

# Etude du registre altissimo des saxophones

Jeanne Clerc-Renaud

Mars - Juin 2004

Mémoire de stage  
de DEA Acoustique, Traitement du signal, Informatique  
Appliqués à la Musique, 2003-2004  
Université Pierre et Marie Curie Paris VI  
Laboratoire d'Acoustique Métrologie et Instrumentation  
Responsable de stage : Vincent Gibiat





# Résumé

Ce rapport présente une étude menée sur différents doigtés de notes suraiguës aux saxophones alto et baryton. Le travail repose d'une part sur les commentaires d'instrumentistes à propos de ces doigtés, d'autre part sur les mesures d'impédance d'entrée de l'instrument pour chaque doigté des registres normal et altissimo. Grâce à la modélisation des effets de l'ensemble anche-lèvres-pince sur l'impédance d'entrée du saxophone, on montre l'importance déterminante des paramètres de raideur, de surface vibrante et de masse vibrante pour l'obtention d'une note suraiguë à la fréquence fondamentale attendue. L'étude permet de démontrer l'aberrance de certains doigtés pourtant proposés dans les méthodes d'apprentissage.

# Abstract

This report presents a study lead on various fingerings of notes from the altissimo register using alto and baritone saxophones. This work is based, on the first hand, on the remarks of instrumentists about these fingerings, and on the other hand, on the input impedance measurement of the instruments for each of the fingerings of the normal and altissimo registers.

Thanks to the modelling of the effects of the system "sheer-lips-pinch" on the input impedance of the saxophone, we show the importance of the stiffness, vibrating surface and vibrating mass parameters to get a high note at the expected fundamental frequency. The study permits to demonstrate the none sens of some fingerings which, nonetheless, are proposed in the learning methods.

# Remerciements

Ce travail a été réalisé au Laboratoire d'Acoustique de Métrologie et d'Instrumentation (L.A.M.I., Bat 3R1B2-3è étage, 118, route de Narbonne, 31062 Toulouse).

Je tiens à remercier Vincent Gibiat pour m'avoir accueillie dans son laboratoire, pour m'avoir encadrée tout au long de ce stage, et pour les connaissances qu'il m'a apportées. Il a su me laisser une grande liberté d'action tout en guidant mes travaux.

Ma reconnaissance va à Gilles Tressos, saxophoniste et essayeur de la société Selmer, qui a mis à ma disposition des anches de saxophone baryton, ainsi que ses connaissances sur le registre altissimo. Le travail qu'il a effectué avec Vincent Gibiat et ses commentaires sur les doigtés de suraigus me furent infiniment utiles.

Je tiens également à remercier mon ami Marc Baron, saxophoniste, élève du département jazz et de la classe d'improvisation générative du CNSM de Paris, pour avoir pris le temps et le soin de tester tous les doigtés de suraigus et de me faire ses commentaires détaillés sur chacun d'eux.

Je remercie l'ensemble des membres (chercheurs, thésards, post-doc, stagiaires) du L.A.M.I., pour leur sympathie, leurs conseils et leur accueil si convivial.

Enfin, je remercie Claudia Fritz et Christophe Vergez pour leurs conseils, ainsi que mes collègues et amis Aude Lizée, Paola Ricciardi et Valentin Emiya, pour leur aide et leur soutien.

# Table des matières

<b>Résumé/Abstract</b>	<b>2</b>
<b>Introduction</b>	<b>6</b>
<b>1 Doigtés des différents suraigus et cadre de l'étude</b>	<b>7</b>
1.1 Rappels historiques . . . . .	7
1.1.1 Invention du saxophone . . . . .	7
1.1.2 Evolution de la tessiture . . . . .	8
1.1.3 Registre suraigu . . . . .	8
1.2 Avis des musiciens . . . . .	10
<b>2 Mesure de l'impédance d'entrée</b>	<b>11</b>
2.1 Méthode et protocole expérimental . . . . .	11
2.2 Baryton . . . . .	13
2.2.1 Registre normal . . . . .	13
2.2.2 Registre suraigu . . . . .	14
2.3 Alto . . . . .	17
2.3.1 Registre normal . . . . .	17
2.3.2 Registre suraigu . . . . .	19
2.4 Comparaison Baryton/Alto . . . . .	19
<b>3 Influence de l'anche</b>	<b>21</b>
3.1 Mise en série d'un cylindre . . . . .	21
3.2 Mise en parallèle d'un cylindre . . . . .	23
3.3 Etude générale des solutions . . . . .	32
3.4 Modélisation de l'anche par un système masse, ressort, amorfisseur . . . . .	33
3.4.1 Détermination de paramètres . . . . .	33
3.4.2 Réponse de l'anche . . . . .	40
3.4.3 Conclusion . . . . .	43

<b>Conclusion</b>	<b>45</b>
<b>Annexes1</b>	<b>46</b>
Clés utilisées au saxophone . . . . .	46
Doigtés de suraigus . . . . .	46
Doigtés de Fa# . . . . .	47
Doigtés de Sol . . . . .	54
Doigtés de Sol# . . . . .	63
Doigtés de La . . . . .	75
<b>Annexes1</b>	<b>87</b>
Calcul de l'impédance d'entrée d'un cylindre ouvert-fermé . . . . .	87

# Introduction

L'impédance acoustique ramenée à l'entrée d'un instrument à vent ou les grandeurs dérivées (coefficient de réflexion dans le domaine fréquentiel et fonction de réflexion dans le domaine temporel) sont à ce jour les paramètres principaux utilisés tant en modélisation physique qu'en analyse des comportements acoustiques des instruments à vent.

La mesure de l'impédance d'entrée est aujourd'hui de routine et s'effectue en quelques secondes permettant ainsi une exploration systématique des pratiques instrumentales liées aux registres normaux des instruments mais aussi aux pratiques contemporaines telles que sons multiples et registres suraigus.

Si dans le registre fondamental de l'instrument et dans une moindre mesure dans le second registre (octave pour les instruments coniques et douzième pour les instruments cylindriques), la compréhension des phénomènes régissant l'oscillation périodique de l'instrument sur une hauteur donnée et leur connexion avec l'impédance d'entrée semblent a priori bien réalisées, ce n'est pas le cas pour les autres pratiques. Ainsi le suraigu du saxophone aujourd'hui d'utilisation courante pose de nombreux problèmes pour l'interprétation des mesures d'impédance. Les doigtés utilisés semblent peu stabilisés, le recours à des artifices de facture (clés d'harmoniques...), engendre des surpoids de l'instrument ou des difficultés de réalisation.

On se propose dans un premier temps d'effectuer une série de mesures systématiques sur les doigtés connus pour deux instruments de la famille du saxophone, en liaison avec la pratique quotidienne d'un musicien. On cherchera ensuite les parties imaginaires et réelles solutions telles que la fréquence des pics d'impédance de la note jouée soit égale à la fréquence des pics de deux impédances en parallèle, dont l'impédance mesurée. On verra ensuite comment relier ces mesures d'impédance d'entrée à l'influence de l'impédance et la raideur d'anche ainsi que sa masse et sa surface vibrante.

# Chapitre 1

## Doigtés des différents suraigus et cadre de l'étude

### 1.1 Rappels historiques

#### 1.1.1 Invention du saxophone

Le mot saxophone veut dire 'son de Sax'. Antoine Joseph Sax dit « Adolphe » naît le 6 novembre 1814 à Dinant. Initié à la facture instrumentale par son père, Charles Joseph Sax, facteur d'instrument de musique, il étudie la clarinette avec Bender, chef de musique du régiment des Guides à Bruxelles. C'est en travaillant avec cet instrument qu'il se rendit compte de ses imperfections de l'époque, et il l'améliora par de nombreux brevets. Ses travaux lui valent les encouragements de nombreuses personnalités étrangères. Il démontre que le timbre d'un instrument est déterminé par les proportions données à la colonne d'air formée dans l'instrument : c'est à partir de cette loi qu'il perfectionne et complète la famille des instruments à vent.

C'est dans les ateliers paternels qu'il est chargé de diriger à Bruxelles, qu'il « invente » un instrument à vent qui « par le caractère de sa voix pût se rapprocher des instruments à cordes, mais qui possédât plus de force et d'intensité que ces derniers ». Ainsi est né le « saxophon », instrument à vent en cuivre de la famille des bois (en raison de son anche). Le brevet d'invention française semble dater du 21 mars 1846 mais l'instrument était déjà au point bien avant cette date. En effet, c'est dans une oeuvre d'Hector Berlioz, le 3 février 1844, que le saxophone apparut pour la première fois en concert. Georges Bizet fut le premier à employer l'alto dans « l'Arlésienne » en 1873. Longtemps, les saxophones furent surtout utilisés dans les musiques militaires[1].

### 1.1.2 Evolution de la tessiture

Sax avait originellement conçu la famille des saxophones en deux groupes, qui s'étendaient du soprano au contrebasse : le groupe orchestral en Fa et en Ut, et le groupe militaire alternant en Sib et en Mib. Le brevet indique que le saxophone était de registre grave ; selon Berlioz, en 1843, "la plus belle voix grave connue à ces jours". Berlioz décrit plus spécifiquement le premier saxophone comme un instrument à transposition en Sib, dont la tessiture va du contre Si à l'Ut2, incluant les tons chromatiques. On note que Berlioz cite ainsi un registre de plus de trois octaves, ce qui implique un autre changement dans le fonctionnement du saxophone depuis son invention : en effet, en 1855, Berlioz, dans son traité sur l'instrumentation et l'orchestration moderne, a réduit le registre à deux octaves et demi. Peu à peu, les instruments destinés à l'orchestre disparaissent, et la grande popularité de l'alto en Mib, plus disposé à une certaine virtuosité, plus petit et moins couteux, favorise l'utilisation commune de cet instrument dans la musique de l'époque.

### 1.1.3 Registre suraigu

Si Berlioz entendait trois octaves de registre pour le premier saxophone, il semblerait que le registre suraigu était très peu exploité. En effet, la première méthode de saxophone, "Méthode complète et raisonnée de saxophone", publiée en 1845 par Kastner, présente des doigtés pour un registre allant du Si au Fa3. De plus, pour promouvoir son instrument, Sax publia 35 compositions de ses contemporains comme Arban, Demersseman, Klosé et Singelée, écrites pour le saxophone, et dont les notes s'étendent du Si au Fa3. "Sax était évidemment conscient que le saxophone pouvait produire des sons au delà du Fa aigu. Bien que ces notes ne figurent dans aucune de ses publications, il est possible que Sax enseignait les notes 'altissimo' à ses élèves les plus avancés. Il n'est pas déraisonnable de penser que ces mêmes élèves aient pu employer quelques notes suraiguës dans les dernières publications de Sax. Cependant, tout ceci n'est que supposition. Nous devons garder à l'esprit que les premiers témoignages sur les performances du saxophone insistent sur la couleur tonique fluide de l'instrument, et mentionnaient très rarement des performances techniques ou des acrobaties suraiguës."<sup>1</sup>

Le registre suraigu du saxophone est aujourd'hui largement utilisé et constitue un mode de jeu normal pour un instrumentiste ayant quelques années d'expérience. Les doigtés utilisés sont très variés selon les méthodes d'apprentissage. De fait, il existe parfois des contradictions entre certains doigtés.

---

<sup>1</sup>Bruce Ronkin, 'The Music for Saxophone and Piano Published by Adolph Sax', Ph.D.diss., University of Maryland(1987), pp.61-2.

Dans un travail précédent, Vincent Gibiat et Gilles Tressos ont montré que l'on pouvait distinguer deux catégories : Les doigtés harmoniques, obtenus avec des doigtés principalement issus du registre normal, et des doigtés spécifiques [2].

Les doigtés utilisés pour jouer les suraigus sont très nombreux et varient selon les musiciens, les méthodes, les écoles. Nous étudierons ici quatre notes suraiguës seulement, Fa#, Sol, Sol# et La, qui sont les notes les plus communes parmi les notes du registre altissimo. Nous retiendrons pour notre étude 13 doigtés de Fa#, 18 doigtés de Sol, 24 doigtés de Sol#, et 23 doigtés de La. Ces doigtés, détaillés en annexe, proviennent d'un site internet : ([http://www.wfg.woodwind.org/sax\\_alt\\_4.html](http://www.wfg.woodwind.org/sax_alt_4.html)), ou ont été publiés par messieurs Claude Delangle [3] et Jean-Marie Londeix [4]. Notons que ces doigtés sont en général donnés dans les méthodes pour la famille des saxophones tout entière, et qu'il n'existe pas a priori, de doigtés spécifiques pour les différents instruments de la famille des saxophones. C'est au musicien de choisir parmi un choix de plusieurs doigtés celui qui lui conviendra le mieux. On s'intéressera à vérifier cette convention en fonction de l'étude de l'impédance d'entrée de chaque doigté pour l'alto et le baryton, et en fonction de l'avis de deux instrumentistes. La figure 1.1 présente toutes les clés du saxophone permettant de jouer les différents doigtés.

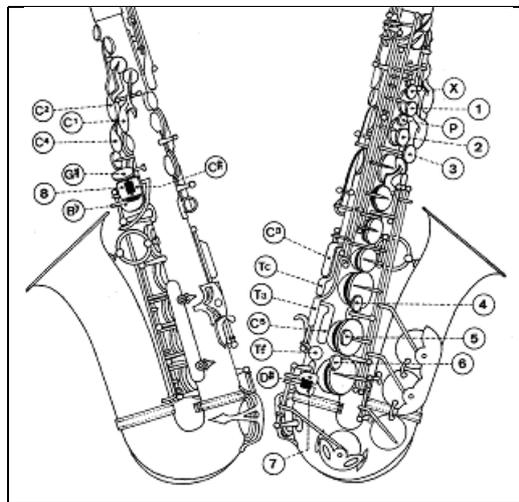


FIG. 1.1 – Clés du saxophone

Sur une portée en notes réelles, les différentes notes altissimo jouées à l'alto et au baryton et étudiées au cours de ce stage s'écrivent comme ceci :

	<i>Alto</i>				<i>Baryton</i>			
En Ut:	La	La#	Si	Do	La	La#	Si	Do
En Mib:	Fa#	Sol	Sol#	La	Fa#	Sol	Sol#	La

FIG. 1.2 – Notes réelles correspondant aux 4 suraigus étudiés à l'alto et au baryton

## 1.2 Avis des musiciens

Au cours de leur premier travail sur les suraigus du baryton, Vincent Gibiat et Gilles Tressos ont mesuré l'impédance d'entrée d'un saxophone baryton et Gilles Tressos a essayé tous les doigtés répertoriés pour les quatre notes étudiées ici [2]. Pour l'alto, j'ai demandé à Marc Baron, élève de 3ème année de la classe de jazz et de la classe d'improvisation générative du CNSM de bien vouloir me faire ses commentaires sur les doigtés à l'alto. Les commentaires des deux instrumentistes sur les différents doigtés de suraigus sont disponibles en annexe.

# Chapitre 2

## Mesure de l'impédance d'entrée

### 2.1 Méthode et protocole expérimental

Les mesures d'impédance sont réalisées avec la méthode TMTC (two-microphone-three-calibration), développée par V.Gibiat et F.Laloë en 1990 [5]. Cette méthode est particulièrement efficace pour sa rapidité et son insensibilité aux bruits acoustiques ambiants.

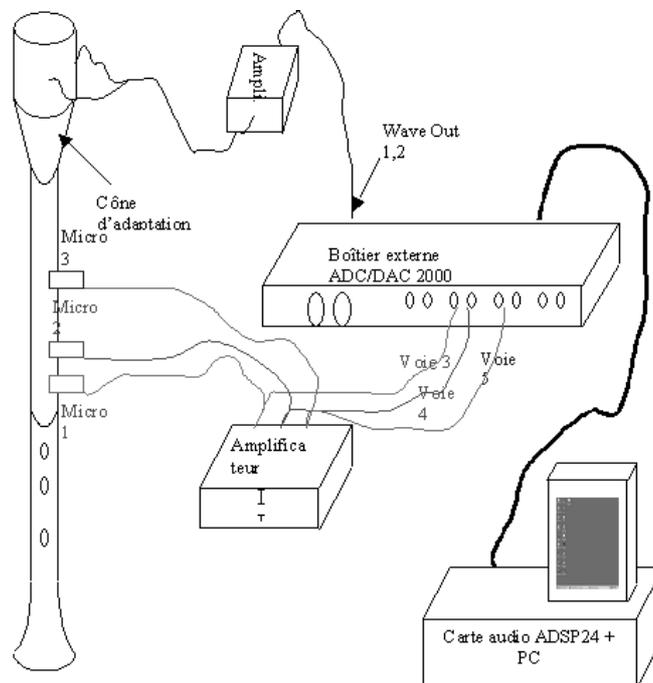


FIG. 2.1 – protocole expérimental

Les mesures ont été effectuées dans la salle de manipulation du LAMI sur les instruments de V. Gibiat.



FIG. 2.2 – Mesure d'impédance d'entrée d'un saxophone alto à l'aide de la méthode TMTC.

## 2.2 Baryton

### 2.2.1 Registre normal

Les mesures d'impédance d'entrée du baryton ont été réalisées préalablement par Vincent Gibiat et Gilles Tressos, pour tous les doigts du registre normal [2]. Les mesures sont étudiées avec le logiciel IMP, conçu par Didier Casserau pour le L.O.A et Renault. Voici une courbe d'impédance d'entrée de Fa medium (208Hz).

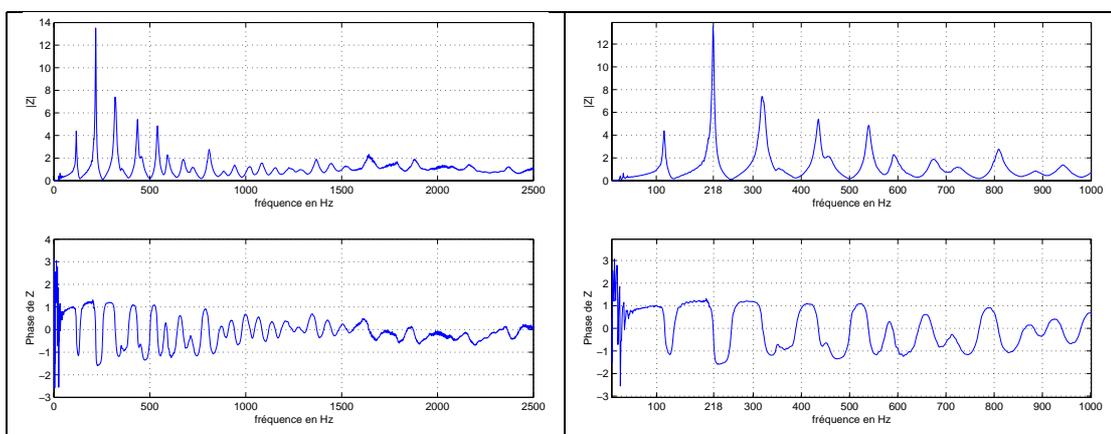


FIG. 2.3 – Courbe d'impédance d'entrée en module et en phase pour un Fa medium à 208 Hz, à deux échelles différentes.

Les courbes obtenues correspondent à nos attentes : la forme ressemble bien à une impédance de tuyau conique, avec le module du premier pic inférieur au second, puis une décroissance des autres modules en fonction de la fréquence, à partir du 2ème pic. On remarque cependant un décalage général de la courbe vers les hautes fréquences. Par exemple, la fréquence de la note jouée correspondant à la figure 2.3 est à 208 Hz au baryton, or le pic d'impédance est à 218 Hz. Ce phénomène se vérifie pour toutes les notes du registre normal. L'écart en cents du pic d'impédance par rapport à la fréquence théorique de chaque note est représenté dans la figure 2.4. On voit que les pics sont mesurés en moyenne entre 50 et 100 cents trop haut. Ce décalage par rapport aux fréquences théoriques des pics de la note jouée effectivement par le musicien est connu et peut s'expliquer par l'absence d'instrumentiste : pas d'effet d'anche, de lèvres, etc...

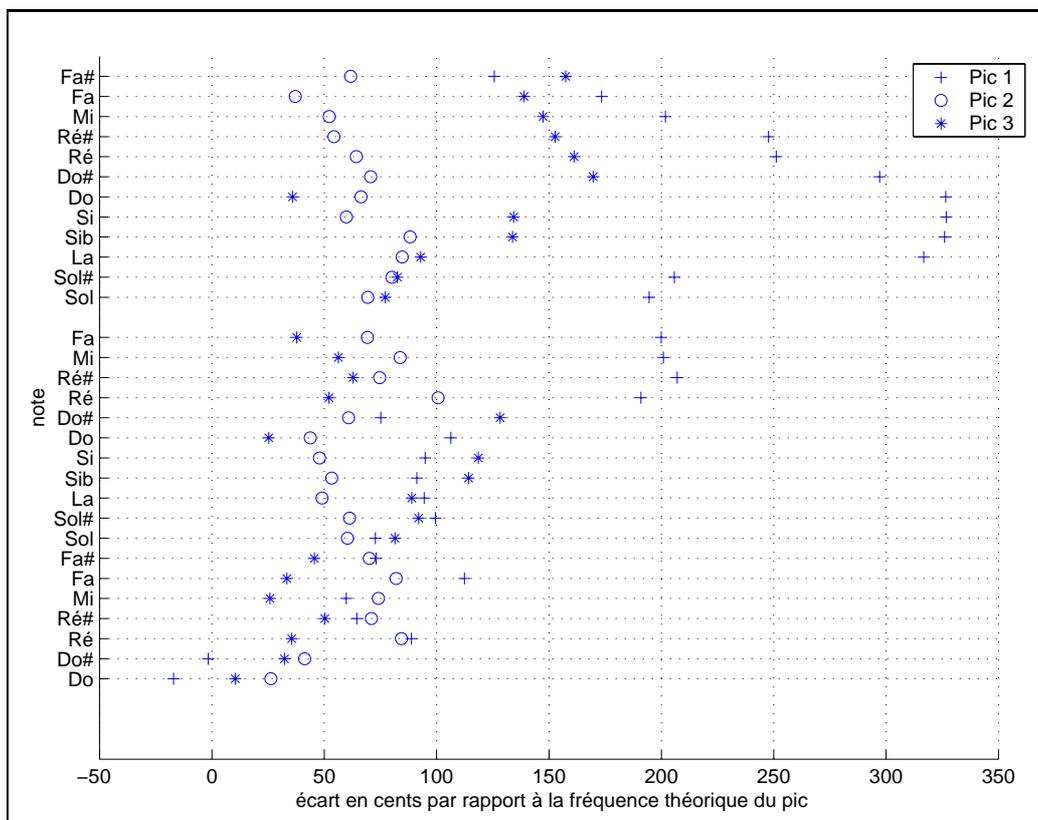


FIG. 2.4 – **Ecart en cents entre la fréquence théorique et la fréquence mesurée de chaque pic d’impédance. La fréquence fondamentale de la note jouée correspond au premier pic jusqu’au Do# inclus, puis au deuxième pic à partir du Ré.**

## 2.2.2 Registre suraigu

### Avis d’un instrumentiste

Pour le registre suraigu, on s’intéresse à 13 doigtés pour le Fa#, 18 doigtés pour le Sol, 24 doigtés pour le Sol# et 23 pour le La. Ces doigtés, qui proviennent tous de méthodes d’apprentissage du saxophone, ont été triés, et ne sont pas les seuls qu’il est possible de trouver dans ces ouvrages. Certains doigtés, trouvés notamment sur internet étaient complètement aberrants. Dans un premier temps, il est demandé à un instrumentiste d’essayer chaque doigté, et de nous faire part de ses commentaires. Pour le baryton, M Gilles Tressos, essayeur chez Selmer, a accepté de faire ce travail. On peut trouver en annexe le détail des différents commentaires qui en résultent.

## Remarques sur les différents doigtés

Comme le remarquent Vincent Gibiat et Gilles Tressos dans leur travail sur le baryton, on distingue deux types de doigtés [2]. Les premiers doigtés, appelés "harmoniques", dérivent des doigtés normaux, et consistent à émettre un partiel de la fondamentale correspondant au doigté en question. Physiquement, ce doigté correspond en général à une longueur déterminée de tuyau dont les trous latéraux sont fermés (il n'existe pas de "bout mort" ou de fourche).

Les seconds types de doigtés, au contraire, sont souvent des doigtés "en fourche", c'est-à-dire qu'il existe des bouts morts dans le tuyau, soit une alternance de trous latéraux bouchés et ouverts. La courbe d'impédance d'entrée correspondant à un tel doigté n'est pas harmonique, et les pics secondaires ne se trouvent pas à une fréquence multiple de la fréquence fondamentale (premier pic). Voici quatre figures qui montrent ces deux types de doigtés :

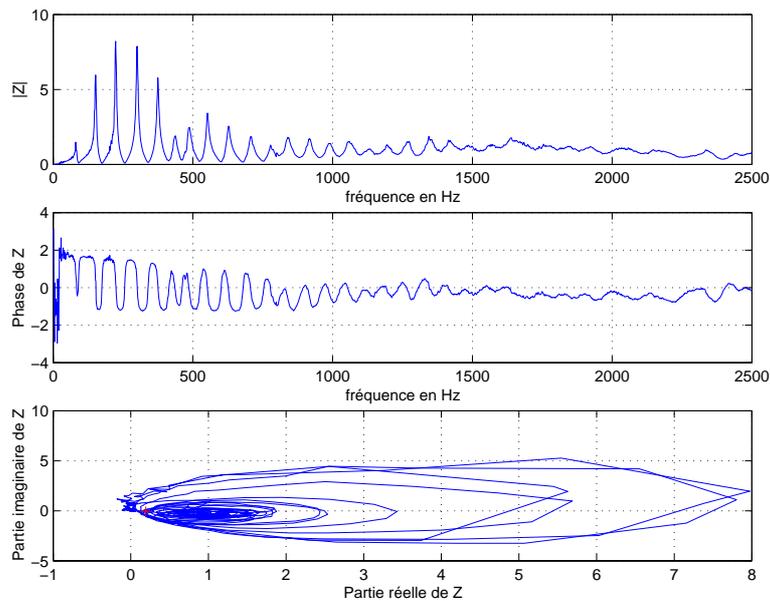


FIG. 2.5 – Courbe d'impédance d'entrée du baryton pour le doigté de La n° 13. Le doigté, T123B|123C, est également un doigté de Si grave (auquel on ajoute la clé d'octave), dont on attrape ici le 7ème partiel.

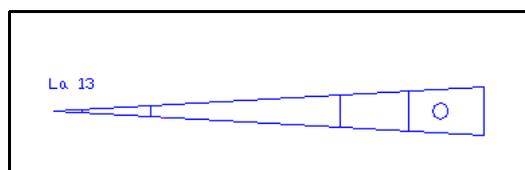


FIG. 2.6 – Position des trous ouverts pour le doigté de La n° 13. Pour ce doigté, tout le tuyau est fermé à l'exception d'un trou, proche du pavillon.

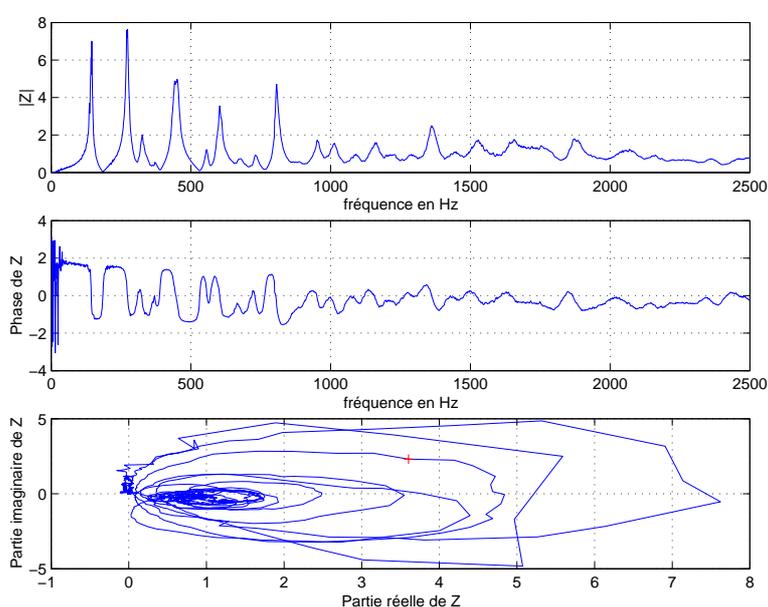


FIG. 2.7 – Courbe d'impédance d'entrée du baryton pour le doigté de Fa# n° 8. Le doigté, T1-3|1-, présente une fourche. Ce doigté n'est pas du tout utilisé dans le registre normal, et n'est donc pas qualifié de "harmonique".

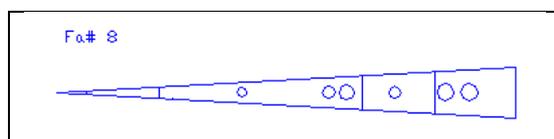


FIG. 2.8 – Position des trous ouverts pour le doigté de Fa# n° 8. On observe une alternance de trous bouchés et ouverts (doigté qui présente une fourche).

## 2.3 Alto

### 2.3.1 Registre normal

#### Courbes

On mesure l'impédance d'entrée d'un saxophone Selmer Serie III et d'un Selmer MarkVI (1972). Les courbes d'impédance d'entrée des deux modèles d'alto sont très proches. Nous nous intéresserons à celles du Série III.

Voici par exemple deux courbes obtenues pour un Fa# (440Hz au saxophone) :

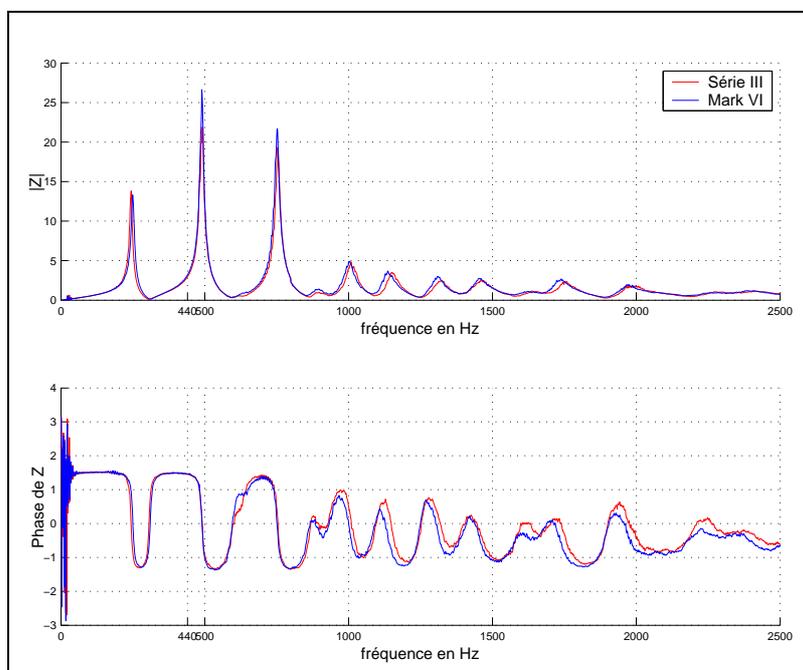


FIG. 2.9 – Impédance d'entrée d'un fa# 440 Hz à l'alto série III et au MarkVI

De manière générale, le phénomène observé au baryton est reproduit ici, mais l'écart par rapport à la fréquence fondamentale du son émis est plus important. Les pics d'impédance semblent se trouver en moyenne un demi ton trop haut. Par exemple sur la figure 2.9 représentant l'impédance d'entrée de deux saxophones altos, le doigté joué est celui d'un Fa# à 440 Hz, tandis que le pic mesuré se situe plutôt vers 500 Hz.

La figure 2.10 rend compte de l'écart en cents des deux premiers pics d'impédance par rapport à la fréquence théorique à laquelle ils devraient tomber, pour toutes les notes du registre normal à l'alto.

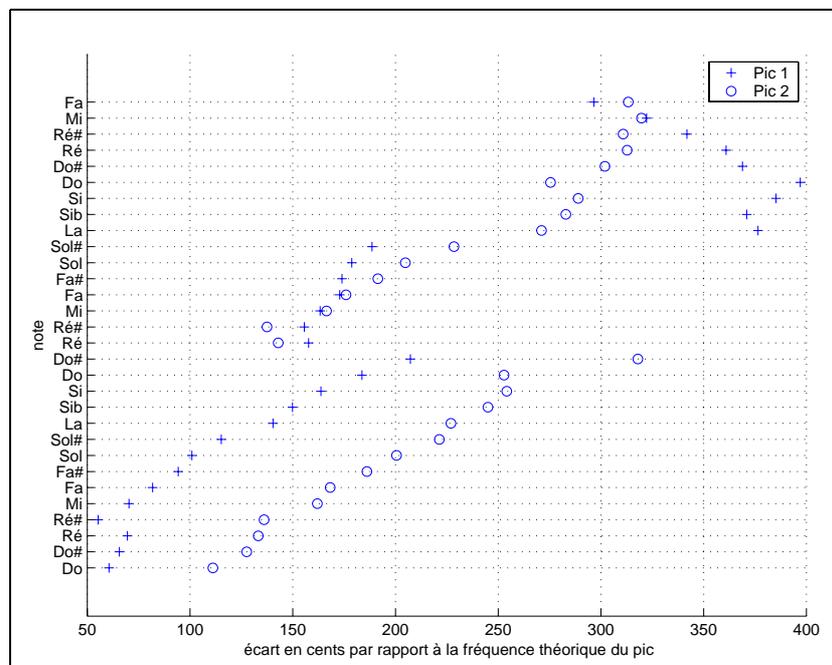


FIG. 2.10 – Ecart en cents entre la fréquence théorique et la fréquence mesurée des 2 premiers pics d'impédance. La fréquence fondamentale de la note jouée correspond au premier pic d'impédance jusqu'au deuxième Do# inclus, et au second pic à partir du deuxième Ré.

## 2.3.2 Registre suraigu

### Comparaison des courbes et de l'avis d'un instrumentiste

Les commentaires de Marc Baron à propos de ces doigtés se trouvent en annexe.

#### Courbes

Les courbes obtenues pour les suraigus à l'alto sont assez surprenantes. La forme globale de la courbe est la même que pour le baryton, et le premier pic d'impédance est bien à une fréquence deux fois plus élevée que le premier pic du même doigté au baryton. Cependant, ceci n'est pas vrai pour les pics suivants. Le décalage par rapport à la fréquence théorique de la note à jouer est tel que cette fréquence semble quasi systématiquement correspondre à un creux d'impédance. Le décalage du registre normal étant plus important à l'alto qu'au baryton, il n'est pas surprenant qu'il en soit de même pour le registre altissimo.

## 2.4 Comparaison Baryton/Alto

Les courbes obtenues nous amènent à plusieurs remarques. Tout d'abord, les courbes du registre normal se trouvent globalement décalées vers les hautes fréquences. De manière générale, on peut constater que les courbes obtenues à l'alto ont la même forme que les courbes obtenues au baryton. La fréquence à laquelle tombe le premier pic à l'alto est le double du baryton, cependant, ceci n'est pas vrai pour les autres pics. Bien que ces deux instruments sonnent à l'octave, le facteur de multiplication des fréquences entre les deux instruments n'est pas constant et égal à deux. Il vaut deux pour le premier pic et croît ensuite en fonction de l'ordre des pics. Le phénomène de décalage n'a aucune raison de ne pas exister pour le registre suraigu et peut donc expliquer en partie un décalage des pics par rapports aux fréquences à jouer. On observe que le décalage du registre normal à l'alto est plus important qu'au baryton, et que les pics des courbes de suraigus à l'alto sont encore plus décalés par rapport à la fréquence de la note à jouer qu'au baryton : les pics ne tombent jamais à la fréquence fondamentale de la note, mais au contraire, cette fréquence correspond plutôt à un creux d'impédance. En revanche, on remarque que la plupart des doigtés ont un premier pic à une fréquence proche de la moitié ou du tiers de la fréquence à jouer.

Tous les doigtés de Fa# possèdent un pic aux alentours de 440 Hz, c'est-à-dire à la moitié de la fréquence de la note à jouer, appelée Fnote.

Les doigtés 3, 4, 5 et 18 de Sol ont un pic à la moitié de Fnote, 1, 2, 8, 9, 10 ont des pics (entre autres) au tiers et aux deux tiers de Fnote. Pour les Sol#, les doigtés 5, 17, 19, 20 ont un pic à la moitié de Fnote, 9 et 1 ont des pics à  $1/3F_{note}$  et  $2/3F_{note}$  et 4, 10, 12, 13, 14 ont un pic à  $F_{note}/3$ .

Les doigtés 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 11, 12, 15, 17, 18, 19, 22, 23 de La suraigus possèdent un pic au tiers de 1048 Hz, et ressemblent a priori à un doigté harmonique (le rapport entre les fréquences des pics semble proportionnel), mais en regardant plus en détails, on constate que cette distribution régulière des pics à des fréquences élevées ne s'aligne pas sur une distribution harmonique contenant Fnote. Par exemple, une courbe peut contenir un premier pic à 350 Hz, un second à 750 Hz et un troisième à 1200 Hz. Les doigtés 13 et 14 ont un profil harmonique, avec une fréquence fondamentale différente, mais possèdent tous les deux leur 7ème pic à 1100 Hz.

Cette partie nous a permis de mettre en évidence l'existence d'un décalage en fréquence des pics d'impédance par rapport à la fréquence fondamentale du son émis. Ce décalage est accru pour les doigtés du registre altissimo. Nous tenterons par la suite d'expliquer ce phénomène.

# Chapitre 3

## Influence de l'anche

Le problème à présent est de caractériser le décalage en fréquence des pics d'impédance d'entrée par rapport aux fréquences théoriques des notes à jouer. Lorsqu'une note est jouée, l'instrument entre en résonance, et l'on observe un pic d'impédance à la fréquence associée. Dans nos mesures, le décalage implique l'intervention d'une autre impédance, telle que l'association de celle-ci à l'impédance mesurée constitue une impédance globale accordée à la résonance. On constate alors deux façons d'associer cette impédance que nous appellerons "impédance ajoutée" à l'impédance mesurée à l'entrée de l'instrument : celle-ci peut être en association série ou parallèle avec le saxophone.

### 3.1 Mise en série d'un cylindre

$$Z_{note} = Z_{ajoutee} + Z_{mesuree} \quad (3.1)$$

La mise en série en entrée du saxophone avec un cylindre de même diamètre et de longueur  $L$  correspond à un allongement du tuyau. Si cette longueur est identique pour tous les doigtés et notes, cela signifie que l'instrument était mal accordé pendant la phase de mesures.

A l'aide du logiciel IMP, on simule l'ajout d'un cylindre de même diamètre que le bec du saxophone, en entrée et en série avec l'instrument, et on fait varier la longueur de ce tuyau pour obtenir des pics aux fréquences théoriques. La figure suivante représente les différentes longueurs attribuées au cylindre en série, de façon à corriger le pic qui doit correspondre à la fréquence de jeu. (première octave : premier pic, deuxième octave : deuxième pic). On remarque que la longueur du cylindre ajouté en série varie selon les notes, de façon à peu près linéaire pour le baryton, mais qu'elle est presque constante

dans le cas de l'alto. Cependant, cette constante de longueur vaut 5 cm, ce qui est beaucoup trop important pour une erreur d'accord.

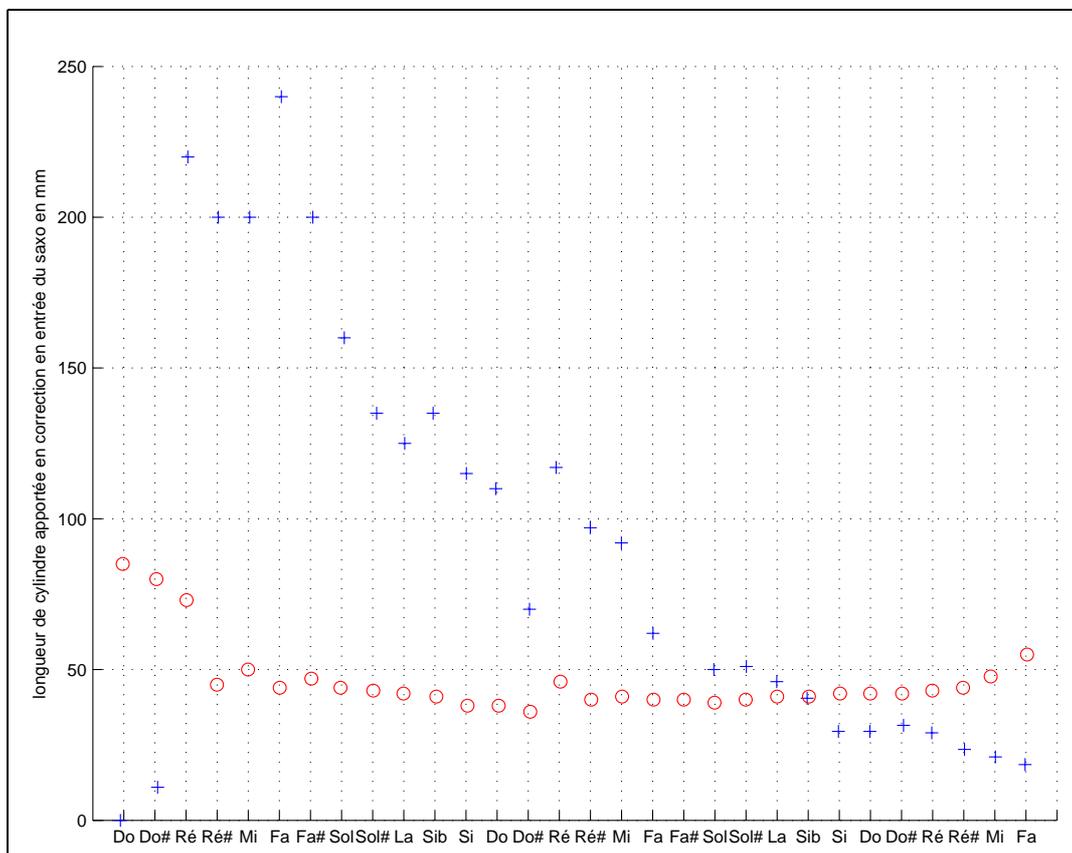


FIG. 3.1 – Longueur de correction du cylindre ajouté en série pour chaque note, Alto en rouge et Baryton en bleu

L'étude de la mise en série d'un cylindre d'une longueur variable nous a permis de montrer qu'une erreur d'accord n'était pas suffisante pour être la cause des écarts constants.

## 3.2 Mise en parallèle d'un cylindre

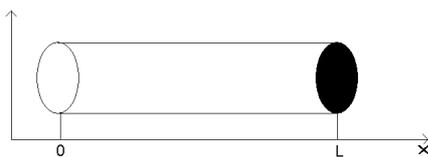
La seconde possibilité de correction est l'association en parallèle.

On a alors

$$\frac{1}{Z_{note}} = \frac{1}{Z_{ajoutee}} + \frac{1}{Z_{mesuree}} \quad (3.2)$$

Le cas le plus simple à considérer est la mise en parallèle de l'instrument avec un cylindre ouvert-fermé, de même diamètre interne que le bec du saxophone.

On considère un cylindre de longueur  $L$ , ouvert en entrée et fermé en sortie.



L'impédance en entrée du cylindre vaut (voir détails du calcul en annexes) :

$$Z_{cylindre} = \frac{p(0)}{v(0)} = -i\rho c \frac{\cos kL}{\sin kL} \quad (3.3)$$

## Point de vue expérimental

A l'aide du logiciel IMP, on simule l'ajout d'un cylindre de même diamètre interne que le bec du saxophone, en entrée et en parallèle avec l'instrument, et on fait varier la longueur de ce tuyau pour obtenir des pics aux fréquences théoriques. La figure 3.2 représente les différentes longueurs attribuées au cylindre en parallèle, de façon à corriger le pic qui doit correspondre à la fréquence de jeu. (première octave : premier pic, deuxième octave : deuxième pic).

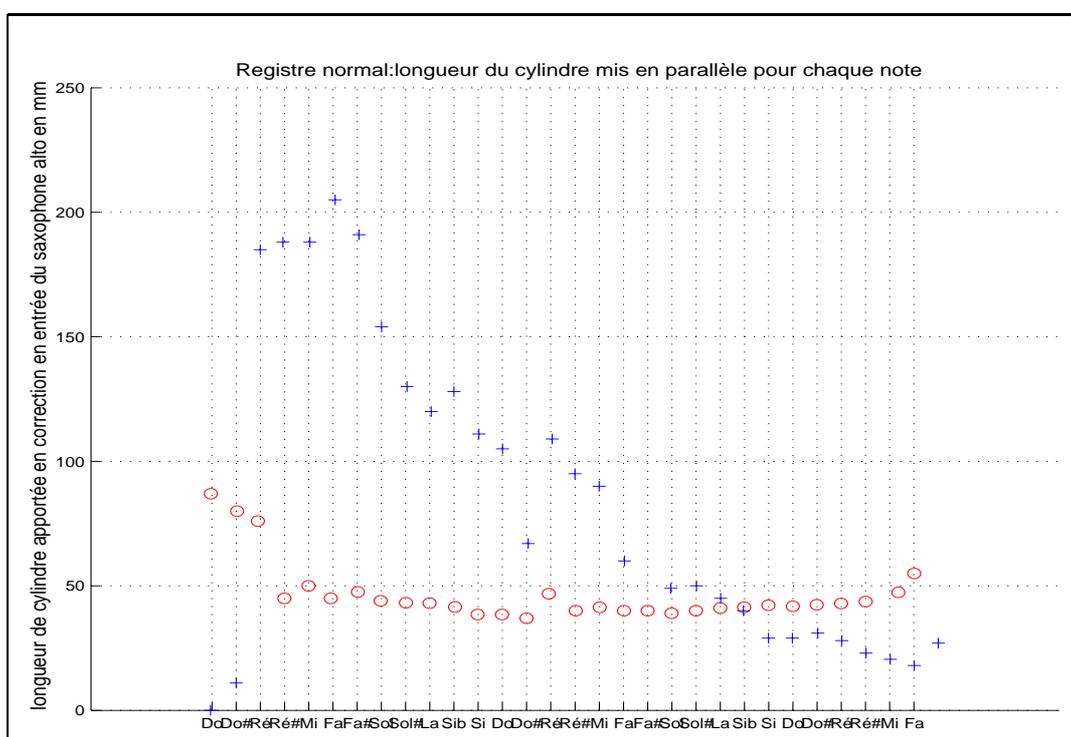


FIG. 3.2 – Longueur de correction du cylindre ajouté en parallèle pour chaque note, en bleu au baryton et en rouge à l'alto.

On peut constater que les figures 3.1 et 3.2 sont quasi identiques ; dans la plupart des cas, la longueur du cylindre en série est la même que la longueur du cylindre en parallèle. Une telle remarque permet d'obtenir une condition sur l'impédance d'entrée du saxophone.

On appelle  $P_e$  la pression en entrée d'un cylindre en série avec l'instrument,  $V_e$  sa vitesse à l'entrée,  $P_{sax}$  et  $V_{sax}$  sont respectivement la pression et la vitesse à l'entrée du saxophone.

$$\begin{aligned} Z_e(F_{note}) &= \frac{P_e}{V_e} \\ Z_{sax}(F_{note}) &= \frac{P_{sax}}{V_{sax}} \end{aligned}$$

Pour un cylindre en série et en entrée du saxophone, on a :

$$\begin{cases} P_e = \cos kLP_{sax} + i\rho c \sin kLV_{sax} \\ V_e = i \sin kLP_{sax} + \rho c \cos kLV_{sax} \end{cases}$$

$$\begin{cases} P_{sax} = \cos kLP_e - i\rho c \sin kLV_e \\ V_{sax} = \frac{-i}{\rho c} \sin kLP_e + \cos kLV_e \end{cases}$$

$$Z_{sax} = \rho c \frac{\cos kLP_e - i\rho c V_e}{\rho c V_e \cos kL - i \sin kLP_e}$$

$$Z_{sax} = i\rho c \frac{Z_e - i\rho c \tan kL}{Z_e \tan kL + i\rho c}$$

et

$$Z_e = \rho c \frac{\rho c \tan kL - iZ_{sax}}{Z_{sax} \tan kL - i\rho c}$$

Donc

$$Z_{e_{correctionserie}} = i\rho c \frac{-Z_{sax} - i\rho c \tan kL}{Z_{sax} \tan kL - i\rho c}$$

D'après 3.24,

$$Z_{e_{correctionparallele}} = \frac{-i\rho c Z_{sax} / \tan kL}{-i\rho c / \tan kL + Z_{sax}}$$

$$(Z_{sax} + i\rho c \tan kL) \left( \frac{-i\rho c}{\tan kL} + Z_{sax} \right) = \frac{Z_{sax}}{\tan kL} (Z_{sax} \tan kL - i\rho c)$$

Finalement :

$$Z_{sax} = i\rho c \cot kL \quad (3.4)$$

Or  $Z_{sax} = Z_{mesuree}$ , donc l'équation 3.4 signifie que la longueur  $L$  de correction à apporter pour décaler le pic d'impédance est la même pour un cylindre en parallèle et en série si  $i\rho c \cot kL$  est égal à l'impédance mesurée à la fréquence qui nous intéresse. Il suffit donc de mesurer  $Z_{sax}(F_{note})$  pour en déduire  $L$ .

On corrige de la même façon les doigtés de suraigus. La figure 3.3 représente les longueurs de cylindre mis en parallèle pour chaque doigté de Fa# suraigu, à l'alto.

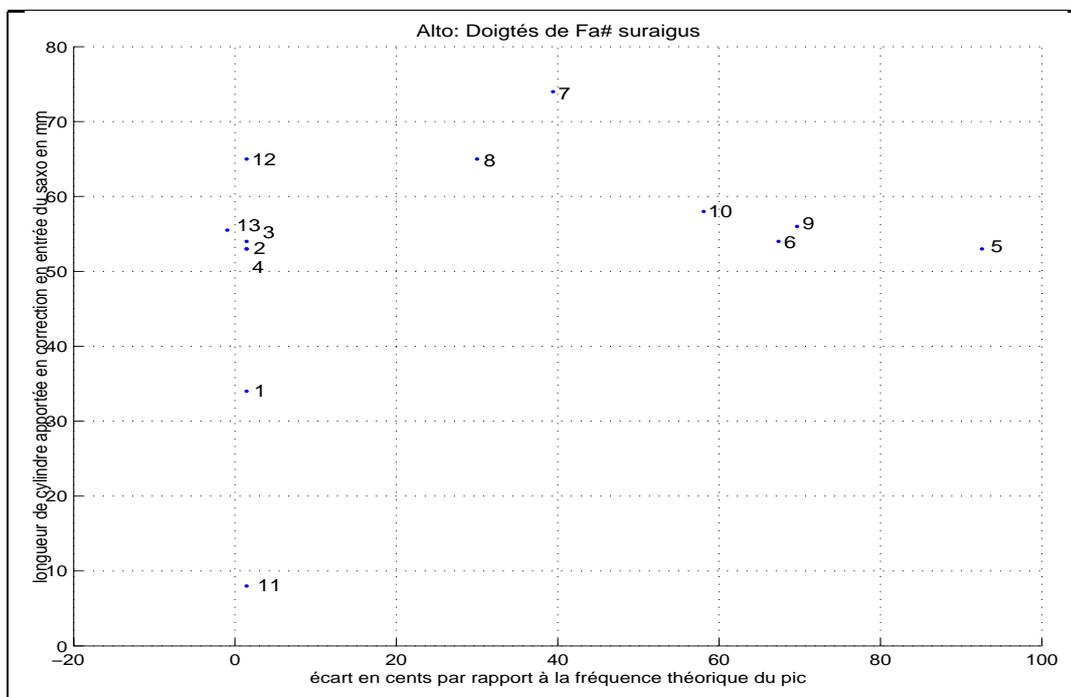


FIG. 3.3 – Alto : Longueur du cylindre mis en parallèle pour chaque doigté de Fa# suraigu, et écart en cents (après correction) par rapport à la fréquence théorique de la note à jouer.

En effectuant ce travail sur tous les doigtés de Fa#, de Sol, de Sol# et de La suraigus, à l'alto et au baryton, on constate que la mise en parallèle d'un cylindre permet en général, pour une certaine longueur L, de corriger la fréquence du pic d'impédance mesurée.

Cependant, on distingue trois cas :

- Le pic est au dessus de la fréquence théorique de la note à jouer : la longueur L est positive.
- Le pic est au dessous de la fréquence théorique de la note à jouer : la longueur L est négative.
- La fréquence théorique de la note à jouer correspond exactement à un creux d'impédance mesurée, si bien qu'en ajoutant un cylindre en parallèle, on décale les pics, mais pas les creux, et la fréquence de la note continue de correspondre à un creux d'impédance, quelle que soit la longueur du cylindre en parallèle. La correction apportée par le cylindre

en parallèle ne sera pas parfaite et on obtiendra au mieux une amélioration (cas visibles sur la figure 3.3, pour le doigté n° 5 par exemple). On peut supposer que c'est le cas des doigtés qui fonctionnent mais qui sonnent faux par rapport à la note à jouer. Dans ce cas, la longueur  $L$  représentée sur les figures précédentes est alors la longueur qui correspond à une optimisation de l'écart entre le pic et  $F_{note}$ . En essayant de se rapprocher encore plus de  $F_{note}$  et en franchissant cette longueur "limite", on observe une disparition du pic d'impédance.

### Point de vue théorique

Reprenons à présent l'équation (3.1), dans le cas d'un cylindre ouvert-fermé :

$$\frac{1}{Z_{note}} = \frac{1}{Z_{cylindre}} + \frac{1}{Z_{mesuree}}$$

Si la note est jouée, c'est qu'elle correspond à une fréquence de résonance du système, donc la partie imaginaire de l'impédance est nulle et la partie réelle est maximale à la fréquence de cette note. Le système à résoudre est le suivant :

$$\begin{cases} \frac{1}{Z_{note}} & = & \frac{1}{Z_a} & + & \frac{1}{Z_m} \\ Im(Z_{note}) & = & 0 \\ Re(Z_{note}) & \text{maximum} \\ \omega & = & 2\pi F_{note}(Hz) \end{cases} \quad (3.5)$$

Avec

$$\begin{cases} Z_{note} = A_{note} + i B_{note} & : \text{ impédance de la note jouée} \\ Z_a = 0 + i y_{cyl} & : \text{ impédance ajoutée} \\ Z_m = A + i B & : \text{ impédance mesurée} \end{cases}$$

On note  $A'$  la dérivée de  $A$  par rapport à la fréquence et  $A''$  la dérivée seconde de  $A$  par rapport à la fréquence.

On cherche  $y_{cyl}$  tel que :

$$\begin{cases} B_{note} & = & 0 \\ A''(F_{note}) & < & 0 \end{cases}$$

$$Z_{note} = \frac{Z_a Z_m}{Z_a + Z_m}$$

$$A_{note} + i B_{note} = \frac{i y_{cyl} (A + i B)}{i y_{cyl} + (A + i B)} \quad (3.6)$$

Après développement, on obtient :

$$\begin{cases} A_{note} = y_{cyl} (A^2 + B^2) + y_{cyl}^2 A \\ B_{note} = y_{cyl} (A^2 + B^2) + y_{cyl}^2 B \end{cases} \quad (3.7)$$

Finalement :

$$\begin{cases} (A^2 + B^2) + y_{cyl} B = 0 \\ -2((A')^2 + A.A'' + (B')^2 + B.B'') > y_{cyl}.A'' \end{cases}$$

$$\begin{cases} y_{cyl} = \frac{-A^2+B^2}{B} \\ y_{cyl} < \frac{-2((A')^2+A.A''+(B')^2+B.B'')}{A''} \end{cases} \quad (3.8)$$

Les mesures qui ont été faites nous donnent l'impédance réduite, c'est à dire :  $\frac{Z}{\rho c}$ .

D'après 3.24 :

$$\begin{aligned} Z_{cylindre} &= -i \rho c \frac{\cos kL}{\sin kL} \\ y_{cyl} &= \frac{Z_{cylindre}}{i \rho c} \\ y_{cyl} &= -\cot kL \end{aligned}$$

$$L = \frac{\arctan \frac{-1}{y_{cyl}} * c}{2\pi F_{note}} \quad (3.9)$$

d'après 3.8 :

$$L = \frac{\arctan \frac{B}{A^2+B^2} * c}{2\pi F_{note}} \quad (3.10)$$

A l'aide d'un programme Matlab, on calcule cette longueur théorique de cylindre à mettre en parallèle pour avoir un pic d'impédance à la fréquence fondamentale de la note à jouer. Ce programme testé sur tous les doigts de suraigus nous permet de constater que la correction au moyen des cylindres en parallèle est correcte.

On observe deux cas :

1) La longueur trouvée par le programme est bien la même que la longueur trouvée par simulation avec IMP.

2) Pas de solution : ce cas concerne les doigtés qui admettaient un creux d'impédance à la fréquence de la note jouée.

Finalement, les résultats de Matlab confirmant les simulations réalisées avec IMP, on peut résumer l'étude des différents doigtés jusqu'à présent grâce aux tableaux ci-dessous :

**Validité de la correction de longueur à l'aide d'un cylindre en parallèle :**

Alto	Fa#	Sol	Sol#	La
bonne correction	1, 2, 3, 4, 11, 12, 13	5, 8, 9, 10, 11, 17, 18	4, 9, 10, 12, 14, 15, 19, 20, 21	5, 6, 13, 22, 23
bonne correction, L négative		6, 7, 15	18, 22, 23	4, 8, 20, 21
creux à Fnote : pas de solution	5, 6, 7, 9(-), 10	1, 3, 12, 13, 14	1, 3, 5, 11(-), 17, 24	9, 10, 11, 14, 15
optimisation seulement : creux proche de Fnote	8	2, 4	2, 6, 7, 8, 13, 16	1, 2, 3, 7(-), 12, 16, 17, 18, 19

Baryton	Fa#	Sol	Sol#	La
bonne correction	1, 2, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 12, 13	3, 6, 7, 14, 15,	2, 3, 4, 8, 10, 11, 13, 16 17, 22, 24	16, 18, 19
bonne correction, L négative	3	1, 2, 4, 5, 8, 9, 10, 11, 16, 17, 18	5, 6, 7, 9, 12 14, 15, 18, 19, 20, 21, 23	1, 2, 3, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 14, 15, 17, 22, 23
creux à Fnote : pas de solution				13, 5
optimisation seulement : creux proche de Fnote	11	12, 13	1	4, 20, 21

Liste des doigtés jugés bons par les instrumentistes :

	Alto	Baryton
Fa#	1, 2, 12, 13	1, 2, 4, 6, 12, 13
Sol	1, 6, 8, 9, 10, 11, 17, 18	11, 17, 18
Sol#	1, 2, 8, 9, 10, 12, 14, 20, 23, 24	2, 3, 9, 10, 12, 13, 14, 22, 23, 24
La	1, 2, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 15, 22	1, 3, 6, 9, 10, 18, 19

Remarque : Pour les doigtés qui fonctionnent, les cas de longueur négative se retrouvent ici ;  $L < 0$  implique  $B < 0$  et  $0 < y_{cyl}$ . Nous verrons par la suite les conséquences physiques que peut avoir une modélisation de mise en parallèle d'un cylindre de longueur négative.

On peut maintenant établir une synthèse de ces deux tableaux en trois catégories :

	notes	alto	baryton
Doigtés corrects pour le musicien et pour le programme	Fa#	1, 2, 12, 13	1, 2, 4, 6, 12, 13
	Sol	6, 8, 9, 10, 11, 17, 18	11, 17, 18
	Sol#	9, 10, 12, 14, 20, 23	2, 3, 9, 10, 12, 13, 14, 22, 23, 24
	La	8, 13, 22	1, 3, 6, 9, 10, 18, 19
Doigtés corrects uniquement pour le musicien	Fa#		
	Sol	1	
	Sol#	1, 2, 8, 24	
	La	1, 2, 9, 10, 11, 12, 15	
Doigtés corrects uniquement pour le programme	Fa#	3, 4, 11	3, 5, 7, 8, 9, 10
	Sol	5, 7, 15	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 14, 15, 16
	Sol#	4, 15, 18, 19, 21, 22	4, 5, 6, 7, 8, 11, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21
	La	4, 5, 6, 20, 21, 23	2, 7, 8, 11, 12, 14, 15, 16, 17, 22, 23

Des doigtés ne rentrent pas dans la première catégorie. Les doigtés corrects en pratique uniquement nécessiteraient une étude plus particulière, ce qui a été impossible dans le temps imparti au stage. Le problème des doigtés corrects en théorie uniquement pourra être élucidé dans la partie suivante.

### 3.3 Etude générale des solutions

On cherche maintenant à étudier les différentes corrections que l'on peut considérer pour corriger la fréquence des pics de l'impédance mesurée, en utilisant une impédance en parallèle sans se limiter à un cylindre. La mise en parallèle du cylindre correspond au cas d'association parallèle le plus simple. Cependant, qu'en est-il des cas où l'impédance mise en parallèle n'est pas imaginaire pure, mais complexe ?

On a à présent :

$$\begin{cases} Z_{note} = A_{note} + i B_{note} & : \text{ impédance de la note jouée} \\ Z_a = x + i y & : \text{ impédance ajoutée} \\ Z_m = A + i B & : \text{ impédance mesurée} \end{cases}$$

avec toujours :

$$\begin{cases} B_{note} = 0 \\ A''(F_{note}) < 0 \end{cases}$$

$$A_{note} + i B_{note} = \frac{(x + i y)(A + i B)}{(x + i y) + (A + i B)} \quad (3.11)$$

Après développement, on obtient :

$$\begin{cases} A_{note} = x^2 A + y(A^2 + B^2) + y^2 A \\ B_{note} = x^2 B + y(A^2 + B^2) + y^2 B \end{cases} \quad (3.12)$$

Finalement :

$$x^2 B + y(A^2 + B^2) + y^2 B = 0 \quad (3.13)$$

$$x^2 + \left(y + \frac{A^2 + B^2}{2B}\right)^2 = \left(\frac{A^2 + B^2}{2B}\right)^2 \quad (3.14)$$

L'ensemble des couples solutions (x,y) est un cercle de centre  $\left(0; -\frac{A^2+B^2}{2B}\right)$  et de rayon  $r = \left|\frac{A^2+B^2}{2B}\right|$ .

## 3.4 Modélisation de l'anche par un système masse, ressort, amortisseur

On sait que l'effet de l'anche est modélisable par une impédance en parallèle. L'anche peut être considérée comme un système mécanique oscillant simple, avec une masse vibrante, une surface vibrante et une raideur. Il est correct de faire l'hypothèse que le musicien peut varier ces différents paramètres pendant qu'il joue, en adaptant le flux d'air en entrée et l'embouchure. Il s'agit dans cette partie de vérifier dans quelle mesure la variation de ces paramètres peut permettre de jouer des suraigus, c'est-à-dire de décaler un pic d'impédance vers une fréquence donnée, pour un doigté donné.

### 3.4.1 Détermination de paramètres

Considérons un système mécanique simple. L'impédance d'un tel système à une fréquence donnée vaut :

$$Z_{meca} = R + i\left(\frac{-k}{\omega_{note}} + M \omega_{note}\right) \quad (3.15)$$

Avec :

$$\omega_{note} = 2 * \pi * F_{note},$$

$M$  la masse vibrante,

$R$  la résistance (ou force de frottement)

$k$  la raideur mécanique en  $Nm^{-1}$  et  $k = K S^2$ , avec  $S$  surface vibrante et  $K$  la raideur acoustique, qui a pour dimension une raideur divisée par une surface au carré.

### Détermination de M et S

On mesure quatre couples de surface et de masse vibrante en prenant une anche d'alto humidifiée, pour se rapprocher des conditions réelles de jeu.

Ces quatre mesures sont :

$$S_1 = 0.5 * 10^{-4} m^2 \text{ et } M_1 = 0.005 g;$$

$$S_2 = 1 * 10^{-4} m^2 \text{ et } M_2 = 0.015 g;$$

$$S_3 = 1.30 * 10^{-4} m^2 \text{ et } M_3 = 0.03 g;$$

$$S_4 = 1.65 * 10^{-4} m^2 \text{ et } M_4 = 0.04 g$$

### Détermination de $R$

On sait que l'impédance acoustique a la dimension d'une impédance mécanique divisée par  $\rho c S$ .

On écrit

$$Z_{meca} = R + i\alpha \quad (3.16)$$

Donc

$$Z_{acoustique} = X_{za} + iY_{za} \quad (3.17)$$

$$Z_{acoustique} = \frac{R}{\rho c S} + i \frac{\alpha}{\rho c S}$$

avec

$$R = X_{za}\rho c S \quad \text{et} \quad \alpha = Y_{za}\rho c S$$

Pour trouver des caractéristiques de l'anche qui seraient solutions de notre système, il faut que les points de coordonnées  $(X_{za}, Y_{za})$  se trouvent sur le cercle solution dont l'équation a été trouvée en 3.3.. On cherche dans un premier temps les valeurs de  $Y_{za}$  telles que :

$$0 < Y_{za} < y_{cyl} , \text{ Pour } 0 < y_{cyl}$$

$$y_{cyl} < Y_{za} < 0 , \text{ Pour } 0 > y_{cyl}$$

A partir de l'équation de cercle et des bornes inférieures et supérieures de  $Y_{za}$ , on obtient facilement  $X_{za}$ . Pour des raisons de symétrie, on ne considère ici que les  $x$  positifs.

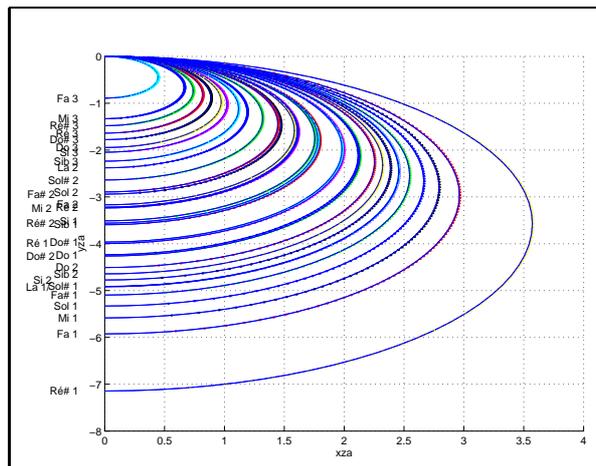


FIG. 3.4 – Alto : Ensemble des points  $(Y_{za}, X_{za})$  appartenant au cercle, pour le registre normal.

Pour le registre normal, on remarque que le rayon (donc l'impédance  $Z_{ajoute}$ ) croit globalement en fonction de la hauteur de la note jouée.

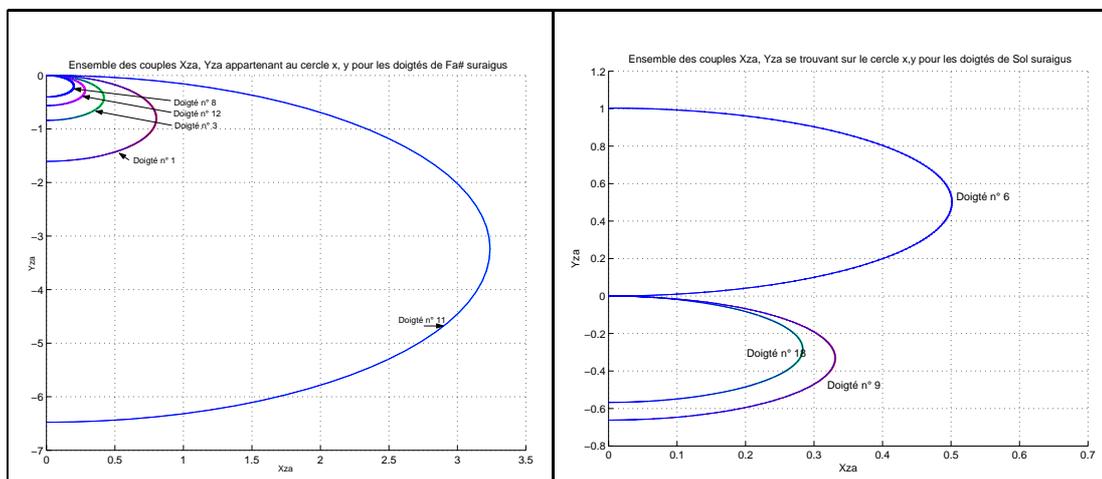


FIG. 3.5 – Alto : Ensemble des points  $(Y_{za}, X_{za})$  appartenant au cercle, pour les Fa# suraigus à gauche et pour les Sol suraigus à droite.

La figure 3.5 montre le cas d'un doigté (Sol n° 6) pour lequel  $y_{cyl}$  est positif, c'est à dire que la longueur de cylindre à apporter pour corriger la hauteur du pic d'impédance est négative. On voit que l'impédance à ajouter en parallèle dans le cas général doit avoir nécessairement une partie imaginaire positive. Cependant, cette condition ne permet pas d'exclure a priori ces doigtés de la liste des solutions possibles.

Sur la figure de gauche, on remarque que le doigté de Fa# n°11 a un rayon particulièrement grand. La longueur de cylindre ajoutée en parallèle qui a été calculée précédemment pour ce doigté est de 9 mm, ce qui est le minimum pour les doigtés de Fa# suraigus. Paradoxalement, ce doigté est jugé mauvais par les deux instrumentistes l'ayant essayé.

En regardant la courbe d'impédance de ce doigté sur la figure 3.6, on voit que celui-ci possède des pics avec un module important de part et d'autre du pic correspondant à 880 Hz pour l'alto, 440 Hz pour le baryton. Ainsi, même s'il existe un pic à la bonne fréquence, l'instrumentiste "attrapera" en priorité les pics importants, et le doigté sera donc instable, voire multiphonique.

Doigté :  $Tf$  - - -  $\parallel f\#$  - - -

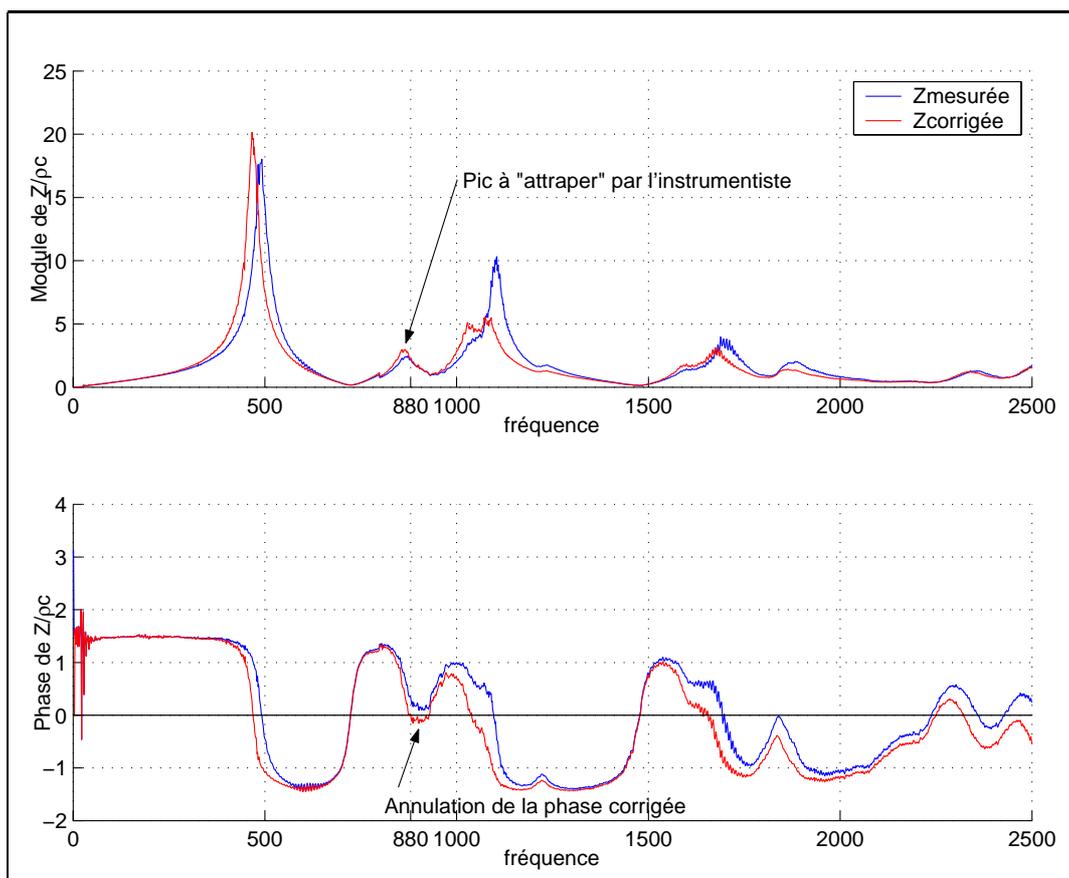


FIG. 3.6 – Doigté Fa# n °11 à l'alto : impédance mesurée en rouge et corrigée en bleu.

Avis de M.Baron :

Bas : plutôt un Fa. Multiphonique et instable.

## Détermination de $K$

On cherche à présent les valeurs de  $K$  sur lesquelles l'instrumentiste peut jouer, en modifiant le flux ou la pince, pour obtenir un pic d'impédance à la bonne fréquence.

$$R = X_{za} \rho c S \text{ pour tout } Y_{za}.$$

D'où

$$\begin{aligned} Y_{cyl} &< \frac{\alpha}{\rho c S} < 0 \\ Y_{cyl} &< \frac{1}{\rho c S} \left( \frac{-K S^2}{\omega_{note}} + M \omega_{note} \right) < 0 \\ Y_{cyl} \rho c S &< \frac{-K S^2}{\omega_{note}} + M \omega_{note} < 0 \\ M \omega^2 &< K S^2 < M \omega^2 - Y_{cyl} \rho c S \omega \\ \frac{M \omega^2}{S^2} &< K < \frac{M \omega^2}{S^2} - \frac{Y_{cyl} \rho c S \omega}{S^2} \end{aligned}$$

Pour chaque couple  $\{S, M\}$ , on obtient donc des valeurs de  $K$  comprises en une borne inférieure et une borne supérieure, telles que

$$\frac{1}{Z_{note}} = \frac{1}{Z_{ajoutee}} + \frac{1}{Z_{mesuree}}$$

On ajoute une dimension au cercle solution : on peut alors observer comment le musicien, en jouant sur les paramètres de surface vibrante et de  $K$  (flux, embouchure), peut faire coïncider les pics d'impédance d'un doigté donné avec la fréquence de la note qu'il veut jouer.

Par exemple, à l'alto, on obtient la figure suivante :

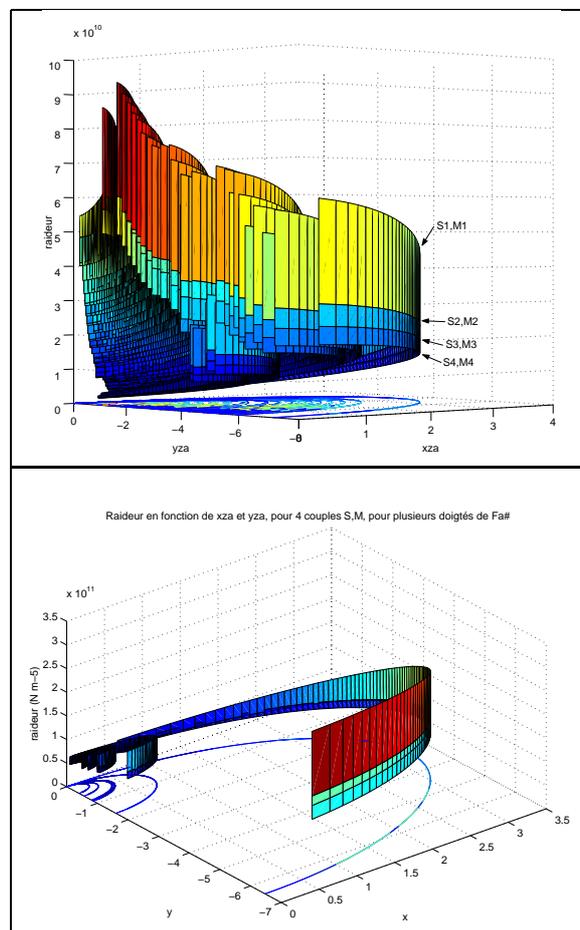


FIG. 3.7 – raideur acoustique en fonction de la position  $(X_{za}, Y_{za})$  sur les cercles, pour les quatre couples  $S, M$ , pour le registre normal en haut et pour les  $Fa\#$  suraigus en bas

Les valeurs de  $K$  obtenues, comprises entre  $1.10^{10}$  et  $10.10^{10}Nm^{-5}$ , sont en accord avec l'étude réalisée par Xavier Boutillon et Vincent Gibiat [6], au cours de laquelle ils avaient mesuré la raideur acoustique de l'anche d'un instrumentiste pour le registre normal, en fonction notamment des nuances.

On remarque que la valeur de la raideur croit en même temps que le rayon du cercle. Ainsi, lorsque le rayon augmente,  $\frac{1}{Z_{ajoutée}}$  diminue, mais la raideur est plus élevée. Comparons à présent la valeur de  $K$  pour plusieurs doigtés de suraigus et plusieurs notes du registre normal. On fixe la surface et la masse :  $S_1 = 0.5 * 10^{-4} m^2$  et  $M_1 = 0.005 g$

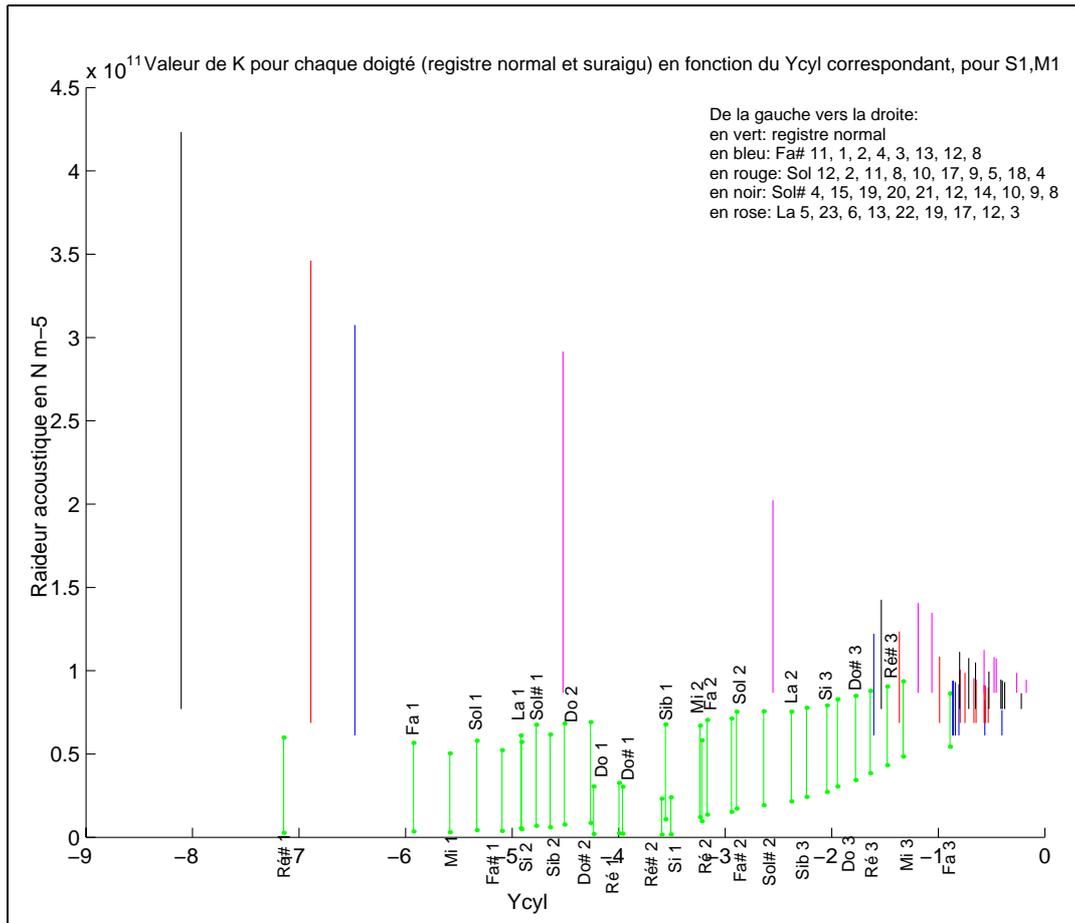


FIG. 3.8 – Intervalles de raideur acoustique pour un couple (Surface, Masse) fixé, pour tous les doigtés, en fonction du  $y_{cyl}$  correspondant.

De manière générale,  $K$ , qui dépend du flux entrant et de "la pince" de l'instrumentiste, est plus important pour le registre suraigu que pour le registre normal. V.Gibiat et X.Boutillon [6] ont mesuré des valeurs de  $K$  pour plusieurs notes du registre normal jouées en decrescendo. Il semblerait d'après ces mesures que  $K$  augmente lorsque le flux diminue. De plus, selon le témoignage de plusieurs saxophonistes, le jeu d'une note altissimo au saxophone

donne bien la sensation de diminuer le flux d'air entrant dans le bec, ce qui concorde avec nos résultats.

On remarque aussi que certains doigtés permettent une grande variation de  $K$ , tandis que d'autres définissent un domaine de valeurs assez restreint. On peut voir ici une information sur la difficulté "d'attrapper" certains suraigus (la valeur de  $K$  étant précise, il faut l'atteindre exactement) et de les stabiliser ( $K$  dépendant du flux, il n'est pas toujours évident de maintenir un flux d'air constant). Cependant, cette condition n'est pas exhaustive.

Nous avons maintenant  $R$ ,  $M$ ,  $S$ , et  $K$ , tels que :

$$\frac{1}{Z_{note}} = \frac{1}{Z_{ajoutee}} + \frac{1}{Z_{mesuree}}$$

Nous allons à présent regarder la réponse de l'anche définie d'après ces paramètres.

### 3.4.2 Réponse de l'anche

A l'aide des paramètres  $M$ ,  $S$ ,  $K$  et  $R$  déterminés précédemment, on peut désormais tracer les courbes de réponse de l'anche. La figure 3.9 représente le module de l'admittance, en fonction de la raideur, pour les 4 couples  $S/M$  fixés, pour les doigtés de  $Fa\#$  à 440 Hz à l'alto (donc registre normal) et d'un  $Fa\#$  à 880 Hz (registre altissimo).

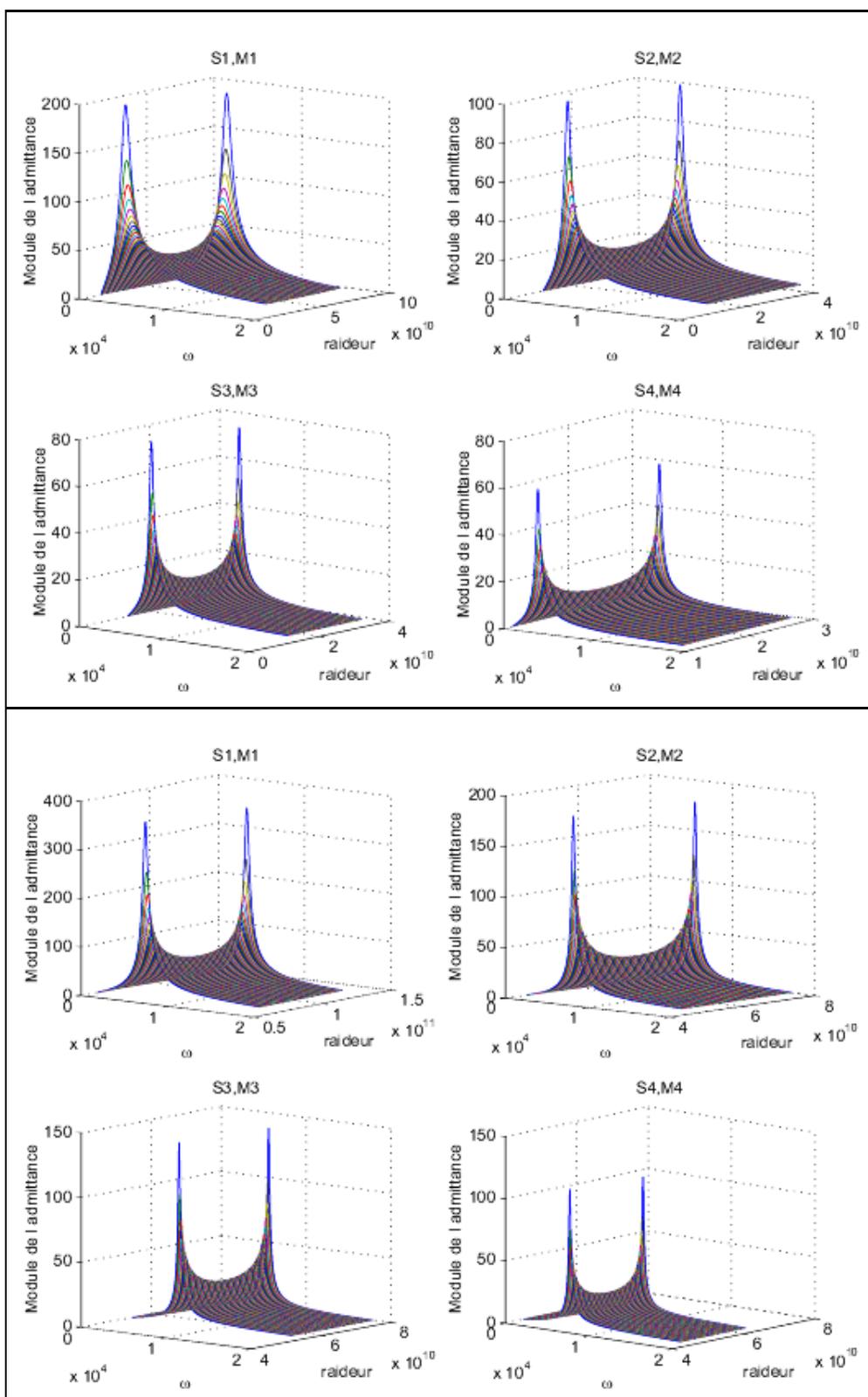


FIG. 3.9 – Alto : Module de l'admittance en fonction de  $\omega$  pour chaque couple  $\{S, M\}$ , pour un Fa# à 440 Hz (registre normal) en haut et pour un Fa# suraigu (doigté n°1) en bas.

La figure 3.9 contient beaucoup d'informations. Tout d'abord, on voit que l'amortissement évolue en fonction de la valeur de K. En effet, il tend vers l'infini lorsque K tend vers sa borne supérieure ou sa borne inférieure, ce qui veut dire que le système est très amorti lorsque  $X_{za}$ , (ou R), tend vers 0.

Les valeurs de R obtenues vont de  $1.10^{-3}$  à  $5.10^{-2}$  pour le registre altissimo, et  $1.10^{-2}$  à 0.2 pour le registre normal.

La figure 3.10 montre que l'amortissement est toujours plus important pour les doigtés de suraigus que pour les doigtés du registre normal.

$$Q = \frac{\sqrt{MK}}{R} \quad (3.18)$$

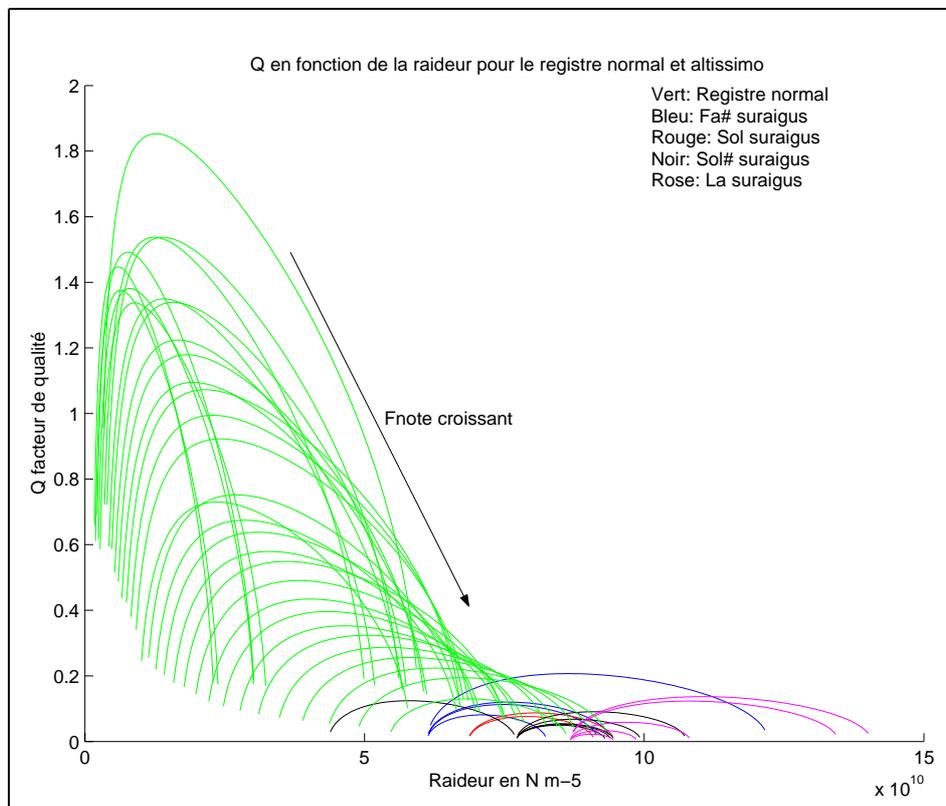


FIG. 3.10 – Facteur de qualité en fonction de la raideur acoustique pour le registre normal (en vert), les doigtés de Fa# suraigu (en bleu), de Sol suraigu (en rouge), de Sol# suraigu (en noir) et de La suraigu (en rose).

L'étude des divers paramètres M, S, R et K sur lesquels l'instrumentiste peut jouer pour obtenir un pic d'impédance à la fréquence fondamentale de la note qu'il veut jouer nous a permis de préciser le modèle adopté pour l'anche. En effet, l'admittance et le facteur de qualité ainsi déterminés nous permettent de caractériser la réponse mécanique de l'anche selon la situation de jeu.

### 3.4.3 Conclusion

Au terme de ce chapitre, on peut établir une liste des doigtés qui fonctionnent, c'est-à-dire pour lesquels les instrumentistes font un commentaire favorable, et pour lesquels il existe un ensemble de couples  $(X_{za}, Y_{za})$ , (ou encore un ensemble de valeurs de K, S et M), tels que l'impédance d'entrée du saxophone pendant le jeu possède un pic d'impédance à la fréquence de la note jouée.

notes	alto	baryton
Fa#	1, 2, 12, 13	1, 2, 4, 6, 12, 13
Sol	6, 8, 9, 10, 11, 17, 18	11, 17, 18
Sol#	9, 10, 12, 14, 20, 23	2, 3, 9, 10, 12, 13, 14, 22, 23, 24
La	8, 13, 22	1, 3, 6, 9, 10, 18, 19

Au baryton, tous les doigtés jugés corrects par Gilles Tressos présentent les caractéristiques physiques pour permettre un pic d'impédance à la bonne fréquence. Cependant, certains doigtés vérifiant également les conditions pour être "jouables" sont jugés instables voire multiphoniques. La présence de pics dont le module est important à des fréquences proches de la fondamentale peut parfois expliquer ce phénomène.

A l'alto, tous les doigtés de Fa#, de Sol et de Sol# appréciés par Marc Baron sont également validés par notre étude, à l'exception de Sol n° 1 et Sol# n°1, 2, 8 et 24. En revanche, la plupart des doigtés de La qu'il recommande présentent un creux d'impédance exactement à la fréquence fondamentale théorique, et seuls les doigtés n°8, 13 et 22 répondent aux critères imposés par le modèle de correction parallèle étudié.

On en conclut une différence évidente entre les doigtés du registre altissimo utilisables à l'alto et au baryton. On constate même que les doigtés corrects à l'alto et au baryton diffèrent de plus en plus lorsque la fréquence de la note à jouer augmente. Ainsi, les bons doigtés de La à l'alto ne sont pas les mêmes qu'au baryton.

D'autre part, il reste un problème avec les doigtés recommandés par M. Baron qui ne possèdent pas les critères favorables pour être utilisables selon notre étude. Aux vues des remarques faites sur les différents pics observés sur les courbes d'impédance dans la partie 2.4 "Comparaison Baryton/Alto", il se révélerait très intéressant de réaliser une étude d'enregistrements sonores de suraigus. En effet, la présence de pics à la moitié de  $F_{note}$ , ou bien au tiers et au deux tiers de  $F_{note}$ , pourrait être à l'origine de l'explication de ce phénomène. Une analyse des sons émis permettrait de déterminer quelles sont les composantes fréquentielles présentes et leur niveau relatif, et d'en déduire de nouvelles hypothèses pour aborder le problème sous un autre angle, psychoacoustique par exemple.

## Conclusion

Pour un saxophoniste débutant, l'étude et l'utilisation des suraigus semblent difficiles et hasardeuses. En effet, parmi les doigtés proposés, très peu ont le mérite de posséder les deux caractéristiques d'un "bon" doigté, à savoir : la facilité d'émission et la justesse. Ce n'est pas surprenant si l'on en croit l'étude de l'impédance d'entrée d'une quinzaine de doigtés pour chaque note suraiguë. En effet, le décalage des pics d'impédance par rapport à la fréquence fondamentale de la note à jouer est plus important pour le registre altissimo que pour le registre normal. La raideur de l'anche, le flux d'air en entrée, la pince, la surface vibrante et la masse vibrante sont autant de paramètres sur lesquels un instrumentiste doit pouvoir jouer pour déplacer les pics d'impédance propres au doigté. L'influence de l'ensemble lèvres - anche - pince est alors déterminante pour la réalisation du son suraigu. Au terme de cette étude, nous retiendrons plusieurs doigtés corrects pour le registre altissimo, nécessitant d'une part un ordre de grandeur de  $K$  facile à obtenir, avec une plage de variation suffisamment large pour que le son soit stable, et d'autre part une surface vibrante de l'ordre de celle du registre normal pour favoriser les situations de jeu réelles. Parmi les doigtés étudiés, on ne relève pas de différence qualitative entre les doigtés harmoniques et les doigtés spécifiques. Cependant, il serait intéressant de poursuivre cette étude des doigtés de suraigus en s'attachant aux longueurs de tuyau et la présence éventuelle d'une alternance de trous ouverts et bouchés, appelés "bouts morts". Enfin, l'analyse d'enregistrements de notes suraiguës pourraient compléter efficacement cette étude en apportant des informations supplémentaires contribuant à l'élaboration d'un modèle plus général.

## Annexes 1

### Clés utilisées au saxophone

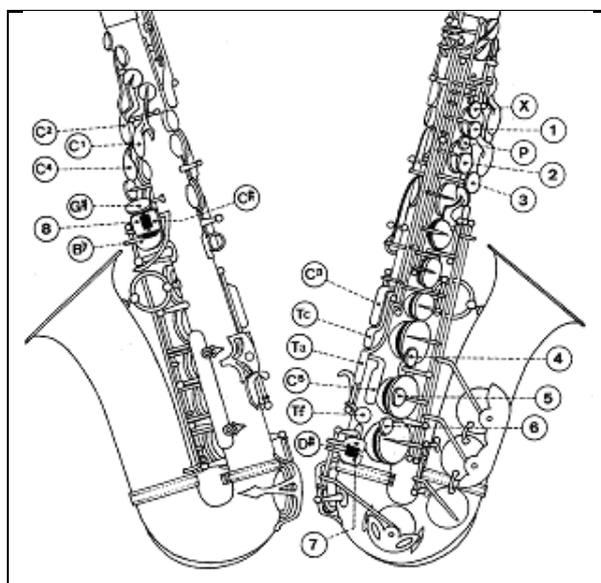


FIG. 3.11 – Clés du saxophone

### Doigtés de suraigus

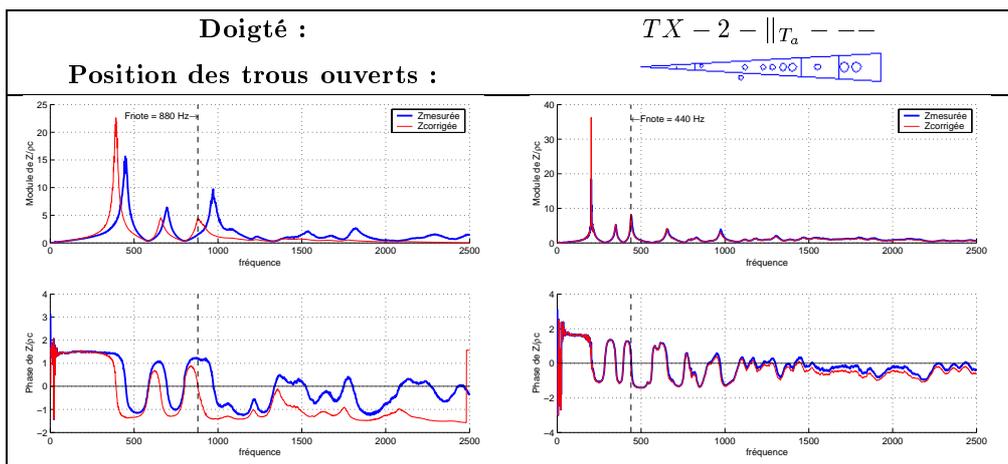
On appelle T la clé d'octave.

L'écriture des doigtés consiste à noter le numéro des clés appuyées.

## Doigtés de Fa#

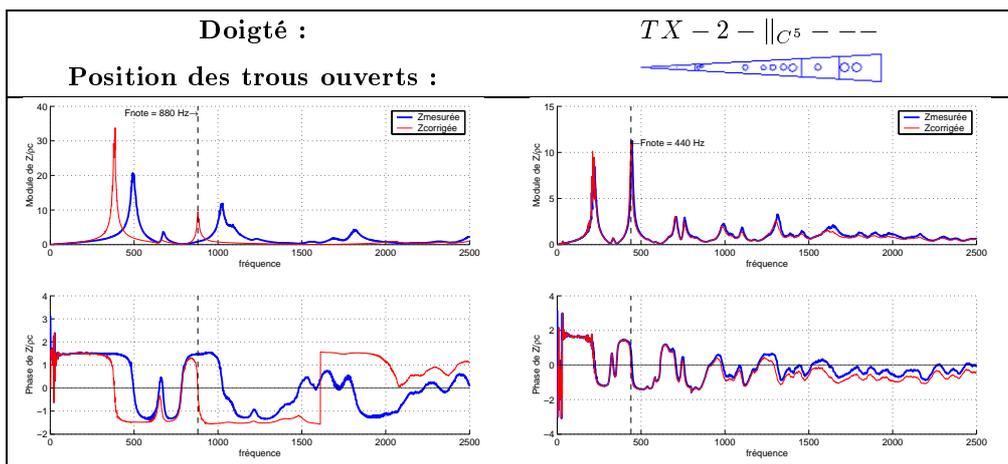
### Fa#1

Avis des musiciens : Baryton : Très bien - facile, Alto : un peu bas - assez facile - stable. Son sourd et peu ouvert.



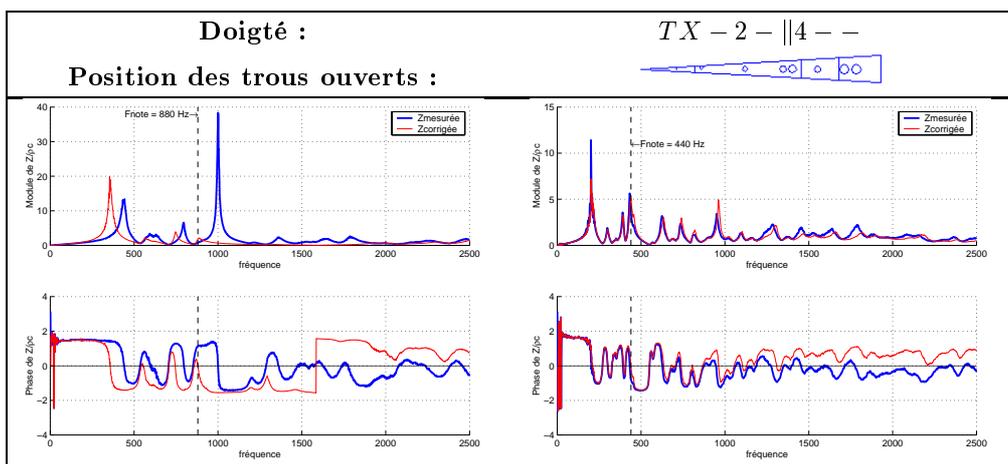
### Fa#2

Avis des musiciens : Baryton : Très bien, Alto : Très facile - stable - assez juste.



### Fa#3

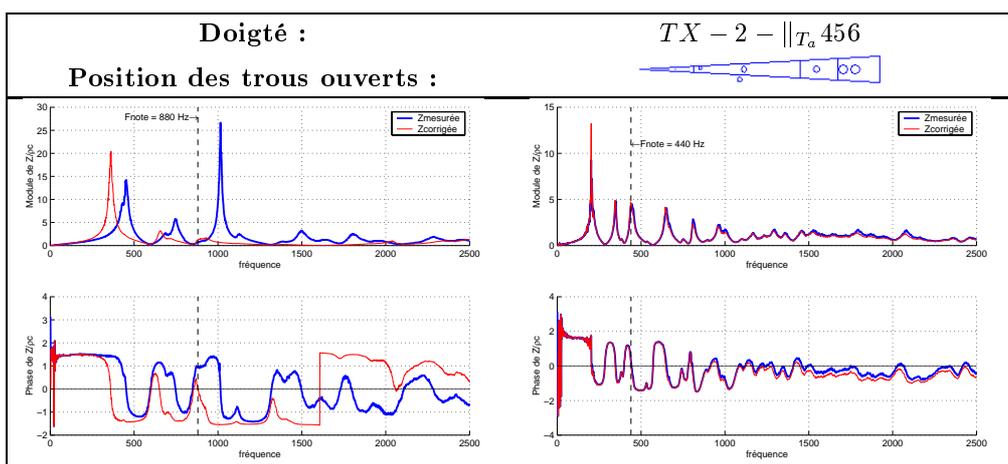
Avis des musiciens : Baryton : Bien - faux - sonne un quart de ton inférieur Alto : Bas - multiphonique, instable. Mieux pour jouer un Sib suraigu.



Mesures d'impédance du doigté Fa#3, alto à gauche et baryton à droite.

### Fa#4

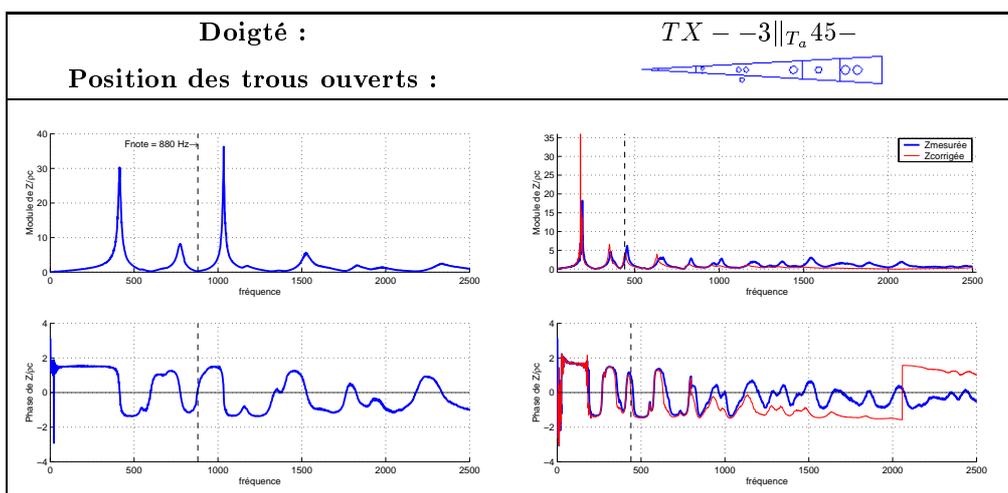
Avis des musiciens : Baryton : Bien - ressemble à 1. Justesse : un peu plus haut que 1. Alto : Très dur à sortir mais assez juste. Très instable.



Mesures d'impédance du doigté Fa#4, alto à gauche et baryton à droite.

## Fa#5

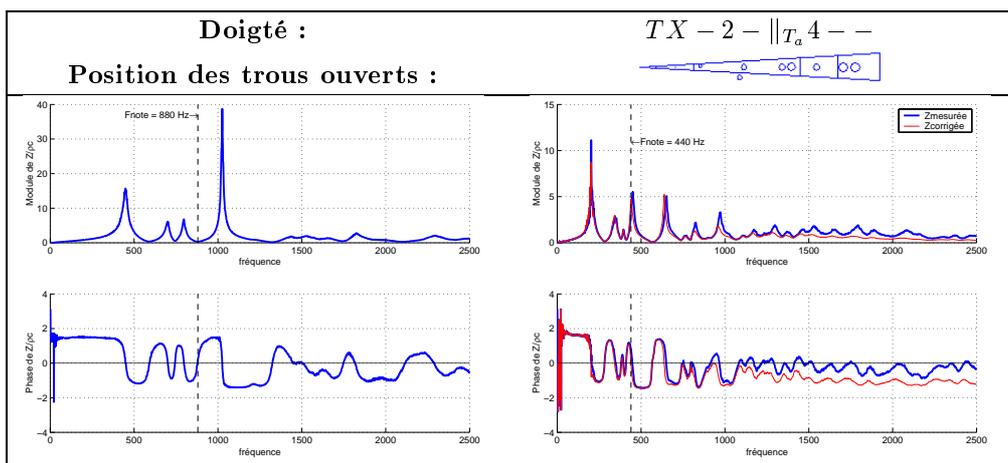
Avis des musiciens : Baryton : Difficile - sort presque en multiphonique. Justesse : trop haut. Alto : Multiphonique - très dur à sortir.



Mesures d'impédance du doigté Fa#5, alto à gauche et baryton à droite.

## Fa#6

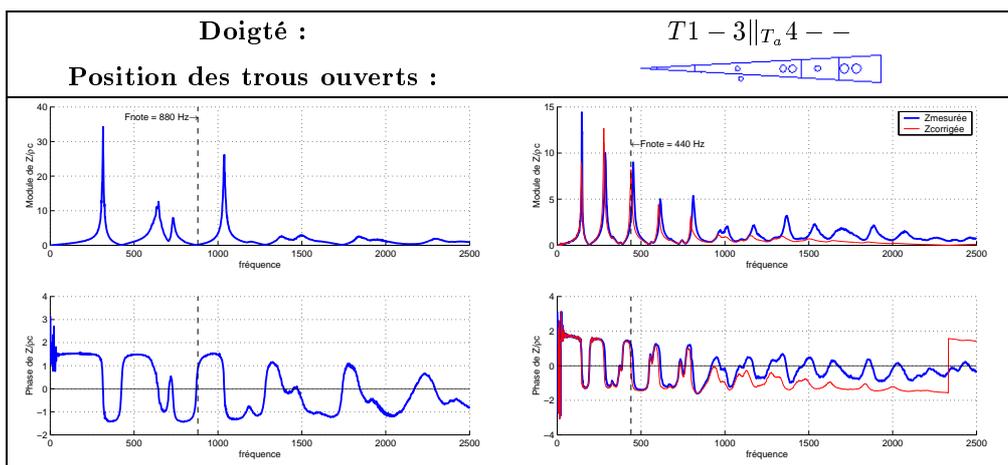
Avis des musiciens : Baryton : Bien - ressemble à 1. Justesse : un peu plus bas que 1. Alto : Très haut - assez facile à sortir au dessus de Mezzo Piano. En dessous de Mezzo Piano : Si suraigu.



Mesures d'impédance du doigté Fa#6, alto à gauche et baryton à droite.

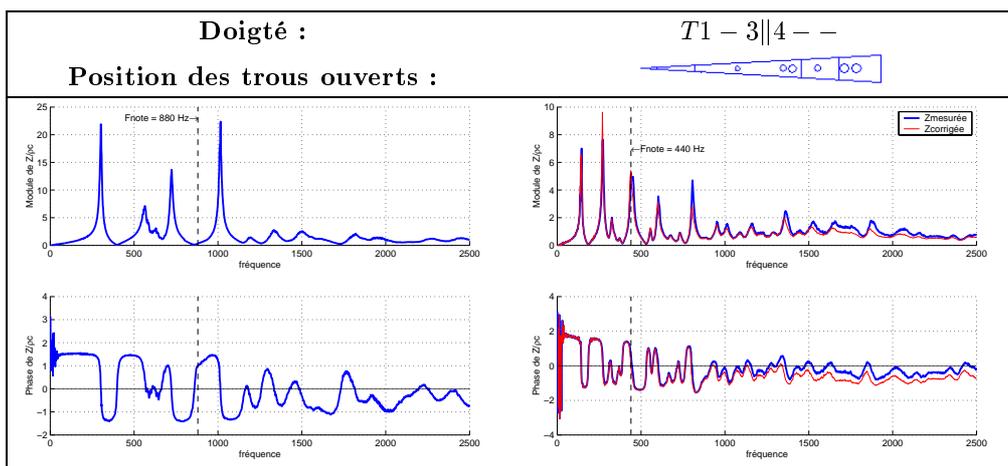
## Fa#7

Avis des musiciens : Baryton : Bien - instable et se rapprochant d'un multiphonique en dessous de Mezzo Piano. Alto : Plus proche du Sol que du Fa#. Le si suraigu sort facilement.



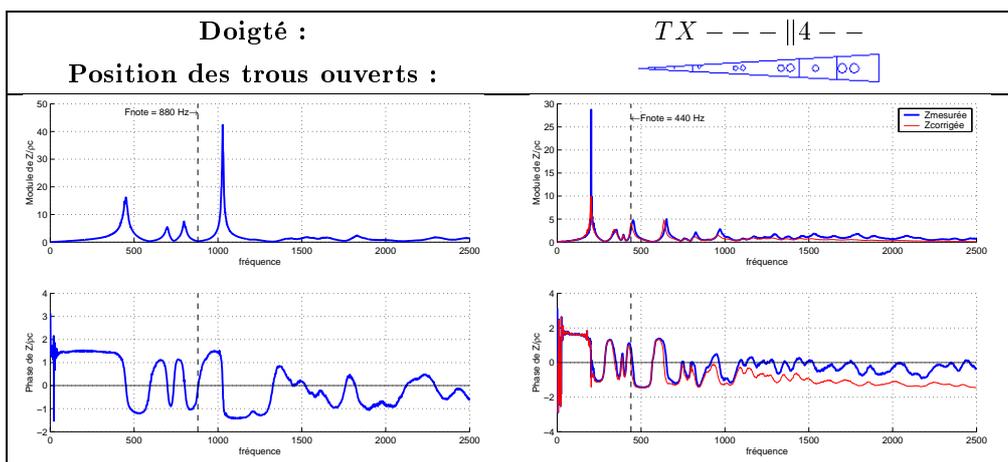
## Fa#8

Avis des musiciens : Baryton : Instable - quasi multiphonique dans les basses nuances. Alto : Presqu'un Sol, mais sort assez facilement.



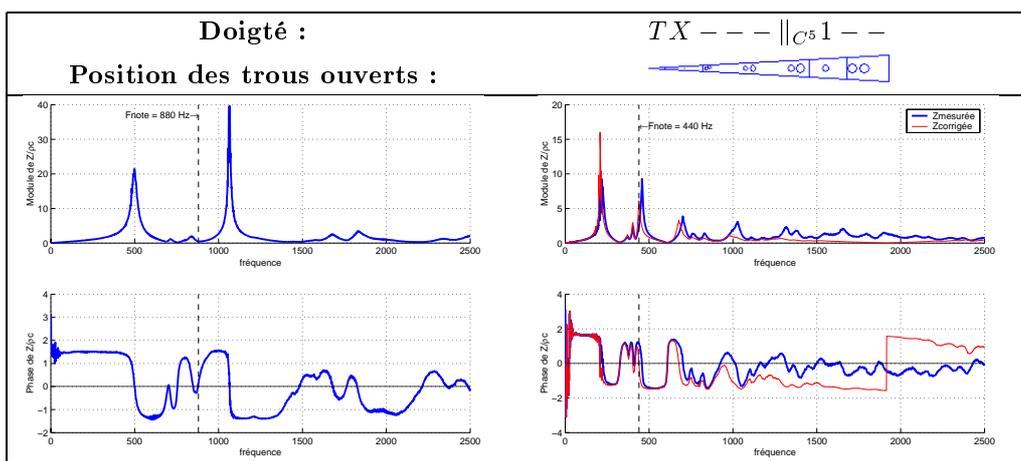
## Fa#9

Avis des musiciens : Baryton : Mauvais - instable - voilé. Alto : Quasi impossible. On le devine au loin derrière un Si suraigu.



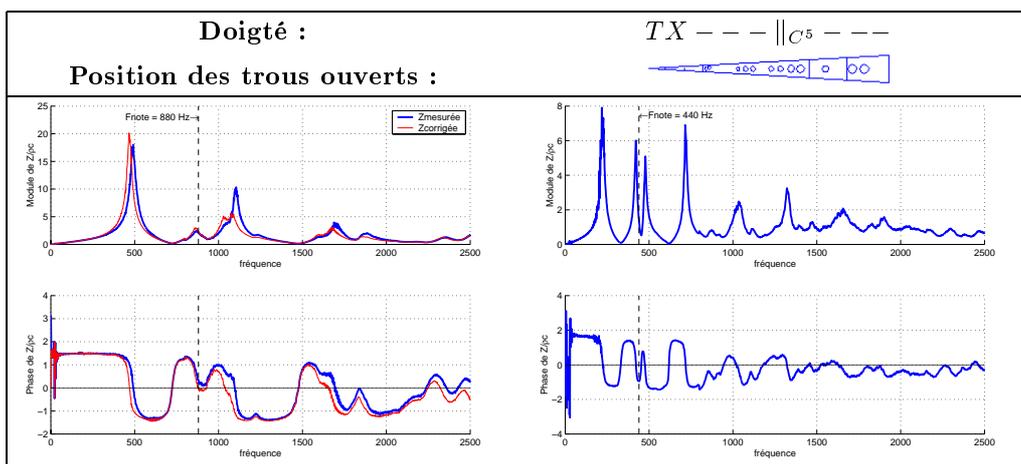
## Fa#10

Avis des musiciens : Baryton : Instable - quasi multiphonique - Justesse : un quart de ton trop haut. Alto : Quasi impossible. Très instable.



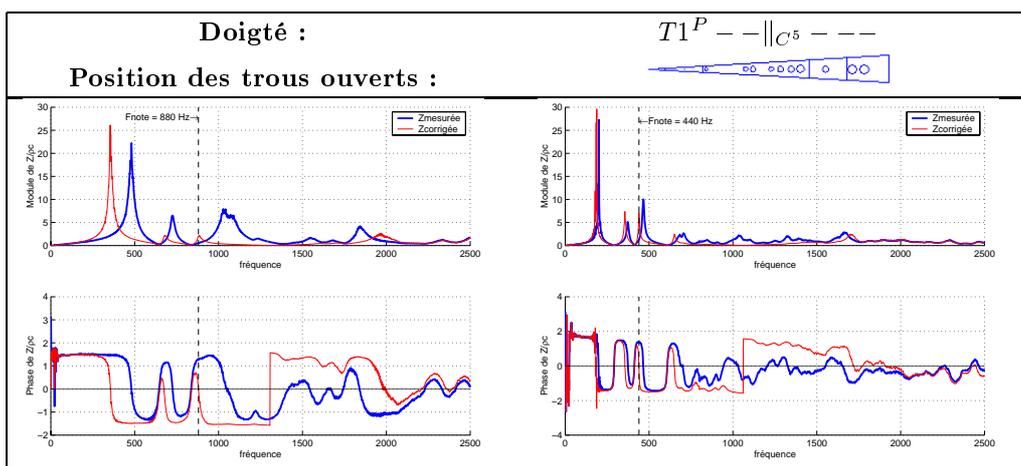
## Fa#11

Avis des musiciens : Baryton : Mauvais - sort très difficilement Presque un Sol suraigu.  
Alto : Bas : plutôt un Fa. Multiphonique et instable.



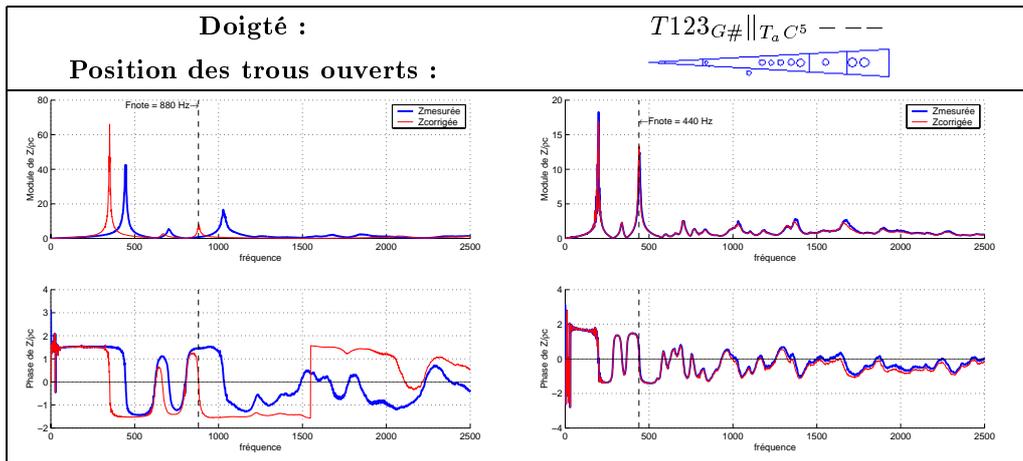
## Fa#12

Avis des musiciens : Baryton : bien stable. Alto : Très facile mais un quart de ton trop haut.



## Fa#13

Avis des musiciens : Baryton : Très bien. Alto : Sort très bien, juste. Très bon Fa# (un peu haut).

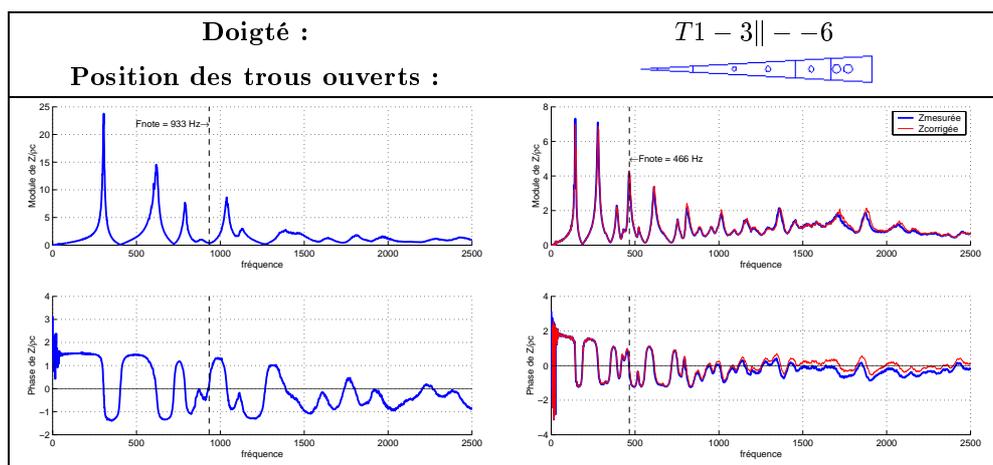


Mesures d'impédance du doigté Fa#13, alto à gauche et baryton à droite.

## Doigtés de Sol

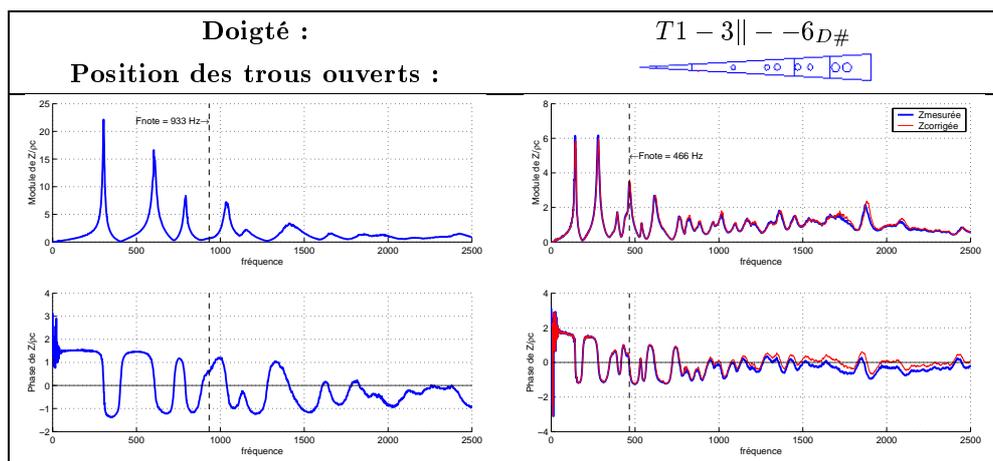
### Sol1

Avis des musiciens : Baryton : moyen - résiste un peu - sonne bien à nuance Forte -  
Justesse : un peu haut. Alto : Très bien - un peu haut.



### Sol2

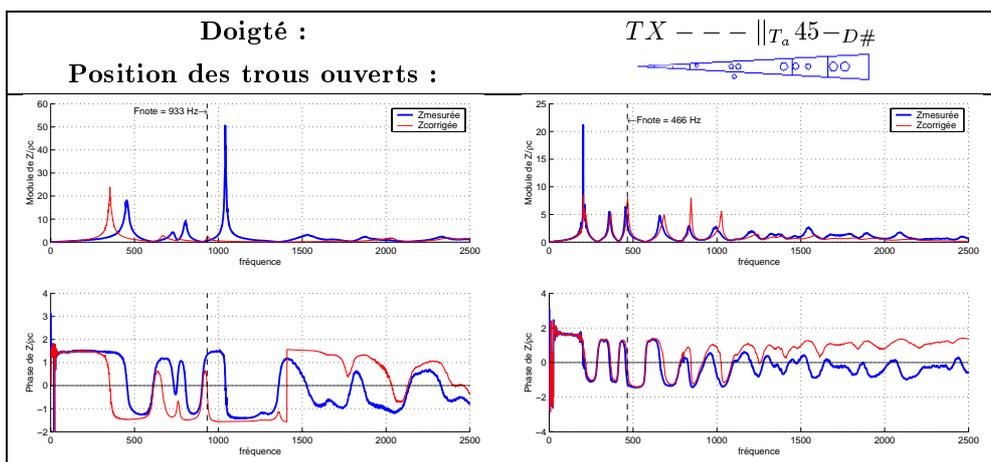
Avis des musiciens : Baryton : Idem que 1. Alto : Pas mal - un peu haut.





## Sol5

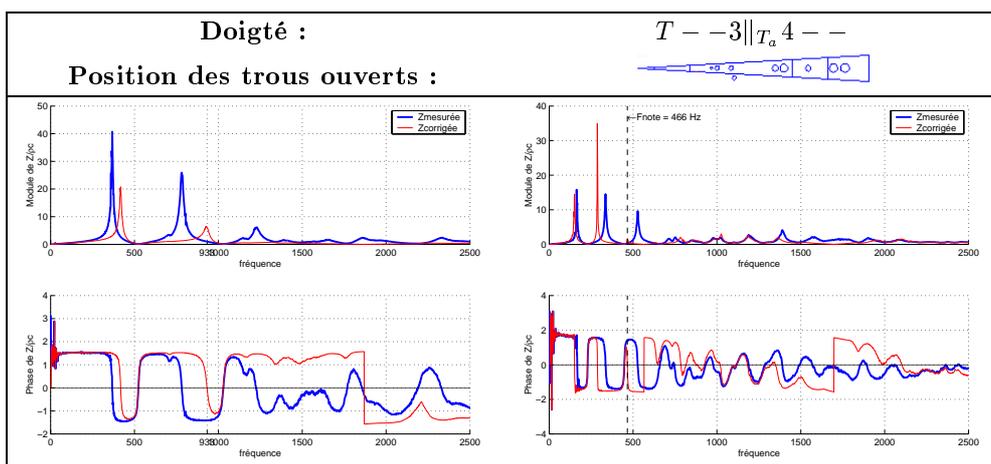
Avis des musiciens : Baryton : Instable en dessous de Mezzo Forte - Justesse : un quart de ton trop bas. Alto : Difficile. Sort en Mezzo Piano.



Mesures d'impédance du doigté Sol5, alto à gauche et baryton à droite.

## Sol6

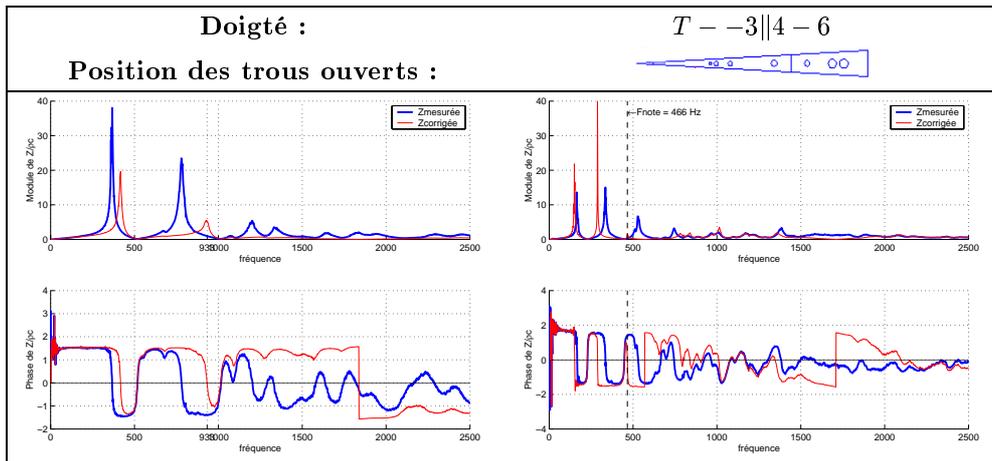
Avis des musiciens : Baryton : Bien mais justesse plus proche d'un La suraigu. Alto : Juste - sort assez bien, mais difficile à tenir à basse nuance.



Mesures d'impédance du doigté Sol6, alto à gauche et baryton à droite.

## Sol7

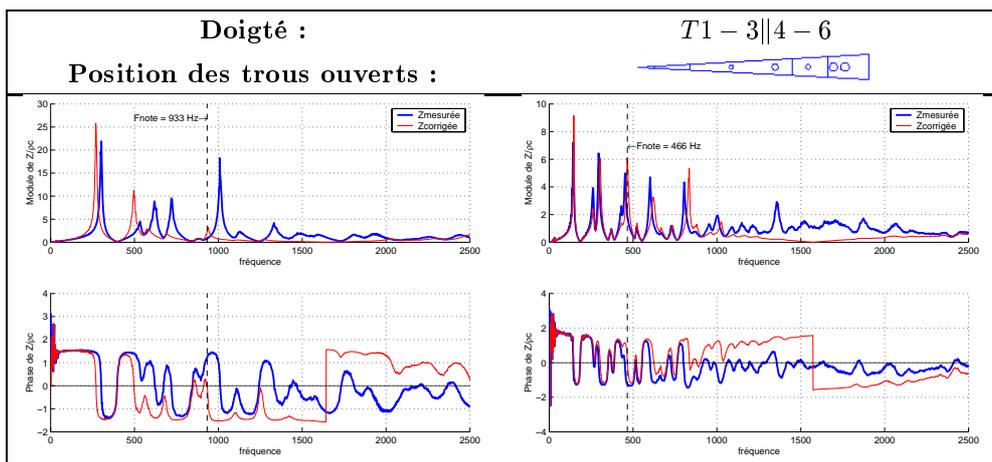
Avis des musiciens : Baryton : Très bien excellent mais pas pour un sol. Ceci est un bon doigté de La suraigu Alto : Multiphonique, avec un la, et un sib mais pas de sol!



Mesures d'impédance du doigté Sol7, alto à gauche et baryton à droite.

## Sol8

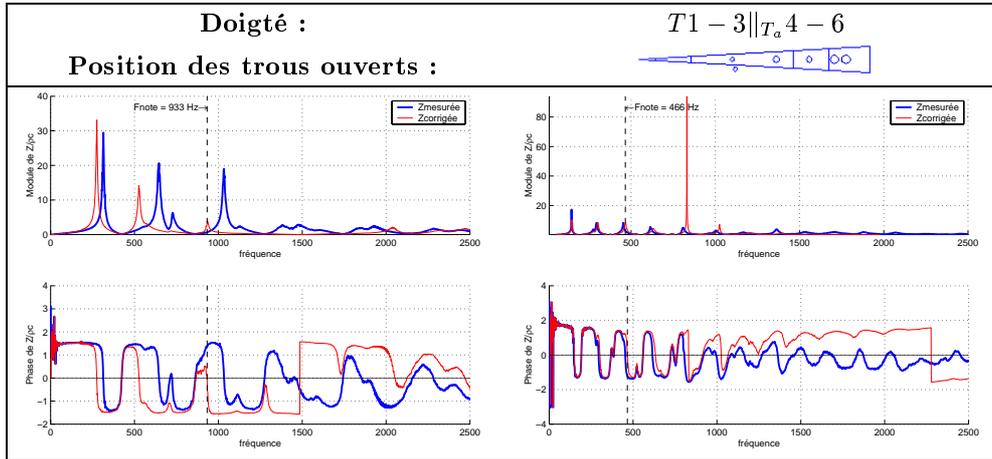
Avis des musiciens : Baryton : Mauvais - instable - on entend un partiel de Si suraigu. Alto : Bien, juste, accepte le volume.



Mesures d'impédance du doigté Sol8, alto à gauche et baryton à droite.

## Sol9

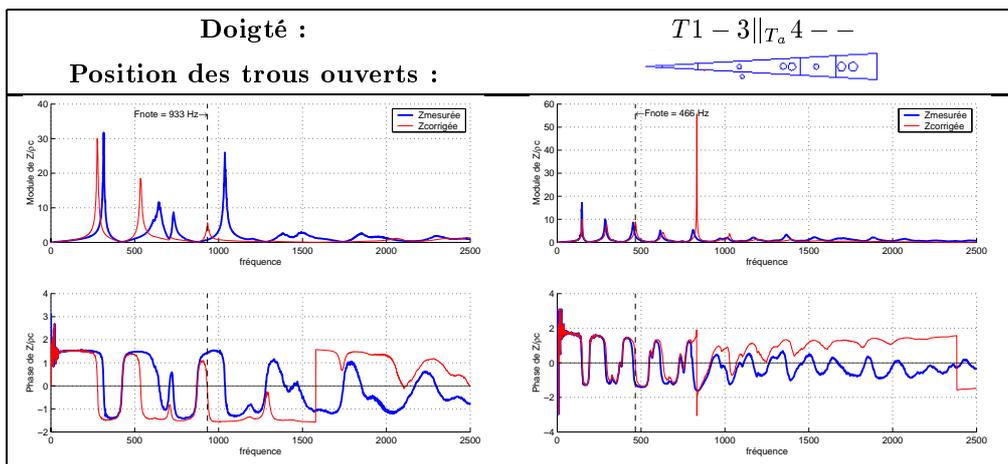
Avis des musiciens : Baryton : Mauvais - instable. Alto : Très bien - facile - juste.



Mesures d'impédance du doigté Sol9, alto à gauche et baryton à droite.

## Sol10

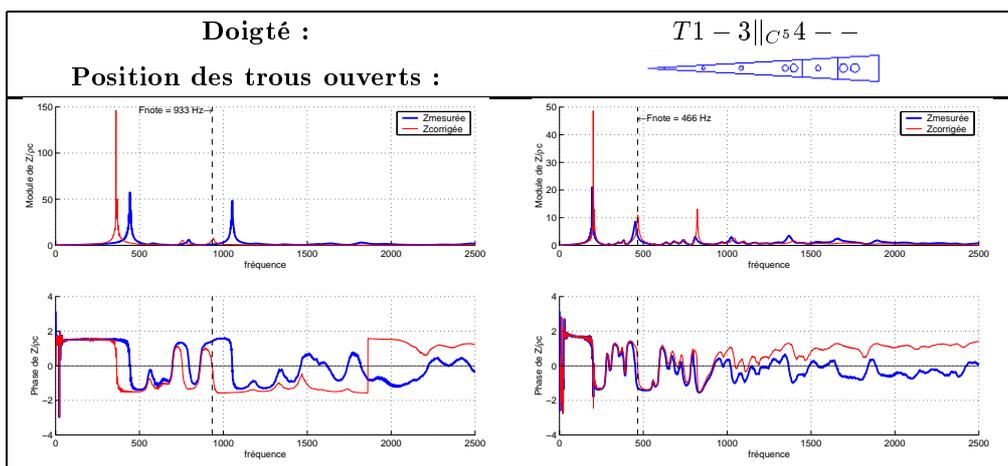
Avis des musiciens : Baryton : C'est le doigté 7 du Fa# : C'est mieux pour un Fa# que pour un Sol. Alto : Trop bas, mais sort bien.



Mesures d'impédance du doigté Sol10, alto à gauche et baryton à droite.

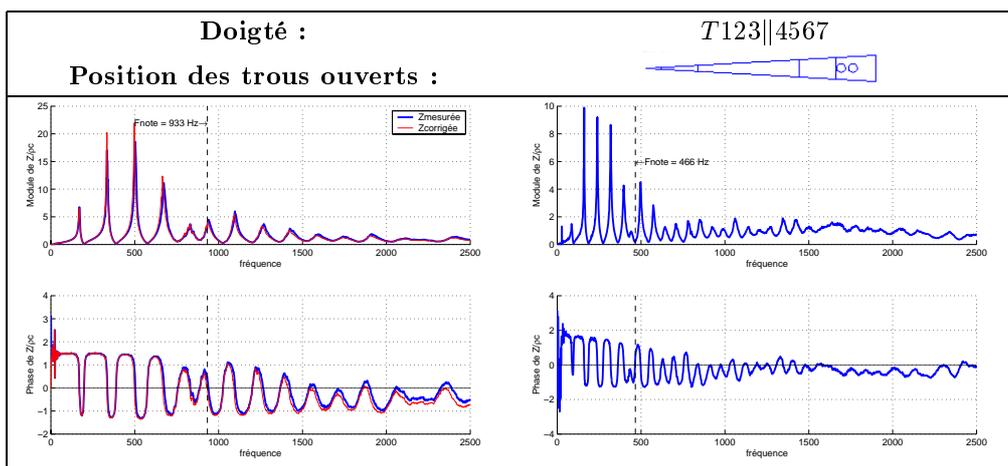
## Sol11

Avis des musiciens : Baryton : Bien - Facile mais un quart de ton trop bas. Alto : Presque un Fa#. Sort bien.



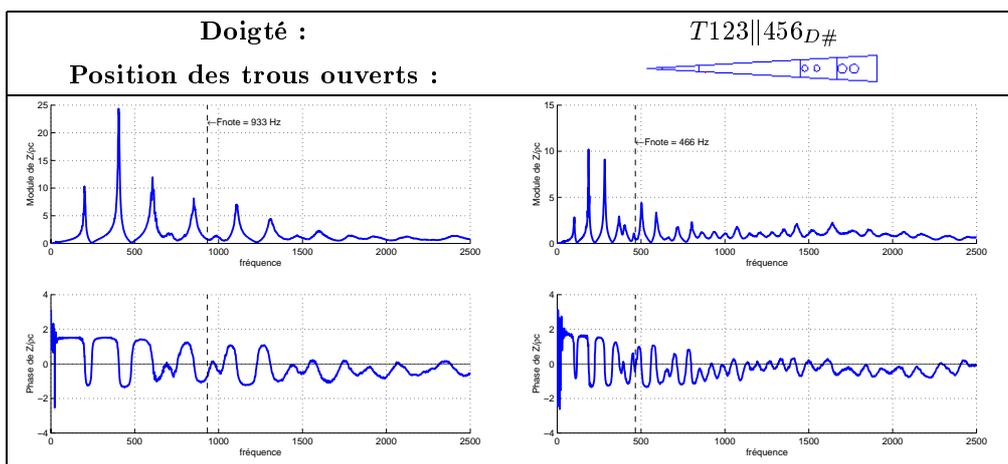
## Sol12

Avis des musiciens : Baryton : Instable dans les basses nuances. Joli couleurs d'harmonique... Justesse : trop haut. Alto : Le La suraigu sort plus facilement, mais ok.



## Sol13

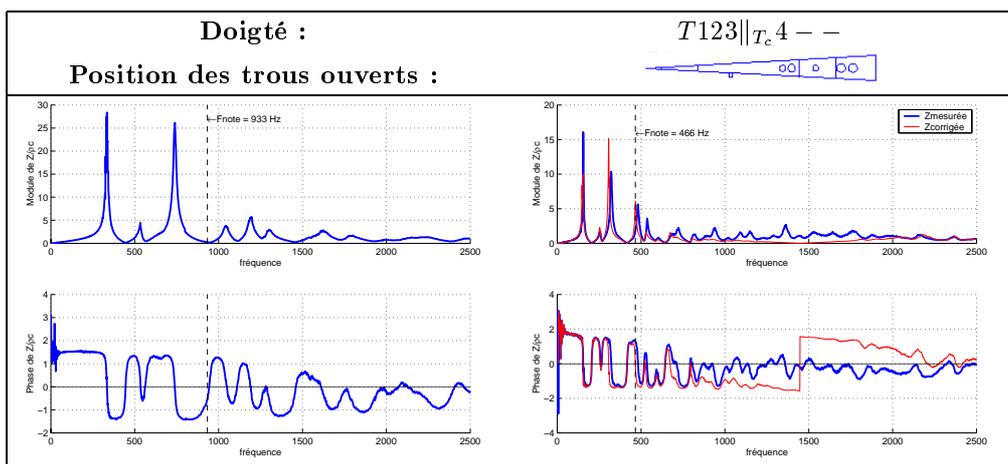
Avis des musiciens : Baryton : Instable dans les basses nuances. Joli couleurs d'harmonique... Justesse : trop haut Alto : Idem 12.



Mesures d'impédance du doigté Sol13, alto à gauche et baryton à droite.

## Sol14

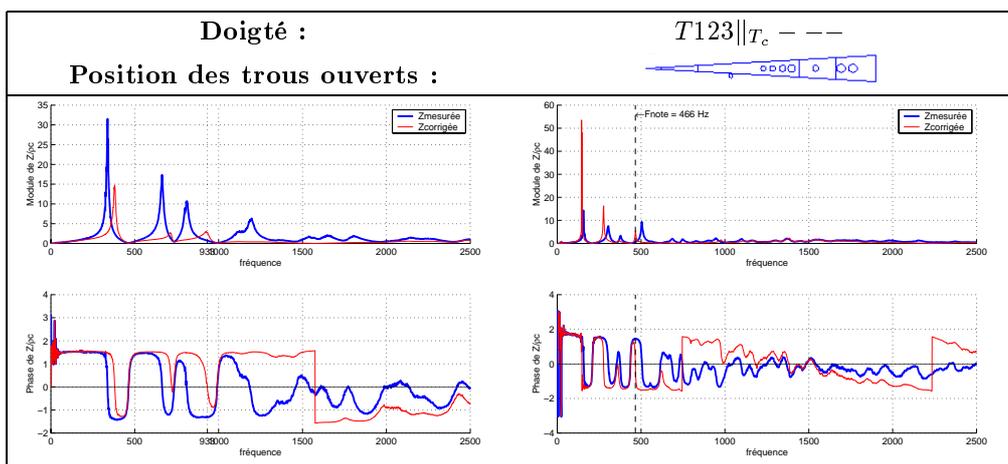
Avis des musiciens : Baryton : Mauvais - très instable - plus proche du Sol#. Alto : Sol# un peu bas. Assez instable, part facilement en multiphonique.



Mesures d'impédance du doigté Sol14, alto à gauche et baryton à droite.

## Sol15

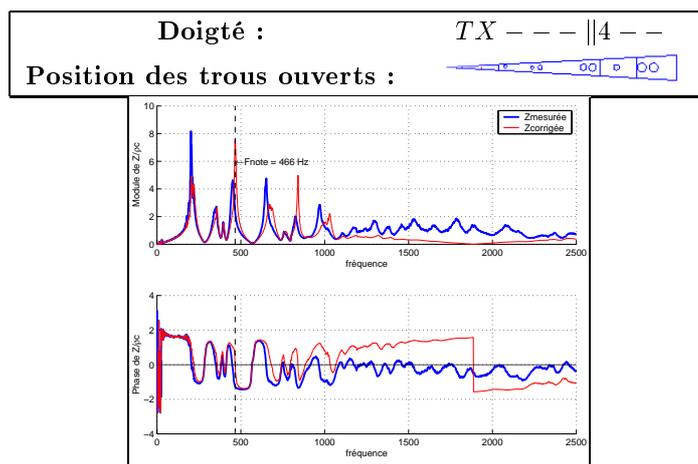
Avis des musiciens : Baryton : Assez instable - un quart de ton trop haut. Alto : Entre La et Sol#, mais sort bien.



Mesures d'impédance du doigté Sol15, alto à gauche et baryton à droite.

## Sol16

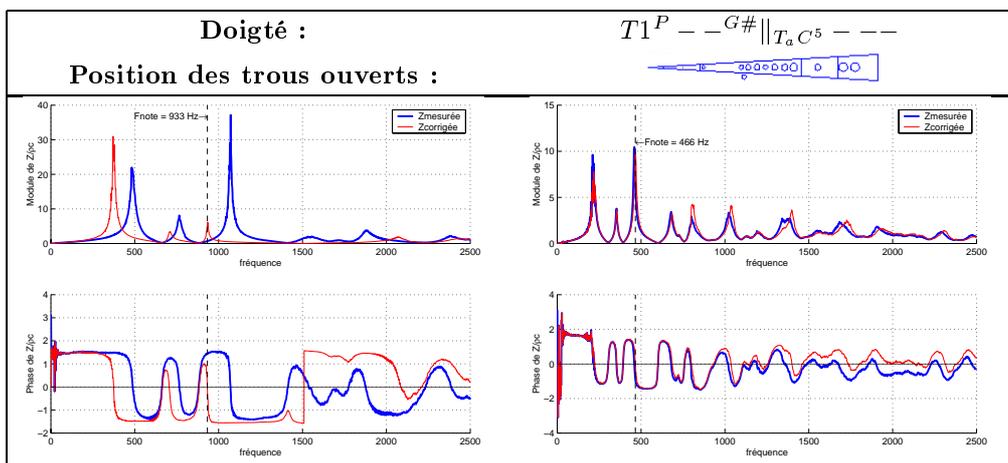
Avis des musiciens : Baryton : se rapproche du 3 et du 4 : Mauvais - très instable. Alto : Il y est ! au milieu de plein d'autres...



Mesures d'impédance du doigté Sol16 au baryton

## Sol17

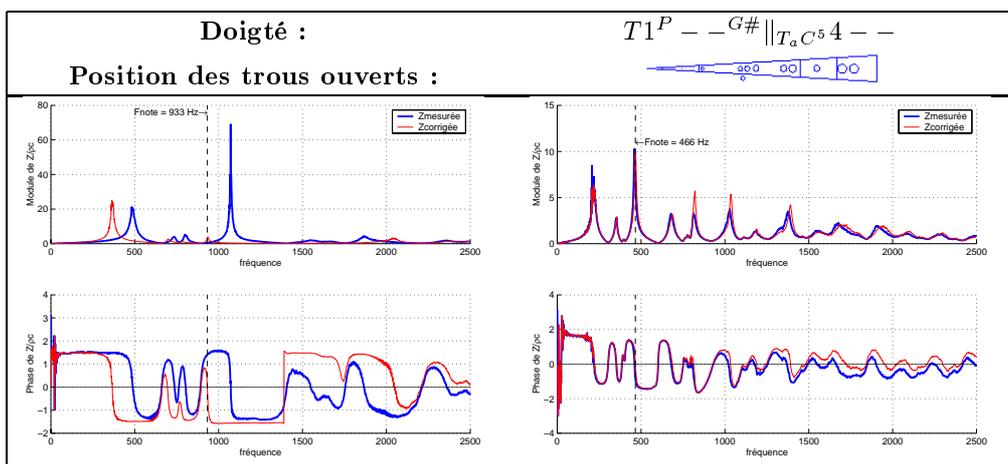
Avis des musiciens : Baryton : facile mais bas. Alto : Juste, sort bien.



Mesures d'impédance du doigté Sol17, alto à gauche et baryton à droite.

## Sol18

Avis des musiciens : Baryton : Bien - Facile mais un quart de ton trop bas. Alto : Sort bien - très facile - juste.

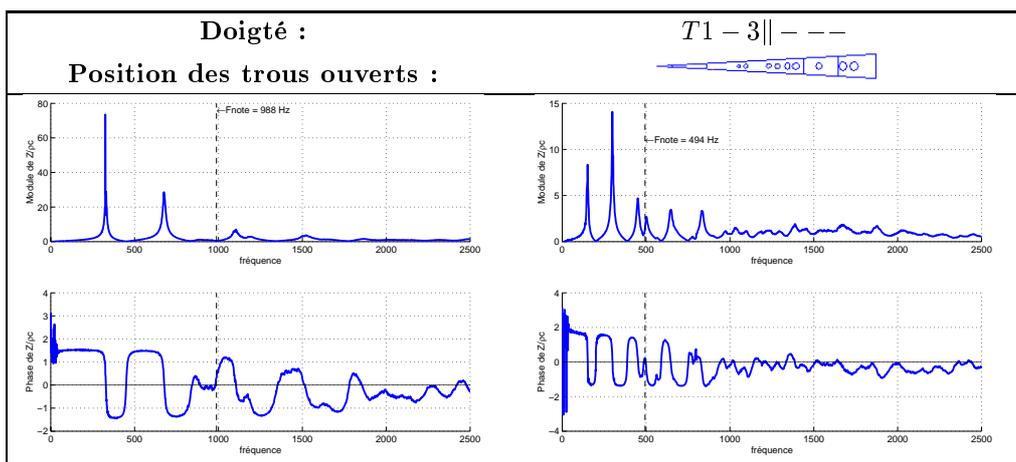


Mesures d'impédance du doigté Sol18, alto à gauche et baryton à droite.

## Doigtés de Sol#

### Sol#1

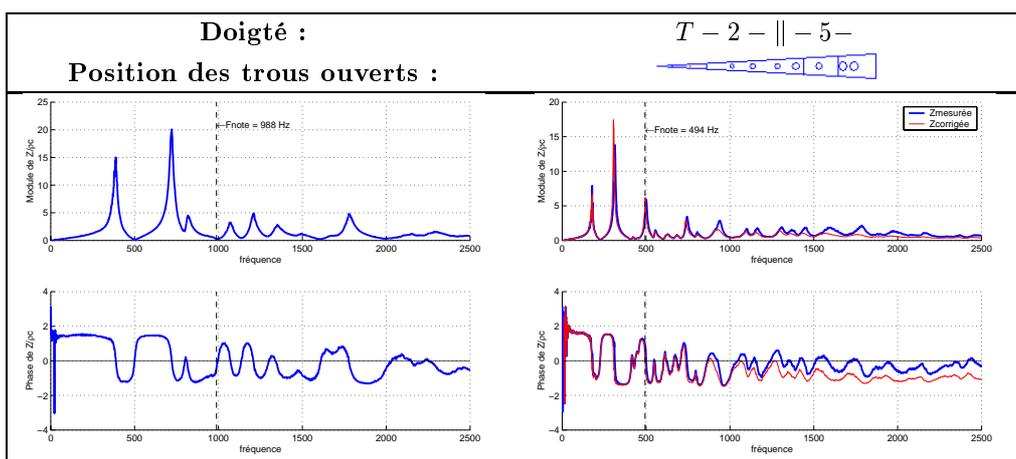
Avis des musiciens : Baryton : quasi impossible - très instable. Alto : Bien mais un petit peu haut.



Mesures d'impédance du doigté Sol#1, alto à gauche et baryton à droite.

### Sol#2

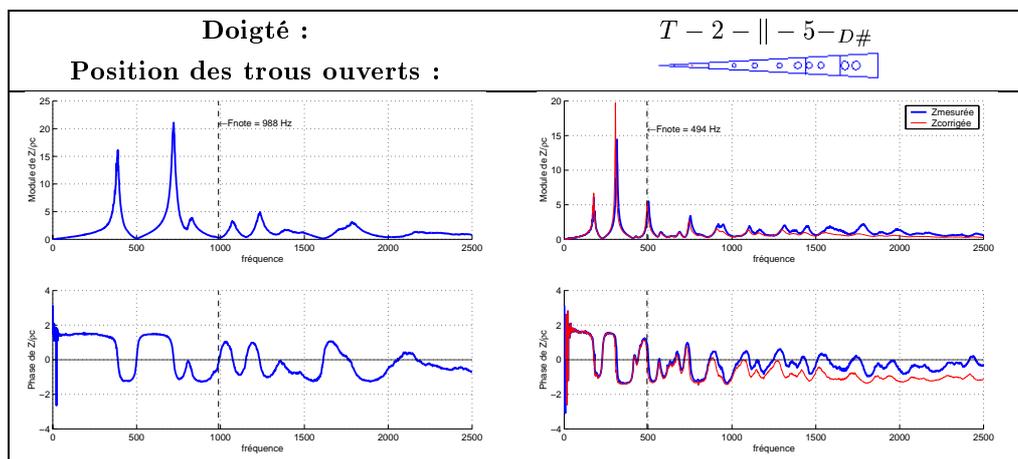
Avis des musiciens : Baryton : Assez bien mais voilé. Alto : Assez bien mais un peu haut.



Mesures d'impédance du doigté Sol#2, alto à gauche et baryton à droite.

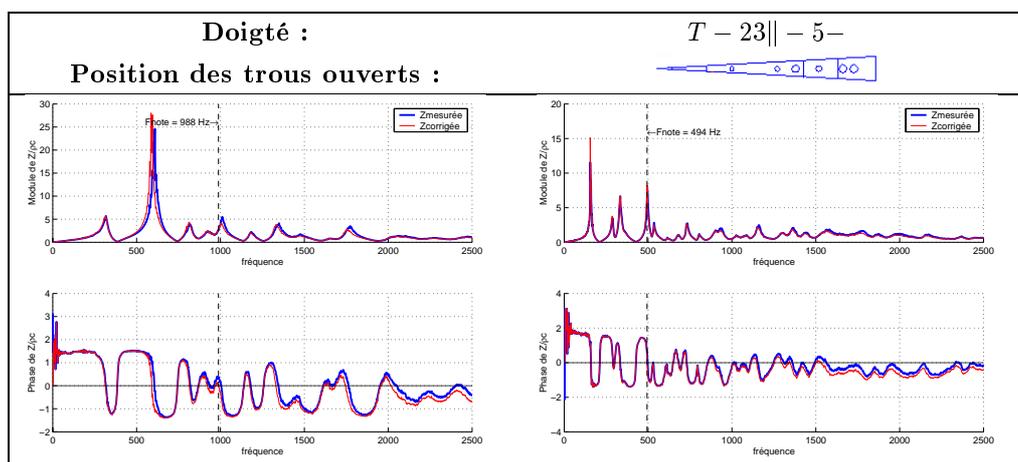
### Sol#3

Avis des musiciens : Baryton : Idem que 2. Alto : Idem, la clé de Eb ne change rien.



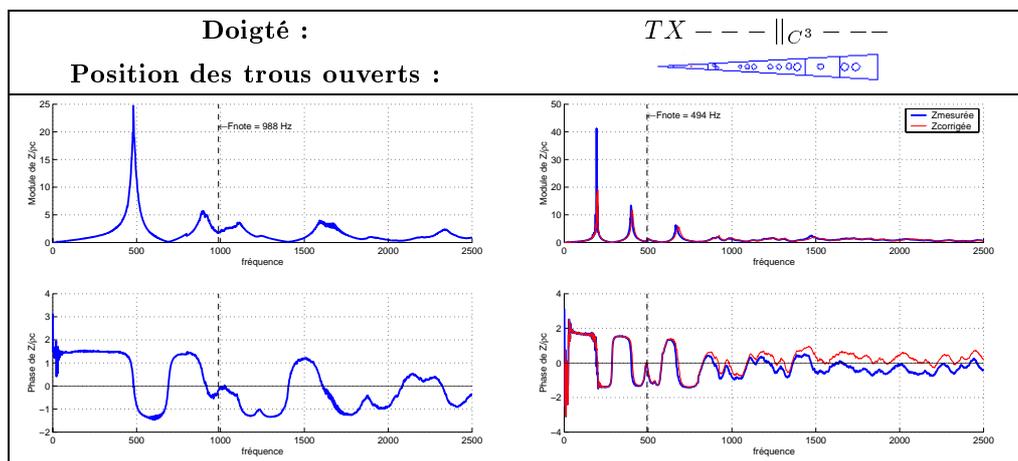
### Sol#4

Avis des musiciens : Baryton : Plus instable que 2 et 3 - haut en justesse - part facilement en multiphonique. Alto : Multiphonique.



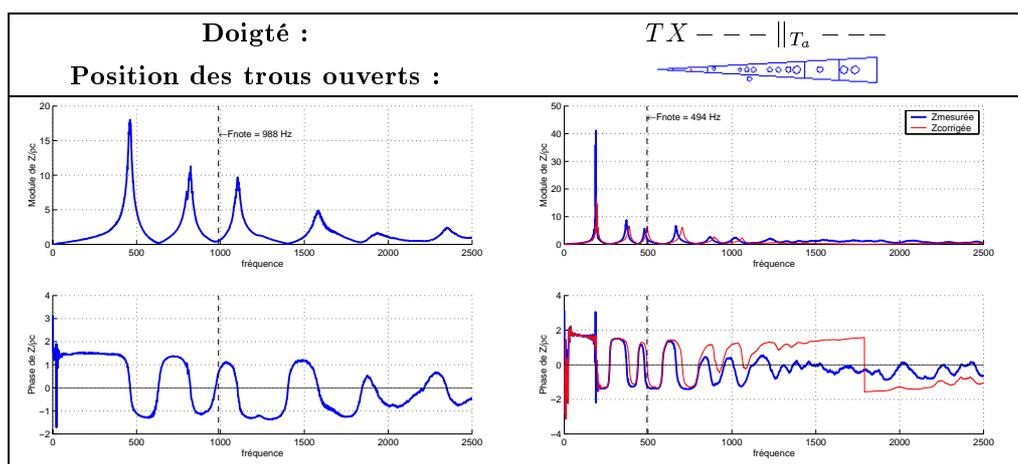
## Sol#5

Avis des musiciens : Baryton : Mauvais impossible. Alto : Do suraigu sort très bien.



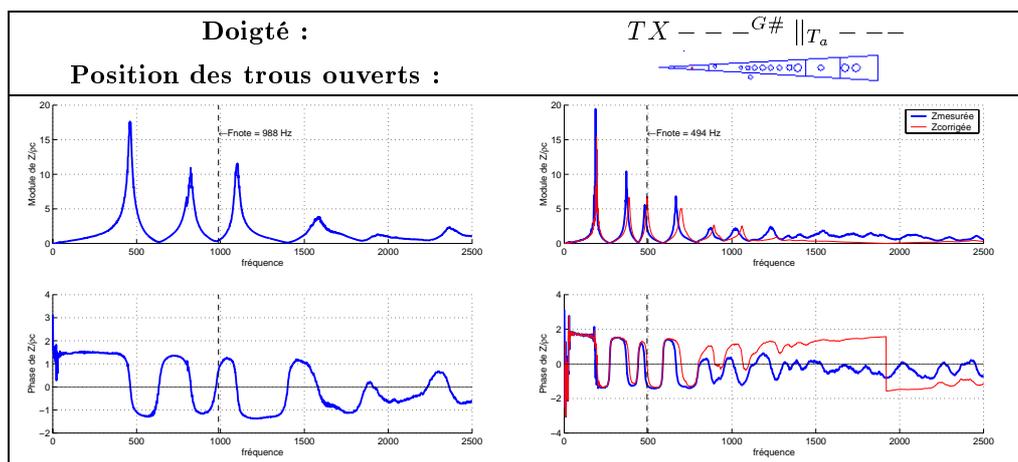
## Sol#6

Avis des musiciens : Baryton : Moyen - justesse plus proche du suraigu - le partiel Do# sort plus facilement que le Sol#. Alto : Bien dans le medium seulement, et assez stable, sinon, on sent que le multiphonique n'est pas loin.



## Sol#7

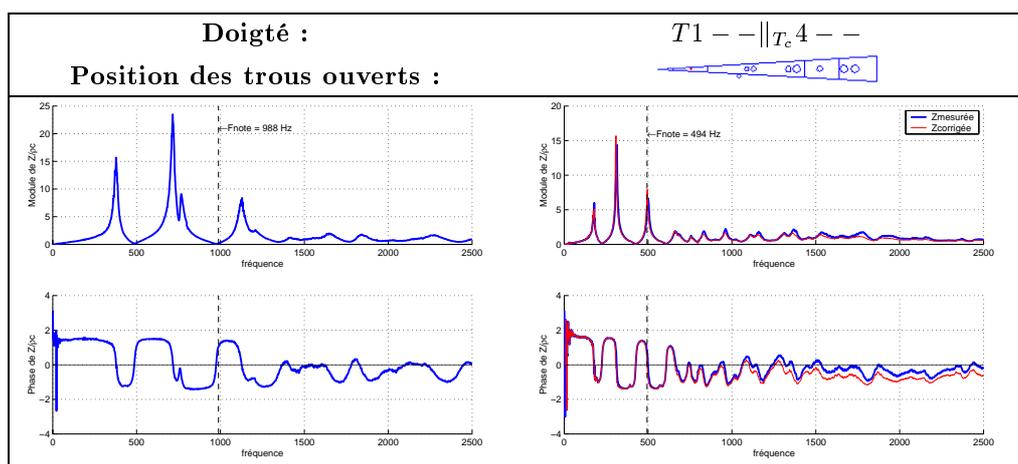
Avis des musiciens : Baryton : Idem que 6 - Justesse : plus haut que 6. Alto : Bien juste - sature un peu.



Mesures d'impédance du doigté Sol#7, alto à gauche et baryton à droite.

## Sol#8

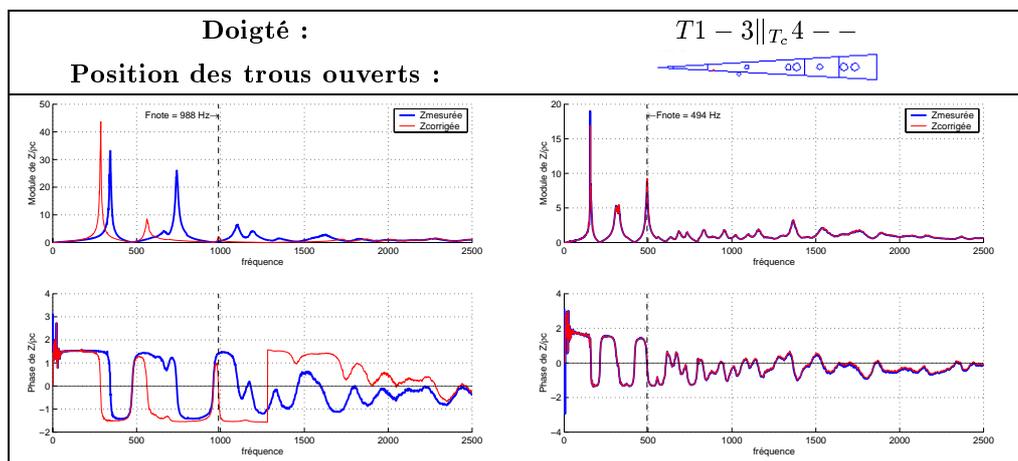
Avis des musiciens : Baryton : Instable. Craque sur le Do inférieur. Alto : Juste - très bien.



Mesures d'impédance du doigté Sol#8, alto à gauche et baryton à droite.

## Sol#9

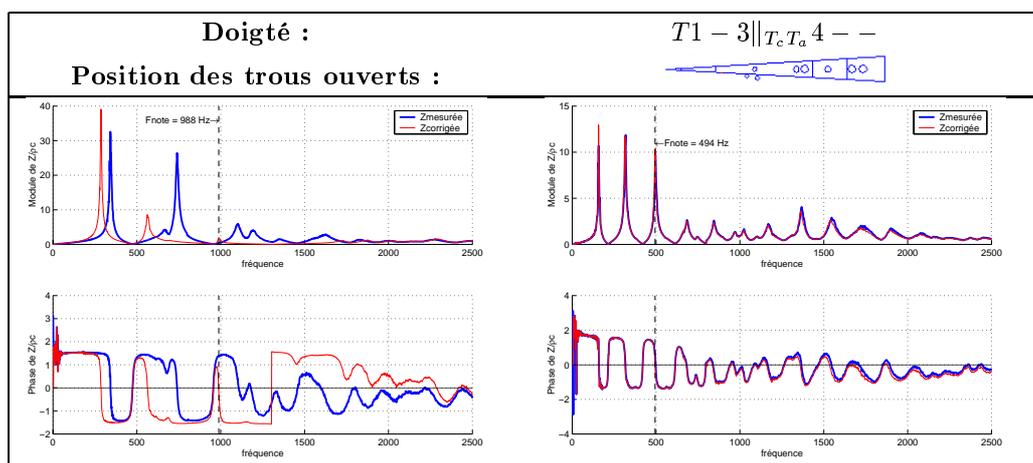
Avis des musiciens : Baryton : Très bien. Alto : Très bien.



Mesures d'impédance du doigté Sol#9, alto à gauche et baryton à droite.

## Sol#10

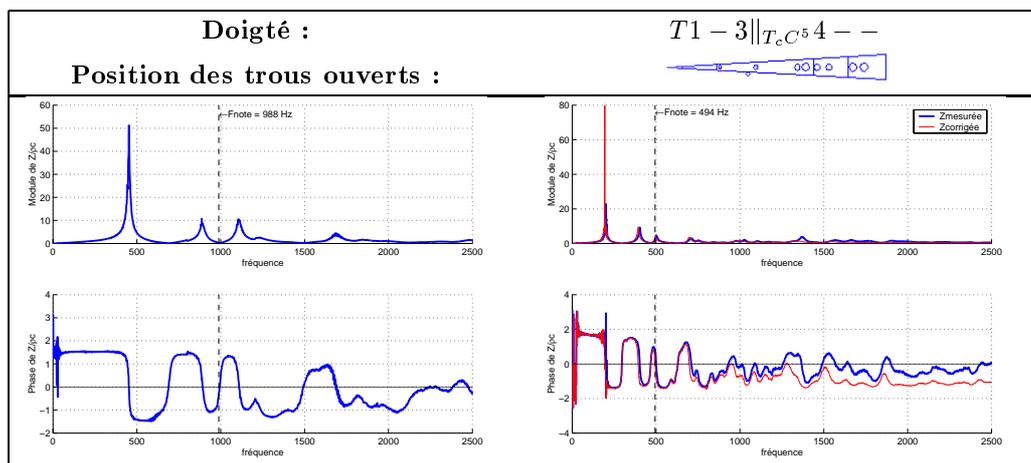
Avis des musiciens : Baryton : Bien - Justesse : un quart de ton trop haut. Alto : Très bien.



Mesures d'impédance du doigté Sol#10, alto à gauche et baryton à droite.

## Sol#11

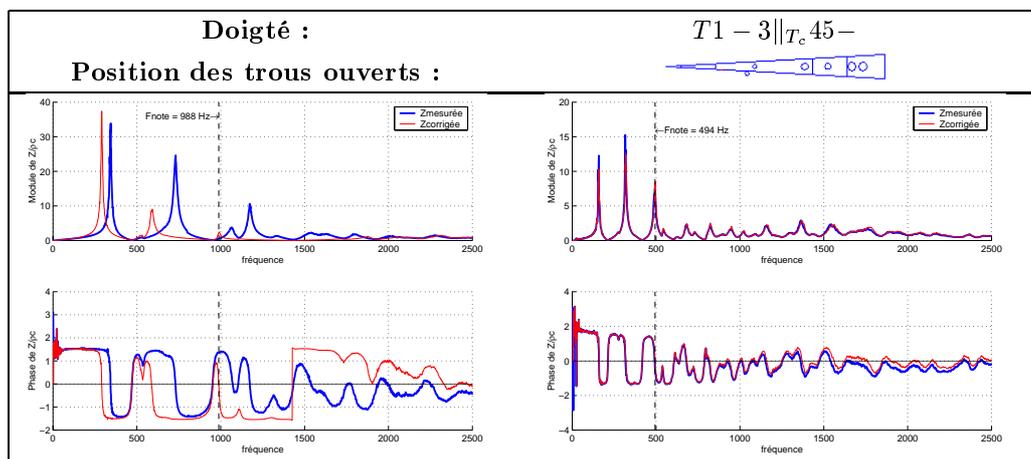
Avis des musiciens : Baryton : Mauvais : la clé de Fa# fait craquer la note. Alto : Dur.



Mesures d'impédance du doigté Sol#11, alto à gauche et baryton à droite.

## Sol#12

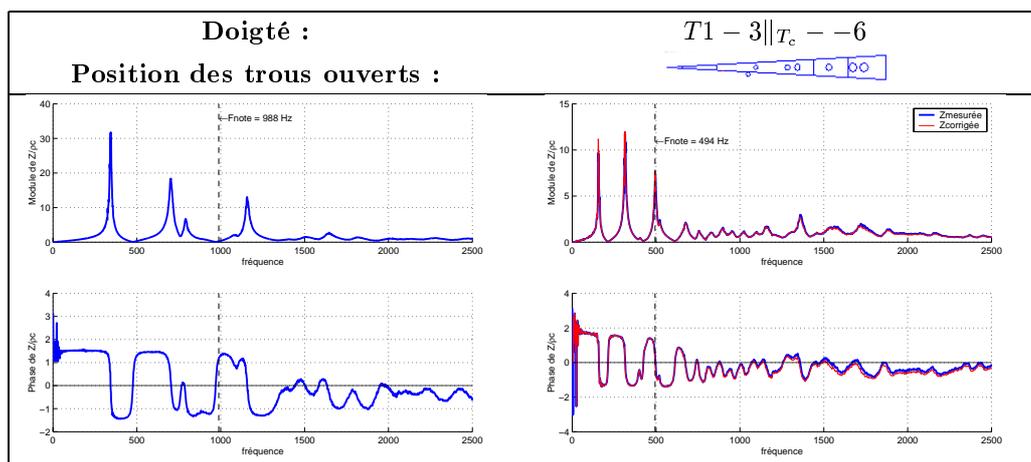
Avis des musiciens : Baryton : Idem que 9 mais un peu plus bas. Alto : Très bien.



Mesures d'impédance du doigté Sol#12, alto à gauche et baryton à droite.

## Sol#13

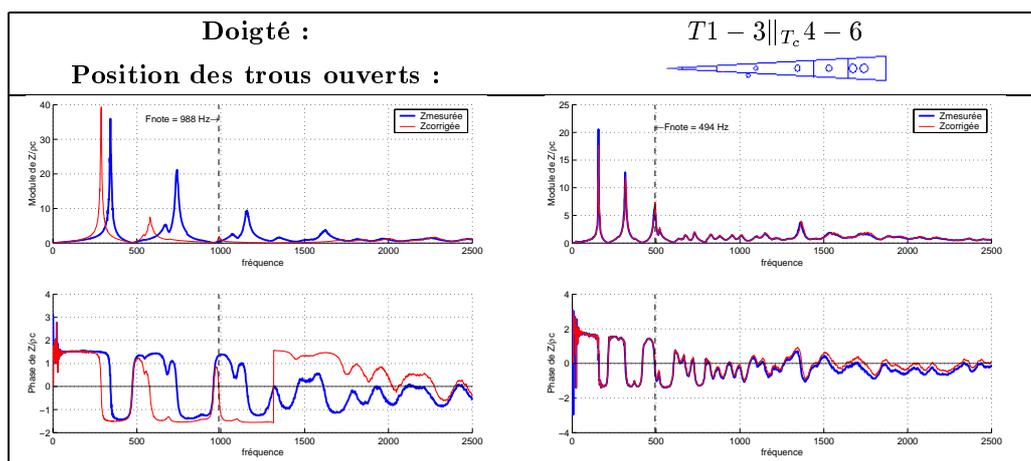
Avis des musiciens : Baryton : Bien - Justesse : un peu haut. Alto : Bien (présence du Si suraigu).



Mesures d'impédance du doigté Sol#13, alto à gauche et baryton à droite.

## Sol#14

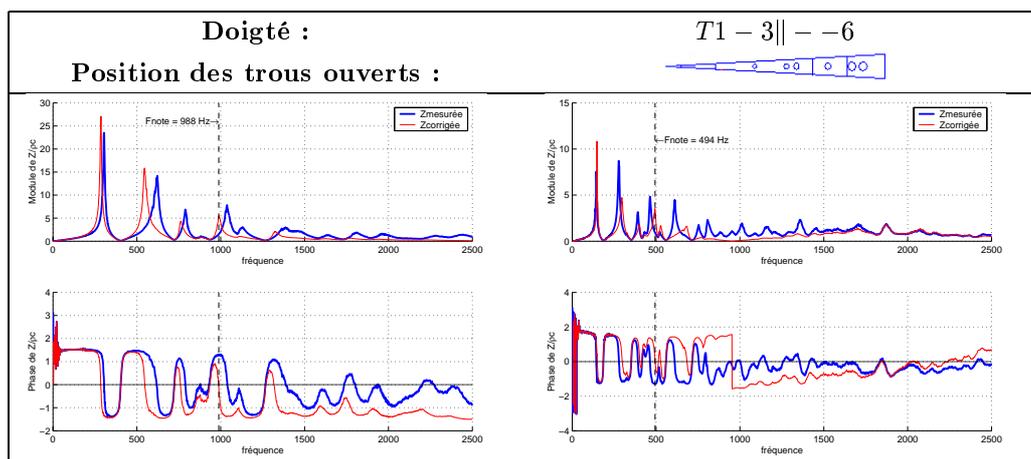
Avis des musiciens : Baryton : Idem que 9 mais un peu plus instable avec le rajout du 3 main droite. Alto : Très bien.



Mesures d'impédance du doigté Sol#14, alto à gauche et baryton à droite.

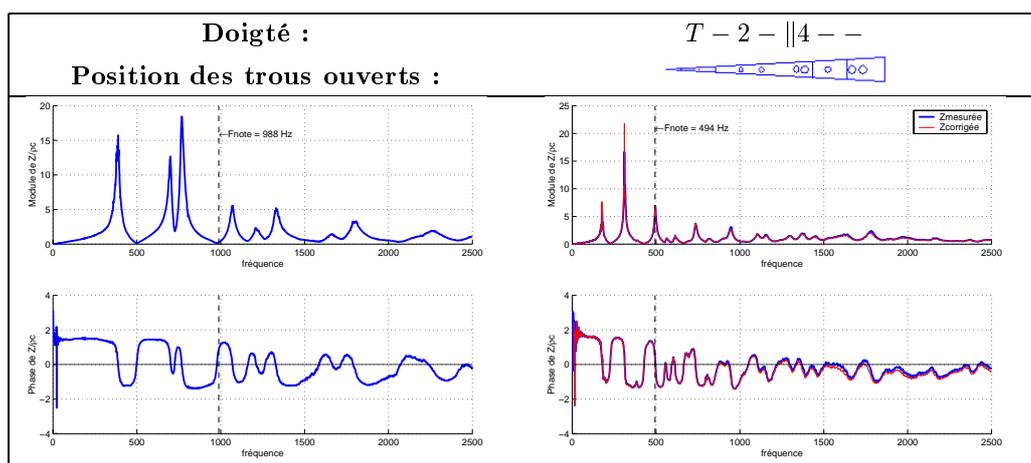
## Sol#15

Avis des musiciens : Baryton : Moyen - voilé et plus proche du Sol suraigu en justesse.  
Alto : Trop bas.



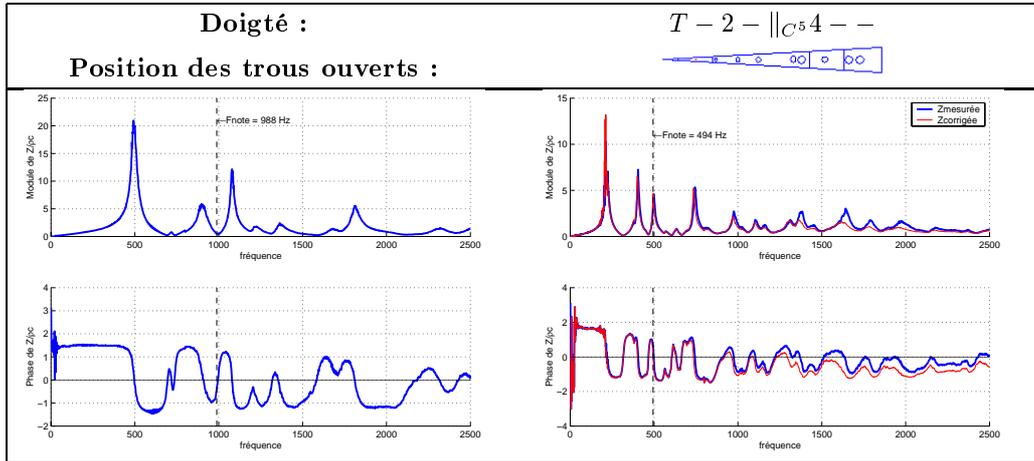
## Sol#16

Avis des musiciens : Baryton : AB voilé - ressemble à 2. Alto : Bien mais on attrape le Si et le Do.



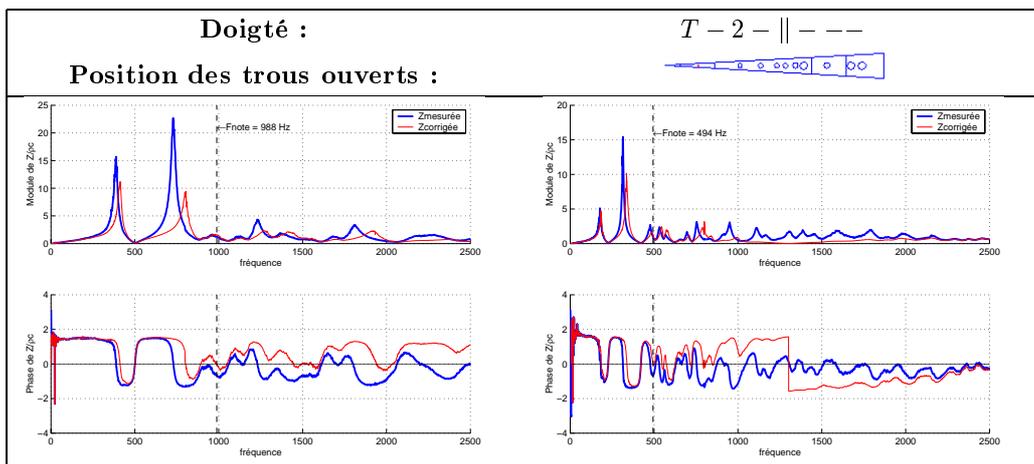
## Sol#17

Avis des musiciens : Baryton : Mauvais. Alto : Dur - multiphonique.



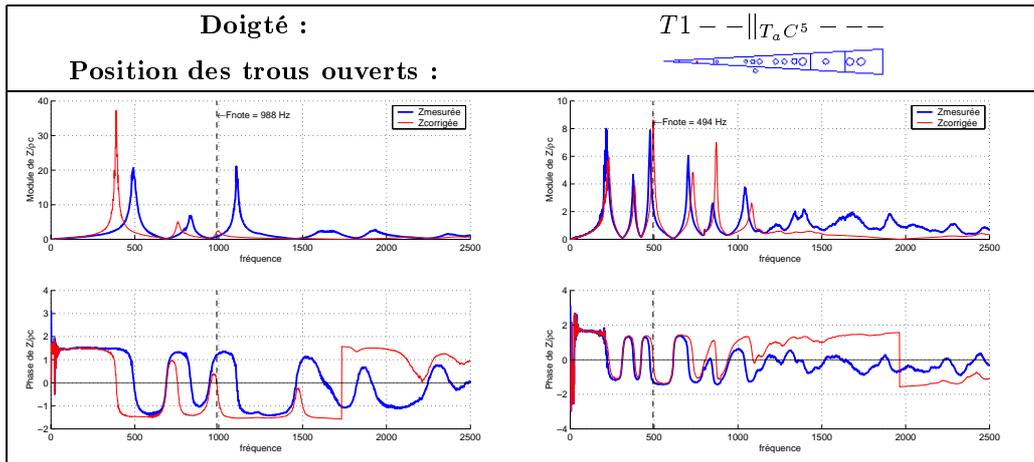
## Sol#18

Avis des musiciens : Baryton : Très instable - limite infaisable. Alto : Très instable - limite infaisable.



## Sol#19

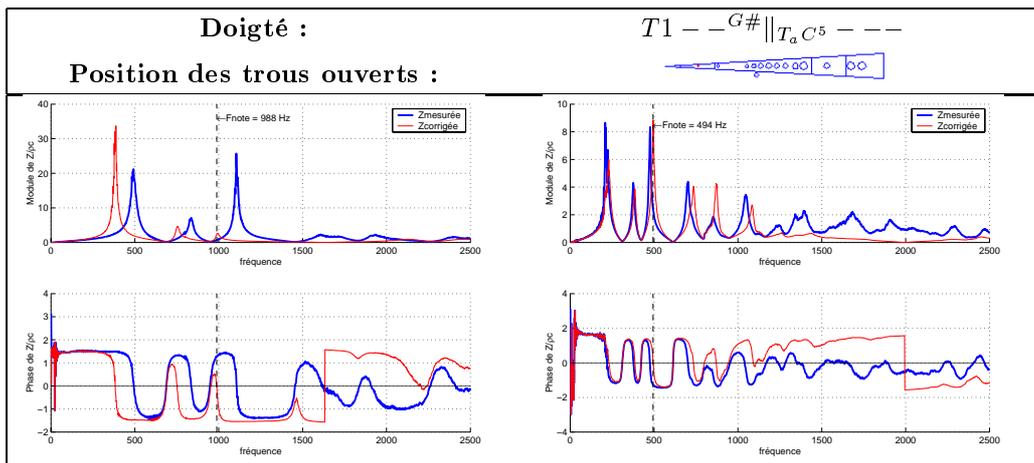
Avis des musiciens : Baryton : Bien pour un Sol suraigu mais pas pour un Sol#. Ce doigté est répertorié dans les Sol. On ne l'a pas analysé, il est entre 6 et 7 du Sol suraigu.  
 Alto : Bien mais un peu bas en Mezzo Piano, mais sinon frotte avec le Si.



Mesures d'impédance du doigté Sol#19, alto à gauche et baryton à droite.

## Sol#20

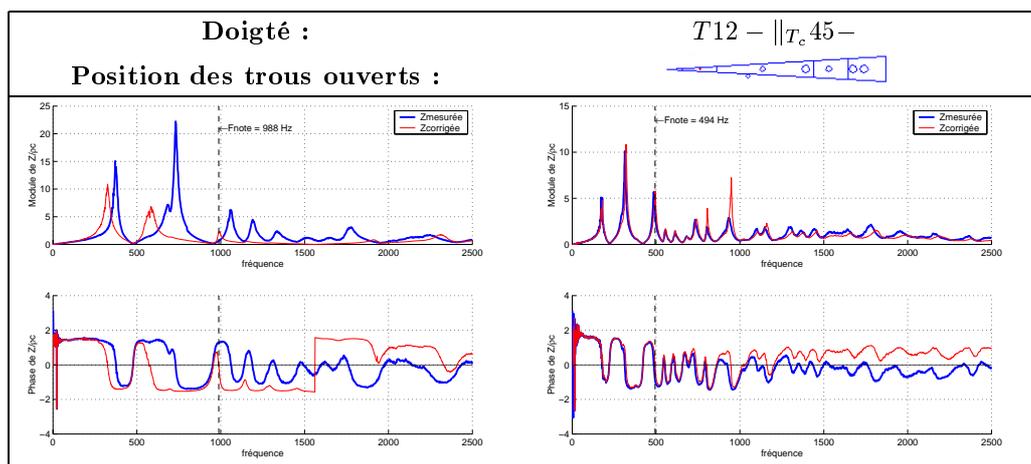
Avis des musiciens : Baryton : Très bien pour un Sol suraigu. Alto : Bien.



Mesures d'impédance du doigté Sol#20, alto à gauche et baryton à droite.

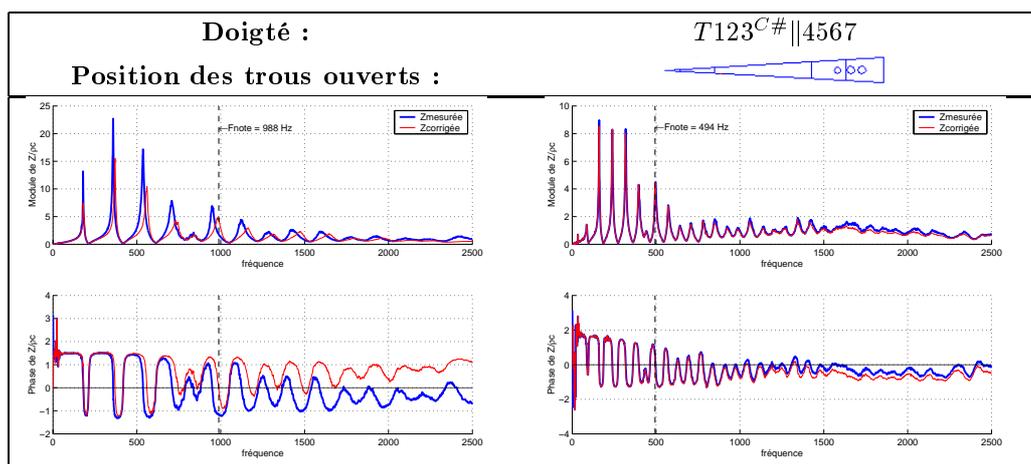
## Sol#21

Avis des musiciens : Baryton : Mauvais instable. Alto : Marche bien mais pas à nuance Piano.



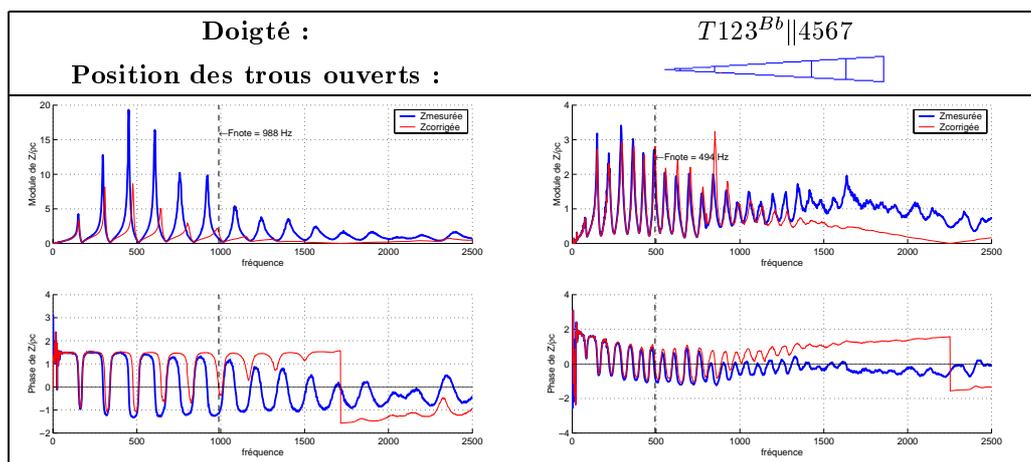
## Sol#22

Avis des musiciens : Baryton : Bien : belle couleur de son harmonique - Justesse : un peu haut. Alto : Super La.



## Sol#23

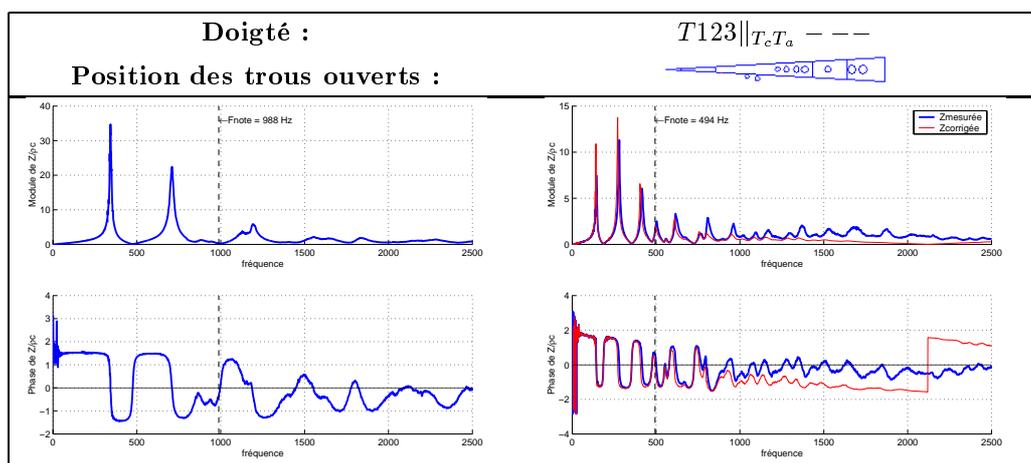
Avis des musiciens : Baryton : Bien : belle couleur de son harmonique - Justesse : un peu haut. Alto : Bien, mais haut.



Mesures d'impédance du doigté Sol#23, alto à gauche et baryton à droite.

## Sol#24

Avis des musiciens : Baryton : Bien - justesse top haut. Alto : Assez haut mais facile.



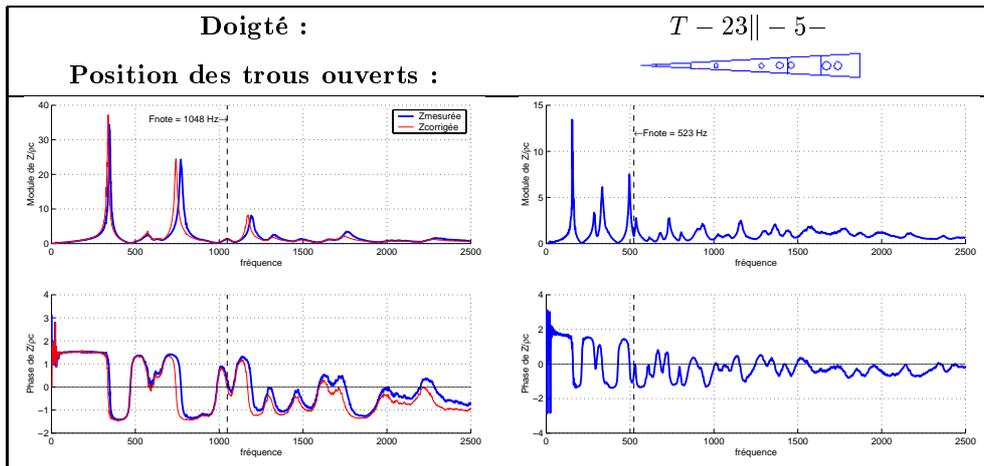
Mesures d'impédance du doigté Sol#24, alto à gauche et baryton à droite.





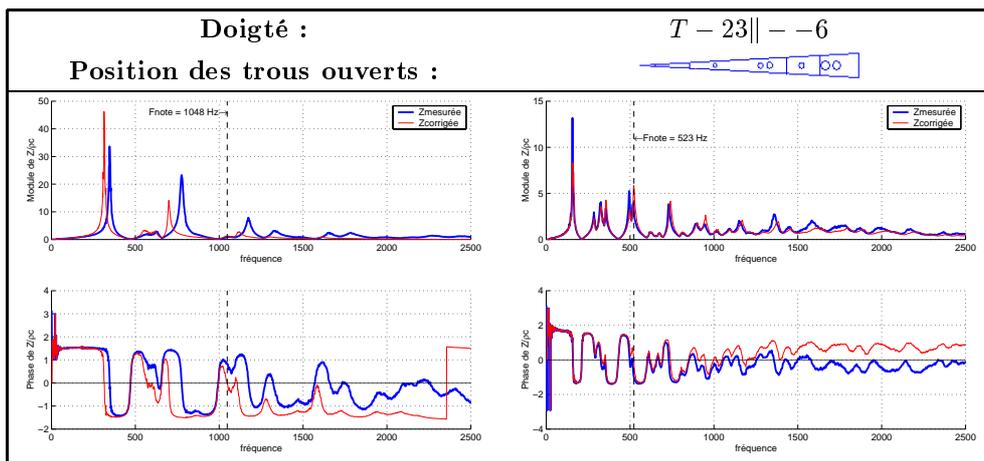
## La5

Avis des musiciens : Baryton : Mauvais : instable. Alto : Instable - part en multiphonique.



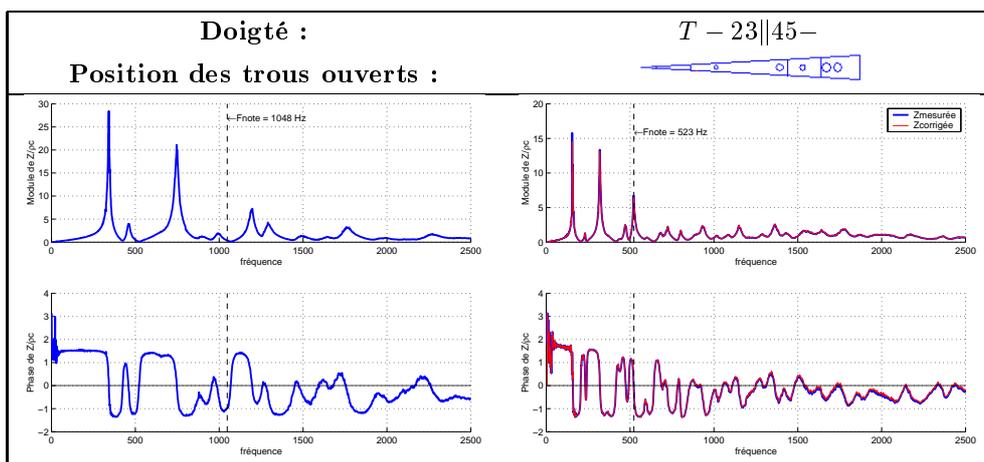
## La6

Avis des musiciens : Baryton : Bien - instable en dessous de Mezzo Piano. Alto : Sort bien à nuance Forte, sinon multiphonique.



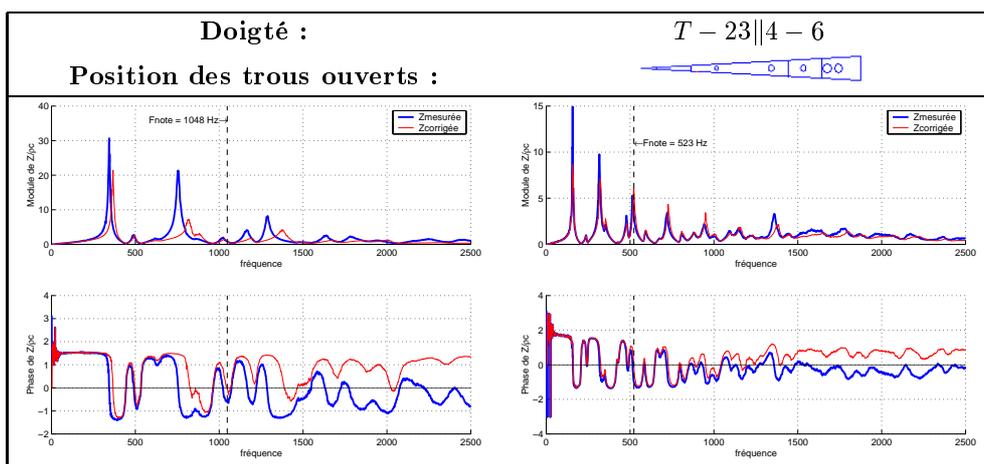
## La7

Avis des musiciens : Baryton : Assez bien - multiphonique aléatoire. Alto : Un quart de ton trop haut.



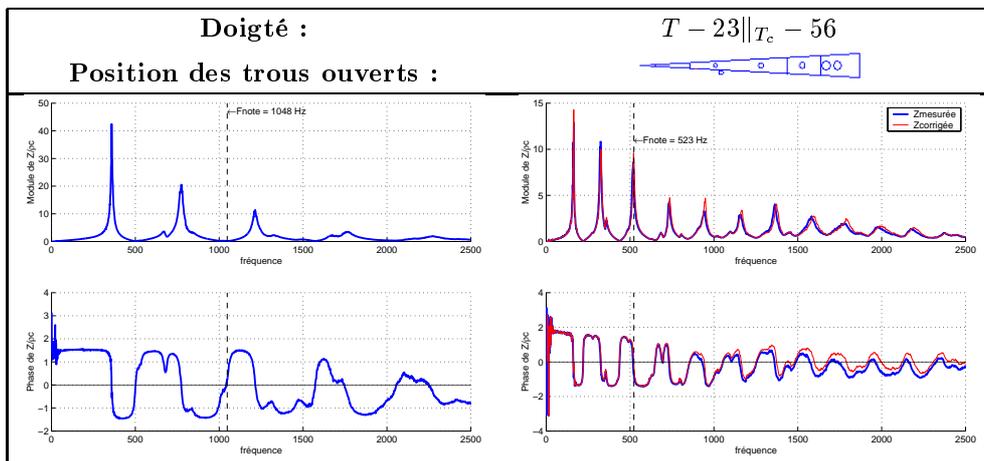
## La8

Avis des musiciens : Baryton : Bien Justesse : un quart de ton trop bas. Alto : Presque un Sib, mais qui sort très bien.



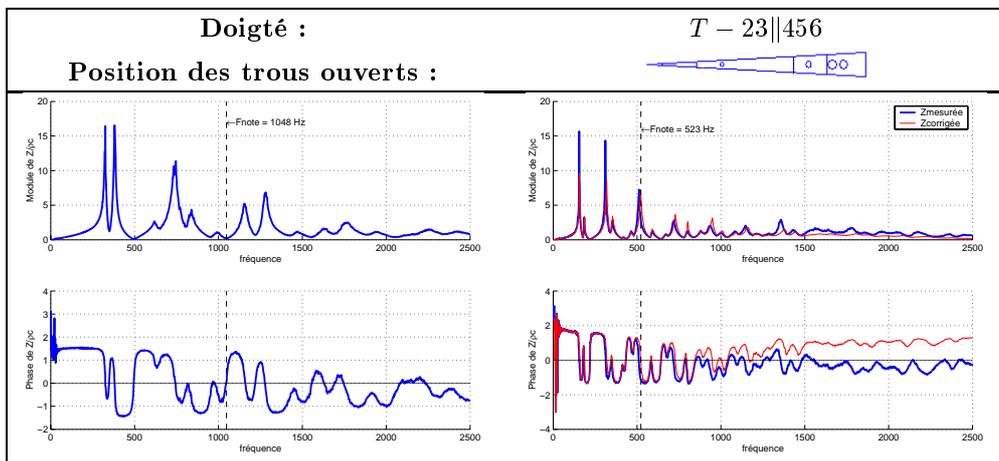
## La9

Avis des musiciens : Baryton : Très bien. Alto : Un peu haut mais très bien.



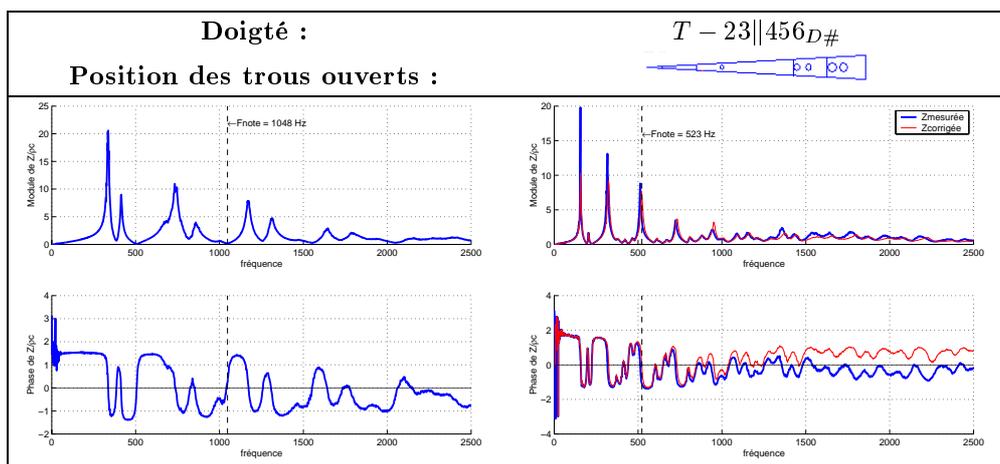
## La10

Avis des musiciens : Baryton : TBien - justesse : bas. Alto : Très bien.



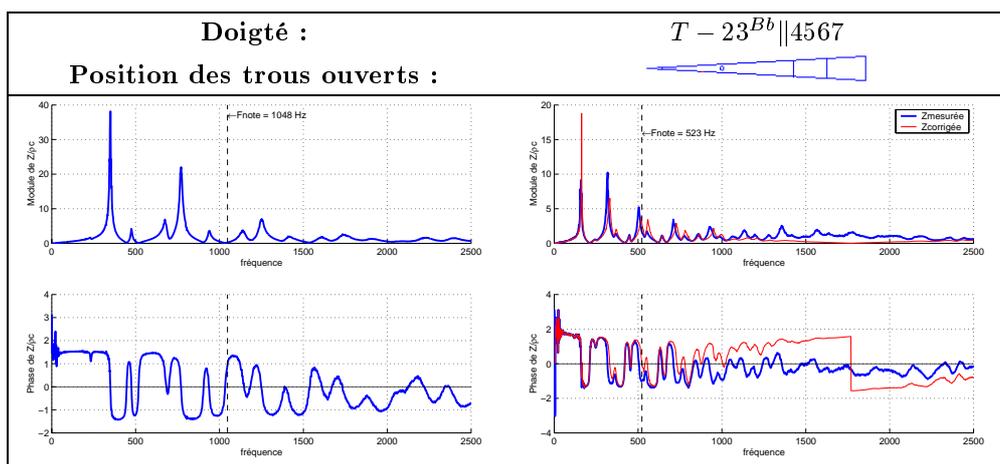
## La11

Avis des musiciens : Baryton : Moyen - instable en dessous de Mezzo Piano / un quart de ton trop bas. Alto : Le même un peu plus bas.



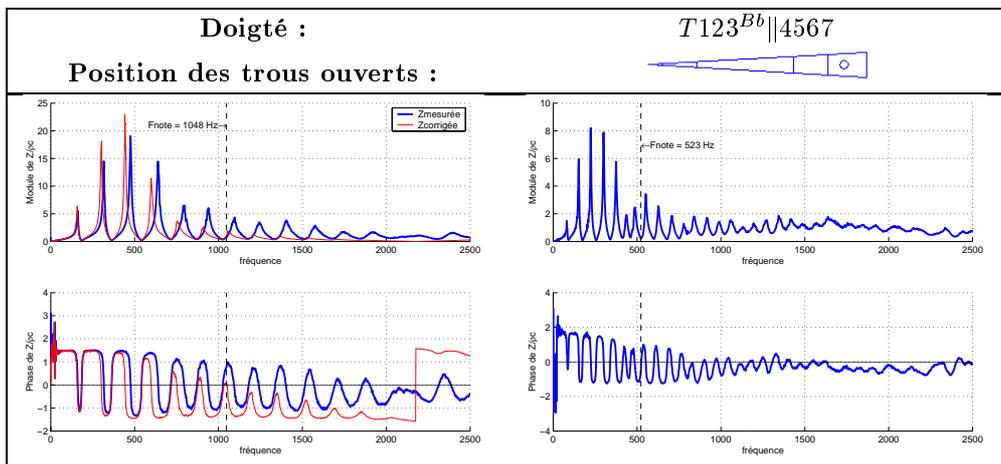
## La12

Avis des musiciens : Baryton : Moyen - instable dans les nuances basses / un quart de ton trop bas. Alto : Très bien.



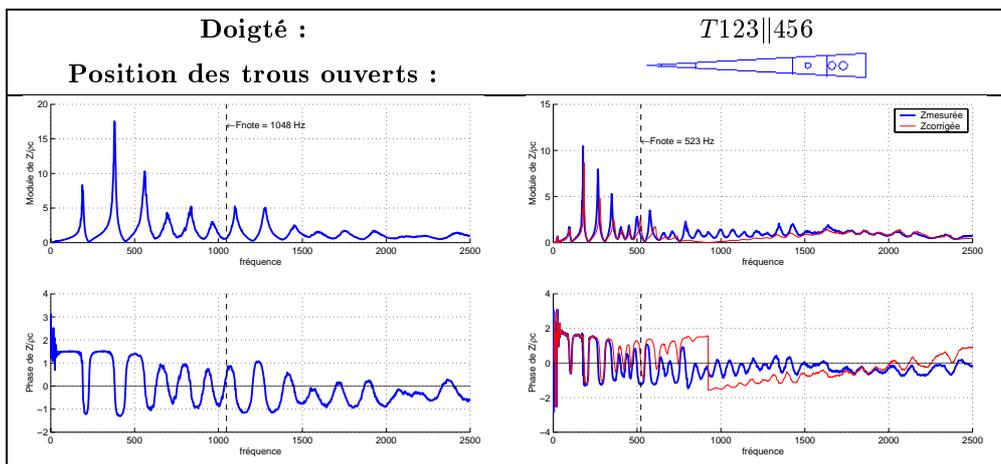
## La13

Avis des musiciens : Baryton : Mauvais - craque. Alto : Très bien.



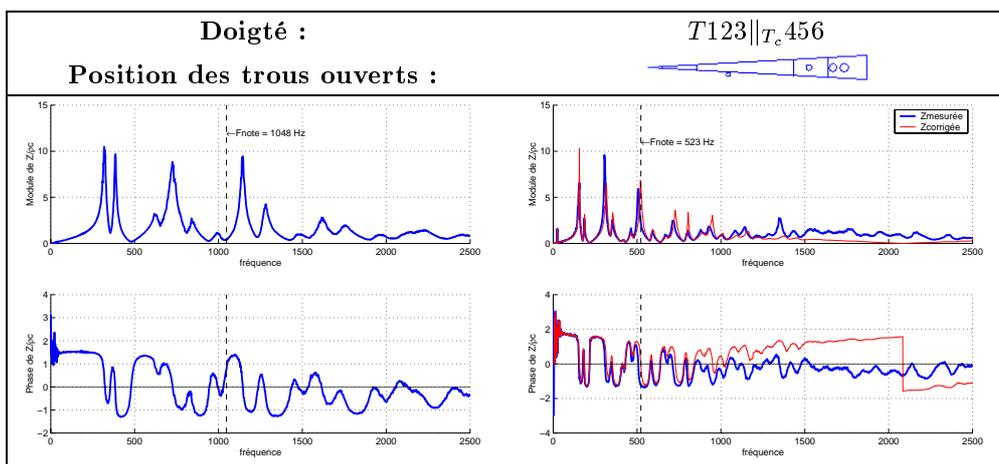
## La14

Avis des musiciens : Baryton : Bien mais justesse : sort comme un Sol# suraigu bas (plus d'un demi ton de différence). Alto : Bien mais moins facile que 12 et 13.



## La15

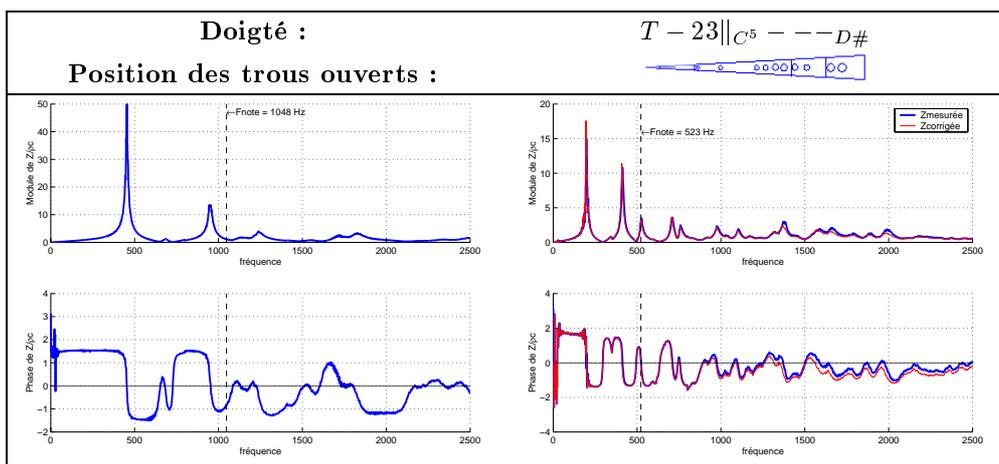
Avis des musiciens : Baryton : Bien mais plus proche du Sol# en justesse. Alto : Très bien.



Mesures d'impédance du doigté La15, alto à gauche et baryton à droite.

## La16

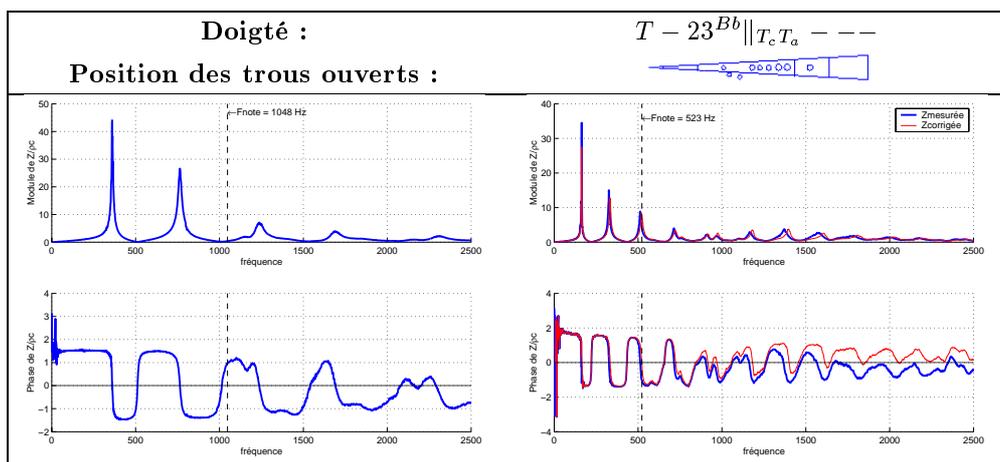
Avis des musiciens : Baryton : Mauvais - le Fa# fait craquer. Alto : Très dur - quasi impossible.



Mesures d'impédance du doigté La16, alto à gauche et baryton à droite.

## La17

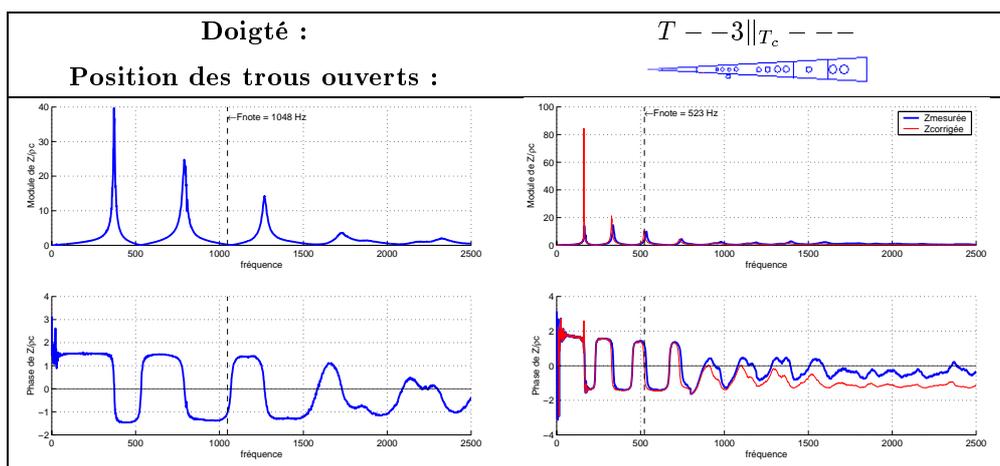
Avis des musiciens : Baryton : Très bien - facile - Justesse : entre Sol# et La. Alto : Très haut, presque un Sib.



Mesures d'impédance du doigté La17, alto à gauche et baryton à droite.

## La18

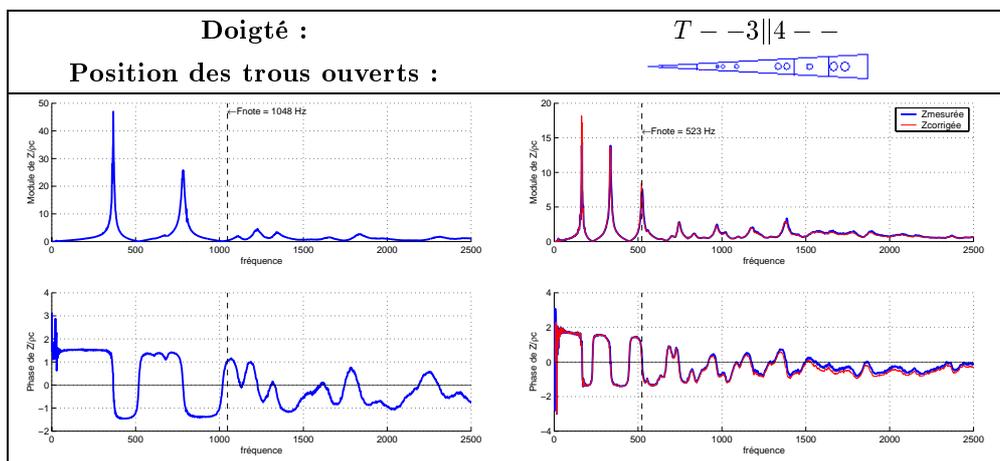
Avis des musiciens : Baryton : Très bien - Justesse : trop haut. Alto : Très bon doigté de Sib.



Mesures d'impédance du doigté La18, alto à gauche et baryton à droite.

## La19

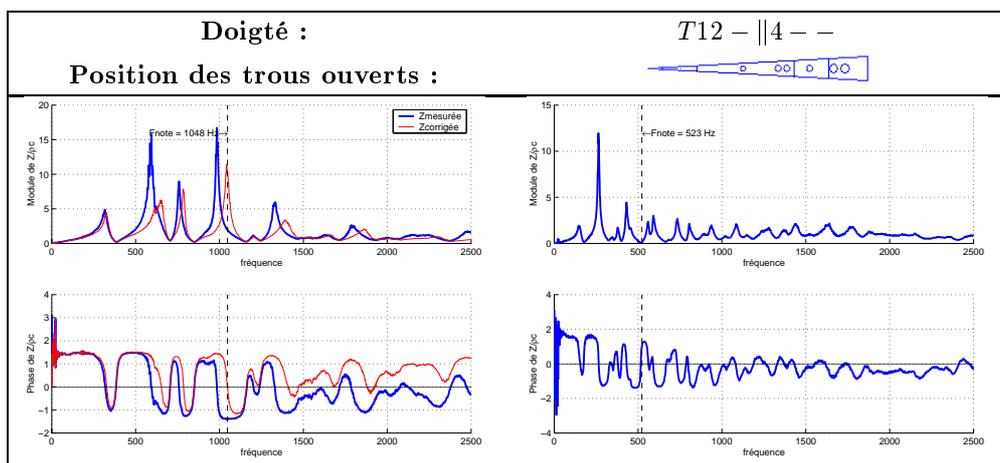
Avis des musiciens : Baryton : super. Alto : Un peu haut mais très bien.



Mesures d'impédance du doigté La19, alto à gauche et baryton à droite.

## La20

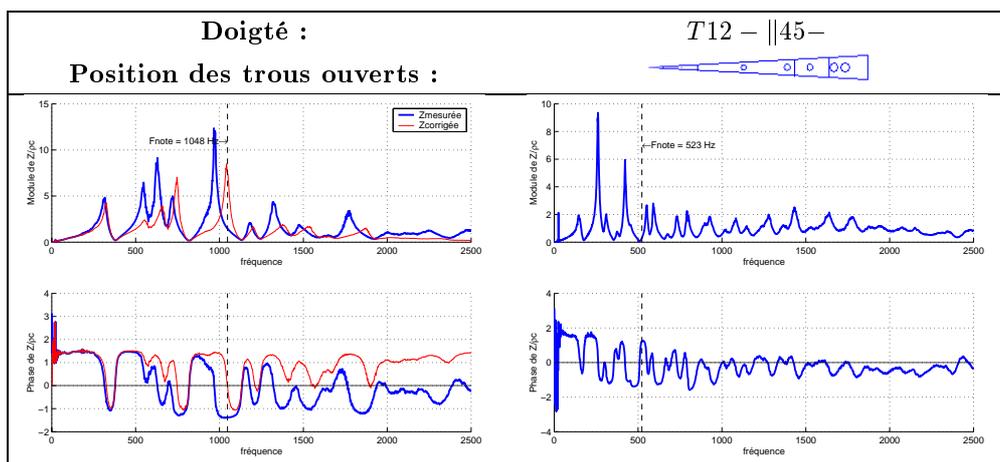
Avis des musiciens : Baryton : Mauvais - très instable - on approche plus le Si suraigu.  
Alto : Bien pour un Si (et encore un peu bas), mais pas pour un La.



Mesures d'impédance du doigté La20, alto à gauche et baryton à droite.

## La21

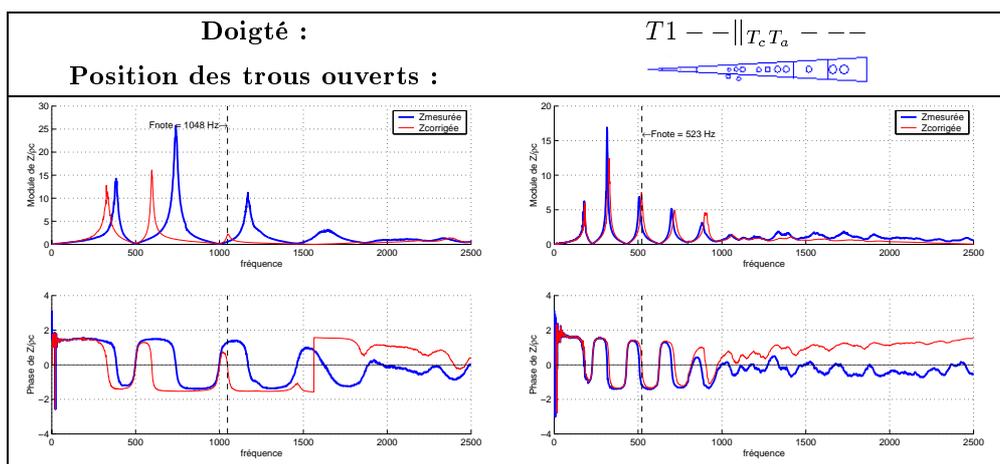
Avis des musiciens : Baryton : Idem 20. Alto : Très bon doigté de Sib, mais un peu haut quand même.



Mesures d'impédance du doigté La21, alto à gauche et baryton à droite.

## La22

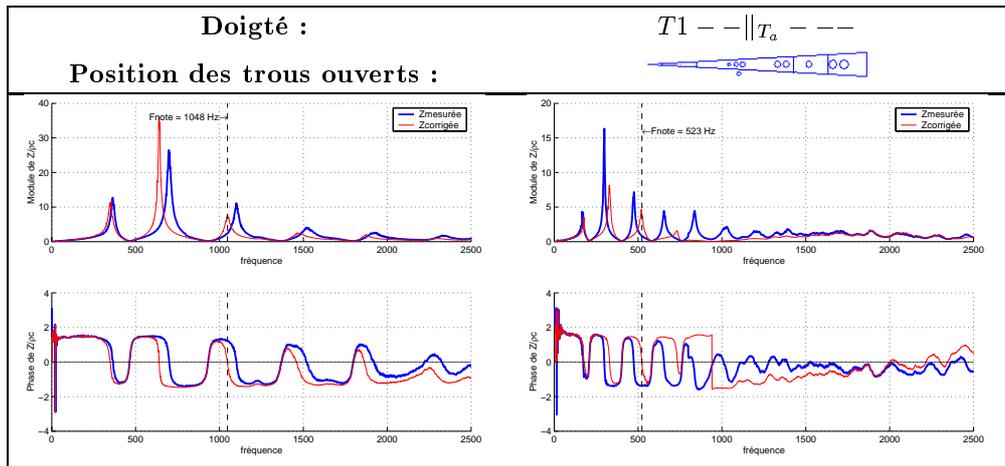
Avis des musiciens : Baryton : Difficile - Justesse : plus proche du Sol#. Alto : Un quart de ton trop bas.



Mesures d'impédance du doigté La22, alto à gauche et baryton à droite.

## La23

Avis des musiciens : Baryton : Bien mais donne Sol en justesse Alto : Entre Sol et Sol# (plutôt Sol#).

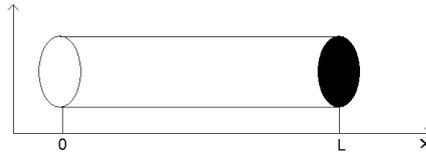


Mesures d'impédance du doigté La23, alto à gauche et baryton à droite.

## Annexes 2

### Calcul de l'impédance d'entrée d'un cylindre ouvert-fermé

On considère un cylindre de longueur  $L$ , ouvert en entrée et fermé en sortie.



On veut trouver l'impédance du cylindre ramenée à l'entrée. Soient  $p$  et  $v$  la pression et la vitesse dans le cylindre ouvert fermé,  $p_0$  la pression à l'entrée du cylindre,  $\rho$  la densité de l'air et  $c$  la vitesse du son dans l'air ambiant. On approxime  $\omega = kc$  (cas sans dispersion),  $k$  étant le nombre d'onde.

On a :

$$\begin{cases} p(x) = Ae^{ikx} + Be^{-ikx} \\ v(x) = \frac{Ae^{-ikx} - Be^{ikx}}{\rho c} \end{cases} \quad (3.19)$$

en particulier, aux extrémités :

$$\begin{cases} p(0) = A + B \\ v(0) = \frac{A - B}{\rho c} \end{cases} \quad (3.20)$$

et

$$\begin{cases} p(L) = Ae^{ikL} + Be^{-ikL} \\ v(L) = \frac{Ae^{-ikL} - Be^{ikL}}{\rho c} \end{cases} \quad (3.21)$$

ce qui conduit à :

$$\begin{cases} p(0) = p(L) \cos kL + i\rho c v(L) \sin kL \\ v(0) = \frac{ip(L)}{\rho c} \sin kL + v(L) \cos kL \end{cases} \quad (3.22)$$

Le cylindre étant fermé à son extrémité, on a  $v(L) = 0$ .

Donc

$$\begin{cases} p(0) = p(L) \cos kL \\ v(0) = \frac{ip(L)}{\rho c} \sin kL \end{cases} \quad (3.23)$$

L'impédance en entrée du cylindre vaut :

$$Z_{cylindre} = \frac{p(0)}{v(0)} = -i\rho c \frac{\cos kL}{\sin kL} \quad (3.24)$$

# Bibliographie

- [1] Liley T. (1998) *Invention and Development* The Cambridge Companion to the Saxophone, Edited by Richard Ingham, Cambridge University Press, 1-15.
- [2] Gibiat V., Tressos G.(2004). *Impedance and Altissimo register on saxophone*, Proceedings of the International Symposium on musical Acoustics, Nara, Japan.
- [3] Delangle C. (1998) *The contemporary saxophone* The Cambridge Companion to the Saxophone, Edited by Richard Ingham, Cambridge University Press, 176-177.
- [4] Londeix J.M. (1970) *Gammes et Modes* Editions Leduc
- [5] Gibiat V., Laloë F. (1990). *Acoustical impedance measurements by the two-microphone-three-calibration (TMTC) method* , J.Acoust.Soc.Am 88, 2533-2545.
- [6] Gibiat V., Boutillon X. (1996). *Evaluation of the acoustical stiffness of saxophone reeds under playing conditions by using the reactive power approach*, J.Acoust.Soc.Am 100, 1178-1189.