

Rapport de stage de Master 2 SAR ATIAM

Baptiste Véricel

30 juin 2010

Version 1.0

Sujet : **Confrontation théorique/expérimentale de caractéristiques d'excitation dans le jeu des cuivres**

Étudiant : Baptiste Véricel
Master 2 Informatique - spécialité SAR - parcours ATIAM
baptiste.vericel@ircam.fr, 01 44 78 49 00

Laboratoire d'accueil : IRCAM - CNRS UMR 9912 LMA-CNRS UPR 7051
Équipe Analyse-Synthèse Équipe Physique des Instruments de Musique
1, place Igor Stravinsky, 31 chemin Joseph-Aiguier,
75004 Paris 13402 Marseille

Encadrants : Thomas Hélie, CR1 CNRS à l'IRCAM
thomas.helie@ircam.fr, 01 44 78 48 24

Christophe Vergez, CR1 CNRS au LMA
vergez@lma.cnrs-mrs.fr, 04 91 16 41 63

René Caussé, CR1 CNRS à l'IRCAM
rene.causse@ircam.fr, 01 44 78 48 60

Enseignant référent : Emmanuel Saint-James
emmanuel.saint-james@lip6.fr



Remerciements

Je tiens à remercier tout particulièrement Thomas Hélie, Christophe Vergez et René Caussé de m'avoir encadré pendant ce stage, car ils m'ont tous trois beaucoup apporté tant sur le plan humain que professionnel. Les développements qui ont été effectués n'auraient pas été possibles sans l'aide précieuse de Alain Terrier et de Gérard Bertrand.

Je souhaite également remercier Sami Karkar et Fabrice Silva qui m'ont beaucoup aidé pour tous les développements théoriques du stage.

Enfin merci à Emmanuel Fléty, Xavier Boutillon et Joël Gilbert qui m'ont aidé à élaborer les expériences sur la bouche artificielle.

Table des matières

I	Modèle de cuivres et méthodes numériques	5
1	Modèle de cuivres	5
2	Décomposition modale du résonateur	6
2.1	Principe de la décomposition modale	6
2.2	Résultats du script d'optimisation	7
3	Simulation temporelle : le logiciel MOREESC	9
3.1	Présentation du logiciel MOREESC	9
3.2	Interprétation d'un résultat de simulation	9
4	Recherche de solutions périodiques par équilibrage harmonique	11
4.1	Présentation de MANLAB	11
4.2	Système d'équation pour les cuivres	13
4.3	Tracé de la branche statique	13
II	Mise en place expérimentale du système de bouche artificielle robotisée	16
5	Présentation du système de bouche artificielle robotisée	16
5.1	Bilan des actionneurs et capteurs du robot au début du stage	16
5.2	Nouveautés développées pendant le stage	17
5.2.1	Système de circuit d'eau	17
5.2.2	Système de blocage des actionneurs	18
5.2.3	Nouveaux capteurs	19
6	Mesure de la réponse mécanique des lèvres	20
6.1	Présentation de la problématique	20
6.2	Recherche du mode opératoire	21
6.3	Système optique adopté	22
III	Résultats expérimentaux et confrontation avec la théorie	24
7	Système de mesure des signaux	24
8	Méthode de traitement des signaux	27
8.1	Présentation de la méthode	27
8.2	Validation de la méthode sur des signaux de synthèse	29
9	Premiers résultats de cartographie	31
A	Script de l'implémentation de la méthode d'estimation AR	34
B	Script d'automatisation de l'expérience de mesures des signaux	35

Bibliography41

Introduction

Les oscillations dans les instruments à vent ont fait l'objet de nombreuses études. Dans les cas des cuivres, ces oscillations sont pilotées par les auto-oscillations entretenues d'un flux d'air. Ces oscillations sont provoquées par un oscillateur mécanique (les lèvres du musicien) qui agissent comme une valve qui module ce flux. La déstabilisation de cet élément mécanique est le fruit d'un couplage aéroélastique complexe entre les lèvres, le flux d'air provenant de la pression d'air statique dans la bouche et le champ acoustique dans l'instrument. De nombreux modèles ont été proposés pour expliciter le comportement physique du jeu de ce type d'instrument.

Le fonctionnement des instruments à anche simple est assez similaire à celui des cuivres mais présente une différence cruciale au niveau du système excitateur. Les premiers efforts pour modéliser le comportement d'un musicien "simplifié" couplé à un instrument de la famille des cuivres ont été effectués en 1982 par Elliot et Bowsher [3]. Ils ont comparé des mesures expérimentales sur un tromboniste avec le comportement prédit par leur théorie en utilisant l'hypothèse des petites oscillations. Cette théorie a ensuite été largement étudiée par Murray Campbell au laboratoire de l'université d'Edimbourg à travers divers projets de recherche et plusieurs thèses. On distinguera notamment celles de J.S. Cullen qui a publié plusieurs articles récents sur un modèle physique de cuivres plus évolué que celui qui sera présenté dans ce rapport dans [8] mais qui n'est pas l'objet de ce stage. Mark Neal et Orlando Richards ont également étudié le comportement des bouches artificielles avec les thèses qu'ils ont effectuées en Ecosse ([9] et [11]).

La difficulté d'évaluer l'influence très complexe de tous les paramètres qui sont à l'origine de la production d'une note dans ce type d'instrument qui peuvent prendre une gamme de valeurs considérable, mais aussi celle de les mesurer avec précision sur un instrumentiste a été très vite mentionnée par Elliot et Bowsher. C'est cette observation qui a conduit à l'élaboration de bouches artificielles munies de lèvres artificielles qui ne sont contrôlées que par un petit nombre de paramètres. Ce type de dispositif a été mis en place dans plusieurs laboratoires de recherche, bien entendu à Edimbourg, mais aussi à l'université du Maine au Mans par Joël Gilbert, et également à l'IRCAM.

Ce stage est dans la continuation d'un stage que j'ai effectué durant l'été 2009 pour la fin de mes études d'ingénieur en électronique et en informatique à l'ENSEA (Ecole Nationale Supérieure de l'Electronique de ses Applications). Ce stage avait pour objectif d'améliorer le système de pilotage des systèmes de bouche artificielle développés d'une part au LMA (Laboratoire de Mécanique et d'Acoustique) sur la flûte à Marseille et à l'IRCAM (Institut de Recherche et de Création Acoustique Musique) à Paris qui dispose d'un système robotisé de bouche artificielle pour le jeu de la trompette. Un nouveau système de pilotage pour le robot musicien de l'IRCAM a notamment été mis en place à l'aide d'une carte électronique dSPACE permettant de contrôler les différents signaux. Elle a remplacé un micro-contrôleur RABBIT qui était compliqué à utiliser. Des modèles physiques des actionneurs présents sur le robot ont été établis pour aller vers des asservissements performants à l'aide de représentations d'état.

Pour mon stage de fin de master 2, j'ai essayé de mettre côte à côte un modèle théorique de cuivres et des expériences sur la bouche artificielle de l'IRCAM. Pour exploiter le comportement du modèle théorique, j'ai utilisé deux méthodes numériques développées au LMA. Une première partie de mon stage s'est donc déroulée à Marseille durant un mois. Le reste du stage s'est déroulé à l'IRCAM. Le but de cette seconde partie de stage a été d'essayer d'identifier certains paramètres du modèle sur la bouche artificielle robotisée. Une procédure automatisée de mesure

de ces paramètres a été mise en place suite à l'établissement de nouvelles fonctionnalités du robot.

Ainsi ce rapport sera constitué d'une partie théorique où un modèle de fonctionnement des cuivres sera établi en concordance avec les modèles établis dans la littérature et au LMA. Un parallèle sera fait avec un modèle d'instrument à anche simple de type clarinette qui a été étudié en détail dans la thèse de Fabrice Silva [13] soutenue récemment et qui fait en partie l'objet de la thèse en cours de Sami Karkar au LMA. Je présenterais également les méthodes numériques développées à Marseille que j'ai étudiées au cours de cette première partie de mon stage ainsi que des applications validant leur bon fonctionnement. Ces méthodes ont principalement été utilisées jusqu'à présent pour les anches simples, et je me suis chargé d'adapter le fonctionnement de l'une d'elle aux instruments de la famille des cuivres.

Dans un deuxième temps je présenterais les travaux qui ont été effectués sur la bouche artificielle robotisée de l'IRCAM afin d'obtenir une expérience permettant de lier son fonctionnement à celui du modèle présenté auparavant. Plusieurs fonctionnalités de ce système ont été ajoutées en étroite collaboration avec Gérard Bertrand et Alain Terrier qui sont respectivement l'électronicien et le mécanicien de l'IRCAM. En parallèle s'est déroulée une période de recherche d'un mode opératoire permettant de mesurer la réponse mécanique des lèvres artificielles qui sera décrite dans ce rapport. Je présenterais finalement le système de mesure qui a été adopté.

Enfin je présenterais l'expérience qui a été mise en place pour effectuer une cartographie des paramètres mécaniques de la lèvre sur un ensemble de configurations de jeu rendu possible par le robot. Des premiers résultats expérimentaux seront alors présentés.

Première partie

Modèle de cuivres et méthodes numériques

Cette partie a pour but de présenter un modèle physique de cuivres ainsi que deux méthodes numériques complémentaires permettant d’exploiter ce modèle. Ces travaux ont principalement eu lieu au LMA. En effet ces méthodes numériques existaient déjà pour des instruments à anche simple tels que la clarinette. La première méthode est un logiciel de simulation temporelle développé par Fabrice Silva au cours de sa thèse soutenue cette année [13]. La seconde est une recherche des solutions périodiques du système basé sur une méthode dite d’équilibrage harmonique qui est développée par Sami Karkar au sein de sa thèse (cf [12]). De part leur complémentarité ces deux méthodes ont pour but d’expliquer le comportement des instruments à vents comme les instruments à anche simple ou les cuivres. Je me suis chargé de faire la synthèse des modèles existant à l’aide d’une étude bibliographique. Il était alors nécessaire de mettre en place un modèle pouvant être utilisé par les deux méthodes afin d’unifier les notations. Je me suis chargé de prendre en main ces méthodes, en faisant quelques premiers tests. Pour la méthode basée sur l’équilibrage harmonique, la version cuivres n’existait pas, il a fallu développer le système d’équation correspondant au modèle pour cette méthode. On discutera de la validité ainsi que de l’intérêt de ces deux méthodes en vue d’une confrontation avec l’expérience.

1 Modèle de cuivres

Il s’agit ici de présenter quelles sont les équations physiques que l’on veut exploiter pour simuler le comportement des cuivres. Ce modèle s’inspire des travaux qui ont été effectués sur l’étude des instruments à anche simple de type clarinette, car même si leur fonctionnement est très différent de par la nature du système excitateur, il s’agit tout de même d’une anche (système dynamique excitateur) couplée de manière non linéaire à un résonateur. Je m’attacherai à conserver les fonctionnements de ces deux familles d’instrument afin de pouvoir comparer les deux.

Dans les deux cas (cuivres ou anche simple), nous modélisons le système excitateur des instruments à vent à anche par un oscillateur à un degré de liberté noté h . Son fonctionnement est modélisé par l’équation différentielle ordinaire (EDO) suivante :

$$\frac{d^2h}{dt^2} + q_r \omega_r \frac{dh}{dt} + \omega_r^2 (h - h_0) = \varepsilon \frac{\omega_r^2}{K} (p_{bec} - p_m) \quad (1)$$

Ici ω_r représente la fréquence angulaire de résonance de l’anche, q_r un coefficient qui modélise l’amortissement de l’anche, h_0 l’ouverture de l’anche au repos, K représente la raideur surfacique de l’anche, p_m la pression dans la bouche (supposée constante), p_{bec} la pression acoustique à l’entrée du résonateur ε un paramètre adimensionné prenant ses valeurs dans $\{-1, 1\}$. On distinguera alors deux cas suivant la valeur de ε :

- $\varepsilon = 1$: L’anche a tendance à se refermer lorsque la pression dans la bouche est supérieure à celle dans le bec, ce qui est le fonctionnement des instruments à anche simple de type clarinette. On parle de fonctionnement “inward” ou d’anche “en-dedans” qui est caractérisé par une fréquence de jeu au seuil inférieure à la fréquence de résonance de l’anche mais surtout en dessous de la fréquence du pic d’impédance du résonateur.

- $\varepsilon = -1$: L'anche a tendance à s'ouvrir lorsque la pression dans la bouche est supérieure à celle dans l'embouchure, ce qui est le fonctionnement des cuivres avec les lèvres (on parle d'anches lippales). On parle de fonctionnement "outward" ou d'anche "en-dehors". Une des caractéristiques de ce type de fonctionnement est que cette fois-ci la fréquence de jeu au seuil est au dessus de la fréquence de résonance du résonateur.

Ce modèle est présenté de manière plus complète dans [2], où suite à des mesures sur bouche artificielle il semblerait que le comportement des lèvres serait plutôt un oscillateur à deux degrés de liberté contenant deux fréquences de résonance des lèvres ayant un comportement "inward" et "outward". On suppose le modèle unidimensionnel "outward" valide pour notre modèle.

Pour simplifier les calculs, on fonctionne avec un modèle adimensionné. On définit ainsi εp_M la pression dans la bouche pour laquelle l'anche est fermée. On a alors la relation $p_M = Kh_0$. On remarque alors que la pression de placage statique est négative dans le cas des anches lippales. On pose alors également les variables suivantes : $\gamma = \frac{p_m}{p_M}$, $x = \frac{h}{h_0}$, $y = \frac{\dot{x}}{\omega_r}$ et $p = \frac{p_{bec}}{p_M}$. L'équation du résonateur devient alors :

$$\frac{1}{\omega_r} \dot{y} + q_r y + x - 1 = \varepsilon(p - \gamma) \quad (2)$$

L'équation de couplage non linéaire avec le résonateur reliant le débit entrant U dans l'instrument et la pression d'air dans la bouche, est la relation de Bernoulli, qui s'écrit dans notre cas :

$$U(t) = Wh(t) \operatorname{sgn}(p_m - p(t)) \sqrt{\frac{2|p(t) - p_m|}{\rho}} \text{ si } h > 0, u = 0 \text{ sinon} \quad (3)$$

avec W la largeur du canal d'anche et ρ la masse volumique de l'air. On adimensionne l'équation en débit par la valeur $U_0 = Wh_0 \sqrt{\frac{2p_M}{\rho}}$ et on note $u = \frac{U}{U_0}$. On a alors l'équation adimensionnée suivante :

$$u = x \operatorname{sgn}(\gamma - p) \sqrt{|p - \gamma|} \text{ si } x > 0, u = 0 \text{ sinon} \quad (4)$$

Enfin la troisième équation à considérer est celle qui décrit le comportement du résonateur. On utilise pour cela la relation donnée par son impédance d'entrée Z_e . La relation entre le débit d'air et la pression d'entrée s'écrit généralement dans le domaine de Fourier par la relation suivante :

$$P(\omega) = Z_e(\omega) U(\omega) \quad (5)$$

2 Décomposition modale du résonateur

2.1 Principe de la décomposition modale

Il est pertinent d'utiliser une décomposition modale du résonateur si on suppose que ce dernier est linéaire. Ce modèle modal n'est plus valide à fort niveau sonore, car la non linéarité du résonateur devient non négligeable (effet bien connu de cuivrage des cuivres). On identifie alors chaque pic de résonance de l'impédance comme une fonction de transfert résonante du second ordre. L'impédance peut alors s'écrire sous la forme suivante :

$$Z_e(\omega) = \sum_{n=1}^N Z_n \frac{j q_n \omega \omega_n}{\omega_n^2 + j q_n \omega \omega_n - \omega^2} \quad (6)$$

Le champ de pression acoustique peut donc se décomposer en N composantes de la manière suivante : $p(t) = \sum_1^N p_n(t)$, où chaque p_n vérifie l'EDO suivante $\forall n$:

$$\frac{d^2 p_n}{dt^2} + q_n \omega_n \frac{dp_n}{dt} + \omega_n^2 p_n(t) = Z_n q_n \omega_n \frac{du}{dt} \quad (7)$$

On remarquera que les coefficients Z_n utilisés sont déjà adimensionnés par l'impédance caractéristique du résonateur $Z_c = \frac{\rho c}{S}$ avec c la célérité du son et S la section du résonateur. Cependant ces modes sont réels et une forme plus générale sous forme de modes complexes peut être adoptée.

Au lieu de faire intervenir les coefficients Z_n , q_n et ω_n , on utilise les pôles complexes s_n et les résidus C_n . On réécrit alors l'impédance d'entrée sous la forme suivante :

$$Z_e(\omega) = \sum_{n=1}^N \frac{C_n}{j\omega - s_n} + \frac{C_n^*}{j\omega - s_n^*} \quad (8)$$

On remarque que cette formulation ne reste strictement valide que si les modes considérés sont effectivement en régime oscillant, c'est à dire si ils ne sont pas trop amortis (facteur de qualité supérieur à $\frac{1}{2}$). Cette hypothèse est vérifiée pour les modes résonants du tuyau. Dans le cas contraire, ce n'est pas une paire de pôles complexes conjugués qui entre en jeu, ce qui change la formulation. En mettant le terme d'ordre n sous forme d'une seule et même fraction pour faire une analogie avec la formulation réelle, on obtient :

$$Z_e(\omega) = \sum_{n=1}^N \frac{j\omega(C_n + C_n^*) - (C_n s_n^* + C_n^* s_n)}{s_n s_n^* - j\omega(s_n + s_n^*) - \omega^2} \quad (9)$$

On se ramène au cas précédent si l'on pose $\omega_n^2 = s_n s_n^* = |s_n|^2$, $q_n \omega_n = s_n + s_n^* = -2\Re(s_n)$ et $Z_n = \frac{C_n + C_n^*}{s_n + s_n^*} = -\frac{\Re(C_n)}{\Re(s_n)}$ avec la condition $C_n s_n^* + C_n^* s_n = 2\Re(C_n s_n^*) = 0$. Si on lève la condition de nullité du terme précédent, on a une partie réelle non nulle au numérateur, et on gagne en généralité. Cela permet en particulier de ne pas considérer que l'impédance est nulle à fréquence nulle, ce qui n'est pas le cas dans la réalité alors que c'est une condition imposée par la prise en compte de modes réels.

Un script MATLAB permet déjà au LMA de trouver les coefficients correspondant à la décomposition modale avec des modes réels à partir d'une impédance de l'instrument mesurée avec un banc d'impédance. Il est basé sur une fonction MATLAB qui se nomme `lsqcurvefit` qui permet d'optimiser un profil approché d'une courbe. Je me suis chargé d'adapter cette version du script pour une décomposition avec des modes complexes. On trouve ainsi les coefficients complexes C_n et s_n pour chaque mode estimé.

2.2 Résultats du script d'optimisation

Je me suis chargé d'adapter un script MATLAB développé par Christophe Vergez au LMA permettant de trouver les coefficients de la décomposition modale en modes réels qui permettent d'approcher au mieux l'impédance d'entrée d'un instrument de musique. La mesure d'impédance est effectuée avec le pot d'impédance développé par Jean-Pierre Dalmont à l'université du Mans. Ce script est basé sur la fonction MATLAB `lsqcurvefit` qui permet d'approcher au mieux le tracé d'une courbe au sens des moindres carrés. Globalement à chaque étape de l'optimisation on calcule de nouveaux coefficients modaux, on génère la courbe d'impédance à l'aide d'une fonction, puis on minimise au sens des moindres carrés la norme de l'erreur quadratique entre les deux courbes (en partie réelle et partie imaginaire). Le script existant déjà pour une optimisation

avec des modes réels, je me suis chargé de l'adapter avec des modes complexes, qui présentent les avantages cités dans la partie 2.

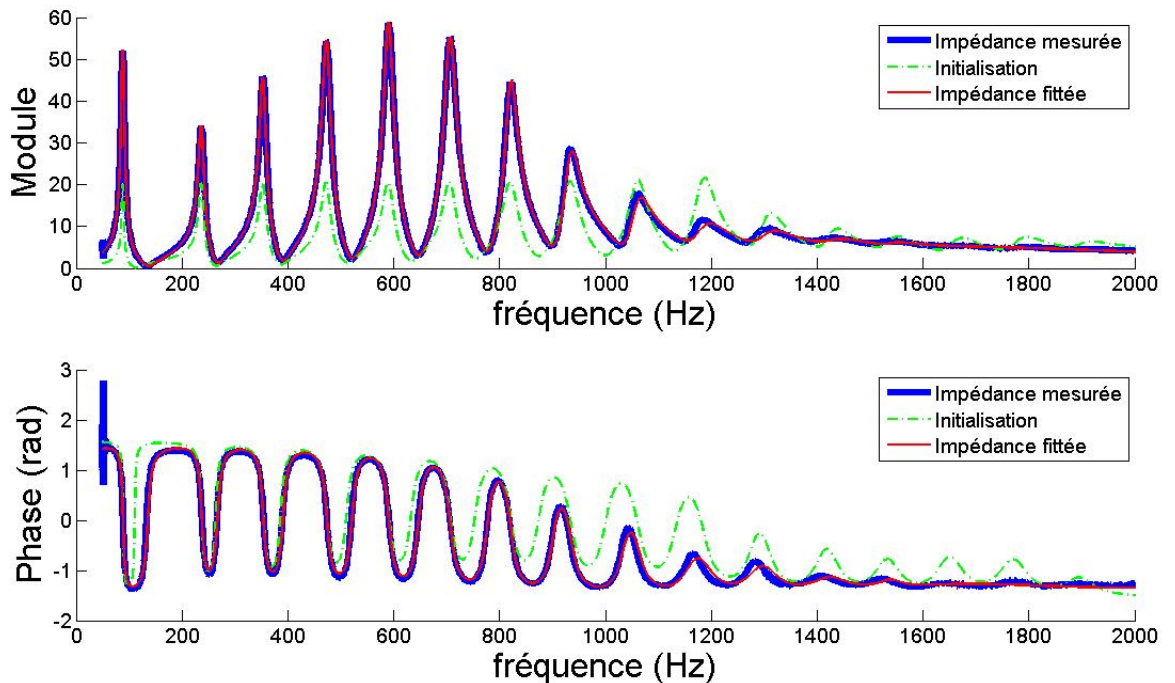
Cette section a pour but de présenter le principe de cette adaptation ainsi que les résultats obtenus. Tout d'abord le script commençait par faire une initialisation des coefficients Z_n , ω_n et $Q_n = \frac{1}{qn}$. Il s'agit donc de trouver une initialisation similaire des coefficients C_n et s_n pour les modes complexes. Je me suis donc servi de l'analogie entre les modes complexes et réels pour générer le même point de départ. En partant de l'expression des modes complexes on obtient et du changement de variables permettant de faire correspondre les deux formalisme on obtient :

$$s_n = \frac{\omega_n}{Q_n} \left(-\frac{1}{2} + i\sqrt{Q_n^2 - 1} \right) \quad (10)$$

$$C_n = Z_n \frac{\omega_n}{Q_n} \left(1 + i\frac{1}{2\sqrt{Q_n^2 - 1}} \right) \quad (11)$$

Une fois que les valeurs initiales de ces coefficients sont fixées, je me suis chargé de modifier la fonction qui génère la courbe d'impédance correspondant à ces coefficients à l'aide de l'équation 8. On a la possibilité d'approcher la courbe avec un certain nombre de modes. Voici la courbe résultante d'une optimisation de l'impédance d'entrée de la trompette qui se trouve sur la bouche artificielle de l'IRCAM avec 15 modes :

FIGURE 1 – Résultats d'une optimisation avec 16 modes complexes



On remarque que au moins sur les 7 premiers pics de l'impédance, on est suffisamment proche de la courbe cible, ce qui est largement suffisant pour les simulations envisagées par la suite. On ne peut cependant pas tronquer le modèle obtenu à un nombre de modes plus réduit (c'est à dire

ne conserver que les 5 premiers modes par exemple), car les contributions des modes supérieurs apportent la précision souhaitée à l'approximation.

3 Simulation temporelle : le logiciel MOREESC

3.1 Présentation du logiciel MOREESC

Une première méthode de simulation du comportement des instruments à anche est une méthode temporelle. Elle utilise un solveur classique d'équation différentielle ordinaire (`lsode`) (cf [13]) et on génère à chaque pas de temps toutes les variables qui permettent de décrire le fonctionnement de l'instrument et on peut ainsi reconstituer le signal de pression acoustique à l'entrée du résonateur en fonction des lois de variation des paramètres que l'on s'est fixé. Dans notre cas on s'intéressera principalement, pour un jeu de paramètres donné, à l'effet de la variation de la pression dans la bouche sur le seuil d'apparition du son et sur les différentes bifurcations que l'on peut observer. On pourra notamment évaluer l'influence de la variation de ω_r sur ces phénomènes.

Le logiciel utilisé se nomme MOREESC (MOdal Resonator-rEEd interaction Simulation Code) qui a été programmé par Fabrice Silva durant sa thèse au LMA (<http://moreesc.lma.cnrs-mrs.fr/>). Le langage de programmation utilisé est le langage python, et certains modules sont programmés en fortran afin de diminuer considérablement les temps de calcul. Le solveur est notamment issu d'une librairie fortran (`odepack`). La section qui suit a pour but de présenter le principe de cette simulation dans ses grandes lignes, le fonctionnement étant détaillé dans la thèse de Fabrice Silva [13].

Ce logiciel permet de résoudre l'évolution d'un vecteur d'état X qui décrit entièrement un système dynamique régit par l'équation générique suivante :

$$\frac{dX}{dt} = f(X, t)$$

avec f fonction non linéaire à valeur vectorielle. C'est bien notre cas pour le vecteur :

$$X = (p_1, p_2, \dots, p_N, h, \frac{dh}{dt})^T, \text{ avec } p_n \in \mathbb{C}, \forall n \in \{1, N\}$$

Or dans la pratique, le solveur n'admettant pas de valeurs complexes on utilise le vecteur d'état suivant :

$$X = \left(\Re(p_1), \Im(p_1), \Re(p_2), \Im(p_2), \dots, \Re(p_N), \Im(p_N), h, \frac{dh}{dt} \right)^T \quad (12)$$

On peut reconstruire le signal de pression p à chaque pas de calcul avec la formule suivante :

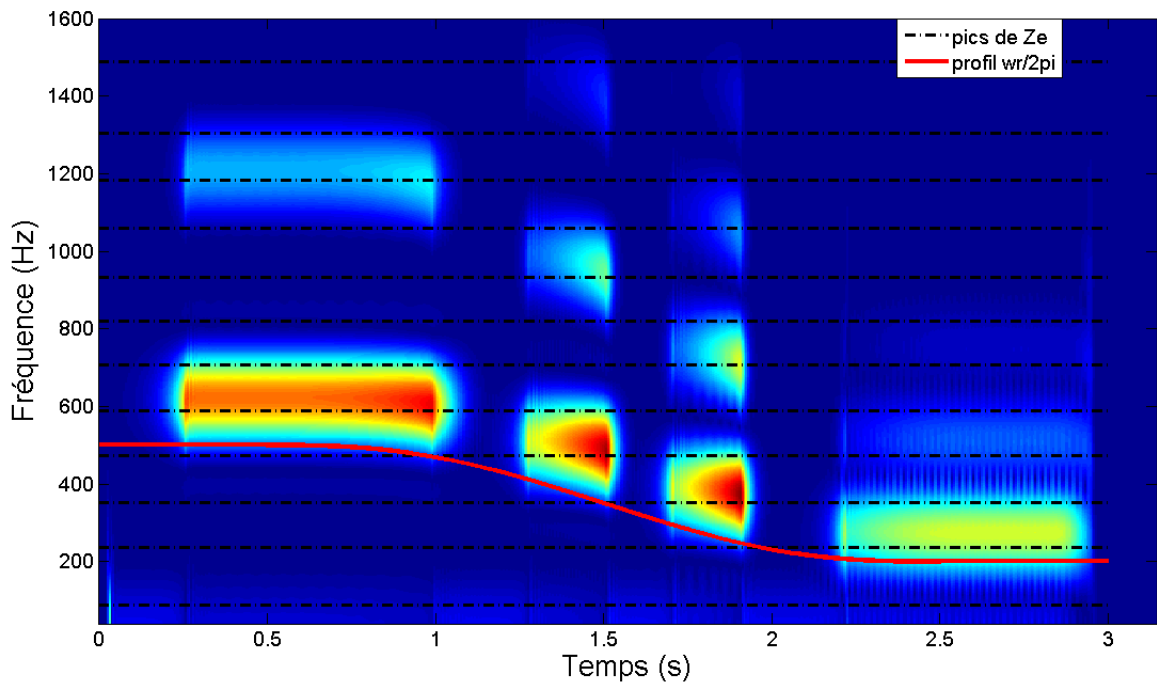
$$p(t) = 2 \sum_{n=1}^N \Re(p_n(t)) \quad (13)$$

3.2 Interprétation d'un résultat de simulation

Voici un résultat issu de la simulation du comportement de la trompette qui est à l'IRCAM sur le robot trompette. L'impédance de l'instrument a été mesurée grâce au pot d'impédance développé par Jean Pierre Dalmont à l'Université du Maine au Mans. A l'aide de l'adaptation du script d'optimisation présenté précédemment que je me suis chargé d'adapter pour des modes

complexes, on peut trouver les coefficients (C_n, s_n) de la décomposition modale. Ces coefficients sont ensuite passés en argument de MOREESC. Les paramètres de l'excitateur peuvent être également fournis par l'utilisateur sous forme de profils temporels, à l'aide d'instants de contrôle et de valeurs spécifiées en ces instants. Le programme se charge de calculer la valeur des paramètres à chaque pas de temps, le résultat passant par les valeurs données aux instants spécifiés avec une courbe temporelle présentant une certaine régularité (de classe C^2 et de dérivée nulle aux instants de contrôle). Ces profils variables sont également une nouveauté du stage notamment pour les valeurs de ω_r et de q_r . Ces travaux ont été effectués en collaboration avec Fabrice Silva qui s'est chargé du développement. Je me suis chargé d'effectuer des tests de ces nouveaux profils variables en simulation avec l'impédance de trompette mesurée, chose qui n'avait jamais été encore faite pour la version cuivre de MOREESC. On récupère en sortie de la procédure le vecteur d'état X à chaque pas de temps. On peut ainsi reconstituer le signal de pression résultant en sommant les N premières composantes impaires de ce vecteur d'état.

Par exemple voici le spectrogramme obtenu pour une pression bouche maintenue constante d'une valeur de $10kPa$, avec les paramètres suivants : $W = 1cm$, $h_0 = 0,5mm$, $K = 3 \times 10^7$. Ici l'impédance a été simulée sur 12 modes. La fréquence de résonance de l'excitateur varie continûment de $500Hz$ à $200Hz$ sur une durée de 3 secondes, de telle sorte qu'on ait une descente de note dans le registre de l'instrument en descendant. Le paramètre d'amortissement q_r de l'excitateur varie continûment de 0,13 à 0,05. On remarque qu'en faisant diminuer l'amortissement on favorise l'émergence de l'oscillation car la résonance de l'excitateur est moins amortie. Or il est bien connu dans le jeu des cuivres que les notes les plus graves sont jouées avec des lèvres plus "molles", soit moins amorties. Sur la figure sont tracés les valeurs des pics de l'impédance de la trompette en traits pointillés noirs. Le profil de fréquence de résonance de lèvres est tracé sur la courbe rouge continue soit $\frac{\omega_r}{2\pi}$.



Ce tracé nous permet d'observer plusieurs phénomènes typiques du fonctionnement du mo-

dèle qui ont déjà été observés par le passé dans la littérature. Tout d’abord, on observe que la fréquence de jeu est supérieure à la fois à celle du pic d’impédance le plus proche et à la fréquence de résonance des lèvres au moment du départ de l’oscillation. Cette caractéristique de la fréquence de jeu au seuil d’oscillation est une des caractéristiques d’un exciteur de type “anche en dehors” ou encore “outward striking” ($\varepsilon = -1$). De plus on remarque qu’à chaque fois que la fréquence de résonance s’éloigne du pic d’impédance le plus proche de la fréquence de jeu et passe en-dessous de ce dernier, il y a une bifurcation de régime c’est à dire un changement de note au profit d’une fréquence de jeu située juste au-dessus du pic d’impédance situé le plus proche de la fréquence de résonance des lèvres. On sent alors bien alors que la fréquence de jeu semble bien être un compromis entre la fréquence du pic d’impédance du résonateur sur lequel on joue et la fréquence propre de l’exciteur, fruit du couplage non-linéaire entre ces deux organes. De plus en écoutant le signal de pression, le son est assez semblable à celui d’une trompette. Les bifurcations visibles sur le spectrogramme sonnent également comme certaines transitions de notes chez des musiciens peu expérimentés.

Ces observations constituent une première validation de l’outil que constitue MOREESC pour la simulation temporelle des cuivres. On conserve avec cette méthode numérique tout ce qui concerne la dynamique temporelle des signaux, c’est à dire les transitoires des sons obtenus. Cet outil est celui qui est le plus proche de l’expérience. En effet il pourrait être intéressant de comparer une loi de commande avec certains paramètres sur le robot musicien de l’IRCAM et d’effectuer une simulation avec MOREESC avec ces mêmes paramètres et de comparer les signaux temporels obtenus.

Il est cependant difficile de trouver rapidement un grand nombre de régimes d’oscillation sur un grand ensemble de paramètres du modèle, car il faut alors effectuer une simulation mettant en évidence chacun de ces régimes, se placer sur un point où le régime est stable et relever le vecteur d’état X sur une période. Ceci est trop fastidieux à effectuer avec ce type d’outil qui reste tout de même assez lent. C’est ce que propose la seconde méthode numérique que j’ai étudié. Cette méthode permet d’explorer tous les régimes périodiques solutions d’un système non-linéaire comme celui des instruments à vent.

4 Recherche de solutions périodiques par équilibrage harmonique

4.1 Présentation de MANLAB

Cette méthode de simulation est complémentaire de la méthode temporelle décrite dans la partie précédente. Il s’agit d’une méthode dite d’équilibrage harmonique. On peut (en théorie) à l’aide d’un développement en série de Fourier tronquée, trouver toutes les solutions périodiques d’un système différentiel non-linéaire. On se servira alors de la méthode de continuation MAN (Méthode Asymptotique Numérique), qui permet de tracer des diagrammes de bifurcation, c’est à dire de tracer des branches solutions des équations du problème dans un espace de paramètres, en particulier dans un plan. Elle sera mise en oeuvre dans notre cas avec le logiciel MANLAB qui est un logiciel fonctionnant sous MATLAB. Une modification récente apportée par Sami Karkar [12] permet de faire appel à des routines FORTRAN permettant d’optimiser les temps de calcul qui peuvent être considérable compte tenu du nombre des équations, notamment lorsque l’on veut augmenter le nombre d’harmoniques.

On veut résoudre des systèmes dont le système d'équations s'écrit sous la forme suivante :

$$\dot{Y} = f(Y, \lambda) \quad (14)$$

où Y est le vecteur d'inconnues, f une fonction faiblement non-linéaire à valeurs vectorielles et λ un paramètre réel (qui sera le paramètre γ , soit la pression dans la bouche, dans notre cas).

Il est montré dans [1] que l'on peut par la suite introduire des variables auxiliaires pour se ramener à un système dont le vecteur d'inconnues Z contient le vecteur Y ainsi que ces variables additionnelles, qui s'écrit sous la forme suivante :

$$m(\dot{Z}) = c(\lambda) + l(Z, \lambda) + q(Z, Z) \quad (15)$$

où m est un opérateur linéaire à valeurs vectorielles, c est un vecteur constant, l est un opérateur linéaire à valeurs vectorielles, et q un opérateur bilinéaire à valeurs vectorielles. On remarque que c et l dépendent de λ , si possible linéairement (ce qui sera le cas dans notre modèle). Cette forme quadratique permet de simplifier énormément la résolution et d'améliorer les performances, car on contrôle alors la forme de la non-linéarité. Ces opérateurs que l'on appelle les "petits opérateurs", sont calculés avec les équations du modèle.

L'idée de base de la méthode d'équilibrage harmonique est de développer le vecteur Z , en le supposant périodique, en série de Fourier tronquée, c'est à dire qu'on considère les coefficients de Fourier comme nuls à partir d'un certain rang H qui est le nombre d'harmoniques considéré :

$$Z(t) = Z_0 + \sum_{k=1}^H Z_{c,k} \cos(kwt) + \sum_{k=1}^H Z_{s,k} \sin(kwt) \quad (16)$$

On collecte les valeurs des coefficients de Fourier dans un grand vecteur colonne $U = [Z_0, Z_{c,1}, \dots, Z_{c,H}, Z_{s,1}, \dots, Z_{s,H}]$, et il est montré dans [1] qu'en se servant de la propriété du développement de Fourier qui est que la dérivation revient à une multiplication par ω , on aboutit à la résolution d'un système qui s'exprime par l'équation suivante :

$$\mathbf{R}(\mathbf{U}) = 0 \quad (17)$$

où \mathbf{R} est une fonction de $\mathbf{U} = [U^t, \lambda, \omega]^t$ qui s'exprime sous la forme :

$$\mathbf{R}(\mathbf{U}) = \mathbf{L}_0 + \mathbf{L}(\mathbf{U}) + \mathbf{Q}(\mathbf{U}, \mathbf{U}) \quad (18)$$

où \mathbf{L}_0 est un vecteur constant, $\mathbf{L}(\cdot)$ est un opérateur linéaire à valeurs vectorielles et $\mathbf{Q}(\cdot, \cdot)$ est un opérateur bilinéaire à valeurs vectorielles. Ces opérateurs sont calculés à partir des petits opérateurs par les formules données en annexe dans [1].

Les tracés des branches solutions sont effectuées avec la méthode de continuation MAN sous MANLAB. Ces branches pouvant prendre plusieurs valeurs pour une valeur de paramètre donnée en ordonnée ou en abscisse du diagramme de bifurcation, il est nécessaire de tracer ces dernières sous forme de courbes paramétrées. On part d'un point solution \mathbf{U}_0 . Les branches solutions sont alors présentées sous forme de série entière tronquée à l'ordre n , à l'aide d'un paramètre de chemin $a = (\mathbf{U} - \mathbf{U}_0)^t \mathbf{U}_1$, où \mathbf{U}_1 est le vecteur tangent à la branche en \mathbf{U}_0 . On trace ensuite le chemin défini par :

$$\mathbf{U}(a) = \mathbf{U}_0 + a\mathbf{U}_1 + a^2\mathbf{U}_2 + \dots + a^n\mathbf{U}_n \quad (19)$$

Les \mathbf{U}_p , $p \in \{2, n\}$ sont calculés à l'aide de la matrice jacobienne du système de manière itérative à partir de \mathbf{U}_0 et \mathbf{U}_1 . La longueur des arcs tracés dépend du rayon de convergence de la série entière générée, que l'on peut évaluer à chaque étape.

4.2 Système d'équation pour les cuivres

Au début de mon stage, il n'existait qu'une version de MANLAB simulant le comportement des instruments à anche simple, c'est-à-dire des anches "en dedans", sur laquelle travaille Sami Karkar. Je me suis donc chargé d'adapter cette version au cas des cuivres soit des anches "en dehors". Le principe du logiciel MANLAB est de décrire le système d'équations à l'aide des "petits opérateurs" décrits dans la section 4.1. Voici le système d'équation que l'on veut simuler, qui est celui du modèle présenté dans la section 1. On repart pour cela des équations suivantes dont on veut simuler le comportement :

$$\begin{aligned} \frac{\ddot{x}}{\omega_r^2} + \frac{\dot{x}}{\omega_r} + x - 1 &= \varepsilon (p - \gamma) \\ \dot{p}_n &= C_n u + s_n p_n \quad n \in \{1, N_m\} \\ p &= 2 \sum_{n=1}^{N_m} \Re(p_n) \\ u &= \text{signe}(\gamma - p) x \sqrt{|\gamma - p|} \end{aligned}$$

Il s'agit ici de trouver les petits opérateurs correspondant à ce système d'équation. On pose pour cela $y = \frac{\dot{x}}{\omega_r}$, $F = \frac{\eta}{x}$, $R_n = \Re(p_n)$, $I_n = \Im(p_n)$, $\Delta p = \gamma - p$, $\Delta p = v|v|$, $z = |v|$. La dernière équation s'écrit en réalité $z^2 = v^2 + \eta$ où η est un paramètre très petit, afin de s'assurer de la positivité de z . La variable F sert à modéliser le plaquage de l'anche dans le cas "en-dedans", il sera sans doute modifié par la suite car la condition de plaquage des lèvres n'est sûrement pas même dans le cas des lèvres. Cependant on suppose que x ne s'approche pas suffisamment de 0 pour que ce terme de force entre en jeu. On pose alors le vecteur d'état suivant pour le système : $Z = [R_1 \ I_1 \ \dots \ R_{N_m} \ I_{N_m} \ x \ y \ F \ u \ v \ z \ \Delta p \ p]^t$. Le système d'équation s'écrit alors sous la forme suivante :

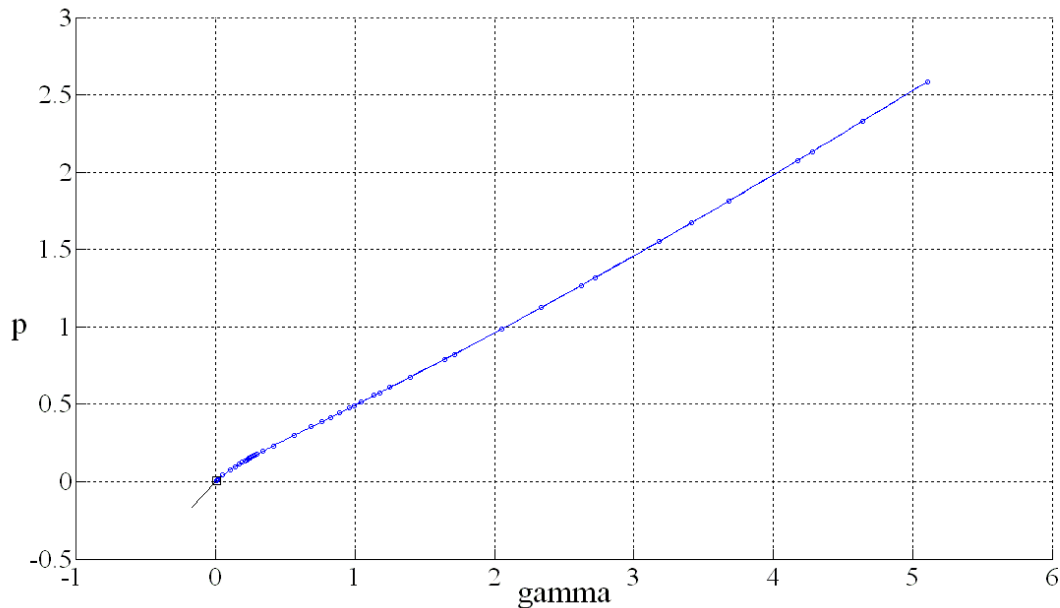
$$\begin{aligned} \frac{\dot{R}_n}{\omega_r} &= 0 & \Re(C_n u + s_n(R_n + iI_n)) &= 0 & \forall n \in [1 \dots N_m] \\ \frac{\dot{I}_n}{\omega_r} &= 0 & \Im(C_n u + s_n(R_n + iI_n)) &= 0 & \forall n \in [1 \dots N_m] \\ \frac{\dot{x}}{\omega_r} &= 0 & y &= 0 \\ \frac{\dot{y}}{\omega_r} &= 1 & -x - \varepsilon \Delta p - q_r y &= +F^2 \\ 0 &= -\eta & &= +Fx \\ 0 &= 0 & -u &= vx \\ 0 &= 0 & \Delta p &= -vz \\ 0 &= -\eta & 0 &= z^2 - v^2 \\ 0 &= \gamma & -\Delta p - p &= 0 \\ \underbrace{0}_{m(\dot{Z})} &= \underbrace{0}_{c(\gamma)} & \underbrace{-p - \sum_{n=1}^{N_m} (R_n)}_{l(Z)} &= \underbrace{0}_{q(Z,Z)} \end{aligned} \tag{20}$$

Ici seul le terme constant c dépend de γ , ce qui rentre bien dans le cadre que l'on s'est fixé. On remarque alors qu'avec le modèle que l'on s'est fixé, il suffit de changer un signe dans l'opérateur linéaire $l(\cdot)$ pour changer le comportement du système en cuivres à partir de la version anche simple.

4.3 Tracé de la branche statique

Une fois cette méthode implémenté, il a fallu obtenir une validation de son bon fonctionnement. Une première façon de valider que les simulations n'affichent pas n'importe quoi, est de

tracer la branche statique, c'est à dire la branche qui est solution du système pour la fréquence nulle. Voici un tracé de cette branche avec MANLAB :



Il s'agit du tracé la pression dans l'embouchure adimensionnée p en fonction de la pression dans la bouche adimensionnée γ .

La première bifurcation étant difficile à mettre en évidence, je ne me suis pas attardé dessus car ce n'est pas un objectif du stage. Pour chercher cette bifurcation, il existe un logiciel nommé AUTO qui trouve aisément les bifurcations d'un tel système. Sami Karkar a d'ailleurs par la suite trouvé le tracé de ce diagramme de bifurcation. Il serait ainsi possible de tracer ce diagramme par le futur. Ce qui est important en revanche est de bien vérifier que les solutions tracés sur le diagramme sous MANLAB sont des solutions du système d'équation. Pour cela il est possible d'accéder au valeurs du vecteur d'état de MANLAB sur des points au choix sur la branche statique. J'ai donc fait cet export et vérifié en récupérant les bonnes variables du modèle que ces valeurs étaient bien solutions du système établi dans le modèle. Cette vérification est de plus facile à effectuer car tous les termes du système d'équation comportant des dérivées temporelles sont nuls car il s'agit de la branche statique.

Pour conclure on peut dire que le but de cette partie a été d'établir un modèle dont le comportement peut être analysé par les deux méthodes numériques présentées de manière conjointe et complémentaire. Les avantages de la simulation temporelle sont la conservation de la dynamique temporelle des signaux et ainsi les régimes d'attaques qui pourraient être étudiés par le futur, mais aussi le fait que cette méthode est celle qui se rapproche le plus de l'expérience. En effet la méthode par équilibrage harmonique via MANLAB ne s'intéresse qu'à des régimes périodiques établis. En revanche l'avantage de la méthode par équilibrage harmonique est que l'on a la possibilité de trouver tous les régimes périodiques solutions du système d'équations, qu'ils soient stables où non stables, et cela de manière continue sur l'espace des paramètres par un tracé de branches solutions. Cette caractéristique n'est pas présente dans une méthode de simulation temporelle qui ne permet de trouver que des régimes stables, et avec lequel il est très compliqué d'accéder à toute une diversité de régimes. De plus, il arrive qu'une branche instable

suivie par MANLAB, devienne stable à partir d'un certain moment, ce qui explique la présence de régimes d'oscillation non expliqués.

Deuxième partie

Mise en place expérimentale du système de bouche artificielle robotisée

Le second aspect de mon stage a été de confronter ces résultats théoriques avec des mesures expérimentales. Cette étude s'est déroulée à l'IRCAM pendant 4 mois. Mon travail s'est alors porté sur le robot musicien de l'IRCAM dont j'avais modifié le pilotage durant mon projet de fin d'études d'ingénieur l'année passée. Il s'agissait d'exploiter les possibilités offertes par cette bouche artificielle robotisée (qui seront développées dans cette section) afin de comparer des résultats théoriques obtenus grâce au modèle établi dans la partie précédente et des méthodes numériques développées au LMA avec des résultats expérimentaux analogues obtenus sur le robot.

5 Présentation du système de bouche artificielle robotisée

Le robot musicien de l'IRCAM est le fruit du projet BARMstrong (Bouche Artificielle Robot Musicien) en partenariat avec l'école des Mines de Paris au sein du projet ANR CONSONNES (CONtrôle et synthèse des SONs Naturels Et Synthétiques) qui s'est terminé en Juin 2009. Cette section a pour but de présenter les fonctionnalités de ce robot ainsi que ses atouts. Pour plus de détails sur le fonctionnement des principaux capteurs et actionneurs, veuillez vous référer à mon précédent rapport de stage ([ref rapport PFE](#)).

Le but d'une telle bouche artificielle est de reproduire certains gestes que fait le musicien lorsqu'il joue de son instrument. On peut alors agir de manière répétée et reproductible sur l'instrument et effectuer de nombreuses mesures grâce à un panel de capteur. Le tout est contrôlé par un ordinateur via une carte d'acquisition permettant également de générer des signaux de commandes (système dSPACE).

5.1 Bilan des actionneurs et capteurs du robot au début du stage

La bouche artificielle robotisée de l'IRCAM, développée au cours du projet BARMstrong et au cours du stage précédent, disposait au début du stage des actionneurs suivants pour la piloter :

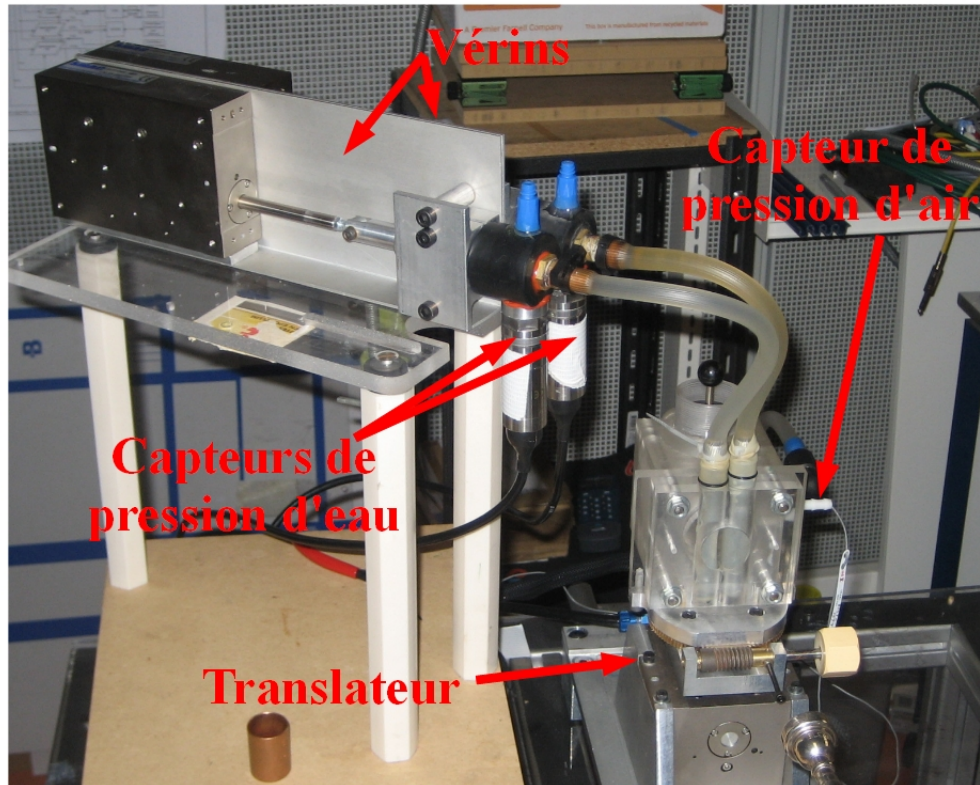
- Une électrovanne permettant de piloter l'arrivée d'air dans la bouche
- Deux vérins permettant de piloter le volume d'eau présent dans les lèvres et ainsi agir sur la pression d'eau
- Un translateur mettant la bouche artificielle en mouvement afin de pouvoir piloter son appui sur la trompette

Pour effectuer les asservissements de ces actionneurs mais aussi pour faire des mesures des grandeurs physiques on disposait des capteurs suivants :

- Un capteur de pression d'air dans la bouche
- Deux capteurs de pression d'eau dans les lèvres
- Trois codeurs incrémentaux permettant d'évaluer la position des deux vérins et du translateur

Voici une photo du robot au début du stage :

FIGURE 2 – Photo du robot au début du stage



5.2 Nouveautés développées pendant le stage

Durant le stage, nous avons développé plusieurs fonctionnalités du robot qui n'étaient pas présentes au début du stage pour les besoins des expériences que nous avons effectuées. Ces travaux ont été rendu possible grâce à l'aide précieuse d'Alain Terrier et de Gérard Bertrand, respectivement mécanicien et électronicien de l'IRCAM.

5.2.1 Système de circuit d'eau

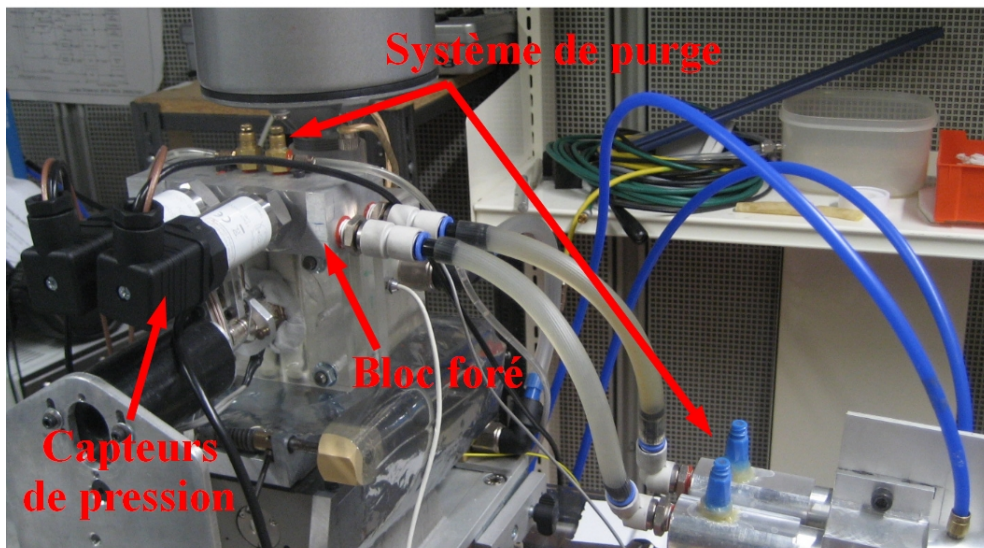
En premier lieu nous avons remplacé les capteurs de pression d'eau dans les lèvres qui étaient défectueux. Nous avons pris des capteurs ayant d'une part une meilleure bande passante et qui sont plus précis.

Un nouveau système de circuit d'eau a ensuite été développé. En effet le précédent système n'était pas pratique car il était trop sujet à la formation de bulles d'air dans le circuit qui fausseraient les mesures de pression d'eau dans les lèvres. Il est basé sur le fait que tout circuit d'eau doit avoir une inclinaison vers le haut ne serait-ce que très légère. Le point culminant du circuit

est alors un petit dôme situé au sommet des lèvres où toutes les éventuelles bulles d'air se retrouvent prises au piège. Au dessus de ce dôme se situent deux purgeurs pour chacune des lèvres facilitant d'une part l'évacuation des bulles d'air mais aussi d'ajuster avec une très grande précision le volume d'eau présent dans les lèvres, ce qui est primordial pour avoir un comportement similaire des deux lèvres. La prise d'eau se faisant au départ par le dessus, les tuyaux d'arrivée d'eau perturbaient le mouvement du translateur, qui rend la bouche artificielle mobile, de par leur rigidité. Le nouveau système permet une arrivée d'eau par le côté de la bouche artificielle munie de deux liaisons pivot permettant d'infliger un effort minimal au translateur car la rigidité des tuyaux ne joue plus. Un dernier avantage de ce nouveau système est que les capteurs de pression d'eau sont désormais situés au plus proche des lèvres (dans le dôme), permettant une mesure bien plus fiable et précise.

Voici une photographie de ce système :

FIGURE 3 – Nouveau circuit d'eau dans les lèvres

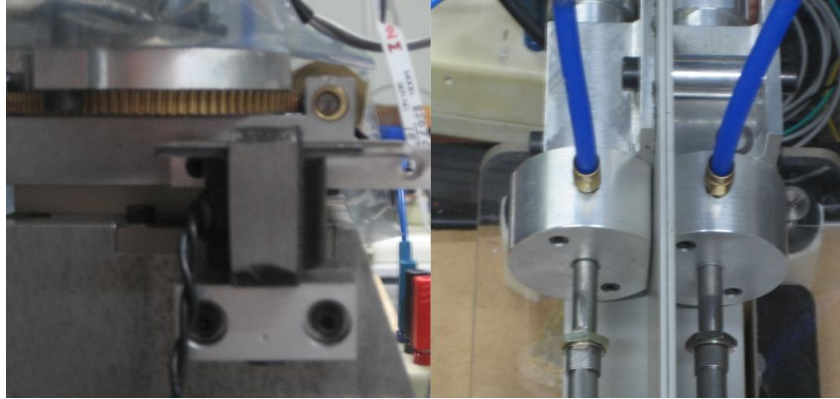


5.2.2 Système de blocage des actionneurs

Pour effectuer des mesures avec un jeu de paramètres donné (pression lèvre, force d'appui), il a été nécessaire de développer un système de blocage mécanique des vérins et du translateur. Pour les vérins nous avons opté pour un système de blocage pneumatique. Une bague en caoutchouc peut venir se serrer grâce à de l'air comprimé autour de la tige du vérin pour le bloquer. Pour le translateur, il s'agit d'un dispositif magnétique. Un électro-aimant permet d'attraper une lamelle de métal solidaire du translateur parallèle à sa direction de déplacement. Voici ci-dessous les photos de ces deux systèmes de blocage. On y observe sur la gauche l'électro-aimant qui bloque le translateur et sur la droite les bagues pneumatiques réalisées par Alain Terrier pour

bloquer les vérins.

FIGURE 4 – Système de blocage des actionneurs



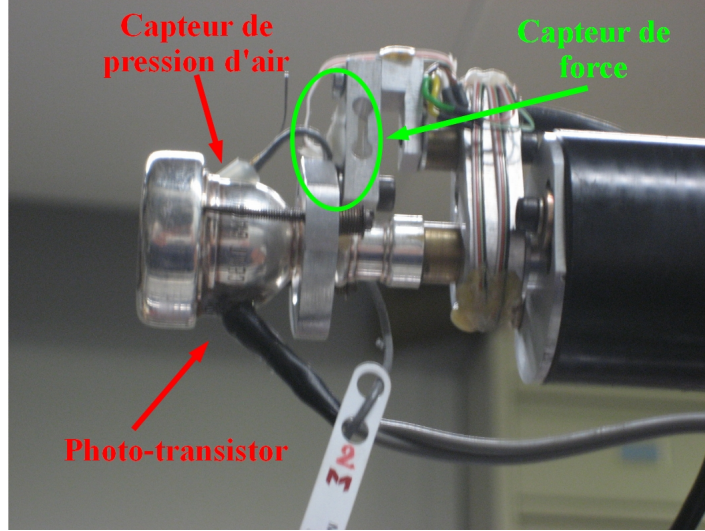
5.2.3 Nouveaux capteurs

Plusieurs capteurs ont également été ajoutés pour le besoin des expériences qui seront réalisées de plusieurs capteurs. En effet dans le modèle théorique développé dans la première partie, on a besoin de connaître la pression en aval des lèvres, c'est à dire la pression dans l'embouchure. Un capteur de pression additionnel a ainsi été implanté dans l'embouchure.

Un paramètre de jeu que nous pouvons contrôler avec la translateur est la force d'appui que la bouche artificielle exerce sur l'instrument. Afin de pouvoir évaluer cette force d'appui, un capteur de force a été installé sur le robot. Son principe est basé sur une pastille que l'on vient écraser avec la bouche artificielle. Sa résistance électrique varie alors avec son écrasement, le capteur fonctionnant alors en pont de Winston.

Le troisième capteur qui a été installé est un capteur optique qui est constitué d'un panneau de LED infra-rouges installé dans la bouche artificielle et d'un photo-transistor situé dans l'embouchure. Le choix de ce capteur permettant de visualiser l'aire d'ouverture des lèvres ainsi que son fonctionnement sera détaillé dans la section suivante. On peut visualiser ces capteurs sur la photographie suivante :

FIGURE 5 – Nouveaux capteurs du robot



6 Mesure de la réponse mécanique des lèvres

6.1 Présentation de la problématique

Le principal objectif de ce stage étant de comparer le comportement de cette bouche artificielle avec le modèle qui a été établi, la tâche la plus importante qu'il a fallu réaliser a été de caractériser ce système par des variables du modèle. Il y a alors deux organes à caractériser : le résonateur (pour nous une trompette) et l'excitateur (les lèvres). Le résonateur, au sens du modèle, est caractérisé par son impédance d'entrée. Pour le caractériser, on mesure donc son impédance d'entrée puis on en extrait les coefficients de sa décomposition modale avec un script d'optimisation MATLAB (méthode présentée dans la première partie). Il reste donc à caractériser le système excitateur, qui est décrit on le rappelle dans le modèle par l'équation suivante :

$$\frac{d^2h}{dt^2} + q_r \omega_r \frac{dh}{dt} + \omega_r^2 (h - h_0) = \frac{\omega_r^2}{K} \mathcal{F} \quad (21)$$

Ici ω_r représente la fréquence angulaire de résonance de l'anche, q_r un coefficient qui modélise l'amortissement des lèvres, h_0 l'ouverture des lèvres au repos, K représente la raideur des lèvres et \mathcal{F} représente la force qui s'applique sur le système. La fonction de transfert à identifier qui constitue la réponse mécanique des lèvres est donc : $C(\omega) = \frac{H(\omega)}{F(\omega)}$ où H et F représentent respectivement les transformées de Fourier de h et de \mathcal{F} .

On remarquera que ce modèle est un résonateur du second ordre à un degré de liberté, c'est à dire qu'il ne présente qu'une seule résonance. Ce n'est pas représentatif de la réalité car les mesures qui ont été faites par le passé (cf [9], [11] et [8]) ont révélé qu'il y en avait plusieurs. Cette approximation garde cependant à priori du sens car il a également été montré qu'une seule résonance est responsable de la déstabilisation du système et donc de la production du son. Des modèles à plusieurs degrés de liberté ont déjà été établis notamment par Cullen dans [8]. La particularité du robot étant de pouvoir rapidement faire varier les paramètres de jeu, nous avons entrepris de mesurer cette réponse mécanique sur l'ensemble de l'espace de paramètres de pressions d'eau dans les lèvres et de force d'appui dont nous disposons. On parlera alors de cartographie, ou de mapping des paramètres indépendants que sont les positions des actionneurs

(vérins et translateurs) vers les paramètres du modèle (fréquence de résonance ω_r , facteur de qualité q_r ...).

6.2 Recherche du mode opératoire

Cette période de recherche est celle qui nous a pris le plus de temps dans le stage. Nous avons sollicité de nombreuses personnes pour résoudre ce problème, notamment Xavier Boutilon à l'école Polytechnique, Emmanuel Fléty à l'IRCAM mais aussi Joël Gilbert à l'université du Maine au Mans. Cette recherche a nécessité de nombreux tests expérimentaux soumis à des contraintes matérielles qui se sont souvent soldés par des échecs de ces différentes méthodes. Cependant nous en avons tiré des résultats qu'il me semble intéressant de noter dans ce rapport. C'est l'objet de cette section.

Il s'agit de trouver le meilleur dispositif expérimental avec les traitements de signaux adéquats pour évaluer la réponse mécanique des lèvres afin de trouver principalement les valeurs de ω_r et de q_r . Il s'agit alors de trouver le meilleur mode opératoire permettant d'obtenir cette réponse mécanique, c'est à dire de déterminer :

- Le système excitateur
- Le capteur
- Le type d'excitation (impulsion, sweep...)

Les mesures qui ont été effectuées par le passé utilisaient pour la plupart une excitation acoustique à l'aide d'un haut-parleur. On envoie un sinus glissant (ou sweep) acoustique dans la bouche et on mesure les vibrations des lèvres avec un vibromètre laser. On calcule par la suite la fonction de transfert entre les signaux de vibration et la pression acoustique dans la bouche mesurée avec un microphone. Cette méthode présente un inconvénient qui est que l'on risque de pointer un noeud de vibration avec le vibromètre. De plus nous avons la contrainte de monter une expérience qui puisse rester en place sur le robot de manière intégrée afin de pouvoir la réitérer dès que l'on veut obtenir une nouvelle calibration du système. Le vibromètre laser est donc exclu.

Au départ nous avons opté pour une solution consistant à mesurer suite à une excitation de type sweep avec un haut-parleur les signaux de pression d'eau dans les lèvres avec un capteur de pression. Cette idée est basée sur l'hypothèse que l'eau présente dans les lèvres est incompressible. Ainsi la déformation de la membrane entraîne la propagation d'une onde dans le fluide. Il est alors possible en mesurant la pression dans l'eau d'avoir une image du mouvement des lèvres.

Au départ nous avons opté pour un capteur constitué d'une pastille piézo-électrique dont on amplifiait la tension de sortie à l'aide d'un petit montage à amplificateur opérationnel conçu par l'électronicien de l'IRCAM, Gérard Bertrand. Ainsi on utilise l'effet piézo-électrique dans le sens inverse afin de mesurer les vibrations dans le fluide. L'avantage de ce montage est qu'il est peu coûteux et on a à priori aucun soucis de bande passante car un cristal piézo-électrique fonctionne normalement jusqu'à sa fréquence de résonance qui est suffisamment élevée pour notre système.

Cependant les signaux issus des acquisitions que j'ai réalisées se sont révélés très bruités car ce système délivre des tensions très faibles et la pastille piézo-électrique se comporte comme une antenne qui génère des signaux sur tous les multiples de 50Hz qui ne sont pas négligeables par rapport au signal utile. De plus avec un signal d'excitation de type sinus glissant, la durée de l'acquisition est suffisamment longue pour intégrer ce bruit temporellement et par conséquent le rendre encore plus significatif.

Afin de capter les vibrations dans l'eau, nous avons essayé de mettre un microphone à électret dans la lèvres artificielle. Il s'agit d'une petite cellule prévue au départ pour capter les ondes sonores dans l'air, mais après un rapide test nous nous sommes aperçus qu'elles fonctionnaient dans l'eau. En outre, étant pré-polarisées, elles n'ont pas besoin de réelle amplification, et les signaux observés sont beaucoup moins bruités par les perturbations extérieures, et leur bande passante est largement suffisante pour la bande de fréquence que nous voulons explorer (jusqu'à 1kHz environ).

La aussi un problème s'est posé. En effet lors des acquisitions, on capte d'avantage la transmission des ondes acoustiques dans l'eau que les ondes créées par la vibration de la membrane dans le cas d'une excitation de type sinus glissant. Ainsi le signal que l'on peut qualifier d'utile est noyé dans le signal acoustique issu de la source. En effet on peut remarquer que si l'on utilise une excitation acoustique, il faut utiliser un système de captation mécanique afin d'éviter cette transmission directe des signaux de l'excitateur vers le capteur. On aurait certainement ce même phénomène en mesurant des vibrations mécanique avec une excitation également mécanique (par exemple avec un pot vibrant). On peut donc retenir qu'il est nécessaire de découpler le fonctionnement de l'excitateur de celui du capteur.

La phase suivante issue des considérations précédentes a été de changer le signal d'excitation en passant d'un sinus glissant à une excitation impulsionnelle semblable le plus possible à une impulsion de Dirac. On envoie à l'aide de la carte dSPACE un signal impulsionnel sur le haut-parleur. Ainsi après un laps de temps très court la réponse du haut-parleur s'évanouit et le système est en régime libre. Pour cette expérience nous avons décidé de comparer les signaux mesurés par l'électret avec ceux issus d'un vibromètre laser dont nous disposons à l'IRCAM, afin de vérifier que l'on capte bien les vibrations de la membrane et non d'autres phénomènes. Cela imposait alors de retirer l'embouchure afin de pouvoir pointer le laser sur la lèvres, chose qui ne sera plus possible lors des mesures. Des mesures avec cet appareil avaient déjà été effectués par Marie Tahon dans [15], ainsi on pourra valider la méthode de mesure si l'on trouve.

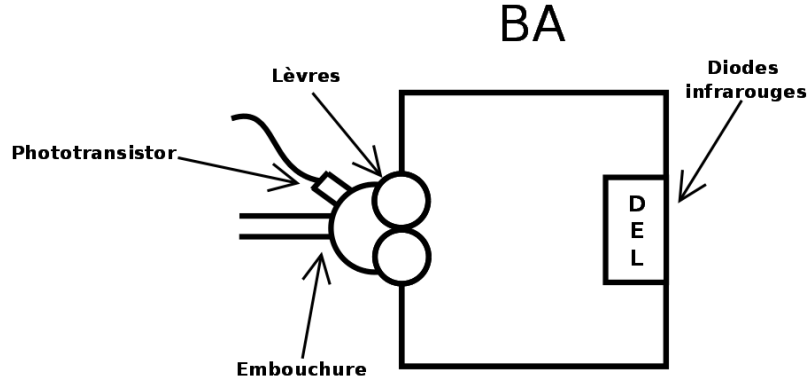
Cette configuration offre plusieurs avantages. En effet la durée de mesure est considérablement réduite car on mesure une réponse impulsionnelle. Ainsi les signaux d'acquisition sont moins sensibles au bruit lorsque l'on trace les spectres. J'ai également vérifié que les pics trouvés dans les spectres ne correspondaient pas à des réponses acoustiques du système en traçant ces spectres en fonction de la longueur d'onde. On trouve alors des distances plus grandes que les dimensions de la bouche artificielle. On mesure donc bien des réponses propres au système. Cependant on n'observe toujours pas exactement les mêmes pics que ceux mesurés par le vibromètre, même si certains concordent.

6.3 Système optique adopté

Notre choix s'est finalement porté vers un capteur optique constitué d'un panneau de LED infra-rouges dont la longueur d'onde d'émission est de 880 nm. Le montage récepteur situé dans l'embouchure est un photo-transistor particulièrement sensible dans une bande de fréquence autour de 880 nm. Ainsi en réduisant la bande de fréquence dans laquelle travaille le montage, on diminue sa sensibilité au bruit. Voici un schéma du montage mis en place :

On conserve ainsi une excitation acoustique à l'aide d'un haut-parleur qui se fixe sur le haut de la bouche. Nous avons choisi ce montage car des systèmes optiques ont largement été utilisés par le passé pour des mesures de réponses mécaniques de lèvres artificielles. Ils ont été utilisés no-

FIGURE 6 – Montage optique de mesure de l'ouverture des lèvres



tamment par le laboratoire de l'université d'Edimbourg en Ecosse lors des thèses de J. S. Cullen [8], Mark Neal [9] et Orlando Richards [11].

Nous avons cependant remarqué que présentant les bonnes caractéristiques de sensibilité, ce montage est tout de même sensible à la lumière ambiante notamment dans la pièce de la bouche artificielle qui est éclairée par des néons qui rayonnent dans tout le spectre lumineux, ajoutant ainsi une composante continue qui allait jusque saturer le système. Le montage électronique qui conditionne le signal issu du photo-transistor est alors pourvu d'un condensateur de filtrage qui filtre la composante continue du signal avec une fréquence de coupure de seulement quelques hertz. Ainsi on ne récupère que la composante alternative qui est bien ce que l'on veut récupérer avec une excitation en sweep.

On visualise ainsi l'aire \mathcal{A} d'ouverture des lèvres. Or nous avons fait l'approximation à l'établissement du modèle à la section 1 que l'ouverture des lèvres se faisait de manière unidimensionnelle, c'est à dire que l'on suppose que : $\forall t, \mathcal{A}(t) = W \times (h_0 + h(t)) = A_0 + A(t)$, W étant la largeur du canal de lèvres et h_0 l'ouverture des lèvres au repos. Si l'on note z le signal issu du photo-transistor lors de la mesure, on fait l'hypothèse que :

$$z(t) = k \times A(t) = k(h(t) - h_0) \quad (22)$$

On considérera ce modèle comme valide pour la suite des calculs. Il n'est certainement pas une image de ce qui se passe réellement compte tenu de la géométrie des lèvres. On pourra par la suite pour affiner le modèle considérer un modèle de signal qui serait un polynôme en h , ou bien un modèle du type $z(t) = k(h(t) - h_0)^\alpha$ avec $1 \leq \alpha \leq 2$ où le cas $\alpha = 1$ représenterait le cas d'une ouverture rectangulaire qui est celui que nous considérons et $\alpha = 2$ serait le cas d'une ouverture circulaire.

Troisième partie

Résultats expérimentaux et confrontation avec la théorie

Le but du stage est avant tout de pouvoir confronter des données expérimentales avec des données que l'on peut obtenir à l'aide des méthodes numériques étudiées durant la première partie de mon stage. Pour ce faire on a vu qu'il fallait dans un premier temps trouver un lien entre les variables du robot qui sont les positions des différents actionneurs ou les données issues des capteurs. On parlera alors de cartographie car on veut pour un jeu de paramètres constituant une grille à deux dimensions un mapping des paramètres de résonance de l'excitateur, c'est à dire des paramètres ω_r et q_r . Cette partie a pour but de présenter la méthode de mesure des signaux, une méthode d'analyse de ces signaux permettant de trouver les paramètres de résonance, et enfin des premiers résultats expérimentaux.

7 Système de mesure des signaux

Pour mesurer les signaux d'acquisition, générer les signaux de commandes des actionneurs et réaliser les asservissements on dispose d'un système de cartes dSPACE. Ce système est programmé grâce à Matlab/Simulink sous forme de modèles Simulink qui sont par la suite compilés en fichier C puis chargés dans le système dSPACE. On dispose notamment des cartes suivantes :

- une carte de sorties analogiques 6 voies (DS2102)
- une carte d'entrées analogiques 16 voies (DS2004)
- une carte de traitements de signaux de codeurs incrémentaux (DS3001)
- une carte d'entrées/sorties PWM (DS5102)

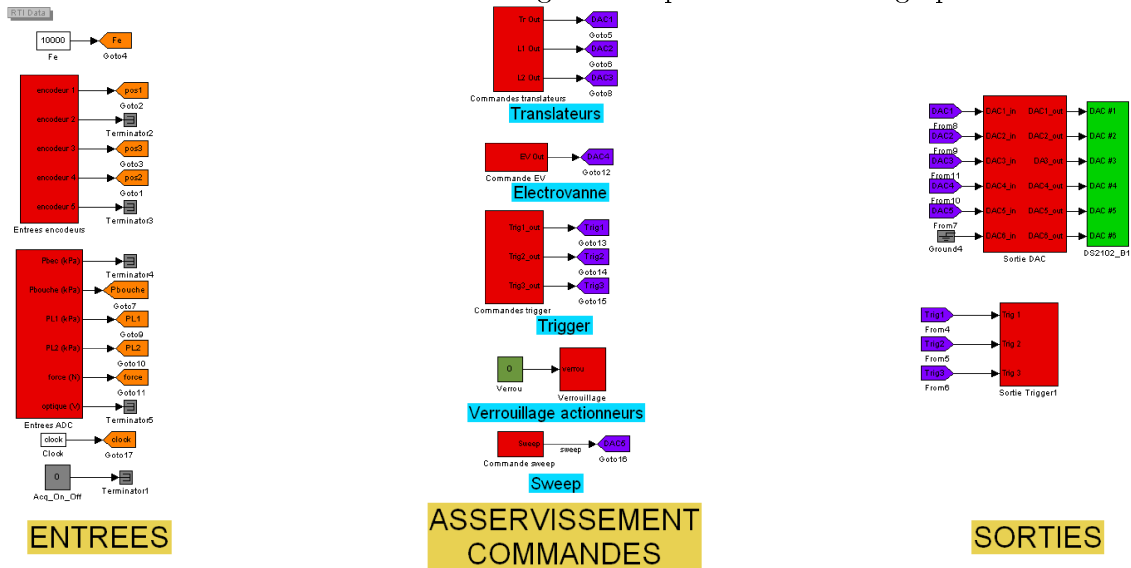
Pour contrôler l'application tournant sur la carte, on utilise un logiciel appelé Control Desk qui permet de contrôler toutes les variables de l'application via une interface graphique modulaire.

Pour faire fonctionner le processus de cartographie, l'application Simulink chargée sur la carte dialogue avec un script Matlab. On dispose pour ce faire d'une librairie Matlab développée par dSPACE permettant d'accéder aux variables de l'application en lecture ou en écriture et de faire des acquisitions. Voici le patch Simulink qui régit le fonctionnement du processus de cartographie :

Un fonctionnement plus détaillé de cette application est décrit dans l'annexe B. On peut simplement remarquer que toutes les entrées, c'est à dire tous les capteurs sont regroupés à gauche, chaque sous-système (en rouge) étant dédié à une carte d'acquisition (codeurs incrémentaux et capteurs analogiques). Les sorties sont regroupées sur la droite du patch avec la même convention. Dans la partie centrale se trouve les différents traitements et génération des signaux de commande.

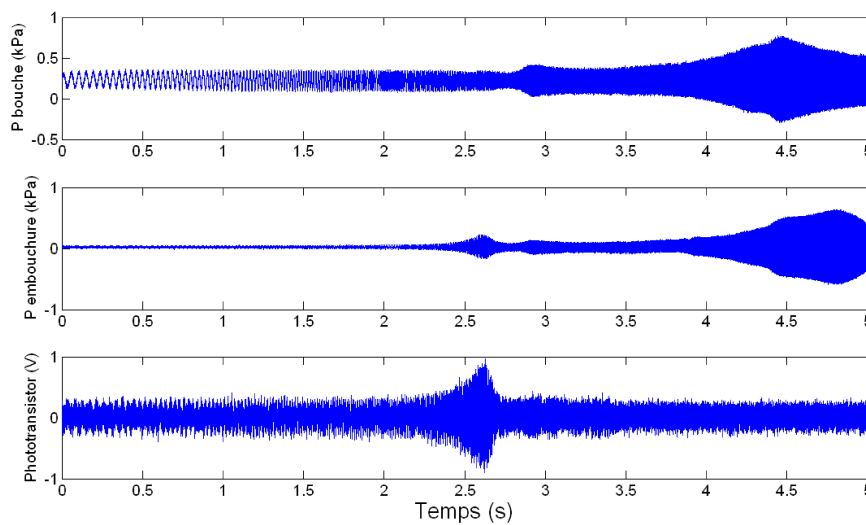
Après une procédure d'initialisation des actionneurs munis de codeurs incrémentaux, on lance le processus de mesure depuis Control Desk. Le script Matlab prend alors l'application en charge de manière automatique. On effectue alors la procédure suivante pour chaque configuration des actionneurs : On positionne les actionneurs. Lorsqu'ils ont bien atteint leur position, on les verrouille mécaniquement afin d'avoir une configuration fixe de la bouche artificielle. On mesure alors les signaux qui sont les plus pertinents pour le fonctionnement du robot qui ne sont pas

FIGURE 7 – Patch Simulink régissant le processus de cartographie



les positions des actionneurs mais bien plutôt la pression dans les lèvres et la force d'appui. On stocke tout de même les positions au cas où il y ait eu une légère dérive de ces derniers au moment du blocage mécanique. On envoie le sweep en mesurant les signaux de pression d'air dans la bouche et dans l'embouchure ainsi que le signal issu du photo-transistor. Le sweep utilisé est un sweep logarithmique balayant une zone de fréquence de $20Hz$ à $1kHz$ et il est d'une durée de 5 secondes. Ces signaux sont ensuite stockés dans une grande matrice à quatre dimensions. Cette opération est répétée pour quatre pressions statiques différentes d'air dans la bouche. On déverrouille ensuite les actionneurs pour passer à la configuration suivante. Voici un exemple des signaux de mesure obtenus :

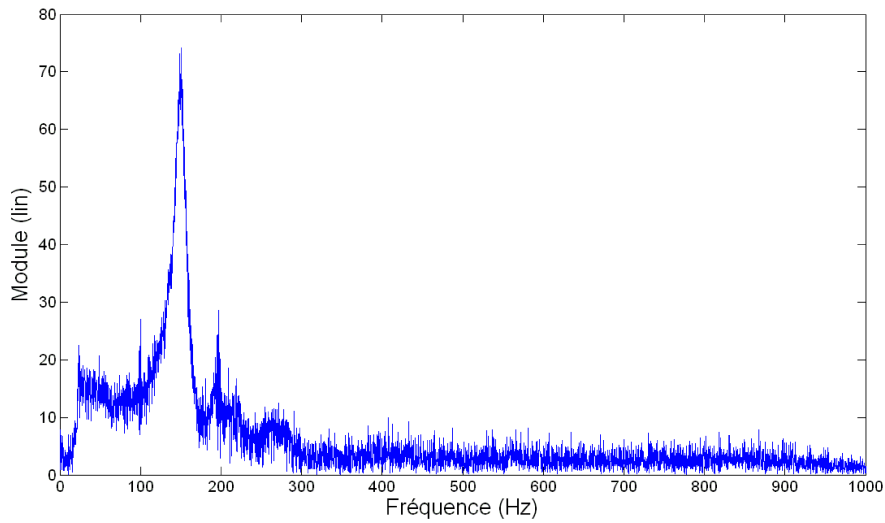
FIGURE 8 – Tracé des signaux temporels issus d'une acquisition



On observe alors bien sur le signal du photo-transistor (signal du bas sur la figure) une résonance (aux alentours de 2,6 secondes) qui n'est pas présente dans le signal de pression bouche (signal du haut sur la figure). Il s'agit bien d'un résonance propre au système mécanique. Elle est présente de manière minimale sur le signal de pression dans l'embouchure (signal du milieu sur la figure) car les lèvres s'ouvrant de manière plus importante à ce moment, l'onde acoustique produite par le haut-parleur est amplifiée.

Si l'on trace le spectre du signal issu du montage optique, on obtient la courbe suivante :

FIGURE 9 – Tracé des signaux temporels issus d'une acquisition



On observe ici bien clairement une résonance aux alentours de 150Hz . On peut donc s'attendre à pouvoir détecter ce pic avec la méthode de traitement de signal développée qui est l'objet de la section suivante.

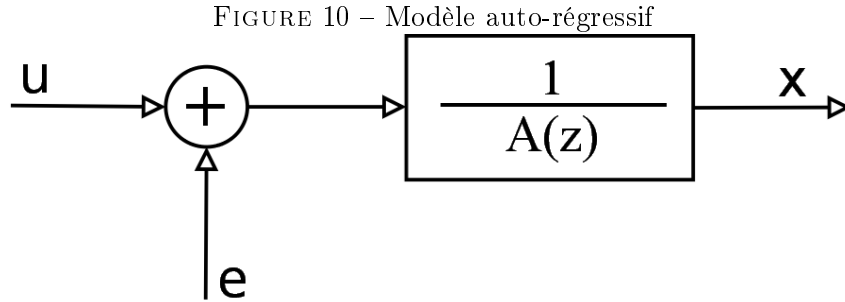
8 Méthode de traitement des signaux

8.1 Présentation de la méthode

Le spectre des signaux d'acquisition obtenus par le processus d'acquisition décrit précédemment n'étant pas directement exploitables pour identifier les paramètres ω_r et q_r il est nécessaire d'utiliser une meilleure méthode d'estimation. Une idée récurrente en traitement du signal pour estimer le comportement d'un système est de le considérer comme un signal auto-régressif. C'est-à-dire que pour un processus $x(n), n \in \mathbb{Z}$ s'écrit pour une modélisation à l'ordre $K \in \mathbb{N}^*$:

$$\forall n \in \mathbb{Z}, x(n) = \sum_{i=1}^K a_i x(n-i) + e(n)$$

Ici e représente un bruit blanc qui représente l'innovation ou encore erreur de prédiction. Or dans notre cas on essaie d'identifier la réponse d'un système à une excitation dont on a une image par la mesure de la pression dans la bouche et celle dans les lèvres. Le système que l'on veut modéliser peut alors se schématiser de la manière suivante :



Ici u représente le signal d'entrée, qui dans notre cas est à un facteur près la différence entre le signal de pression bouche et le signal de pression dans l'embouchure, e représente un bruit blanc gaussien centré de variance σ^2 et le signal que l'on observe en sortie est nommé x qui pour nous est le signal issu du capteur optique. Le filtre auto-régressif que l'on cherche à identifier est $\frac{1}{A(z)}$ avec $A(z) = \sum_{k=0}^K a_k z^{-k}$, K étant l'ordre de la modélisation et avec $a_0 = 1$. On posera également $u = G\tilde{u}$, où \tilde{u} est le signal mesuré que l'on considère comme l'entrée du filtre (pour nous la différence de pression bouche et embouchure), car on ne connaît cette entrée qu'à un facteur près. On cherchera donc également dans la méthode à identifier ce gain G .

On a ainsi l'équation aux différences qui régit notre modèle :

$$\forall n \in \mathbb{Z}, \sum_{k=0}^K a_k x_{n-k} = G \tilde{u}_n + e_n$$

On pose $\Theta = (a_1, a_2, \dots, a_K, G, K)$ qui est l'ensemble de nos paramètres, K étant fixé. On considère une observation sur un horizon de N points. On observe donc $D_N = (x_1, x_2, \dots, x_N, \tilde{u}_1, \tilde{u}_2, \dots, \tilde{u}_N)$. Pour définir des signaux sur l'ensemble des entiers naturels, ils sont supposés nuls en dehors du support $[1..N]$ sur lequel ils sont observés.

Tout comme dans un algorithme de type Levinson-Durbin, on tente de minimiser la proba-

bilité des observations pour les paramètres du modèle, soit :

$$\begin{aligned} P(D_N|\Theta) &= \underbrace{P(x_N, \tilde{u}_N|D_{N-1}, \Theta)}_{=P(e_N|D_{N-1}, \Theta)} \times P(D_{N-1}|\Theta) \\ &= \prod_{n=1}^N P(e_n|D_{n-1}, \Theta) \end{aligned}$$

Or $P(e_n|D_{n-1}, \Theta) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{e_n^2}{2\sigma^2}}$ avec $e_n = \sum_{k=0}^K a_k x_{n-k} - G \tilde{u}_n$. On doit donc minimiser :

$$P(D_N|\Theta) = \left(\frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \right)^N e^{-\frac{\sum_{n=1}^N e_n^2}{2\sigma^2}}$$

Minimiser cette probabilité revient donc à minimiser l'anti-log-vraisemblance :

$$L_N = -\ln(P(D_N|\Theta)) = N \left(\frac{1}{2} \ln(2\pi) + \ln(\sigma) \right) + \frac{Q}{2\sigma^2}$$

Finalement on veut minimiser $Q(\Theta) = \sum_{n=1}^N \left(x_n + \sum_{k=1}^K a_k x_{n-k} - G \tilde{u}_n \right)^2$ par rapport à Θ . Minimisons tout d'abord par rapport à G . On cherche la valeur de G annulant la dérivée partielle de Q par rapport à G .

$$\frac{\partial Q}{\partial G} = \frac{1}{2\sigma^2} \sum_{n=1}^N -2\tilde{u}_n \left(x_n + \sum_{k=1}^K a_k x_{n-k} - G \tilde{u}_n \right) = 0$$

Il convient alors de poser les variables suivantes représentant l'inter-corrélation et les auto-corrélations des signaux \tilde{u}_n et x_n : $\forall k \in \mathbb{Z}, R_{xx}(k) = \sum_{n=1}^N x_n x_{n-k}$, $R_{uu}(k) = \sum_{n=1}^N \tilde{u}_n \tilde{u}_{n-k}$ et $R_{ux}(k) = \sum_{n=1}^N \tilde{u}_n x_{n-k}$. On remarquera que R_{ux} n'est pas symétrique contrairement à R_{xx} et R_{uu} . Vérifier l'équation précédente revient donc à vérifier :

$$R_{ux}(0) - G R_{uu}(0) + \sum_{k=1}^K a_k x_{n-k} = 0$$

On aboutit donc à l'équation suivante :

$$\boxed{G = \frac{1}{R_{uu}(0)} (\underline{R}_{ux}^t \underline{a} + R_{xu}(0))} \quad (23)$$

$$\text{avec } \underline{a} = \begin{pmatrix} a_1 \\ \vdots \\ a_K \end{pmatrix} \text{ et } \underline{R}_{ux} = \begin{pmatrix} R_{ux}(1) \\ \vdots \\ R_{ux}(K) \end{pmatrix}$$

On procède de la même manière pour la dérivée par rapport aux a_i pour $i \in (1..K)$. On cherche alors à résoudre :

$$\begin{aligned} \frac{\partial Q}{\partial a_i} &= \frac{1}{2\sigma^2} \sum_{n=1}^N x_{n-i} \left(x_n + \sum_{k=1}^K a_k x_{n-k} - G \tilde{u}_n \right) = 0 \\ \sum_{k=0}^K \sum_{n=1}^N a_k x_{n-i} x_{n-k} - G \sum_{n=1}^N x_{n-i} \tilde{u}_n &= 0 \\ \sum_{k=1}^K a_k R_{xx}(|k-i|) - G R_{xu}(i) + R_{xx}(i) &= 0 \end{aligned}$$

Cette équation nous ramène au système matriciel suivant :

$$\underbrace{\begin{pmatrix} R_{xx}(0) & \cdots & \cdots & R_{xx}(K-1) \\ \vdots & \ddots & & \vdots \\ \vdots & & \ddots & \vdots \\ R_{xx}(K-1) & \cdots & \cdots & R_{xx}(0) \end{pmatrix}}_{\mathcal{R}^{-1}} \begin{pmatrix} a_1 \\ \vdots \\ \vdots \\ a_K \end{pmatrix} = G \underline{R}_{xu} - \underline{R}_{xx}$$

$$\text{avec } \underline{R}_{xu} = \begin{pmatrix} R_{xu}(1) \\ \vdots \\ R_{xu}(K) \end{pmatrix} \text{ et } \underline{R}_{xx} = \begin{pmatrix} R_{xx}(1) \\ \vdots \\ R_{xx}(K) \end{pmatrix}$$

On obtient donc à la valeur de \underline{a} via l'équation suivante :

$$\boxed{\underline{a} = \mathcal{R} (G \underline{R}_{xu} - \underline{R}_{xx})} \quad (24)$$

En injectant la valeur de \underline{a} obtenue dans l'équation 24 dans l'équation 23, on obtient :

$$G = \frac{1}{R_{uu}(0)} (\underline{R}_{ux}^t \mathcal{R} (G \underline{R}_{xu} - \underline{R}_{xx}) + R_{xu}(0))$$

$$G \left(1 - \frac{\alpha}{R_{uu}(0)} \right) = \frac{R_{xu}(0)}{R_{uu}(0)} - \underline{R}_{xu}^t \mathcal{R} \underline{R}_{xx}$$

$$\text{avec } \alpha = \underline{R}_{xu}^t \mathcal{R} \underline{R}_{xu}$$

On aboutit finalement à la valeur :

$$\boxed{G = \frac{\underline{R}_{xu}^t \mathcal{R} \underline{R}_{xx} - R_{xu}(0)}{\alpha - R_{uu}(0)}} \quad (25)$$

Pour trouver la valeur de \underline{a} on injecte la valeur de G obtenue dans l'équation 25 dans l'équation 24. Le code MATLAB correspondant à l'implémentation de cette méthode se trouve en annexe A.

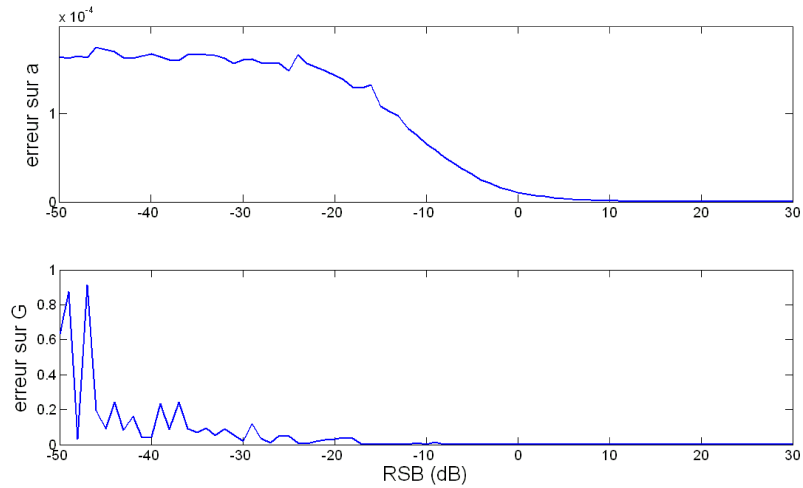
8.2 Validation de la méthode sur des signaux de synthèse

Pour valider l'efficacité de cette méthode, j'ai effectué quelques tests sur des signaux générés sous MATLAB. Le signal d'excitation qui a été généré est le même que celui qui a été utilisé pour l'expérience de cartographie décrite dans la section précédente. Du bruit additionnel est ajouté à ce signal d'excitation. On fait passer ce signal bruité dans un filtre auto-régressif d'ordre 3 dont on connaît les coefficients ($a_0 = 1$, $a_1 = 0.1$ et $a_2 = 0.3$). On fait passer ces signaux dans la méthode d'estimation des coefficients du filtre. On peut alors tracer les taux d'erreurs sur l'estimation des valeurs des coefficients du filtre et du gain G (ici G vaut 3.5) en fonction du rapport signal sur bruit entre le signal d'excitation et le bruit additionnel qui est ajouté. Ces taux représentent si on note a le vecteur des coefficients du filtre à retrouver et a_{est} les coefficients du filtre estimés par la méthode, et de même G et G_{est} , on trace respectivement $\frac{\|a - a_{est}\|^2}{\|a\|^2}$ et $\frac{|G - G_{est}|}{G}$ pour représenter les taux d'erreur relatifs à a et G .

On obtient les courbes suivantes :

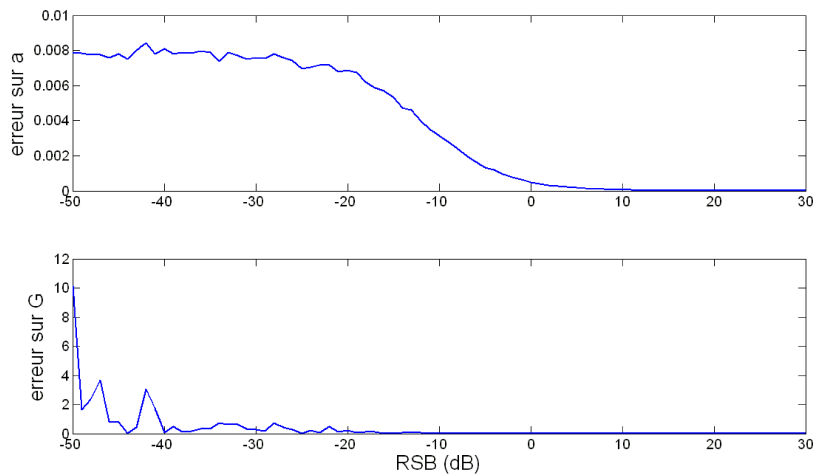
Pour un signal d'une durée de 5 secondes avec une courbe moyennée sur 1000 tirages de signaux de bruits :

FIGURE 11 – Modèle auto-régressif



Pour un signal d'une durée de 0.1 secondes avec une courbe moyennée sur 1000 tirages de signaux de bruits :

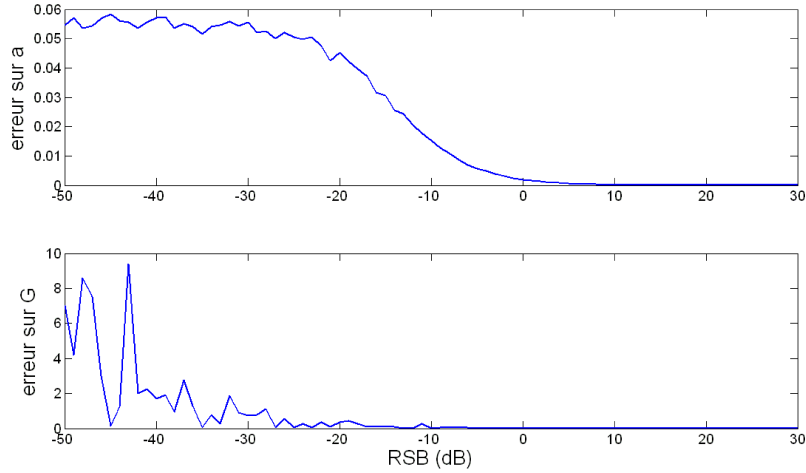
FIGURE 12 – Modèle auto-régressif



Pour un signal d'une durée de 0.01 secondes avec une courbe moyennée sur 1000 tirages de signaux de bruits :

On observe pour ces trois courbes une asymptote dans l'estimation de a qui semble avoir une valeur de plus en plus faible lorsque la taille du signal augmente, ce qui semble logique car si la

FIGURE 13 – Modèle auto-régressif



méthode dispose de plus d'échantillons, elle dispose de plus d'information sur le signal utile. On peut noter que les performances de cette méthode semblent excellentes dès que le rapport signal sur bruit dépasse $0dB$.

Cependant nous n'avons toujours pas réussi à faire fonctionner cette méthode sur les signaux de mesures. Nous avons également envisagé si cette méthode ne fonctionne toujours pas, d'envisager une méthode analogue où le signal d'excitation serait :

$$U = G_1 P_{bouche} + G_2 P_{embouchure} + G_3$$

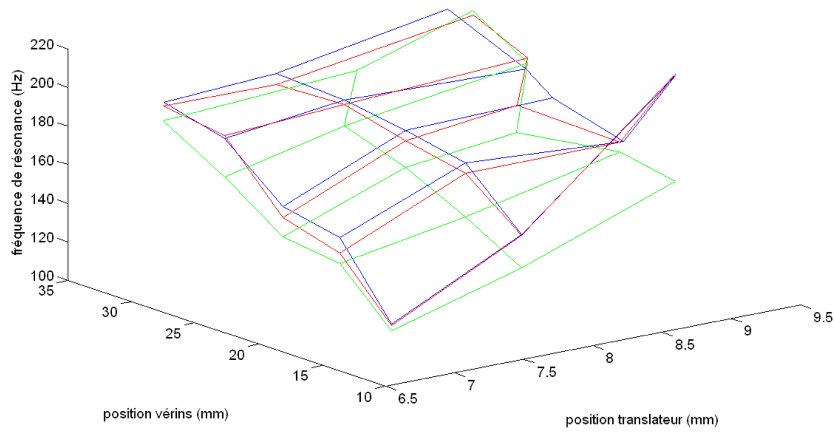
Ainsi le signal d'excitation ne serait pas exactement la différence entre la pression bouche et la pression dans l'embouchure, mais plutôt une combinaison linéaire de ces deux signaux, les 3 coefficients (G_1 , G_2 et G_3) étant identifiés par la méthode de manière analogue à ce qui est présenté précédemment. Le gain G_3 permettrait alors d'évacuer tous problèmes de constante dans les signaux, dûs à leur centrage ou encore aux positions au repos.

9 Premiers résultats de cartographie

Voici des premiers résultats expérimentaux de cartographie. N'ayant pas encore eu le temps de mettre en oeuvre la méthode d'estimation des pôles présentée dans la section précédente, l'estimation des fréquences de résonance a été faite en détectant le maximum du module du spectre du signal du photo-transistor, qui reste assez visible d'après le spectre qui a été montré dans la section 7. On mesure alors seulement la fréquence de résonance de la lèvres couplée au résonateur constitué de l'embouchure et du petit tube qui lui sert de support. L'impédance de ce résonateur a été mesurée et ne présente qu'un seul mode acoustique situé aux alentours de $600Hz$. Son influence doit ainsi être relativement minimale et le résultat présenté ne devrait pas être si loin de la réponse propre au système de lèvres seul. On obtient alors les deux courbes suivantes :

Les différentes surfaces tracées sur la courbe correspondent à différentes pressions statiques dans la bouche. On a successivement les pressions 0 , $2277kPa$ (surface bleue), $0.6465kPa$ (surface rouge) et $2.9715kPa$ (surface verte). Cette courbe semble dans l'ensemble satisfaisante car à part un point qui semble aberrant dans la cartographie (pour une position du translateur autour de $9mm$ et une position des vérins autour de $15mm$ sur les surfaces bleues et rouges), on remarque

FIGURE 14 – Cartographie des fréquences de résonance des lèvres en fonction de la position des actionneurs



que la fréquence de résonance détectée a tendance à monter lorsque la position des actionneurs augmente, ce qui semble logique puisqu'alors les lèvres se raidissent donc leur fréquence propre a tendance à augmenter.

Par manque de temps cette analyse du système excitateur n'a pas pu être menée jusqu'au bout durant le stage, mais elle verra certainement le jour d'ici très peu de temps car les résultats obtenus dans cette troisième partie sont très encourageants. Un mapping plus fin suite à d'autres séries de mesures et le bon fonctionnement de la méthode d'estimation proposée quitte à l'améliorer un peu avec les trois gains G_1 , G_2 et G_3 sont envisageables d'ici la soutenance.

Conclusion

De nombreuses nouveautés ont été établies au cours de ce stage, notamment en ayant adapté les deux méthodes numériques développées au LMA au fonctionnement des cuivres. De plus ces méthodes semblent toutes deux fonctionner avec les données d'un instrument mesuré par son impédance d'entrée. Ces méthodes fonctionnent avec des décompositions de l'impédance d'entrée en modes complexes grâce à l'adaptation du script d'optimisation existant pour les modes réels, ce qui est également nouveau. Ces outils théoriques semblent prêts à se confronter à des résultats expérimentaux.

Cependant une confrontation effective avec ces outils numériques, qui était l'objectif annoncé par ce stage, par manque de temps, n'a pas pu être finalisée entièrement. En effet cette confrontation, on l'a vu au cours de ce rapport, passe par un mapping des paramètres de la bouche artificielle robotisée vers des paramètres du modèle pour le système excitateur qui est les lèvres. Cette tâche s'est révélée beaucoup plus ardue que ce que nous pensions. Il a pour cela fallu développer plusieurs nouvelles fonctionnalités du robot, et un système de mesure satisfaisant pour observer la réponse mécanique des lèvres. Toutes ces nouvelles fonctionnalités présentent un intérêt en soi car ce système robotisé est également une nouveauté.

De plus, les premiers résultats expérimentaux sont très encourageants car ils semblent cohérents avec le modèle établi, ce qui constitue déjà un premier pas vers la confrontation entre la théorie et l'expérimental. Cette étude mérite réellement d'être continuée car il semble que l'on arrivera aux résultats escomptés.

ANNEXES

A Script de l'implémentation de la méthode d'estimation AR

Voici le script Matlab réalisant la méthode d'estimation d'un signal par un signal autorégressif :

```
function [G,a_v] = estim_ar(x_v,u_v,K)

% [G,a_v] = estim_ar(x_v,u_v,K)
% Fonction permettant de trouver les coefficients d'estimation d'un signal
% par un processus auto-régressif en sachant l'entrée
%
%INPUTS :
%*****
%- x_v : signal à analyser
%- u_v : entrée du filtre à estimer
%- K : ordre de la modélisation AR
%
%OUTPUTS :
%*****
%- G : Gain fixe estimé entre les deux signaux
%- a_v : vecteur contenant les coefficients du filtre estimé

x_v = x_v(:);
u_v = u_v(:);

% Initialisation des variables locales
N = length(x_v);

Rxx_v = xcorr(x_v,x_v);
Rxu_v = xcorr(x_v,u_v);
Ruu_v = xcorr(u_v,u_v);

Rxu0 = Rxu_v(N);
Ruu0 = Ruu_v(N);

iR_m = inv(toeplitz( Rxx_v( N+(0 :K-1) )));
Rxu_v = Rxu_v( N-(1 :K) );
Rxx_v = Rxx_v( N+(1 :K) );

alpha = Rxu_v'*iR_m*Rxu_v;
```

```

% Calcul des estimations des paramètres du filtre AR par la méthode du
% maximum de vraisemblance
G = (R_xu0 - R_xu_v'*iR_m*R_xx_v) / (R_uu0 - alpha);
a_v = iR_m * (G*R_xu_v - R_xx_v);
a_v = [1;a_v];

```

```
end
```

B Script d'automatisation de l'expérience de mesures des signaux

Il s'agit du script MATLAB qui a été développé pour automatiser l'expérience de mesures des signaux permettant d'effectuer la cartographie :

```

% Manip de mesure de caractéristiques mécaniques des lèvres artificielles
% par Baptiste Véricel
% le 01/06/2010

```

```

% Ce script permet d'automatiser la manip de mesure de réponses mécaniques
% des lèvres artificielles en fonction des paramètres de jeu (force
% d'appui, pression d'eau dans les lèvres, pression bouche)

```

```

%% Initialisation de la carte dSPACE
mlib('SelectBoard','DS1006');

```

```

%% Lien logiciel avec les variables de l'application
variables_label = { 'Model Root/Verrou/Value';... %X+
'Model Root/Acq_On_Off/Value';... %X-
'Model Root/Fe/Value';... %V+
'Model Root/Commandes translateurs/Tr pos/Value';...
'Model Root/Commandes translateurs/L1 pos/Value';...
'Model Root/Commandes translateurs/L2 pos/Value';...
'Model Root/Commande EV/EV/Value';...
'Model Root/Commande acoustique/lance_sweep/Value';...
'Model Root/Commande acoustique/T_signal/Value';...
'Model Root/Entrees ADC/PL1/ADC';...
'Model Root/Entrees ADC/PL2/ADC';...
'Model Root/Entrees ADC/Force/ADC';...
'Model Root/Entrees encodeurs/Conversion mm 1/Out1';...
'Model Root/Entrees encodeurs/Conversion mm 4/Out1';...
'Model Root/Entrees encodeurs/Conversion mm 3/Out1';...
'Model Root/Commandes translateurs/Kg Tr/Gain';...
'Model Root/Commandes translateurs/Kg L1/Gain';...

```

```

'Model Root/Commandes translateurs/Kg L2/Gain';...
'Labels/end_init'};

Pbouche_label = 'Model Root/Entrees ADC/Pbouche/ADC';
Pbec_label = 'Model Root/Entrees ADC/Pbec/ADC';
Optique_label = 'Model Root/Entrees ADC/Optique/ADC';

if mlib('IsApplRunning')
    [ Verrou,...
      Acq_On_Off,...
      Fe_app,...
      pos_Tr_write,...
      pos_L1_write,...
      pos_L2_write,...
      EV_write,...
      Lance_Acquisition,...
      T_signal,...
      PL1,...
      PL2,...
      force,...
      pos_Tr_read,...
      pos_L1_read,...
      pos_L2_read,...
      Kg_Tr,...
      Kg_L1,...
      Kg_L2,...
      initialisation_end] = mlib('GetTrcVar',variables_label);

    Pbouche = mlib('GetTrcVar',Pbouche_label);
    Pbec = mlib('GetTrcVar',Pbec_label);
    Optique = mlib('GetTrcVar',Optique_label);

end

```

```

%% Initialisation des variables locales de l'application

```

```

Fe = mlib('read',Fe_app);

% Actionneurs des lèvres
pos_L_min = 15; % Position min
pos_L_max = 31; % Position max
delta_pos_L = 4; % Saut de position (mm)
L_v = pos_L_min :delta_pos_L :pos_L_max;
N_L = length(L_v);

delta = -9.8;

```

```

% Translateur
pos_Tr_min = 7; % Position min
pos_Tr_max = 10; % Position max
delta_pos_Tr = 1; % Saut de position (mm)
Tr_v = pos_Tr_min :delta_pos_Tr :pos_Tr_max;
N_Tr = length(Tr_v);

% Electrovanne
EV_min = 0.30; % Consigne EV min
EV_max = 0.34; % Consigne EV max
EV_step = 0.02; % Saut
EV_v = [0,EV_min :EV_step :EV_max];
N_EV = length(EV_v);

%% Initialisation de l'acquisition

trig_label = 'Labels/time';
trig = mlib('GetTrcVar',trig_label);

T_excitation= mlib('read',T_signal);% Durée du signal d'excitation (s)
NumSamples = (T_excitation+2)*Fe; % Durée de l'acquisition (échantillons)

% Paramètres de l'acquisition
mlib('Set',...
'Trigger', 'ON', ...
'TriggerVariable', trig, ...
'TriggerLevel',1,...
'TriggerEdge','rising',...
'TraceVars', [Pbouche ;Pbec ;Optique], ...
'NumSamples', NumSamples,...
'OutputFormat','matrix');

% Initialisation des variables permettant de stocker les données
Optique_m = zeros(NumSamples,N_EV,N_L,N_Tr);
Pbouche_m = zeros(NumSamples,N_EV,N_L,N_Tr);
Pembouchure_m = zeros(NumSamples,N_EV,N_L,N_Tr);

pos_Tr_m = zeros(N_EV,N_L,N_Tr);
pos_L1_m = zeros(N_EV,N_L,N_Tr);
pos_L2_m = zeros(N_EV,N_L,N_Tr);
F_m = zeros(N_EV,N_L,N_Tr);
PL1_m = zeros(N_EV,N_L,N_Tr);
PL2_m = zeros(N_EV,N_L,N_Tr);

%% Attente de la fin de l'initialisation
end

```

```

pause(1);

%% Attente du début de l'application
end

%% Activation des asservissements

pos_Tr = mlib('read',pos_Tr_read);
pos_L1 = mlib('read',pos_L1_read);
pos_L2 = mlib('read',pos_L2_read);
mlib('write',pos_Tr_write,'Data',pos_Tr);
mlib('write',pos_L1_write,'Data',pos_L1);
mlib('write',pos_L2_write,'Data',pos_L2);
pause(1);
mlib('write',Kg_Tr,'Data',1);
mlib('write',Kg_L1,'Data',1);
mlib('write',Kg_L2,'Data',1);
pause(5);

%
pos_L = pos_L_min;
pos_Tr = pos_Tr_min;
mlib('write',pos_Tr_write,'Data',pos_Tr);
mlib('write',pos_L1_write,'Data',pos_L);
mlib('write',pos_L2_write,'Data',pos_L+delta);

while ((abs(mlib('read',pos_L1_read)-pos_L)>delta_pos_L/4)||...
end
pause(2);

%% Boucle d'acquisition
for Tr_compt = 1 :N_Tr

Tr = Tr_v(Tr_compt);
mlib('write',pos_Tr_write,'Data',Tr);
end
pause(1);

for L_compt = 1 :N_L

pos_L = L_v(L_compt);
mlib('write',pos_L1_write,'Data',pos_L);
mlib('write',pos_L2_write,'Data',pos_L+delta);
while ((abs(mlib('read',pos_L1_read)-pos_L)>0.1)||...
end
pause(1);
mlib('write',pos_Tr_write,'Data',Tr);
end
pause(1);

```



```

% Verrouillage des actionneurs
mlib('write',Verrou,'Data',1);
pause(1);

% Boucle de mesure des signaux
for EV_compt = 1 :N_EV

    mlib('write',EV_write,'Data',EV_v(EV_compt));
    pause(0.5);

    mlib('write',Kg_Tr,'Data',0);
    mlib('write',Kg_L1,'Data',0);
    mlib('write',Kg_L2,'Data',0);

    % Stockage des paramètres
    pos_Tr_m(EV_compt,L_compt,Tr_compt) = mlib('read',pos_Tr_read);
    pos_L1_m(EV_compt,L_compt,Tr_compt) = mlib('read',pos_L1_read);
    pos_L2_m(EV_compt,L_compt,Tr_compt) = mlib('read',pos_L2_read);
    F_m(EV_compt,L_compt,Tr_compt) = mlib('read',force);
    PL1_m(EV_compt,L_compt,Tr_compt) = mlib('read',PL1);
    PL2_m(EV_compt,L_compt,Tr_compt) = mlib('read',PL2);

    % Acquisition des signaux
    mlib('StartCapture');
    mlib('write',Lance_Acquisition,'Data',1);
    end
    mlib('write',Lance_Acquisition,'Data',0);
    Capture_m = mlib('FetchData');

    % Arrêt de l'électrovanne
    mlib('write',EV_write,'Data',0);
    pause(0.5);

    % Stockage des signaux
    Pbouche_m(:,EV_compt,L_compt,Tr_compt) = Capture_m(1,:);
    Pembouchure_m(:,EV_compt,L_compt,Tr_compt) = Capture_m(2,:);
    Optique_m(:,EV_compt,L_compt,Tr_compt) = Capture_m(3,:);

end

% Déverrouillage des actionneurs
mlib('write',Verrou,'Data',0);
pause(2);

% Activation des asservissements
pos_Tr = mlib('read',pos_Tr_read);
pos_L1 = mlib('read',pos_L1_read);

```

```
pos_L2 = mlib('read',pos_L2_read);  
mlib('write',pos_Tr_write,'Data',pos_Tr);  
mlib('write',pos_L1_write,'Data',pos_L1);  
mlib('write',pos_L2_write,'Data',pos_L2);  
mlib('write',Kg_Tr,'Data',1);  
mlib('write',Kg_L1,'Data',1);  
mlib('write',Kg_L2,'Data',1);  
pause(1);
```

end

end

Références

- [1] Christophe Vergez Bruno Cochelin. A high purely frequency-based harmonic balance formulation for continuation of periodic solutions. *Journal of Sound and Vibration*, 324 :243, 2009.
- [2] Murray Campbell. Brass instruments as we know them today. *Acta Acustica*, 90 :600, 2004.
- [3] S.J. Elliot and J.M. Bowsher. Regeneration in brass wind instruments. *Journal of Sound and Vibration*, 83 :181, 1982.
- [4] Christophe Vergez Fabrice Silva, Jean Kergomard. Oscillation thresholds for "striking outward" reeds coupled to a resonator. *ISMA*, 2007.
- [5] Jean Kergomard Christophe Vergez Aude Deblevid Philippe Guillemain Fabrice Silva, Vincent Debut. Simulation of single reed instruments oscillations based on modal decomposition of bore and reed dynamics. *International Congress of Acoustics*, 2007.
- [6] Joël Gilbert and Sylvie Ponthus. Artificial buzzing lips and brass instruments : Experimental results. *JASA*, 104 :1627, 1998.
- [7] Pierre Aumond Joël Gilbert. Pedal notes of brass instruments, a mysterious regime of oscillation. *Acoustics'08*, 2008.
- [8] Murray Campbell J.S. Cullen, Joël Gilbert. Brass instruments : Linear stability analysis and experiments with an artificial mouth. 2000.
- [9] Mark Neal. *A Study of the Brass Instruments Lip Reed Mechanism using Artificial Lips and Lattice Boltzmann Flow Simulation*. PhD thesis, 2002.
- [10] Michael J. Newton and Murray Campbell. Mechanical response of real and artificial brass players lips. *JASA*, 123 :14, 2008.
- [11] Orlando Richards. *Investigation of the Lip Reed using Computational Modelling and Experimental Studies with an Artificial Mouth*. PhD thesis, 2003.
- [12] Bruno Cochelin Sami Karkar, Christophe Vergez. Exploration systématique des régimes périodiques des instruments à anche. *Congrès Français d'Acoustique*, 2010.
- [13] Fabrice Silva. *Émergence des auto-oscillations dans un instrument de musique à anche simple*. PhD thesis, 2009.
- [14] Jean Kergomard Aude Lizée Snorre Farner, Christophe Vergez. Contribution to harmonic balance calculations of self-sustained periodic oscillations with focus on reed instruments. *JASA*, 2006.
- [15] Marie Tahon. Caractérisation de lèvres artificielles. *Rapport de stage*, 2007.