

Rapport de Stage Master 2 ATIAM
Modélisation, asservissement et commande
d'une bouche artificielle robotisée pour le jeu des cuivres.
UPMC Ircam

LOPES Nicolas
Encadrants de stage: Hélie Thomas - Caussé René
Collaborateur: Freour Vincent

20 août 2012

Remerciements

Je tiens à remercier Thomas Helie pour son aide et son encadrement ainsi que René Caussé. Je remercie également Vincent Freour avec qui j'aurais grand plaisir à travailler à nouveau. Merci à Alain Terrier et Gérard Bertrand sans qui aucune expérience sur le robot ne serait possible. Enfin merci à Joël Gilbert pour ses conseils sur les résonances de lèvres artificielles.

Table des matières

1	La Bouche Artificielle Robotisée et sa calibration	5
1.1	Présentation et historique	6
1.1.1	Alimentation en air	6
1.1.2	Bouche	7
1.1.3	Instrument	8
1.2	Evolution technique du système pendant le stage	10
1.3	Calibrage des lèvres : Ancienne version et évolution	11
1.3.1	Première calibration	11
1.3.2	Mesure des paramètres caractéristiques	11
1.3.3	Nouvelle calibration	13
2	Expérimentations	16
2.1	Cartographies	17
2.1.1	Protocole expérimental	17
2.1.2	Résultats	18
2.1.3	Symétrie	18
2.1.4	Résonances des lèvres	20
2.1.5	A propos de la cavité buccale	22
2.1.6	Conclusion	22
2.2	Études sur les résonances mécaniques des lèvres	23
2.2.1	Étude par vélocimètre laser	23
2.2.2	Étude par capteur optique	25
2.2.3	Conclusion	26
2.3	Influence et contrôle actif du "conduit vocal" du Robot (en collaboration avec Vincent Freour)	27
2.3.1	Théorie	27
2.3.2	Protocole expérimental	28
2.3.3	Résultats	29
2.3.4	Conclusion	29
3	Modélisation	32
3.1	Modélisation Hamiltonienne à port	33
3.1.1	Système hamiltonien à port	33

3.1.2	Un système hamiltonien à port pour le robot	34
3.2	Modèle le lèvres	35
3.2.1	Énergie du système :	36
3.2.2	Variables d'état du système :	36
3.2.3	Fonction Hamiltonienne :	36
3.2.4	Système	37
3.3	Modèle de jet bi-dimensionnel	38
3.3.1	Hypothèses	38
3.3.2	Conservation de la masse et de la quantité de mouvement	39
3.3.3	Potentiel solution	39
3.3.4	Champ de Pression	40
3.3.5	Variables Macroscopiques : Explicitation de quantités moyennes	40
3.3.6	Énergie du Jet	41
3.3.7	Première formulation en système hamiltonien à port (Dimension 3)	41

Introduction

Pour la seconde fois dans ma scolarité, j'ai eu l'opportunité d'effectuer mon stage à l'Ircam encadré par Thomas Hélie et René Caussé, sur la bouche artificielle robotisée. C'est un projet qui me tient particulièrement à cœur et dans lequel je me sens maintenant personnellement impliqué. Ce stage a d'ailleurs été pour moi une première étape, telle une préparation à la thèse que je débute l'année prochaine sur ce même sujet au sein de l'école doctorale SMAER¹ de l'UPMC².

Ce stage et la thèse qui en découle visent à proposer des modèles, simulations, asservissements et lois de commandes pour le < système bouche, lèvres, instrument > et sa version robotisée. Une approche bien adaptée à la modélisation de systèmes physiques complexes repose sur la " formulation hamiltonienne à port " ([1]) : elle conduit à des systèmes à bilans énergétiques bien posés et préserve naturellement la passivité. Dans ces travaux, on cherchera à mettre à profit ces propriétés pour les simulations, l'analyse de stabilité (en utilisant l'énergie du robot comme fonctionnelle de Lyapunov et en exploitant la dissipativité), la synthèse d'observateurs ainsi que pour la mise au point d'asservissements et de lois de commandes. On cherchera à reproduire des sons ou consignes cibles (nuance, hauteur, etc), d'abord dans des cas simples (régimes périodiques, stationnaires, attaques calibrées) puis plus généraux (transitoires, restitution d'une phrase musicale, etc). On comparera les signaux mesurés et simulés pour valider les modèles. Une attention particulière sera portée sur le couplage aéro-acoustique (passif) qui est à l'origine de la non-linéarité responsable de l'auto-oscillation. Enfin, les résultats de ses travaux seront utilisés pour mettre au point un banc de test d'instruments réels : on mettra en place des protocoles afin de tester des critères objectifs fixés dans le cadre du projet ANR CAGIMA (Conception Acoustique Globale d'Instruments de Musique à Anche justes et homogènes, 2077-2015, P. Guillemain).

J'ai en grande partie consacré mon stage précédent aux aspects techniques du robot. Pour ce stage de Master 2 "Recherche" ATIAM³, je me suis concentré sur les expérimentations afin de débiter la mise au point de modèles physiques performants. Ce fut d'ailleurs pour moi l'occasion de m'initier au concept des systèmes hamiltoniens à port présentés dans la dernière partie. Contrairement à la méthode classique consistant à concevoir des modèles pour ensuite les confronter aux expériences, j'ai profité de la plat-forme robotique pour effectuer le parcours inverse. En effet, j'étudie le comportement physique du système afin de créer des modèles adaptés. Ainsi, ce rapport se divise en trois parties : Une première partie sur le robot et la problématique de calibration, une deuxième partie sur les expériences qui permettront de mettre au point les modèles qui sont introduit dans la troisième et dernière partie.

1. Sciences mécaniques, acoustiques, électroniques et robotiques

2. Université Pierre et Marie Curie

3. Acoustique, traitement du signal et Informatique appliqués à la Musique

Chapitre 1

La Bouche Artificielle Robotisée et sa calibration

1.1 Présentation et historique

Les instruments de musique de la famille des cuivres sont des systèmes physiques complexes. Ils mettent en jeu des phénomènes de mécanique des solides déformables (muscles, tissus), de mécanique des fluides (jet, turbulences) incluant la propagation acoustique. Du point de vue des systèmes dynamiques, ils correspondent à des systèmes non linéaires auto-oscillants capables d'une grande diversité de régimes, y compris chaotiques. De plus, leur contrôle est délicat et nécessite un long apprentissage de la part du musicien. Pour toutes ces raisons, la modélisation de ces instruments, leur analyse, simulation, inversion entrée/sortie (détermination d'une commande fournissant un son cible) et contrôle sont encore des sujets de recherches actifs, comme cela est le cas pour la voix (autre système à valve humaine oscillante couplée à un système acoustique). Afin de réaliser des expériences calibrées reproductibles, la robotisation d'une bouche artificielle dédiée au jeu des cuivres a été initiée à l'IRCAM (projet ANR CONSONNES, 2006-2009, J. Kergomard).

Historiquement, le projet a été engagé dans le cadre de deux projets mécaniques de l'école des Mines de Paris. Baptiste Vericel a ensuite effectué deux stages sur le projet (B.Vericel [4], [3]). J'ai pour ma part déjà effectué un stage technique sur le robot (N. Lopes[8]).

Depuis sa création, la bouche artificielle n'a cessé d'évoluer afin de répondre aux différents besoins d'observations. De ce fait, aujourd'hui, le robot dispose d'un nombre conséquent de capteurs et actionneurs qu'il est important de décrire. Nous allons voir dans ce chapitre tous les organes de ce robot et allons nommer les variables physiques en jeu.

Le système se compose de 3 organes principaux : l'instrument, la bouche, et l'alimentation en air (voir Fig. 1.1 & 1.2).

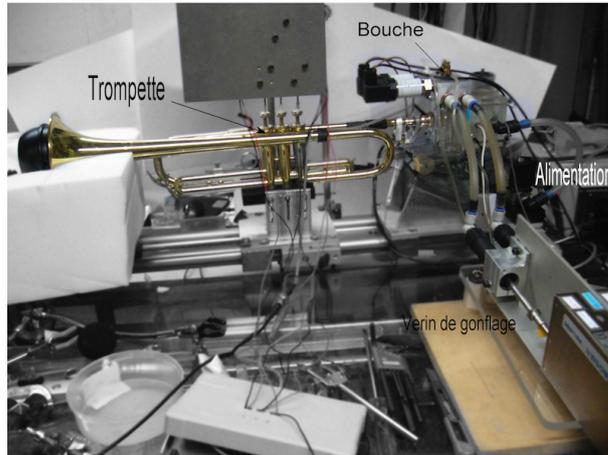


FIGURE 1.1 – Photographie du système complet (Instrument : Trompette)

1.1.1 Alimentation en air

Le "souffle" de la bouche est piloté par une électro-vanne (C_V) et alimentée par de l'air comprimé (cf. Fig 1.3). Un capteur mesure la température de l'air comprimé (T_A). Un autre mesure la pression d'alimentation (P_A).

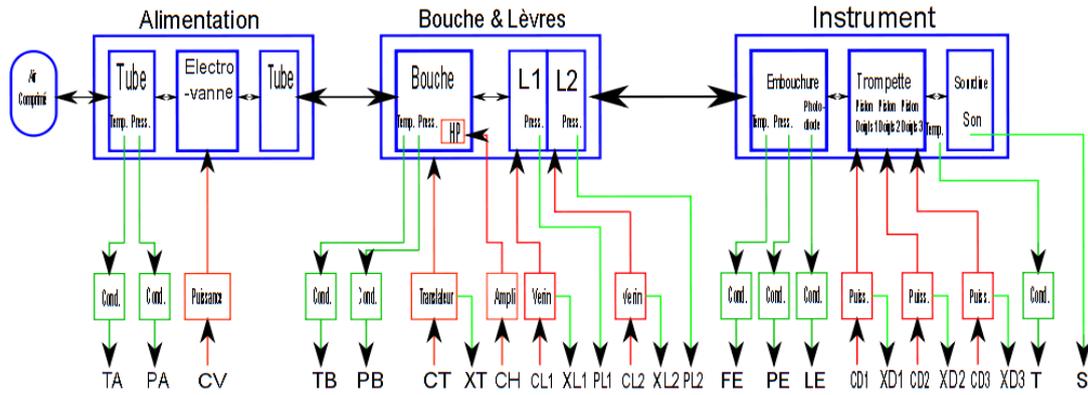


FIGURE 1.2 – Schéma fonctionnel

1.1.2 Bouche

La bouche est un bloc creux d'un volume comparable à celui d'une bouche réelle. Son entrée est composée de deux lèvres artificielles en latex. Ces deux lèvres peuvent être remplies d'eau avec précision grâce aux deux vérins de gonflage. Ces vérins sont commandés (C_{L1} et C_{L2}) et asservies en position ([8]). La position est mesurée à $5 \mu m$ près par des capteurs incrémentaux (X_{L1} et X_{L2}). On effectue également, grâce à deux capteurs placés au niveau des lèvres, une mesure de pression d'eau (P_{L1} et P_{L2}). Dans la cavité buccale se trouvent un capteur de pression P_B (statique et acoustique p_B) et un capteur de température T_B . On y trouve également un émetteur infrarouge associé à un récepteur dans l'embouchure. Ce couple permet de mesurer l'intensité lumineuse L_E passant entre les lèvres et ainsi d'obtenir une estimation de l'aire d'ouverture. Un haut-parleur à compression (C_H) peut être ajouté sur la bouche pour injecter un signal de pression acoustique. Enfin, le tout peut être mis au contact de l'embouchure grâce à un transducteur également commandable et asservi en position et mesurable (C_T et X_T).



FIGURE 1.3 – Photographie de l'alimentation en air

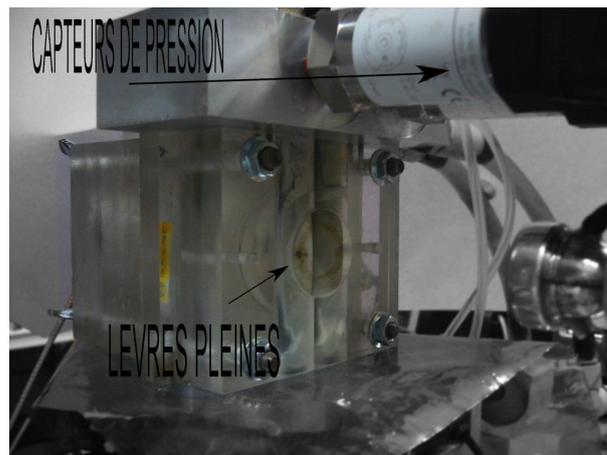


FIGURE 1.4 – Photographie de la bouche artificielle

1.1.3 Instrument

Lors d'une utilisation typique, la trompette reste fixe. Elle dispose d'une embouchure modifiée accueillant trois capteurs : Un capteur de pression¹ dans l'embouchure P_E , un capteur de force pour mesurer la contrainte F_E imposée par la bouche sur l'embouchure et un capteur infrarouge allant de pair avec un émetteur décrit dans la suite 2.2.2. Les pistons de la trompette sont positionnés par trois actionneurs commandés (doigts) en tout ou rien (C_{D1} C_{D2} C_{D3}). Une sourdine est ajoutée au niveau du pavillon. Celle-ci permet d'atténuer

1. Sa sensibilité lui permet de capter aussi bien les pressions constantes qu'acoustiques.

l'intensité sonore. Le signal sonore S est enregistré grâce à un microphone. Enfin, la température ambiante est mesurée au niveau de la trompette par une capteur de température T .

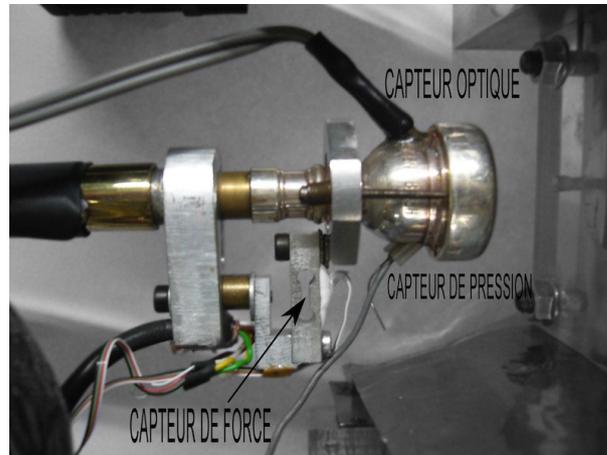


FIGURE 1.5 – Photographie de l'embouchure modifiée (Cas de la trompette)

1.2 Evolution technique du système pendant le stage

Dans un tout premier temps, un travail important a été fait sur l'amélioration du robot d'un point de vue système hardware et software. En effet, afin d'avoir une puissance suffisante pour un contrôle en boucle fermée du robot, nous avons décidé d'acquérir un nouvel ordinateur de dernière génération ainsi que la dernière version de la suite de logiciel dSpace. C'est d'un point de vue logiciel que le plus de travail a été accompli : jusqu'à présent, le système dSpace contenait tous les algorithmes d'asservissement (PID), de contrôle ainsi que les scripts de cartographies. Le logiciel dSpace Control Desk permet d'observer et de modifier en temps réel les valeurs internes au dSpace. Bien que très pratique d'un point de vue programmation (Le dSpace est directement programmable via SimuLink), cette configuration ne permet pas une liaison simple avec MAX/MSP et force à recompilier le programme complet à chaque modification. Dans notre nouvelle configuration (Fig. 1.6), seules les boucles d'asservissement sont conservées dans le dSpace. Les scripts ont été codés dans une couche supérieure au logiciel ControlDesk en Python. Le langage est de type interprété : Les commandes sont directement exécutables dans le terminal Python incorporé à ControlDesk.

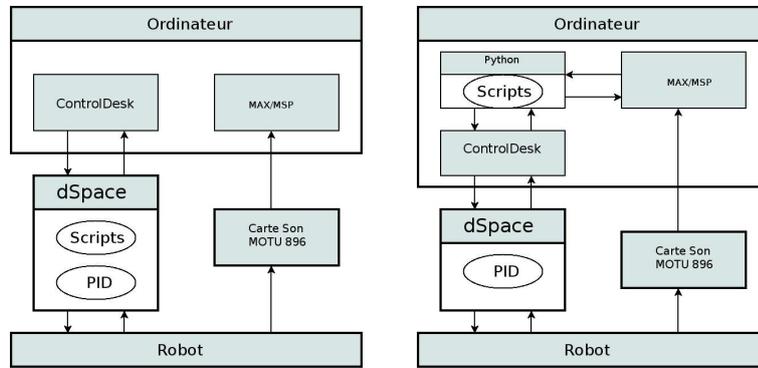


FIGURE 1.6 – Schéma de principe de l'architecture du Robot : Ancien à gauche/Nouveau à droite.

Cette couche supérieure a deux avantages principaux :

1. Orienté Objet : Python est un langage de programmation interprété orienté objet. Ce type de langage apporte une modularité qui facilite grandement la création de script d'automatisation.
2. Bibliothèques : Il existe un grand nombre de bibliothèques libres fonctionnant en python. Notamment des bibliothèques de calcul et de protocole UDP utilisé pour communiquer avec MAX/MSP.

Actuellement, cette mise à niveau nous permet d'automatiser les calibrations et les expériences. Par exemple, les cartographies sont effectuées de manière parfaitement automatique et les résultats sont calculés et immédiatement disponibles.

1.3 Calibrage des lèvres : Ancienne version et évolution

Au fur et à mesure des manipulations, les paramètres du système se modifient. En effet les propriétés du latex des lèvres ne sont pas complètement stables. Celles-ci ont tendance à se détendre au cours d'une utilisation. Ces défauts ne sont pas les seuls responsables d'une modification des paramètres : lors de vidange des lèvres les quantités d'eau injectées peuvent différer. De la même manière, des manipulations sur le corps du cuivre peuvent légèrement modifier sa position et ainsi changer le point de contact avec les lèvres. Cela a pour conséquence de rendre une répétition exacte d'expérience impossible. Afin de pouvoir utiliser le robot comme un banc d'essai, et ainsi réitérer les expériences de manière parfaitement semblable, il a fallu mettre au point une étape de calibration. Un premier calibrage avait été mis au point lors du dernier stage ([8]). Le nouveau calibrage s'appuie sur une observation plus large de l'espace des commandes. L'étape de calibrage a été programmée en python et s'effectue de manière automatique.

1.3.1 Première calibration

Cette étape a pour but de passer des paramètres de contrôle des actionneurs (positions des vérins de gonflage des lèvres X_{L1} X_{L2} et position du translateur X_T) à des paramètres de contrôle de plus haut niveau, indépendants des déformations.

Définition : Soit $\theta = (\text{Paramètres de Calibration})$

On définit la fonction de calibration recherchée :

$$(\tilde{X}_T, \tilde{X}_{L1}, \tilde{X}_{L2}) \xrightarrow{f} (X_T, X_{L1}, X_{L2})$$

On appellera $(\tilde{X}_T, \tilde{X}_{L1}, \tilde{X}_{L2})$ les paramètres de contrôle de haut niveau et (X_T, X_{L1}, X_{L2}) les paramètres de bas niveau.

1.3.2 Mesure des paramètres caractéristiques

La calibration se fait en deux temps :

1. Gonflage/dégonflage des lèvres, translateur reculé.
2. Avance/recul du translateur, lèvres "justes" gonflées.

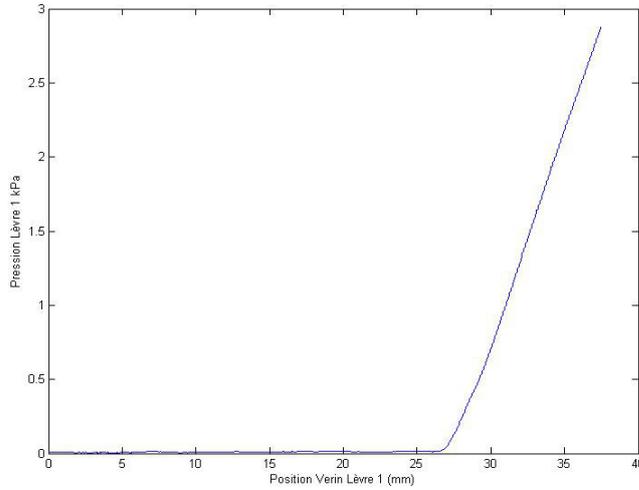
Étape 1 : Gonflage et dégonflage des lèvres, Obtention de $X_{L1}^*, \sigma_{L1}, X_{L2}^*, \sigma_{L2}$

Pour cette étape :

1. Le translateur est complètement reculé. Autrement dit, les lèvres ne sont pas en contact avec l'embouchure.
2. La deuxième lèvre reste dégonflée, soit $X_{L2} = 0$.
3. Le vérin de gonflage de la lèvre 1 effectue un balayage complet de toutes ses positions tout en observant le couple (X_{L1}, P_{L1}) .

On réitère cette étape pour la seconde lèvre. Ainsi, il nous est possible de tracer les deux courbes de pression interne des lèvres en fonction de la position de leur vérin de gonflage. (Fig. 1.7)

On remarque que la pression reste constante et très faible jusqu'aux points que l'on notera respectivement X_{L1}^* et X_{L2}^* pour les lèvres 1 et 2. Nous pouvons alors considérer qu'à cette position, les lèvres sont



On identifie les paramètres :

$$\begin{aligned} X_{L1}^* \\ \sigma_{L1} \end{aligned}$$

FIGURE 1.7 – Pression d’eau dans une lèvre (PL) en fonction de la position du vérin de gonflage.

parfaitement gonflées². La deuxième partie de la courbe est clairement linéaire, il est donc possible d’en tirer une information très forte : Les coefficients directeurs σ_{L1} et σ_{L2} .

Étape 2 : Avance et recule du translateur : Obtention de X_T^*

Pour cette étape :

1. Les lèvres sont "justes" gonflées : $X_{L1} = X_{L1}^*$ et $X_{L2} = X_{L2}^*$
2. Le translateur effectue un balayage complet de toutes ses positions tout en observant le couple (X_T, F) .

Cette opération nous permet de tracer la courbe de la force d’appuis des lèvres sur l’embouchure en fonction de la position du translateur(cf. Fig. 1.8).

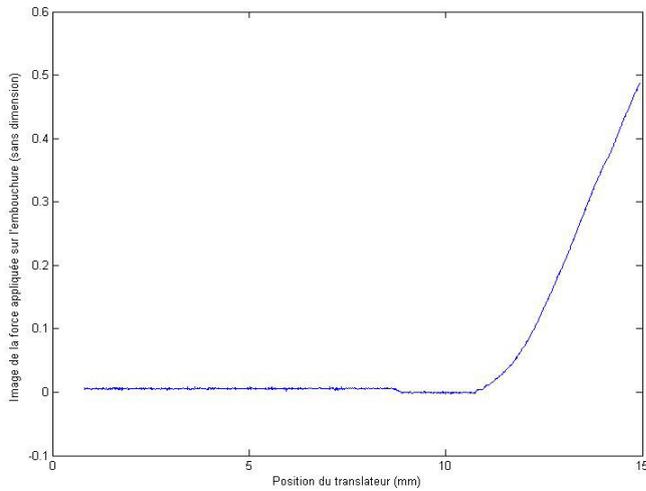
Une fois de plus, on remarque que la force reste constante jusqu’au point X_T^* . A partir de ce point, la courbe n’est pas parfaitement linéaire mais tend clairement vers une asymptote oblique. Le coefficient directeur de la droite nous donne un sixième et dernier paramètre de calibration σ_T .

Finalement, ces 2 étapes de calibration nous fournissent six paramètres : $X_{L1}^*, X_{L2}^*, X_T^*, \sigma_{L1}, \sigma_{L2}, \sigma_T$. Ces coefficients nous permettent de considérer la bouche artificielle comme un banc d’essai grâce à des paramètres de contrôle de haut niveau, indépendants des déformations et des fuites.

Fonction de calibration :

$$\begin{aligned} \tilde{X}_{L1} &= (X_{L1} - X_{L1}^*)\sigma_{L1} \\ \tilde{X}_{L2} &= (X_{L2} - X_{L2}^*)\sigma_{L2} \\ \tilde{X}_T &= (X_T - X_T^*)\sigma_T \end{aligned}$$

2. D’où la dénomination "justes" gonflées. En effet, à cette position, les lèvres ne sont pas encore sous pression.



On identifie les paramètres :

$$X_T^*$$

$$\sigma_T$$

FIGURE 1.8 – Force de l’embouchure sur les lèvres (F) en fonction de la position du translateur (X_T)

1.3.3 Nouvelle calibration

Bien que la calibration précédente nous apportait une répétabilité satisfaisante dans la plupart des cas, j’ai décidé de mettre au point une calibration plus complète. Celle-ci a comme avantage de se baser sur des considérations physiques.

Considérations

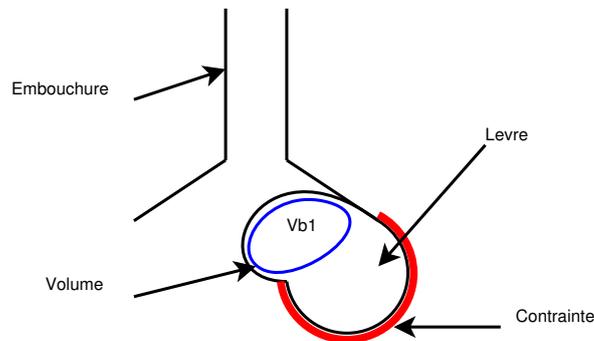


FIGURE 1.9 – Masse vibrante après mise sous contrainte de la lèvre.

Dans une position standard, l’embouchure est en appui sur les lèvres sous pression ($P_L > 0$). L’appui de l’embouchure crée une poche d’eau de volume \check{V}_L dans la lèvre susceptible de vibrer (voir Fig. 1.9). En considérant T^* comme la position du translateur permettant le contact avec les lèvres juste gonflées³, on

3. On considère ici que les deux lèvres sont réglées de manière identique

peut donc définir la fonction de calibration recherchée comme :

$$(\Delta_T = X_T - T^*, \check{V}_{L1}, \check{V}_{L2}, \theta) \xrightarrow{f} (X_T, X_{L1}, X_{L2})$$

Pour bien comprendre la calibration, il faut observer qu'à un état donné du système Lèvre+Embouchure (avec seconde lèvre dégonflée) :

1. Augmenter X_L injecte de l'eau directement dans \check{V}_L puisque seul cet endroit de la lèvre reste déformable.
2. Pour les mêmes raisons, augmenter X_T (ou Δ_T : appuis de l'embouchure sur la lèvre) déplace du fluide vers \check{V}_L .

Ces deux considérations nous permettent d'écrire l'égalité suivante :

$$\check{V}_L = V_L - V^* + f_\Delta(\Delta_T)$$

Avec f_Δ une fonction à déterminer telle que $f_\Delta(0) = 0$. Pour des raisons d'homogénéité, nous préférons utilisé les variables V_{L1} et V_{L2} étant donné que X_{L1} et X_{L2} contrôlent la position des véris. Ainsi, $V_L = \pi r_{verin}^2 X_L$ où r_{verin} est le rayon du verin.

Confrontation avec les données (Fig. 1.10)

Le processus de calibration non optimisé est plus complet que le précédant. En effet, il s'agit ici de balayer un espace à deux dimensions. Pour chaque lèvre, la calibration s'effectue en 3 étapes :

1. Comme pour la première calibration, sans contact avec l'embouchure, la lèvre est gonflée puis dégonflée pour identifier V^* (Voir 1.3.2).
2. Lèvre réglée à V^* , l'embouchure est avancée puis reculée pour identifier T^* (voir 1.3.2).
3. On mesure enfin la pression de lèvre P_L pour un balayage de l'espace $[X_L, X_T]$ en garantissant $P_L < 18KPa^4$.

On remarque que, à V_L fixé (à V^* par exemple), le volume ajouté par X_T peut être assimilé à la courbe rouge. En d'autres termes, au delà de la frontière rouge, le volume d'eau ajouté correspond au volume \check{V}_L .

En modélisant cette courbe rouge par une fonction polynomiale d'ordre 2 on peut alors écrire la fonction de calibration :

Fonction de calibration :

$$\check{V}_L = V_L - V_L^* + (a_{L2}\Delta_T^2 + a_{L1}\Delta_T)$$

L'étape de calibration nous permet donc d'obtenir les 7 paramètres V_{L1}^* , V_{L2}^* , T^* , a_{L11} , a_{L12} , a_{L21} , a_{L22} .

4. Seuil de sécurité

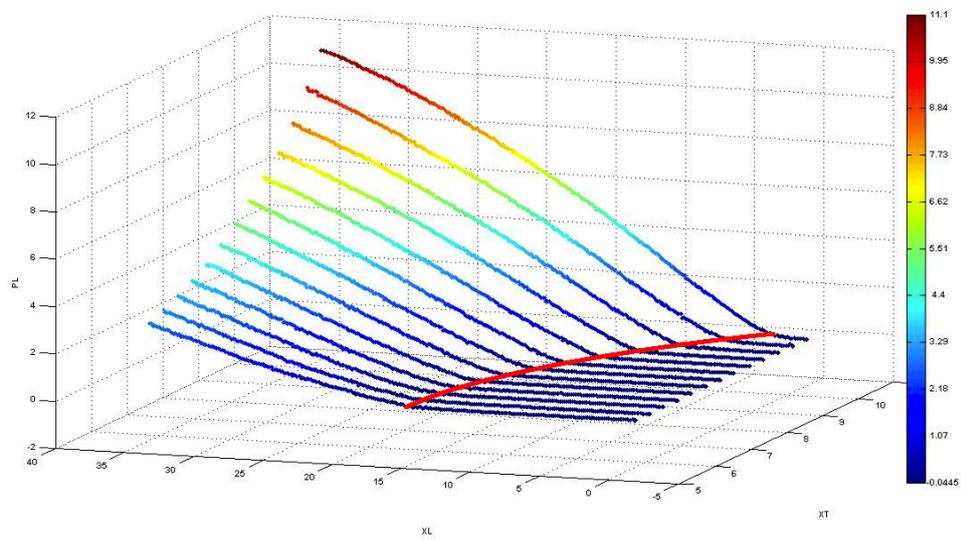


FIGURE 1.10 – Pression d’eau dans une lèvre en fonction de la position du vérin de gonflage X_L et de la position du translateur X_T . Courbe rouge : Point de contact entre l’embouchure et la lèvre.

Chapitre 2

Expérimentations

2.1 Cartographies

Dans le projet "Bouche Artificielle Robotisée", le but des cartographies est d'effectuer une carte des correspondances entre les paramètres de contrôle et les caractéristiques du son émis par l'instrument. Lors de mon stage précédant des cartographies ont déjà été étudiées. Cependant les conditions ainsi que le protocole expérimental étaient différents. En effet la bouche artificielle a été modifiée pour accueillir un trombone¹. De ce point de vue là les cartographies seront donc complètement différentes. De plus, le protocole expérimental est différent sur trois autres points :

1. Le souffle n'est plus gardé constant entre les différentes mesures : Une attaque de type échelon est répétée à chaque fois.
2. L'espace étudié est celui de la nouvelle calibration : Δ_T , \check{V}_{L1} et \check{V}_{L2} .
3. De nouvelles caractéristiques provenant de nouveaux signaux sont étudiées.

2.1.1 Protocole expérimental

L'expérience consiste à balayer un espace à trois dimensions Δ_T , \check{V}_{L1} et \check{V}_{L2} . Pour chaque position le souffle est envoyé et une série de mesure est effectuée sur le son, et sur les différents organes du robot.

Paramètres de l'expérience :

1. Espace étudié :
 $\Delta_T = 0 - > 5mm$ par pas de 0.5
 $\check{V}_{L1} = -5 - > 25$ (Unité de volume de lèvres / $2 * \pi * r_{verin}$, ie. mm)
 $\check{V}_{L2} = -5 - > 25$
2. Pression d'alimentation Air Comprimé = 2 bar
3. Souffle de type échelon :
Ouverture Electro-valve : $0 - > 34\%$
4. Après positionnement, ouverture de la valve à 0.5s et mesure à 2s.
5. Calibration du robot à entre chaque pas de Δ_T .

Données étudiées :

1. Pressions statiques :
Embouchure P_E
Bouche P_B
Lèvres P_{L1} , P_{L2} .
2. Pressions acoustiques : Embouchure p_E (Fréquence fondamentale, Amplitude, Rugosité, Centroïde)
Bouche p_B (Fréquence fondamentale, Amplitude)
Lèvres p_{L1} p_{L2} (Fréquence fondamentale, Amplitude)

Lors de l'expérience, les mesures statiques sont effectuées par le système dSpace, tandis que les traitements sur les mesures acoustiques sont fait en temps réel grâce au logiciel Max/Msp.

1. L'instrument précédent était une trompette

2.1.2 Résultats

Cette expérience nous permet d’acquérir la cartographie présentée en figure 2.1 (gauche). Afin d’améliorer la lisibilité et de nous concentrer sur les informations pertinentes nous ne conservons que les points dont la rugosité est minimale. En effet la rugosité mesure le taux d’inharmonicité des partiels formant le son émis par l’instrument. Ainsi, en nous concentrant sur les points de mesure peu rugueux, on est assuré de n’étudier que des points où la fréquence de jeu est clairement identifiée. Cette sélection nous donne la cartographie à rugosité minimale présentée en figure 2.1 (droite).

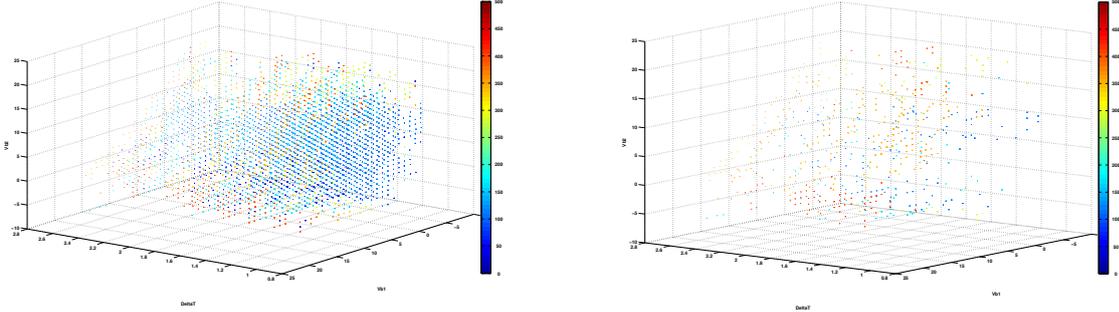


FIGURE 2.1 – Gauche : Cartographie complète. Droite : Cartographie à rugosité minimale. Les couleurs représentent les fréquences de zéro à 500 Hz

Avec cette représentation, on observe très difficilement les différentes zones correspondants aux notes jouables par l’instrument. La projection (Fig. 2.3) permet d’identifier plus facilement ces zones. La figure 2.2 nous montre l’histogramme des fréquences des points superposé à la courbe d’impédance de l’instrument. On voit que nous arrivons à jouer les 6 premiers régime (Note pédale exclue). On remarque également que le troisième et le quatrième régime sont difficiles à obtenir en comparaison avec le premier et le dernier. De plus, il apparait que la fréquence de jeu est toujours supérieure à la fréquence du pic d’impédance de l’instrument.

2.1.3 Symétrie

Compte tenu de la symétrie des deux lèvres, nous pouvons espérer une symétrie de la cartographie en ce qui concerne les fréquences de jeu dans le plan (P_{L1}, P_{L2}) . Cependant les deux lèvres n’étant pas parfaitement identiques et la calibration optimale, il s’avère que la symétrie n’est pas visuellement et facilement identifiable. Certaines zones sont déformées ou absentes. De plus, il n’est pas possible d’identifier quelle lèvre est responsable d’une zone fréquentielle. Afin de pallier a ce problème nous avons choisi d’étudier les signaux acoustiques provenant de la pression d’eau dans chacune des lèvres. En effet, en comparant l’amplitude de ces dernières, nous espérons déterminer laquelle de ces deux lèvres était responsable de l’excitation. Malheureusement, dans pratiquement toutes nos mesures, la première lèvre "semble" vibrer plus que la première ($|\frac{p_{L1}^{acou}}{p_{L2}^{acou}}|(f_0) > 1$) (figure 2.4). Une cause évidente de ce déséquilibre est une mauvaise calibration des deux capteurs de pression d’eau puisqu’ils n’ont été prévus à la base que pour des mesures de pression statique. Afin de pouvoir conserver nos mesures de cartographie, une astuce d’équilibrage a été utilisée pour estimer la fonction de transfère entre les deux pressions $|\frac{p_{L1}^{acou}}{p_{L2}^{acou}}|(f)$. Dans un premier temps cette technique consiste à isoler les fréquences de jeu une à une. Ensuite, il convient pour chacune d’entre elles, de trouver le coefficient

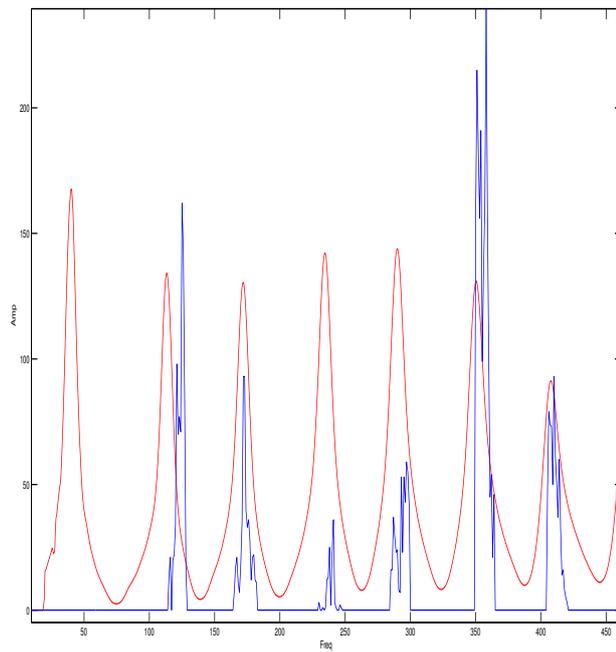


FIGURE 2.2 – Histogramme des fréquences et impédance de l'instrument (Cas du trombone)

(Gain) permettant la meilleure répartition gauche/droite des points de mesures (Une zone de fréquence f_1 appartenant à la lèvre 1 doit avoir son homologue symétrique pour la lèvre 2, ainsi un coefficient bien choisi permet de répartir les décisions de prépondérance $Ceof \left| \frac{P_{L1}^{acou}}{P_{L2}^{acou}} \right| (f) > 1$). Cette technique nous permet de faire apparaître la symétrie exposée dans la figure 2.4 (droite).

Il est remarquable que dans la majeure partie des cas, la lèvre en action est celle dont la pression statique est la plus faible. Cela peut se comprendre par des aspects énergétiques. En effet si la lèvre est modélisée par un système masse ressort, et si l'on considère que la pression interne est directement liée au coefficient de raideur, on comprend alors que plus la pression interne est faible, et moins l'énergie nécessaire pour exciter le système est élevé. Ainsi, à énergie fournie fixée, la lèvre dont la pression interne est la plus faible sera probablement la plus excitée. Ces considérations ne sont évidemment valables que dans des cas où les lèvres ont un réglage permettant une excitation correspondant aux fréquences de résonance de l'instrument utilisé.

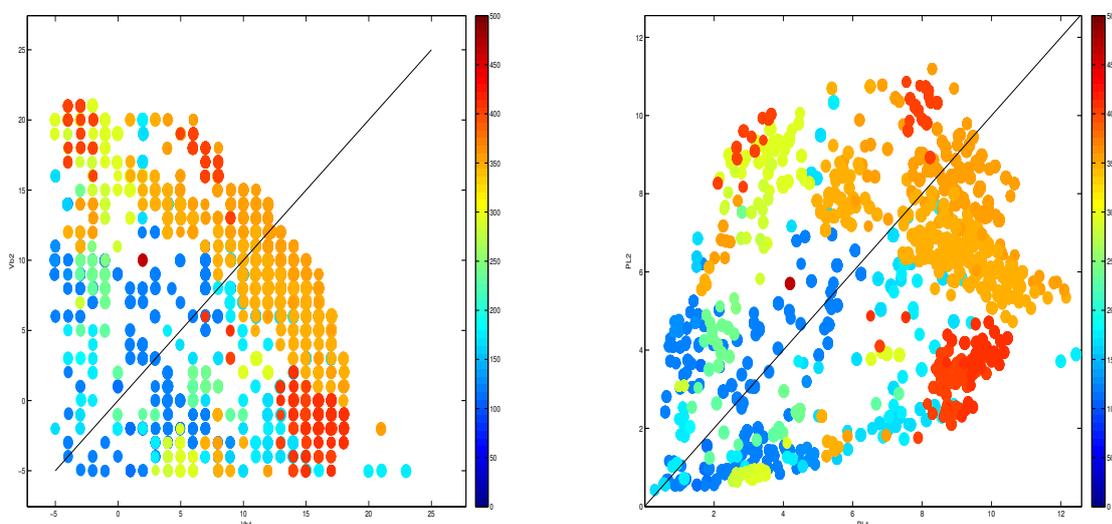


FIGURE 2.3 – Fréquences de jeu dans le plan $\check{V}_{L1}, \check{V}_{L2}$ à gauche, P_{L1}, P_{L2} à droite.

2.1.4 Résonances des lèvres

La symétrie exposée dans la partie précédente nous permet de trier les points de mesure selon que l'excitation ait été causée par la première ou la seconde lèvre. Cela nous permet de tracer les fréquences de jeu en fonction de la pression d'eau interne de la lèvre (qui est excitatrice). La figure 2.5 représente le cas de la première lèvre (gauche), de la deuxième lèvre (droite) puis la superposition des deux cas. On remarque alors que le comportement des deux lèvres est semblable. De plus, il apparaît ici clairement que la pression d'eau statique d'une lèvre est le paramètre prépondérant agissant sur les fréquences de résonance. Enfin, on semble pouvoir identifier au moins trois résonances par lèvre.

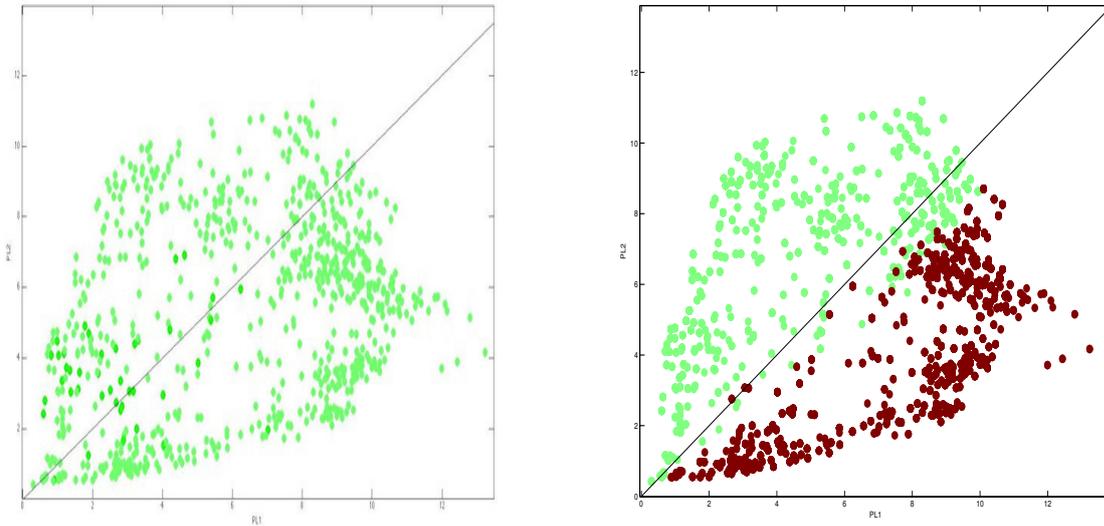


FIGURE 2.4 – Prépondérance de la vibration de lèvres ($|\frac{P_{L1}^{acou}}{P_{L2}^{acou}}|(f_0)$) à la fréquence fondamentale en fonction des pressions statiques (P_{L1}, P_{L2}), Vert : prépondérance de la lèvre 1, Rouge : Prépondérance de la lèvre 2. Non équilibrée à gauche, équilibrée à droite.

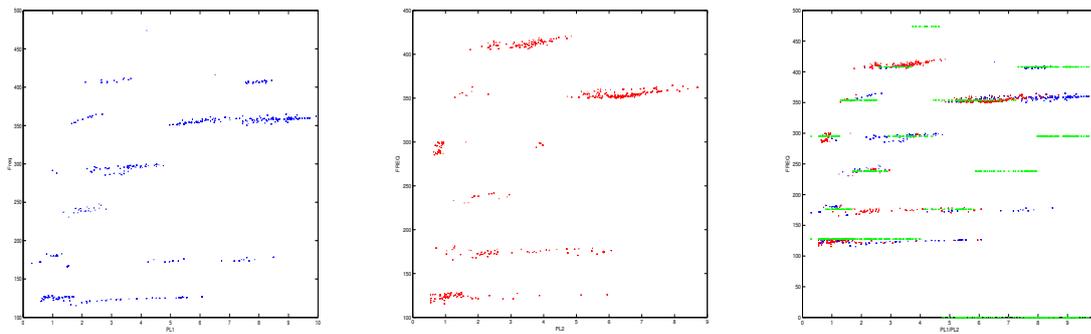


FIGURE 2.5 – Fréquence de jeu en fonction de la pression de lèvre 1 (gauche), Fréquence de jeu en fonction de la pression de lèvre 2 (centre). Superposition des deux graphes (droit) avec modélisation des résonances en vert.

2.1.5 A propos de la cavité buccale

Lors de la cartographie, une idée m'a été proposée par Vincent Freour (Voir section 2.3) : enregistrer le quotient des pressions acoustiques p_E/p_B afin de mesurer l'influence de la cavité buccale.

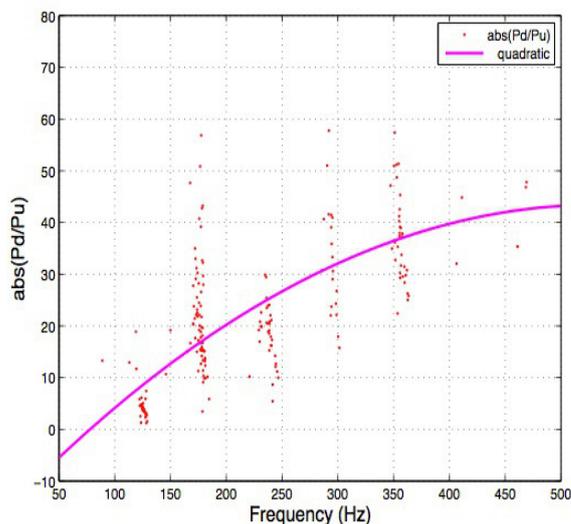


FIGURE 2.6 – Quotient des amplitudes des pressions acoustiques p_E/p_B en fonction de la fréquence de jeu.

La figure 2.6 présente une tendance croissante, ce qui signifie que la cavité est plus influente dans les basses fréquences. D'après les mesures effectuées par Vincent Freour sur les musiciens, cette tendance est opposée. Cela signifie sûrement que le volume de la cavité buccale est trop important chez notre robot.

2.1.6 Conclusion

Nous avons vu grâce aux cartographies que :

1. Nous pouvons utiliser la symétrie des deux lèvres (après une prochaine calibration des capteurs de pression des lèvres).
2. 6 régimes de jeu sont jouables.
3. La fréquence de jeu est supérieure à la fréquence de résonance de l'instrument.
4. Le comportement des deux lèvres est identique.
5. Une lèvre paraît être modélisable par trois résonances.
6. La cavité buccale n'est pas adaptée et doit être modifiée.

2.2 Études sur les résonances mécaniques des lèvres

L'étude de la résonance mécanique des lèvres est un point capital pour assurer une bonne compréhension du système et la création d'un modèle pertinent afin de mettre au point un contrôle performant du robot. Cette partie traite de deux expériences :

1. Une étude par vélocimètre laser
2. Une étude par capteur optique

2.2.1 Étude par vélocimètre laser

Cette première expérience s'inspire de l'article [7] écrit par Joël Gilbert. J'ai d'ailleurs eu la chance de profiter de ses connaissances sur le sujet lors d'une rencontre à l'Ircam.

Protocole

Le protocole expérimental (Fig. 2.7 et 2.8) a nécessité la création d'une pièce particulière appelée "embouchure de contrainte". Cette embouchure réalisée par Alain Terrier (Ircam - Mécanicien) permet d'appliquer une contrainte sur les lèvres sans couplage acoustique. C'est un cylindre pourvu d'ouvertures latérales sur lequel est fixé le cerclage d'une embouchure. Nous utilisons pour cette expérience un haut-parleur dans la cavité buccale.

L'expérience se déroule en 3 étapes :

1. Positionnement de la bouche (mise sous contrainte des lèvres) avec jet d'air
2. Positionnement du vélocimètre laser sur une lèvre
3. Émission d'un sweep fréquentiel (50-500 Hz) dans la cavité buccale avec le haut-parleur.

Les signaux enregistrés sont :

1. La pression acoustique buccale (p_B) positionnée proche des lèvres.
2. Le signal du vélocimètre (v_{laser})

Résultats

L'étude des résultats consiste à observer la fonction de transfert $H_L(f) = \frac{v_{laser}(f)}{P_B(f)}$. Les résultats obtenus sont cohérents avec ceux exposés dans [7]. Comme nous travaillons avec le signal du vélocimètre qui mesure la vitesse de la lèvre, il convient dans notre cas d'observer les passages par zéro de la phase de $H_L(f)$ afin d'identifier les différentes résonances. La figure 2.9 nous montre la fonction de transfert en amplitude logarithmique et en phase pour une position particulière à gauche puis pour trois positions superposées à droite correspondant à des pressions internes de lèvre de plus en plus élevées. Comme nous l'avions prédit dans le chapitre 2.1.4, nous pouvons facilement observer trois résonances dans la gamme de jeu du trombone (environ 50 - 500 Hz). De plus, la fréquence de ces résonances augmente avec l'élévation de la pression interne de lèvre.

Bien que cette expérience nous donne des résultats, certains défauts apparaissent :

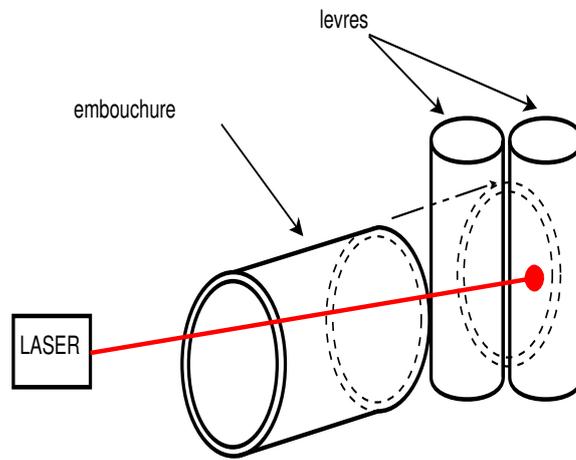


FIGURE 2.7 – Protocole expérimental : Mesure des résonances de lèvre par vélocimètre laser

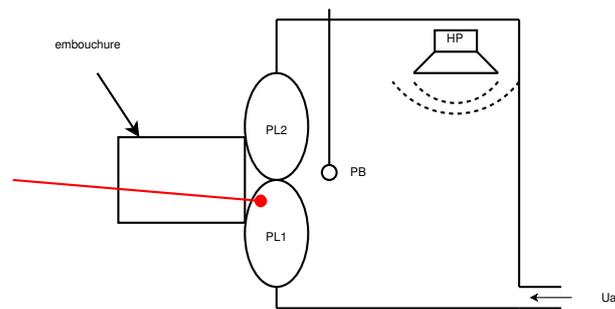


FIGURE 2.8 – Schéma du protocole vélocimètre (2 dimensions)

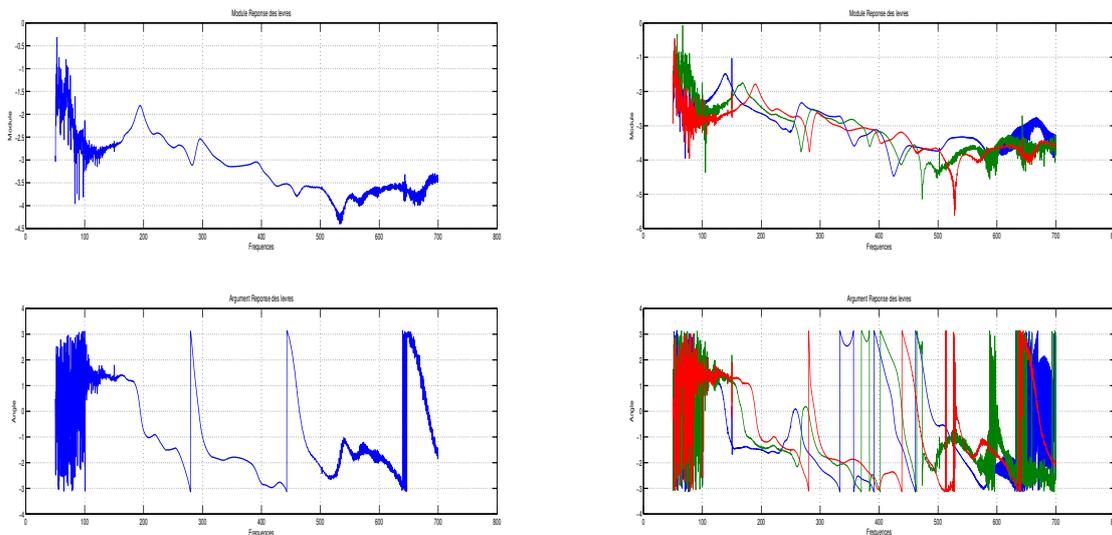


FIGURE 2.9 – Fonction de transfert $H_L(f)$.

1. Pour fonctionner convenablement, le vélocimètre a besoin d'être positionné vers une surface de couleur particulière (une sorte de gris métallisé). Pour ce faire, il m'a été nécessaire d'ajouter une fine couche de peinture sur les lèvres. Or, une modification du système étudié n'est pas envisageable pour le moment.
2. Le vélocimètre mesure la vitesse de l'objet visé suivant son axe qui, dans notre cas, ne correspond pas totalement à l'axe d'ouverture des lèvres. Cela a pour conséquence de masquer dans de très nombreux cas certaines résonances.
3. Cette expérience demande la mise en place d'un équipement conséquent (Vélocimètre et remplacement de l'instrument). Cela rend difficile une cartographie complète des résonances de lèvres et presque impossible l'étude d'une position particulière correspondant à un son précis avec trombone.

Pour toutes ces raisons, il nous est nécessaire de développer une nouvelle méthode, nous permettant d'effectuer des mesures avec trombone.

2.2.2 Étude par capteur optique

La méthode que nous avons choisi de développer se base sur le capteur optique du robot. Celui-ci nous permet de mesurer une estimation de l'ouverture des deux lèvres. Contrairement au vélocimètre, cette grandeur a l'avantage de mesurer la vitesse selon l'axe d'ouverture des lèvres. De plus, le capteur est interne à l'embouchure du trombone ce qui évite tout démontage.

Protocole

Notre capteur d'ouverture de lèvre réalisé par Gerard Bertrand se décompose en deux parties, l'émetteur, diodes électro-luminescentes infrarouges placées en fond de cavité buccale et le récepteur, photo-transistor

placé dans l'embouchure (Fig. 2.10).

Ici encore, l'expérience se fait en deux temps :

1. Positionnement de la bouche (mise sous contrainte des lèvres) avec jet d'air.
2. Émission d'un balayage fréquentiel (50-500 hz) avec le haut parleur.

Pour cette expérience, nous n'utilisons plus le signal de pression P_B . En effet, nous avons à disposition des signaux plus adaptés au modèle de lèvre : les signaux de pression dynamiques internes des lèvres. En effet, ces derniers nous donnent une information plus précise et moyennée sur la force appliquée sur les lèvres. Ainsi, les signaux mesurés sont :

1. Les pressions dynamiques des lèvres (p_{L1} p_{L2}).
2. Le signal d'ouverture des lèvres (S_{opt}).

Résultats

Les observations se font sur les fonctions de transfert $H_{L1} = \frac{S_{opt}}{p_{L1}}$ et $H_{L2} = \frac{S_{opt}}{p_{L2}}$. Jusqu'à présent, les résultats ne sont pas au rendez-vous. Les fonctions sont trop bruitées et cela sans doute pour une raison simple : le signal d'ouverture nous donne une information mixée sur la vitesse des deux lèvres. L'une des solutions envisageables est de comparer les pressions dynamiques internes de lèvres à la fréquence f_0 afin de s'assurer que l'une est négligeable devant l'autre. Ainsi, nous pourrions considérer que le signal d'ouverture (dérivé) sera proportionnel à la vitesse de la lèvre qui a la plus forte pression. Cependant, cela nécessite un calibrage des capteurs de pression d'eau qui ne sera pas effectué avant le début de la thèse.

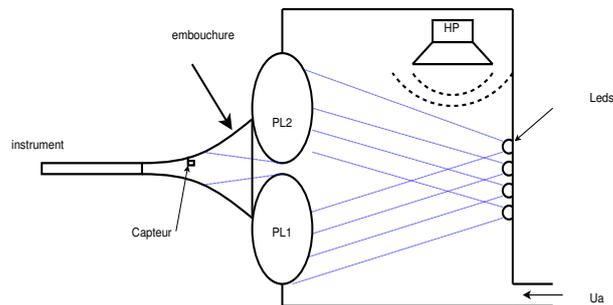


FIGURE 2.10 – Schéma de l'étude par capteur optique

2.2.3 Conclusion

Nous avons vu dans ce chapitre que :

1. Les résultats sur les résonances de lèvres correspondent aux résultats de la cartographie.
2. La méthode avec capteur optique est la plus adaptée et doit être développée.

2.3 Influence et contrôle actif du "conduit vocal" du Robot (en collaboration avec Vincent Freour)

Lors de mon stage, j'ai eu la chance de pouvoir travailler avec Vincent Freour, doctorant de l'université McGill de Montréal. Il étudie l'influence du conduit vocal dans le jeu des cuivres et en particulier du trombone (Ref. [12]). Il a passé trois mois à l'Ircam afin d'appliquer ses études sur la bouche artificielle. En effet, jusqu'à présent, il n'avait pu effectuer des mesures que sur des musiciens.

La bouche artificielle permet de créer des conditions de jeu particulières tout en donnant accès à des mesures impossibles sur un vrai musicien.

2.3.1 Théorie

Le modèle de couplage (Fig. 2.11) utilisé prend en compte le couplage avec le conduit vocal qui dans le cas de notre robot n'est rien d'autre que la cavité buccale.

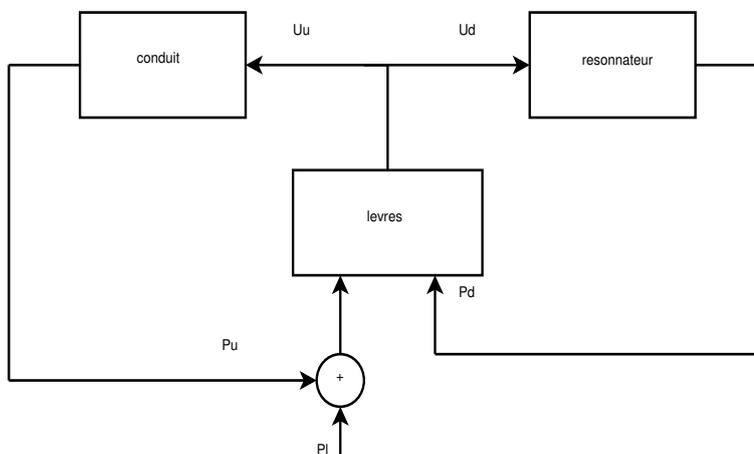


FIGURE 2.11 – Modèle de couplage

Hypothèse

En considérant la continuité du débit U à la jonction des lèvres, nous pouvons écrire que : $U_B = U$ et $U_E = -U$

$$U = \frac{p_E}{Z_E} + \frac{p_E - p_B}{Z_{levres}} - U = \frac{p_B}{Z_B} + \frac{p_B - p_E}{Z_{levres}}$$

Ainsi en négligeant l'apport en débit du mouvement des lèvres :

$$\frac{Z_B}{Z_E} = -\frac{p_B}{p_E}$$

On a donc

$$\left| \frac{Z_B}{Z_E} \right| = \left| \frac{p_B}{p_E} \right| \quad (2.1)$$

$$\angle Z_B - \angle Z_E = \angle p_B - \angle p_E + \pi \quad (2.2)$$

Définitions

Il convient de définir la mobilité des lèvres :

1. Mobilité "Downstream" : $G_d(\omega) = \frac{S_{levre}(\omega)}{p_E(\omega)}$

2. Mobilité "Upstream" : $G_u(\omega) = \frac{S_{levre}(\omega)}{p_B(\omega)}$

3. Mobilité Corrigée : $G(\omega) = \frac{S_{levre}(\omega)}{(p_E - p_B)(\omega)}$

Avec $S_{levre} \sim S_{opt}$ l'ouverture des lèvres.

2.3.2 Protocole expérimental

Objectif de l'expérience

Lors de ses mesures sur des musiciens, Vincent Freour pouvait mesurer les mobilités ainsi que les différences de phases pour une f_0 donnée. Grâce au robot, il voulait étudier l'influence du déphasage entre la pression dans la bouche et dans l'embouchure sur le couplage. Pour cela, il désirait observer les mobilités tout en contrôlant le déphasage grâce à un contrôle actif.

Protocole

Cette expérience se base sur un contrôle actif de la différence de phase entre la pression buccale et la pression dans l'embouchure. Pour faire cela, nous avons utilisé le haut parleur pour injecter un signal (Fig. 2.12).

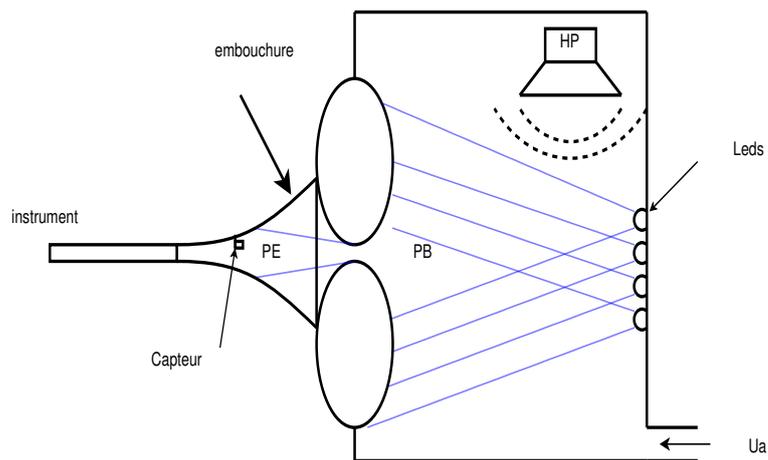


FIGURE 2.12 – Schéma du protocole 2D

L'expérience se fait alors en plusieurs étapes :

1. On se place sur une position de "buzz" où l'oscillation est faite, ainsi l'étude se fait à f_0 constante.
2. On enregistre les signaux sans contrôle actif.
3. On fait varier linéairement la différence de phase $\angle P_B - \angle P_E$ avec 2 conditions sur le signal généré par le HP :
 - a $|P_E/P_B| = Cte$ (rapport d'amplitude entre Z_E et Z_B à f_0 constante)
 - b $|P_B| = Cte$ (énergie acoustique vue par les lèvres à f_0 du coté conduit vocal constante)

Enjeux

La difficulté de cette expérience était de mettre au point le contrôle actif à l'aide du haut parleur et d'un patch Max/Msp. J'ai pour ma part eu un rôle évident dans le contrôle et l'utilisation du robot, mais aussi dans la mise au point du patch. En effet, le déphasage des signaux de pression à f_0 est calculé en temps réel par MAX/MSP. Cette partie du patch a été élaboré par Vincent. J'ai pour ma part mis au point toute la partie asservissement PID du patch.

2.3.3 Résultats

Les figures 2.13 et 2.14 nous montrent les résultats pour les deux conditions : $|P_B| = Cte$ et $|P_E/P_B| = Cte$. On peut d'abord remarquer le bon fonctionnement de l'expérience. En effet, on voit clairement la variation linéaire de la différence de phase ce qui montre que l'asservissement PID est opérationnel. Ainsi, la manipulation est robuste et permet de réaliser différentes conditions de couplages. Les premières analyses suggèrent la présence d'un optimum qui implique :

- . Qu'un accord précis du conduit vocal peut être la clé d'un contrôle expert.
- . Possibilité d'utiliser le contrôle actif pour faciliter le contrôle du robot pour des tâches musicales.

Perspectives

Dans la suite notre collaboration, nous souhaitons avancer sur deux points : déterminer un critère d'efficacité permettant d'identifier le couplage optimal et établir une carte de couplage optimal dans le plan des paramètres de contrôle du robot.

2.3.4 Conclusion

En conclusion de ce chapitre :

1. Le processus expérimental complexe utilisé est performant
2. Dans le cas de notre robot, la cavité buccale est influente.
3. Un contrôle actif pourrait être utilisé pour trouver un optimum de couplage pour le jeu.
4. Une méthode passive pourrait être développée.

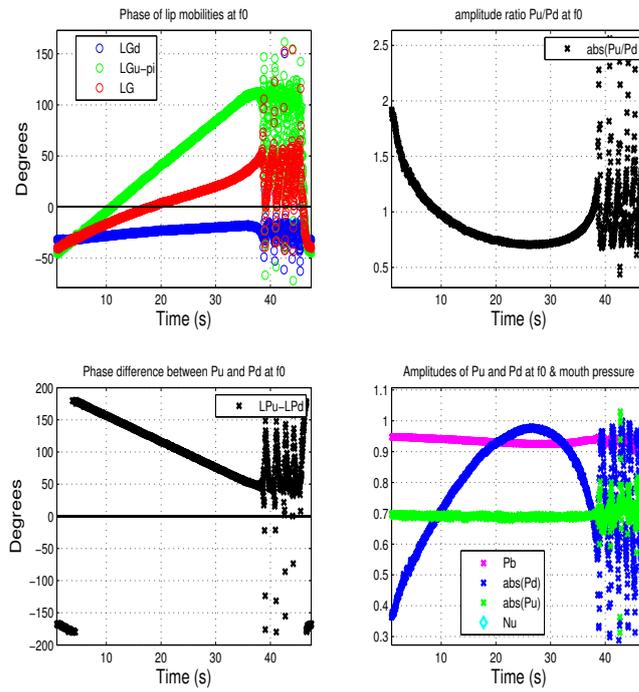


FIGURE 2.13 – Résultats pour $P_B = Cte$, Figure de Vincent Freour ($u = B$ et $d = E$)

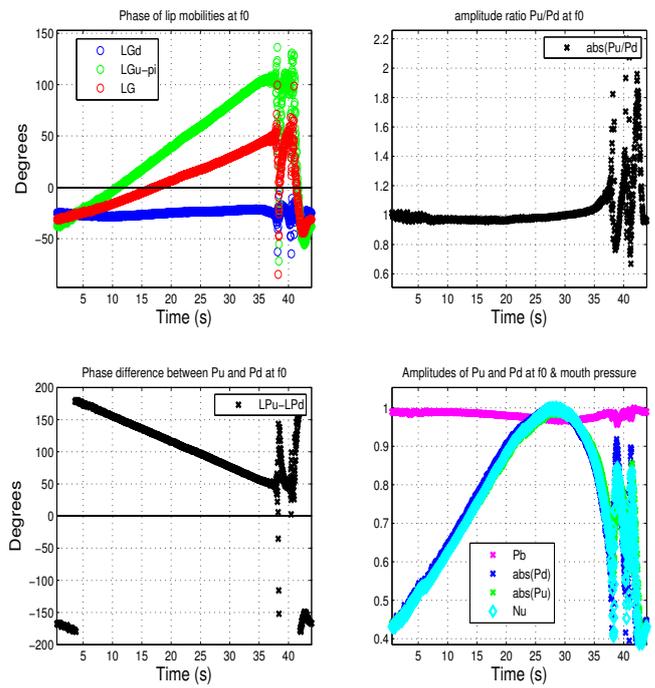


FIGURE 2.14 – Résultats pour $P_B/P_E = Cte$, Figure de Vincent Freour ($u = B$ et $d = E$)

Chapitre 3

Modélisation

3.1 Modélisation Hamiltonienne à port

L'un des points fondamentaux du projet "bouche artificielle robotisée" est celui de la modélisation. En effet, afin d'assurer un contrôle complet du robot, il est nécessaire de construire un modèle fiable de l'ensemble de ses organes. Une approche bien adaptée à la modélisation de systèmes physiques complexes repose sur la "formulation hamiltonienne à port" : elle conduit à des systèmes à bilans énergétiques bien posés et préserve naturellement la passivité. Le concept des systèmes hamiltoniens à port est exposé dans l'ouvrage [1].

3.1.1 Système hamiltonien à port

La représentation d'un modèle sous forme de système hamiltonien à port consiste en plusieurs points :

Un vecteur d'état

Le vecteur d'état est le vecteur des quantités représentant l'état énergétique du système en fonction du temps. Par exemple, dans le cas d'un système masse-ressort simple pour lequel l'énergie interne peut être exprimée comme la somme de l'énergie cinétique et de l'énergie potentielle, $e(t) = \frac{1}{2}mv(t)^2 + \frac{1}{2}kx(t)^2$, les variables d'état sont naturellement v et x . (Voir 3.2)

Une fonction Hamiltonienne

La fonction hamiltonienne n'est rien d'autre que l'énergie interne du système exprimée comme une fonction de l'état du système. Par exemple, dans le cas du système masse-ressort, la fonction hamiltonienne est $H(X) = \frac{1}{2}mv^2 + \frac{1}{2}kx^2$.

Un système

Le modèle peut alors se mettre sous la forme d'un système :

$$\dot{X} = (J(X) - R(X))\partial_X H(X) + B(X)U$$

Où :

1. U est le vecteur des entrées du système
2. $J(X)$ est la matrice représentant les échanges d'énergie au sein du système.
Cette matrice est par construction anti-symétrique, et lorsque le système est parfaitement bien posé, elle a l'avantage d'être canonique.
3. $R(X)$ est la matrice représentant les pertes du système.
Cette matrice est par construction symétrique définie positive.
4. $\partial_X H(X)$ est la dérivée de la fonction hamiltonienne en fonction de l'état (Opérateur gradient).

Un bilan énergétique

Le système écrit sous la forme précédente apparait naturellement comme énergétiquement bien posé. En effet, en considérant la multiplication terme à terme par la dérivée de la fonction hamiltonienne par rapport à l'état, $\partial_X H^T$, il apparait :

$$\partial_t H(X(t)) = \partial_X H^T J(X) \partial_X H - \partial_X H^T R(X) \partial_X H + \partial_X H^T B(X) U$$

Il est alors remarquable que :

1. $\partial_X H^T J(X) \partial_X H = 0$ par anti-symétrie de J .
2. $\partial_X H^T R(X) \partial_X H > 0$ par symétrie et positivité de R .

L'une des conséquences à cela est qu'à source passive ($\partial_X H^T B(X) U < 0$), la variation d'énergie au cours du temps d'un système hamiltonien à port est par construction bornée. Dans ces conditions, la stabilité du système est assurée tout comme la certitude de mettre au point des modèles physiquement possibles.

3.1.2 Un système hamiltonien à port pour le robot

L'une des propriétés les plus importantes du concept des hamiltoniens à port est qu'un ensemble de sous systèmes hamiltoniens à port est lui-même un système hamiltonien à port. Considérant cela, il nous est alors possible de nous concentrer sur les différents organes du robot comme sous-système hamiltonien à port, pour ensuite mettre au point un système mécatronique (mécanique, électronique, mécanique des fluides) modélisant le robot complet (voir fig. 3.1).

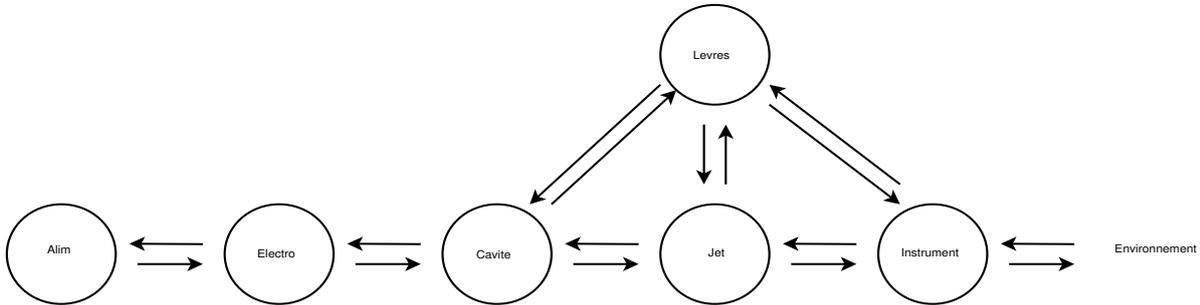


FIGURE 3.1 – Première division du robot en sous-système.

Dans un premier temps, seuls les éléments nécessaires à la création du son seront modélisés (alimentation en air comprimé, cavité buccale, lèvres, jet d'air et instruments) afin d'alléger la modélisation. De plus, pour assurer un premier fonctionnement du modèle complet, les sous-systèmes modélisés seront les plus simples possibles pour ensuite être perfectionnés peu à peu.

3.2 Modèle le lèvre

Bien que, comme nous l'avons vu dans le chapitre 2.1 la lèvre n'a pas une unique résonance, nous choisissons par souci de simplicité de la modéliser comme un système masse, ressort et amortissement. De plus, l'excitateur sera dans un premier temps modélisé par une seule et unique lèvre. Ce modèle est évidemment très loin de la réalité mais a l'avantage d'être très simple à mettre au point. (cf. Fig 3.2).

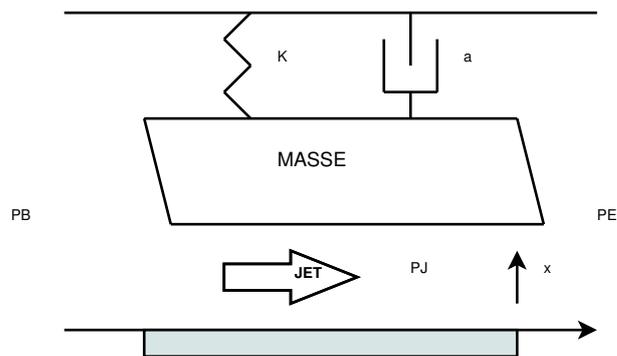


FIGURE 3.2 – Modèle à une masse

Entrées/Sorties du système :

1. Force du Jet sur la masse : \vec{F}_J
Vitesse de la masse : \dot{x}
2. Pression interne : P_B
Vitesse de la masse : \dot{x}
3. Pression externe : P_E
Vitesse de la masse : \dot{x}

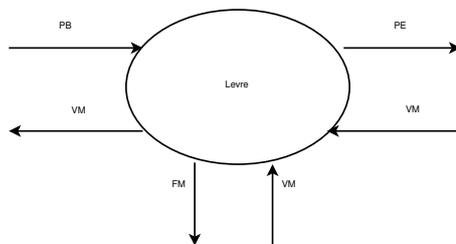


FIGURE 3.3 – Diagramme d'entrée/sortie Lèvre

Hypothèses : La masse se déplace sur son axe vertical. Sa position est repérée par son ordonnée x . La gravité est négligée.

Bilan des forces :

1. Force d'inertie : $\vec{F}_i = m \vec{a}$
2. Force de pression interne : $\vec{F}_B = S_B P_B \vec{u}$
3. Force de pression externe : $\vec{F}_E = -S_E P_E \vec{u}$

4. Force inférieure : \vec{F}_J
5. Force de rappel : $\vec{F}_R = kx\vec{v}_x$
6. Force d'amortissement : $\vec{F}_a = a\dot{x}\vec{v}_x$

En isolant la masse :

$$m\vec{a} = \vec{F}_B + \vec{F}_E + \vec{F}_J + \vec{F}_R + \vec{F}_a \quad (3.1)$$

Après projection sur \vec{v}_x :

$$m\ddot{x} + a\dot{x} + kx = \sin(\alpha)S_BP_B - \sin(\alpha)S_EP_E + F_J \quad (3.2)$$

3.2.1 Énergie du système :

L'énergie e du système s'exprime comme la somme de l'énergie cinétique de la masse et de l'énergie potentielle du ressort.

$$e(t) = \frac{1}{2}m\dot{x}^2 + \frac{1}{2}kx^2 \quad (3.3)$$

Et sa dérivée temporelle est :

$$\dot{e}(t) = m\dot{x}\ddot{x} + kx\dot{x} \quad (3.4)$$

3.2.2 Variables d'état du système :

Le vecteur d'état du système est :

$$X(t) = \begin{pmatrix} \dot{x} \\ x \end{pmatrix} \quad (3.5)$$

3.2.3 Fonction Hamiltonienne :

La fonction hamiltonienne du système n'est rien d'autre que l'énergie exprimée en fonction du vecteur d'état X :

$$H(X(t)) = e(t) \quad (3.6)$$

Le dérivée de la fonction hamiltonienne par rapport à l'état s'écrit alors,

$$\partial_X H = \begin{pmatrix} m\dot{x} \\ kx \end{pmatrix} \quad (3.7)$$

3.2.4 Système

Les équations précédentes nous permettent d'écrire le système sous une forme non canonique Hamiltonienne à port :

$$\begin{pmatrix} \ddot{x} \\ \dot{x} \end{pmatrix} = \left(\begin{pmatrix} 0 & -1/m \\ 1/m & 0 \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} a/m & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix} \right) \partial_X H + \begin{pmatrix} 1 & \sin(\alpha)S_B & -\sin(\alpha)S_E \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} F_J \\ P_B \\ P_E \end{pmatrix} \quad (3.8)$$

3.3 Modèle de jet bi-dimensionnel

Le modèle de jet d'air est l'un des sous-systèmes le plus complexe à modéliser. L'équation de Bernoulli généralement utilisée dans ce type de problème ne nous permet pas de le résoudre. En effet, elle ne garantit pas l'équilibre des échanges énergétiques. Nous devons donc faire appel à des connaissances sur la mécanique des fluides.

Nous avons décidé dans un premier temps, de considérer le jet comme laminaire et de négliger la viscosité.

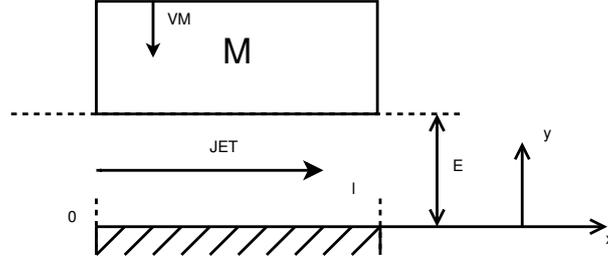


FIGURE 3.4 – Modèle de jet bi-dimensionnel sous une masse en mouvement

3.3.1 Hypothèses

Pour tout $t \in \mathbb{R}^+$, on considère un fluide repéré dans le pavé 2D $\Omega_{xy}(t)$ décrit par

$$\Omega_{xy}(t) = \Omega_x \times \Omega_y(t) \text{ avec } \Omega_x =]x_-, x_+[, \text{ et } \Omega_y(t) =]y_-, y_+(t)[,$$

avec $x_- = 0$, $x_+ = \ell > 0$, $y_- = 0$, et $y_+(t) = \xi(t) > 0$. On note sa frontière $\partial\Omega_{xy}(t)$, décrite par

$$\begin{aligned} \partial\Omega_{xy}(t) &= \Gamma_{x_-}(t) \cup \Gamma_{x_+}(t) \cup \Gamma_{y_-} \cup \Gamma_{y_+}(t) \\ \Gamma_{x_{\pm}}(t) &= \{x_{\pm}\} \times \Omega_y(t) \\ \Gamma_{y_{\pm}}(t) &= \Omega_x \times \{y_{\pm}(t)\} \end{aligned}$$

Par ailleurs, on note

$$\Omega_{xyt} = \{(x, y, t) \in \Omega_x \times \mathbb{R}^+ \times \mathbb{R}^+ \mid y \in \Omega_y(t)\} \quad (3.9)$$

On considère le problème qui répond aux hypothèses suivantes :

(H1) une description d'un jet bidimensionnel localisé dans $\Omega_{xy}(t)$, caractérisé par sa vitesse $\mathbf{v} = v_x \mathbf{e}_x + v_y \mathbf{e}_y$ et sa pression p , sous une seule lèvre mobile et correspondant aux conditions aux frontières suivantes, pour tout $t \in \mathbb{R}^+$,

$$\forall (x, y) \in \Gamma_{y_-}(t), \quad v_y(x, y, t) = \dot{y}_-(t) = 0, \quad (3.10)$$

$$\forall (x, y) \in \Gamma_{y_+}(t), \quad v_y(x, y, t) = \dot{y}_+(t) = \dot{\xi}(t), \quad (3.11)$$

La largeur de la lèvre (direction \mathbf{e}_z) est notée ζ . Les conditions à l'extrémité gauche ($x = x_-$) et droite ($x = x_+$) de la lèvre seront imposées indirectement par le fait qu'on souhaite un modèle simplifié respectant l'hypothèse (H2).

(H2) la composante de vitesse v_y ne dépend pas de x :

$$\forall(x, y, t) \in \Omega_x \times \{0\} \times \mathbb{R}^+, \quad \partial_x v_y(x, y, t) = 0, \quad (3.12)$$

(H3) le fluide est incompressible : $\rho(x, y, t) = \rho_0$.

(H4) le jet est irrotationnel de sorte qu'il existe un potentiel $\Phi(x, y, t)$ tel que

$$\mathbf{v} = \nabla \Phi, \quad (3.13)$$

où $\nabla = (\partial_x, \partial_y)^t$.

(H5) les forces de gravité sont négligées.

Les conditions initiales sont celles de l'équilibre du fluide au repos. Donc, avant $t = 0$, on a vitesse nulle, potentiel nul, pression nulle (si l'on convient de considérer l'écart à la la pression atmosphérique supposée constante).

3.3.2 Conservation de la masse et de la quantité de mouvement

Sous les hypothèses (H3)-(H5), les équations de conservation de la masse ($\partial_t \rho + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v}) = 0$) et de la quantité de mouvement s'écrivent, respectivement

$$\forall(x, y, t) \in \Omega_{xyt}, \quad \nabla^2 \Phi = 0, \quad (3.14)$$

$$\forall(x, y, t) \in \Omega_{xyt}, \quad \partial_t \mathbf{v} + (\mathbf{v} \cdot \nabla) \mathbf{v} + \frac{\nabla P}{\rho_0} = 0. \quad (3.15)$$

où P est la pression locale du fluide. On préfère souvent à (3.15) sa forme intégrée (spatialement), qui conduit à l'équation de Bernoulli pour un jet non stationnaire :

$$\exists K \mid \forall(x, y, t) \in \Omega_{xyt}, \quad \partial_t \Phi(x, y, t) + \frac{(\nabla \Phi(x, y, t))^2}{2} + \frac{P(x, y, t)}{\rho_0} = K(t). \quad (3.16)$$

3.3.3 Potentiel solution

Le potentiel solution à (H1)-(H4) est solution de (3.10-3.14). On trouve après calcul qu'il est de la forme suivante :

$$\exists v_0, \Phi_0 \mid \Phi(x, y, t) = \frac{y^2 - x^2}{2} \dot{L}(t) + x v_0(t) + \Phi_0(t) \quad (3.17)$$

où L est défini par

$$\forall t \in \mathbb{R}^+, \quad L(t) = \ln \xi(t). \quad (3.18)$$

La vitesse est alors donnée par

$$\forall(x, y, t) \in \Omega(t) \times \mathbb{R}^+, \quad v_x(x, y, t) = -x \dot{L}(t) + v_0(t) \quad (3.19)$$

$$\forall(x, y, t) \in \Omega(t) \times \mathbb{R}^+, \quad v_y(x, y, t) = +y \dot{L}(t) \quad (3.20)$$

de sorte qu'on note désormais ces fonctions $v_x(x, t)$ et $v_y(y, t)$.

3.3.4 Champ de Pression

L'équation de Navier-Stokes (3.15) et l'expression du champ de vitesse (3.19 & 3.20) nous permettent de calculer le champ de pression,

$$\exists v_0, P_0 \mid \forall (x, y, t) \in \Omega_{xyt}, p(x, y, t) = P_0(t) - \rho \left[(y^2 - x^2) \frac{\ddot{L}(t)}{2} + (y^2 - x^2) \frac{\dot{L}(t)^2}{2} + (v_0(t) - \dot{L}(t)v_0(t))x \right]$$

3.3.5 Variables Macroscopiques : Explicitation de quantités moyennes

On définit les débits $U_{x\pm}(t) := \zeta \int_{\Omega_y(t)} v_x(x_{\pm}, t) dy = \zeta \xi v_x(x_{\pm}, t)$ les pressions statiques moyennes $P_{x\pm}(t) := \frac{1}{\xi(t)} \int_{\Omega_y(t)} p(x_{\pm}, y, t) dy$ et les pressions dynamiques moyennes $Q_{x\pm}(t) := \frac{1}{\xi(t)} \int_{\Omega_y(t)} \frac{1}{2} \rho \mathbf{v}(x_{\pm}, y, t)^2 dy$.

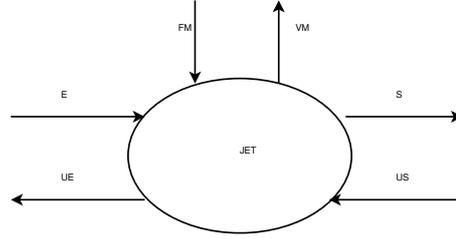


FIGURE 3.5 – Diagramme d'entrée/sortie Jet

Les échanges d'énergie entre le jet et l'extérieur ont lieu au niveau des entrées et sorties du gaz (P_E, P_S, Q_E, Q_S, U_E et U_S) et de la masse (V_M : Vitesse de la masse, et F_M : Action du jet sur la masse).

Échanges Masse ↔ Jet

$$\begin{aligned} V_M(t) &= \dot{\xi} \\ F_M(t) &= \zeta \int_0^\ell p(x, \xi, t) dx \\ &= \zeta \ell \left[P_0 - \rho \left((\ddot{L} + \dot{L}^2) \frac{\xi^2}{2} + (\dot{L}^2 - \ddot{L}) \frac{\ell^2}{6} + (v_0 - \dot{L}v_0) \frac{\ell}{2} \right) \right] \end{aligned} \quad (3.21)$$

Entrée du Flux d'air

$$U_E(t) = \zeta \int_0^\xi v_x(0, t) dy \quad (3.22)$$

$$= \zeta \xi v_0 \quad (3.23)$$

$$P_E(t) = \frac{1}{\xi} \int_0^\xi p(0, y, t) dy \quad (3.24)$$

$$= P_0 - \rho(\ddot{L} + \dot{L}^2) \frac{\xi^2}{6} \quad (3.25)$$

$$Q_E(t) = \frac{1}{\xi} \int_0^\xi \frac{1}{2} \rho \mathbf{v}(0, \xi, t)^2 dy \quad (3.26)$$

$$= \frac{1}{2} \rho (v_0^2 + \frac{\xi^2}{3} \dot{L}^2) \quad (3.27)$$

Sortie du Flux d'air

$$U_S(t) = \zeta \xi (v_0 - \ell \dot{L}) \quad (3.28)$$

$$P_S(t) = P_0 - \rho \left[(\ddot{L} + \dot{L}^2) \frac{\xi^2}{6} + (\dot{L}^2 - \ddot{L}) \frac{\ell^2}{2} + (v_0 - \dot{L} v_0) \ell \right] \quad (3.29)$$

$$Q_S(t) = \frac{1}{2} \rho (v_0^2 - 2\ell v_0 \dot{L} + \ell^2 \dot{L}^2 + \frac{\xi^2}{3} \dot{L}^2) \quad (3.30)$$

3.3.6 Énergie du Jet

L'énergie cinétique $e_j(t)$ du volume de fluide sous la lèvre est donnée par,

$$e_j(t) = \int \int_\Gamma \frac{1}{2} \rho \mathbf{v}^2 dx dy \quad (3.31)$$

$$= \frac{1}{2} \rho \ell \xi (v_0^2 - \ell \dot{L} v_0 + \frac{1}{3} (\ell^2 + \xi^2) \dot{L}^2) \quad (3.32)$$

L'écriture de la dérivée temporelle de (3.32) laisse apparaître le bilan d'énergie du système,

$$\dot{e}_j = (P_E + Q_E) U_E - (P_S + Q_S) U_S - F_M V_M$$

3.3.7 Première formulation en système hamiltonien à port (Dimension 3)

Variables d'état Macroscopique

Le vecteur d'état macroscopique est donné par, en notant la vitesse moyenne suivant l'axe x : $V_x(t) = \frac{1}{\ell} \int_0^\ell v_x(x, t) dx$,

$$X(t) = \begin{pmatrix} V_x \\ V_M \\ \xi \end{pmatrix} \quad (3.33)$$

$$= \begin{pmatrix} v_0 - \frac{\ell}{2}\dot{L} \\ \dot{\xi} \\ \xi \end{pmatrix} \quad (3.34)$$

Fonction Hamiltonienne

La fonction hamiltonienne n'est autre que la réécriture de l'énergie cinétique (3.32) en fonction des variables d'état macroscopiques (3.33),

$$H(X) = \frac{1}{2}\rho\ell\xi V_x^2 + \frac{1}{2}\frac{\rho}{3}\ell\xi\left(1 + \frac{1}{4}\left(\frac{\ell}{\xi}\right)^2\right)V_M^2$$

$$\begin{aligned} \dot{e}_j &= \partial_t H \\ &= \rho\ell\xi V_2 \dot{V}_2 + \frac{\rho}{3}\ell\xi\left(1 + \frac{1}{4}\left(\frac{\ell}{\xi}\right)^2\right)V_M \dot{V}_M + \left[\frac{1}{2}\rho\ell V_2^2 + \frac{1}{2}\frac{\rho}{3}\left(1 - \frac{1}{4}\left(\frac{\ell}{\xi}\right)^2\right)V_M^2\right] \dot{\xi} \\ &= \partial_X H^T \dot{X} \end{aligned}$$

Le dérivée de la fonction hamiltonienne par rapport à l'état s'écrit alors,

$$\partial_X H = \begin{pmatrix} \rho\ell\xi \\ \frac{\rho}{3}\ell\xi\left(1 + \frac{1}{4}\left(\frac{\ell}{\xi}\right)^2\right) \\ \frac{1}{2}\rho\ell V_2^2 + \frac{1}{2}\frac{\rho}{3}\ell\left(1 - \frac{1}{4}\left(\frac{\ell}{\xi}\right)^2\right)V_M^2 \end{pmatrix}$$

Équations du système

Les trois équations qui régissent le système sont :

$$\dot{V}_x = \frac{1}{\rho\ell} [(P_E + Q_E) - (P_S + Q_S)] \quad (3.35)$$

$$\begin{aligned} \dot{V}_M &= -\frac{\frac{1}{6}\left(1 - \frac{1}{4}\left(\frac{\ell}{\xi}\right)^2\right)}{\frac{\xi}{3}\left(1 + \frac{1}{4}\left(\frac{\ell}{\xi}\right)^2\right)} V_M^2 - \frac{1}{2} \frac{1}{\frac{\xi}{3}\left(1 + \frac{1}{4}\left(\frac{\ell}{\xi}\right)^2\right)} V_2^2 \\ &\quad - \frac{1}{\rho\frac{\xi}{3}\left(1 + \frac{1}{4}\left(\frac{\ell}{\xi}\right)^2\right)} \left(\frac{F_M}{Z\ell} - \frac{P_S + Q_S}{2} - \frac{P_E + Q_E}{2}\right) \end{aligned} \quad (3.36)$$

$$V_M = U_E - U_S \quad (3.37)$$

Systeme

Les equations (3.35)(3.35)(3.36)(3.37) nous permettent d'ecrire le systeme sous une forme non canonique Hamiltonienne a port :

$$\begin{pmatrix} \dot{V}_2 \\ \dot{V}_M \\ \dot{\xi} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \\ 0 & 1 & 0 \end{pmatrix} \left(\frac{1}{\rho \frac{\xi}{3} \ell (1 + \frac{1}{4} (\frac{\ell}{\xi})^2)} \right) \partial_X H + \begin{pmatrix} \frac{1}{\rho \ell} & -\frac{1}{\rho \ell} & 0 \\ \frac{1}{2\rho \frac{\xi}{3} (1 + \frac{1}{4} (\frac{\ell}{\xi})^2)} & \frac{1}{2\rho \frac{\xi}{3} (1 + \frac{1}{4} (\frac{\ell}{\xi})^2)} & -\frac{1}{\rho \frac{\xi}{3} (1 + \frac{1}{4} (\frac{\ell}{\xi})^2) \zeta \ell} \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} P_E + Q_E \\ P_S + Q_S \\ F_M \end{pmatrix} \quad (3.38)$$

$$V_M = U_E - U_S \quad (3.39)$$

Remarquons que pour une hauteur de canal fixe ($\xi = cte$) et en regime stationnaire, ($V_x = cte$) l'equation 3.35 correspond a l'equation de Bernouilli utilisee typiquement dans la modelisation des instruments a vent ($p + \frac{1}{2} \rho v^2$). Dans la modelisation proposee dans ce chapitre, l'effet dynamique est prit en compte ($V_x \neq cte$: ceci correspond a l'equation de Bernouilli en regime instationnaire egalement utilisee). Enfin pour une hauteur de canal variable (anche en vibration) et pour respecter le bilan d'energie, on voit que la dynalpie ($P + Q$) est modifiee par les equations 3.32 3.35. On prevoit d'utiliser la formulation Hamiltonienne, mais meme sans cela, les resultats peuvent etre utilises et remplacer l'equation de Bernouilli.

Conclusion et perspectives

Nous avons vu dans ce rapport que le robot était d'un point de vue technique parfaitement utilisable et que les résultats obtenus lors des différentes expériences étaient exploitables. De nouvelles informations ont été exposées avec notamment les résonances multiples de lèvres et les premières constatations sur la confrontation des mouvements des deux lèvres (Prépondérance d'une lèvre dans l'excitation). Nous avons vu l'influence de la cavité buccale du robot par une mise au point d'un système de contrôle actif. Nous avons également introduit les premiers modèles de sous-systèmes et montré la possibilité d'utiliser le concept des hamiltoniens à port dans le cas de système compliqué comme le jet d'air entre les lèvres.

Comme je l'ai déjà exprimé dans l'introduction, la bouche artificielle robotisée adaptée aux cuivres est un système complexe et chaque expérimentation pourrait être le sujet d'un stage à part entière. J'ai pour ma part eu la chance d'effectuer ce stage avec l'idée de continuer en thèse. J'ai ainsi eu l'occasion d'explorer les possibilités du robot et de lancer le travail sur la modélisation. Il paraît clair que le système est aujourd'hui opérationnel d'un point de vue technique. Les résultats obtenus cette année sont très prometteurs.

Ce stage a été pour moi extrêmement enrichissant. Mes séances de travail avec Vincent Freour ont été performantes et agréables. Nous travaillerons certainement à nouveau ensemble lors de ma thèse.

Les prochaines étapes de mon travail auront lieu dès le mois prochain, avec dans un premier temps une calibration des capteurs de pression d'eau. Ensuite, un certain temps sera passé à mettre au point une nouvelle forme de cavité buccale. Je dois également continuer la modélisation du robot pour enfin effectuer une première simulation numérique. En parallèle, je continuerais mon travail sur l'identification des résonances de lèvre.

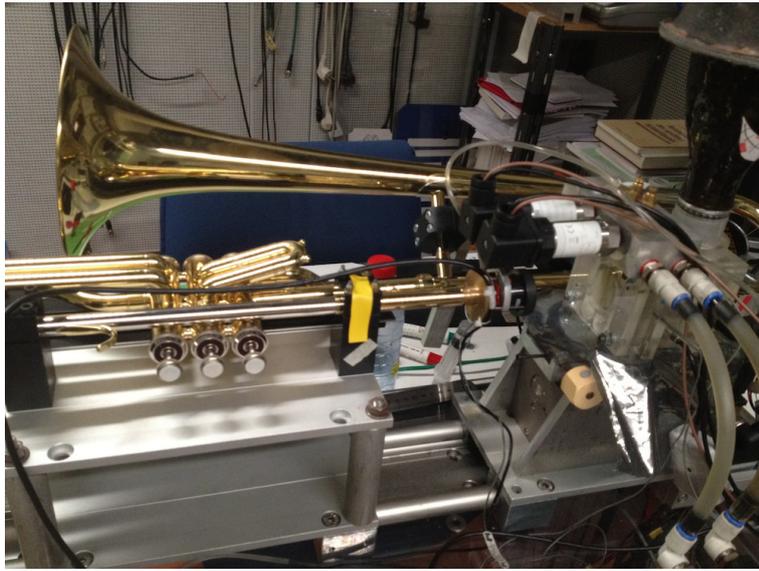


FIGURE 3.6 – Photographie trombone 1



FIGURE 3.7 – Photographie trombone 2

Bibliographie

- [1] V. Duindam, A. Macchelli, S. Stramigioli, H. Bruyninckx. Modeling and Control of Complex Physical Systems : The Port-Hamiltonian Approach. *Springer*
- [2] C.-A. Macaluso and J.-P. Dalmont.
Trumpet with near-perfect harmonicity : Design and acoustic results.
JASA, 129(1) :404–414, 2011.
- [3] B. Véricel.
Confrontation théorique/expérimentale de caractéristiques d'excitation dans le jeu des cuivres. Stage M2R ATIAM
- [4] B. Véricel.
Commande et interfaçage d'un robot musicien. Stage Ingénieur ENSEA
- [5] A. Almeida et al.
Clarinet parameter cartography : automatic mapping of the sound produced as a function of blowig pressure and reed force. ISMA 2010.
- [6] F. Silva.
Emergence des auto-oscillations dans un instrument de musique à anche simple. Thèse, 2009.
- [7] J. Gilbert, S. Ponthus.
Artificial buzzing lips and brass instruments : Experimental results. *JASA*, 104 :1627, 1998.
- [8] N. Lopes. Cartographie de paramètres de jeu de trompettiste : mise en correspondance automatique du son produit avec les paramètres de contrôle d'une bouche artificielle asservie. Stage ingénieur de l'ENSEA.
- [9] P. Chassaing. Mécanique des fluides : Élément d'un premier parcours. Deuxième édition.
- [10] T. Hélie.
Etude de méthodes d'estimation des paramètres d'un modèle physique d'instrument de musique - Application à la trompette. Stage DEA Ircam 1998.
- [11] J. Cisonni. Modélisation et inversion d'un système complexe de production de signaux acoustiques. Thèse.
- [12] V. Freoura and G. P. Scavone. Investigation of the effect of upstream airways impedance on regeneration of lip oscillations in trombone performance. *Acoustics* 2012.