectuer des mesures sur des flûtistes en leur demandant d'effectuer des exercices susceptibles de les amener à utiliser la dynamique de pression d'alimentation pour décaler les

seuils de changement de régime. L'analyse de ces mesures permet ensuite d'essayer de savoir si la dynamique de pression d'alimentation est effectivement bien utilisée et si d'autres paramètres de contrôles le sont également.

Différents types de variations de pression d'alimentation plus ou moins rapides (des rampes, des profils exponentiels et en racine carrée) ont été réalisés en expériences et simulés avec le modèle numérique. L'effet de la pression d'alimentation initiale, et plus généralement de l'évolution de la pression d'alimentation précédent le passage du seuil statique de changement de régime (défini comme la pression de changement de régime obtenue dans un cas quasi-statique) a également été étudié.

Une première partie présentera un état de l'art du fonctionnement de la flûte et le modèle utilisé. Ensuite les résultats expérimentaux et de simulations obtenus avec les différents profils de variations et l'étude de l'effet de l'évolution de la pression d'alimentation précédent le passage du seuil statique seront analysés dans une deuxième partie. Un modèle de changement de régime imaginé à partir des observations faites dans la partie précédente et de la comparaison avec les travaux fait sur le seuil d'oscillation de la clarinette [5] [6] sera présenté dans une troisième partie. Enfin les mesures faites sur une musicienne professionnelle, Marine Sablonnière, seront analysées dans une dernière partie.

## 2 État de l'art

### 2.1 Fonctionnement de la flûte à bec

Le fonctionnement des instruments de la famille des flûtes repose sur la mise en auto-oscillation d'un jet d'air [8] [14]. Dans le cas de la flûte à bec ce jet se forme à la sortie du *canal* appelée *lumière* grâce à la différence de pression entre la bouche de l'instrumentiste et l'extérieur (voir figure 1). Un jet d'air est intrinsèquement instable : si on observe la fumée d'une cigarette, on s'aperçoit que les moindres mouvements de l'air environnant dévient la fumée et que ces perturbations s'amplifient à mesure qu'elle progresse. De même le jet formé à la sortie du *canal* dans la flûte à bec est perturbé par le champ acoustique du *résonateur*. Les perturbations ainsi générées se propagent le long du jet à une vitesse qui est de l'ordre de la moitié de celle du jet [11].

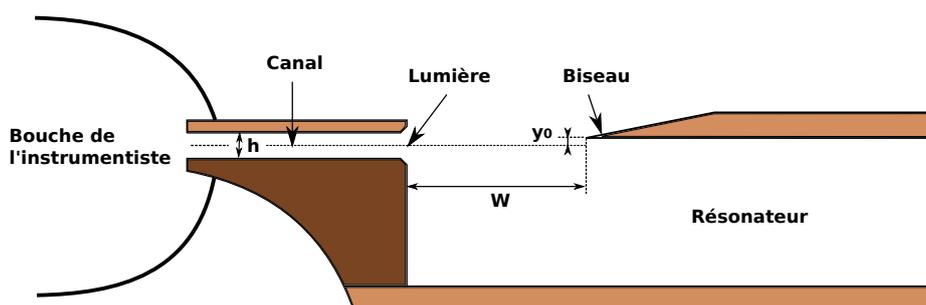


FIGURE 1 – Schéma d'une flûte à bec en coupe longitudinale.

Lorsque ce jet rencontre le *biseau* il génère une onde acoustique qui se propage dans le *résonateur*, se réfléchit à son extrémité (lorsque tous les trous sont fermés) et revient perturber le jet au niveau de la *lumière*. La perturbation ainsi créée s'amplifie et se propage le long du jet. Lorsqu'elle rencontre le *biseau*, elle génère une onde acoustique plus importante que la précédente qui à son tour se propage dans le résonateur et revient perturber le jet à sa naissance. Une nouvelle perturbation plus importante est ainsi générée. Elle se propage à son tour le long du jet en s'amplifiant et le phénomène se renouvelle ainsi continuellement jusqu'à qu'il y ai saturation de l'amplitude des perturbations. Le jet se met ainsi à osciller de part et d'autre du *biseau* : il entre en auto-oscillation [8] [14]. Il se crée ainsi une source aéroacoustique de pression qui peut être modélisée comme deux sources de débit en opposition de phase situées de part et d'autre du *biseau* (voir figure 2).

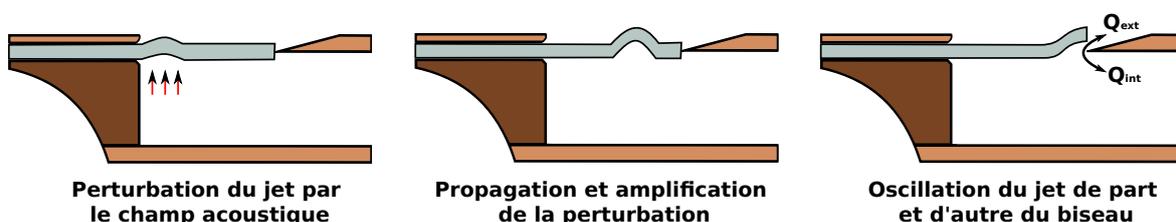


FIGURE 2 – Fonctionnement d'une flûte à bec.

Le temps de convection des perturbations le long du jet introduit un retard  $\tau$ . Il dépend de la distance *lumière biseau*  $W$  et de la vitesse de jet  $U_j$ , et donc de la pression dans la bouche de l'instrumentiste (1) (2). Afin que les auto-oscillations puissent s'entretenir, la source aéroacoustique située au niveau du *biseau* doit être en phase avec les oscillations du résonateur. Ceci a pour conséquence que la fréquence de jeu de la flûte dépend de la pression d'alimentation : la pression dans la bouche du flûtiste détermine la vitesse de jet qui elle-même modifie la valeur du retard  $\tau$ . La source aéroacoustique et le résonateur devant être nécessairement synchronisés, le retard  $\tau$  modifie la période des oscillations et donc la fréquence.

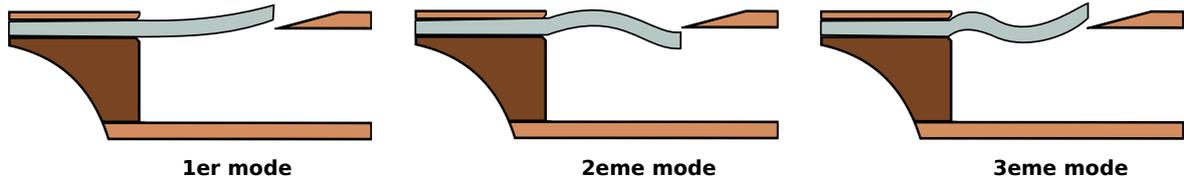


FIGURE 3 – Modes hydrodynamiques de jet dans une flûte à bec.

$$\tau = \frac{W}{0.4U_j} \quad (1)$$

$$U_j = \sqrt{\frac{2P_{bouche}}{\rho}} \quad (2)$$

Ainsi plus la pression dans la bouche est élevée plus la fréquence le sera également. Ce phénomène est particulièrement important aux basses pressions d'alimentation car la vitesse de jet, donnée par la relation de Bernoulli (2), est proportionnelle à la racine carrée de la pression d'alimentation  $P_{bouche}$  ( $\rho$  étant la masse volumique de l'air). Les flûtistes cherchent à éviter ce phénomène en utilisant des doigtés différents pour jouer une même note *piano* et *forte* tout en évitant les variations de fréquence.

## 2.2 Les différents régimes de fonctionnement

### 2.2.1 Les changements de régime

Afin que les oscillations s'auto-entretiennent, la source aéroacoustique doit être synchronisée avec le résonateur et l'amplification doit être suffisante. Cette deuxième condition est facilement satisfaite lorsque la fréquence de fonctionnement est proche d'une fréquence de résonance du résonateur : le gain du résonateur y est suffisamment élevé. Mais lorsqu'elle s'en écarte, le gain apporté par le résonateur diminue, et lorsqu'il n'est plus suffisant pour entretenir les auto-oscillations, la fréquence de jeu de la flûte change brusquement pour se rapprocher d'une autre résonance pour laquelle le gain du résonateur est suffisant.

Il s'agit d'un changement de registre. On observe facilement ce phénomène en soufflant de plus en plus fort dans une flûte à bec. Il se produit à un moment donné un changement brusque de fréquence, la note passe généralement à l'octave supérieure (si le résonateur est harmonique), puis si on continue d'augmenter la pression d'alimentation, à la quinte supérieure, à la quarte supérieure, et ainsi de suite. Les fréquences de fonctionnement de la flûte sont proches des fréquences de résonance du résonateur (sauf toutefois à très faible pression d'alimentation).

Les conditions de synchronisation (de la source et du résonateur) et de gain suffisant peuvent être vérifiées à une même pression d'alimentation pour plusieurs fréquences de jeu différentes. On peut ainsi obtenir plusieurs régimes différents à une même pression d'alimentation suivant les conditions initiales. Cependant, lorsque la flûte est sur un régime donné, elle continue à fonctionner sur ce régime jusqu'à ce qu'il ne puisse plus être observable. On dit alors que ce régime devient instable. Ceci a pour conséquence la présence de phénomènes d'hystérésis dans la flûte. Ils ont l'avantage de permettre aux flûtistes de jouer à la fois *forte* sur le premier registre et *piano* sur le second registre [1].

Le jet d'air peut osciller suivant plusieurs modes hydrodynamiques différents (voir figure 3). La plupart des sons produits par les flûtes correspondent à des oscillations du jet suivant le premier mode hydrodynamique. Il est cependant possible de faire fonctionner une flûte à bec avec des modes hydrodynamiques de jet d'ordre plus élevé. Les sons produits de cette façon sont appelés sons *éoliens* [8]. Il faut pour cela une pression d'alimentation très faible et très stable. Cela est difficile à obtenir en conditions de jeu car la distance *lumière biseau* n'est pas suffisante pour que ces modes aient le temps de se développer, mais c'est néanmoins possible avec un dispositif expérimental approprié [21], [15].

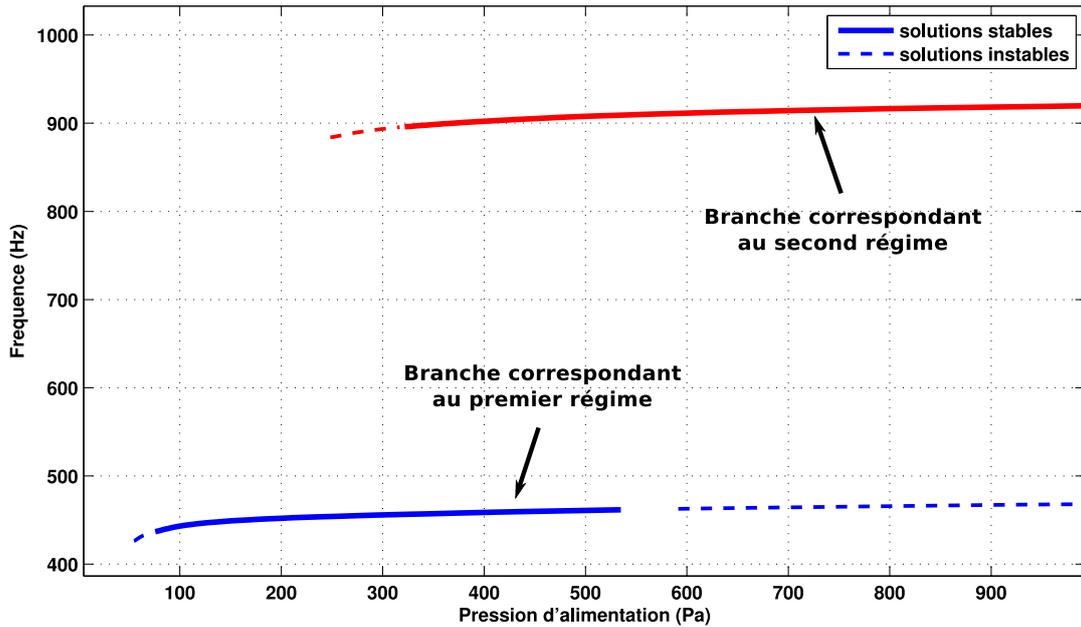


FIGURE 4 – Diagramme de bifurcation en fréquence de jeu pour le doigté de *la grave* d’une flûte à bec alto zen on Bressan calculé en tenant compte de la géométrie de l’instrument avec le logiciel de continuation numérique DDE-Biftool [12] [3].

Lorsque le jet oscille sur le second mode hydrodynamique, le déphasage des perturbations dû à leur convection le long du jet est équivalent au déphasage induit par le premier mode hydrodynamique à une pression d’alimentation plus élevée. Les sons *éoliens* ont donc une fréquence plus élevée que les sons produits avec la même pression d’alimentation avec le premier mode hydrodynamique [1].

### 2.2.2 Diagrammes de bifurcation

Pour décrire le fonctionnement de la flûte, on peut utiliser un *diagramme de bifurcation*. Il s’agit d’un diagramme sur lequel on trace une grandeur caractéristique du fonctionnement de la flûte, comme la fréquence de jeu ou l’amplitude de la pression interne à proximité du *biseau*, en fonction d’un paramètre donné (dans le cadre de ce travail il s’agit de la pression d’alimentation). Ces diagrammes peuvent être obtenus expérimentalement en effectuant une rampe de pression très lente et en extrayant l’amplitude et la fréquence fondamentale de la pression interne enregistrée (voir annexe A) ou par des méthodes de continuation numérique (par exemple [12]) à partir d’un modèle physique de l’instrument (voir figure 4). Ces dernières permettent de suivre les régimes instables ce qui n’est pas possible expérimentalement puisque qu’ils ne sont pas observables.

Les différents régimes de fonctionnement apparaissent comme des *branches*, c’est à dire des portions de courbe. On observe ainsi deux *branches* sur le diagramme de bifurcation présenté dans la figure 4. Celle qui est la plus basse en fréquence correspond au premier registre, et l’autre au second. Ce diagramme de bifurcation a été calculé par Soizic Terrien avec le logiciel de continuation numérique DDE-Biftool [12] à partir de la géométrie d’une flûte alto Zen On Bressan pour le doigté de *la grave*. Les *branches* instables sont tracées en pointillés.

On peut voir sur la figure 4 que le premier et le second registre sont stable simultanément sur une certaine plage de pression. Si la flûte est sur le premier registre et que l’on augmente la pression d’alimentation, elle continue à fonctionner sur ce registre jusqu’à ce qu’il devienne instable. La flûte passe alors sur le second registre (environ 550 Pa sur la figure 4). Si ensuite on diminue la pression d’alimentation, la flûte reste de même sur le second registre jusqu’à ce qu’il devienne instable (vers

300 Pa sur la figure 4). Les pressions de passage du premier au second registre et du second au premier sont donc différentes : on retrouve le phénomène d’hystérésis introduit précédemment. Ces pressions sont appelées *seuils de changement de régime*.

### 2.2.3 Analyse de la stabilité avec la théorie de Floquet

On peut réaliser une étude théorique de la stabilité d’un régime à partir d’un modèle physique de flûte, c’est ce qui a été fait pour le diagramme de bifurcation présenté dans la figure 4. Pour cela il faut utiliser des outils habituellement utilisés pour l’étude des *système dynamiques* comme l’*espace des phases* [4]. Il s’agit d’un espace dans lequel un point décrit complètement l’état d’un système à un instant donné. Dans le cas d’un pendule simple ses dimensions sont la position et la vitesse. Le nombre de dimensions de l’espace des phases dépend du système que l’on étudie. Dans le cas d’une flûte le nombre de dimensions est infini du fait du retard introduit par la convection des perturbation le long du jet : on ne peut pas représenter son fonctionnement avec deux dimensions seulement.

Lorsque le système étudié évolue au cours du temps, les points correspondants aux états successifs forment ce que l’on appelle une *trajectoire*. Dans le cas d’un mode de fonctionnement (ou régime) périodique cette trajectoire est une boucle fermée, appelée *cycle limite*. Ainsi une trajectoire qui arrive suffisamment près de cet objet, également appelé *attracteur*, s’en rapproche et ne pourra jamais s’en éloigner si les caractéristiques du système ne changent pas. Ce *cycle limite* est donc caractéristique d’un régime de fonctionnement du système. Lorsqu’il devient instable les trajectoires qui en étaient très voisines s’en écartent.

Pour étudier la stabilité d’un régime périodique, on peut étudier comment une petite perturbation de la trajectoire évolue au cours d’une période [4] [18]. Si cette perturbation a tendance à augmenter, cela signifie que le régime est instable, sinon on peut considérer qu’il est stable. La théorie de Floquet permet d’estimer cette évolution [16]. Ainsi si on considère une petite perturbation  $Y(t)$  apportée à l’instant  $t$  on pourra connaître sa valeur à l’instant  $t + T$  ( $T$  étant la période des oscillations) grâce à la relation (3) :

$$Y(t + T) = MY(t) \quad (3)$$

Où  $M$  est la matrice de Floquet et  $Y(t)$  et  $Y(t + T)$  sont des vecteurs qui caractérisent la perturbation dans l’*espace des phases* aux instants  $t$  et  $t + T$ . Si on considère une seule dimension  $n$  de l’*espace des phases*, l’évolution de la perturbation suivant cette dimension peut être estimée grâce la relation 4 :

$$y_n(t + T) = y_n(t)e^{\alpha_n T} \quad (4)$$

Où  $\alpha_n$  est l’exposant de Floquet permettant de connaître l’évolution de la perturbation  $y_n$  suivant la dimension  $n$  de l’espace des phases. Les exposants de Floquet sont des nombres complexes. Si leur partie réelle est positive, la perturbation aura tendance à s’accroître, et inversement si elle est négative, à décroître. On peut donc conclure qu’un régime périodique sera stable si les parties réelles de tous ses exposants de Floquet sont inférieures ou égales à 0, et qu’il sera instable si au moins une des parties réelles de ses exposants de Floquet est supérieure à 0. Ce type d’analyse est effectué dans les algorithmes de continuation numérique afin de déterminer la stabilité au sens de Floquet des solutions périodiques trouvées.

## 2.3 Outils numériques et expérimentaux

### 2.3.1 Modèle physique

Les travaux de nombreux chercheurs ont permis au cours du temps de réaliser des modèles physiques de flûte plus ou moins élaborés [14]. Le modèle dit *jet drive* [9] [23] [22] peut être considéré comme le modèle de l’état de l’art. Il décrit les auto-oscillations d’un jet d’air de part et d’autre

du *biseau*. On considère que le jet injecte deux sources de débit en opposition de phase de part et d'autre du *biseau*, ce qui crée une différence de pression. La source aéroacoustique est donc modélisée par un dipôle de pression.

Le fonctionnement de la flûte peut être décomposé en trois parties :

- Une partie correspondant à l'amplification et à la convection des perturbations le long du jet décrite par l'équation (5). La variable  $\eta$  représente le déplacement transversal du jet au niveau du *biseau* par rapport au centre du canal, il est exprimé en fonction de l'épaisseur du canal  $h$ , de la distance *lumière biseau*  $W$  (voir figure 1), de la vitesse du jet  $U_j$ , de la vitesse acoustique  $v_{ac}$ , du retard de propagation des perturbations  $\tau$  et du facteur d'amplification exponentielle des perturbations  $\alpha_i$ .

$$\eta(t) = \frac{h}{U_j} e^{\alpha_i W} v_{ac}(t - \tau) \quad (5)$$

- Une seconde partie décrivant l'interaction *jet-biseau* qui donne naissance à la source aéroacoustique. La différence de pression entre les deux source est donnée en fonction du déplacement transversal du jet  $\eta(t)$  par l'équation (6) où  $\rho$  représente la masse volumique de l'air,  $b$  la demi épaisseur du jet,  $\delta_d$  la distance entre les deux sources et  $y_0$  le décalage entre l'arrête du *biseau* et le centre du canal.

$$\Delta p(t) = \frac{\rho b U_j \delta_d}{W} \frac{d}{dt} \left( \tanh \left( \frac{\eta(t) - y_0}{b} \right) \right) - \frac{\rho}{2} \left( \frac{v_{ac}}{0,6} \right)^2 \text{sign}(v_{ac}(t)) \quad (6)$$

- Une dernière partie permet de décrire l'effet du résonateur. Pour cela on s'appuie sur une décomposition modale, décrite par les coefficients  $a_n$ ,  $\omega_n$  et  $Q_n$ , de l'admittance du résonateur à proximité du *biseau* pour connaître la vitesse acoustique  $V_{ac}$  à partir de la différence de pression  $\Delta P(\omega)$  (7).

$$V_{ac}(\omega) = \sum_n \frac{a_n j \omega}{\omega_n^2 - \omega^2 + j \omega \frac{\omega_n}{Q_n}} \Delta P(\omega) \quad (7)$$

Ce modèle a été implémenté dans Simulink et DDE-Biftool par Soizic Terrien. Pour cela, les caractéristiques géométriques de la flûte utilisée pour effectuer les expériences (une flûte alto Zen On Bressan) ont été mesurées précisément. L'admittance du résonateur a ensuite été calculée avec le logiciel WIAT [17] puis un programme d'optimisation a permis d'ajuster les coefficients  $a_n$ ,  $\omega_n$  et  $Q_n$  de la représentation modale. Simulink permet de réaliser des simulations temporelles en faisant varier des paramètres au cours du temps, et DDE-Biftool permet de calculer des solutions périodiques du modèle pour des jeux de paramètres donnés, par continuation numérique, et ainsi d'obtenir des diagrammes de bifurcation (voir figure 4).

Les sons obtenus par simulation numérique avec Simulink sont réalistes, et permettent d'observer des changements de régime comme avec une flûte réelle. Cependant ce modèle présente l'inconvénient de beaucoup surestimer l'amplitude des sons *éoliens*, ce qui peut être gênant pour certaines simulations. D'autre part certains paramètres du modèle, comme la distance  $\delta_d$  entre les deux sources de débit sont difficiles à estimer. Il est donc difficile de comparer quantitativement les résultats de simulations ou les diagrammes de bifurcations obtenus avec ce modèle avec les données expérimentales. Il est cependant possible d'effectuer des comparaisons qualitatives.

### 2.3.2 Dispositif expérimental

Un dispositif expérimental permettant de faire fonctionner une flûte avec une pression d'alimentation contrôlée en temps réel [15] a été utilisé au cours de ce stage pour générer des profils de variations de pression particuliers comme des rampes linéaire.

La flûte est fixée à une bouche artificielle qui est alimentée par un réseau d'air comprimé dont la pression est régulée par une électrovanne (voir figure 5). Un ordinateur et une carte de calcul en temps réel permettent d'effectuer la régulation de la pression et de gérer l'acquisition des signaux.

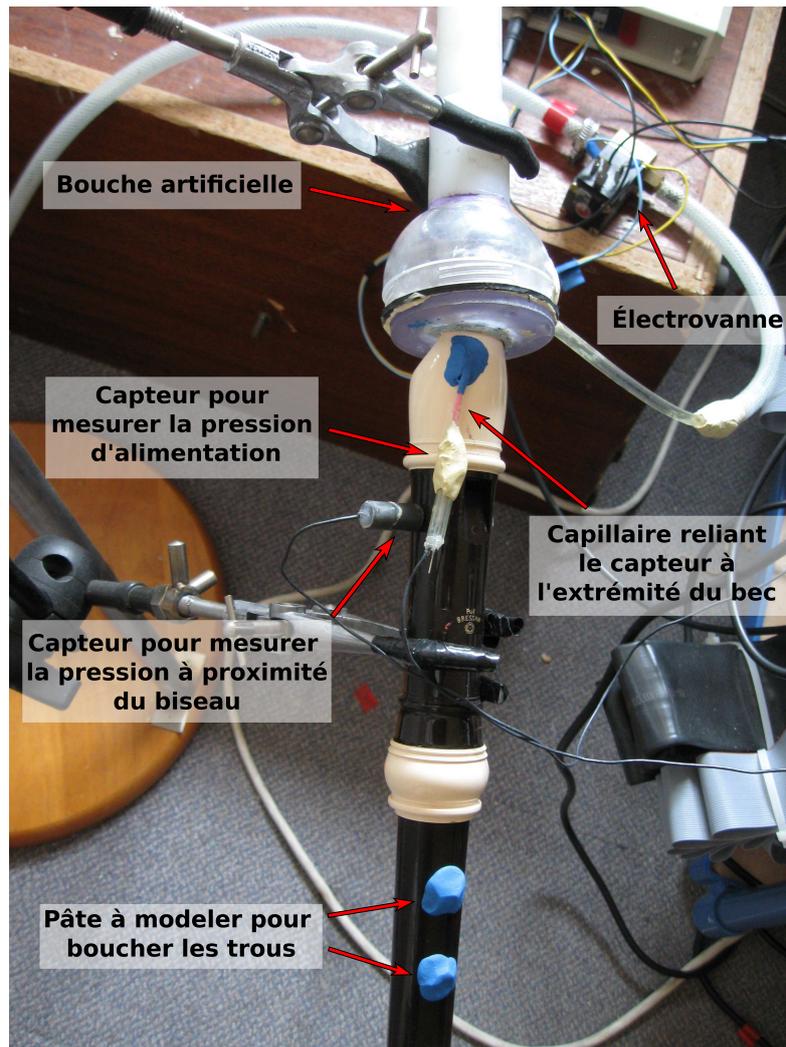


FIGURE 5 – Dispositifs expérimental utilisé.

Pour cela un capteur mesure la pression à l'extrémité du bec de la flûte par l'intermédiaire d'un capillaire. L'écart entre la pression souhaitée à un instant donné et la pression réelle dans la bouche artificielle est évalué, et une correction de l'ouverture de l'électrovanne est calculée par la carte de calcul en temps réel afin d'obtenir le profil de pression prédéfini. Un second capteur mesure la pression à proximité du *biseau* de la flûte.

**Position du problème :** ce que l'on connaît actuellement du fonctionnement de la flûte repose pour l'essentiel sur l'hypothèse que les paramètres de contrôle varient suffisamment lentement pour que l'on puisse considérer que l'on est dans un cas quasi-statique. Cependant le jeu des musicien repose sur les variations de ces paramètres au cours du temps. Il est donc probable que le fonctionnement de la flûte soit dans ce contexte différent par rapport au cas statique. L'objectif de ce travail est d'étudier l'influence des variations temporelles de la pression d'alimentation et d'essayer de savoir si les musiciens les utilisent pour modifier le fonctionnement de leur instrument.

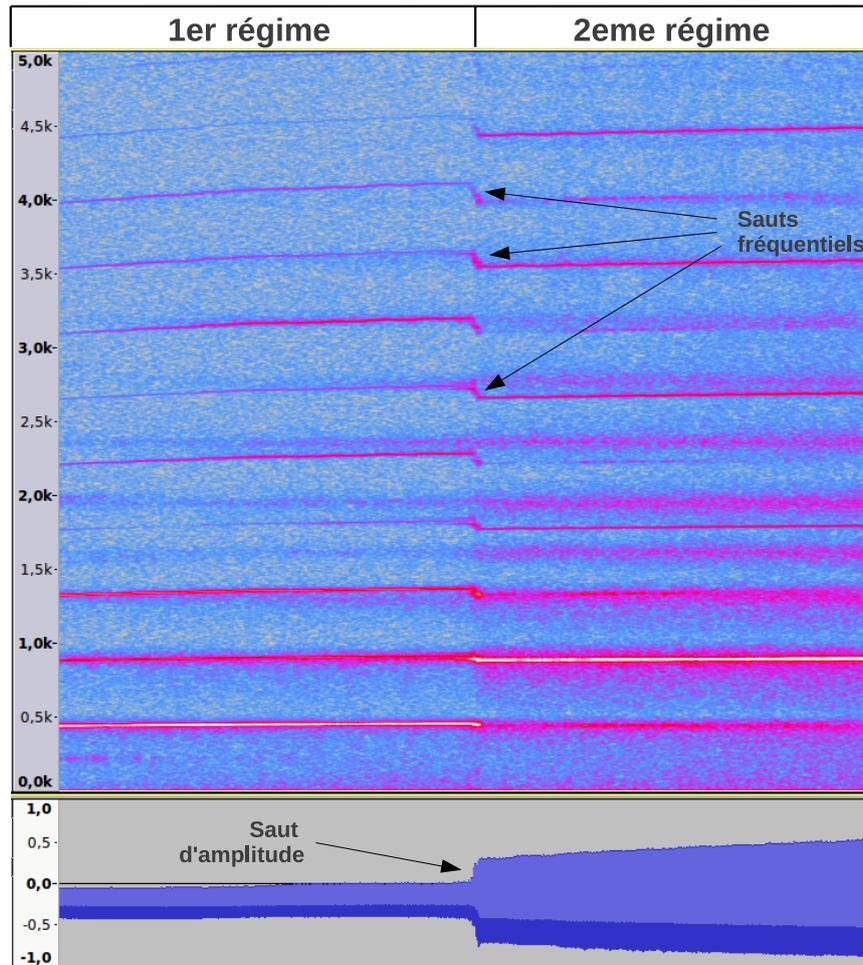


FIGURE 6 – Spectrogramme et signal temporel d’un son de flûte tracés avec le logiciel Audacity. Le spectrogramme a été calculé avec des fenêtres de Hanning de 4096 échantillons. La fréquence d’échantillonnage est de 20 kHz.

### 3 Étude de l’effet de la dynamique de pression avec une bouche artificielle et un modèle Simulink

#### 3.1 Détection des changements de régime

Lorsque l’on écoute un son de flûte, les changements de régime se caractérisent par un brusque changement de fréquence fondamentale. Ils semblent donc à première vue assez simple à détecter, et une automatisation de la détection semble envisageable. Pour cela il suffit d’utiliser un algorithme d’estimation de la fréquence fondamentale et de détecter les changements brusques en repérant les maxima de la dérivée de la fréquence fondamentale en fonction du temps. D’autre part, les sons de flûte étant pour la plupart périodiques, et le premier harmonique ayant généralement l’amplitude la plus élevée, l’estimation de la fréquence fondamentale est dans la plupart des cas assez fiable.

Pour cela deux algorithmes d’estimation de la fréquence fondamentale ont été testés :

- le produit spectral [19]
- la méthode *yin* développée par Alain De Cheveigné et Hideki Kawahara [10]

Ces méthodes permettent effectivement de détecter des changements de régime, mais elles ne sont pas suffisamment précises, et dans certains cas elles échouent. Cela peut paraître surprenant au vu des arguments présentés précédemment en leur faveur.

Cela est dû au fait que les changements de régimes sont fréquemment précédés par des régimes

*quasipériodiques* appelés sons *multiphoniques* ou sons de roulement par les musiciens. Ces sons se caractérisent par la présence dans leur spectre de deux composantes fréquentielles  $f_1$  et  $f_2$  dont le rapport n'est pas harmonique, de leurs sommes ( $f_1 + f_2, f_1 + 2f_2, 2f_1 + f_2, \dots$ ) et de leurs différences ( $f_1 - f_2, f_1 - 2f_2, 2f_1 - f_2, \dots$ ). Lorsque l'on écoute ces sons on perçoit les deux composantes éventuellement accompagnées d'un phénomène de battement. Pour certains doigtés le second régime n'est pas périodique. C'est le cas en particulier des doigtés dits de fourche (comportant un ou plusieurs trous fermés après un trou ouvert) comme ceux de *si* et *si bémol* pour lesquels le second régime est *quasipériodique*.

Ces sons ne sont pas périodiques et mettent donc en défaut les méthodes d'estimation de la fréquence fondamentale. Les instants correspondant aux changements de régime ne sont donc pas repérés précisément, et dans le cas des doigtés pour lesquels le second régime est *quasipériodique*, il peut arriver qu'il ne soient pas du tout détectés.

C'est pourquoi une approche manuelle a été envisagée : le signal temporel et le spectrogramme du son de flûte à analyser sont tracés avec le logiciel Audacity et les changements de régime sont repérés par rapport à certains critères. Ces changements se caractérisent par une variation brusque de l'amplitude du signal temporel et un saut de la fréquence des partiels. Si on suit un partial donné sur le spectrogramme d'un son de flûte, on constate qu'au moment des changements de régimes sa fréquence varie brusquement (voir figure 6). Le saut fréquentiel n'est pas toujours très important et il est dans certains cas difficile à observer. Il s'avère être cependant le critère qui permet de repérer des changements de régime le plus précis. Tous les changements de régimes étudiés dans les expériences et les simulations ont été repérés manuellement.

## 3.2 Comparaison de différents profils de variation de pression

### 3.2.1 Étude de l'effet de la pente de rampes de pression d'alimentation sur les seuils de changement de régime et le retard au changement de régime

Afin d'étudier l'effet de la dynamique de pression d'alimentation sur les seuils de changement de régime, une première expérience a consisté à étudier l'influence de la pente de rampes de pression d'alimentation sur les seuils de changement de régime. Pour cela des rampes de pression de différentes pentes ont été réalisées avec la bouche artificielle. Les valeurs des seuils de changement de régime ont ensuite été relevées. Pour éviter que les mesures ne soient perturbées par les fluctuations locales de la pression d'alimentation, la pression de changement de régime a été estimée à partir de la moyenne du signal de pression d'alimentation sur une courte fenêtre centrée sur l'instant du changement de régime.

La taille de cette fenêtre a été évaluée en l'augmentant progressivement jusqu'à ce que la moyenne de la pression d'alimentation varie suffisamment peu pour qu'on puisse considérer l'influence du bruit comme négligeable. La taille de fenêtre ainsi déterminée est d'environ 300 échantillons pour une fréquence d'échantillonnage de 20 KHz soit 15 ms.

Les pentes effectives des rampes ont été estimées en effectuant une régression linéaire sur les portions du signal de pression d'alimentation correspondant aux rampes (les différentes rampes étaient séparées par des plages de pression constante afin de laisser le temps à la flûte et au système de régulation de se stabiliser). D'une manière générale les pentes des rampes obtenues sont assez proches des pentes demandées par la consigne sauf pour les pentes les plus rapides (à partir de 400 Pa/s environ).

Les mêmes rampes ont été simulées avec le modèle Simulink. Les résultats obtenus sont présentés sur la figure 7. Les pentes positives correspondent au passage du premier régime au second, et les négatives au passage du second au premier. On peut voir que plus la pente est grande plus le seuil de changement de régime est élevé. Plus l'évolution de la pression d'alimentation est rapide, plus le seuil de changement de régime s'écarte du seuil statique (défini comme le seuil de changement de régime pour une pente très faible). Pour les pentes négatives il y a une différence de plus 50 Pa entre l'évolution la plus lente et l'évolution la plus rapide, ce qui représente plus de 20% de la valeur du

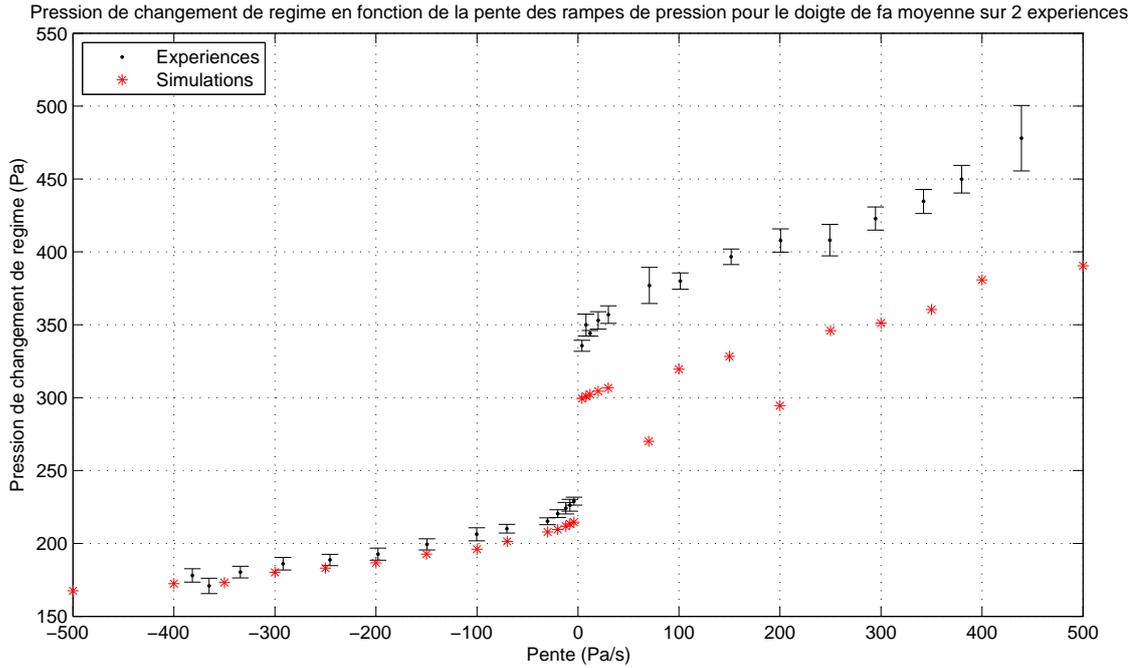


FIGURE 7 – Seuils de changement de régime obtenus expérimentalement et par simulation avec un modèle Simulink pour des rampes linéaires de différentes pentes. Les valeurs expérimentales sont moyennées sur trois expériences réalisées sur une flûte Zen On Bressan avec le doigté de fa grave.

seuil statique (228 Pa). La différence est encore plus importante pour les pentes positives : il y a un écart de plus de 100 Pa entre la pente la plus faible et la plus rapide, ce qui représente environ 30% de la valeur du seuil statique (335 Pa). Les variations des valeurs des seuils sont plus importantes pour les faibles pentes. On retrouve également l’effet d’hystérésis décrit pour le cas statique dans la figure 4 au changement de signe de la pente : il y a un saut de la valeur des seuils.

Les seuils obtenus avec le modèle sont relativement proches des seuils obtenus expérimentalement, ce qui est assez inattendu car ce modèle simplifie beaucoup le fonctionnement de la flûte et certains paramètres (comme la distance entre les deux sources) sont difficiles à estimer. Les valeurs obtenues pour le passage du second registre au premier sont particulièrement proches des valeurs expérimentales : l’écart relatif entre les deux valeurs ne dépasse pas 7 %. D’autre part le modèle, même si il ne donne pas exactement les mêmes valeurs de seuil, a le même comportement que la vraie flûte : plus les variations de pression d’alimentation sont rapides, plus le seuil de changement de régime s’éloigne du seuil statique.

Deux valeurs de seuils issues des simulations sont très écartées des autres pour les pentes croissantes. Cela est dû au fait que le modèle amplifie beaucoup les amplitudes des sons *éoliens* vis à vis des sons réels de flûte. Dans les simulations correspondant à ces deux points le premier régime fait une apparition très brève car il est précédé par un son *éolien*, et le seuil de changement de régime se trouve décalé.

Les mêmes expériences ont été réalisées sur d’autres doigtés : sol, la, si bémol et si (voir figure 8). Les mesures ne sont issues que d’une seule expérience et seulement 12 pentes différentes ont été réalisées. Le point obtenu avec la pente la plus importante pour le doigté de *la* est très écarté des autres. On suppose qu’il y a eu une erreur de mesure pour ce point, il n’a pas été pris en compte dans les analyses. Le doigté de si bémol se distingue des autres par le fait qu’il ne présente pas de phénomène d’hystérésis. Cette particularité se retrouve d’ailleurs dans ses diagrammes de bifurcation expérimentaux (voir figure 34 et 35 de l’annexe A). On retrouve un comportement similaire à celui du doigté de fa : plus les pentes des rampes sont élevées en valeur absolue, plus le seuil de changement de

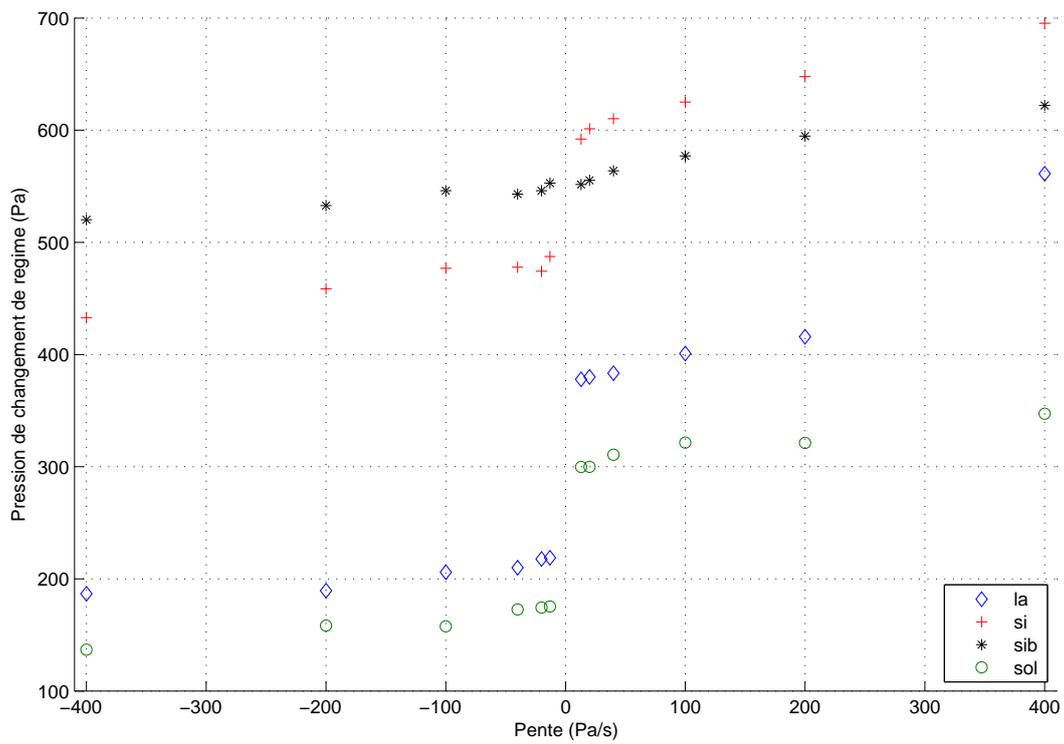


FIGURE 8 – Seuils de changement de régime obtenus expérimentalement pour des rampes linéaires de différentes pentes. Les valeurs sont issues d’une seule expérience réalisée sur une flûte Zen On Bressan avec les doigtés de *sol*, *la*, *si bémol* et *si graves*.

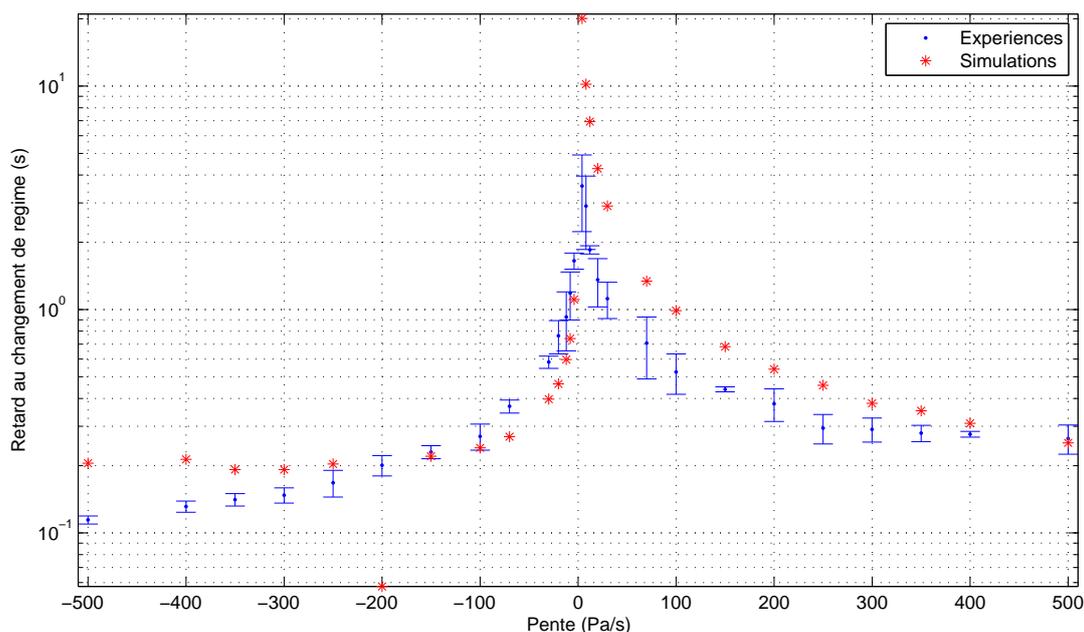


FIGURE 9 – Retard au changement de régime mesuré pour des rampes de pression d’alimentation de pentes différentes sur une flûte alto Zen On Bressan avec le doigté de *fa* grave, et sur des simulations effectuées avec un modèle Simulink.

régime s’écarte du seuil statique. Il semble donc que ce comportement soit généralisable à l’ensemble des doigtés de la flûte.

En plus du seuil de changement de régime, le retard au changement de régime a également été extrait des expériences et des simulations. Il s’agit de l’intervalle de temps entre le passage au seuil statique (estimé à partir de la rampe la plus lente) et le changement de régime effectif. L’instant correspondant au passage du seuil statique est déterminé en repérant dans le signal de pression d’alimentation la première valeur supérieure au seuil statique et la dernière valeur inférieure au seuil statique et en calculant la moyenne des deux temps correspondants. Les résultats de cette analyse sont présentés sur la figure 9.

On observe pour les mesures et pour les simulations que plus la pente des rampes est élevée, plus le retard au changement de régime est faible. Ainsi pour les rampes les plus rapides ce retard est inférieur à 200 millisecondes alors que pour les rampes les plus lentes il s’approche de 4 secondes. Avec les simulations ce retard dépasse 20 secondes pour la rampe croissante la plus longue. On peut donc conclure que plus les variations de pression sont lentes, plus le retard au changement de régime est important. Ce retard devient particulièrement important pour les rampes de très faible pente.

Pour une même pente en valeur absolue, le retard au changement de régime est différent pour le passage du premier au second régime et pour le passage du second au premier régime. D’une manière générale le retard mesuré pour le passage du premier au second registre (ce qui correspond aux pentes positives) est approximativement le double de celui mesuré pour le passage du second régime au premier (ce qui correspond aux pentes négatives).

**Conclusion :** les résultats obtenus pour le seuil de changement de régime confirment les observations précédentes [20] sur plusieurs doigtés en les affinant et montrent que la dynamique de pression peut permettre de modifier les seuils de changement de régime de manière significative à l’échelle du musicien. Plus les variations de pressions sont rapides plus le seuil de changement de régime s’éloigne du seuil statique. D’autre part on retrouve un comportement identique à celui du seuil d’oscillation de la clarinette [5] [7]. Un autre effet de la dynamique de pression sur les changements

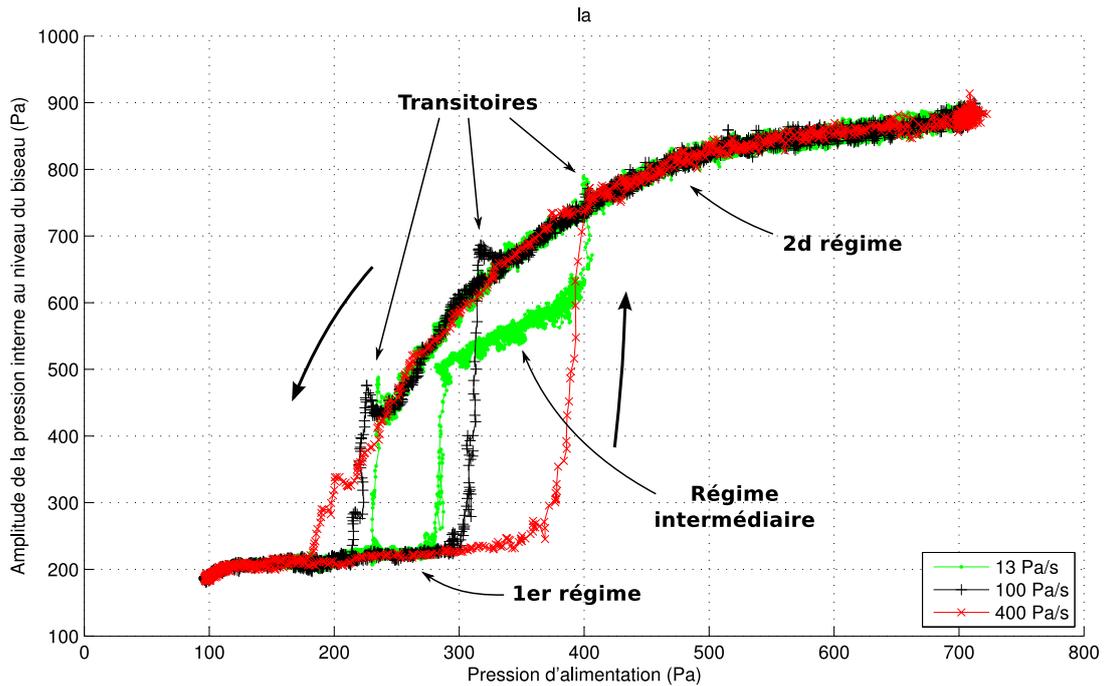


FIGURE 10 – Diagrammes de bifurcations en amplitude de la pression interne au niveau du *biseau* tracés à partir de 3 rampes de pression de respectivement 13 Pa/s, 100 Pa/s et 400 Pa/s effectuées sur le doigté de *la* grave d’une flûte à bec alto Zen On Bressan.

de régime a été observé : le retard au changement de régime. L’analyse des mesures expérimentales et des simulation ont permis de montrer que ce retard est d’autant plus important que la pentes des rampes de pression est faible (en valeur absolue).

### 3.2.2 Évolution du diagramme de bifurcation en fonction de la pente de rampes linéaires

Le suivi de seuils de changement de régime permet de savoir comment évolue un point particulier du diagramme de bifurcation. Pour savoir si d’autres changements que le décalage des seuils de bifurcations interviennent lorsque la pression d’alimentation varie, des diagrammes de bifurcation expérimentaux ont été tracés à partir de 3 rampes de pression de 13 Pa/s, 100 Pa/s et 400 Pa/s (voir figure 10). La première peut être considérée comme un cas quasi-statique.

Les changements de régime correspondent aux changements brusques d’amplitude. On observe comme précédemment que plus la pente des rampes est élevée, plus les seuils de changement de régime s’éloignent des seuils statiques. D’une manière générale les amplitudes obtenues pour les deux rampes rapides ne s’écartent pas de manière significative de celles obtenue avec la rampe la plus lente à l’exception cependant des effets des transitoires lors des changements de régimes. Ceux-ci se manifestent par des augmentations locales d’amplitude juste avant ou juste après le changement brusque d’amplitude. Ils sont particulièrement visibles aux alentours de 200 Pa, 300 Pa et 400 Pa sur la branche supérieure (voir figure 10).

Pour la rampe la plus lente un régime intermédiaire entre le premier et le second régime existe. Il se manifeste par la présence d’une troisième branche située entre les branches du premier et du second régime. Pour les deux autres rampes cette branche n’existe pas. On peut en conclure qu’un effet de la dynamique est qu’elle peut permettre d’accéder à un régime sans nécessairement passer par tous les régimes stables qui existent entre le régime de départ et le régime d’arrivée. Les flûtistes se servent probablement de cet effet pour accéder directement à certains régimes sans passer par les

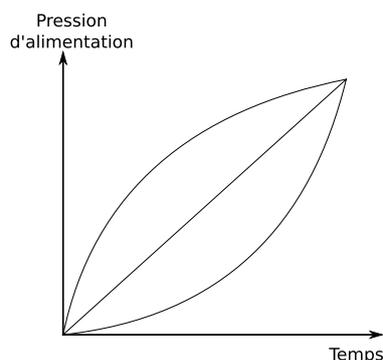


FIGURE 11 – Trois types de variations de pression d'alimentation allant d'une même pression d'alimentation initiale à une même pression d'alimentation finale en un même temps.

régimes intermédiaires.

On observe que lorsque les variations de pression d'alimentation sont plus rapides, les branches correspondant aux différents régimes se trouvent prolongées. Ainsi la branche correspondant au premier régime (celle dont l'amplitude est la plus faible et qui débute vers 100 Pa) s'étend jusqu'à un peu en dessous de 300 Pa pour la rampe la plus lente, puis jusqu'à 300 Pa pour la rampe de 100 Pa/s et au delà de 350 Pa pour la rampe la plus rapide. Les branches s'étendent vraisemblablement dans des domaines de pression d'alimentation où les régimes correspondants sont instables. D'autre part, à l'exception des transitoires liés aux changements de régimes, les branches ne sont pas déformées.

Les mêmes observations, à l'exception des effets des transitoires, ont été faites sur les diagrammes de bifurcation en fréquence (voir annexe A figure 38). On y observe également une branche intermédiaire qui a une fréquence inférieure à celle du premier régime.

**Conclusion :** il apparaît donc que dans le cas où la pression d'alimentation varie, le fonctionnement de la flûte suit le diagramme de bifurcation statique en s'en écartant un peu lors des transitoires de changements de régime et en évitant éventuellement certaines branches. Lorsque le point de fonctionnement parvient à l'extrémité d'une branche stable, il semble la poursuivre dans sa partie instable jusqu'à ce que le changement de régime ait lieu. La dynamique de pression d'alimentation permettrait donc d'explorer expérimentalement des parties instables du diagramme de bifurcation statique.

### 3.2.3 Comparaison de différents profils de variation de la pression d'alimentation

Les musiciens expérimentés ne font pas varier la pression d'alimentation de la flûte de façon linéaire [20]. Cela suggère que le profil des variations de la pression d'alimentation a une influence sur le seuil de changement de régime et le retard temporel au changement de régime. Pour vérifier cette hypothèse, on a choisi de comparer trois profils de variations de pression allant d'une même pression de départ à une même pression d'arrivée en un même temps mais en empruntant un chemin différent (voir figure 11). L'expérience a été répétée pour différentes durées et donc avec des variations de pression d'alimentation plus ou moins rapides. Ces variations étaient toujours séparées par des intervalles de temps durant lesquels la pression d'alimentation était constante afin de laisser le temps à la flûte et au système de régulation de se stabiliser. Dans chacun des cas le doigté utilisé est celui de *fa grave*.

Les mesures faites pour les rampes sont les mêmes que celles utilisées pour étudier l'effet de la pente. Elles sont donc moyennées sur trois expériences. Les mesures faites avec les profils en racine carrée ont été moyennées sur deux expériences. Et une seule expérience a été faite pour les profils en exponentielle, le manque de temps n'ayant pas permis d'en faire davantage.

Les valeurs des seuils de changement de régime et de retard au changement de régime ont été extraites des données expérimentales (voir annexe B). Elles diffèrent suivant les profils de variations

de pression utilisés.

On constate ainsi que pour le passage du premier au second régime les profils exponentiels sont ceux qui permettent d'obtenir les seuils de changement de régime les plus élevés. À l'inverse les profils en racine carrée sont ceux pour lesquels les seuils sont les plus bas, pour les variations rapides en tout cas (d'une durée inférieure à 10 secondes). Pour une durée donnée l'écart entre le seuil le plus élevé et le seuil le plus bas est d'autant plus grand que la durée des variations est courte. Cet écart peut atteindre des valeurs de l'ordre de 100 Pa, soit un écart relatif de 25 %.

Pour le passage du second régime au premier les différences entre les valeurs des seuils obtenus avec les différents profils sont moins importantes : l'écart maximal est d'environ 50 Pa. Mais l'écart relatif vaut presque 40 %. Les profils exponentiels sont dans ce cas ceux qui permettent d'obtenir les seuils les plus bas, et les profils en rampe sont ceux qui permettent d'obtenir les seuils les plus élevés. Comme pour le passage premier vers second régime, les différences entre les profils sont d'autant plus marquées que les variations sont rapides.

**Conclusion :** les profils exponentiels sont donc ceux qui permettent de s'éloigner le plus du seuil statique, et plus les variations de pression sont rapides, plus l'écart entre les seuils obtenus avec les différents profils est important. D'autre part on retrouve le fait que, quel que soit le profil utilisé, plus les variations de pression sont rapides plus on s'éloigne du seuil statique.

Si on considère le retard temporel au changement de régime, dans le cas du passage du premier régime au second, les profils exponentiels sont ceux pour lesquels ce retard est le plus court et les profils en racine carrée sont ceux qui permettent d'obtenir les retards les plus importants. À l'inverse du seuil de changement de régime, plus les variations de pression d'alimentation sont lentes, plus l'écart entre les retards obtenus avec les différents profils est important. Cet écart peut atteindre des valeurs de l'ordre de 4 secondes, et le retard maximal est de plus de 6 secondes.

Pour le passage du second régime au premier, les profils en exponentiels sont encore ceux pour lesquels le retard est le plus court. En revanche, ce sont les rampes qui dans ce cas permettent d'obtenir les retards les plus importants. Comme précédemment, l'écart entre les différents profils est d'autant plus important que les variations de pression sont longues.

Les profils en racine carrée sont, dans le cas du passage du premier régime au second, ceux qui permettent d'obtenir les retard temporel au changement de régime les plus importants. Et dans le cas du passage du second régime au premier ce sont les rampes. D'une manière générale, quel que soit le profil utilisé, le retard au changement de régime est d'autant plus important que les variations de pression sont lentes.

**Conclusions :** les résultats obtenus avec ces comparaisons de profils de variations de pression permettent d'établir des premières conclusions sur la manière dont les flûtistes pourraient utiliser la dynamique de pression d'alimentation pour jouer le plus fort possible sans changer de registre. On peut ainsi penser qu'un flûtiste utilisera un profil de variation de pression d'allure exponentielle si il veut jouer le plus fort possible sans changer de régime, mais cela ne lui permettrait pas à priori de jouer longtemps sans changer de registre. Si il veut jouer le plus longtemps possible le plus fort possible, il devrait plutôt utiliser un profil d'allure en racine carrée. D'autre part on peut généraliser les résultats obtenus avec les rampes : plus les variations de pression d'alimentation sont rapides, plus le seuil de changement de régime sera éloigné du seuil statique et plus le retard au changement de régime sera court.

### 3.3 Influence de l'évolution précédant le passage du seuil statique

#### 3.3.1 Influence de la pression initiale

Lorsque l'on effectue un changement de régime avec une flûte on part d'une pression d'alimentation initiale que l'on fait ensuite varier jusqu'à ce que le changement ait lieu. Pour tester

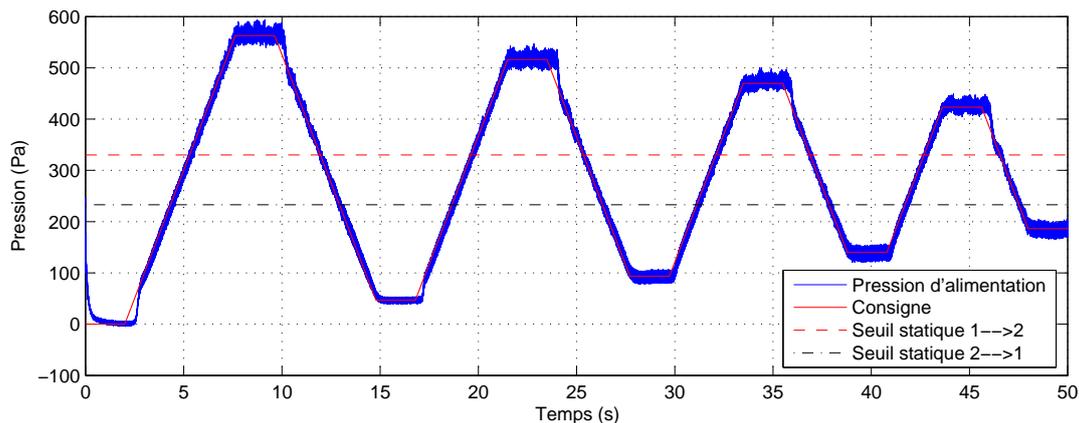


FIGURE 12 – Pression d'alimentation utilisée pour étudier l'influence de la pression initiale sur la valeur du seuil de changement de régime. Des rampes de pente identique sont réalisées à partir de pressions d'alimentation initiales différentes.

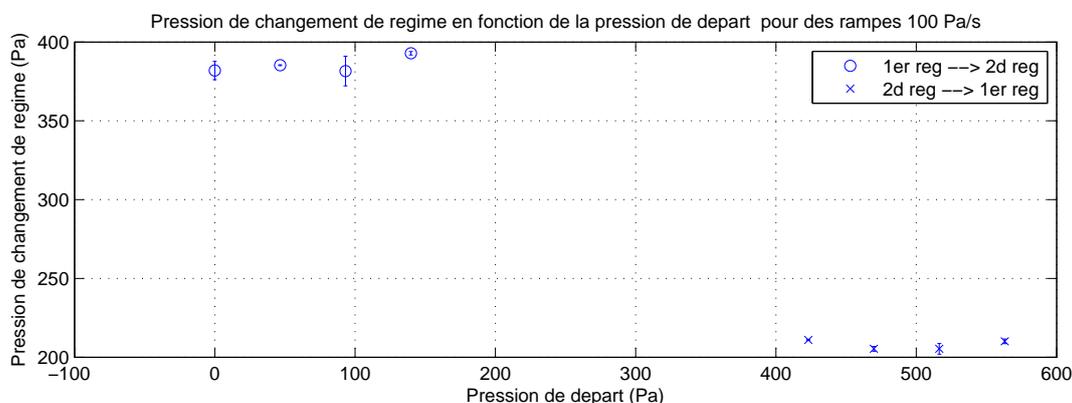


FIGURE 13 – Seuils de changement de régime en fonction de la pression d'alimentation initiale, obtenus avec des rampes de 100 Pa/s. Les valeurs sont moyennées sur 3 expériences faites sur le doigté de *fa* grave d'une flûte à bec alto Zen On Bressan.

expérimentalement si cette pression d'alimentation initiale a une influence sur la valeur des seuils de changement de régime, des rampes de pentes identiques (100 Pa/s) mais ayant des points de départ différents ont été générées avec la bouche artificielle. Les pressions initiales des rampes ont été choisies avec un écart par rapport aux seuils statiques de changement de régime de plus en plus petit (voir figure 12). Cette expérience a été répétée trois fois. Les seuils de changement de régime ont été relevés manuellement et une valeur moyenne a été calculée pour chaque pression d'alimentation initiale (voir figure 13).

On observe que pour les pentes croissantes et décroissantes, le seuil de changement de régime varie peu en fonction de la pression initiale des rampes. L'écart maximal entre les valeurs ne dépasse pas 12 Pa pour les pentes croissantes (soit moins de 4% de la valeur moyenne) et l'écart type maximale pour une pression initiale donnée est de 20 Pa. Pour les pentes décroissantes l'écart maximal entre les valeurs ne dépasse pas 6 Pa (soit moins de 3% de la valeur moyenne) et l'écart type maximal pour une pression initiale donnée est de 7 Pa. Les variations des valeurs de seuils en fonction de la pression initiale sont donc inférieures aux variations dues aux incertitudes de mesures. On ne peut donc pas conclure que la pression initiale a une influence déterminante sur le seuil de changement de régime.

Les expériences ont été reproduites en simulation avec le modèle Simulink (voir figure 14). Les variations des valeurs des seuils obtenus en fonction de la pression initiale ne dépassent pas 1 Pa pour

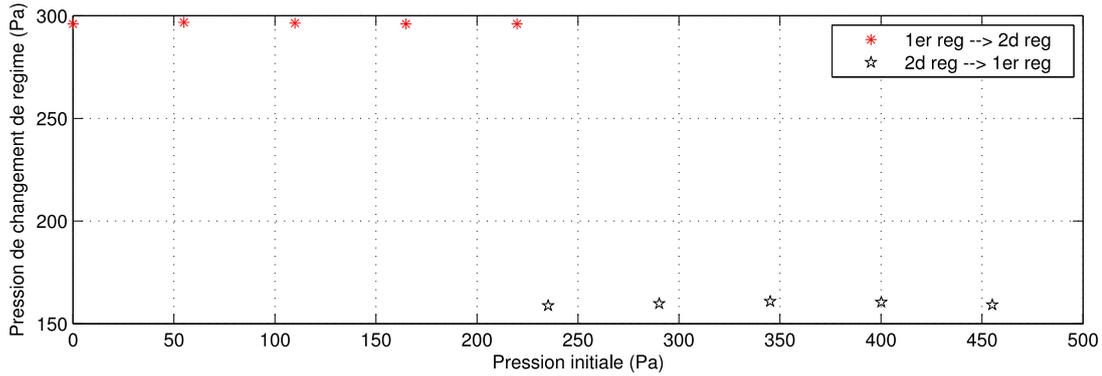


FIGURE 14 – Seuils de changement de régime en fonction de la pression d’alimentation initiale, obtenus par simulation avec un modèle Simulink de flûte pour des rampes de 100 Pa/s. L’admittance du résonateur est celle d’un tube cylindrique.

les pentes croissantes et 2 Pa pour les pentes décroissantes. On peut donc conclure, comme pour les expériences que la valeur des seuils de changement de régime est très peu sensible à la pression initiale.

Cette indépendance du seuil de changement de régime vis à vis de la pression initiale peut être expliquée par la présence de bruit de turbulence dans la flûte. Une explication identique a été formulée pour l’indépendance du seuil d’oscillation de la clarinette vis à vis de la pression initiale dans le cas où du bruit est présent [6]. Pour les simulations les petits écarts entre les valeurs des seuils peuvent également être attribués à l’influence du bruit. La présence de bruit dans les simulations peut paraître surprenante, mais elle s’explique en fait par les erreurs d’arrondi dues à l’échantillonnage des valeurs. Avec une précision numérique suffisamment élevée (quelques milliers de chiffres significatifs), il est possible d’observer une dépendance du seuil de changement de régime vis à vis de la pression d’alimentation initiale. Cet effet a déjà été observé avec un modèle numérique de clarinette [5], [6].

### 3.3.2 Effet des variations de pression précédant le passage du seuil statique.

Les expériences et les simulations faites pour évaluer l’influence de la pression initiale ont permis de mettre en évidence l’indépendance du seuil de changement de régime vis à vis de ce paramètre. On peut cependant se demander si les variations de pression précèdent le passage du seuil statique ont un effet sur le seuil de changement de régime. Pour cela des rampes présentant un changement de pente (300 Pa/s puis 30 Pa/s) à une pression donnée ont été générées avec la bouche artificielle. L’expérience a été répétée pour plusieurs pressions de changement de pente situées en dessous et au dessus du seuil statique (voir figure 15). Pour chaque pression de changement de pente l’expérience a été répétée trois fois. Le seuil de changement de régime a ensuite été relevé dans chacun des cas (voir figure 16).

Pour les rampes croissantes, on observe que tant que le changement de pente se situe en dessous du seuil statique, la pression de changement de régime reste à peu près constante. Sa valeur est celle qui correspond à une rampe de pente constante de 30 Pa/s (environ 370 Pa), c’est donc la seconde pente qui détermine le seuil de changement de régime. Puis quand la pression de changement de pente dépasse le seuil statique, le seuil de changement de régime augmente progressivement jusqu’à atteindre la valeur correspondant à une rampe de pente constante de 300 Pa/s (environ 410 Pa). Lorsque le changement de pente est suffisamment éloigné du seuil statique, c’est la première pente qui détermine le seuil de changement de régime.

On observe un comportement similaire pour les rampes décroissantes : tant que le changement de pente a lieu au dessus du seuil statique, c’est la deuxième pente (30 Pa/s) qui détermine la valeur du seuil de changement de régime (220 Pa environ). Lorsque la pression de changement de pente passe en dessous du seuil statique, le seuil de changement de régime passe progressivement de la

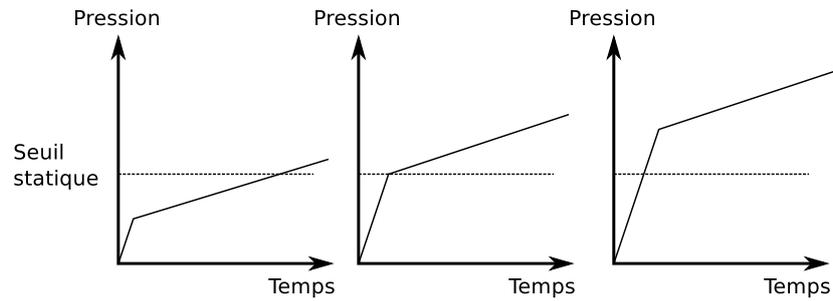


FIGURE 15 – Consignes de pression d’alimentation utilisées pour évaluer l’influence des variations de pression d’alimentation précédent le passage du seuil statique de changement de régime. Un changement de pente est effectué à diverses pressions d’alimentation situées en dessous et au dessus du seuil statique.

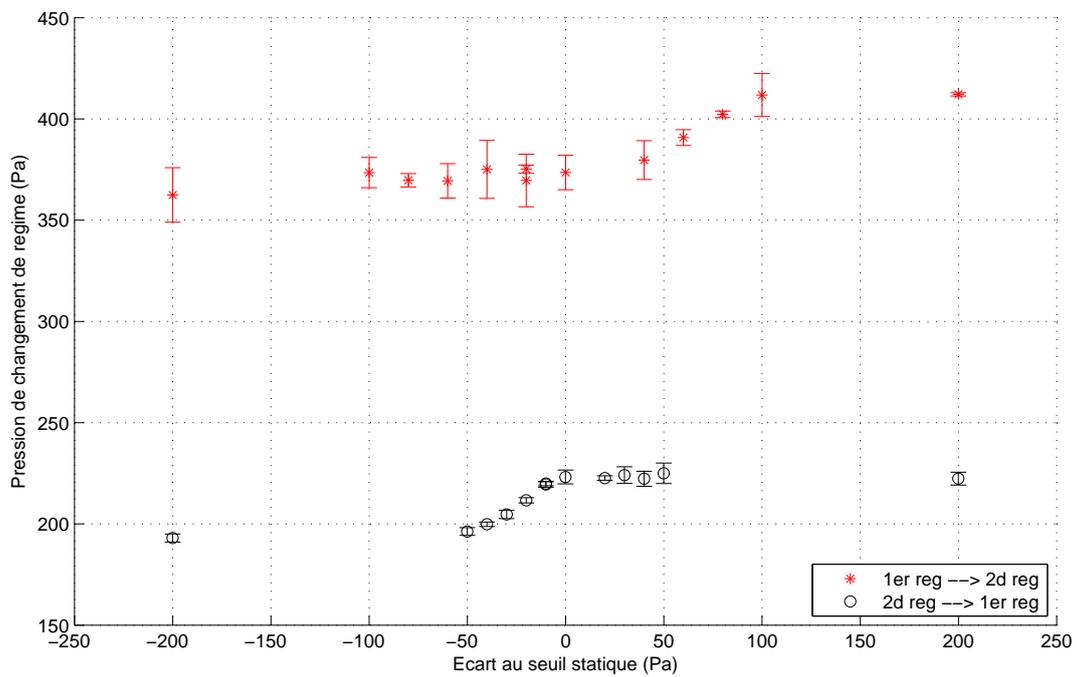


FIGURE 16 – Seuils de changement de régime en fonction de l’écart entre la pression de changement de pente des rampes de pression avec le seuil statique de changement de régime (qui est différent pour les pentes croissantes et décroissantes). Les valeurs sont moyennées sur 3 expériences.

valeur correspondant à la deuxième pente (qui est de 300 Pa/s) à celle correspondant à la première (190 Pa environ).

On peut donc conclure que les variations de pression d'alimentation précédant le passage du seuil statique n'ont pas d'influence sur la valeur du seuil de changement de régime.

### 3.4 Conclusions sur les changements de régime

Les diverses expériences et simulations réalisées au cours de ce stage permettent d'établir un certain nombre de conclusions sur les changements de régimes :

- Il s'écoule un certain temps entre le passage du seuil statique et le changement de régime effectif.
- Plus les variations de pression sont rapides, plus le changement s'effectue rapidement et plus le seuil de changement de régime est éloigné du seuil statique.
- Le seuil de changement de régime dépend du chemin suivi par la pression d'alimentation (c'est à dire du profil de pression d'alimentation).
- Le seuil de changement de régime ne dépend pas des variations de pression qui précèdent le passage du seuil statique.

Ces conclusions permettent d'élaborer un modèle de changement de régime qui est présenté dans la partie suivante. Le travail présenté dans cette partie permet également d'effectuer des conjectures quand à la stratégie que pourraient adopter les musiciens pour jouer le plus fort possible sans changer de régime, (ou le plus bas possible dans le cas où ils jouent sur le second régime). On a ainsi pu observer qu'un profil de pression d'alimentation d'allure exponentielle permettrait de beaucoup déplacer les seuils de changement de régime, mais qu'il ne permettrait pas de jouer longtemps avec une pression d'alimentation supérieure au seuil statique sans changer de régime. En revanche un profil ayant l'allure d'une racine carrée permettrait de jouer plus longtemps au dessus du seuil statique mais ne permettrait pas de décaler autant le seuil de changement de régime. Les flûtistes devraient donc probablement adopter différentes stratégies suivant la durée des notes qu'ils jouent et l'intensité sonore recherchée.

## 4 Modélisation des changements de régime

### 4.1 Présentation du modèle

Le comportement du seuil de changement de régime de la flûte ressemble à celui du seuil d'oscillation de la clarinette [5] [6]. Cela suggère que malgré les différences entre les deux systèmes, les changements de régimes s'effectuent de manière similaire. Les travaux effectués sur le seuil d'oscillation de la clarinette ont ainsi aidé à élaborer un modèle de changement de régime pour la flûte.

Le décalage entre le seuil de changement de régime (appelé *seuil dynamique*) et le seuil statique peut être expliqué de la manière suivante : dès que le seuil statique est dépassé la flûte commence à changer de régime. Mais comme la pression d'alimentation continue à varier pendant que le changement de régime a lieu et qu'il nécessite un certain temps, la pression à laquelle il se termine est différente de la valeur du seuil statique. Elle sera plus élevée pour un changement lié à une augmentation de pression d'alimentation et plus basse pour un changement dû à une diminution de pression d'alimentation. D'autre part plus l'écart entre la pression d'alimentation et le seuil statique est grand, plus le changement de régime s'effectue rapidement, ce qui explique pourquoi le retard temporel au changement de régime est plus petit pour les variations rapides de pression d'alimentation.

Si on considère ce qui a lieu dans l'espace des phases lors d'un changement de régime, la trajectoire de la flûte suit un cycle limite lorsqu'elle est sur le premier régime, et elle se met à suivre un autre cycle limite lorsqu'elle passe sur le second régime. Le changement de régime est donc le passage d'un cycle limite à un autre. Si, comme on le suppose, le changement est semblable à celui qui a lieu pour le seuil d'oscillation de la clarinette, alors la trajectoire de la flûte commence à s'éloigner du cycle limite de départ dès que le seuil statique est dépassé. Mais comme l'écart entre la trajectoire et le cycle limite de départ évolue exponentiellement, il est imperceptible pendant un certain temps et augmente brusquement au moment du changement de régime effectif, ce qui explique pourquoi on ne perçoit pas le changement immédiatement après le passage du seuil statique. On peut considérer que le changement de régime effectif a lieu lorsque la trajectoire de la flûte s'est éloignée suffisamment du cycle limite de départ.

Afin de traduire ces idées en termes mathématiques, deux notions sont introduites :

- le *taux de changement de régime*  $\tau_{ch}$
- la *vitesse de changement de régime*  $v_{ch}$

Le *taux de changement de régime* est une grandeur adimensionnée qui vaut zéro quand le changement de régime n'a pas commencé et 1 lorsqu'il est terminé. Elle peut être considérée comme le rapport de l'écart entre la position du point de fonctionnement de la flûte dans l'espace des phases et le cycle limite correspondant au régime de départ sur une distance caractéristique à partir de laquelle on peut considérer que la flûte a quitté le cycle limite de départ. La *vitesse de changement de régime* est la vitesse à laquelle le *taux de changement de régime* s'accroît (elle s'exprime donc en  $s^{-1}$ ). On observe qu'elle est liée à l'écart  $\Delta p$  entre la pression d'alimentation et le seuil statique (voir figure 17) : plus il est élevé plus elle l'est également.

Par définition de  $v_{ch}$  la valeur du *taux de changement de régime* à un instant  $t$  donné après le passage du seuil statique est donné par la relation (8) (l'origine des temps est l'instant du passage du seuil statique).

$$\tau_{ch} = \int_0^t v_{ch}(\Delta p(t)) dt \quad (8)$$

On définit  $t_{ch}$  comme le temps auquel le changement de régime effectif a lieu. On a alors  $\tau_{ch} = 1$ . C'est à cet instant qu'on peut observer le changement d'amplitude et le saut fréquentiel. La relation (9) est alors vérifiée.

$$\int_0^{t_{ch}} v_{ch}(\Delta p(t)) dt = 1 \quad (9)$$

La façon la plus simple de modéliser la vitesse de changement de régime  $v_{ch}(\Delta p)$  consiste à la considérer proportionnelle à un coefficient  $\alpha$  près à l'écart avec le seuil statique  $\Delta p$  :  $v_{ch} \simeq \alpha \Delta p$  (ce

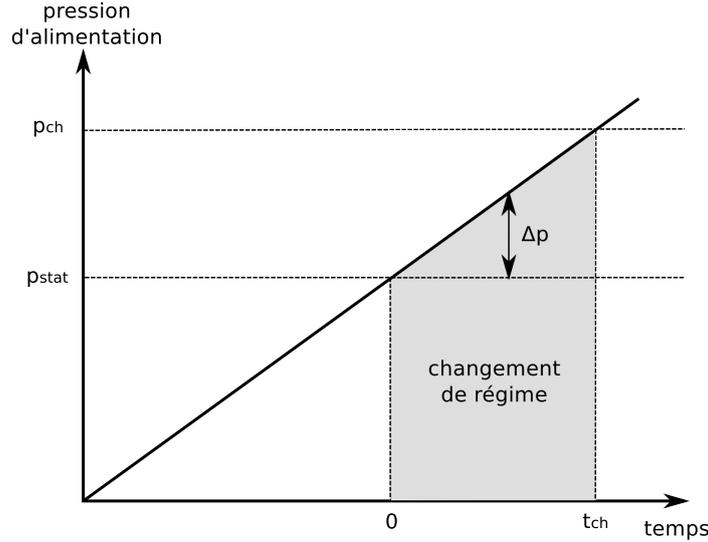


FIGURE 17 – Évolution de la pression d’alimentation lors d’un changement de régime avec une rampe linéaire. Le changement débute lorsque la pression d’alimentation atteint le seuil statique  $p_{stat}$  et se termine lorsqu’elle atteint le seuil dynamique  $p_{ch}$ .

modèle sera évalué dans la section suivante). Dans le cas d’une rampe de pression de pente  $a$  on a  $\Delta p(t) = at$ . On peut en déduire une relation entre le retard temporel au changement de régime et la pente des rampes (10) :

$$t_{ch} \simeq \sqrt{\frac{2}{\alpha a}} \quad (10)$$

On peut également en déduire une expression du seuil dynamique sous forme d’une correction du seuil statique proportionnelle à la racine carrée de la pente  $a$  des rampes (11) :

$$p_{dyn} \simeq p_{stat} + \sqrt{\frac{2a}{\alpha}} \quad (11)$$

## 4.2 Étude de la validité de l’approximation linéaire de la vitesse de changement de régime

Pour vérifier si le modèle de *vitesse de changement de régime* proposé précédemment est pertinent, le retard au changement de régime a été tracé en fonction de l’inverse de la racine carrée de la pente des rampes réalisées précédemment (voir figure 18). On peut voir que malgré la simplicité du modèle, la relation (10) est étonnamment bien vérifiée par les données expérimentales. Le retard au changement de régime est particulièrement bien corrélé avec l’inverse de la racine carrée de la pente : les coefficients de corrélations sont supérieurs à 0,99. En revanche, on ne peut pas en dire autant pour les données issues des simulations : pour les rampes croissantes l’allure de la courbe obtenue est manifestement différente d’une droite. L’allure obtenue pour les rampes décroissantes ressemble toutefois plus à une droite. Les valeurs du paramètre  $\alpha$  obtenues par régression linéaire sur les données expérimentales sont  $0,034 \text{ s}^{-1} \cdot \text{Pa}^{-1}$  pour les rampes croissantes et  $0,17 \text{ s}^{-1} \cdot \text{Pa}^{-1}$  pour les rampes décroissantes.

Une autre manière de vérifier le modèle consiste à tracer la pression de changement de régime en fonction de la racine carrée de la pente des rampes. Le résultat est présenté dans la figure 19. On remarque à nouveau, avec toutefois des coefficients de corrélations moins élevés, que la relation (11) est étonnamment bien vérifiée pour les données expérimentales. Le coefficient de corrélation entre les seuils de changements de régime et la racine carrée des pentes est supérieur à 0,97 pour les rampes croissantes et supérieur à 0,99 pour les rampes décroissantes. De même que précédemment le modèle Simulink ne vérifie pas bien la relation calculée avec le modèle linéaire de  $v_{ch}$  pour les

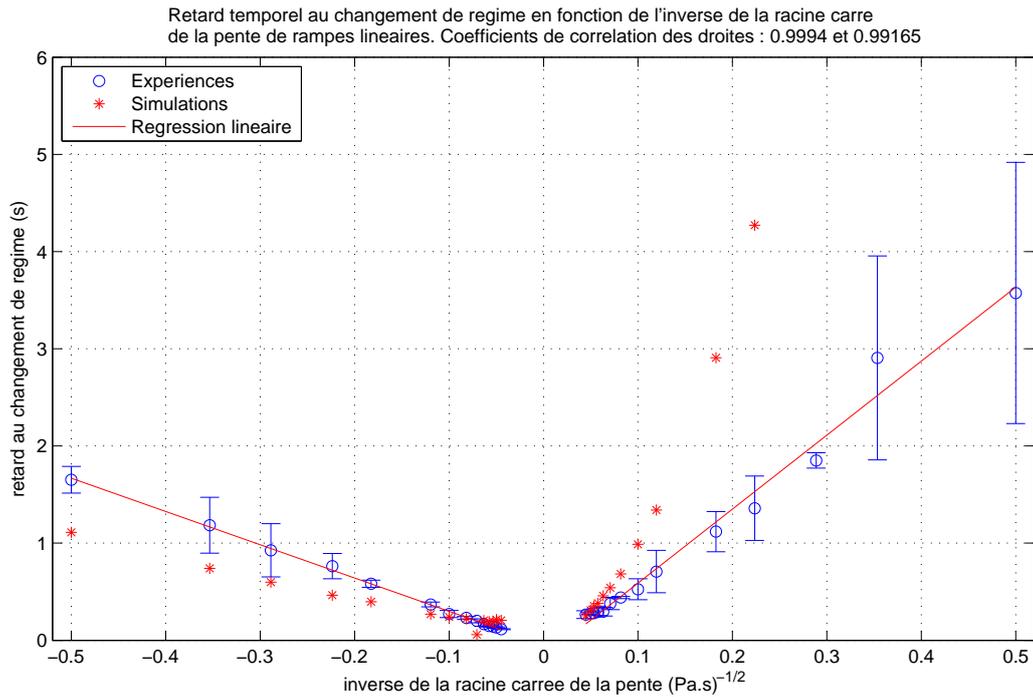


FIGURE 18 – Retard temporel au changement de régime en fonction de l'inverse de la racine carrée de la pente de rampes de pression d'alimentation. Les mesures sont moyennées sur trois expériences et ont été faites sur une flûte Zen On Bressan avec le doigté de *fa* grave. Les simulations ont été faites avec un modèle Simulink.

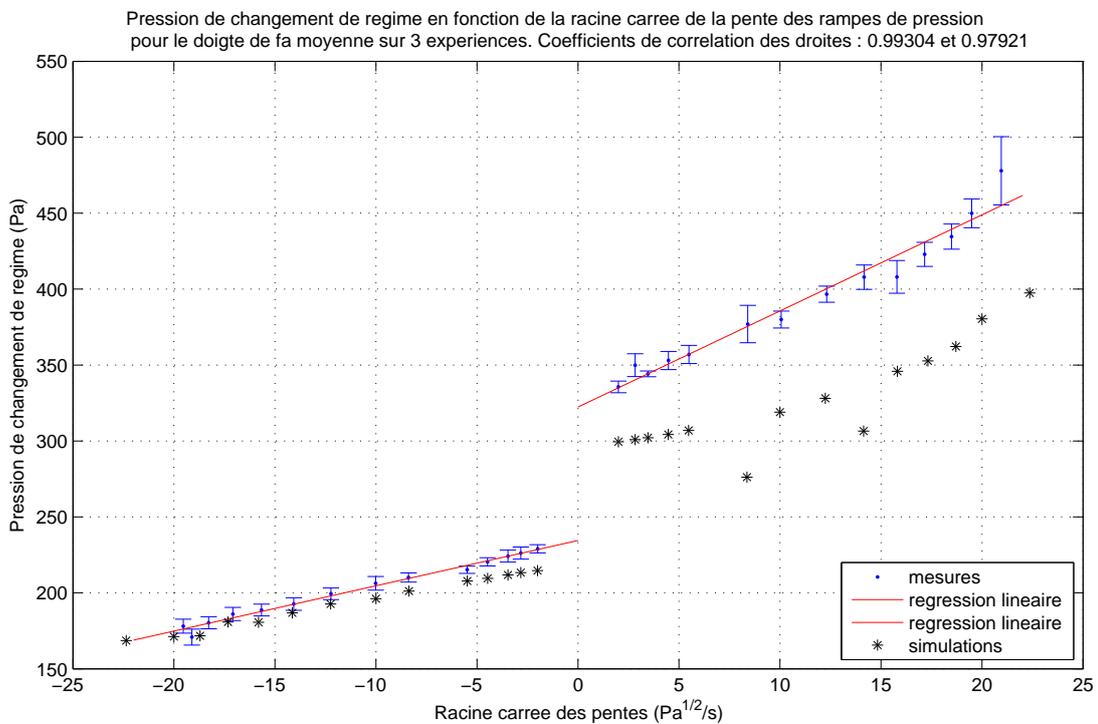


FIGURE 19 – Pression de changement de régime en fonction de la racine carrée de la pente de rampes de pression d'alimentation. Les données expérimentales sont moyennées sur trois expériences et ont été faites sur une flûte alto Zen On Bressan avec le doigté de *fa* grave. Les simulations ont été faites avec un modèle Simulink.

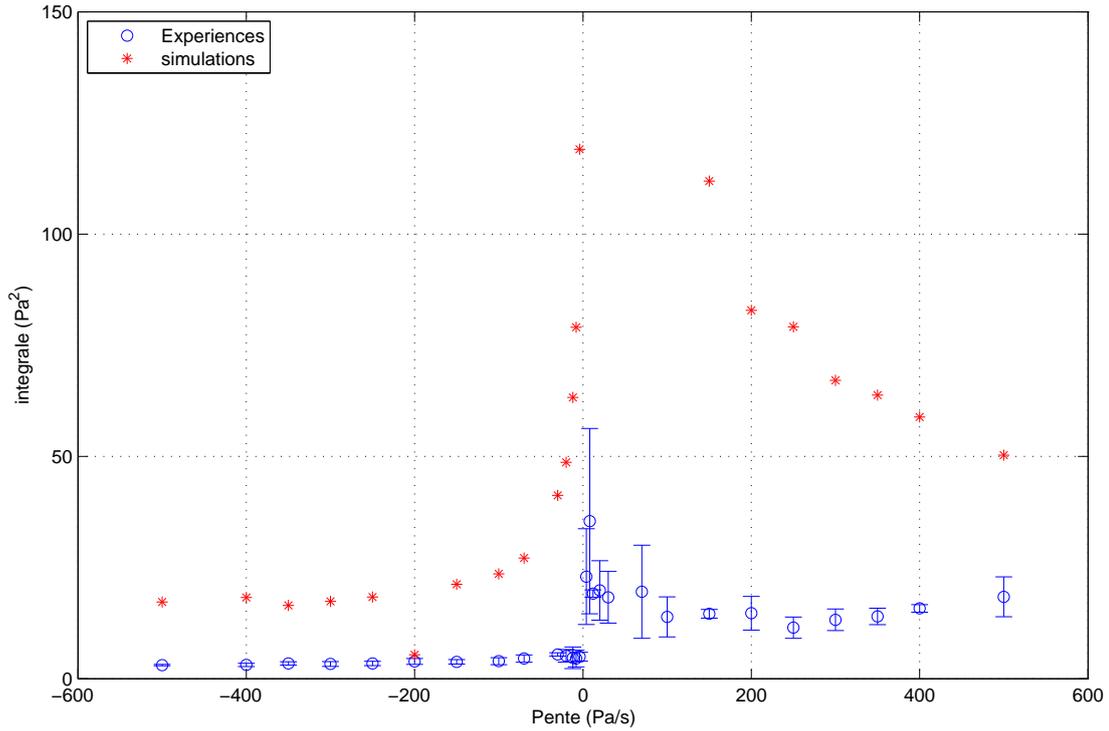


FIGURE 20 – Intégrale de l'écart entre la pression d'alimentation et le seuil statique de changement de régime entre l'instant du passage du seuil statique et l'instant correspondant au changement de régime effectif.

pentés croissantes. La courbe obtenue ressemble cependant plus à une droite que sur la figure 18. Les valeurs du paramètre  $\alpha$  obtenues par régression linéaire sur les données expérimentales sont  $0,22 \text{ s}^{-1} \cdot \text{Pa}^{-1}$  pour les rampes croissantes et  $0,05 \text{ s}^{-1} \cdot \text{Pa}^{-1}$  pour les rampes décroissantes.

Une troisième méthode permettant de vérifier si le modèle rend compte de la réalité consiste à calculer l'intégrale de l'écart  $\Delta p$  entre la pression d'alimentation et le seuil statique depuis l'instant du passage du seuil statique jusqu'à l'instant correspondant à la fin du changement de régime. Cette intégrale est calculée avec la méthode des trapèzes pour les signaux expérimentaux, et analytiquement à partir de la pente des rampes et de la pression de changement de régime pour les simulations. Le résultat est présenté sur la figure 20.

Selon le modèle de vitesse de changement de régime utilisé, cette quantité devrait être constante et égale à  $1/\alpha$ . On peut voir que l'intégrale est relativement constante pour les rampes décroissantes expérimentales. L'écart maximal entre les différentes valeurs est de  $0,47 \text{ Pa}^2$ , ce qui représente moins de 12% de la valeur moyenne. La valeur moyenne du paramètre  $\alpha$  est de  $0,24 \text{ s}^{-1} \cdot \text{Pa}^{-1}$ . Pour les rampes croissantes, le modèle est déjà moins bien vérifié, surtout pour les faibles pentes. L'écart maximal entre les valeurs est de  $11,4 \text{ Pa}^2$  ce qui représente presque 70% de la valeur moyenne. Les valeurs obtenues pour les pentes supérieures à  $100 \text{ Pa/s}$  sont cependant plus constantes. En excluant les valeurs obtenues pour les faibles pentes, on peut estimer la valeur du paramètre  $\alpha$  à  $0,07 \text{ s}^{-1} \cdot \text{Pa}^{-1}$ .

Pour ce qui est des simulations, le modèle n'est pas du tout vérifié pour les pentes croissantes et pour les faibles pentes négatives. On peut considérer qu'il est vérifié pour les pentes inférieures à  $-200 \text{ Pa/s}$  : en dessous de cette valeur l'écart maximal entre les valeurs est de  $1,9 \text{ Pa}^2$  ce qui représente moins de 11% de la valeur moyenne.

L'intégration de l'écart entre la pression d'alimentation et le seuil statique met donc en évidence

les limites de l'approximation linéaire de  $v_{ch}$ . Elle semble assez bonne pour le passage du second régime au premier, mais elle fonctionne déjà moins bien pour le passage du premier au second régime, surtout pour les faibles pentes. Elle est encore moins valable pour les simulations faites avec le modèle Simulink.

On peut cependant remarquer que les différentes vérifications donnent des valeurs du paramètre  $\alpha$  relativement proches, surtout pour les rampes décroissantes : l'écart maximal entre les trois valeurs est de  $0,04 \text{ s}^{-1} \cdot \text{Pa}^{-1}$  ce qui représente moins de 20 % de la valeur moyenne ( $21 \text{ s}^{-1} \cdot \text{Pa}^{-1}$ ). Pour les rampes croissantes la valeur maximale ( $0,07 \text{ s}^{-1} \cdot \text{Pa}^{-1}$ ) vaut cependant plus du double de la valeur minimale ( $0,034 \text{ s}^{-1} \cdot \text{Pa}^{-1}$ ). L'approximation faite sur le modèle est donc assez bien vérifiée pour le passage du second régime vers le premier, mais elle fonctionne moins bien pour le passage du premier au second registre.

### 4.3 Observation directe de la vitesse de changement de régime

Les analyses précédentes ont fait ressortir les limites de l'approximation linéaire de la vitesse de changement de régime. Cette fonction n'est donc pas rigoureusement proportionnelle à l'écart entre la pression d'alimentation et le seuil statique de changement de régime. Il serait donc intéressant d'observer directement  $v_{ch}$  pour mieux connaître son évolution.

#### 4.3.1 Observation directe de la vitesse de changement de régime avec des simulations

La méthode la plus simple pour observer directement la vitesse de changement de régime consiste à garder la pression d'alimentation constante pendant le changement de régime. Pour cela il faut effectuer une variation de pression d'alimentation très rapide depuis une pression d'alimentation à laquelle le régime de départ est stable jusqu'à une pression d'alimentation cible à laquelle le régime d'arrivée est également stable. Il faut ensuite garder cette pression d'alimentation cible constante. Il est nécessaire que la flûte soit restée suffisamment longtemps à la pression d'alimentation de départ afin que le régime de départ soit stabilisé.

On fait l'hypothèse que l'effet de la variation rapide sur le retard au changement de régime est négligeable : on considère que le changement de régime s'effectue uniquement pendant que la pression d'alimentation cible reste constante. La vitesse de changement de régime doit alors être constante, et d'après l'équation (9), la relation (12) entre la vitesse de changement de régime et le retard au changement de régime doit être vérifiée :

$$v_{ch}(\Delta p) = \frac{1}{t_{ch}} \quad (12)$$

Il suffit donc pour observer directement la vitesse de changement de régime d'effectuer plusieurs variations de pression d'alimentation vers différentes pressions d'alimentation cible et de mesurer le retard au changement de régime  $t_{ch}$ . On connaît alors la vitesse de changement de régime pour chaque pression cible et on peut la tracer en fonction de ce paramètre (voir figure 21 et 22 a). D'autre part cela permet de vérifier la valeur du seuil statique estimée à partir de rampes lentes de pression d'alimentation. Cela est facile à faire en simulation, mais moins évident à réaliser expérimentalement car il est difficile d'obtenir des profils de variations de pression d'alimentation très rapides sans qu'il n'y ait des oscillations de la pression d'alimentation juste après.

La vitesse de changement de régime a ainsi été estimée à partir de simulations avec le modèle Simulink. Les coefficients modaux utilisés correspondent au doigté de *sol* de la flûte utilisée pour les expériences. Ce doigté a été choisi pour pouvoir comparer les résultats obtenus avec le diagramme de bifurcation calculé par Soizic Terrien avec DDE-Biftool. Le doigté de *fa*, qui a fait l'objet de nombreuses expériences, n'a pas été choisi car le calcul de son diagramme de bifurcation pose problème : l'algorithme de continuation ne parvient pas à suivre certaines branches. Les résultats de ces simulations sont présentés dans les figures 21 et 22 a.

On retrouve le comportement global prévu par le modèle : plus la pression d'alimentation s'écarte du seuil statique, plus la vitesse de changement de régime est élevée. L'allure de la courbe observée

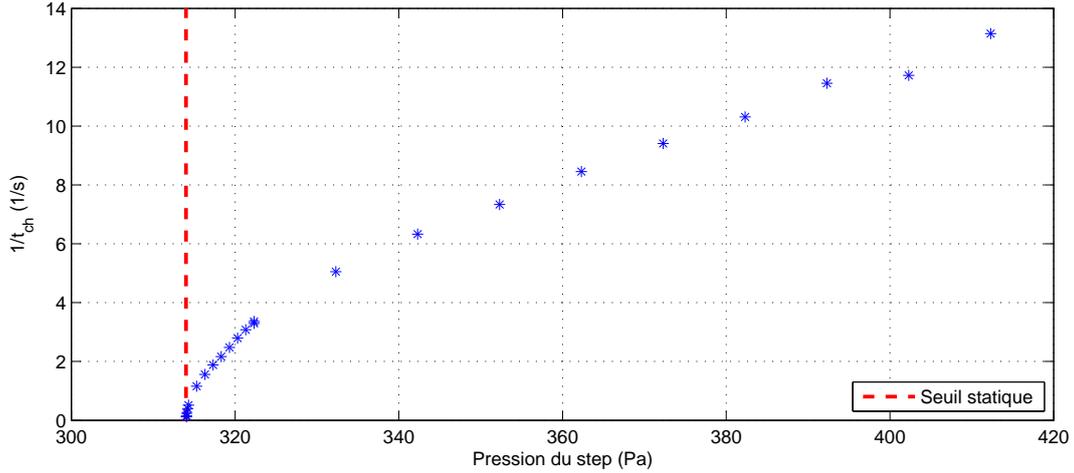


FIGURE 21 – Vitesse de changement de régime mesurée par simulations avec un modèle Simulink de flûte en fonction de la pression d’alimentation cible pour le passage du premier vers le second régime. Les coefficients modaux utilisés correspondent au doigté de *sol* d’une flûte à bec alto Zen On Bressan.

ressemble à celle d’une fonction racine carrée pour le passage du premier vers le second régime. Pour le passage du second vers le premier régime elle a une évolution plus complexe : il semble y avoir un changement brusque de pente entre 220 Pa et 230 Pa. Cela correspond à un changement de régime d’arrivée : en dessous de 225 Pa le régime d’arrivée n’est plus, à l’exception d’une simulation vers 223 Pa, le premier régime, mais un régime *éolien*. Cela suggère que la vitesse de changement de régime dépend du régime d’arrivée.

L’observation de la figure 21 suggère que la vitesse de changement de régime peut être assez bien décrite par une fonction du type  $v_{ch} = \alpha\sqrt{\Delta P}$ . Cela ne semble pas à première vue être le cas pour la courbe de la figure 22, mais le changement de pente peut cependant être interprété comme un changement brusque du paramètres  $\alpha$  de la fonction  $v_{ch}(\Delta p)$  lié au changement de régime d’arrivée. On verra par la suite que cette hypothèse est assez bien vérifiée.

Si on considère le cas de rampes linéaires de pression d’alimentation ( $\Delta p(t) = at$ ), la valeur du seuil dynamique de changement de régime peut être calculée d’après l’équation (9) en fonction de la nouvelle expression de la vitesse de changement de régime :

$$p_{dyn} = p_{stat} + \left(\frac{3a}{2\alpha}\right)^{2/3} \quad (13)$$

L’écart au seuil statique devrait donc être proportionnel à la racine  $2/3$  de la pente des rampes de pression. Des simulations avec des rampes ont donc été effectuées sur le doigté de *sol* avec le modèle Simulink pour vérifier cette relation de proportionnalité.

Les pentes des rampes choisies pour ces simulations sont différentes de celles utilisées pour le doigté de *fa*. Des pentes plus élevées ont été effectuées (jusqu’à 10000 Pa/s). Un effet qui n’avait pas été observé précédemment apparaît alors : la valeur du seuil de changement de régime sature pour les deux rampes ayant la pente la plus élevée en valeur absolue (abscisses -465 et 465 sur la figure 23). Un comportement similaire a été observé pour le seuil d’oscillation de la clarinette [6].

La figure 23 présente la pression de changement de régime en fonction de la racine  $2/3$  de la pente des rampes utilisées au cours des simulations. On observe que les points, à l’exception de ceux obtenus avec des pentes de 10000 Pa/s, forment trois droites qui correspondent chacune à un changement de régime différent. La pression de changement de régime et la racine  $2/3$  de la pente des rampes sont assez bien corrélées puisque les coefficients de corrélation obtenus pour chacune des trois droites sont supérieurs à 0,99. L’hypothèse d’une vitesse de changement de régime de la forme

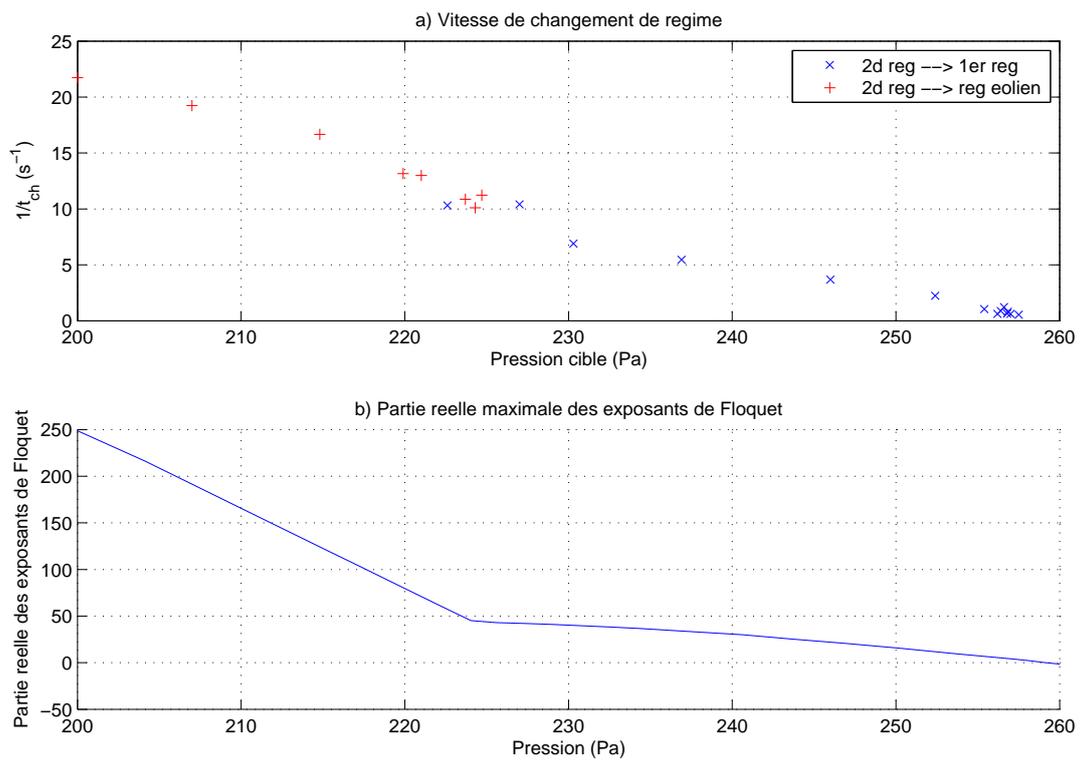


FIGURE 22 – Vitesse de changement de régime mesurée à partir de simulations réalisées avec un modèle Simulink de flûte et partie réelle maximale des exposants de Floquet calculée avec DDE-Biftool en fonction de la pression d’alimentation cible pour le passage du second vers le premier régime. Les coefficients modaux utilisés correspondent au doigté de *sol* d’une flûte à bec alto Zen On Bressan.

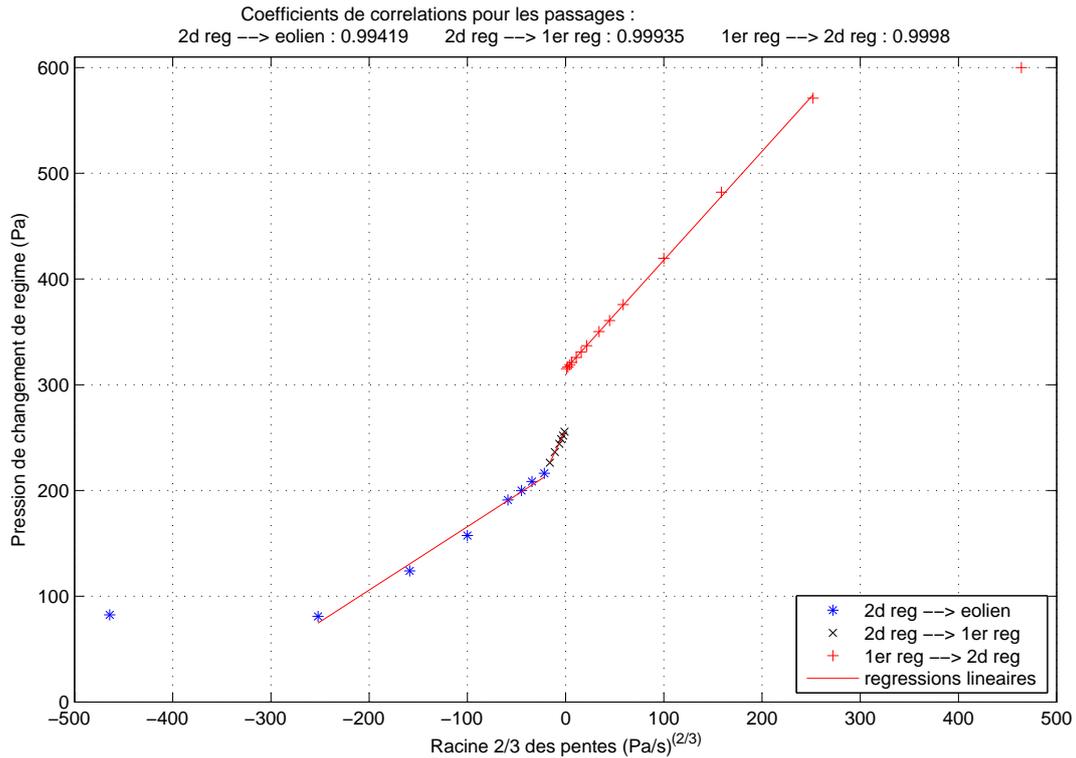


FIGURE 23 – Pression de changement de régime en fonction de la racine 2/3 de la pente de rampes de pression simulées avec un modèle Simulink de flûte pour le doigté de *sol* grave.

$v_{ch} = \alpha\sqrt{\Delta P}$  est donc assez bien vérifiée pour le modèle.

De même que pour le doigté de *sol*, les seuils de changement de régimes mesurés avec les rampes effectuées sur le doigté de *fa* ont été tracés en fonction de la racine 2/3 de la pente des rampes sur la figure 24. Ce modèle de vitesse de changement de régime décrit également assez bien la réalité expérimentale, pour ce doigté en tout cas. Les coefficients de corrélation entre les données sont pour chacun des changements de régimes (premier vers second régime et second vers premier régime) supérieurs à 0,99 et supérieurs à ceux obtenus avec les mêmes mesures avec l'approximation linéaire ( $v_{ch} = \alpha\Delta P$ ).

Ce modèle fonctionne également bien pour les données issues de simulations avec le modèle Simulink. Les points forment deux droites. On retrouve toutefois les deux points pour lesquels le changement de régime a été perturbé par les régimes *éoliens* dont l'amplitude est surestimée par le modèle *jet drive*. D'autre part les deux points correspondants aux deux pentes croissantes les plus élevées s'écartent un peu de la tendance générale. Peut être cela est il également dû à une perturbation par les régimes *éoliens*, mais ce n'est pas sûr. Ils ont toutefois été exclus des analyses.

Le modèle a également été vérifié sur les quatre autres doigtés étudiés au cours de ce stage : *sol*, *la*, *si bémol* et *si*. De même que pour le doigté de *fa*, des régressions linéaires ont été effectuées sur les courbes représentant le seuil de changement de régime en fonction de la racine 2/3 des pentes des rampes de pression d'alimentation. Les coefficients de corrélations obtenus (voir tableau 4 de l'annexe C) sont tous, à l'exception de celui obtenu pour le doigté de *sol*, supérieurs à 0,99 pour le passage du premier régime au second. Ils sont moins élevés pour le passage du second régime vers le premier, mais restent néanmoins tous supérieurs à 0,95. Cela peut être dû au fait que le modèle de vitesse de changement de régime est moins valable pour le passage du second régime au premier pour ces doigtés là, ou parce que les valeurs ne sont issues que d'une seule expérience et que le bruit de mesure est plus important. Les valeurs du paramètre  $\alpha$  du modèle obtenues pour les cinq doigtés étudiés sont présentées dans le tableau 3 de l'annexe C.

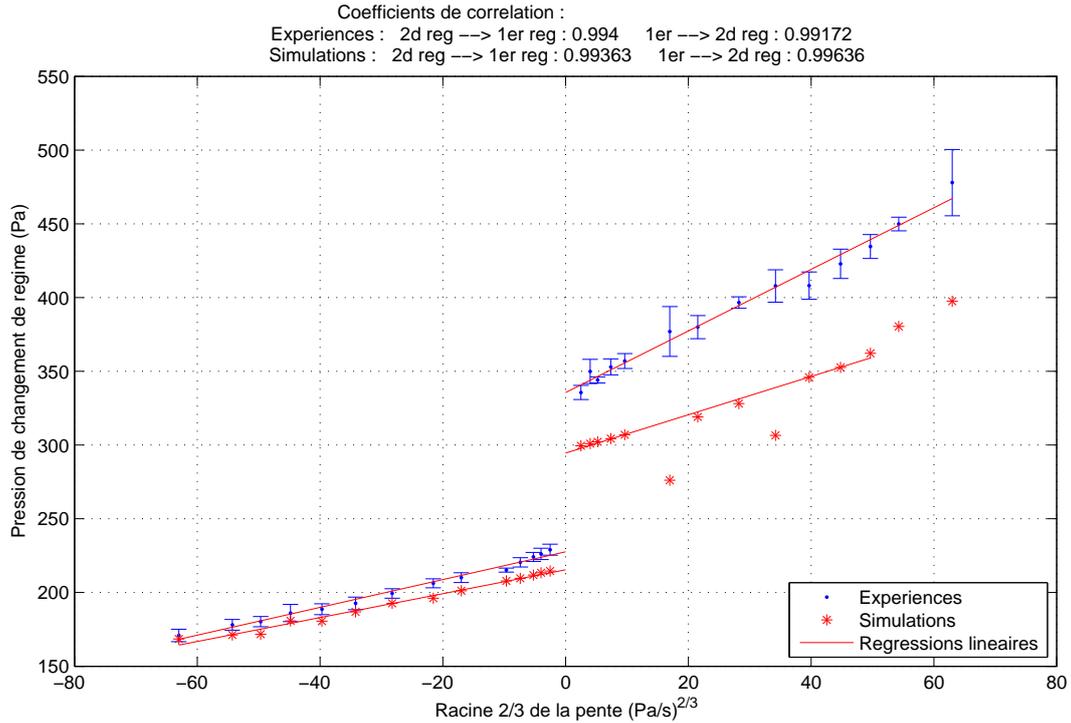


FIGURE 24 – Pression de changement de régime en fonction de la racine 2/3 de la pente de rampes de pression d’alimentation. Les mesures ont été faites sur trois expériences avec le doigté de *fa grave* d’une flûte à bec alto Zen On Bressan, et les simulation ont été faites avec un modèle Simulink.

**Conclusion :** le modèle de vitesse de changement de régime issu de l’observation directe de la vitesse de changement de régime semble donc être valable à la fois pour les simulations et pour les mesures pour plusieurs doigtés différents. Il permet d’estimer le seuil statique de changement de régime d’une nouvelle façon : il est donné par l’ordonnée à l’origine de la droite de régression linéaire calculée à partir du tracé du seuil de changement de régime en fonction de la racine 2/3 des pentes des rampes de pression. Cette méthode présente l’avantage de s’affranchir complètement des effets de la dynamique de pression d’alimentation qui peuvent avoir une influence même pour des rampes de pression d’alimentation très lentes.

#### 4.3.2 Lien entre la vitesse de changement de régime et la partie réelle maximale des exposants de Floquet

L’allure de la vitesse de changement de régime qui présente un changement de pente lorsque le régime d’arrivée n’est plus le premier régime, mais un régime *éolien*, peut être comparée à l’allure de la partie réelle maximale des exposants de Floquet. On peut voir en effet sur la figure 22 que cette grandeur a une évolution qui ressemble à celle de la vitesse de changement de régime. Elle présente un brusque changement de pente vers 225 Pa qui correspond à peu près au changement de régime d’arrivée observé lors des simulations destinées à calculer la vitesse de changement de régime.

La partie réelle maximale des exposants de Floquet permet d’estimer l’évolution d’une perturbation après une période dans la direction de l’espace des phases vers laquelle les perturbations sont le plus amplifiées [4] [18]. Le calcul des exposants de Floquet repose sur une linéarisation du modèle de flûte autour du cycle limite correspondant au régime de départ. Cette approximation n’est en théorie valable qu’au voisinage de ce cycle limite. On peut néanmoins essayer de l’utiliser pour prédire le nombre de périodes  $T$  à partir duquel l’écart entre la trajectoire de la flûte dans l’espace des phase et le cycle limite dépasse un certain seuil arbitraire  $s$ . Ce qui revient à chercher à partir de quel nombre de périodes la flûte a quitté le voisinage du cycle limite correspondant au régime de départ.

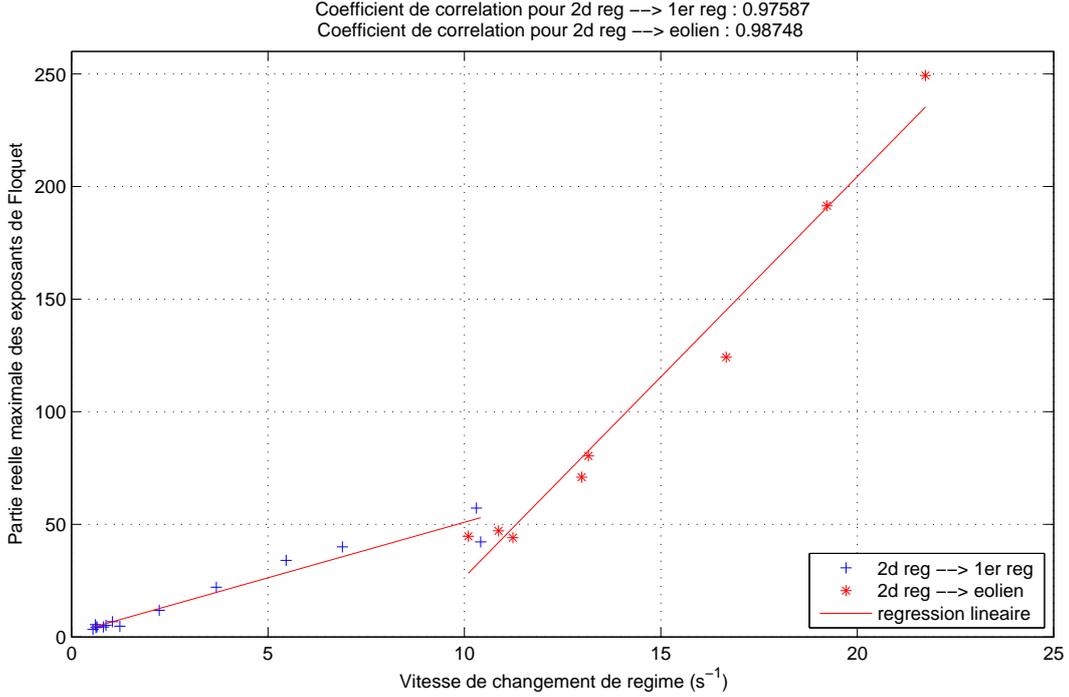


FIGURE 25 – Partie réelle des exposants de Floquet calculées avec DDE-Biftool tracées en fonction de la vitesse de changement de régime obtenue par simulations avec Simulink pour le doigté de *sol* d’une flûte à bec alto Zen On Bressan.

Cela nécessite de résoudre l’équation (14) :

$$y_n e^{\alpha_n NT} = s \quad (14)$$

Où  $y_n$  est la perturbation initiale dans une direction  $n$  donnée de l’espace des phase pour laquelle la partie réelle de l’exposant de Floquet  $\alpha_n$  correspondant est maximale. La résolution de cette équation conduit à l’expression du nombre  $N$  de périodes nécessaires pour dépasser le seuil arbitraire  $s$  correspondant au changement de régime. On peut en déduire le retard au changement de régime  $t_{ch}$  (15) :

$$t_{ch} = NT = \frac{1}{\alpha_n} \ln \left( \frac{s}{y_n} \right) \quad (15)$$

L’expression (15) implique que la vitesse de changement de régime devrait être proportionnelle à la partie réelle maximale des exposants de Floquet à un facteur  $1/\ln(s/y_n)$  près<sup>1</sup>. Pour vérifier cette hypothèse, les parties réelles maximales des exposants de Floquet ont été tracées en fonction de la vitesse de changement de régime. le résultat est présenté sur la figure 25. Les données utilisées pour cette figure sont les mêmes que celles de la figure 22.

On peut voir que pour les deux types de changements de régime (second régime vers premier et second régime vers *éolien*), la relation de proportionnalité entre les deux quantités est assez bien vérifiée. Le coefficient de corrélation entre les deux grandeurs est de plus de 0,97 pour le passage du second régime vers le premier et de plus de 0,98 pour le passage du second régime vers un régime *éolien*. Dans le premier cas la partie réelle des multiplicateurs de Floquet est environ 5 fois plus élevée que la vitesse de changement de régime, et dans le second cas elle est environ 18 fois plus

1. L’équation (9) donne pour une pression d’alimentation constante  $t_{ch} = \frac{1}{v_{ch}}$ . Si on considère que le retard au changement de régime donné par l’expression (15) est identique à celui donné par la relation (9) alors  $\frac{1}{v_{ch}} = \frac{1}{\alpha_n} \ln \left( \frac{s}{y_n} \right)$  d’où  $v_{ch} = \frac{\alpha_n}{\ln \left( \frac{s}{y_n} \right)}$ .

élevée. Le lien entre les deux grandeurs dépend donc du changement de régime considéré. Cette dépendance peut s'expliquer par le fait que le coefficient de proportionnalité dépend d'un certain seuil  $s$  qui est inconnu et qui peut varier suivant le changement de régime qui a lieu.

La partie réelle maximale des multiplicateurs de Floquet permet donc d'avoir une idée de l'allure de la vitesse de changement de régime. Ainsi plus elle est grande, plus la vitesse de changement de régime est élevée.

## 5 Analyse de mesures effectuées sur une musicienne professionnelle

Afin d'étudier si les musiciens utilisent la dynamique de pression d'alimentation pour décaler les seuils de changement de régime, des mesures ont été faites sur une flûtiste à bec professionnelle : Marine Sablonnière, professeure au conservatoire de Marseille. Il lui a été demandé d'effectuer différents exercices au cours desquels la dynamique de pression d'alimentation pourrait être utilisée pour décaler les seuils.

### 5.1 Déroulement des expériences

#### 5.1.1 Dispositif expérimental

Une carte d'acquisition reliée à un ordinateur a été utilisée pour mesurer la pression d'alimentation, la pression interne à proximité du *biseau* et le son rayonné par la flûte avec deux capteurs de pression et un microphone. Un trou pratiqué dans la flûte à proximité du *biseau* permet de fixer le capteur nécessaire à la mesure de la pression interne (Endevco 8507C-2). La pression d'alimentation est mesurée par l'intermédiaire d'un capillaire reliant un capteur de pression (Endevco 8507C-1) à l'extrémité du bec de la flûte.

La mesure de la pression d'alimentation a posé un problème particulier : le capteur utilisé pour les mesures faites sur la bouche artificielle ne résistant pas à l'humidité, il a été nécessaire d'en utiliser un autre moins précis (Honeywell ASCX01 DN), mais résistant à l'humidité. Le capteur de remplacement a dû être réglé avec le capteur utilisé sur la bouche artificielle afin de pouvoir comparer les mesures issues des deux capteurs. Pour cela des variations de pression ont été générées avec la bouche artificielle et la pression d'alimentation a été enregistrée avec les deux capteurs simultanément. Le tracé de la tension de sortie du capteur de remplacement en fonction de la pression mesurée par le capteur utilisé avec la bouche artificielle permet ensuite de convertir la tension de sortie du capteur de remplacement en pression.

Cette approche a été préférée à un étalonnage avec un banc d'étalonnage afin de pouvoir mieux comparer les données issues des deux capteurs. Ainsi, si l'étalonnage du capteur de la bouche artificielle n'est pas parfait, on devrait tout de même être sûr de mesurer la même pression avec le capteur de remplacement, même si la valeur de pression donnée n'est pas tout à fait juste. Les pressions d'alimentation mesurées sur les musiciens seront donc comparables à celles mesurées sur la bouche artificielle.

La répétition de la procédure de réglage a montré que la sensibilité du capteur varie au cours du temps. Cela est probablement dû à l'influence de paramètres tels que la température sur la sensibilité d'au moins un des deux capteurs. Deux courbes extrêmes (voir figure 43 annexe D) ont néanmoins été extraites des différents réglages afin d'établir un intervalle de confiance où situer les mesures. La tension correspondant à la pression d'alimentation mesurée au cours de la séance de mesure a été convertie en pression avec une courbe de réglage mesurée juste après.

Deux séances de mesures ont été effectuées au conservatoire de Marseille avec la flûtiste à bec Marine Sablonnière. Après la première séance il a été constaté que les mesures étaient inexploitables : la pression d'alimentation n'avait pas été correctement enregistrée car la flûtiste bouchait sans le savoir le capillaire reliant l'extrémité du bec de la flûte au capteur de pression. Une seconde séance de mesure a donc été faite en essayant d'éviter que le capillaire ne se bouche et en vérifiant constamment si les mesures de pression d'alimentation étaient exploitables.

Il a par la suite été constaté par Soizic Terrien qu'un emplacement différent du capillaire permettrait d'éviter ce type de problème. Pendant les séances de mesures le capillaire était placé sur le côté du bec ce qui le rendait susceptible d'être bouché par les commissures des lèvres. En le plaçant au milieu du bec les problèmes d'obturation sont beaucoup plus limités, mais ce positionnement introduit plus de gêne pour l'instrumentiste.

Doigté	1 <sup>er</sup> régime vers 2 <sup>e</sup> (Pa)	2 <sup>e</sup> régime vers 1 <sup>er</sup> (Pa)
fa	320	235
sol	297	180
la	372	223
si bémol	551	551
si	584	494

TABLE 1 – Seuils statiques de changement de régime estimés à partir de mesures avec la bouche artificielle.

### 5.1.2 Exercices demandés

Pour essayer de savoir comment les flûtistes pourraient utiliser la pression d'alimentation pour décaler les seuils de changement de régime, différents exercices ont été réalisés.

Il lui a tout d'abord été demandé de jouer un morceau de musique<sup>2</sup> contenant les notes graves de la flûte pour lesquelles les changements de régimes sont susceptibles de perturber l'instrumentiste. Cela permettrait de voir si dans un contexte de jeu la pression d'alimentation utilisée dépasse les seuils statiques mesurés avec la bouche artificielle, et éventuellement d'identifier une stratégie utilisant la dynamique de pression d'alimentation pour les décaler.

Il a ensuite été demandé d'effectuer des *crescendos* et *decrescendos* tels qu'ils seraient faits dans un contexte musical afin de comparer les pressions d'alimentation utilisées avec les seuils statiques mesurés sur la bouche artificielle et d'essayer d'identifier des stratégies éventuellement utilisées pour jouer plus fort sans changer de régime.

Afin de comparer plus directement le jeu d'un musicien avec les expériences faites avec la bouche artificielle, un autre exercice a consisté à demander à la flûtiste de jouer le plus fort possible sans changer de régime jusqu'à ce que le changement de régime ait lieu.

Enfin, un dernier exercice a consisté à réaliser des *gammes chromatiques* afin de comparer les notes attaquées directement avec les exercices précédents.

## 5.2 Comparaison avec les seuils mesurés avec la bouche artificielle

Trois notes graves ont été extraites du morceau de musique enregistré : *sol*, *la* et *si bémol*. La pression d'alimentation utilisée a été comparée avec les seuils statiques estimés avec la bouche artificielle (voir tableau 1). Pour cela la pression d'alimentation calculée à partir du réglage effectué juste après la séance de mesure a été tracée ainsi que ses valeurs maximales et minimales en fonction du temps. D'autre part, le seuil statique a été représenté par une ligne en pointillé (voir figures 44, 45 et 46 en annexe D). La pression interne mesurée à proximité du *biseau* a également été représentée.

La différence entre la pression d'alimentation et le seuil statique est très importante pour la note *la* : l'écart dépasse au moins 210 Pa soit environ 56 % de la valeur du seuil statique. Par ailleurs cette note est attaquée au dessus du seuil statique. Cela peut être expliqué par l'influence de la note qui précède qui modifie les conditions initiales, et/ou par le fait que la flûtiste peut favoriser le premier registre pour cette note en jouant sur l'accord du conduit vocal [2]. Pour les deux autres notes la pression d'alimentation s'approche du seuil statique et le dépasse à peine. On peut donc conclure que les musiciens peuvent jouer à des pressions d'alimentation supérieures aux seuils statiques dans un contexte de jeu.

De la même manière que précédemment, la pression d'alimentation mesurée pendant les *crescendos* effectués sans changement de régime a été comparée avec les seuils statiques (voir tableau 1). Les figures correspondant aux doigtés de *fa*, *sol*, *la*, *si bémol* et *si* sont présentées dans l'annexe D sur les figures 47, 48, 49, 50 et 51.

2. Jean-Sébastien Bach, sonate en mi mineur pour flûte et basse continue (transposée en sol mineur) BWw1034 1<sup>er</sup> mouvement.

Doigté	1 <sup>er</sup> régime vers 2 <sup>e</sup> (Pa)	2 <sup>e</sup> régime vers 1 <sup>er</sup> (Pa)
fa	750 ± 70	270 ± 30
sol	600 ± 60	240 ± 20
la	580 ± 50	260 ± 30
si bémol	990 ± 80	680 ± 60
si	960 ± 80	630 ± 60

TABLE 2 – Seuils de changement de régime mesurés sur des *crescendos* et *decrescendos* effectués par une flûtiste en essayant de jouer le plus longtemps possible sur le premier régime.

La pression d'alimentation utilisée dépasse les seuils statiques de manière significative pour le doigté de *fa*. L'écart avec le seuil statique atteint au moins 50 Pa soit plus de 15 % de la valeur du seuil statique. En revanche la pression d'alimentation utilisée pour les autres doigtés (*sol*, *si bémol*, *si* et *la*) s'écarte peu du seuil statique : elle s'en approche jusqu'à les dépasser légèrement mais il n'y a pas d'écart aussi important que pour le doigtés de *fa*.

Les seuils de changement de régime des exercices consistant à effectuer des *crescendos* tout en restant le plus longtemps possible sur le premier registre ont été relevés ainsi que leurs incertitudes (voir tableau 2, 1<sup>er</sup> régime vers 2<sup>e</sup>). Les valeurs obtenues sont toutes très supérieures aux seuils statiques. L'écart avec le seuil statique dépasse 430 Pa soit 80 % de la valeur du seuil statique pour le doigté de *si bémol* et l'augmentation du seuil de changement de régime atteint 430 Pa soit plus de 130 % de la valeur du seuil statique pour le doigté de *fa*. Les flûtistes parviennent donc à obtenir des décalages de seuils plus importants que ceux obtenus avec la bouche artificielle avec les rampes de pression d'alimentation : les décalages observés avec la bouche artificielle ne dépassent pas 136 Pa soit 28 % du seuil statique pour le doigté de *si*.

Des *decrescendos* passant du second registre au premier ont également été effectués. Les valeurs des seuils de changement de régime ainsi que leurs incertitudes ont été relevés (voir tableau 2, 2<sup>e</sup> régime vers 1<sup>er</sup>).

Les seuils de changement de régime obtenus par la flûtiste sont tous plus élevés que les seuils statiques estimés avec la bouche artificielle. Cela est particulièrement surprenant car pour le passage du second registre au premier les seuils obtenus avec la bouche artificielle sont tous inférieurs aux seuils statiques. Par ailleurs cela signifie que le changement se fait à une pression d'alimentation à laquelle le second régime devrait encore être stable.

D'autre part on peut se demander si la flûtiste n'a pas essayé de jouer le plus longtemps possible sur le premier registre au lieu d'essayer de jouer le plus longtemps possible sur le second. Elle aurait donc essayé de retrouver le premier registre le plus tôt possible. En effet au cours de la séance de mesure il lui avait été demandé de d'essayer de jouer le plus fort possible tout en restant le plus longtemps possible sur le premier registre pour les *crescendos*, mais pour les *decrescendos* il n'avait pas été explicitement demandé de jouer le plus faible possible sur le second registre. La flûtiste a donc pu essayer d'appliquer la première consigne aux *decrescendos* ce qui est d'ailleurs cohérents avec le fait que les flûtistes jouent le plus souvent sur le premier registre. Il y a donc une incertitude sur ce que la flûtiste a cherché à faire lors des *decrescendos*.

Les décalages observés pour le passage du second au premier registre sont toutefois moins importants que les décalages observés pour le passage du premier au second registre. Ainsi il ne dépasse pas 140 Pa pour le doigté de *si* et est seulement de 35 Pa pour le doigté de *fa*, ce qui représente au maximum 28 % du seuil statique. Cela peut être dû au fait que la flûtiste ne peut pas utiliser la dynamique de pression d'alimentation pour augmenter les seuils de passage du second au premier registre, alors qu'elle peut utiliser à la fois la dynamique de pression d'alimentation et les autres paramètres de contrôle pour augmenter le seuil de passage du premier au second registre. Cela expliquerait pourquoi les décalages observés sont plus importants pour le passage du premier au second registre.

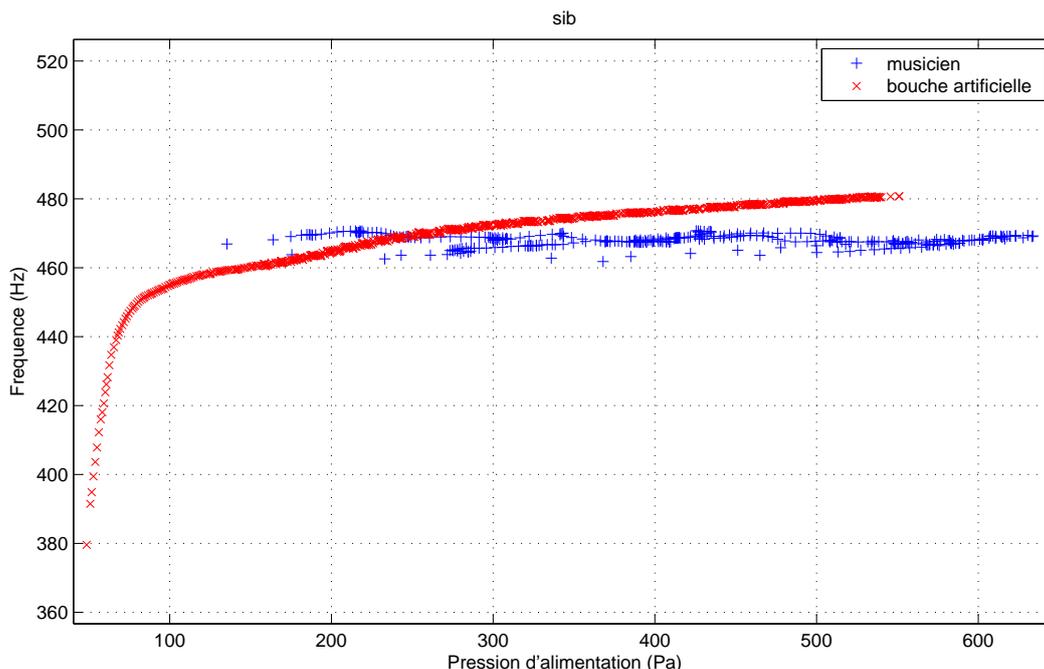


FIGURE 26 – Fréquence de jeu obtenue avec la bouche artificielle et par une flûtiste en fonction de la pression d’alimentation pour le doigté de *si* bémol grave d’une flûte à bec alto Zen On Bressan.

**Conclusion :** Les mesures faites permettent de mettre en évidence le fait que les musiciens parviennent à décaler les seuils de changement de régime au dessus et en dessous de la valeur du seuil statique alors que la dynamique de pression d’alimentation ne permet de décaler les seuils de changement de régime que dans un sens par rapport au seuil statique : dans le cas du passage du premier régime vers le second le seuil ne peut être qu’augmenté et dans le cas du passage du second au premier régime le seuil ne peut être que diminué. Les flûtistes utilisent donc manifestement d’autres moyen que la dynamique de pression d’alimentation pour décaler les seuils de changement de régime. Il peut s’agir de l’accord des résonances du conduit vocal ou d’une modification de la position des lèvres par rapport à l’entrée du *canal* pour favoriser un régime. L’utilisation de ces autres moyens d’action sera observée plus en détail dans la partie suivante.

Il serait intéressant d’étudier ce phénomène plus en détail en demandant à un musicien d’essayer de jouer le plus tôt possible sur le second registre en effectuant un *crescendo* à partir du premier registre. Cela permettrait de vérifier si les flûtistes parviennent à diminuer le seuil de passage du premier au second registre. D’autre part il serait également intéressant de demander à un musicien d’essayer de jouer le plus *pianissimo* possible sur le second registre en effectuant un *decrescendo* à partir du second registre pour vérifier si les musiciens parviennent à diminuer le seuil de passage du second registre au premier.

### 5.3 Contrôle de la justesse des notes

Lorsque les enregistrements pris lors de la séance de mesure effectuée avec Marine Sablonnière ont été écoutés pour la première fois un détail a aussitôt été remarqué : les notes enregistrées semblaient plus justes que celles enregistrées avec la bouche artificielle. Afin de mieux observer ce phénomène la fréquence de jeu a été tracée en fonction de la pression d’alimentation pour construire en quelque sorte un diagramme de bifurcation du système *instrument-instrumentiste*. La fréquence de jeu obtenue avec une rampe lente effectuée avec la bouche artificielle a été superposée aux figures afin de comparer les fréquences obtenues (voir figure 26 et en annexe D figure 52 ).

On observe alors que la flûtiste parvient à obtenir une fréquence de jeu bien plus constante en

fonction de la pression d'alimentation que celle obtenue avec la bouche artificielle. Pour le doigté de *si* (figure 52) la fréquence de jeu de la flûtiste semble être répartie sur deux lignes. Cela est dû au fait qu'elle n'a pas joué exactement la même note lors du *crescendo* et du *decrescendo*, mais que dans chacun des cas elle s'est efforcée de maintenir la fréquence la plus constante possible. Elle parvient donc à compenser l'effet de la variation de vitesse de jet sur la fréquence de jeu.

Deux hypothèses sont envisageables : elle peut utiliser l'accord de son conduit vocal sur une certaine fréquence et/ou jouer sur la position des lèvres par rapport à l'entrée du *canal*. Cet effet est particulièrement visible sur les doigtés de *si* et *si bémol* car la fréquence de jeu varie beaucoup avec la pression d'alimentation (pour le doigté de *si bémol* la fréquence varie de plus 300 cents sur la plage de pression utilisée par la flûtiste ce qui équivaut à une tierce mineure).

La correction de la justesse des notes a des effets visibles sur les spectrogrammes des sons enregistrés. Les sons de flûte contiennent des bandes de bruit. Il s'agit de bandes de fréquence dans lesquelles le bruit est plus fort. Cela est dû au fait que le bruit de turbulence généré au niveau de la source aéroacoustique est filtré par le résonateur. Ces bandes de bruit correspondent donc aux résonances du résonateur.

Lorsque l'on fait jouer une flûte avec une bouche artificielle les fréquences centrales de ces bandes de bruit restent quasiment constantes quelque soit la pression d'alimentation (voir figure 27 *a*). Ce n'est pas forcément le cas lorsque la flûte est jouée par musicien. On peut voir pour les doigtés pour lesquels la fréquence varie beaucoup que la fréquence centrale de certaines bandes de bruit se déplace pendant le jeu (voir figure 27 *b*). Cet effet est probablement lié au contrôle de la justesse par le musicien avec l'accord du conduit vocal ou le positionnement des lèvres. On peut remarquer également que les bandes de bruit des sons enregistrés avec un musicien sont plus larges que celles des sons obtenus avec la bouche artificielle.

Ce contrôle de la justesse des notes montre que les flûtistes disposent de paramètres de contrôle autres que la dynamique de pression d'alimentation qui sont assez efficaces.

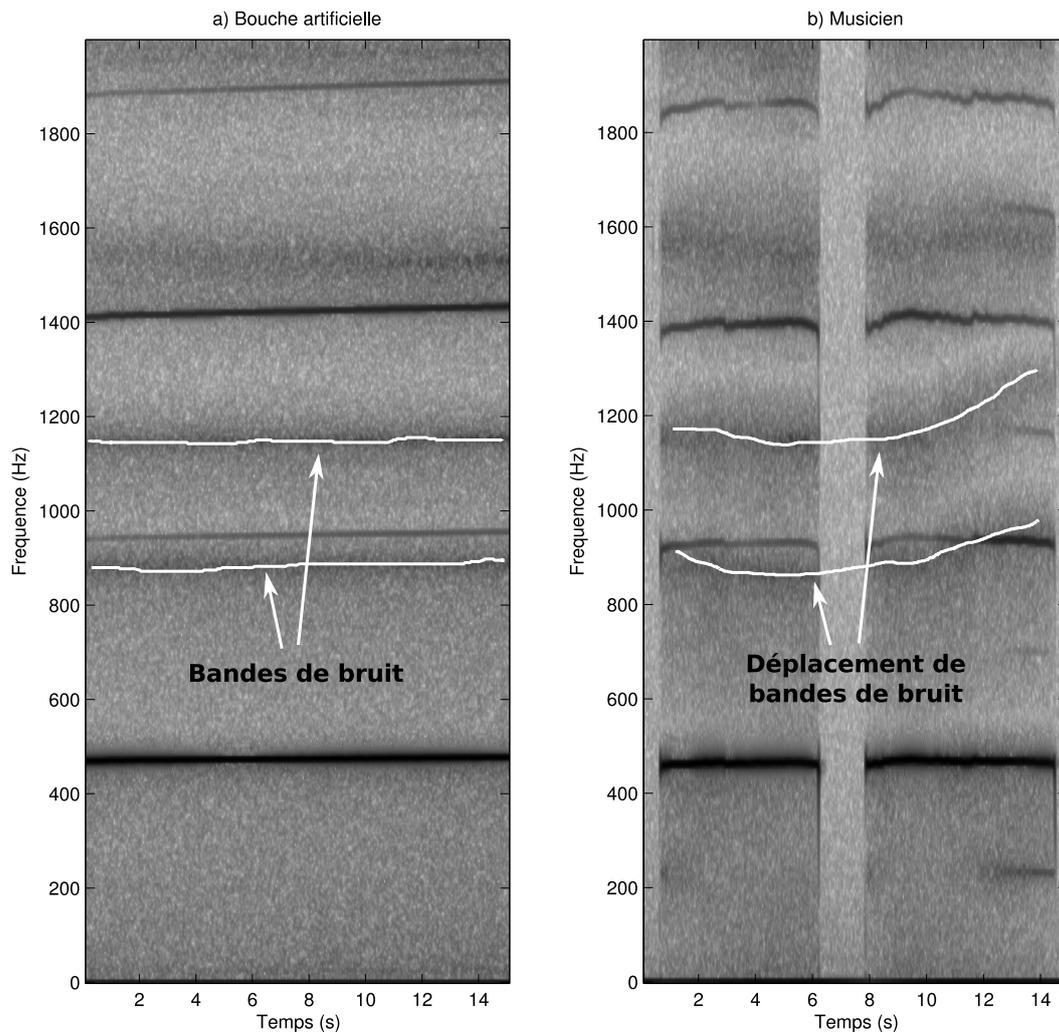


FIGURE 27 – Comparaison des spectrogrames de la pression interne à proximité du *biseau* mesurée avec la bouche artificielle et sur un musicien avec le doigté de *si bémol* d’une flûte à bec alto Zen On Bressan. On observe que le musicien parvient à déplacer les bandes de bruit probablement dans le but de corriger la justesse de la note.

## 6 Conclusion

Le travail effectué au cours de ce stage a permis de mieux connaître l'effet de la dynamique de pression d'alimentation sur le fonctionnement de la flûte à bec. Il a été mis en évidence que la dynamique de pression d'alimentation permet principalement de décaler les seuils de changement de régime. L'amplitude des variations de pression interne et la fréquence de jeu restent assez proches de celles données par le diagramme de bifurcation statique. Ces décalages de seuils peuvent être tels que certains régimes de fonctionnement n'apparaissent plus lorsque les variations de pression d'alimentation sont suffisamment rapides.

L'effet sur les seuils de changement de régime a donc été étudié en détail expérimentalement et en effectuant des simulations. Pour cela l'effet de différents profils de variations de pression d'alimentation ont été testés : des rampes linéaires, des profils en exponentiels et en racine carrée. L'effet de l'évolution de la pression d'alimentation précédant le passage du seuil statique de changement de régime a également été étudié en effectuant des rampes avec différentes pressions initiales et des rampes ayant un changement de pente à une pression donnée.

Ces travaux ont permis de faire ressortir certaines caractéristiques des changements de régimes :

- Les changements de régime ne sont pas instantanés.
- Plus les variations de pression d'alimentation sont rapides, plus les seuils de changement de régime s'écartent des seuils statique et plus le changement est rapide.
- Les seuils de changement de régime dépendent du chemin suivi par la pression d'alimentation à partir du moment où elle a dépassé le seuil statique.

Ces caractéristiques qui ressemblent à celles du seuil d'oscillation de la clarinette [5] [6] ont permis d'élaborer un modèle de changement de régime pour la flûte. Ce modèle considère que lors d'un changement de régime une grandeur adimensionnée, le *taux de changement de régime*, croit de 0 à 1 à une vitesse, appelée *vitesse de changement de régime*, qui dépend de l'écart entre la pression d'alimentation et le seuil statique. La confrontation avec les mesures et les simulations a montré que le modèle décrit bien le phénomène étudié. La comparaison d'estimations de la *vitesse de changement de régime* avec la partie réelle maximale des exposants de Floquet calculée par Soizic Terrien avec DDE-Biftool a montré qu'il existe un lien entre les deux grandeurs, mais la relation quantitative doit encore être explorée. L'évolution de la vitesse de changement de régime avec la pression d'alimentation ressemble à celle des parties réelles maximales des exposants de Floquet.

Des mesures de pression d'alimentation effectuées avec une musicienne professionnelle ont permis de montrer que les musiciens modifient les seuils de changement de régime dans un contexte musical. Les décalage des seuils mesurés sont plus importants que ceux obtenus avec la bouche artificielle avec les différentes configurations testées. D'autre part les flûtistes parviennent à augmenter et à diminuer les seuils de changement de registre alors que dans l'état actuel des connaissances il n'a été montré que la possibilité de décaler les seuils de changement de régime dans un seul sens par rapport aux seuils statiques avec la dynamique de pression d'alimentation. Ils utilisent donc probablement d'autres paramètres de contrôle que la dynamique de pression pour y parvenir comme l'accord du conduit vocal sur une certaine fréquence, ou la position des lèvres par rapport à l'entrée du canal.

Il est difficile d'estimer la part que prend la dynamique de pression dans le contrôle des seuils de changement de régime vis à vis des autres paramètres. L'exercice effectué avec les *crescendos* et *decrescendos* permet néanmoins de supposer qu'elle est utilisée : les décalages obtenus lorsqu'elle pouvait l'être (sur les *crescendos*) étant plus importants que lorsqu'elle ne pouvait pas être utilisée (sur les *decrescendos*). Pour aller plus loin, il serait intéressant d'essayer de reproduire les profils de pression utilisés par la flûtiste avec une bouche artificielle pour vérifier que les seuils obtenus sont différents de ceux obtenus par la flûtiste et pour quantifier l'importance de ce paramètre par comparaison avec les seuils statiques.

## Références

- [1] Roman Auvray, Benoît Fabre, and Pierre-Yves Lagrée. Regime change and oscillation thresholds in recorder-like instruments. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 131 :1574, 2012.
- [2] Roman AUVRAY, Benoit Fabre, Pierre-Yves Lagrée, Soizic Terrien, Christophe Vergez, et al. Influence of the fluctuations of the control pressure on the sound production in flute-like instruments. *Acoustics 2012 Nantes*, 2012.
- [3] David AW Barton, Bernd Krauskopf, and R Eddie Wilson. Collocation schemes for periodic solutions of neutral delay differential equations. *Journal of Difference Equations and Applications*, 12(11) :1087–1101, 2006.
- [4] Pierre Bergé, Yves Pomeau, and Christian Vidal. L'ordre dans le chaos. *L'ordre dans le chaos.. P. Bergé, Y. Pomeau, C. Vidal. Hermann, Paris, France. 353 pp. Price FF 230.00 (1984).*, 1, 1984.
- [5] Baptiste Bergeot, André Almeida, Christophe Vergez, and Bruno Gazengel. Prediction of the dynamic oscillation threshold in a clarinet model with a linearly increasing blowing pressure. *Nonlinear Dynamics*, pages 1–14, 2012.
- [6] Baptiste Bergeot, André Almeida, Christophe Vergez, and Bruno Gazengel. Prediction of the dynamic oscillation threshold in a clarinet model with a linearly increasing blowing pressure : Influence of noise. *arXiv preprint arXiv :1304.2294*, 2013.
- [7] Baptiste Bergeot, André Almeida, Christophe Vergez, Bruno Gazengel, Ferrand Didier, et al. Attack transients of an artificially blown clarinet : evolution of the sound amplitude for different blowing pressure profiles. 2012.
- [8] Antoine Chaigne and Jean Kergomard. *Acoustique des instruments de musique*. belin, 2008.
- [9] John W Coltman. Jet drive mechanisms in edge tones and organ pipes. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 60 :725, 1976.
- [10] Alain De Cheveigné and Hideki Kawahara. Yin, a fundamental frequency estimator for speech and music. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 111 :1917, 2002.
- [11] Patricio De La Cuadra, Christophe Vergez, and Benoit Fabre. Visualization and analysis of jet oscillation under transverse acoustic perturbation. *Journal of Flow Visualization and Image Processing*, 14(4), 2007.
- [12] Koen Engelborghs, T Luzyanina, and G Samaey. DDE-BIFTOOL : a Matlab package for bifurcation analysis of delay differential equations. *TW Report*, 305, 2000.
- [13] Augustin Ernout. Étude de l'influence des fluctuations de pression de contrôle sur le fonctionnement et la sonorité des tuyaux d'orgue et des flûtes. Master's thesis, Université Diderot Paris VII, 2012.
- [14] B Fabre and A Hirschberg. Physical modeling of flue instruments : a review of lumped models. *Acta Acustica united with Acustica*, 86(4) :599–610, 2000.
- [15] Didier Ferrand, Ch Vergez, Benoit Fabre, and François Blanc. High-precision regulation of a pressure controlled artificial mouth : the case of recorder-like musical instruments. *Acta Acustica united with Acustica*, 96(4) :701–712, 2010.
- [16] G Floquet. Sur les equations differentielles lineaires. *Ann. ENS [2]*, 12 :47–88, 1883.
- [17] Antoine Lefebvre. *Computational acoustic methods for the design of woodwind instruments*. PhD thesis, McGill University, 2010.
- [18] Ali H Nayfeh and Balakumar Balachandran. *Applied nonlinear dynamics*. Wiley. com, 2008.
- [19] Manfred R Schroeder. Period histogram and product spectrum : New methods for fundamental-frequency measurement. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 43 :829, 1968.
- [20] Soizic Terrien. Flûte à bec : comparaison du jeu d'un musicien, d'une bouche artificielle et d'une synthèse sonore par modèle physique. Master's thesis, Université Pierre et Marie Curie, 2010.

- [21] Soizic Terrien. Flûte à bec : analyse de deux phénomènes observés sur bouche artificielle influence de l'inharmonicité du résonateur et étude des sons éoliens. Master's thesis, Université de Provence - Aix-Marseille I, 2011.
- [22] Marc-Pierre Verge, Benoit Fabre, A Hirschberg, and APJ Wijnands. Sound production in recorderlike instruments. i. dimensionless amplitude of the internal acoustic field. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 101 :2914, 1997.
- [23] MP Verge, R Caussé, B Fabre, A Hirschberg, APJ Wijnands, and A van Steenbergen. Jet oscillations and jet drive in recorder-like instruments. *Acta acustica*, 2(5) :403–419, 1994.

## A Diagrammes de bifurcations obtenus expérimentalement

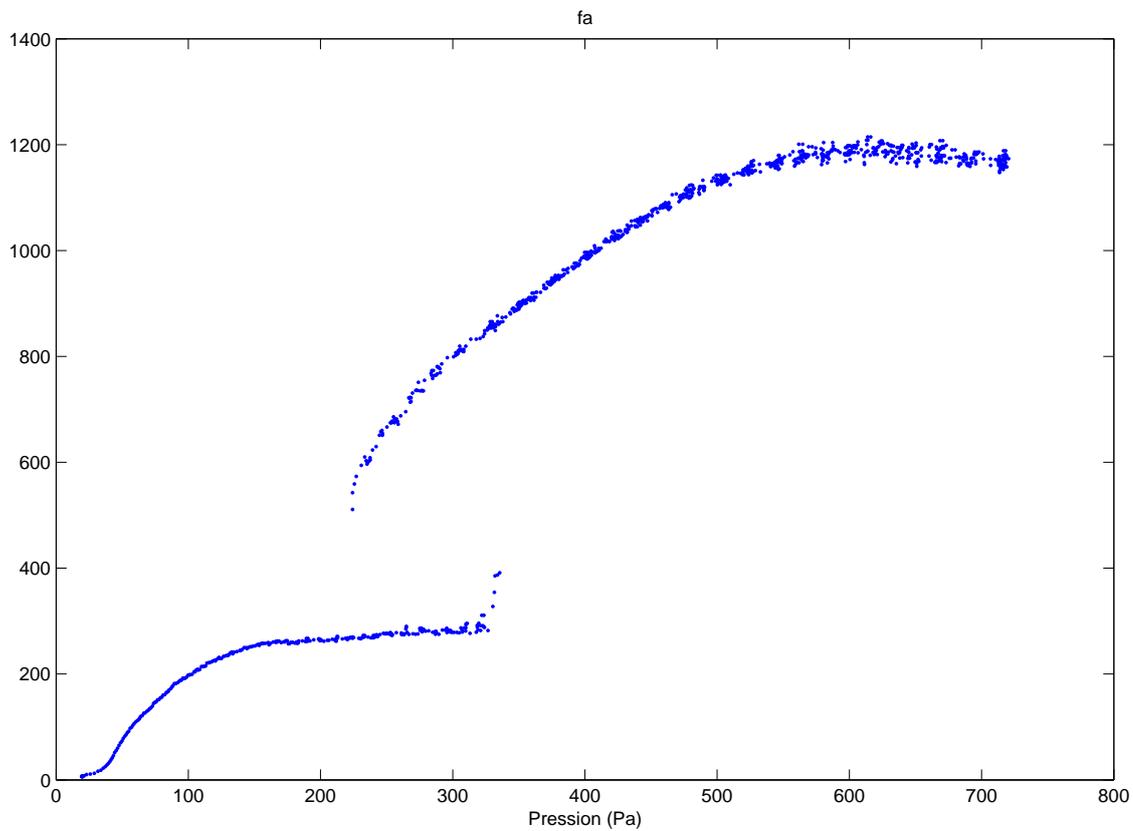


FIGURE 28 – Diagramme de bifurcation en amplitude du champ interne mesuré à proximité du *biseau* pour le doigté de *fa* grave d'une flûte à bec alto zen on Bressan.

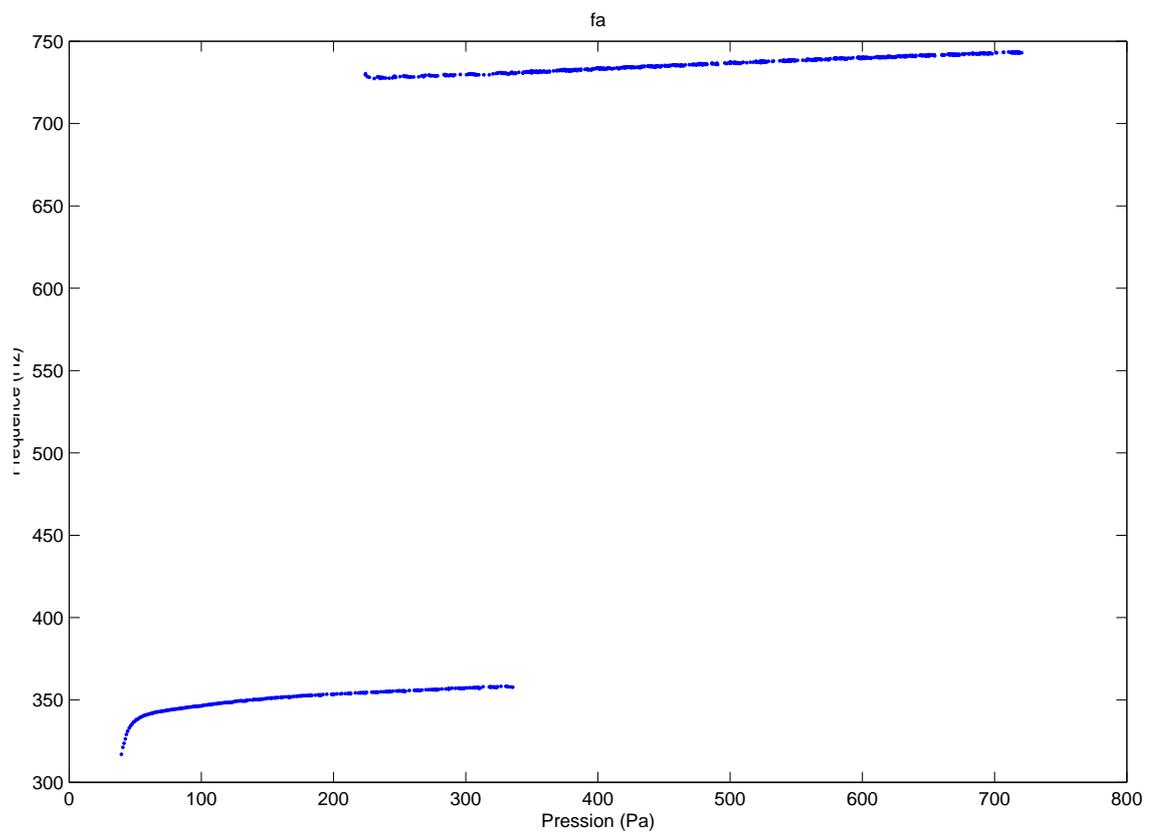


FIGURE 29 – Diagramme de bifurcation en fréquence de jeu pour le doigté de *fa* grave d’une flûte à bec alto zen on Bressan.

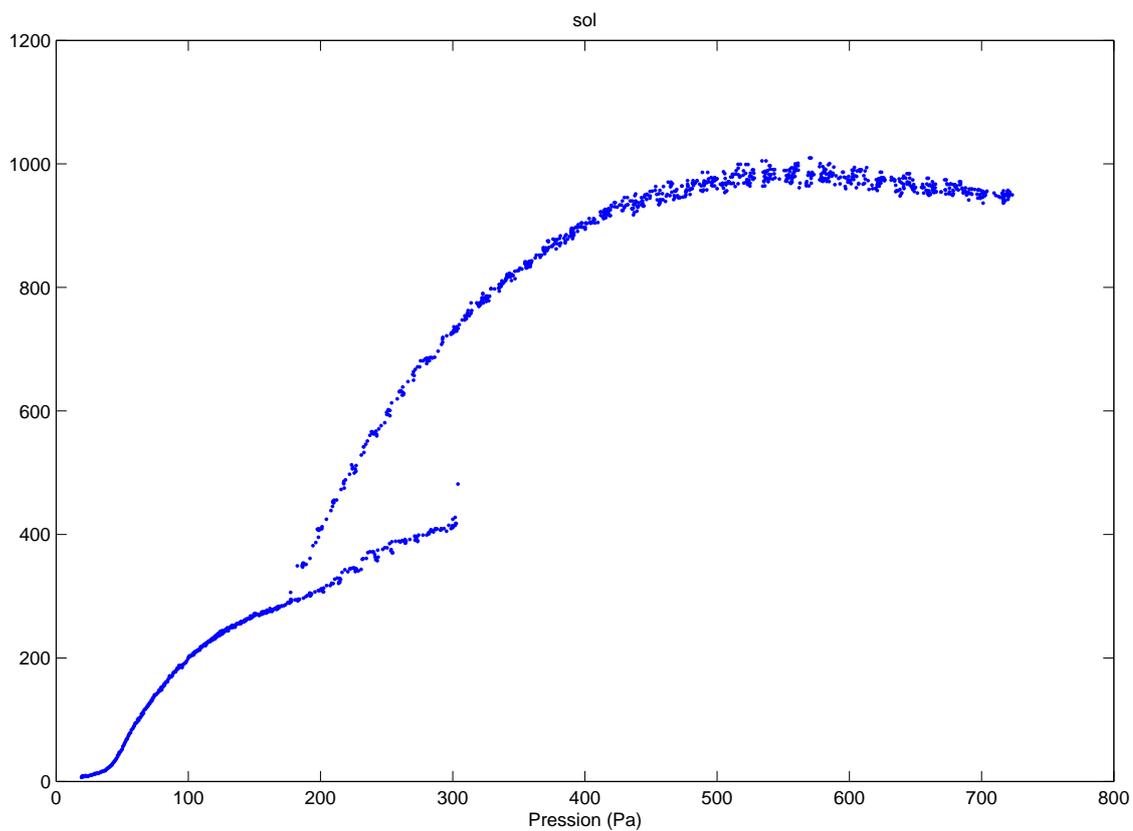


FIGURE 30 – Diagramme de bifurcation en amplitude du champ interne mesuré à proximité du *biseau* pour le doigté de *sol* grave d’une flûte à bec alto zen on Bressan.

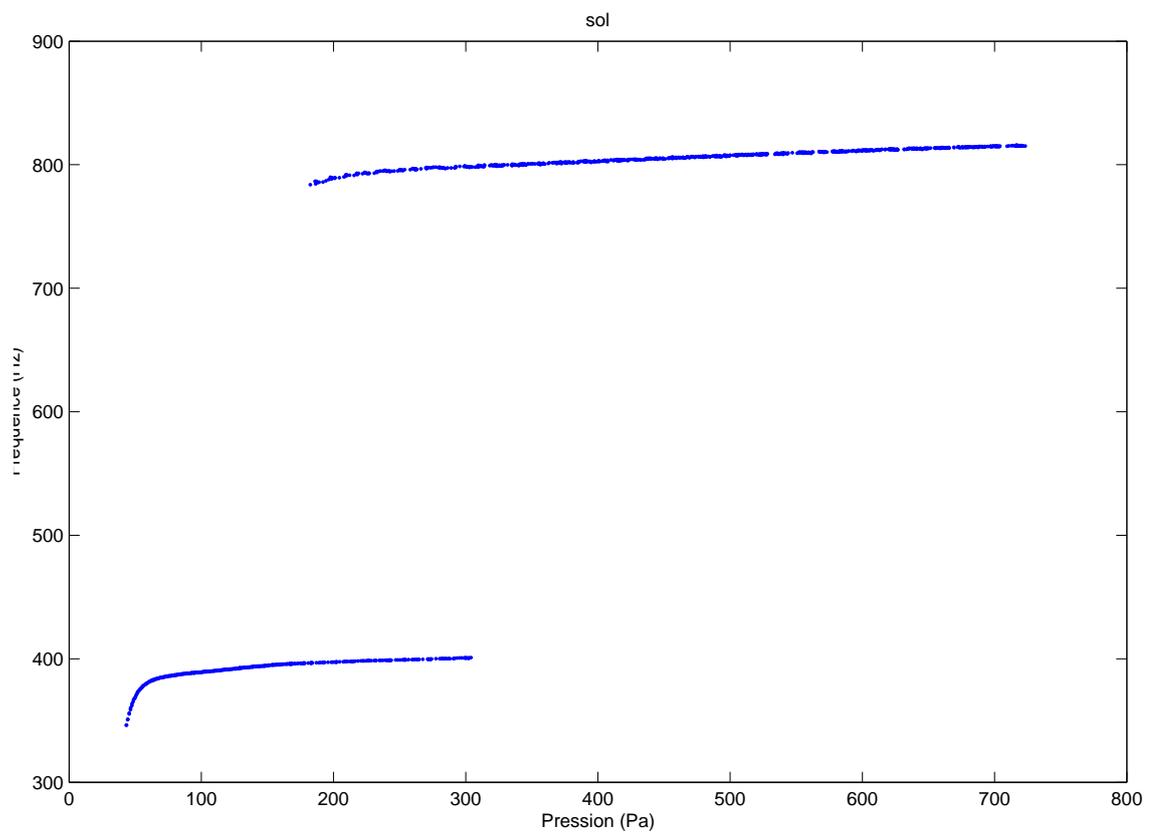


FIGURE 31 – Diagramme de bifurcation en fréquence de jeu pour le doigté de *sol* grave d’une flûte à bec alto zen on Bressan.

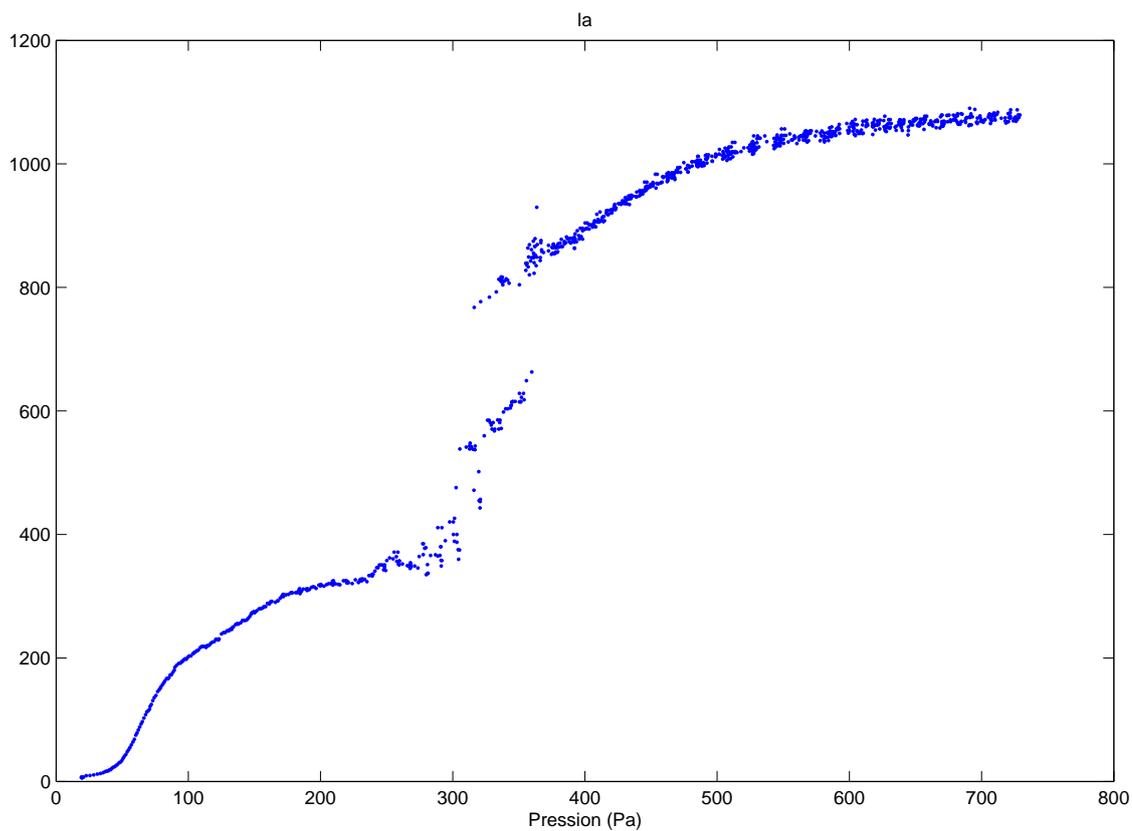


FIGURE 32 – Diagramme de bifurcation en amplitude du champ interne mesuré à proximité du *biseau* pour le doigté de *la* grave d’une flûte à bec alto zen on Bressan.

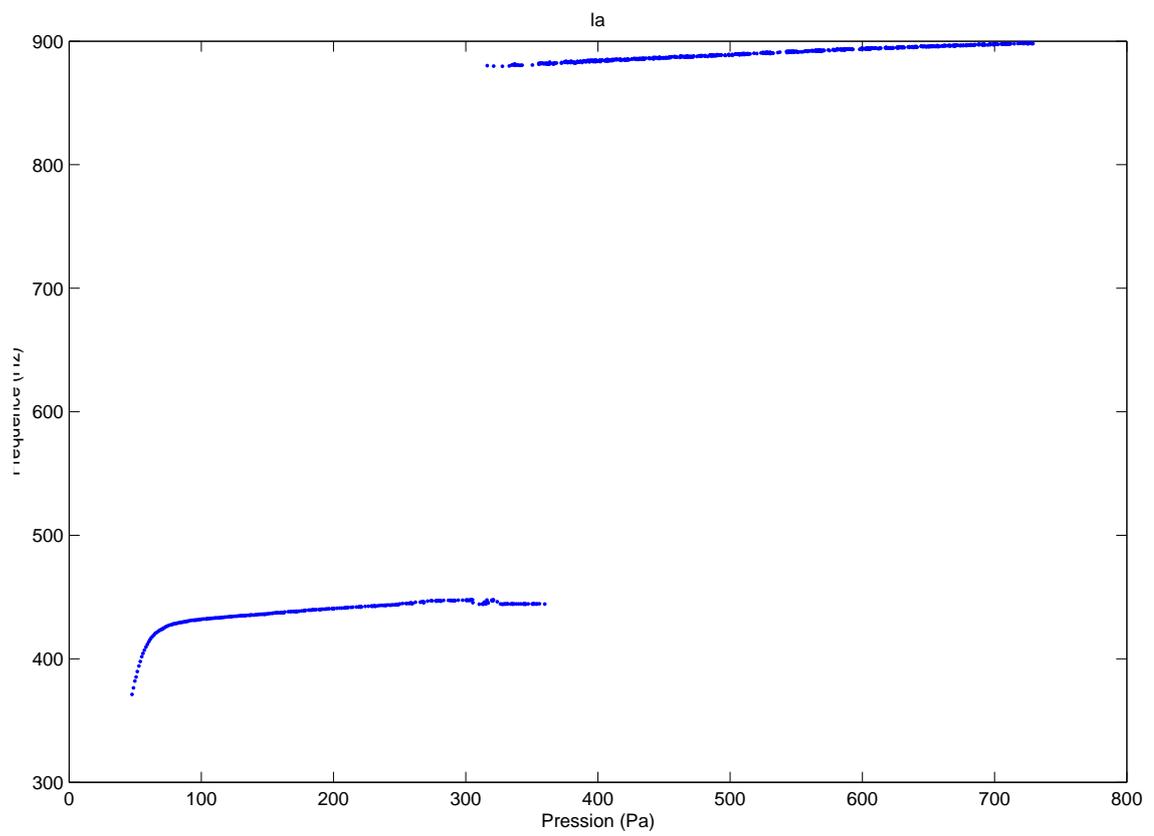


FIGURE 33 – Diagramme de bifurcation en fréquence de jeu pour le doigté de *la* grave d’une flûte à bec alto zen on Bressan.

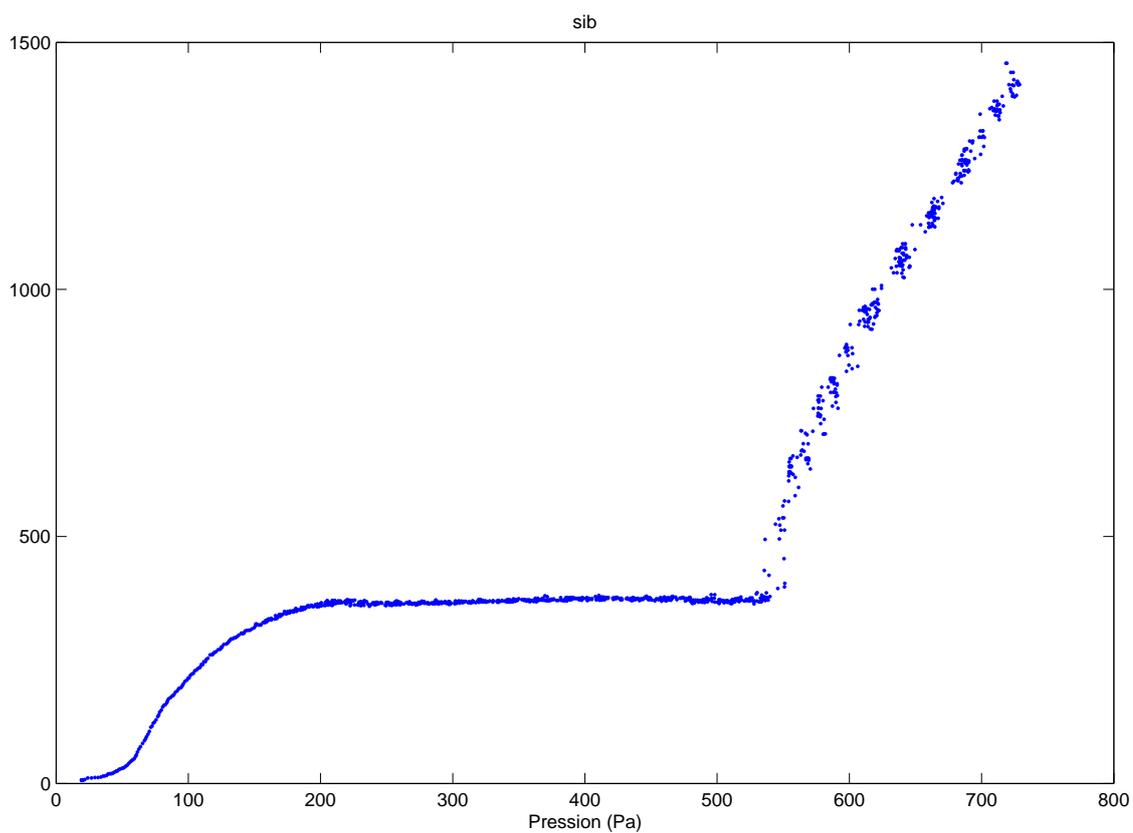


FIGURE 34 – Diagramme de bifurcation en amplitude du champ interne mesuré à proximité du *biseau* pour le doigté de *si bémol* grave d’une flûte à bec alto zen on Bressan.

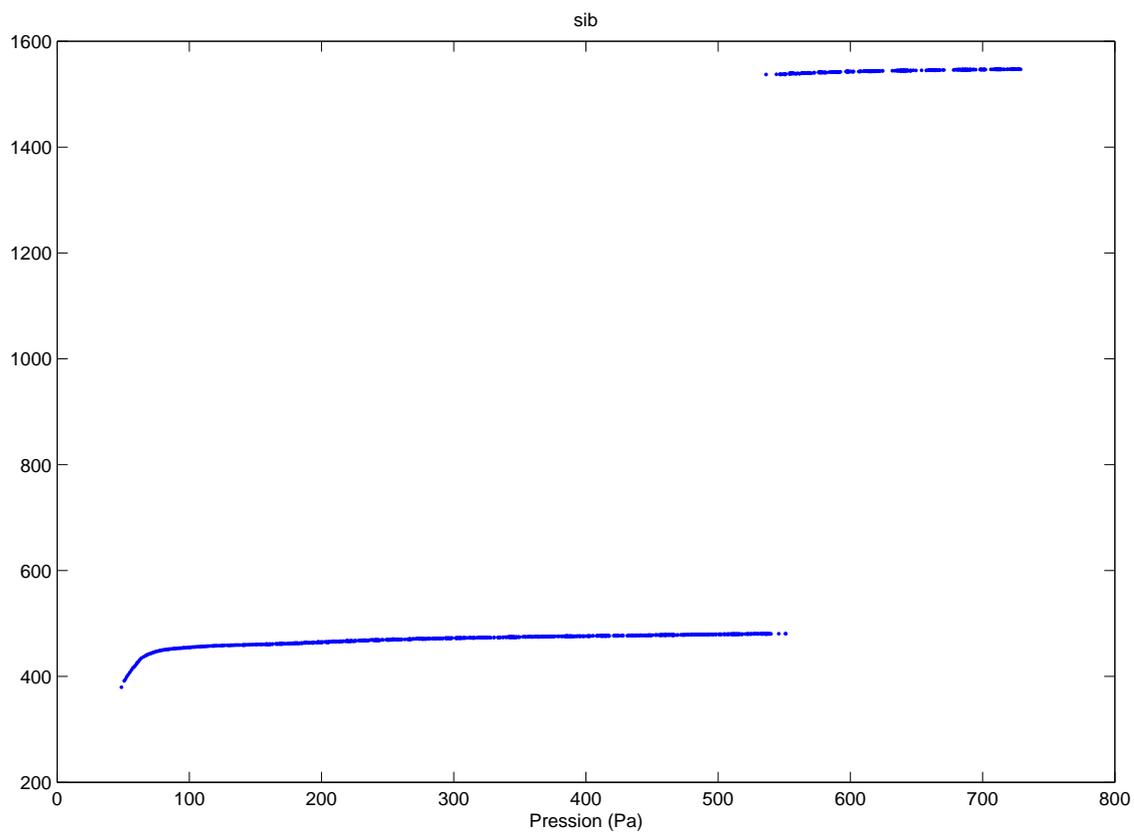


FIGURE 35 – Diagramme de bifurcation en fréquence de jeu pour le doigté de *si bémol* grave d’une flûte à bec alto zen on Bressan.

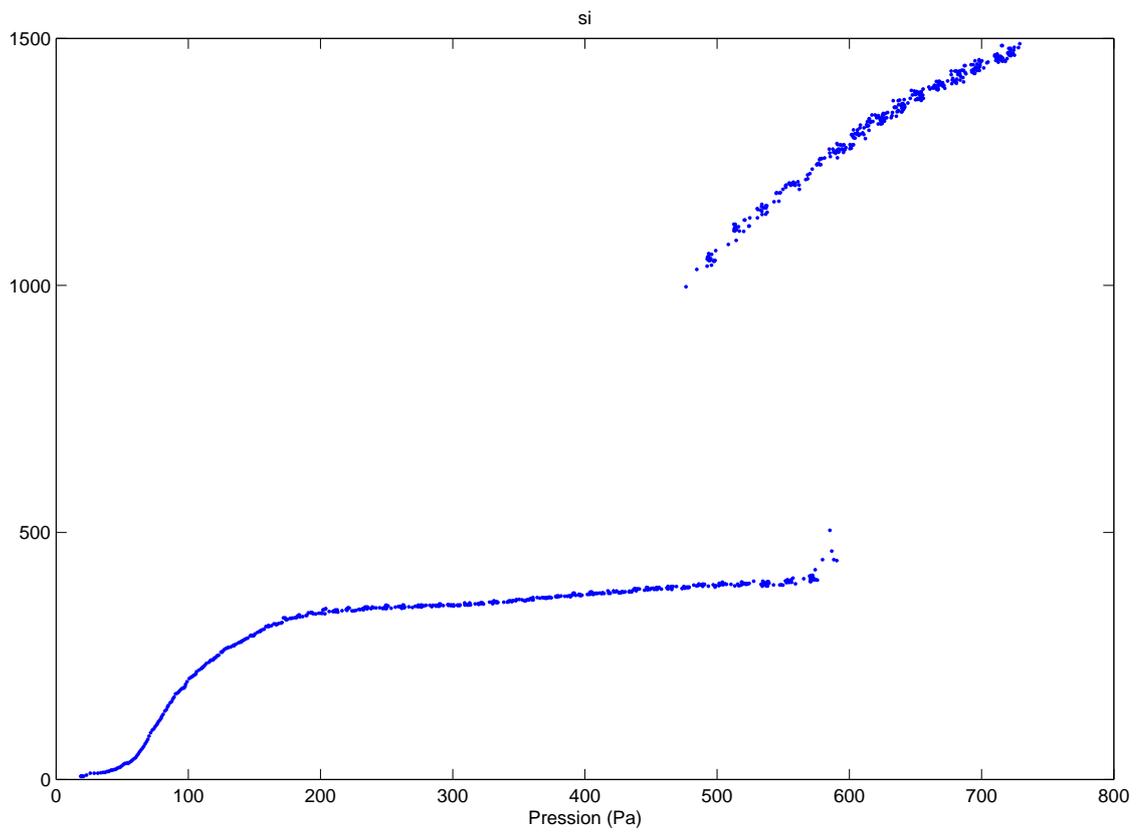


FIGURE 36 – Diagramme de bifurcation en amplitude du champ interne mesuré à proximité du *biseau* pour le doigté de *si* grave d’une flûte à bec alto zen on Bressan.

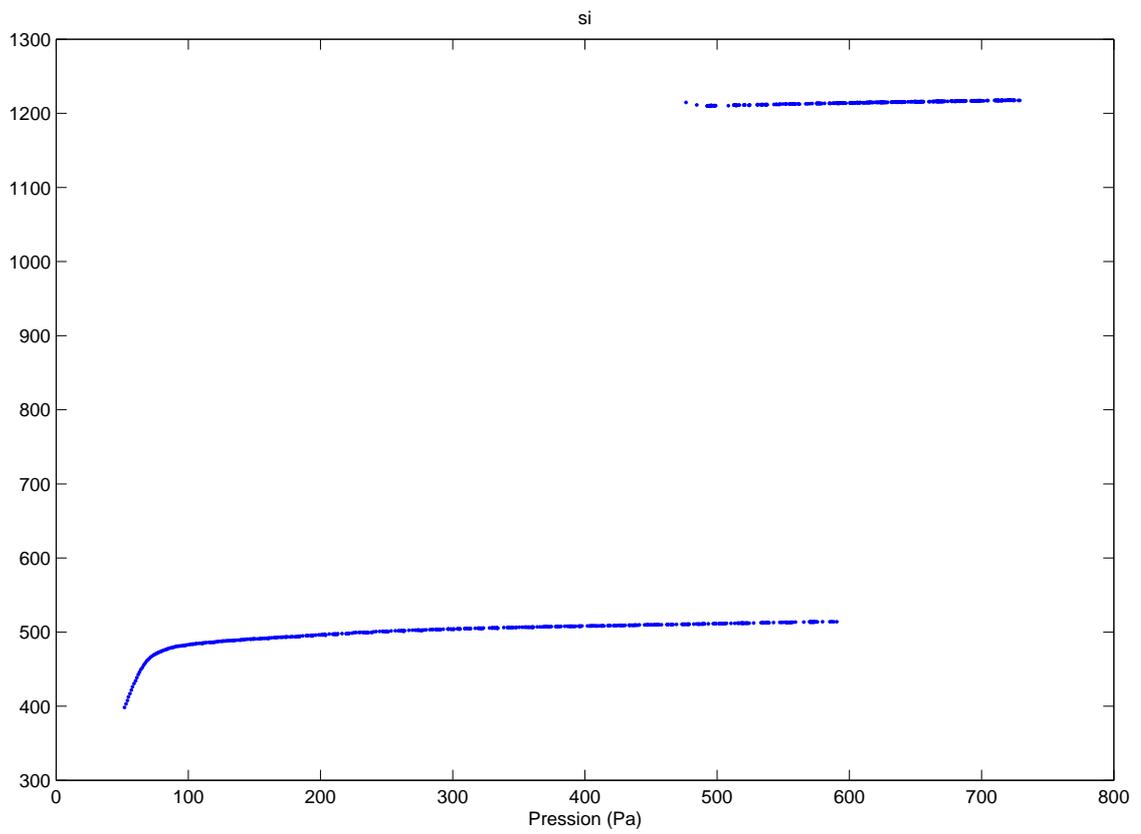


FIGURE 37 – Diagramme de bifurcation en fréquence de jeu pour le doigté de *si* grave d’une flûte à bec alto zen on Bressan.

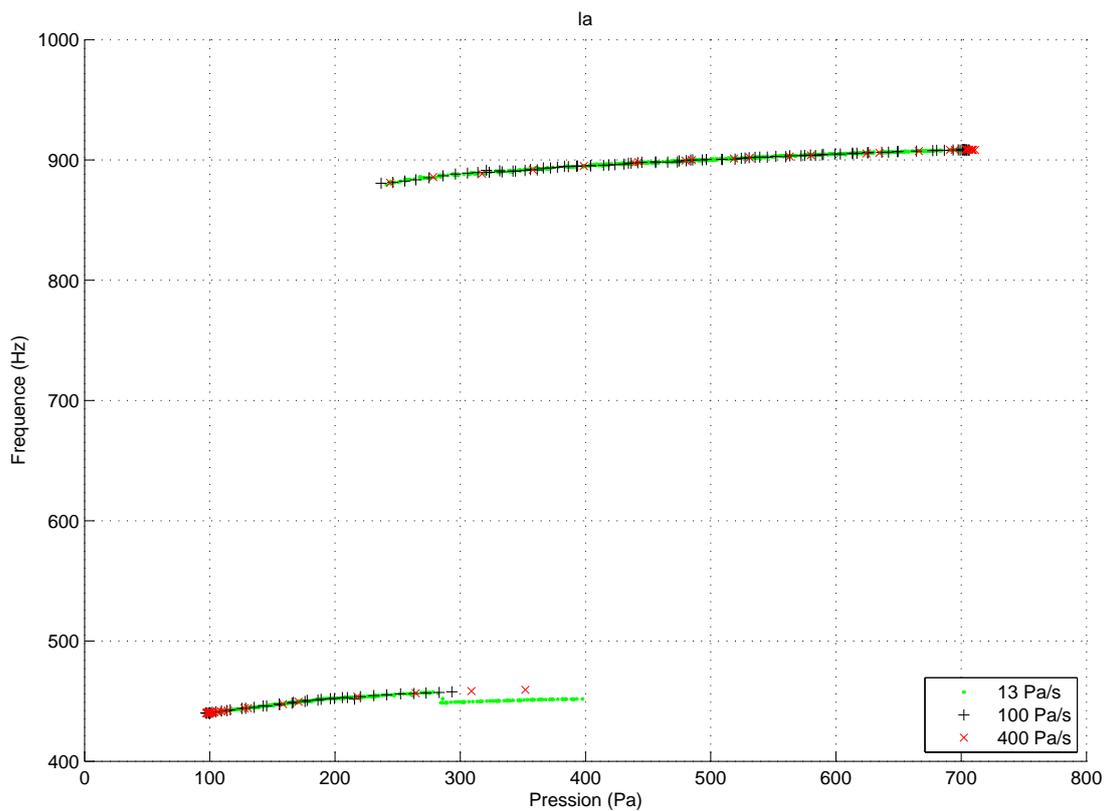


FIGURE 38 – Diagrammes de bifurcations en fréquence fondamentale tracés à partir de 3 rampes de pression d'alimentation de respectivement 13 Pa/s, 100 Pa/s et 400 Pa/s effectuées sur le doigté de *la* grave d'une flûte à bec alto Zen On Bressan.

## B Comparaison de différents profils de variations de pression

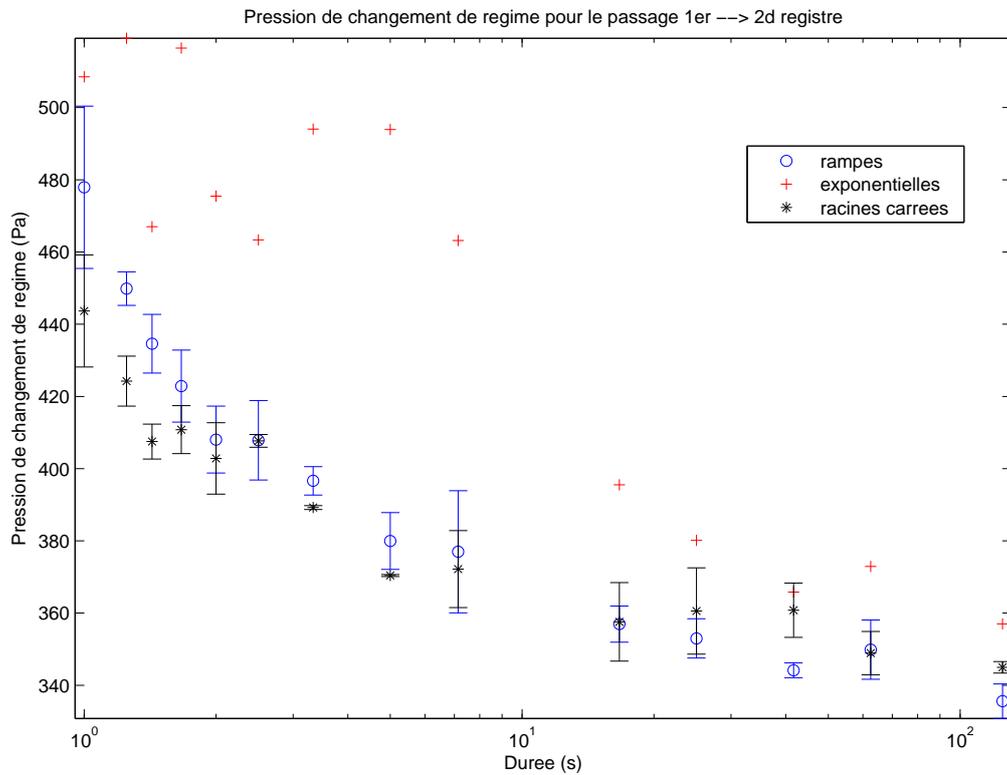


FIGURE 39 – Pression de passage du premier au second régime en fonction de la durée des variations de pression pour des profils exponentiels, linéaires et en racine carrées. Une flûte à bec alto Zen On Bressan a été utilisée avec le doigté de *fa* grave.

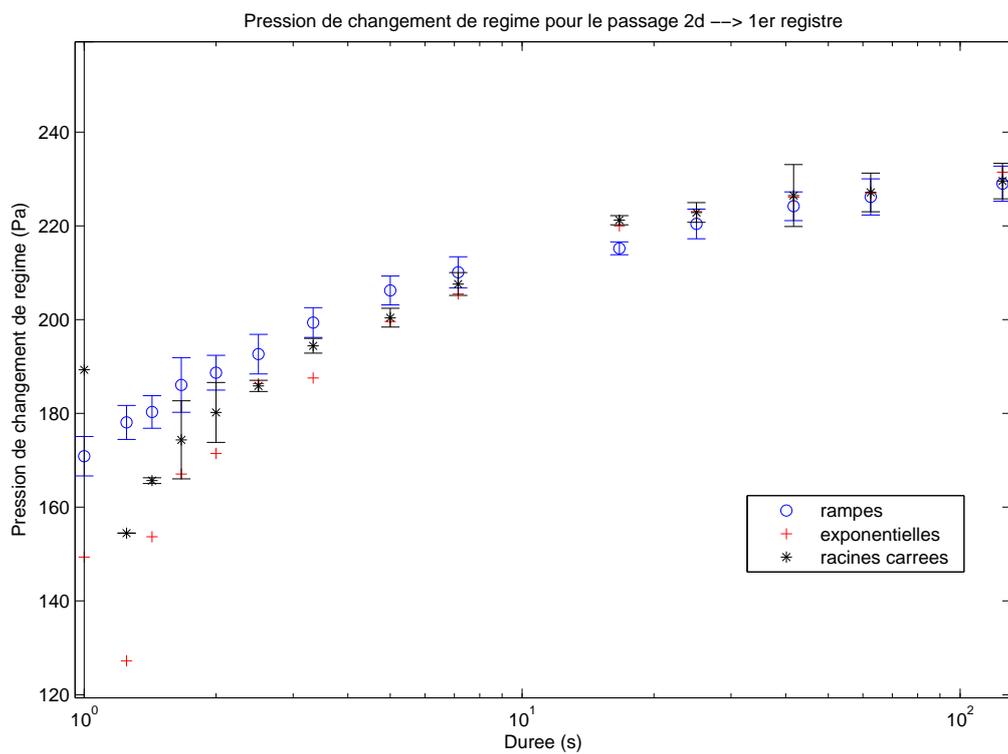


FIGURE 40 – Pression de passage du second au premier régime en fonction de la durée des variations de pression pour des profils exponentiels, linéaires et en racine carrées. Une flûte à bec alto Zen On Bressan a été utilisée avec le doigté de *fa* grave.

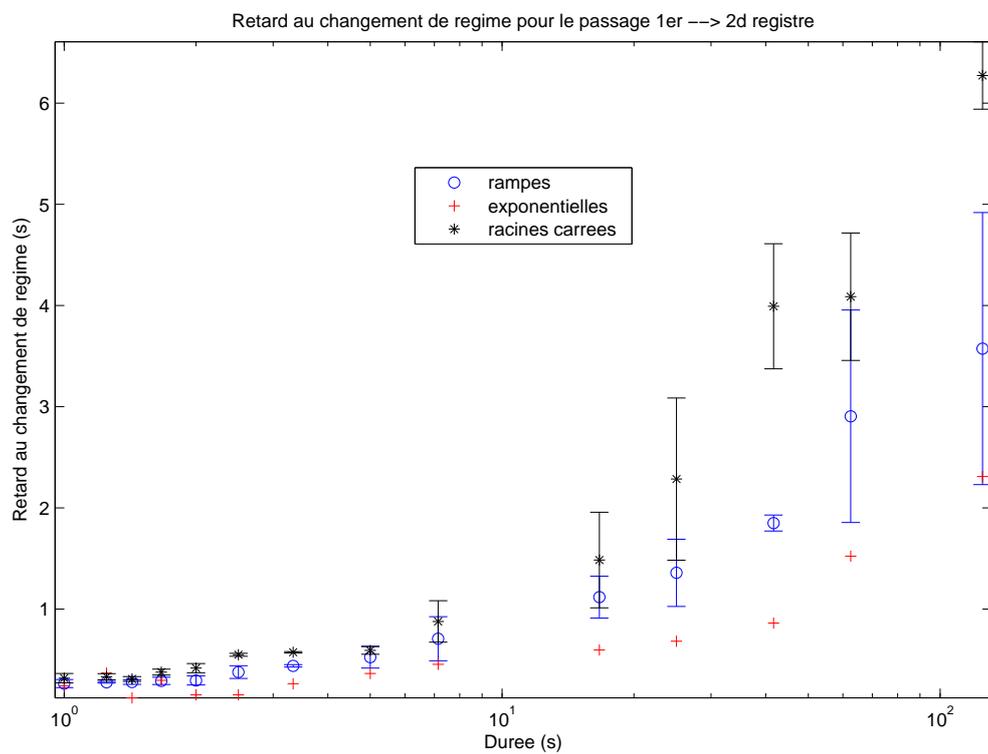


FIGURE 41 – Retard au changement de régime pour le passage du premier au second régime en fonction de la durée des variations de pression pour des profils exponentiels, linéaires et en racine carrées. Une flûte à bec alto Zen On Bressan a été utilisée avec le doigté de *fa* grave.

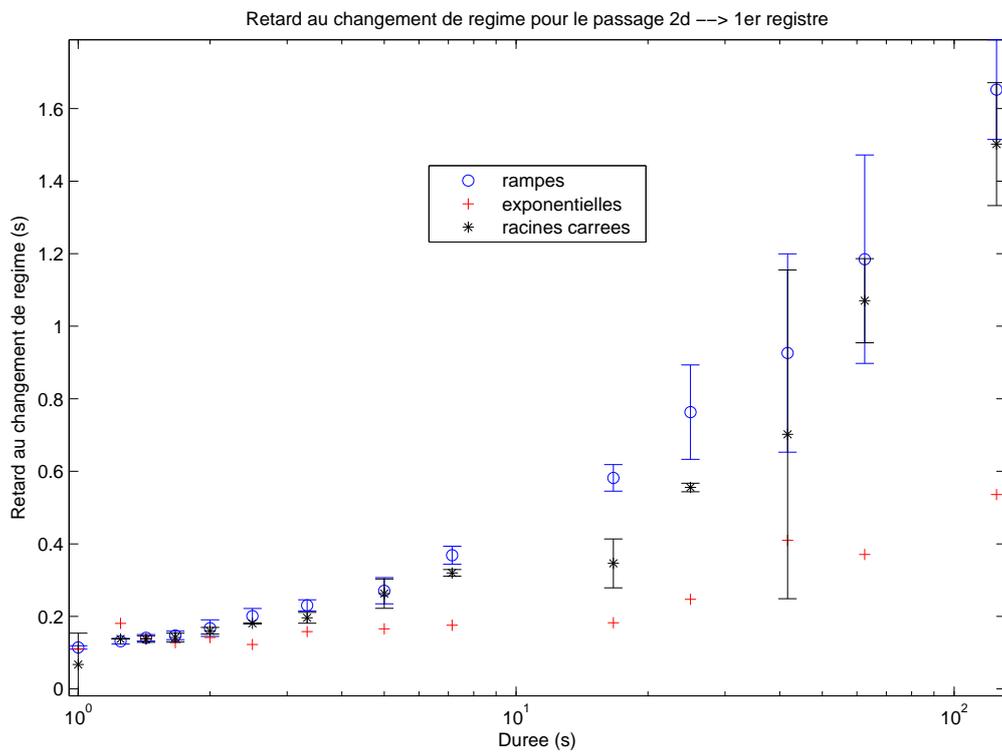


FIGURE 42 – Retard au changement de régime pour le passage du second au premier régime en fonction de la durée des variations de pression pour des profils exponentiels, linéaires et en racine carrées. Une flûte à bec alto Zen On Bressan a été utilisée avec le doigté de *fa* grave.

## C Paramètres du modèle de changement de régime

doigté	1 <sup>er</sup> régime vers 2 <sup>e</sup> ( $s^{-1}Pa^{-1/2}$ )	2 <sup>e</sup> régime vers 1 <sup>er</sup> ( $s^{-1}Pa^{-1/2}$ )
fa	0,4971	1,6412
sol	1,7264	2,2341
la	0,9385	2,5745
si bémol	0,8811	3,2449
si	0,5269	1,5188

TABLE 3 – Paramètre  $\alpha$  du modèle avec  $v_{ch} = \alpha\sqrt{\Delta p}$  extrait des données expérimentales par régression linéaire pour les 5 doigtés étudiés.

doigté	1 <sup>er</sup> régime vers 2 <sup>e</sup>	2 <sup>e</sup> régime vers 1 <sup>er</sup>
fa	0,9917	0,994
sol	0,9685	0,9723
la	0,9957	0,955
si bémol	0,9989	0,957
si	0,9961	0,9561

TABLE 4 – Coefficients de corrélations entre les seuils de changement de régime et la racine 2/3 des pentes des rampes utilisées obtenus pour les différents doigtés étudiés.

## D Mesures effectuées sur les musiciens

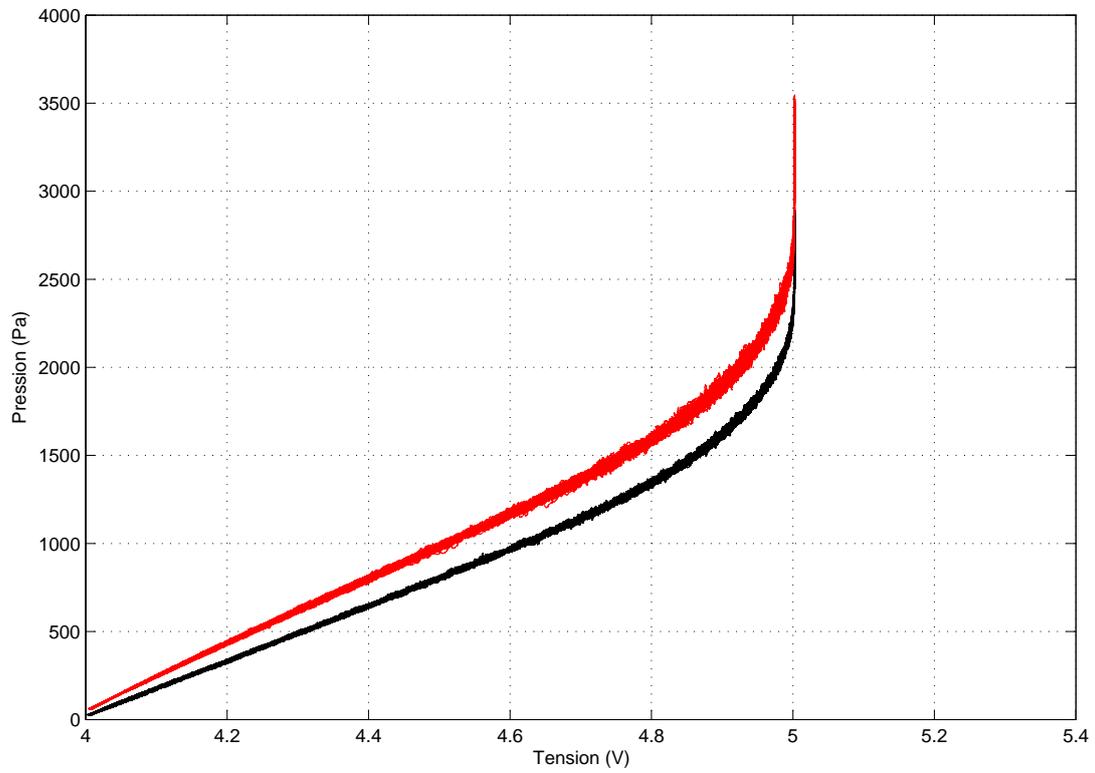


FIGURE 43 – Courbes d'étalonnage extrêmes obtenues en traçant la pression donnée par un capteur de référence en fonction de la tension de sortie du capteur utilisé pour les mesures sur musicien.

## D.1 Notes extraites d'un morceau de musique interprété par une flûtiste

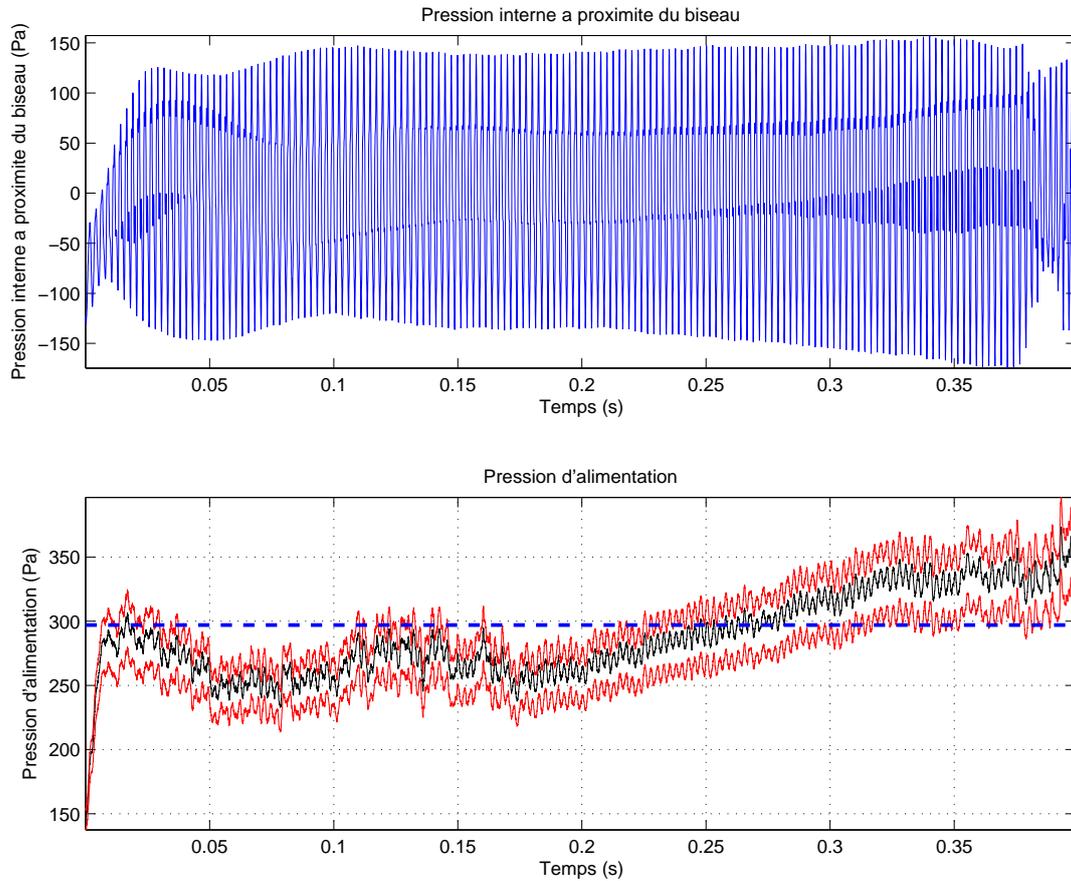


FIGURE 44 – Pression interne mesurée à proximité du biseau et pression d'alimentation pour le doigté de *sol* grave d'une flûte à bec alto Zen On Bressan. La pression d'alimentation tracée en noire correspond à la valeur estimée avec une calibration effectuée juste après les mesures, et les deux courbes tracées en rouge correspondent aux pression d'alimentation maximale et minimale. La ligne en pointillés représente le seuil statique de changement de régime estimé avec la bouche artificielle.

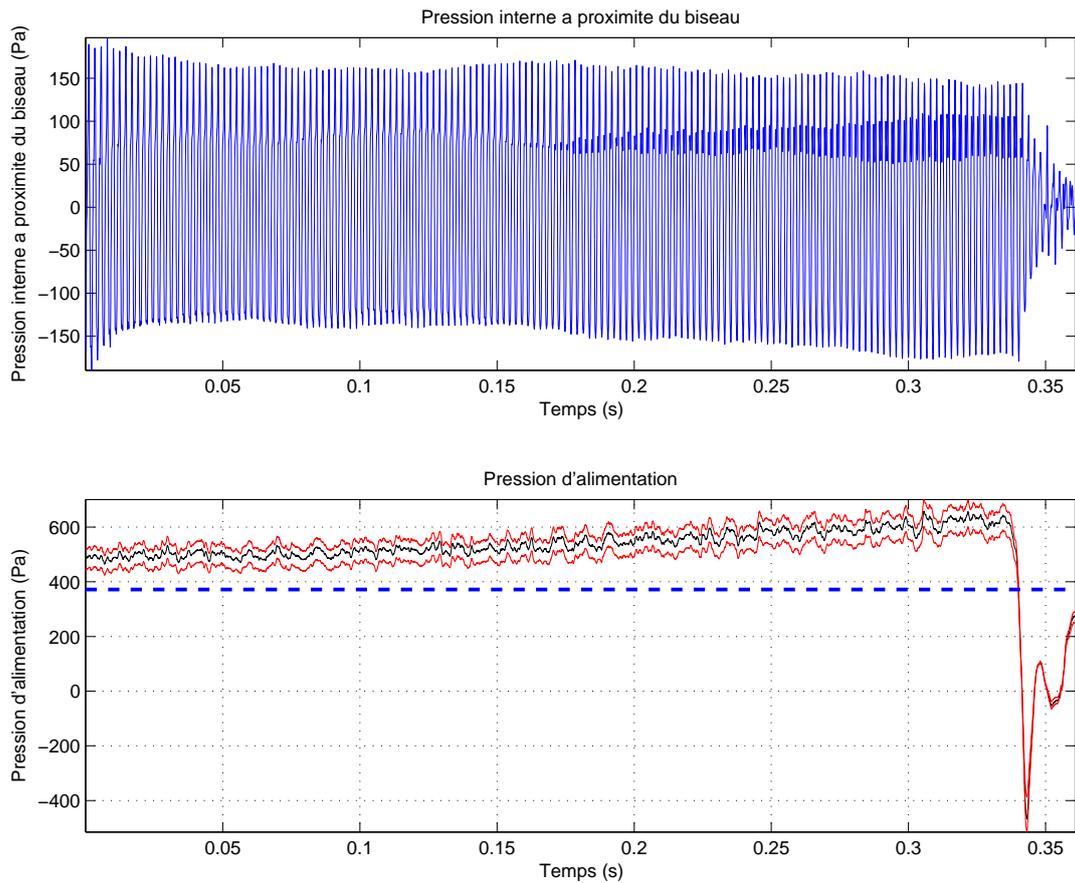


FIGURE 45 – Pression interne mesurée à proximité du biseau et pression d'alimentation pour le doigté de *la grave* d'une flûte à bec alto Zen On Bressan. La pression d'alimentation tracée en noire correspond à la valeur estimée avec une calibration effectuée juste après les mesures, et les deux courbes tracées en rouge correspondent aux pression d'alimentation maximale et minimale. La ligne en pointillés représente le seuil statique de changement de régime estimé avec la bouche artificielle.

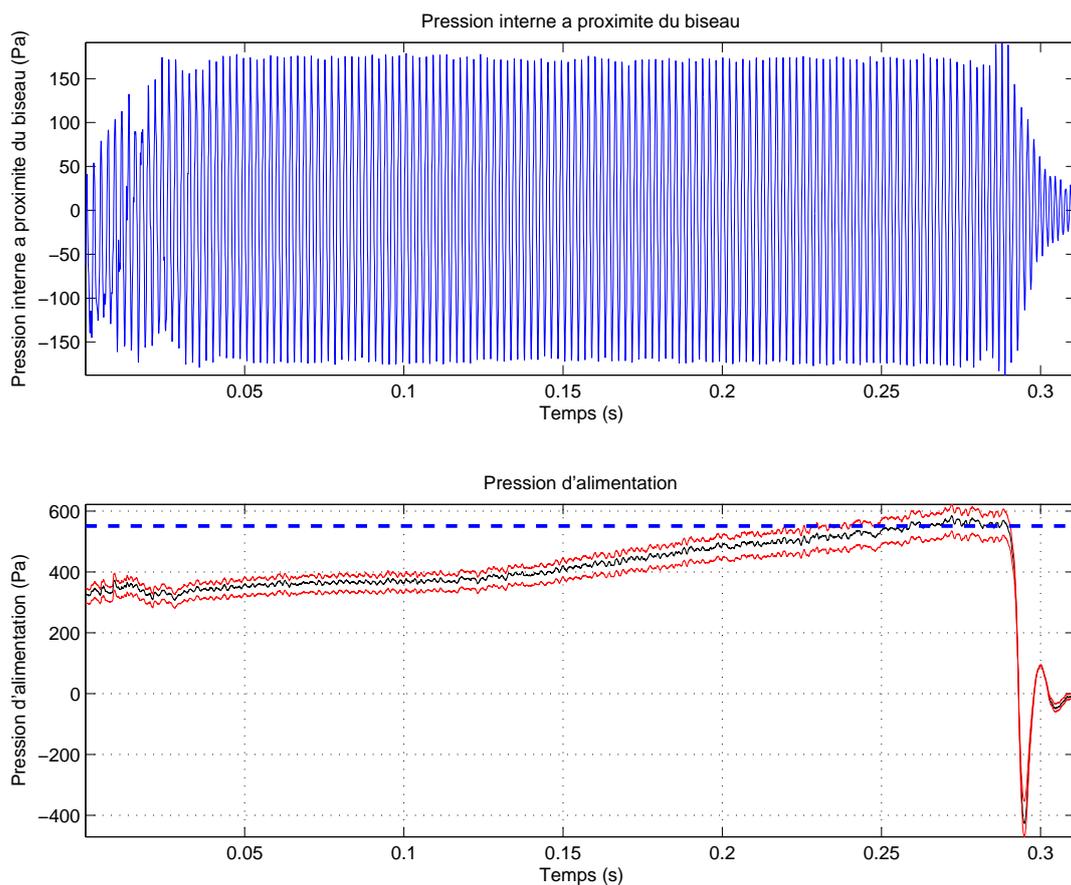


FIGURE 46 – Pression interne mesurée à proximité du biseau et pression d'alimentation pour le doigté de *si bémol* grave d'une flûte à bec alto Zen On Bressan. La pression d'alimentation tracée en noire correspond à la valeur estimée avec une calibration effectuée juste après les mesures, et les deux courbes tracées en rouge correspondent aux pression d'alimentation maximale et minimale. La ligne en pointillés représente le seuil statique de changement de régime estimé avec la bouche artificielle.

## D.2 Crescendos et decrescendos sans changement de registre

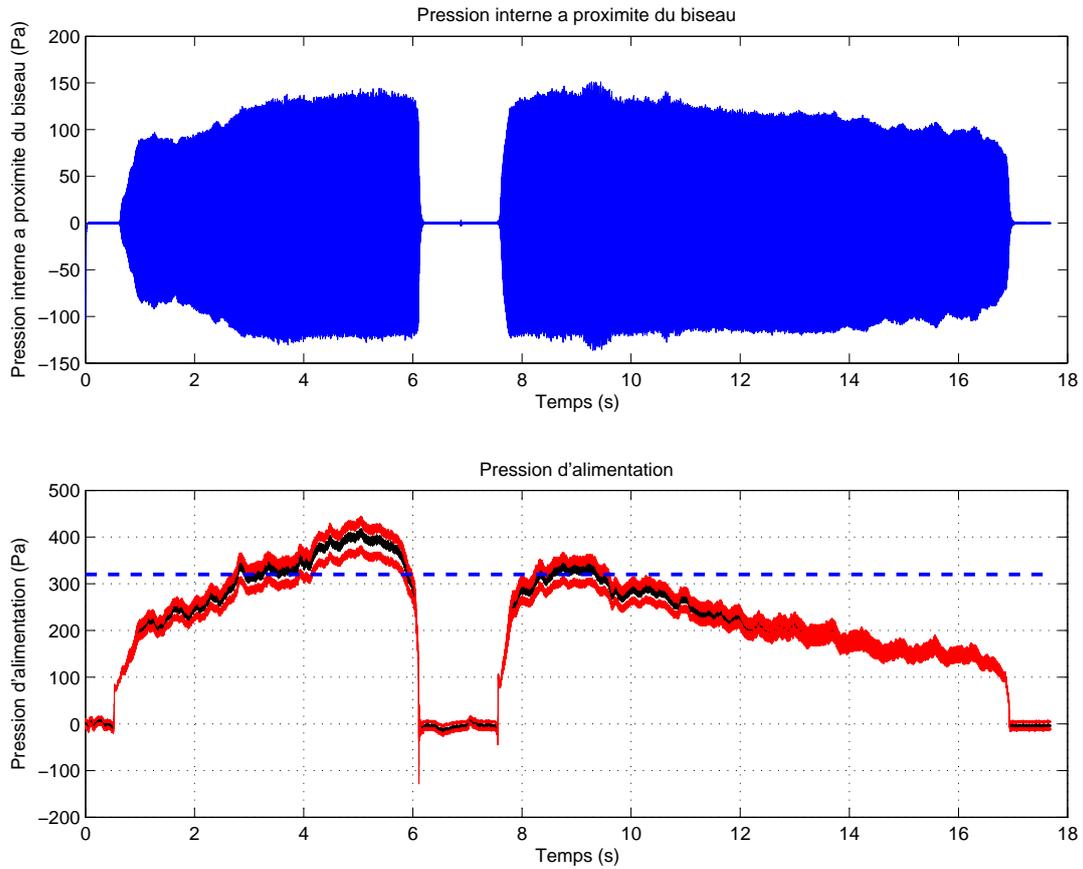


FIGURE 47 – Pression interne mesurée à proximité du biseau et pression d'alimentation pour le doigté de *fa* grave d'une flûte à bec alto Zen On Bressan. La pression d'alimentation tracée en noire correspond à la valeur estimée avec une calibration effectuée juste après les mesures, et les deux courbes tracées en rouge correspondent aux pression d'alimentation maximale et minimale. La ligne en pointillés représente le seuil statique de changement de régime estimé avec la bouche artificielle.

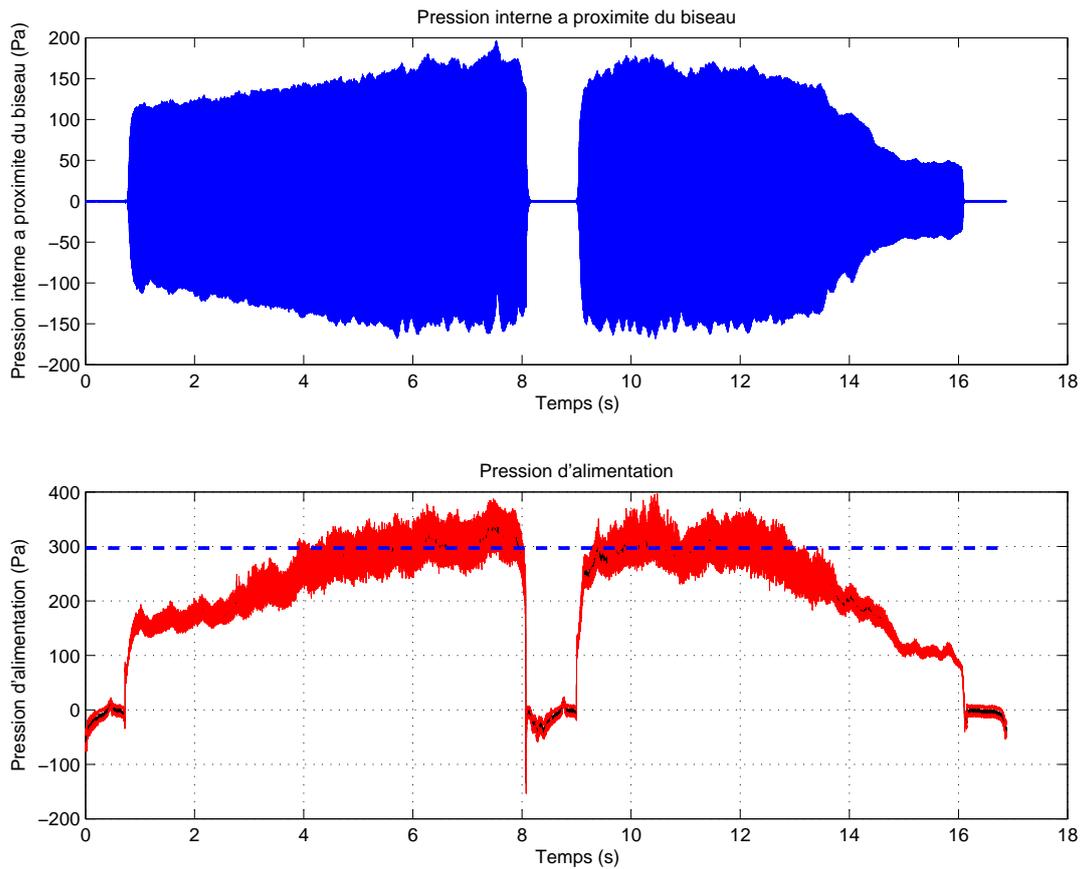


FIGURE 48 – Pression interne mesurée à proximité du biseau et pression d’alimentation pour le doigté de *sol* grave d’une flûte à bec alto Zen On Bressan. La pression d’alimentation tracée en noire correspond à la valeur estimée avec une calibration effectuée juste après les mesures, et les deux courbes tracées en rouge correspondent aux pression d’alimentation maximale et minimale. La ligne en pointillés représente le seuil statique de changement de régime estimé avec la bouche artificielle.

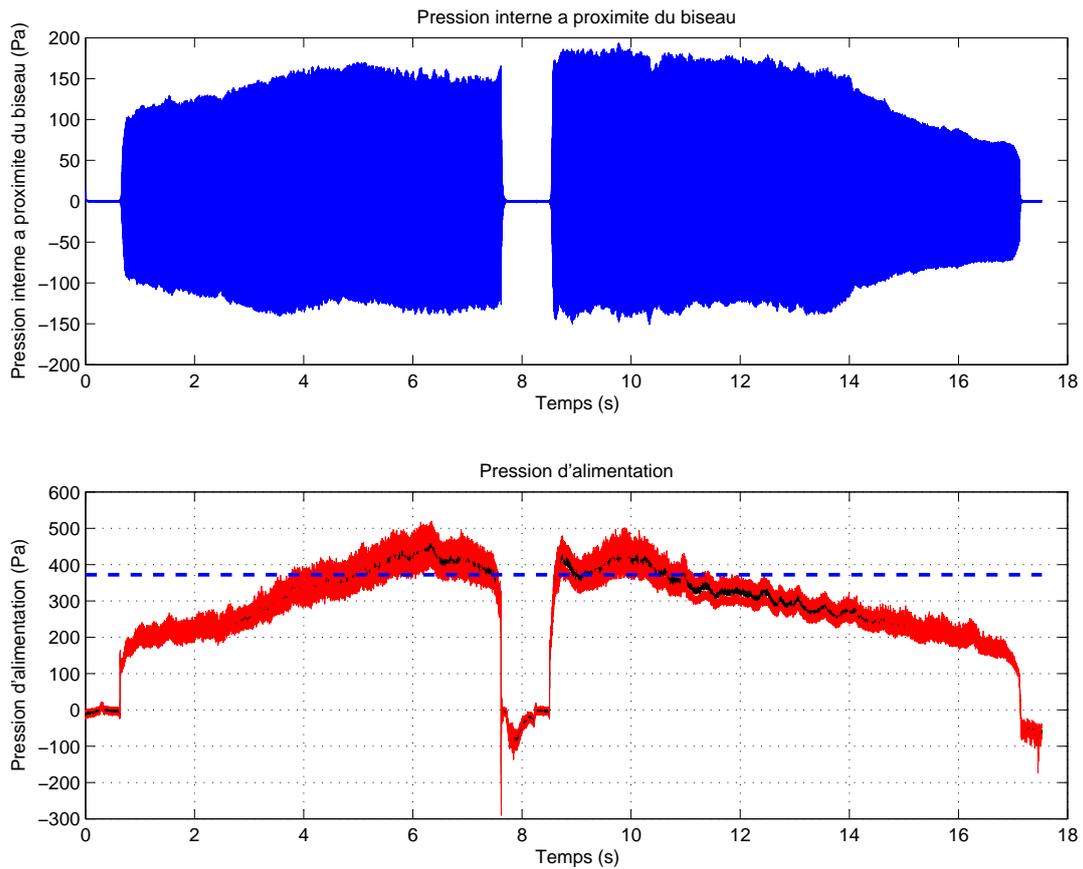


FIGURE 49 – Pression interne mesurée à proximité du biseau et pression d’alimentation pour le doigté de *la grave* d’une flûte à bec alto Zen On Bressan. La pression d’alimentation tracée en noire correspond à la valeur estimée avec une calibration effectuée juste après les mesures, et les deux courbes tracées en rouge correspondent aux pression d’alimentation maximale et minimale. La ligne en pointillés représente le seuil statique de changement de régime estimé avec la bouche artificielle.

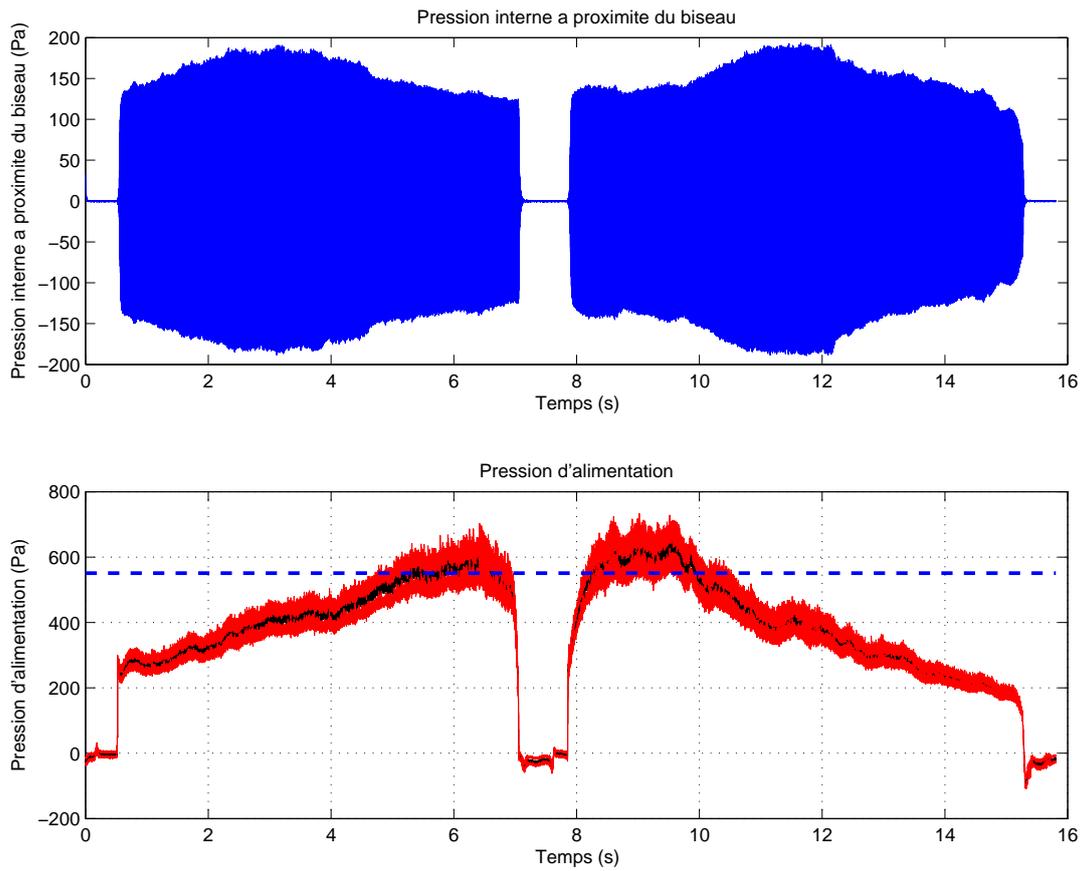


FIGURE 50 – Pression interne mesurée à proximité du biseau et pression d’alimentation pour le doigté de *si bémol* grave d’une flûte à bec alto Zen On Bressan. La pression d’alimentation tracée en noire correspond à la valeur estimée avec une calibration effectuée juste après les mesures, et les deux courbes tracées en rouge correspondent aux pression d’alimentation maximale et minimale. La ligne en pointillés représente le seuil statique de changement de régime estimé avec la bouche artificielle.

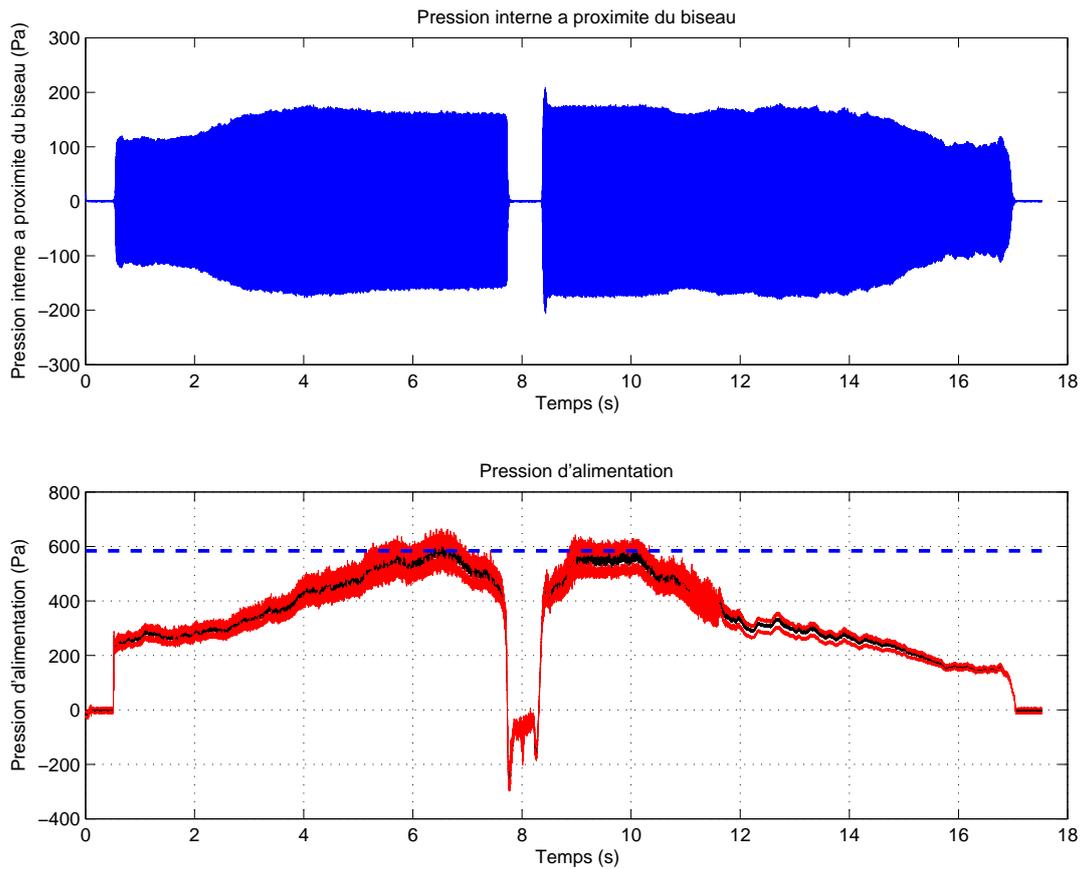


FIGURE 51 – Pression interne mesurée à proximité du biseau et pression d'alimentation pour le doigté de *si* grave d'une flûte à bec alto Zen On Bressan. La pression d'alimentation tracée en noire correspond à la valeur estimée avec une calibration effectuée juste après les mesures, et les deux courbes tracées en rouge correspondent aux pression d'alimentation maximale et minimale. La ligne en pointillés représente le seuil statique de changement de régime estimé avec la bouche artificielle.

### D.3 Contrôle de la justesse des notes

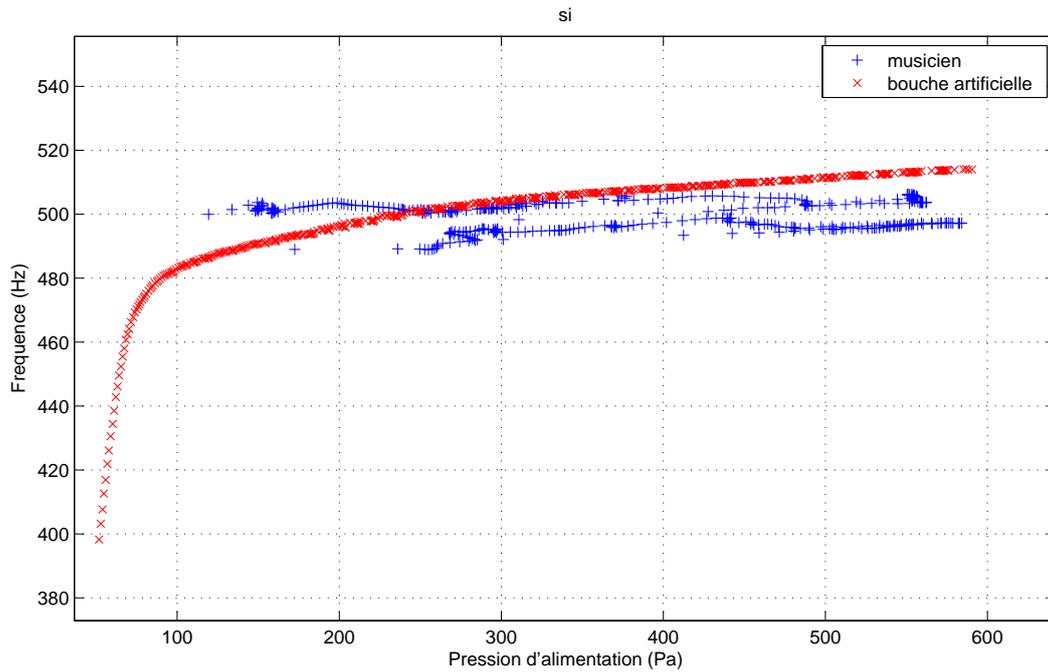


FIGURE 52 – Fréquence de jeux obtenue avec la bouche artificielle et par une flûtiste en fonction de la pression d'alimentation pour le doigté de *si* grave d'une flûte à bec alto Zen On Bressan.

## E Paramètres du modèle Simulink

$\rho$	1,2 Kg/m <sup>3</sup>
$\alpha_i$	400
$\delta_d$	0,0036 m
$b$	0,0004 m
$y_0$	0,0001 m
$h$	0,001 m
$\alpha$	0,4

TABLE 5 – Paramètre du modèle Simulink utilisé pour les simulations.  $\alpha$  est le coefficient de proportionnalité entre la vitesse de convection des perturbations le long du jet  $v_{conv}$  et la vitesse du jet  $U_j$  ( $v_{conv} = \alpha U_j$ ).

Mode	$a_n$	$\omega_n$ (rad/s)	$Q_n$			
1	20,8371	2264,1	45,753			
2	16,0937	4645,3	61,9016			
3	13,6693	7077,9	72,4417	$a_0$	$b_0$	$c_0$
4	12,3465	9488,8	79,3385	12,8004	2,1704	4,2464
5	10,6956	11897	81,5624			

TABLE 6 – Coefficients de la représentation modale correspondant au doigté de *fa* grave. Les coefficients  $a_0$ ,  $b_0$  et  $c_0$  correspondent à un mode uniforme de fonction de transfert  $H(s) = \frac{a_0}{\omega_1 b_0 s + c_0}$  où  $s$  est la variable de Laplace.

Mode	$a_n$	$\omega_n$ (rad/s)	$Q_n$			
1	22,364	2510,7	44,9055			
2	16,3903	5113	59,6472			
3	12,6424	7569,6	67,2014	$a_0$	$b_0$	$c_0$
4	10,5553	9718,7	73,5744	11,2214	1,6011	3,3116
5	10,3252	11910	79,988			

TABLE 7 – Coefficients de la représentation modale correspondant au doigté de *sol* grave. Les coefficients  $a_0$ ,  $b_0$  et  $c_0$  correspondent à un mode uniforme de fonction de transfert  $H(s) = \frac{a_0}{\omega_1 b_0 s + c_0}$  où  $s$  est la variable de Laplace.

