

Rapport de Projet de Fin d'Etude
Cartographie de paramètres de jeu de trompettiste:
mise en correspondance automatique du son
produit avec les paramètres de contrôle
d'une bouche artificielle asservie.

LOPES Nicolas

30 Juillet 2011

Table des matières

I	Bouche artificielle robotisée trompettiste	4
1	Description technique	5
1.1	Alimentation en air	5
1.2	Bouche	6
1.3	Trompette	8
2	Principe de fonctionnement et modélisation	10
2.1	La Trompette	10
2.2	Le couplage des lèvres sur l'embouchure	11
3	Mise en place d'une méthode de calibration	14
3.1	Mesure des paramètres caractéristiques	14
3.1.1	Étape 1 : Gonflage et dégonflage des lèvres, Obtention de X_{L1}^* , σ_{L1} , X_{L2}^* , σ_{L2}	15
3.1.2	Étape 2 : Avance et recule du translateur : Obtention de X_T^*	15
3.2	Tests de reproductibilité et robustesse de la calibration	16
3.2.1	Fuites et déformations	17
3.2.2	Robustesse & Reproductibilité	17
3.3	Conclusion sur la calibration	19
II	Cartographie de paramètres de jeu : Première exploration	23
4	Mise en correspondance	24
4.1	Objectif	24
4.2	Protocole expérimental et méthode utilisée	24
5	Résultats	26
5.1	Cartographie dans l'espace des paramètres de contrôle de haut niveau	26
5.2	Étude vis à vis des capteurs	26
6	Discussion et propositions pour la suite du stage	32

III	Estimation de paramètres de modèle physique	33
7	Modèle stochastique et problème posé	34
7.1	Modèle initial	34
7.2	Modèle centré	35
7.3	Représentation d'état	35
7.4	Identification des paramètres du système idéal	35
7.5	Modèle de mesure : Modèle stochastique	36
7.6	Hypothèses additionnelles	36
8	Méthode proposée	37
8.1	Discrétisations du problème : Mise sous forme d'un signal Auto-régressif	37
8.2	Méthode générale	38
9	Premiers résultats sur signaux de synthèse	40
9.1	Signal Synthétique	40
9.2	Méthode et résultats	40

Introduction

Dans le cadre de mon Projet de Fin d'Etude à l'ENSEA¹, j'ai eu la chance de pouvoir intégrer l'équipe Analyse/Synthèse de L'Ircam². Mon stage s'est déroulé sur six mois, encadré par M.Thomas Hélie, chercheur à l'Ircam et responsable de l'équipe A/S, et M. René Caussé responsable de l'équipe Acoustique.

Le sujet du stage porte sur la bouche artificielle dont voici une brève description : Dans les modèles simples d'instruments à vent de type cuivre (trompette, trombone, etc), les paramètres de commande importants incluent la pression dans la bouche, la force d'appui de l'embouchure sur les lèvres et les caractéristiques des lèvres (masse, amortissement et raideur apparentes : on parle du masque du musicien). Il est facile de mesurer la pression dans la bouche pendant l'activité humaine mais accéder aux autres paramètres de contrôle est difficile. Afin de disposer d'un outil expérimental, reproductible et contrôlable, la robotisation d'une bouche artificielle dédiée au jeu des cuivres a été effectuée à L'Ircam dans le cadre du projet de l'Agence National de la Recherche CONSONNES³ et avec le concours de l'Ecole des Mines de Paris, et de BTS. Une première confrontation théorique/expérimentale a été obtenue à l'aide de cet outil et un travail similaire a été réalisé sur la clarinette.

Les objectifs du stage sont les suivants :

1. Cartographier expérimentalement la fréquence de jeu et d'autres caractéristiques typiques (seuils d'oscillation et d'extinction du son, barycentre spectral, etc.) qu'on cherchera à relier aux paramètres de jeu.
2. Relier les paramètres des lèvres artificielles (masse, amortissement, raideur apparentes) aux variables "force d'appui", "pression d'eau", "pression de bouche".

Ce compte-rendu est composé de 3 parties principales :

- Une première partie concrète sur l'utilisation du robot et sa calibration.
- Une seconde partie sur une cartographie des fréquences de jeu.
- Une dernière partie sur une méthode d'estimation de paramètre.

Remarque : A ce jour, le stage n'est pas terminé. La majorité des thèmes abordés ne sont pas définitifs.

1. École Nationale Supérieure de l'Électronique et de ses Applications
2. Institut de Recherche et de Coordination de l'Acoustique et de la Musique
3. 2005-2009, <http://www.consonnes.cnrs-mrs.fr>

Première partie

Bouche artificielle robotisée
trompettiste

Chapitre 1

Description technique

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 capteur et actionneur 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 : la trompette, la bouche, et l'alimentation en air (voir Fig. 1.1 & 1.2).

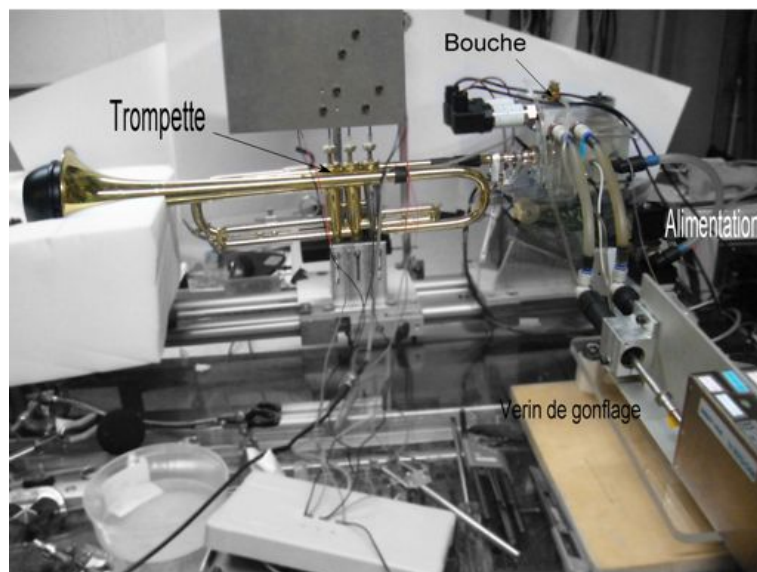


FIGURE 1.1 – Vue globale

1.1 Alimentation en air

Le "souffle" de la bouche est produit par une électro-vanne (C_V) pilotée et alimentée par de l'air comprimé (cf. Fig 1.2). Un capteur mesure la température de l'air comprimé (T_A). Un autre

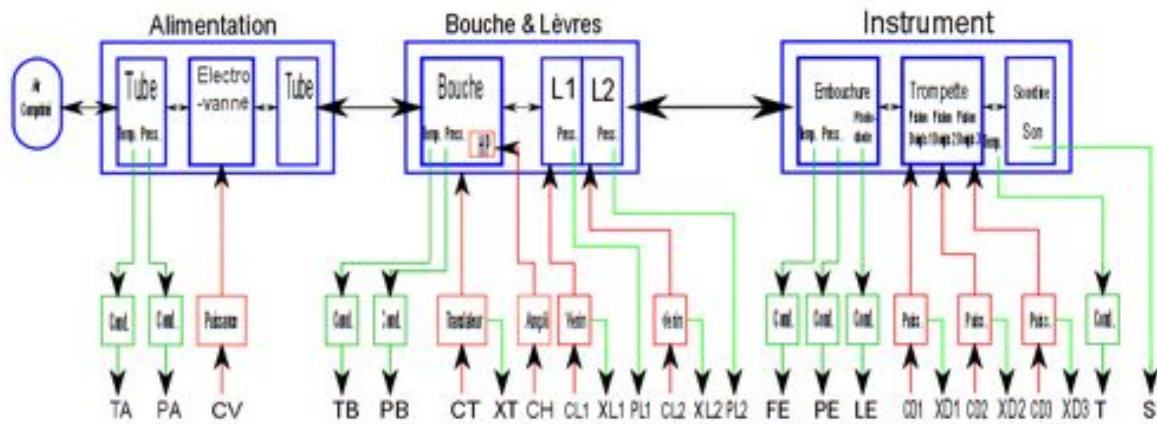


FIGURE 1.2 – Schéma fonctionnel

est chargé de mesurer la pression d'alimentation (P_A).

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 en position (C_{L1} et C_{L2}). Cette 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 et un capteur de température T_B . On y trouve également un émetteur infrarouge correspondant au récepteur de l'embouchure. Ce couple permet de mesurer l'intensité lumineuse passant entre les lèvres L_E et ainsi d'obtenir une image de l'air d'ouverture. Un haut parleur (C_H) peut être ajouté pour forcer la pression acoustique. Enfin, le tout peut être mis au contact de l'embouchure grâce à un translateur également commandable en position et mesurable (C_T et X_T).



FIGURE 1.3 – Alimentation Pneumatique

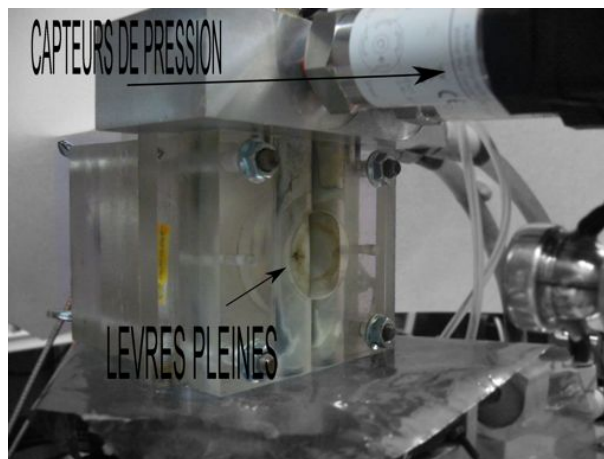


FIGURE 1.4 – La bouche

1.3 Trompette

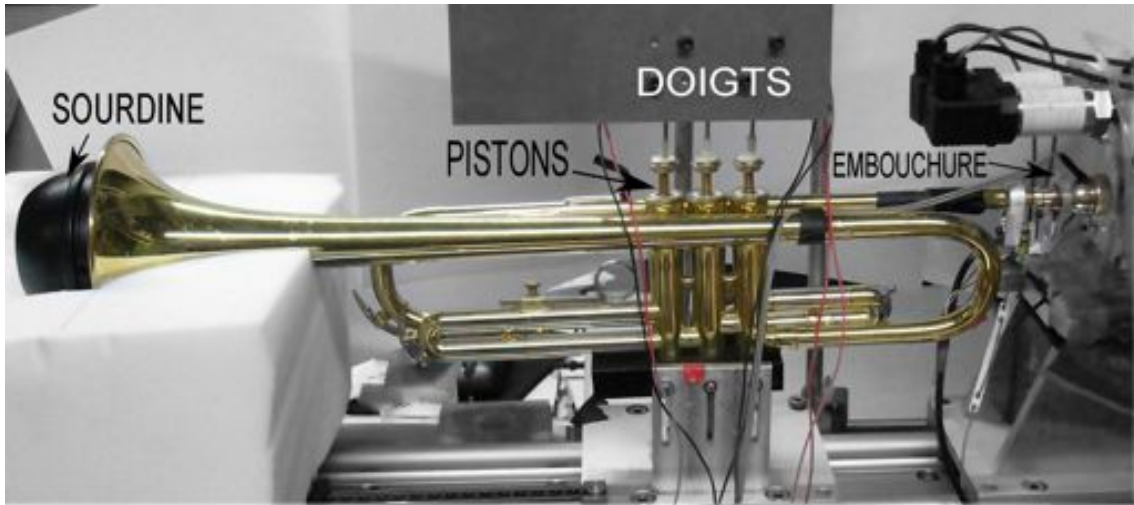


FIGURE 1.5 – Trompette

Lors d'une utilisation normale, 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 1.2. 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 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 un capteur de température T .

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

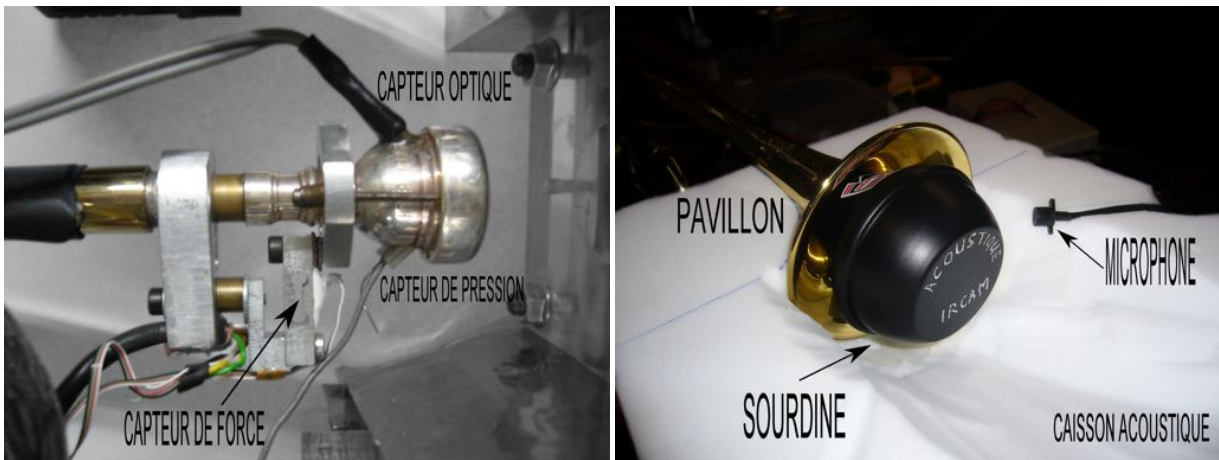


FIGURE 1.6 – Embouchure & Sourdine



FIGURE 1.7 – Doigts

Chapitre 2

Principe de fonctionnement et modélisation

Ce système a déjà été le thème de nombreux sujets de recherche à l'Ircam, notamment avec X.Rodet et I.Steinecke , C.Vergez et plus récemment T.Hélie. De cela a découlé des modèles plus ou moins complexes du couplage des lèvres sur l'embouchure. Dans le cadre de notre sujet, nous avons choisi d'utiliser un modèle simple à une masse.

2.1 La Trompette

La trompette est un instrument à vent de la famille des cuivres claires. La trompette la plus commune est celle dite à "piston en Si bémol"¹. Cette trompette est fabriquée dans un tuyau de 1,50 m de long et constituée par l'embouchure, le tube (ou perche) et le pavillon(cf. Fig. 2.1).

Les pistons sont des mécanismes permettant d'accroître la longueur du tube. Ils permettent par un jeu de dérivation de faire varier la longueur de la partie "tube droit" de l'instrument.

Physiquement, la trompette peut être assimilée du point de vue acoustique comme un résonateur. L'impédance acoustique d'entrée $Z_{in}(f)$ "charge" les lèvres du musicien. Le couplage Lèvres/ Z_{in} est responsable des oscillations conduisant à la génération des notes. Les maximums de $|Z_{in}|$ correspondent aux modes (notes naturelles) jouables. L'impédance est donnée par la formule $\frac{dP}{dU}$ où P et U sont respectivement la pression efficace et le débit d'air efficace (par analogie avec l'électricité en assimilant la pression et la tension d'une part, le débit et l'intensité de l'autre). Dans notre cas, j'ai mesuré l'impédance² du système complet à l'aide d'un banc d'impédance (cf. []) dans toutes les combinaisons possibles (2*8 possibilités : Pistons, avec/sans sourdine). (cf Fig 2.2)

1. Il existe aussi des trompettes accordées en Ut (Do), ou moins utilisées, en sol Re Mib fa ou trompettes basses

2. L'impédance de la trompette dépend de la température externe. Une coulisse permet d'allonger la longueur du tuyau et ainsi de s'accorder avec d'autres musiciens.



FIGURE 2.1 – Description de la trompette
2.1

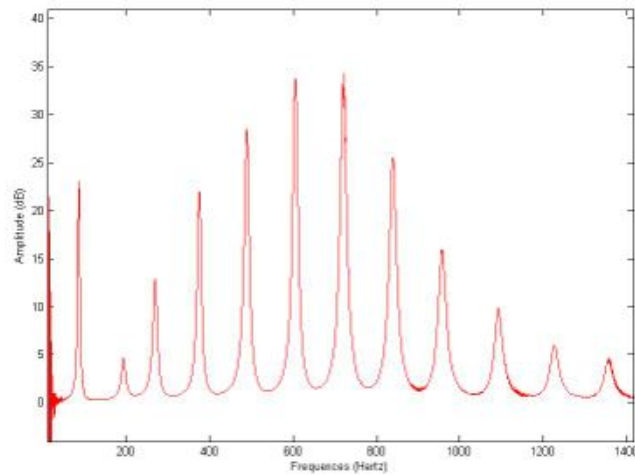


FIGURE 2.2 – Impédance de la Trompette avec embouchure et sourdine : Première position (Tous les pistons relâchés)

2.2 Le couplage des lèvres sur l'embouchure

Les lèvres du trompettiste ont un rôle excitateur :

La pression dans la bouche P_b est à l'origine de la formation d'un jet passant entre les lèvres et dont l'évolution dépend des forces auxquelles ces dernières sont soumises(cf. Fig. 2.3). Ces forces ont plusieurs origines :

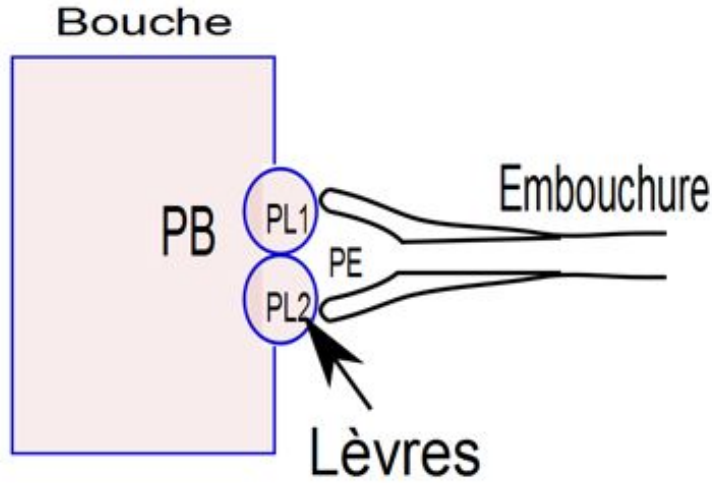


FIGURE 2.3 – Schéma du couple lèvre et embouchure

1. Les forces de pression sur la lèvre
2. Les forces mécaniques intrinsèques

Comme nous l'avons déjà vu plus haut, nous avons choisi de modéliser très simplement ce couplage par un système à une masse soumise à une force de rappel et un amortissement (cf. Fig 2.4).

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 : $\vec{F}_J = -S_J P_J \vec{v}_x$
5. Force de rappel : $\vec{F}_R = k(x - x_e) \vec{v}_x$
6. Force d'amortissement : $\vec{F}_a = a(\dot{}) \vec{v}_x$

En isolant la masse :

$$m \vec{a} = \vec{F}_B + \vec{F}_E + \vec{F}_J + \vec{F}_R + \vec{F}_a \quad (2.1)$$

Après projection sur \vec{v}_x :

$$m\ddot{x} + a\dot{x} + k(x - x_e) = \sin(\alpha)S_B P_B - \sin(\alpha)S_E P_E + S_J P_J \quad (2.2)$$

Hypothèses supplémentaires : Il est dans un premier temps légitime de considérer une géométrie symétrique, c'est à dire que $S_B = S_E$. De plus, la théorie sur la modélisation des jets et le

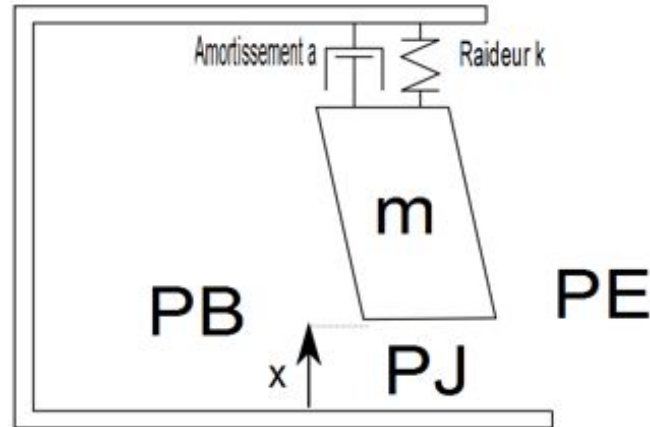


FIGURE 2.4 – Modèle à une masse

théorème de Bernoulli³ nous permettent d'exprimer P_J comme une fonction de P_B et P_E . Ce modèle se ramène à :

$$m\ddot{x} + a\dot{x} + k(x - x_e) = A_B P_B + A_E P_E \quad (2.3)$$

Où selon les degrés de raffinement, on supposera que :

- (H_0) $A_B = A_E = \text{constante}$
- (H_1) $A_B \neq A_E$ sont constants, ou bien
- (H_2) A_B et A_E sont des fonctions de x ;

De plus, m (la masse vibrante équivalente), a et k sont pilotés par les actionneurs du robot comme décrit ci dessous :

Qualitativement, lors d'une oscillation, appuyer l'embouchure sur les lèvres diminue la masse équivalente vibrante m et étire le latex ce qui tend à augmenter le coefficient de raideur k . Les observations montrent effectivement dans ce cas une augmentation de la fréquence de jeu ce qui correspond bien à une augmentation de $\frac{k}{m}$. On sait que gonfler une lèvre produit un effet semblable. De ce point vue, il apparait que l'estimation des ces paramètres est un problème compliqué. Il est l'objet du travail initié en partie 3.

Lors des stages précédents (B.Véricel ENSEA 2009), la première approximation a été mise à l'épreuve par le biais notamment d'une méthode de vraisemblance. Ce modèle s'est avéré trop éloigné de la réalité.

3. Cette partie éloigne trop du sujet du stage, elle n'a donc pas été approfondit

Chapitre 3

Mise en place d'une méthode de calibration

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. De plus, la partie hydraulique de la bouche artificielle n'étant pas parfaitement imperméable, certaines micro fuites apparaissent lors d'utilisation sous des pressions importantes. 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 de la trompette 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. En effet, une configuration donnée (X_T, X_{L1}, X_{L2}) donne un certain résultat le premier jour, puis un résultat différent le lendemain. 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. Cette étape a pour but de passer des paramètres de contrôles 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 $\theta =$ (Paramètres de Calibration) On définit la fonction de calibration recherchée :

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

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.

3.1 Mesure des paramètres caractéristiques

La calibration se fait en deux temps :

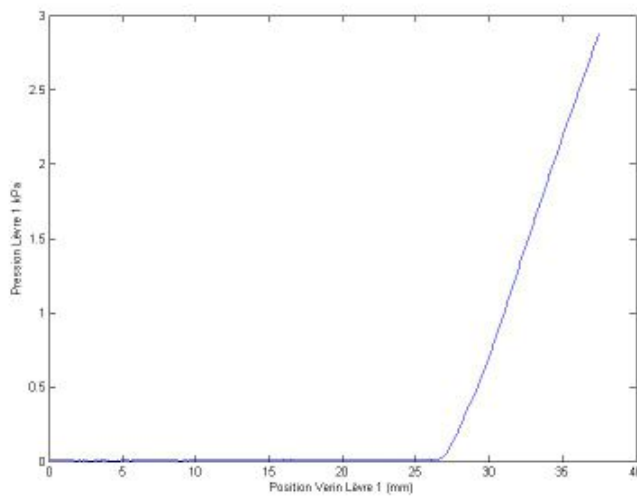
1. Gonflage/dégonflage des lèvres, translateur reculé.
2. Avance/recul du translateur, lèvres "justes" gonflées.

3.1.1 Étape 1 : Gonflage et dégonflage des lèvres, Obtention de X_{L1}^* , σ_{L1} , X_{L2}^* , σ_{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.



On identifie les paramètres :

$$X_{L1}^*$$

$$\sigma_{L1}$$

FIGURE 3.1 – Pression d'eau dans une lèvre (PL) en fonction de la position du vérin de gonflage.

On remarque que la pression reste constante et très faible jusqu'aux points 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 parfaitement gonflées¹. 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} .

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

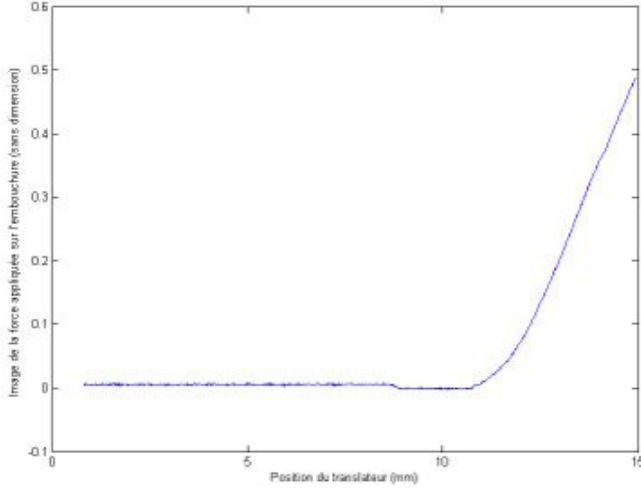
Pour cette étape :

1. Les lèvres sont "justes" gonflées : $X_{L1} = X_{L1}^*$ et $X_{L2} = X_{L2}^*$

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

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. 3.2).



On identifie les paramètres :

$$\begin{aligned} X_T^* \\ \sigma_T \end{aligned}$$

FIGURE 3.2 – Force de l'embouchure sur les lèvres (F) en fonction de la position du translateur (X_T)

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 nous 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 :

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

3.2 Tests de reproductibilité et robustesse de la calibration

Pour tester la robustesse de cette étape, nous avons effectué 5 séries de 20 calibrations. Chaque vingtaine est réalisée avec des pauses de 30 secondes entre calibrations. Les trois premières vingtaines sont effectuées avec des pauses de plus de 5 minutes. Les deux dernières vingtaines

sont effectuées après une pause de 24 heures. Cela a permis de calculer des statistiques sur les paramètres de calibration et de constater l'influence des fuites et des déformations.

3.2.1 Fuites et déformations

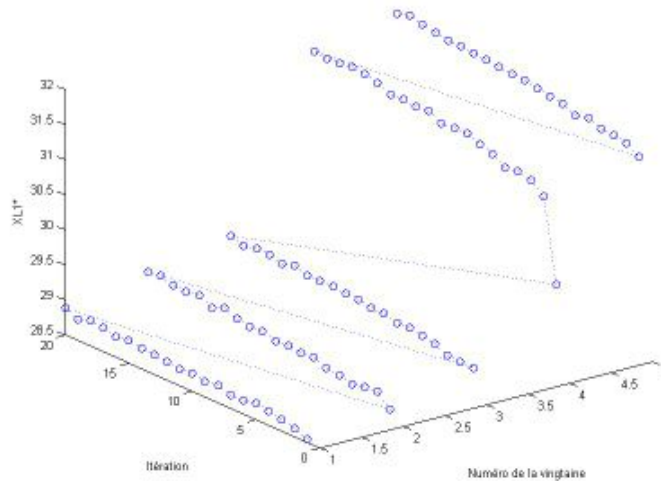


FIGURE 3.3 – Mise en évidence d’une mémoire à court-terme du latex et d’une fuite via l’estimation de X_{L1}^*

Les mesures ont montrées que les fuites et les déformations n’ont un effet marquant que sur X_{L1} et X_{L2} , et de manière semblable. La figure 3.3 montre les différentes mesures de X_{L1}^* pour chaque calibration. Dans un premier temps, on remarque que dans une série, X_{L1}^* augmente à chaque itération. Cependant, cette augmentation est réversible. Il s’agit d’une déformation à court terme dut à l’utilisation du latex. D’un autre coté on peut voir que, de série en série, X_{L1}^* augmente de manière plus marquée et irréversible. on a bien affaire dans ce cas ci à des fuite d’eau. On peut évidemment noté le décalage après la pause de 24 heures. Cela nous permet d’estimer les pertes dut aux fuites ainsi que les déformations du latex (voir figure 3.4 & 3.5). Cela nous permet de corriger les pertes de fuite d’eau (voir figure 3.6).

3.2.2 Robustesse & Reproductibilité

La correction de la perte de fuite nous permet de calculer des histogrammes pour chacun des paramètres (voir 3.7 et 3.8). Les moyennes et variances (voir tableau 3.1) montres bien la robustesse de notre méthode de calibration ².

A ce jour, la reproductibilité d’une commande de haut niveau après calibration n’a été testée que sur les données fournies par l’expérience décrite précédemment. Une expérience plus probante

2. Les résultats sont proches et donne la même conclusion avec la lèvres 2

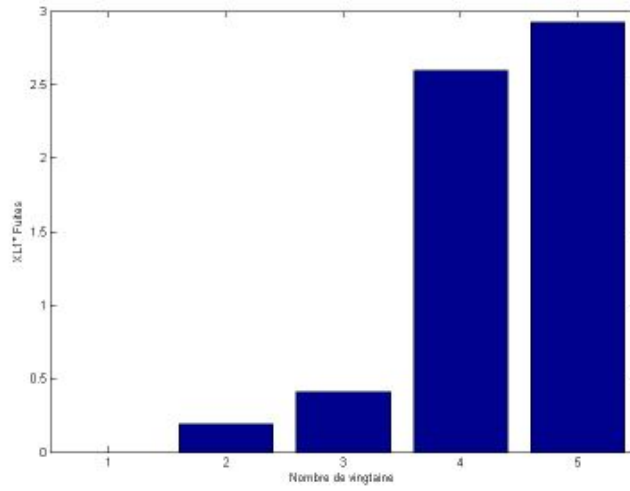


FIGURE 3.4 – Décalage de X_{L1}^* dû aux fuites (en mm)

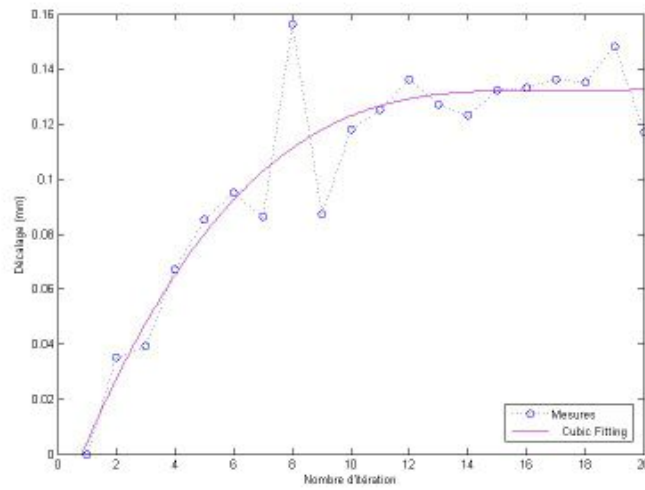


FIGURE 3.5 – Décalage de X_{L1}^* dû aux déformations(en mm)

X	Moyenne	Variance
X_{L1}^*	28.7482	0.0045
σ_{L1}^*	0.1905	1.1566e-006
X_T^*	11.6228	0.0045
σ_T	0.1547	1.4854e-005

TABLE 3.1 – Tableau des moyennes & variances des paramètres de calibration

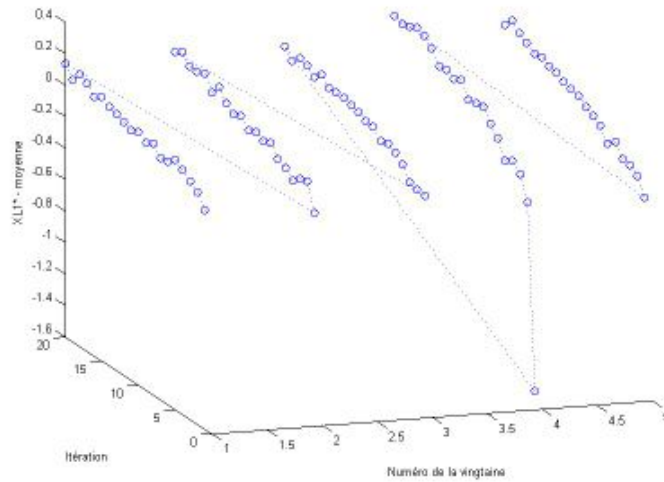


FIGURE 3.6 – Graphique X_{L1}^* corrigé

sera effectuée dans la suite du stage. Le but ici est de montrer à quel point deux expériences identiques, mais dans des états mécaniques différents, peuvent être reliées par le biais des paramètres de calibrations(cf. Fig. 3.9 et 3.10).

X	Expérience 1	Expérience 2
X_{L1}^*	26.6350	26.8618
σ_{L1}^*	0.2732	0.2710
X_T^*	11.7150	12.3700
σ_T	0.1577	0.1516

TABLE 3.2 – Tableau des paramètres de calibration des 2 expériences

3.3 Conclusion sur la calibration

Malgré les défauts de la plateforme (fuites, déformations, ...), les paramètres de haut-niveau obtenus après calibration font sens et montrent une robustesse satisfaisante.

Il devient envisageable de :

- Apprécier le "vieillessement", l'évolution temporelle de la machine.
- planifier des expériences reproductibles pilotées par les paramètres de haut niveau.

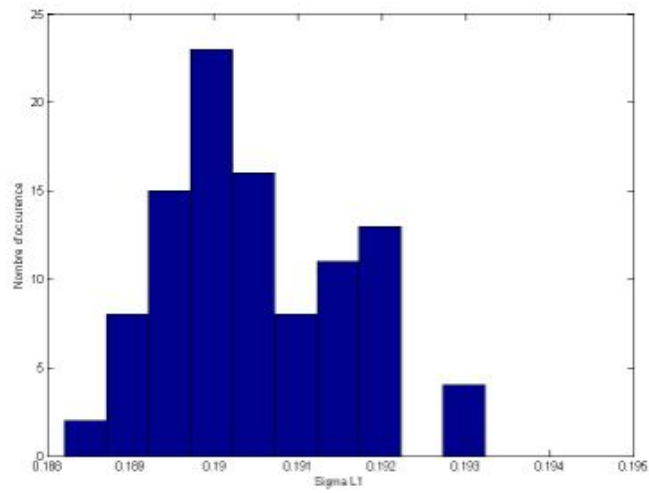
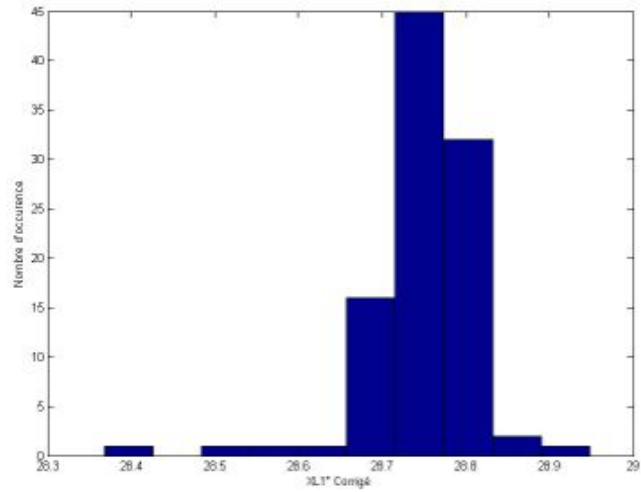


FIGURE 3.7 – Histogrammes des paramètres X_{L1}^* & σ_{L1}

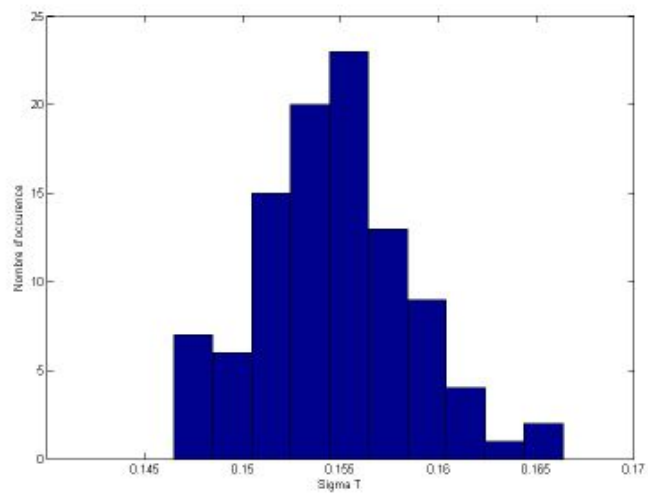
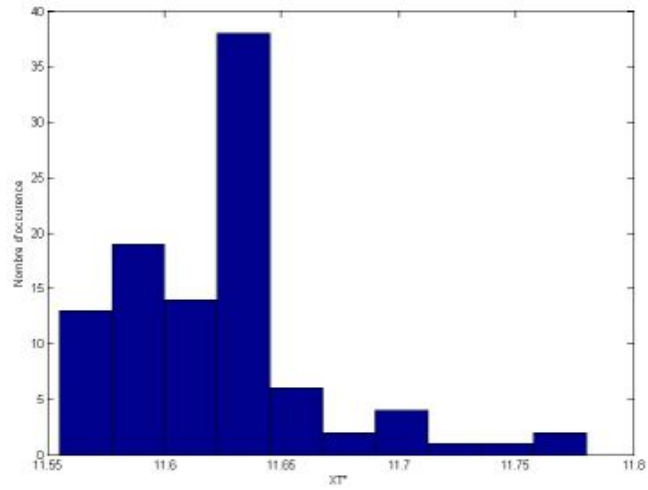


FIGURE 3.8 – Histogrammes des paramètres X_T^* & σ_T

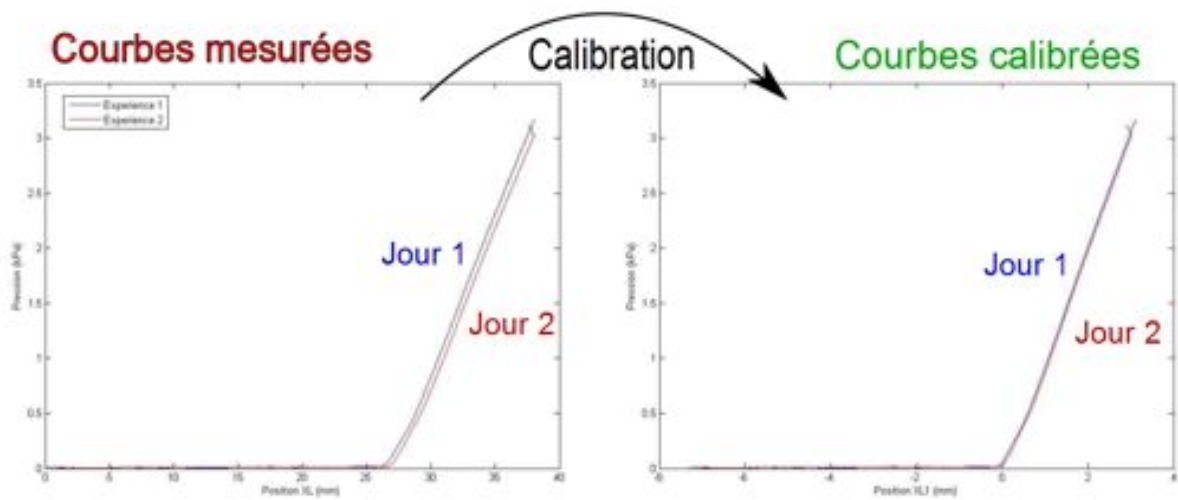


FIGURE 3.9 – Graphique de la pression dans la première lèvre en fonction de la position du vérin correspondant pour deux expériences faite deux jours différents : Calibration de XL

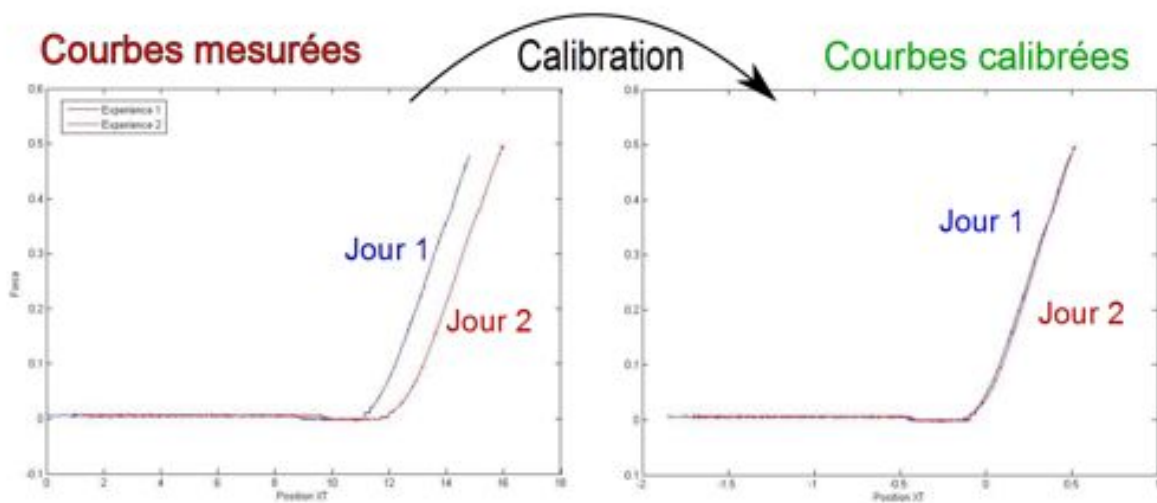


FIGURE 3.10 – Graphique de la force de l'embouchure (F) sur les lèvres en fonction de la position du translateur (XT) correspondant pour deux expériences faite deux jours différents : Calibration de XT

Deuxième partie

Cartographie de paramètres de jeu : Première exploration

Chapitre 4

Mise en correspondance

4.1 Objectif

L'objectif de cette cartographie est d'effectuer une mise en correspondance entre les paramètres de contrôle de haut niveau ($\tilde{X}_T, \tilde{X}_{L1}, \tilde{X}_{L2}$) et les caractéristiques du son émit par la trompette. Cette première cartographie n'a pas pour prétention d'être définitive mais montre plutôt les possibilités de la bouche artificielle robotisée. Pour toute cette partie, l'alimentation en air comprimé reste fixe. La commande de l'électro-vanne C_{EV} est fixée à 48% ce qui correspond au débit d'air moyen d'un trompettiste. Le but direct est d'identifier les zones de l'espace ($\tilde{X}_T, \tilde{X}_{L1}, \tilde{X}_{L2}$) permettant un son en sortie de trompette mais également les silences et les zone de notes rugueuses¹.

4.2 Protocole expérimental et méthode utilisée

Cette méthode consiste à parcourir les plages d'utilisations des paramètres de contrôle de haut niveau des actionneurs ($\tilde{X}_T, \tilde{X}_{L1}, \tilde{X}_{L2}$) avec un pas choisi en respectant les conditions suivantes :

1. L'ensemble du système doit être en service : $P_{L1} > 0, P_{L2} > 0$ et $F > 0$.
2. Les lèvres ne doivent pas être soumises à une pression trop forte : $P_{L1} < 20$ kPa, $P_{L2} < 20$ kPa

Le protocole se joue sur trois points importants :

- Une calibration est faite en tout premier lieu, puis toutes les 5 minutes pour s'assurer que les commandes de haut niveau restent valables.
- Les commandes \tilde{X}_{L1} et \tilde{X}_{L2} restent fixes à chaque pas de mesure. (Les lèvres sont fixées à un certain volume)
- A chaque pas de mesure, \tilde{X}_T augmente progressivement (La bouche se rapproche de l'embouchure) jusqu'à obtenir une des pression de lèvres trop élevée.

1. Les notes rugueuses n'ont pas de fondamentale bien définie, elles sont la conséquence de la concurrence de plusieurs oscillations.

Remarque : Compte tenu des propriétés du latex (voir partie 3.2.1) cette expérience se fait à vitesse faible pour éviter les pertes par déformation. Cela implique un temps de manipulation très long.

Les mesures effectuées au long de l'expérience sont :

- Le son S en sortie de trompette (44100 hertz).
- Les signaux des différents capteurs du robot (100 hertz) : voir 1.2
- Les paramètres de calibration
- Signal de synchronisation 44100-100 hertz

Le signal de synchronisation permet la mise en correspondance des signaux fournis par le robot et du signal sonore.

Le traitement du signal sonore se fait grâce à l'algorithme YIN. C'est un algorithme de reconnaissance de fréquence fondamentale. Il est basé sur une méthode de corrélation modifiée permettant de diminuer l'erreur. Bien qu'existant, cet algorithme a dut être paramétré pour notre problème. Il fournit pour chaque point de mesure 3 descripteurs :

1. Une estimation de la fréquence fondamentale f_0 .
2. L'énergie du signal sonore Pwr .
3. Un coefficient de fiabilité de f_0 : a_0 (Une note bien reconnue donne a_0 faible).

Les notes sont ainsi repérées en imposant un seuil minimum sur le coefficient : $\frac{Pwr}{a_0}$.

Chapitre 5

Résultats

Important : Dans cette partie, tous les paramètres de contrôle sont de haut niveau.

5.1 Cartographie dans l'espace des paramètres de contrôle de haut niveau

Compte tenu du nombre de point mesuré, l'espace des commandes de haut niveau est difficile à observer mais laisse déjà entrevoir les différentes zones où se concentrent les fréquences (Voir 5.1).

Un histogramme des fréquences reconnues a été calculé (Voir Fig. 5.2). On y retrouve les pics des impédances acoustiques vus dans la première partie (2.2).

Les pics de l'histogramme correspondent aux pics de l'impédance exposé dans la partie 2.1 . La figure 5.3 montre une cartographie particulière à X_{L2} fixé à -1.885. On y retrouve :

- Les zones de fréquences correspondants aux pics de l'histogramme.
- Les zones d'extinction du son.
- Les zones propices aux notes rugueuses.

La figure 5.4 montre l'exemple du troisième pic (360 hertz) pour toutes les valeurs de $(\tilde{X}_T, \tilde{X}_{L1}, \tilde{X}_{L2})$. Cet exemple met en évidence plusieurs points :

- Les fréquences semblent former des surfaces dans l'espace des commandes de haut niveau.
- S'éloigner de la surface dans le sens croissant de X_T^* augmente la fréquence. ce qui correspond bien aux observations faites dans la partie ??.
- La première vue laisse apparaître une symétrie qui correspondrait au fonctionnement de chacune des lèvres.

5.2 Étude vis à vis des capteurs

Nous pouvons, grâce aux capteurs de la bouche artificielle, obtenir des informations pertinentes sur son état lorsqu'un son est émit. Par exemple, la figure 5.5 montre une séparation faite en étudiant les deux cas $P_{L1} > P_{L2}$ et $P_{L1} < P_{L2}$.

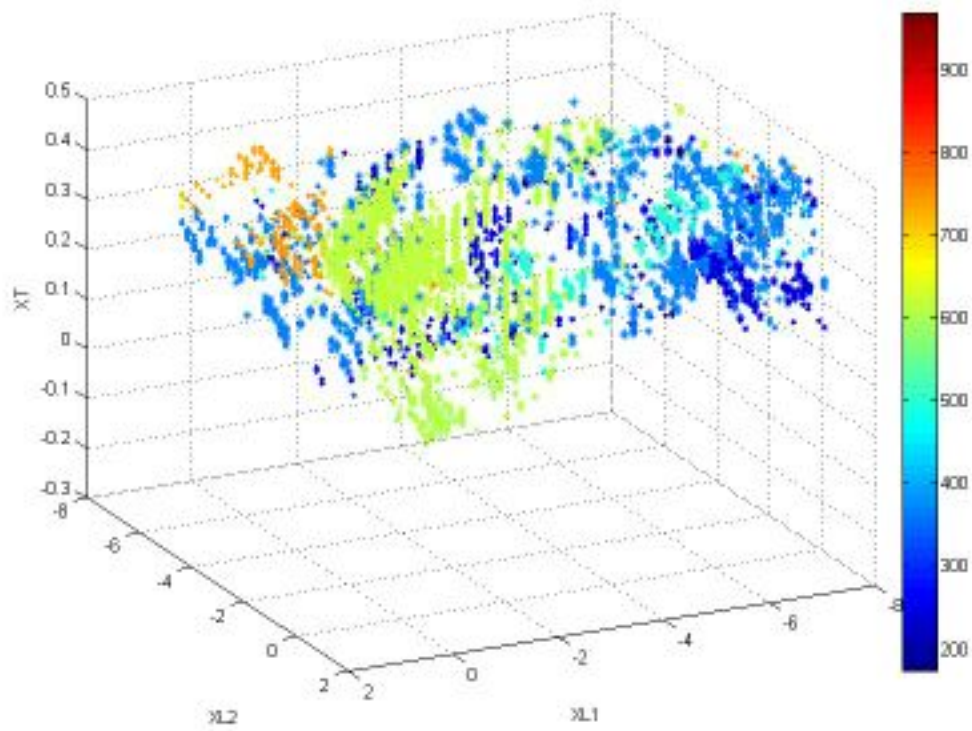


FIGURE 5.1 – Points de résonance dans l'espace des commande de haut niveau (X_T, X_{L1}, X_{L2}) : Échelle des fréquences

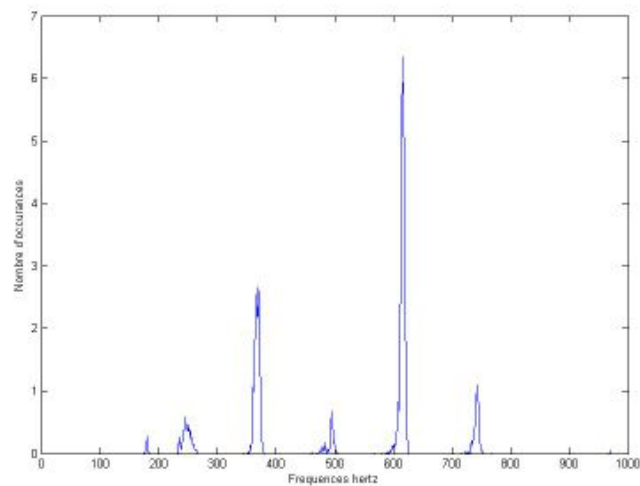


FIGURE 5.2 – Histogramme des Fréquences

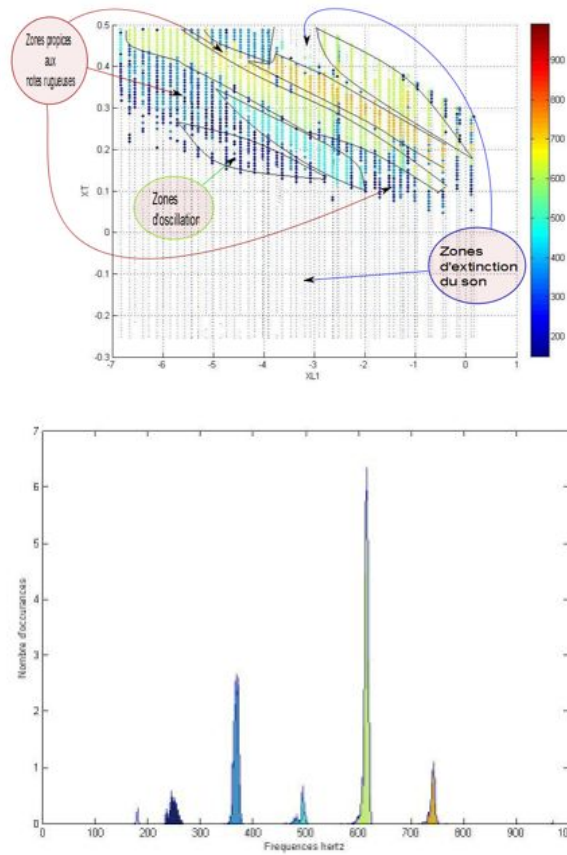


FIGURE 5.3 – Cartographie pour $XL2 = -1.885$ et correspondance avec l'histogramme

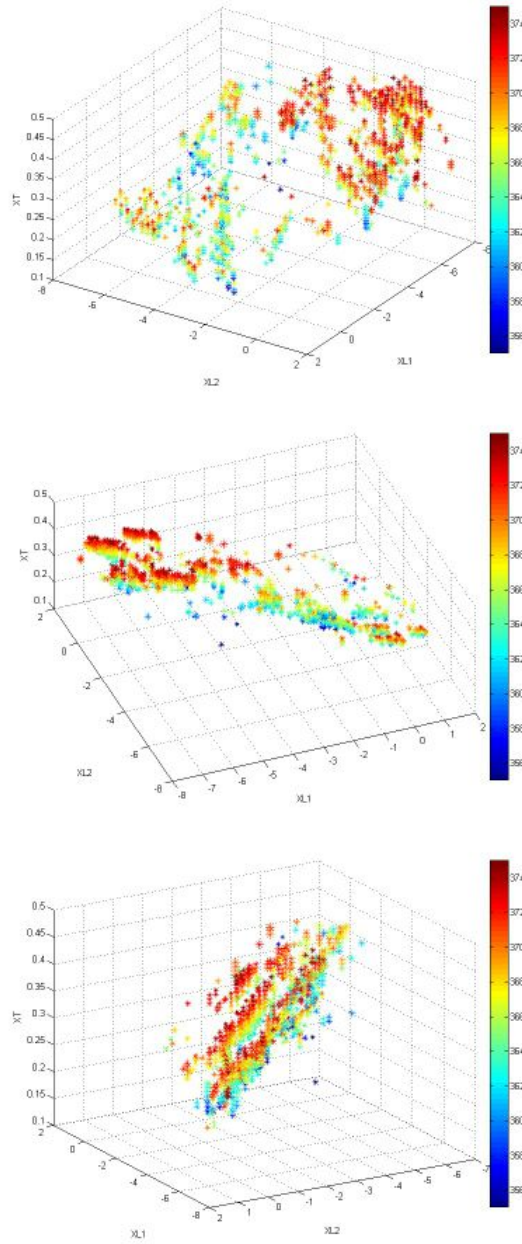


FIGURE 5.4 – (Commandes de haut niveau)Troisième pic 360 Hertz : 3 vues

Cela met en évidence les deux régimes de fonctionnements des deux lèvres observés sur la symétrie. Ainsi nous pouvons nous concentrer sur un régime en particulier, celui où $P_{L1} > P_{L2}$.

La figure 5.6 représente la force F sur l'embouchure en fonction des pressions internes des lèvres P_{L1} et P_{L2} . Nous pouvons faire plusieurs remarques :

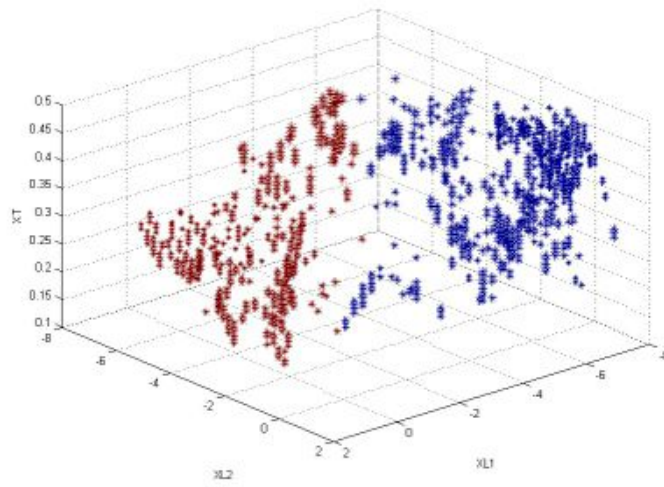


FIGURE 5.5 – Séparations des deux régimes de fonctionnement

- Les mesures forment une nouvelle fois une surface.
- En cohérence avec nos observations, une augmentation sur la force d'embouchure a tendance à augmenter la fréquence.

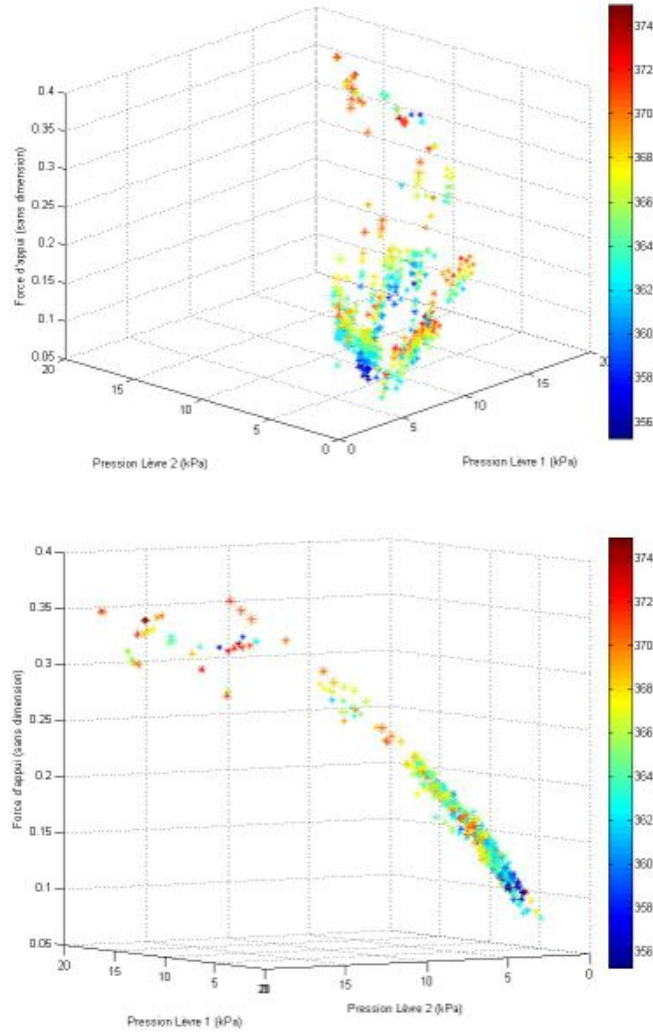


FIGURE 5.6 – Force sur l’embouchure en fonction des pressions de lèvre pour le pic à 360 Hertz dans son premier régime de fonctionnement.

Chapitre 6

Discussion et propositions pour la suite du stage

Dans un premier temps, cette première exploration nous montré que la calibration nous permettait d'exécuter une expérience de long durée sans nous soucier des éventuelles fuites. Nous avons aussi mis en évidence les zones d'oscillation sous forme de surface, ainsi que les deux régimes de fonctionnement. Une méthode d'analyse en composante principale a été développée pour utiliser toute l'information donnée par les mesures du robot. Celle-ci n'a pas donné de résultats concluants et n'a donc pas été exposée.

Voici le travail prévu concernant cette cartographie pour la fin du stage :

1. Maintenant que les zones d'oscillations ont été observé, nous pouvons effectuer des mesures plus précises. Je prévois donc une nouvelle cartographie autour des points d'intérêts. En plus des descripteurs YIN, nous utiliserons des descripteurs plus avancés fournis par l'Ircam¹ tel que le descripteur de son rugueux.
2. Je dois parvenir à extraire les informations importantes en améliorant notamment la méthode d'analyse en composante principale.
3. Toute cette étude s'est basée sur la première position des pistons de la trompette. Je dois donc mettre au point une méthode rapide de cartographie pour les autres positions.
4. Je dois finalement utiliser cette cartographie pour jouer une mélodie basique avec la bouche artificielle robotisée.

1. Ircam Descriptors

Troisième partie

Estimation de paramètres de modèle
physique

Chapitre 7

Modèle stochastique et problème posé

Parmi les approximations vues dans la partie ??, la plus simple n'a pas pu être validé. Il m'a donc été proposé d'étudier une méthode de vraisemblance sur le second modèle. La question fondamentale est : Est-il possible de mettre au point une méthode permettant d'estimer les paramètres de la lèvre à partir des signaux recueillis sur le robot ? Et quels sont les paramètres judicieux à prendre en compte ? Toute la partie qui suit se base sur le protocole suivant :

1. Une calibration est faite au début puis toutes les 5 minutes.
2. Le haut-parleur injecte un bruit acoustique dans la bouche.
3. Pour chaque position ($\tilde{X}_{L1}, \tilde{X}_{L2}$ et \tilde{X}_T), on mesure P_B , P_E et I_E ¹.

7.1 Modèle initial

Dans sa plus simple représentation, le modèle peut s'exprimer comme une équation différentielle du second ordre à coefficient constant :

$$m\ddot{x} + a\dot{x} + k(x - x_e) = A_B p_B + A_E p_E \quad (7.1)$$

Avec m la masse, a l'amortissement, k la constante de raideur, A_B et A_E des constantes du système², p_B et p_E les signaux de pression et x_e la position à l'équilibre. Les conditions initiales sont : $x(0) = x_e$ et $\dot{x}(0) = 0$. Dans le soucis d'une implémentation future, il est nécessaire de prendre en compte une hypothèse supplémentaire : Dans notre cas, le déplacement x n'est pas mesuré directement, en effet il est acquis par le biais d'un capteur optique infrarouge. Une lumière infrarouge est projetée depuis l'intérieur de la bouche. L'intensité mesuré y depuis l'embouchure nous donne une image du déplacement x . Nous pouvons finalement exprimer le modèle initial³ :

$$\begin{cases} m\ddot{x} + a\dot{x} + k(x - x_e) = A_B p_B + A_E p_E \\ y = \kappa x \end{cases} \quad (7.2)$$

1. Les pressions de bouche et d'embouchure ainsi que l'intensité lumineuse image de l'ouverture des lèvres.
2. dépendantes entre autres des géométries et des capteurs de pression
3. En première approximation, nous pouvons considérer comme proportionnelle la fonction de transfère du capteur optique.

Avec κ le gain du capteur optique.

7.2 Modèle centré

Il convient de centrer notre modèle. On pose :

$$\begin{cases} \tilde{x} = x - x_e \\ \tilde{y} = y - y_e \quad \text{avec } y_e = \kappa x_e \end{cases} \quad (7.3)$$

On a alors :

$$\begin{cases} m\ddot{\tilde{x}} + a\dot{\tilde{x}} + k\tilde{x} = A_B p_B + A_E p_E \\ \tilde{y} = \kappa \tilde{x} \end{cases} \quad (7.4)$$

7.3 Représentation d'état

Une autre manière de formaliser le problème est de l'exprimer sous forme matricielle. On pose $X = \begin{bmatrix} \tilde{x} & \dot{\tilde{x}} \end{bmatrix}^T$, $Y = \tilde{y}$ et $U = \begin{bmatrix} p_B & p_E \end{bmatrix}^T$, On a alors :

$$\begin{cases} \dot{X} = AX + BU \\ Y = CX \end{cases} \quad (7.5)$$

Avec $A = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -\frac{k}{m} & -\frac{a}{m} \end{bmatrix}$, $B = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ \frac{A_B}{m} & \frac{A_E}{m} \end{bmatrix}$ et $C = \begin{bmatrix} \kappa & 0 \end{bmatrix}$

7.4 Identification des paramètres du système idéal

En faisant l'hypothèse d'un système oscillant, nous pouvons réécrire les paramètres sous une forme plus adaptée. On pose alors : $\frac{k}{m} = \omega^2$, $\frac{a}{m} = -2\omega\xi$, $\frac{A_B}{m} = \alpha_B$ et $\frac{A_E}{m} = \alpha_E$. On a donc ainsi le système :

$$\begin{cases} \ddot{\tilde{x}} - 2\omega\xi\dot{\tilde{x}} + \omega^2\tilde{x} = \alpha_B p_B + \alpha_E p_E \\ \tilde{y} = \kappa \tilde{x} \end{cases} \quad (7.6)$$

Où ξ est le coefficient d'amortissement du système et ω est sa pulsation de résonance. Les paramètres à estimer⁴ sont alors :

$$\Theta_{idéal} = \{\xi, \omega^2, \alpha_B, \alpha_E, \kappa, y_e\}$$

4. Les paramètres $\{\kappa, y_e\}$ peuvent éventuellement être mesurés indépendamment.

7.5 Modèle de mesure : Modèle stochastique

Afin de nous approcher d'un modèle réel utilisable dans le cas d'une expérimentation concrète, il est nécessaire d'intégrer un modèle de bruit de mesure à notre système. Ce bruit a été choisi comme gaussien, blanc et appliqué au signal d'observation \tilde{y} . Avec $e \sim N(\mu, \sigma^2)$ et \hat{y} signal réel observé. Cela augmente ainsi le nombre de paramètres du système :

$$\Theta_{stochastique} = \{\xi, \omega^2, \alpha_B, \alpha_E, \kappa, y_e, \mu, \sigma^2\}$$

7.6 Hypothèses additionnelles

Nous pouvons dans un premier temps choisir $\mu = 0$. En effet, \hat{y} est invariant par changement de variable : $(y_e, \mu) \rightarrow (y_e + \mu, 0)$. Autrement dit, dans notre problème, la paire (y_e, μ) n'est pas identifiable. Enfin, on considère σ comme déterministe.

$$\Theta_{final} = \{\xi, \omega^2, \alpha_B, \alpha_E, \kappa, y_e, \mu, \sigma^2\}$$

Chapitre 8

Méthode proposée

8.1 Discrétisations du problème : Mise sous forme d'un signal Auto-régressif

Les données recueillies par notre système sont échantillonnées. Il est donc d'un intérêt capitale de discrétiser notre modèle. Pour se faire, nous avons choisi d'approximer la dérivé par la transformée bilinéaire.

$$\dot{x}(t) \xrightarrow{\text{Labplace}} sx(s) \quad (8.1)$$

$$s \longrightarrow \frac{2}{T} \frac{1 - z^{-1}}{1 + z^{-1}} \quad (8.2)$$

T est la période d'échantillonnage. D'où

$$\dot{x}(t) \longrightarrow \frac{2}{T} \frac{1 - z^{-1}}{1 + z^{-1}} x[n] \quad (8.3)$$

En remplaçant dans le modèle exposé avec l'équation 7.4 et en considérant $\tilde{x} \longrightarrow x[n]$ pour alléger les notations, on a :

$$x[n] + \lambda_1 x[n-1] + \lambda_2 x[n-2] = r_B \check{P}_B[n] + r_E \check{P}_E[n] \quad (8.4)$$

Avec

$$\check{P}_B = P_B[n] + 2P_B[n-1] + P_B[n-2]$$

$$\check{P}_E = P_E[n] + 2P_E[n-1] + P_E[n-2]$$

$$\lambda_1 = \frac{2\omega^2 - 8/T^2}{4/T^2 - 4\omega\sigma/T + \omega^2}$$

$$\lambda_2 = \frac{\omega^2 + 4\omega\sigma/T + 4/T^2}{4/T^2 - 4\omega\sigma/T + \omega^2}$$

$$r_B = \frac{A_B}{4/T^2 - 4\omega\sigma/T + \omega^2}$$

$$r_E = \frac{A_E}{4/T^2 - 4\omega\sigma/T + \omega^2}$$

Remarque : Quand $T \rightarrow 0$ on remarque que $(\lambda_1, \lambda_2, r_B, r_E)$ tendent vers une solution dégénérée :

$$(\lambda_1, \lambda_2, r_B, r_E) \rightarrow (-2, 1, 0, 0)$$

Il est donc primordiale de maîtriser l'équilibre entre la fréquence d'échantillonnage et ω , c'est à dire d'avoir une première estimation de la pulsation. Une méthode possible serait d'agir par itération.

8.2 Méthode générale

Le paragraphe précédent nous à montré que notre modèle discretisé pouvait être envisagé comme auto-régressif d'ordre 2 en considérant le bruit additif du paragraphe 7.5. Nous allons voir une méthode d'estimation de paramètre par maximum de vraisemblance généralisée pour un modèle AR d'ordre K.

[Schéma AR + bruit]

Le filtre Auto-régressif que l'on cherche à identifier est $A(z)^{-1}$ avec $A(z) = \sum_{k=0}^K a_k z^{-k}$ et $a_0 = 1$. On cherche également à identifier les coefficients r_B et r_E . On a l'équation aux différences suivante :

$$\forall n \in \mathbb{Z} \sum_{k=0}^K a_k x_{n-k} = r_B P_{B,n} + r_E P_{E,n} + e_n \quad (8.5)$$

On pose $\theta = (a_1, a_2, \dots, a_K, r_B, r_E)$. L'horizon d'observation est de N échantillons : $D_N = (x_1 \dots x_N, P_B[1] \dots P_B[N], P_E[1] \dots P_E[N])$. Les signaux sont considérés comme nuls hors de cet horizon. Nous allons maximiser la vraisemblance des paramètres, c'est à dire la probabilité des observations pour les paramètres du modèle, soit :

$$\begin{aligned} P(D_N|\theta) &= P(x_N, P_{B,N}, P_{E,N} | D_{N-1}, \theta) P(D_{N-1}|\theta) \\ &= P(e_N | D_{N-1}) P(D_{N-1}|\theta) \\ &= P(e_N | D_{N-1}, \theta) P(e_{N-1} | D_{N-2}, \theta) P(D_{N-2}|\theta) \\ &= \dots \\ &= \prod_{n=1}^N P(e_n | D_{n-1}, \theta) \end{aligned} \quad (8.6)$$

Or $P(e_n | D_{n-1}, \theta) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{e_n^2}{2\sigma^2}}$ avec $e_n = \sum_{k=0}^K a_k x_{n-k} - r_B P_{B,n} - r_E P_{E,n}$. On doit donc maximiser :

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

On pose $Q = \sum e_n^2$. Maximiser cette probabilité revient à minimiser l'anti-log-vraisemblance :

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

On cherche donc finalement à minimiser :

$$Q(\theta) = \sum_{n=1}^N \left(x_n + \sum_{k=1}^K a_k x_{n-k} - r_B P_{B,n} - r_E P_{E,n} \right)^2$$

Nous allons donc annuler les dérivées partielles de Q par rapport à chacun des paramètres (voir annexe ??).

Notation : Soient X_n et Y_n deux signaux, on note :

1. *Auto-corrélation* : $\forall k \in \mathbb{Z}, R_{XX}(k) = \sum_{n=1}^N X_n X_{n-k}$

2. *Inter-corrélation* : $\forall k \in \mathbb{Z}, R_{XY}(k) = \sum_{n=1}^N X_n Y_{n-k}$

3. *On note également* : $\underline{X} = \begin{pmatrix} X_1 \\ \vdots \\ X_N \end{pmatrix}$

4. *Et enfin* :

$$R^{-1} = \begin{pmatrix} R_{xx}(0) & \cdots & \cdots & R_{xx}(K-1) \\ \vdots & \cdots & \cdots & \vdots \\ \vdots & \cdots & \cdots & \vdots \\ R_{xx}(K-1) & \cdots & \cdots & R_{xx}(0) \end{pmatrix}$$

on obtient les trois équations suivantes :

$$\underline{a} = R(r_B \underline{R}_{P_B x} + r_E \underline{R}_{P_E x} - \underline{R}_{xx}) \quad (8.7)$$

$$A = \frac{1}{R_{P_B P_B}(0)} (R_{P_B x}(0) - r_E R_{P_B P_E}(0) + \underline{R}_{P_B x}^T \underline{a}) \quad (8.8)$$

$$B = \frac{1}{R_{P_E P_E}(0)} (R_{P_E x}(0) - r_B R_{P_E P_B}(0) + \underline{R}_{P_E x}^T \underline{a}) \quad (8.9)$$

Finalement, ces trois équations donnent accès aux coefficients recherchés : \underline{a} , r_B et r_E (voir annexe ??).

Chapitre 9

Premiers résultats sur signaux de synthèse

Jusqu'à présent, la méthode de vraisemblance n'a été testée que sur des signaux de synthèse. En effet, compte tenu du planning, de la validation récente de la calibration et du capteur optique non calibré, l'expérimentation réelle a été reportée pour la fin de stage. Cependant pour valider théoriquement cette méthode, nous avons effectué un certain nombre de mesure sur des signaux synthétiques.

9.1 Signal Synthétique

On choisit les coefficients du filtre AR : $a_0 = 1, a_1 = -0.2, a_2 = 1$ et les coefficients $r_B = 0.3$ et $r_E = 0.6$. Soit P_B et P_E des bruits blancs gaussiens. On ajoute un bruit de mesure e_n . On filtre ensuite le signal $r_B P_B + r_E P_E + e_n$ par AR pour obtenir le signal de synthèse x .

9.2 Méthode et résultats

On applique la méthode de vraisemblance sur les signaux : P_B, P_E et x avec un rapport signal sur bruit variant de -30 à 100 dB. Le nombre d'expériences effectuées est de 1000. On calcule alors pour chaque paramètre le biais et la variance de l'erreur. (cf. Fig. 9.1 & 9.2) On remarque que pour un SNR élevé, le biais tend vers 0. Cependant, pour un SNR inférieur à 60 dB, le résultat se dégrade largement. Pour conclure, même si l'algorithme semble fonctionner, il faudra veiller à avoir un rapport signal sur bruit élevé dans un cas réel.

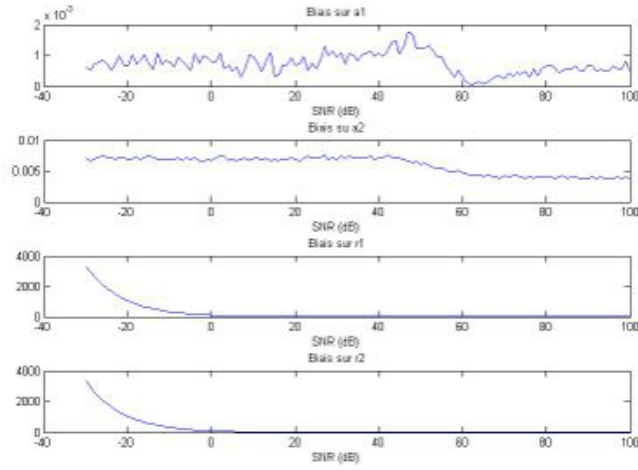


FIGURE 9.1 – Biais des paramètres estimés en fonction du rapport signal sur bruit

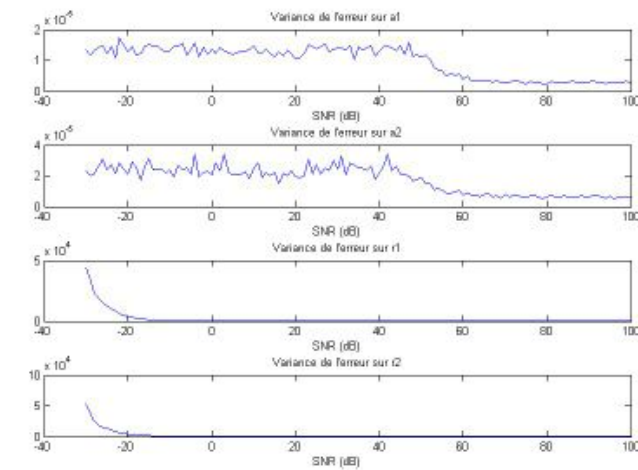


FIGURE 9.2 – Variance de l'erreur des paramètres estimés en fonction du rapport signal sur bruit

Conclusion

Contribution

Pendant cette première partie de stage, J'ai contribué à mettre au point une méthode de calibration efficace permettant une utilisation de la bouche artificielle robotique en banc d'essai. D'un point de vu technique, la calibration a été complètement automatisé. J'ai également programmé et effectué les premières cartographies. Pour cela, j'ai avec l'aide du technicien mis au point le système de prise de son et de synchronisation avec le robot. D'un autre coté, j'ai élaboré une méthode d'estimation par maximum de vraisemblance. Même si cela n'a pas été exposé dans ce rapport, j'ai étudié différents modèles pour relier la pression d'eau des lèvres aux actions qu'elles subissent. Enfin, j'ai également commencé à étudier une modélisation thermodynamique possible de l'alimentation pneumatique.

Problèmes rencontrés

Durant cette première partie de stage, j'ai été confronté à de nombreux problèmes. J'ai passé un certain temps à apprendre à utiliser simulink pour la programmation du robot. Les PID des asservissements ont été à nouveau réglé avec la technique de pompage, en effet le vieillissement du robot a rendu ces derniers instables. La calibration du système optique pose encore des problèmes aujourd'hui : Ce système présente des non linéarités causées par ne nombreuses réflexions dans la bouche.

Perspectives

Dans le mois restant

Dans ce dernier mois je prévois de :

1. Tester la méthode de vraisemblance sur le robot.
2. Améliorer la cartographie avec d'autre descripteur de son.
3. Trouver une méthode de cartographie rapide.
4. Faire jouer le robot grâce à cette cartographie.
5. Si le temps de permet : travailler sur un modèle thermodynamique de lèvres.

A plus long terme

Dans la suite de la vie du robot, il sera intéressant de :

1. Étudier la commande de l'électro-vanne et son influence sur le son.
2. Programmer une calibration automatique en temps réel.
3. Élaborer une technique de jeu plus fine avec des nuances précises.

Bibliographie

- [1] C.-A. Macaluso and J.-P. Dalmont.
Trumpet with near-perfect harmonicity : Design and acoustic results.
JASA, 129(1) :404–414, 2011.
- [2] B.Véricel.
Confrontation théorique/expérimentale de caractéristiques d'excitation dans le jeu des cuivres. Stage M2R ATIAM
- [3] A. Almeida et al.
Clarinet parameter cartography : automatic mapping of the sound produced as a function of blowig pressure and reed force. ISMA 2010.
- [4] F.Silva.
Emergence des auto-oscillations dans un instrument de musique à anche simple. Thèse, 2009.
- [5] J.Gilbert, S.Ponthus.
Articial buzzing lips and brass instruments : Experimental results. *JASA*,104 :1627,1998.
- [6] T.Hélie.
Etude de methodes d'estimation des paramètres d'un modèle physique d'instrument de musique - Application à la trompette. Stage DEA Ircam 1998.