



ÉTUDE ARTICULATOIRE ET ACOUSTIQUE DES FRICATIVES SIBILANTES

Thèse de doctorat de phonétique
Université Paris III
2009

Martine Toda
Sous la direction de Shinji Maeda

REMERCIEMENTS

Merci à tous les locuteurs, qui ont fait preuve de générosité, bienveillance, et patience.

Merci à mon directeur Shinji Maeda de m'avoir assisté dans la simulation 1D, et d'avoir examiné ma thèse jusque dans le plus fin détail. Je dois reconnaître que je n'ai pas trouvé de solution définitive à tous les problèmes qui ont été soulevés, mais je retiens de cette collaboration une expérience extrêmement positive.

Merci aux membres du LPP qui m'ont conseillée et encouragée à persévérer. Pour leurs critiques constructives lors de mes pré-soutenances : Jacqueline Vaissière, Cécile Fougeron, Rachid Ridouane, Annie Rialland, Barbara Kühnert, Kiyoshi Honda, Julie Montagüe, Takeki Kamiyama, Rajesh Khatiwada, Cédric Gendrot, Charalampos Karypidis, entre autres. Merci à ceux qui ont accepté de relire ce document et qui m'ont aidée à le rendre plus digeste : Jacqueline Vaissière, Cédric Gendrot, Pierre Hallé, Coralie Vincent, Angélique Amelot, Annie Rialland.

Mes remerciements s'adressent également à mes collègues d'ATR, notamment Kiyoshi Honda, qui était mon maître de stage, Hironori Takemoto et Sayoko Takano qui m'ont appris à travailler avec les données IRM, et Tatsuya Kitamura pour son aide patiente dans les expériences de simulation 3D.

Merci à Frederik Bissmarck, Michal Joachimczak, Alexis Michaud et une personne qui ne tenait pas à ce que son nom soit mentionné pour leur aide dans la construction des corpus du suédois, du polonais et du chinois.

Merci à Yasuhiro Shimada, Ichiro Fujimoto, et Yuko Shakudo pour leur assistance technique dans l'acquisition IRM.

Ma thèse a été rendue possible grâce aux financements du CNC (projet SAALSA, 2000-2002), de l'UE (projet ASPI 2006-2008) et de l'ANR (projet ARTIS 2009-2011), et tout particulièrement d'ATR (projet financé par Telecommunications Advancement Organization, 2002-2003) qui m'a permis l'acquisition des données. J'ai également bénéficié de contrats d'ATER (Bordeaux 2004-2005 et Paris III 2005-2006) en tant que thésarde « en fin de » thèse.

RÉSUMÉ LONG

Introduction

La diversité des inventaires phonémiques, en fonction des langues, est un phénomène des plus intéressant. La façon dont les sons d'une langue se dispersent dans l'espace articulatoire/acoustique suscite l'intérêt des phonéticiens de longue date. Les contrastes entre les phonèmes sont-ils fondés sur une distance *suffisante* ou des principes *quantiques* ? Les fricatives sibilantes constituent un sous-système consonantique de choix pour étudier cette question. Comme les voyelles, les sibilantes peuvent être discriminées les unes des autres grâce à leur spectre. D'après la base de données UPSID, l'inventaire des sibilantes comporte entre un et quatre lieux d'articulation contrastifs. Les caractéristiques spectrales qui les différencient sont toutefois mal connues. Cette thèse a comme objectif principal d'élucider la relation entre la forme du conduit vocal et les caractéristiques acoustiques : pics spectraux du bruit de friction et, secondairement, transitions formantiques. Pour cela, elle a recours à la modélisation acoustique.

Chapitre I : description articulatoire des sibilantes

L'objectif de ce chapitre est de fournir une description articulatoire riche et détaillée des fricatives sibilantes dans leur diversité linguistique et individuelle. Trente locuteurs issus de sept langues (français, anglais, japonais, chinois, polonais, suédois, russe) ont été recrutés. Le choix méthodologique a porté sur l'imagerie par résonance magnétique (IRM) de haute résolution (0,25 mm/pixel) comportant l'insertion du contour des dents.

Dans la section I-1, nous présentons les résultats qualitatifs de l'analyse des données articulatoires. Si la variation inter-individuelle est frappante, des tendances propres à chaque langue existent. En particulier, le lieu d'articulation du /s^j/¹ en japonais est nettement plus antérieur que le /ʃ/ français ou anglais (avec lesquels il est parfois confondu), en ce que la pointe de la langue touche la base des incisives inférieures chez 8 locuteurs sur 9. En japonais, le contraste d'avec /s/ se manifeste principalement dans la forme du dos de la langue, plus bombée (palatalisée) pour /s^j/.

La section I-2 s'intéresse à deux types articulatoires de sibilantes non-antérieures. En français, 4 locuteurs sur 7 produisent un /ʃ/ qui met en œuvre une position reculée de la langue et une protrusion labiale, tandis que les 3 autres locuteurs produisent un type de /ʃ/ qui met en œuvre le bombement du dos de la langue, ce qui a comme effet de créer une constriction longue et étroite (*chenal palatal*). Les locuteurs de ce second groupe ne

¹ Il s'agit de la consonne contenue dans les syllabes し, しゃ, しゅ, しょ (translittéré « shi », « sha », « shu », « sho »), en opposition avec les syllabes せ, さ, す et そ (« se », « sa », « su », « so ») contenant /s/. Son statut de phonème (et non d'allophone contextuel en présence de la consonne /j/) est argumenté dans l'Annexe II.

Résumé long

présentent pas de protrusion labiale. Ces deux types articulatoires présentent des analogies avec les deux sibilantes non-antérieures du polonais (2 locuteurs), /s/ et /ɕ/, respectivement. Cette parenté suggère l'existence de prototypes phonétiques préférés des locuteurs (en vertu de leurs propriétés présumées de saillance ou de robustesse), qui peuvent être exploités ou non en tant que phonèmes distincts.

Dans la section I-3, la dispersion des sibilantes dans l'espace articulatoire est examinée à l'aide de deux variables quantitatives. Les résultats montrent que l'étendue de la dispersion varie en fonction du système phonologique. C'est en français (7 locuteurs) et en anglais (5 locuteurs) que la plus grande dispersion est observée. Seule la taille de la cavité orale antérieure est associée de manière systématique au contraste /s/-/ʃ/ (décrit par le trait [+/- antérieur]). Le degré de palatalisation varie librement en fonction des locuteurs, par opposition au japonais (9 locuteurs), où le phonème /s/, a priori semblable au /s/ français ou anglais, est systématiquement moins palatalisé que /sʲ/ (contraste décrit par le trait [+/- distribué]).

Enfin, la section I-4 récapitule la taille des constriction linguale et dentale en fonction des langues. En effet, les fonctions d'aire montrent que le conduit vocal des sibilantes possède deux constriction, linguale et dentale, la constriction dentale étant entre une à trois fois moins étroite que la constriction linguale. Ces données suggèrent des effets importants de la constriction dentale sur le plan acoustique, par l'isolement de la cavité labiale de la cavité orale antérieure, qui sont confirmés par les résultats de simulation (chapitre III).

Chapitre II : description acoustique des sibilantes

En II-1, les transitions formantiques à la jonction des sibilantes avec trois timbres de voyelles sont examinées. En français, les transitions formantiques des formants F1 à F4 ne présentent pas de caractéristique systématique en fonction des stratégies « recul » ou « déformation » décrites au chapitre I. Une relation variable selon les locuteurs entre les formants de la voyelle et ceux des fricatives permet d'expliquer ce phénomène, comme nous le montrerons avec une expérience de simulation VCV au chapitre III.

En II-2, les caractéristiques du bruit de friction sont examinées. Nous montrons, en particulier, qu'un « même » son [s] peut avoir un spectre d'aspect très différent selon les locuteurs (de français) : diffus ou compact. La fréquence du pic majeur varie également de manière importante en fonction du contexte vocalique et des locuteurs. Malgré ces facteurs de variation, il existe deux plages de fréquence où le contraste entre /s/ et /ʃ/ est maximal : la première, vers 2,5-4 kHz, et la deuxième, vers 7-12 kHz. De même, le contraste du bruit de friction de /ɕ/ et /ʂ/, en polonais, qui n'est pas décrit de façon optimale par la fréquence du centre de gravité, se caractérise par la présence d'un pic *ultra-bas* pour /ʂ/, pas nécessairement très proéminent, autour de 1,5 kHz.

Il est intéressant de constater que la coarticulation entre sibilante et voyelle qui suit se manifeste de façon différente en fonction des langues. En français et en anglais, les formants de la partie stable de la voyelle ne diffèrent pas de manière importante entre les deux contextes de sibilantes. En chinois, l'inverse se produit : le timbre de la voyelle est

très différent en fonction de la sibilante tautosyllabique. Le timbre de la voyelle contient donc des informations sur le lieu d'articulation de la sibilante.

Les propriétés contrastives de la voyelle et du bruit de friction semblent, en effet, complémentaires. C'est en chinois que la fréquence du pic principal ou du centre de gravité présente le plus fort chevauchement entre les différentes sibilantes. En français et en anglais, ces indices de fréquence sont largement distants : il n'existe pour ainsi dire pas de chevauchement entre /s/ et /ʃ/. En japonais, avec un contraste de bruit intermédiaire, la normalisation du locuteur à l'aide de la fréquence des formants vocaliques permet de renforcer la séparabilité de /s/ et /s^h/.

Chapitre III : Modélisation acoustique des sibilantes

Ce chapitre présente les résultats de simulation, mettant en évidence le lien entre la forme du conduit vocal et les propriétés acoustiques (résonances) du bruit de friction.

En III-1, l'effet des principaux paramètres de modélisation est examiné à l'aide de configurations simples de sibilantes. Le type (monopôle/dipôle) ou l'emplacement de la source déterminent l'apparition de paires pôle-zéro pour les cavités isolées (cavité postérieure), peu significatives pour la forme du spectre, ou de pôles (de fréquence constante) et de zéros libres pour la cavité antérieure. L'adjonction d'une cavité sublinguale entraîne des effets équivalents à l'allongement de la cavité antérieure.

En III-2, l'effet de la longueur du chenal palatal et de la cavité antérieure dans une configuration de type [ʃ] est examiné. En vertu de l'interaction qui se produit entre ces deux cavités, leur longueur respective est complémentaire au regard de la fréquence de coupure (équivalent au pic spectral). Par ailleurs, des discontinuités sont observées dans l'évolution de la fréquence de coupure, dues au croisement des paires pôle-zéro de la cavité postérieure. La mise en correspondance avec les longueurs normalisées issues de mesures faites sur les données IRM suggère que les sibilantes naturelles sont produites dans les zones stables. Toutefois, il est peu plausible que les discontinuités prédites délimitent les frontières phonémiques de manière universelle. En effet, il semble exister de multiples possibilités pour réaliser les contrastes, laissées au choix des locuteurs.

En III-3, l'effet des configurations acoustiquement équivalentes (d'après la fréquence de coupure) sur les transitions formantiques est examiné pour la séquence /aʃa/. Le locus plus élevé du F2 du /ʃ/ palatalisé est expliqué par une cavité postérieure plus courte. Les transitions du F3 et du F4 sont également modifiées, avec un rapprochement de F3 et F4 pour le /ʃ/ apical ; F3 étant affilié à la cavité antérieure pour le /ʃ/ apical et au chenal palatal pour le /ʃ/ palatalisée. La configuration du conduit vocal selon le type masculin ou féminin affecte également l'aspect des transitions (en particulier F3 et F4), pour un même type de /ʃ/ palatalisé. Cette modification s'explique par un changement d'affiliation des formants dû à une cavité postérieure plus courte.

La section III-4 examine l'affiliation formantique dans les spectres de bruit naturels par le biais de la simulation acoustique avec des fonctions d'aire réelles. L'aire du conduit vocal de deux locuteurs du polonais mesurée sur les données IRM est utilisée. D'après les

propriétés acoustiques de conduits vocaux tronqués, le pic ultra-bas de /s/ chez ces deux locuteurs est affilié à la cavité antérieure, contrairement aux hypothèses avancées par Halle et Stevens (1997). En effet, la cavité antérieure nettement plus grande pour /s/ que pour /ç/ explique la différence de fréquence du premier pic spectral. Pour /ç/, le chenal palatal est également impliqué dans les pics majeurs qui définissent l'enveloppe spectrale. De plus, la cavité labiale s'avère être responsable de formants indépendants en raison de la forte constriction dentale qui limite le couplage avec la cavité orale antérieure. L'indépendance acoustique de la cavité labiale doit être considérée comme une caractéristique fondamentale des sibilantes étant donné le caractère universel de la constriction dentale étroite (I-4). Par conséquent, la protrusion labiale des sibilantes relève de mécanismes acoustiques distincts de l'arrondissement labial des vocoïdes ([u, y, w, ɪ...]), où les lèvres forment un résonateur de Helmholtz avec la cavité orale. La protrusion labiale dans /s/ ou /ʃ/, au contraire, permet d'abaisser la fréquence du formant labial. Cet abaissement contribuerait à garantir le contraste avec /s/ dont le pic spectral se situe dans les mêmes fréquences (cf. II-2).

La section III-5 examine l'affiliation formantique à l'aide de conduits vocaux 3D. Les résultats de simulation acoustique en trois dimensions (méthode des éléments finis) avec des conduits vocaux entiers et tronqués confirment la prédominance des résonances des cavités antérieures dans l'enveloppe spectrale lorsque la source de bruit est placée près des incisives. Les conduits vocaux sans les lèvres et des lèvres seules ont permis de vérifier l'affiliation du pic spectral vers 5 – 7 kHz de /ʃ/ (Fr1) et /s/ (P1) à la cavité labiale.

Conclusion

L'étude acoustique du bruit de friction et des transitions formantiques a montré que ces deux indices étaient complémentaires, leurs poids respectifs dépendant des langues (II). Toutefois, les moyens articulatoires mis en œuvre pour les réaliser diffèrent en fonction des locuteurs, en particulier en français (I-2), mais également dans les autres langues (III-2). Il serait donc difficile de décrire un contraste de « lieu » des sibilantes de manière universelle (indépendante des locuteurs) en termes articulatoires. De plus, si l'on ne peut pas exclure que les oppositions phonémiques exploitent des principes quantiques chez les locuteurs individuellement, ces résultats suggèrent que la réalisation des contrastes des sibilantes dans les langues relève du principe d'une distance suffisante.

La dispersion des sibilantes dans l'espace articulatoire (I-3) va également dans ce sens, en ce qu'elle est clairement sensible au système phonologique². Le son /s/ n'a pas la même

² Les zones stables et instables telles qu'observée dans l'expérience de la section III-2 sont en effet définies par la longueur de la cavité postérieure ; autrement dit, si les locuteurs de toutes les langues avaient en moyenne un conduit vocal de même longueur, les zones stables acoustiquement correspondraient aux mêmes zones de l'espace articulatoire quelle que soit la langue. Si le principe quantique régissait la dispersion des phonèmes dans l'espace articulatoire, on s'attendrait à ce que deux sons semblables

Résumé long

dispersion selon qu'il s'oppose à /s^j/ (japonais) ou à /ʃ/ (français). Par ailleurs, certains sons présentent une dispersion plus importante que d'autres, précisément le /ʃ/ en français.

La modélisation acoustique a permis d'apporter une explication à ce phénomène. La cavité orale antérieure et le chenal palatal peuvent donner lieu à un pic majeur de fréquence équivalente (III-2). D'après les résultats de modélisation à l'aide de fonctions d'aire réelles, ces deux cavités sont responsables des pics observés dans les spectres naturels (III-4). En particulier, chez deux locuteurs polonais, la cavité orale antérieure de grand volume est responsable du formant ultra-bas (vers 1,5 – 1,8 kHz) du /ʃ/. Il s'avère également que la cavité labiale est responsable d'un formant propre, en raison de la forte constriction dentale (III-4 et III-5). Cette forte constriction au niveau des incisives caractérise du reste toutes les sibilantes (I-4). La protrusion labiale de /ʃ/ aurait donc comme effet principal d'abaisser ce formant. En français et en anglais, le maintien du formant labial à 4 – 5 kHz par le biais de la protrusion labiale permet de renforcer la différence avec /s/, qui possède une prééminence spectrale vers 8 – 10 kHz.

En examinant une large variété de fricatives sibilantes, cette thèse a donc pu mettre en évidence les caractéristiques acoustiques associées à leur contraste, et les interpréter analytiquement en termes d'affiliation des formants aux cavités par le biais de la modélisation acoustique.

comme /s/ en japonais et /s/ en français, qui relèveraient des mêmes zones quantiques, occupent la même étendue dans l'espace articulatoire.

TABLE DES MATIÈRES

Remerciements 2

Résumé long 3

 Introduction..... 3

 Chapitre I : description articulaire des sibilantes 3

 Chapitre II : description acoustique des sibilantes 4

 Chapitre III : Modélisation acoustique des sibilantes 4

 Conclusion 4

Table des matières..... 4

Abréviations 4

Définitions 4

 Articulation 4

 Acoustique 4

 Modélisation 4

 Segments, phonèmes, traits 4

Introduction générale 4

 Dispersion des phonèmes 4

 Inventaires des sibilantes dans les langues du monde 4

 Variabilité inter-individuelle 4

 Objectif de cette thèse 4

 Locuteurs et langues 4

 Données IRM et enregistrements sonores 4

 Simulation acoustique 4

 Classification phonétique des sibilantes 4

Table des matières

I. Description articulatoire des fricatives sibilantes.....	4
Introduction	4
Anatomie structurelle et fonctionnelle des articulateurs	4
« Lieux » d’articulation : point de constriction et forme de la langue	4
Méthode.....	4
Corpus	4
Instrumentation et procédure d’acquisition	4
Protocole d’acquisition.....	4
Déroulement de l’expérience	4
Données analysées.....	4
Insertion du contour des dents	4
I-1 : Description qualitative.....	4
Lecture des données IRM	4
Fonction d’aire	4
Résultats	4
Locuteur Fr2 (français).....	4
Locuteur Fr5 (français).....	4
Récapitulation : description articulatoire qualitative, français	4
Locuteur P1 (polonais)	4
Récapitulation : description articulatoire qualitative, polonais.....	4
Discussion : les caractéristiques articulatoires robustes.....	4
I-2 : Deux types articulatoires de post-alvéolaires.....	4
Résultats	4
Français.....	4
Polonais	4

Table des matières

Discussion.....	4
I-3 : Dispersion des sibilantes dans l'espace articulatoire (analyse quantitative)	4
Résultats	4
Discussion.....	4
Variation inter-individuelle	4
I-4 : Taille des constriction (analyse quantitative)	4
Résultats	4
Discussion.....	4
II. Description acoustique des fricatives sibilantes.....	4
Introduction	4
Méthode.....	4
Corpus.....	4
Instrumentation et procédure d'acquisition	4
Analyse spectrographique.....	4
Spectre du bruit de friction	4
Détection du pic spectral	4
Centre de gravité (COG).....	4
Résultats	4
II-1 : Transitions formantiques des sibilantes dans trois contextes vocaliques	4
Analyse spectrographique : locuteurs Fr2, Fr5 et P1	4
F1-F4 à la jonction FV et au centre V – français	4
F1-F4 à la jonction FV et au centre V – anglais	4
F1-F4 à la jonction FV et au centre V – japonais.....	4
F1-F4 à la jonction FV et au centre V – chinois	4
II-2 : Spectre de bruit	4

Table des matières

Description qualitative des spectres de bruit (français).....	4
Spectre de bruit des sibilantes non-antérieures en polonais	4
Pic principal en français, anglais, japonais et chinois	4
Centre de gravité en français, anglais, japonais et chinois	4
Quantification de la distance du bruit entre deux sibilantes	4
Discussion.....	4
Normalisation du centre de gravité	4
III. Modélisation acoustique des fricatives sibilantes	4
Introduction	4
Mécanisme général de production des fricatives sibilantes.....	4
La source de bruit.....	4
Position de la source de bruit dans le conduit vocal	4
Modes de résonance	4
Sibilantes examinées	4
Méthodes de simulation acoustique	4
Paramètres communs de la modélisation « 1D » (VTF_fric) utilisés dans III-1, III-2, et III-4.....	4
III-1 : Propriétés basiques de configurations simples du conduit vocal de sibilantes (1D).....	4
Position et type de source	4
Cavité « branchante ».....	4
III-2 : Effets de la longueur de la cavité antérieure et de la constriction sur la fréquence de coupure (1D)	4
Méthode.....	4
Configuration du conduit vocal.....	4

Table des matières

Fréquence de coupure des fonctions de transfert	4
Résultats	4
Discussion.....	4
III-3 : Effet des configurations de /a/ et /ʃ/ sur les transitions formantiques dans la séquence /aʃa/ (1D)	4
Méthode	4
Modélisation « 1D » dans le domaine temporel (VCVsynth)	4
Configurations cibles pour /ʃ/	4
Configurations cibles pour /a/	4
Résultats	4
Configuration optimale pour la cible /a/	4
Configuration optimale pour la cible /ʃ/	4
Résultats de synthèse VCV.....	4
Discussion.....	4
III-4 : Affiliation des formants aux cavités dans les configuration de /ç/ et /ʃ/ réalistes (1D)	4
Méthode	4
Résultats	4
P1 /ʃ/	4
P2 /ʃ/	4
P1 /ç/	4
P2 /ç/	4
Discussion.....	4

Table des matières

III-5 : Propriétés acoustiques des conduits vocaux 3D : expériences de simulation à l'aide de la méthode des éléments finis.....	4
Méthode.....	4
Extraction de la forme 3D du conduit vocal.....	4
Simulation à l'aide de la méthode des éléments finis (FEM).....	4
Résultats	4
III-5.1 Modes de résonance de trois sibilantes : conduits vocaux 3D entiers.....	4
III-5.2 Pertinence des conduits vocaux tronqués	4
III-5.3 Comparaison 1D – 3D	4
III-5.4 Effets de la cavité labiale	4
Discussion.....	4
Une expérience naturelle	4
Conclusion Générale.....	4
Cibles acoustiques présumées des sibilantes	4
Système phonologique et caractéristiques articulatoires	4
Fondements acoustiques des contrastes phonémiques	4
L'effet acoustique de la protrusion labiale.....	4
Questions persistantes	4
Bibliographie	4
Annexe I. Inventaire des fricatives sibilantes.....	4
Tendances majeures.....	4
Tendances mineures	4
Vue d'ensemble.....	4
Annexe II. Corpus linguistiques	4
Français.....	4

Table des matières

Anglais.....	4
japonais.....	4
chinois	4
polonais.....	4
russe.....	4
suédois	4
Le japonais.....	4
Le français et l'anglais.....	4
Le chinois (dialectes apparentés au mandarin).....	4
Le polonais.....	4
Le suédois	4
Le russe.....	4
Annexe III. Description articulatoire qualitative.....	4
Locuteur Fr1	4
Locuteur Fr3	4
Locuteur Fr4	4
Locuteur Fr6	4
Locutrice Fr7.....	4
Locuteur E1	4
Locuteur E2	4
Locuteur E3	4
Locuteur E4	4
Locuteur E5	4
Récapitulation : description articulatoire qualitative, anglais	4
/s/	4

Table des matières

/ʃ/	4
Locuteur J1	4
Locuteur J2	4
Locuteur J3	4
Locuteur J4	4
Locutrice J5	4
Locutrice J6	4
Locutrice J7	4
Locutrice J8	4
Locuteur J9	4
Récapitulation : description articulatoire qualitative, japonais.....	4
/s/	4
/sʲ/	4
Locutrice FrJ	4
Locuteur C1	4
Locutrice C2	4
Locuteur C3	4
Locuteur C4	4
Récapitulation : description articulatoire qualitative, chinois	4
/s/	4
/ç/	4
/ʃ/	4
Locuteur P2.....	4
Locuteur S.....	4

Table des matières

Locutrice R	4
Annexe IV : descriptions articulatoires quantitatives diverses	4
Le palais.....	4
La position relative des incisives	4
L'articulation.....	4
Quantification	4
Courbure du palais sur le plan sagittal, coronal et axial.....	4
L'occlusion des incisives (overjet et overbite) durant la production des sibilantes	4
Corrélations.....	4
Annexe V : description acoustique individuelle.....	4
Français.....	4
Anglais.....	4
Japonais	4
Chinois.....	4
Polonais	4
Suédois.....	4
Russe.....	4
Spectres moyens.....	4
Anglais.....	4
Japonais	4
Annexe VI : simulation acoustique 1D à partir de fonctions d'aire mesurées	4
P1 /s/	4
P2 /s/	4
Annexe VII : simulation acoustique 3D.....	4

Table des matières

Effet de la finesse du maillage	4
Effet de la taille de l'espace de rayonnement	4
Effet de la position et de l'orientation de la source.....	4
Effet du point de mesure.....	4

ABRÉVIATIONS

IRM	Imagerie par résonance magnétique
FEM	Méthode des éléments finis
CA	Cavité antérieure, située en avant de la constriction linguale
COA	Cavité orale antérieure, comprise entre les constriction linguale et dentale
CP	Cavité postérieure
CPal	Chenal palatal
F1, F2, ...	Premier formant, deuxième formant, ...
V	voyelle
C	consonne
F	fricative

DÉFINITIONS

Articulation

Conduit vocal	Partie aérienne supra-glottique comprenant principalement les cavités laryngale, pharyngale, orale et nasale. Dans les fricatives sibilantes étudiées dans cette thèse, la cavité nasale est considérée comme déconnectée du conduit principal.
« Lieu » d'articulation	Terme général pour décrire la position des articulateurs supra-glottiques, englobant à la fois le point de constriction et la forme de la langue.
Point de constriction	Le lieu où la constriction (linguale ou labiale) est maximale à l'intérieur du conduit vocal ; lieu d'articulation au sens strict (ne se prononçant pas sur la forme ou posture de la langue) pour une consonne.
Forme de la langue	Aspect du dos de la langue vu sur le plan médio-sagittal. Ladefoged et Maddieson (1996) distinguent deux sibilantes post-alvéolaires, l'une caractérisé par un dos de la langue plat, [ʃ], et l'autre par un dos de la langue bombé, [ʒ], bien qu'ils ne soient pas contrastifs à notre connaissance (aucune langue ne possède les deux à la fois comme phonème).
Constriction ou chenal palatal	Partie la plus étroite du conduit vocal formée par le rapprochement de la langue avec la paroi orale supérieure (pour les coronales). Lorsque le dos de la langue est bombé et élevé vers le palais, il en résulte une cavité longue et étroite désignée par le terme de « chenal palatal » (<i>palatal channel</i> ; cf. Halle et Stevens, 1997).
Protrusion	Déformation des lèvres où les lèvres sont poussées en avant, sans qu'il y ait un contact des commissures labiales aussi important que pour l'arrondissement, et sans qu'il n'y ait nécessairement une réduction significative de l'aire labiale par rapport à la position neutre des lèvres.
Arrondissement	(1) Geste labial qui réduit l'aire d'ouverture labiale, par le rapprochement des lèvres supérieure et inférieure et le contact des commissures labiales. (2) Geste labial ou de labialisation en général (comprenant la protrusion). Dans cette thèse, ce terme est employé au sens restreint (1).
Palatalisation	(1) Processus diachronique par lequel le lieu d'articulation d'un son se déplace vers la région palatale, (2) articulation (état ponctuel) où le dos de la langue forme une longue constriction le long du palais, appelée <i>chenal palatal</i> . Tout au long de cette thèse, le terme <i>palatalisation</i> sera employé uniquement dans le deuxième sens.
Coronal	Lieu d'articulation générique regroupant les lieux dental, alvéolaire, post-alvéolaire et prépalatal d'après Catford, 1988 (Figure 6), c'est-à-dire ni labial, ni vélaire, ni pharyngal. (Cf. Chomsky et Halle, 1968 : p. 304.)
Palatal	V. infra : <i>segments, phonèmes, traits</i>
Antérieur	V. infra : <i>segments, phonèmes, traits</i>

Acoustique

Bruit de friction	Portion bruitée du signal pendant la réalisation d'une fricative, s'opposant au signal (quasi-) périodique pendant les voyelles. Dans cette thèse, le terme de « bruit » désigne le signal acoustique enregistré via un micro placé à distance, par opposition au terme de « source de bruit » qui fait explicitement référence à la source elle-même (et qui n'a pas été étudiée en tant que telle dans la présente étude).
Spectre	Représentation de l'intensité d'une portion de son en fonction des fréquences, à l'aide de la transformation de fourrier à court terme.
Pic spectral	Zone du spectre dont l'intensité relative est plus importante que celle des fréquences voisines.
Pic majeur ou pic principal	Pic spectral le plus proéminent du spectre.
Formant	Pic caractérisant l'enveloppe spectrale. On fait référence aux formants en les numérotant par ordre croissant de leur fréquence. Dans les fricatives, les formants de la cavité postérieure à la constriction sont parfois invisibles. Dans ce cas, les formants visibles pourront être désignés par le terme de <i>formant fricatif</i> F_{f1} , F_{f2} , etc., sans qu'ils soient nécessairement en correspondance avec les formants vocaliques adjacents F_1 , F_2 , etc.
Antiformant	Creux observé dans le spectre.
Résonance	Fréquence où la source est amplifiée par une structure dont les dimensions permettent que l'onde acoustique entre en résonance.
Antirésonance	Fréquence où la source est atténuée.
Pôle	Pic dans la fonction de transfert, qui correspond à la résonance acoustique d'un résonateur.
Zéro	Creux dans la fonction de transfert.
Paire pôle-zéro	Une paire constituée d'un pôle et d'un zéro rapprochés, provenant d'une même cavité de résonance.
Pôle ou zéro libre	Pôle ou zéro qui n'apparaît pas en paire avec un zéro ou un pôle, respectivement.
Proéminence spectrale	Plage de fréquences du spectre où il y a concentration d'énergie. Une proéminence spectrale peut être composée d'un ou plusieurs formants ou pics.
Fréquence de coupure	Dans le spectre des fricatives sibilantes, une montée abrupte de l'énergie est souvent observée, autour de 2 à 4 kHz pour [ʃ] et entre 5 et 8 kHz pour [s]. Par analogie aux filtres, cette zone peut être désignée par le terme de fréquence de coupure. La fréquence de coupure est utilisée dans les fonctions de transfert pour capturer le pic équivalent au pic principal du spectre.
Hautes fréquences	Fréquences entre 5 et 10 kHz.
Très hautes fréquences	Fréquences au-dessus de 10 kHz.

Définitions

Rayonnement aux lèvres	Transformation du signal acoustique lorsqu'il quitte le conduit vocal pour passer dans l'espace extérieur en subissant une chute de pression. Elle se traduit par un renforcement relatif des hautes fréquences à raison d'un gain de 6dB/octave, et élargit la largeur de bande des résonances dans les hautes fréquences qui impliquent la cavité antérieure.
Source monopôle	Source de bruit créée par les turbulences résultant d'un jet libre. Il y a injection de masse, qui peut être simulée par une source de courant dans un circuit électrique analogue. Les variations de pression se transmettent uniformément en toutes directions.
Source dipôle	Source de bruit créée par la force exercée par un jet heurtant un obstacle. De masse constante, elle est simulée par une source de voltage dans un circuit analogue. Cette source possède une orientation : son axe est perpendiculaire à la surface de l'obstacle. En simulation, elle peut être conçue comme la combinaison de deux sources monopôles de phase opposée placées côte à côte. La variation de pression se trouve déphasée selon la direction, et elle est quasi nulle perpendiculairement à son axe.

Modélisation

Modèle	Une représentation (simplifiée) du conduit vocal par un nombre limité de paramètres.
Configuration	Une instance du conduit vocal définie par un ensemble de paramètres.
Simulation ou modélisation acoustique	Modélisation acoustique du conduit vocal par laquelle on tente de reproduire les principales caractéristiques d'un son observé. Elle se distingue de la modélisation <i>articulatoire</i> qui modélise (prédit) à la fois (1) le comportement articulatoire et (2) ses caractéristiques acoustiques.
Source	Source d'excitation. La principale source d'excitation d'une fricative sourde est une source de friction, qui consiste en un bruit ayant comme origine la turbulence créée par une constriction suivie d'un espace relativement libre comportant ou non un obstacle. Cette source turbulente est constituée de sources monopôle, dipôle et quadripôle (Stevens, 1998).
Source de débit	Source de courant dans un circuit analogue, équivalent à une source monopôle.
Source de pression	Source de voltage dans un circuit analogue, équivalent à une source dipôle.
Filtre	Considérant que la source est indépendante acoustiquement du conduit vocal dans le cadre de la théorie source-filtre, le conduit vocal est vu comme un filtre. La réponse du conduit vocal est représentée en tant que fonction de transfert. La théorie source-filtre est réputée applicable aux fricatives sibilantes (Shadle, 1985).
Fonction de transfert	Propriété d'un filtre (rapport entre l'entrée, la source, et la sortie, le son rayonné), exprimée en intensité en fonction des fréquences.

Définitions

Affiliation formantique ou affiliation des formants aux cavités du conduit vocal	Correspondance entre les formants (pics spectraux numérotés dans l'ordre croissant des fréquences) et les résonances des cavités du conduit vocal.
Modélisation unidimensionnelle ou 1D	Modélisation acoustique où on considère que l'onde acoustique est plane (aucune résonance dans une direction autre que longitudinale au conduit vocal n'est prise en compte). Il s'agit d'une approximation, mais qui permet de modéliser assez bien les voyelles et les consonnes (ex. Fant, 1960).
Modélisation tridimensionnelle ou 3D	Modélisation acoustique avec un modèle tridimensionnel du conduit vocal, où l'onde acoustique peut se propager dans toutes les directions. Dans cette étude, la méthode des éléments finis a été utilisée pour estimer la fonction de transfert du modèle
Méthode des éléments finis	Méthode d'approximation basée sur le principe que tout objet complexe peut être décomposé en un ensemble fini d'éléments simples. Dans cette étude, le conduit vocal a été décomposé en un grand nombre de tétraèdres (polyèdre à quatre faces triangulaires).

Segments, phonèmes, traits

Sibilantes ou fricatives sibilantes	Fricatives caractérisées sur le plan articuloire par une position élevée de la mâchoire et le rapprochement des incisives supérieures et inférieures. Sur le plan acoustique, elles se caractérisent par un bruit strident (intense). Le bruit de friction intense est attribué au mode de production du bruit, qui implique un obstacle (<i>v. source dipôle</i>) constitué par les incisives ou le palais. Les fricatives sibilantes sont nécessairement coronales, mais il existe des fricatives coronales non sibilantes.
Sibilantes antérieures	Fricatives sibilantes dont le point de constriction se situe au niveau des alvéoles ou plus en avant : dentales et alvéolaires.
Sibilantes postérieures, ou non-antérieures	Fricatives sibilantes dont le point de constriction se trouve en arrière de la protubérance des alvéoles. On distingue les palato-alvéolaires ou post-alvéolaires, les cacuminales, les rétroflexes et les alvéolo-palatales.
Son de parole, segment ou phone	Le segment est représenté entre crochets : []. (1) Occurrence d'un phonème dans la parole (dont on peut délimiter le début et la fin sur l'échelle temporelle). (2) Représentation de sons qui partagent certaines caractéristiques (acoustiques et articuloires) communes, sans qu'il soit particulier à une langue.
Phonème	Représentation abstraite des sons distinctifs dans une langue donnée. Il est représenté par un symbole phonétique entre barres obliques : //.
Trait « phonétique » ou indice phonétique	Indice auditif ou visuel, articuloire, acoustique ou perceptif associé à un son de parole.

Définitions

Trait phonologique	Représentation abstraite d'une propriété d'un phonème.
Trait distinctif	Représentation abstraite d'un attribut articulatoire et/ou acoustique qui permet de décrire une opposition phonologique.
Inventaire	Ensemble des phonèmes d'une langue donnée.
Coronal	<i>V. articulation</i>
Palatal / non-palatal	Opposition phonologique qui est décrite par le trait [+/- distribué] dans le cadre de Chomsky et Halle, 1968.
Antérieur / non-antérieur	Opposition phonologique décrite par le trait [+/- antérieur]. Par exemple. les sibilantes dentales/ alvéolaires /s/ s'opposant aux palato-alvéolaires/ post-alvéolaires /ʃ/.

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Résumé de l'introduction

La diversité des inventaires phonémiques, en fonction des langues, est un phénomène de plus en plus intéressant. La façon dont les sons d'une langue se dispersent dans l'espace articulatoire/acoustique suscite l'intérêt des phonéticiens de longue date. Les contrastes entre les phonèmes sont-ils fondés sur une distance *suffisante* ou des principes *quantiques* ? Les fricatives sibilantes constituent un sous-système consonantique de choix pour étudier cette question. Comme les voyelles, les sibilantes peuvent être discriminées les unes des autres grâce à leur spectre. D'après la base de données UPSID, l'inventaire des sibilantes comporte entre un et quatre lieux d'articulation. Les caractéristiques spectrales qui les différencient sont toutefois mal connues. Cette thèse a comme objectif principal d'élucider la relation entre la forme du conduit vocal et les caractéristiques acoustiques : pics spectraux du bruit de friction et, secondairement, transitions formantiques.

Les langues parlées sur Terre possèdent des inventaires phonétiques extrêmement différents les unes des autres. Cette différence n'est pas explicable par la différence de l'appareil phonatoire des individus qui parlent les langues différentes. En effet, les enfants adoptés en bas âge apprennent la langue de leur entourage de manière comparable aux enfants biologiques. Si l'aptitude à utiliser le langage peut dépendre de facteurs biologiques³, la diversité linguistique serait plutôt d'ordre culturel. Les langues peuvent être comparées à un système vivant, avec leur propre équilibre synchronique et leurs tendances de changement diachronique.

Une des préoccupations fondamentales de la linguistique est de comprendre quels sont les critères sous-jacents au choix de l'inventaire phonétique dans une langue donnée.

Dispersion des phonèmes

De nombreuses études se sont intéressées à la relation entre les types de contrastes phonémiques des voyelles, le timbre vocalique, la dispersion des voyelles, d'une part, et

³ L'homme est une espèce animale qui utilise le langage pour communiquer – il n'en va pas ainsi pour toutes les espèces.

la taille de l'inventaire vocalique, d'autre part (ex. Crothers, 1962 ; Disner, 1984 ; Flege, 1989 ; Maddieson, 1984 ; Schwartz *et al.*, 1997a).

La dispersion des voyelles est un sujet qui oppose deux courants. D'une part, celui qui considère que les voyelles se dispersent dans l'espace acoustico-perceptif de façon à ce qu'un contraste *suffisant* existe entre elles (Liljencrants et Lindblom, 1972 ; Diehl *et al.*, 2003). D'autre part, celui qui considère que ce sont les propriétés particulières de certaines qualités vocaliques (proximité de deux formants qui leur assure une stabilité acoustique résistante aux fluctuations articulatoires) qui rendent ces sons propices à être choisis comme phonèmes (Stevens, 1972 ; Badin *et al.*, 1990 ; Schwartz *et al.* 1997b). Bien que les études sur les inventaires soient moins nombreuses dans le domaine des consonnes (ex. Lindblom et Maddieson, 1988 ; Ohala, 1979), le même débat peut être transposé à un sous-groupe consonantique constitué des fricatives sibilantes, telles que [s] dans le mot « ça » ou [ʃ] dans le mot « chat ». En effet, le contraste entre les sibilantes /s/ - /ʃ/ de l'anglais se matérialise principalement dans le bruit de friction, qui est caractérisé par une structure spectrale particulière (Harris, 1958 ; Heinz et Stevens, 1961 ; Stevens, 1985 ; Forrest *et al.*, 1988 ; Jongman *et al.*, 2000 ; Ali *et al.*, 2001), de même qu'en espagnol argentin (Manrique et Massone, 1981). Le spectre de bruit de friction semble participer à l'identification des sibilantes également dans les langues (ex. polonais) où trois lieux d'articulation s'opposent (Lisker, 2001 ; Nowak, 2006). Le contraste du spectre de bruit entre les sibilantes relève-t-il d'un principe de distance suffisante, ou de propriétés quantiques, favorisant les régions stables et saillantes de l'espace acoustique ?

Inventaires des sibilantes dans les langues du monde

Les fricatives sibilantes existent dans la majorité des langues du monde (88 % d'après la base de données UPSID qui recense 451 langues choisies avec un souci de représentativité). Un dépouillement de la base UPSID concernant les sibilantes est fourni en Annexe I. La popularité des sibilantes peut être attribuée à l'efficacité perceptive de leur bruit⁴.

D'après l'inventaire des sons dans les langues du monde (Maddieson, 1984) il existe un « encombrement » dans la région coronale (Keating, 1991), mais on peut aussi parler de l'encombrement des fricatives sibilantes par rapport aux consonnes relevant d'un autre mode d'articulation⁵. Cet encombrement sur le plan universel se traduit par des

⁴ A la différence des autres fricatives, des occlusives et des nasales, les sibilantes peuvent être produites à des positions éloignées du sommet syllabique (sommet d'intensité, c'est-à-dire la voyelle. cf. Jespersen, 1904 ; Parker, 2008), ce qui rend /s/ inclassable dans l'échelle de sonorité (qui se destine à décrire la succession des segments à l'intérieur de la syllabe) – cf. Blevins, 1995, p. 211.

⁵ Du point de vue acoustique et auditif, le bruit de friction semble véhiculer davantage d'information relative au lieu d'articulation en comparaison au bruit d'explosion des occlusives ou au murmure nasal qui nécessitent l'intégration de l'information formantique. (Blumstein and Stevens, 1979 ; Kewley-Port, 1983 ; Kurowski et Blumstein,

inventaires relativement riches de fricatives sibilantes en tant que sous-groupe consonantique.

L'inventaire des fricatives sibilantes diffère d'une langue à une autre. Selon le système phonologique des langues, les sibilantes ne se distinguent pas par le même ensemble de traits. Leur nombre varie également d'une langue à une autre. Il peut donc être intéressant d'observer leur dispersion à l'intérieur de l'espace acoustique ou articulatoire afin d'étudier, en tant qu'alternative aux voyelles, comment les membres d'un système se positionnent les uns par rapport aux autres. De plus, en mettant en relation l'articulation et l'acoustique, il peut être intéressant de déterminer si le contraste phonémique se sert de prototypes quantiques (Stevens, 1972 ; deux régions stables séparés par une zone instable et entre lesquels un changement continu d'un paramètre articulatoire donne lieu à un changement discontinu du produit acoustique) ou si, au contraire, le contraste phonémique est garanti par une distance acoustique et perceptive *suffisante*.

Variabilité inter-individuelle

Il est connu que le bruit de friction des fricatives sibilantes présente une variation importante en fonction du locuteur (ex. Hughes et Halle, 1956 ; Boothroyd et Medwetsky, 1992 ; Gordon *et al.*, 2002 ; Evers *et al.*, 1998). Or, cette variation est antinomique à l'universalité du langage, dans la mesure où l'efficacité du langage en tant que code repose sur l'absence d'ambiguïté. Pourquoi les locuteurs parlent-ils alors différemment ? Ont-ils des normes (cibles) différentes les uns des autres ? Même en supposant que tous les locuteurs partagent la même norme⁶, on peut encore imaginer plusieurs causes à cette variation. Les hypothèses suivantes peuvent être envisagées : (1) La cible de la production serait proprioceptive avant d'être acoustique⁷. Cette hypothèse est motivée par les résultats de Perkell *et al.* (2004). Toutefois, la cible proprioceptive, si elle existe, ne constitue certainement pas un repère suffisant, comme l'attestent les résultats de Matthies *et al.* (1996), où l'effet du feedback auditif était significatif sur la qualité des fricatives produites par des sujets implantés cochléaires. (2) Les locuteurs ne percevraient pas leur écart par rapport à la norme acoustique. Cette éventualité ne sera pas examinée dans cette thèse, qui se consacre entièrement à la production. (3) Les locuteurs seraient conscients de ne pas être dans la norme, mais comme le contraste phonémique est déjà suffisant avec des efforts cognitifs et/ou articulatoires élémentaires, ils ne ressentent pas la nécessité de fournir davantage d'efforts pour atteindre une cible plus canonique ; (4) Les locuteurs seraient conscients de ne pas être dans la norme, mais ils n'ont pas les capacités physiques de rapprocher davantage leur production de la cible, du fait de leur anatomie ou biomécanique individuelle. Les hypothèses 3 et 4 ne peuvent pas être vérifiées directement, car on ne connaît pas de moyen direct de mesurer la *conscience*.

1984.)

⁶ Ce qui n'est pas très plausible.

⁷ Quoique le feed-back auditif semble contribuer à l'ajustement de l'articulation (Matthies *et al.*, 1996).

Toutefois, il est possible de quantifier la distance acoustique et d'observer l'articulation, afin de déterminer si les locuteurs disposeraient d'une marge physique pour ajuster leur production dans la direction de la moyenne inter-individuelle.

Objectif de cette thèse

Ainsi, l'objectif de cette thèse est de mettre en évidence le lien entre la forme du conduit vocal (déterminée par les cibles articulatoires et la morphologie individuelle) et les caractéristiques acoustiques des sibilantes, dont principalement le bruit de friction mais également les transitions formantiques. En effet, en élucidant les mécanismes qui régissent le système des fricatives sibilantes, nous espérons trouver des clés pour comprendre comment, de manière générale, se construisent les systèmes phonétiques. Pour parvenir à cette fin, nous mettons en œuvre la modélisation. La simulation acoustique consiste à estimer les propriétés acoustiques d'un modèle du conduit vocal. L'intérêt d'utiliser un modèle est de pouvoir le faire varier de façon graduelle et systématique, de telle sorte qu'on puisse isoler l'effet acoustique pertinent d'une propriété morphologique du conduit vocal.

Le risque de la modélisation, naturellement, est de créer des « monstres », c'est-à-dire des représentations du conduit vocal qui ne sont pas représentatives d'un état possible du conduit vocal réel. En l'absence de données précises sur la morphologie du conduit vocal 3D des sibilantes relevant de contrastes de lieu d'articulation de type différents, nous avons donc consacré des efforts importants dans l'acquisition de données articulatoires et leur description. Le bruit de friction des fricatives est relativement stationnaire, et peut être tenu. Les fricatives sibilantes peuvent donc se prêter, sans altération notoire de leur mode de production, à des prises de données statiques telle que l'imagerie par résonance magnétique (IRM)⁸. La technique de l'IRM statique a été choisie pour l'acquisition de la morphologie du conduit vocal pendant la production des sibilantes sourdes tenues. Elle présente l'avantage de rendre compte de la forme tridimensionnelle du conduit vocal, ce qui semble particulièrement important dans les sibilantes, où le conduit vocal présente des formes complexes (cf. Narayanan *et al.*, 1995), surtout dans la région de la cavité antérieure où la pointe de la langue et la couronne dentaire le délimitent. En effet, la fonction d'aire du conduit vocal, dont la connaissance est capitale dans la modélisation acoustique, ne peut être estimée de façon simple à partir de la distance sagittale⁹ uniquement (ex. Perrier *et al.*, 1992 ; Badin *et al.*, 1995).

Seules les sibilantes sourdes ont été étudiées, car leur mécanisme de production peut être considéré comme plus simple (un seul type de source : source bruitée) et plus facilement interprétable. En effet, le voisement et la friction sont antagonistes du point de vue aérodynamique : le voisement nécessite une chute de pression transglottique, donc une

⁸ D'après Engwall (2000), les productions tenues pourraient être considérées comme des instances hyper-articulées des *cibles articulatoires* (cf. Lindblom, 1983).

⁹ Distance, sur le plan médio-sagittal, entre les limites inférieure (ex. la langue) et supérieure (ex. le palais) du conduit vocal.

pression intra-orale basse, tandis que la génération du bruit de friction requiert une chute de pression à la constriction, donc une pression intra-orale élevée (cf. Ohala, 1994). Les fricatives voisées ont donc tendance à comporter un bruit de friction moins intense que les sourdes, ou alors elles sont dévoisées pendant une portion de leur réalisation. D'après la littérature, il pourrait exister des différences subtiles d'articulation entre les fricatives sourdes et sonores partageant le même lieu d'articulation¹⁰.

Locuteurs et langues

Trente sujets représentant 7 langues ont participé à l'étude¹¹. Un des objectifs de cette thèse étant d'étudier la dispersion des sibilantes dans l'espace acoustique et articuloire, ces langues ont été choisies en fonction de leur système phonologique. Le français et l'anglais (7 et 5 locuteurs, respectivement) possèdent 2 sibilantes sourdes, /s/ et /ʃ/, contrastées par leur lieu d'articulation (décrit par le trait [+/- antérieur]¹²). Le japonais (9

¹⁰ Narayanan *et al.* (1995 : p.1342-1343) ont noté une position avancée de la racine de la langue (donnant lieu à un volume pharyngal plus grand) des fricatives voisées en référence aux sourdes, dont la fonction serait, d'après ces auteurs, de maintenir le flux transglottique pendant le voisement. Des contraintes aérodynamiques liées à la génération du bruit pourraient également entrer en jeu dans l'ajustement de l'articulation : Christensen *et al.* (1992) ont constaté une constriction plus étroite de /s/ chez un sujet laryngectomisé (locuteur oesophagien) en comparaison à la moyenne chez les sujets normaux. Les auteurs interprètent cette différence comme étant destinée à compenser la plus faible pression intraorale liée à ce type de parole.

¹¹ D'autres locuteurs de ces mêmes langues ont également participé à l'expérience mais nous n'avons pas pu utiliser leurs données, soit à cause de bruit important dans les données IRM (dû à un mouvement ou tremblement, ou à la présence de certains métaux magnétisables sur leur dents), ou à cause d'une anomalie articuloire visible dans les données IRM, par exemple le voile du palais ouvert, jugé incompatible avec la production effective de fricatives pendant les séquences d'acquisition.

Les sujets étaient principalement des chercheurs à ATR, où les données ont été acquises. Par ailleurs, afin d'augmenter le nombre de locuteurs des langues peu représentées (en particulier : français, chinois et russe), des personnes extérieures ont également été recrutées par le biais de relations ou par des annonces publiées dans des écoles de langue (japonais langue étrangère). Les personnes extérieures au laboratoire étaient rémunérées.

¹² Chomsky et Halle, 1968 : p. 304. Nous suivons l'usage en ayant recours aux termes évoquant l'articulation plutôt que l'acoustique (comme *aigu*, *grave*, *diffus*, *compact* – Jakobson *et al.*, 1952), à l'exception de [+/- strident]. Du reste, le trait [+/- strident] pourrait être remplacé par [+/- obstacle] pour plus de cohérence – rappelons que le fait qu'il y ait vraiment un obstacle ou non (ce qui n'a pas été vérifié à grande échelle pour des configurations articuloires réelles) n'est pas fondamentalement la question, car les traits servent simplement à décrire des oppositions phonologiques. Par exemple, le trait [+/- voisé] est utilisé pour un contraste qui se matérialise, en anglais, principalement dans le VOT (voice onset time / délais d'établissement du voisement).

sujets) possède également 2 sibilantes sourdes, /s/ et /sʲ/¹³ (phonétiquement proche de [ʃ]), mais qui sont contrastée par la présence/absence de palatalisation (décrite par le trait [+/- distribué]¹⁴, comme le reste du système consonantique (ex. [ka ~ kʲa]). Le chinois (variété du Nord, dont le dialecte de Pékin ; 4 locuteurs), le polonais (2 locuteurs) et le suédois (variété de Stockholm ; 1 locuteur) possèdent trois sibilantes sourdes, /s/, /ç/ et /ʃ/ ou /ʂ/. Ces trois sibilantes se différencient par le lieu d'articulation, mais également par la forme de la langue et la qualité des voyelles auxquelles elles s'associent. Historiquement, /ç/ provient de la palatalisation d'une occlusive vélaire en chinois et en suédois, et de la palatalisation d'une alvéolaire suivie d'un noyau syllabique complexe /iV/ en polonais. En suédois, /ʂ/ provient de la suite /rs/ en position de coda syllabique. Le russe (1 sujet) possède quatre fricatives sibilantes, /s/, /sʲ/, /ç/ (en position médiane et finale de mot) et /ʃ/. Comme les autres consonnes du russe, les sibilantes sont organisées par paires palatalisées/vélarisées (/sʲ/ s'opposant à /s/ et /ç/ s'opposant à /ʃ/). Les deux premières et les deux dernières s'opposent par leur lieu d'articulation. Enfin, l'auteur de cette thèse a également servi de sujet (bilingue français/japonais). Les sibilantes étudiées sont récapitulées dans le **Tableau 1**. Le statut phonologique de chacune des sibilantes dans ces langues est discuté en détail dans l'annexe II.

Tableau 1. Langues, nombre de locuteurs et types de contrastes examinés dans cette thèse.

langues	nombre de locuteurs	contrastes		sibilantes
		[+/- antérieur]	[+/- distribué]	
français ¹⁵	7 (+1 bilingue)	*		s, ʃ
anglais ¹⁶	5	*		s, ʃ
japonais ¹⁷	9 (+1 bilingue)		*	s, sʲ

¹³ Selon certains auteurs, il n'y a qu'un seul phonème, /s/, dont la réalisation allophonique est proche de [ç] lorsqu'il est suivi du yod /j/. Selon d'autres auteurs, il y a deux phonèmes, l'un, /s/, l'autre /sʲ/, qui n'est pas, d'après cette analyse, un groupe consonantique. Ces deux points de vue sont détaillés dans l'Annexe II.

¹⁴ Chomsky et Halle, 1968 : p. 312.

¹⁵ Tous les locuteurs de français étaient en provenance de la France métropolitaine, excepté la locutrice bilingue, originaire du Canada mais vivant en France avant de venir à ATR.

¹⁶ Les locuteurs de l'anglais étaient d'origine diverses. Le locuteur E1 des Etats-Unis, les locuteurs E2 et E4 du Royaume Uni, et les locuteurs E3 et E5 du Canada. Le locuteur E5 est bilingue (cantonais et anglais). Etant né à Hong-Kong, il a appris l'anglais à l'âge de 6 ans, avant de s'établir au Canada huit ans avant l'acquisition des données.

¹⁷ Les locuteurs de japonais se partagent en dialecte de l'Est (Kanto) et de l'Ouest (Kansai). Les locuteurs J1, J4, J5, J6 et J7 sont de la région d'Osaka, Nara et Kyoto

Introduction générale

chinois	4	*	*	s, ʃ, ʒ
polonais	2	*	*	s, ʃ, ʒ
suédois	1	*	*	s, ʃ, ʒ
russe	1	*	*	sʲ, s, ʃ, ʒ

Données IRM et enregistrements sonores

Ces données IRM, de haute résolution et où les moulages dentaires numériques ont été insérés, ont donné lieu à plusieurs types d'observation. D'abord, l'observation articulaire qualitative, puis plusieurs mesures quantitatives dont la fonction d'aire.

L'aspect acoustique des sibilantes produites par les locuteurs a également été étudié. Le spectre moyen du bruit de friction a été calculé sur des productions tenues, dont les conditions d'acquisition (position allongée sur le dos) visaient à imiter celles de l'IRM. Les transitions formantiques ont été analysées acoustiquement, dans des occurrences de mots.

Simulation acoustique

Enfin, nous avons utilisé les programmes VTF_fric et VCVsynth développés par S. Maeda (1982, 1996) pour la modélisation acoustique. Ces deux programmes simulent la propagation acoustique unidimensionnelle, c'est-à-dire dans le sens longitudinal du conduit vocal. VTF_fric estime la fonction de transfert du conduit vocal dans le domaine fréquentiel. VCVsynth permet de synthétiser des occurrences VCV en interpolant section par section entre la fonction d'aire de la voyelle à la consonne (ici une fricative), puis de la consonne à la voyelle suivante. Ce dernier programme permet donc de modéliser les transitions formantiques en fonction des cibles consonantique et vocalique. Le lien causal entre la forme du conduit vocal et l'aspect du spectre ainsi que des transitions formantiques a été examiné en faisant varier plusieurs paramètres « articulatoires » (paramètres morphologiques représentant des variations articulatoires) sur des continua. Les propriétés acoustiques des fonctions d'aire réelles, ainsi que des conduits vocaux 3D issus des données IRM (à l'aide de la méthode des éléments finis) sont également discutées.

Classification phonétique des sibilantes

Une classification assez exhaustive des fricatives, dont les sibilantes, a été proposée par Ladefoged et Maddieson (1996). Nous reproduisons leur tableau (**Tableau 2**). La fricative /ɸ/ du suédois, classée dans la rubrique « autres symboles » de l'API (alphabet

(Kansai). Les locuteurs J3 et J8, de même que la locutrice bilingue, parlent la variété standard, de la région de Tokyo, Chiba, Saitama, Ibaragi (Kanto). Le locuteur J2 est originaire du Nord (Aomori), le locuteur J9 de Tottori (Ouest).

Introduction générale

phonétique internationale, table de symboles mise à jour en 1993 ; IPA, 1999), est décrite comme une sibilante, mais ne figure pas dans ce tableau.

Tableau 2. Fricatives non sibilantes et sibilantes. Ladefoged et Maddieson, 1996 : 138.

138 *Fricatives*

Table 5.1 Terms and symbols for principal categories of fricatives

1) NON-SIBILANTS

	LABIO-	LINGUO-	INTER-								
	BILABIAL	DENTAL	LABIAL	DENTAL	CORONAL	PALATAL	VELAR	UVULAR	PHARYNGEAL	EPIGLOTTAL	
	ɸ β	f v	θ ð	ʈ ʊ̯	↓	ç ʝ	x ɣ	χ ʁ	ħ ʕ	ħ ʕ	
					↓						

2) CORONAL SIBILANTS AND NON-SIBILANTS

		FLAT	DOMED	PALATALIZED	CLOSED	SUB-APICAL
	DENTAL	ALVEOLAR	POST-ALVEOLAR	POST-ALVEOLAR	POST-ALVEOLAR	PALATAL
			(RETROFLEX)	(ALVEOLO-PALATAL)	(HISSING-HUSHING)	(RETROFLEX)
	PLAIN	θ ð	ʈ ʊ̯	↓		
SIBILANT		ʃ ʒ	s z	ʃ ʒ	ç ʝ	ʃ ʒ

Le **Tableau 3** indique des exemples de langues qui possèdent les différentes sibilantes. Certaines de ces sibilantes, présentes dans la langue toda, sont illustrées dans la **Figure 1**.

Tableau 3. Les diverses sibilantes et les langues dans lesquelles elles sont utilisées (Ladefoged et Maddieson, 1996 : p. 164).

164 *Fricatives*

Table 5.7 Types of sibilants

		"PLACE OF ARTICULATION"	EXEMPLIFYING LANGUAGES
1	ʃ	apical dental	Chinese, Diegueño, Polish
2	s	apical or laminal alveolar	English, Ubykh
3	ʃ	laminal alveolar	Toda
4	ʃ	laminal flat post-alveolar	Chinese, Polish, Ubykh
5	ʃ	apical post-alveolar	Diegueño, Toda
6	ʃ	apical or laminal domed post-alveolar (palato-alveolar)	English
7	ʃ	laminal domed post-alveolar	Toda
8	ç	laminal palatalized post-alveolar (alveolo-palatal)	Chinese, Polish, Ubykh
9	ʃ	laminal closed post-alveolar ('hissing-hushing')	Ubykh
10	ʃ	sub-apical palatal (sub-apical retroflex)	Toda

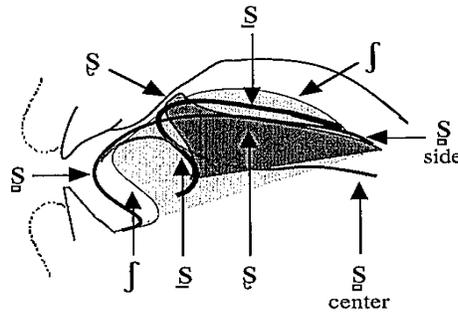


Figure 5.17 A composite diagram of Toda tongue positions in sibilant fricatives. In the case of *ʃ* the center and sides of the tongue have been shown separately. The position of the center and sides is taken to be much the same for the other sounds, and only one tongue line is shown for each of them.

Figure 1. Représentation schématique de l'articulation de quelques sibilantes : exemple de la langue toda (Ladefoged et Maddieson, 1996 : 160). Ces contours ont été extrapolés d'après les palatogrammes et linguogrammes mis à l'échelle, et l'empreinte dentaire d'un locuteur.

Toutes les sibilantes se trouvent dans la région coronale. Si leur lieu d'articulation est d'abord déterminé par la position de la constriction, comme pour les occlusives, il existe des paires de sibilantes qui s'opposent par la forme de la langue, comme par exemple /*c*/ et /*ʃ*/ en chinois (cf. Tableau 3), qui sont toutes les deux post-alvéolaires, mais où la première est palatalisée (dos de la langue fortement bombé), tandis que la seconde présente un dos de la langue plat (voir Figure 1).

Plusieurs articulations secondaires peuvent être associées aux sibilantes. On peut citer la pharyngalisation (ex. emphase en arabe), la palatalisation (ex. russe), la labialisation (v. Annexe I).

D'autres traits distinctifs peuvent se combiner à ces divers lieux d'articulation : le contraste de voisement, le mode éjectif, la laryngalisation (v. Annexe I). L'aspiration ne semble pas s'associer aux sibilantes (ni aux fricatives en général) de manière contrastive. Par exemple, en coréen, où les occlusives présentent une opposition fortis, lenis et aspirée, ce paradigme est lacunaire pour la fricative [*s*], qui ne se décline qu'en fortis et lenis (et il manque l'aspirée – ex. Cho *et al.*, 2002 ; Kim *et al.*, 2005).

Le terme « strident » est employé comme un quasi-synonyme de « sibilant ». Les deux termes font référence à un bruit intense. « Sibilant » renvoie aux fricatives dotées d'un bruit intense dans l'absolu (ex. [*f*] et [*θ*] en sont exclus), tandis que « strident » implique un bruit intense relatif. En particulier, le statut de la fricative labio-dentale [*f*] a fait l'objet d'un débat, car cette fricative s'oppose à [*ɸ*] en ewe, et [*f*] possède un bruit plus intense. Le trait [+ / - strident] pouvait donc être un bon candidat pour décrire ce contraste (v. Aydelott et Blumstein, 1994). Dans cette thèse, nous avons choisi de nous intéresser aux sibilantes, en excluant [*f*], car seul le bruit de friction des sibilantes (c'est-à-dire des stridentes coronales) est connu comme constituant un indice sur le mode et le lieu d'articulation. Par exemple, le spectre de /*s*/ ou /*ʃ*/ dont l'intensité a été abaissée peut être

Introduction générale

perçu comme un /f/ ou un /θ/, mais le spectre de /f/ ou /θ/ dont le niveau a été remonté n'est pas perçu comme /s/ ou /ʃ/ (Behrens et Blumstein, 1988). Ces résultats suggèrent que la répartition fréquentielle de l'énergie dans le spectre de bruit de /f/ n'est pas primordiale dans la perception du lieu d'articulation (en accord avec Harris, 1958), tandis qu'il l'est pour les sibilantes /s/ et /ʃ/.

Le bruit intense des sibilantes s'explique par le mode de production de la source de bruit, comme nous en reparlerons dans le chapitre III. Shadle (1985) a montré expérimentalement, à l'aide de modèles mécaniques, que les sibilantes, ainsi que [ç] et [x], impliquaient très vraisemblablement une source de type « obstacle », où le rendement acoustique de l'énergie de la turbulence est plus élevé que les sources de type « flux libre » ([f], [θ]). Howe et McGowan (2005) ont théoriquement démontré l'importance des incisives en tant qu'amplificateur acoustique du bruit provenant des turbulences. Ces résultats sont en harmonie avec la position haute de la mandibule observée pour les fricatives sibilantes (Lee *et al.*, 1994, et Mooshammer *et al.*, 2007).

I. DESCRIPTION ARTICULATOIRE DES FRICATIVES SIBILANTES

Résumé du chapitre I

L'objectif de ce chapitre est de fournir une description articulatoire riche et détaillée des fricatives sibilantes dans leur diversité linguistique et individuelle. Trente locuteurs issus de sept langues (français, anglais, japonais, chinois, polonais, suédois, russe) ont été recrutés. Le choix méthodologique a porté sur l'imagerie par résonance magnétique (IRM) de haute résolution (0,25 mm/pixel) comportant l'insertion du contour des dents.

Dans la section I-1, nous présentons les résultats qualitatifs de l'analyse des données articulatoires. Si la variation inter-individuelle est frappante, des tendances propres à chaque langue existent. En particulier, le lieu d'articulation du /s^j/¹⁸ en japonais est nettement plus antérieur que le /s/ français ou anglais (avec lesquels il est parfois confondu), en ce que la pointe de la langue touche la base des incisives inférieures chez 8 locuteurs sur 9. En japonais, le contraste d'avec /s/ se manifeste principalement dans la forme du dos de la langue, plus bombée pour /s^j/.

La section I-2 s'intéresse à deux types articulatoires de sibilantes non-antérieures. En français, 4 locuteurs sur 7 produisent un /s/ qui met en œuvre une position reculée de la langue et une protrusion labiale, tandis que les 3 autres locuteurs produisent un type de /s/ qui met en œuvre le bombement du dos de la langue, ce qui a comme effet de créer une constriction longue et étroite (*chenal palatal*). Les locuteurs de ce second groupe ne présentent pas de protrusion labiale. Ces deux types articulatoires présentent des analogies avec les deux sibilantes non-antérieures du polonais (2 locuteurs), /s/ et /ç/, respectivement. Cette parenté suggère l'existence de prototypes phonétiques préférés des

¹⁸ Il s'agit de la consonne contenue dans les syllabes し, しゃ, しゅ, しょ, en opposition avec les syllabes せ, さ, す et そ contenant /s/. Son statut de phonème (et non d'allophone contextuel en présence de la consonne /j/) est argumenté dans l'Annexe II.

I. Description articulaire des fricatives sibilantes

locuteurs (en vertu de leurs propriétés présumées de saillance ou de robustesse), qui peuvent être exploités ou non en tant que phonèmes distincts.

Dans la section I-3, la dispersion des sibilantes dans l'espace articulaire est examinée à l'aide de deux variables quantitatives. Les résultats montrent que l'étendue de la dispersion varie en fonction du système phonologique. C'est en français (7 locuteurs) et en anglais (5 locuteurs) que la plus grande dispersion est observée. Seule la taille de la cavité orale antérieure est associée de manière systématique au contraste /s/-/ʃ/ (décrit par le trait [+/- antérieur]). Le degré de palatalisation varie librement en fonction des locuteurs, par opposition au japonais (9 locuteurs), où le phonème /s/, a priori semblable au /s/ français ou anglais, est systématiquement moins palatalisé que /sʲ/ (contraste décrit par le trait [+/- distribué]).

Enfin, la section I-4 récapitule la taille des constriction linguale et dentale en fonction des langues. En effet, les fonctions d'aire montrent que le conduit vocal des sibilantes possède deux constriction, linguale et dentale, la constriction dentale étant entre une à trois fois moins étroite que la constriction linguale. Ces données suggèrent des effets importants de la constriction dentale sur le plan acoustique, par l'isolement de la cavité labiale de la cavité orale antérieure, qui sont confirmés par les résultats de simulation (chapitre III).

INTRODUCTION

Dans ce chapitre, nous fournissons une description articuloire détaillée basée sur l'observation des données IRM, en fonction des langues.

Anatomie structurelle et fonctionnelle des articulateurs

Le conduit vocal se définit comme l'ensemble des cavités entre la glotte et les lèvres. Les articulateurs mobiles comprennent le larynx, le voile du palais^{19,20}, la mandibule, la langue et les lèvres. La mandibule, la langue et les lèvres sont prises en considération dans la description articuloire des fricatives sibilantes.

Les fricatives sibilantes se caractérisent avant tout par la présence d'une constriction importante comme toute fricative, qui permet de créer un bruit turbulent à l'intérieur du conduit vocal. La langue et la mâchoire sont sollicitées pour atteindre cette cible articuloire.

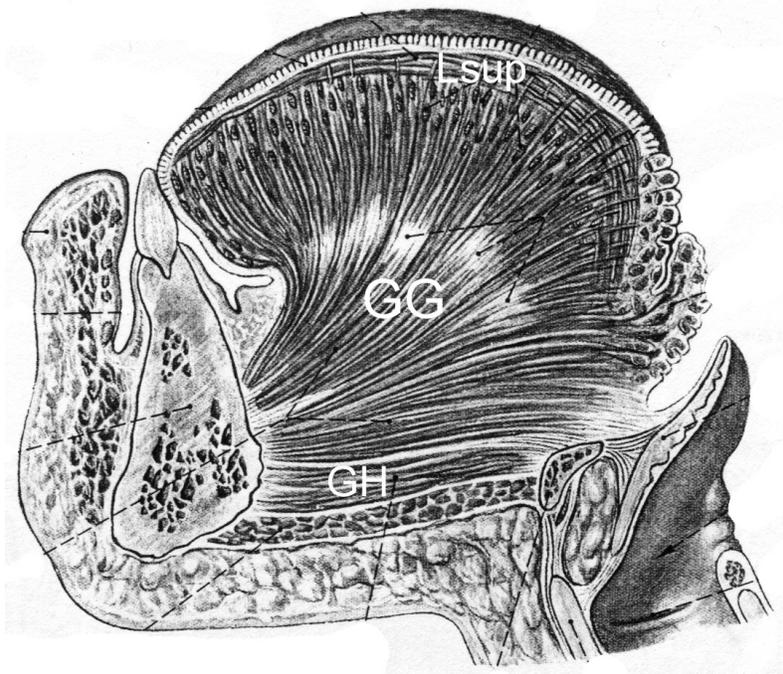
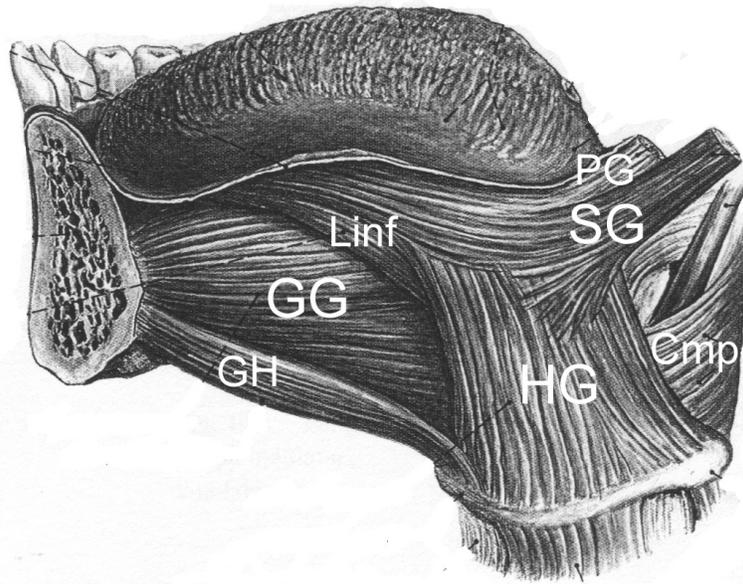
La mandibule peut se déplacer, par rapport au crâne, par rotation et translation.

La langue, qui se déplace avec la mandibule en raison du génio-glosse (GG) qui y est inséré, possède une grande liberté de mouvement. Quelques 16 muscles seraient impliqués dans les mouvements de la langue (Kakita *et al.* 1985). La **Figure 2** illustre les principaux muscles de la langue. Les muscles extrinsèques sont connectés au palais (palato-glosse, PG), à l'os hyoïde (hyo-glosse, HG, et chondro-glosse, CG), au crâne (stylo-glosse, SG). La langue possède également des muscles intrinsèques (transverse de la langue, T ; vertical, V ; longitudinaux supérieur et inférieur, Lsup et Linf). La position de la langue subit également l'influence de la position de l'os hyoïde, connecté au constricteur moyen du pharynx (Cmp).

¹⁹ L'ouverture du voile du palais est considéré comme incompatible du point de vue aérodynamique avec la production du bruit (Ohala, 1994). De plus, si des fricatives peuvent comporter un flux d'air nasal positif à la suite d'une voyelle nasale (Basset *et al.* 2001), il n'existe pas, dans la base de données UPSID, de fricatives dont l'opposition phonémique impliquerait la présence simultanée de nasalisation. Shosted (2007) relève cependant des exemples rares de fricatives nasales, en particulier en coatzopan mixtec (en citant Gerfen 2001).

²⁰ Par ailleurs, le couplage de la cavité nasale à travers le voile du palais est supposé très faible (cf. Dang et Honda, 1996). Par conséquent, la cavité nasale n'est pas considérée pertinente au regard de la qualité du bruit de friction, et ne sera pas prise en compte dans cette étude.

I. Description articuloire des fricatives sibilantes



I. Description articuloire des fricatives sibilantes

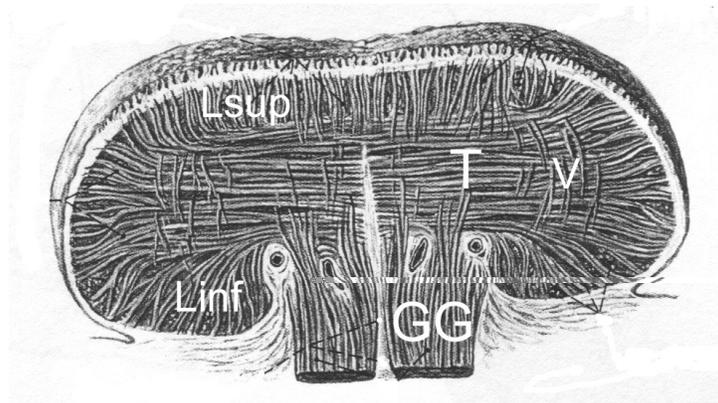


Figure 2. Principaux muscles de la langue. Linf : longitudinal inférieur ; GG : génio-glosse ; (GH : génio-hyoïde), PG : palato-glosse, SG : stylo-glosse, HG : Hyo-glosse, (Cmp : constricteur moyen du pharynx), Lsup : longitudinal supérieur, T : transverse de la langue. Image du haut : vue latérale à 80 % ; image du milieu : vue latérale, coupe médiane ; image du bas : coupe transversale à hauteur de la partie moyenne. D'après Sobotta (2000), p. 109-110.

Le génio-glosse constitue la plus grande masse musculaire de la langue. Inséré à la surface interne de la mandibule, ses segments se déploient perpendiculairement à la surface de la langue sur toute son épaisseur (et de l'apex à la racine). Les fibres du génio-glosse sont entrelacées avec celles du muscle transverse, qui se déploie du centre (septum lingual) vers les bords latéraux de la langue ; du muscle vertical, qui relie la face inférieure et la face supérieure de la langue ; et des muscles longitudinaux supérieur et inférieur, qui prennent origine à l'apex de la langue et se terminent à la racine de la langue. (Sobotta, 2000, p. 112 et Takemoto, 2001, p. 102-104.)

Maeda (1978) a effectué une analyse en composantes principales de la forme de la langue sur le plan sagittal, pour les voyelles et quelques consonnes du français. D'après cette étude, trois facteurs permettent d'expliquer 98 % de la variance observée. Ces résultats suggèrent que les quelques seize muscles qui viennent d'être décrits fonctionnent en fait de manière coordonnée de telle sorte que les mouvements de la langue possèdent des degrés de liberté très limités. Les résultats de Nguyen *et al.* (1994) vont dans le même sens, pour les fricatives /s/ et /ʃ/ en français, sur un locuteur.

D'après l'étude de Kakita *et al.* (1985 : p. 141), la position de la langue dans la dimension antéro-postérieure, qui pourrait être mise en parallèle avec le premier facteur du modèle articuloire de Maeda (1978, ou au premier facteur lingual dans Maeda, 1979) serait principalement contrôlée, au moins pour les voyelles, par la contraction du génio-glosse, du génio-hyoïde et du mylo-hyoïde pour pousser la langue vers l'avant, et du hyo-glosse et du stylo-glosse pour amener la langue en arrière. Par ailleurs, au vu de la structure musculaire de la langue, le deuxième facteur (lingual) du modèle articuloire de Maeda pourrait être associé à l'activité du muscle transversal de la langue, du muscle longitudinal inférieur et du segment antérieur du styloïde. De même, il peut être suggéré

I. Description articulaire des fricatives sibilantes

que le soulèvement de l'apex accompagné d'une forme concave du dos de la langue, dans les consonnes apicales, serait obtenu par la contraction du segment antérieur du génio-glosse et du muscle longitudinal supérieur. Malheureusement, l'étude de Kakita *et al.* (1985) ne s'est pas intéressé à la production des consonnes.

Les lèvres, dont la forme est également influencée par la position de la mâchoire, ont aussi plusieurs degrés de liberté. Il existe des langues, telles que le suédois, qui ont jusqu'à trois formes distinctes des lèvres pour les voyelles : non arrondie ([i]/« i ») ; arrondie ou *outrounded* ([y]/« u » et [u]/« o ») ; et comprimée ou *inrounded* ([ʏ]/« y ») – cf. Fant (1983).

D'après une analyse en composantes principales des formes du visage pendant la production de non-mots VCV et de parole continue en français et en anglais (Maeda *et al.* 2002), deux facteurs ont pu être associés à la forme des lèvres²¹ (Figure 3) : (1) protrusion-rétraction et (2) arrondissement-étirement. Il est intéressant de noter que des facteurs similaires ont été obtenus pour les trois locuteurs (1 en anglais, 2 en français). L'obtention de deux facteurs « labiaux »²² concorde avec Benoît *et al.* (1991) qui ont montré que la forme labiale de la chuintante /ʃ/ (aperture horizontale faible mais aperture verticale forte) n'était pas la même que celle de la voyelle arrondie /y/ (aperture verticale et horizontale faibles).

²¹ Dans cette version d'analyse en composantes principales, seulement deux facteurs arbitraires corrélés avec les mouvements de la mâchoire (mouvement transversal (avant-arrière) et mouvement vertical) ont été extraits (par analyse en facteurs arbitraires) au préalable. Une analyse en composantes principales (cf. Maeda, 1978, 1979) a été effectuée par la suite.

²² Concrètement, l'obtention de deux facteurs séparés dans une analyse en composantes principales indique que ces deux configurations articulaires surviennent pendant des segments distincts.

I. Description articulatoire des fricatives sibilantes

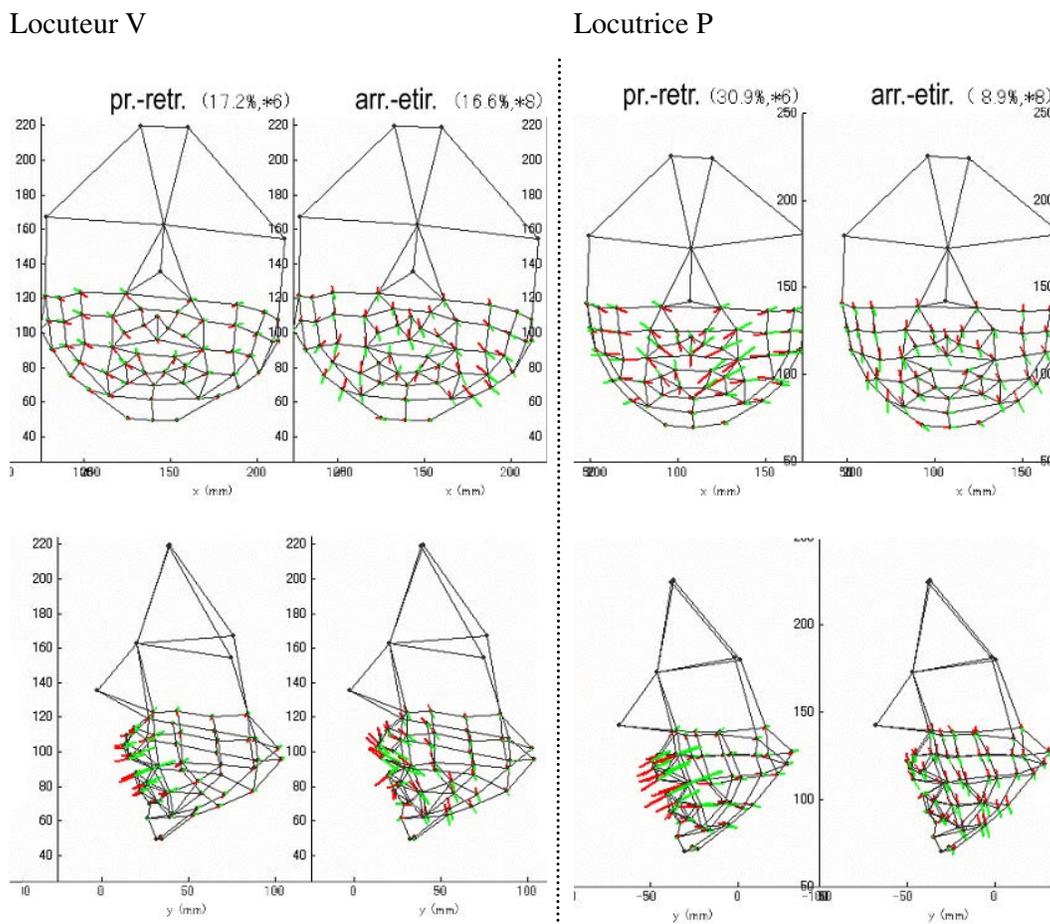


Figure 3. Facteurs labiaux pour deux locuteurs du français. Cf. Maeda et al. (2002), Toda (2001). Pour chacun des locuteurs, la première colonne représente le facteur « protrusion-rétraction »²³ et la deuxième colonne le facteur « arrondissement- étirement ». Les segments superposés au maillage représentent les vecteurs pour +/- 6 et 8 σ , respectivement.

Ces deux facteurs indiquent une différence de nature du geste de labialisation pour les sibilantes post-alvéolaires [ʃ et ʒ], d'une part, qui se caractérisent par une forte protrusion et un arrondissement modéré²⁴, et les approximantes [w et ɹ (en anglais)], d'autre part,

²³ Cette dénomination a été choisie pour faire court, mais il est évident que le facteur « protrusion-rétraction » contient également de l'arrondissement-étirement, de même que le facteur « arrondissement-étirement » se compose également de déplacements dans la direction avant-arrière. Ce qui est significatif est le fait qu'il résulte d'une analyse statistique deux facteurs, séparés, liés à la position des lèvres (cf. note 22).

²⁴ Une hauteur interlabiale supérieure aux voyelles et aux fricatives /s/ et /z/, responsable

I. Description articuloire des fricatives sibilantes

présentant un fort degré d'arrondissement en plus de la protrusion. (ex. Toda *et al.*, 2002a). La séparation de ces facteurs pourrait découler, en partie, du fait que l'aire labiale est plus réduite pour les approximantes que pour les sibilantes [ʃ] et [ʒ]. Les mécanismes musculaires du visage, et en particulier des lèvres, ne sont toutefois pas bien connus. La Figure 4 illustre les muscles du visage et des lèvres.

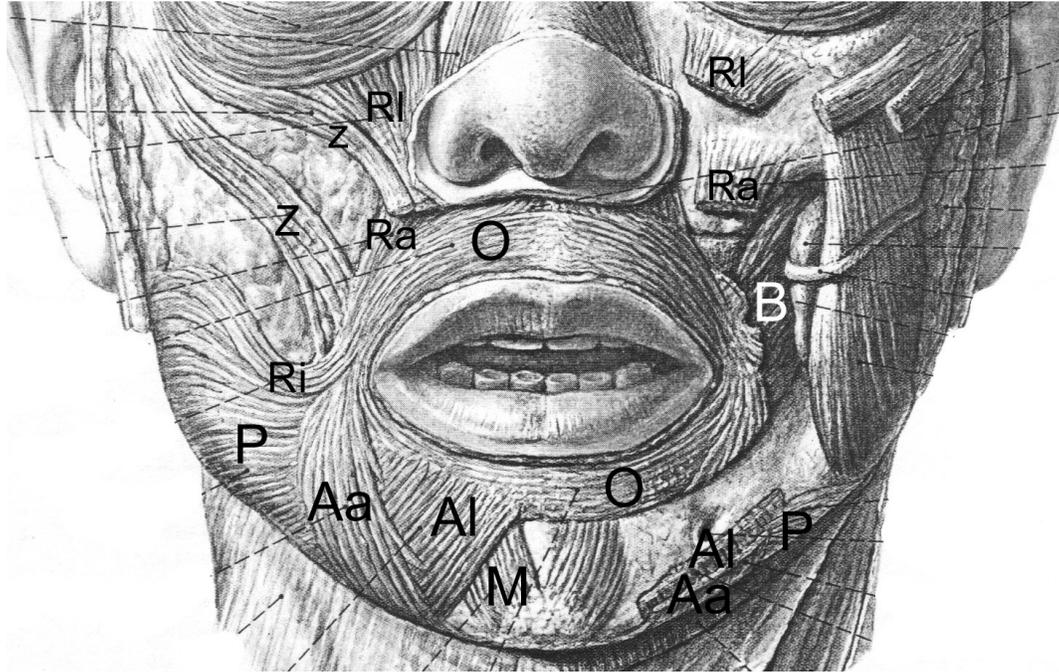


Figure 4. Principaux muscles des lèvres. Z : grand zygomatique ; z : petit zygomatique ; Ri : releveur de la lèvre supérieure ; Ra : releveur de l'angle de la bouche ; O : orbiculaires de la bouche, partie marginale ; B : buccinateur ; Ri : risorius ; P : platisma ; Aa : abaisseur de l'angle de la bouche ; Ai : abaisseur de la lèvre inférieure ; M : mentonnier. D'après Sobotta (2000), p. 75.

Les faisceaux des muscles orbiculaires périphérique (qui constitue principalement les lèvres) et marginal (v. Figure 4) se contractent dans la réalisation d'un arrondissement. Il a été proposé (Honda *et al.* 1995) que le contrôle différencié de ces deux faisceaux musculaires permettrait de réaliser des gestes labiaux différents, d'arrondissement et de protrusion. Toutefois, la structure des tissus étant fine et complexe, l'observation de l'activité musculaire des lèvres n'est pas aisée.

« Lieux » d'articulation : point de constriction et forme de la langue

Les « lieux d'articulation » des sibilantes se subdivisent traditionnellement en lieux

d'une aire labiale supérieure, caractérise les sibilantes /ʃ/ et /ʒ/ (Abry et Boë, 1986).

I. Description articuloire des fricatives sibilantes

antérieurs (dental ou alvéolaire) et non-antérieurs (postalvéolaire, palatoalvéolaire, alvéolopalatal) en fonction du point de constriction linguale, qui se trouve en avant ou en arrière des alvéoles, respectivement (ex. Keating, 1991 : p.33). Cependant, il est utile, dans une perspective de comparaison inter-langues, de spécifier également la forme de la langue en plus du lieu de constriction linguale pour les consonnes coronales. Les sibilantes antérieures peuvent être laminales ([ʃ]) ou apicales ([ʃ]). Dans les langues où il n'existe pas de contraste entre les laminales et apicales, certains locuteurs peuvent présenter une articulation laminaire, tandis que d'autres utilisent une articulation apicale (Dart, 1998). Les sibilantes non antérieures peuvent être sub-apicales (rétroflexes, [ʃ]), apicales (cacuminales, ou avec un dos de la langue plat [ʃ]²⁵), laminales avec un dos de la langue bombé ([ʃ]), ou palatalisée ([ç]).

Comme nous l'avons mentionné dans l'introduction générale, certaines sibilantes peuvent se caractériser par une articulation complexe contrastive : palatalisation, labialisation ou pharyngalisation (emphatiques). Dans certaines langues, dont le français, la sibilante palatoalvéolaire /ʃ/ est réputée être accompagnée d'un geste labial qui n'est pas distinctif en soi. Ce geste semble différent de celui de /w/, comme nous l'avons mentionné dans la section précédente, et par conséquent nous le désignons sous le terme de protrusion, en opposition à l'arrondissement (Toda *et al.* 2002a). Stevens et Keyser (1989), Keyser et Stevens (2001) et Stevens *et al.* (2004) considèrent ce geste labial comme une propriété de renforcement (« *enhancement* »), destiné à affiner les caractéristiques distinctives du bruit de friction de /ʃ/ en référence à celui de /s/. D'après ces auteurs, l'*arrondissement* [sic.] participerait à l'ajustement de la longueur de la cavité antérieure (Keyser et Stevens, 2001, p. 281-282). Aucune preuve n'a cependant encore été apportée concernant l'implication des lèvres dans la prééminence du spectre de bruit de /ʃ/, sans doute parce cette hypothèse a tout ce qu'il y a de plus plausible : le caractère grave du bruit de friction de /ʃ/ en comparaison à celui de /s/ n'est pas contestable, ni le fait que l'allongement d'une cavité puisse abaisser la fréquence de résonance associée à cette cavité. Dans cette perspective, un arrondissement (diminution de l'aire labiale) contribuerait à l'abaissement de cette résonance²⁶. Nous reviendrons sur cette question dans le chapitre III (modélisation acoustique) de cette thèse.

Dans la présente thèse, nous avons entrepris d'acquérir des données articuloires dans le but premier de mettre en évidence les configurations articuloires des sibilantes en fonction des langues.

Étant donné le caractère général de notre étude, nous avons cherché à analyser le plus grand éventail de sibilantes possibles. Toutefois, les contraintes expérimentales nous ont

²⁵ « Flat palatoalveolar », d'après Ladefoged et Maddieson, 1996.

²⁶ Or, il vient d'être remarqué (cf. Benoît *et al.* 1991 ; Toda *et al.* 2002a) que la forme des lèvres pour /ʃ/ diffère de celle des vocoïdes labiaux.

I. Description articuloire des fricatives sibilantes

limitée dans le choix des langues. L'acquisition des données IRM s'effectuait au centre BAIC des laboratoires ATR, à Kyoto, Japon. Malheureusement, il ne nous a pas été possible de trouver des locuteurs de langues ayant des sibilantes avec deux lieux d'articulation antérieures contrastifs autre que le japonais (dont le contraste peut être décrit par la présence/absence de palatalisation plutôt qu'une différence de lieu proprement dite), des sibilantes labialisées ou emphatisées (au sens distinctif), ni de rétroflexes de type sub-apical telles que décrites dans Ladefoged et Bhaskararao (1983). Ainsi, l'inventaire des sibilantes étudiées ici se limite aux fricatives [s], [s^j], [ʃ], [ʂ], et [ç].

MÉTHODE

Corpus

Des corpus différents ont été préparés en fonction des langues. Ces corpus se trouvent en annexe II. Le corpus IRM comportait les symboles des sibilantes cibles accompagnés de quelques mots les contenant.

Exemple : « s » dans *Assam* ; « ch » dans *achat*. (français)

Les sujets devaient soutenir la sibilante cible telle que produite dans le mot ; d'où le terme de contexte « virtuel » ou « imaginaire ». Selon les langues, le corpus contenait entre 5 et 8 sibilantes par contextes « virtuels ». Dans cette étude, nous analysons les sibilantes produites pour un contexte virtuel avec des voyelles adjacentes ouvertes non arrondies (**Tableau 4**). Les sujets étaient familiarisés au préalable avec le corpus et ce mode de production durant la séance d'enregistrement acoustique qui précédait la séance IRM, où ils avaient lu plusieurs fois ces mots et s'étaient exercés à produire des sibilantes tenues.

Tableau 4. Sibilantes cibles et leur « contexte » virtuel pour l'acquisition IRM.

japonais	/s/ : « assari (あっさり) » ; /s ^h / : « kass ^h a (滑車) »
français	/s/ : « Assam » ; /ʃ/ : « achat »
anglais	/s/ : « sad » ; /ʃ/ : « shall »
chinois	/s/ : « sese (瑟瑟) » ; /ç/ : « xexe (谢谢) » ; /ʃ/ : « zheshe (折射) »
polonais	/s/ : « sadza » ; /ç/ : « siadam » ; /ʃ/ : « szatan »
suédois	/s/ : « sällan » ; /ç/ : « kär » ; /ʃ/ : « färs »
russe	/s ^h / : « sjejatj (сеять) » ; /s/ : « samaya (самая) » ; /ç/ : « chjekje (щек) » ; /ʃ/ : « chans (шанс) »

Instrumentation et procédure d'acquisition

Les données articuloires ont été acquises au Brain Activity Imaging Center à ATR, Kyoto, Japon, pendant notre séjour en tant que chercheur stagiaire. L'appareil utilisé était Shimadzu-Marconi Eclipse 1.5T. Deux types de séquences, Fast 3D et Spin Echo, ont été utilisés (Tableau 5).

I. Description articulaire des fricatives sibilantes

Tableau 5. Paramètres d'acquisition IRM.

Finalité	Nom de séquence			Direction des images	Champs de vue	Résolution des données (taille des pixels et espacement des tranches)	Durée de la séquence	Locuteurs
		TE (ms)	TR (ms)					
fricatives (cavité antérieure)	Fast 3D	3,3	10	Sagittal	128 mm × 128 mm ×	0,25 mm × 0,25 mm ×	23 s	28 locuteurs (tous sauf R et FrJ)
					45 mm ²⁷	1,5 mm		
contour des dents (1)	Fast 3D	3,3	10	Sagittal	128 mm × 128 mm ×	0,25 mm × 0,25 mm ×	23 s	27 locuteurs (tous sauf R, FrJ et Fr7)
					45 mm	1,5 mm		
fricatives (conduit vocal entier)	Spin Echo	3,3	10	Sagittal	256 mm × 256 mm ×	0,5 mm × 0,5 mm ×	30 s	FrJ, R
					60 mm	1,5 mm		
contour des dents (2) ²⁸	Spin Echo	11	3000	Sagittal	256 mm × 256 mm ×	0,5 mm × 0,5 mm ×	3 min	FrJ, R, Fr7
					76,5 mm	1,5 mm		

Protocole d'acquisition

La séquence Fast 3D, qui utilisait une antenne de petite taille placée en avant des lèvres (l'antenne est décrite dans Takano *et al.*, 2003), permettait l'obtention de données d'une très bonne résolution en un temps assez court. En contrepartie, elle ne rendait visible que la partie avant du conduit vocal (jusqu'aux environs de la région vélaire). Cette séquence a été utilisée pour obtenir la morphologie précise de la partie avant du conduit vocal, dont la cavité antérieure, considérée comme responsable des pics spectraux majeurs des

²⁷ Pour les locuteurs J2 et J3, qui présentaient un conduit vocal plus large, un volume plus important a été scanné : 51 et 54 mm d'épaisseur, respectivement. La durée de la séquence était augmentée proportionnellement.

²⁸ Ce contour des dents a été obtenu avec l'utilisation d'un médium contrastant (boisson au parfum myrtille de teneur riche en fer), de telle sorte que toutes les dents étaient bien isolées de l'air contenu dans la bouche. Le contour des dents avec la méthode (1) était obtenu par le contact des tissus (langue et lèvres) avec les dents. Seules la partie avant des dents était donc bien isolée de l'air. Cette première méthode était suffisante pour la reconstitution des conduits vocaux antérieurs, tandis que la méthode (2) était nécessaire pour la reconstitution des conduits vocaux entiers.

I. Description articuloire des fricatives sibilantes

sibilantes (ex. Fant, 1960 ; Flanagan, 1972). La relative courte durée de la séquence d'acquisition limitait les risques de mouvement, qui affecte la qualité des images, et permettait le plus souvent la production réelle de la fricative du début à la fin de la séquence d'acquisition.

Toutes les acquisitions, sauf mention contraire, s'effectuaient en position allongée sur le dos (position supine), avec exception pour une locutrice (J8) qui s'est également prêtée à l'acquisition en position allongée sur le ventre, afin d'évaluer les effets de la force de gravitation sur la forme du conduit vocal (Annexe III). Plusieurs études se sont intéressées par le passé à la variation possible de l'articulation entre la position verticale et la position supine (Tiede *et al.*, 2000 ; Engwall, 2003 ; Kitamura *et al.*, 2005 ; Stone *et al.*, 2007). Les résultats de Stone *et al.* suggèrent que les locuteurs ont tendance à effectuer une compensation de façon à préserver la forme du conduit vocal, surtout dans la région où se produit la constriction, pour les consonnes. Toutefois, ces auteurs constatent que les locuteurs (13 locuteurs) emploient des stratégies différentes de compensation. Par ailleurs, il a été observé que les fricatives étaient résistantes à la coarticulation (Tabain 2001), et que la langue possédait des degrés de liberté limités dans la production des sibilantes [s] et [ʃ] (Nguyen *et al.*, 1994). Les données acquises en position supine pourraient donc donner une assez bonne indication de l'articulation des sibilantes en général.

La séquence Spin-echo utilisait une antenne enveloppant tout le visage. Cette séquence était également assez brève (environ 30 secondes). Quelques locuteurs seulement se sont prêtés à ce mode d'acquisition, destiné à obtenir la forme du conduit vocal en entier, de la glotte jusqu'aux lèvres. Ces données ont été utilisées dans la simulation acoustique, et à l'observation articuloire de la forme complète de la langue, y compris dans la région pharyngale.

En plus des séquences d'acquisition des fricatives tenues, nous avons effectué l'acquisition de la forme des dents²⁹. Pour cela, la consigne était donnée aux locuteurs de fermer la bouche en mettant en contact leurs lèvres et leur langue avec leurs dents (surtout en avant de la bouche). Ainsi, nous avons pu obtenir le contour de leurs dents grâce au contraste avec les tissus environnants.

Quelques locuteurs (en particulier ceux qui se sont prêtés à l'acquisition du conduit vocal entier, où il était nécessaire d'obtenir la forme des dents jusqu'en arrière de la bouche) se sont prêtés à un autre mode d'acquisition de la forme des dents par contraste. Cette acquisition se déroulait en position prone (allongée sur le ventre) pour éviter la création d'une bulle d'air dans la région des incisives. Ce deuxième mode consistait à garder dans

²⁹ Dans les séquences d'acquisition utilisées dans cette expérience, les tissus musculaires ou graisseux apparaissent en gris ou en blanc, et les tissus osseux apparaissent en noir, de même que l'air. Ainsi, le contour des dents ne peut pas être distingué dans les images où le locuteur est en train de produire une fricative (ou tout autre son de parole où les dents sont en contact avec l'air).

I. Description articulatoire des fricatives sibilantes

la bouche un liquide contrastant (une boisson sportive gélifiée au parfum de myrtille et riche en fer, apparaissant en blanc dans les images). Afin de faciliter la tâche aux locuteurs et éviter les fuites du liquide, un ruban adhésif était placé sur leur bouche.

Déroulement de l'expérience

La séance d'acquisition IRM avait lieu après la séance d'enregistrement sonore (qui pouvait avoir eu lieu juste avant ou quelques jours auparavant). Le but de l'expérience ainsi que son déroulement étaient expliqués aux locuteurs lors de cette séance d'enregistrements acoustiques. De plus, la séance d'enregistrement acoustique servait à entraîner les locuteurs à la production tenue de fricatives.

Lors de la séance d'acquisition des données IRM, les locuteurs devaient d'abord remplir un questionnaire de sécurité liée à la technique IRM, destiné à minimiser les risques d'accidents (utilisateur de pacemakers, implants métalliques...). Ensuite, les locuteurs acceptaient formellement de participer à l'expérience après avoir lu une notice explicative « informed consent » (proposée en japonais et en anglais), qui rappelait les objectifs de l'expérience, les bénéfices scientifiques escomptés et les potentiels risques encourus. Les locuteurs étaient libres de se désister à tout moment sans aucun préjudice (s'ils étaient recrutés à l'extérieur du laboratoire ATR, leur rémunération n'était pas remise en cause). Ensuite, le déroulement de l'expérience leur était expliqué une nouvelle fois, et les locuteurs étaient invités à produire les fricatives de façon tenue, afin de contrôler que la consigne avait bien été comprise. Il leur était demandé de produire les fricatives cibles de manière tenue pendant toute la durée de la séquence d'acquisition (qui durait de 23 à une trentaine de secondes), sans reprise de souffle (la reprise de souffle entraîne le mouvement de la tête de manière quasi inévitable). Lorsque les locuteurs avaient épuisé tout leur souffle, il leur était demandé de garder la même position sans respirer jusqu'à la fin de la séquence. Chaque fricative était présentée sous la forme « s comme dans *Assam* », avec un exemple de mot, et les locuteurs étaient invités à produire la fricative tenue « exactement comme lorsqu'elle est contenue dans ce mot ». Pour les langues qui ne nous étaient pas familières (chinois, polonais, russe et suédois), la liste des sons à produire, avec les mots dans lesquels ils apparaissent, était imprimée sur une feuille et collée à l'intérieur de l'appareil de façon à ce qu'elle puisse être lue par le locuteur pendant la séance d'acquisition. La fricative à produire était communiquée au locuteur par le numéro dans la liste. La communication entre la cabine de contrôle et la salle d'acquisition IRM était assurée par le biais d'un haut-parleur (le sujet entendait les consignes et les questions de l'expérimentateur) et de gestes (du pied du sujet, visible de la cabine de contrôle). Pour chaque séquence, l'expérimentateur annonçait la tâche suivante et le sujet confirmait ou exprimait une demande d'explication supplémentaire par le geste convenu pour « oui » ou « non ». Le corpus d'acquisition comprenait les fricatives sibilantes sourdes cibles dans plusieurs contextes imaginaires. Après l'acquisition de l'ensemble du corpus, nous vérifiions les données. Nous recommençons l'acquisition des séquences dans les cas suivants, autant de fois que nécessaire, dans la limite du temps disponible, et sans abuser de la patience du sujet, lorsqu'il acceptait :

- si les images étaient bruitées suite à un mouvement ou à un tremblement ;
- si l'articulation ne correspondait vraisemblablement pas à la fricative cible ;

I. Description articulatoire des fricatives sibilantes

s'il existait une variation jugée trop importante (inconsistance) entre les différentes occurrences de la même fricative (entre les différents « contextes »).

Malgré ces précautions, les données de plusieurs locuteurs ont dû être écartées de l'analyse. Les critères de rejet étaient les suivants : tremblements récurrents ; présence de métaux magnétisables sur leurs dents, créant des distorsions ou des ombres ; des caractéristiques articulatoires difficilement compatibles avec la tenue réelle de la fricative pendant la séance d'acquisition, en particulier une grande ouverture du voile du palais (cf. note 19).

Données analysées

Dans notre description articulatoire, nous ne nous servons que des fricatives sibilantes produites en contexte non arrondi, présentées aux sujets avec les mots indiqués dans la section *corpus* (Tableau 3) quelques pages plus haut. En effet, bien que la consigne avait été donnée aux sujets de produire la fricative « telle que » contenue dans le mot, pour certains locuteurs, aucune différence articulatoire nette n'avait pu être constatée entre les contextes « imaginaires » non arrondi et arrondi. Il peut donc être suggéré que ces locuteurs ont produit une fricative proche de leur cible « idéale », indépendamment du contexte. Ce point représente une des limites de la méthode utilisée, en particulier lorsque les locuteurs participant à l'expérience ne sont pas phonéticiens.

Pour observer l'effet du contexte, il existe des modes d'acquisition dynamique ou ciné-itérative (IRM temps réel (2D) : Demolin *et al.*, 2002 ; Narayanan *et al.*, 2004 ; ciné-MRI (itératif) utilisant la synchronisation avec un signal audio : Stone *et al.* 2001 (2D) ; Takemoto *et al.*, 2003 (3D)). Les techniques faisant appel à l'itération demandent une certaine expertise de la part du sujet et des séances d'acquisition longues. De plus, dans ces approches, la résolution des images est nettement moins bonne que dans les protocoles d'acquisition statique. Dans notre étude, nous avons donné la priorité au nombre de sujets et à la précision de l'image³⁰. Les fricatives sont des sons relativement stationnaires, qui peuvent être tenus, comme on peut allonger les voyelles. Bien que ce mode de production ne soit pas naturel, ces sons peuvent être considérés comme assez proches de la cible des fricatives produites dans la parole naturelle. D'après Engwall (2003), les productions tenues seraient hyperarticulées, c'est-à-dire, en d'autres termes, qu'elles sont plus proches de leurs formes canoniques sur le plan cognitif que les occurrences produites en parole continue. Après coup, la variation due au mode de production (tenu *vs.* mot) s'avère mineure en comparaison à la variation inter-individuelle (cf. II-2). Dans la mesure où nous nous intéressons à l'affiliation formantique des pics spectraux du bruit de friction, nous estimons que les productions tenues sont tout à fait satisfaisantes.

³⁰ Nous avons jugé qu'il était important de connaître avec précision la taille de la constriction, de façon à pouvoir apprécier de manière fiable les propriétés acoustiques des sibilantes. En particulier, la taille de la constriction peut avoir un effet important sur l'aspect du spectre, en raison du couplage de la cavité postérieure (ex. Badin, 1989).

I. Description articuloire des fricatives sibilantes

Insertion du contour des dents

Une fois les données acquises, la forme des dents a été restituée dans les données des fricatives par les moyens suivants.

D'abord, les moulages numériques 3D des dents supérieures et inférieures, avec quelques parties du crâne et de la mandibule, ont été extraits séparément à l'aide du contraste de luminosité entre les parties osseuses (noir) et les tissus mous (gris clair). Cette méthode, analogue à celle publiée dans Takemoto *et al.*, 2004, nous a été conseillée par K. Honda. Elle présente plusieurs avantages par rapport à la procédure d'insertion du contour numérisé à partir de moulages dentaires (ex. Narayanan, *et al.*, 1995). Premièrement, la procédure demande moins de temps et de moyens car elle utilise la même technique que l'acquisition des données articuloires. Deuxièmement, il y a moins de risque d'erreurs par le fait qu'il y a moins d'étapes intermédiaires entre l'acquisition des empreintes dentaires et leur insertion dans les données articuloires, d'une part, et d'autre part par le fait que les données sont de même nature dès le départ. Enfin, leur insertion dans les données articuloires peut se faire avec une grande précision grâce aux détails des structures osseuses qui se trouvent à la fois dans les données articuloires et dans les données des dents.

L'extraction des moulages numériques des dents a été effectuée manuellement image par image en sélectionnant les parties pertinentes et en effaçant le reste de l'image. Cette opération a été effectuée séparément pour les dents du haut et du bas, afin de pouvoir les positionner ensuite indépendamment dans les données articuloires. Par la suite, les teintes claires et sombres ont été interverties de manière à ce que les dents et les structures osseuses apparaissent en blanc (en tant que matière) et les tissus environnants en noir (comme du vide). Enfin, les moulages numériques des dents supérieures et inférieures ont été insérés l'un et l'autre dans les données des fricatives à l'aide d'un logiciel de traitement de données médicales volumétriques Intage-rv. Les détails de la pulpe osseuse des dents, les alvéoles de la mâchoire et des sinus, les contours de la mâchoire et du palais dur servaient de référence pour ajuster la position des dents par rotation et translation en trois dimensions (**Figure 5**). Cette procédure était également manuelle, et la précision approximative est de l'ordre de 0.25 mm et de 0.5 degré.

I. Description articulaire des fricatives sibilantes

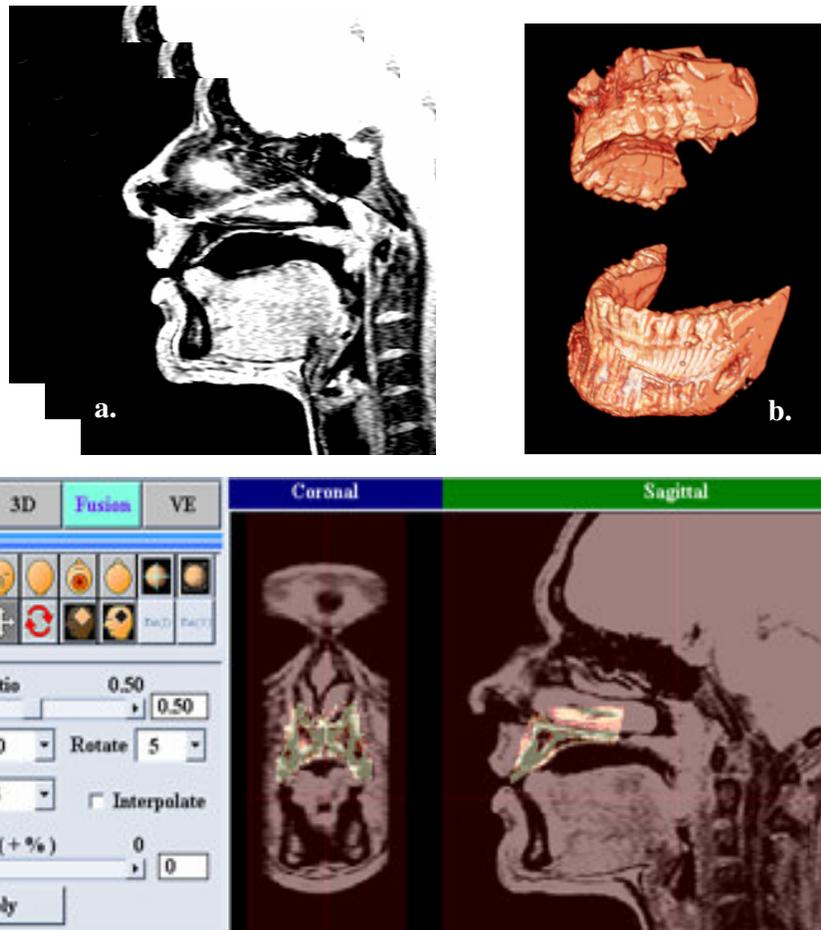


Figure 5. Insertion des moulages numériques des dents supérieures et inférieures. (a) Données 3D des fricatives ; (b) moulages numériques 3D des dents ; (c) copie d'écran illustrant l'insertion des dents par rotation et translation dans un logiciel de traitement de données volumétriques, Intage-rv.

I-1 : DESCRIPTION QUALITATIVE

La description qualitative se conforme à la subdivision de la langue et du palais de Catford (1988) que nous reproduisons en Figure 6 et Figure 7. Cette subdivision est toutefois approximative, en l'absence, la plupart du temps, de repères précis sur les articulateurs. Seuls les résultats de trois locuteurs, deux de français et un de polonais, seront présentés dans la présente section à titre illustratif. Toutes les autres descriptions qualitatives sont fournies en Annexe III. Le code des locuteurs comporte une lettre en fonction de leur langue maternelle (Fr : français, E : anglais, J : japonais, C : chinois, P : polonais, S : suédois, R : russe) et un numéro.

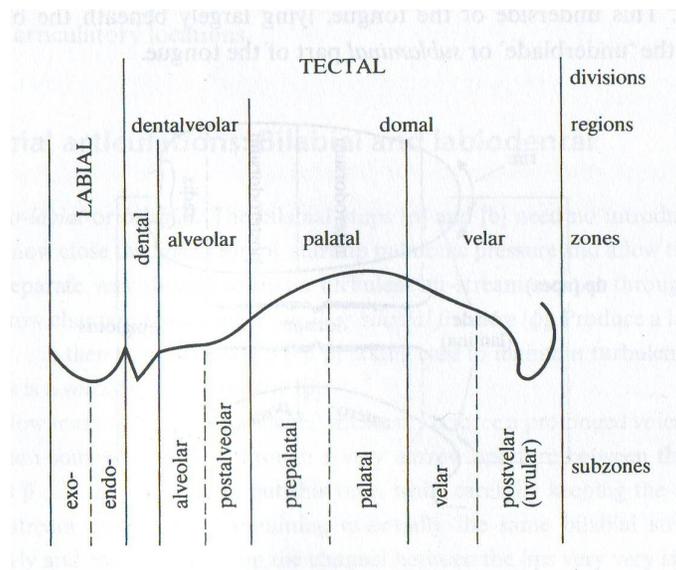


Fig. 23 Upper articulatory locations

Figure 6. Subdivision des articulateurs supérieurs d'après Catford (1988 : 77).

I. Description articulatoire des fricatives sibilantes

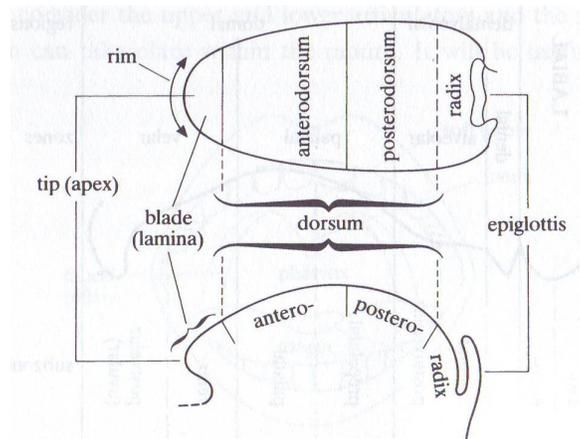


Fig. 24 Subdivisions of the tongue

Figure 7. Subdivision des articulateurs de la langue d'après Catford (1988 : 88).

Lecture des données IRM

Les données IRM sont présentées sous forme de coupes sagittales et de coupes coronales. Les Figure 8 et Figure 9 indiquent les principaux organes et éléments visibles dans ces images.

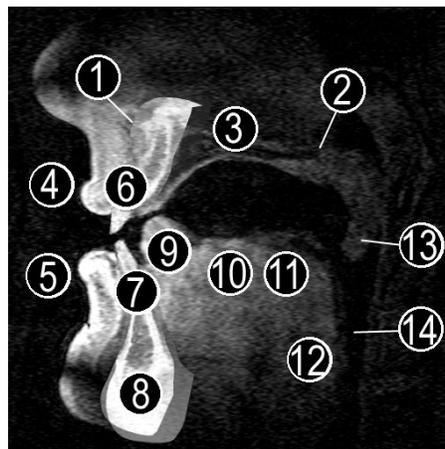


Figure 8 . Principaux organes et éléments visibles sur une coupe sagittale (/s/, locuteur E1). (1) épine nasale antérieure ; (2) épine nasale postérieure ; (3) la partie foncée ou blanche (lorsque insérée a posteriori en même temps que les dents) correspond au palais dur ; (4) et (5) lèvres supérieure et inférieure ; (6) et (7) incisives supérieures et inférieures ; (8) mandibule ; (9) pointe et lame de la langue ; (10) predorsum ; (11) dos de la langue au sens restreint ; (12) l'épiglotte se trouve dans cette région, mais elle est plus ou moins visible selon le locuteur et la consonne ; (13) luette attenante au velum ; (14) pharynx.

I. Description articulatoire des fricatives sibilantes

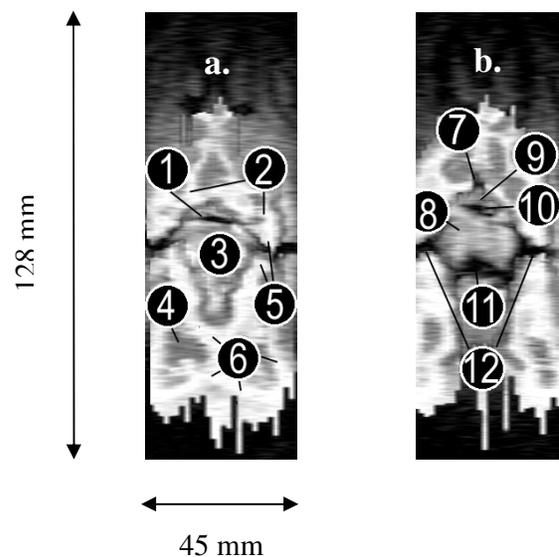


Figure 9. Principaux organes et éléments visibles sur des coupes coronales (a : /s/, locuteur E1 ; b : /ʃ/, même locuteur). (1) La partie noire correspond à l'air à l'intérieur de la constriction ; (2) les parties blanches correspondent aux substances osseuses insérées avec les dents. Ici, la mâchoire supérieure ; (3) la langue (4) les parties légèrement sombre à l'intérieur des parties osseuses correspondent à la pulpe osseuse ; (5) les dents supérieures et inférieures ; (6) parties osseuses de la mâchoire inférieure. (7) La partie correspond au palais dur (appartenant aux données des fricatives) qui n'a pas été insérée avec les dents (avec inversion de luminosité ; ce qui l'aurait rendu blanc) ; (8) la langue ; (9) muqueuse de la paroi palatale ; (10) la partie noire correspond à l'air contenu dans la constriction ; (11) la partie noire correspond à l'air qui se trouve dans l'espace sublingual ; (12) la partie noire correspond à l'air dans l'espace inter-dental.

Les dents et avec elles certaines parties osseuses de la mandibule et de la base du crâne sont rendues artificiellement visibles, grâce à la combinaison de deux ensembles de données, l'une qui fournit la forme des dents (par contraste et après interversion des teintes sombres et claires), et l'autre qui fournit la position des autres articulateurs durant la production des sibilantes. La procédure de l'insertion des dents est décrite dans la section *méthode* du présent chapitre.

Les données IRM peuvent contenir certains artefacts. Les artefacts sont des « erreurs » dans les images IRM et qui ne correspondent pas à la réalité substantielle. Ils sont dus, principalement, à la distorsion du champ magnétique par la présence de métaux magnétisables ou de structures de forme bouclée (électromagnétisme). Les principaux artefacts que l'on rencontre dans les données sont les vides (parties noires) dus aux métaux contenus dans certains amalgames dentaires : les parties latérales de la langue, à proximité des dents réparées, peuvent être invisibles (locuteurs E1, C1, C4...). Par ailleurs, le sillon antéropostérieur de la langue peut également comporter une ombre. Ceci

I. Description articulaire des fricatives sibilantes

est dû aux limites de la résolution des données dans la dimension sagittale. En effet, dans les données présentées ici, les images sont espacées de 1,5 mm. La reconstitution en 3D peut donc comporter quelques erreurs lorsqu'il existe une différence importante entre deux images consécutives (comme c'est le cas pour le sillon de la langue qui crée un abaissement abrupt du contour de la langue d'une coupe sagittale à une autre). Ce type d'artéfact est observable dans beaucoup de coupes coronales, surtout pour les /s/ où le sillon de la langue est profond, par exemple, les locuteurs E1, E5, J3 ou J4.

Fonction d'aire

La fonction d'aire des sibilantes a été mesurée en utilisant les coupes coronales perpendiculaires aux coupes IRM sagittales d'origine. Ainsi, les coupes sont *globalement* perpendiculaires au sens longitudinal du conduit vocal. Il s'agit bien sûr d'une approximation, en particulier pour la région dentale où la forme du conduit vocal est assez complexe. Cette simplification a été utilisée dans Narayanan *et al.* (1995). Une comparaison des résultats de simulation à partir de conduits vocaux 1D et 3D est donnée en III-5.

La **Figure 10** illustre les coupes coronales par rapport au plan sagittal. Dans la réalité, les données ont été redécoupées en coupes coronales espacées d'1 millimètre. Dans l'image du haut, les trois triangles indiquent l'emplacement approximatif des coupes coronales du bas. Le contour du conduit vocal est surligné sur chacune de ces coupes coronales. L'aire du conduit vocal dans chacune des coupes a été mesurée à l'aide du logiciel ImageJ 1.31. Lorsqu'il existe une cavité sublinguale profonde, comme c'est le cas ici par le /ʃ/ du locuteur Fr2, il existe deux branches du conduit vocal dans la région de la constriction, comme illustré dans la coupe coronale du milieu. Dans ce cas, l'aire de la branche sublinguale est représentée à la suite de la cavité orale antérieure (**Figure 11**, courbe a), tandis que la branche « principale » du conduit vocal comprise entre la constriction linguale et la région vélaire est représentée par une autre courbe (**Figure 11** b). Dans nos données « haute résolution » utilisant une antenne placée devant la bouche, le contraste devient moins bon dans la partie postérieure du conduit vocal. Nous avons arrêté les mesures là où le contour de la langue devenait difficile à discerner, ce qui correspond généralement à la région vélaire. Pour certains locuteurs, la cavité labiale a également été difficile à mesurer, en raison de la courbure latérale des lèvres ou d'une occlusion fortement asymétrique (rétrognatique). L'aire des lèvres commence à l'image où les commissures labiales deviennent visibles. Par conséquent, la cavité labiale fait défaut dans les données de beaucoup de locuteurs, ou sa longueur a tendance à être sous-estimée dans les meilleurs des cas. Ce point sera développé dans la section III-4.

I. Description articuloire des fricatives sibilantes

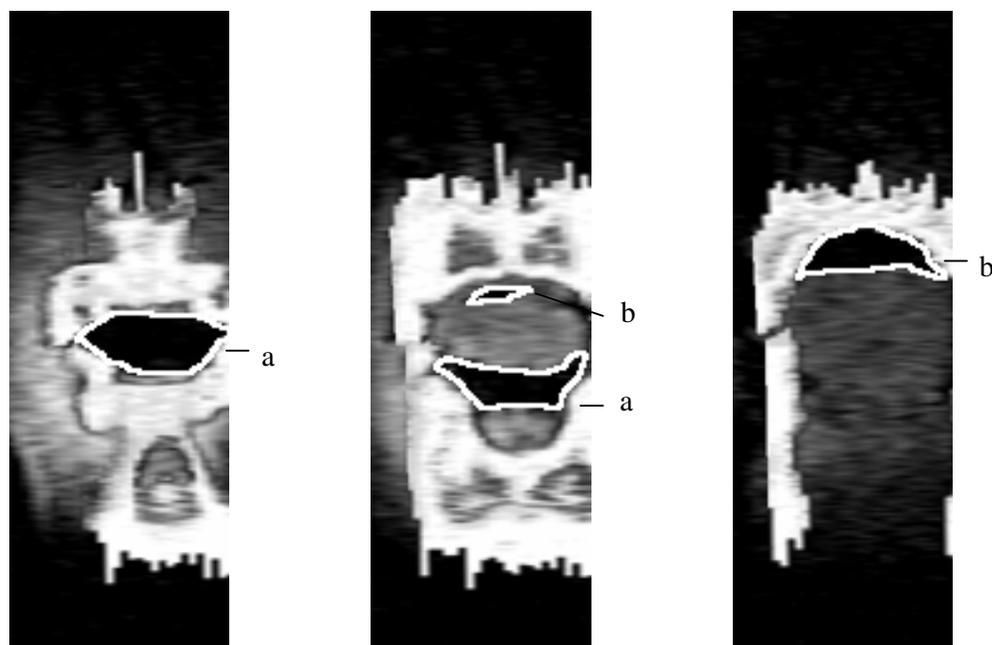


Figure 10. Haut : Représentation schématique des coupes coronales par rapport au profil médo-sagittal (en réalité, elles étaient beaucoup moins espacées que dans cette illustration). Locuteur Fr2, /ʃ/. Bas : Exemple d'aires mesurées dans trois coupes coronales représentatives, correspondant à l'emplacement des triangles de la coupe sagittale. Les lettres a et b sont en correspondance avec les courbes de la Figure 11.

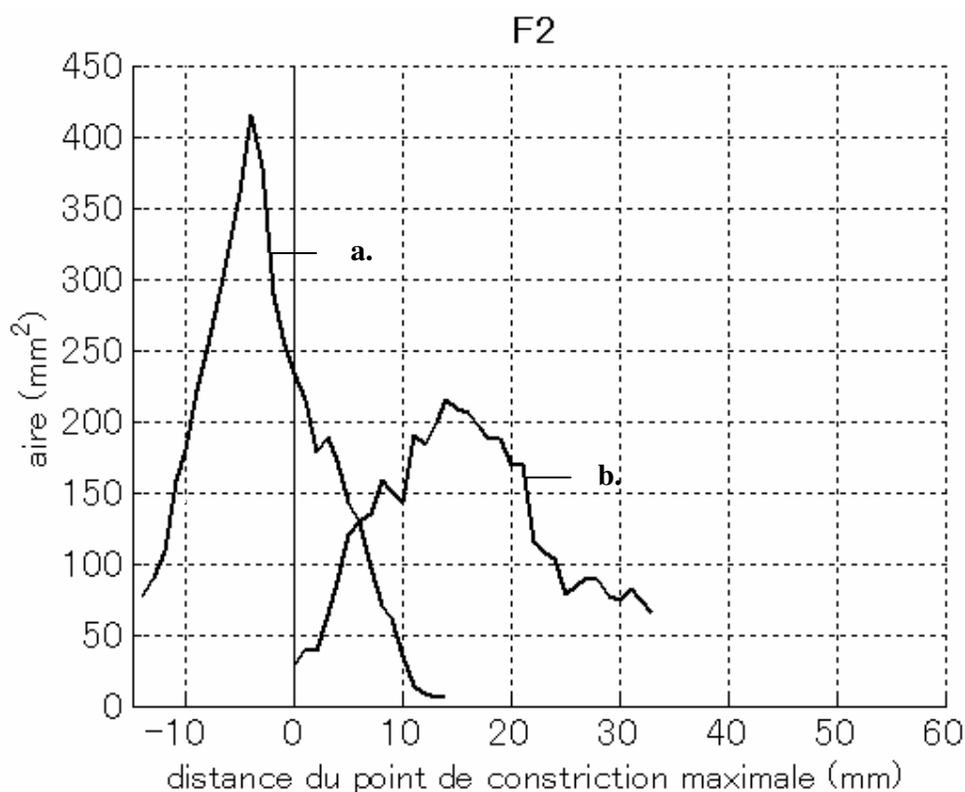


Figure 11. Fonction d'aire du /s/, locuteur Fr2. Les courbes a et b correspondent respectivement aux aires (a) allant des lèvres jusqu'au fond de la cavité sublinguale et (b) de la constriction linguale jusqu'à la région vélaire. Les courbes sont alignées relativement à la constriction linguale maximale (0). Les lèvres se trouvent à gauche (ici, l'aire de la cavité labiale n'a pu être mesurée à cause de la courbure latérale des lèvres de ce locuteur).

Résultats

Locuteur Fr2 (français)

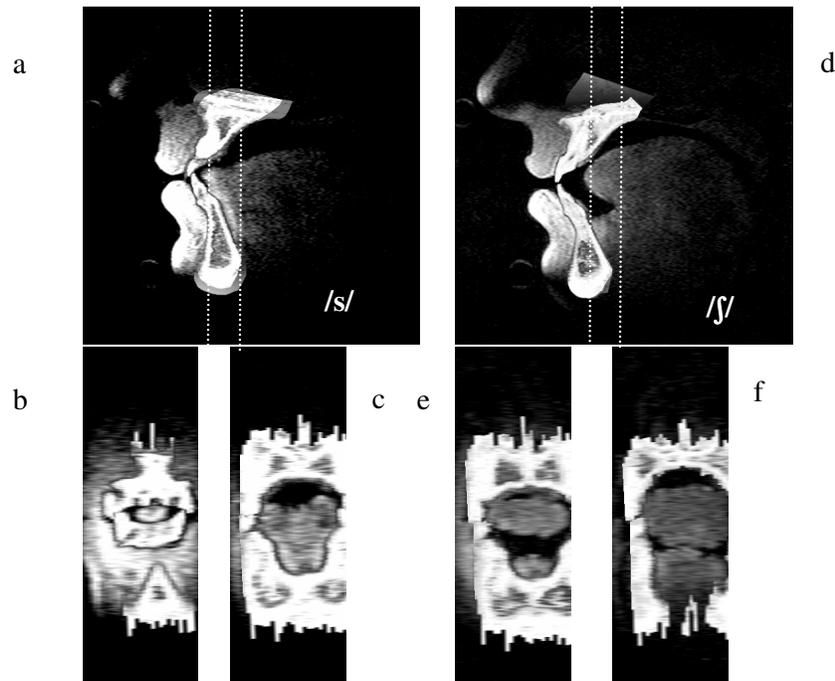


Figure 12. Coupes médo-sagittales (haut) et coronales (bas) des données IRM complétées des dents. A gauche, /s/ (a, b, c) ; à droite, /ʃ/ (d, e, f). Les lignes pointillées blanches sur les profils sagittaux a et d indiquent l'emplacement approximatif des coupes coronales b, c et e et f, respectivement.

Le locuteur Fr2 est un locuteur de français, masculin, d'une vingtaine d'années au moment de l'enregistrement.

Le /s/ produit par ce locuteur a la particularité d'être latéral : au lieu d'avoir un seul passage étroit à proximité du plan médo-sagittal, la pointe de la langue touche la partie centrale des alvéoles, en laissant passer le flux d'air de chaque côté (Figure 12, b). L'acoustique ne présente pourtant pas de déviance particulière³¹ (Figure 32), et

³¹ Il est vrai que la variabilité inter-individuelle est importante quant à la forme du spectre de bruit et les transitions formantiques, comme nous le montrons au chapitre II (Figure 34, Figure 44, Figure 45) et en annexe V (Figure 182). Une articulation latérale pourrait donc faire partie des différentes causes de cette variabilité. Par exemple, le /s/ de ce locuteur est particulièrement riche en énergie dans les hautes fréquences, avec un pic majeur et un centre de gravité vers les 9 kHz (Figure 182). Le spectre présente par ailleurs un pic (moins intense) vers 5,5 kHz, qui est une fréquence plus typique pour un /s/

I. Description articuloire des fricatives sibilantes

l'impression subjective est celle d'un /s/ normal. Même si son articulation s'éloigne de la description classique du /s/, nous avons donc tendance à considérer qu'il s'agit d'une possibilité, parmi d'autres, de produire un /s/, plutôt qu'un trouble de l'articulation.

La forme de la langue est différente en fonction de la sibilante même en arrière du point de constriction. Pour /s/, chez ce locuteur, la langue est concave sur le plan coronal, (**Figure 12 c**), en contraste avec /ʃ/ où elle est convexe (**Figure 12 f**). Cette différence de forme est reflétée par l'aire du conduit vocal (**Figure 13**) entre 15 et 30 mm en arrière de la constriction, qui est plus grande pour /s/ que pour /ʃ/. Les fonctions d'aire (ici et dans le chapitre III) ont été mesurées sur chaque coupe coronale espacées de 1 mm entre elles, où la voie aérienne a été détournée manuellement et son aire obtenue dans le logiciel Image J. L'aire a été mesurée à partir des lèvres, dès que les commissures labiales étaient visibles, jusqu'à la région vélaire. L'aire du conduit vocal dans la partie pharyngale, où le contour de la voie aérienne n'était pas bien visible, n'a pas été mesurée.

Par ailleurs, une cavité sublinguale est visible pour /ʃ/ (**Figure 12 e**). Cette cavité sublinguale crée une bifurcation du conduit vocal qui est représentée par deux courbes dans la **Figure 13**. L'aire des tranches successives de la cavité sublinguale est représentée à la suite de la cavité orale antérieure (courbe de gauche). L'autre branche du conduit vocal, de la constriction jusqu'à la région palatale, est représenté par une deuxième courbe (vers la droite).

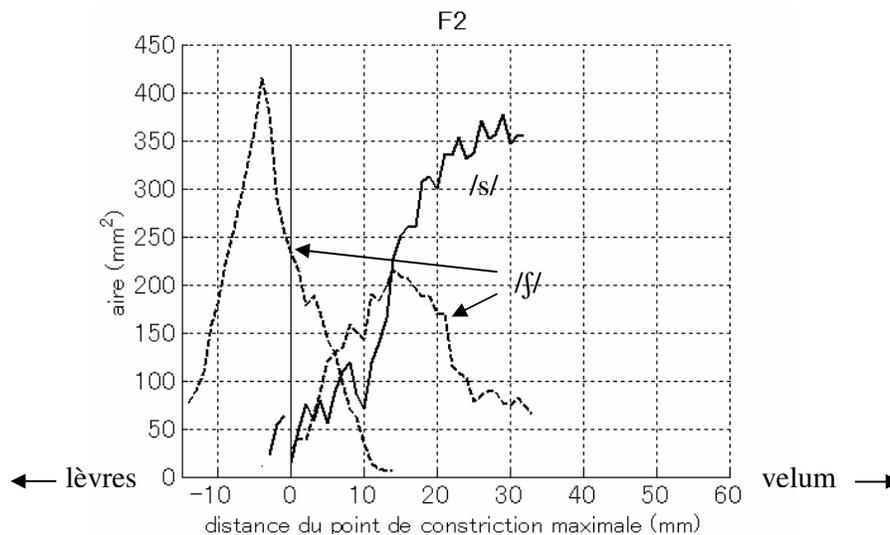


Figure 13. Fonctions d'aire de /s/ (ligne pleine) et /ʃ/ (lignes pointillées) ; mesures effectuées sur les coupes coronales perpendiculaires aux images d'origine (dont Figure 12 b, c, e et f en sont des exemples). Les mesures s'arrêtent là où le contraste entre la voie aérienne et les tissus mous devenait

français.

I. Description articuloire des fricatives sibilantes

faiblement perceptible (dans la région vélaire, à droite). Les lèvres se situent à gauche, mais pour ce locuteur, n'ont pas pu être mesurées en raison de leur courbure latérale. Chez ce locuteur, la cavité antérieure du /ʃ/ comporte une cavité sublinguale, qui est représentée dans le prolongement de la cavité orale, en arrière de la constriction (à droite de la constriction (= point 0), qui est le point de référence choisi pour l'alignement des fonctions d'aire).

Les fonctions d'aire présentent deux constriction majeures. La première, vers -14 mm pour /ʃ/ et vers -3 mm pour /s/, correspond à la constriction dentale. La deuxième, à 0 mm, est la constriction linguale. La cavité comprise entre les constriction dentale et linguale est désignée par le terme « cavité *orale* antérieure ».

Tableau 6. Description qualitative de l'articulation des sibilantes ; locuteur Fr2

	/s/	/ʃ/
Articulateur de la langue	pointe de la langue	lame de la langue
Cible supérieure	dentale	région post-alvéolaire
Constriction	passages latéraux	plate
Forme sagittale du dos de la langue	plate	bombée
Lèvres		protruses et ouvertes en référence à /s/

La différence d'articulation entre les deux phonèmes sibilants réside dans l'articulateur de la langue, la région cible, la forme du dos de la langue (il y a une différence également visible sur le plan coronal) et celle des lèvres (Tableau 6). La fonction d'aire (Figure 13) révèle une grande différence quant à la taille de la cavité antérieure.

I. Description articulatoire des fricatives sibilantes

I. Description articuloire des fricatives sibilantes

Locuteur Fr5 (français)

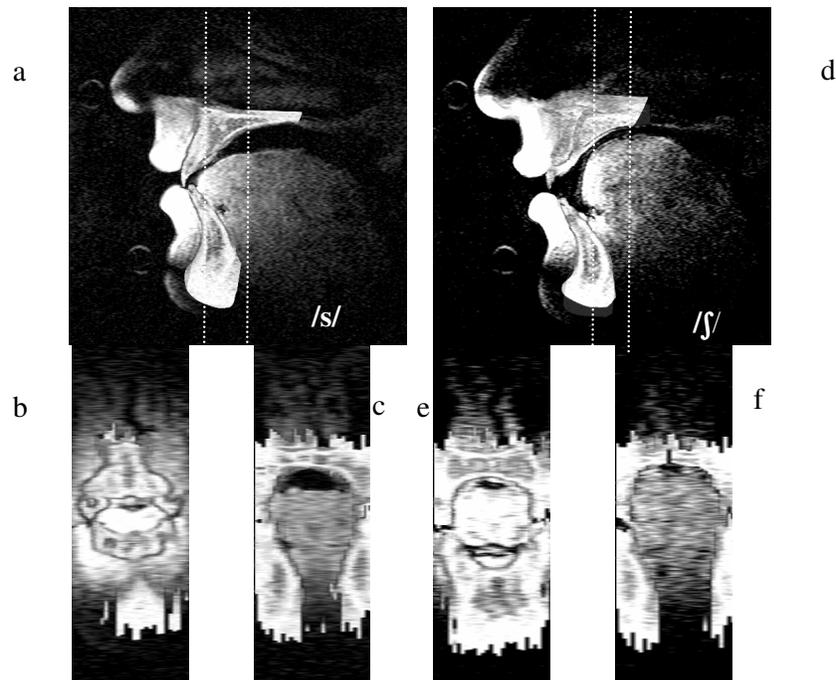


Figure 14. Coupes médio-sagittales (haut) et coronales (bas) des données IRM complétées des dents. A gauche, /s/ ; à droite, /ʃ/. Les lignes pointillées blanches sur les profils sagittaux indiquent l'emplacement approximatif des coupes coronales.

Le locuteur Fr5 est un locuteur masculin de français, âgé d'une vingtaine d'années au moment de l'enregistrement. Contrairement au locuteur Fr5, son /s/ est central (**Figure 14** b). Les sibilantes /s/ et /ʃ/ s'opposent, du point de vue articuloire, par la forme de la langue (v. **Tableau 7**). Bien que le dos de la langue pour /s/ ne soit pas concave sur le plan coronal (**Figure 14** c) comme le locuteur Fr2 (**Figure 12** c), la langue est nettement plus plate sur le plan sagittal chez ce locuteur pour /s/ que pour /ʃ/ (**Figure 14** f). Le point de constriction qui en résulte est plus postérieur pour /ʃ/, ce qui donne lieu à une cavité antérieure nettement plus grande et plus longue. De plus, la forme bombée du dos de la langue se traduit par la palatalisation de /ʃ/, à la différence de /s/, qui est clairement visible sur la fonction d'aire en **Figure 15**. Cette articulation est différente du locuteur Fr2 (**Figure 13**). En effet, il y a création d'un chenal palatal long (d'au moins 3,5 cm) et étroit (environ 50 mm² ; cf. également **Figure 14** f) en arrière de la constriction chez le locuteur Fr5.

I. Description articulatoire des fricatives sibilantes

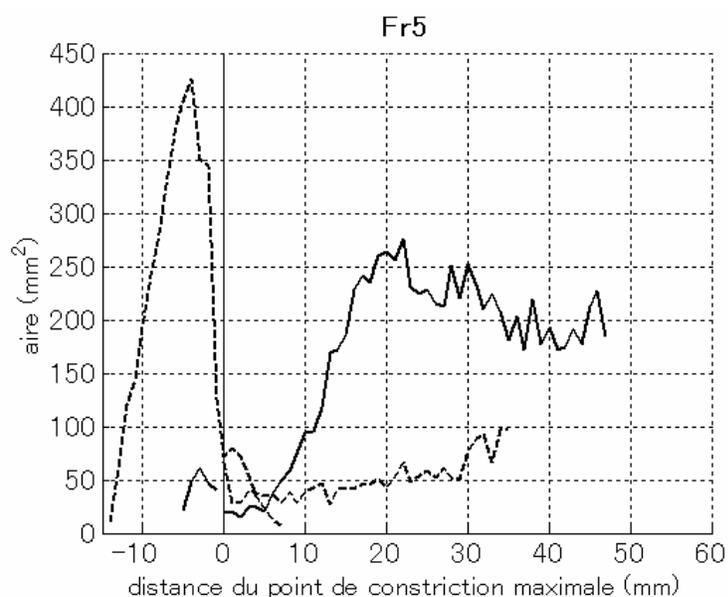


Figure 15. Fonctions d'aire de /s/ (lignes pleines) et /ʃ/ (lignes discontinues) ; mesures effectuées sur les coupes coronales perpendiculaires aux images d'origine.

Tableau 7. Description articulatoire qualitative du locuteur Fr5.

	/s/	/ʃ/
Articulateur de la langue	lame de la langue	prédorsum à dorsum
Cible supérieure	alvéolaire	post-alvéolaire à palatale
Forme de la constriction	plate	plate
Forme sagittale du dos de la langue	légèrement bombée	très bombée
Lèvres		protrusion par rapport à /s/

I. Description articuloire des fricatives sibilantes

Récapitulation : description articuloire qualitative, français

Nous récapitulons ici les tendances articuloires des sept locuteurs du français. La description articuloire détaillée des locuteurs Fr1, Fr3, Fr4, Fr6 et Fr7 se trouve en Annexe III. La **Figure 16** présente les contours médo-sagittaux.

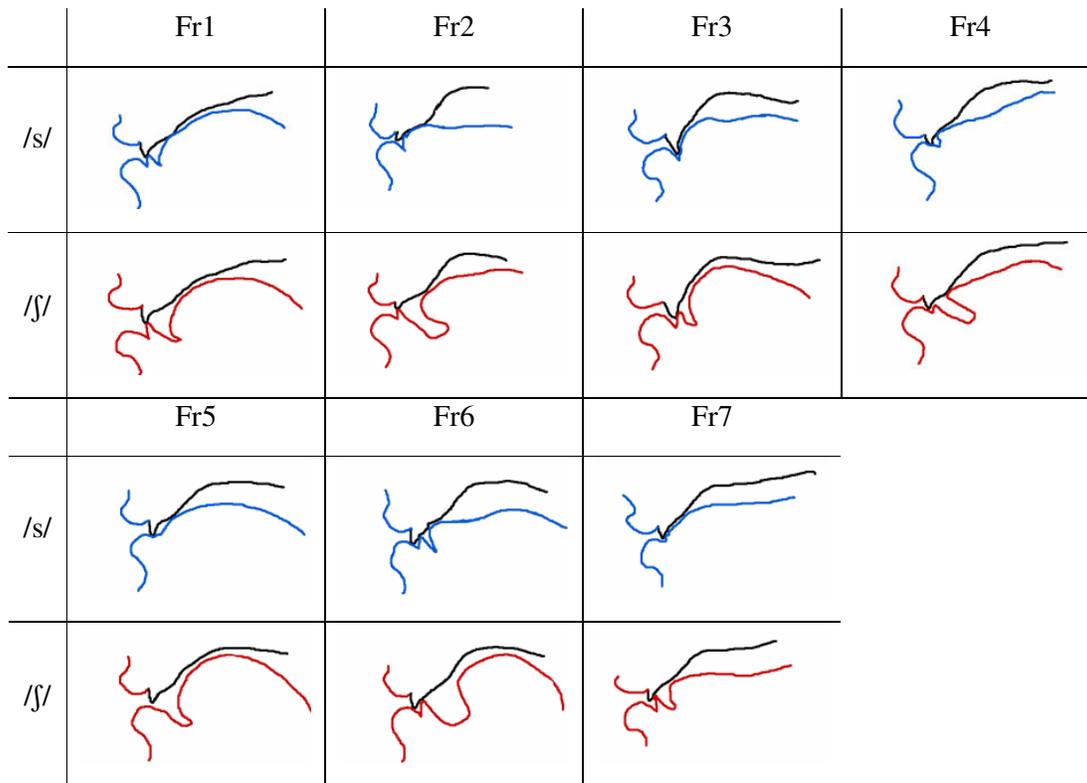


Figure 16. Profils médo-sagittaux des sept locuteurs du français

/s/

Ce phonème est réalisé (en production tenue), très différemment selon les locuteurs du français. Il peut être apical (Fr2, Fr4, Fr6), avec souvent une petite cavité antérieure (Fr4 et Fr6) ou laminal (Fr1, Fr3, Fr5, Fr7) et sans protubérance de cavité antérieure, de telle sorte que celle-ci puisse être différenciée de la constriction elle-même. La cible articuloire peut être dentale (Fr2, Fr4), denti-alvéolaire (Fr3, Fr5, Fr7), alvéolaire (Fr6) et même alvéolo-postalvéolaire (Fr1). S'il fallait trouver un point commun à toutes ces articulations de /s/, ce serait que le point de constriction est toujours antérieur à celui de /ʃ/ pour un locuteur donné (cf. paragraphe suivant). Cet aspect sera à nouveau discuté, cette fois quantitativement, dans la section I-3. De plus, s'il arrive que l'une des deux sibilantes sourdes soit plus palatalisée que l'autre (aire plus étroite en arrière de la constriction), c'est toujours /ʃ/ qui est plus palatalisé. Mais pour la moitié des locuteurs (Fr1, Fr2, Fr4,

I. Description articuloire des fricatives sibilantes

Fr7), pour qui la forme de la langue n'est pas très différente entre les deux sibilantes, il n'existe pas de différence notable quant au degré de palatalisation entre les deux sibilantes. Un sillon de la langue n'est observé pour /s/ que pour les locuteurs Fr4, Fr6 et, dans un moindre degré, Fr7. L'existence d'un sillon sur le plan coronal, associé à une forme concave de la langue sur le plan sagittal, ne serait donc pas une caractéristique robuste, contrairement à ce qui a été proposé pour l'anglais, d'après les résultats d'une expérience de parole perturbée (Flege *et al.*, 1988).

/ʃ/

Ce phonème, en production tenue, est réalisé avec une articulation linguale apicale (Fr4), laminaire (Fr2, Fr7), voire prédorsale ou dorsale (Fr1, Fr3, Fr5, Fr6). Ce phonème peut donc être réalisé, lorsque l'articulation est apicale, comme une palato-alvéolaire plate [ʃ] d'après la description des sibilantes dans Ladefoged et Maddieson (1996). Les locuteurs pour qui l'articulateur lingual est prédorsal ou dorsal présentent une articulation palatalisée, caractéristique de la palato-alvéolaire bombée [ʃ], qui s'étend de la région alvéolaire ou post-alvéolaire à la région palatale (ex. locuteur Fr5). La taille de la cavité orale antérieure peut varier du simple au double, voire au triple, selon le locuteur, en longueur (10 à 25 mm) comme en aire maximale (150 à 600 mm²). De manière générale, la langue ne touche pas les incisives inférieures (ceci est valable aussi pour l'anglais ; v. Annexe III).

La variabilité inter-locuteurs concerne aussi la forme des lèvres. Contrairement à la description habituelle de /ʃ/ (ex. Ladefoged et Maddieson, 1996), une protrusion labiale franche (dans le sens où la forme des lèvres diffère entre /s/ et /ʃ/) n'est observée que pour la moitié des locuteurs (Fr1, Fr2, Fr4, Fr5 ; v. aussi profils sagittaux superposés, **Figure 22**). Cette protrusion est obtenue majoritairement par le changement de la forme des lèvres (Fr1, Fr2, Fr5) ou par l'avancement de la position de la mâchoire inférieure (Fr4), où l'un n'exclut pas l'autre. Trois (Fr1, Fr2, Fr4) des locuteurs pour qui une nette protrusion labiale est observée font partie des locuteurs (Fr1, Fr2, Fr4, Fr7) qui changent très peu la forme de leur langue entre les deux sibilantes /s/ et /ʃ/. Bien que le nombre relativement restreint de locuteurs ne nous permette pas d'effectuer une généralisation, les gestes de palatalisation et de protrusion, en référence à /s/, tendent à être en distribution complémentaire. Ce point sera approfondi dans la section I-3. L'équivalence acoustique de ces deux types de /ʃ/ est discutée dans les sections II-1, II-2 et III-2.

I. Description articulatoire des fricatives sibilantes

Locuteur P1 (polonais)

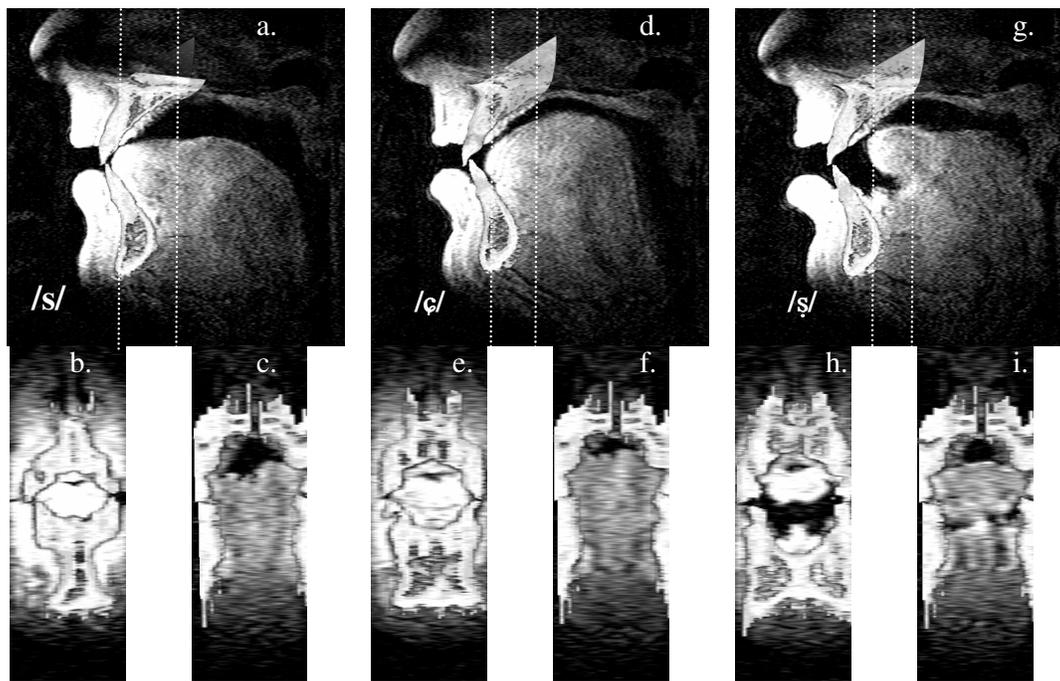


Figure 17. Coupes médio-sagittales (haut) et coronales (bas) des données IRM complétées des dents. A gauche, /s/ ; au centre, /ç/ ; à droite, /ʂ/. Les lignes pointillées blanches sur les profils sagittaux indiquent l'emplacement approximatif des coupes coronales.

Le locuteur P1 est un locuteur polonais âgé d'une quarantaine d'années au moment de l'acquisition des données. Il présente un dos de la langue plat pour /s/ et /ʂ/ (**Figure 17** a et g), cette dernière présentant un point de constriction postérieur donnant lieu à une grande cavité orale antérieure en partie sublinguale, clairement visible dans la **Figure 17** g et h. La sibilante /ç/ est réalisée avec un dos bombé, donnant lieu à une longue constriction étroite (**Figure 17** d). La pointe de la langue, si elle ne touche pas les incisives inférieures, en est, en tout cas, très proche, de telle sorte que la cavité orale antérieure est nettement plus petite que celle de /s/ (**Figure 18**). On observe une protrusion labiale croissante pour /ç/ et /ʂ/ (**Figure 17** d et g). Les fonctions d'aire (**Figure 18**) révèlent également une différence de l'aire labiale, plus grande pour /ʂ/. La sibilante /s/ présente une asymétrie importante de la langue au niveau du dorsal (**Figure 17** c), mais la constriction est alignée sur le plan médio-sagittal (**Figure 17** b). Les principales caractéristiques articulatoires sont récapitulées dans le **Tableau 8**.

I. Description articulatoire des fricatives sibilantes

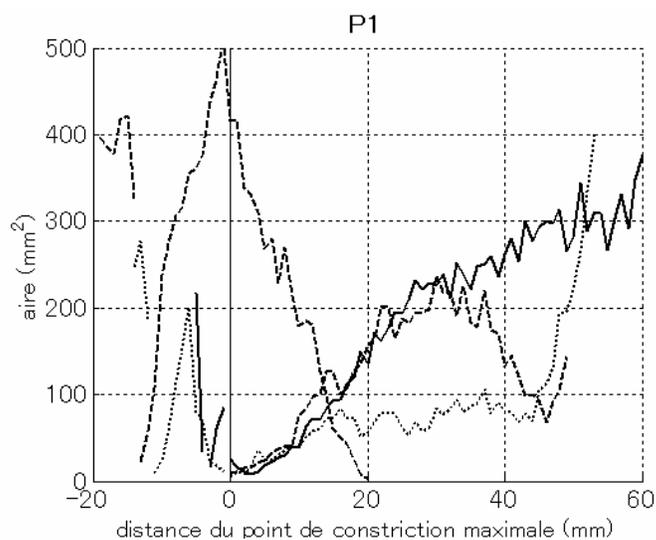


Figure 18. Fonctions d'aire ; mesures effectuées sur les coupes coronales perpendiculaires aux images d'origine. Lignes pleines : /s/ ; lignes interrompues : /ʃ/ ; lignes pointillées : /ç/.

Tableau 8. Description articulatoire qualitative du locuteur P1.

	/s/	/ç/	/ʃ/
Articulateur de la langue	pointe	lame et dos	pointe
Cible supérieure	denti-alvéolaire	alvéolaire à palatale	post-alvéolaire
Forme du dos de la langue	plate	bombée	plate
région pharyngale	moyenne	large	étroite
Lèvres		protrusion intermédiaire	protrusion maximale

I. Description articuloire des fricatives sibilantes

Récapitulation : description articuloire qualitative, polonais

La Figure 19 montre le profil sagittal pour les locuteurs P1 et P2. Les contours sagittaux superposés, de même que les données IRM et leur description détaillée pour le locuteur P2 se trouvent en Annexe III.

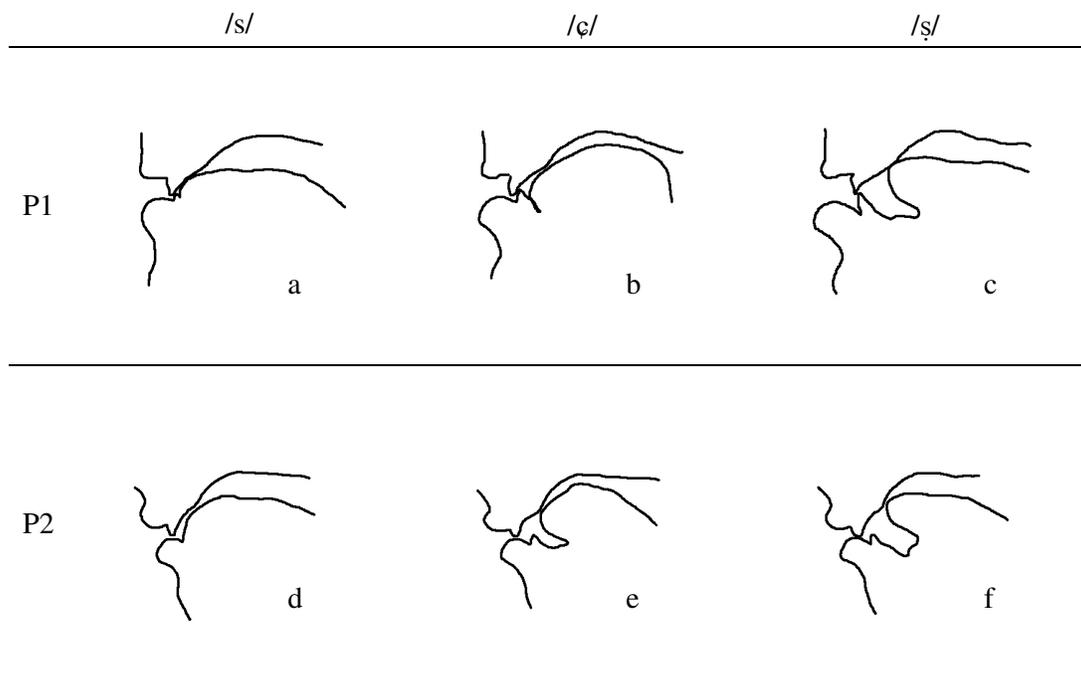


Figure 19. Contours médio-sagittaux des sibilantes du polonais.

/s/

Pour les deux locuteurs que nous avons étudiés, la sibilante */s/* est réalisée de manière similaire aux */s/* français et anglais, sans tendance apicale (avec dos concave) comme en japonais ou en chinois (cf. Annexe III). L'opposition entre */s/* et */ʂ/* rappelle celle de */s/* et */ʃ/* en français, chez certains locuteurs (Fr1, Fr2, Fr4, Fr7), où la forme globale de la langue reste inchangée, mais la langue en entier est rétractée. Le degré de rétraction, toutefois, a tendance à être plus important que la moyenne des locuteurs français.

/ɕ/

Cette sibilante est réalisée avec le prédorsum (P2 ; **Figure 19 e**) ou le dos de la langue (P1 ; **Figure 19 b**) bombé, de telle sorte qu'il en résulte une articulation palatalisée. La pointe de la langue ne touche pas les incisives inférieures, et la cavité orale antérieure, pour ces deux locuteurs, est plus grande que celle observée pour le */s^j/* chez la majorité de

I. Description articuloire des fricatives sibilantes

nos locuteurs de japonais (un exemple représentatif se trouve en **Figure 20**, a).

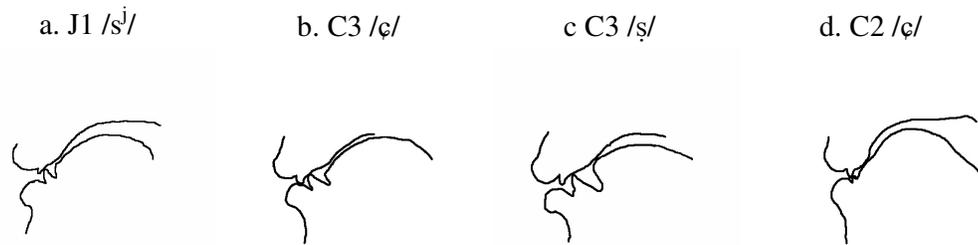


Figure 20. Contours médio-sagittaux (a) de /s^j/ par le locuteur japonais J1, (b) de /ç/ et (c) de /ʃ/ par le locuteur chinois C3, et (d) de /ç/ par la locutrice C2.

La sibilante /ç/ du polonais ressemblerait à son équivalent en chinois (cf. **Figure 20**, b). Toutefois, dans la mesure où la variation inter-individuelle est importante, il est difficile de déterminer si les différences entre ces deux langues sont dues au choix particulier des locuteurs ou à la langue (par ex. la locutrice C2, en **Figure 20** d, présente une langue extrêmement bombée avec une cavité orale antérieure très petite, plutôt comme en japonais). Ladefoged et Wu (1984 : p.272) remarquent cependant que le dos de la langue est plus élevé pour /ç/ en polonais qu'en chinois.

/ʃ/

Bien que le même symbole ait été utilisé dans la littérature pour le polonais et pour le chinois, 'cette' sibilante semble de nature différente entre ces deux langues. La différence principale consiste en la taille de la cavité orale antérieure. Cette cavité est nettement plus grande chez les deux locuteurs de polonais que chez tous les locuteurs de chinois dont nous avons observé les profils sagittaux dans cette étude et même en comparaison aux données publiées ailleurs, ex. Ladefoged et Wu, 1984. Cette différence de taille peut être appréciée dans la **Figure 27**, section I-3. Elle serait davantage comparable à celle de certains locuteurs de français et d'anglais (Fr2, E3). Ceci n'est peut-être pas une coïncidence, car le polonais ne possède pas de fricative vélaire, comme c'est également le cas pour le français et l'anglais. L'espace postérieur serait donc disponible pour la sibilante non antérieure, sans qu'il y ait de risque de confusion avec une fricative non sibilante proche³².

Le lieu d'articulation plus postérieur de /ʃ/ est obtenu, chez ces deux locuteurs de polonais, surtout par la rétraction de la langue avec le soulèvement de la

³² Dont, théoriquement (en extrapolant d'après Shadle, 1985), la fréquence des résonances serait proche mais la source moins intense.

I. Description articulaire des fricatives sibilantes

langue (**Figure 19** c et f) tel une rétroflexe cacuminale [ʂ], alors qu'en chinois, le dos de la langue est plutôt bombé (**Figure 20** c ; moins que pour /ç/, en **Figure 20** b, toutefois), tel un [ʃ]. Qu'il s'agisse d'une conséquence du lieu de constriction, ou que ce soit intentionnel, le fait est qu'on observe un rétrécissement pharyngal dans le /ʂ/ polonais par rapport au /s/ (comparer **Figure 17** a et g), alors qu'il n'existe pas de différence aussi nette entre /s/ et /ʂ/ chez nos locuteurs de chinois (cf. données IRM en Annexe III). Ladefoged et Wu (1984 : p. 271) remarquent toutefois que la racine de la langue est plus avancée pour /ʂ/ que pour /s/. Ces observations sont consistantes avec une cavité orale antérieure plus grande en polonais qu'en chinois.

Discussion : les caractéristiques articulaires robustes

Les données articulatoires brutes (qui viennent d'être présentées pour quelques locuteurs, les autres observations se trouvant en Annexe III) illustrent la grande variation inter-individuelle présente dans toutes les langues. Les profils sagittaux des locuteurs sont présentés en **Figure 21**.

I. Description articatoire des fricatives sibilantes

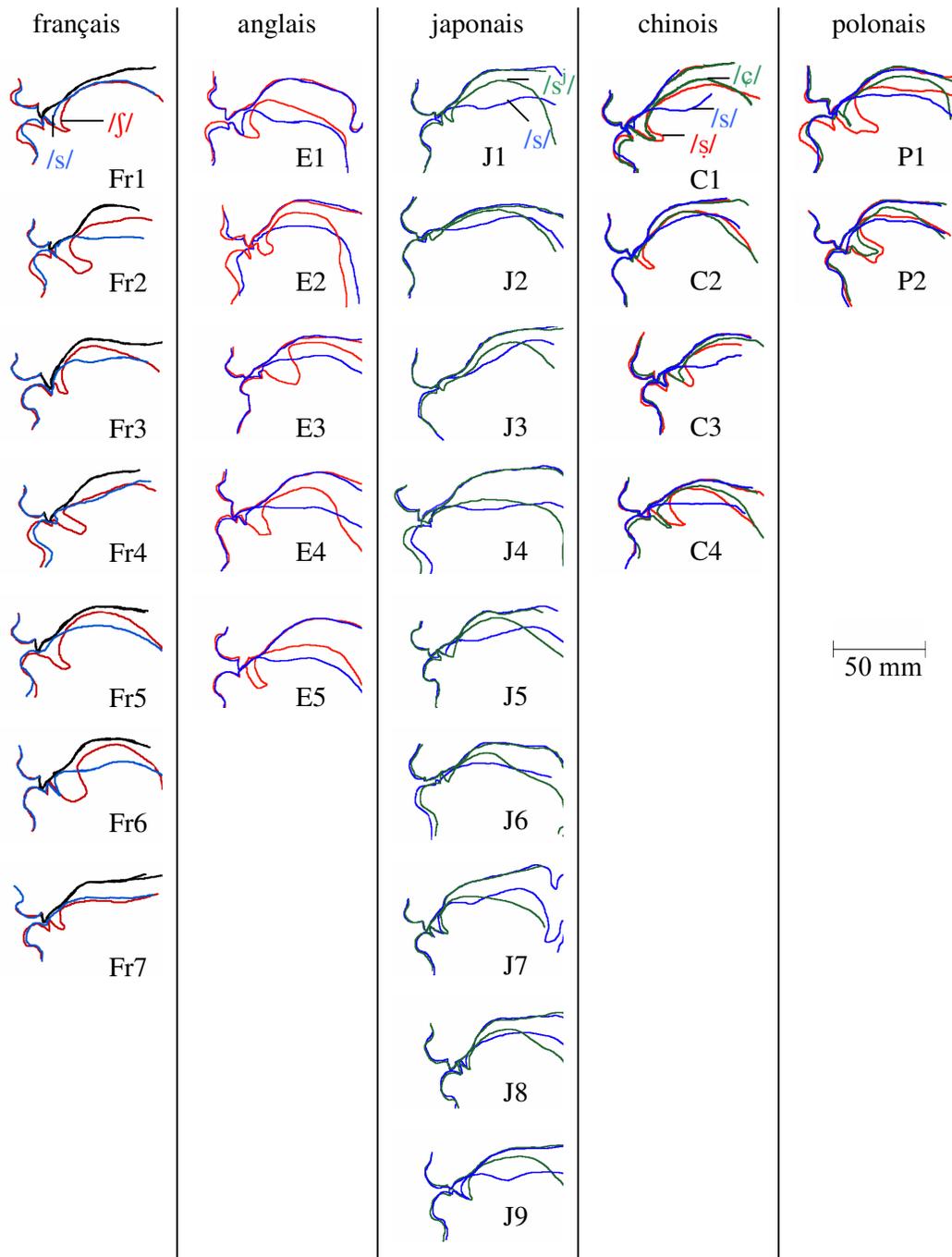


Figure 21. Profils sagittaux superposés, 27 locuteurs monolingues. Les /s/ sont représentés en bleu, les sibilantes [+ distribué] en vert, et les autres sibilantes [-antérieur] en rouge.

D'après la **Figure 21**, il serait difficile de relever des caractéristiques communes à *tous* les locuteurs d'une même langue. Toutefois, certaines caractéristiques articatoires sont

I. Description articuloire des fricatives sibilantes

relativement robustes. Ces caractéristiques robustes sont récapitulées dans le Tableau 9. Nous pensons que cette étude articuloire peut apporter quelques réponses également dans le domaine de la phonologie. En effet, lorsqu'on souhaite décrire des oppositions phonémiques à l'aide de traits distinctifs, le choix de ceux-ci (c'est-à-dire l'étiquette) a généralement recours aux manifestations phonétiques (en majorité articuloires). Or, dans certains cas, plusieurs traits peuvent prétendre au statut de trait distinctif, typiquement lorsqu'il existe deux traits binaires disponibles ($2 \times 2 = 4$) pour décrire un contraste entre trois sons (ex. [antérieur] et [distribué] pour /ç/ en chinois et en polonais), et le choix parmi les différentes possibilités demande à être justifié. A l'aide des observations que nous avons effectuées, nous proposons un ensemble de traits (dont les traits distinctifs) pour les phonèmes de chaque langue.

Tableau 9. Description articuloire qualitative des sibilantes sourdes dans différentes langues, les moyens articuloires mis en œuvre dans la réalisation de l'opposition phonémique, et une proposition de description en traits.

langue	sibilante	Caractéristique articuloire retrouvée chez la plupart des locuteurs	Différences articuloires associées à l'opposition phonémique	Traits ³³ de « lieu » (distinctifs en gras), en plus de : [CORONAL]
français	/s/	position antérieure de la langue avec contact avec les incisives inférieures	position antéro-postérieure de la langue, avec une cavité orale antérieure de plus grande taille dans /ʃ/. Protrusion labiale pour /ʃ/ chez la moitié des sujets.	[+antérieur]
	/ʃ/	position non antérieure de la langue donnant lieu à une cavité orale antérieure. La moitié des sujets présentent une protrusion labiale		[-antérieur]
anglais	/s/	Similaire au français.	Similaire au français.	[+strident, +antérieur]
	/ʃ/	Similaire au français.		[-antérieur ³⁴]

³³ D'après la tradition de Chomsky et Halle (1968). Dans la lignée de la théorie de la sous-spécification (Steriade, 1987), nous omettons de mentionner les traits non-distinctifs.

³⁴ Le trait [+ strident] n'est distinctif que pour /s/ - /θ/.

I. Description articuloire des fricatives sibilantes

japonais	/s/	Position antérieure avec contact incisives inférieures, langue plutôt concave et articulation apicale	forme de la langue, avec palatalisation dans /s ^j /, ayant comme conséquence de donner lieu à une cavité orale antérieure légèrement plus grande pour /s ^j /.	[-distribué]
	/s ^j /	Position antérieure avec contact incisives inférieures chez la majorité des locuteurs, langue bombée et palatalisation.		[+distribué ³⁵]
chinois	/s/	Articulation antérieure, plutôt apicale.	Position antéro-postérieure de la langue et forme de la langue (palatalisation ou non). La protrusion labiale n'est généralement pas utilisée.	[+antérieur, -distribué]
	/ç/	Articulation intermédiaire, avec contact incisives chez un seul sujet (sur 4). Dos bombé et constriction longue et étroite		[+distribué]
	/s̺/	Articulation non antérieure avec cavité orale antérieure de taille moyenne.		[-antérieur, -distribué]
polonais	/s/	Articulation antérieure, pas nécessairement apicale.	Position antéro-postérieure de la langue et forme de la langue (palatalisation	[+antérieur]

³⁵ Le trait [+ antérieur] n'est pas nécessaire pour décrire l'opposition de /s^j/ avec la fricatives palatale /ç/, du moment qu'on considère que le trait [coronal] est distinctif. Toutefois, du point de vue phonétique, il est possible que l'articulation de la sibilante alvéolo-palatale du japonais soit plus antérieure que les sons proches tels que les phonèmes /ç/ en chinois et en polonais, afin de garantir un contraste optimal avec la fricative palatale. La frontière perceptive entre /s^j/ et /ç/ en japonais ne semble d'ailleurs pas très étanche, car il existe une confusion (convergence) de ces deux sons dans certains dialectes, comme ceux de Tokyo-shitamachi ou d'Aomori.

I. Description articuloire des fricatives sibilantes

	/ç/	Dos de la langue bombée, palatalisation. Position antéro-postérieure moyenne (aucun des deux locuteur ne présente de contact avec les incisives inférieures). Protrusion labiale intermédiaire chez l'un des deux locuteurs.	ou non).	[-antérieur, +distribué]
	/ʃ/	Articulation très postérieure, plutôt apicale. Protrusion labiale maximale chez un des deux locuteurs		[-antérieur, -distribué]

Dans ce tableau, nous n'avons pas mentionné la configuration pharyngale, qui n'était pas clairement visible pour tous les sujets, et qui, de plus, semblait présenter des variations individuelles importantes.

Nous proposons des ensembles différents de traits distinctifs pour le chinois et le polonais, pour des critères purement articuloires. Nous observons une forte tendance apicale (à l'opposée de la palatalisation) du /s/ chinois, en opposition avec le /s/ plutôt laminal du polonais (bien que nous n'ayons à notre disposition que les données de 2 locuteurs). Par conséquent, nous avons choisi d'attribuer le trait [-distribué] au /s/ chinois, mais pas au polonais, où ce trait reste sous-spécifié. En polonais, c'est le trait [+/- antérieur] qui permet de décrire le contraste entre /s/, d'une part, et /ç/ et /ʃ/, d'autre part. De même, la position de la langue pour /ç/ est nettement postérieure en polonais, contrairement au phonème portant la même étiquette en chinois. Nous avons donc attribué le trait [-antérieur] au /ç/ polonais, mais pas au /ç/ chinois. En chinois, c'est le trait [+/- distribué] qui permet d'isoler /ç/ de /s/ et /ʃ/.

I-2 : DEUX TYPES ARTICULATOIRES DE POST-ALVÉOLAIRES

Nous avons discuté des tendances articuloires générales associées aux contrastes des sibilantes dans la section précédente. Or, la variation inter-individuelle de l'articulation est frappante dans ces données. Cette variation ne semble toutefois pas si anarchique. En deçà du niveau phonémique, les réalisations articuloires semblent en effet pouvoir être subdivisées en quelques types, deux précisément, en ce qui concerne le /ʃ/ français. Ces deux types d'articulation seront comparées aux deux post-alvéolaires du polonais.

L'observation des profils sagittaux superposés des 7 locuteurs de français (**Figure 22**) nous a amené à séparer ces derniers en deux groupes, les locuteurs qui contrastent /ʃ/ de /s/ par le bombement du dos de la langue (donnant lieu à un chenal palatal) et ceux qui ont recours à une position plus postérieure de la langue sans visiblement la déformer. Ces deux stratégies articuloires ont été présentées aux XXIVèmes Journées d'études sur la parole (Toda, 2006) sous le terme de stratégies de « déformation » et de « recul » de la langue.

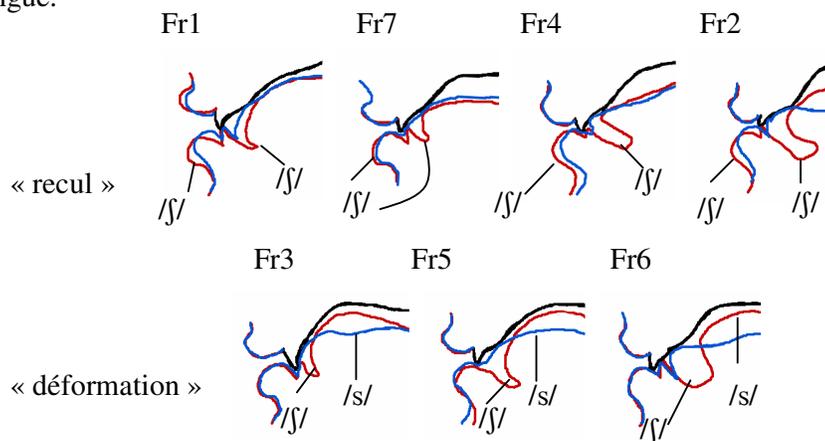


Figure 22. Contour médio-sagittal du conduit vocal des locuteurs du français. Les quatre locuteurs du haut présentent un recul de la langue de /ʃ/ par rapport à /s/. Les trois locuteurs du bas présentent une articulation palatalisée du /ʃ/ par rapport au /s/ avec un bombement du dos de la langue.

En plus de l'aspect de la langue, les deux groupes semblent également se distinguer par le comportement labial. Ici, la protrusion labiale du /ʃ/ est définie par l'avancée effective des lèvres – qu'elle fasse appel à l'avancement de la mandibule ou à la protrusion proprement dite des lèvres – en référence à /s/. Il est frappant de constater, en dépit du fait que le /ʃ/ français soit admis comme étant protrus, aucun des locuteurs de la stratégie « déformation » (les trois du bas) ne présentent de protrusion labiale pour /ʃ/.

Dans la mesure où on considère (par simplification) que l'onde acoustique se propage de manière unidirectionnelle et longitudinale au conduit vocal, ce qui détermine les

I. Description articuloire des fricatives sibilantes

caractéristiques acoustiques du conduit vocal est surtout la longueur des cavités et le rapport d'aire entre deux cavités contiguës, et non la forme précise de ces cavités. La fonction d'aire, qui traduit l'aire de la section du conduit vocal en fonction de la distance par rapport à un point de référence (ici, le point le plus étroit de constriction formée par la langue) est donc une bonne façon de simplifier la représentation du conduit vocal afin d'effectuer des comparaisons entre catégories phonétiques ou entre sujets.

Pour obtenir les fonctions d'aire, l'aire du conduit vocal a été mesurée tous les millimètres à partir des lèvres jusqu'à la région vélaire (régions clairement visibles) sur des coupes coronales perpendiculaires aux images sagittales d'origine³⁶. Il s'agit d'une représentation bidimensionnelle du conduit vocal tridimensionnel.

Dans ce chapitre, nous présentons les fonctions d'aire pour le groupe de locuteurs de français, que nous avons trouvé intéressant, car parmi les locuteurs, dont le nombre est relativement important, nous avons observé deux approches différentes pour la réalisation du /ʃ/ que nous interprétons comme des stratégies alternatives dans cette langue (et non pas comme des *déviations* individuelles). L'équivalence de ces deux stratégies du point de vue acoustique sera discutée dans les chapitres II et III-2. Nous présentons également, à titre comparatif, les fonctions d'aire des deux locuteurs polonais. Toutes les fonctions d'aire individuelles sont fournies en Annexe III (y compris les autres langues).

Résultats

Français

La Figure 23 présente la fonction d'aire du conduit vocal de ces deux groupes pour les deux sibilantes /s/ et /ʃ/. Le locuteur Fr1, qui présente une articulation inhabituellement palatalisée aussi bien pour /s/ que pour /ʃ/, figure en ligne grisée.

³⁶ Cette méthode d'estimation de la fonction d'aire est une première approximation basée sur l'observation selon laquelle le conduit vocal est globalement horizontal dans la région orale antérieure. La longueur des cavités, en référence à l'onde acoustique plane théorique, peut donc être sous-estimée dans les régions où les coupes coronales ne sont pas tout à fait perpendiculaire à celle-ci. Ainsi, la longueur de la cavité antérieure et son prolongement sublingual risquent d'être légèrement sous-estimés. De plus, la cavité labiale n'a pas toujours pu être mesurée sur la totalité de sa longueur, du fait de sa courbure et l'absence de frontières latérales vers son extrémité. La longueur de cette cavité peut donc être sous-estimée de façon importante. Ce point sera abordé dans la section III-4.

I. Description articatoire des fricatives sibilantes

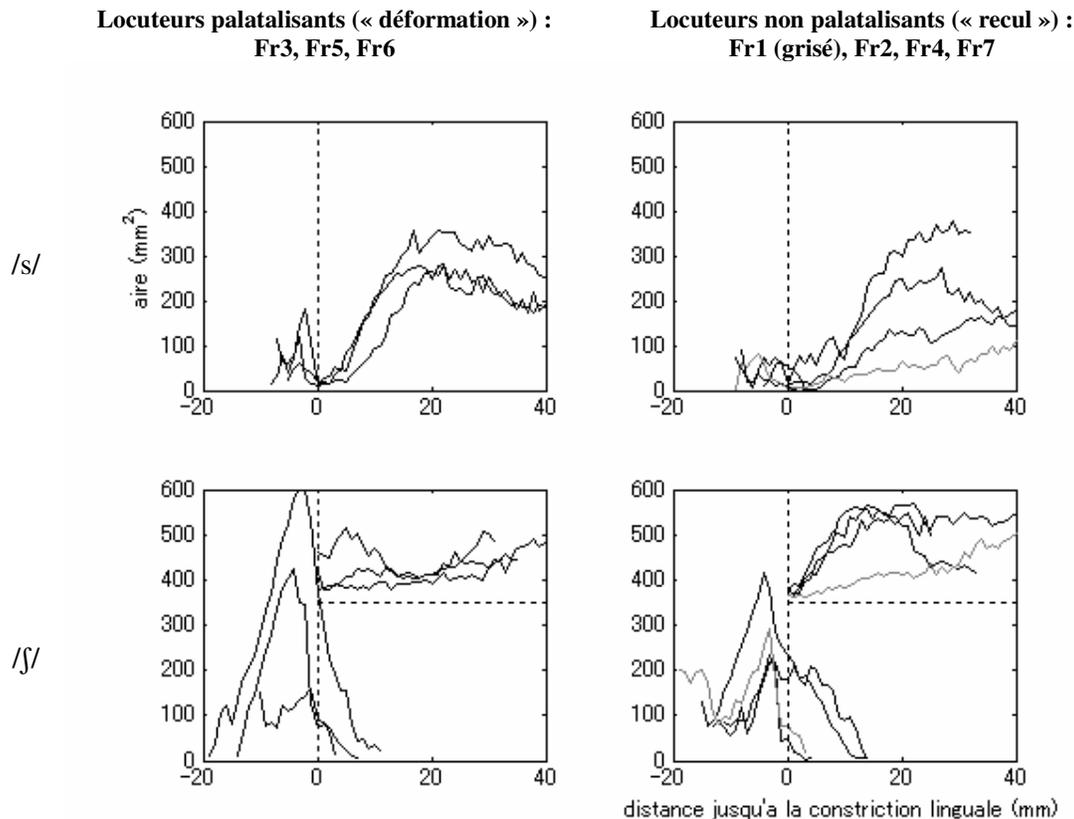


Figure 23. Fonction d'aire de /s/ et /ʃ/ pour deux groupes locuteurs du français classés en fonction de la manière dont ils réalisent le contraste entre /s/ et /ʃ/. Toutes les courbes sont alignées au point de constriction linguale maximale (0 mm ; les lèvres se situent à gauche). Pour /ʃ/, la partie postérieure à la constriction est décalée vers le haut pour améliorer la visibilité. Sa ligne de base se situe à 350 mm². La partie de la cavité antérieure qui dépasse en arrière du point de constriction maximal correspond à la cavité sublinguale.

En comparant les fonctions d'aire pour /ʃ/ à celles de /s/ à l'intérieur du groupe « déformation » (**Figure 23**, gauche), la palatalisation, qui se traduit par la création d'un chenal palatal étroit (autour de 50 mm²) et relativement long (au moins 30 mm) est évidente. Dans le groupe « recul », le degré de palatalisation est variable selon le locuteur, aussi bien pour /ʃ/ que pour /s/, mais la constriction s'élargit de manière abrupte dans les premiers 10 mm en arrière du point de constriction surtout pour /ʃ/ (excepté le locuteur Fr1).

Polonais

Comme nous l'avons mentionné plus haut, le polonais possède deux fricatives sibilantes post-alvéolaires. Ces deux phonèmes peuvent être comparés, en termes de fonction d'aire,

I. Description articuloire des fricatives sibilantes

aux deux variantes du /ʃ/ français.

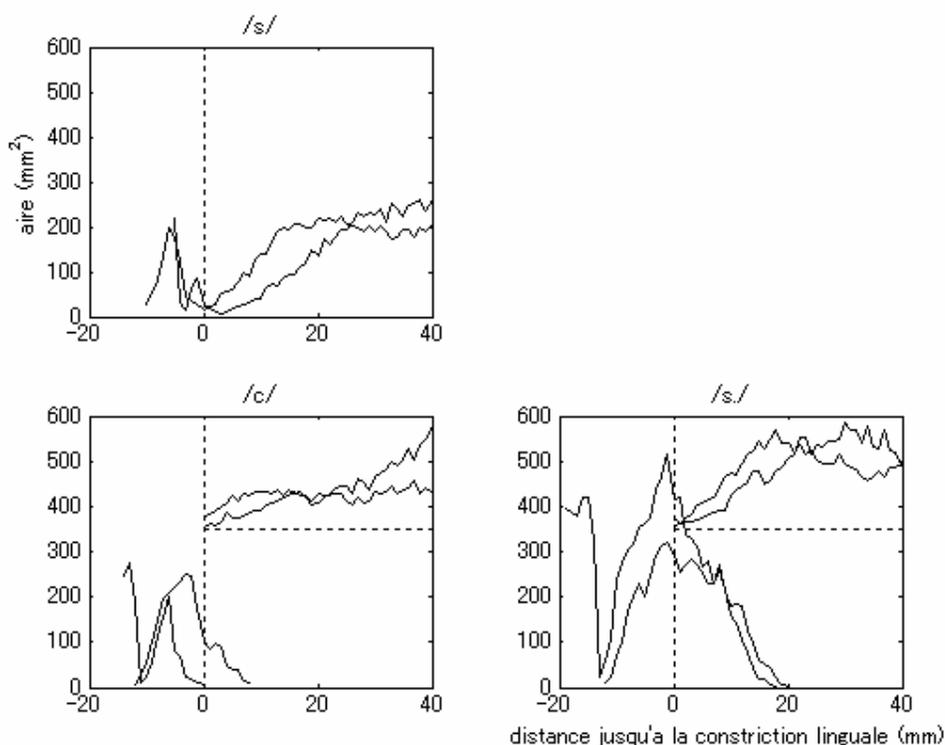


Figure 24. Fonction d'aire des sibilantes polonaises /s/, /ç/ (« c ») et /ʃ/ (« s. ») pour deux locuteurs. Ces fonctions d'aire peuvent paraître différentes des contours médio-sagittaux (Figure 25), car elles tiennent compte de l'aire du conduit vocal 3D.

La **Figure 24** présente la fonction d'aire de /s/, /ç/ et /ʃ/ pour les locuteurs P1 et P2. Le contraste entre les deux sibilantes post-alvéolaires /ç/ et /ʃ/ se manifeste dans (1) la taille de la cavité antérieure, plus grande pour /ʃ/ ; et (2) l'aspect du conduit vocal en arrière de la constriction. Le /ç/ polonais présente une constriction étroite (autour de 50 mm²) et longue (au moins 30 mm), alors que celle-ci s'élargit dans les premiers 20 mm en arrière de la constriction linguale pour le /ʃ/, comme le /s/. Les deux sibilantes non-antérieures du polonais présentent des similitudes avec les deux types de /ʃ/ français quant à la présence (/ç/_{pl} et /ʃ/_{fr} « déformation ») / absence (/ʃ/_{pl} et /ʃ/_{fr} « recul ») de ce chenal palatal. Toutefois, s'il existe des grandes et des petites cavités orales antérieures en français, contrairement au polonais, elles ne sont pas associées de manière systématique aux deux types de stratégie. Il s'agit plutôt d'une variation inter-individuelle. On peut donc conclure que le contrôle articuloire des sibilantes post-alvéolaires en polonais est plus élaboré (plus fin) qu'en français.

I. Description articulaire des fricatives sibilantes

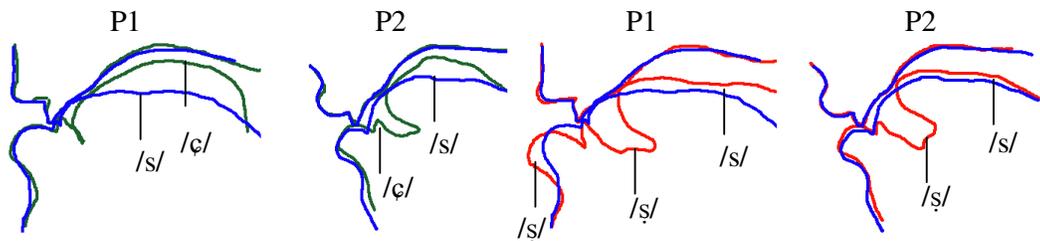


Figure 25. Contour médio-sagittal des sibilantes /ç/ (gauche) et /ʃ/ (droite) superposées avec celui de /s/, locuteurs P1 et P2.

D'après les contours sagittaux présentés en **Figure 25**, en prenant /s/ comme référence, si le locuteur P1 semble plutôt bomber la langue pour /ç/ et reculer la langue pour /ʃ/, le locuteur P2 semble avoir recours aux deux contrôles articulatoires à la fois aussi bien pour /ç/ que pour /ʃ/. En effet, chez ce locuteur, /s/ se situe à mi-chemin entre /ç/ et /ʃ/ quant au degré de bombement du dos de la langue, tandis que la position de la langue (l'apex) recule graduellement de /s/ à /ç/, et à /ʃ/.

Discussion

Nous sommes amenée à considérer les deux stratégies articulatoires quant à la réalisation du contraste /s/ - /ʃ/ en français observée parmi les 7 locuteurs qui ont participé à notre étude en tant qu'*options* articulatoires. En effet, les locuteurs se partagent en deux moitiés entre ces deux stratégies, et par conséquent il nous semble difficile de considérer cette variation comme des déviations³⁷, qu'il s'agisse de l'une ou l'autre des stratégies. De plus, ces deux stratégies peuvent être définies par plusieurs critères articulatoires (forme/position de la langue ; présence ou absence de protrusion labiale effective) et morphologique (présence/absence d'un chenal palatal) précis. Notre étape suivante consistera donc à déterminer si cette équivalence articulatoire a des répercussions sur le plan acoustique, en examinant les productions de ces locuteurs dans le chapitre II et par une modélisation acoustique où des paramètres morphologiques appropriés seront modifiés de manière systématique dans le chapitre III (III-2 et III-3).

Il est intéressant de noter que les deux variantes *optionnelles* du /ʃ/ français peuvent aussi se spécialiser de telle sorte qu'un contraste phonémique puisse s'établir entre elles. Cette spécification articulatoire, d'après nos données polonaises, consisterait en l'ajustement de la taille de la cavité antérieure, qui fait appel, en particulier, à la protrusion labiale et/ou à la présence d'une cavité sublinguale. En polonais, nous avons observé que le locuteur

³⁷ Il n'est pas possible de penser qu'il s'agit de particularités régionales, non plus (cf. Introduction, note15).

I. Description articulaire des fricatives sibilantes

P2 effectuait un contrôle articulaire plus fin (en combinant déformation et recul de la langue dans différentes proportions) afin d'atteindre ses cibles articulaires. Ce comportement pourrait découler de la nécessité de contrôler à la fois la taille de la cavité antérieure et le degré de palatalisation.

I-3 : DISPERSION DES SIBILANTES DANS L'ESPACE ARTICULATOIRE (analyse quantitative)

Afin de fournir une vision plus synthétique de l'articulation, qui permette de comparer les langues relevant de différents systèmes phonologiques, nous avons eu recours à des mesures liées à la position et la forme de la langue. Ces mesures, basées sur le seul profil médio-sagittal (et non sur les données tridimensionnelles telles que la fonction d'aire), ont fait l'objet d'une communication dans un colloque (Toda et Honda, 2003).

La **Figure 26** illustre l'aire de la cavité orale antérieure sur le plan médio-sagittal (Figure 26 a) et l'indice de proximité du dos de la langue avec le palais (Figure 26 b ; que nous appellerons « indice de palatalisation » pour simplifier). Cette dernière mesure a été conçue dans l'espoir de nous abstraire de la spécificité individuelle de la courbure de la langue qui est liée à celle du palais. Il s'agit de la distance moyenne de la langue avec le palais en arrière de la constriction sur une portion définie par des points de repère anatomiques. Plus le dos de la langue est élevé vers le palais, plus l'indice de palatalisation est petit. Ces deux mesures ont été conçues de façon à être liées, respectivement, à la position antéro-postérieure de la langue et à la forme de la langue (plate ou bombée) sur le plan sagittal. D'autres mesures ont également été explorées (les résultats sont similaires) et sont décrites en annexe IV.

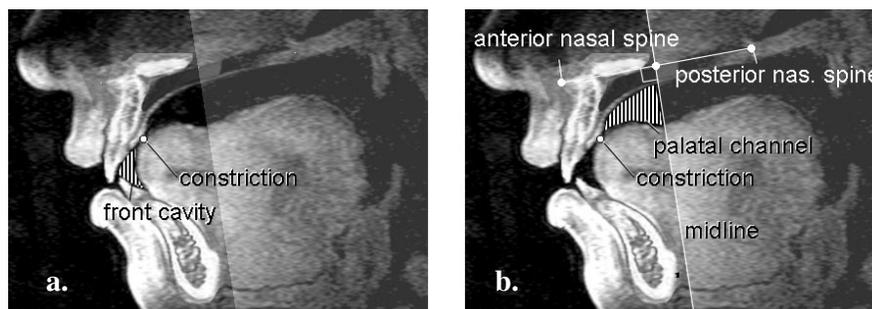


Figure 26. (a) Aire de la cavité orale antérieure sur le plan sagittal, CAa ; et (b) indice de (non-) palatalisation, ou de proximité du dos de la langue avec le palais, PALi (cette abréviation est utilisée dans l'étude statistique contenue dans l'annexe IV ; figures d'après Toda et Honda, 2003). L'aire de la cavité orale antérieure, CAa, est mesurée sur le profil médio-sagittal. L'indice de palatalisation est obtenu en divisant l'aire comprise entre la langue et le palais en arrière de la constriction et jusqu'à la médiane perpendiculaire au segment qui relie l'épine nasale antérieure et postérieure (partie hachurée en b.) par la distance entre le point de constriction maximal et cette médiane.

La **Figure 27** présente les résultats de ces mesures en fonction des langues, classées par type de système phonologique. Le japonais oppose /s/ et /sʲ/ par l'absence/présence de palatalisation ; le français et l'anglais opposent /s/ et /ʃ/ par le lieu d'articulation ; le chinois, le suédois et le polonais possèdent chacune trois sibilantes dont les contrastes font appel à la fois au lieu d'articulation et à la forme de la langue.

Résultats

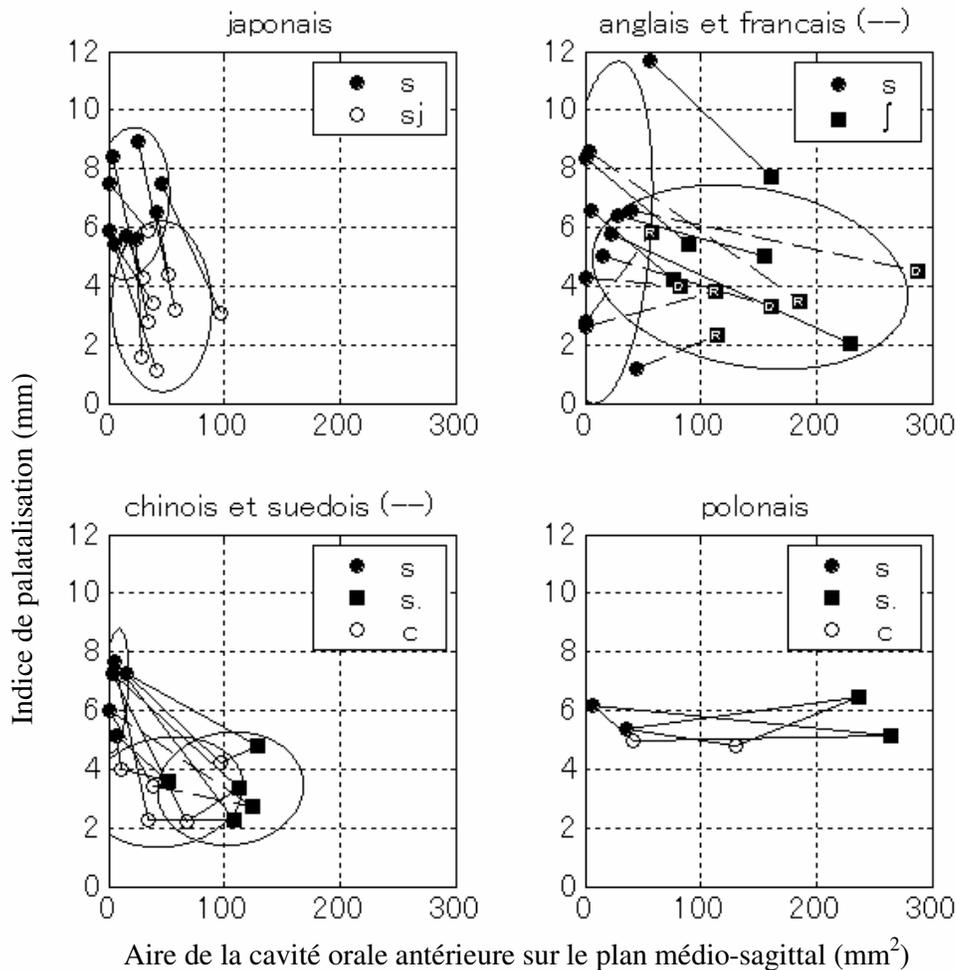


Figure 27. Dispersion des sibilantes dans l'espace articuloire défini par l'aire de la cavité orale antérieure sur le plan médio-sagittal et l'indice de palatalisation (voir texte) en fonction du système phonologique des langues. Les ellipses correspondent à ± 2 écarts types. En français, les /ʃ/ de la stratégie « recul » sont marqués par la lettre « R » et ceux de la stratégie « déformation » par la lettre « D ».

D'après la Figure 27, le japonais et le groupe chinois/suédois présentent une distribution du /s/ et du /s^j/ - ç/ assez similaire. Toutefois, le /s/ en chinois/suédois semble se restreindre à une aire de la cavité orale antérieure plus petite qu'en japonais. Le /s/ en chinois/suédois se différencie donc du /ç/ par les deux variables articuloires à la fois, alors qu'il se différencie de /s^j/ en japonais surtout par le degré de palatalisation. Malgré leur similitude (v. description qualitative, Annexe III), deux phonèmes représentés par le même symbole

I. Description articuloire des fricatives sibilantes

/s/ peuvent donc avoir des dispersions qualitativement différentes en fonction du système phonologique (ici, il s'agit de l'existence/absence d'un contraste +/- antérieur).

Le /ʃ - ʂ/ en chinois/suédois présente globalement le même degré de palatalisation que /ç/ (d'après cette méthode) mais tend à être plus postérieur, bien que les deux distributions tendent à se superposer. Cela n'est pas tout à fait en accord avec l'observation qualitative (Annexe III), où un bombement plus important de la langue avait été observé pour /ç/. Il peut donc être suggéré que l'indice de palatalisation est sensible au lieu d'articulation (et n'est pas une variable indépendante).

La distribution du groupe français/anglais est très différente de celle du japonais et du groupe chinois/suédois en ce que le degré de palatalisation semble complètement aléatoire (non pertinent). Il existe une relation systématique entre les sibilantes /s/ et /ʃ/ uniquement au regard de l'aire de la cavité orale antérieure. Toutefois, cette aire reste extrêmement variable selon les locuteurs (et cette variation ne semble pas être liée à la langue).

Quant au polonais, l'aire de la cavité orale antérieure semble être la seule mesure qui permette de distinguer les trois sibilantes entre elles. Pourtant, les profils sagittaux indiquent une palatalisation nettement plus marquée pour /ç/ par rapport aux deux autres sibilantes sourdes. Il est possible que l'indice de palatalisation ne permette pas de bien traduire le degré de palatalisation pour les consonnes dont le lieu de constriction est très postérieur, comme /ʃ/. Le faible nombre de locuteurs limite par ailleurs nos possibilités de généralisation sur cette langue ou ce type de système phonologique.

Discussion

La dispersion des sibilantes dans l'espace articuloire défini par l'aire de la cavité orale antérieure sur le plan sagittal et l'indice de palatalisation suggère que le type de système phonologique, et non pas la taille de l'inventaire des sibilantes, détermine la réalisation articuloire des phonèmes. En effet, le japonais et le groupe français/anglais possède le même nombre de sibilantes sourdes, mais l'espace articuloire occupé par les sibilantes est nettement plus réduit en japonais. Cela peut s'interpréter comme résultant de la nécessité de maintenir une proximité phonétique entre /s/ et /sʲ/ en japonais afin de préserver une symétrie dans le système consonantique (rappelons le parallèle avec les paires /k/ - /kʲ/, /n/ - /nʲ/, etc.). Il est également possible que l'espace postérieur soit réservé à /ç/³⁸, qui n'est autre que la version palatalisée de la fricative glottale, /hʲ/, réalisée en tant que fricative palatale. L'espace articuloire occupé dans la dimension de la taille de la cavité antérieure est également plus réduit pour le groupe chinois/suédois en comparaison au polonais, qui possèdent des sibilantes apparemment similaires. De fait,

³⁸ Il ne s'agit pas d'une sibilante, mais le contraste avec la sibilante /sʲ/ peut s'exprimer en termes de fréquence des pics en plus d'une différence possible d'intensité du bruit de friction. Des exemples de la fricative palatale en allemand sont présentés en III-5.

I. Description articuloire des fricatives sibilantes

parmi celles-ci, le polonais est la seule langue « à deux traits distinctifs » qui ne possède pas de fricative vélaire³⁹. Bien que la fricative vélaire du chinois ne soit pas une sibilante⁴⁰, seule la partie « antérieure » de l'espace articuloire est occupée par les sibilantes en chinois, vraisemblablement pour garantir un contraste suffisant entre la sibilante postérieure et la fricative vélaire /x/⁴¹. Le locuteur suédois présente le même type de dispersion que le chinois, et la même interprétation convient pour expliquer ce phénomène (le suédois possède une fricative « à double articulation » palato-alvéolaire et vélaire, /ɧ/ ; v. Annexe III).

Variation inter-individuelle

Les résultats montrent qu'il existe dans toutes les langues une variation individuelle de l'articulation (I-2 et 3). A quoi cette variation est-elle due ? Des études approfondies sont nécessaires, en particulier dans le domaine aéro-acoustique, pour mettre en évidence le rôle de chacun parmi les facteurs possibles :

- Variation individuelle de la cible (acoustique), au niveau cognitif ;
- Variation d'occurrence à occurrence due au hasard (une seule prise IRM a été analysée) ;
- Artéfacts de mesure dus à des différences morphologiques, qui n'ont pas d'incidence sur les propriétés fonctionnelles (ex. résonances de mêmes fréquences) ;
- Différentes stratégies articuloires.

En français, deux stratégies articuloires ont été considérées comme des alternatives articuloires, sans que les facteurs les conditionnant aient pu être identifiés. Au moins deux facteurs possibles peuvent être suggérés :

- Pour une raison de morphologie individuelle, l'une des deux stratégies est plus « économique » en termes de coût articuloire que l'autre ;
- Pour une raison de morphologie individuelle, l'une des deux stratégies permet d'atteindre une meilleure cible acoustique.

Si, sur le plan acoustique, les deux stratégies permettent des compensations inter-articulateurs, il est possible que l'une des deux stratégies soit préférable du point de vue aérodynamique pour la génération de la source de bruit, selon la morphologie particulière des locuteurs.

³⁹ Le polonais possède toutefois une fricative glottale /h/ (« h » et « ch »).

⁴⁰ Le statut de la fricative vélaire /ɧ/ du suédois est incertain, car bien qu'elle présente, au moins chez notre locuteur, un rapprochement des incisives (voir . Annexe III), l'intensité du bruit de friction est moindre que les sibilantes /s/, /ç/ et /ʃ/.

⁴¹ Il s'agit d'une fricative non-stridente, autrement dit son bruit de friction serait moins intense que les sibilantes. Toutefois, la différence d'intensité n'est pas nécessairement un indice suffisant pour permettre un contraste optimum. Nous donnons le spectre de fricatives non-antérieures non-sibilantes de l'allemand dans la section III-5.

I. Description articuloire des fricatives sibilantes

Par exemple, lorsque la distance est plus courte entre le lieu où jaillit le flux d'air et l'obstacle, la source de bruit est plus intense (Pastel, 1987). De même, lorsque la constriction est longue, le flux d'air tend à demeurer laminaire sur une plus longue distance en sortant de la constriction, ce qui aboutit au même effet qu'une distance courte. Le bombement de la langue et la création d'un chenal palatal pourraient donc avoir des visées à la fois acoustiques et aéro-acoustiques. Par ailleurs, une source dipôle doit être orientée dans le sens longitudinal du mode de résonance d'une cavité pour être efficace. Il est donc prévisible qu'en fonction de l'angle du palais et de la dentition du locuteur, la position et la forme optimales de la constriction seront différentes. Le lieu et la forme de la constriction peuvent également dépendre de la présence des rugosités sur le palais. En effet, une surface irrégulière produit des turbulences, donc du bruit, et les locuteurs pourraient rechercher cet effet en positionnant adéquatement leur langue. Un décalage de la constriction par rapport au plan médio-sagittal ou une asymétrie de l'occlusion peuvent également contribuer à l'obtention d'une meilleure source.

L'existence d'une variation inter-individuelle importante en français et en anglais dans le domaine palatal/non-palatal, ou dans le domaine antérieur/non-antérieur en japonais, en comparaison au groupe chinois/suédois, peut conforter le concept de sous-spécification (cf. Steriade, 1995), au niveau phonétique. Nos résultats dissuadent, en effet, l'utilisation de traits non distinctifs dans la description des phonèmes d'une langue donnée. Si les inventaires phonologiques sont construits sur le principe de l'utilisation maximale des traits disponibles (MUAF - Maximal Use of Available Features, Ohala, 1979), ou de l'économie des traits (Clements, 2003), qui est une autre formulation des mêmes idées⁴², la réalisation des phonèmes au niveau individuel semble obéir à d'autres principes encore peu élucidés.

⁴² Remarquons que ces principes ne peuvent pas être vérifiés sur la base de descriptions phonologiques – une description phonologique économique (du reste, c'est ce qu'elle doit être) mènera à la conclusion que les langues sont économiques. L'étude des inventaires permet de constater qu'il existe bel et bien une économie sur le plan conceptuel ou cognitif (contrastes).

I-4 : TAILLE DES CONSTRICTIONS (analyse quantitative)

Nous avons mentionné dans l'introduction générale que les sibilantes se caractérisaient par une position élevée de la mâchoire (Lee *et al.*, 1994 ; Mooshammer *et al.*, 2007), permettant aux incisives de remplir le rôle d'obstacle au flux d'air provenant de la constriction linguale, primordial dans la création de la source de bruit strident (cf. Shadle 1985).

Dans cette étude, nous avons inséré les moulages dentaires numériques dans les données articuloires avec précision. Nous sommes donc à même de mesurer la taille approximative de la constriction dentale en plus de la constriction linguale. Des études antérieures ont montré que la largeur de la constriction linguale différait entre les sibilantes alvéolaires et palato-alvéolaires (ex. Fletcher, 1989 : p.745, Fletcher et Newman, 1991 : p.854). Une différence de profondeur du sillon de la langue a également été observée (Stone, 1992 : p.259-260), avec un sillon plus profond pour /ʃ/ dans la partie postérieure de la langue, et plus profond pour /s/ dans la partie antérieure de la langue. Si des estimations de l'aire de la constriction ont été faites (Hixon, 1966 ; Scully, 1979), nous ne connaissons pas d'étude où l'aire de la constriction linguale est mesurée de manière directe. Les mesures des constriction dentale et linguale ont été effectuées sur les fonctions d'aire (présentées sujet par sujet dans l'Annexe III).

Il est possible que l'aire de constriction ne soit pas identique selon le mode de production parole continue/ fricatives tenues. Toutefois, nous considérons que nos mesures peuvent servir de référence dans le domaine aéro-acoustique étant donné que les locuteurs produisaient effectivement les sibilantes pendant au moins une bonne partie de la séquence d'acquisition IRM. La **Figure 28** résume ces résultats en fonction des langues et de l'identité des sibilantes.

Résultats

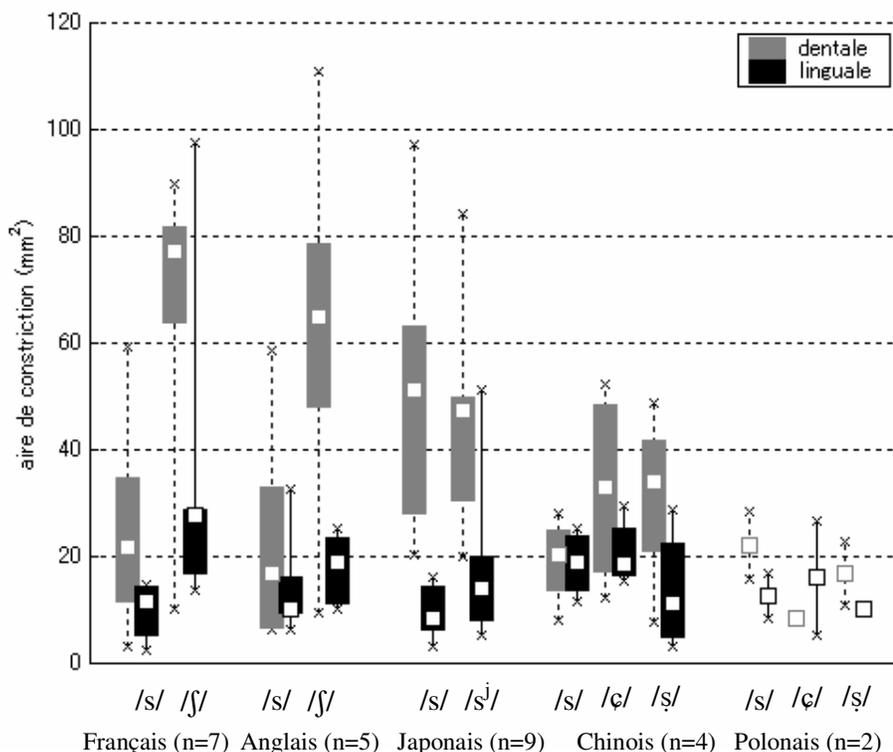


Figure 28. Taille des constriction dentales (rectangles gris et lignes pointillées) et linguale (rectangles noirs et lignes pleines) en fonction des langues et des sibilantes. Les croix indiquent les maxima et minima, les rectangles couvrent du premier au troisième quartiles et les carrés blancs indiquent le mode (ou médiane).

Cette figure nous indique une tendance générale concernant la constriction dentale d'être moins étroite que la constriction linguale. De plus, en français et en anglais, la constriction dentale pour /ʃ/ tend à être plus large que celle de /s/.

Bien que la constriction dentale corresponde au double ou au triple de la constriction linguale, elle reste néanmoins dans le même ordre de grandeur, surtout lorsqu'on tient compte du fait que la cavité orale antérieure atteint généralement entre 200 et 400 mm² pour les post-alvéolaires. De plus, il est possible que la méthode utilisée ait conduit à une surestimation de cette aire. En effet, la morphologie de cette région du conduit vocal est assez complexe, et en particulier, dans la région dentale, les incisives supérieures présentent généralement un *overjet* positif (se trouvent plus en avant par rapport aux incisives inférieures, sur le plan antéro-postérieur ; v. également l'Annexe IV), de telle sorte que le flux d'air chemine du haut vers le bas plutôt que perpendiculairement aux coupes coronales que nous avons utilisées pour mesurer l'aire.

I. Description articuloire des fricatives sibilantes

En japonais, le /s/ présente une constriction dentale assez grande par comparaison aux sibilantes antérieures /s/ dans les autres langues. Contrairement à ce qui avait été observé pour l'anglais (Fletcher et Newman, 1991), il ne semble pas exister de différence nette quant à la taille de la constriction linguale en fonction des sibilantes, à l'exception du français où /ʃ/ présente une constriction linguale plus grande que /s/ (ce qui va dans le même sens que les résultats de Fletcher et Newman, 1991, pour l'anglais, où /ʃ/ présentait une constriction plus large). La taille de la constriction linguale semble en effet dépendre du lieu d'articulation, mais également de la forme de la langue. Nous constatons que les locuteurs de la stratégie « déformation » en français ont tendance à présenter une constriction linguale plus grande pour /ʃ/ que les locuteurs « recul » (**Figure 29**).

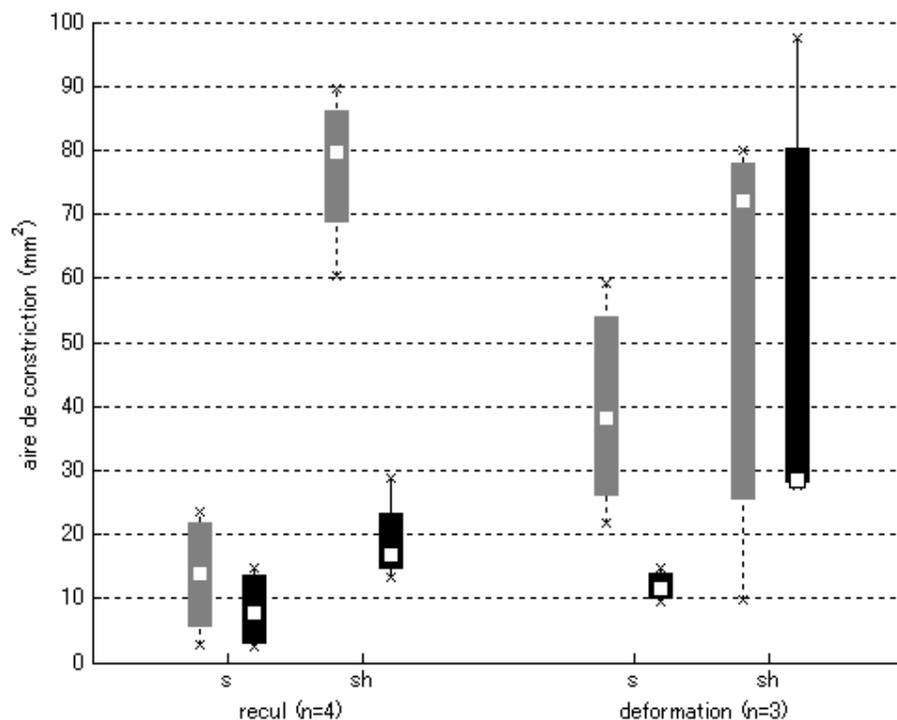


Figure 29. Taille des constrictions dentale (rectangles gris et lignes pointillées) et linguale (rectangles noirs et lignes pleines) en français (/s/ et /ʃ/ 'sh'), locuteurs groupés par type articuloire « recul » (Fr1, Fr2, Fr4, Fr7) et « déformation » (Fr3, Fr5, Fr6) ; cf. I-3.

La Figure 29 illustre la taille des constrictions pour les locuteurs du français triés en fonction de leur stratégie articuloire « recul » ou « déformation ». Bien qu'on ne puisse rien conclure de manière certaine en raison du faible nombre de locuteurs dans chaque groupe, nous constatons que les locuteurs du groupe « déformation » présentent une constriction dentale plus grande pour /s/ et, comme nous l'avons mentionné, une constriction linguale plus grande pour /ʃ/, en référence au groupe « recul ».

Discussion

Les résultats que nous venons de présenter sont nouveaux, car jusque là, la taille de la constriction avait été estimée d'après les données de pression et de débit oral (ex. Hixon, 1966, Scully, 1979), ou expérimentalement, à l'aide de modèles mécaniques (ex. Shadle 1991), mais il n'existait pas d'étude comportant des coupes coronales du conduit vocal au niveau de ces strictionnements précisément. Selon Scully (1979), la taille de la constriction de /s/ (en ne supposant qu'une seule constriction) se situerait entre 0,06 et 0,12 cm² (6 et 12 mm²). Ces valeurs sont proches de celles de Hixon (1966), qui estimait l'aire de la constriction minimale entre 6,67 et 6,94 mm² pour /s/, à trois niveaux d'effort (9 locuteurs). Cette fourchette est proche de l'aire de la constriction linguale que nous avons mesurée pour /s/ en français et en japonais, mais inférieure aux valeurs mesurées dans les /s/ des autres langues. Hixon (1966, p. 177) et Shadle et Scully (1995, p. 58) s'accordent sur une aire de constriction légèrement supérieure pour /ʃ/ (entre 9, 63 et 10,19 mm² pour Hixon, 1966 et environ 12 à 22 mm² pour Shadle et Scully, 1995), ce qui correspond à la tendance observée en français, anglais et japonais (s^j) dans nos données, bien que certains locuteurs présentent des valeurs nettement supérieures (jusqu'à 50 ou 100 mm²). Par ailleurs, Shadle (1991 : p. 42) remarque que dans ses modèles mécaniques de /ʃ/ à « 2,5 dimensions » (fonction d'aire correcte en moyenne mais coupes transversales rectangulaires), la moitié de la chute de pression se produit à la constriction dentale (nous en déduisons que l'autre moitié se produit à la constriction linguale). Les valeurs estimées pour des locuteurs d'anglais par Hixon (1966) et Scully (1979) ou de français par Shadle et Scully (1995) cumuleraient donc vraisemblablement l'effet des strictionnements linguale et dentale en termes de chute de pression.

Les strictionnements linguale et dentale ne seraient toutefois pas complémentaires. En effet, alors que la constriction linguale crée un flux laminaire qui se déverse dans un espace plus large pour donner lieu à des turbulences, la constriction dentale a un rôle important dans la conversion de l'énergie de la turbulence de l'air en énergie acoustique par diffraction, donc l'amplification du bruit au niveau acoustique (Howe et McGowan, 2005). La distance entre les incisives supérieures et inférieures sur le plan horizontal (dénotée par la variable *h*, page 1007) déterminerait, entre autres, l'intensité du son rayonné.

La taille de la constriction dentale doit donc répondre à deux contraintes. Premièrement, elle doit être suffisamment large afin de permettre l'établissement d'une différence de pression entre la constriction linguale et la cavité orale antérieure pour qu'il y ait naissance de turbulences. Deuxièmement, les incisives supérieures et inférieures doivent être suffisamment resserrées afin de permettre une bonne conversion de l'énergie du domaine aérodynamique vers l'acoustique. Les valeurs que nous avons observées seraient donc le fruit d'un compromis entre ces deux contraintes antagonistes.

Nous avons observé que la taille de la constriction dentale pour /ʃ/ en français et en anglais tendait à être plus importante que celle de /s/ dans ces mêmes langues, en valeur absolue mais aussi proportionnellement à la taille de la constriction linguale correspondante. Nous ne sommes pas en mesure d'expliquer ce phénomène mais il est

I. Description articulaire des fricatives sibilantes

possible, par exemple, que les propriétés du flux turbulent soient de nature différente pour cette sibilante, et qu'elle nécessite une chute de pression plus importante au niveau de la constriction linguale. On peut également suggérer que le mécanisme d'amplification est intentionnellement différent entre /s/ et /ʃ/, afin d'aider à maintenir leur contraste. Cette suggestion est motivée par la différence de fréquence du pic majeur de ces deux sibilantes. Pour /s/, les hautes fréquences entre 6 et 10 kHz devraient être, idéalement, les mieux amplifiées. Pour /ʃ/, au contraire, l'amplification devrait être efficace surtout pour les fréquences plus basses, entre 3 et 5 kHz, pas au-delà.

II. DESCRIPTION ACOUSTIQUE DES FRICATIVES SIBILANTES

Résumé du chapitre II

Ce chapitre est consacré à la description acoustique des sibilantes.

En II-1, les transitions formantiques à la jonction des sibilantes avec trois timbres de voyelles sont examinées. En français, les transitions formantiques des formants F1 à F4 ne présentent pas de caractéristique systématique en fonction des stratégies « recul » ou « déformation » décrites au chapitre I. Une relation variable selon les locuteurs entre les formants de la voyelle et ceux des fricatives permet d'expliquer ce phénomène, comme nous le montrerons avec une expérience de simulation VCV au chapitre III.

En II-2, les caractéristiques du bruit de friction sont examinées. Nous montrons, en particulier, qu'un « même » son [s] peut avoir un spectre d'aspect très différent selon les locuteurs (de français) : diffus ou compact. La fréquence du pic majeur varie également de manière importante en fonction du contexte vocalique et des locuteurs. Malgré ces facteurs de variation, il existe deux plages de fréquence où le contraste entre /s/ et /ʃ/ est maximal : la première, vers 2,5-4 kHz, et la deuxième, vers 7-12 kHz. De même, le contraste du bruit de friction de /ç/ et /ʃ/, en polonais, qui n'est pas optimalement décrit par la fréquence du centre de gravité, se caractérise par la présence d'un pic *ultra-bas* pour /ʃ/, pas nécessairement très proéminent, autour de 1,5 kHz.

Il est intéressant de constater que la coarticulation entre sibilante et voyelle qui suit se manifeste de façon différente en fonction des langues. En français et en anglais, les formants de la partie stable de la voyelle ne diffèrent pas de manière importante entre les deux contextes de sibilantes. En chinois, l'inverse se produit : le timbre de la voyelle est très différent en fonction de la sibilante tautosyllabique. Le timbre de la voyelle contient donc des informations sur le lieu d'articulation de la sibilante.

Les propriétés contrastives de la voyelle et du bruit de friction semblent, en effet, complémentaires. C'est en chinois que la fréquence du pic principal ou du centre de gravité présente le plus fort chevauchement entre les différentes sibilantes. En français et

II. Description acoustique des fricatives sibilantes

en anglais, ces indices de fréquence sont largement distants : il n'existe pour ainsi dire pas de chevauchement entre /s/ et /ʃ/. En japonais, avec un contraste de bruit intermédiaire, la normalisation du locuteur à l'aide de la fréquence des formants vocaliques permet de renforcer la séparabilité de /s/ et /sʲ/.

INTRODUCTION

Les corrélats acoustiques et perceptifs des fricatives sibilantes se trouvent dans le bruit de friction et les transitions formantiques des voyelles adjacentes. Jongman *et al.* (2000) fournissent une revue des différentes méthodologies d'investigation de l'acoustique des fricatives.

Si le bruit de friction semble constituer l'indice perceptif majeur dans l'identification des sibilantes /s/ - /ʃ/ de l'anglais (Harris, 1958 ; Heinz et Stevens, 1961), le contexte vocalique est à même d'influencer le jugement dans des stimuli contenant des indices contradictoires (Whalen, 1991), de même qu'il peut modifier la frontière catégorielle entre ces deux sibilantes avec l'utilisation de stimuli sur un continuum⁴³. En effet, Mann et Repp (1980) ont montré que l'identité du locuteur (femme ou homme), ainsi que la nature de la voyelle adjacente avaient un effet sur les réponses des auditeurs dans une tâche d'identification. L'observation de la production par McGowan et Nittrouer (1988), Wu et Childers (1991), Boothroyd et Medewetsky (1992) et Jongman *et al.* (2000) vont dans le même sens, en ce qu'ils montrent qu'un indice de fréquence du bruit de friction varie avec l'âge (plus élevé pour les enfants) et le sexe (plus élevé pour les femmes) du locuteur, ce qui suggère que le bruit de friction est lié, dans une certaine mesure, à la taille du conduit vocal⁴⁴. La perception des catégories phonétiques prendrait donc en considération les variations individuelles prédictibles (covariations des indices vocaliques et du bruit) dans la production (en conformité avec Johnson, 1991).

Le bruit de friction ne constitue pas un indice perceptif uniquement dans le contraste entre /s/ et /ʃ/. Les sibilantes /ç/ et /ʂ/ du polonais sont identifiées avec un score correct approchant les 100 % lorsque leur bruit de friction isolé est présenté à des auditeurs natifs (Nowak, 2006) et supérieur au hasard avec des auditeurs non natifs (Lisker, 2001)⁴⁵. Jassem (1979) propose une analyse spectrale qui comprend plusieurs variables, permettant d'atteindre un taux de classification correcte de l'ordre de 89-92 % pour les fricatives coronales. Ces résultats suggèrent qu'il est nécessaire de prendre en considération la distribution de l'énergie dans les différentes bandes de fréquence (et non une seule valeur, comme le centre de gravité, qui ne permet pas de discriminer /ç/ et /ʂ/ ('j') : Jassem, 1995). Il n'existe pas, à notre connaissance, d'étude de perception utilisant

⁴³ D'après Mann et Repp (1980), dans une tâche d'identification mettant en œuvre des stimuli synthétiques sur un continuum /s/-/ʃ/, les stimuli ambigus tendaient à être perçus comme /ʃ/ en contexte non arrondi, et comme /s/ dans le contexte arrondi.

⁴⁴ Bien qu'il soit contre-intuitif que la hauteur du larynx ait une incidence directe sur le lieu d'articulation des consonnes coronales.

⁴⁵ Dans Nowak (2006), les stimuli sont produits par une locutrice native ; dans Lisker, (2001), par un locuteur natif. Les spécificités dues aux locuteurs pourraient donc avoir influencé les résultats, en plus du caractère natif ou non-natif des auditeurs.

II. Description acoustique des fricatives sibilantes

des stimuli synthétiques qui permette d'inférer quels sont précisément les corrélats spectraux spécifiques à /ç/ et à /ʂ/ en polonais.

Les transitions formantiques (et/ou la qualité de la voyelle tautosyllabique) jouent néanmoins un rôle majeur dans les contrastes impliquant la palatalité. En polonais, les transitions vocaliques, en particulier celle de la voyelle suivant la fricative, sont connues pour avoir un effet important sur le jugement d'identité de la fricative par des auditeurs natifs (Nowak 2006), en conformité avec un F2 systématiquement plus élevé pour /ç/ que pour /ʂ/ à la jonction de la fricative et de la voyelle, le premier étant palatalisé (ex. Zygis et Hamann, 2003).

L'objectif du présent chapitre est de fournir une description détaillée des différents aspects acoustiques des productions des sujets ayant participé à l'étude articulatoire, et de mettre en évidence les caractéristiques robustes (communes) de chaque phonème en fonction des langues.

MÉTHODE

Corpus

Des corpus différents ont été préparés en fonction des langues. Ces corpus se trouvent en Annexe II. Ces corpus étaient composés des trois parties suivantes :

- Entre quatre à six mots isolés (selon les langues), où les sibilantes sourdes étaient en contexte non arrondi (voyelle non arrondie parmi [a, ɑ, ə ou ε] selon la langue et la consonne) et arrondi (parmi [u, y, ʊ] selon la langue et la consonne) ;
- Des fricatives sibilantes tenues pendant quelques secondes (les locuteurs recevaient la consigne de produire la sibilante « telle que » produite dans tel ou tel mot – cette consigne était la même que pour l’acquisition IRM) ;

Ces deux premières parties ont été produites une fois en position assise, une fois en position allongée (pour simuler la condition IRM). L’enregistrement comprenait d’autres matériaux linguistiques, dont :

- Une liste de mots contenant des sibilantes sourdes et sonores dans différents contextes vocaliques et dans différentes positions syllabiques, permettant de contrôler, à un stade préliminaire de l’analyse, que les occurrences analysées étaient bien représentatives.

Dans cette étude, une place importante a été accordée à la description du bruit de friction tenu en position allongée. Bien qu’il ne s’agisse pas d’un mode de production canonique de la parole, c’est la conditions qui se rapproche le plus de celle de l’acquisition des données articulatoires IRM. Dans ce type de production, nous supposons que les sons ont été hyper-articulés, c’est-à-dire qu’ils sont susceptibles d’avoir atteint leur cible acoustique et articulatoire. Cette idée est confortée par l’aspect stable des formants du bruit de friction sur le spectrogramme (**Figure 30** pour une occurrence représentative).

II. Description acoustique des fricatives sibilantes

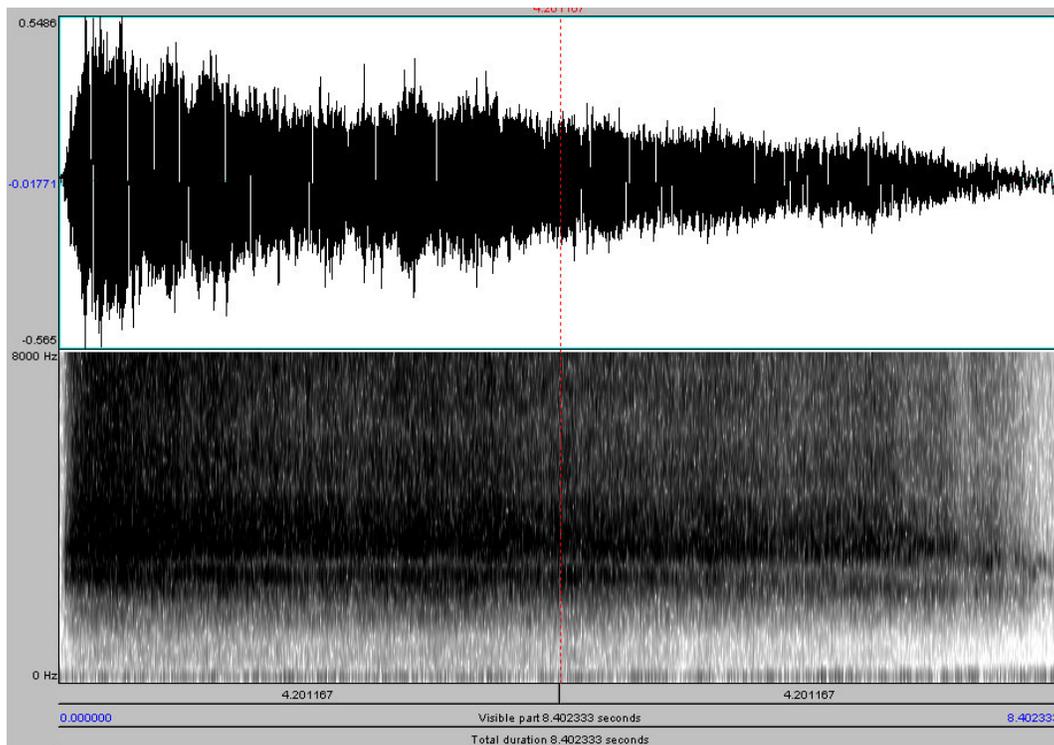


Figure 30. Signal et spectrogramme d'une occurrence de /s/ tenu (locuteur Fr2), dont la durée totale est de 8,4 secondes. Le spectrogramme montre les fréquences de 0 à 8 kHz.

Bien que la production en position allongée ne soit pas identique à celle de la position verticale (ex. Kitamura *et al.*, 2005 ; Stone *et al.*, 2007), à cause de l'angle de la nuque (qui modifie la forme du conduit vocal dans la région laryngale) et de l'effet de la gravité, nous considérons qu'il s'agit tout de même d'une instance possible de parole, du fait qu'il n'y a pas de baisse d'intelligibilité connue liée à la position allongée.

Instrumentation et procédure d'acquisition

L'enregistrement acoustique avait lieu en premier, avant l'acquisition des données IRM. Pendant cette séance, le déroulement de l'ensemble de l'expérience était expliqué aux sujets. Les informations relatives aux participants étaient généralement recueillies à ce moment (âge, histoire linguistique, dialecte s'il y avait lieu). L'enregistrement avait lieu dans une chambre sourde (située dans l'ex-laboratoire HIS d'ATR, Kyoto). Les sujets étaient assis sur un tabouret pour lire le corpus en position assise, et allongés sur le sol avec un oreiller pour la position allongée. Dans les deux positions, le micro était placé, à l'aide d'un pied, à environ 30 cm du visage, décalé sur le côté (afin d'éviter le bruit dû au souffle direct). Un micro cravate Sony à prise LCR était directement connecté à un enregistreur numérique Marantz, réglé à la fréquence d'échantillonnage de 48 kHz (16 bits).

II. Description acoustique des fricatives sibilantes

L'ensemble du corpus a été enregistré une seule fois, section par section, après un bref entraînement si bien que la lecture était fluide.

Analyse spectrographique

Des spectrogrammes à bande large ont été examinés qualitativement et les formants F1 à F4 y ont été mesurés à la jonction de la fricative et de la voyelle suivante et pendant la partie stable de la voyelle suivante. La trajectoire des formants vocaliques à proximité des fricatives permet d'interpoler le F-pattern durant les fricatives (Fant, 1960)⁴⁶, où certaines résonances sont très peu excitées (résonances de la cavité postérieure, notamment ; v. chapitre III-1).

Spectre du bruit de friction

Le spectre moyen du bruit de friction a été calculé sur une portion de 62 ms au centre de la fricative lorsque celle-ci était contenue dans un mot, ou dans différentes portions (début, milieu, fin) du bruit de friction des productions tenues. Le spectre moyen a été calculé en faisant la moyenne de la densité spectrale du bruit (en décibels) du spectre FFT calculé pour 10 fenêtres Hamming de 8 ms se chevauchant de 2 ms (durée totale de 62 ms), comme illustré en **Figure 31**. Le moyennage de plusieurs fenêtres est motivé par la théorie source-filtre, où l'on suppose que la source de bruit est aléatoire, mais la structure résonancielle constante pendant la production d'une occurrence tenue. Ainsi, en effectuant la moyenne du spectre de plusieurs fenêtres, on minimise l'effet de la variation aléatoire de la source et maximise les caractéristiques constantes du filtre. Nous avons choisi des fenêtres relativement courtes, de façon à augmenter le nombre de fenêtres prélevées dans le signal (en particulier pour les occurrences à l'intérieur de mots). Cette durée, qui permet d'atteindre une résolution fréquentielle de 125 Hz, est suffisante pour l'étude des fricatives où les contrastes s'expriment par des différences de l'ordre de milliers de Hertz. Pour chaque condition, le spectre moyen a été calculé pour une seule occurrence représentative. Dans la mesure où les productions sonores n'avaient pas été enregistrées simultanément à l'acquisition IRM, le risque de variation d'occurrence à occurrence pouvant être considéré du même ordre que la différence possible entre les

⁴⁶ « *The F-pattern, at any instant of time, is defined as the resonance frequencies of the oral part of the vocal tract or those resonance frequencies that show a continuity with the oral resonances of an adjacent sound. The F-pattern coincides closely with the observable formant peak frequencies of sound produced from a glottal, preferably voiced, source. [...] Because of the continuities and limited range of articulatory movements, the F-pattern is continuous throughout a speech utterance, and it may therefore be some interest to follow it continuously within a speech record, even at the silent intervals, by a process of interpolation. The transitional characteristics of consonant-vowel and vowel-consonant combinations may thus be specified by the F-pattern at successive points in the time scale, the F-pattern being a fairly accurate and concise acoustic correlate to articulation in the more precise sense of vocal tract configuration.* » (Fant, 1960 : 25-26)

II. Description acoustique des fricatives sibilantes

deux types enregistrement. Pour cette raison, il n'a pas été jugé utile d'effectuer des moyennes sur plusieurs répétitions.

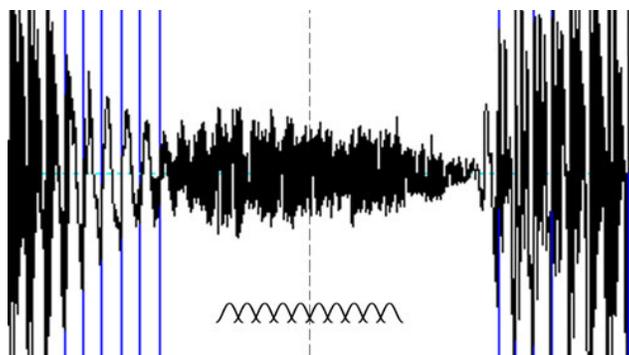


Figure 31. Représentation schématique du fenêtrage pour le calcul du spectre moyen du bruit de friction. La portion centrale du signal présenté dans cette figure correspond au bruit de friction. Les barres verticales indiquent les cycles de voisement détectés (Praat 4.3.01).

Détection du pic spectral

La même portion du bruit de friction a également donné lieu à un lissage spectral par LPC (linear predictive coding), avec 48 coefficients pour une fréquence d'échantillonnage de 48 kHz⁴⁷. Le pic spectral d'intensité maximale a été détecté sur la base des racines LPC de cette courbe lissée. L'ordre LPC a été défini empiriquement suite à l'inspection visuelle des spectres lissés et des spectres moyens.

Le pic spectral est une mesure quantitative pratique pour décrire un spectre de manière concise. Toutefois, il peut être simplificateur et/ou peu fiable lorsqu'un spectre comporte, à des fréquences éloignées, plusieurs pics dont l'intensité est comparable comme c'est souvent le cas des [s], (v. spectres moyens en Annexe V).

Centre de gravité (COG)

Enfin, le centre de gravité du bruit de friction a été calculé sur la base de la densité spectrale (échelle linéaire) obtenue par FFT pour les 10 fenêtres temporelles décrites précédemment. Il s'agit, comme la fréquence du pic, d'une indication concise sur la distribution fréquentielle de l'énergie du spectre, qui consiste en la moyenne des fréquences (en Hz) pondérées par l'intensité (cf. Forrest *et al.* 1988)⁴⁸. Si le spectre comporte surtout des formants de basse fréquence, le centre de gravité sera bas, et

⁴⁷ La fréquence d'échantillonnage étant de 48000 Hz, un coefficient de 48 permet de détecter en moyenne 1 pic tous les 1000 Hz environ.

⁴⁸ Dans cette thèse, le centre de gravité a été calculé uniquement sur l'échelle fréquentielle linéaire (Hz).

II. Description acoustique des fricatives sibilantes

inversement. C'est une mesure quelque peu simplificatrice, là encore, dans la mesure où, d'une part, un spectre comportant une prééminence très marquée dans les fréquences moyennes et, d'autre part, un spectre plat où l'énergie se distribue uniformément dans toutes les fréquences, pourront être caractérisés par un même centre de gravité moyen. Toutefois, en pratique, le centre de gravité s'est avéré être un bon indicateur du lieu d'articulation, permettant d'atteindre 70 à 100 % de classification correcte de /s/ et /ʃ/, en anglais (Forrest *et al.*, 1988 ; Ali *et al.*, 2001 – base de données TIMIT, 60 locuteurs). Ali *et al.* ont obtenu des résultats de classification comparables en utilisant la fréquence du pic spectral et la pente spectrale⁴⁹. Le centre de gravité est d'ailleurs marginalement corrélé avec la fréquence du pic principal (Newman 2003)⁵⁰. Dans cette thèse, le centre de gravité a été calculé pour l'intervalle de 1 kHz à 15 kHz. Les basses fréquences ont été exclues de façon à éviter qu'un voisement éventuel ne tire le centre de gravité vers le bas. La limite supérieure a été choisie en tenant compte à la fois de la présence possible de pics intenses autour de 10-12 kHz pour certains [s], des limites de sensibilité du micro, et des limites du champ de l'audition. Pour les sibilantes post-alvéolaires, étant donné que l'énergie du spectre est assez faible dans les fréquences supérieures à 10 kHz, la valeur du centre de gravité ne change pas de manière importante selon qu'on utilise les intervalles 1-10 ou 1-15 kHz.

⁴⁹ MNSS (maximum normalized spectral slope), basé sur la dérivée du spectre. Nissen et Fox (2005) ont également trouvé que la pente spectrale, de même que la variance, permettaient de discriminer entre les sibilantes /s/ et /ʃ/, d'une part, et entre les sibilantes *versus* les non sibilantes (/f/ et /θ/), d'autre part.

⁵⁰ Du moins pour le contraste du type /s/ - /ʃ/ (anglais) ; 19 locuteurs, $r = 0,43$, $p < 0,07$ (Newman, 2003).

RÉSULTATS

II-1 : Transitions formantiques des sibilantes dans trois contextes vocaliques

Analyse spectrographique : locuteurs Fr2, Fr5 et P1

Dans le chapitre précédent, nous avons noté que certains locuteurs présentaient une stratégie de « recul » de la langue s'opposant à la stratégie « déformation ». Les locuteurs de français Fr2 et Fr5 appartiennent à ces deux groupes, respectivement.

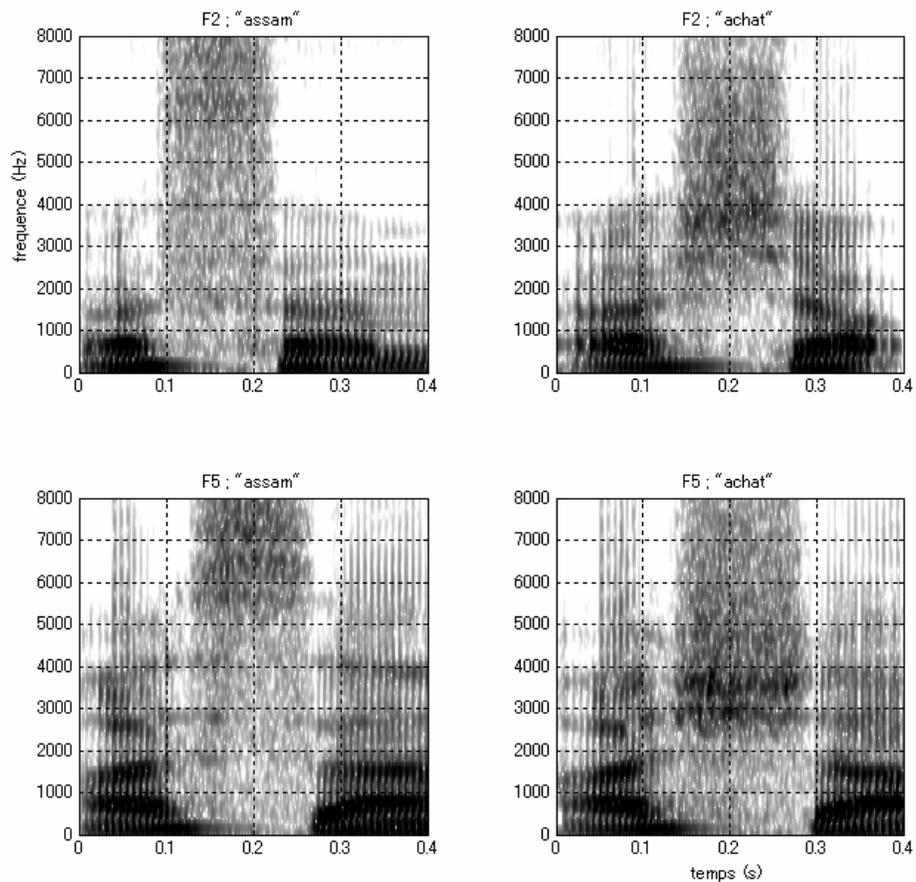


Figure 32. Spectrogrammes extraits des occurrences « Assam » (gauche) et « achat » (droite) produites en position assise par les locuteurs Fr2 (haut) et Fr5 (bas). Tous les spectrogrammes présentés dans cette thèse ont été créés dans Matlab, et ne comportent pas de pré-emphase. Les niveaux de gris correspondent donc au niveau sonore (dB).

II. Description acoustique des fricatives sibilantes

La **Figure 32** montre le spectrogramme des mots « Assam » et « achat ». La sibilante /s/ est très différente de /ʃ/, en ce que son bruit de friction est concentré dans les hautes fréquences, au-delà de la zone fréquentielle occupée par les formants de la voyelle. En d'autres termes, /ʃ/ peut être caractérisé de manière plus précise que /s/, en référence aux formants vocaliques auxquels ses pics spectraux sont connectés. Chez le locuteur Fr5, il existe une continuité entre les formants F3 et F4 de la voyelle et la partie la plus intense du bruit de friction de /ʃ/. De plus, d'après ces spectrogrammes, la trajectoire des F3 et F4 durant la voyelle, de même que durant la fricative, est relativement stationnaire. Ce fait suggère que la morphologie du conduit vocal auxquelles sont affiliés F3 et F4 n'a pas changé de manière importante entre la fricative et les voyelles. Le léger saut de ces formants à la jonction des voyelles et de la fricative pourrait être attribué au changement brutal du lieu de la source (glottique pour la voyelle ou supraglottique pour la fricative sourde), qui occasionnent l'introduction d'antiformants pendant la fricative (ce point sera discuté en III-1).

Le maximum de l'énergie du bruit de friction se situe en face du F4 chez le locuteur Fr2. Cependant, contrairement au locuteur Fr5, les F3 et F4 de la voyelle présentent un mouvement important, accompagné de discontinuités vers 0,31-0,32 seconde. Cela suggère une modification importante de la structure résonnante entre la fricative et la voyelle. Ce type de saut abrupt survenant pendant la voyelle peut être attribué au couplage/découplage de cavités latérales telle que la cavité sublinguale. L'effet du branchement d'une cavité annexe est discuté en III-1.

Nous avons observé, dans le chapitre précédent, que les deux stratégies articulatoires « recul » et « déformation » du /ʃ/ français pouvaient être mises en parallèle avec les deux sibilantes post-alvéolaires du polonais, /ʂ/ et /ʐ/, du fait de leur similarité articulatoire. La Figure 24 présente le spectrogramme des occurrences contenant les trois sibilantes en contexte /a/ pour le locuteur P1.

II. Description acoustique des fricatives sibilantes

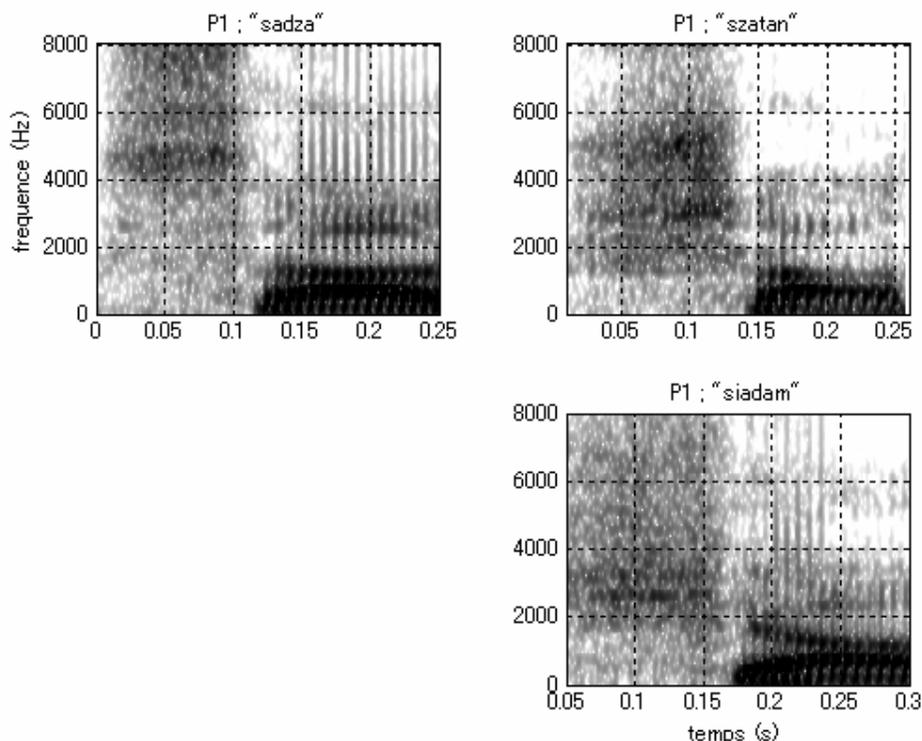


Figure 33. Spectrogrammes des séquences [sɑ] (en haut à gauche), [ʂɑ] (en haut à droite) et [ɕɑ] (en bas à droite) extraits respectivement des mos « sadza », « szatan » et « siadam ».

Contrairement au /ʃ/ français, le bruit de friction du /ʂ/ présente une énergie relativement intense dès la région du F2, formant auquel un premier pic du bruit est connecté. Le pic supérieur faisant face à F3-F4 est plus intense encore, suivi d'un troisième pic dans la région du F6. Pour /ʂ/ comme pour /s/, tous les formants visibles sont relativement stationnaires, suggérant que la forme du conduit vocal a peu changé entre la fricative et la voyelle. Cette interprétation est en harmonie avec les coupes sagittales IRM de ces sibilantes (chapitre I), où la racine de la langue est relativement proche de la paroi pharyngale, ce qui est compatible avec la voyelle /a/.

La sibilante /ɕ/ présente des pics spectraux faisant face à la région F3 - F4 de la voyelle. Il est difficile de déterminer le lien précis entre ces pics et ces formants du fait que ces formants sont peu visibles sur le spectrogramme. On observe une trajectoire descendante du F2 vers la voyelle, ce qui suggère une articulation s'étendant dans la région palatale, en accord avec les données IRM.

A la différence de l'articulation, il existe peu de points communs du point de vue de la connectivité des formants entre le /ʂ/ du locuteur P1 et le /ʃ/ du locuteur Fr2 (stratégie

II. Description acoustique des fricatives sibilantes

« recul »). Cela s'explique par le fait que les pics caractéristiques du /s/ sont de plus basse fréquence dans /s/ (P1) que ceux de /ʃ/ (Fr2). Les formants ne se croisant jamais, et en supposant que les deux sibilantes ont un nombre de résonances équivalent proportionnellement aux formants de la voyelle qui suit, le pic spectral du /s/ (P1) se trouve connecté au F2 ou au F3 de la voyelle adjacente. Ce point sera discuté en profondeur dans la section III-3 (synthèse VCV).

Afin d'avoir une vue d'ensemble en fonction des langues, les formants F1-F4 ont été mesurés manuellement sur les spectrogrammes des mots (produits en position assise), à la jonction de la sibilante et de la voyelle suivante (« jonction ») et au centre de cette même voyelle (« centre »). Il s'agit d'une représentation simplifiée de la transition formantique où l'échelle du temps a été ignorée. La jonction avec la voyelle *suivante* a été choisie parce que la séquence consonne-voyelle constitue une unité phonétique à plusieurs égards (v. Pickett *et al.* 1995).

F1-F4 à la jonction FV et au centre V – français

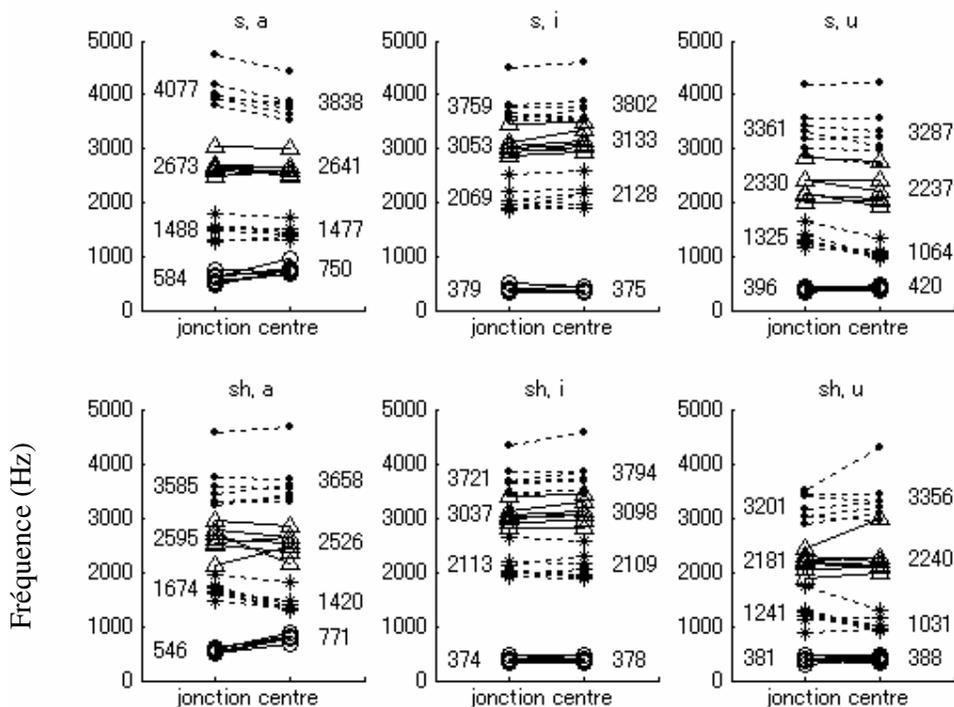


Figure 34. Fréquence des formants F1 à F4 à la jonction (« jonction ») des sibilantes /s/ et /ʃ/ ('sh') et de la voyelle suivante /a/, /i/ ou /u/ ; et au centre de la voyelle (« cible »), produites à l'intérieur de mots (v. corpus en Annexe II ; 7 locuteurs). Les cercles représentent F1, les croix F2, les triangles F3 et les points F4. La valeur moyenne (en Hz) y est accolée.

II. Description acoustique des fricatives sibilantes

D'après la **Figure 34**, la valeur du F2 à la jonction est très variable selon la voyelle, mais pas très différent entre /s/ et /ʃ/, surtout pour les voyelles hautes. Ces résultats pourront être comparés à ceux du chinois, présentés plus loin en **Figure 38**. Cela suggère que la consonne subit une coarticulation importante de la part de la voyelle.

Nous pouvons également noter que les transitions F3 et F4 sont parfois contradictoires entre locuteurs différents (ex. /ʃ/, contexte /a/).

II. Description acoustique des fricatives sibilantes

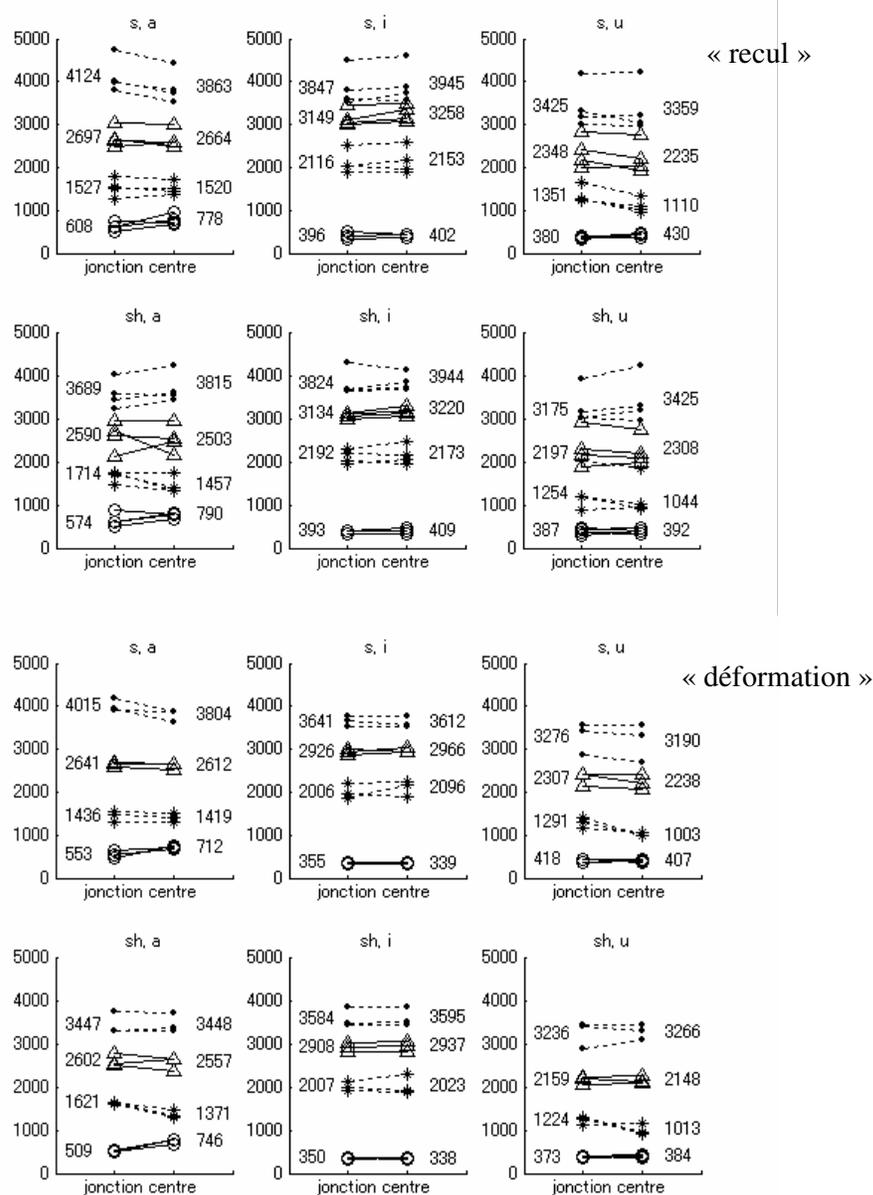


Figure 35. Fréquence des formants F1 à F4 à la jonction FV et au centre de la voyelle qui suit. Haut : locuteurs de français utilisant la stratégie « recul » d'après les données IRM statique (Fr1, Fr2, Fr4, Fr7). Bas : locuteurs de la stratégie « déformation » (Fr3, Fr5, Fr6).

II. Description acoustique des fricatives sibilantes

La **Figure 35** présente les mêmes données du français, mais triées par type de /ʃ/ « recul » ou « déformation ». Les types de transitions formantiques sont disparates (surtout pour /ʃ/ « recul » avec /a/) malgré ce regroupement. Cette disparité peut avoir été occasionnée par la difficulté d'identifier les formants en position jonction dû à la présence d'antiformants et parfois de formants surnuméraires (dans l'hypothèse d'une cavité sublinguale branchante – v. III-1). Il est également possible que ces différences soient dues à la variation inter-individuelle de la morphologie du conduit vocal pendant la voyelle /a/. Cette hypothèse est examinée dans une expérience de simulation en III-3 (synthèse VCV).

F1-F4 à la jonction FV et au centre V – anglais

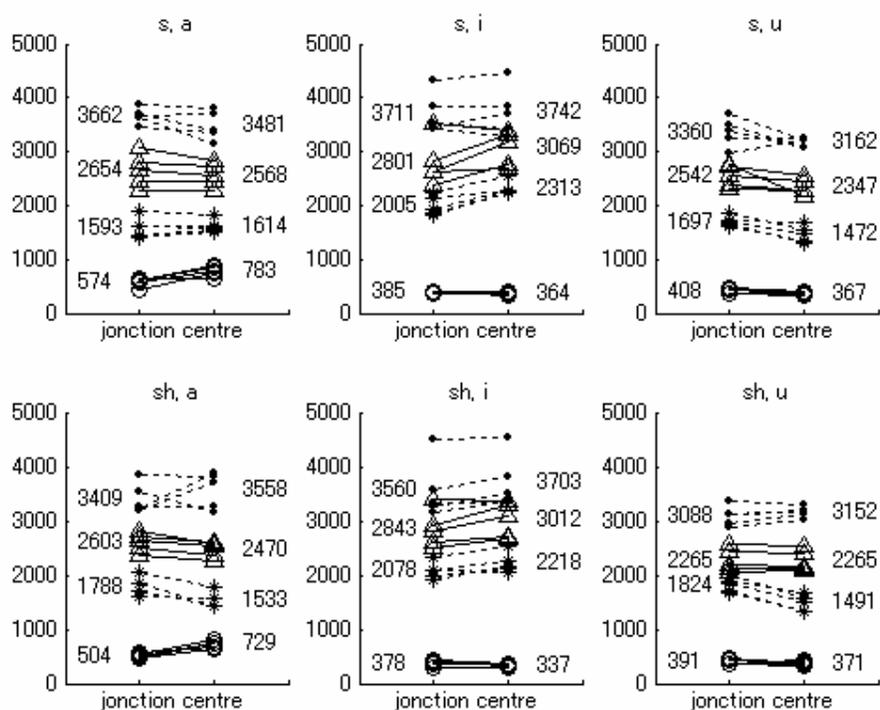


Figure 36. Fréquence de F1 à F4 à la jonction et au centre de la voyelle suivante pour les locuteurs d'anglais (v. légende de la Figure 34).

En anglais, le F2 à la jonction tend à être plus élevé pour /ʃ/ que pour /s/ dans les contextes /a/ et /u/. Comparé au français, le F2 subit moins l'influence du contexte vocalique /u/. Bien que la valeur du F2 au centre du /u/ soit plus élevée en anglais qu'en français, on observe tout de même un abaissement moyen de plus de 300 Hz entre la jonction et le centre. Même si nos données sont limitées, nous aurions tendance à penser que le locus du F2 de /ʃ/ en contexte /u/ est plus élevé en anglais qu'en français. Les spectres moyens du bruit de friction de /ʃ/ en contexte /u/ (II-2) confortent cette interprétation.

II. Description acoustique des fricatives sibilantes

F1-F4 à la jonction FV et au centre V – japonais

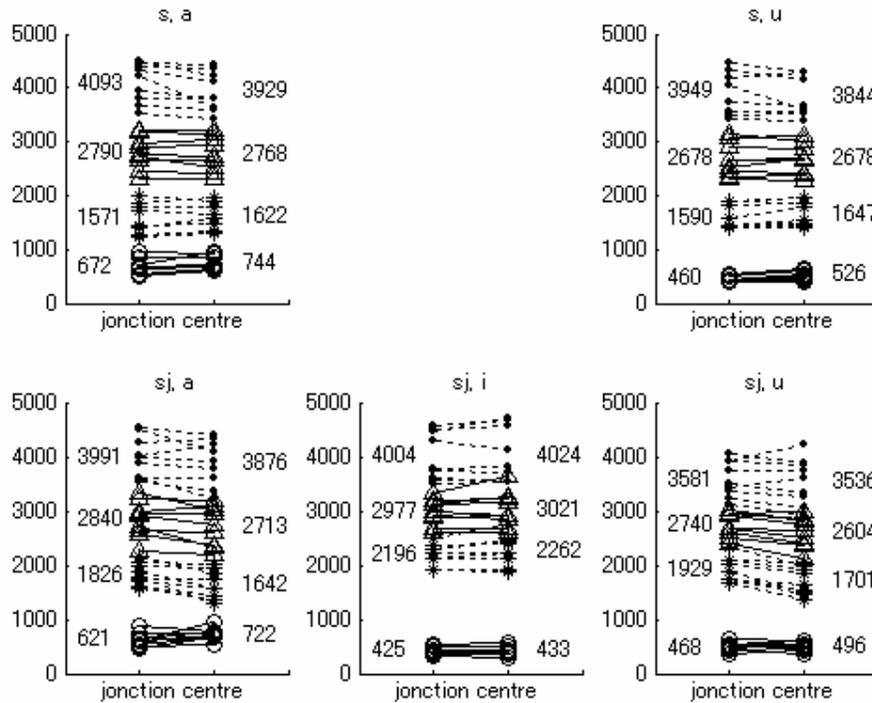


Figure 37. Fréquence de F1 à F4 à la jonction et au centre de la voyelle suivante pour les sibilantes /s/ et /sj/ (représenté ‘c’) des locuteurs japonais (v. légende de la Figure 34).

A l’exception des combinaisons /s^ja/ et /s^ju/, les formants présentent très peu de mouvement entre la jonction et la cible. /s^j/ posséderait donc un locus plus élevé que /s/, et distant des cibles de /a/ et /u/⁵¹. L’absence de mouvement suggère que la configuration du conduit vocal change très peu entre la fricative et la voyelle pour les autres combinaisons.

⁵¹ La voyelle haute qui se situe à l’extrémité postérieure du triangle vocalique japonais est représentée par le symbole ‘u’, en suivant l’usage, mais cette voyelle semble en réalité plus centrale que postérieure, d’après la valeur du F2.

II. Description acoustique des fricatives sibilantes

F1-F4 à la jonction FV et au centre V – chinois

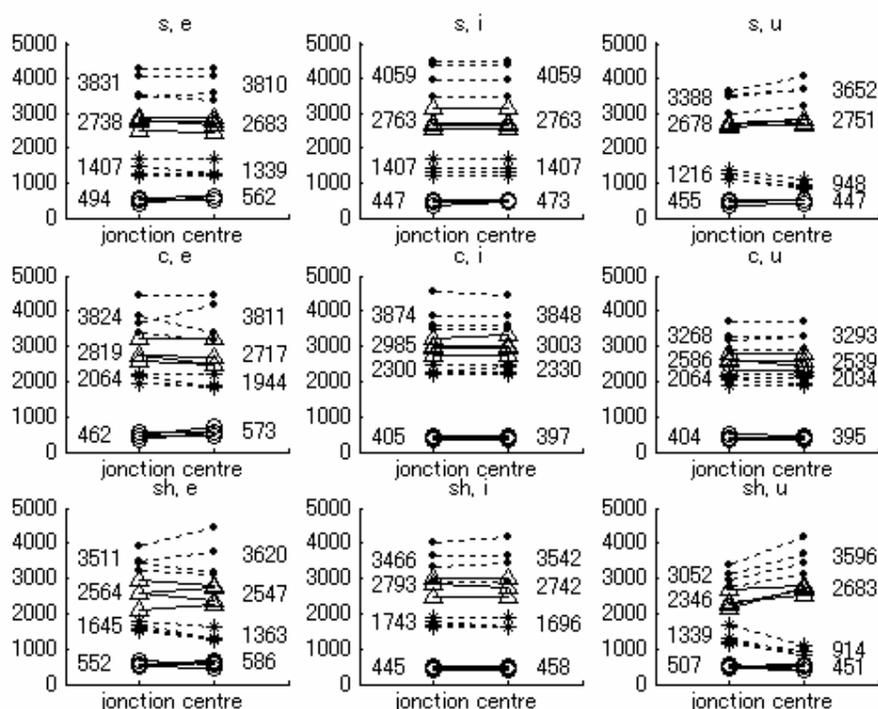


Figure 38. Fréquence des formants F1 à F4 à la jonction et à la cible pour les sibilantes /s/, /ç/ (représenté 'c') et /ʃ/ (représenté 'sh') du chinois. (Voir légende de la Figure 34.)

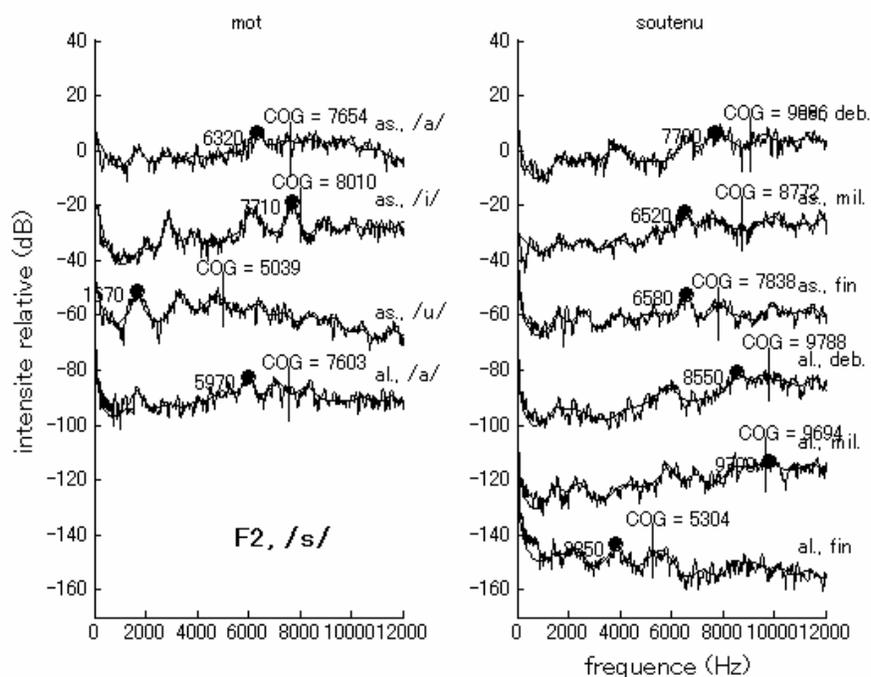
En chinois, on constate, comme en japonais, que plusieurs combinaisons FV ne présentent quasiment aucun mouvement formantique, suggérant une forte coarticulation entre la sibilante et la voyelle. Cette coarticulation, contrairement au français, s'exerce davantage dans le sens de la fricative vers la voyelle, d'après la grande différence des formants de la cible selon la sibilante qui la précède. En particulier, le contexte /ç/ élève la cible du F2 de la voyelle, que ce soit pour /ə/, /i/ ou /u/.

II. Description acoustique des fricatives sibilantes

II-2 : Spectre de bruit

Description qualitative des spectres de bruit (français)

Les spectres moyens des sibilantes sont étonnamment différents en fonction des locuteurs, même pour un même phonème à l'intérieur de chacune des langues. La **Figure 39**, qui présente le spectre de /s/ produit par deux locuteurs du français, en est une illustration.



II. Description acoustique des fricatives sibilantes

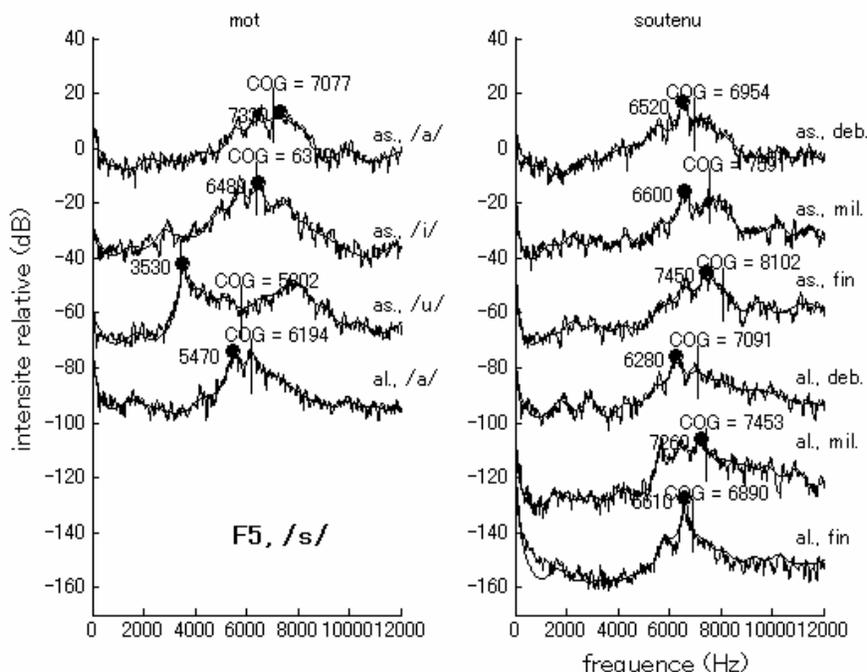


Figure 39. Spectres moyens du bruit de friction de /s/ par les locuteurs Fr2 (haut) et Fr5 (bas) La sibilante a été produite dans différentes conditions : en position assise (as.) ou allongée (al.), extraits de mots comportant différents contextes vocaliques (gauche) ou tenus (droite). Pour les occurrences tenues, le spectre moyen a été calculé dans les portions du début (deb.), du milieu (mil.) et de la fin. Le pic le plus intense (rond noir) a été détecté sur la courbe lissée (LPC⁵²). Le centre de gravité (barres verticales croisant chacune des courbes) a été calculé sur l'échelle linéaire (Hz) pour l'intervalle de 1 kHz à 15 kHz.

L'aspect du spectre moyen de /s/ chez le locuteur Fr2 (Figure 39, panneaux supérieurs) varie de manière importante selon la condition de production : en position assise ou allongée, en contexte de mot ou tenu, entre le début et la fin d'une occurrence tenue, et en fonction du contexte vocalique lorsqu'il s'agit d'un mot⁵³. Cette variation influe sur la fréquence du pic spectral comme sur celle du centre de gravité. Ces valeurs demeurent cependant plus élevées pour /s/ que pour /ʃ/ (Figure 40, panneaux du haut). On peut également noter que le spectre de Fr2 /s/ présente une prééminence spectrale moins marquée que le /ʃ/ du même locuteur (Figure 40); son énergie se répartit sur plusieurs pics occupant une large plage de fréquences, surtout au-dessus de 6 kHz.

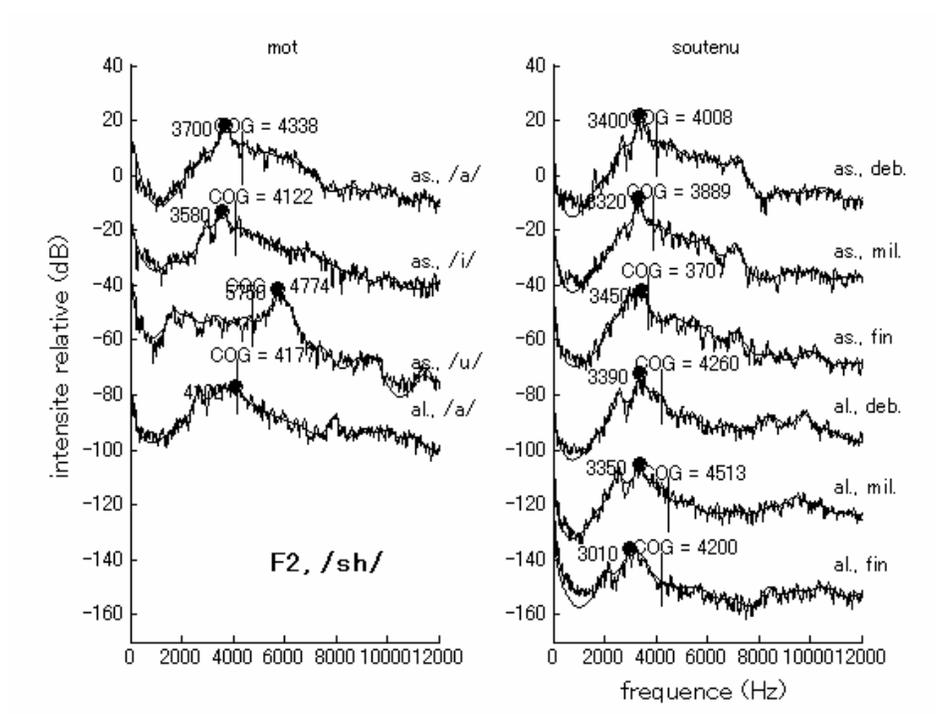
⁵² Quarante-huit coefficients LPC, pour une fréquence d'échantillonnage de 48 kHz.

⁵³ Les spectres moyens ont été calculé uniquement sur les portions de friction du bruit, exemptes de portions aspirées.

II. Description acoustique des fricatives sibilantes

Le spectre de bruit de /s/ du locuteur Fr5 présente une prééminence compacte, quelle que soit la condition, à la seule exception du contexte /u/, où deux pics majeurs sont observés, le premier étant de 2 à 3 kHz inférieur au pic maximal des autres conditions, et le deuxième étant plus élevé que le pic maximal des autres conditions. Étant donné l'espacement de ces deux résonances (la fréquence du deuxième pic se situe entre le double et le triple du premier), on peut penser qu'il s'agit du premier et du deuxième mode de résonance d'une même cavité. Il pourrait s'agir de la cavité labiale, ce qui est corroboré par les résultats de simulation de la section III-5. En considérant le pic de 3,5 kHz comme une résonance quart d'onde, la longueur *effective* (avec l'effet du rayonnement aux lèvres et de sa forme conique) est de 2,5 cm, ce qui est plausible.

La variabilité de la fréquence du pic principal et du centre de gravité des spectres diffus, tel que celui du /s/ par le locuteur Fr2, peut être causé par la variation de l'enveloppe de la source, dont la pente peut varier selon le débit d'air (Shadle, 1990 : p. 205 ; Shadle, 1991 : p. 415), peut facilement faire basculer le pic principal d'un formant à un autre. Également, en fonction de l'emplacement de la source⁵⁴, certaines résonances seraient plus excitées que d'autres.



⁵⁴ L'emplacement de la source est déterminée par la configuration articulaire. L'emplacement de la source et la fonction de transfert du conduit vocal ne peuvent donc pas être manipulées indépendamment (si tant est que les locuteurs sont capables de la contrôler intentionnellement).

II. Description acoustique des fricatives sibilantes

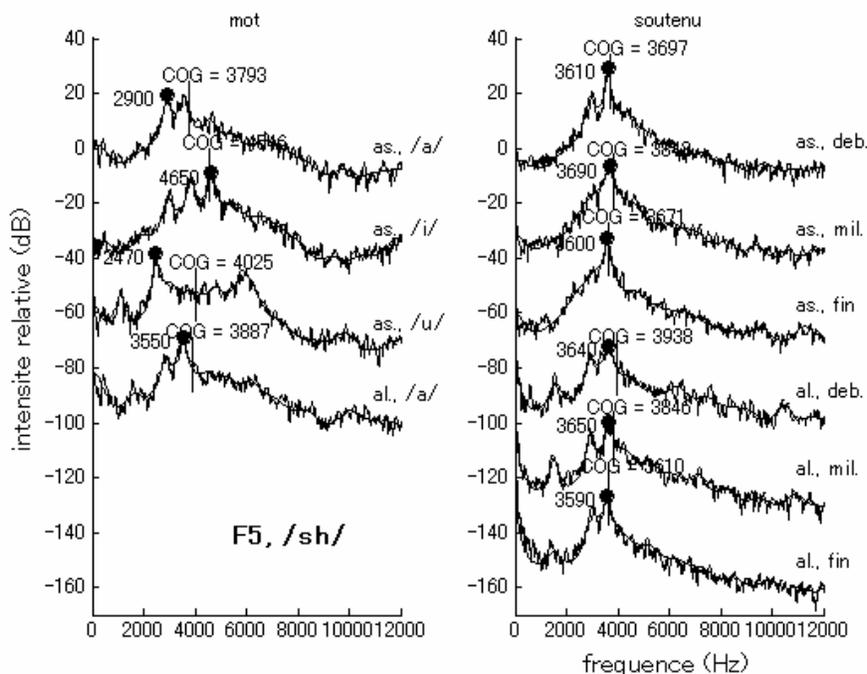


Figure 40. Spectres moyens de /ʃ/ ('sh') ; locuteurs Fr2 (haut) et Fr5 (bas). Voir légende de la Figure 39.

Le spectre de /ʃ/ est relativement invariable en fonction des conditions de production pour les deux locuteurs, sauf lorsque produit dans un mot en contexte /u/. En effet, dans le contexte /u/, au lieu d'un pic autour de 3,5-4 kHz, on en trouve deux, le premier vers 2 kHz et le deuxième vers 6 kHz. Ces deux pics, qui rappellent ceux du /s/ compact (Fr5), peuvent provenir des résonances un quart et trois quart d'onde⁵⁵ de la cavité antérieure étant donné leur espacement et leur fréquence. Pour qu'il y ait un formant de plus basse fréquence, une cavité antérieure plus grande par rapport aux autres contextes se serait formée, en raison d'un point d'articulation reculé vers la zone vélaire par coarticulation avec la voyelle. Chez le locuteur Fr2, le deuxième pic possède l'énergie maximale du spectre. Or, son spectre n'est pas qualitativement très différent de celui de Fr5. Le pic maximal n'est donc pas nécessairement fiable pour décrire un spectre de bruit. La fréquence du pic inférieur pourrait s'y substituer, mais il est alors nécessaire de définir un seuil d'intensité à partir duquel on commence à considérer un maximum local comme un pic pertinent (cette méthode a été utilisée dans l'expérience rapportée dans la section III- 2). Le centre de gravité est également sensible à la présence de plusieurs pics majeurs dans le spectre. L'intensité importante du second pic de /ʃ/, Fr2 entraîne une fréquence légèrement plus élevée du COG en comparaison aux autres contextes vocaliques.

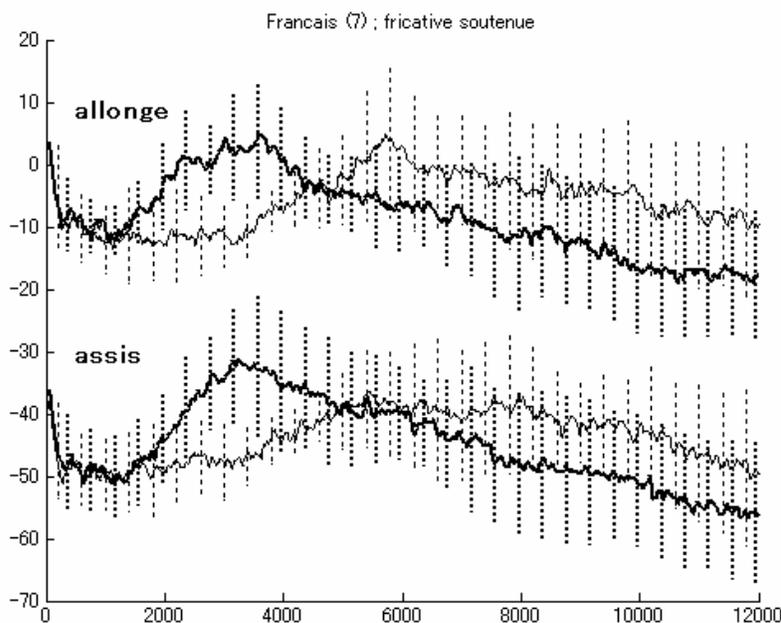
⁵⁵ Cf. introduction du chapitre III, en particulier la **Figure 49**.

II. Description acoustique des fricatives sibilantes

Comme nous l'avons mentionné dans l'introduction du présent chapitre, la hauteur du bruit de friction est connue comme étant un indice distinctif entre les sibilantes /s/ (aigu) et /ʃ/ (grave). Le centre de gravité ou la fréquence du pic du bruit permettant de discriminer entre ces deux sibilantes avec un taux élevé de classification correcte (ex. Ali *et al.* 2001), on comprend que le besoin d'affiner cette description ne se fasse pas ressentir. Les études de perception prennent cependant comme modèle une instance de /s/ ou /ʃ/ produit par un ou deux locuteurs tout au plus. Les résultats de ces études confirment donc en réalité une hypothèse qui risque d'être simplificatrice (*les auditeurs se servent de la hauteur du bruit pour décider entre /s/ et /ʃ/*).

En y regardant de plus près, certaines occurrences de /s/ possèdent des pics de très basse fréquence : par exemple, /s/ (Fr2) en contexte /u/ possède un pic maximal à 1600 Hz, ce qui est plus bas que celui d'un /ʃ/ typique. L'impression subjective que nous éprouvons à l'écoute de ce son est pourtant celle d'un /s/ tout à fait habituel. Nous en déduisons que la présence d'énergie dans les hautes fréquences (l'intensité du spectre s'atténue de façon très graduelle au-dessus du pic maximal) doit orienter notre perception en faveur d'un /s/.

Les spectres moyens, tous locuteurs confondus, confortent nos propos.



II. Description acoustique des fricatives sibilantes

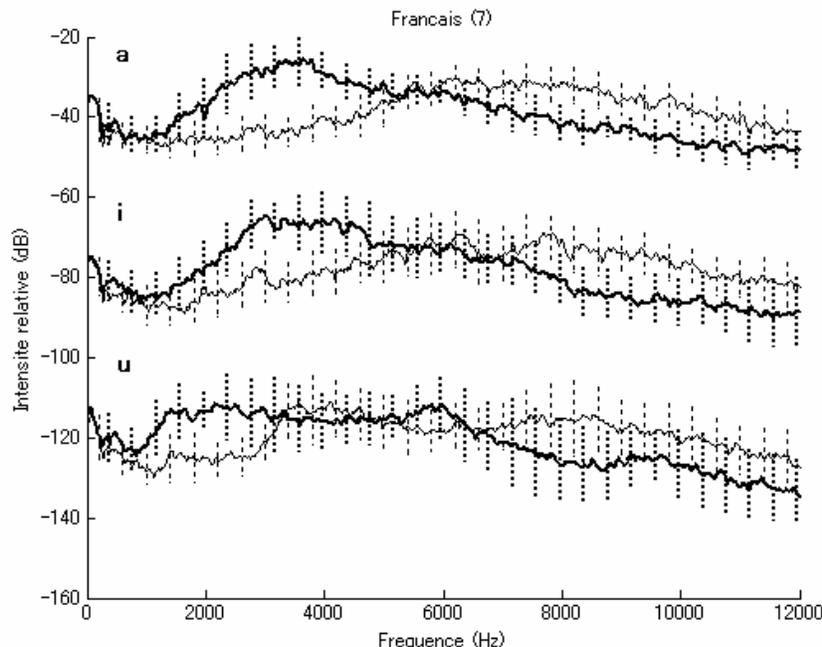


Figure 41. Spectres moyens, tous locuteurs confondus, pour le français (6 hommes et 1 femme). Les lignes épaisses correspondent à /ʃ/ et les lignes fines à /s/. Les segments hachurés correspondent à +/- 1 écart type. Le panneau du haut montre les spectres moyens de production tenue, en positions assise ou allongée. Le panneau du bas présente les spectres moyens dans différents contextes vocaliques. Les ensembles de courbes ont été décalés de 40 dB chacun pour une meilleure visibilité.

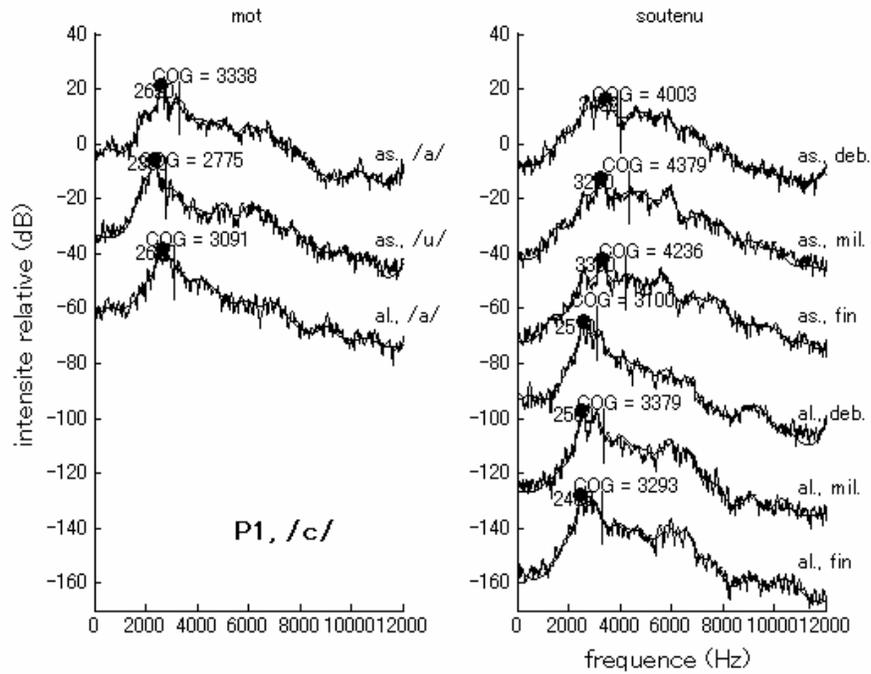
D'après les spectres moyens de tous les locuteurs (**Figure 41**), les sibilantes /s/ et /ʃ/ s'opposent par deux différences majeures sur le plan spectral, réparties sur deux zones fréquentielles : entre 2,5 et 4 kHz, où on observe la proéminence spectrale de /ʃ/, et entre 7 et 12 kHz, où se situe la proéminence spectrale de /s/. En contexte /u/, les proéminences spectrales des deux fricatives sont abaissées, de telle sorte que les intervalles de 1 à 3 kHz et de 7 à 12 kHz sont les régions où se concentre la différence entre les deux sibilantes. Bien que le spectre moyen du /s/ en contexte /u/ possède un premier pic vers 3,5 kHz, les courbes des deux sibilantes n'ont pas de différence notable entre 3,5 et 7 kHz, en raison d'une proéminence de bande large de /ʃ/ qui ne s'atténue qu'au-delà d'un deuxième pic situé vers 6 kHz.

Dans toutes les conditions, les deux courbes sont maximalelement distantes dans la zone de fréquence inférieure, correspondant au pic inférieur du /ʃ/. L'intensité relative du bruit dans la région du F3 par rapport à la voyelle adjacente a d'ailleurs été montrée comme distinctive dans la perception de /s/ et /ʃ/ en anglais (Stevens, 1985 et Hedrick et Ohde, 1993). Toutefois, la zone de fréquence supérieure, où /s/ possède plus d'énergie que /ʃ/,

II. Description acoustique des fricatives sibilantes

est moins variable avec le contexte vocalique. Plutôt qu'une perception globale de hauteur, les auditeurs pourraient rechercher des indices perceptifs dans ces *deux zones de fréquences* pour déterminer si la fricative présentée a plus de chance d'être un /s/ ou un /ʃ/.

Spectre de bruit des sibilantes non-antérieures en polonais



II. Description acoustique des fricatives sibilantes

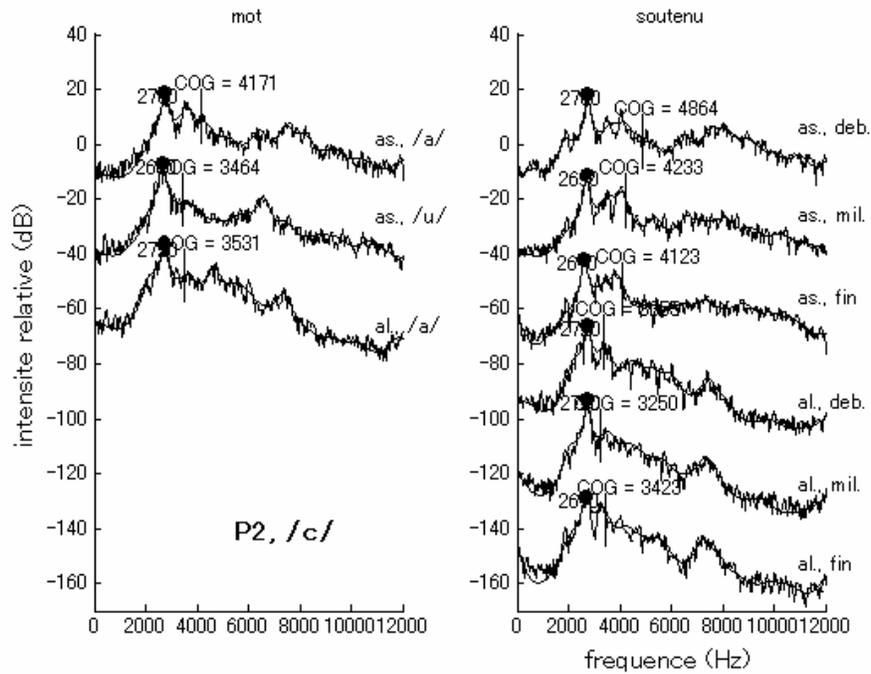
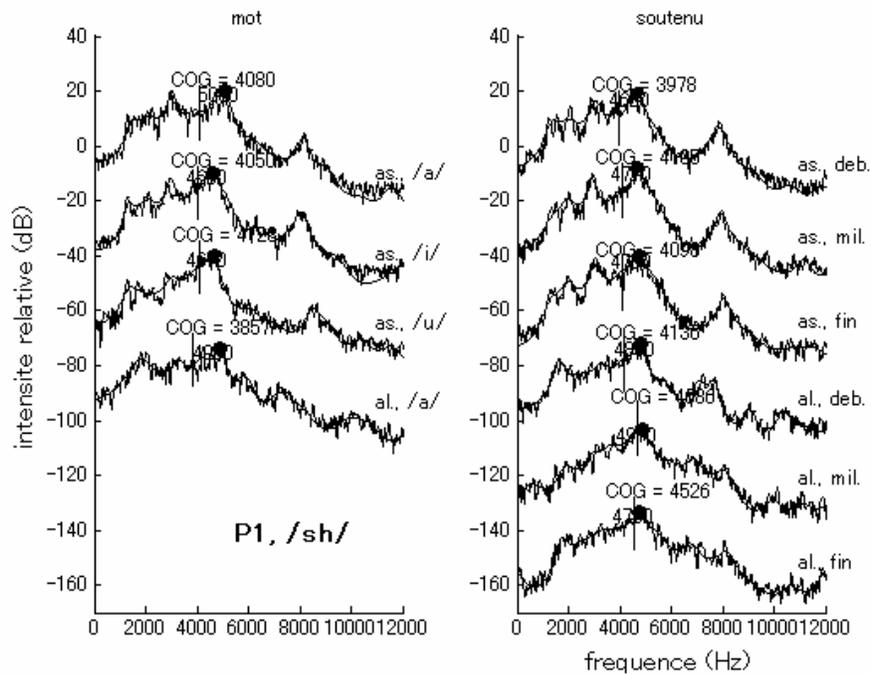


Figure 42. Spectres moyens de /ç/ ('c') ; locuteurs P1 (haut) et P2 (bas). Voir légende de la Figure 39.



II. Description acoustique des fricatives sibilantes

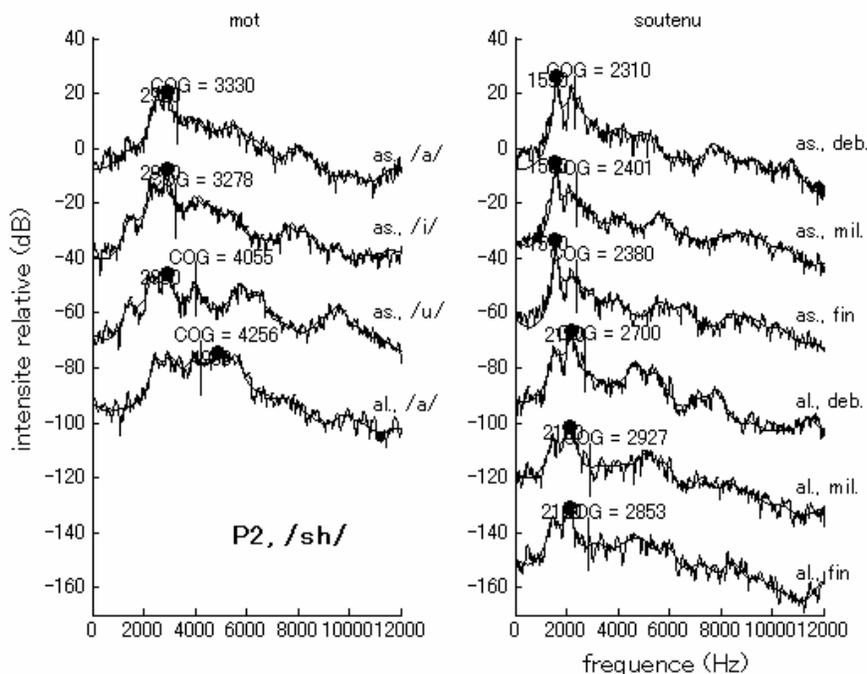


Figure 43. Spectres moyens de /s/ ('sh') ; locuteurs P1 (haut) et P2 (bas). Voir légende de la Figure 39.

En polonais, d'après la littérature, le centre de gravité n'est pas une variable satisfaisante pour décrire le contraste entre /ç/ et /s/ (Jassem, 1995 ; Zygis et Hamman, 2003 ; Nowak, 2006). De même, chez nos locuteurs, ni le centre de gravité ni la fréquence du pic principal ne sont suffisants pour discriminer /ç/ et /s/. Chez P1, leur fréquence est plus élevée pour /s/ que pour /ç/, et c'est l'inverse qui est observé pour P2. Toutefois, il existe également chez P1 un pic vers 1,8 kHz pour /s/, dont on ne trouve pas d'équivalent pour /ç/. Ce pic de basse fréquence est considéré comme caractéristique de /s/ dans Halle et Stevens (1997)⁵⁶. Ces auteurs l'attribuent à une résonance de la cavité postérieure. Nous examinons ce point en détail dans la section III-4.

L'intensité relative du pic vers 1,8 kHz étant moins importante que celle des pics de fréquence supérieure, le centre de gravité est tiré vers le haut chez P1. Chez P2, le pic vers 2 kHz est détecté comme étant le pic maximal dans toutes les conditions présentées dans cette figure, à l'exception du contexte /a/ en position allongé. En dehors de l'intensité

⁵⁶ Nowak (2006) a mesuré deux pics majeurs pour /s/, le plus bas des deux étant de fréquence systématiquement inférieure au pic principal de /ç/ (1 locutrice, trois contextes vocaliques).

II. Description acoustique des fricatives sibilantes

relative des pics, la forme spectrale semble globalement inchangée en fonction des conditions de production. Le centre de gravité étant sensible à l'intensité relative des pics, le même phénomène peut être à l'origine du chevauchement du centre de gravité entre les phonèmes /ç/ et /ʃ/ observée dans la littérature.

Pic principal en français, anglais, japonais et chinois

Bien que le spectre de bruit ne soit pas réductible à une fréquence, comme nous l'avons vu précédemment, le pic principal et le centre de gravité sont des mesures valables pour les spectres compacts qui représentent une bonne partie des spectres des sibilantes (v. annexe V). Nous présentons donc ici les données de tous les locuteurs de quatre langues sous une forme condensée à l'aide de la fréquence du pic le plus proéminent et, dans la section suivante, du centre de gravité, afin d'effectuer des comparaisons intra- et inter-langues du bruit de friction.

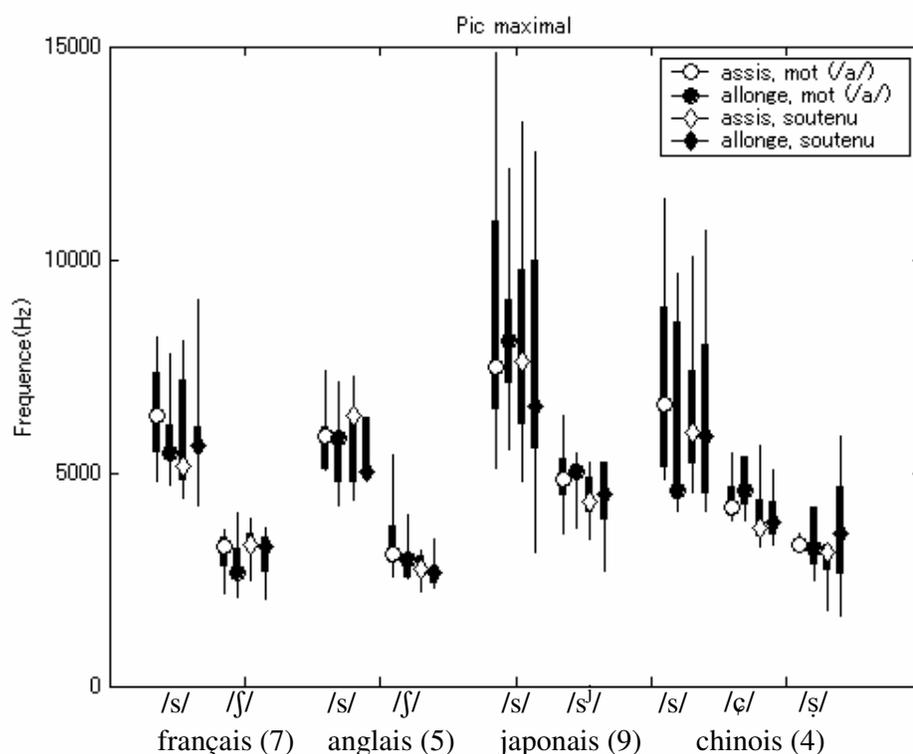


Figure 44. Distribution de la fréquence du pic principal en fonction des langues (français, anglais, japonais et chinois – le nombre de locuteurs est indiqué entre parenthèses) et des sibilantes, produites en position assise ou allongée, en contexte de mot (contexte /a/ ; excepté pour le chinois : /ə/) ou tenu. Les traits fins couvrent la totalité de la distribution (du minimum au maximum), les traits épais couvrent du premier au troisième quartiles, et le marqueur

II. Description acoustique des fricatives sibilantes

correspond au mode⁵⁷.

La distribution du pic maximal confirme la similitude des sibilantes en français et en anglais, observée précédemment sous l'angle des transitions formantiques. Le japonais ne possède pas, sur le plan acoustique, l'équivalent du /s/ français ou anglais, son /s/ présentant un pic plus élevé que le /s/ français et anglais (il peut avoisiner 15 kHz pour certains sujets). Le /s/ japonais est aussi remarquable par sa grande variation aussi bien inter-individuelle que liée la condition de production : le pic maximal se situe entre 3 et 13 kHz selon le locuteur. Cette variation est associée à un spectre plat (v. spectres individuels en Annexe V) – parmi les nombreux pics, l'un d'entre eux se trouve être le plus intense, un peu par hasard. En effet, le centre de gravité (**Figure 45**), qui est une sorte de moyenne, présente une variation inter-individuelle moins grande (le pic du /s/ japonais s'étend entre 5 et 11 kHz). Le /s^j/ japonais, quant à lui, présente un pic intermédiaire entre les /s/ et /ʃ/ français et anglais. Les distributions de /s/ et /ʃ/ en français et en anglais se chevauchent peu. Les /s/ et /s^j/ japonais se chevauchent un peu plus, en raison, surtout, de l'importante variation de /s/. En chinois, toutes les sibilantes se chevauchent plus ou moins, bien qu'il y ait une tendance /s/ > /ç/ > /ʃ/ ; /s/ étant nettement plus élevé que /ʃ/.

⁵⁷ Le mode est la valeur qui départage les effectifs en deux parts de même nombre d'échantillons.

II. Description acoustique des fricatives sibilantes

Centre de gravité en français, anglais, japonais et chinois

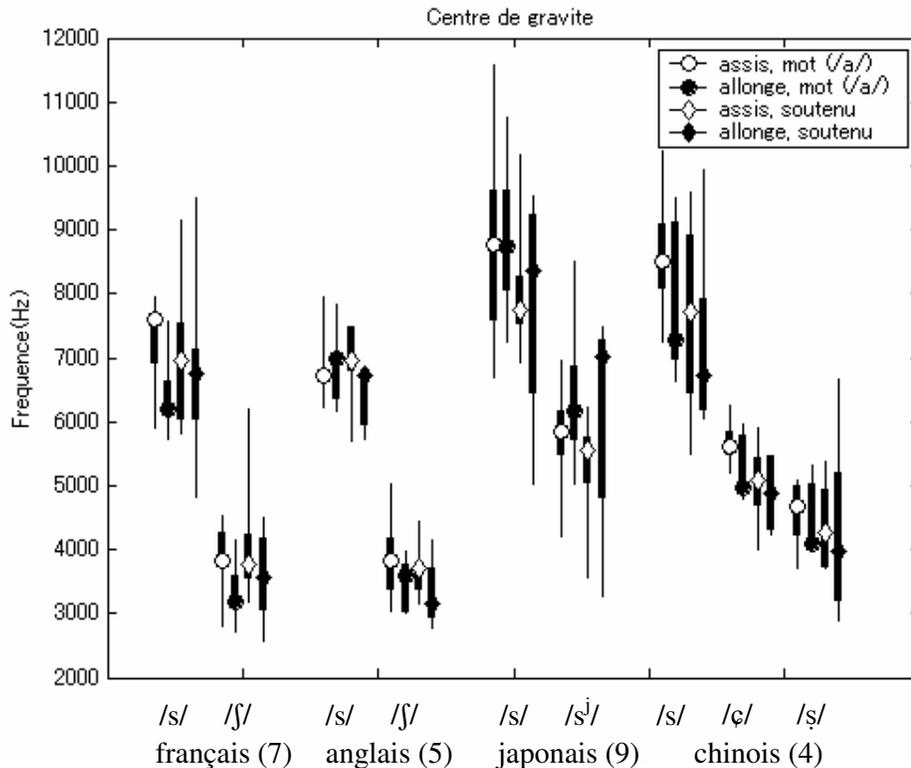


Figure 45. Distribution de la fréquence du centre de gravité spectral (calculé pour les fréquences de 1 à 15 kHz) en fonction des langues (français, anglais, japonais et chinois) et des sibilantes, produites en position assise ou allongée, en contexte de mot (contexte /a/ ; excepté pour le chinois : /ə/) ou tenu. V. légende de la Figure 44.

Le centre de gravité confirme globalement les observations faites pour le pic maximal. Toutefois, il semble être une meilleure mesure dans la perspective de discriminer entre les différentes sibilantes d'une même langue, car moins sensible aux maxima locaux (pics maximaux détectés « accidentellement » sur un spectre plat).

Quantification de la distance du bruit entre deux sibilantes

Afin de pouvoir apprécier quantitativement la distance acoustique du bruit de friction de deux sibilantes dans une langue, nous avons défini un score de séparabilité (*distinctness score* ou *Ds* en anglais) inspiré de la formule de la distribution t de Student. Cette formule pondère la différence de moyenne entre les deux échantillons (les deux phonèmes) en fonction de leur variance et de la taille des échantillons. Ces résultats ont été publiés dans Toda (2007).

II. Description acoustique des fricatives sibilantes

$$Ds = (M_a - M_b) / \sqrt{(S_a^2 + S_b^2) / n},$$

Dans cette équation, M dénote la fréquence moyenne inter-sujet (du centre de gravité), des catégories phonétiques a et b (ex. en français, /s/ et /ʃ/), S l'écart type et n le nombre de sujets.

Tableau 10. Score de séparabilité (Ds) du centre de gravité entre /s/ et /sj/ (japonais) et entre /s/ et /ʃ/ (français) dans trois contextes vocaliques. Le centre de gravité a été calculé ici pour l'intervalle fréquentiel de 1 kHz à 24 kHz. Le signe '*' indique que le centre de gravité est significativement différent entre les deux sibilantes dans le test T de rang appariés de Wilcoxon (bilatéral, au seuil de $\alpha = 0.05$).

	/a/	/i/	/u/ ou /ʊ/
Français	3.54*	3.80*	1.91*
Japonais	1.66*	-	1.41*

Les résultats montrent que, si la séparabilité entre /s/ et /ʃ/ est très grande en français dans les contextes /a/ et /i/ (ces valeurs correspondent à moins de 1 % de chevauchement de la distribution du t de Student), elle l'est nettement moins en contexte /u/ (qui, tout de même, correspond à moins de 5 % de chevauchement). Le score est moins bon en japonais, sans différence importante entre les contextes /a/ et /u/ (équivalent, tout de même, à 5 - 10 % de chevauchement). Nous pouvons donc affirmer que le centre de gravité du bruit de friction est un bon indice acoustique pour discriminer entre les deux phonèmes, /s/ et /ʃ/ en français, et également /s/ et /sʲ/ en japonais.

DISCUSSION

Nous avons observé que les transitions formantiques FV pouvaient présenter des tendances très différentes selon les langues. En français et en anglais, les valeurs formantiques à la jonction de la fricative varie de manière importante en fonction du contexte. En chinois, au contraire, c'est la cible, au cœur de la voyelle, qui varie en fonction de la sibilante qui la précède, avec une différence de F2 de plusieurs centaines de Hertz entre la sibilante palatale /ç/ et les autres, chez nos quatre locuteurs. Nous pouvons alors nous demander si cette différence relève du hasard ou s'il existe des contraintes spécifiques au système phonologique.

Une première explication, un peu simplificatrice, pourrait invoquer les risques de confusion. Le français et l'anglais possèdent un inventaire vocalique important en comparaison au chinois. Mais à l'inverse, l'inventaire de leur système de sibilante est plus réduit (contraste de 2 « lieux ») que le chinois, ce dernier possédant trois lieux d'articulation. Par conséquent, en français et en anglais, le risque de confondre les voyelles entre elles est potentiellement plus grand qu'en chinois, tandis que le risque que se produise une confusion entre les sibilantes est plus réduit. Par conséquent, la coarticulation favoriserait l'identité des voyelles au détriment des sibilantes en français et anglais, et à l'inverse, elle favoriserait l'identité des sibilantes en chinois. Le système tonal pourrait expliquer en partie la résistance des voyelles à la coarticulation, comme à la réduction (cf. Su, 2003).

Cette interprétation peut-elle s'appliquer au japonais ? Le japonais possède à la fois un inventaire réduit de sibilantes (2 « lieux ») et un inventaire vocalique réduit. D'après l'interprétation que nous venons de proposer, on pourrait donc prédire que la coarticulation devrait être partagée équitablement entre consonne et voyelle. Nos résultats montrent cependant que non seulement la cible (voyelles /a/ et /u/) est relativement invariable entre les deux contextes de sibilantes, mais la jonction est également stable indépendamment du contexte vocalique. En un mot, les séquences sibilante-voyelle en japonais sont hyper-articulées en comparaison aux autres langues.

En ce qui concerne l'hyper-articulation des sibilantes, l'utilisation de géminées pour le japonais, au lieu de consonnes simples pour les autres langues (cf. corpus linguistique en annexe II) pourrait être mise en cause. Toutefois, la relative invariance en fonction des contextes rejoint l'invariance inter-sujets sur le plan articulatoire que nous avons observée au chapitre I-2 (dispersion dans l'espace articulatoire). Nous avons interprété la proximité entre /s/ et /s'/ dans la dimension antéro-postérieure (et la faible variation inter-individuelle dans cette dimension, en comparaison au groupe français-anglais) comme liée à la nécessité de maintenir une analogie avec l'opposition palatal/non palatal des autres consonnes. En effet, rappelons qu'il existe un paradigme palatal/non palatal étendu sur tout le système consonantique, y compris les occlusives.

La dispersion dans l'espace articulatoire étant limitée à la région antérieure, le contraste reposait, sur le plan articulatoire, essentiellement sur le degré de palatalisation. Bien que l'inventaire des sibilantes soit réduit, la résistance des sibilantes japonaises à la

II. Description acoustique des fricatives sibilantes

coarticulation telle qu'elle se manifeste sur le plan acoustique pourrait donc découler de ces contraintes.

Pourquoi les voyelles japonaises résistent-elles à la coarticulation ? En dehors de la possibilité que, pour une raison quelconque, les locuteurs japonais avaient effectivement hyper-articulé, les explications suivantes peuvent être proposées.

- En japonais, les voyelles sont assez centrales (moins extrêmes), donc en fait il n'y aurait pas de « résistance » à la coarticulation, mais simplement, une distance moindre du locus de la fricative à la cible de la voyelle ;
- La structure syllabique est plus simple en japonais (typiquement CV) qu'en chinois (couramment CVC et CV₁V₂, dont diphtongues et semivoyelles). Les noyaux syllabiques sont donc d'ordinaire susceptibles de subir une réduction plus importante en chinois ;
- En japonais, il n'existe pas de contraste /ç/-/ʃ/ comme en chinois, dont le bruit de friction tend à se chevaucher. La qualité de la voyelle viendrait renforcer le contraste /ç/-/ʃ/ en chinois, tandis qu'en japonais, la différence du bruit entre /s/ et /s^j/, associée à une valeur formantique caractéristique à la jonction, permettrait d'atteindre un contraste suffisant, de telle sorte qu'il ne serait pas nécessaire d'aller jusqu'à altérer la qualité de la voyelle pour renforcer le contraste existant.

Des études approfondies, qui dépassent le cadre de cette thèse, seraient nécessaires pour trancher cette question.

Il peut également être intéressant de mettre en parallèle la forte coarticulation des voyelles en chinois avec la phonologisation de la qualité des voyelles en fonction des consonnes en russe. Le russe possède un système consonantique où toutes les consonnes se dédoublent en version vélarisée ('dure') ou palatalisée ('douce'). Cependant, concrètement, la palatalisation et la vélarisation sont réalisées par la syllabe en entier, avec des noyaux syllabiques de qualité très différente. Les indices contrastifs dans les inventaires riches de sibilantes pourraient donc davantage faire appel aux voyelles adjaçantes que dans les langues de petits inventaires.

Quant au bruit de friction, la fréquence du pic maximal, ainsi que le centre de gravité comme mesures du bruit de friction mettent en évidence un excellent contraste entre /s/ et /ʃ/ en français et en anglais, en accord avec la littérature (ex. Hughes et Halle, 1956 ; Jongman *et al.*, 2000). Il n'est alors pas surprenant que le bruit de friction constitue l'indice perceptif principal dans l'identification du lieu d'articulation des sibilantes en anglais (ex. Harris, 1958, Heinz et Stevens, 1961). Il est vraisemblable qu'il en soit ainsi en français également, d'autant plus qu'il existe une grande variation contextuelle de la direction de mouvement des formants à la jonction fricative-voyelle, comme nous venons de le rappeler, et qui rend sans doute plus difficilement interprétable par l'auditeur les transitions formantiques.

A la lumière des données formantiques et du bruit, nous sommes maintenant en mesure de

II. Description acoustique des fricatives sibilantes

proposer une explication quant à l'existence de deux stratégies articulatoires (« recul » / « déformation ») pour le /ʃ/ français⁵⁸. Ces deux stratégies auraient pour but l'obtention d'un bruit de friction le « meilleur » possible : le plus proche de la cible acoustique de /ʃ/, et/ou le plus distinct de /s/⁵⁹. Pour certains locuteurs, ce but serait le mieux servi avec la stratégie « recul » ; pour d'autres, ce serait la stratégie « déformation ». Le coût de ce choix stratégique est une variation individuelle de la fréquence des formants à la jonction, la stratégie « déformation » donnant lieu à une articulation palatalisée, qui tendrait à entraîner un F2 plus élevé à la jonction (le mécanisme articulatoire de l'élévation du F2 à la jonction de la fricative est discuté en III- 3). Toutefois, si les transitions ne constituent qu'un indice mineur pour l'identification du lieu d'articulation de la sibilante, ce « coût » serait négligeable par rapport aux bénéfices obtenus en termes d'efficacité acoustique du bruit et/ou d'économie d'efforts articulatoires. Cette hypothèse devra être testée dans une expérience ultérieure où des données dynamiques seront mises en oeuvre.

Le contraste du bruit de friction entre /s/ et /s^j/ en japonais s'avère moins grand, tout en restant assez bon. Cela ne signifie pas que les sibilantes japonaises devraient être plus facilement confondues qu'en français ou en anglais. En effet, la différence du F2 à la jonction FV est systématique (s^j>s) et significative (p<0,05) entre /s/ et /s^j/ en japonais, contrairement au français où cette relation n'est observée qu'en contexte /a/ seulement (cf. Toda 2007). De plus, cette relation est renforcée lorsqu'on effectue une normalisation inter-locuteurs (cf. infra) à l'aide de la valeur du F2 au cœur de la voyelle⁶⁰.

Normalisation du centre de gravité

Il est intéressant de noter qu'une normalisation individuelle permet d'améliorer le score de séparabilité du centre de gravité du spectre de bruit (cf. **Tableau 10**). En effet, les valeurs formantiques à la jonction et au centre de la voyelle (**Figure 37**) présentent souvent une variation inter-individuelle allant dans le même sens (les segments sont parallèles), ce qui pourrait suggérer qu'ils résultent passivement d'un facteur propre à l'individu, par exemple la taille du conduit vocal. De fait, on sait que les formants des voyelles varient en fonction du sexe (ex. Peterson et Barney, 1952), et il est aussi connu que les femmes ont un conduit vocal plus court que celui des hommes, en raison, principalement, de la position plus élevée du larynx. Un phénomène allant dans le même sens est observé pour le bruit de friction de /s/ : il est plus aigu pour les enfants, suivis des femmes, suivies des hommes (avec une pente spectrale significativement différente ; Nissen et Fox, 2005 : p. 2574-2575). De plus, les frontières catégorielles dans la discrimination /s/-/ʃ/ en anglais changent, pour les mêmes stimuli de bruit, en fonction du

⁵⁸ Nous n'avons pas examiné l'existence de telles stratégies en anglais, en considérant que le nombre de locuteurs (5) était insuffisant.

⁵⁹ En effet, nous ne connaissons pas précisément quelle est la cible ultime.

⁶⁰ Le score de séparabilité est alors de 1,39 (contexte /a/) et 2,27 (contexte /u/), comparable à celui du bruit de friction sans normalisation inter-individuelle.

II. Description acoustique des fricatives sibilantes

sexe du locuteur qui produit le contexte vocalique (Mann et Repp, 1980). Ce phénomène suggère que les auditeurs sont capables d'exercer une normalisation du bruit de friction en fonction des caractéristiques de la voyelle propre au locuteur. Le contraste entre les différentes sibilantes effectivement perçue devrait donc en réalité être plus grand que celui que nous mesurons de manière absolue. Nous avons donc tenté de normaliser le bruit de friction afin d'évaluer la distance « perçue » entre les sibilantes. Les résultats détaillés ont été publiés dans Toda (2007).

Pour ce faire, un coefficient de pondération (normalisation individuelle) a été calculé à partir du rapport entre la fréquence des formants de la voyelle (qui suivait la sibilante) du locuteur et la moyenne du groupe. Par exemple, avec F2 à la jonction, cela donne :

$$CP2_{\text{jonct.sujet}} = 1/(F2_{\text{jonct.sujet}} / F2_{\text{jonct.moyenne}})$$

Ce coefficient a été calculé avec les formants F1 à F4, mesurés à la jonction ou au centre de la voyelle suivante.

En japonais, presque tous les formants, dans les deux positions, apportent une amélioration du score de séparabilité. Les valeurs les plus élevées sont obtenues avec un coefficient de pondération basé sur le F2 du centre de la voyelle : 2,13 et 1,62 pour les contextes /a/ et /u/, respectivement, contre 1,66 et 1,41 sans normalisation (cf. **Tableau 10**). Il existe donc dans le signal acoustique des suites sibilante-voyelle, en japonais, des indices potentiels qui permettent de mieux situer le bruit de friction dans l'espace perceptif.

En français, l'effet de la normalisation est variable selon la voyelle. La voyelle /a/ permet d'atteindre le plus haut score de séparabilité (5,51 avec le F2 à la jonction), tandis qu'en contexte /u/, le score le plus élevé plafonne à 2,14 (F1 centre). De nombreuses combinaisons entraînaient une dégradation du score. Malgré tout, le contraste du bruit entre les deux sibilantes étant déjà très important sans normalisation (**Tableau 10**), il reste globalement élevé avec normalisation, pour un score de séparabilité supérieur à 2 dans 18 cas sur 24 (trois contextes vocaliques, F1 à F4, jonction ou centre), contre 3 cas sur 16 (deux contextes vocaliques contrastifs, F1 à F4, jonction ou centre) en japonais.

III. MODÉLISATION ACOUSTIQUE DES FRICATIVES SIBILANTES

Résumé du chapitre III

Ce chapitre présente les résultats d'expériences de modélisation acoustique mettant en évidence le lien entre la forme du conduit vocal et les propriétés acoustiques (résonances) du spectre de bruit.

En III-1, l'effet des principaux paramètres de modélisation est examiné à l'aide de configurations simples de sibilantes. Le type (monopôle/dipôle) ou l'emplacement de la source déterminent l'apparition de paires pôle-zéro pour les cavités isolées (cavité postérieure), peu significatives pour la forme du spectre, ou de pôles (de fréquence constante) et de zéros libres pour la cavité antérieure. L'adjonction d'une cavité sublinguale entraîne des effets équivalents à l'allongement de la cavité antérieure.

En III-2, l'effet de la longueur du chenal palatal et de la cavité antérieure dans une configuration de type [ʃ] est examiné. En vertu de l'interaction qui se produit entre ces deux cavités, leur longueur respective est complémentaire au regard de la fréquence de coupure. Par ailleurs, des discontinuités sont observées dans l'évolution de la fréquence de coupure, dues au croisement des paires pôle-zéro de la cavité postérieure. La mise en correspondance avec les longueurs normalisées issues de mesures faites sur les données IRM suggère que les sibilantes naturelles sont produites dans les zones stables. Toutefois, il est peu plausible que les discontinuités prédites délimitent les frontières phonémiques de manière universelle. En effet, il semble exister de multiples possibilités laissées au choix des locuteurs pour réaliser les contrastes.

En III-3, l'effet des configurations acoustiquement équivalentes (d'après la fréquence de coupure) sur les transitions formantiques est examiné pour la séquence /aʃa/. Le locus plus élevé du F2 du /ʃ/ palatalisé est expliqué par une cavité postérieure plus courte. Les transitions du F3 et du F4 sont également modifiées, avec un rapprochement de F3 et F4 pour le /ʃ/ apical ; F3 étant affilié à la cavité antérieure pour le /ʃ/ apical et au chenal

III. Modélisation acoustique des fricatives sibilantes

palatal pour le /ʃ/ palatalisée. La configuration du conduit vocal selon le type masculin ou féminin affecte également l'aspect des transitions (en particulier F3 et F4), pour un même type de /ʃ/ palatalisé. Cette modification s'explique par un changement d'affiliation des formants dû à une cavité postérieure plus courte.

La section III-4 examine l'affiliation formantique dans les spectres de bruit naturels par le biais de la simulation acoustique avec des fonctions d'aire réelles. L'aire du conduit vocal de deux locuteurs du polonais mesurée sur les données IRM est utilisée. D'après les propriétés acoustiques de conduits vocaux tronqués, le pic ultra-bas de /ʃ/ chez ces deux locuteurs est affilié à la cavité antérieure, contrairement aux hypothèses avancées par Halle et Stevens (1997). En effet, la cavité antérieure nettement plus grande pour /ʃ/ que pour /ç/ explique la différence de fréquence du premier pic spectral. Pour /ç/, le chenal palatal est également impliqué dans les pics majeurs qui définissent l'enveloppe spectrale. De plus, la cavité labiale s'avère être responsable de formants indépendants en raison de la forte constriction dentale qui limite le couplage avec la cavité orale antérieure. L'indépendance acoustique de la cavité labiale doit être considérée comme une caractéristique fondamentale des sibilantes étant donné le caractère universel de la constriction dentale étroite (I-4). Par conséquent, la protrusion labiale des sibilantes relève de mécanismes acoustiques distincts de l'arrondissement labial des vocoïdes ([u, y, w, ɪ...]), où les lèvres forment un résonateur de Helmholtz avec la cavité orale. La protrusion labiale dans /ʃ/ ou /ʒ/, au contraire, permet d'abaisser la fréquence du formant labial. Cet abaissement contribuerait à garantir le contraste avec /s/ dont le pic spectral se situe dans les mêmes fréquences (cf. II-2).

La section III-5 examine l'affiliation formantique à l'aide de conduits vocaux 3D. Les résultats de simulation acoustique en trois dimensions (méthode des éléments finis) avec des conduits vocaux entiers et tronqués confirment la prédominance des résonances des cavités antérieures dans l'enveloppe spectrale lorsque la source de bruit est placée près des incisives. Les conduits vocaux sans les lèvres et des lèvres seules ont permis de vérifier l'affiliation du pic spectral vers 5 – 7 kHz de /ʃ/ (Fr1) et /ʒ/ (P1) à la cavité labiale.

III. Modélisation acoustique des fricatives sibilantes

INTRODUCTION

Les deux chapitres précédents ont permis de mettre en évidence l'articulation des sibilantes tenues dans des langues variées, ainsi que leurs caractéristiques acoustiques. Toutefois, les caractéristiques articulatoires comme acoustiques sont complexes, et il est par conséquent difficile de comprendre, telles qu'elles se présentent, la relation causale qu'elles entretiennent. Ce dernier chapitre a comme objectif d'éclaircir ce point, pour plusieurs types de sibilantes qui viennent d'être décrites, avec l'aide de modèles simples et de modèles réalistes. En effet, la modélisation offre la possibilité d'examiner l'effet acoustique de différents paramètres articulatoires manipulés indépendamment les uns des autres et de manière systématique. En premier lieu, l'aspect statique (bruit de friction) sera examiné. En second lieu, l'aspect dynamique (transitions formantiques) sera discuté.

Mécanisme général de production des fricatives sibilantes

Le bruit de friction des fricatives résulte des turbulences qui sont créées dans le conduit vocal lorsqu'un flux laminaire de l'air émerge de la constriction et se développe dans la cavité en aval (cavité antérieure). Le seuil au-delà duquel les turbulences surviennent est décrit par le nombre de Reynolds. Ce nombre est proportionnel à la vitesse de particule et à la taille effective du passage (Flanagan 1972 : 55). Pour les sibilantes, la présence d'un obstacle est également considérée comme primordiale dans l'intensité et l'enveloppe spectrale de la source de bruit qui les caractérise. En effet, la conversion aéro-acoustique des turbulences en ondes acoustiques serait plus efficace en la présence d'obstacles. Shadle (1985) et Pastel (1987) ont étudié les propriétés du bruit de friction généré par des modèles mécaniques simulant le conduit vocal, avec ou sans obstacle. Nous présentons ces études plus en détail dans la section consacrée aux propriétés de la source. Howe et McGowan (2005) ont montré la relation entre le débit et l'amplification de l'intensité acoustique en présence d'un obstacle semblable aux incisives.

Pour les fricatives de type obstacle (telles que [s], [ʃ], [ç] et [x], p. 178-189), Shadle (1985 : p. 123) conclut des résultats de ses expériences qu'une indépendance source-filtre peut être supposée. Cela signifie que les propriétés résonancielles du conduit vocal n'ont pas, ou peu, d'incidence sur les propriétés de la source. Comme exemple du cas contraire, on peut citer le sifflement, où, les volutes de la turbulence sont renforcées par une cavité de résonance dont la taille en est proche. Il en résulte une excitation très importante à une des fréquences de résonance de cette cavité. Shadle et Scully (1995) ont observé qu'un sifflement pouvait survenir pour des /s/ en contexte /u/ (chez un locuteur francophone). Toutefois, comme le sifflement n'est pas une caractéristique pertinente du point de vue de l'opposition phonémique des sibilantes⁶¹, nous n'allons considérer dans ce chapitre que le

⁶¹ Dans aucune langue du monde, à notre connaissance. Les langues sifflées (ex. Rialland, 2003), utilisent le sifflement comme mécanisme de « phonation », mais il n'y a pas d'alternance entre le sifflement et une autre modalité de production de source qui permette de réaliser des contrastes.

III. Modélisation acoustique des fricatives sibilantes

cas général, qui n'implique pas de sifflement.

Le bruit de friction des sibilantes peut donc être analysé sous l'angle de la théorie source-filtre, où la source de bruit, résultant des turbulences, est amplifiée ou atténuée en fonction des propriétés résonnantes du conduit vocal décrites par la fonction de transfert. D'après la littérature (v. sections suivantes), le spectre à long terme de la source de bruit des fricatives et des sibilantes en particulier serait relativement plat, avec une prééminence d'une largeur de bande importante. Par conséquent, les caractéristiques distinctives du bruit de friction des sibilantes résulteraient essentiellement du filtre. Cette thèse s'intéressera donc uniquement aux modes de résonance du conduit vocal des sibilantes et non à l'aspect aéro-acoustique de la génération des sources de bruit.

La source de bruit

La source de bruit qui excite le conduit vocal des fricatives résulte de la fluctuation locale [aléatoire] de vitesse volumétrique du flux d'air due à la turbulence (Stevens, 1998 : p.100).

Il existe trois cas de figure où de la turbulence est créée pour donner lieu à un bruit (Stevens, 1998 : p. 100-101) : (1) lorsqu'un flux d'air provenant d'une constriction est libéré dans un espace ouvert (la source de bruit est distribuée sur une région en aval de la constriction)⁶² ; (2) lorsqu'un flux d'air heurte un obstacle. (L'obstacle exerce alors une force fluctuante sur l'air ; c'est à l'obstacle que se situe la source)⁶³ ; (3) lorsque des fluctuations aléatoires [de vitesse] surviennent au flux d'air à la surface d'une constriction, à cause de ses irrégularités (la source est distribuée le long de la constriction)⁶⁴. Dans le premier cas, la source principale provient de l'ajout d'un volume d'air. La source est alors de type monopole, qui doit être modélisée comme une source de débit (en parallèle), ou de courant dans un circuit analogue (comme la source de voisement). Dans les deux autres cas, il n'y a pas d'apport de volume. La source principale qui en résulte est alors de type dipôle, qui peut être conçue comme la combinaison de deux sources monopôles de phase opposée placées côte à côte (Pastel, 1987 : 21). La source dipôle possède donc une orientation, son amplitude maximale se situant dans le sens longitudinal, et son amplitude dans le sens transversal tendant à être nulle. La source dipôle doit être modélisée comme une source de pression, ou de voltage (en série) dans un circuit analogue (Shadle, 1985).

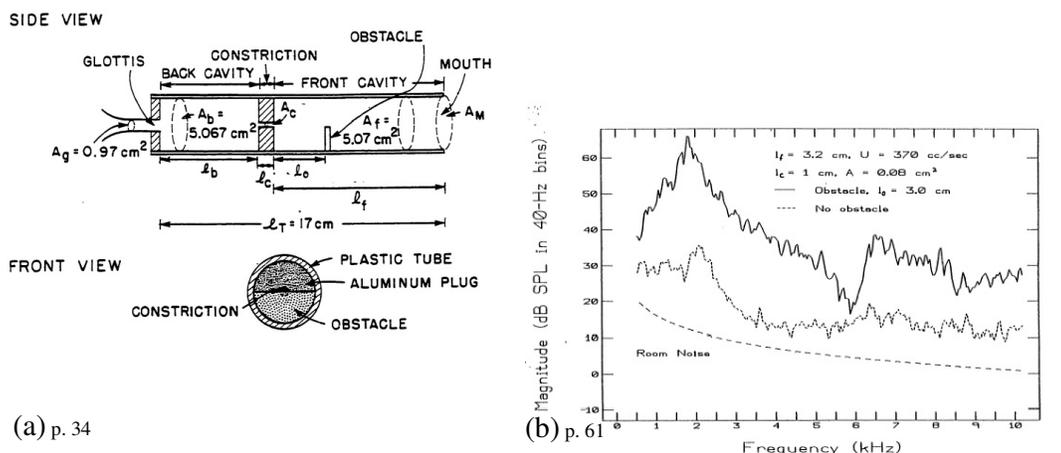
D'après les expériences de Shadle (1985) et de Pastel (1987) portant sur des modèles mécaniques, les configurations avec obstacle produisent un bruit d'intensité supérieure aux modèles sans obstacle (comme indiqué dans la **Figure 46**).

⁶² Ex. [f], ou mieux, [ϕ], où la forme de la constriction, bilabiale, est plus simple.

⁶³ Ex. [ʃ].

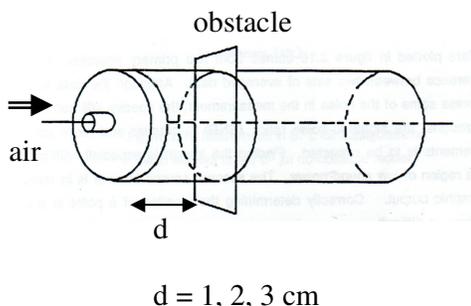
⁶⁴ Ex. [ç].

III. Modélisation acoustique des fricatives sibilantes

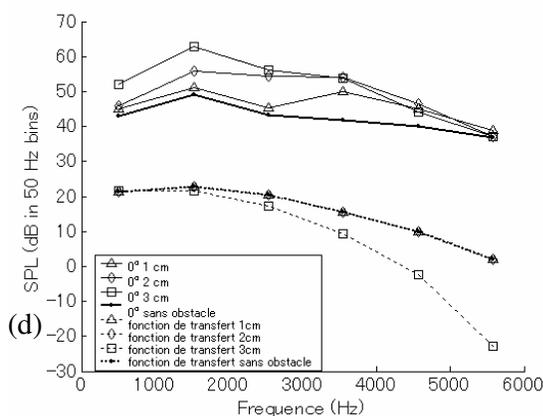


(a) p. 34

(b) p. 61



(c) p. 49



(d)

Figure 46. (a) et (c) : schéma des modèles mécaniques du conduit vocal de Shadle (1985) et « 0° avec obstacle » (le flux d'air entrant est parallèle au mode principal de résonance du modèle) de Pastel (1987), respectivement ; (b) magnitude du bruit en dB SPL obtenu par le modèle de Shadle (1985) en (a) ; avec (courbe du haut) ou sans (courbe du milieu) obstacle. En (d), magnitude du bruit en dB SPL du modèle de Pastel (1987 ; illustré en c), aux fréquences de résonance du modèle, ainsi que les fonctions de transfert théoriques. Le modèle est alimenté par un débit d'air de 442 cm³/sec (l'arrivée d'air se situe à gauche sur le schéma (c)). Les trois courbes du haut en (d) sont obtenues avec les configurations où l'obstacle se trouvait à 1, 2 et 3 cm en aval du flux entrant. La courbe épaisse correspond à une configuration sans obstacle. Les courbes pointillées, en bas, indiquent l'enveloppe de la fonction de transfert⁶⁵ (aux fréquences de résonance) du modèle mesurant 17 cm de long, globalement

⁶⁵ Les fonctions de transfert divergent les unes des autres en raison de la fréquence des antiformants, qui varie selon la position de la source (localisée à l'obstacle). L'intérêt essentiel de cette figure est de montrer que la présence d'un obstacle donne lieu à un bruit plus intense.

fermé à un bout (gauche) et ouvert à l'autre (droite). D'après les tableaux de Pastel (1987), p. 101 et 104.

L'enveloppe spectrale de chacune de ces sources peut difficilement être mesurée. Shadle (1990, 1991) a montré que l'enveloppe de la source de bruit (composite, donc⁶⁶) était susceptible de varier en fonction de la morphologie du conduit vocal ; en l'occurrence, la présence ou absence d'une cavité sublinguale dans /s/. Les résultats d'analyse par synthèse de Narayanan et Alwan (2000) vont également dans ce sens, bien qu'il soit en réalité impossible de déterminer l'enveloppe spectrale d'une source tant qu'on ne connaît pas son emplacement (la fonction de transfert du conduit vocal varie en fonction de l'emplacement de la source), et d'autant plus que la source est probablement distribuée, et non pas localisée à un point précis.

Position de la source de bruit dans le conduit vocal

Comme nous l'avons mentionné précédemment, le bruit provenant de turbulences peut théoriquement se situer (1) à la sortie de la constriction ; (2) à l'obstacle ; (3) à l'intérieur de la constriction lorsque celle-ci comporte des irrégularités. Des expériences attestent empiriquement ces différentes positions.

Fant (1960) a effectué des simulations acoustiques à l'aide d'un dispositif analogique qui permettait de calculer la fonction de transfert du conduit vocal représenté par une fonction d'aire (la fonction d'aire étant dérivée de données radiographiques de voyelles et consonnes russes). Pour les consonnes /ʃ/ ('š') et /ç/ ('šč'), il constate que la fonction de transfert calculée avec une source de niveau constant sur toutes les fréquences (équivalent d'un bruit blanc) localisée à l'intérieur de la constriction correspond le mieux au spectre du bruit naturel (**Figure 47**). En observant les courbes de Fant, il nous semble cependant que si une source de -12 dB/oct (pour /ʃ/) ou -6 dB/oct (pour /ç/) avait été utilisée, la source dentale aurait également produit un résultat tout à fait convenable.

⁶⁶ La source de bruit est supposée être composée de sources monopôle, dipôle et quadrupôle.

III. Modélisation acoustique des fricatives sibilantes

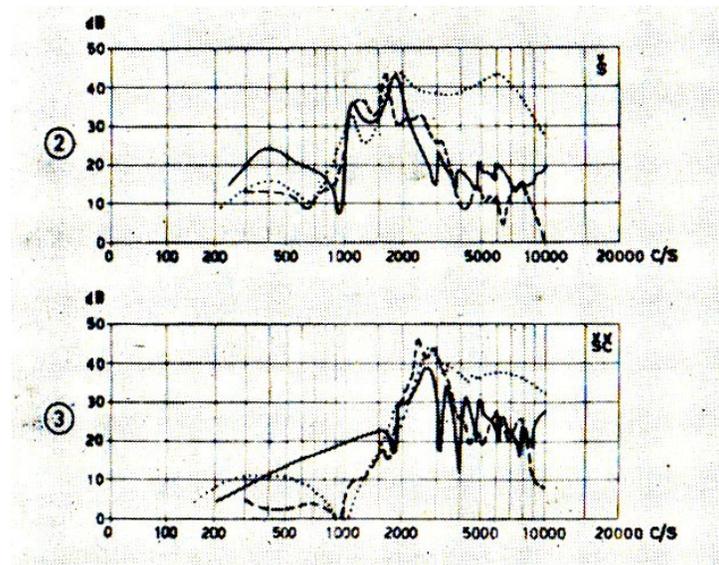


Figure 47. Spectre de bruit (ligne pleine) des sibilantes ② /ʃ/ et ③ /ç/ du russe, et la fonction de transfert calculée avec une source de niveau constant localisée dans le chenal palatal (ligne discontinue) ou aux incisives (ligne pointillée). Reproduction d'un détail de la figure 2.6-5 de Fant (1960) :175.

Shadle (1990, 1991), quant à elle, a montré, dans une expérience où elle a calculé une *fonction de cohérence* entre la pression acoustique mesurée à différents endroits du conduit vocal (modèle de 'niveau III', de « 2,5 dimensions », avec un contour sagittal réaliste mais de largeur constante) et la pression rayonnée, que la source majeure pour [ʃ] se situait aux incisives inférieures (**Figure 48**). Dans un modèle de 'niveau IV' (profil sagittal et aire réalistes, mais de sections rectangulaires), la source a été localisée aux incisives supérieures pour le même [ʃ]. Les enveloppes spectrales de la source, reproduites en **Figure 48**, suggèrent que la source possède un spectre globalement plat, avec un pic d'une grande largeur de bande à des fréquences différentes selon les fricatives. Le débit affecte surtout le niveau sonore de la source, qui garde une enveloppe spectrale globalement constante. Ces modèles du conduit vocal étaient dérivés des données de Fant (1960). Or, lorsqu'on tient compte des conclusions de Fant, il est possible que ce [ʃ] comporte une source distribuée, dont une partie est localisée à la constriction et une autre aux incisives. Il est regrettable que la pression au niveau de la constriction n'ait pas été examinée pour le modèle de niveau III basé sur les données de Fant (1960), ce qui aurait pu nous éclairer sur l'importance relative de la source à la constriction, si elle a lieu, et de la source dentale. Pour la fricative non sibilante [ç], la source serait vraisemblablement située à l'intérieur de la constriction. Étant donné que la sibilante [ç] présente une constriction longue et étroite similaire à cette fricative, il est donc possible qu'une part importante de la source de [ç] survienne à l'intérieur de la constriction. Dans une étude antérieure utilisant des modèles mécaniques simples, Shadle (1985 : 178-179) affirme que la source de bruit des fricatives [ç] et [x] est vraisemblablement constituée de sources de pression distribuées à l'intérieur de la constriction.

III. Modélisation acoustique des fricatives sibilantes

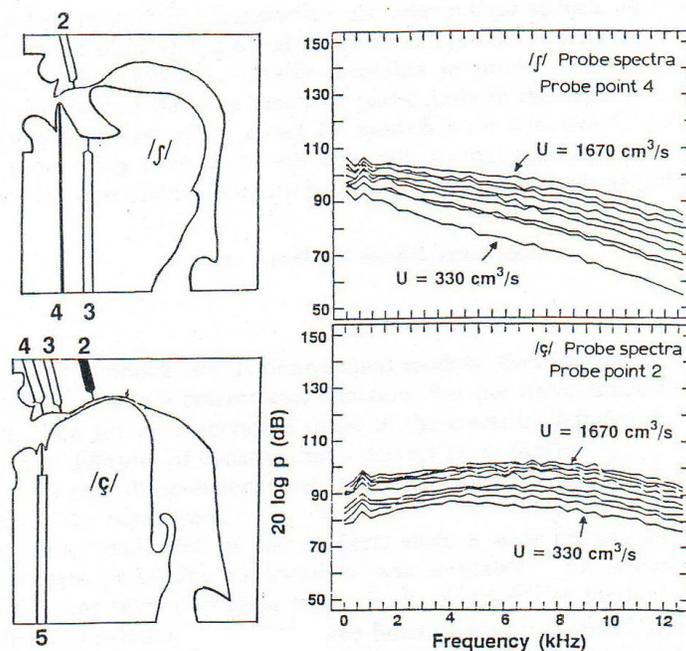


Figure 48. D'après Shadle (1991 : 415). À gauche, représentation schématique des modèles de « niveau III » en plexiglas dont le profil sagittal est exact mais pas la forme ni l'aire des sections. L'emplacement des micros sondes est numéroté. A droite, spectre de bruit mesuré à l'emplacement du micro sonde 4 (/ʃ/) et 2 (/ç/), respectivement, qui présentaient la corrélation minimale avec le spectre du son rayonné (mesuré à distance), ce qui suggère que la source est générée à cet endroit. Les profils sagittaux des modèles sont adaptés de Fant (1960)⁶⁷.

Narayanan et Alwan (2000) ont obtenu la meilleure correspondance entre les spectres calculés (à partir de fonctions d'aire issues de données IRM) et estimés à partir des enregistrements en combinant une source monopole à la sortie de la constriction, et une ou deux sources dipôles, situées au niveau des incisives et sur une paroi de la cavité antérieure (pour /ʃ/ et /ʒ/ seulement).

En résumé, nous pouvons conclure qu'il est vraisemblable que plusieurs sources de bruit contribuent à l'excitation du conduit vocal dans les fricatives sibilantes. Ces sources seraient de différents types (monopôles et dipôles), situées à l'intérieur de la constriction, à sa sortie, à l'intérieur de la cavité antérieure ou à l'emplacement des incisives, et dépendraient de la morphologie du conduit vocal. Leur enveloppe semble toutefois globalement plate, et dans ce cas, les caractéristiques spectrales du bruit de friction des sibilantes proviendraient principalement des propriétés acoustiques (fonction de

⁶⁷ Bien que servant à modéliser [ç], le profil sagittal du bas de cette figure correspond à la consonne russe /j/ dans Fant (1960 :170).

transfert) du conduit vocal.

Modes de résonance

Comme nous l'avons mentionné, ce chapitre s'intéressera aux résonances du conduit vocal des sibilantes. Le conduit vocal peut être vu comme un ensemble de résonateurs simples connectés les uns aux autres. Lorsque les cavités de résonance sont séparées par des discontinuités géométriques importantes⁶⁸, les cavités deviennent acoustiquement indépendantes. D'après Fant (1960), il existe trois types de mode de résonances⁶⁹ correspondant aux trois types de résonateurs simples, illustrées en Figure 49 : (a) la résonance de Helmholtz; (b) les résonances multiples impaires d'un quart d'onde; (c) les résonances multiples d'une demi-onde. Toutes les configurations du conduit vocal peuvent être considérées, en première approximation, comme étant la combinaison de résonateurs appartenant à un de ces trois types, ou d'un type intermédiaire.

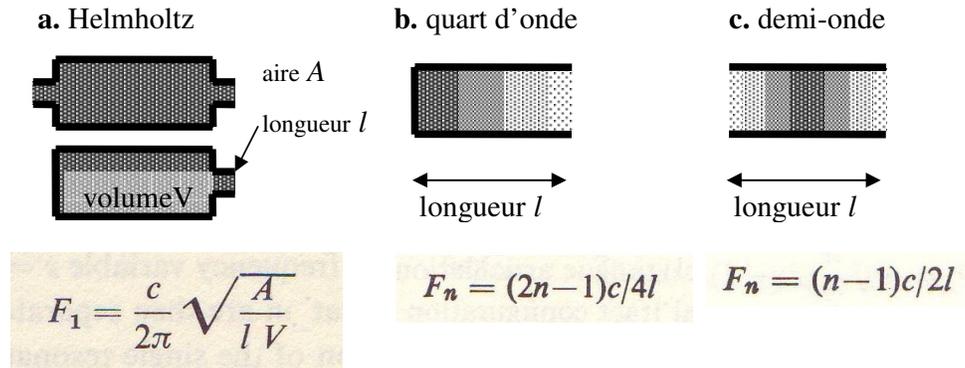


Figure 49. Représentation schématique de différents types de résonateurs et les formules qui permettent de calculer leurs fréquences de résonance approximatives F_n (en supposant qu'il n'y a aucune perte) avec la vitesse du son c . Le gris de remplissage représente la distribution de pression à l'intérieur de ces cavités pour leur premier mode de résonance (foncé : pression élevée ; pâle : pression faible). (a) Cavités comportant un petit orifice : résonateur de Helmholtz ; (b) tube dont une des extrémités est fermée et l'autre ouverte : résonateur quart d'onde (c) tube aux deux extrémités ouvertes : résonateur demi-onde.

Théoriquement, le spectre des sibilantes peut donc être appréhendé de manière analytique, chacun des pics, ou formants, pouvant être associé à une résonance provenant d'une cavité, à condition que le couplage acoustique entre les différentes cavités ne soit pas trop

⁶⁸ Une différence de d'aire de section de 1 à 10 peut être considérée comme un seuil au-delà duquel deux cavités peuvent être vues comme acoustiquement indépendantes.

⁶⁹ Trois modes pertinents, lorsqu'on ne tient compte de la propagation plane de l'onde acoustique dans le sens longitudinal des résonateurs.

III. Modélisation acoustique des fricatives sibilantes

important⁷⁰.

La différence principale entre le spectre d'une sibilante et le spectre d'une voyelle tient à l'enveloppe de la source d'excitation et à sa localisation. Les voyelles sont excitées par une source voisée, située à la glotte, dont la pente spectrale (modulée localement par les harmoniques) est fortement négative (d'environ -6 dB/oct. en prenant en considération le rayonnement aux lèvres). De fait, les formants au-dessus de 5 kHz sont rarement visibles⁷¹. Dans les fricatives sibilantes, comme nous venons d'en faire la revue, la source de friction est supraglottique (associée à une constriction orale). Son enveloppe spectrale peut s'étendre jusqu'à de très hautes fréquences, comme le laisse supposer certains [s] (cf. chapitre II-2) dont le pic maximal se situe vers 12 kHz.

Du fait d'une localisation supraglottique de la source de bruit, la structure spectrale des sibilantes (et des fricatives) contient nécessairement des antiformants. Qu'il s'agisse d'une source monopôle (où l'onde acoustique se propage dans toutes les directions) ou d'une source dipôle orientée parallèlement aux modes de résonance principaux (dans le sens longitudinal du conduit vocal), l'onde acoustique se propagera vers l'avant et l'arrière lorsque la source se situe à mi-chemin du conduit vocal. Or, les deux ondes stationnaires ne seront pas nécessairement en phase selon leur fréquence et les dimensions de la cavité de résonance dans laquelle elles se trouvent. A certaines fréquences, elles peuvent s'annuler complètement. Ce sont à ces fréquences, où l'impédance de la source vers l'arrière est infinie (Flanagan, 1972 : 73), qu'apparaissent les zéros, qui sont identifiés en tant qu'antiformants dans le spectre de bruit. Lorsque une source se situe à mi-chemin d'une cavité de résonance, la fréquence des zéros dépend donc des propriétés de la partie postérieure de la cavité de résonance, et est par conséquent indépendante de celle des pôles. Cette cavité de résonance produira donc des pôles et des zéros dits « libres ».

Lorsqu'une source d'excitation se situe en aval d'une cavité de résonance (ex. dans la cavité postérieure), les pôles et les zéros de cette cavité convergent vers la même fréquence (cf. Jackson *et al.*, 2001). C'est pourquoi on observe habituellement des *paires* pôle-zéro, qui s'annulent mutuellement dans une plus ou moins grande mesure, selon que le degré de couplage acoustique de cette cavité (cavité postérieure) avec les cavités connexes dans lesquelles se situe la source de bruit (cavité antérieure) est petit ou grand, respectivement. Ce point est discuté à l'aide de la modélisation dans la section 1 du présent chapitre.

Sibilantes examinées

⁷⁰ Lorsque le couplage acoustique entre deux cavités est important, les formants de ces deux cavités se repoussent lorsqu'ils sont rapprochés (Fant, 1960 : p. 80-84). Ainsi, la fréquence des formants s'éloigne de la fréquence de résonance théorique. Dans ce cas de figure, il devient difficile d'attribuer un formant à une cavité plutôt qu'à l'autre.

⁷¹ De plus, la structure formantique des voyelles autour de 5 kHz est souvent obscurcie par la présence d'antiformants provenant des sinus piriformes (ex. Dang et Honda, 1997).

III. Modélisation acoustique des fricatives sibilantes

L'objectif du présent chapitre est d'interpréter la structure spectrale des sibilantes, de manière générale, et ce dans une perspective analytique, en relation avec les configurations articulatoires. Toutefois, nous nous intéresserons prioritairement aux sibilantes post-alvéolaires (palatalisées ou non), d'une part, parce que les post-alvéolaires soulèvent des questions spécifiques, comme nous le détaillons dans les paragraphes suivants, et d'autre part, parce que les sibilantes antérieures (tel que [s]) se prêtent moins bien à la modélisation.

Problématiques spécifiques aux post-alvéolaires

D'après la base de données UPSID (v. introduction générale et annexe I), les contrastes entre deux sibilantes post-alvéolaires, comme en polonais, sont plus fréquents que les contrastes phonémiques entre les sibilantes antérieures (ex. [s] laminal vs. [s] apical ou [s] dental vs. [s] alvéolaire). Toutefois, si le bruit de friction constitue vraisemblablement un indice acoustique pertinent dans ce type de contraste (Nowak, 2006 ; et Lisker, 2001), la différence précise entre les deux catégories de spectres n'a pas encore été décrite de manière claire et nette⁷². En comparaison, le contraste de type antérieur/postérieur, tel que /s/ - /ʃ/ en français ou en anglais, est très évident (fréquence du bruit plus élevé pour /s/, qu'on prenne le pic maximal ou le centre de gravité) et le mécanisme acoustique sous-jacent – une cavité antérieure plus petite pour /s/, donnant lieu à des résonances plus aiguës – est généralement accepté (ex. Perkell et al 1979).

De plus, il existe un autre point concernant les post-alvéolaires qui demande à être examiné de près. En effet, le /ʃ/ français ou anglais est réputé être accompagné d'une protrusion labiale (ex. Ladefoged et Maddieson, 1996 : 148), qui a été interprétée comme un geste de renforcement (ex. Keyser et Stevens, 2001) : l'allongement de la cavité labiale a comme conséquence d'agrandir la cavité antérieure, responsable du pic principal du bruit, qui devient plus grave, et donc plus distant de celui de /s/. L'hypothèse de l'abaissement du pic principal comme but acoustique de la protrusion labiale n'a jamais été formellement vérifiée, sans avoir non plus été remise en cause, du fait de sa vraisemblance, certainement. Or, nous avons observé la présence systématique d'une seconde constriction dans nos données IRM de sibilantes, qui est la constriction dentale (cf. chapitre I-4). Bien que cette constriction tende à être moins étroite que la constriction linguale, son aire demeure néanmoins très petite, surtout en comparaison avec l'aire de la cavité labiale et de la cavité orale antérieure : un rapport de 1 : 10 (qu'on peut admettre comme le seuil à partir duquel deux cavités sont indépendantes) étant courant. Cela suggère que la cavité labiale peut être indépendante acoustiquement vis-à-vis de la cavité orale antérieure. Les données de plusieurs de nos locuteurs sont donc clairement en contradiction avec l'hypothèse de l'*allongement* de la cavité antérieure comme but de la

⁷² Le centre de gravité ne semble pas être une bonne mesure pour discriminer entre /ç/ et /ʃ/ dans tous les cas (Nowak, 2006 ; Zygis et Hamann, 2003). Halle et Stevens (1997) notent que /ʃ/ possède une résonance dans la région du F2 (entre 1,5 et 2,5 kHz), contrairement à /ç/, qu'ils attribuent à une résonance de la cavité postérieure.

III. Modélisation acoustique des fricatives sibilantes

protrusion labiale. Nous avons donc estimé qu'il était utile d'examiner ce point de plus près.

Difficulté de modéliser les sibilantes antérieures

Si les sibilantes antérieures ([s]) peuvent fondamentalement être considérées comme la version miniature des sibilantes post-alvéolaires (ou non-antérieures), avec de plus petites cavités de résonance (cavité orale antérieure, cavité labiale et constriction), la variété des spectres observés (cf. Annexe V) suggère l'existence de modes de résonance très variés selon les langues et/ou les locuteurs. Or, la morphologie du conduit vocal ne peut être observée avec la même précision que les post-alvéolaires, du fait des dimensions réduites de ces cavités. De plus, l'hypothèse de la propagation plane de l'onde acoustique dans le sens longitudinal du conduit vocal (en modélisation « 1D » ou *circuit analogue*) est moins justifiée, étant donné que la cavité antérieure peut être aussi haute (profonde) ou large que longue, sans compter le fait que la complexité de la morphologie du conduit vocal aux alentours des incisives rend difficile la détermination du sens « longitudinal ». Des modes transversaux peuvent donc vraisemblablement survenir *dans les mêmes zones de fréquences* que les modes longitudinaux, rendant potentiellement plus difficile l'interprétation des modes de résonance des pics observés dans les spectres naturels. Les sibilantes antérieures présentent également des inconvénients pour la simulation 3D. Étant donné les fréquences de résonance élevées attendues pour les cavités de résonance de petite taille, un maillage particulièrement fin serait nécessaire, afin de garantir une précision de calcul dans les hautes et très hautes fréquences. Ceci a comme conséquence d'exiger un temps de calcul plus long et, de fait, rédhibitoire, avec le matériel informatique qui était mis à notre disposition.

Méthodes de simulation acoustique

La modélisation acoustique fait appel à deux techniques. La première est la modélisation communément appelée « 1D », ou analogue à un circuit électrique. Les programmes VTF_fric et VCVsynth (Maeda 1982 et Maeda 1996) ont été utilisés. Cette modélisation suppose que l'onde acoustique se transmet uniquement dans le sens longitudinal du conduit vocal, représenté par une fonction d'aire. Cette approche est considérée comme satisfaisante pour modéliser les phénomènes acoustiques courants des sons de la parole. Elle offre l'avantage d'être rapide à exécuter, et les résultats peuvent être relativement simples à interpréter lorsque les configurations du conduit vocal sont simples, et qu'un continuum articulatoire est exploré de manière systématique.

Le second type de modélisation utilise une méthode par éléments finis (FEM). Cette méthode s'appuie sur le principe que tout objet complexe (tel que le conduit vocal) peut se décomposer en un nombre fini d'éléments géométriques simples (ici, des tétraèdres), pour lesquels il est facile de calculer le processus de transmission du son. Cette méthode, utilisée encore marginalement dans le domaine de l'acoustique de la parole (ex. Kitamura *et al.*, 2008) permet d'estimer les propriétés acoustiques d'un modèle tridimensionnel. Elle offre l'avantage d'être applicable à des conduits vocaux 3D dérivés des données IRM, sans nécessiter d'interprétation sur la structure du conduit vocal (ex. quel est le sens « longitudinal »).

Paramètres communs de la modélisation « 1D » (VTF_fric) utilisés dans III-1,

III. Modélisation acoustique des fricatives sibilantes

III-2, et III-4

Comme nous l'avons développé dans l'introduction, nous supposons l'indépendance source-filtre pour les fricatives sibilantes, en suivant Shadle (1985). La simulation acoustique dans le domaine fréquentiel vise à déterminer les propriétés du conduit vocal en tant que filtre : le rapport d'intensité entre le son rayonné ($P_{\text{rayonnée}}$) et la source de bruit (P_{source}) pour chaque échantillon fréquentiel. Ce rapport peut s'exprimer en gain (dB) en fonction des fréquences, et est désigné par le terme « fonction de transfert (acoustique) ».

L'onde acoustique présente des analogies avec le courant électrique dans un circuit, c'est pourquoi des circuits, où le conduit vocal est représenté par une succession de sections d'aire uniforme et de faible longueur (ici, 1 mm pour la simulation dans le domaine fréquentiel et 5 mm pour la simulation VCV), ont été utilisés pour calculer la fonction de transfert. Dans ce type de modélisation, seuls les modes acoustiques dans le sens longitudinal du conduit vocal sont pris en compte (d'où l'expression « 1D »).

Les programmes VTF_fric et VCVsynth (Maeda 1982 et 1996) reposent sur ces principes. Les propriétés de transmission de l'onde acoustique de section à section sont calculées numériquement. Les paramètres utilisés par défaut dans nos simulations se trouvent en Tableau 11.

Les conditions aux extrémités peuvent être définies de différentes manières. Dans les simulations que nous avons effectuées, nous avons ignoré le système sous-glottique⁷³ et nous avons simulé la rayonnement aux lèvres par un circuit « RL »⁷⁴. De plus, les parois sont considérées comme souples (pouvant vibrer), par conséquent, occasionnant une perte et un déplacement des formants. En pratique, les fricatives sont peu concernées par l'effet de la souplesse des parois, qui se manifeste surtout en-dessous de 500 Hz.

⁷³ La trachée et les poumons ne sont pas pris en compte dans les calculs, et une source de pression de 8 cm H₂O (= 8 hPa) sert de condition de frontière.

⁷⁴ Les pertes dues au rayonnement aux lèvres sont calculées à l'aide du « R », la résistance et du « L », la masse acoustique (inertance) connectées en parallèle.

III. Modélisation acoustique des fricatives sibilantes

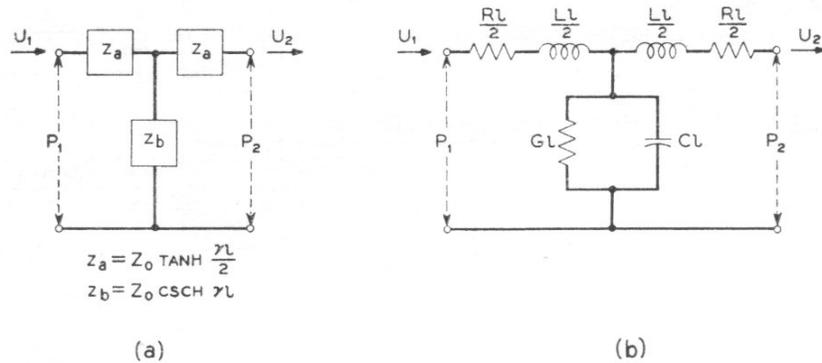


Fig. 6.13 a and b. *T*-circuit equivalents for a length *l* of uniform cylindrical pipe. (a) Exact circuit, (b) first-term approximations to the impedance elements

Figure 50. Circuit représentant une section du conduit vocal (d'après Flanagan, 1972, p. 229).

Les sources monopôle et dipôle ont été modélisées de la façon suivante. Chaque section du conduit vocal est représentée par deux éléments en série de masse acoustique $L/2$ et un élément parallèle représentant la compliance C (cf. **Figure 50**). La source monopôle est alors une source de débit (de courant) connectée parallèlement à C , et la source dipôle est une source de pression (de voltage) connectée en série avec $L/2$ ⁷⁵.

Tableau 11. Paramètres par défaut utilisés avec VTF_fric (domaine fréquentiel).

Parois	Condition aux lèvres	Système sous-glottique	Type de source
souples	circuit RL	désactivé	pression
Type de résultat	Aire glottale	Longueur des sections	échantillons fréquents
pression rayonnée	1 cm ²	1 mm	tous les 10 Hz de 10 à 24000 Hz

⁷⁵ Dans la simulation 1D, la source dipôle est toujours orientée dans le sens « longitudinal » du conduit vocal.

III. Modélisation acoustique des fricatives sibilantes

III-1 : PROPRIÉTÉS BASIQUES DE CONFIGURATIONS SIMPLES DU CONDUIT VOCAL DE SIBILANTES (1D)

Dans cette section, nous abordons les propriétés acoustiques communes aux fricatives sibilantes. Le contenu de cette section fait partie du manuscrit d'un chapitre de livre (Toda *et al.*, accepté).

Les principales caractéristiques qui distinguent le spectre des fricatives de celui des voyelles sont les suivantes. Premièrement, la source de bruit possède une enveloppe spectrale dont la répartition de l'énergie atteint de très hautes fréquences, jusqu'à 15 kHz, alors que le spectre des voyelles présente une atténuation de plus de 30 dB avant 5 kHz. Deuxièmement, les fricatives comportent une constriction assez étroite pour permettre la génération d'un bruit. La cavité postérieure tend donc à être isolée acoustiquement : les résonances de la cavité antérieure tendent à être prédominantes dans la détermination de l'enveloppe spectrale. De plus, pour les fricatives sibilantes dont la constriction se trouve dans la région coronale ou dentale, les résonances de la cavité antérieure, courte, tendent à être élevées. Le premier pic spectral est rarement observé en-dessous de 2,5 kHz. Enfin, la source d'excitation (bruitée) des fricatives étant localisée à mi-chemin dans le conduit vocal, des antiformants apparaissent en plus des formants.

Bien que la morphologie du conduit vocal des sibilantes soit complexe (chapitre I), elle peut être simplifiée en ses constituants fonctionnels élémentaires : une cavité postérieure, une constriction, et une cavité antérieure (qui est optionnelle pour la sibilante [s]).

Position et type de source

Comme nous en avons parlé dans l'introduction, la position et le type de la source de bruit varieraient selon la configuration du conduit vocal. Dans cette section, nous examinons l'effet de la position et du type de source avec une configuration du conduit vocal fixe.

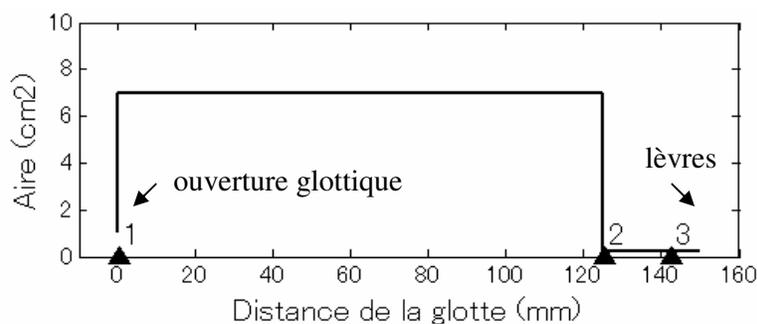


Figure 51. Configuration simple du conduit vocal pour la fricative [s], constituée de deux tubes uniformes, d'après Flanagan (1972). Les numéros indiquent les différents emplacements de la source de bruit utilisés en modélisation acoustique : à la glotte (1), à la jonction des deux tubes (2), et à 8 mm en arrière de l'extrémité labiale (3). La cavité postérieure mesure 12,5 cm pour une aire constante de 7 cm² ; La cavité antérieure est de 2,5 cm pour une

aire de 0,2 cm². (L'ouverture de la glotte, qui occasionne une perte surtout dans les basses fréquences, est de 1 cm².)

Le modèle de la **Figure 51** représente un [s]. Il comporte une constriction qui simule à la fois la constriction linguale et la cavité antérieure. Lorsque ce modèle est excité à la glotte, sa fonction de transfert présente un grand nombre de pics (**Figure 52**, courbe du haut), correspondant globalement aux résonances de chacune de ses cavités. La résonance de Helmholtz, attendue vers 170 Hz, n'est pas visible, probablement dû à l'atténuation importante des basses fréquences en raison de la glotte ouverte ($A_g = 1 \text{ cm}^2$). On observe premièrement des pics survenant à intervalle rapproché (1,4 kHz) et dont la largeur de bande est étroite. Ces pics correspondent aux résonances multiple d'une demi-onde de la cavité postérieure, dont les fréquences théoriques sont d'environ 1,4 ; 2,8 ; 4,2 kHz, etc. Des pic et proéminences de la cavité antérieure, apparaissant à intervalles de 6,5 kHz (6,5 ; 13 ; 19,5 kHz) se superposent aux résonances de la cavité postérieure. Leur largeur de bande est plus importante en raison du rayonnement aux lèvres pris en compte par le circuit « RL » dans la simulation.

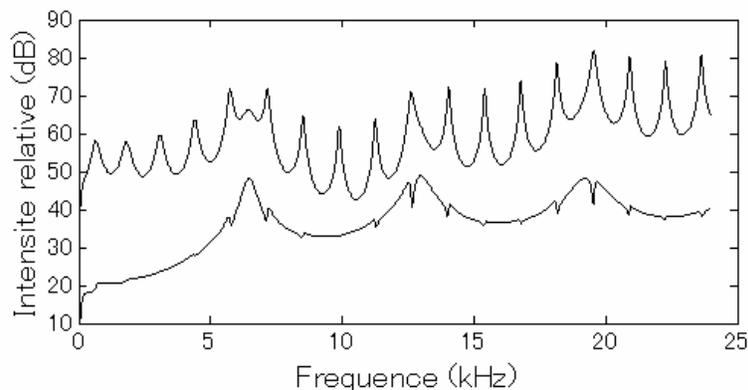


Figure 52. Fonctions de transfert d'un modèle simple de [s]. Les deux courbes sont décalées de 30 dB pour plus de clarté. La courbe supérieure correspond au résultat avec une source de pression localisée à la glotte(emplacement 1 de la Figure 51), tandis que la courbe inférieure est obtenue avec une source de pression localisée à la jonction des cavités postérieure et antérieure (emplacement 2 dans la Figure 51).

Lorsqu'une source de pression est placée à la jonction des deux cavités (emplacement 2 dans la Figure 51), la cavité postérieure produit des paires pôle-zéro. Les zéros surviennent aux fréquences où l'impédance à la source vers l'arrière (vers la glotte) est infinie (Flanagan, 1972 : p. 73). Pour une cavité de résonance isolée excitée en aval, la fréquence des zéros converge vers celle des pôles. Dans la configuration actuelle, en raison de l'écart important entre l'aire de la cavité postérieure et celle de la cavité antérieure, les zéros et les pôles sont très rapprochés ; de telle sorte qu'ils s'annulent en grande partie. Ainsi, la forme globale du spectre dépend principalement de résonances de la cavité antérieure.

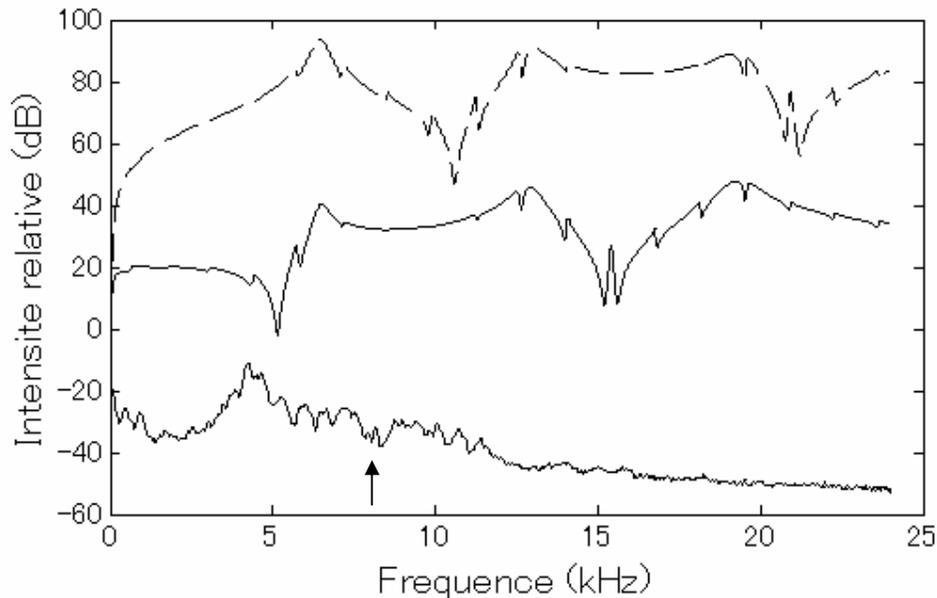


Figure 53. Fonctions de transfert (deux courbes du haut) d'un modèle de [s] pour une source localisée à mi-chemin à l'intérieur de la cavité antérieure (emplacement 3 dans la Figure 51). Ligne interrompue : source monopole modélisée par une source de débit. Ligne pleine : source dipôle modélisée par une source de pression. L'intensité relative est définie en référence au premier échantillon fréquentiel (10 Hz). Ceci reste valable pour toutes les fonctions de transfert présentées dans cette thèse. Courbe du bas : spectre moyen de bruit du /s/ tenu⁷⁶, produit en position allongée, locuteur Fr3 (moyenne de 200 fenêtres de 8 ms prélevées sur les 80 % du centre de l'occurrence (durée totale de l'occurrence = 6,44 s).

Lorsqu'une source se trouve à mi-chemin à l'intérieur d'une cavité, comme à l'emplacement 3 de la Figure 51, cette cavité produit des zéros libres, et non des paires pôle-zéro (Figure 53). Les spectres naturels présentent des antifonnements suggérant la présence de zéros libres, comme celui de la **Figure 53** (flèche). La fréquence des zéros libres varie en fonction de l'emplacement de la source (voir aussi Figure 54) et du type, débit ou pression, de la source. La fréquence des pôle, toutefois, reste la même quelle que soit l'emplacement de la source et le type de la source. Les spectres naturels des fricatives sibilantes présentent souvent des creux suggérant des zéros libres. Le spectre de bruit présenté à titre indicatif (Figure 53) présente une remontée abrupte de l'énergie juste

⁷⁶ La configuration simple du /s/ dont sont issues les courbes du haut, directement reprise de Flanagan (1972), ne vise pas à reproduire le /s/ du locuteur Fr3. Il est donc inutile de rechercher une quelconque ressemblance. Le spectre naturel est présenté à titre illustratif quant aux creux spectraux attribuables à des zéros libres.

III. Modélisation acoustique des fricatives sibilantes

avant le pic majeur (4,5 kHz). Cette variation importante de l'intensité du spectre peut être due à la présence d'un zéro libre vers 2,5 kHz. Ce spectre présente un deuxième creux vers 8 kHz, puis un dernier vers 12,5 kHz. Ces trois creux majeurs, régulièrement espacés, peuvent très vraisemblablement être des zéros libres provenant de la cavité antérieure.

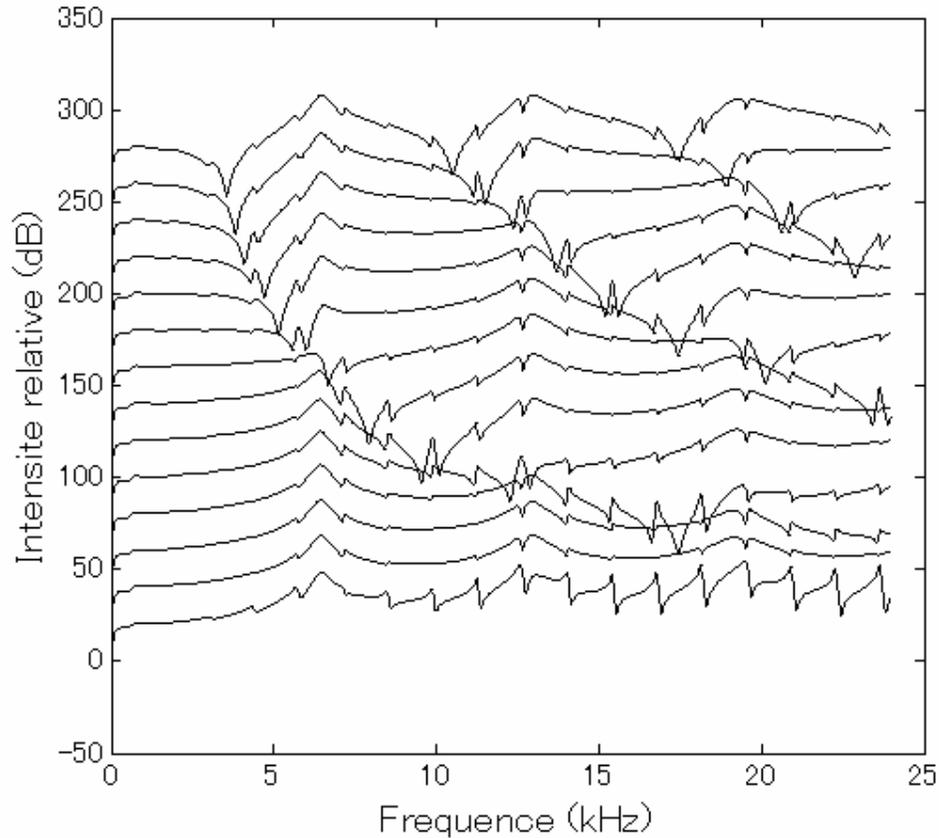


Figure 54. Fonctions de transfert calculées pour la configuration du conduit vocal pour [s] (Figure 51) avec une source de pression dont le lieu est variable. De bas en haut, la source se déplace de 1 mm derrière la jonction entre la cavité postérieure et la constriction (à 12,4 cm de la glotte) à l'extrémité antérieure du conduit vocal (les lèvres ; à 15 cm de la glotte) par pas de 2 mm. Il se produit un changement abrupte entre les deux premières courbes du bas, expliqué par le passage de l'emplacement de la source de la cavité postérieure vers la cavité antérieure. Les courbes sont décalées de 20 dB entre elles pour une meilleure lisibilité.

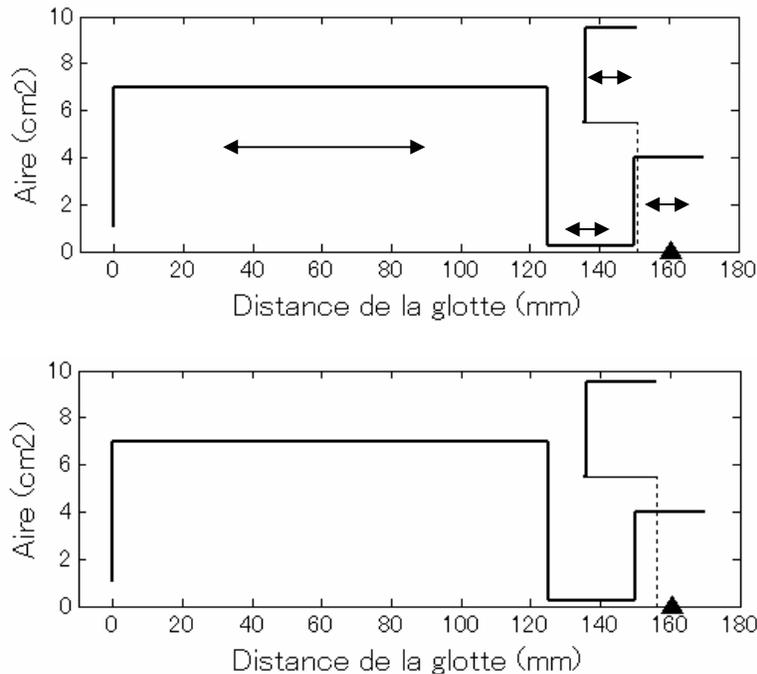
La fréquence des zéros varie en fonction de la position de la source, alors que celle des pôles est constante. Par conséquent, il peut arriver, dans certaines configurations, que des zéros libres annulent complètement des pôles de la cavité antérieure, comme dans la **Figure 54** (voir aussi la section III-2). Dans cette figure, le pic de 13 kHz est annulé par un zéro libre lorsqu'une source de pression est localisée à 13,2 cm de la glotte (5 ème

III. Modélisation acoustique des fricatives sibilantes

courbe en partant du bas). De même, les pics de 6,5 kHz et de 19,5 kHz sont annulés par des zéros libres avec une source de pression à 13,8 cm de la glotte (8^{ème} courbe en partant du bas).

Cavité « branchante »

Lorsqu'il existe un branchement dans le conduit vocal, ou deux cavités parallèles, cette bifurcation crée aussi les conditions d'apparition de zéros dans la fonction de transfert. La Figure 55 représente la fonction d'aire de modèles de [ʃ]. Nous avons vu (v. chapitre I) que beaucoup de /ʃ/ en français ou en anglais possédaient une cavité sublinguale. Dans le conduit vocal du haut (Figure 55), la cavité sublinguale est modélisée en tant que cavité branchante, connectée au conduit principal à l'emplacement du trait pointillé. Cette configuration est modélisée par un circuit parallèle dans un circuit électrique. Cette configuration est comparée à un conduit vocal non branchant (Figure 55, bas), possédant une cavité antérieure de la même longueur que la cavité antérieure et la cavité sublinguale réunies du modèle branchant. La cavité postérieure est raccourcie d'autant pour conserver la même longueur totale (on suppose deux articulations possibles par un même locuteur). La configuration intermédiaire représente un embranchement à mi-chemin de la cavité antérieure, 5 mm en avant de la constriction.



III. Modélisation acoustique des fricatives sibilantes

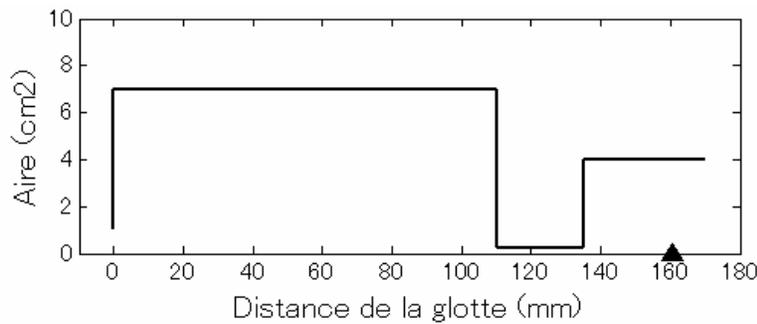


Figure 55. Haut : fonction d'aire simple pour une sibilante post-alvéolaire branchante (voir texte). La cavité branchante (15 mm de long) est connectée à l'extrémité postérieure de la cavité antérieure (20 mm de long). La cavité postérieure mesure 125 mm de long et la constriction 25 mm de long. Les flèches indiquent le sens de la propagation de l'onde acoustique dans cette simulation. Milieu : modèle branchant avec cavité branchante de 20 mm connecté à mi-chemin de la cavité antérieure (5 mm en avant de la constriction). Bas : fonction d'aire simple pour une sibilante post-alvéolaire non branchante (cavité postérieure = 110 mm ; constriction = 25 mm ; cavité antérieure = 35 mm). Dans les trois configurations, l'aire de la cavité postérieure est de 7 cm² ; de la constriction de 0.2 cm² ; de la cavité antérieure et de la cavité branchante de 4 cm².

Lorsqu'une cavité branchante est connectée au conduit principal, cette cavité étant excitée par son extrémité en aval, elle produira des paires pôle-zéro dans la fonction de transfert. La distance des zéros et des pôles d'une paire dépend du degré de couplage de cette cavité avec le conduit vocal principal. Dans le cas présent, la cavité branchante mesure la même aire que la cavité antérieure. Dans la configuration du haut, la cavité antérieure forme donc une cavité uniforme avec la cavité branchante (que nous appellerons cavité antérieure effective⁷⁷). La fréquence des pôles de cette cavité est donc la même que le modèle avec une cavité antérieure longue (**Figure 56** ligne pointillée et ligne pleine, respectivement). La différence entre ces deux courbes provient de la différence de longueur de la cavité postérieure, qui produit des paires pôle-zéro de fréquence différente. Lorsque la cavité branchante est connectée à mi-chemin de la cavité antérieure (5 mm en avant de la constriction), la fonction de transfert (ligne interrompue, au milieu) s'écarte des autres courbes. Le premier formant reste épargné, mais les suivants sont affectés par le couplage acoustique entre la cavité branchante et la cavité antérieure principale.

⁷⁷ Pour cette raison d'unité fonctionnelle sur le plan acoustique, la cavité sublinguale a été représentée à la suite de la cavité antérieure dans les fonctions d'aire mesurées (I-1, I-2 et annexe III) ; le conduit vocal « principal » situé en arrière de la constriction linguale étant représenté par une courbe séparée.

III. Modélisation acoustique des fricatives sibilantes

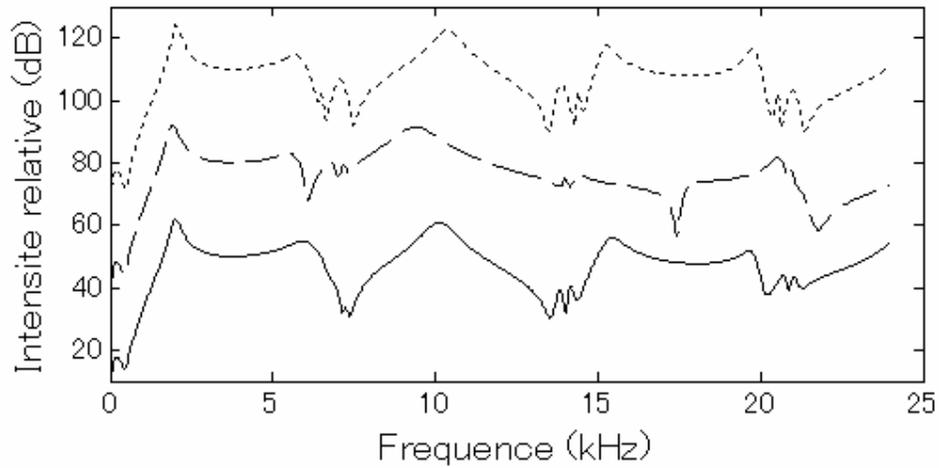


Figure 56. Fonctions de transfert de configurations du conduit vocal pour sibilante post-alvéolaire. Ligne pointillée : modèle branchant (Figure 55, haut) ; ligne interrompue : modèle branchant (Figure 55, milieu) ; ligne pleine : modèle non-branchant (Figure 55, bas). La source de pression se situe à 10 mm en arrière de l'extrémité labiale des fonctions d'aire. Les courbes sont décalées de 30 dB pour une meilleure visibilité.

III-2 : EFFETS DE LA LONGUEUR DE LA CAVITÉ ANTÉRIEURE ET DE LA CONSTRICTION SUR LA FRÉQUENCE DE COUPURE⁷⁸ (1D)

Dans le chapitre articuloire (I-2), nous avons vu qu'il existait des sibilantes post-alvéolaires palatalisées et d'autres plus apicales, identifiées sous les stratégies articuloires « recul » et « déformation » en français. Afin de mieux comprendre l'affiliation des formants aux cavités dans ces types de configuration, nous examinons, dans cette section, les propriétés acoustiques de configurations simples où la longueur de la cavité antérieure et celle du chenal palatal ont été modifiées de manière systématique.

De plus, ces deux types de post-alvéolaires, qui relèvent de variation inter-individuelle et/ou contextuelle, peuvent être contrastives dans d'autres langues comme le polonais. Ces langues constituent donc un cas d'étude intéressant pour évaluer le pouvoir explicatif de certaines théories. D'après la théorie quantique (ex. Stevens 1972, 1989), les prototypes des phonèmes auraient tendance à émerger dans les régions acoustiques stables, où un changement articuloire donne lieu à peu de variation acoustique. Plusieurs facteurs peuvent être à l'origine des zones instables, ou de discontinuités. On peut citer, entre autres, le croisement des résonances orales et des résonances sous-glottiques (Chi et Sonderegger, 2007), ou le couplage de cavités latérales interdentes (Honda et Takano, 2006) introduisant des pôles et zéros qui occasionnent des sauts abrupts de résonances, et seraient impliqués dans la délimitation de l'espace vocalique. Le contraste entre /s/ et /ʃ/ en anglais est un exemple souvent cité dans ce contexte, où le recul graduel de la langue entraîne la création soudaine d'une cavité sublinguale, responsable d'un changement abrupt de la fréquence du pic spectral (Perkell *et al.* 1979). L'expérience présentée dans la présente section vise également à examiner les discontinuités qui résultent d'un changement continu de la configuration articuloire, mais pour les sibilantes non-antérieures.

Le contenu de cette section a fait l'objet d'une communication (Toda et Maeda, 2006).

Méthode

Configuration du conduit vocal

Le modèle schématisé en Figure 57 et dont les propriétés fixes sont décrites dans le Tableau 12 représente une fricative sibilante non-antérieure. Il comporte une cavité postérieure, une constriction (appelée également *chenal palatal*), et une cavité antérieure. La longueur de la constriction et celle de la cavité antérieure varient sur un continuum de manière indépendante sur une plage réaliste. La longueur de la cavité postérieure est ajustée de telle sorte que la longueur totale du modèle soit toujours de 17 cm.

⁷⁸ Equivalent du pic majeur dans les spectres naturels de sibilantes.

III. Modélisation acoustique des fricatives sibilantes

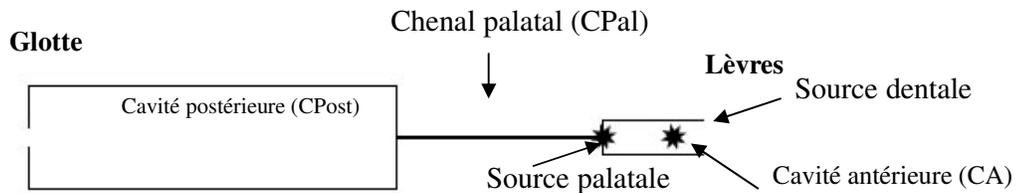


Figure 57. Représentation schématique du modèle de sibilante non antérieure.

Tableau 12. Propriétés fixes du modèle de conduit vocal.

Longueur de chaque section	longueur totale du modèle	position de la source de bruit	aire de la cavité postérieure	aire de la constriction	aire de la cavité antérieure
1 mm	170 mm	(a) 10 mm en arrière de l'extrémité labiale (<i>source dentale</i>); (b) à la sortie du chenal palatal (<i>source palatale</i>)	6 cm ²	0.5 cm ²	2 cm ²

Fréquence de coupure des fonctions de transfert

Afin de décrire de manière succincte les caractéristiques des fonctions de transfert obtenues par la simulation acoustique et de faciliter leur comparaison, une mesure fréquentielle a été utilisée. Appelée « fréquence de coupure », cette mesure objective consiste en la fréquence du premier pic (par ordre croissant des fréquences) dépassant d'au moins 20 dB le niveau le plus bas de la courbe dans les fréquences inférieures à lui. La fréquence de coupure est l'équivalent du pic majeur des spectres naturels (cf. section II-2). En effet, les fonctions de transfert décrivent les propriétés du « filtre » qui est le conduit vocal. Il n'y a donc pas d'atténuation en fonction des fréquences en dehors de celle due au rayonnement aux lèvres, et l'enveloppe des fonctions de transfert tend donc vers + 6 dB/octave. Or, le spectre naturel présente une atténuation à mesure que les fréquences augmentent (atténuation attribuée à l'enveloppe de la source). Le premier mode d'une résonance a donc tendance à être le pic majeur. La fréquence de coupure vise donc à capturer ce premier mode. La condition « dépassant d'au moins 20 dB » vise à exclure les maxima locaux, insignifiants du point de vue de la forme globale du spectre, qui ne sont autre que les poles (jumelés à des zéros) de la cavité postérieure.

Deux types de source, pression et débit, localisées à deux endroits - aux incisives (source

III. Modélisation acoustique des fricatives sibilantes

de pression uniquement ; « source dentale ») et à la sortie de la constriction (« source palatale » de pression ou de débit) - ont été utilisés. Ces trois conditions ne prétendent pas être représentatives de toutes les sources possibles dans les fricatives sibilantes non antérieures. Remarquons également que ces paramètres ne peuvent pas, en réalité, être contrôlés indépendamment de la configuration articuloire. Elles visent ici à examiner les variations possibles de la fonction de transfert dues à ces paramètres, en l'absence de méthode analytique fiable pour prédire la position et le type de source pour une configuration articuloire donnée⁷⁹.

Résultats

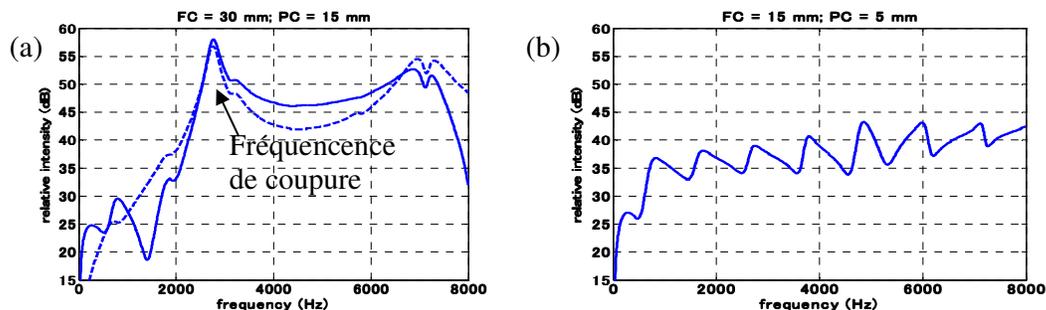


Figure 58. Exemples de fonction de transfert. (a) Fonctions de transfert obtenues pour une même configuration, CA = 30 mm et CPal = 15 mm, avec une source dentale de pression (ligne pleine) et une source palatale de débit (ligne pointillée). (b) Fonction de transfert plate montante (CA = 15 mm ; CPal = 5 mm ; source dentale de pression), où aucune fréquence de coupure (voir texte) n'a pu être détectée.

La Figure 58 illustre différents types de fonction de transfert obtenus par simulation acoustique dans le domaine fréquentiel. La **Figure 58 (a)** montre le résultat pour deux conditions de source, source dentale de pression (ligne pleine) et source palatale de débit (ligne pointillée), avec la même configuration articuloire. La fréquence des pics est la même, mais celle des creux (zéros) varie. La **Figure 58 (b)** montre une courbe typique où aucun pic répondant à la définition de la fréquence de coupure n'est détecté. Ce type de fonction de transfert est marginal dans l'ensemble, et est associé aux configurations où à la fois la cavité antérieure et le chenal palatal sont courts. L'absence de détection serait due au fait que le pic principal attendu soit supérieur à 8 kHz (limite supérieure de cette expérience).

⁷⁹ Cf. Adachi et Honda, 2003.

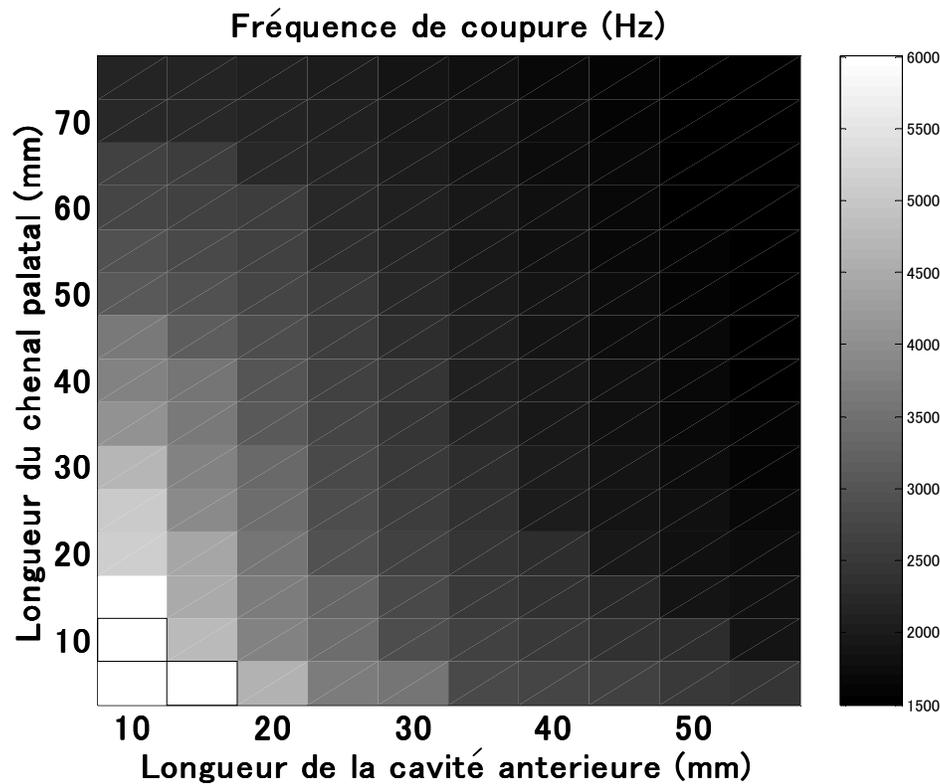


Figure 59. Fréquence de coupure (représentée en niveaux de gris entre 1,5 et 6 kHz) en fonction de la longueur de la cavité antérieure et du chenal palatal pour une source dentale de pression. Les rectangles blancs avec bordure correspondent aux configurations où la fréquence de coupure n'a pu être détectée (cf. Figure 58).

Supposons qu'il n'existe aucun couplage acoustique entre la cavité antérieure et le chenal palatal. Le chenal palatal pourrait être considéré comme un tube simple ouvert à ses deux extrémités (résonateur multiples de demi-onde), et la cavité antérieure comme un tube simple fermé-ouvert (résonateur multiples impairs du quart d'onde). Dans cette situation, la fréquence de coupure correspondrait à la première résonance de la cavité antérieure lorsque celle-ci est supérieure à la moitié de la longueur du chenal palatal, et à la première résonance du chenal palatal lorsque ce dernier fait au moins le double de la longueur de la cavité antérieure. Cependant, les résultats de simulation montrent que la longueur de la cavité antérieure et celle de la constriction sont, au contraire, complémentaires du point de vue de la fréquence de coupure (**Figure 59**), ici avec une source dentale de pression. En effet, la fréquence de coupure diminue lorsque augmente la longueur, soit de la cavité antérieure, soit de la constriction. Cela indique qu'on peut s'attendre à un couplage acoustique entre ces deux cavités dans les conduits vocaux réels dont l'aire des sections est proche des dimensions utilisées dans cette modélisation, et suggère les vastes possibilités de compensation articuloire permettant d'obtenir un bruit de friction comportant un pic principal de même fréquence.

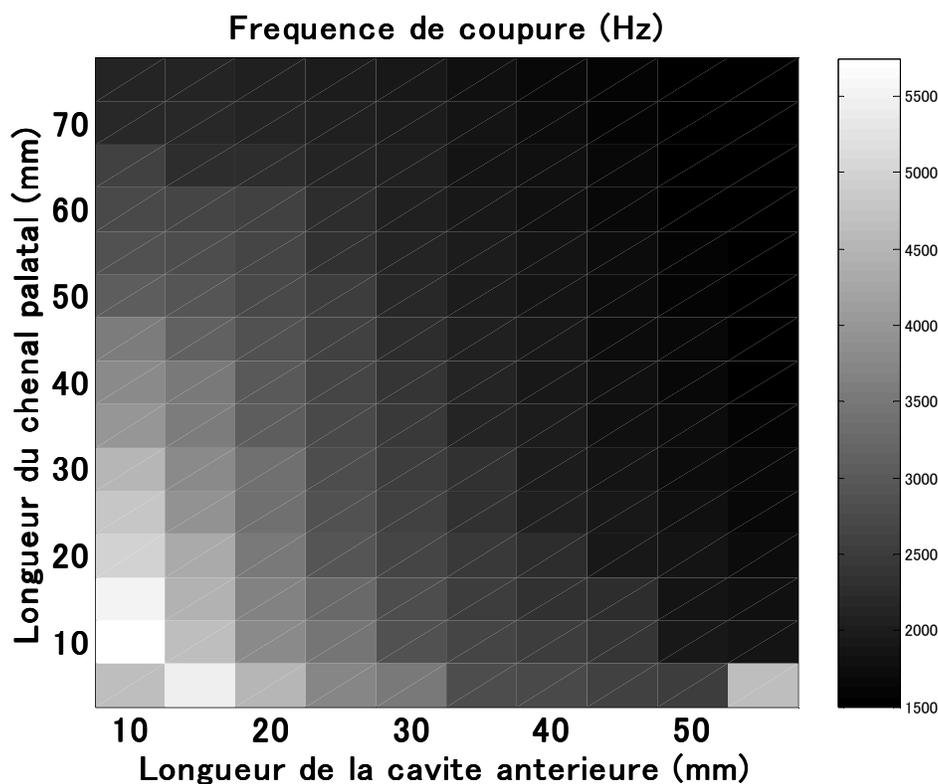


Figure 60. Fréquence de coupure (représentée en niveaux de gris) en fonction de la longueur de la cavité antérieure et du chenal palatal pour une source palatale de débit.

Lorsque la source de débit se situe à la sortie de la constriction (**Figure 60**), la distribution fréquentielle de la fréquence de coupure est similaire à celle d'une source dentale. La fréquence des pics, correspondant à des pôles, en effet, ne change pas en fonction de la position ou du type de la source (cf. III-1).

L'observation attentive de ces deux figures (**Figure 59** et **Figure 60**) suggère l'existence de discontinuités (en diagonale) divisant l'espace articulatoire en quatre zones. Pour mieux visualiser ces frontières, nous avons calculé la différence moyenne entre configurations voisines (**Figure 61**), qui est en quelque sorte une dérivée de deux dimensions. Ce calcul est basé sur la fréquence en Bark afin d'être plus proche de la perception auditive.

III. Modélisation acoustique des fricatives sibilantes

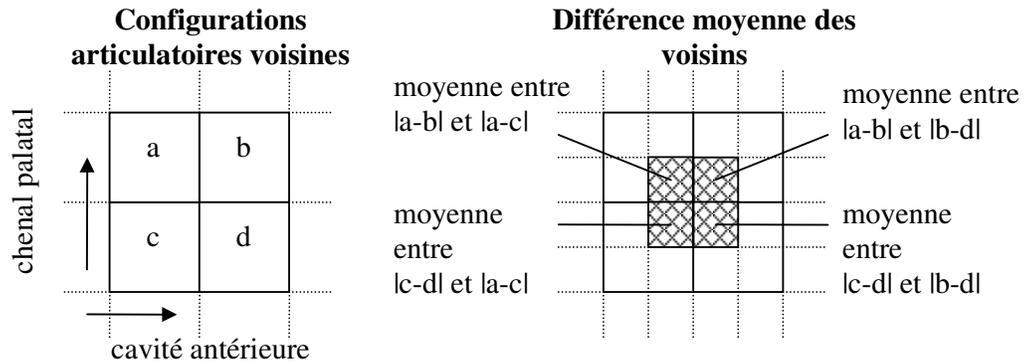


Figure 61. Distance moyenne de la fréquence de coupure entre les configurations articulaires voisines (chacune des configurations articulaires est représentée, dans les Figure 59 et Figure 60, par un rectangle de niveau de gris variable correspondant à la fréquence de coupure). Les symboles a, b, c et d représentent la fréquence de coupure dans l'échelle Bark (calculée d'après la formule de Trau Müller, 1990).

La Figure 62 représente la différence moyenne de la fréquence de coupure des configurations articulaires voisines avec une source dentale de pression. Des traits clairs (discontinuités) se détachent d'un fond sombre (zones stables).

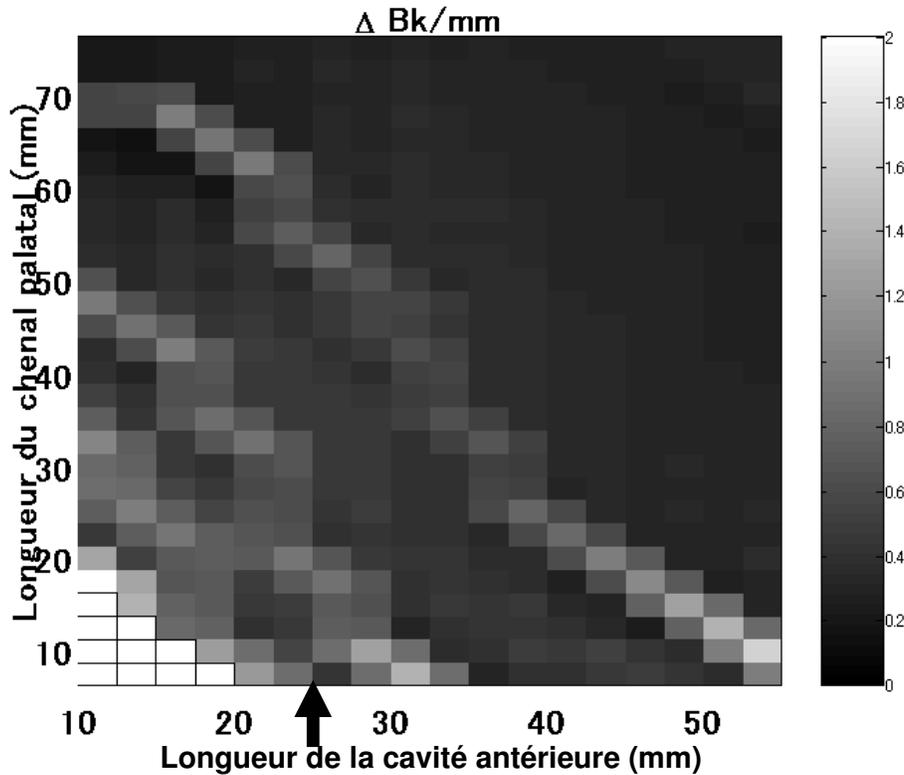


Figure 62. Distance moyenne (représentée en niveaux de gris) de la fréquence

de coupure entre configurations articulatoires voisines (source dentale de pression), en Bk/ 5mm. La flèche indique l'emplacement où se situe la « coupe » de la Figure 63.

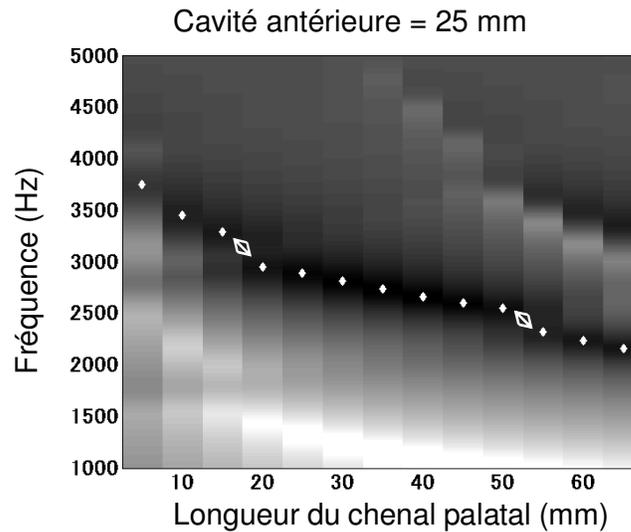


Figure 63. Nomogramme spectrographique (le gris foncé correspond à une forte intensité, c'est-à-dire les pics) pour les configurations dont la cavité antérieure est fixée à 25 mm (indiqué par une flèche dans la Figure 62), et dont la longueur du chenal palatal varie de 5 à 65 mm, avec une source dentale de pression. Les losanges blancs indiquent la fréquence de coupure détectée. Les flèches indiquent des sauts de la fréquence de coupure (voir texte).

Lorsqu'on examine de plus près la variation des fonctions de transfert d'une configuration à une autre à l'aide de nomogrammes spectrographiques (**Figure 63**), les sauts de la fréquence de coupure, observés entre 15 et 20 mm et entre 50 et 55 mm du chenal palatal (indiqués par des flèches), s'expliquent clairement. En effet, à ces points de rupture, la première résonance du chenal palatal ou de la cavité antérieure, qui constitue le pic de la fréquence de coupure, croise des résonances dont la fréquence augmente à mesure que le chenal palatal s'allonge (et change par conséquent d'affiliation formantique). Ces résonances ou plus exactement ces paires pôle-zéro qui croisent le pic de la fréquence de coupure sont affiliés à la cavité postérieure, qui se raccourcit d'autant que le chenal palatal s'allonge. Ainsi, le croisement de la fréquence de coupure avec les paires pôle-zéro de la cavité postérieure est responsable des discontinuités dans l'espace acoustique (**Figure 62**). Nous désignerons ce type de discontinuité de *mécanisme 1*. On peut raisonnablement considérer que le franchissement des zones de discontinuité peut avoir un impact perceptif chez les auditeurs, car ces sauts représentent entre 1 et 2 Bk (de 300 à 1500 Hz).

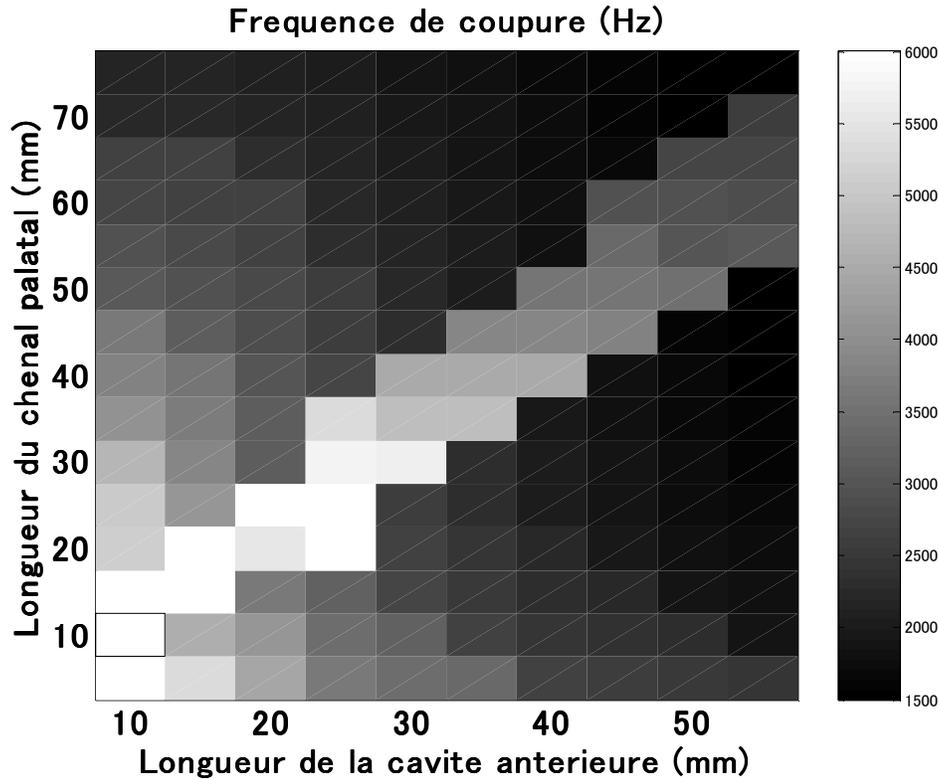


Figure 64. Fréquence de coupure (exprimée en niveaux de gris) des fonctions de transfert obtenues par simulation acoustique pour une source palatale de pression. L'axe horizontal correspond à la longueur de la cavité antérieure et l'axe vertical à la longueur du chenal palatal.

La fréquence de coupure, pour les fonctions de transfert obtenues avec une source palatale de pression, ne peut être déduite uniquement des résonances de la cavité antérieure et du chenal palatal. En effet, comme le montre la Figure 64, une zone de fréquence de coupure élevée (gris clair) apparaît en diagonale dans l'espace articulatoire. L'observation de nomogrammes permet de connaître la raison de ce saut remarquable. La Figure 65, où la cavité antérieure est fixe (30 mm) et le chenal palatal varie (de 5 à 65 mm), indique en effet le croisement du premier pic spectral, détecté comme fréquence de coupure dans les autres conditions de source, par un antiformant lorsque le chenal palatal mesure entre 30 et 40 mm. Cet antiformant n'est pas jumelé à un formant. Il s'agit donc d'un zéro libre.

D'après Fant (1960, p. 63), les zéros sont attendus aux fréquences où l'impédance de la cavité postérieure est infinie. Une cavité de résonance peut être représentée par un circuit comme dans Flanagan (1972, p. 27, Figure 3.3a). Le chenal palatal pouvant être considéré ouvert aux deux extrémités, les deux extrémités du circuit peuvent être représentées par un court-circuit (impédance nulle). Le chenal palatal étant étroit, l'élasticité de l'air (Z_b) peut être ignorée. Par conséquent, l'impédance du chenal palatal est principalement déterminée par sa masse acoustique (Z_a). Dans un cas où on ignore les pertes, $Z_0 \tanh(\gamma l_{Cpal}/2)$ peut être substitué par $Z_0 \tan(\beta l_{Cpal}/2)$, où β est une constante égale à ω/c .

III. Modélisation acoustique des fricatives sibilantes

L'impédance du chenal palatal, Z_{CPal} , peut donc être formulée de la façon suivante :

$$Z_{CPal} = Z_0 \tan(\omega l_{CPal}/c),$$

où Z_0 , égal à $\rho c/A_{CPal}$, est une constante (ρ : densité de l'air ; c : vitesse du son ; A_{CPal} : aire du chenal palatal). Sachant que la fonction tangentielle $\tan(\varphi)$ devient infinie à $\varphi = \pi/2, 3\pi/2, 5\pi/2 \dots (2n-1)\pi/2$, pour $n \in \text{entiers}$, et $\omega = 2\pi f$, les zéros du chenal palatal sont attendus aux fréquences :

$$f_{\text{zéros}} = (2n-1)c/4l_{CPal}.$$

Pour un chenal palatal de 35 mm, le premier zéro est donc attendu autour de 2,5 kHz, ce qui coïncide avec la résonance quart d'onde de la cavité orale antérieure, attendue théoriquement vers 2,9 kHz mais abaissée dans cette configuration due à l'effet de la charge de rayonnement aux lèvres, RL, et à l'interaction avec le chenal palatal. Le saut de la fréquence de coupure est donc dû à l'annulation du pic, provenant de la cavité antérieure, par un zéro libre du chenal palatal. Nous le désignerons par *mécanisme 2*.

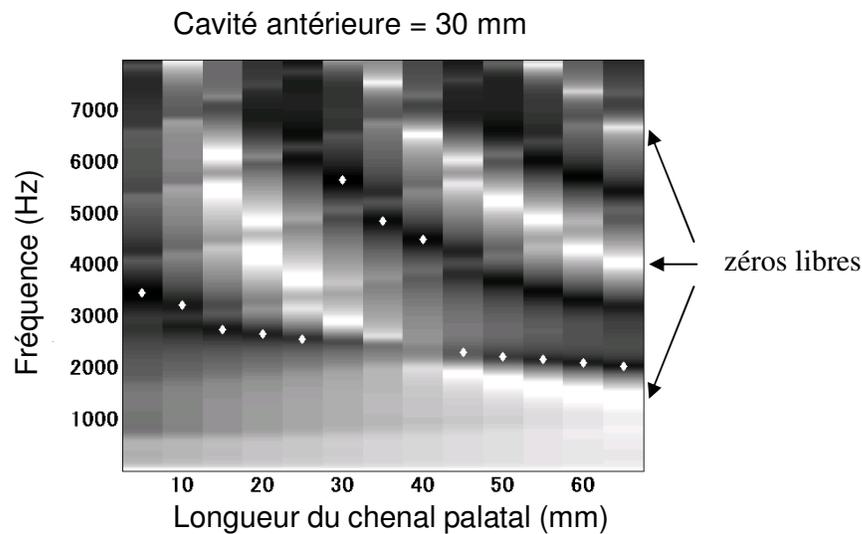


Figure 65. Nomogramme spectrographique (foncé : forte intensité ; pâle : faible intensité) pour un chenal palatal variant de 5 à 65 mm, la cavité antérieure étant maintenue à 30 mm. Les losanges blancs indiquent la fréquence de coupure détectée. Pour les longueurs 30, 35 et 40 mm du chenal palatal, la première résonance de la cavité antérieure (vers 2,5 kHz) est affaiblie en raison du croisement d'un zéro libre affilié au chenal palatal. Il en résulte un saut de la fréquence de coupure détectée, correspondant à la première résonance du chenal palatal.

Discussion

A travers cette expérience de simulation nous avons montré que, dans les fricatives, les

III. Modélisation acoustique des fricatives sibilantes

résonances de la cavité postérieure pouvaient interagir avec les résonances de la constriction (chenal palatal) et de la cavité antérieure (mécanisme 1), de telle sorte que la fréquence de coupure présente des discontinuités dans son évolution fréquentielle. Soulignons que ce mécanisme est inévitable, quel que soit le type et la position de la source (contrairement au mécanisme 2). Cela signifie qu'il existe potentiellement des zones stables et instables dans l'espace articuloire/ acoustique des sibilantes non-antérieures, qui pourraient éventuellement définir les prototypes de phonèmes dans les langues humaines (*cf.* théorie quantique, ex. Stevens 1972).

L'emplacement des zones de discontinuité, toutefois, peut dépendre de plusieurs facteurs, liés à la l'anatomie individuelle de l'appareil phonatoire et au type d'articulation. En effet, les paires pôle-zéro de la cavité postérieure (qui, en croisant les résonances des cavités antérieures, provoque des sauts de la fréquence de coupure) dépendent de la longueur de cette cavité. Or, la longueur du conduit vocal varie en fonction des locuteurs, et même s'il est possible que deux locuteurs aient une cavité antérieure et un chenal palatal de longueur identiques pendant la production de /ʃ/, et donc une fréquence de coupure identique, une cavité postérieure plus ou moins longue selon ces locuteurs délimitera de manière différente l'espace articuloire en zones de stabilité et discontinuité acoustiques.

Le type articuloire peut avoir un effet semblable sur la répartition des zones de discontinuité. Pour un conduit vocal de longueur fixe, les configurations articuloires comprenant une cavité sublinguale, qui peut être modélisée par une cavité branchante, auront besoin d'une cavité orale plus courte pour atteindre une fréquence de coupure équivalente, et par conséquent une cavité postérieure plus longue par rapport à une configuration non-branchante (*cf.* **Figure 56**). De plus, une articulation apicale est susceptible d'être accompagnée d'un rétrécissement pharyngal, qui peut modifier la fréquence de résonance de la cavité postérieure (un effet non uniforme est attendu en fonction des formants – ex. Mrayati *et al.* 1988).

Nous pouvons nous demander dans quelle mesure les zones de stabilité prédisent l'articulation des sibilantes réelles. Pour vérifier cela, nous avons mesuré les longueurs approximatives de la constriction et de la cavité antérieure, comme illustré en **Figure 66**.

III. Modélisation acoustique des fricatives sibilantes

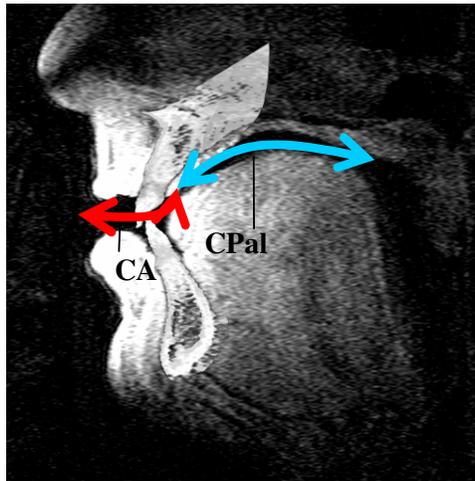


Figure 66. Mesure approximative de la longueur de la cavité antérieure (CA) et du chenal palatal (CPal) sur le profil médio-sagittal des données IRM.

Le **Tableau 13** indique les longueurs ainsi mesurées pour 28 locuteurs. Remarquons qu'il existe une forte tendance du chenal palatal à être plus long que la cavité antérieure pour /ç/ et plus court que la cavité antérieure pour /ʃ - ʒ/ en chinois, polonais et suédois. Il n'existe pas de telle relation systématique pour /ʃ/ en français et anglais. Toutefois, en français, les locuteurs Fr2, Fr4 et Fr7, de la stratégie « recul », présentent une cavité antérieure plus longue que le chenal palatal (type « ʒ - ʒ ») ; tandis que les locuteurs Fr3, Fr5 et Fr6, de la stratégie « déformation », font l'inverse (type « ç »). En japonais (/sʲ/), à l'exception des locuteurs J4 et J7, le chenal palatal est plus long que la cavité orale antérieure (type « ç »).

Tableau 13. Coefficient de normalisation de la longueur du conduit vocal (voir texte infra) et longueurs mesurées (brutes) de la cavité antérieure et du chenal palatal des sibilantes non-antérieures et/ou distribuées pour 28 locuteurs.

	Locuteur	C_{norm}	/ʃ/	
			ICA (mm)	IPal (mm)
anglais	E1	0.893787	32.205	5.619
	E2	0.971421	26.539	17.982
	E3	0.926758	37.448	35.089
	E4	0.944172	32.91	22.23
	E5	0.788851	31.132	11.16
français	Fr1	0.944172	32.189	35.249
	Fr2	0.918411	37.127	14.536
	Fr3	0.893787	29.621	49.324
	Fr4	0.909974	33.351	8.906

III. Modélisation acoustique des fricatives sibilantes

	Fr5	0.878166	29.959	39.351		
	Fr6	0.918411	37.175	44.882		
	Fr7	0.776658	28.172	8.497		
			<i>/s^j/</i>			
	Locuteur	F4 [a] synt./mes.	ICA (mm)	ICPal (mm)		
japonais	J1	0.962254	19.672	47.068		
	J2	1.01049	20.163	53.469		
	J3	0.971421	17.592	52.853		
	J4	0.870668	15.391	13.354		
	J5	0.814423	20.289	40.009		
	J6	0.764836	20.941	21.147		
	J7	0.855838	19.828	10.611		
	J8	0.827644	21.107	37.056		
	J9	0.935258	24.109	42.25		
			<i>/ç/</i>		<i>/ʃ/ ou /ʒ/</i>	
	Locuteur	F4 [a] synt./mes. ⁸⁰	ICA (mm)	ICPal (mm)	ICA (mm)	ICPal (mm)
chinois	C1	0.928019	26.191	30.508	31.776	18.055
	C2	0.672994	15.247	46.212	26.05	43.356
	C3	0.849673	25.743	57.361	35.297	26.892
	C4	0.900173	25.862	54.673	35.228	14.134
polonais	P1	0.857614	23.711	62.855	44.195	12
	P2	0.834002	32.522	38.86	35.194	7.631
suédois	S	0.918457	12.099	54.123	35.639	38.45

Étant donné que nous nous attendons à un décalage des zones de stabilité en fonction de la longueur du conduit vocal des locuteurs, nous avons normalisé la longueur de la cavité antérieure et du chenal palatal mesurées à l'aide d'un indice de la longueur du conduit vocal. Le larynx n'étant en général pas visible dans nos données IRM, nous avons utilisé une mesure acoustique, la fréquence du quatrième formant d'une voyelle ouverte ([a] ou

⁸⁰ F4 mesuré de la voyelle [a] en contexte non palatal, dans les mots /*fafang*/ en chinois, /*hazat*/ en polonais et /*sellan*/ en suédois. Pour le français, l'anglais et le japonais, la voyelle /a/ qui suit la sibilante /*ʃ*/ ou /*s^j*/ dans un mot du corpus (Annexe II) a été utilisée. Rappelons que les données articulatoires correspondent à une sibilante tenue.

III. Modélisation acoustique des fricatives sibilantes

[ɑ]). En effet, d'après Fant (1960 : p. 82), le quatrième formant de cette voyelle serait un des plus stables malgré les variations articulatoires (entre toutes les configurations pour les voyelles). Lorsque le F4 varie, cette variation pourrait donc être due à des facteurs individuels, dont la longueur du conduit vocal. Pour normaliser le conduit vocal des locuteurs en fonction du F4 de la voyelle [a] ou [ɑ], nous avons synthétisé cette voyelle à l'aide d'une configuration simple mesurant 17 cm, comme la configuration de sibilante non-antérieure utilisée dans cette étude.

Tableau 14. Dimension des configurations simples [a]/[ɑ] à deux tubes d'une longueur totale de 17 cm et la fréquence des quatre premiers formants calculés avec VTCalcs (parois souples, RL circuit, glotte fermée).

	tube postérieur		tube antérieur		Formants (Hz)			
	aire (cm ²)	longueur (cm)	aire (cm ²)	longueur (cm)	F1	F2	F3	F4
[ɑ]	1,4	7	6	10	725	1261	2616	3120
[a]	2	9	6	8	662	1387	2364	3467

Sachant que la fréquence des résonances théoriques est inversement proportionnelle à la longueur de la cavité dont elle est issue, on peut calculer un coefficient de normalisation, C_{norm} , à partir de la fréquence du F4.

$$C_{norm} = 1/(F4 \text{ mesuré} / F4 \text{ synthétisé})$$

La longueur normalisée (l_{norm}) de la cavité antérieure et du chenal palatal peut donc être calculée en divisant les longueurs brutes par ce coefficient :

$$l_{norm} = l_{mesuré}/C_{norm}$$

Les coefficients de normalisation sont présentés en Tableau 13.

La Figure 67 présente la dispersion des sibilantes en fonction de la longueur normalisée de leurs cavité antérieure et chenal palatal. Il est intéressant de remarquer que les mesures normalisées se concentrent dans les zones stables (gris foncé).

Cependant, des écarts assez importants sont observés à l'intérieur d'un même phonème, signalé par les marqueurs de la même forme. Par exemple, le /s^j/ japonais (triangles) occupe deux zones de stabilité (la deuxième et la troisième en partant du coin droit, en haut). De même, le /ʃ/ français et anglais (carrés) occupe deux zones (les première et deuxième). Ce phénomène est cohérent avec la variation observée des trajectoires formantiques en fonction des locuteurs, en français (cf. II-2), qui avait été interprétée comme le reflet de stratégies articulatoires différentes.

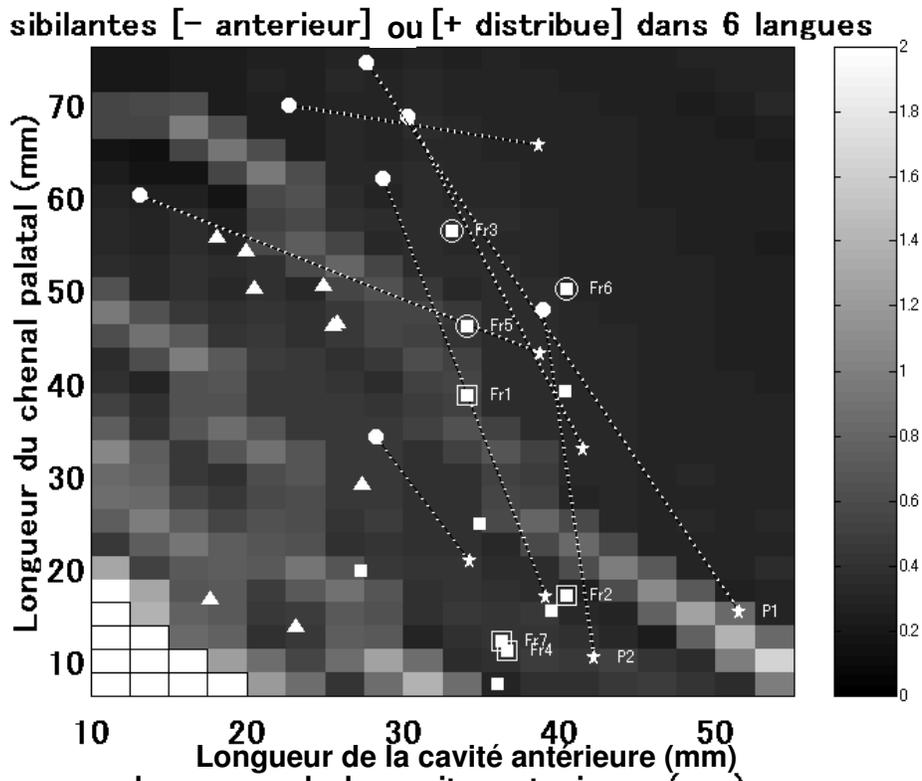


Figure 67. Dispersion des sibilantes en fonction de la longueur de la cavité antérieure et du chenal palatal mesurées sur les coupes IRM médio-sagittales et normalisée en fonction d'un facteur individuel de longueur du conduit vocal (Tableau 13), superposées aux zones de stabilité et d'instabilité acoustique prédites par simulation acoustique (source dentale ; v. légende de la Figure 62). Les triangles sont pour le /s^j/ japonais, les carrés pour les /ʃ/ français et anglais, les cercles pour l'alvéolo-palatale en chinois, suédois et polonais, et les étoiles pour la post-alvéolaire non palatalisée de ces trois dernières langues. Les sibilantes produites par les mêmes sujets sont connectées par des segments pointillés. En français, les données des locuteurs de la stratégie articulaire « recul » (cf. I-2) sont entourées d'un carré ; celles des locuteurs de la stratégie « déformation » par un cercle.

En conclusion, la réalisation des sibilantes non antérieures est-elle déterminée par la relation quantitative de l'articulation à l'acoustique ?

D'après la **Figure 67**, la réponse serait affirmative. Les données mesurées et normalisées se situent de préférence dans les régions foncées (stables) au détriment des zones pâles (instables). Toutefois, le choix des régions stables utilisées pour un phonème donné dépend des locuteurs, pour une raison encore inconnue, qui pourrait avoir trait à la morphologie individuelle des organes de la parole. Si les zones stables attirent les

III. Modélisation acoustique des fricatives sibilantes

réalisations phonétiques des sibilantes au niveau individuel, il est donc difficile de penser que l'émergence de l'opposition phonémique à l'intérieur des sibilantes non antérieures repose sur les propriétés quantiques de l'espace articulaire, en accord avec les arguments avancés par Ladefoged et Bhaskararao (1983 : p. 300). Le contraste du bruit de friction entre /ç/ et /ʃ/ en polonais, par exemple, semblerait plutôt fondé sur un critère de distance acoustique « suffisante » au sens de Lindblom (1983), sous réserve qu'il n'existe pas de frontière quantique absolue dans la génération de la source de bruit (ex. source palatale/dentale entraînant des conséquences acoustiques de type quantique). Par ailleurs, il est difficile de prendre la mesure des degrés de liberté articulaires qui se présentent aux locuteurs dans l'ajustement du bruit de friction, car les oppositions de type [+/- distribué] sont souvent associées à des différences de timbre de voyelle ou de locus du F2. Différents indices acoustiques (bruit + transitions) devraient, idéalement, être pris en compte pour déterminer où sont les frontières majeures.

De même, l'articulation, dans la présente section, a été modélisée par la fonction d'aire, mais il n'est pas certain qu'un changement continu des commandes articulaires donne lieu à un changement continu de la fonction d'aire. Par exemple, pour le contraste /s/- /ʃ/ en anglais, Perkell *et al.* (1979) ont proposé que le recul graduel de la langue était associé à un changement brusque de la forme du conduit vocal lorsque la langue se détache des incisives inférieures, en créant un espace sublingual. Il reste donc à déterminer si un tel phénomène ne se produit pas entre deux sibilantes non antérieures.

III-3 : EFFET DES CONFIGURATIONS DE /a/ ET /ʃ/ SUR LES TRANSITIONS FORMANTIQUES DANS LA SÉQUENCE /aʃa/ (1D)

En II-1, nous avons vu que l'aspect des transitions formantiques à la frontière de /ʃ/ et des voyelles adjacentes n'était pas directement lié au type articuloire « recul » ou « déformation ». Nous avons suggéré que la variation inter-individuelle quant à la direction du mouvement de F3 pouvait être conditionnée par la morphologie individuelle du conduit vocal. On sait que les individus possèdent un conduit vocal non seulement de longueur différente mais dont le rapport vertical (cavité pharyngale) et horizontal (cavité orale) diffèrent (ex. Honda *et al.*, 1996). Ces auteurs ont également montré que les différences morphologiques avaient une incidence sur le geste de la langue dans la production des voyelles. Fant (1960 : p. 66) modélise les voyelles ouvertes [ɑ ('a')] et [æ] par deux tubes uniformes, dont celui qui se situe du côté lèvres est plus large. Cette configuration ne permet pas l'établissement de résonance de Helmholtz, contrairement aux voyelles fermées. Les fréquences théoriques de résonances dépendent alors uniquement de la longueur des cavités. Il pourrait donc être suggéré que la configuration articuloire des voyelles ouvertes rend difficile la compensation inter-locuteurs quant à la longueur du conduit vocal, et par conséquent, qu'il existe une relation biunivoque plus forte entre la fréquence de ses formants et la longueur des cavités du conduit vocal.

Afin d'examiner dans quelles mesures les trajectoires formantiques peuvent être modifiées par la longueur et le rapport des cavités avant/arrière pendant la voyelle /a/, de même que par la configuration apicale (type « recul »⁸¹) ou palatalisée (type « déformation ») du /ʃ/, nous avons mené une expérience de simulation de la séquence /aʃa/ (simulation dans le domaine temporel). Les configurations cibles du conduit vocal pendant la voyelle /a/ et pendant la fricative /ʃ/ sont optimisées pour ressembler au mieux à une occurrence naturelle choisie (un locuteur supplémentaire du français, Fr8). Les conséquences d'autres combinaisons sont également discutées quant à leur mécanisme acoustique. Ces résultats ont été publiés dans Toda *et al.* 2008 (ISSP 2008).

Méthode

Modélisation « 1D » dans le domaine temporel (VCVsynth)

La modélisation dans le domaine temporel avec le programme VCVsynth (Maeda, 1996)

⁸¹ La stratégie « recul » tend à donner lieu à un /ʃ/ apical. Le locuteur Fr1 en est une exception, produisant un /ʃ/ palatalisé, comme l'est son /s/, tout en réunissant les autres attributs de la stratégie « recul » : recul de la langue et protrusion labiale en comparaison à /s/. Voir également la **Figure 23**.

III. Modélisation acoustique des fricatives sibilantes

permet d'obtenir des séquences VFV synthétisées à partir de la fonction d'aire de voyelles et de fricatives, de sources d'excitation appropriées (nature et emplacement), et de paramètres déterminant leur coordination temporelle. Tous les paramètres temporels sont spécifiés par les cibles temporelles (en ms) et le mode d'interpolation (linéaire ou cosinusoidal).

La cible articulatoire des voyelles et de la fricative est spécifiée par une fonction d'aire. Les transitions sont obtenues par l'interpolation de l'aire section par section (le nombre total de sections doit donc être le même entre les voyelles et la consonne⁸²) en suivant une courbe cosinusoidale dans le temps entre deux cibles consécutives. Lorsque la fricative comporte un branchement, le couplage de cette cavité est spécifiée par des paramètres temporels spécifiques.

L'activation des sources voisée (voyelle) et de bruit (fricative) est déterminée automatiquement, en fonction des configurations glottique et supra-glottique. Trois paramètres spécifient l'état de la glotte : la ligne de base de l'ouverture glottique, l'amplitude de fluctuation de l'aire glottale (v. **Figure 68**), et la fréquence fondamentale. La source de voisement est basée sur Fant (1960). La source de bruit correspond, à long terme, à un bruit rose, dont la pente spectrale est d'environ -12 dB/oct au-dessus de 1 kHz. Son intensité maximale peut être réglée manuellement par rapport à la source voisée. Son intensité varie à chaque instant en fonction de la taille de la constriction et du débit d'air.

⁸² Mais pas nécessairement de la même longueur. Dans cette étude, toutefois, la longueur des sections était la même pour la fricative et la voyelle.

III. Modélisation acoustique des fricatives sibilantes

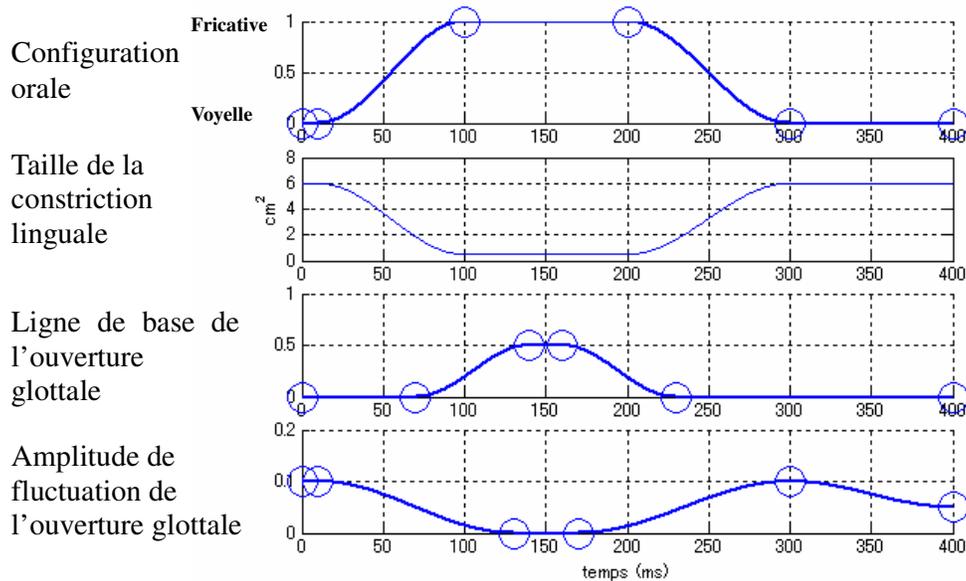


Figure 68. Exemple de coordination temporelle des paramètres articulatoires et glottiques pour la modélisation VCV. L'axe horizontal représente le temps. La configuration orale et les paramètres glottiques sont contrôlés à l'aide de points d'ancrage, indiqués par des cercles. Les valeurs intermédiaires sont déterminées par interpolation cosinusoidale. La fréquence fondamentale, F0, non illustrée, est contrôlée de manière similaire.

Configurations cibles pour /ʃ/

Les configurations cibles potentielles pour simuler la sibilante post-alvéolaire (du français) ont été créées sur un continuum, où la longueur du chenal palatal et de la cavité antérieure étaient variables (Figure 69), de façon à simuler les deux variantes articulatoires décrites dans le chapitre I. La longueur totale du conduit vocal a été ajustée à celle du /a/.

III. Modélisation acoustique des fricatives sibilantes

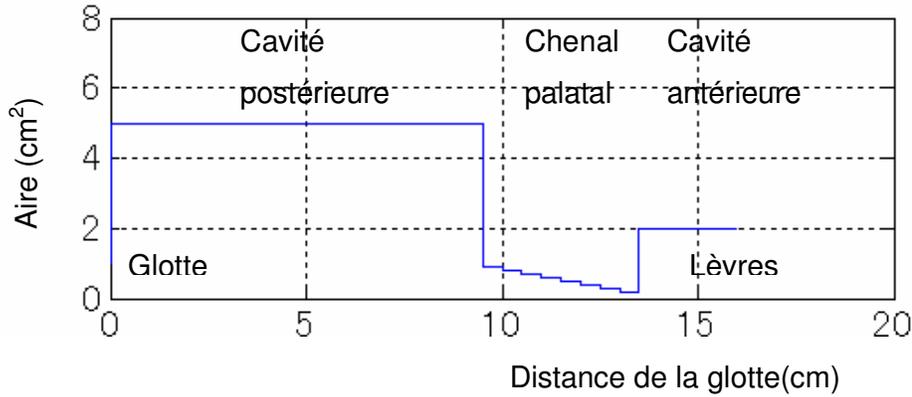


Figure 69. Fonction d'aire pour un /ʃ/ sans cavité branchante (ici, configuration palatale).

Configurations cibles pour /a/

Il est connu, comme nous l'avons déjà mentionné, que la forme du conduit vocal varie en fonction des sujets tant par sa longueur totale que par le rapport entre sa partie orale (horizontale) et pharyngale (verticale – Honda *et al.* 1996). Ainsi, nous avons pensé, dans l'occurrence /aʃa/ en français, qu'une différence articulatoire dans la voyelle /a/ en fonction des locuteurs, associée aux deux types de /ʃ/, pouvait expliquer les différentes transitions formantiques observées, décrites dans le chapitre II-1 (Toda, 2006). Afin de tester cette hypothèse, nous avons créé un continuum pour la configuration cible de la voyelle /a/, où le rapport de longueur cavité postérieure / cavité antérieure varie entre 0,3 et 1,7, et la longueur totale du conduit vocal varie entre 13 et 20 cm (Figure 70).

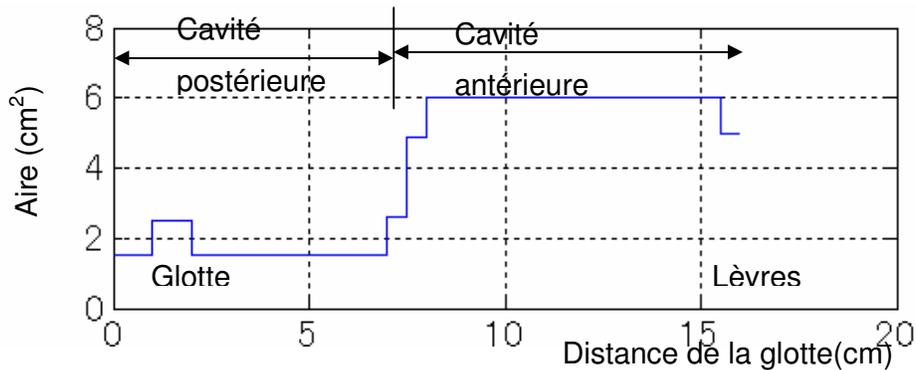


Figure 70. Fonction d'aire du conduit vocal pour un /a/.

Résultats

Configuration optimale pour la cible /a/

Les formants F1 à F4 mesurés dans la partie stable de la voyelle postconsonantique /a/ des occurrences /aʃa/ ('achat') en français ont été comparés aux formants F1 à F4 des fonctions de transfert calculées à partir de la configuration de /a/ décrite dans la **Figure 70**, dont la longueur totale et le rapport de longueur de la cavité postérieure sur la cavité antérieure étaient variables. Les configurations les plus proches en termes de somme des carrés des différences F1 à F4 (racine carrée $((F1_{calculé}-F1_{mesuré})^2 + (F2_{calculé}-F2_{mesuré})^2 + (F3_{calculé}-F3_{mesuré})^2 + (F4_{calculé}-F4_{mesuré})^2)$) pour chacun des locuteurs sont indiquées dans la **Figure 71**.

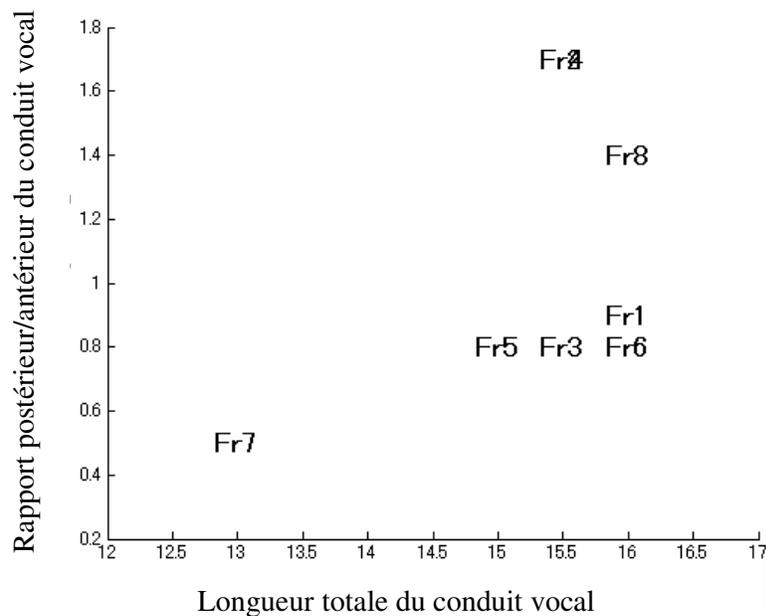


Figure 71. Configurations de la voyelle /a/ définies par leur longueur totale (axe horizontal) et le rapport de longueur cavité postérieure / cavité antérieure (axe vertical) permettant d'obtenir les formants F1 à F4 les plus proches des formants mesurés dans la partie stable de la voyelle postconsonantique de l'occurrence /aʃa/, pour les locuteurs Fr1 à Fr7 (Fr7 est la seule femme) et un locuteur additionnel Fr8.

En regardant de plus près, la fonction de distance mesuré-calculé présente parfois deux minima locaux (**Figure 72**). La présence de ces deux pics (signalés par les « x ») est due aux propriétés élémentaires d'un tube acoustique, appelée réciprocité. Avec notre configuration de /a/, dans un scénario où les pertes sont ignorées, l'interversion de la longueur de la cavité antérieure et de la cavité postérieure donne lieu à une fonction de transfert identique. Dans notre simulation, qui tient compte du rayonnement aux lèvres, les deux fonctions d'aire dont la fréquence des formants est identique sont obtenues avec des longueurs légèrement différentes.

III. Modélisation acoustique des fricatives sibilantes

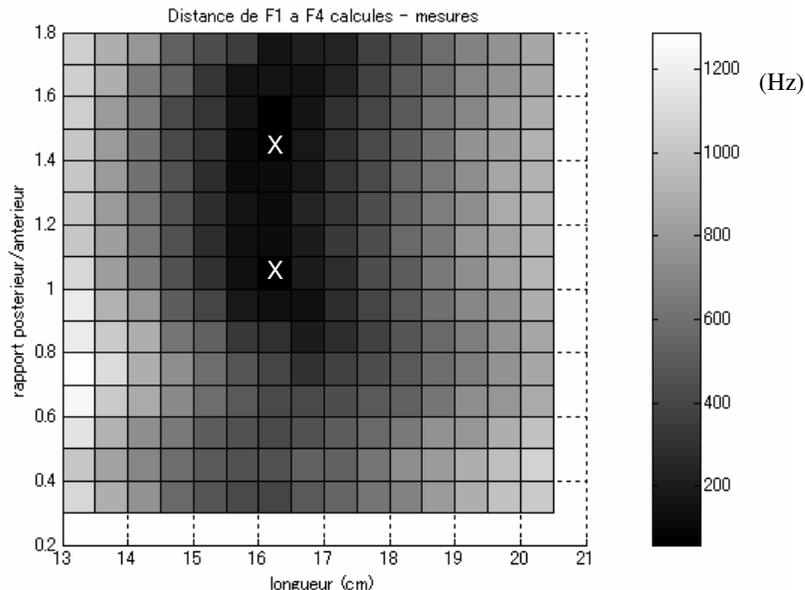


Figure 72. Fonction de distance des formants F1 à F4 calculés et mesurés, basée sur la somme des carrés, exprimée en niveaux de gris, pour le locuteur Fr8. Les axes horizontal et vertical correspondent aux paramètres articulatoires de la configuration /a/ (Figure 70). Les formants F1 à F4 mesurés pendant la partie stable de la voyelle /a/ postconsonantique pour le locuteur Fr8 étaient de 734, 1368, 2690, 3488 Hz, respectivement.

D'après l'intensité relative des formants F3 et F4 du locuteur Fr8, on peut supposer une affiliation du F3 à la cavité antérieure (perte due au rayonnement aux lèvres, expliquant une intensité modérée en référence à F2 et F4) et l'affiliation du F4 à la cavité postérieure. Parmi les deux configurations permettant d'obtenir des formants proches, la variante 'postérieure' (proportion postérieur : antérieur = 1)⁸³ est donc plus vraisemblable. Les deux configurations seront néanmoins retenues comme cible de /a/ dans la simulation VCV.

⁸³ Dans le sens où la constriction est localisée à un lieu plus postérieur.

III. Modélisation acoustique des fricatives sibilantes

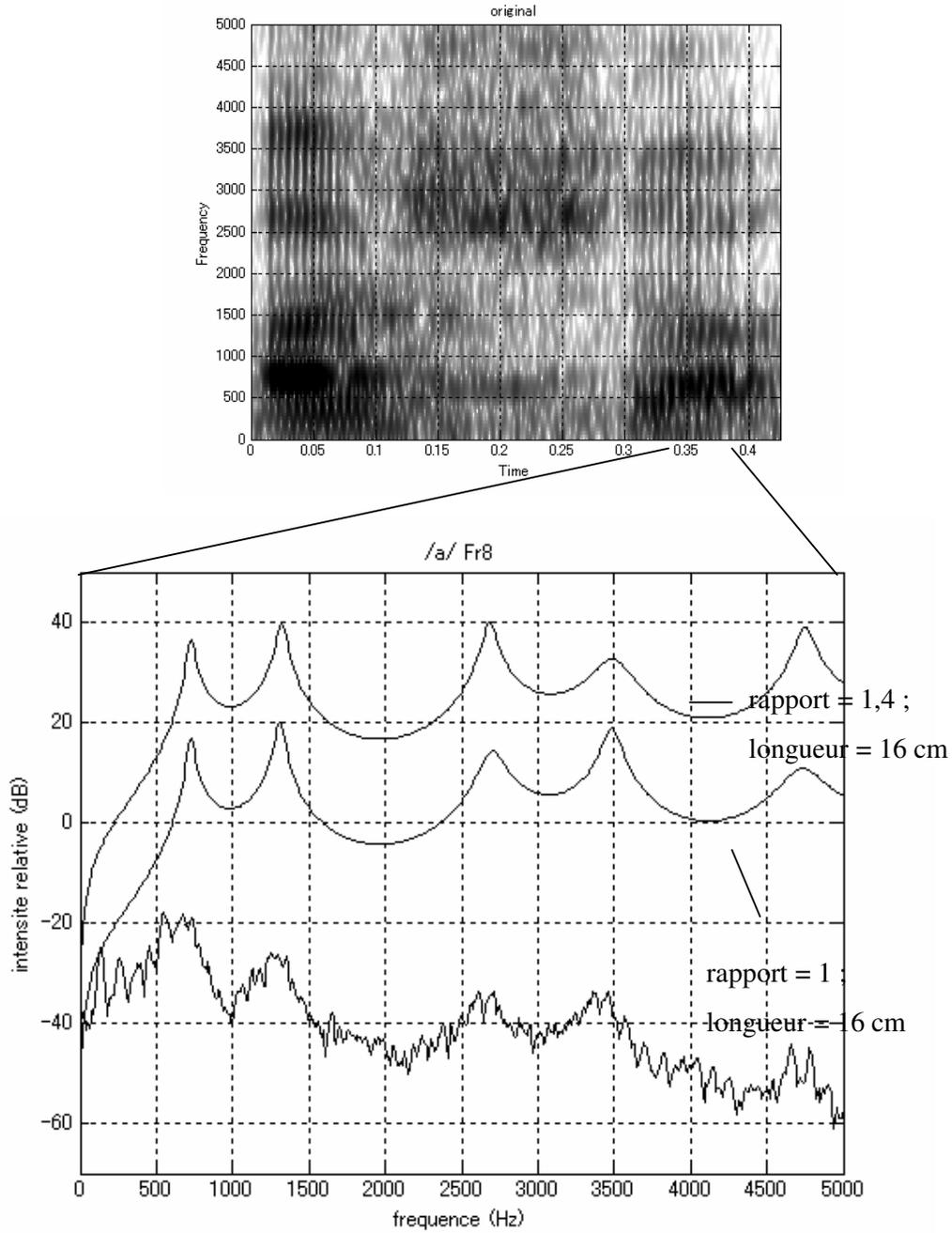


Figure 73. En haut : spectrogramme de l'occurrence /a/ du locuteur Fr8 ; et en bas, spectre de la portion stable de la voyelle, comprise entre 0,33 et 0,42 s du spectrogramme (ligne épaisse)⁸⁴, et fonctions de transfert dont la fréquence des

⁸⁴ Moyenne du spectre FFT de 20 fenêtres Hamming de 25 ms.

formants F1 à F4 est la plus proche des formants mesurés. La différence de pente spectrale entre le spectre naturel et les fonctions de transfert est due à l'enveloppe spectrale de la source, d'environ -12dB/octave (Fant, 1960 : p.51).

Configuration optimale pour la cible /ʃ/

Nous avons fait varier la longueur du chenal palatal et de la cavité antérieure, comme dans la section III-2, afin de sélectionner les configurations qui donnent lieu à une fréquence de coupure autour de 2660 Hz, fréquence du pic principal du bruit de friction de /ʃ/ produit par le locuteur Fr8. Comme attendu, d'après les résultats présentés en **Figure 59**, de nombreuses combinaisons de longueurs de chenal palatal et de cavité antérieure donnent lieu à une fréquence de coupure autour de 2660 Hz, par compensation (**Figure 74**). Deux configurations cibles de /ʃ/, représentatives de chacune des stratégies « recul » et « déformation », ont été sélectionnées parmi celles-ci, afin de réduire les combinaisons fricative-voyelle faisant l'objet de simulation. Leur fonction de transfert, en lignes pleines, est illustrée en **Figure 75**, de même que celles des autres configurations ayant la même fréquence de coupure (lignes pointillées). Dans la simulation VCV, le nombre de sections des fonctions d'aire de /ʃ/ a été adapté à la voyelle adjacente (voir ci-dessus), en variant la longueur de la cavité postérieure.

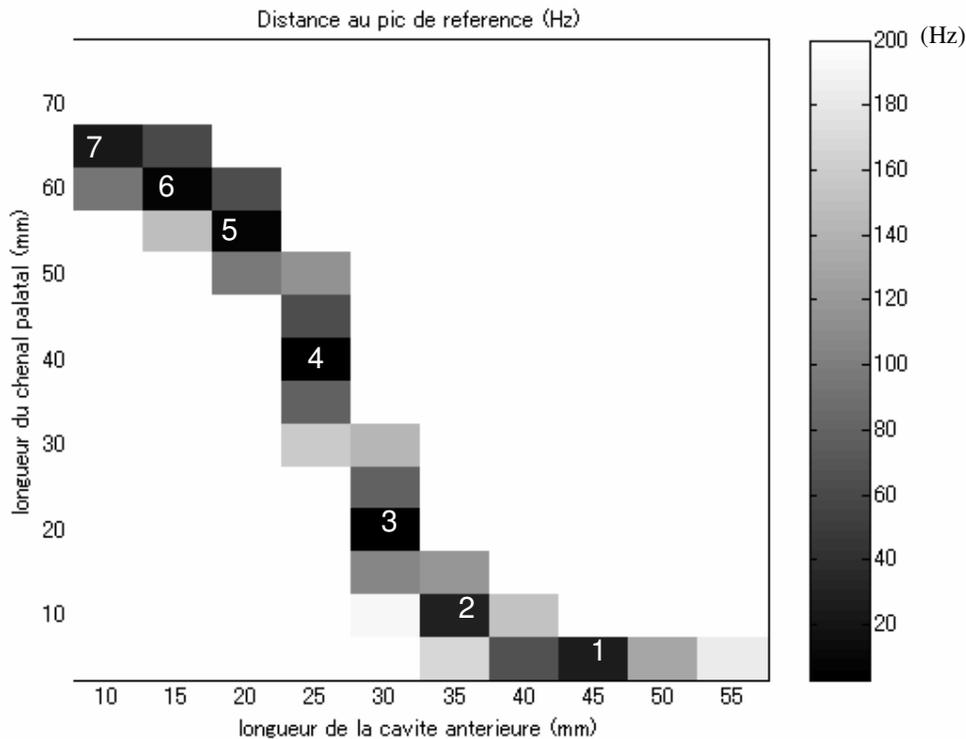


Figure 74. Distance de la fréquence de coupure des fonctions de transfert au pic de référence du locuteur Fr8 (2660 Hz) représentée en niveaux de gris. L'axe

horizontal correspond à la longueur de la cavité antérieure et l'axe vertical à la longueur du chenal palatal (la configuration du conduit vocal pour /ʃ/ est illustrée en Figure 69).

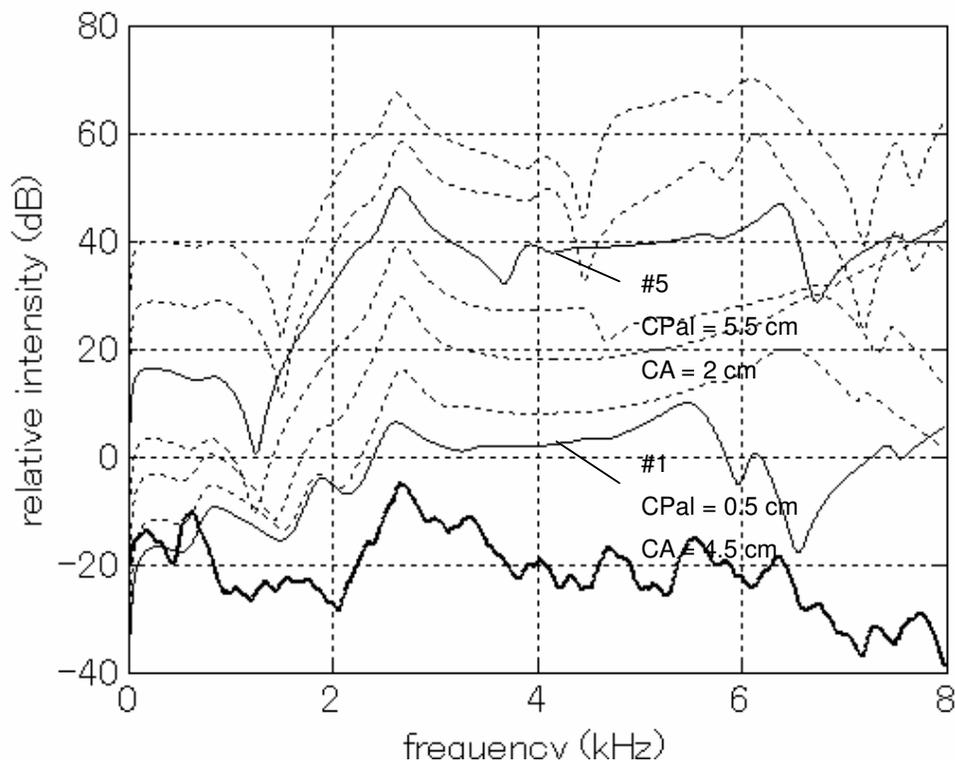


Figure 75. Spectre moyen du bruit de friction de /ʃ/ extrait de la séquence /aʃa/ (ligne épaisse, en bas) et, de bas en haut, fonctions de transfert des configurations de /ʃ/ donnant lieu à un pic proche du bruit naturel numérotées de 1 à 7 dans la Figure 74. La source de pression est localisée aux dents.

Résultats de synthèse VCV

Les résultats de synthèse avec la configuration ‘postérieure’ de la voyelle /a/ sont présentés en Figure 76. Entre les deux configurations de /ʃ/, la variante à constriction courte, à droite (numéro 1 de la Figure 74), donne une transition du F2 plus proche de celle observée dans l’occurrence naturelle (Figure 73, haut)⁸⁵, tendant vers 1600 Hz à la jonction de la fricative, au lieu de 2000 Hz avec la variante du /ʃ/ palatalisé, à gauche.

⁸⁵ La transition du F2 est surtout visible à la jonction de la voyelle préconsonantique avec la fricative. Le F2 est fortement atténué et difficile à localiser à la jonction postconsonantique, probablement à cause d’un antiformant.

III. Modélisation acoustique des fricatives sibilantes

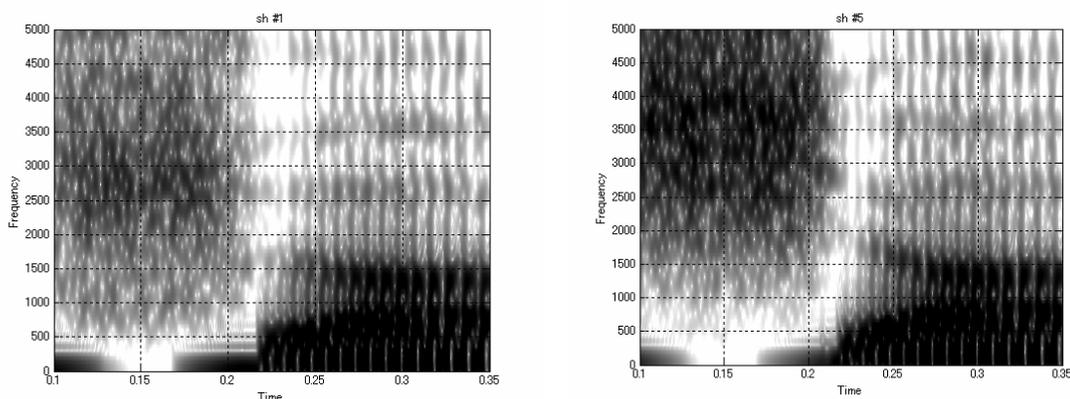


Figure 76. Spectrogrammes de la transition /ʃa/⁸⁶ synthétisée à l'aide de vcvSynt. La configuration cible /a/ est caractérisée par un rapport cavité postérieure/cavité antérieure = 0,9 et une longueur totale de 16 cm. A gauche, configuration cible /ʃ/ de constriction courte (numéro 1 ; cavité antérieure de 45 mm et constriction de 5 mm) et à droite, de constriction longue (numéro 5 ; cavité antérieure de 15 mm et chenal palatal de 55 mm).

Une configuration apicale du /ʃ/ est compatible avec les données IRM des sibilantes tenues de ce locuteur (**Figure 77**). Malgré une articulation de type « déformation » (absence de recul de la racine de la langue en référence à /s/, bombement important du dos de la langue en comparaison à /s/, et absence de protrusion labiale franche), le conduit vocal de /ʃ/ du locuteur Fr8 possède une constriction très courte, formée par l'apex⁸⁷.

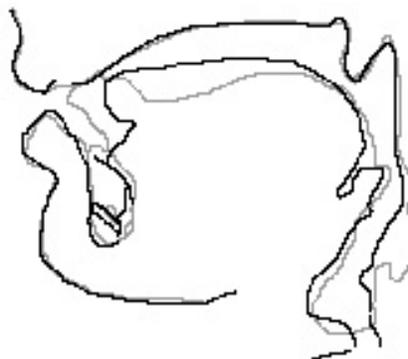


Figure 77. Contour médio-sagittal du conduit vocal d'après les données IRM

⁸⁶ Les mêmes cibles de /a/ ayant été utilisées pour la voyelle initiale et la voyelle post-consonantique, les transitions /aʃ/ et /ʃa/ sont parfaitement symétriques. Nous ne montrons donc que la transition /ʃa/.

⁸⁷ Il s'agirait d'une situation inverse du locuteur Fr1 (voir . note 81).

des fricatives tenues /ʃ/ (noir) et /s/ (gris) produites par le locuteur Fr8 (les modalités d'acquisition sont précisées dans Aron *et al.*, 2008).

L'occurrence synthétisée avec une cible /a/ antérieur (**Figure 78**, gauche) présente à peu près les mêmes transitions formantiques que le /a/ postérieur (**Figure 76**, droite). En effet, même si l'affiliation formantique est différente pendant la cible de la voyelle, les formants ne se croisant jamais, ils vont suivre la même trajectoire vers les formants F1, F2, etc. du /ʃ/. La trajectoire des formants est susceptible d'être modifiée lorsqu'il survient des formants surnuméraires dus à des cavités branchantes. Ce cas n'est pas examiné ici.

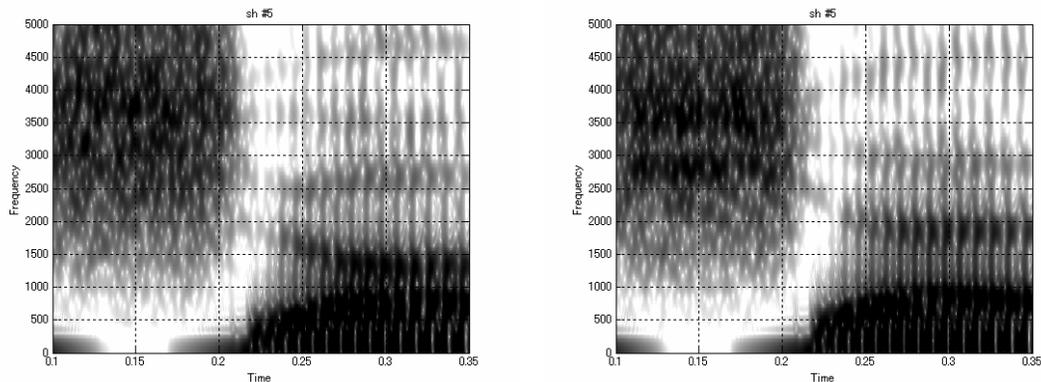
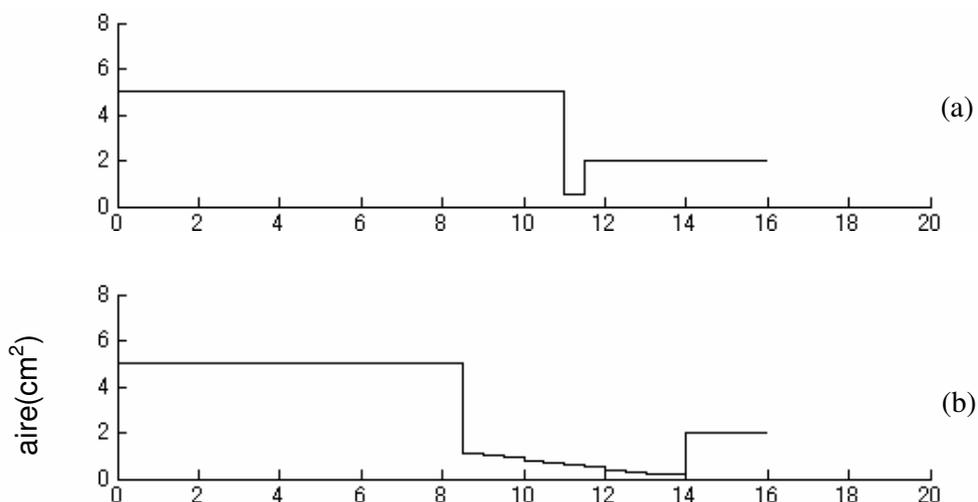


Figure 78. Spectrogrammes de la transition /ʃa/ synthétisée avec une configuration /ʃ/ de constriction longue (numéro 5). A gauche, configuration /a/ antérieur d'un rapport cavité postérieure/cavité antérieure = 1,4, et une longueur totale de 16 cm. A droite, configuration /a/ de type féminin, d'un rapport cavité postérieure/cavité antérieure = 0,5, et une longueur totale de 13 cm.

Nous constatons cependant que la combinaison d'un même /ʃ/, palatalisé, avec deux types de /a/ donne lieu à des transitions formantiques très différentes. Avec un conduit vocal de 16 cm, on obtient un F3 montant et un F4 descendant (**Figure 78**, gauche) alors qu'avec un conduit vocal de 13 cm, on observe un F3 descendant et un F4 montant. En effet, entre ces conduits vocaux de longueur différente, la résonance donnant lieu au pic principal de la fricative change d'affiliation : en raison d'une cavité postérieure plus longue affiliée au F2, elle correspond au F3 pour le conduit vocal « masculin » de 16 cm. En revanche, la cavité postérieure courte dans le conduit vocal « féminin », de 13 cm, donne lieu à une résonance plus élevée que le pic principal, d'où l'affiliation au F2 du pic principal. La différence de structure formantique pendant la fricative, en raison d'un ordre différent des résonances de la cavité antérieure et du chenal palatal par rapport aux résonances de la cavité postérieure, explique donc cette différence frappante des transitions formantiques.

Discussion

Nous avons vu que la transition du F2 tendait vers une cible plus élevée vers la fricative /ʃ/ lorsqu'il s'agit d'une configuration palatalisée, avec une constriction longue. Dans les spectrogrammes de la **Figure 76**, le F2 n'est pas connecté à un pic de bruit⁸⁸, ce qui suggère que ce formant est affilié à la cavité postérieure durant la fricative. Il est alors logique qu'une configuration palatalisée, où la constriction étant plus longue⁸⁹, la cavité postérieure s'en trouve raccourcie d'autant (cf. **Figure 79 a versus b**), produise des résonances de la cavité postérieure de plus haute fréquence (qui est ici le locus du F2 pendant la fricative). Dans la séquence /ʃa/ avec un conduit vocal court (féminin ; **Figure 78**, droite), le F2 de la voyelle est connecté au premier pic spectral, ce qui indique qu'il s'agit d'une résonance d'une cavité antérieure. La cavité postérieure étant beaucoup plus courte que les configurations masculines (dû à un larynx plus élevé ; **Figure 79 c**), sa première résonance vient seulement après celle de la cavité antérieure, et éventuellement du chenal palatal, devenant ainsi F3 ou F4.



⁸⁸ D'après la trajectoire du F2, il existe bien une résonance à cet endroit, mais qui n'est pas efficacement excitée.

⁸⁹ La constriction pouvant être assimilée à un résonateur ouvert-ouvert, dont les fréquences de résonance sont les multiples de demi-onde, il faut le double de longueur pour obtenir un pic de même fréquence que la cavité antérieure (dans les configurations avec constriction courte) assimilable à un résonateur quart d'onde (fermé-ouvert).

III. Modélisation acoustique des fricatives sibilantes

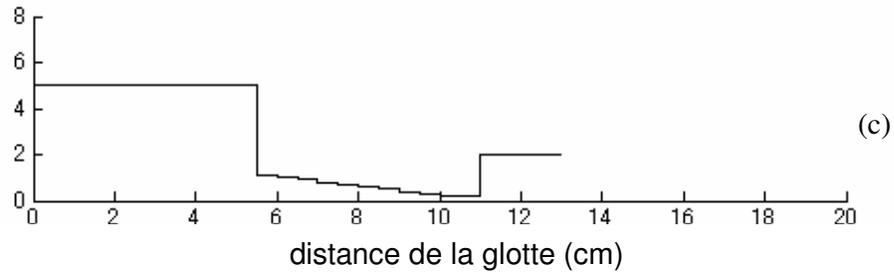


Figure 79. Fonctions d'aire de /s/. La glotte est représentée à gauche et les lèvres à droite. (a) Configuration avec constriction courte. (b) /s/ avec constriction longue (palatalisé). (c) /s/ avec constriction longue, et conduit vocal court.

Pour conclure, cette expérience de simulation VCV a permis de montrer les mécanismes par lesquels des configurations articulatoires acoustiquement équivalentes sur le plan statique peuvent donner lieu, combinées entre elles, à des transitions formantiques diverses. Cette expérience n'a pas l'ambition de décrire les indices acoustiques exhaustifs qui permettraient de prédire la configuration articulatoire d'une séquence donnée dans le cadre de l'inversion articulatoire. Elle montre, cependant, que pourvu que les configurations du conduit vocal définies par des paramètres articulatoires appropriés pour la cible de chacun des segments soient identifiés, les transitions formantiques permettent de restreindre les solutions possibles.

III-4 : AFFILIATION DES FORMANTS AUX CAVITÉS DANS LES CONFIGURATIONS DE /ç/ ET /ʃ/ RÉALISTES (1D)

Dans les sections précédentes, nous avons examiné l'affiliation formantique de la fonction de transfert d'un point de vue général, à l'aide de modèles simplifiés. Dans la présente section, nous examinons l'affiliation formantique dans la fonction de transfert de quelques modèles 1D réalistes dérivés des données IRM, que nous comparerons au spectre moyen du bruit de friction produit par les locuteurs, à titre de validation.

Ces expériences nous permettront de mettre en évidence, en particulier, le rôle acoustique de la cavité labiale. Jusqu'ici, la cavité labiale faisait partie intégrante de la cavité antérieure dans les configurations simplifiées. Cependant, la cavité labiale pourrait être en réalité plus indépendante acoustiquement, étant donnée l'étroitesse de la constriction dentale observée dans les données IRM (cf. I-4).

Les fonctions d'aire des deux locuteurs polonais ont été utilisées dans les expériences de simulation de cette section. Le polonais a été choisi car il existe une opposition de « lieu » d'articulation (au sens large) à l'intérieur des sibilantes non antérieures. Comme nous l'avons déjà mentionné dans l'introduction du chapitre II, il a été montré que le contraste entre ces deux sibilantes post-alvéolaires peut être perçu par le biais du bruit de friction (Lisker, 2001 ; Nowak, 2006). Il existerait donc des caractéristiques spectrales propres à chacune de ces sibilantes. Halle et Stevens (1997) ont observé la présence d'un pic dans la région du F2 (autour de 1,5 kHz) pour /ʃ/. Nous avons également observé un tel pic chez nos deux locuteurs en II-2. Halle et Stevens attribuent ce formant fricatif à une résonance de la cavité postérieure. De telles résonances ne seraient pas observées pour /ç/, en raison de l'isolement acoustique de la cavité postérieure (pharyngale) de par la présence d'un chenal palatal long et étroit. Cette explication, cependant, ne nous semble pas satisfaisante d'après nos données IRM, étant donné l'étroitesse de la constriction linguale dans /ʃ/. Avec une aire de constriction de 0,1 à 0,6 cm², d'après l'expérience de Badin (1989, p.53), les résonances de la cavité postérieure devraient apparaître en tant que paires pôle-zéro rapprochés, tendant à s'annuler mutuellement, comme nous l'avons également illustré dans la section III-1. L'incertitude quant à l'affiliation formantique dans le spectre de /ʃ/ et de /ç/ demeure donc entière.

Les sibilantes du polonais présentent également un intérêt pour étudier le rôle de la protrusion labiale, plus importante dans /ʃ/ que /ç/ chez le locuteur P1. Une partie des résultats de cette section se destine à être publiée dans un chapitre de livre (Toda *et al.*, en préparation)⁹⁰.

⁹⁰ Le locuteur présenté sous le code 'P1' dans cette thèse porte le code 'P2' dans Toda *et al.* (en préparation), et réciproquement.

Méthode

Les propriétés acoustiques de configurations réalistes ont également été calculées à l'aide de VTF_fric.

Fonction d'aire mesurée sur les données IRM

Les fonctions d'aires ont été mesurées sur les données IRM, où, pour chaque coupe coronale, la voie aérienne a été encerclée manuellement et son aire obtenue dans le logiciel Image J (Les fonctions d'aire d'origine sont présentées dans I-2 et dans l'annexe III). L'aire a été mesurée tous les millimètres, à partir des lèvres, dès que les commissures labiales étaient visibles, jusqu'à la région vélaire. L'aire du conduit vocal dans la pharyngale, où le contour de la voie aérienne n'était pas bien visible, n'a pas été mesurée.

Traitement de la cavité postérieure tronquée

Étant donné que les fonctions d'aire dérivées des données IRM ne couvrent que la partie antérieure du conduit vocal, nous avons dû appliquer un traitement particulier pour éliminer les résonances de la cavité postérieure affectées par la troncation du conduit vocal en plein milieu.

Par exemple, si les fonctions d'aire avaient été utilisées telles quelles, avec une « glotte » ouverte ou fermée connectée au point tronqué (dans la région vélaire), la cavité « postérieure » tronquée, située en arrière de la constriction, aurait produit des résonances de haute fréquence, alors que dans la réalité, cette cavité se prolongeant jusqu'au pharynx, on s'attendrait à des résonances de beaucoup plus basse fréquence.

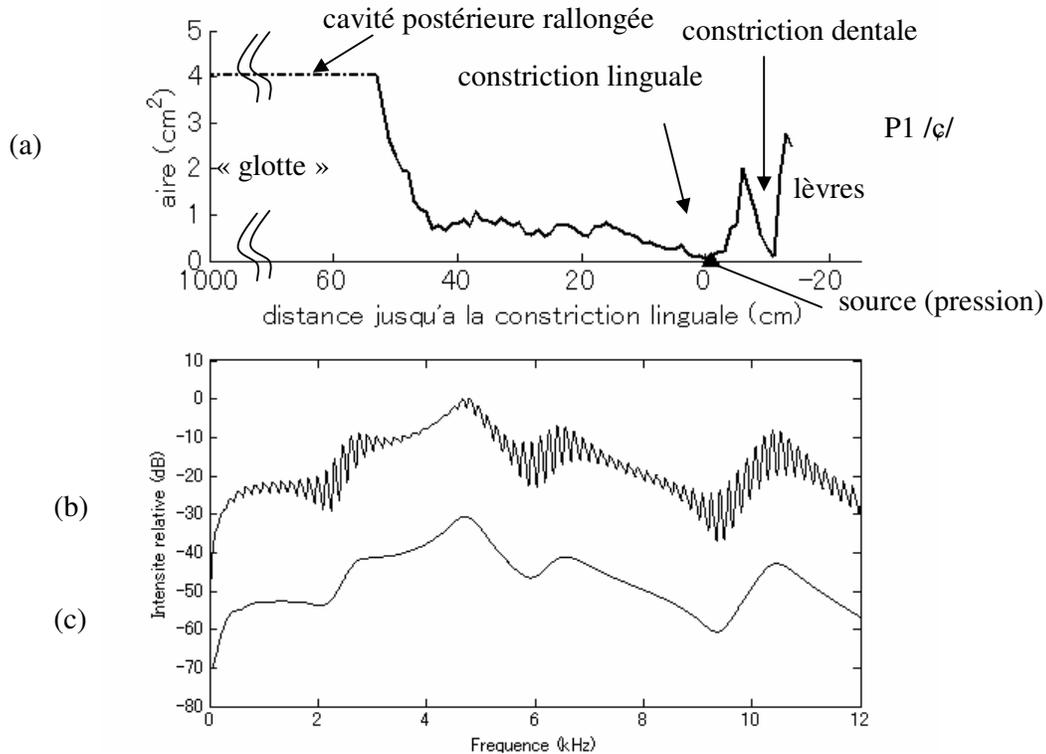


Figure 80. (a) Exemple de fonction d'aire dont la cavité postérieure a été rallongée d'un mètre, (b) sa fonction de transfert brute et (c) sa fonction de transfert après lissage cepstral.

Nous avons donc choisi de supprimer toute résonance provenant de la partie postérieure du conduit vocal par filtrage. La partie postérieure de la fonction d'aire a été prolongée de 1 mètre environ (**Figure 80 a**), de telle sorte que les résonances résultant de cette structure apparaissent à intervalles fréquentiels rapprochés sur la fonction de transfert (**Figure 80 b**), de manière comparable aux harmoniques par rapport aux formants dans le spectre des voyelles. Ainsi, ces résonances ont pu être supprimées par filtrage cepstral (**Figure 80 c**). Une telle manipulation ne doit pas affecter de manière significative les résonances de la cavité orale antérieure et de la cavité labiale, dès lors que les constriction sont étroites et qu'on peut supposer un couplage acoustique faible.

Cavités branchantes

Lorsque les fonctions d'aire comportaient une cavité branchante (P1 /ʃ/ et P2 /ç/ et /ʒ/), cette cavité a été modélisée en tant que circuit parallèle au conduit vocal principal (comme le conduit nasal pour les voyelles ou consonnes nasales, mais avec l'extrémité obstruée).

Configurations tronquées

Comme nous venons de le mentionner, les constriction linguale et dentale étant étroites, on peut supposer une indépendance acoustique élevée entre les différentes parties du conduit vocal séparées par ces constriction. Ainsi, en plus des configurations « originales » dérivées des fonctions d'aire mesurées, des configurations « tronquées » aux constriction ont été utilisées. La partie du conduit vocal situé en amont (arrière) de la constriction linguale et dont la partie arrière est prolongée d'un mètre (cf. **Figure 80 a**) est désignée par le terme « cavité postérieure ». La partie délimitée par la constriction linguale et la constriction dentale est appelée « cavité *orale* antérieure ». La partie en aval (avant) de la constriction dentale est appelée « cavité labiale ». L'ensemble qui regroupe la *cavité orale antérieure* et *cavité labiale* est désigné par le terme « cavité antérieure ».

En supprimant alternativement les cavités antérieure et postérieure (avec son prolongement d'un mètre), on peut examiner les contributions respectives de la cavité antérieure et du chenal palatal dans la fonction de transfert originale. En effet, dans certaines fonctions d'aire (ex. P1 /ç/), un élargissement abrupt du chenal palatal est observé (**Figure 80 a**). Ainsi, même si l'isolement acoustique du chenal palatal et de la cavité pharyngale (dont les résonances sont supprimées par filtrage) n'est pas aussi parfait que celui de la cavité orale antérieure, le chenal palatal peut être responsable de résonances propres à lui.

Plusieurs sources d'erreur peuvent être prédites dans la modélisation 1D avec les fonctions d'aire « réalistes ». D'abord, la fonction d'aire, dérivée des coupes coronales des données IRM, n'est pas nécessairement correctement orientée par rapport aux modes de résonance effectives du conduit vocal (c'est-à-dire dans le sens longitudinal). Or, la modélisation 1D suppose une propagation plane de l'onde acoustique. Des erreurs d'orientation peuvent donc avoir comme conséquence de raccourcir la longueur effective des cavités (tout en élargissant leur aire), et de donner lieu à des résonances de fréquences plus élevées. Par ailleurs, les lèvres forment une courbe, et les extrémités latérales étaient souvent invisibles sur leur partie antérieure. Leur longueur, dans les fonctions d'aire, est donc généralement sous-estimée. Afin de remédier à ce problème, une correction simple, basée sur la longueur approximative des lèvres observée sur le profil médio-sagittal, a été appliquée aux fonctions d'aire de /s/.

Résultats

P1 /s/

La Figure 81 indique les configurations diverses et les fonctions de transfert simulées correspondantes. La première fonction de transfert (Figure 81 b') est obtenue avec la configuration originale complète, en supposant une source de pression située dans la constriction. La deuxième (Figure 81 c') est obtenue avec une configuration tronquée à la constriction linguale, qui ne contient que la cavité antérieure, avec une source de pression

III. Modélisation acoustique des fricatives sibilantes

placée à l'extrémité arrière de la cavité. La troisième (Figure 81 d') est obtenue avec une configuration tronquée à la constriction dentale, qui ne comporte que la cavité labiale. Une source de pression a été placée à l'extrémité arrière du conduit vocal. La quatrième fonction de transfert (Figure 81 e') est obtenue avec une configuration de nouveau tronquée à la constriction linguale, mais qui ne contient, cette fois, que la partie postérieure (la source était située à la « glotte », environ 1 mètre en arrière). La cinquième (Figure 81 f') correspond à la cavité antérieure dont la cavité labiale a été corrigée (allongée) pour mieux correspondre à la longueur réelle, avec une source de pression à l'extrémité arrière des lèvres. Enfin, la dernière courbe (Figure 81 g') est obtenue (même configuration) avec une source de débit localisée dans la cavité labiale.

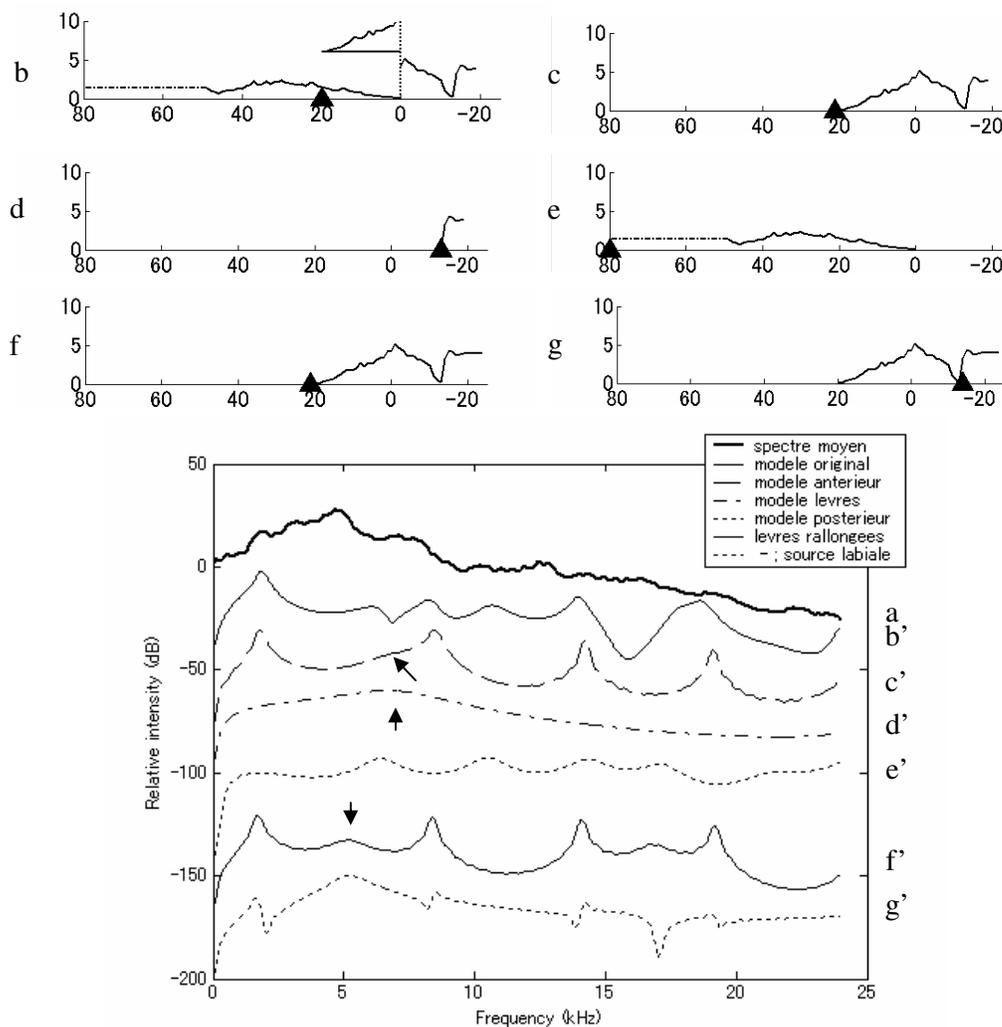


Figure 81. Fonctions d'aire de six configurations de /s/ du locuteur P1 (petites figures du haut, de b à g), le spectre moyen du bruit de friction enregistré (figure du bas, ligne épaisse a), et les fonctions de transfert (lignes fines, de b' à g') calculées pour chacune des configurations. Dans les fonctions d'aire, l'axe

horizontal représente la distance (en mm) à partir de la constriction linguale (0), avec la glotte à gauche. L'axe vertical représente l'aire de chaque section (en cm²). Les triangles indiquent l'emplacement de la source. Les cavités postérieures allongées sont indiquées en pointillés (elles ne sont pas représentées en entier, mais les calculs ont été effectués avec un prolongement de la cavité postérieure d'un mètre environ). Les fonctions de transfert ont été décalées de 30 dB entre elles pour une meilleure visibilité.

La courbe de la configuration originale (**Figure 81 b'**) présente des pics à intervalle régulier, vraisemblablement affiliés à la cavité antérieure d'après leur correspondance avec les pics de la cavité antérieure (**Figure 81 c'**). Ces pics sont proches des pics du spectre moyen (**Figure 81 a**) observés vers 2, 8, 13 et 20 kHz, que nous attribuons, selon toute vraisemblance, à la cavité antérieure. La cavité postérieure (**Figure 81 e'**) semble peu impliquée dans les pics constitutifs de la prééminence spectrale du bruit réel. Le décalage vers les hautes fréquences des pics calculés par rapport au bruit réel était prévisible (cf. Introduction de ce chapitre⁹¹).

Le pic principal du spectre moyen (**Figure 81 a**) ne possède pas d'équivalent dans les fonctions de transfert comme les pics que nous venons d'attribuer à la cavité antérieure. Toutefois, l'observation attentive de la fonction de transfert de la cavité antérieure révèle l'existence d'un coude (flèche, **Figure 81 c'**) à gauche du deuxième pic. Une résonance de la cavité labiale est soupçonnée être à son origine, étant donné sa largeur de bande importante (la simulation acoustique prend en compte le rayonnement aux lèvres). Afin de vérifier cette hypothèse, nous avons donc été amenée à construire une configuration tronquée à la constriction dentale, ne contenant que les lèvres (**Figure 81 d**). La fonction de transfert d'une telle configuration (**Figure 81 d'**) révèle que la cavité labiale est effectivement responsable d'une résonance vers 7 kHz (flèche de la courbe **Figure 81 d'**).

Le pic principal⁹² proviendrait-il de la résonance labiale ? En effet, il est probable que l'erreur d'estimation concernant la longueur de la cavité labiale soit importante en raison de sa courbure latérale. L'aire des lèvres n'a été mesurée que sur les coupes coronales où les commissures labiales étaient visibles. Or, la cavité labiale se prolonge pourtant de plusieurs millimètres au-delà. Sur la coupe médio-sagittale du /s/ du locuteur P1, la cavité labiale fait au moins 1 cm, alors qu'elle fait à peine 0,6 cm dans la fonction d'aire.

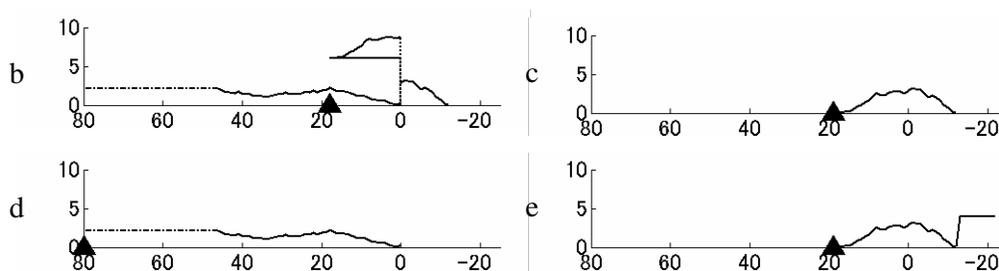
⁹¹ Les fonctions d'aire ont été mesurées sur les coupes coronales du conduit vocal, qui ne sont pas nécessairement perpendiculaires au sens longitudinal de ce dernier (modes de résonance principaux), ce qui a pu raccourcir la longueur effective des cavités.

⁹² Pour le bruit de friction tenu en position allongée présenté ici, le deuxième pic de la prééminence spectrale est le plus intense, et c'est ainsi que nous le désignons comme étant le pic principal. Toutefois, dans d'autres conditions de production, le premier pic de la prééminence, se trouvant vers 2 kHz, est le plus intense. Nous supposons que cette différence provient de la source (en particulier, sa localisation) plutôt que d'une différence éventuelle de configuration articulaire.

III. Modélisation acoustique des fricatives sibilantes

Lorsque la cavité labiale est rallongée artificiellement de 0,5 cm⁹³, le pic labial descend jusqu'à 5 kHz (flèche de la courbe **Figure 81 f'**), ce qui l'aligne à la fréquence du pic principal du spectre moyen. Le pic labial devient le pic principal de la fonction de transfert lorsqu'une source de débit est placée à l'intérieur de la cavité labiale (**Figure 81 g'**)⁹⁴. Notons que l'allongement de la cavité labiale n'a pas d'incidence sur les autres pics de la cavité antérieure, ce qui indique que l'interaction entre la cavité orale antérieure et la cavité labiale est minimale pour cette configuration articuloire.

P2 /s/



⁹³ Une longueur totale de 1,1 cm est tout à fait plausible pour une sibilante labialisée. En effet, Badin *et al.* (1994 : p. 249) ont trouvé que la longueur effective des lèvres, estimée acoustiquement (et en prenant en compte le rayonnement), était de l'ordre de 12 mm pour un /s/.

⁹⁴ La position de la source ne modifie pas la fréquence des résonances, mais peut modifier leur intensité relative en raison de l'apparition des antiformants à des fréquences différentes, et en raison des pertes implémentées par les parois souples (ces dernières concernent surtout les basses fréquences en-dessous de 1 kHz).

III. Modélisation acoustique des fricatives sibilantes

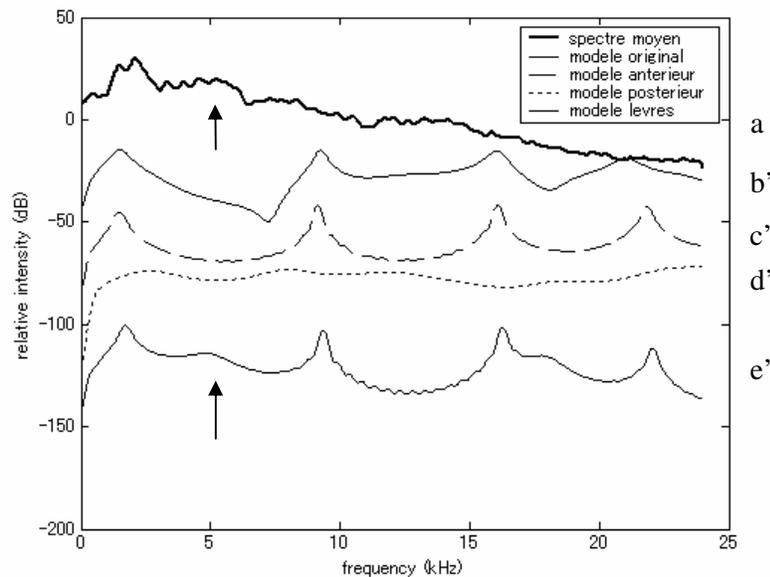


Figure 82. Configurations diverses du conduit vocal (haut), et spectre moyen du bruit de friction (figure du bas, ligne épaisse a) et fonctions de transfert correspondantes (lignes fines b' à e') pour /s/, locuteur P2. La première fonction de transfert (b') correspond à la fonction d'aire originale b, source de pression localisée dans la constriction. Les trois fonctions de transfert suivantes correspondent à des configurations tronquées à la constriction, comprenant, respectivement, la cavité antérieure (c), la cavité postérieure (d), puis de nouveau la cavité antérieure, mais cette fois avec une cavité labiale corrigée (e), visant à mieux reproduire la configuration articulaire. Dans ces trois dernières configurations, une source de pression a été placée à l'extrémité postérieure. Les courbes ont été décalées de 30 dB entre elles pour une meilleure visibilité.

La **Figure 82** présente les fonctions de transfert calculées avec les configurations originales de /s/ pour le locuteur P2. La configuration originale (**Figure 82 b'**) présente les mêmes pics que la cavité antérieure (**Figure 82 c'**), indiquant une faible implication de la cavité postérieure (**Figure 82 d'**; du moins lorsque la partie pharyngale est ignorée). Les pics de la cavité antérieure (**Figure 82 c'**) peuvent être mis en correspondance avec les pics du spectre moyen (**Figure 82 a'**) observés vers 2, 9 et 14 kHz.

Comme pour le locuteur P1, le pic du spectre moyen de P2 /s/ qui se situe vers 6 kHz (**Figure 82**, flèche de la courbe a) ne trouve pas de correspondance dans la fonction de transfert de la cavité antérieure (**Figure 82 c'**). Chez ce locuteur, la courbure latérale importante des lèvres, associée à une position reculée de la mandibule, n'a pas permis de mesurer l'aire d'aucune portion de la cavité labiale. Si le pic de 6 kHz (**Figure 82 a**) provenait de la cavité labiale, il est donc normal qu'aucun pic ne lui corresponde dans les fonctions de transfert calculées. L'adjonction d'une cavité labiale typique, constituée

III. Modélisation acoustique des fricatives sibilantes

d'un tube uniforme dont l'aire est de 4 cm^2 et la longueur de 1 cm , permet d'obtenir un pic vers 5 kHz (**Figure 82 e'**, flèche) sans que la fréquence des autres pics s'en trouve modifiée, ce qui montre que l'interaction entre la cavité orale antérieure et la cavité labiale est très faible pour cette configuration du conduit vocal.

P1 /ç/

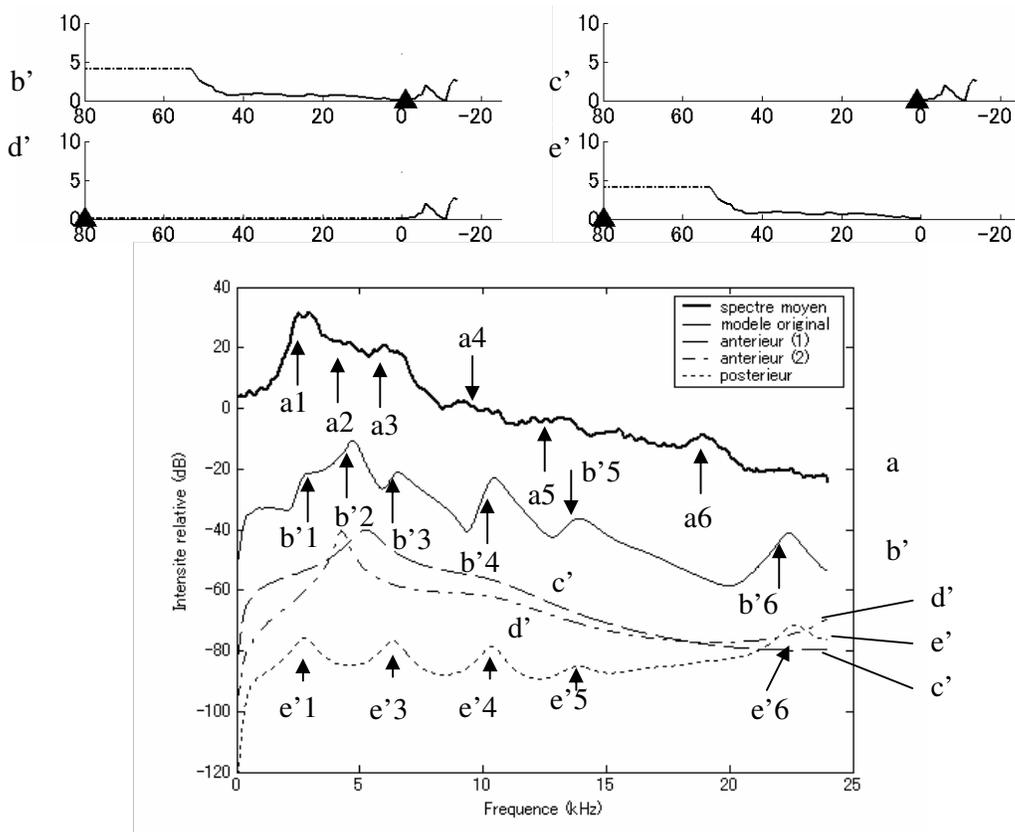


Figure 83. En haut, configurations variées du conduit vocal pour /ç/, P1. En bas, spectre moyen (ligne épaisse a) et fonctions de transfert (lignes fines b' à e'). La première fonction de transfert (b') est pour la configuration originale (de la région vélaire aux lèvres) avec une source de pression localisée dans la constriction. Les deux courbes suivantes correspondent à la cavité antérieure. La fonction de transfert c', dont le pic spectral principal a une fréquence plus élevée, a été obtenue avec une extrémité tronquée (au niveau de la constriction linguale) fermée, et la fonction de transfert d', avec une extrémité tronquée ouverte (et rallongée de 1 m). La dernière fonction de transfert correspond à la cavité postérieure (e). Dans ces trois dernières simulations, une source de pression localisée à l'extrémité arrière du conduit vocal a été utilisée. Les courbes ont été décalées de 30 dB entre elles pour une meilleure visibilité.

La Figure 83 présente les résultats pour /ç/ (P1). Contrairement à /s/, la cavité postérieure (Figure 83 e') semble occuper un rôle important dans la structure spectrale de la sibilante

III. Modélisation acoustique des fricatives sibilantes

/ç/. La fonction de transfert de la configuration originale (Figure 83 b') présente en effet trois pics (2,5, 5 et 7 kHz : (b'1), (b'2) et (b'3)) qui correspondent bien à la proéminence du spectre moyen (constituée des pics a1 a2 et a3). Or, la cavité antérieure ne serait responsable que du deuxième pic autour de 5 kHz (Figure 83 c' et d'). C'est précisément la cavité postérieure (Figure 83 e') dont le chenal palatal fait partie, qui présente des pics vers 2,5 (e'1) et 7 kHz (e'3), et également vers 11 kHz (e'4), 14 kHz (e'5) et 22,5 kHz (e'6), en correspondance systématique avec les pics respectifs de la configuration originale, avec un décalage d'environ 5 % vers les hautes fréquences. Il est donc très probable que le chenal palatal soit impliqué dans les caractéristiques spectrales fondamentales de /ç/.

P2 /ç/

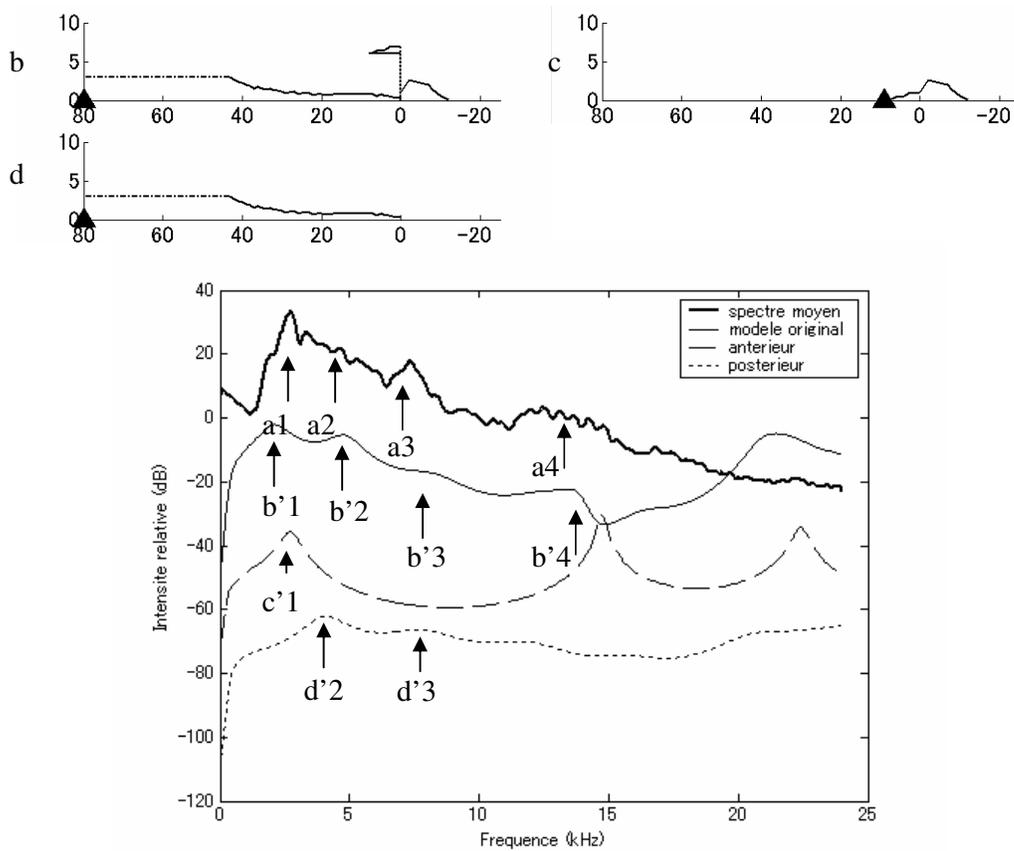


Figure 84. Haut : configuration diverses du conduit vocal pour /ç/, P2. Bas : spectre moyen (ligne épaisse a) et fonctions de transfert (b', c', d') correspondant aux trois configurations. La fonction de transfert b' est pour la configuration originale, avec une source de pression localisée à son extrémité postérieure (modèle branchant). La fonction de transfert c' correspond à la cavité antérieure (source de pression placée à l'extrémité postérieure de la cavité sublinguale) ; la dernière, d', à la cavité postérieure, avec une source de

pression à l'extrémité arrière du conduit vocal. Les courbes ont été décalées de 30 dB entre elles pour une meilleure visibilité.

Dans /ç/ de P2 (**Figure 84**), le chenal palatal semble être impliqué dans les pics principaux du spectre de bruit, comme c'était le cas pour le /ç/ de P1. Les deux premiers pics de la cavité postérieure (d'2 et d'3) correspondent approximativement, en fréquence, aux deuxième et troisième pics de la configuration originale (b'2 et b'3) et aux pics du bruit naturel (a2 et a3). La cavité antérieure (c'), quant à elle, serait responsable du premier pic de la configuration originale (b'1), qui est aligné avec le pic (a1) du bruit naturel. La fréquence des deux premiers pics de la configuration originale (b'1 et b'2) est légèrement décalée par rapport à la fréquence des pics des cavités antérieure et postérieure pris séparément (c'1 et d'2), qui se repoussent réciproquement. Cela suggère qu'il existe un certain degré d'interaction entre ces deux cavités, semblable à ce qui a été observé dans l'expérience de la section III-2.

Nous pouvons noter que le pic principal de /ç/ (**Figure 83 a1** et **Figure 84 a1**) est vraisemblablement affilié à la cavité orale antérieure pour P2 et au chenal palatal pour P1. L'ordre des résonances prédit par la simulation reflète les caractéristiques articulatoires. P2 présente une cavité orale antérieure plus grande que P1, avec une partie sublinguale. À l'inverse, P1 présente une constriction (chenal palatal) plus longue que P2.

Les résultats de simulation pour /s/ se trouvent en Annexe VI.

Discussion

Dans /s/ comme dans /ç/, nous avons vu que les proéminences spectrales du bruit de friction étaient vraisemblablement constituées de plusieurs pics, affiliés à des cavités différentes. Pour /s/, il s'agit de la cavité orale antérieure et de la cavité labiale, et pour /ç/, de la cavité orale antérieure et du chenal palatal.

La cavité labiale, comme attendu, semble être assez indépendante acoustiquement de la cavité orale antérieure. En effet, ni l'adjonction d'une cavité labiale (P2) ni l'allongement de la cavité labiale existante (P1) n'affecte la fréquence des autres pics de la cavité antérieure. Chez les locuteurs d'anglais et de français dont la taille de la constriction dentale est proche de celles des locuteurs polonais (cf. Figure 28), il est raisonnable de considérer que la cavité labiale peut constituer une structure indépendante. Le rôle acoustique de la protrusion labiale dans ces sibilantes postalvéolaires (/ʃ/, /sʃ/...), ne serait pas d'abaisser la fréquence de résonance de la cavité antérieure, contrairement à ce qui est habituellement avancé (ex. Keyser et Stevens, 2001) ; mais plutôt, d'abaisser les fréquences de résonance de la cavité labiale. Dans le cas de l'anglais et du français, en estimant la longueur des lèvres à 1 cm en situation non protruse et 1,4 cm avec protrusion, la fréquence théorique de leur première résonance quart d'onde serait de 8,8 et 6,3 kHz, respectivement. Ainsi, la protrusion labiale aurait un effet sur le spectre dans la deuxième zone fréquentielle où se manifeste le contraste entre /s/ et /ʃ/, située au-dessus de 6 kHz

III. Modélisation acoustique des fricatives sibilantes

(cf. **Figure 41** en section II-2 et **Figure 201** en Annexe V). Précisément, en effectuant une protrusion labiale, les locuteurs pourraient viser à abaisser le formant labial de /ʃ/, de façon à maximiser le contraste avec /s/.

L'abaissement de la résonance labiale pourrait également avoir comme but de former un groupe avec la résonance de la cavité orale antérieure. Lorsque deux résonances théoriques sont proches l'une de l'autre et qu'il existe une interaction entre les deux cavités de résonance, les formants se repoussent, créant une zone de stabilité acoustique relativement insensible à la variation articuloire (Stevens, 1972 ; cf. III-2). Ainsi, la protrusion labiale pourrait avoir comme fonction de garantir la stabilité du pic principal provenant de la cavité orale antérieure.

De même, il est possible de penser que ce phénomène de stabilisation se produit également (délibérément ou non) entre les résonances du chenal palatal et celles de la cavité orale antérieure, comme illustré par l'expérience de la section III-2. Pour nos deux locuteurs, nous avons observé que la proéminence spectrale de /ç/ était constituée de résonances provenant de la cavité antérieure et du chenal palatal.

Quel serait alors le corrélat acoustique du contraste dans le bruit de friction de /ç/ et /ʃ/ ?

Dans nos données, nous avons observé que le premier pic de la proéminence spectrale⁹⁵ (cf. Annexe V), était plus bas (en fréquence) pour /ʃ/ (vers 1,8 – 2 kHz) que pour /ç/ (vers 2,5 – 2,7 kHz). Ce premier pic de /ʃ/, chez les deux locuteurs, s'avère être affilié à la cavité orale antérieure (qui comprend une partie sublinguale). Nous pouvons même ajouter que d'une manière générale il est peu probable que ce pic puisse être affilié à une autre cavité. Pour obtenir une résonance de 2 kHz, un résonateur quart d'onde doit mesurer 4,4 cm, un résonateur demi-onde doit faire 8,7 cm. Si la cavité orale antérieure peut donner lieu à une résonance de Helmholtz de 2 kHz ou même plus basse⁹⁶, le chenal palatal, assimilable à un résonateur demi-onde, peut difficilement atteindre 8,7 cm de longueur.

⁹⁵ Rappelons que le spectre moyen de référence a été calculé sur une sibilante tenue. Le locuteur étant libéré des contraintes de coarticulation, cette production peut être considérée comme représentative de la cible idéale (cf. Engwall, 2000). Une production tenue est intéressante également du point de vue technique. En effet, pendant la production, la configuration articuloire est sensée ne pas avoir changé. Ainsi, par le moyennage des spectres de bruit calculés pour un très grand nombre de fenêtres prélevées dans cet échantillon, nous pouvons réduire au maximum l'effet des fluctuations accidentelles de la source.

⁹⁶ Dans l'hypothèse d'une résonance de Helmholtz, la fréquence de résonance dépend du volume de la cavité, de même que la longueur et l'aire du col (cf. **Figure 49**). Il existe donc de plus grandes possibilités de compensation articuloire par rapport à un résonateur quart d'onde ou demi-onde.

III. Modélisation acoustique des fricatives sibilantes

Pour /ç/, nous avons vu que le chenal palatal était vraisemblablement impliqué dans la prééminence spectrale. En particulier, la proximité des résonances de la cavité antérieure et de celles du chenal palatal, par leur interaction, favorise une stabilité acoustique⁹⁷.

Dans /s/, si la cavité labiale, grâce à la protrusion labiale, est responsable d'une résonance d'assez basse fréquence, ce formant sera difficilement aussi proche de la résonance de la cavité orale antérieure que ne le sont les résonances du chenal palatal et de la cavité orale antérieure dans /ç/. En effet, un résonateur quart d'onde de 2 cm (longueur limite de la cavité labiale) produit une première résonance vers 4,4 kHz. On peut s'attendre à au moins 1,5 kHz voire 3 kHz d'écart entre le formant affilié à la cavité orale antérieure et le formant labial avec protrusion.

En somme, le spectre de bruit de /s/ se distinguerait de /ç/ par la présence d'un formant de très basse fréquence (en dessous de 2 kHz), et une prééminence spectrale plus diffuse.

Il serait intéressant, dans une étude ultérieure, d'examiner les frontières de catégorisation /s/ - /ç/ par des auditeurs en fonction de la fréquence de deux pics (simulant la résonance de la cavité antérieure et celle du chenal palatal ou de la cavité labiale) et de leur intensité relative. En effet, si le pic inférieur à 2 kHz semble caractériser le /s/ polonais, nous ne disposons pas de données suffisantes pour déterminer à partir de quelle intensité relative (par rapport aux autres pics), il entraîne la perception d'un /s/. Si la variation inter-locuteurs ou d'occurrence à occurrence résulte d'une variation du spectre de la source, les auditeurs pourraient tolérer une différence de l'ordre de +/- 10 dB/oct (cf. spectres moyens de différentes conditions, Annexe V).

⁹⁷ D'après sa forme, le chenal palatal est certainement proche d'un résonateur demi-onde, ouvert aux deux extrémités. Lorsque la constriction dentale est importante, la cavité orale antérieure devrait s'apparenter à un résonateur de Helmholtz, ou un résonateur demi-onde fermé-fermé.

III-5 : PROPRIÉTÉS ACOUSTIQUES DES CONDUITS VOCAUX 3D : EXPÉRIENCES DE SIMULATION À L'AIDE DE LA MÉTHODE DES ÉLÉMENTS FINIS

Dans cette section, les propriétés acoustiques de configurations réalistes de conduits vocaux 3D sont calculées à l'aide de la méthode des éléments finis⁹⁸. Les modes de résonance sont d'abord identifiés dans des conduits vocaux 3D entiers, puis la pertinence des conduits vocaux tronqués est discutée. Enfin, les résultats de simulation 1D et 3D sont comparés, puis le rôle acoustique de la protrusion labiale est à nouveau examiné, à travers des expériences de simulation 3D.

La modélisation « 3D » permet de calculer la fonction de transfert du conduit vocal, en l'absence de toute interprétation hasardeuse sur la structure du conduit vocal (ex. le sens « longitudinal ») et de l'hypothèse de la propagation plane de l'onde acoustique. Nous comparons les fonctions de transfert obtenues par les modélisations 1D et 3D qui partent des mêmes données IRM afin d'apprécier l'adéquation des résultats de modélisation. En effet, la comparaison de la fonction de transfert 1D avec le spectre du bruit effectivement produit par le locuteur n'est pas suffisante comme moyen de validation, étant donné que l'acquisition des données IRM et sonores n'était pas simultanée et qu'en cas de divergence, l'erreur peut également être attribuée à une différence de production de la part du locuteur. Par ailleurs, la modélisation 3D sera utilisée pour estimer la fonction de transfert de modèles de conduit vocal entier (de la glotte aux lèvres). Dans ces modèles, la visualisation des noeuds et ventres de pression permet, dans une certaine mesure, de localiser les modes de résonance et les cavités qui y sont impliquées.

Méthode

Extraction de la forme 3D du conduit vocal

Le conduit vocal des sibilantes a été extrait des données IRM des locuteurs FrJ, Fr1 et P1. Leur sélection est fondée sur des critères suivants :

- La bonne qualité des données : les données IRM devaient comporter peu de bruit dû à un mouvement ou un tremblement de la part du locuteur pendant l'acquisition, afin de faciliter l'extraction du conduit vocal. De même, les données présentant des zones d'ombre dues aux plombages dentaires ont été écartées ;
- La représentativité d'un éventail varié de sons : [s], [s^j], [ç], [ʃ], et [ʒ].

Les données de /s/_{fr}, /s^j/_{jp} et /ʃ/_{fr} de la locutrice FrJ couvrent le conduit vocal en entier, de

⁹⁸ Précisons qu'il s'agit d'une simulation dans le domaine *acoustique*, qui ne concerne pas les mécanismes aéro-acoustiques impliqués dans la génération de la source de bruit (ex. Adachi et Honda, 2003 ; Adachi *et al.*, 2005 ; Nozaki, 2005).

III. Modélisation acoustique des fricatives sibilantes

la glotte jusqu'aux lèvres. Les autres données ne comportent que la partie antérieure du conduit vocal, c'est-à-dire entre la région vélaire et les lèvres. La pertinence des conduits vocaux 3D « tronqués » pour modéliser les propriétés acoustiques du conduit vocal des sibilantes sera discutée dans III-5.2.

L'extraction des conduits vocaux 3D à partir des données IRM avec le contour des dents inséré (v. chapitre I) comporte les étapes suivantes :

(1) Les données volumétriques IRM (complétées des dents) ont été redécoupées en coupes sagittales espacées de 0,25 mm. Les volumes de départ ont donc une résolution de l'ordre de 0,25 x 0,25 x 0,25 mm. La précision des données dans la dimension transversale (de gauche à droite) est artificielle, car les tranches IRM d'origine, espacées de 1,5 mm ont été rééchantillonnées (interpolation effectuée par le programme de traitement d'images médicales, Intage-rv).

(2) Renforcement des contours du conduit vocal. Pour chaque image, le contour du conduit vocal a été tracé manuellement dans un logiciel de traitement d'images (Photoshop). Cette opération permet par la suite d'extraire le conduit vocal de manière automatique (sélection des données contiguës) dans un logiciel de conception assisté par ordinateur (Mimics, Materialize NV).

(3) Binarisation des données. Le conduit vocal apparaissant en noir, cerné par les tissus mous ou les dents (insérées) en blanc.

(4) Nettoyage du bruit (poussière) à l'intérieur du conduit vocal. Les points blancs situés à l'intérieur de la voie aérienne du conduit vocal (ne correspondant à aucune structure anatomique) a été effacé image par image.

(5) Extraction du conduit vocal dans un logiciel de conception assisté par ordinateur (Mimics). Exportation en tant que maillage de surface dont les segments font environ 1, 1,5 et 2 mm de long. L'effet de la finesse du maillage a été examiné pour certains conduits vocaux 3D. Ces résultats sont présentés en Annexe VII. A cette étape, une partie de l'espace en avant et autour des lèvres que nous désignons par le terme d'« espace de rayonnement », d'environ 5 cm × 5 cm × 5 cm, a été conservée de façon à pouvoir calculer la pression acoustique à l'extérieur du conduit vocal. L'effet de la taille de l'espace de rayonnement a également été examiné. Les résultats sont présentés en Annexe VII.

(6) Importation de ces données de surface dans Hypermesh (Altair Engineering Inc.) et segmentation en tétraèdres, de taille variable selon la complexité morphologique locale (nombre d'éléments de l'ordre de 200000 pour les conduits vocaux entiers en maillage de 1 mm).

Simulation à l'aide de la méthode des éléments finis (FEM)

Le logiciel *Sysnoise* (LMS) a été utilisé pour calculer la fonction de transfert des conduits vocaux 3D et visualiser la répartition de la pression acoustique à l'intérieur des conduits

III. Modélisation acoustique des fricatives sibilantes

vocaux. Une source « dipôle » de magnitude 1 a été utilisée pour chaque simulation. Cette source dipôle a été simulée à l'aide de deux sources monopôles, de phase opposée, placées à une distance de 1 mm l'une de l'autre. Plusieurs positions et orientations de la source dipôle ont été expérimentées. Les résultats de ces expériences sont présentés en annexe VII. Dans les autres expériences, sauf mention, la source a été placée au centre de la voie aérienne⁹⁹, immédiatement en arrière de la constriction dentale et orientée approximativement dans le sens longitudinal du conduit vocal à cet endroit¹⁰⁰. La pression acoustique à l'extérieur des lèvres a été calculée pour servir de fonction de transfert. Dans les résultats présentés dans cette section, cette pression a été mesurée quelques centimètres en avant des lèvres. L'effet du point de mesure a été examiné, et ces résultats sont présentés en Annexe VII. Dans tous les cas, étant donné les dimensions de l'espace de rayonnement, il n'est pas possible de parler de pression rayonnée. Toutefois, les sibilantes présentant toujours une mâchoire fermée, l'aire des lèvres est relativement étroite par rapport à cet espace, même petit, et par conséquent, on peut supposer que la distorsion fréquentielle reste raisonnablement faible, en raison de l'isolement acoustique du conduit vocal. Deux tailles d'espace de rayonnement ont été comparées pour le conduit vocal 3D /s/_{fr} de la locutrice FrJ, et des fonctions de transfert similaires ont été obtenues (Annexe VII). Par conséquent, la fréquence des pics spectraux est considérée comme fiable, ou du moins, s'il existe des écarts, ils ne seraient pas imputables à la taille de l'espace de rayonnement.

Deux conditions de frontière ont été utilisées dans cette modélisation. Les parois du conduit vocal 3D ont été considérées rigides et ne représentant aucune perte. La glotte, d'environ 1 cm² ou légèrement inférieure à 1 cm², a été considérée comme donnant sur un espace libre¹⁰¹. Lorsque les conduits vocaux 3D étaient tronqués (vers la région vélaire), la même condition de frontière a été appliquée à l'extrémité coupée du conduit vocal 3D. Les cinq faces¹⁰² de l'espace de rayonnement connecté à la suite des lèvres ont reçu le même traitement : une impédance acoustique de l'air égale à ρc (en supposant $\rho = 1.733$ kg/m³; $c = 346.37$ m/s).

La simulation a été effectuée dans le domaine fréquentiel tous les 50 Hz de 50 à 8000 Hz.

⁹⁹ Lorsque l'articulation est symétrique, le centre de la voie aérienne coïncide avec la coupe médio-sagittale. Cependant, il n'est pas rare que le conduit vocal soit décalé à droite ou à gauche (cf. Annexe III).

¹⁰⁰ Les deux sources monopôles ont été placées l'une derrière l'autre, sur le même plan sagittal et axial des données IRM d'origine.

¹⁰¹ Ce qui n'est pas tout à fait réaliste, étant donné la pression intraorale est de 5,6 cm H₂O en moyenne pour /s/ (Scully, 1979), et qu'il est généralement considéré que la pression sous-glottique est égale à la pression intra-orale dans les consonnes sourdes.

¹⁰² La sixième « face », délimitée par les lèvres et le visage autour des lèvres, était considérée comme une paroi rigide.

Résultats

III-5.1 Modes de résonance de trois sibilantes : conduits vocaux 3D entiers

Les propriétés acoustiques de trois conduits vocaux entiers ont été examinées pour la locutrice FrJ : /s/fr, /s^j/jp, et /ʃ/fr.

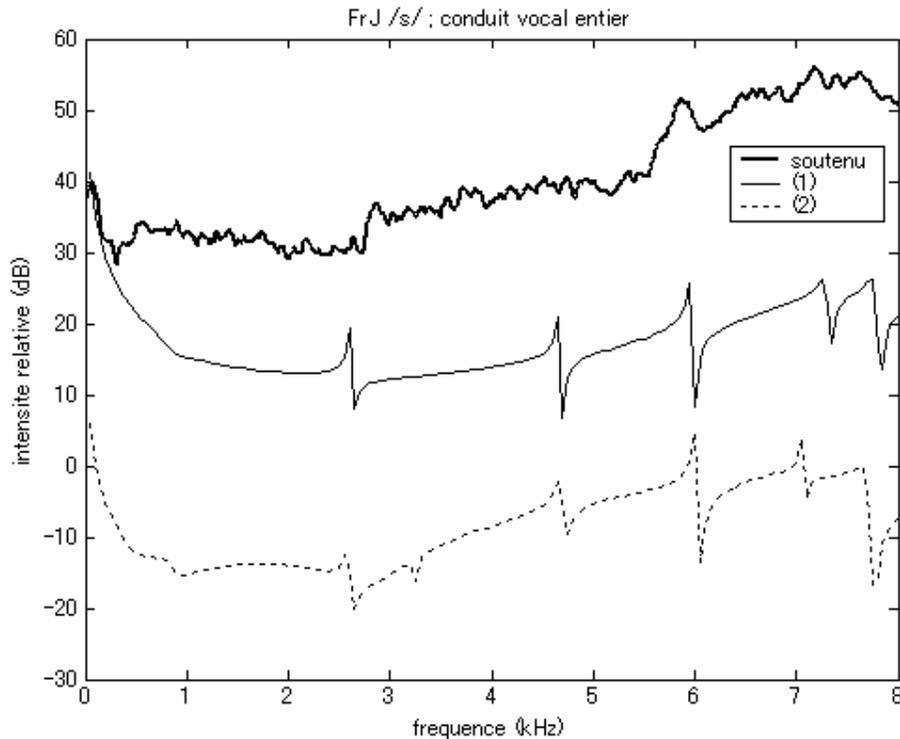


Figure 85. Spectre de bruit de friction tenu (ligne épaisse) et fonctions de transfert calculées à l'aide de la méthode des éléments finis (lignes fines) pour le /s/fr de la locutrice FrJ. (1) fonction de transfert calculée avec un conduit vocal issu d'un maillage de surface dont les segments mesuraient environ 2 mm ; (2) conduit vocal issu d'un maillage de 1 mm. Les fonctions de transfert sont décalées entre elles de 20 dB pour plus de clarté.

Les fonctions de transfert calculées à l'aide de la méthode des éléments finis pour le conduit vocal de /s/fr, locutrice FrJ (**Figure 85**) reproduisent assez bien l'aspect du spectre naturel qui est plat et montant, avec quelques pics spectraux peu prononcés, qui pourraient résulter de paires pôle-zéro comme pour les fonctions de transfert. Le conduit vocal 3D (avec un maillage plus ou moins fin et un espace de rayonnement plus ou moins grand) a une influence mineure sur l'aspect général de la fonction de transfert. La différence de la pente spectrale entre le spectre moyen et les fonctions de transfert (écart qui est moindre avec le conduit vocal connecté à un grand espace d rayonnement)

III. Modélisation acoustique des fricatives sibilantes

proviendrait principalement du rayonnement aux lèvres, incomplet dans la simulation, dû à la proximité du point de mesure des lèvres. La **Figure 86** présente la distribution de pression à l'intérieur du conduit vocal 3D à la fréquence des pics spectraux de la fonction de transfert.

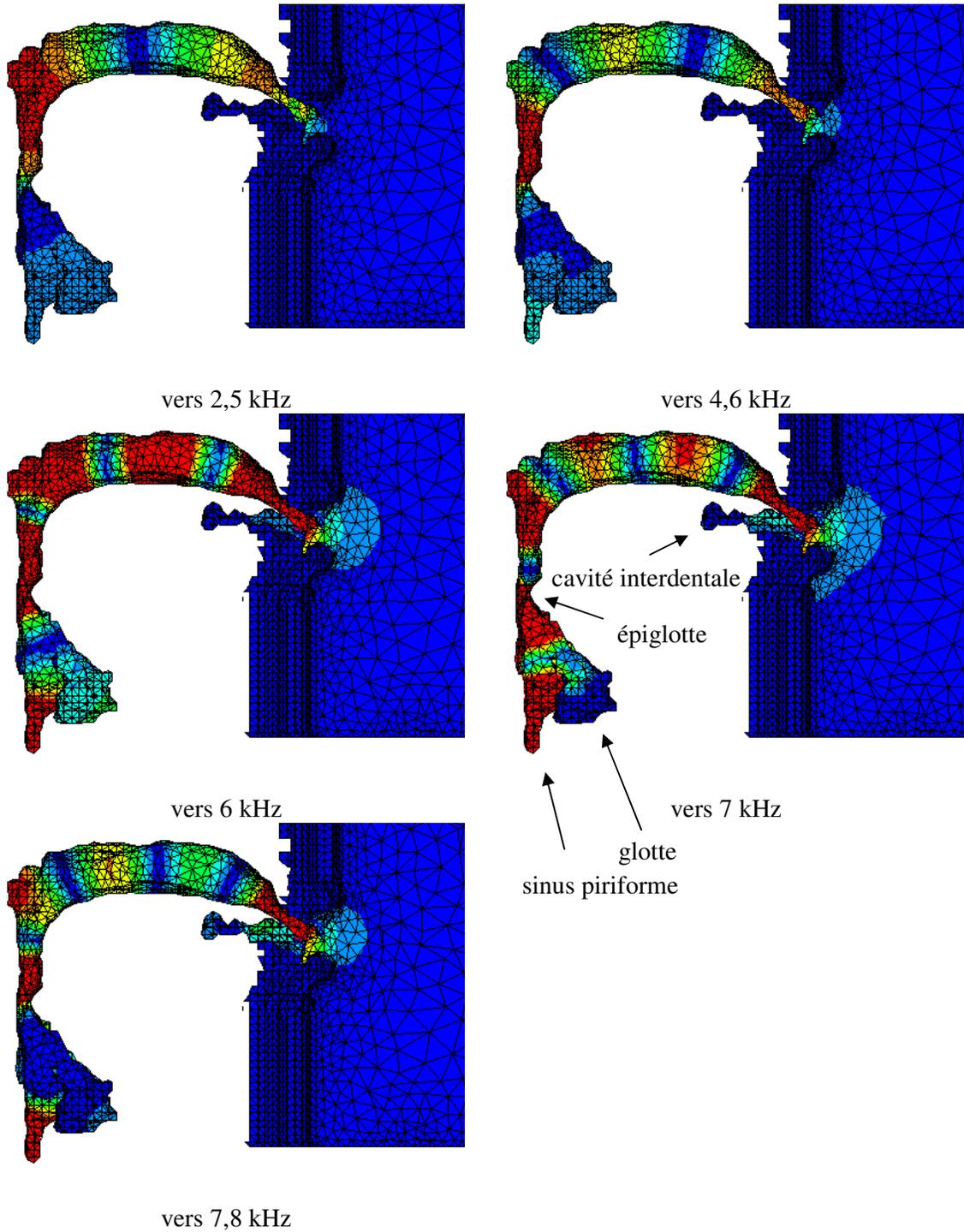


Figure 86. Distribution de pression à la fréquence des pics spectraux, à l'intérieur du conduit vocal /s/_{fr} de la locutrice FrJ construit à partir d'un maillage de 1 mm (en correspondance avec la courbe pointillée (2) de la Figure 85). Vue de l'intérieur du conduit vocal 3D coupé en deux dans le sens sagittal. Une pression élevée est représentée en rouge ; une pression basse en bleu.

L'alternance des nœuds (rouge) et ventres (bleu) de pression à l'intérieur du conduit vocal de /s/_{fr}, locutrice FrJ, suggère que les paires pôle-zéro autour de 2,5 et 4,6 kHz proviennent, respectivement, des résonances des premier et deuxième modes multiples d'une demi-onde de la cavité comprise entre la constriction linguale et le rétrécissement épiglottique. Ces fréquences correspondent aux résonances théoriques de tubes uniformes fermé-fermé mesurant 7 et 7,6 cm, respectivement. Les paires pôle-zéro autour de 6 et 7 kHz peuvent être également assimilées à des résonances multiples d'une demi-onde (quatrième et cinquième modes, précisément), mais où la cavité postérieure est entièrement impliquée, y compris la partie pharyngale et les sinus piriformes. Ces fréquences correspondent aux résonances naturelles de tubes uniformes de 11,7 et 12,5 cm, respectivement, fermés aux deux extrémités. Remarquons que ces deux derniers modes de résonance (6 et 7 kHz) correspondent, respectivement, aux troisième et quatrième modes de la cavité comprise entre la constriction linguale et le rétrécissement épiglottique. En effet, c'est seulement à ces fréquences que la morphologie du pharynx inférieur était propice à son entrée en résonance. Ce sont ces détails morphologiques qui expliqueraient l'espacement quelque peu irrégulier des paires pôle-zéro de la « cavité postérieure » dans la fonction de transfert et dans les spectres naturels (**Figure 85**). A 7,8 kHz, on identifie cinq nœuds de pression entre la constriction et le rétrécissement épiglottique (quatrième mode de résonance multiple de la demi-onde). Il s'agit d'un « doublon » de la résonance de 7 kHz, survenant toutefois sur un segment plus court, dû aux détails morphologiques du conduit vocal 3D.

A aucune de ces fréquences, la cavité laryngale n'est caractérisée par un nœud de pression, en raison de l'ouverture de la glotte (nous sommes dans un scénario de sibilante sourde – l'ouverture de la glotte était de l'ordre de 1 cm²). Contrairement aux voyelles, les sinus piriformes font partie du segment principal du conduit vocal, au lieu d'être des cavités branchantes¹⁰³. Quant à la cavité interdente, elle ne semble pas participer aux modes de résonances principales dans ce conduit vocal 3D.

¹⁰³ Les sinus piriformes étant deux, ils peuvent toutefois avoir l'effet de cavités latérales (et produire des zéros libres), en particulier lorsqu'il existe une asymétrie.

III. Modélisation acoustique des fricatives sibilantes

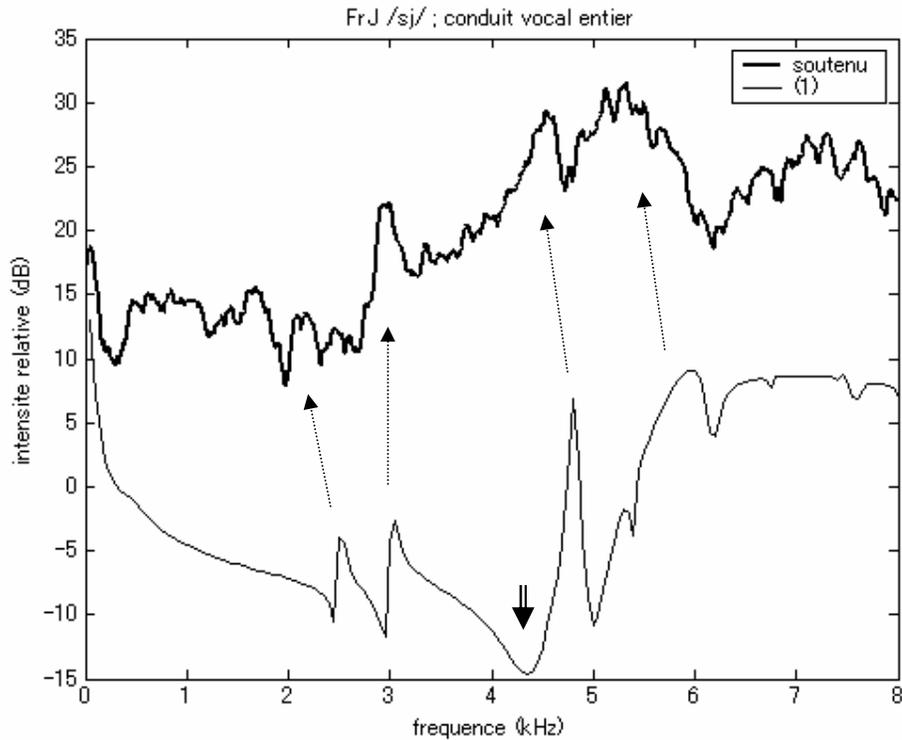


Figure 87. Spectre du bruit de friction (ligne épaisse) et fonction de transfert (1) calculée par le biais de la méthode des éléments finis pour $/s^j/_{jp}$ de la locutrice FrJ. Le conduit vocal 3D est construit à partir d'un maillage de 2 mm.

La **Figure 87** montre la fonction de transfert calculée à l'aide de la méthode FEM pour $/s^j/_{jp}$, FrJ. Les paires pôle-zéro autour de 2,5 ; 3,0 et 4,8 kHz apparaissent à proximité de pics observés sur le spectre moyen du bruit de friction tenu. Les deux courbes présentent une prééminence spectrale au-dessus de 5-6 kHz. Un antiformant de bande large (**Figure 87**, flèche double), survenant vers 4,4 kHz dans la fonction de transfert calculée, semble être responsable de la différence de niveau entre 3 à 5 kHz du spectre moyen et de la fonction de transfert. La fréquence des zéros dépend du lieu de la source et de son orientation (cf. Annexe VII). Ces paramètres de la source sont probablement responsables de l'écart de niveau entre les deux courbes, alors que la fréquence des pics correspond bien.

III. Modélisation acoustique des fricatives sibilantes

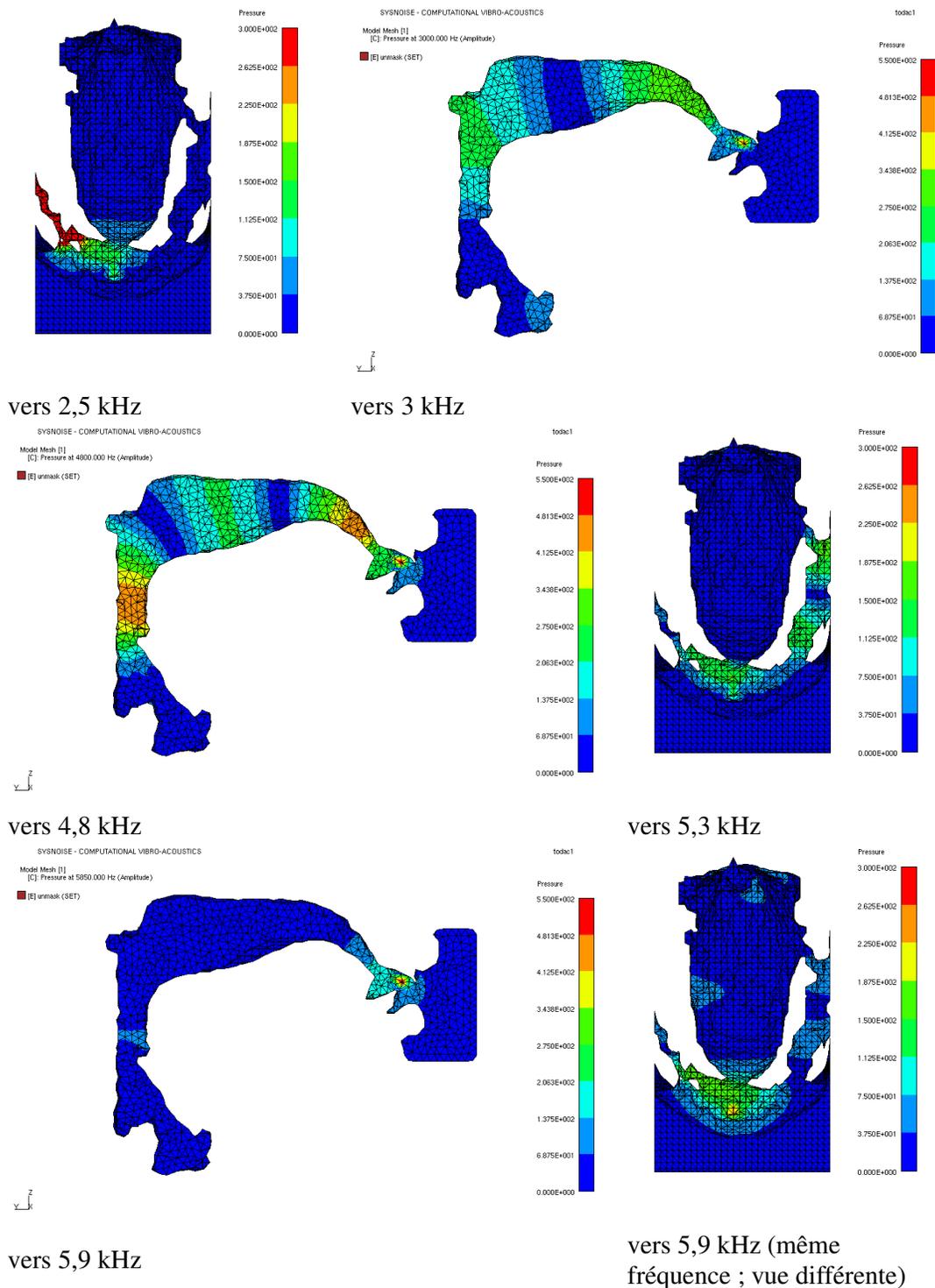


Figure 88. Distribution de pression à la fréquence des pics spectraux, à l'intérieur du conduit vocal 3D /s^j/_{jp} de FrJ. Vues de l'intérieur du conduit vocal 3D (tranche médio-sagittale) et vues du haut. Une pression élevée est représentée en rouge ; une pression basse en bleu.

III. Modélisation acoustique des fricatives sibilantes

La Figure 88 montre la distribution de pression à l'intérieur du conduit vocal 3D pour /s^j/_{jp}. A 2,5 ; 5,3 et 5,9 kHz, seule la cavité orale antérieure entre en résonance (avec éventuellement ses prolongements interdentaires), sans que la cavité postérieure ne présente d'alternance de nœuds/ventres de pression. A 3 et 4,8 kHz, la cavité postérieure, délimitée par le rétrécissement épiglottique et la constriction post-alvéolaire, entre également en résonance. Bien que cette fricative appartienne à la catégorie palatalisée, cette locutrice (tout comme les locutrices J7 et J8) ne présente pas de chenal palatal bien distinct de la cavité orale postérieure (comme les locutrices J5 et J6). Si les mécanismes acoustiques responsables des pics du spectre naturel à 4,6 et 5,3 kHz sont les mêmes que ceux qui ont donné lieu aux pics spectraux à 4,8 et 5,3 kHz dans la fonction de transfert simulée, alors il peut être suggéré, pour le /s^j/_{jp} de la locutrice FrJ, que la fréquence de la prééminence spectrale est contrôlée par les tailles respectives de la cavité orale postérieure (excluant la cavité pharyngale) et de la cavité orale antérieure.

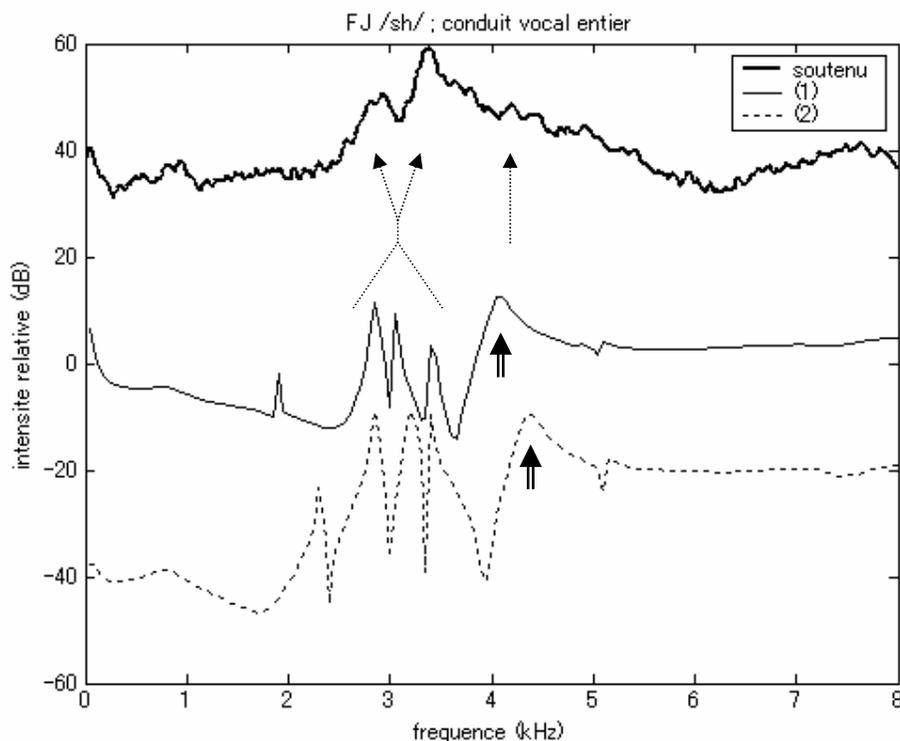


Figure 89. Spectre moyen de bruit tenu (ligne foncée) et fonctions de transfert calculées à l'aide de la méthode des éléments finis (lignes fines) pour /s^j/_{fr}, locutrice FrJ. (1) Conduit vocal 3D construit à partir d'un maillage de 2 mm (ligne pleine fine) ; (2) conduit vocal 3D construit à partir d'un maillage de 1 mm et comportant un grand espace de rayonnement (de l'ordre de 10 x 10 x 5 cm² ; ligne pointillée). Les fonctions de transfert sont décalées entre elles de 20 dB pour plus de clarté.

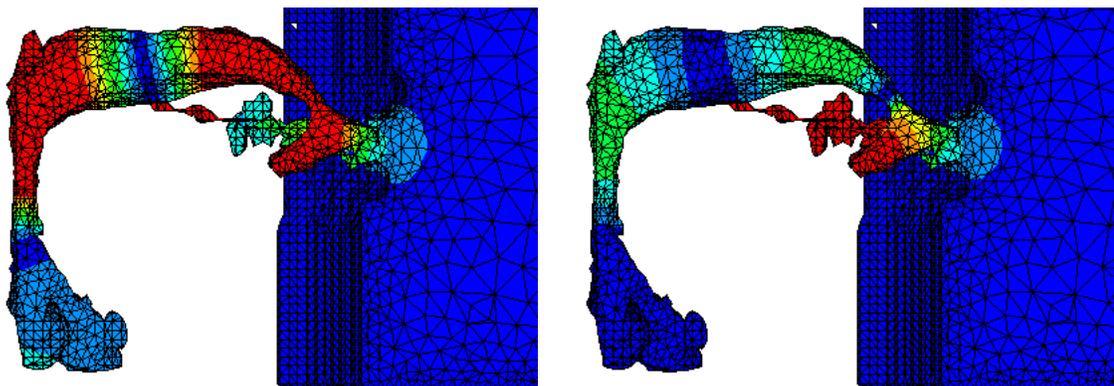
La Figure 89 présente les fonctions de transfert de /s^j/_{fr}, FrJ, calculées à l'aide de la

III. Modélisation acoustique des fricatives sibilantes

méthode FEM. Les deux conduits vocaux 3D donnent lieu à des fonctions de transfert caractérisées par deux proéminences spectrales. La première proéminence se situe vers 3 kHz, dans les mêmes fréquences que la proéminence spectrale du spectre moyen. Elle est constituée de plusieurs pics et de creux de bande étroite. La seconde, en un seul pic vers 4-4,5 kHz, indiqué par les flèches doubles, présente un décalage d'environ 400-500 Hz entre le maillage de 2mm et le maillage de 1mm avec un grand espace de rayonnement. Ce décalage peut être dû aussi bien à la différence du maillage qu'à la différence de la taille de l'espace de rayonnement à l'extérieur des lèvres (cf. Figure 205 et Figure 206 en Annexe VII).

Le pic majeur des fonctions de transfert vers 4-4,5 kHz (Figure 89, flèches doubles), précédé d'un creux prononcé, dépasse le pic majeur du spectre moyen jusqu'à 1 kHz. D'après la distribution de pression à l'intérieur du conduit vocal 3D (Figure 90 : en bas, à droite), la cavité orale antérieure seule, qui comporte une cavité sublinguale et un espace interdental, est impliquée dans ce pic. La cavité orale antérieure est d'ailleurs impliquée dans tous les autres pics importants de cette sibilante. Contrairement au /s/_{fr} de FrJ, il est difficile de déterminer le mode de résonance de la cavité orale antérieure d'après la distribution de pression seulement. Il serait nécessaire de connaître le débit pour trancher cette question.

A 2,8 kHz, la partie orale de la cavité postérieure, comprise entre le rétrécissement épiglottique et la constriction, entre en résonance avec la cavité orale antérieure. D'après le ventre de pression dans la région palatale, il s'agirait du premier mode de résonance demi-onde, correspondant aux résonances d'un tube uniforme fermé-fermé de 6,3cm. Les pics de 3,1 et 3,4 kHz sont marqués par l'entrée en résonance de l'espace interdental, qui est une cavité délimitée par la paroi interne de la joue, les couronnes dentaires supérieure et inférieure et la langue, et connectée à la cavité orale antérieure. L'existence de plusieurs résonances à intervalle de fréquence rapproché peut donc être expliqué par la complexité morphologique du conduit vocal 3D. La fonction de transfert calculée sans espaces interdentaux (et sans cavité postérieure) ne présente qu'un seul pic vers 3,9 kHz (Figure 92) et, de ce fait, conforte cette interprétation.



vers 2,8 kHz

vers 3,1 kHz

III. Modélisation acoustique des fricatives sibilantes

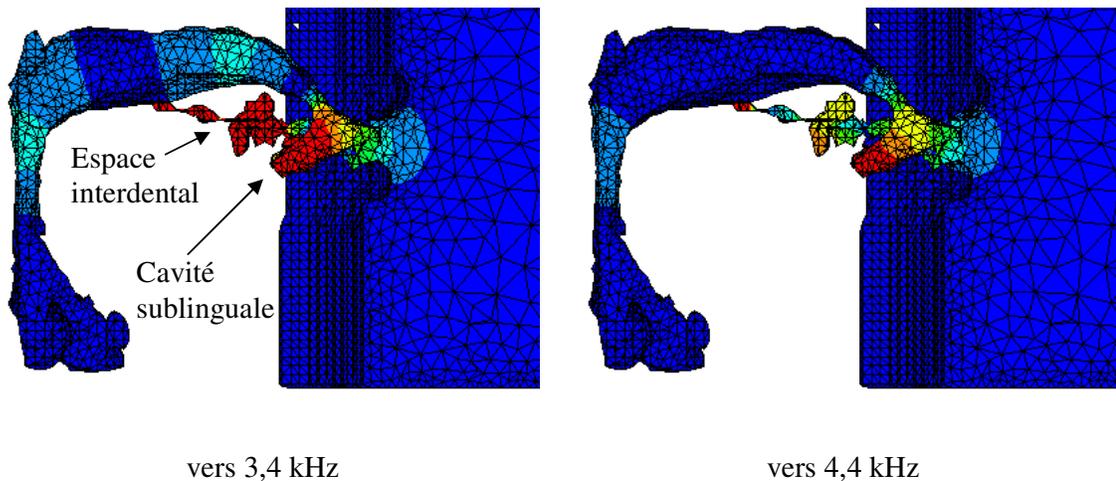


Figure 90. Distribution de pression à la fréquence des pics spectraux, à l'intérieur du conduit vocal 3D FrJ /s/ construit à partir d'un maillage de 1 mm (en correspondance avec la courbe pointillée (2) de la Figure 89). Vue de l'intérieur du conduit vocal 3D coupé en deux dans le sens sagittal. Une pression élevée est représentée en rouge ; une pression basse en bleu.

III-5.2 Pertinence des conduits vocaux tronqués

Il est souvent considéré (e.g. Heinz et Stevens 1961) que les caractéristiques principales des fricatives proviennent essentiellement des résonances de la (des) cavité(s) antérieure(s) à la constriction. En effet, la génération d'une source de bruit requiert une constriction relativement étroite. De ce fait, le couplage entre la cavité antérieure et la cavité postérieure est limité. Fant (1960 : p. 181-185) propose des représentations du conduit vocal de /s/ avec différents degrés de simplification. Le modèle le plus simple, ne comprenant que l'équivalent de la cavité antérieure, permet de reproduire un spectre assez proche de celui d'origine.

Dans cette section, nous présentons une expérience où la fonction de transfert calculée avec des conduits vocaux entiers est comparée à celle de conduits vocaux tronqués, ex. **Figure 91 c.** L'objectif est de vérifier si, en effet, la cavité postérieure peut être supprimée sans altérer les propriétés acoustiques essentielles de la sibilante. L'estimation de la fonction de transfert de conduits vocaux 3D tronqués demande un traitement spécifique du plan de la coupe. Ce plan ne doit pas posséder les mêmes propriétés que les autres parois, au risque que les résonances de la cavité tronquée (à un endroit choisi arbitrairement au milieu de la cavité orale postérieure) apparaissent dans la fonction de transfert. La même condition de frontière que l'espace de rayonnement a donc été appliquée : impédance acoustique de l'air, ρc ($\rho = 1.733 \text{ kg/m}^3$; $c = 346.37 \text{ m/s}$). Ainsi, les ondes acoustiques parvenant jusqu'à cette paroi sont perdues (ne sont pas réfléchies), évitant l'établissement de résonances dans la cavité tronquée.

III. Modélisation acoustique des fricatives sibilantes

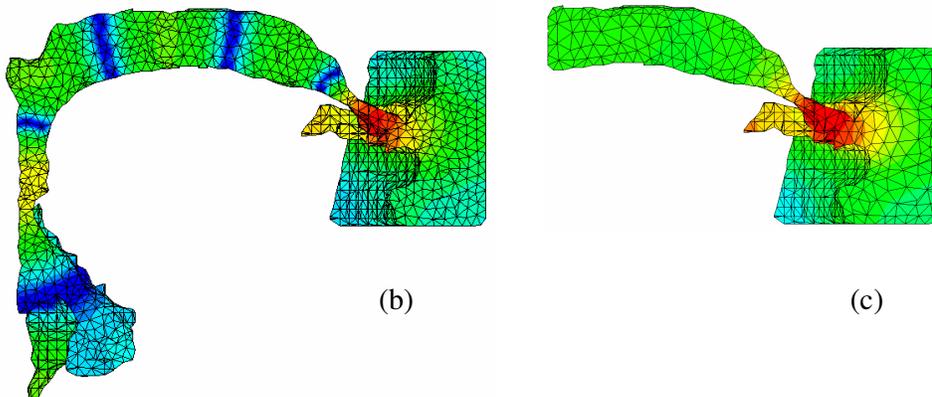
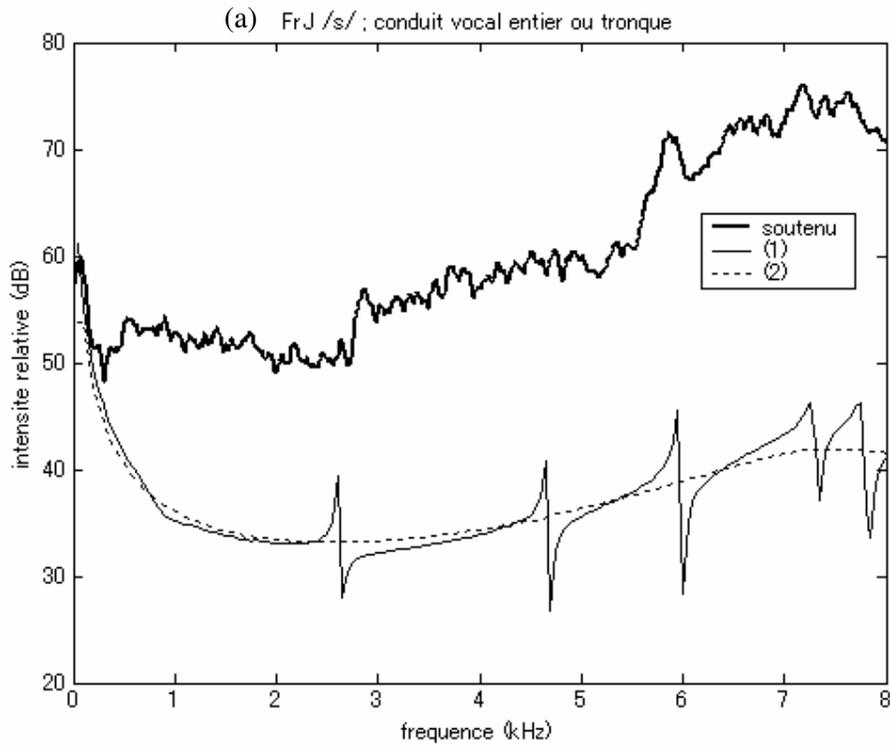


Figure 91. (a) Fonctions de transfert calculées à l'aide de la méthode des éléments finis pour /s/fr, FJ. (1), Ligne pleine : fonction de transfert d'un conduit vocal entier illustré en (b), dérivé d'un maillage de surface de 2 mm ; et (2), en ligne pointillée, pour un conduit vocal tronqué dans la région vélaire illustré en (c). Les images (b) et (c) représentent la distribution de pression à l'intérieur des conduits vocaux 3D (coupé en deux dans le sens sagittal), vers 7,8 kHz. Une source dipôle a été placée en arrière des incisives, dans la direction antéro-postérieure. Il est à noter que l'échelle des couleurs n'est pas nécessairement la même que la Figure 86.

La **Figure 91** a présente le spectre moyen et les fonctions de transfert du conduit vocal 3D

III. Modélisation acoustique des fricatives sibilantes

de /s/fr, FrJ, entier (**Figure 91 b**) et tronqué (**Figure 91 c**). Pour ce dernier, le point de troncation se situe dans la région vélaire, et est perpendiculaire au sens longitudinal du conduit vocal (et donc aux modes de résonance principaux). La différence entre les deux fonctions de transfert se manifeste dans la présence ou l'absence de paires pôle-zéro provenant de la cavité postérieure. Il est intéressant de noter que le pic spectral vers 7-8 kHz de largeur de bande importante et qui détermine l'enveloppe globale de la fonction de transfert est conservé dans la fonction de transfert du conduit vocal tronqué. Il s'agit d'une résonance qui implique la cavité orale antérieure, d'après la distribution de pression observée à 7,8 kHz.

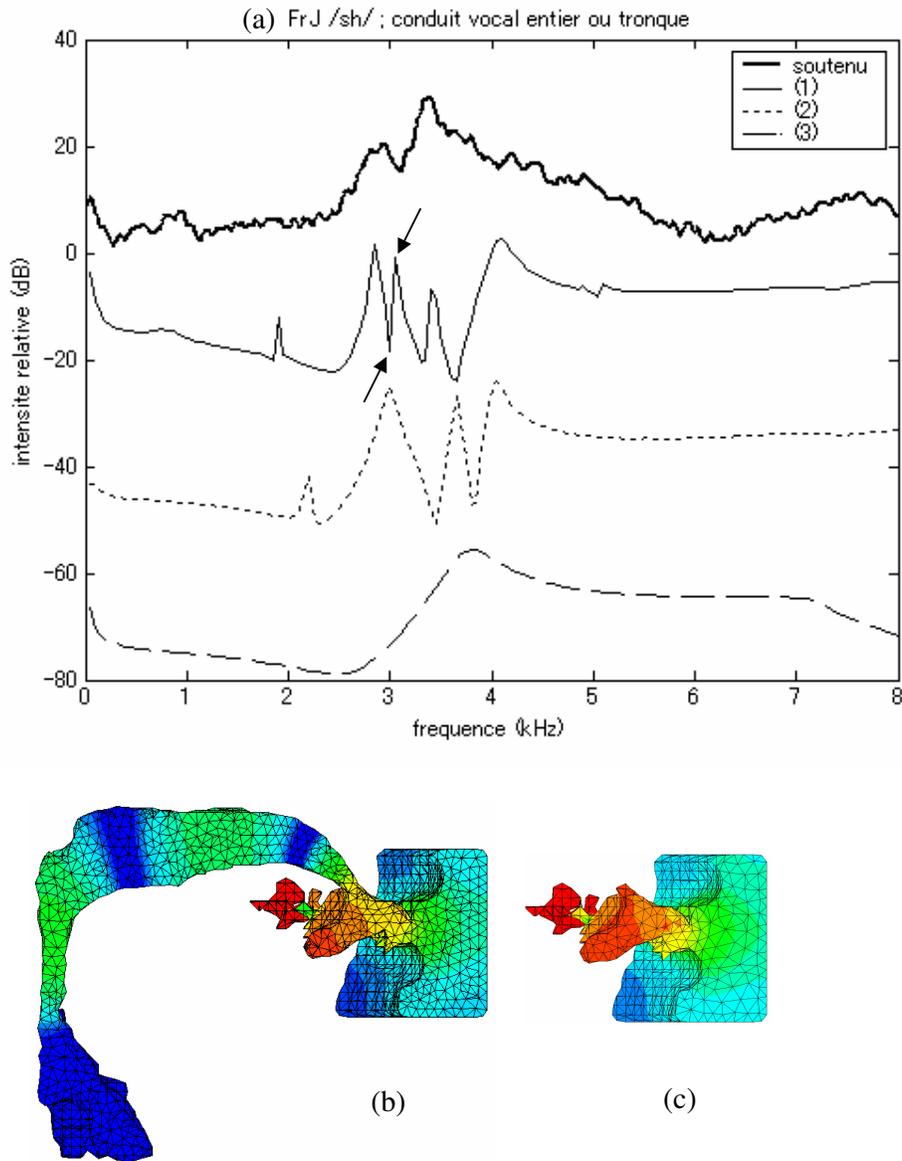


Figure 92. En (a), fonctions de transfert calculées à l'aide de la méthode des éléments finis pour /s/fr, FrJ. La fonction de transfert (1), ligne pleine, est

calculée avec un conduit vocal entier dérivé d'un maillage de surface de 2 mm, illustré en (b) ; la fonction de transfert (2), en ligne pointillée, correspond à celle d'un conduit vocal tronqué à la constriction linguale, illustré en (c) ; enfin, la fonction de transfert (3), en ligne interrompue, a été obtenue avec un conduit vocal tronqué dans la région vélaire et dépourvu d'espaces inter-dentaires (non illustré). Dans toutes les simulations, la source a été placée immédiatement devant la constriction dentale. A noter que l'échelle des couleurs n'est pas nécessairement la même que la Figure 90.

La **Figure 92** présente le spectre moyen et les fonctions de transfert des conduits vocaux 3D entier et tronqués de /ʃ/_{fr}, FrJ. Contrairement à /s/, le conduit vocal tronqué (**Figure 92 c**) a été coupé à la constriction linguale¹⁰⁴. Le plan de coupe, d'aire petite, a été considéré cette fois comme une paroi rigide. Un tel conduit vocal permet néanmoins d'obtenir une fonction de transfert proche de celle du conduit vocal 3D entier. Le nombre de pics est moins important pour le conduit vocal tronqué en comparaison au conduit vocal entier. Le pic vers 3,1 kHz précédé d'un creux, indiqués par des flèches, présent dans la courbe du conduit vocal entier (a 1), pourrait donc être une paire pôle-zéro de la cavité postérieure. La longueur théorique d'un tube uniforme fermé-fermé est de 5,6 cm, pour une résonance demi-onde de 3,1 kHz, ce qui correspond approximativement à la longueur de la cavité comprise entre la constriction linguale et le rétrécissement épiglottique.

Les pics présents vers 2 kHz et 3,5 kHz pour le conduit vocal entier sont décalés vers les hautes fréquences dans la courbe du conduit vocal tronqué, suggérant une interaction de la cavité postérieure avec la cavité antérieure, ou l'effet du traitement en tant que paroi rigide du plan de troncation.

La fonction de transfert du conduit vocal tronqué et dépourvu des espaces interdentaires (a 3) reproduit également un pic spectral dont la fréquence est proche de celui de spectre moyen. La structure spectrale est toutefois très simplifiée en comparaison avec le conduit vocal tronqué mais pourvu d'espaces interdentaires (a 2). Les paires pôle-zéro supplémentaires sont donc probablement dues aux espaces interdentaires, qui ont l'effet de cavités branchantes (cf. III-1).

L'aspect du spectre moyen se situe à mi-chemin entre les courbe (2) et (3). En effet, le spectre moyen présente des petites irrégularités semblables aux pics et creux de la fonction de transfert calculée avec un conduit vocal tronqué comportant des espaces interdentaires, mais sans que ces irrégularités soient aussi prononcées. De plus, la fréquence du pic principal est plus proche de celui du conduit vocal tronqué sans cavités interdentaires (a 3). Il est possible que le couplage des cavités interdentaires ait été exagéré dans la simulation, suite à une altération possible de la morphologie du conduit vocal au

¹⁰⁴ Contrairement à /s/, la constriction en elle-même n'est pas constitutive d'une cavité de résonance dans /ʃ/, d'après la distribution des nœuds et ventres de pression à l'intérieur du conduit vocal à la fréquence des pics spectraux (**Figure 92 b**). Par conséquent, le conduit vocal a été tronqué au point le plus étroit de la constriction linguale.

cours de l'extraction des conduits vocaux 3D.

III-5.3 Comparaison 1D – 3D

La Figure 93 illustre les conduits vocaux 3D tronqués utilisés pour calculer leur fonction de transfert avec la méthode FEM. Dans ces conduits vocaux 3D, les espaces inter-dentaires n'ont pas été pris en compte.

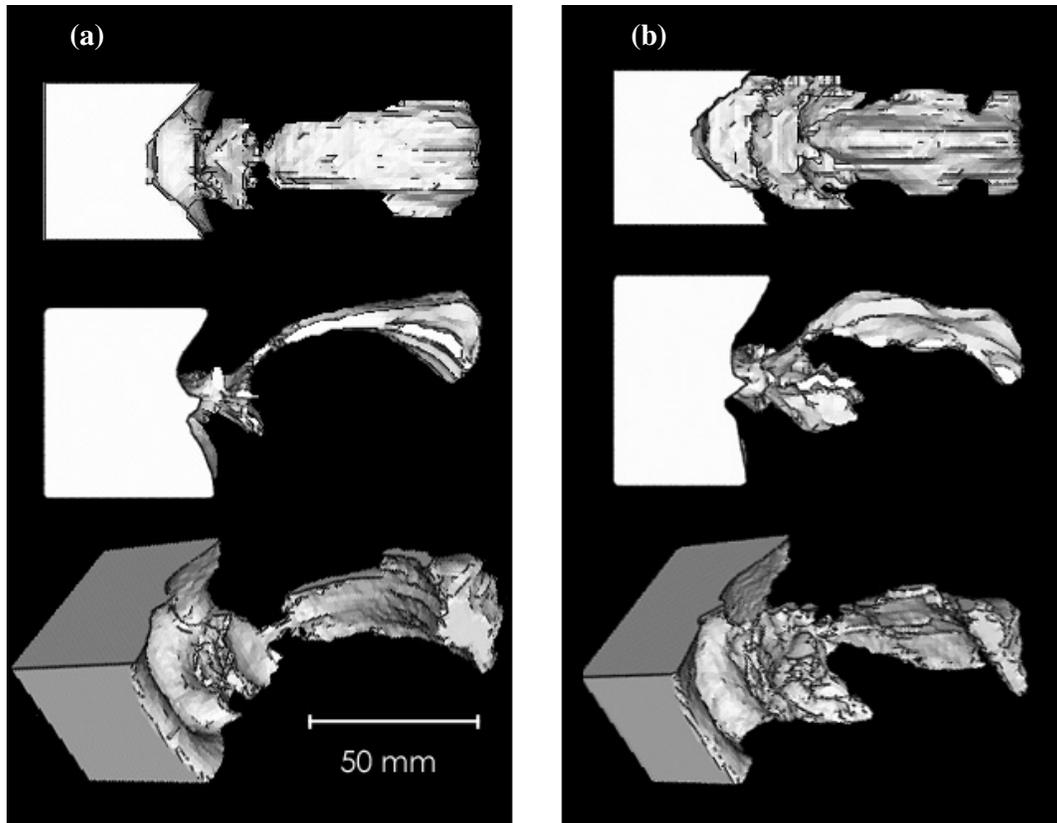


Figure 93. Vues 3D des conduits vocaux de (a) /ʃ/, Fr1 et (b) /ʒ/, P1 ; construits à partir d'un maillage de 1,5 mm. Vue du haut (haut), de profil (milieu) et 3/4 du fond (bas). La description articulatoire détaillée pour ces deux locuteurs est présentée en Annexe III (locuteur Fr1) et en I-1 (locuteur P1). Le locuteur Fr1 est un locuteur de la stratégie « recul » (cf. I-3).

III. Modélisation acoustique des fricatives sibilantes

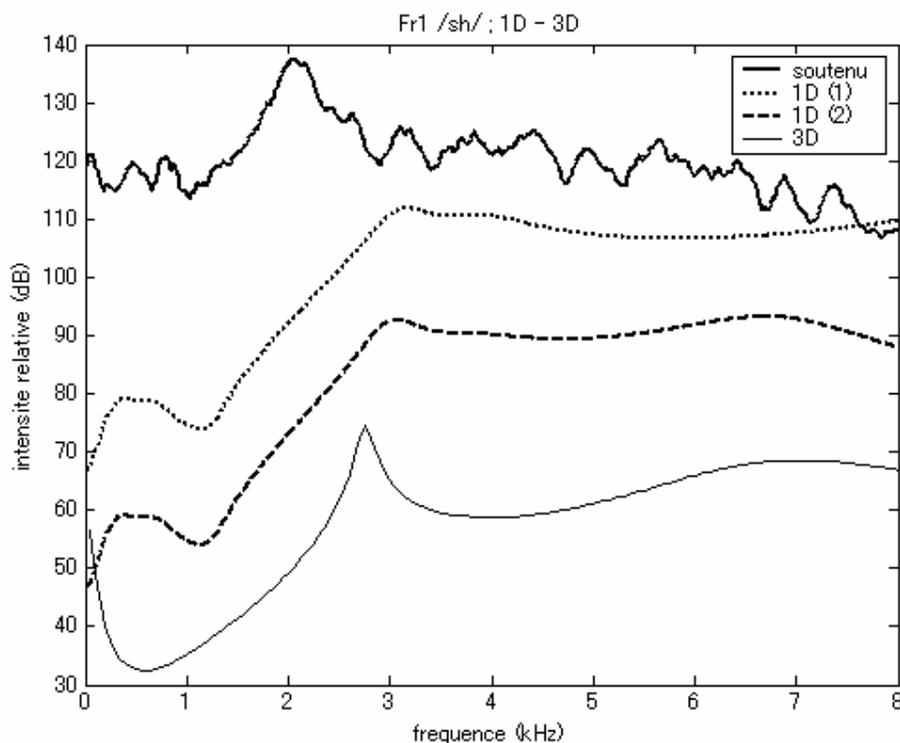


Figure 94. De haut en bas, spectre moyen d'un bruit tenu, /ʃ/, locuteur Fr1, en position allongée (ligne épaisse pleine), fonction de transfert calculée à l'aide de VTF_fric (simulation 1D) à partir de la fonctions d'aire (la fonction d'aire se trouve en Annexe III – lignes épaisses pointillées (1) et (2)), et fonction de transfert 3D, calculée à l'aide de la méthode des éléments finis (ligne fine). Source dentale dans les trois simulations. Source de pression pour la simulation 1D et source dipôle orientée dans le sens avant-arrière pour la simulation 3D. Dans la courbe 1D (2), la cavité labiale a été artificiellement prolongé par un tube uniforme, de 5 mm de long et 4 cm² d'aire de section.

La **Figure 94** présente les fonctions de transfert calculées à l'aide de VTF_fric (1D ; même procédure qu'en III-4) et de Sysnoise (3D). Un pic caractéristique apparaît vers 2,5-3,5 kHz dans les deux méthodes. Ce pic peut être mis en correspondance avec le pic spectral du spectre moyen du bruit tenu, qui est plus grave (vers 2 kHz). Ce décalage peut être attribué à une différence de morphologie du conduit vocal entre la séance d'acquisition IRM et celle de l'enregistrement sonore, plutôt qu'à des erreurs spécifiques aux méthodes de simulation acoustique. Nous y reviendrons dans la *discussion*.

III. Modélisation acoustique des fricatives sibilantes

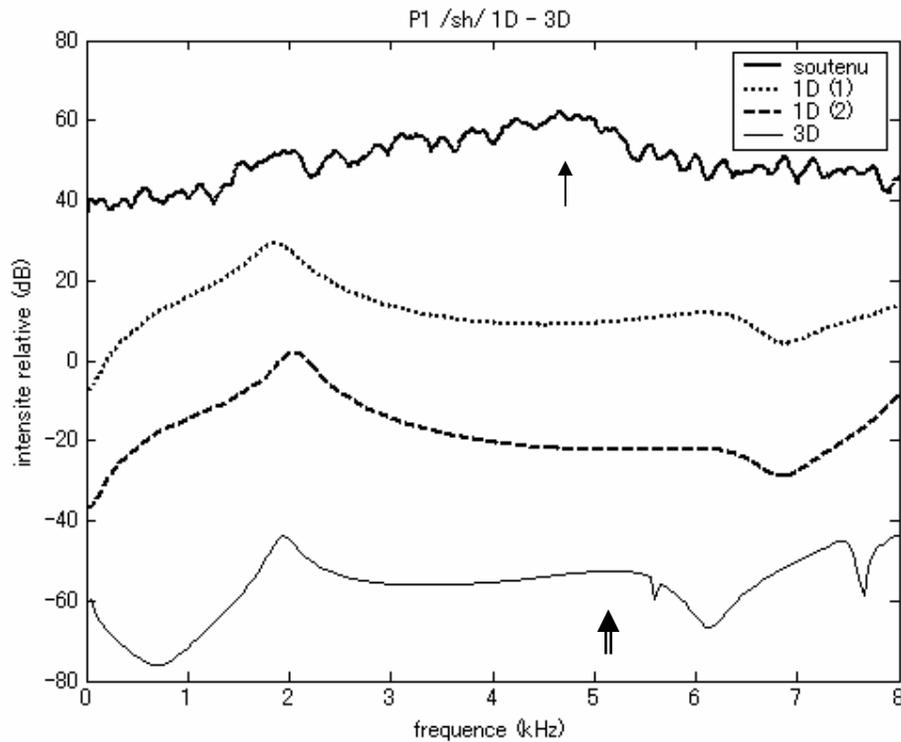


Figure 95. De haut en bas, spectre moyen (ligne pleine épaisse) et fonctions de transfert calculées à l'aide de VTF_fric (méthode 1D – lignes épaisses pointillées (1) et (2)) et à l'aide de Sysnoise (méthode 3D – ligne fine) ; locuteur P1, /s/. Source dentale de pression (dipôle). Pour la simulation 3D, la source est orientée dans le sens avant-arrière. Dans la fonction de transfert 1D (1), l'effet du rayonnement aux lèvres a été implémenté, contrairement à (2).

La **Figure 95** présente les résultats de simulation 1D et 3D pour /s/ de P1. Les deux méthodes, 1D et 3D, permettent aussi bien de reproduire un pic vers 2 kHz, aligné avec le pic *ultra-bas* du spectre moyen, qui caractérise le spectre de /s/ (bien que n'étant pas le plus intense ; cf. III-4). L'effet du rayonnement aux lèvres, implémenté dans la courbe 1D (1) et ignoré dans la courbe 1D (2), a un effet mineur ($\Delta 100 - 200$ Hz) sur la fréquence de ce pic. Cette observation concorde avec l'affiliation probable de ce pic à la cavité orale antérieure (III-4). Le pic principal du spectre moyen, vers 5 kHz, a été attribué à la cavité labiale (III-4). Nous avons déjà discuté du décalage du formant labial dans la fonction de transfert calculée avec la méthode 1D, qui serait dû à une longueur de cavité labiale sous-estimée. Dans la simulation 3D, un pic large est observé au-dessus de 5 kHz (flèche double), non loin en fréquence du pic principal du spectre moyen (flèche simple). Si ce pic provenait effectivement des lèvres, comme nous poussons à le penser les résultats de la sous-section suivante (III-5.4), alors le décalage observé par rapport au pic principal du

III. Modélisation acoustique des fricatives sibilantes

spectre moyen pourrait être attribué à l'insuffisance du rayonnement aux lèvres dans la simulation 3D¹⁰⁵. La simulation 3D donne néanmoins un pic plus proche du spectre naturel que la méthode 1D. Il est probable que la cavité labiale ait été mieux prise en compte dans la simulation 3D, dont la morphologie du conduit vocal est plus fidèle aux données d'origine. Dans la méthode 1D, qui utilise une fonction d'aire, les lèvres, courbes, subissent une altération considérable (cf. III-4). Dans les fonctions de transfert 1D présentées ici, la longueur des lèvres n'a pas été corrigée.

III-5.4 Effets de la cavité labiale

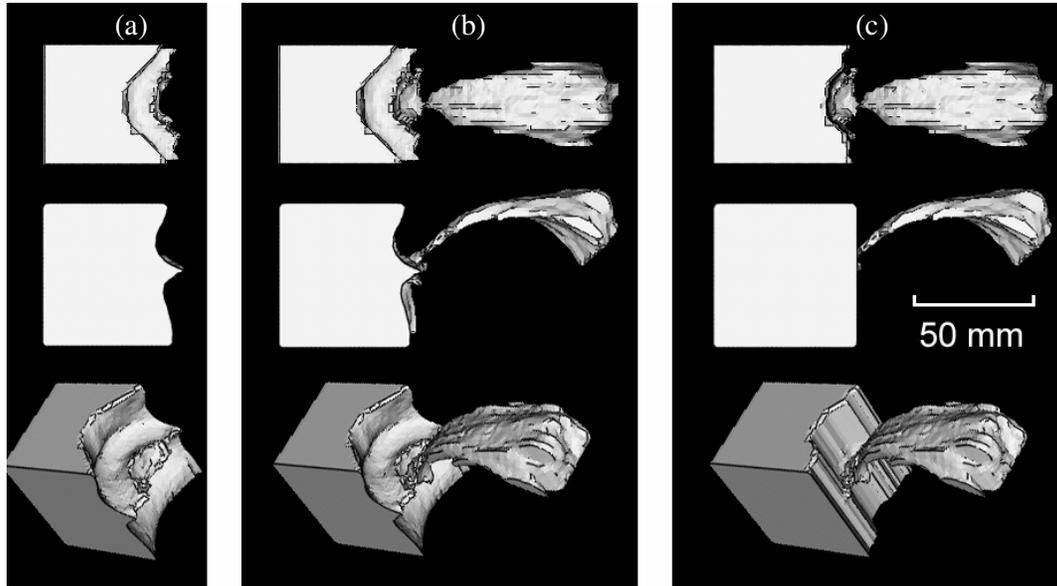
Afin de déterminer le rôle de la protrusion labiale, nous avons mené une expérience de simulation 3D avec des conduits vocaux modifiés. Nous avons déjà noté dans la section I-4 que la constriction dentale était étroite, même parfois aussi étroite que la constriction linguale. Il est donc légitime de supposer que la cavité labiale est relativement indépendante de la cavité orale antérieure sur le plan acoustique, ce qui a été confirmé dans les expériences de simulation 1D avec des fonctions d'aire mesurées (III-4). Nous avons donc créé des conduits vocaux dépourvus de cavité labiale et des conduits vocaux ne comprenant que la cavité labiale à partir de modèles tronqués dans la région vélaire (qui peuvent être considérés comme équivalents à des conduits vocaux entiers d'un point de vue phonétique¹⁰⁶). Les trois types de modèles sont illustrés en **Figure 96**.

¹⁰⁵ Le rayonnement entraîne l'allongement effectif de la cavité labiale (cf. Flanagan, 1972, p. 36-38).

¹⁰⁶ En effet, nous avons montré dans la sous-section précédente que les caractéristiques spectrales essentielles des sibilantes pouvaient être modélisées à l'aide de conduits vocaux tronqués.

III. Modélisation acoustique des fricatives sibilantes

Fr1 /ʃ/



P1 /ʒ/

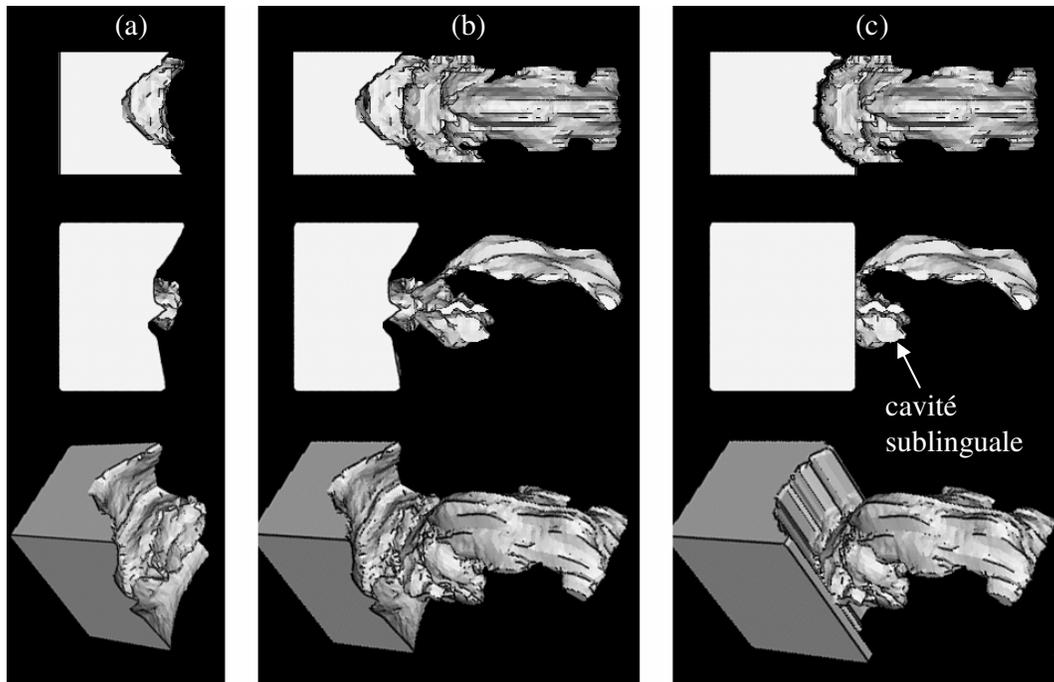
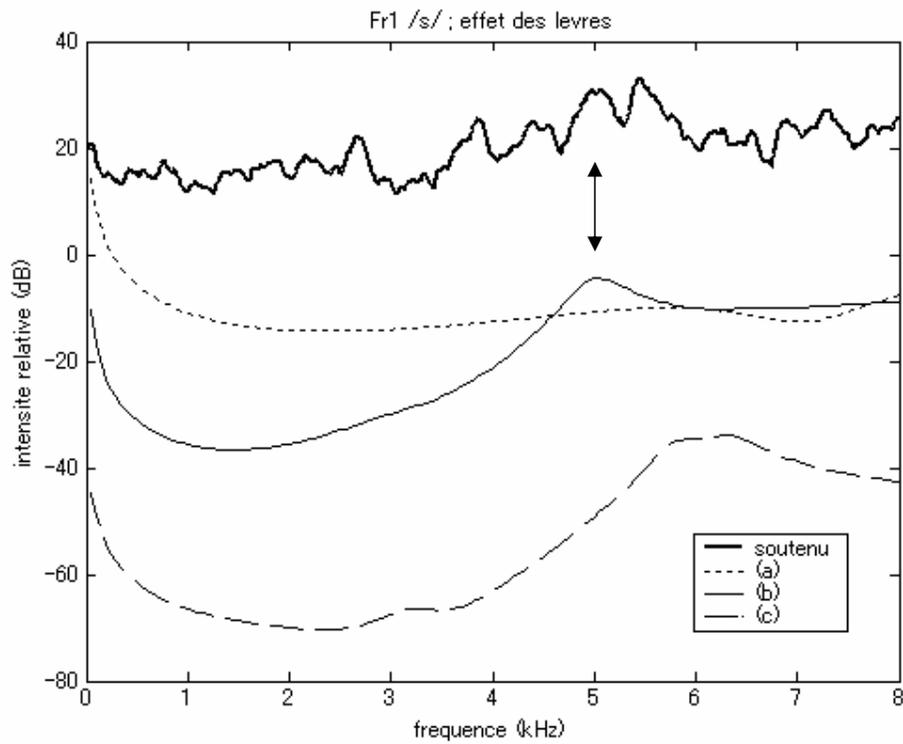


Figure 96. Conduits vocaux des sibilantes Fr1 /ʃ/ (haut) et P1 /ʒ/ (bas) ; (a) les lèvres seulement, (b) original (identiques à la Figure 93), et (c) sans les lèvres. A

III. Modélisation acoustique des fricatives sibilantes

l'intérieur de chaque panneau, vue du haut du conduit vocal 3D (haut), de profil (milieu) et de 3/4 par le haut (bas).



III. Modélisation acoustique des fricatives sibilantes

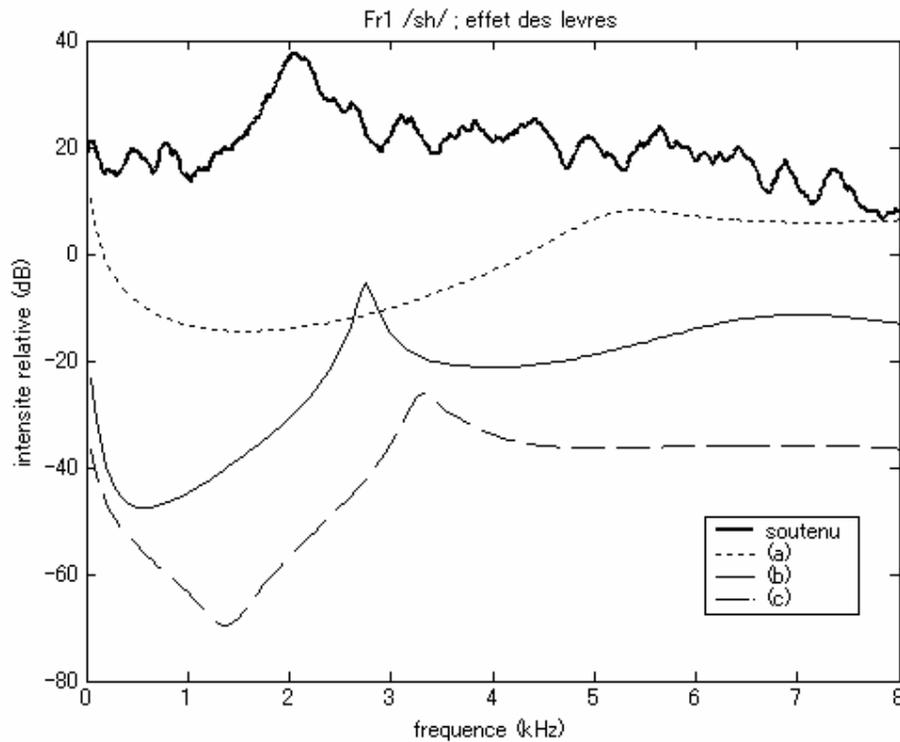


Figure 97. De haut en bas dans chaque image, spectre moyen du bruit de friction tenu (ligne épaisse) et fonctions de transfert calculées à l'aide de la méthode des éléments finis, pour Fr1 /s/ (haut) et /ʃ/ (bas) - maillage de 1,5 mm ; (a) lèvres seulement (conduit vocal original tronqué à la constriction dentale), avec une source localisée en avant de la constriction dentale ; (b) conduit vocal 3D original, source dentale (c) sans les lèvres (couvrant de la région vélaire jusqu'à la constriction dentale), source dentale.

Pour Fr1 /ʃ/ (Figure 97, bas), le conduit vocal sans les lèvres (c) produit un pic vers 3,3 kHz, d'aspect (d'intensité et de largeur de bande) semblable à celui observé vers 2,8 kHz pour le conduit vocal 3D original (b). Quant au conduit vocal qui ne contient que les lèvres (a), où la section tronquée est traitée comme une paroi rigide, il produit un pic vers 5,4 kHz, de largeur de bande semblable à celui de 7 kHz dans la fonction de transfert du conduit vocal 3D original (b). Notons que le conduit vocal sans les lèvres (a) ne présente pas de pic dans la région de 7 kHz, et que le conduit vocal des lèvres seules (c) ne présente pas de pic autour de 3 kHz. Nous en déduisons que le pic de 2,8 kHz du conduit vocal original (b) provient principalement de la cavité orale antérieure, tandis que le pic large de 7 kHz provient de la cavité labiale. Ces deux pics peuvent être mis en correspondance avec les pics de 2 kHz et de 6 kHz du spectre moyen, respectivement.

Il existe une différence importante (environ 500 Hz) de la fréquence du pic principal entre les configurations avec ou sans les lèvres. De même, le pic labial dans le conduit vocal original est plus élevé que dans le conduit vocal des lèvres seules. Ces deux faits peuvent

III. Modélisation acoustique des fricatives sibilantes

suggérer qu'il existe un certain couplage acoustique entre la cavité labiale et la cavité orale antérieure (comparable à la situation entre la cavité antérieure et le chenal palatal dans l'expérience de la section III-2), sans minimiser l'effet du traitement des plans de coupe comme parois rigides, alors que malgré leur étroitesse, la constriction dentale est précisément ouverte. Ces résultats sont contradictoires avec ceux de III-4 (1D), où les modifications de la cavité labiale n'ont pas entraîné de changement majeur des autres pics. La différence entre ces deux expériences peut être attribuée à la façon dont les conduits vocaux sont dérivés des données IRM. Dans la fonction d'aire (III-4), l'aire est mesurée manuellement à partir d'images dont la résolution artificielle¹⁰⁷ est de 0,0625 mm² par pixel. Dans les conduits vocaux 3D, la morphologie du conduit vocal est globalement préservée, mais chaque détail est « arrondi » avec une précision de l'ordre de 1,5 mm dans le sens de l'expansion¹⁰⁸. Une surestimation de l'aire de la constriction dans les conduits vocaux 3D pourrait donc expliquer ce phénomène.

Pour Fr1 /s/ (**Figure 97**, haut), le conduit vocal qui ne contient que les lèvres (a) ne présente pas de pic dans les limites de 0-8 kHz. Les conduits vocaux avec ou sans cavité labiale (b) et (c), présentent un pic vers 5 et 6 kHz, respectivement. Ce pic est proche du pic principal du spectre moyen (vers 5-5,5 kHz). Comme /ʃ/, la suppression de la cavité labiale entraîne une élévation d'environ 1 kHz du pic principal du conduit vocal original. Bien que la fonction de transfert des lèvres seules ne présente pas de pic à l'intérieur de la plage fréquentielle de la simulation, on peut supposer le même type d'affiliation formantique : pour ce conduit vocal, le pic de 5 kHz (conduit vocal original, b) est affilié à la cavité orale antérieure.

¹⁰⁷ Rappelons que l'aire du conduit vocal a été mesurée sur les données IRM initialement acquises sur le plan sagittal (coupes espacées de 1,5 mm), mais redécoupées en coupes coronales après interpolation (ce qui revient à une résolution artificielle de 0,25 mm dans l'axe droite-gauche). La résolution dans l'axe haut-bas étant de 0,25 mm/ pixel, la résolution finale, au moment de la mesure de l'aire, est de 0,25 x 0,25 = 0,625 mm²/ pixel.

¹⁰⁸ C'est ce que nous avons constaté en réalisant des maillages plus ou moins fins, avec l'aide du logiciel Mimics (Materialize).

III. Modélisation acoustique des fricatives sibilantes

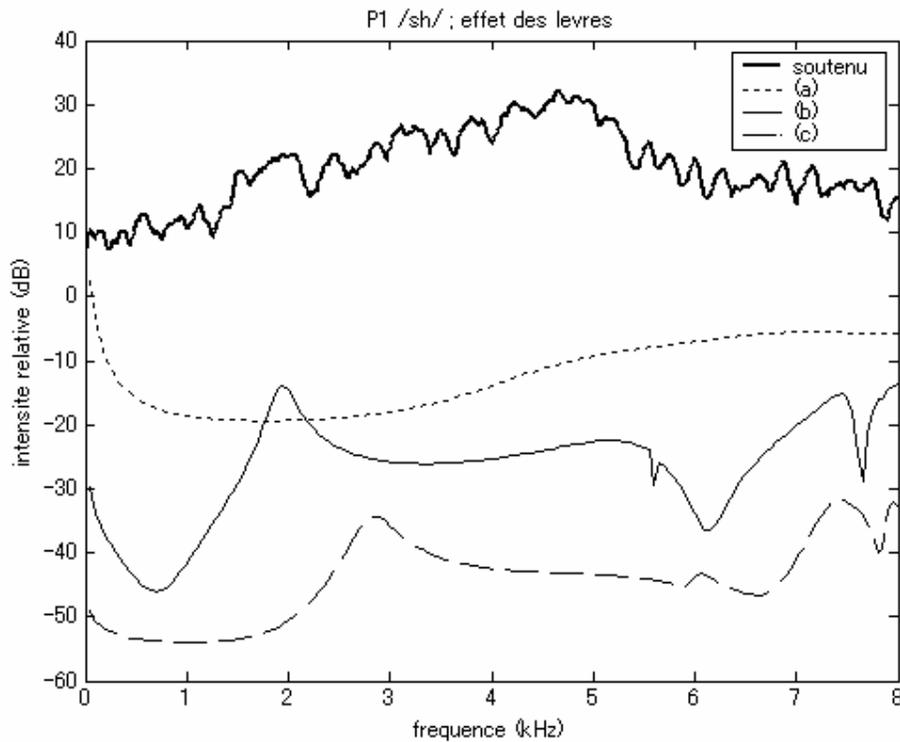


Figure 98. De haut en bas, spectre moyen du bruit de friction tenu (ligne épaisse) et fonctions de transfert calculées à l'aide de la méthode des éléments finis, pour P1 /ʃ/ ; maillage de 1,5 mm. (a) Les lèvres seulement (conduit vocal 3D tronqué à la constriction dentale), avec une source localisée en avant de la constriction dentale ; (b) conduit vocal 3D original, des lèvres jusqu'à la région vélaire; (c) sans les lèvres (couvrant de la région vélaire jusqu'à la constriction dentale), avec une source derrière la constriction dentale.

Pour P1 /ʃ/ (**Figure 98**), le pic de 3 kHz du conduit vocal 3D sans les lèvres (c) peut être mis en correspondance avec le pic de 2 kHz du conduit vocal original (b) et du spectre moyen. De même, le pic vers 7 kHz des lèvres seules (c) peut être mis en correspondance avec le pic de 5,3 kHz du conduit vocal original (b) et de 5 kHz du spectre moyen. Le pic de 2 kHz du conduit vocal original peut donc être attribué à la cavité orale antérieure, et le pic de 5,3 kHz à la cavité labiale. La différence de fréquence du pic de la cavité orale antérieure est importante (environ 1 kHz) entre les configurations avec (b) et sans (c) les lèvres, comme pour Fr1 /ʃ/. Ce résultat est surprenant dans la mesure où l'allongement de la cavité labiale dans la fonction d'aire de P1 /ʃ/, dans l'expérience de la section III-4, n'avait pas occasionné de changement de fréquence du pic de 2 kHz dans la fonction de transfert calculée avec la méthode 1D (**Figure 81**, première et quatrième fonctions de transfert). Comme nous l'avons évoqué quelques paragraphes plus haut, une altération de la morphologie du conduit vocal 3D, surtout sensible pour les constriction étroites et dont la forme est complexe, peut être responsable de cette divergence entre les méthodes

1D et 3D.

Discussion

Dans cette section, les modes de résonance des sibilantes ont été examinés à l'aide de conduits vocaux 3D. D'après la distribution de la pression acoustique à l'intérieur du conduit vocal, il a été montré que la cavité orale antérieure était responsable des pics majeurs dans le conduit vocal FrJ /ʃ/ₓ. La constriction linguale (que nous ne désignons pas par le terme de *chenal palatal* en raison de sa faible longueur et de son lieu d'articulation alvéolaire, mais qui est de même nature) était responsable de la prééminence de FrJ /s/ₓ. La troncation de ces modèles dans la région vélaire (/s/) ou à la constriction linguale (/ʃ/) n'a pas entraîné de modification de l'enveloppe globale de la fonction de transfert. Par conséquent, l'apport de la cavité postérieure, au sens classique¹⁰⁹, dans le spectre de bruit est vraisemblablement insignifiant pour FrJ /s/ₓ et /ʃ/ₓ, comme pour les sibilantes du polonais /ç/ et /ʒ/ qui ont fait l'objet de simulations 1D dans III-4.

Pour les deux sibilantes étudiées, Fr1 /ʃ/ et P1 /ʒ/, les méthodes de simulation 1D et 3D ont donné lieu à des résultats plus ou moins proches des spectres naturels. Pour P1 /ʒ/, les deux méthodes sont aussi bonnes pour reproduire le pic attribué à la cavité orale antérieure (pic *ultra-bas*) du spectre moyen. Toutefois, pour Fr1 /ʃ/, la méthode 3D donne lieu à un pic principal plus proche de celui du spectre moyen que la méthode 1D, quoique la différence avec le pic principal du spectre moyen reste importante. Une correction de la longueur de la cavité labiale¹¹⁰ avec la méthode 1D (courbe (2)) a peu d'incidence sur la fréquence du pic principal malgré une constriction relativement large (80 mm²) qui favoriserait l'interaction des résonances de la cavité orale antérieure et de la cavité labiale. Cette correction permet uniquement d'observer un formant labial vers 7 kHz, comme dans la fonction de transfert de la méthode 3D. L'écart entre les fonctions de transfert et le spectre naturel pour cette sibilante pourrait vraisemblablement être dû, par conséquent, à une différence de production entre la séance d'acquisition IRM et l'enregistrement sonore. Un enregistrement simultané pendant l'acquisition des données articulatoires apparaît indispensable pour apprécier l'exactitude de la méthode de simulation.

Quant aux lèvres, les résultats de simulation 3D, contrairement aux résultats de

¹⁰⁹ C'est-à-dire qui se situe en arrière de la constriction linguale – en d'autres termes, qui exclut le *chenal palatal*. Rappelons qu'il ne s'agit pas de la même entité que la 'cavité postérieure' dans la section III-4, où le conduit vocal avait été découpé à la constriction linguale maximale, et par conséquent, notre 'cavité postérieure' pouvait contenir un *chenal palatal*.

¹¹⁰ La longueur des lèvres a très certainement été sous-estimée dans la fonction d'aire de /ʃ/ du locuteur Fr1 (Annexe III), en raison de sa courbure latérale.

III. Modélisation acoustique des fricatives sibilantes

simulation 1D (III-4), montrent que le pic associé à la cavité orale antérieure est sensible à la présence/absence de la cavité labiale : la fréquence du pic associé à la cavité orale antérieure augmente de 0,5 à 1 kHz lorsqu'on supprime les lèvres. L'existence d'interaction entre la cavité orale antérieure et la cavité labiale peut être envisagée pour Fr1 /ʃ/, dont la constriction dentale est relativement large (environ 80 mm²). Cependant, cette position est moins confortable pour Fr1 /s/ et P1 /ʃ/, dont la constriction dentale ne dépasse pas 15 mm², même en supposant la déformation possible du conduit vocal lors de la construction du maillage (dont les segments mesurent environ 1,5 mm). Une solution alternative serait de considérer que la cavité orale antérieure s'apparente à un résonateur de Helmholtz, avec la constriction dentale comme col (cf. **Figure 49**). La suppression de la cavité labiale et, accidentellement, d'une partie de la constriction dentale, a pu raccourcir le col, occasionnant l'élévation de la fréquence de résonance de Helmholtz lors de la suppression de la cavité labiale. Rappelons que dans la simulation 1D, la constriction dentale est entièrement présente dans les configurations d'origine comme dans les configurations corrigées pour les lèvres. Quant à l'élévation de la fréquence du pic labial en l'absence de toute cavité orale, il pourrait être expliqué par le changement de la condition de frontière de la constriction dentale : ouverte dans les conduits vocaux 3D originaux et fermée dans les conduits vocaux des lèvres seules. Cette interprétation est en accord avec les résultats de III-4, **Figure 83** où deux conditions de frontière ont été comparées.

L'implication de la cavité labiale dans un pic large de haute fréquence (*formant labial* entre 5 et 8 kHz, voire au-delà pour /s/) est toutefois confirmée par la modélisation acoustique 3D, en conformité avec la modélisation 1D (III-4).

Une expérience naturelle

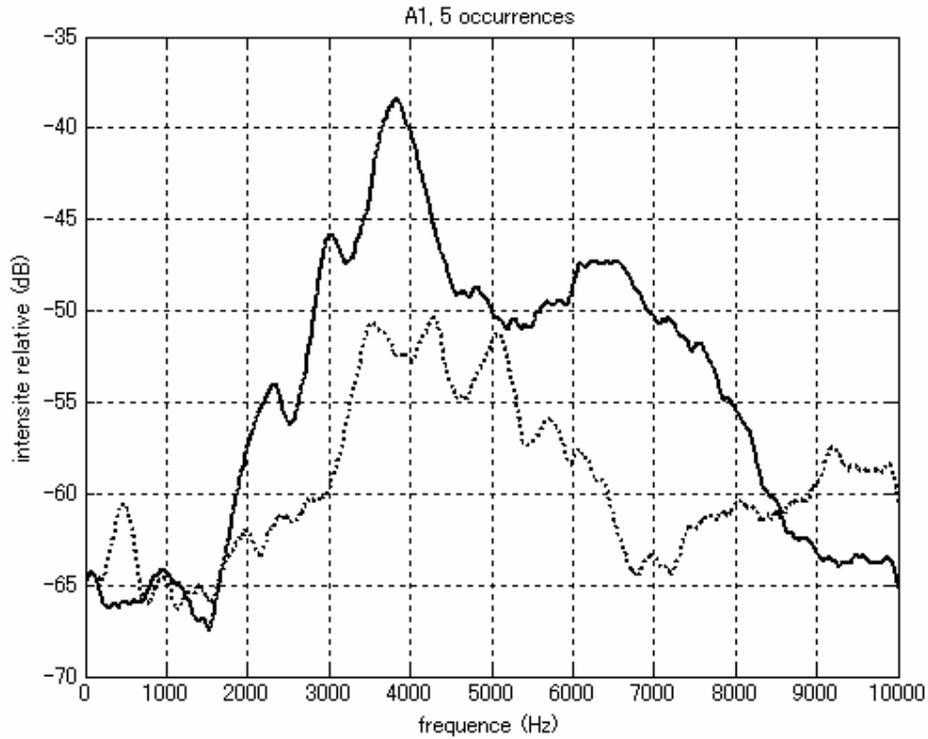
Nous présentons, en complément des résultats de simulation, des données de parole naturelle concernant le rôle de la cavité labiale, qui est vraisemblablement acoustiquement indépendante de la cavité orale antérieure. S'il n'existe pas de son de parole « sans les lèvres », il existe des sons de parole sans constriction dentale : ce sont les fricatives non-sibilantes.

En allemand, /ʃ/ et [ç] (allophone de /x/) s'opposent de manière minimale en contexte /i:/ ou /i/. Par exemple, *mich* [miç] « moi » vs. *misch* [miʃ] « mélanger ». Bien que leur lieu d'articulation ne soit pas strictement le même, il s'agit de deux sons articulés plus ou moins dans la région palatale. D'après Shadle (1985), ces deux types de sons comporteraient une source de bruit de type obstacle (distribuée pour [ç]). Le plus gros de la différence spectrale entre les deux sons devrait donc provenir de la fonction de transfert du conduit vocal.

S'il est probable, étant donné le système phonologique de l'allemand (en particulier, l'existence du phonème /x/), que /ʃ/ ne soit pas strictement identique à celui de l'anglais (cf. I-3), dans la mesure où il s'agit d'une sibilante, on s'attend à trouver un formant labial, vers 5-8 kHz environ. Pour /ç/, on s'attend à trouver un pic majeur affilié à la cavité antérieure dans des fréquences proches de celui de /ʃ/, dont le lieu d'articulation est

III. Modélisation acoustique des fricatives sibilantes

proche, mais pas de formant labial car les lèvres ne peuvent être responsable d'un formant spécifique étant donné qu'elles font partie intégrante de la cavité antérieure.



III. Modélisation acoustique des fricatives sibilantes

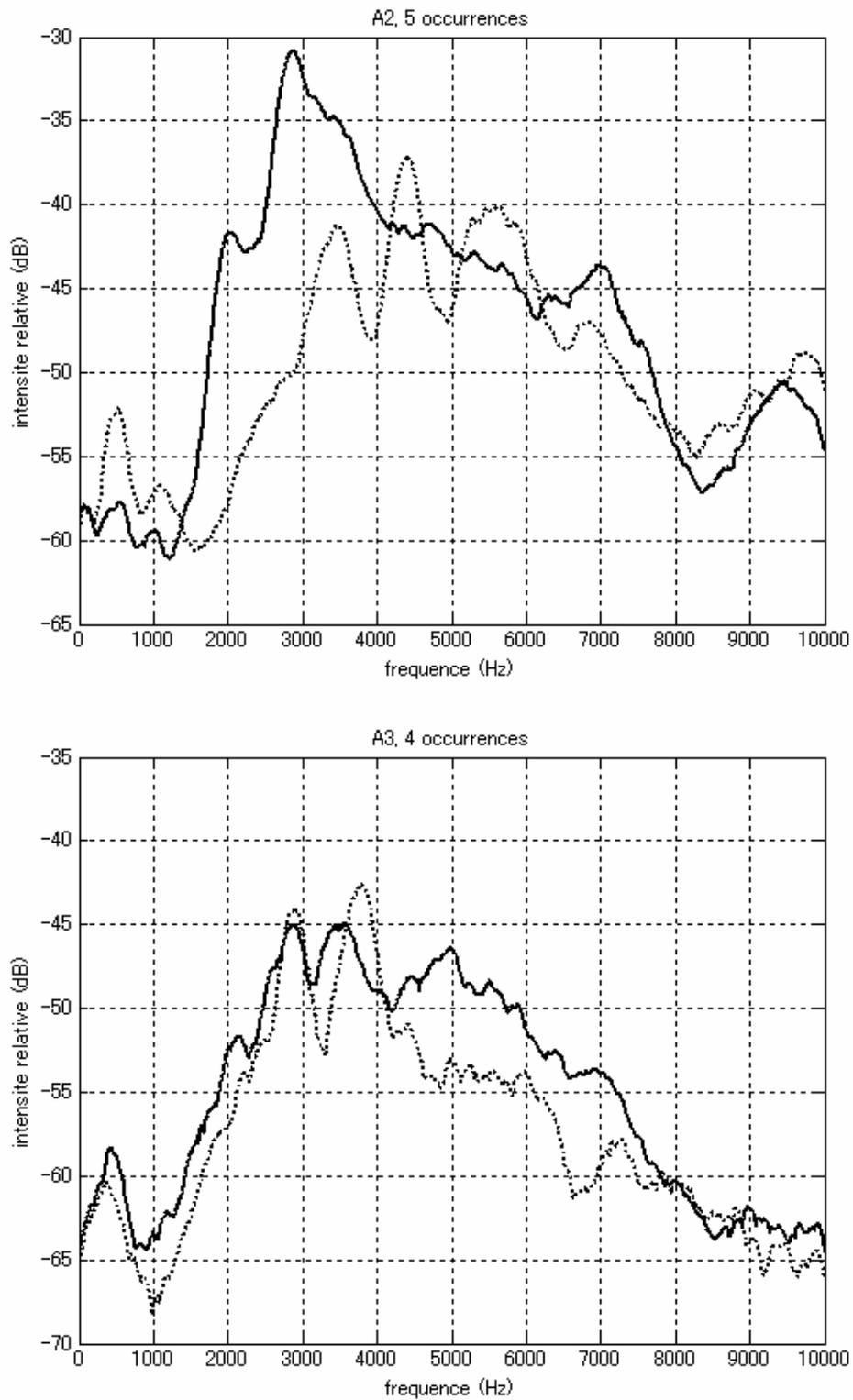


Figure 99. Spectre moyen (moyenne de la portion centrale de 4 ou 5

occurrences) des fricatives [ʃ] et [ç] produites dans les séquences [ɪʃ] (lignes pleines) et [ɪç] (lignes pointillées), à l'intérieur d'une phrase cadre « *Ich habe [...] gesagt* (j'ai dit [...]) ». Deux locutrices, A1 et A2, et un locuteur, A3. Ces données ont été acquises dans le cadre d'une collaboration avec Hyunsoon Kim, Kiyoshi Honda et Shinji Maeda¹¹¹.

La Figure 99 illustre le spectre de bruit des fricatives [ʃ] et [ç] en contexte /ɪ_/. Chez tous les locuteurs, le spectre de [ʃ] est globalement plus diffus que celui de [ç] en raison d'une prééminence secondaire dans les hautes fréquences (5-7 kHz).

Chez la locutrice A1, les deux fricatives présentent une prééminence principale autour de 4 kHz. Cette prééminence est plus diffuse et moins intense pour [ç]. Le [ʃ] possède une prééminence secondaire vers 6,5 kHz.

La locutrice A2 produit un [ʃ] avec une prééminence principale intense vers 3 kHz. Une prééminence secondaire est observée vers 7 kHz. La prééminence spectrale de [ç] est de fréquence plus élevée : trois pics répartis entre 3,5 et 5,5 kHz. Cette prééminence recouvre la prééminence secondaire de [ʃ]. La différence spectrale de ces deux sons pour cette locutrice se manifeste donc surtout dans l'intensité supérieure de la prééminence principale de [ʃ] en comparaison à [ç], comme pour la locutrice A1, mais aussi son caractère grave.

Enfin, le locuteur A3 présente une prééminence spectrale vers 3-4 kHz pour les deux fricatives. [ʃ] est caractérisé par un autre pic important vers 5 kHz. A la différence des deux locutrices, il n'y a pas de grande différence d'intensité entre les deux fricatives. La différence spectrale de ces deux fricatives se situe entre 4,5 et 7,5 kHz, où le spectre de [ʃ] est plus intense que celui de [ç] en raison de son pic secondaire.

Les résultats de ces trois locuteurs sont conformes à nos prédictions. Si la fréquence du pic spectral principal varie selon les locuteurs et les fricatives, indiquant une différence possible du lieu de constriction, la sibilante [ʃ] présente systématiquement une prééminence secondaire dans les fréquences comprises entre 5 et 7 kHz, interprétable comme un formant labial. A l'opposé, [ç] présente une seule prééminence spectrale (constituée de plusieurs pics proches les uns des autres¹¹²). Bien que chaque locuteur semble avoir sa propre façon de réaliser le contraste entre ces deux sons, la structure spectrale de chacune des fricatives est interprétable en termes de présence/absence de constriction dentale.

En d'autres termes, si les sibilantes se caractérisent par une constriction dentale étroite sur

¹¹¹ L'enregistrement a été effectué dans la chambre sourde de l'ILPGA, Université Paris III. Les spectres FFT ont été calculés sur le signal couvrant les 50% centraux du segment, avec des fenêtres Hamming de 10 ms.

¹¹² Ces pics peuvent être attribués au chenal palatal et à la cavité antérieure.

III. Modélisation acoustique des fricatives sibilantes

le plan articulatoire, elles se caractérisent par la présence d'un formant labial sur le plan acoustique. La présence d'un formant labial, au-delà de 5 kHz (et plus, selon qu'il y ait ou non de protrusion labiale), serait donc le corrélat acoustique du trait [+ strident] ou [+ obstacle]¹¹³.

¹¹³ Ce terme avait été proposé dans la note 12 comme alternative au terme « strident », en cohérence avec les autres traits de lieu et de mode qui font tous référence à l'articulation.

CONCLUSION GÉNÉRALE

Résumé de la conclusion

L'étude acoustique du bruit de friction et des transitions formantiques a montré que ces deux indices étaient complémentaires, leurs poids respectifs dépendant des langues (II). Toutefois, les moyens articulatoires mis en œuvre pour les réaliser diffèrent en fonction des locuteurs, en particulier en français (I-2), mais également dans les autres langues (III-2). Il serait donc difficile de décrire un contraste de « lieu » des sibilantes de manière universelle (indépendante des locuteurs) en termes articulatoires. De plus, si l'on ne peut pas exclure que les oppositions phonémiques exploitent des principes quantiques chez les locuteurs individuellement, ces résultats suggèrent que la réalisation des contrastes des sibilantes dans les langues relève du principe d'une distance suffisante.

La dispersion des sibilantes dans l'espace articulatoire (I-3) va également dans ce sens, en ce qu'elle est clairement sensible au système phonologique¹¹⁴. Le son /s/ n'a pas la même dispersion selon qu'il s'oppose à /sʲ/ (japonais) ou à /ʃ/ (français). Par ailleurs, certains sons présentent une dispersion plus importante que d'autres, précisément le /ʃ/ en français.

La modélisation acoustique a permis d'apporter une explication à ce phénomène. La cavité orale antérieure et le chenal palatal peuvent donner lieu à un pic majeur de fréquence équivalente (III-2). D'après les résultats de modélisation à l'aide de fonctions d'aire réelles, ces deux cavités sont responsables des pics observés dans les spectres

¹¹⁴ Les zones stables et instables telles qu'observée dans l'expérience de la section III-2 sont en effet définies par la longueur de la cavité postérieure ; autrement dit, si les locuteurs de toutes les langues avaient en moyenne un conduit vocal de même longueur, les zones stables acoustiquement correspondraient aux mêmes zones de l'espace articulatoire quelle que soit la langue. Si le principe quantique régissait la dispersion des phonèmes dans l'espace articulatoire, on s'attendrait à ce que deux sons semblables comme /s/ en japonais et /s/ en français, qui relèveraient des mêmes zones quantiques, occupent la même étendue dans l'espace articulatoire.

naturels (III-4). En particulier, chez deux locuteurs polonais, la cavité orale antérieure de grand volume est responsable du formant ultra-bas (vers 1,5 – 1,8 kHz) du /s/. Il s'avère également que la cavité labiale est responsable d'un formant propre, en raison de la forte constriction dentale (III-4 et III-5). Cette forte constriction au niveau des incisives caractérise du reste toutes les sibilantes (I-4). La protrusion labiale de /ʃ/ aurait donc comme effet principal d'abaisser ce formant. En français et en anglais, le maintien du formant labial à 4 – 5 kHz par le biais de la protrusion labiale permet de renforcer la différence avec /s/, qui possède une proéminence spectrale vers 8 – 10 kHz.

En examinant une large variété de fricatives sibilantes, cette thèse a donc pu mettre en évidence les caractéristiques acoustiques associées à leur contraste, et les interpréter analytiquement en termes d'affiliation des formants aux cavités par le biais de la modélisation acoustique.

L'objectif de cette thèse était d'éclaircir l'affiliation des formants aux cavités de résonance dans les fricatives sibilantes. Nous disposons maintenant d'un ensemble d'éléments de réponse.

Cibles acoustiques présumées des sibilantes

Nous avons vu dans le chapitre II, sections 2 et 3 que les cibles acoustiques des sibilantes étaient vraisemblablement différentes en fonction des langues.

En français et en anglais, le bruit de friction permet à lui seul une séparation quasi parfaite entre /s/ et /ʃ/. En contrepartie, la trajectoire des formants F2 et F3 varie en fonction des locuteurs, ce qui suggère que la cible articuloire vise surtout à atteindre un bruit de friction particulier, au détriment des transitions formantiques. Par ailleurs, le spectre de bruit des fricatives varie de manière importante en fonction du contexte vocalique, ce qui indique leur faible résistance à la coarticulation.

En japonais et en chinois, le bruit de friction constitue un indice acoustique moins puissant. Les transitions formantiques (japonais) et le timbre de la voyelle tautosyllabique (chinois) présentent des caractéristiques systématiques, qui viendraient compléter l'ensemble des indices permettant l'identification du « lieu » d'articulation. Contrairement au français et à l'anglais, les sibilantes sont donc plus résistantes à la coarticulation. Les cibles à atteindre à la fois pour le bruit de friction *et* les transitions engendrent des contraintes articuloires différentes des langues « à bruit » que sont le français et l'anglais. Ceci expliquerait la variation inter-individuelle relativement faible à l'intérieur des catégories phonémiques en japonais et en chinois en comparaison au français et à l'anglais (I-3).

Conclusion

Dans ce contexte, deux stratégies articulatoires ont été observées pour le /s/ français, mettant en œuvre le déplacement de la langue (stratégie « recul ») ou la déformation du dos de la langue (stratégie « déformation ») en référence à /s/ (chapitre I, section 2). Ces stratégies entraînent la formation de conduits vocaux dont la cavité orale antérieure et le chenal palatal varient en taille. Nous avons montré en III-2 que les résonances associées à ces deux structures étaient complémentaires et stabilisées grâce à leur interaction. Ces résultats suggèrent donc l'existence de grandes possibilités de « compensation », ou complémentarité inter-articulateurs, expliquant la relative homogénéité des caractéristiques spectrales du bruit de friction malgré l'importance de la variation articulatoire entre les individus. Par conséquent, il est probable que les sujets *disposent des moyens physiques de produire un bruit de friction plus standard, mais n'y trouvent pas d'intérêt*¹¹⁵, étant donné que le contraste est déjà important, et qu'il n'existe pour ainsi dire aucune ambiguïté. Quant à la variation inter-individuelle des transitions formantiques de F2 et F3, la différence de longueur du conduit vocal et du rapport entre les cavités antérieure et postérieure peut en être responsable (III-3).

Système phonologique et caractéristiques articulatoires

Les données articulatoires de trois types de langues, dont le contraste des sibilantes peut être décrit à l'aide des traits [+/- antérieur], [+/- distribué] ou les deux, ont été acquises à l'aide de l'IRM statique et examinées. Il s'est avéré que la distribution articulatoire des sibilantes divergeait entre les langues, même pour des sons apparemment proches. Par exemple, les occurrences de /s/ produites par les locuteurs du japonais (contraste [+/- distribué]) n'occupent pas exactement la même région dans l'espace articulatoire que les occurrences de /s/ en français et en anglais (contraste [+/- antérieur] ; I-3) : dans ce deuxième groupe, il existe une variation plus grande dans la dimension palatal/non-palatal. De même, le /s/ en japonais présente une dispersion plus étendue dans la dimension antérieur/non-antérieur en comparaison au groupe chinois/suédois (contraste à deux traits). Ce fait mérite d'être souligné. Même s'il peut se trouver que deux locuteurs de chacune de ces deux langues produisent un [s] parfaitement semblable, il existe indéniablement des tendances divergentes en fonction des langues. Ces observations sont en accord avec l'idée selon laquelle il existerait une variation plus importante dans les dimensions articulatoires non-pertinentes sur le plan phonologique, ou de codage¹¹⁶.

Fondements acoustiques des contrastes phonémiques

En dehors de l'enveloppe de la source qui varie vraisemblablement en fonction de la configuration articulatoire (III-introduction) et de l'emplacement de la source qui conditionne la fréquence des zéros libres (III-1 ; Annexe VII), le bruit de friction des sibilantes est structuré par les résonances de la cavité labiale, de la cavité orale antérieure,

¹¹⁵ Cf. l'hypothèse 3, contre l'hypothèse 4, de l'introduction générale.

¹¹⁶ La variation inter-individuelle ne préjuge pas de la *précision* articulatoire (cf. Tabain, 2001 ; Stone *et al.*, 2007).

et du chenal palatal (I-4 ; III-4, 5). Ces résonances peuvent théoriquement être ajustées de manière quasi-indépendante¹¹⁷. Nous suggérons qu'en polonais, le bruit de /ç/ et /ʂ/, qui est distinctif, peut être caractérisé par la fréquence du pic inférieur et la compacité de la prééminence spectrale (III-4). Lorsqu'on observe la dispersion des sibilantes non-antérieures normalisées dans les langues qui en possèdent deux (III-2 ; Figure 67 ; ronds et étoiles reliées par un segment pointillé), tous les locuteurs ne semblent pas s'appuyer sur les mêmes frontières « quantiques » pour délimiter les catégories phonémiques. Si la théorie quantique peut rendre compte du comportement de certains locuteurs individuellement, il semble difficile, dans l'ensemble, d'invoquer les discontinuités acoustiques pour expliquer ce type d'opposition phonémique. Le contraste à l'intérieur des sibilantes non-antérieures serait plutôt fondé sur le principe d'une distance suffisante.

L'effet acoustique de la protrusion labiale

Nous avons remarqué que les deux variantes individuelles du /ʃ/ français présentaient des similitudes articulatoires avec les deux phonèmes sibilants non-antérieurs du polonais /ç/ et /ʂ/ (I-2 et II-1). En particulier, la variante « recul » du /ʃ/, proche du /ʂ/ polonais, tendait à être accompagnée d'une protrusion labiale, contrairement à la variété « déformation ». D'après les résultats de simulation avec des configurations réalistes du conduit vocal (III-4 et 5), le pic du /ʂ/ polonais, situé vers 1,8 - 2 kHz, serait affilié à la cavité orale antérieure ; et le pic vers 5 kHz à la cavité labiale. D'après l'observation des données IRM, il s'avère que la constriction dentale, à peine plus grande que la constriction principale (linguale), mesure entre le simple et le triple de cette dernière (I-4). Cette observation concorde avec la position élevée de la mâchoire en parole continue, d'après la littérature (cf. introduction générale). Les lèvres seraient donc responsables d'un formant spécifique dans toutes les sibilantes. De plus, le mode de résonance de la cavité labiale s'apparenterait à un résonateur « quart d'onde » fermé (constriction dentale) – ouvert (extrémité labiale). Ainsi, le mécanisme acoustique explique enfin pourquoi on n'observe pas la même forme des lèvres que pour les vocoïdes labiaux (cf. I-Introduction), assimilables, quant à eux, à des résonateurs de Helmholtz, où les lèvres forment le col. Dans un résonateur de Helmholtz, le rétrécissement de l'aire du col (arrondissement labial), de même que son allongement (protrusion labiale), abaissent tous deux la fréquence de résonance ; cependant, dans un résonateur quart d'onde, seul l'allongement abaisse les fréquences de résonance. De plus, l'élargissement de l'aire labiale par l'écartement vertical des lèvres peut également contribuer à l'abaissement de ces fréquences, en augmentant l'effet du rayonnement (cf. Flanagan, 1972, p. 36-38).

La fréquence du premier (et probablement le seul qui compte) formant labial se situerait, d'après nos expériences (III-4 et 5), entre 5 et 8 kHz. La protrusion labiale dans /ʃ/ en français et en anglais entraînerait donc deux effets : (1) l'abaissement, plutôt mineur, de la

¹¹⁷ La configuration articulatoire peut toutefois entraîner une modification de l'emplacement, du type, et des caractéristiques spectrales de la source de bruit.

Conclusion

fréquence du pic affilié à la cavité orale antérieure (en fonction du degré de couplage entre la cavité orale antérieure et la cavité labiale), et (2) l'abaissement du formant labial, d'environ 7-8 kHz à environ 4-5 kHz. Jusque là, il était communément admis que la protrusion labiale avait pour fonction d'abaisser la fréquence du pic principal. Or, l'abaissement du formant labial lui-même pourrait être recherché. En effet, les spectres moyens de /s/ et /ʃ/ (II-3) en français révèlent l'existence de deux zones fréquentielles où se concentre la différence entre les deux sibilantes, la deuxième zone se situant autour de 8-10 kHz, là où se trouve le pic principal de /s/. Afin d'optimiser le contraste phonémique, il est concevable que le formant labial de /ʃ/ soit délibérément dévié vers les plus basses fréquences, pour ne pas coïncider avec le pic majeur de /s/¹¹⁸. Cette interprétation n'est pas incompatible avec la notion de *renforcement* (Stevens et Keyser, 1989 ; Keyser et Stevens, 2001)¹¹⁹, même si on l'attendait autrement. Nous pouvons alors nous demander pourquoi les locuteurs de la stratégie « déformation » n'ont pas recours à la protrusion labiale. Il peut être suggéré que les résonances labiales sont moins bien excitées, en raison d'une source de bruit qui se situerait plus en arrière, vers le chenal palatal où un bruit de constriction serait favorisé par une constriction longue et étroite (III-introduction). Des études approfondies sur la source de bruit sont indispensables pour valider cette hypothèse.

Questions persistantes

Dans cette thèse, nous nous sommes intéressée aux propriétés acoustiques du conduit vocal, en excluant volontairement l'aspect aéro-acoustique. L'une des motivations était que les propriétés acoustiques permettent vraisemblablement de prédire le plus gros de la variation du spectre pertinente sur le plan de l'opposition phonémique (III-introduction). L'autre raison est que les moyens informatiques à notre portée ne permettaient pas d'entreprendre des simulations dans le domaine aéro-acoustique. Nos données IRM, toutefois, possèdent une précision suffisante pour se prêter à ce type d'expériences dans le futur. Adachi *et al.* (2005) et Nozaki (2005) ont obtenu des résultats qui incitent à revoir notre conception de la source de bruit des sibilantes que nous tirons de Shadle (1985) et Pastel (1987).

¹¹⁸ Nous n'avons pas examiné l'affiliation formant-cavité dans le spectre de bruit de [s] dans cette thèse, mais étant donné les dimensions du conduit vocal pour cette sibilante, le pic principal de [s] peut provenir soit de la cavité labiale, soit de la cavité orale antérieure, soit de la constriction.

¹¹⁹ Nous sommes à la recherche de critères objectifs permettant de décider quand une caractéristique articulatoire est *déterminante* (primaire) ou destinée à *renforcer* un contraste acoustique existant. Cette question est d'autant plus importante lorsque deux gestes articulatoires (l'un qualifié *déterminant*, et l'autre de *renforcement*) modifient un même et unique indice acoustique (ex. fréquence du pic principal). Car cette situation n'est autre qu'un cas de coordination inter-articulateurs. Penserait-on à dissocier le mouvement de la mandibule de celui de la langue dans la spécification articulatoire des voyelles ?

Conclusion

En effet, le spectre de la source de bruit de /s/ (japonais) calculé par Adachi *et al.* (2005) comportait des pics prononcés, au lieu d'une enveloppe plate. Ces propriétés peuvent être simplement un artéfact dû à une durée de simulation très brève (de l'ordre d'une dizaine de milliseconde) ; des études approfondies seraient donc nécessaires.

Quant à Nozaki (2005), il a obtenu un signal tout à fait typique pour un /s/ en simulant un flux d'air traversant la constriction dentale. Ces résultats remettent en cause le rôle des résonances dans le spectre de bruit (de /s/ du moins), puisqu'aucune cavité de résonance n'était modélisée dans cette expérience. La source de bruit pourrait donc avoir un rôle plus important qu'on ne le pense aujourd'hui, dans la détermination du spectre des sibilantes et dans les oppositions phonémiques. Si tel était effectivement le cas, la configuration articuloire pourrait chercher à satisfaire des contraintes d'ordre aéro-acoustique et acoustique à la fois. Il serait intéressant d'examiner si les variations articuloires observées peuvent être motivées par des propriétés aéro-acoustiques.

Cette thèse a également écarté la question de la perception des sibilantes. Or, nous avons noté que le spectre ne pouvait pas être décrit de manière satisfaisante seulement par la fréquence du pic majeur ou de son centre de gravité. Premièrement, il existe des contrastes de bruit qui se caractérisent par la présence/absence d'un formant ultra-bas (pas nécessairement très proéminent) comme /s/ - /ç/ en polonais. Deuxièmement, il existe deux zones fréquentielles qui différencient le bruit de /s/ et /ʃ/ en français et en anglais ; et il est vraisemblable que les locuteurs cherchent à optimiser ces deux indices par le biais de la protrusion labiale. Enfin, la seule caractéristique commune qui permettait de décrire le contraste [ʃ] – [ç] chez trois locuteurs allemands était l'aspect diffus/ compact du spectre des fricatives (et pas la différence d'intensité, ni la fréquence du pic), la sibilante étant plus diffuse en raison de son formant labial.

Nous pouvons alors nous demander à partir de quelle intensité un formant ultra-bas est perçu (/s/ polonais) ; à partir de quelle largeur de bande une fricative est reconnue comme stridente ; et dans quelle mesure la pente spectrale dans les hautes fréquences influe sur la perception d'un /s/. Cette question rejoint les incertitudes quant à la source de bruit de /s/ évoquées plus haut : y a-t-il une source de bruit spécifique pour /s/ ? Nous avons également constaté que les locuteurs pouvaient se baser sur la fréquence des formants vocaliques pour effectuer une normalisation du locuteur. S'il existe une littérature abondante sur ce sujet, en particulier dans le domaine de l'identification du locuteur, les mécanismes de normalisation consonne-voyelle ne sont pas encore bien connus.

Enfin, nous avons noté que les modalités de coarticulation différaient en fonction des langues. Plus précisément, les traits de lieu consonantiques sont portés à la fois par le bruit de friction et le timbre vocalique en chinois, tandis qu'en français, la voyelle /u/ modifie de manière importante le spectre de bruit de la sibilante qui la précède. Y aurait-il un effet de vase communicant entre les systèmes consonantiques (riche en chinois et pauvre en français, en ce qui concerne le sous-groupe des sibilantes) et vocalique (pauvre en chinois et riche en français) ? Si tel était le cas, la représentation phonologique devrait pouvoir rendre compte de l'interaction entre les traits vocaliques et consonantiques (en évitant l'écueil de paraphraser les réalités physiques).

BIBLIOGRAPHIE

- Abry, Christian et Louis-Jean Boë, 1986, « 'Laws' for lips », *Speech communication* 5, p. 97-104.
- Adachi, Seiji et Kiyoshi Honda, 2003 « CFD approach to fricative sound sources », *proc. 6th ISSP*, p. 1-6.
- Adachi, Seiji, Yosuke Tanabe et Kiyoshi Honda, 2005, « Numerical simulation of fricative sound sources », présentation invitée à la *Conference on turbulences*, ZAS, Berlin.
- Ali, Ahmed M. Abdelatty et Jan Van der Spiegel, 2001, « Acoustic-phonetic features for the automatic classification of fricatives », *Journal of the acoustical society of America* 109 (5), p. 2217-2235.
- Aron, M., M.-O. Berger, E. Kerrien, « Multimodal fusion of electromagnetic, ultrasound and MRI data for building an articulatory model », *proc. 8th ISSP*, Strasbourg, p. 349-352.
- Aydelott, Utman J. et S. E. Blumstein, 1994, « The influence of language on the acoustic properties of phonetic features: a study of the feature [strident] in Ewe and English », *Phonetica* 51 (4), p. 221-238.
- Badin, Pierre, 1989, « Acoustics of voiceless fricatives: production theory and data », *STL-QPSR* 30 (3), p. 33-55.
- Badin, Pierre, Kunitoshi Motoki, Nobuhiro Miki, Diane Ritterhaus et Med-Tahar Lallouache, 1994, « Some geometric and acoustic properties of the lip horn », *Journal of the Acoustical Society of Japan (E)* 15, 4 ; p. 243-253.
- Badin, Pierre, 1991, « Fricative consonants: acoustic and X-ray measurements », *Journal of Phonetics* 19, p. 397-408.
- Badin, Pierre, Denis Beautemps, Rafael Laboissière et Jean-luc Schwarz, 1995, « Recovery of vocal tract geometry from formants for vowel and fricative consonants using a midsagittal-to-area function conversion model », *Journal of phonetics* 23, p. 221-229.
- Badin, Pierre, Pascal Perrier, Louis-Jean Boë, et Christian Abry, 1990, « Vocalic nomograms: acoustic and articulatory considerations upon formant convergences », *Journal of the Acoustical Society of America* 87(3), p. 1290-1300.
- Basset, P., A. Amelot, J. Vaissière et B. Roubeau, 2001, « Nasal airflow in French spontaneous speech », *Journal of the international phonetic association* 31 (1), p. 87-100.

Bibliographie

- Benoît, C., C. Abry et L.-J. Boë, 1991, « The effects of context on labiality in French », *Proc. 2nd Eurospeech Conference*, Genes, Italie, vol. 1, p. 153-156.
- Behrens, Susan et Sheila E. Blumstein, 1988, « On the role of the amplitude of the fricative noise in the perception of place of articulation in voiceless fricative consonants », *Journal of the Acoustical Society of America* 84 (3), p. 861-867.
- Blevins, Juliette, 1995, « The syllable in phonological theory ». John A. Goldsmith, *The handbook of phonological theory*, Cambridge (MA) et Oxford : Blackwell, p. 206-244.
- Bloomstein, Sheila E. et Kenneth N. Stevens, 1979, « Acoustic invariance in speech production: evidence from measurements of the spectral characteristics of stop consonants », *Journal of the Acoustical Society of America* 66(4), p. 1001-1017.
- Boothroyd, Arthur et Larry Medwetsky, 1992, « Spectral distribution of /s/ and the frequency response of hearing aids », *Ear and hearing* vol 13, no. 3, p. 150-157.
- Catford, J. C., 1988 (2001), *A practical introduction to phonetics*, Oxford et New York : Oxford University Press.
- Chi, X., et Sonderegger, M. (2007). « Subglottal coupling and its influence on vowel formants » *Journal of the Acoustical Society of America* 122, p. 1735-1745.
- Cho, Taehong, Sun-Ah Jun et Peter Ladefoged, 2002, « Acoustic and aerodynamic correlates of Korean stops and fricatives », *Journal of Phonetics* 30, p. 193-228.
- Chomsky, Noam et Morris Halle, 1968, *Sound patterns of English*, New York : Harper & Row.
- Christensen, John M., Samuel G. Fletcher et Martin J. McCutcheon, 1992, « Esophageal speaker articulation of /s, z/: a dynamic palatometric assessment », *Journal of communication disorders* 25-1, p. 65-76.
- Clements, G. N., 2003, « Feature economy in sound systems » *Phonology* 20-3, p.287-333.
- Crothers, John, 1958, « Typology and universals of vowel systems », dans J. H. Greenberg, C. A. Ferguson et E. A. Moravcsik (dir.) : *Universals of human language. Vol 2: phonology*, p. 93-152.
- Dang, Jianwu et Kiyoshi Honda, 1996, « An improved vocal tract model of vowel production implementing piriform resonance and transvelar nasal coupling », *proc. 4th ICSLP*, p. 965-968.
- Dang, Jianwu et Kiyoshi Honda, 1997, « Acoustic characteristics of the piriform fossa in models and humans », *Journal of the Acoustical Society of America* 101 (1), p. 456-465.

Bibliographie

Dart, Sarah, 1998, « Comparing French and English coronal consonant articulation » *Journal of Phonetics* 26, p. 71-94.

Demolin, Didier, Sergio Hassid, Thierry Metens et Alain Soquet, 2002, « Real-time MRI and articulatory coordination in speech », *Comptes rendus biologiques* 325, p.547-556.

Diehl, R.L., B. Lindblom et C. P.Creeger, 2003, « Increasing realism of auditory representations yields further insights into vowel phonetics », Proc. of the XVth ICPhS, Barcelone, p. 1381-1384.

Disner, Sandra F., 1984, « Insights on vowel spacing ». I. Maddieson (dir.) *Patterns of sounds*, Cambridge : Cambridge University Press, p. 123 - 155.

Engwall, Olov, 2000, « Are static MRI representative of dynamic speech? Results from a comparative study using MRI, EPG, and EMA », Proc. 6th ICSLP, Pékin, p. 17-20.

Engwall, Olov, 2003, « A revisit to the application of MRI to the analysis of speech production – testing our assumptions », Proc. 6th ISSP, Sydney, p. 43-48.

Evers, Vincent, Henning Reetz et Aditi Lahiri, 1998, « Crosslinguistic acoustic categorization of sibilants independent of phonological status », *Journal of phonetics* 26, p. 345-370.

Fant, Gunnar, 1960 (1970), *Acoustic theory of speech production*, La Hague : Mouton.

Fant, Gunnar, 1983 « Feature analysis of Swedish vowels – a revisit », *STL-QPSR* 24 (2-3), p. 1-19.

Flanagan, James L., 1972, *Speech analysis, synthesis and perception*, Heidelberg et New-York : Springer Verlag.

Flege, James Emil, 1989, « Differences in inventory size affect the location but not the precision of tongue positioning in vowel production », *Language and Speech* 32 (2), p. 123-147.

Flege, James Emil, Samuel G. Fletcher, et Abdullah Homiedan, 1988, « Compensating for a bite-block in /s/ and /t/ productio : palatographic, acoustic and perceptual data », *Journal of the Acoustical Society of America* 83 (1), p. 212-228.

Fletcher, Samuel G., 1989, « Palatometric specifications of stop, affricate and sibilant sounds », *Journal of speech and hearing research* Vol 32, p.736-748.

Fletcher, Samuel G. et Dennis G. Newman, 1991, « [s] and [ʃ] as a function of linguapalatal contact place and sibilant groove width », *Journal of the Acoustical Society of America* 89 (2), p. 850-858.

Forrest, Karen, Gary Weismer, Paul Milenkovic et Ronald N. Dougall, 1988, « Statistical

Bibliographie

analysis of word-initial voiceless obstruents: preliminary data », *Journal of the Acoustical Society of America* 84 (1), p.115-123.

Gerfen, C., 2001, « Nasalized fricatives in Coatzopan Mixtec », *Int. J. Am. Ling* 67, p. 449-466.

Gordon, Matthew, Paul Bartmaier et Kathy Sands, 2002, « A cross-linguistic acoustic study of voiceless fricatives », *Journal of the International Phonetic Association* n. 32, p. 141-171.

Halle, Morris and Kenneth N. Stevens, 1997 (réédition), « The postalveolar fricatives of Polish », dans S. Kiritani, H. Hirose and H. Fujisaki (dir.) *Speech production and language: in honor of Osamu Fujimura*. Berlin: Mouton de Gruyter, p. 177-193. Initialement dans *Speech communication group working papers 7*, Research Laboratory of Electronics, MIT, 1991: p. 77-94.

Hashi, Michiko et Kiyoshi Honda, 2000, « X線マイクロビームによる歯音、歯茎音、後部歯茎音における舌形状の分析 (Variability in tongue posture in the production of dental, alveolar, and post-alveolar consonants: a cross-linguistic study) », 日本音響学会講演論文集 (actes de conférence de la société d'acoustique japonaise), p. 281-282.

Harris, Katherine, 1958, « Cues for the discrimination of American English fricatives in spoken syllables », *Language and speech* vol. 1, p.1-7.

Hedrick, Mark S. et Ralph N. Ohde, 1993, « Effect of relative amplitude of frication on perception of place of articulation », *Journal of the Acoustical Society of America* 94 (4), p. 2005-2026.

Heinz et Stevens, 1961 « On the properties of fricative consonants », *Journal of the Acoustical Society of America* 33, p. 589-596.

Hixon, T., 1966, « Turbulent noise sources for speech », *Folia phoniatrica* 18, p. 168-182.

Honda, Kiyoshi, et Sayoko Takano, 2006, « Facteurs physiologiques et acoustiques impliqués dans la transition de /i/ à /a/ », présentation invitée à la conférence *bases phonétiques des traits distinctifs*, Paris.

Honda, K., T. Kurita, Y. Kakita et S. Maeda, 1995 « Physiology of the lips and modeling of lip gesture », *Journal of Phonetics*, 23, p. 243-254.

Honda, K., S. Maeda, M. Hashi, J. S. Dembowski et J. R. Westbury, 1996, « Human palate and related structures: their articulatory consequences », *proc. ICSLP* p. 784-787.

Howe, M. S. et R. S. McGowan, 2005, « Aeroacoustics of [s] », *Proc. R. Soc. A* 561, p. 1005-1029.

Bibliographie

Hughes, George H. and Morris Halle, 1956, « Spectral properties of fricative consonants », *Journal of the Acoustical Society of America* vol. 28, p. 303-310.

International Phonetic Association (ed.), 1999, *Handbook of the International Phonetic Association: A guide to the usage of the International Phonetic Alphabet*. Cambridge: Cambridge University Press.

Jackson, Michel T.-T., Carol Espy-Wilson and Susanne E. Boyce, 2001, « Verifying a vocal tract model with a closed side-branch », *Journal of the Acoustical Society of America* 109 (6), p. 2983–2987.

Jakobson, Roman, Gunnar Fant et Morris Halle, 1952, *Preliminaries to speech analysis : the distinctive features and their correlates*, Cambridge (USA) : MIT.

Jassem, W., 1979, « Classification of fricative spectra using statistical discriminant functions », dans B. Lindblom et S. Öhman, *Frontiers of speech communication research*, Londres, New York et San Francisco : Academic Press, p. 77-91.

Jassem, Wiktor., 1995, « The acoustic parameters of Polish voiceless fricatives: an analysis of variance », *Phonetica* 52, p. 251-258.

Jespersen, Otto, 1904, *Lehrbuch der phonetik*, Leipzig et Berlin : B.G. Teubner.

Johnson, Keith, 1991, « Differential effect of speaker and vowel variability on speech perception », *Language and speech* 34, p. 265-279.

Jongman, Allard, Ratreë Wayland, et Serena Wong, 2000, « Acoustic characteristics of English fricatives », *Journal of the Acoustical Society of America* 108 (3), p.1252-1263.

Kakita, Yuki, Osamu Fujimura et Kiyoshi Honda, 1985, « Computation of mapping from muscular contraction patterns to formant patterns in vowel space », dans Fromkin : *Phonetic linguistics*, p. 133-144.

Keating, Patricia, 1991 « Coronal places of articulation », dans *Phonetics and phonology, volume 2. The special status of coronals*. Academic press, p. 29-48.

Keyser, Samuel Jay et Kenneth N. Stevens, 2001, « Enhancement revisited », dans Michael Kenstowicz : *Ken Hale, a life in language*, Cambridge, MA et Londres : MIT Press, p. 271-291.

Kewley-Port, 1983, « Time-varying features as correlates of place of articulation in stop consonants », *Journal of the Acoustical Society of America* 73, p. 322-335.

Kitamura, T., H. Takemoto et K. Honda, 2008, « Acoustic characteristics of solid vocal tracts modeled from ATR MRI database of Japanese vowel production », Poster présenté à *Acoustics 08* (ASA SFA joint meeting), Paris.

Kitamura, Tatsuya, Hironori Takemoto, Kiyoshi Honda, Yasuhiro Shimada, Ichiro

Bibliographie

- Fujimoto, Yuko Syakudo, Shinobu Masaki, Kagayaki Kuroda, Noboru Oku-uchi et Michio Senda, 2005, « Difference in vocal tract shape between upright and supine postures: Observations by an open-type MRI scanner », *Acoust. Sci and Techn.* 26 (5), p. 465-468.
- Kim, Hyunsoon, Kiyoshi Honda, et Shinji Maeda, 2005, « Stroboscopic cine-MRI study on the phasing between the tongue and the larynx in Korean three-way phonation contrast », *Journal of Phonetics* 33, p. 1-26.
- Kurowski, Kathleen et Sheila E. Blumstein, 1984, « Perceptual integration of the murmur and formant transitions for place of articulation in nasal consonants », *Journal of the Acoustical Society of America* 76, p. 383-390.
- Ladefoged, Peter et Peri Bhaskararao, 1983, « Non-quantal aspects of consonant production: a study of retroflex consonants », *Journal of phonetics* 11, p. 291-302.
- Ladefoged, P. and I. Maddieson, 1996, *The Sounds of the World's Languages*, Blackwell.
- Ladefoged, P. et Z. Wu, 1984, « Places of articulation: an investigation of Pekingese fricatives and affricates », *Journal of Phonetics* 12, p. 267-278.
- Lee, Sook-hyang, Mary E. Beckman and Michel Jackson, 1994, « Jaw target for strident fricatives », *Proc. ICSLP*, Yokohama, p. 37-40.
- Liljencrants, J. et Björn. Lindblom, 1972, « Numerical simulation of vowel quality systems ». *Language* 48, p. 839-862.
- Lindblom, Björn, 1983, « Economy of speech gestures ». Dans MacNeilage P.F. (ed.) *The Production of Speech*, Springer, New York, 217-245.
- Lindblom, Björn, 1986, « Phonetic universals in vowel systems ». John J. Ohala et Jeri J. Jaeger (eds) : *Experimental phonology*, Orlando et Londres : Academic Press, 13-44.
- Lindblom, B. et I. Maddieson, 1988. « Phonetic universals in consonant systems », dans L.M. Hyman et C.N. Li (dir.), *Language, speech and mind. Studies in honour of Victoria A. Fromkin.*, Londres: Routledge, p. 62-78.
- Lisker, Leigh, 2001, « Hearing the Polish sibilants [s ś š]: phonetic and auditory judgements », *Travaux du cercle linguistique de Copenhague* vol. XXXI (Nina Grønnum et Jørgen Rischel, dir.), Copenhague : C. A. Reitzel.
- Maddieson, Ian (dir.), 1984, *Patterns of sounds*, Cambridge : Cambridge University Press.
- Maddieson, Ian et Kristin Precoda , 1989, « Updating UPSID », *UCLA working papers in phonetics* 74, p. 104-111.

Bibliographie

- Maeda, Shinji, 1978, « Une analyse statistique sur les positions de la langue : étude préliminaire sur les voyelles françaises », *9^{èmes} Journées d'étude sur la parole*, G.A.L.F, p. 191-195.
- Maeda, Shinji, 1979, « An articulatory model of the tongue based on a statistical analysis », *Speech communication papers*, 97^{ème} congrès ASA.
- Maeda, Shinji, 1982, « A digital simulation method of the vocal-tract system », *Speech communication* 1, p. 199-229.
- Maeda, Shinji, 1996, « Phonemes as concatenable units: VCV synthesis using a vocal-tract synthesizer », *Sound patterns of connected speech. Description, models and explanation (actes du symposium à l'université de Kiel)*, p. 145-164.
- Maeda, S., M. Toda, A. J. Carlen and L. Meftahi, 2002, « Functional modeling of face movements during speech », *proc. 7th ICSLP*, p. 1529-1532.
- Manrique, Ana Maria Borzone de, et Maria Ignacia Massone, 1981, « Acoustic analysis and perception of Spanish fricative consonants », *Journal of the Acoustical Society of America* 69 (4), p. 1145-1153.
- Matthies, Melanie L., Mario Svirsky, Joseph Perkell et Harlan Lane, 1996, « Acoustic and articulatory measures of sibilant production with and without auditory feedback from a cochlear implant », *Journal of speech and hearing research* vol. 39, p. 936-946.
- Mester, A., Ito, J. 2006. Systemic markedness and faithfulness. *CLS* 39 ([Http://people.uscd.edu/~ito/pages/pubs.html](http://people.uscd.edu/~ito/pages/pubs.html)).
- Mooshammer, Christina, Philip Hoole and Anja Geumann, 2007, « Jaw and order », *Language and Speech* vol. 50, no. 2, p. 145-176.
- Mrayati, M, R. Carré et B. Guérin, 1988, « Distinctive regions and modes: a new theory of speech production », *Speech Communication* 7, p. 257-286.
- Narayanan, Shrikanth and Abeer Alwan, 2000 « Noise source models for fricative consonants », *IEEE transactions on speech and audio processing* vol. 8, no. 2, p. 328-344.
- Narayanan, Shrikanth S., Abeer A. Alwan et Katherine Haker, 1995, « An articulatory study of fricative consonants using magnetic resonance imaging », *Journal of the Acoustical Society of America* 98 (3), p. 1325-1347.
- Narayanan, Shrikanth, Krishna Nayak, Sungbok Lee, Abhinav Sethy et Dani Byrd, 2004 « An approach to real-time magnetic resonance imaging for speech production », *Journal of the Acoustical Society of America* 115 (4), p. 1771-1776.
- Newman, Rochelle, 2003, « Using links between speech perception and speech production to evaluate different acoustic metrics: a preliminary report », *Journal of the*

Bibliographie

Acoustical Society of America 113 (5), p. 2850-2860.

Nguyen, Noël, Philip Hoole et Alain Marchal, 1994, « Regenerating the spectral shapes of [s] and [ʃ] from a limited set of articulatory parameters », *Journal of the Acoustical Society of America* 96 (1), p. 33-39.

Nissen, Shawn L. et Robert Allen Fox, 2005, « Acoustic and spectral characteristics of young children's fricative productions: a developmental perspective », *Journal of the Acoustical Society of America* 118 (4), p. 2570-2578.

Nowak, Paweł M., 2006, « The role of vowel transitions and frication noise in the perception of Polish sibilants », *Journal of phonetics* 34, p. 139-152.

Nozaki, Kazunori, 2005, « Numerical simulations of the sibilant [s] », présenté à la *Conference on turbulences*, ZAS, Berlin.

Ohala, John. J., 1979, « Moderator's introduction to symposium on phonetic universals in phonological systems and their explanation », *Proc. ICPHS*, vol. 3, pp. 181-185.

Ohala, Jonh, 1994, « Speech aerodynamics », dans R. E. Asher et J. M. Y. Simpson (dir.), *The encyclopedia of language and linguistics*, Oxford : Pergamon, p. 4144-4148.

Okada, H, 1999, « Japanese » dans IPA (dir.) *Handbook of the International Phonetic Association: A guide to the usage of .the International Phonetic Alphabet*. Cambridge: Cambridge University Press, 117-119.

Parker, Steve, « Sound level protrusions as physical correlates of sonority », *Journal of phonetics* 36 (1), p. 55-90.

Pastel, Leah M. P., 1987, *Turbulent noise sources in vocal tract models*, M.S. dissertation. Massachusetts Institute of Technology.

Perkell, J. S., S. E. Boyce et K. N. Stevens, 1979, « Articulatory and acoustic correlates of the [s – ʃ] distinction » dans J. J. Wolf et D. H. Klatt (dir.) *Speech Communication Papers presented at the 97th meeting of the Acoustical Society of America*. New York : American Institute of Physics, p. 109-113.

Perkell, Joseph S., Melanie L. Matthies, Mark Tiede, Harlan Lane, Majid Zandipour, Nicole Marrone, Ellen Stockmann, et Frank H. Guenther, 2004, « The distinctness of speaker's /s/ - /ʃ/ contrast is related to their auditory discrimination and use of an articulatory saturation effect », *Journal of speech, language, and hearing research* vol. 47, p. 1259-1269.

Perrier, Pascal, Louis-Jean Boë et Rudolph Sock, 1992, « Vocal tract area function estimation from midsagittal dimensions with CT scans and a vocal tract cast: modeling the transition with two sets of coefficients », *Journal of speech, language and hearing research* Vol. 35, p.53-67.

Bibliographie

Peterson, G. E. et H. L. Barney, 1952, « Control methods used in a study of the vowels », *Journal of the Acoustical Society of America* 24, p. 175-184.

Rialland, Annie, 2003, « A New Perspective on Silbo Gomero ». *Proc. 15th ICPHS*, Barcelone, p. 2131-2134.

Schwartz, Jean-Luc, Louis-Jean Boë, Nathalie Vallée et Christian Abry, 1997a, « Major trends in vowel system inventories ». *Journal of Phonetics* 25, p. 233-253.

Schwartz, Jean-Luc, Louis-Jean Boë, Nathalie Vallée et Christian Abry, 1997b, « The dispersion-focalization theory of vowel systems ». *Journal of Phonetics* 25, p. 255-286.

Scully, C., 1979, « Model prediction and real speech: fricative dynamics », dans B. Lindblom et S. Öhman, *Frontiers of speech communication research*, Londres, New York et San Francisco : Academic Press.

Shadle, Christine H., 1985, *The Acoustics of Fricative Consonants*, Thèse de doctorat, M.I.T.

Shadle, Christine H., 1990, « Articulatory-acoustic relationships in fricative consonants » dans W. J. Hardcastle et A. Marchal (dir.) : *Speech production and speech modelling*, Kluwer Academic Publishers, p. 187-209.

Shadle, Christine H., 1991, « The effect of geometry on source mechanisms of fricative consonants » *Journal of phonetics* 19, p. 409-424.

Shadle, Christine H. et Celia Scully, 1995, « An articulatory-acoustic-aerodynamic analysis of [s] in VCV sequences », *Journal of phonetics* 23 : p. 53-66.

Shosted, Ryan K., 2007, « Investigating the aerodynamics of nasalized fricatives », *proc. XVIth ICPHS*, Saarbrücken, p. 255-258.

Sobotta, Johannes, 2000, *Atlas d'anatomie humaine ; tome 1, tête, cou, membre supérieur*, coordonné par R. Putz et R. Bapst, avec la collaboration de Renate Putz. 4^{ème} édition française, traduit de l'allemand (*Atlas der Anatomie des Menschen*, 21^{ème} édition).

Steriade, Donca, 1995, « Underspecification and markedness » dans John A. Goldsmith : *The handbook of phonological theory*, Cambridge (MA) et Oxford : Blackwell, p. 114-174.

Stevens, K. N. , 1972 « The quantal nature of speech: evidence from articulatory-acoustic data », dans E. E. David et P. B. Denes, *Human communication: a unified view*, p. 51-66.

Stevens, K.N., 1985, « Evidence for the role of acoustic boundaries in the perception of speech sounds. » , dans Victoria A. Fromkin (dir.), *Phonetic Linguistics: Essays in Honor of Peter Ladefoged*, Orlando: Academic Press, p. 243-255.

Stevens, Kenneth N., 1998, *Acoustic phonetics*. Cambridge (MA) et Londres : MIT press.

Bibliographie

- Stevens, Kenneth N., Zhiqiang Li, Chao-Yang Lee and Samuel Keyser, 2004, « A note on Mandarin fricatives and enhancement », dans G. Fant, H. Fujisaki, J. Cao and Y. Xu (dir.), *Foreign language teaching and research press*, Pékin, 393–403.
- Stevens, Kenneth N. et Jay Keyser, 1989, « Primary Features and their Enhancement in Consonants », *Language* 65 (1), p. 81-106.
- Stone, Maureen, E. Davis, A. Douglas, M. Ness Aiver, R. Gullapalli, W. Levine et A. Lundberg, 2001, « Modeling the motion of the internal tongue from tagged cine-MRI images », *Journal of the Acoustical Society of America* 109, p. 2974-2982.
- Stone, Maureen, Alice Faber, Lawrence J. Raphael et Thomas H. Shawker, 1992, « Cross-sectional tongue shape and linguopalatal contact patterns in [s], [ʃ], and [l] », *Journal of phonetics* 20, p. 253-270.
- Stone, M., G. Stock, K. Bunin, K. Kumar, M. Epstein, C. Kambhamettu, M. Li, V. Parthasarathy et J. Prince, 2007, « Comparison of speech production in upright and supine position », *Journal of the Acoustical Society of America*, 122 (1), p. 532-541.
- Su, Tzu-Ting, 2003, *Etude sur la disparition des phonèmes en français et en mandarin de Taïwan*, thèse de doctorat, Université Paris III – Sorbonne Nouvelle.
- Tabain, Marija, 2001, « Variability in fricative production and spectra: implications for the hyper- and hypo- and quantal theories of speech production », *Language and speech* 44 (1), p. 57-94.
- Takano, Sayoko, Kiyoshi Honda, Shinobu Masaki, Yasuhiro Shimada et Ichiro Fujimoto, 2003, « High-resolution imaging of vocal tract gesture using a laryngeal MRI coil and a synchronized imaging method with external triggering », *Proc. spring meeting, Acoustical Society of Japan*, p. 291-292.
- Takemoto, Hironori, Kiyoshi Honda, Shinobu Masaki, Yasuhiro Shimada and Ichiro Fujimoto, 2003, « Measurements of temporal changes in vocal tract area function during a continuous vowel sequence using a 3D cine-MRI technique », *Proc. 6th ISSP*, p. 284-289.
- Takemoto, Hironori, Tatsuya Kitamura, Hironori Nishimoto et Kiyoshi Honda, 2004, « A method of tooth superimposition of MRI data for accurate measurement of vocal tract shape and dimensions », *Acoustic science and technology* 25, p. 468-474.
- Tiede, M., S. Masaki, et E. Vatikiotis-Bateson, 2000, « Contrasts in speech articulation observed in sitting and supine conditions », *Proc. 5th speech production seminar*, p. 25-28.
- Toda, Martine, 2001, *Coarticulation labiale et mandibulaire – modélisation paramétrique pour une animation 3D réaliste*, mémoire de DEA, Université Paris III.
- Toda, Martine, 2005a, « Effect of palate shape on the spectral characteristics of coronal

Bibliographie

- fricatives », présenté à la *Conference on turbulences*, ZAS, Berlin.
- Toda, Martine, 2005b, «Language-specific control of the articulation for /s/ », présenté à la *Conference on turbulences*, ZAS, Berlin.
- Toda, Martine, 2006, « Deux stratégies articulatoires mises en œuvre dans le contraste /s/ - /ʃ/ en français », poster présenté aux *IIVIèmes Journées d'Étude sur la Parole*, Dinard, p. 65-68. <http://www.cavi.univ-paris3.fr/ilpga/ed/student/stmt/>.
- Toda, Martine, 2007, « Speaker normalization of fricative noise: considerations on language-specific contrasts », *proc. ICPhS*, Saarbrücken, Allemagne, p. 825-828.
- Toda, M. et K. Honda, 2003, «An MRI-based cross-linguistic study of sibilant fricatives », *Proc. 6th ISSP*, Sydney, Australie.
- Toda, M. et S. Maeda, 2006, « Quantal aspects of non anterior sibilant fricatives: a simulation study », *Proc 7th ISSP*, Ubatuba, SP, Brésil, p. 573-580.
- Toda, M., S. Maeda, Michaël Aron et Marie-Odile Berger, 2008, « Modeling subject-specific formant transition patterns in /aʃa/ sequences », *proc. 8th ISSP*, Strasbourg, p. 357-360.
- Toda, M., S. Maeda et K. Honda, accepté, « Formant-cavity affiliation in sibilant fricatives », à paraître dans Fuchs, Zygis et Toda : *phonetics and phonology of obstruents*.
- Toda, M., S. Maeda, A. J. Carlen, and L. Meftahi, 2002a, « Dissociation de la protrusion et de l'arrondissement dans la production des consonnes labialisées de l'anglais », actes des *24èmes Journées d'Étude sur la Parole*, Nancy.
- Toda, M., S. Maeda, A. J. Carlen et L. Meftahi, 2002b, « Lip gestures in English sibilants: articulatory-acoustic relationship », *proc. 7th ICSLP*, 2165-2168.
- Trautmüller H., 1990, « Analytical expressions for the tonotopic sensory scale », *Journal of the Acoustical Society of America* 88, p. 97-100.
- Wu, Ke, et D. G. Childers, 1991, « Gender recognition from speech. Part I: Coarse analysis », *Journal of the Acoustical Society of America* 90 (4), p. 1828-1840.
- Zygis, Marzena et Silke Hamann, 2003, « Perceptual and acoustic cues of Polish coronal fricatives », *Proc. 15th ICPhS*, Barcelone, 395-398.

ANNEXE I. INVENTAIRE DES FRICATIVES SIBILANTES

La base de données UPSID (UCLA Phonological Segment Inventory Database, Maddieson et Precoda, 1989, mise à jour en 1993) est une base de données de l'inventaire des phonèmes dans 451 langues du monde.

Cette base de données possède des limites. Bien que conçue de façon à être représentative des quelques 3000 ou 6000 langues du monde, on peut bien sûr s'interroger sur sa valeur représentative. Le nombre de langues contenues dans cette base est-il proportionnel au nombre de langues qui existent dans chaque groupe linguistique ? La réponse n'est pas facile à donner, d'autant plus qu'il n'est pas aisé d'estimer le nombre de langues, du fait qu'il n'existe pas de critères objectifs sûrs pour trancher entre « deux variantes d'une même langue » ou « deux langues différentes mais apparentées ».

Un autre point faible relève du codage phonologique, qui demande une analyse phonologique, et qui peut faire l'objet de choix parfois subjectifs. Par exemple, comment coder un phonème lorsqu'il présente des variantes positionnelles comme l'alvéolo-palatale du russe, qui est une affriquée pré-fricativisée en début de mot et fricative dans les autres positions, ou les occlusives *lenis* du coréen, considérées comme sourdes, mais qui se réalisent voisées en position intervocalique. Ceci est d'autant plus sensible que la plupart des informations relayées dans cette base sont de deuxième main.

En rapport avec cette difficulté, on peut aussi critiquer l'hétérogénéité possible du codage. Par exemple, il y a la possibilité de coder deux variantes de [s] comme l'une « ant » et l'autre « ant ; palzd », ou encore l'une « alv » et l'autre « dent ». Mais aucune langue, en tout cas contenue dans cette base, comme il apparaît dans notre dépouillement, ne présente de contraste entre trois variantes du [s] « ant » / « ant ; palzd » / « dent ». Bien qu'il ne soit donc pas très pertinent d'offrir ce large choix de codage, il est probablement difficile de forcer à une uniformité en regroupant certaines catégories, car il existe un besoin de cohérence avec le reste du système phonologique, et surtout, l'équivalence articulatoire ou acoustique de ces alternatives de codage, utilisées pour des langues différentes, n'a pas été démontrée.

Toutefois, afin d'être en mesure de déterminer quel type de contraste est pertinent dans un inventaire, nous avons utilisé des super-catégories regroupant plusieurs types de sibilantes. En particulier, il nous a semblé que le contraste de lieu d'articulation antérieur/postérieur était un trait particulièrement prisé dans les langues du monde. Toutefois, bien qu'il n'existe pas de sibilante dentale (« dent ») contrastive dans une langue, une sibilante antérieure peut être codée comme dentale ou alvéolaire (« unspdent ») ou encore alvéolaire (« alv ») en fonction de la langue. Pour faire un décompte portant sur les lieux antérieur et postérieur, nous avons donc regroupé toutes les étiquettes liées à un lieu antérieur (« dent », « alv » et « unspdent ») non contrastives entre elles à l'intérieur d'une langue sous la super-catégorie « ANT ». De même, toutes les étiquettes ayant trait à un lieu non antérieur (palato-alvéolaire « pal_al », palatale « pal », rétroflexe « ret ») non contrastives entre elles ont été regroupées sous la super-catégorie « POST ».

Tendances majeures

Sur les 397 langues qui possèdent des sibilantes (étiquette « sib » ; toutes ces langues possèdent au moins une sibilante *sourde*), 286 possèdent 1 ou 2 sibilantes et 89 en possèdent 3 ou 4. A l'intérieur des fricatives sibilantes, les traits de lieu (antérieur ~ postérieur) et de voisement sont les plus impliqués dans le contraste (**Figure 100**). Lorsque l'inventaire ne comporte qu'une seule sibilante, ce phonème est toujours sourd (« vl »), et il est antérieur (« ANT ») dans la majorité des cas (131 langues sur 147). Lorsqu'il y a deux sibilantes (139 langues), le contraste porte sur le lieu antérieur vs. postérieur dans la majorité (ex. « dent » / « pal_al ») mais le voisement est également impliqué dans le contraste dans plus d'un tiers de ces langues (53). Lorsque l'inventaire comporte trois sibilantes, le voisement est en partie remplacé par un contraste de trois lieux d'articulation distincts (**Figure 101**). Lorsqu'il y a quatre sibilantes ou plus dans l'inventaire, presque toutes les langues utilisent le contraste de voisement. Dans ces langues où l'inventaire est grand, la proportion des articulations secondaires ou doubles articulations, des traits laryngaux (aspiration, préaspiration, laryngalisation), de mode (éjectives, nasalisation) et de durée devient plus importante (**Figure 102** à **Figure 104**).

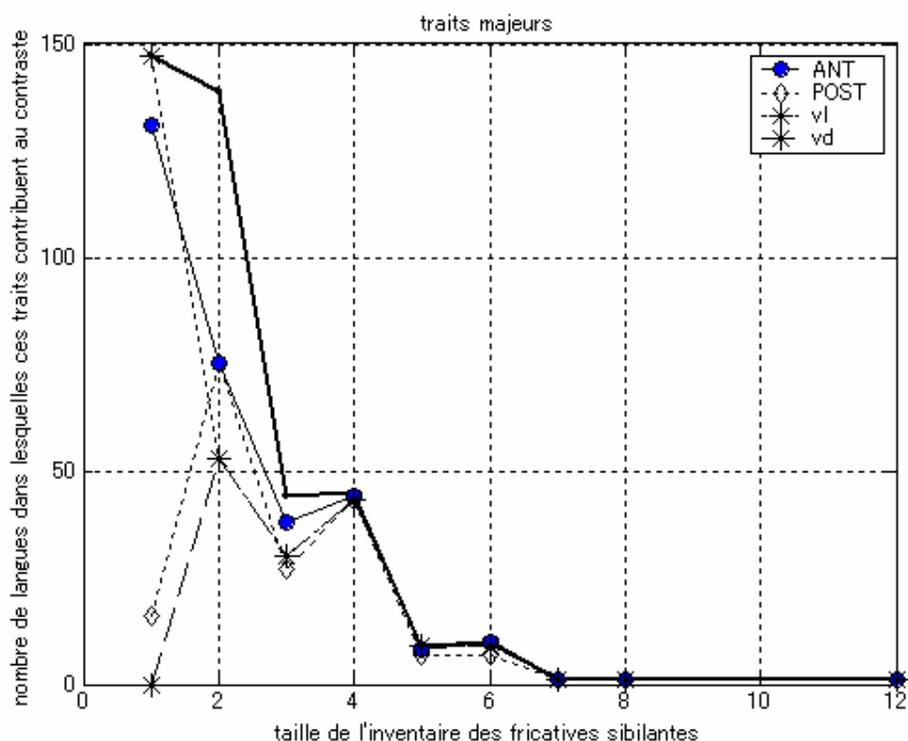


Figure 100. Nombre d'occurrences des traits distinctifs (sauf lorsque la taille de l'inventaire est égale à 1 ; dans ce cas les traits ne sont pas nécessairement distinctifs) les plus utilisés (lieux génériques et voisement) en fonction de la taille de l'inventaire des fricatives sibilantes (sourdes et sonores confondues) d'après la base de données UPSID. La courbe foncée représente le nombre

total de langues pour chaque taille de l'inventaire. Pour toutes les langues, lorsqu'il n'existait pas de contraste entre deux lieux antérieurs (parmi « unspdent », « dent » et « alv »), nous avons remplacé le trait de lieu original par un trait générique d'antériorité que nous avons nommé « ANT ». De même, lorsqu'il n'existait pas de contraste entre deux lieux postérieurs (parmi « pal_al », « ret » et « pal »), nous avons remplacé le trait de lieu original par un trait générique de postériorité que nous avons nommé « POST ». Les traits de lieux distinctifs, beaucoup moins fréquents, sont représentés dans la Figure 101.

La Figure 101 indique le nombre d'occurrences des autres traits de lieu impliqués dans un contraste à l'intérieur des lieux antérieurs ou à l'intérieur des lieux postérieurs. Nous observons que les traits postérieurs de lieu (« pal_al », « ret » et « pal ») occupent une place non négligeable dans les inventaires à trois sibilantes, tandis que le trait de voisement est proportionnellement peu utilisé dans cette taille d'inventaire (Figure 100).

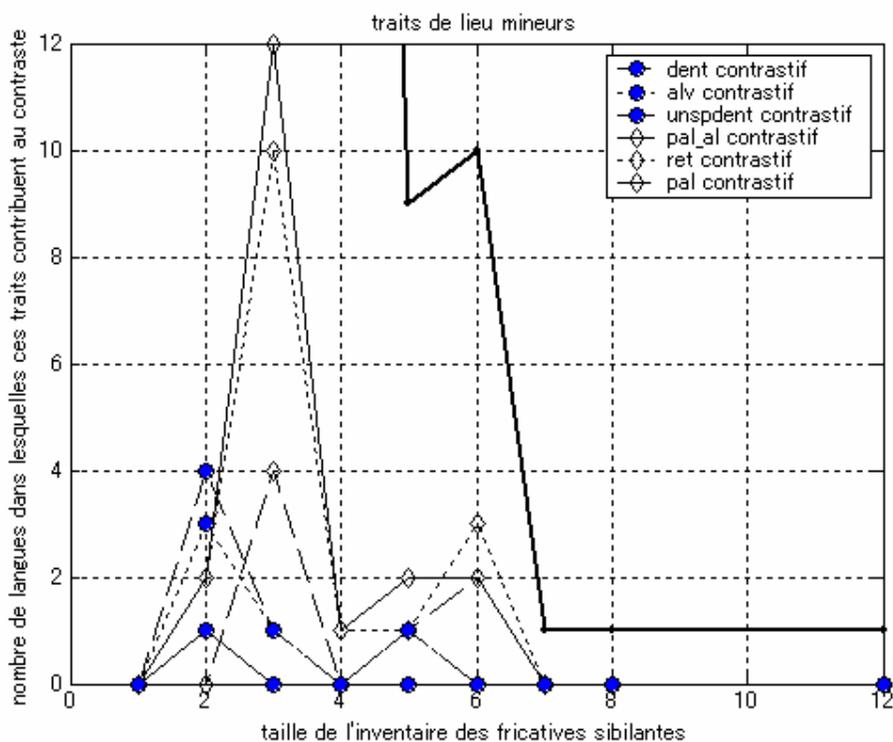


Figure 101. Nombre d'occurrences des traits distinctifs mineurs (ceux qui sont les moins utilisés) de lieu en fonction de la taille de l'inventaire des sibilantes. Les traits de lieu « dent », « alv », « unspdent », « pal_al », « ret » et « pal », qui sont représentés dans cette figure, sont toujours distinctifs (ex. le trait « dent » s'oppose à un autre trait de lieu antérieur, « alv »). Lorsque la distinction à l'intérieur des lieux antérieurs et postérieurs n'était pas distinctive, nous avons remplacé ces traits par les traits génériques de lieu « ANT » et « POST »,

respectivement (illustrés en Figure 100). La ligne épaisse représente le nombre total de langues en fonction de la taille de l'inventaire de sibilantes.

Tendances mineures

Les traits de lieu secondaires (forme de la langue ou labialisation) ne sont impliqués dans le contraste que de manière anecdotique (Figure 102).

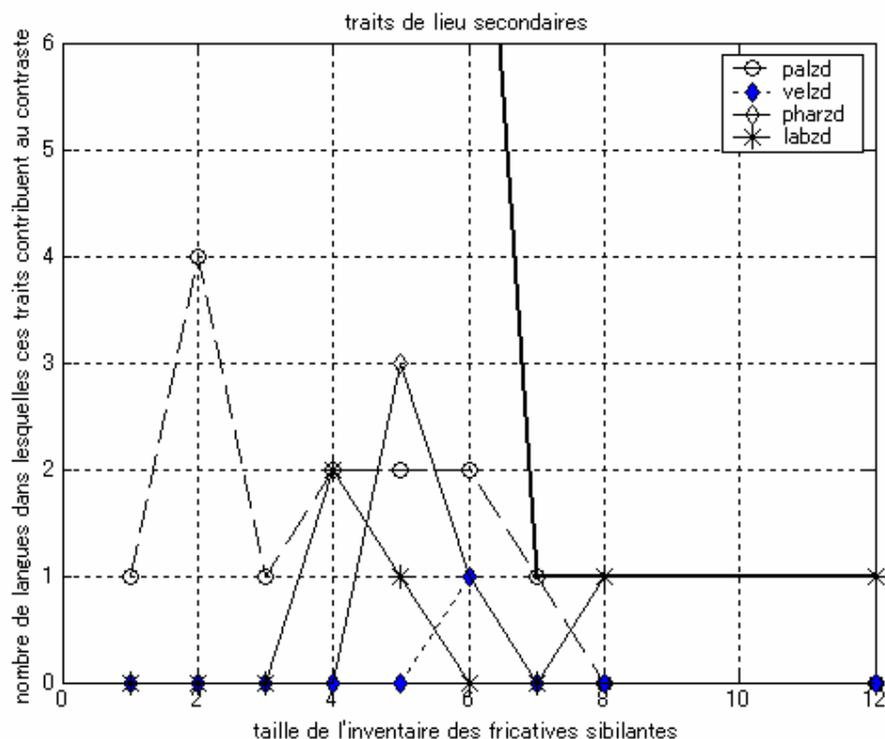


Figure 102. Nombre d'occurrences des traits de lieu secondaires (ou de double articulation) en fonction de la taille de l'inventaire. Ces traits sont la plupart du temps distinctifs par le principe même du codage de la base de données UPSID (« base de données des inventaires phonologiques »). La ligne épaisse représente le nombre total de langues en fonction de la taille de l'inventaire de sibilantes.

De même, les traits laryngaux autres que le voisement sont faiblement représentés (Figure 103). En ce qui concerne la préaspiration, cela suit la tendance générale pour les consonnes (une seule langue sur les 451 recensées utilise ce trait distinctif). Cependant, la proportion de laryngalisation et d'aspiration est très faible par rapport à la tendance pour les consonnes en général (44 langues et 118 langues, respectivement).

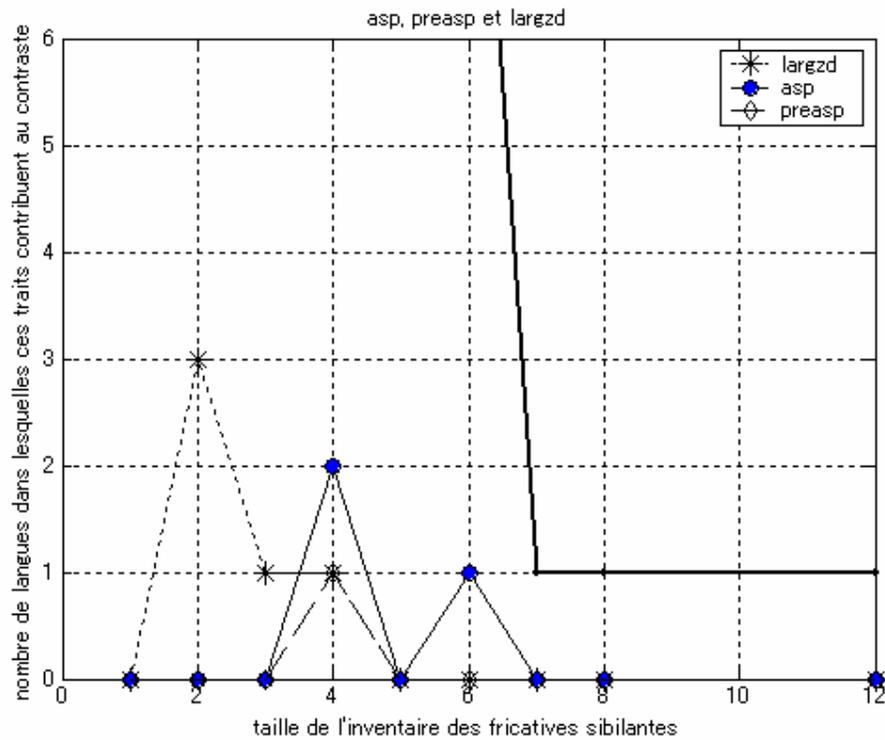


Figure 103. Nombre d'occurrences des traits distinctifs laryngaux en fonction de la taille de l'inventaire. La ligne épaisse représente le nombre total de langues en fonction de la taille de l'inventaire de sibilantes.

Enfin, le mode éjectif, la nasalisation et la durée complètent le tableau des traits distinctifs des sibilantes d'après la base de données UPSID (Figure 104). Ces traits sont également très marginaux dans le contraste des segments sibilants.

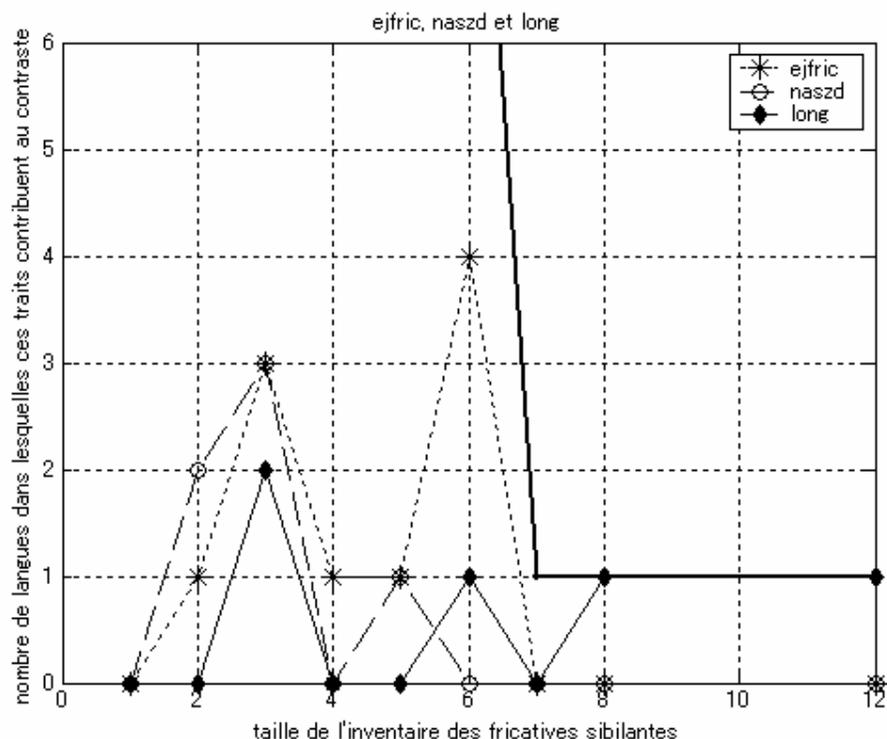


Figure 104. Nombre d'occurrences des autres traits distinctifs en fonction de la taille de l'inventaire. La ligne épaisse représente le nombre total de langues en fonction de la taille de l'inventaire de sibilantes.

Vue d'ensemble

Parmi les 413 langues qui possèdent des *fricatives*, 406 possèdent au moins une fricative *sourde*. Sur ces 406, 397 possèdent au moins une fricative *sibilante* sourde, comme nous l'avons déjà mentionné. Parmi ces 397 langues, l'inventaire le plus courant ne contient qu'une seule sibilante sourde¹²⁰ (204) dont le lieu d'articulation est antérieur pour la majorité (180 langues). Le deuxième inventaire le plus courant contient deux sibilantes sourdes (149) dont le contraste porte principalement sur le lieu (144). Toutefois, parmi les 193 langues qui possèdent au moins deux sibilantes sourdes, 22 possèdent deux « lieux » antérieurs distincts. De même, 19 langues possèdent deux « lieux » postérieurs.

¹²⁰ Ces décomptes ne prennent pas en considération les sibilantes voisées, dont il a été question plus haut.

Annexes

Tableau 15. Traits utilisés dans le codage des sibilantes en fonction des langues dans la base de données UPSID (451 langues). Les traits non distinctifs sont indiqués entre parenthèses. Les traits génériques ANT et POST ont été cochés lorsqu'il n'existait pas de contraste à l'intérieur des catégories antérieures (dent, unspdent, alv) et non-antérieures (pal_al, ret, pal).

inv	nom	code	traits de lieu (langue)										autres traits							
			dent	unspdent	alv	ANT	pal_al	ret	pal	POST	palzd	velzd	pharzd	labzd	largzd	naszd	ejfric	asp	preasp	long
1	ADZERA	2419		(*)		(*)														
1	AGHEM	4134			(*)	(*)														
1	AHTNA	6108			(*)	(*)														
1	AINU	2140			(*)	(*)														
1	AKAN	4115			(*)	(*)														
1	AKAWAIO	6853		(*)		(*)														
1	ALABAMA	6759			(*)	(*)														
1	ALEUT	6900					(*)				(*)									
1	AMAHUACA	6810		(*)		(*)														
1	AMELE	8635			(*)	(*)														
1	AO	2512			(*)	(*)														
1	APINAYE	6809		(*)		(*)														
1	ARAUCANIAN	6837			(*)	(*)														

Annexes

1	ASMAT	8601			(*)	(*)														
1	ATAYAL	2407			(*)	(*)														
1	AZANDE	4130			(*)	(*)														
1	BAI	2506			(*)	(*)														
1	BAINING	8631			(*)	(*)														
1	BARASANO	6832			(*)	(*)														
1	BARIBA	4113			(*)	(*)														
inv	nom	code	dent	unspdent	alv	ANT	pal_al	ret	pal	POST	palzd	velzd	pharzd	labzd	largzd	naszd	ejfric	asp	preasp	long
1	BATAK	2413			(*)	(*)														
1	BEEMBE	4123				(*)	(*)													
1	BELLA COOLA	6771				(*)	(*)													
1	BETE	4144				(*)	(*)													
1	BIROM	4120				(*)	(*)													
1	BISA	4104				(*)	(*)													
1	BOBO-FING	4138				(*)	(*)													
1	BODO	2515				(*)	(*)													
1	BRAHUI	2917				(*)	(*)													

Annexes

1	BRAO	2311			(*)	(*)														
1	BRUU	2316			(*)	(*)														
1	CARIB	6807			(*)	(*)														
1	CHAM	2411					(*)		(*)											
1	CHAMORRO	2416			(*)	(*)														
1	CHANGZHOU	2503			(*)	(*)														
1	CHEROKEE	6781					(*)		(*)											
1	CHUAVE	8611			(*)	(*)														
1	CHUKCHI	2708			(*)	(*)				*										
1	CUNA	6857			(*)	(*)														
1	DADIBI	8616			(*)	(*)														
1	DAFLA	2508			(*)	(*)														
1	DAN	4106			(*)	(*)														
1	DANGALEAT	4374					(*)		(*)											
1	DANI	8613			(*)	(*)														
1	DIOLA	4108			(*)	(*)														
inv	nom	code	dent	unspdent	alv	ANT	pal_al	ret	pal	POST	palzd	velzd	pharzd	labzd	largzd	naszd	ejfric	asp	preasp	long

Annexes

1	DOAYO	4128	(*)	(*)				
1	DOGON	4170	(*)	(*)				
1	EFIK	4119		(*)	(*)			
1	EJAGHAM	4125		(*)	(*)			
1	EPENA PEDEE	6811		(*)	(*)			
1	EVEN	2167		(*)	(*)			
1	EWE	4114	(*)		(*)			
1	EWONDO	4141		(*)	(*)			
1	FASU	8617		(*)	(*)			
1	FE?FE?	4148	(*)		(*)			
1	FIJIAN	2439		(*)	(*)			
1	FUZHOU	2505	(*)		(*)			
1	GBEYA	4129				(*)	(*)	
1	GREEK	2000		(*)	(*)			
1	GUAHIBO	6830		(*)	(*)			
1	GWARI	4140		(*)	(*)			
1	HAKKA	2502	(*)		(*)			

Annexes

1	HIGHLAND CHINANTEC	6786					(*)		(*)											
1	HOPI	6738			(*)	(*)														
1	HUASTECO	6776					(*)		(*)											
1	HUAVE	6716	(*)			(*)														
1	HUPA	6105			(*)	(*)														
1	IBAN	2435			(*)	(*)														
1	IGBO	4116	(*)			(*)														
1	IK	4208			(*)	(*)														
inv	nom	code	dent	unspdent	alv	ANT	pal_al	ret	pal	POST	palzd	velzd	pharzd	labzd	largzd	naszd	ejfric	asp	preasp	long
1	IRARUTU	2440	(*)			(*)														
1	ISLAND CARIB	6823		(*)		(*)														
1	ISOKO	4147			(*)	(*)														
1	ITELMEN	2710		(*)		(*)														
1	ITONAMA	6800		(*)		(*)														
1	IVATAN	2428			(*)	(*)														
1	IWAM	8605			(*)	(*)														

Annexes

1	JAPANESE	2171	(*)	(*)			
1	JAPRERIA	6848			(*)	(*)	
1	JAVANESE	2409	(*)	(*)			
1	JOMANG	4142		(*)	(*)		
1	KADUGLI	4102		(*)	(*)		
1	KAINGANG	6808			(*)	(*)	
1	KALA LAGAW YA	8365		(*)	(*)		
1	KALIAI	2421	(*)	(*)			
1	KAM	2404		(*)	(*)		
1	KANAKURU	4370			(*)	(*)	
1	KEFA	4364			(*)	(*)	
1	KERA	4371		(*)	(*)		
1	KEWA	8610		(*)	(*)		
1	KHARIA	2301	(*)	(*)			
1	KHMER	2306	(*)	(*)			
1	KHMU?	2312	(*)	(*)			

Annexes

1	KIOWA	6785	(*)	(*)					
1	KLAMATH	6707	(*)	(*)					

Annexes

inv	nom	code	dent	unspdent	alv	ANT	pal_al	ret	pal	POST	palzd	velzd	pharzd	labzd	largzd	naszd	ejfric	asp	preasp	long
1	KLAO	4133		(*)		(*)														
1	KOHUMONO	4136			(*)	(*)														
1	KOLOKUMA IJO	4150			(*)	(*)														
1	KONKANI	2024			(*)	(*)														
1	KONYAGI	4145			(*)	(*)														
1	KOTA	2903						(*)		(*)										
1	KOYA	2905	(*)			(*)														
1	KPELLE	4103			(*)	(*)														
1	KUNIMAIPA	8620		(*)		(*)														
1	KURUKH	2904		(*)		(*)														
1	KWAIO	2433			(*)	(*)														
1	KWAKW'ALA	6731			(*)	(*)														
1	LAHU	2510					(*)			(*)										
1	LAME	4376			(*)	(*)														
1	LELEMI	4118			(*)	(*)														

Annexes

1	LENAKEL	2426			(*)	(*)														
1	LUA	4151			(*)	(*)														
1	LUE	2427			(*)	(*)														
1	LUGBARA	4215			(*)	(*)														
1	LUNGCHOW	2406					(*)			(*)										
1	MAIDU	6708			(*)	(*)														
1	MALAGASY	2410	(*)			(*)														
1	MAMBILA	4153			(*)	(*)														
1	MBUM	4146			(*)	(*)														
1	MIEN	2517	(*)			(*)														
inv	nom	code	dent	unspdent	alv	ANT	pal_al	ret	pal	POST	palzd	velzd	pharzd	labzd	largzd	naszd	ejfric	asp	preasp	long
1	MOR	2429		(*)		(*)														
1	MORO	4101			(*)	(*)														
1	MOVIMA	6860					(*)			(*)										
1	MUNDARI	2300			(*)	(*)														
1	MURSI	4214					(*)			(*)										
1	NAMA	4906			(*)	(*)														

Annexes

1	NAMBAKAENGO	8626	(*)	(*)			
1	NANAI	2168	(*)	(*)			
1	NDUT	4149	(*)	(*)			
1	NEPALI	2023		(*)	(*)		
1	NEWARI	2518	(*)	(*)			
1	NEZ PERCE	6706		(*)	(*)		
1	NGANASAN	2157	(*)	(*)			
1	NICOBARESE	2313	(*)	(*)			
1	NIMBORAN	8604	(*)	(*)			
1	NIVKH	2700		(*)	(*)		
1	NYANGI	4207	(*)	(*)			
1	NYIMANG	4227		(*)	(*)		
1	OGBIA	4124	(*)	(*)			
1	PACOH	2314			(*)	(*)	
1	PAIWAN	2434			(*)	(*)	
1	PARAUK	2309			(*)	(*)	
1	PICURIS	6740	(*)	(*)			

Annexes

inv	nom	code	dent	unspdent	alv	ANT	pal_al	ret	pal	POST	palzd	velzd	pharzd	labzd	largzd	naszd	ejfric	asp	preasp	long
1	PIRAHA	6802		(*)		(*)														
1	PO-AI	2405					(*)			(*)										
1	POHNPEIAN	2430				(*)														
1	QAWASQAR	6859				(*)														
1	RUKAI	2417				(*)														
1	SA'BAN	2415				(*)														
1	SALIBA	6861				(*)														
1	SANDAWE	4902				(*)														
1	SANGO	4143					(*)			(*)										
1	SAVOSAVO	8645				(*)														
1	SEBEI	4209		(*)		(*)														
1	SELEPET	8607				(*)														
1	SENECA	6754		(*)		(*)														
1	SHASTA	6746		(*)		(*)														
1	SHUSWAP	6778					(*)			(*)										
1	SONGHAI	4200				(*)														

Annexes

1	SOUTHERN KIWAI	8636	(*)		(*)															
1	SPANISH	2011	(*)		(*)															
1	SRE	2310			(*)	(*)														
1	SUENA	8618	(*)			(*)														
1	TAGALOG	2414			(*)	(*)														
1	TAISHAN	2501					(*)		(*)											
1	TAMA	4210			(*)	(*)														
1	TAMANG	2507	(*)			(*)														
1	TAMPULMA	4112			(*)	(*)														
1	TAORIFI	8623	(*)			(*)														
1	TEKE	4127			(*)	(*)														
inv	nom	code	dent	unspdent	alv	ANT	pal_al	ret	pal	POST	palzd	velzd	pharzd	labzd	largzd	naszd	ejfric	asp	preasp	long
1	TEMEIN	4211			(*)	(*)														
1	TEMNE	4109			(*)	(*)														
1	TETUN	2437		(*)		(*)														
1	THAI	2400	(*)			(*)														

Annexes

1	TICUNA	6831	(*)	(*)			
1	TIDDIM CHIN	2513		(*)	(*)		
1	TIGAK	2425		(*)	(*)		
1	TIRURAY	2431		(*)	(*)		
1	TOL	6747		(*)	(*)		
1	TONKAWA	6752	(*)		(*)		
1	TSIMSHIAN	6774		(*)	(*)		
1	TSOU	2418			(*)	(*)	
1	USAN	8630		(*)	(*)		
1	VANIMO	8640		(*)	(*)		
1	VIETNAMESE	2303		(*)	(*)		
1	WANTOAT	8615	(*)		(*)		
1	WARAO	6852		(*)	(*)		
1	WARIS	8637	(*)		(*)		
1	WEST MAKIAN	8647	(*)		(*)		
1	WINTU	6709		(*)	(*)		
1	WOISIKA	8633	(*)		(*)		

Annexes

1	WOLOF	4107			(*)	(*)														
1	XIAMEN	2504		(*)		(*)														
1	YAGARIA	8609			(*)	(*)														
1	YANA	6745	(*)			(*)														
nv	nom	code	dent	unspdent	alv	ANT	pal_al	ret	pal	POST	palzd	velzd	pharzd	labzd	largzd	naszd	ejfric	asp	preasp	long
1	YAQUI	6739			(*)	(*)														
1	YAREBA	8621			(*)	(*)														
1	YAY	2402		(*)		(*)														
1	YESSAN-MAYO	8632			(*)	(*)														
1	YUCUNA	6843			(*)	(*)														
1	YUKAGHIR	2172		(*)		(*)														
1	YULU	4216	(*)			(*)														
1	YUPIK	6902		(*)		(*)														
1	ZOQUE	6711			(*)	(*)														
2	!XU	4904			(*)	*	(*)			*										
2	ACHUMAWI	6744			(*)	*	(*)			*										
2	AIZI	4131			(*)	*	(*)			*										

Annexes

2	ALAMBLAK	8634	(*)	*	(*)	*		
2	ALBANIAN	2021	(*)	*	(*)	*		
2	ALLADIAN	4152	(*)	*	(*)	*		
2	AMO	4122	(*)	*	(*)	*		
2	AMUESHA	6824	(*)	*	(*)	*		
2	AMUZGO	6770	(*)	*	(*)	*		
2	ANGAS	4367	(*)	*	(*)	*		
2	ARABELA	6817	(*)	*	(*)	*		
2	ARMENIAN	2022	(*)	*	(*)	*		
2	ASHUSLAY	6814	(*)	*	(*)	*		
2	AWIYA	4359	(*)	*	(*)	*		
2	AZERBAIJANI	2159	(*)	*	(*)	*		
2	BAKAIRI	6856	(*)	*	(*)	*		

Annexes

inv	nom	code	dent	unspdent	alv	ANT	pal_al	ret	pal	POST	palzd	velzd	pharzd	labzd	largzd	naszd	ejfric	asp	preasp	long
2	BAMBARA	4105			(*)	*	(*)			*										
2	BASHKIR	2163			(*)	*	(*)			*										
2	BATS	2604	(*)			*	(*)			*										
2	BEJA	4361	(*)			*	(*)			*										
2	BENGALI	2017	(*)			*			(*)	*										
2	BRETON	2002			(*)	*	(*)			*										
2	BRIBRI	6801		(*)		*	(*)			*										
2	CADDO	6775		(*)		*	(*)			*										
2	CAMPA	6825			(*)	*	(*)			*										
2	CAYAPA	6803			(*)	*	(*)			*										
2	CAYUVAVA	6840			(*)	*	(*)			*										
2	CHATINO	6729		(*)		*	(*)			*										
2	CHIPEWYAN	6106		(*)		*	(*)			*										
2	COFAN	6836		(*)		*	(*)			*										
2	DAGBANI	4110		(*)		*	(*)			*										

Annexes

2	DAGUR	2176					*	*												
2	DAHALO	4372			(*)	*	(*)		*											
2	DAJU	4225			(*)	*	(*)		*											
2	DIEGUENO	6743	*		*															
2	DIZI	4363			(*)	*	(*)		*											
2	EYAK	6109			(*)	*	(*)		*											
2	FARSI	2013			(*)	*	(*)		*											
2	FINNISH	2153			(*)	*	(*)		*											
2	FRENCH	2010	(*)			*	(*)		*											
2	FUR	4203			(*)	*	(*)		*											
inv	nom	code	dent	unspdent	alv	ANT	pal_al	ret	pal	POST	palzd	velzd	pharzd	labzd	largzd	naszd	ejfric	asp	preasp	long
2	GELAO	2436			(*)	*			(*)	*										
2	GEORGIAN	2600			(*)	*	(*)			*										
2	GERMAN	2004			(*)	*	(*)			*										
2	GUAJIRO	6826			(*)	*	(*)			*										
2	GUARANI	6828	*		*															
2	HADZA	4900			(*)	*	(*)			*										

Annexes

2	HAMER	4365	(*)	*	(*)	*		
2	HINDI-URDU	2016	(*)	*	(*)	*		
2	HIXKARYANA	6842	(*)	*	(*)	*		
2	HUARI	6841	(*)	*	(*)	*		
2	HUNGARIAN	2154	(*)	*	(*)	*		
2	IAI	2422	(*)	*	(*)	*		
2	INUIT	6901	(*)	*	(*)	*		
2	IRANXE	6845	(*)	*	(*)	*		
2	IRISH	2001	(*)	*	(*)	*		
2	JAQARU	6820	(*)	*	(*)	*		
2	JEBERO	6844	(*)	*	(*)	*		
2	JINGPHO	2511	(*)	*	(*)	*		
2	JIVARO	6835	(*)	*	(*)	*		
2	KANURI	4201	(*)	*	(*)	*		
2	KASHMIRI	2018	(*)	*	(*)	*	*	
2	KAWAIIISU	6763	(*)	*	(*)	*		
2	K'EKCHI	6714	(*)	*	(*)	*		

Annexes

2	MABA	4202			(*)	*	(*)		*											
2	MANCHU	2169	(*)			*	(*)		*											
2	MANDARIN	2500		(*)		*	(*)		*											
2	MARGI	4368		(*)		*	(*)		*											
2	MAZATEC	6727		(*)		*	(*)		*											
2	MIXE	6715	(*)			*	(*)		*											
2	MIXTEC	6728		(*)		*	(*)		*											
2	MOGHOL	2174		(*)		*	(*)		*											
2	MONGUOR	2173		(*)		*	(*)		*											
2	MOXO	6827		(*)		*	(*)		*											
2	MUINANE	6806		(*)		*	(*)		*											
inv	nom	code	dent	unspdent	alv	ANT	pal_al	ret	pal	POST	palzd	velzd	pharzd	labzd	largzd	naszd	ejfric	asp	preasp	long
2	MUMUYE	4132			(*)	*	(*)			*										
2	NAHUATL	6762			(*)	*	(*)			*										
2	NAVAJO	6104		(*)		*	(*)			*										
2	NENETS	2156		(*)							*									
2	NEO-ARAMAIC	4355			(*)	*	(*)			*										

Annexes

2	NERA	4212	(*)	*	(*)	*		
2	NGIZIM	4369		(*)	*	(*)	*	
2	NONI	4139	(*)		*	(*)	*	
2	NORWEGIAN	2006		(*)	*	(*)	*	
2	NUBIAN	4206		(*)	*	(*)	*	
2	OCAINA	6805		(*)	*	(*)	*	
2	ORMURI	2025		(*)	*	(*)	*	
2	PAPAGO	6736	(*)		*	(*)	*	
2	PAYA	6854		(*)	*	(*)	*	
2	PHLONG	2520	(*)		*	(*)	*	
2	POMO	6742		(*)	*	(*)	*	
2	QUECHUA	6819		(*)	*	(*)	*	
2	QUILEUTE	6732		(*)	*	(*)	*	
2	RESIGARO	6838		(*)	*	(*)	*	
2	ROMANIAN	2012	(*)		*	(*)	*	
2	SAMA	2412		(*)				*
2	SEDANG	2304		(*)	*	(*)	*	

Annexes

2	SELKUP	2164	(*)		*	(*)			*											
2	SENADI	4111	(*)							*										
2	SHIRIANA	6855	(*)		*	(*)			*											
inv	nom	code	dent	unspdent	alv	ANT	pal_al	ret	pal	POST	palzd	velzd	pharzd	labzd	largzd	naszd	ejfric	asp	preasp	long
2	SIERRA MIWOK	6779	(*)			*	(*)			*										
2	SINHALESE	2020			(*)	*	(*)			*										
2	SIONA	6833			(*)										*					
2	SIRIONO	6829	(*)			*	(*)			*										
2	SOMALI	4358			(*)	*	(*)			*										
2	SOUTHERN NAMBIQUARA	6816			(*)										*					
2	SUI	2403	(*)			*	(*)			*										
2	TABI	4213			(*)	*	(*)			*										
2	TACANA	6812					*	*												
2	TAMASHEQ	4357	(*)			*	(*)			*										
2	TAROK	4121	(*)			*	(*)			*										
2	TERA	4375			(*)	*			(*)	*										

Annexes

2	TIGRE	4351			(*)	*	(*)		*											
2	TLAPANEC	6772			(*)	*	(*)		*											
2	TLINGIT	6102			(*)													*		
2	TOTONAC	6713			(*)	*	(*)		*											
2	TRUMAI	6865			(*)	*	(*)		*											
2	TSESHAHT	6730			(*)	*	(*)		*											
2	TUNICA	6758			(*)	*	(*)		*											
2	TURKISH	2158			(*)	*	(*)		*											
2	TUVA	2165	(*)			*	(*)		*											
2	TZELTAL	6712	*			*														
2	UPPER CHEHALIS	6773			(*)	*	(*)		*											
2	UZBEK	2175			(*)	*	(*)		*											
2	WAPISHANA	6822			(*)	*	(*)		*											
inv	nom	code	dent	unspdent	alv	ANT	pal_al	ret	pal	POST	palzd	velzd	pharzd	labzd	largzd	naszd	ejfric	asp	preasp	long
2	WAPPO	6760			(*)	*	(*)		*											
2	WIYOT	6753			(*)	*	(*)		*											

Annexes

2	YAKUT	2161	(*)	*	(*)	*		
2	YAWA	8629		(*)			*	
2	YORUBA	4137		(*)	*	(*)	*	
2	YUCATEC	6777		(*)	*	(*)	*	
2	ZULU	4126		(*)	*	(*)	*	
2	ZUNI	6748	(*)		*	(*)	*	
3	AMHARIC	4352	(*)		*	(*)	*	*
3	ARABIC	4350	(*)		*	(*)	*	*
3	BASQUE	2714	(*)		*	* *		
3	BERTA	4218	(*)		*	(*)	*	*
3	BULGARIAN	2009	(*)		*	(*)	*	*
3	BURMESE	2509	(*)		*	(*)	*	*
3	BURUSHASKI	2715	(*)		*	* *		
3	CAMSA	6863		(*)	*	* *		
3	CHUVASH	2160	(*)		*	* *		
3	GA	4117		(*)	*	(*)	*	*
3	GUAMBIANO	6862		(*)	*	* *		

Annexes

3	HAUSA	4366			(*)	*	(*)		*						*						
3	HMONG	2519	(*)			*		*	*												
3	IRAQW	4360			(*)	*	(*)		*												*
3	JACALTEC	6780			(*)	*		*	*												
3	KABARDIAN	2601	(*)			*	(*)		*									*			
3	KAREN	2516		(*)		*	(*)		*										*		
inv	nom	code	dent	unspdent	alv	ANT	pal_al	ret	pal	POST	palzd	velzd	pharzd	labzd	largzd	naszd	ejfric	asp	preasp	long	
3	KAROK	6741	*		*		(*)			*											
3	KOMA	4220			(*)	*	(*)			*								*			
3	KURDISH	2015	*		*		(*)			*			*								
3	LAI	2432		(*)		*			(*)	*	*										
3	MARI	2151		(*)		*	(*)			*	*										
3	NAXI	2525	(*)			*		*	*												
3	PAEZ	6804			(*)	*	(*)			*	*										
3	PASHTO	2014			(*)	*	*	*													
3	RUSSIAN	2008	(*)			*	(*)			*	*	*									
3	RUTUL	2603		(*)		*	(*)			*				*							*

Annexes

3	SAAMI	2155	(*)	*	(*)	*	*													
3	SHILHA	4356	(*)	*	(*)	*	*			*										
3	TARASCAN	6847	(*)	*	*	*	*													
3	TEHUELCHÉ	6821	(*)	*	*	*	*													
3	TELUGU	2902		(*)	*	*	*													
3	TULU	2906		(*)	*	*	*													
3	WICHITA	6755	(*)													*			*	
4	AVAR	2606	(*)	*	(*)	*	*												*	
4	DAKOTA	6756	(*)	*	(*)	*	*									*				
4	LITHUANIAN	2007		(*)	*	(*)	*			*										
4	MAZAHUA	6717	(*)	*	(*)	*	*									*	*			
4	OJIBWA	6750	(*)	*	(*)	*	*												*	
4	SOCOTRI	4354	(*)	*	(*)	*	*									*				
4	YUCHI	6757	(*)	*	(*)	*	*									*				
inv	nom	code	dent	unspdent	alv	ANT	pal_al	ret	pal	POST	palzd	velzd	pharzd	labzd	largzd	naszd	ejfric	asp	preasp	long
6	ACOMA	6749	(*)			*	*	*	*									*		

Annexes

6	LAK	2602	(*)	*	(*)	*	*	*
8	ARCHI	2605	(*)	*	(*)	*	*	*

ANNEXE II. CORPUS LINGUISTIQUES

Français

Orthographe (tel que présenté au locuteur) Phonétique []

« »

Assam	asam
achat	aʃa
ici	isi
Clichy	kliʃi
vous soulevez	vusul(ə)ve
doux choux	duʃu

Anglais

Orthographe (présenté au locuteur) « » Phonétique []

see	si:
sad	sæd
soup	su:p
sheep	ʃi:p
shall	ʃæl
shoot	ʃu:t

japonais

Orthographe (présenté au locuteur) « » Phonétique []

Annexes

あっさり	as:ari
うっすら	us:ura
びっしり	bisʲ:iri
かつしゃ	kasʲ:a
プッシュ	pusʲ:u

chinois

Orthographe (présenté au locuteur) « » *Phonétique []*

xiexie 谢谢	çīçīçī
xixi 嬉戏	çiçi
xuxu 徐徐	çyçy
shishi 事实	ʃʃʃ
zheshe 折射	ʈʂəʂə
shushu 叔叔	ʃʃʃu
cisi 刺死	ʈsisi
sese 瑟瑟	səʂə
lusu 露宿	lusu

polonais

Orthographe (présenté au locuteur) « » *Phonétique []*

sadza	sadza
sypac	sipatʃ

Annexes

suma	suma
szatan	ʃatan
szybka	ʃibka
szumna	ʃumna
siadam	ʃadam
siurek	ʃurek

russe

Orthographe (présenté au locuteur) « » *Phonétique []*

сытый	sɪtɪ
самая	samajɑ
синий	sini
сеять	sʲejatʲ
ширина	ʃirina
шанс	ʃans
щи	ʃʲi
щеке	ʃʲekʲe

suédois

Orthographe (présenté au locuteur) « » *Phonétique []*

sällan	sellan
--------	--------

Annexes

så	so:
kär	çer
tjusa	çy:sa
färs	fɛʂ
nors	noʂ

Le japonais

La langue japonaise possède l'alvéolaire /s/. Dans une analyse répandue (ex. Okada, 1999), c'est son unique phonème sibilant. En effet, son allophone [s^j ou ç¹²¹] est en distribution complémentaire dans les syllabes orthographiées しや, しゅ, et しよ (romanisés « sya », « syu » et « syo » ; **Tableau 16**) dont la consonne est analysée comme un groupe consonantique /sj/.

Tableau 16. Paires minimales autour du /s/ en japonais.

syllabes non palatales	syllabes palatales
[sɑ] ex. /sasjo:/ (visa)	[çɑ] ex. /sjasjo:/ (contrôleur dans un train)
/asa/ (matin)	
/saru/ (singe)	
[sɛ] ex. /ase/ (sueur)	[çi] ex. /sisjo:/ (maître)
/seki/ (place assise)	/siki/ (quatre saisons)
[su] ex. /suru/ (écraser, effriter)	[çɥ] ex. /sjusjo:/ (premier ministre)
/kasu/ (résidu)	/kasju/ (chanteur)
[so] ex. /soru/ (raser)	[ço] ex. /sjoki/ (secrétaire)

¹²¹ Il s'agit du symbole API qui nous semble phonétiquement le plus proche de ce son. Toutefois, comme nous allons le voir avec les données articulatoires, ce son japonais est produit avec une position de la langue plus avancée (la pointe de la langue touche généralement la base des incisives inférieures) que le phonème /ç/ en chinois et en polonais (cf. I-3).

L'opposition entre syllabes avec /j/ et les syllabes sans /j/, comme illustré dans le **Tableau 16**, est systématique pour toutes les consonnes en japonais. Par exemple : /p/ - /pj/ dans /ippo:/ « d'une part » et /ippjo:/ « un bulletin de vote » ; /k/ - /kj/ dans /kaku/ « ébrécher » et /kaku/ « client », etc. Cette combinatoire rappelle fort l'opposition des consonnes dures et douces en russe. Nous supposons, de fait, que l'approche qui analyse le son [ç] en deux phonèmes /s+j/ est motivée par l'orthographe, plutôt que par la logique interne du système phonologique. En effet, le japonais possède des structures syllabiques très contraintes, qui interdisent, en particulier, les groupes consonantiques en début de mot. La seule exception serait la suite /#Cj/. En vertu de cette analyse, nous considérons, dans ce travail, qu'il existe en japonais deux sibilantes sourdes, /s/ et /s̺/ (ou /ç/, pour simplicité de représentation), qui partagent le même lieu d'articulation [CORONAL¹²²], et s'opposent par le trait [+/- distribué] (cf., pour cette approche, Mester et Ito, 2006).

Le français et l'anglais

Le français et l'anglais possèdent la dentale/alvéolaire¹²³ /s/ et la palato-alvéolaire /ʃ/ aussi couramment appelée post-alvéolaire. Ces deux consonnes peuvent se combiner avec presque toutes les voyelles. On trouve des paires minimales pour toutes les positions syllabiques (attaque et coda) et avec plusieurs voyelles¹²⁴, antérieures ou postérieures, et en français, arrondies et non arrondies. Ces consonnes peuvent également faire partie d'un groupe consonantique à l'initiale de mot en formant les séquences /st/, /sp/, /sk/, /sl/, /sn/, /sm/, /sw/¹²⁵ en anglais, et /st/, /sp/, /sk/, /sj/, /ʃj/, /sq/, /sw/, /ʃw/¹²⁶ en français, avec marginalement quelques occurrences de /ʃq/, /sl/, /sn/, /sm/¹²⁷, et les suites /sr/, /ʃm/, /ʃn/¹²⁸, suite à la chute d'un /ə/ muet optionnel. De plus, la contraction du clitique « je » précédant un verbe qui commence par une consonne sourde donne lieu à des unités prosodiques avec des groupes consonantiques initiaux : /ʃp/, /ʃt/, /ʃk/, /ʃs/, /ʃr/, /ʃq/¹²⁹. Si on prend en considération tous ces contextes supplémentaires, on peut dire que /s/ et /ʃ/

¹²² Le trait [+ antérieur] n'est pas distinctif, car il n'existe pas d'autre fricative sibilante, ni d'affriquée, en dehors des alvéolaires et des alvéolo-palatales : [s, z, dz, ç, ʃ, dj, ts et tç].

¹²³ L'articulation pourrait être dentale, denti-alvéolaire ou alvéolaire selon les sujets, d'après Dart (1998).

¹²⁴ Pour les sourdes /s/ et /ʃ/.

¹²⁵ Ex. « spot », « stop », « scope », « snow », « smoke », « slow », « sweet ».

¹²⁶ Ex. « spectre », « stylo », « squelette », « science », « chien », « suie », « souhait », « choix ».

¹²⁷ Ex. « chuintement », « snob », « slogan », « smicard ».

¹²⁸ Ex. « sera », « chemin », « chenille »,

¹²⁹ Ex. « je parle » « je tente » « je commence », « je sais » « je serai », « je suis ».

ont la même distribution à l'intérieur de groupes consonantique initiaux comprenant les occlusives, les sonantes et les semi-consonnes. Ces deux fricatives sibilantes sourdes, en français et en anglais, sont toutes deux [coronales] et peuvent se distinguer par le trait distinctif [+/- antérieur]. Dans les deux langues, il n'existe qu'une seule série d'occlusives [coronale] : /t et d/ ; et qu'une seule nasale [coronale] : /n/. De ce fait, on peut parler de l'encombrement de la série des fricatives sibilantes par rapport aux autres séries de consonnes.

En anglais, il existe une série de fricatives coronales non sibilantes /θ et ð/, qui se distinguent des sibilantes par le trait [- strident]¹³⁰ (ex. Stevens, 1998). L'anglais possède en plus des affriquées qui forment une série parallèle aux fricatives sibilantes.

Le chinois (dialectes apparentés au mandarin)

Le mandarin et des variétés de chinois parlées dans le Nord de la Chine (y compris le dialecte de Pékin) possèdent les fricatives sibilantes /s/ (alvéolaire), /ç/ (alvéolo-palatale) et /ʃ/ (décrite comme palato-alvéolaire avec le dos de la langue plat ; Ladefoged et Maddieson, 1996 : pages 152-153)¹³¹. Comme le japonais, il existe des restrictions distributionnelles de ces consonnes. Les sibilantes /s/ et /ʃ/ ne s'associent jamais à un noyau syllabique qui commence par une voyelle (ou une semi-voyelle) haute antérieure. À l'inverse, /ç/ s'associe aux noyaux syllabiques qui commencent avec des voyelles ou semi-voyelles hautes antérieures mais pas aux noyaux qui commencent avec un vocoïde haut non antérieur. /ç/ alterne avec /s/ ou /ʃ/, mais également avec /k/. Ces trois sibilantes /s/, /ç/ et /ʃ/ peuvent donc être décrites par l'ensemble de trait [+ antérieur, - distribué], [+ distribué], et [- antérieur, - distribué], respectivement, en conformité avec Stevens *et al.*, 2004. En plus de ces sibilantes, le chinois possède une fricative vélaire sourde /x/¹³².

Le polonais

Le polonais possède trois sibilantes sourdes également : /s/, /ç/, /ʃ/. Cet ensemble de fricatives ressemble à celui du chinois, mais des différences d'articulation ont été observées (Ladefoged et Wu, 1984 : p.272). Il n'empêche qu'on peut décrire cette opposition phonémique à l'aide du trait [+ distribué], attribut de la palatalisation, pour /ç/, et [- distribué] à /s/ et /ʃ/. Ces deux dernières s'opposent par le trait de lieu [+/- antérieur].

Le suédois

¹³⁰ Il s'agit d'un des rares traits distinctifs faisant référence à une propriété acoustique.

¹³¹ En pinyin, « s », « x » et « sh », respectivement.

¹³² En pinyin, « h ».

Le suédois possède deux fricatives sibilantes [s] et [ç]. Comme le chinois, [ç] est en distribution complémentaire avec [k], ce dernier étant associé aux voyelles postérieures et [ç] apparaissant avec les voyelles antérieures. Pour être consistant avec la représentation des sibilantes chinoises (où /ç/ a un statut de phonème), et du fait que [ç] et [k] sont phonétiquement éloignés, le statut de phonème de /ç/ (</kV_{ant}/) semble justifié.

En plus de ces deux sibilantes, certaines variétés du suédois possèdent un troisième son sibilant, /ʃ/, qui provient historiquement de la séquence /rs#/. Dans ces variétés, /ʃ/ s'oppose à /s/. Le locuteur suédois qui a participé à cette étude appartient à ce type de dialecte et possède donc trois sibilantes.

Le suédois possède également, en plus de ces trois sibilantes, une fricative sourde à double articulation vélaire et palato-alvéolaire, /ħ/. D'après nos données IRM (voir Annexe III), cette fricative est produite avec les incisives rapprochées comme les sibilantes, mais son bruit de friction est moins intense.

Le russe

Le russe possède trois sibilantes sourdes : /sʲ/, /sʲ/ et /ʃ/¹³³. En plus de ces trois fricatives, l'affriquée /çtç/¹³⁴ est réalisée en tant que fricative sibilante [ç] en début de mot. Dans cette étude, nous avons demandé à une locutrice russe de soutenir cette consonne comme lorsqu'elle se prononce à l'initiale d'un mot. Dans notre étude, nous avons donc un inventaire de quatre fricatives sibilantes. Etant donné que /çtç/ s'oppose aux autres sibilantes, et tout en étant réalisé en tant que fricative dans cette position, nous le représenterons /ç/.

¹³³ En cyrillique, ces phonèmes sont orthographiés avec les caractères « c » (suivi d'une voyelle dure), « c » (suivi d'une voyelle douce) et « ш », respectivement.

¹³⁴ En cyrillique, ce phonème est orthographié avec le caractère « ш ».

ANNEXE III. DESCRIPTION ARTICULATOIRE QUALITATIVE

Locuteur Fr1

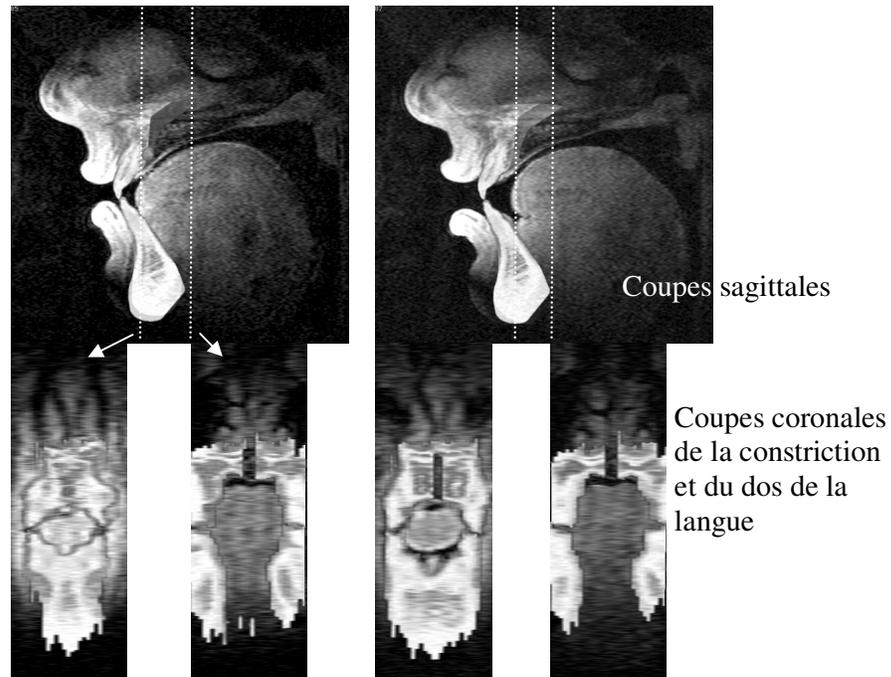


Figure 105. Coupes sagittales (haut) et coronales (bas) des données IRM complétées des dents. A gauche, /s/ ; à droite, /ʃ/. Les lignes pointillées blanches sur les profils sagittaux indiquent l'emplacement approximatif des coupes coronales.

Le locuteur FR1 est un locuteur de français (région parisienne), masculin, d'une vingtaine d'années au moment de l'enregistrement et était stagiaire à ATR.

La différence articulatoire entre /s/ et /ʃ/ réside dans la différence du point de constriction et de la forme des lèvres.

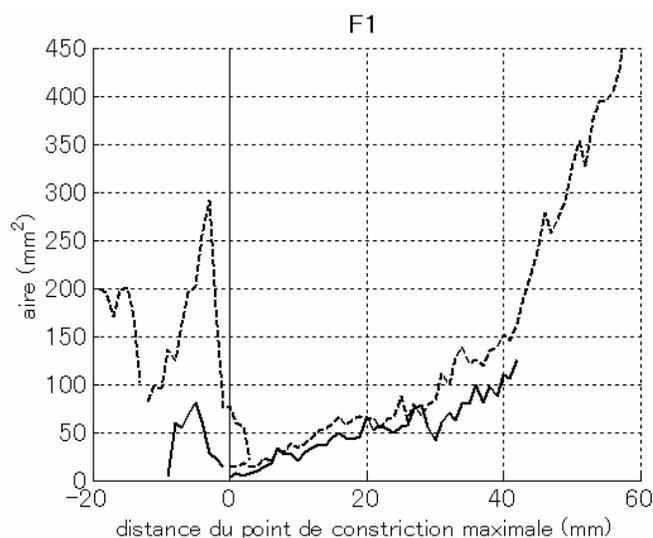


Figure 106. Fonctions d'aire de /s/ (lignes pleines) et /ʃ/ (lignes discontinues) ; mesures effectuées sur les coupes coronales perpendiculaires aux images d'origine.

Tableau 17. Description articulatoire qualitative du locuteur Fr1.

	/s/	/ʃ/
Articulateur de la langue	lame de la langue	lame de la langue
Cible supérieure	alvéoles	région post-alvéolaire
Forme de la constriction	ellipsoïde	ellipsoïde
Forme sagittale du dos de la langue	bombée	bombée
Région pharyngale	large	étroite
Lèvres		protruses et ouvertes en référence à /s/

Locuteur Fr3

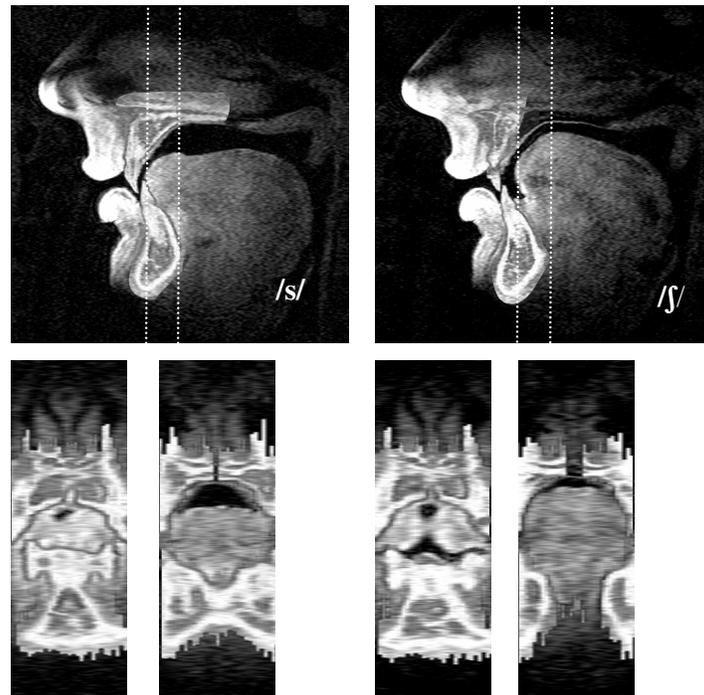


Figure 107. Coupes médio-sagittales (haut) et coronales (bas) des données IRM complétées des dents. A gauche, /s/ ; à droite, /ʃ/. Les lignes pointillées blanches sur les profils sagittaux indiquent l'emplacement approximatif des coupes coronales.

Le locuteur Fr3 est un locuteur de français âgé d'une vingtaine d'années au moment de l'enregistrement.

La différence entre /s/ et /ʃ/ sur le plan articulatoire réside principalement dans la forme de la langue. Pour /s/, on observe un léger rétrécissement vélaire, tandis que pour /ʃ/, le predorsum de la langue est bombé de telle sorte que la langue longe le palais entre les alvéoles et la région prépalatale.

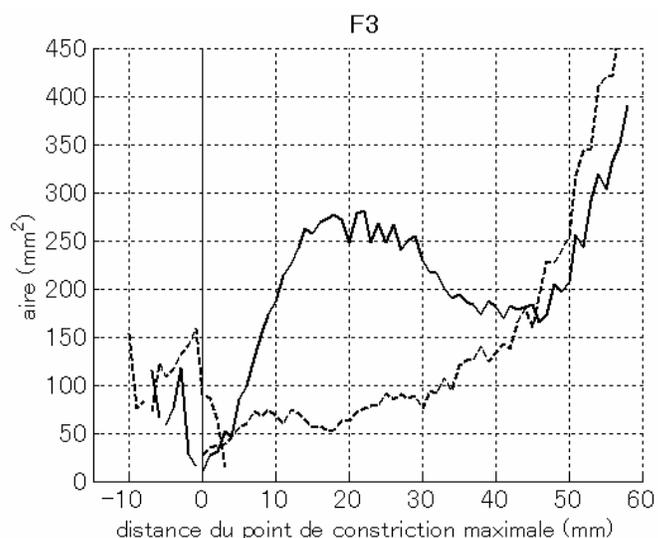


Figure 108. Fonctions d'aire de /s/ (lignes pleines) et /ʃ/ (lignes discontinues) ; mesures effectuées sur les coupes coronales perpendiculaires aux images d'origine.

Les fonctions d'aire entre /s/ et /ʃ/ diffèrent le plus dans la région immédiatement postérieure à la constriction, où on pourrait qualifier l'articulation de /ʃ/ comme palatalisée.

Tableau 18. Description qualitative de l'articulation des sibilantes : locuteur Fr3.

	/s/	/ʃ/
Articulateur de la langue	lame de la langue	lame et predorsum de la langue
Cible supérieure	dentale à alvéolaire	région post-alvéolaire à prépalatale
Forme sagittale du dos de la langue	plate	bombée
Forme de la constriction	circulaire	circulaire
Région pharyngale	étroite	étroite
Lèvres		pas de nette protrusion

Locuteur Fr4

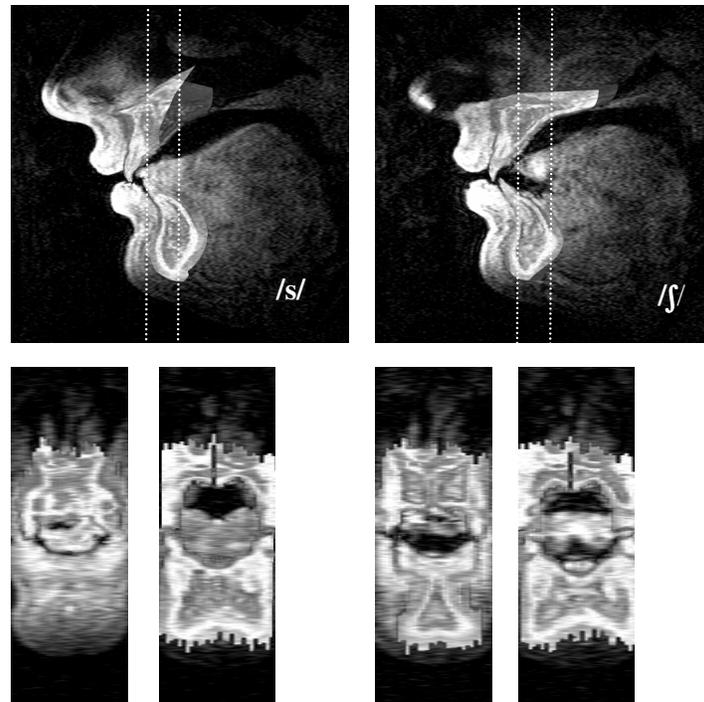


Figure 109. Coupes médio-sagittales (haut) et coronales (bas) des données IRM complétées des dents. A gauche, /s/ ; à droite, /ʃ/. Les lignes pointillées blanches sur les profils sagittaux indiquent l'emplacement approximatif des coupes coronales.

Le locuteur Fr4 est un locuteur masculin de français âgé d'une vingtaine d'années au moment de l'enregistrement.

Les sibilantes /s/ et /ʃ/ s'opposent, du point de vue articuloire, par la présence ou non d'une cavité sublinguale, qui se traduit en une cavité antérieure plus grande pour /ʃ/ dans la fonction d'aire. La forme de la langue reste quasi inchangée entre les deux sibilantes.

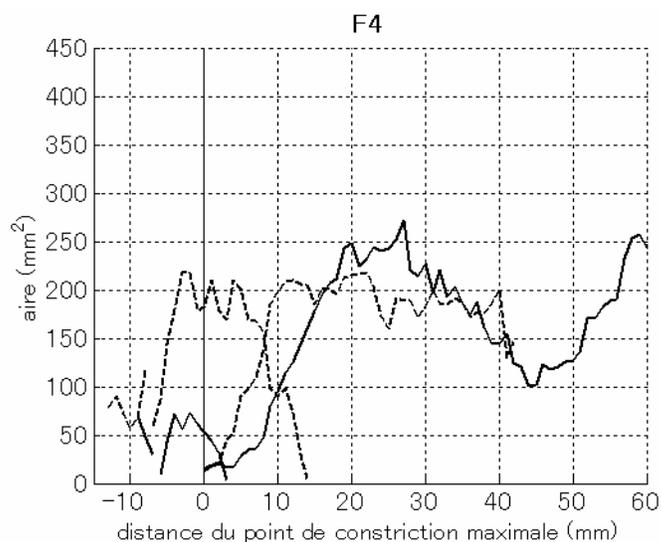


Figure 110. Fonctions d'aire de /s/ (lignes pleines) et /ʃ/ (lignes discontinues) ; mesures effectuées sur les coupes coronales perpendiculaires aux images d'origine.

Tableau 19. Description qualitative de l'articulation des sibilantes : locuteur Fr4.

	/s/	/ʃ/
Articulateur de la langue	pointe de la langue	pointe de la langue
Cible supérieure	dentale	alvéolaire
Forme de la constriction	ellipsoïde	ellipsoïde
Forme sagittale du dos de la langue	concave	plate
Région vélaire	rétrécissement vélaire	
Lèvres		avancement de la mâchoire par rapport à /s/

Locuteur Fr6

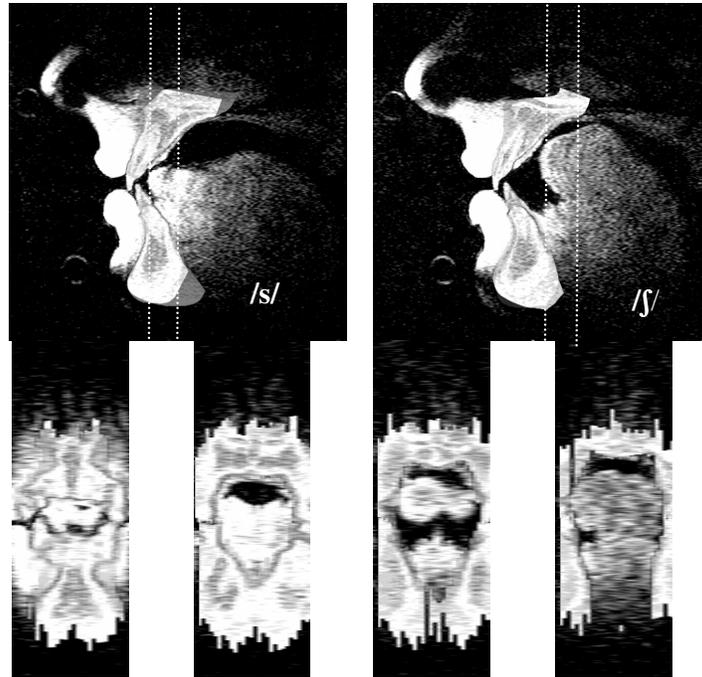


Figure 111. Coupes médio-sagittales (haut) et coronales (bas) des données IRM complétées des dents. A gauche, /s/ ; à droite, /ʃ/. Les lignes pointillées blanches sur les profils sagittaux indiquent l'emplacement approximatif des coupes coronales.

Le locuteur Fr6 est un locuteur masculin de français âgé d'une vingtaine d'année au moment de l'enregistrement. La forme de la langue entre les sibilantes /s/ et /ʃ/ est très différente, ce qui donne lieu à une palatalisation de /ʃ/ de même qu'une cavité antérieure très grande pour cette même consonne, comprenant une cavité sublinguale importante.

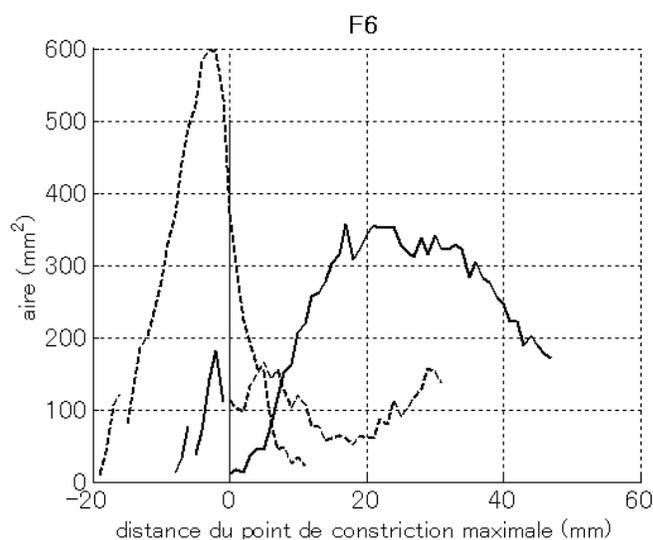


Figure 112. Fonctions d'aire de /s/ (lignes pleines) et /ʃ/ (lignes discontinues) ; mesures effectuées sur les coupes coronales perpendiculaires aux images d'origine.

Tableau 20. Description articulatoire qualitative du locuteur Fr6.

	/s/	/ʃ/
Articulateur de la langue	pointe de la langue	lame et prédorsum
Cible supérieure	dental à alvéolaire	post-alvéolaire à palatale
Forme de la constriction	circulaire	plate
Forme sagittale du dos de la langue	concave	bombée
Région pharyngale	étroite	large
Lèvres		pas de nette protrusion

Locutrice Fr7

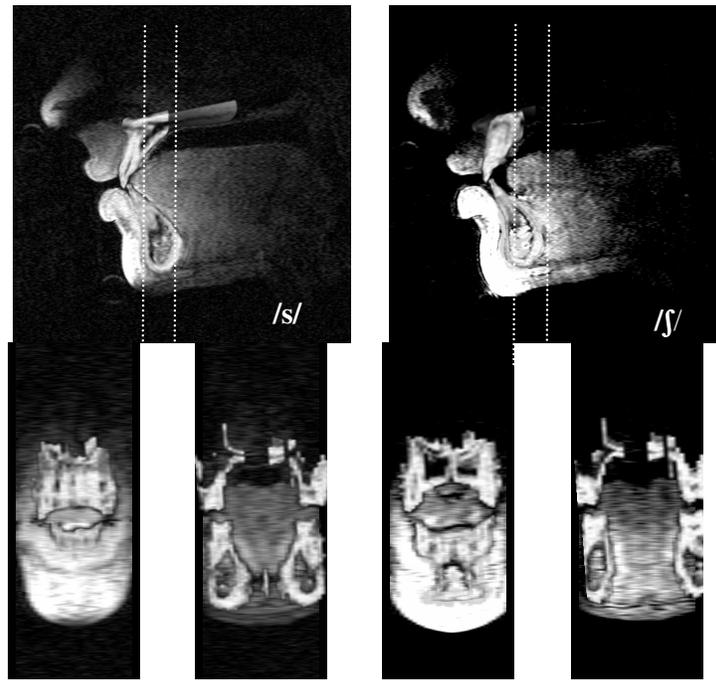


Figure 113. Coupes médio-sagittales (haut) et coronales (bas) des données IRM complétées des dents. A gauche, /s/ ; à droite, /ʃ/. Les lignes pointillées blanches sur les profils sagittaux indiquent l'emplacement approximatif des coupes coronales.

La locutrice Fr7 est la seule locutrice de français qui ait participé à cette étude. Elle était âgée d'une vingtaine d'années au moment de l'enregistrement. Les deux sibilantes semblent être moins différentes l'une de l'autre que pour les autres locuteurs du français. La forme de la langue est très semblable entre /s/ et /ʃ/. La constriction est plus postérieure pour /ʃ/, ce qui donne lieu à une petite cavité antérieure, quasi inexistante dans /s/.

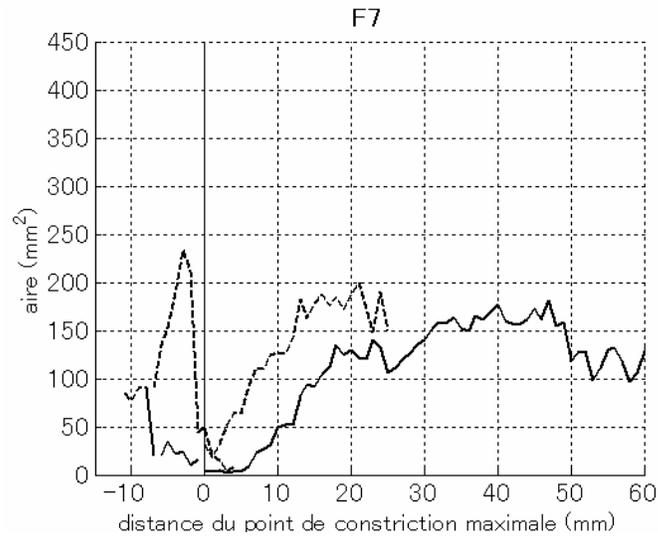


Figure 114. Fonctions d'aire de /s/ (lignes pleines) et /ʃ/ (lignes discontinues) ; mesures effectuées sur les coupes coronales perpendiculaires aux images d'origine.

Tableau 21. Description articulatoire qualitative de la locutrice Fr7.

	/s/	/ʃ/
Articulateur de la langue	lame de la langue	lame de la langue
Cible supérieure	dentale à alvéolaire	alvéolaire
Forme de la constriction	ellipsoïde	ellipsoïde
Forme sagittale du dos de la langue	plate	plate
Lèvres		pas de nette protrusion

Locuteur E1

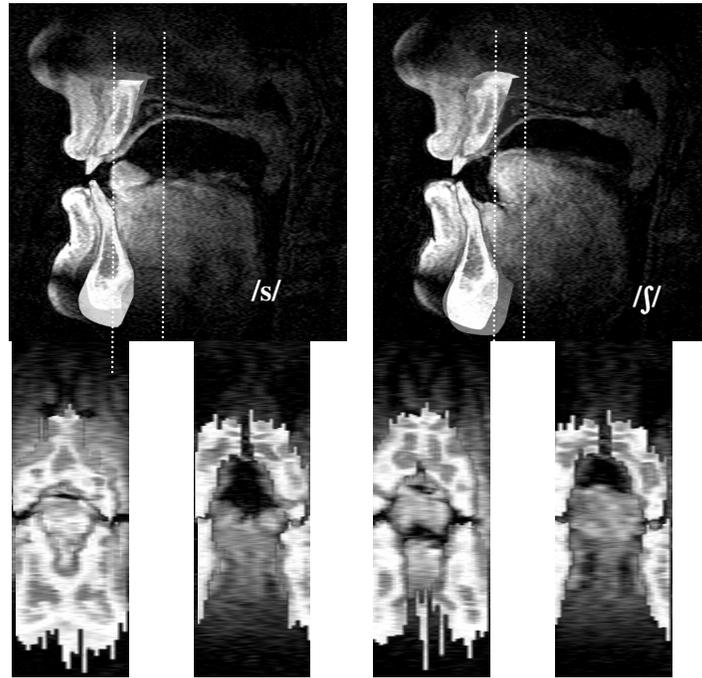


Figure 115. Coupes médio-sagittales (haut) et coronales (bas) des données IRM complétées des dents. A gauche, /s/ ; à droite, /ʃ/. Les lignes pointillées blanches sur les profils sagittaux indiquent l'emplacement approximatif des coupes coronales.

Le locuteur E1 est un locuteur masculin d'anglais américain, âgé d'une trentaine d'années à l'époque. Bien que la forme de la langue soit différente entre les deux sibilantes, l'articulation de /ʃ/ n'est pas palatalisée en comparaison à /s/, dû à la forme du palais, qui est très profond (haut). Pour ce locuteur, une cavité orale antérieure est observée pour les deux sibilantes, la taille de celle-ci étant plus grande pour /ʃ/. La pointe de la langue est mobilisée pour réaliser la constriction dans la sibilante /s/, avec un dos de la langue concave. En conséquence, la langue ne touche pas les incisives inférieures dans /s/.

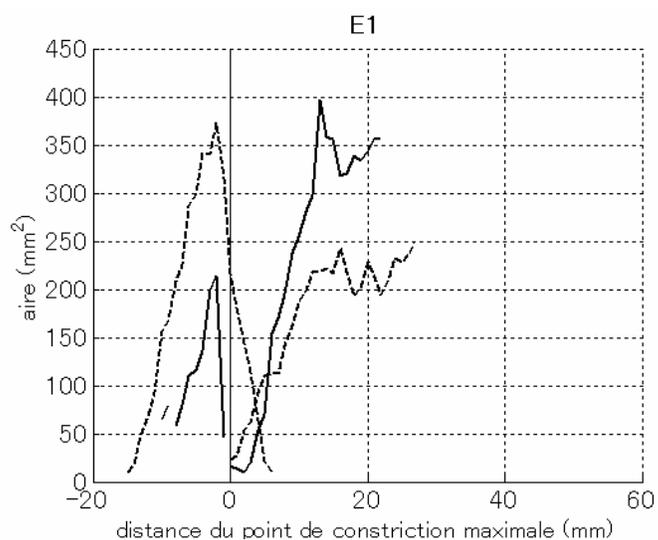


Figure 116. Fonctions d'aire de /s/ (lignes pleines) et /ʃ/ (lignes discontinues) ; mesures effectuées sur les coupes coronales perpendiculaires aux images d'origine.

Tableau 22. Description articulatoire qualitative du locuteur E1.

	/s/	/ʃ/
Articulateur de la langue	pointe de la langue	lame de la langue
Cible supérieure	alvéolaire	post-alvéolaire
Forme de la constriction	plate	ellipsoïde
Forme sagittale du dos de la langue	concave	plat
Région pharyngale	étroite	étroite
Lèvres		pas de nette protrusion

Locuteur E2

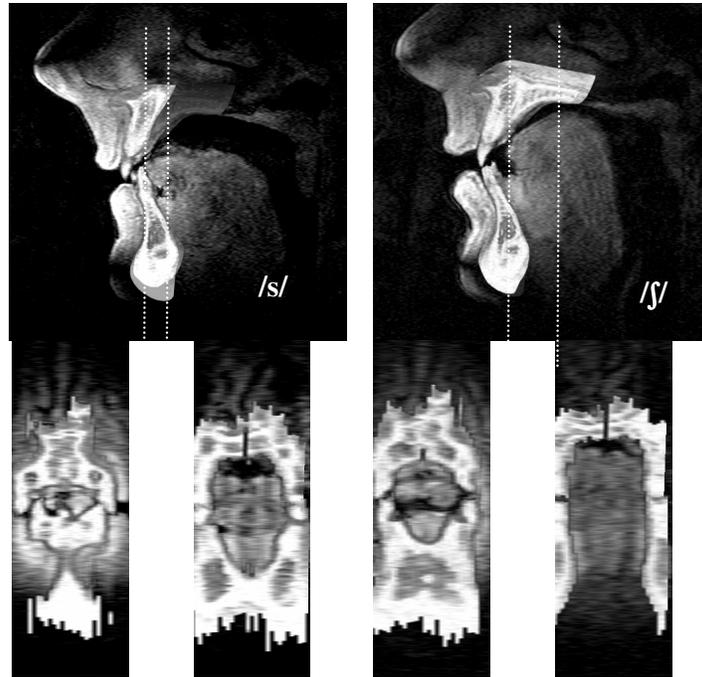


Figure 117. Coupes médio-sagittales (haut) et coronales (bas) des données IRM complétées des dents. A gauche, /s/ ; à droite, /ʃ/. Les lignes pointillées blanches sur les profils sagittaux indiquent l'emplacement approximatif des coupes coronales.

Le locuteur E2 est un locuteur d'anglais britannique âgé d'une trentaine d'années au moment de l'enregistrement.

La différence fondamentale entre /s/ et /ʃ/ réside dans la forme de la langue. Le dos de la langue est bombé dans /ʃ/, ce qui donne lieu à une palatalisation en comparaison à /s/. Le /s/ du locuteur E2 comprend une occlusion labio-dentale, tandis que les incisives supérieures et inférieures sont alignées pour /ʃ/.

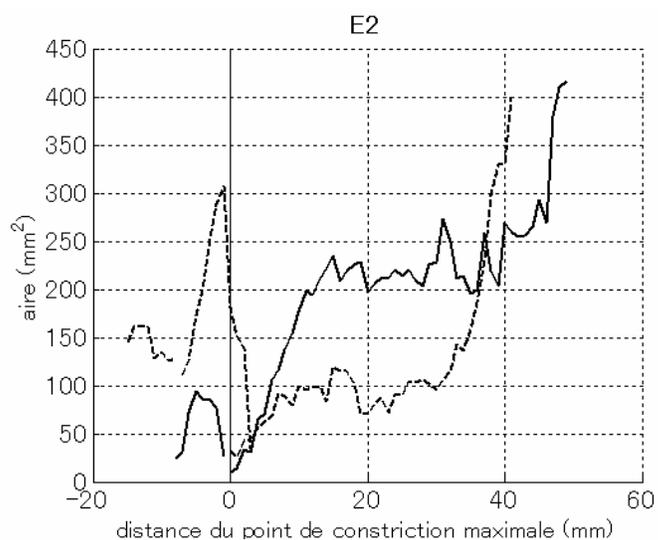


Figure 118. Fonctions d'aire de /s/ (lignes pleines) et /ʃ/ (lignes discontinues) ; mesures effectuées sur les coupes coronales perpendiculaires aux images d'origine.

Tableau 23. Description articulatoire qualitative du locuteur E2.

	/s/	/ʃ/
Articulateur de la langue	lame	lame à dos
Cible supérieure	dental à alvéolaire	alvéolaire à palatal
Forme sagittale du dos de la langue	plate	bombée
région pharyngale	étroite	large
Lèvres		protrusion par rapport à /s/

Locuteur E3

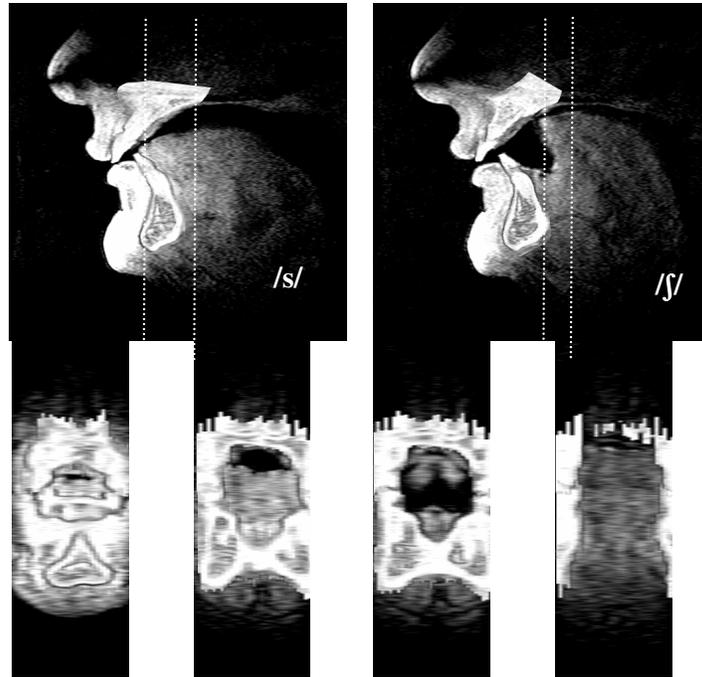


Figure 119. Coupes médio-sagittales (haut) et coronales (bas) des données IRM complétées des dents. A gauche, /s/ ; à droite, /ʃ/. Les lignes pointillées blanches sur les profils sagittaux indiquent l'emplacement approximatif des coupes coronales.

Le locuteur E3 est un locuteur d'anglais britannique âgé d'une trentaine d'années au moment de l'enregistrement. La différence entre /s/ et /ʃ/ est principalement due au recul de la langue, qui donne lieu à une grande cavité orale antérieure pour /ʃ/, qui est également palatalisé en comparaison à /s/ (cf. fonction d'aire). Ce locuteur présente une occlusion labio-dentale pour les deux sibilantes.

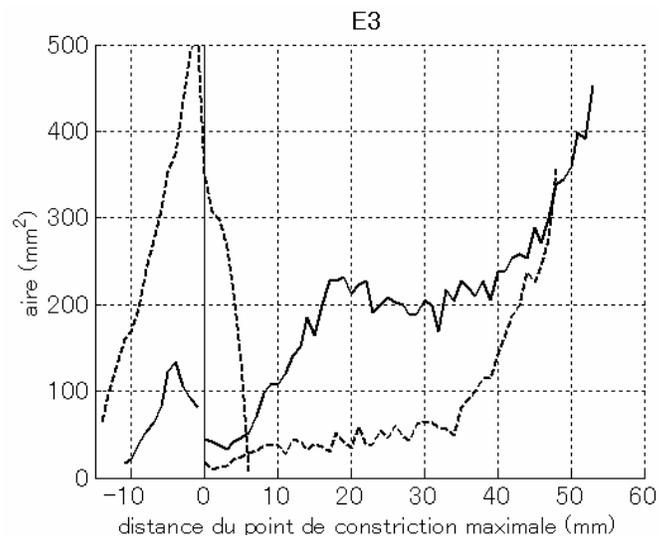


Figure 120. Fonctions d'aire de /s/ (lignes pleines) et /ʃ/ (lignes discontinues) ; mesures effectuées sur les coupes coronales perpendiculaires aux images d'origine.

Tableau 24. Description articulatoire qualitative du locuteur E3.

	/s/	/ʃ/
Articulateur de la langue	lame	lame
Cible supérieure	alvéolaire	prépalatale
Forme sagittale du dos de la langue	plate	légèrement bombée
Lèvres		pas de nette protrusion

Locuteur E4

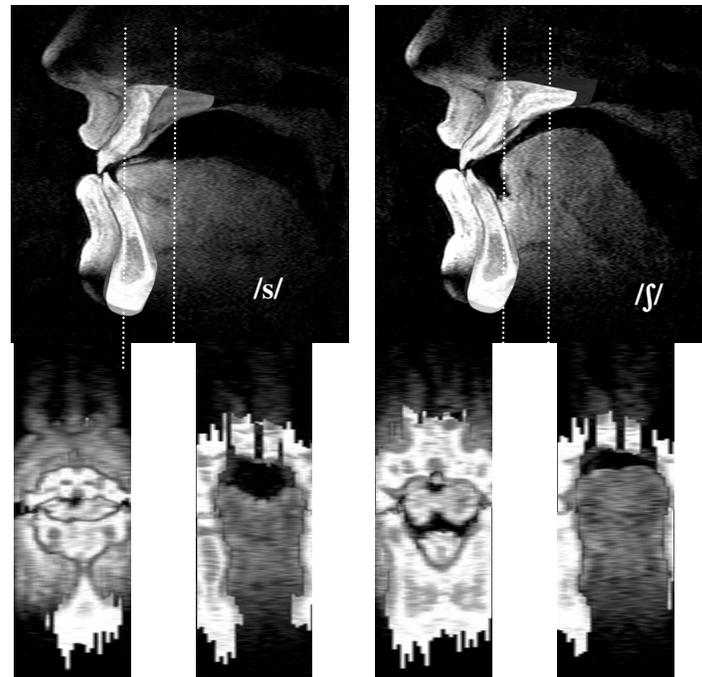


Figure 121. Coupes médio-sagittales (haut) et coronales (bas) des données IRM complétées des dents. A gauche, /s/ ; à droite, /ʃ/. Les lignes pointillées blanches sur les profils sagittaux indiquent l'emplacement approximatif des coupes coronales.

Le locuteur E4 est un locuteur d'anglais canadien. Il était âgé d'une vingtaine d'années au moment de l'enregistrement. La différence entre ses sibilantes /s/ et /ʃ/ réside surtout dans la forme de la langue, dont le dos est bombé pour /ʃ/, qui est légèrement palatalisé en comparaison à /s/.

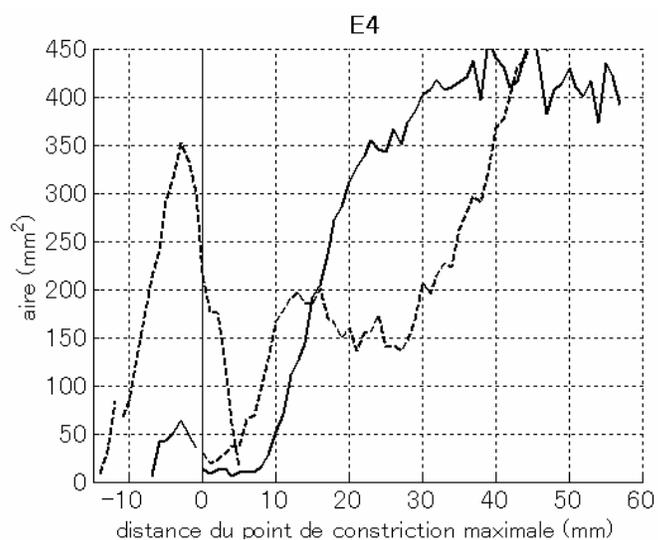


Figure 122. Fonctions d'aire de /s/ (lignes pleines) et /ʃ/ (lignes discontinues) ; mesures effectuées sur les coupes coronales perpendiculaires aux images d'origine.

Tableau 25. Description articulatoire qualitative du locuteur E4.

	/s/	/ʃ/
Articulateur de la langue	lame	lame et dos
Cible supérieure	dentale à alvéolaire	post-alvéolaire à prépalatale
Forme sagittale du dos de la langue	plate	bombée
région pharyngale	étroite	large
Lèvres		légère protrusion par rapport à /s/

Locuteur E5

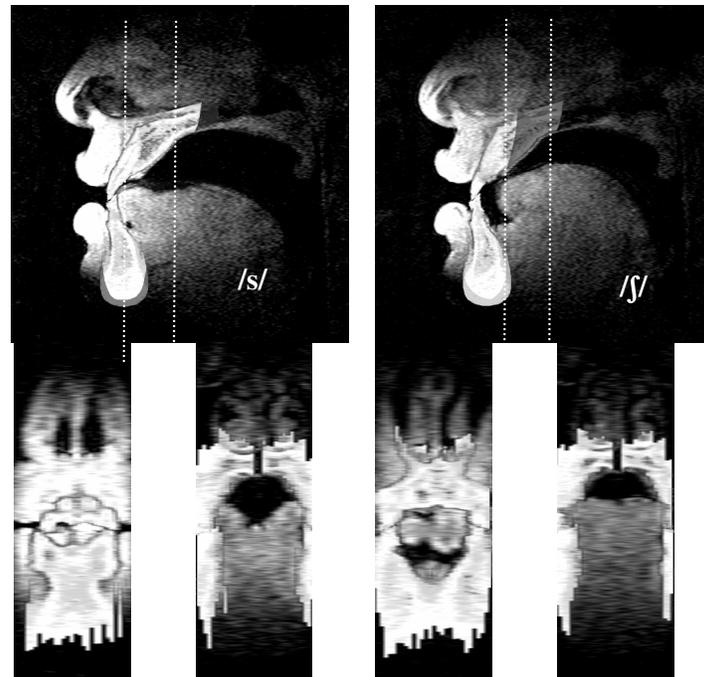


Figure 123. Coupes médio-sagittales (haut) et coronales (bas) des données IRM complétées des dents. À gauche, /s/ ; à droite, /ʃ/. Les lignes pointillées blanches sur les profils sagittaux indiquent l'emplacement approximatif des coupes coronales.

Le locuteur E5 est un locuteur d'anglais canadien. Bien qu'ayant grandi dans un environnement majoritairement anglophone, il a également été en contact avec une variété du chinois qui est la langue maternelle de ses parents. Il était âgé d'une vingtaine d'années au moment de l'enregistrement.

La différence entre /s/ et /ʃ/ réside dans la cavité orale antérieure, inexistante pour /s/ et de taille moyenne pour /ʃ/. Cette différence serait dû à la forme de la langue, qui est bombée pour /ʃ/, sans pour autant occasionner de palatalisation.

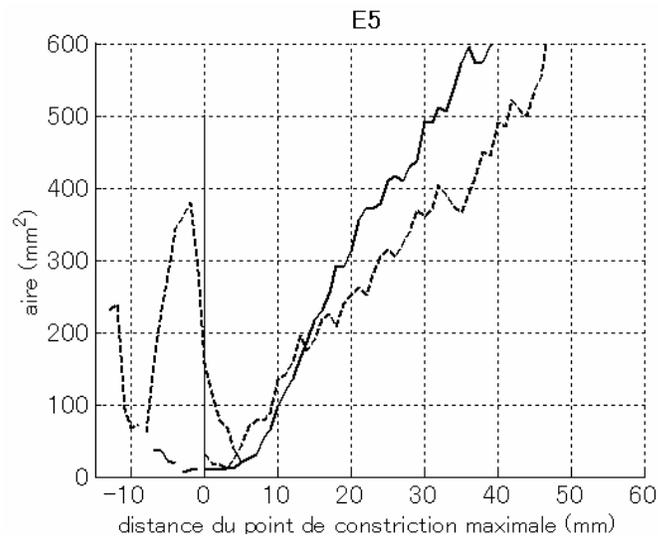


Figure 124. Fonctions d'aire de /s/ (lignes pleines) et /ʃ/ (lignes discontinues) ; mesures effectuées sur les coupes coronales perpendiculaires aux images d'origine.

Tableau 26. Description articulatoire qualitative du locuteur E5.

	/s/	/ʃ/
Articulateur de la langue	pointe de la langue	lame de la langue
Cible supérieure	dentale	alvéolaire
Forme sagittale du dos de la langue	concave	bombée
Lèvres		protruses par rapport à /s/

Récapitulation : description articulatoire qualitative, anglais

/s/

Trois locuteurs (E2, E3, E4) sur les cinq ont une articulation apicale pour /s/. Les deux autres locuteurs (E1, E5) ont une articulation laminaire. Le locuteur E1 suivi du locuteur E4 présente une cavité orale antérieure dont la taille est cependant inférieure à celles de /ʃ/. La cible supérieure est dentale (E5), denti-alvéolaire (E2, E4) ou alvéolaire (E1, E3). Cette tendance à la variation inter-individuelle, pour l'anglais comme pour le français, rejoint les résultats de Dart (1998).

/ʃ/

Le contraste avec /s/ fait appel, comme pour le français, au bombement du dos de la langue pour /ʃ/ (E1, E2, E4, E5) ou à un positionnement plus postérieur de la langue (E3). Il en résulte une sibilante plus palatalisée en référence à /s/ chez trois locuteurs (E2, E3, E4). La taille de la cavité antérieure varie de 10 à 20 mm en longueur et de 350 à 500 mm² en aire maximale. Ces valeurs sont comparables à celles du français.

Annexes

Locuteur J1

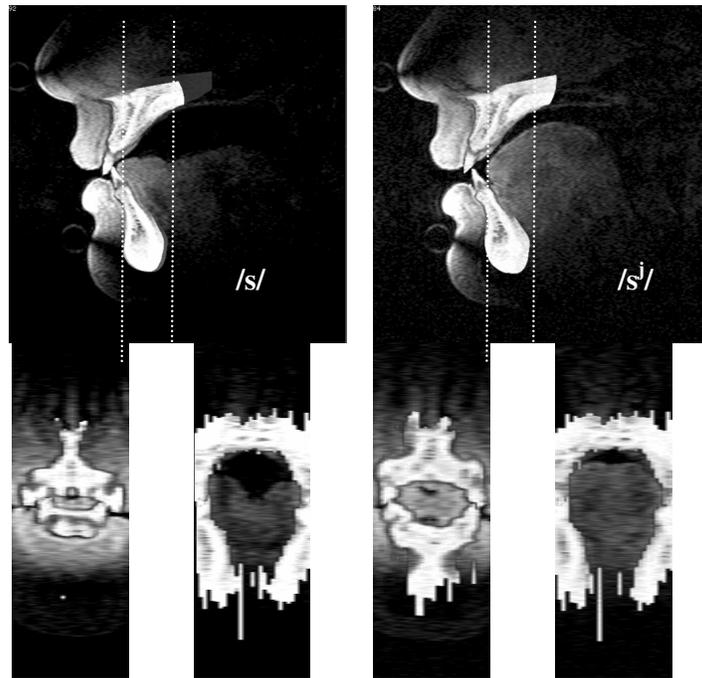


Figure 125. Coupes médio-sagittales (haut) et coronales (bas) des données IRM complétées des dents. A gauche, /s/ ; à droite, /sʲ/. Les lignes pointillées blanches sur les profils sagittaux indiquent l'emplacement approximatif des coupes coronales.

Le locuteur J1 est un locuteur du japonais originaire d'Osaka (dialecte kansai). Il était âgé d'une quarantaine d'années au moment de l'enregistrement. La différence entre les deux sibilantes /s/ et /sʲ/ réside surtout dans la forme de la langue, où le dos est bombé pour /sʲ/, qui est palatalisé (cf. fonction d'aire). La cavité orale antérieure est quasi inexistante pour les deux sibilantes.

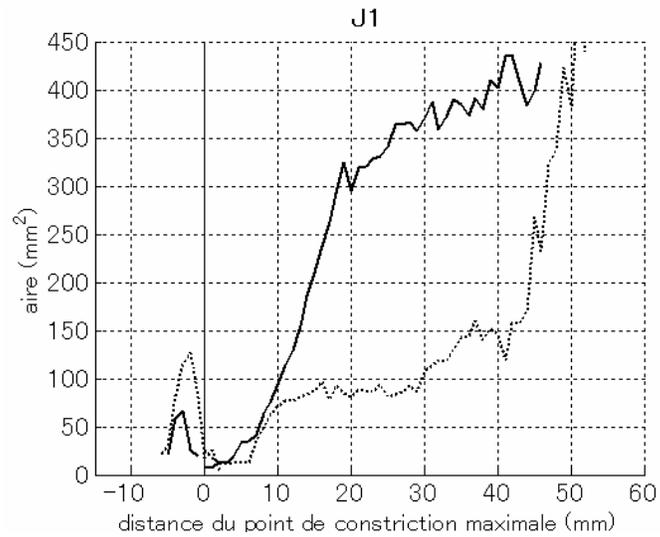


Figure 126. Fonctions d'aire de /s/ (lignes pleines) et /sʲ/ (pointillées) ; mesures effectuées sur les coupes coronales perpendiculaires aux images d'origine.

Tableau 27. Description articulatoire qualitative du locuteur J1.

	/s/	/sʲ/
Articulateur de la langue	pointe de la langue	lame et dos
Cible supérieure	dentale	alvéolaire à palatale
Forme sagittale du dos de la langue	concave	bombée

Locuteur J2

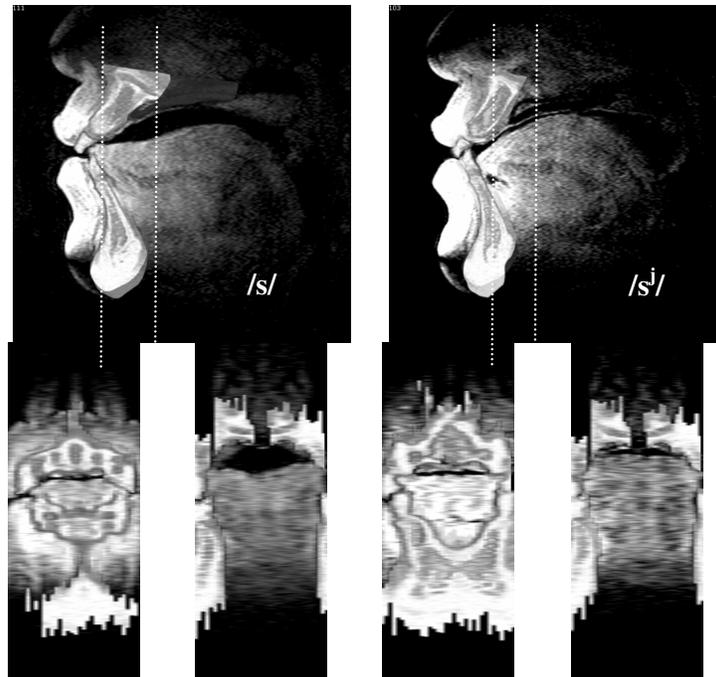


Figure 127. Coupes médio-sagittales (haut) et coronales (bas) des données IRM complétées des dents. A gauche, /s/ ; à droite, /sʲ/. Les lignes pointillées blanches sur les profils sagittaux indiquent l'emplacement approximatif des coupes coronales.

Le locuteur J2 est un locuteur du japonais originaire du nord (Hokkaido). Il était âgé d'une quarantaine d'années au moment de l'enregistrement.

Dans les deux sibilantes, la pointe de la langue touche les incisives (supérieures pour /s/ et inférieures pour /sʲ/). La cavité orale antérieure est quasi inexistante pour les deux fricatives. La différence entre les deux sibilantes réside dans la forme de la langue, plate pour /s/ et bombée pour /sʲ/., cette dernière étant palatalisé en comparaison à /s/.

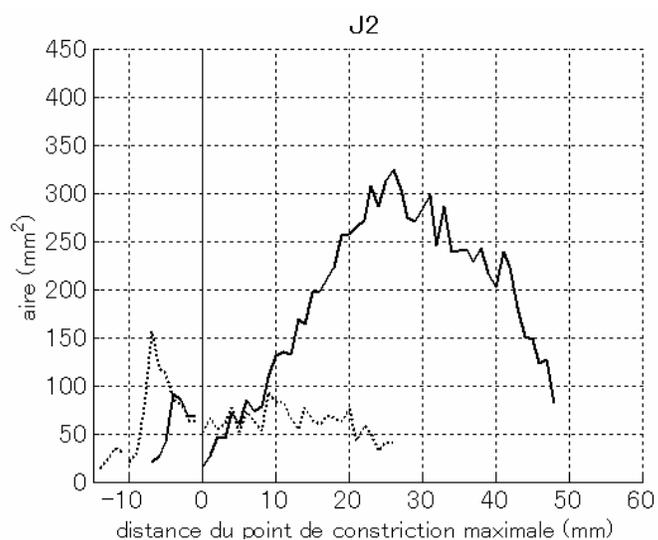


Figure 128. Fonctions d'aire de /s/ (lignes pleines) et /sj/ (pointillées) ; mesures effectuées sur les coupes coronales perpendiculaires aux images d'origine.

Tableau 28. Description articulatoire qualitative du locuteur J2.

	/s/	/sʲ/
Articulateur de la langue	pointe de la langue	lame et dos
Cible supérieure	dentale	alvéolaire à palatale
Forme sagittale du dos de la langue	plat	bombé
région pharyngale	étroite	large

Locuteur J3

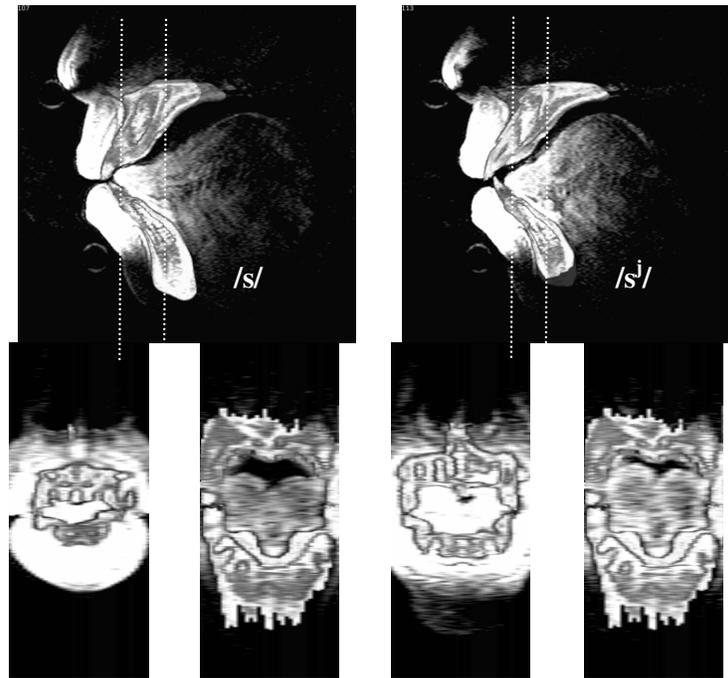


Figure 129. Coupes médio-sagittales (haut) et coronales (bas) des données IRM complétées des dents. A gauche, /s/ ; à droite, /sʲ/. Les lignes pointillées blanches sur les profils sagittaux indiquent l'emplacement approximatif des coupes coronales.

Le locuteur J3 est un locuteur de japonais originaire du kanto (dialecte de Tokyo), âgé d'une cinquantaine d'années. La différence entre /s/ et /sʲ/ se manifeste par une articulation apicale pour /s/ et laminaire pour /sʲ/. Dans cette dernière, la langue longe le palais pour donner lieu à une palatalisation.

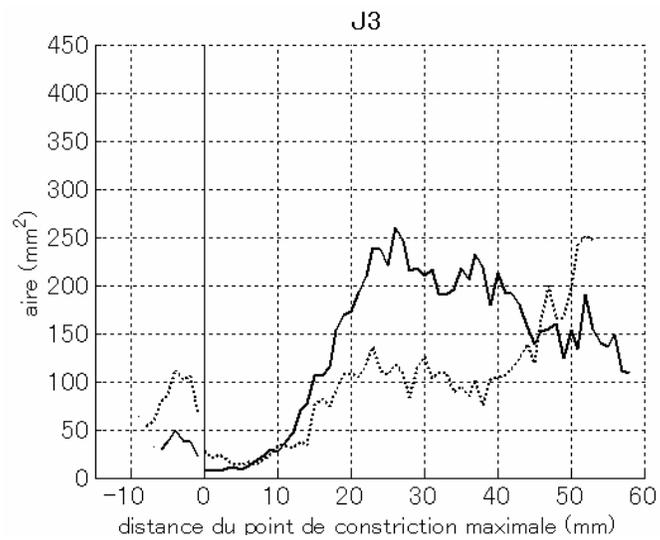


Figure 130. Fonctions d'aire de /s/ (lignes pleines) et /sʲ/ (pointillées) ; mesures effectuées sur les coupes coronales perpendiculaires aux images d'origine.

Tableau 29. Description articulatoire qualitative du locuteur J3.

	/s/	/sʲ/
Articulateur de la langue	pointe de la langue	lame et dos
Cible supérieure	dentale	alvéolaire à palatale
Forme sagittale du dos de la langue	plat	bombé
région pharyngale	étroite	large

Locuteur J4

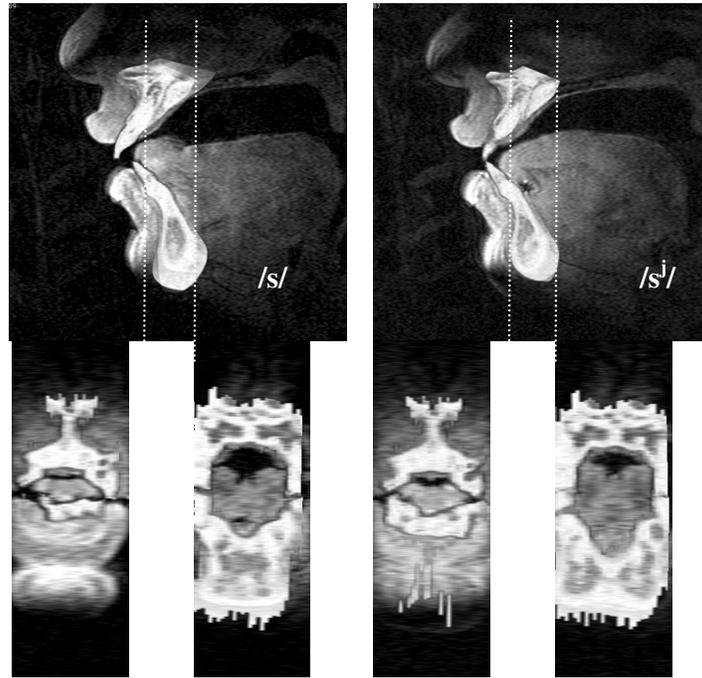


Figure 131. Coupes médio-sagittales (haut) et coronales (bas) des données IRM complétées des dents. A gauche, /s/ ; à droite, /sʲ/. Les lignes pointillées blanches sur les profils sagittaux indiquent l'emplacement approximatif des coupes coronales.

Le locuteur J4 est un locuteur de japonais originaire de la région kansai, âgé d'une quarantaine d'années. Dans les deux sibilantes, la langue touche les incisives. Pour ce locuteur, /sʲ/ est relativement peu palatalisé, comme il apparaît dans la fonction d'aire. La différence entre les deux fricatives réside toutefois dans la forme de la langue, concave pour /s/. Remarquons également une occlusion labio-dentale pour /s/, tandis que les incisives supérieures et inférieures sont alignées pour /sʲ/.

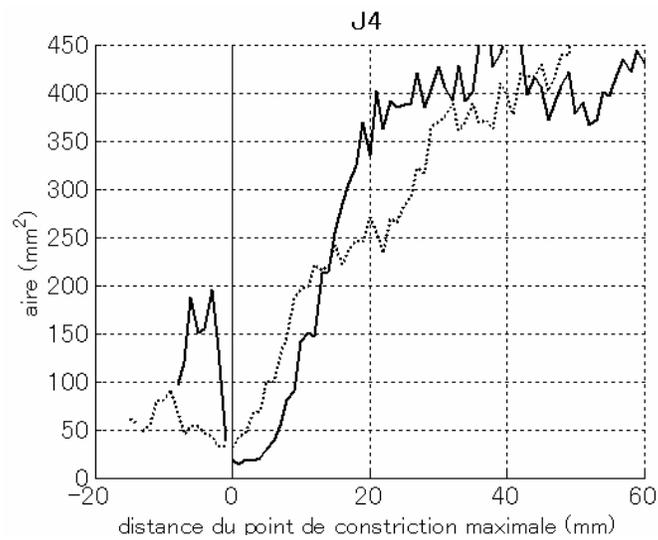


Figure 132. Fonctions d'aire de /s/ (lignes pleines) et /sj/ (pointillées) ; mesures effectuées sur les coupes coronales perpendiculaires aux images d'origine.

Tableau 30. Description articulatoire qualitative du locuteur J4.

	/s/	/sʲ/
Articulateur de la langue	pointe de la langue	lame de la langue
Cible supérieure	dentale à alvéolaire	alvéolaire
Forme sagittale du dos de la langue	concave	plate
région pharyngale	étroite	large

Locutrice J5

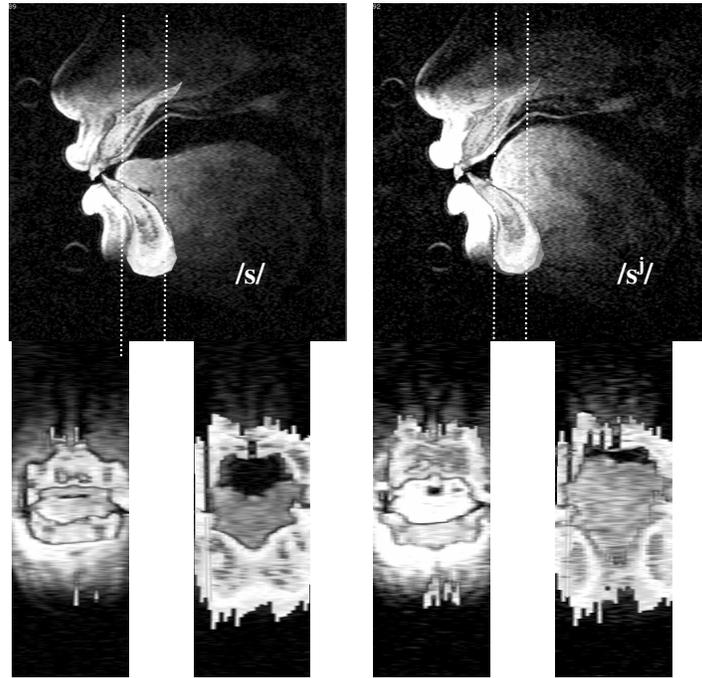


Figure 133. Coupes médio-sagittales (haut) et coronales (bas) des données IRM complétées des dents. A gauche, /s/ ; à droite, /sʲ/. Les lignes pointillées blanches sur les profils sagittaux indiquent l'emplacement approximatif des coupes coronales.

La locutrice J5 est une locutrice de japonais originaire d'Osaka (kansai), âgée d'une trentaine d'années au moment de l'enregistrement.

Le dos de la langue est plat pour /s/ et bombé pour /sʲ/, ce qui donne lieu à une palatalisation pour ce dernier. La cavité orale antérieure est légèrement plus grande pour /sʲ/.

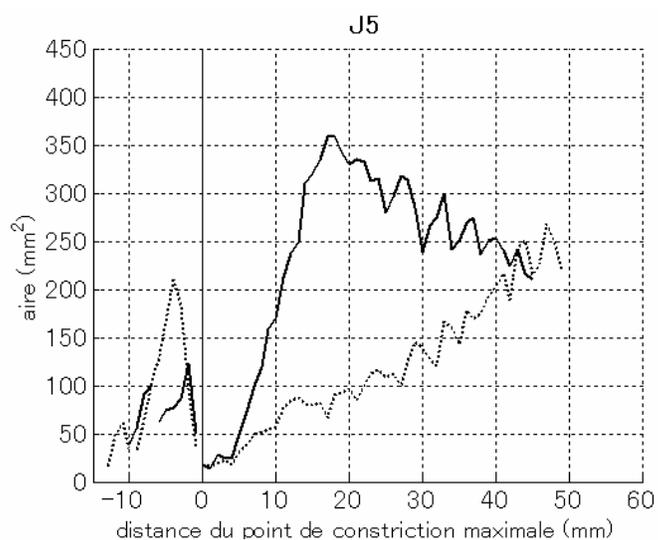


Figure 134. Fonctions d'aire de /s/ (lignes pleines) et /sʰ/ (pointillées) ; mesures effectuées sur les coupes coronales perpendiculaires aux images d'origine.

Tableau 31. Description articulatoire qualitative de la locutrice J5.

	/s/	/sʰ/
Articulateur de la langue	pointe de la langue	lame et dos
Cible supérieure	alvéolaire	post-alvéolaire à palatale
Forme sagittale du dos de la langue	plate	bombée
bas pharynx	étroit	étroit

Locutrice J6

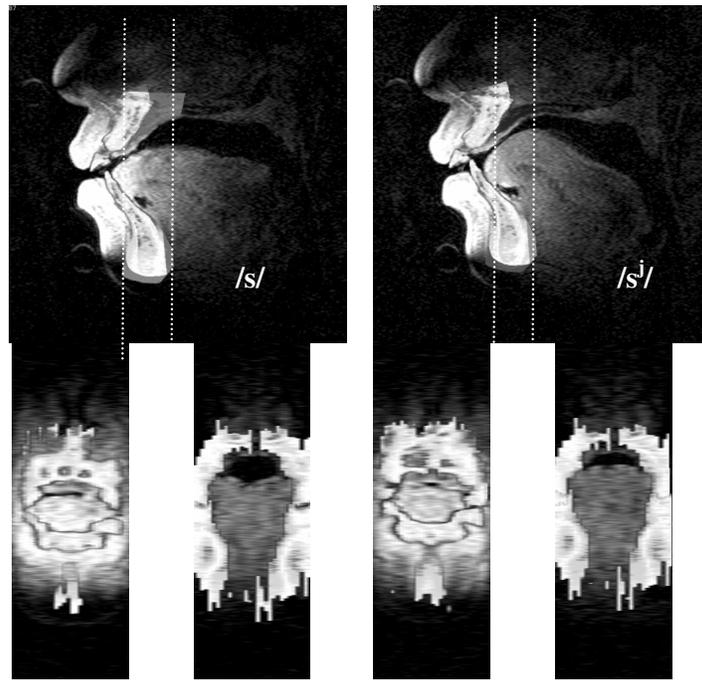


Figure 135. Coupes médio-sagittales (haut) et coronales (bas) des données IRM complétées des dents. A gauche, /s/ ; à droite, /sʲ/. Les lignes pointillées blanches sur les profils sagittaux indiquent l'emplacement approximatif des coupes coronales.

Cette locutrice, issue de la région kansai et âgée d'une trentaine d'année, présente une articulation laminaire pour /s/, mais un sillon est visible sur la coupe coronale du dos de la langue, ce qui l'apparente aux /s/ des autres locuteurs en opposition à /sʲ/. Quant à /sʲ/, la locutrice J6 bombe la partie prédorsale de la langue et non le dos. il en résulte une constriction palatalisée moins longue.

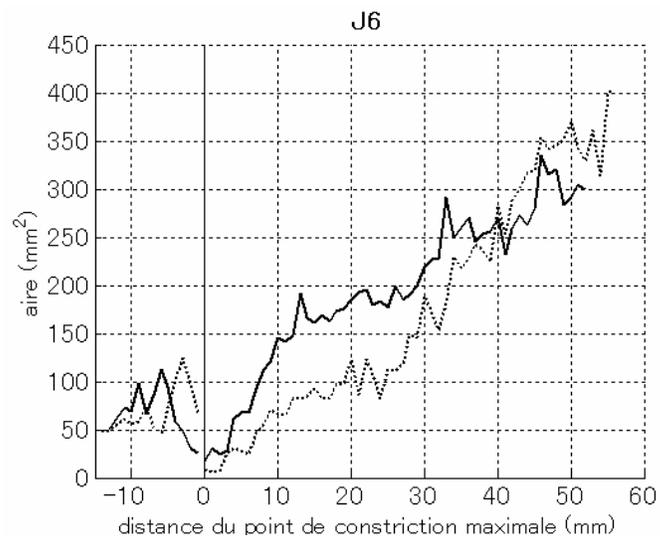


Figure 136. Fonctions d'aire de /s/ (lignes pleines) et /sʰ/ (pointillées) ; mesures effectuées sur les coupes coronales perpendiculaires aux images d'origine.

Tableau 32. Description articulatoire qualitative de la locutrice J6.

	/s/	/sʰ/
Articulateur de la langue	lame	lame et predorsum
Cible supérieure	alvéolaire	alvéolaire à prépalatale
Forme sagittale du dos de la langue	plate	bombée

Locutrice J7

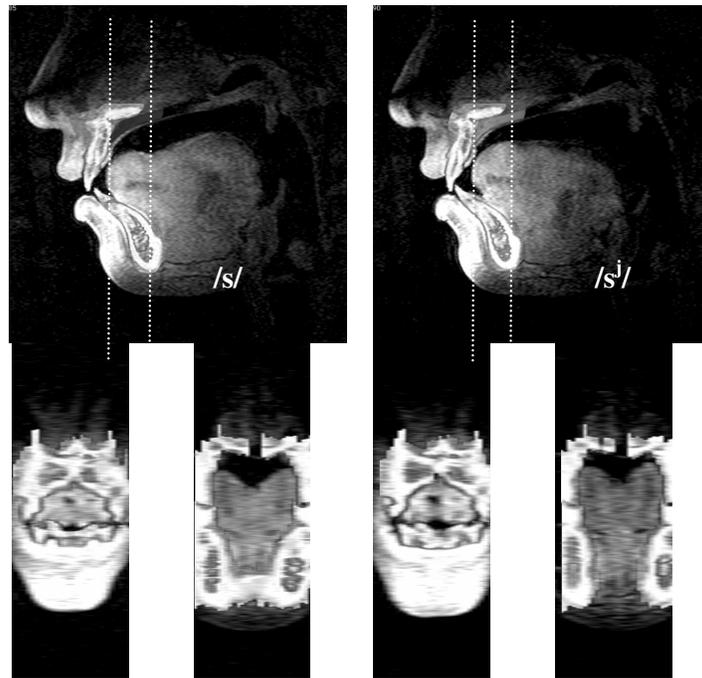


Figure 137. Coupes médio-sagittales (haut) et coronales (bas) des données IRM complétées des dents. À gauche, /s/ ; à droite, /sʲ/. Les lignes pointillées blanches sur les profils sagittaux indiquent l'emplacement approximatif des coupes coronales.

La locutrice J7 est une locutrice de japonais originaire de Nara (kansai), âgée d'une vingtaine d'années au moment de l'enregistrement.

Bien que son /sʲ/ soit réalisé avec le prédorsum bombé sur le profil sagittal, la constriction est relativement courte et la fonction d'aire indique qu'il n'existe pas une grande différence de morphologie du conduit vocal entre les deux sibilantes en arrière de la constriction. De plus, une cavité sublinguale est observée pour les deux sibilantes, et leur taille est comparable. Il existe un rétrécissement vélaire pour /s/ en comparaison à /sʲ/.

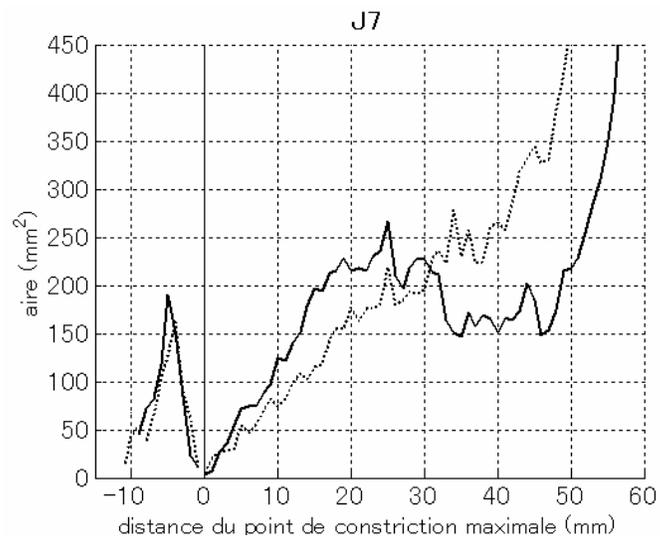


Figure 138. Fonctions d'aire de /s/ (lignes pleines) et /sʲ/ (pointillées) ; mesures effectuées sur les coupes coronales perpendiculaires aux images d'origine.

Tableau 33. Description articulatoire qualitative de la locutrice J7.

	/s/	/sʲ/
Articulateur de la langue	pointe de la langue	lame de la langue
Cible supérieure	alvéolaire	alvéolaire
Forme sagittale du dos de la langue	concave	bombée
région pharyngale	large	très large

Locutrice J8

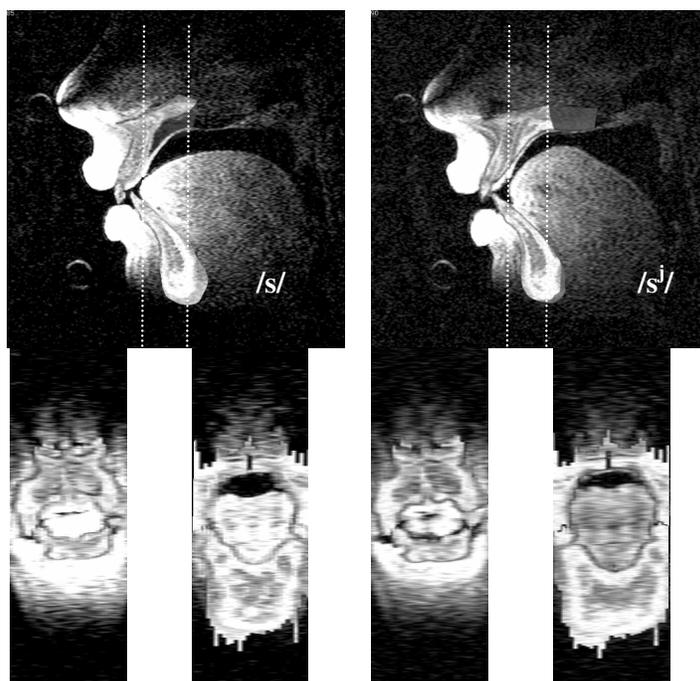


Figure 139. Coupes médio-sagittales (haut) et coronales (bas) des données IRM acquises en position allongée sur le dos, complétées des dents. A gauche, /s/ ; à droite, /sʲ/. Les lignes pointillées blanches sur les profils sagittaux indiquent l'emplacement approximatif des coupes coronales.

La locutrice J8 est une locutrice de japonais originaire de Ibaragi (kantô). Cette locutrice était âgée d'une trentaine d'années au moment de l'enregistrement.

Cette locutrice a produit les sibilantes cibles en deux positions, allongée sur le dos (Figure 139) et allongée sur le ventre (Figure 140). Aucune des deux positions ne correspond à la position verticale habituelle de l'élocution, mais la comparaison des deux positions permet de prendre la mesure de l'effet de la gravitation ou de la position du cou¹³⁵ sur la forme du conduit vocal.

¹³⁵ Toutefois, avec le protocole utilisé, le larynx n'est pas visible. Il n'est donc pas possible de considérer l'effet de la position du larynx (auquel la langue est attaché) sur l'articulation.

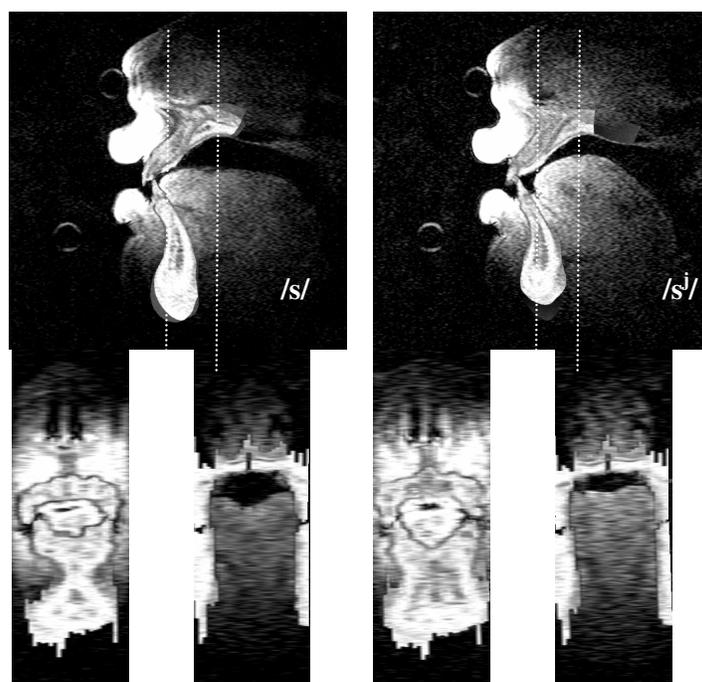


Figure 140. Coupes médio-sagittales (haut) et coronales (bas) des données IRM de la locutrice J8 acquises en position allongée sur le ventre, pour comparaison, complétées des dents. A gauche, /s/ ; à droite, /sʰ/. Les lignes pointillées blanches sur les profils sagittaux indiquent l'emplacement approximatif des coupes coronales.

Dans les deux positions, /sʰ/ présente systématiquement un prédorsum bombé, tandis que /s/ présente une langue relativement plate. /s/ présente également une cavité orale antérieure, de petite taille, alors qu'elle est inexistante pour /sʰ/.

Dans la position allongée sur le ventre, les lèvres sont nettement plus protrusées mais aussi ouvertes que dans la position allongée sur le dos. Ceci est valable pour les deux sibilantes, et suggère que la forme des lèvres est indifférente (n'est pas contrôlée) pour la production de ces sons. En conséquence, on observe une occlusion labio-dentale dans /s/ en position sur le dos, alors que les incisives supérieures et inférieures sont rapprochées dans la position sur le ventre. Quant à la langue, elle est plus plate pour /s/ en position sur le ventre que sur le dos, sur le plan sagittal, avec un sillon de la langue plus profond sur le plan coronal. L'activité du génio-glosse postérieur dans la position supine (sur le dos), afin d'amener la langue vers le haut, pour réaliser une constriction, et l'activité du génio-glosse antérieur ou moyen pour maintenir un passage entre le palais et la langue (afin de contrecarrer l'effet de la gravitation qui tire la langue vers le bas, c'est-à-dire vers la partie antérieure du palais) dans la position prone (sur le ventre) peuvent être suggérées. /sʰ/ présente peu de différence perceptible de l'articulation. La paroi pharyngale n'étant pas visible sur les images de la position prone, il est difficile d'effectuer des comparaisons avec ex. Engwall (2003), qui a observé une cavité pharyngale plus large dans la position supine en référence à la position prone.

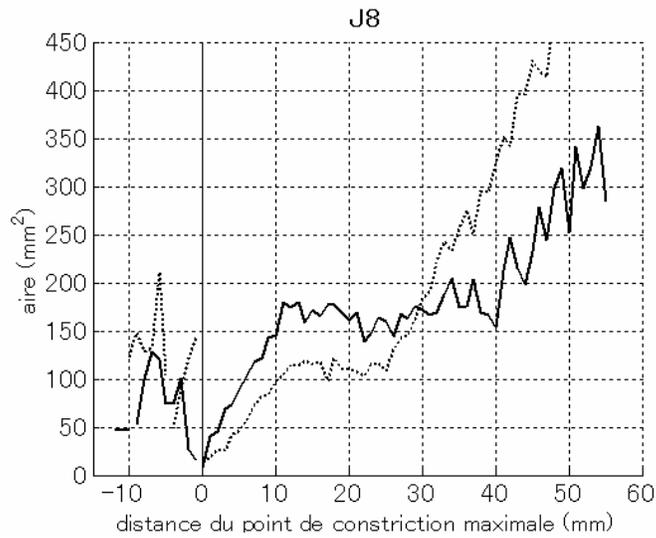


Figure 141. Fonctions d'aire de /s/ (lignes pleines) et /sʰ/ (pointillées) ; mesures effectuées sur les coupes coronales perpendiculaires aux images d'origine acquises en position allongée sur le dos.

Tableau 34. Description articulatoire qualitative de la locutrice J8.

	/s/	/sʰ/
Articulateur de la langue	lame	lame et prédorsum
Cible supérieure	alvéolaire (sur le dos) ou dentale à alvéolaire (sur le ventre)	post-alvéolaire
Forme sagittale du dos de la langue	plate	bombée
bas-pharynx	étroit	étroit

Annexes

Locuteur J9

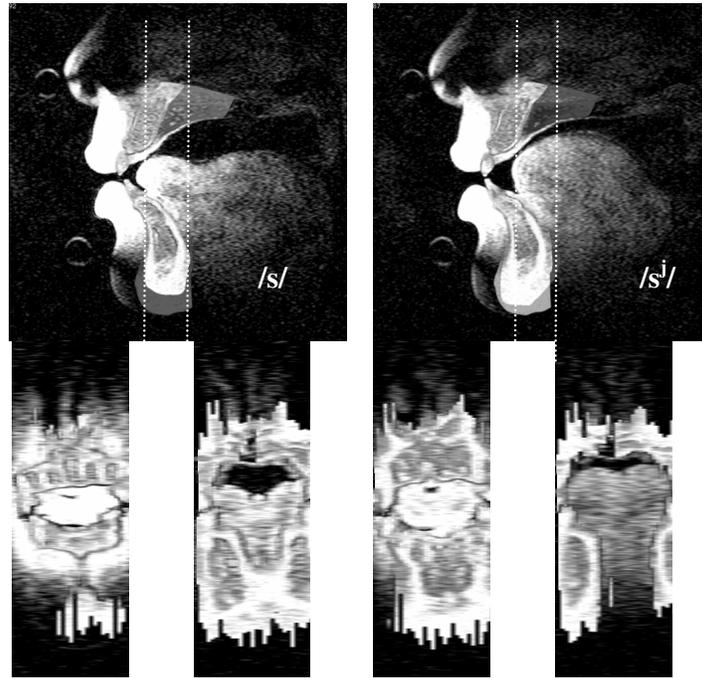


Figure 142. Coupes médio-sagittales (haut) et coronales (bas) des données IRM complétées des dents. A gauche, /s/ ; à droite, /sʲ/. Les lignes pointillées blanches sur les profils sagittaux indiquent l'emplacement approximatif des coupes coronales.

Le locuteur J9 est un locuteur de japonais originaire de Tottori (dialecte apparenté à celui de kansai), âgé d'une trentaine d'années. Dans /sʲ/, une cavité orale antérieure relativement importante en comparaison aux autres locuteurs de japonais est visible, de même qu'un dos de la langue bombée, qui donne lieu à une articulation palatalisée.

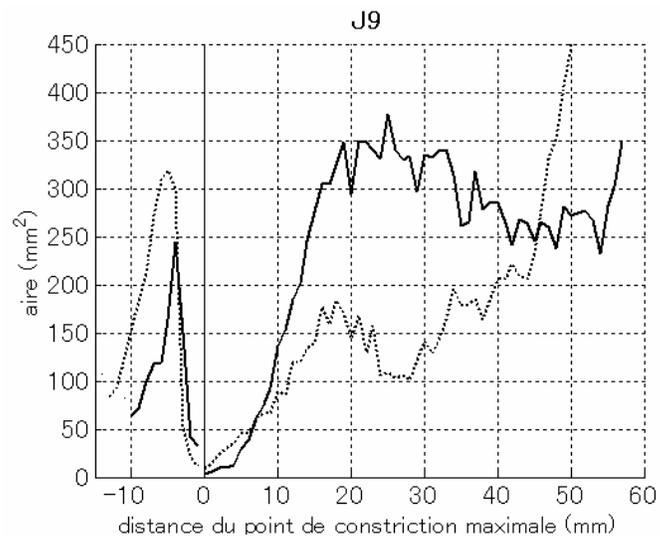


Figure 143. Fonctions d'aire de /s/ (lignes pleines) et /sj/ (pointillées) ; mesures effectuées sur les coupes coronales perpendiculaires aux images d'origine.

Tableau 35. Description articulatoire qualitative du locuteur J9.

	/s/	/sʲ/
Articulateur de la langue	pointe de la langue	lame et dos
Cible supérieure	alvéolaire	post-alvéolaire à palatale
Forme du dos de la langue	concave	bombée
région pharyngale	étroite	large

Récapitulation : description articulatoire qualitative, japonais

/s/

/s/ est réalisé dental, denti-alvéolaire ou alvéolaire. Il est plus souvent apical que laminal (J6, J8), et le dos de la langue, qui est soit concave, soit plat, est moins bombée en comparaison à /s^j/ chez tous les locuteurs. On observe chez quelques locuteurs une petite cavité orale antérieure distincte de la constriction (J5, J7, J9), mais qui ne dépasse jamais celle de /s^j/.

/s^j/

La fricative sibilante /s^j/ est réalisée avec une cible alvéolaire à palatale, avec une constriction plus longue que /s/. La constriction peut être réalisée avec la lame de la langue, le predorsum ou le dos, avec une forme de la langue convexe. Contrairement à /ʃ/ en français ou en anglais, la langue touche les incisives inférieures à l'exception du locuteur J9, et on n'observe jamais de cavité sublinguale. Cet aspect apparenterait cette fricative au son [ʂ] de l'ubykh, une post-alvéolaire où la pointe de la langue touche les incisives inférieures, décrite par Catford et reprise dans Ladefoged et Maddieson (1996). D'après les symboles de l'API, on pourrait simplement la transcrire par une alvéolaire laminaire [ʂ] ou une alvéolo-palatale [ç], bien qu'elle diffère de certaines alvéolo-palatales du chinois et du polonais (v. sections suivantes) en ce qu'elle n'est pas aussi postérieure. La forme des lèvres ne contribue pas au contraste entre les deux sibilantes en japonais.

Tandis que la logique du système phonologique encouragerait l'utilisation des symboles /s/ et /s^j/ pour transcrire les sibilantes sourdes du japonais, on pourrait représenter ces sons par les symboles [s̥ ou s] et [s̥^j ou ç], respectivement, d'après leur articulation. L'utilisation du symbole [ʃ], par assimilation au son de l'anglais et du français dont il est proche par la forme typiquement bombée de la langue, ne serait pas appropriée, en raison de l'espace entre la langue et les incisives inférieures qui est inhérent à ce son (cf. Perkell *et al.* 1979). Ces résultats sont en accord avec ceux de Hashi et Honda (2000), qui ont également constaté une différence significative de la distance de la partie antérieure de la langue avec les incisives inférieures pour le /s^j/ japonais en comparaison au /ʃ/ anglais (18 et 20 locuteurs, respectivement).

Annexes

Locutrice FrJ

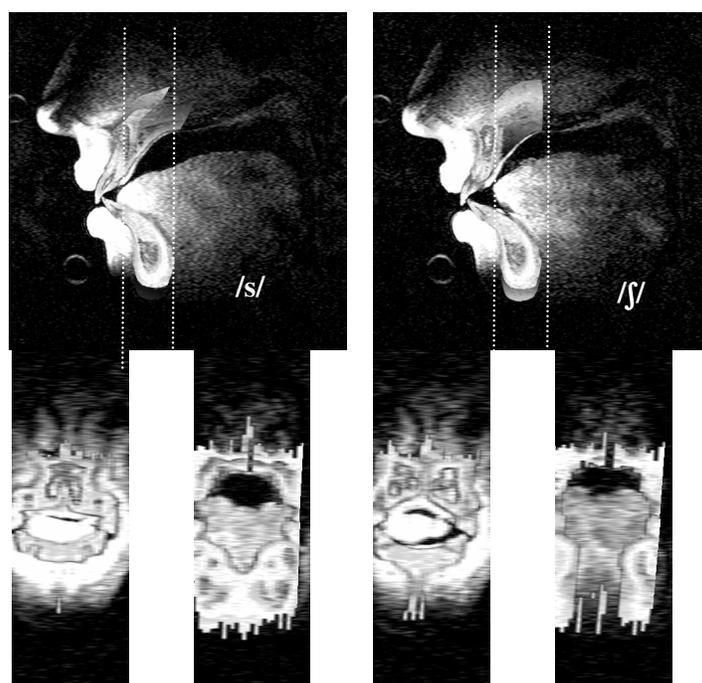


Figure 144. Coupes médio-sagittales (haut) et coronales (bas) des données IRM pour le français, produite par la locutrice bilingue FrJ, complétées des dents. A gauche, /s/ ; à droite, /ʃ/. Les lignes pointillées blanches sur les profils sagittaux indiquent l'emplacement approximatif des coupes coronales.

Tableau 36. Description articulatoire qualitative de la locutrice FrJ.

	/s/	/ʃ/
Articulateur de la langue	lame	pointe
Cible supérieure	alvéolaire	post-alvéolaire
Forme du dos de la langue	plat	bombé
Lèvres		pas de nette protrusion

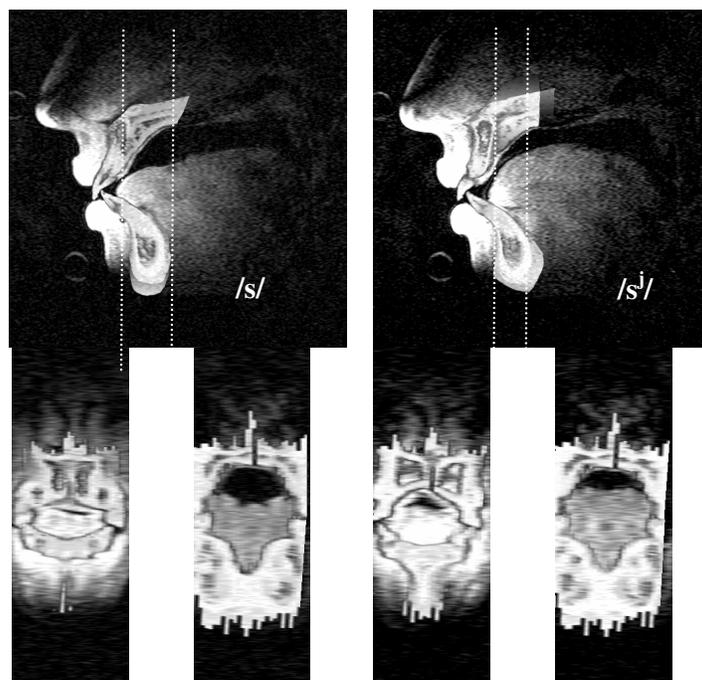


Figure 145. Coupes médio-sagittales (haut) et coronales (bas) des données IRM pour le japonais, produites par la locutrice bilingue FrJ, complétées des dents. A gauche, /s/ ; à droite, /sʲ/. Les lignes pointillées blanches sur les profils sagittaux indiquent l'emplacement approximatif des coupes coronales.

Tableau 37. Description articulatoire qualitative de la locutrice FrJ.

	/s/	/sʲ/
Articulateur de la langue	lame	lame et predorsum
Cible supérieure	alvéolaire	post-alvéolaire
Forme du dos de la langue	plat	bombé

La locutrice FrJ (auteur de cette thèse) est une locutrice bilingue de français et de japonais (dialecte de la région kanto). Originnaire du Québec (francophone) où elle est demeurée jusqu'à l'âge de 7 ans, elle a vécu au japon de 7 à 18 ans, et en France de 18 à 26 ans. Les deux langues étaient pratiquées au foyer familial. La maîtrise des deux langues peut être considérée à peu près égale. Elle était âgée de 26 ans au moment de l'acquisition des données.

Aussi bien pour le français que pour le japonais, la forme de la langue diffère entre les deux sibilantes, où elle est plus plate pour les /s/. La sibilante japonaise /sʲ/ est toutefois réalisée avec un dos de la langue plus bombé que la sibilante française /s/. Une cavité

orale antérieure est observée dans toutes les sibilantes, la plus grande étant celle de /s/₍fr₎ suivi de /sʲ/₍jp₎. Il est intéressant de noter que la langue touche la base des incisives inférieures dans /sʲ/₍jp₎ mais pas dans /s/₍fr₎.

Les deux /s/ sont réalisés de manière très semblable, si ce n'est que /s/₍fr₎ présente une constriction pharyngale légèrement plus importante (ce qui peut être soit intentionnel soit dû au hasard d'une répétition à l'autre), sans apparaître atypique au regard ni des données des locuteurs de français ni de celles de japonais dont nous avons fait la revue auparavant. Il est difficile de déterminer si la similitude entre les deux /s/ tient à la spécificité morphologique de cette locutrice, qui aurait été amenée à adopter cette même articulation même dans le cas où elle aurait suivi un développement monolingue français ou japonais, ou, au contraire, si son bilinguisme en est responsable, ces /s/ ayant été réalisés autrement si elle n'avait été exposée qu'à une seule langue à la fois.

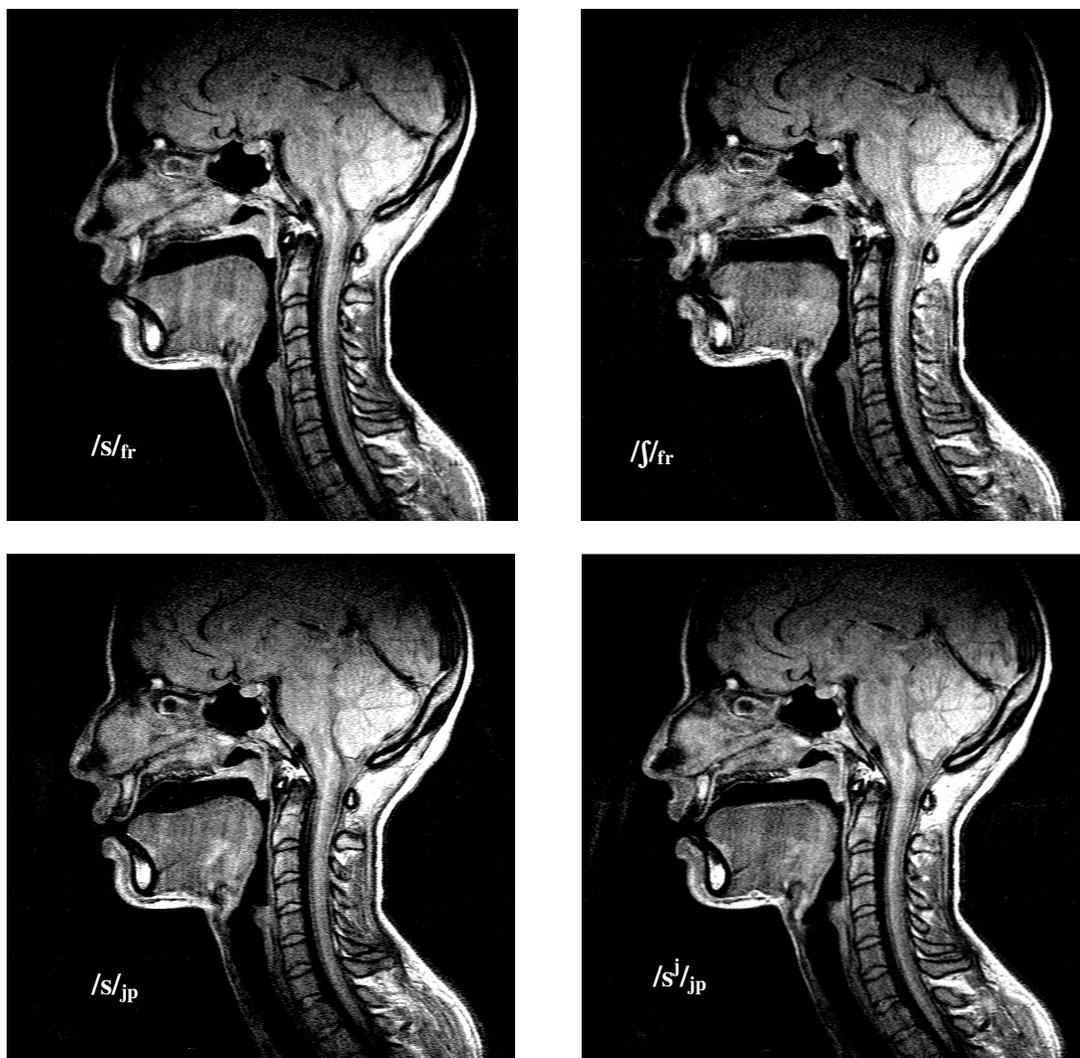


Figure 146. Coupes médio-sagittales des données IRM couvrant le conduit vocal en entier pour la locutrice FJ. Ces données, après insertion du contour

Annexes

des dents, ont servi à extraire les conduit vocaux 3D utilisés dans la simulation acoustique FEM.

Locuteur C1

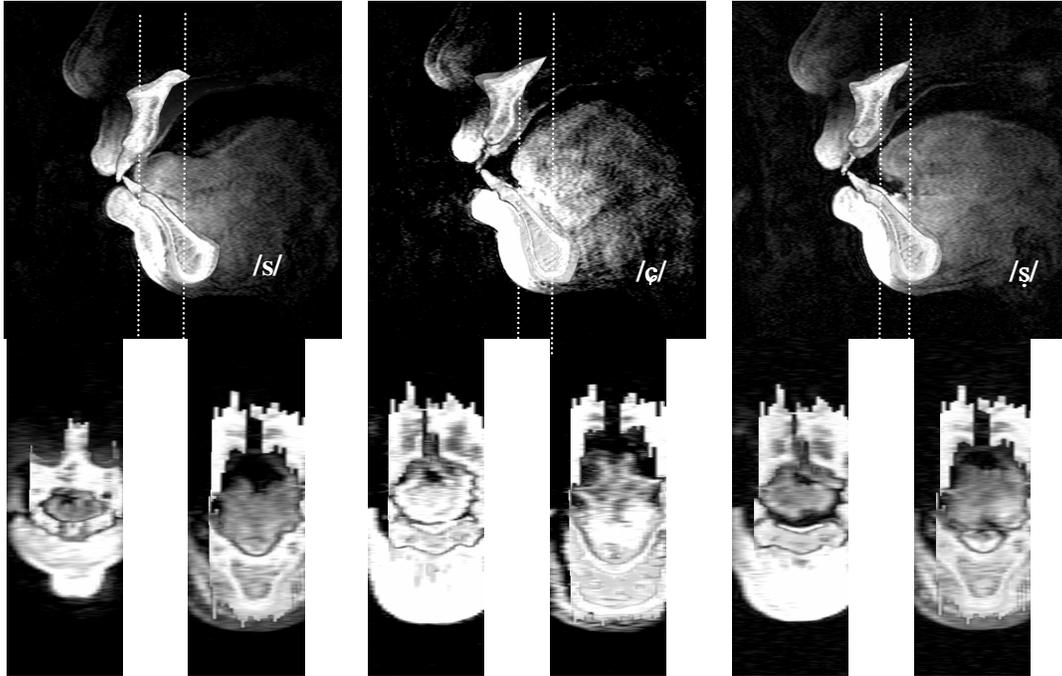


Figure 147. Coupes médio-sagittales (haut) et coronales (bas) des données IRM complétées des dents. A gauche, /s/ ; au centre, /ç/ ; à droite, /s/. Les lignes pointillées blanches sur les profils sagittaux indiquent l'emplacement approximatif des coupes coronales.

Le locuteur C1 est un locuteur de chinois âgé d'une quarantaine d'années au moment de l'acquisition des données.

Entre les trois sibilantes sourdes, l'articulation diffère tant pour la forme de la langue, qui est concave (/s/), bombée (/ʃ/) ou très bombée (/ç/), que pour le point de constriction, qui est alvéolaire (/s/) ou post-alvéolaire (/ʃ/ et /ç/). La langue très bombée dans /ç/ donne lieu à une longue constriction qui s'étend jusqu'à la région palatale. Les fonctions d'aire indique un degré de palatalisation décroissant de /ç/ > /ʃ/ > /s/. Ce locuteur présente une cavité orale antérieure distincte de la constriction pour les sibilantes /ç/ et //ʃ/, où la langue ne touche pas les incisives inférieures. Toutefois, cette cavité est plus grande pour /s/, où elle est en partie sublinguale.

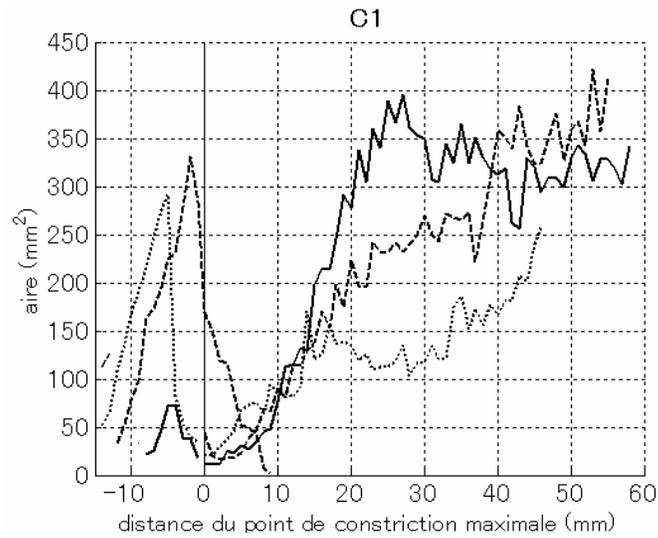


Figure 148. Fonctions d'aire ; mesures effectuées sur les coupes coronales perpendiculaires aux images d'origine. Lignes pleines : /s/ ; lignes interrompues : /ʃ/ ; lignes pointillées : /ç/.

Tableau 38. Description articulatoire qualitative du locuteur C1.

	/s/	/ç/	/ʃ/
Articulateur de la langue	pointe	lame et dos	lame
Cible supérieure	alvéolaire	post-alvéolaire à palatale	post-alvéolaire
Forme du dos de la langue	concave	très bombé	bombé
région pharyngale	étroite	large	étroite
Lèvres	pas de nette différence entre les consonnes		

Locutrice C2

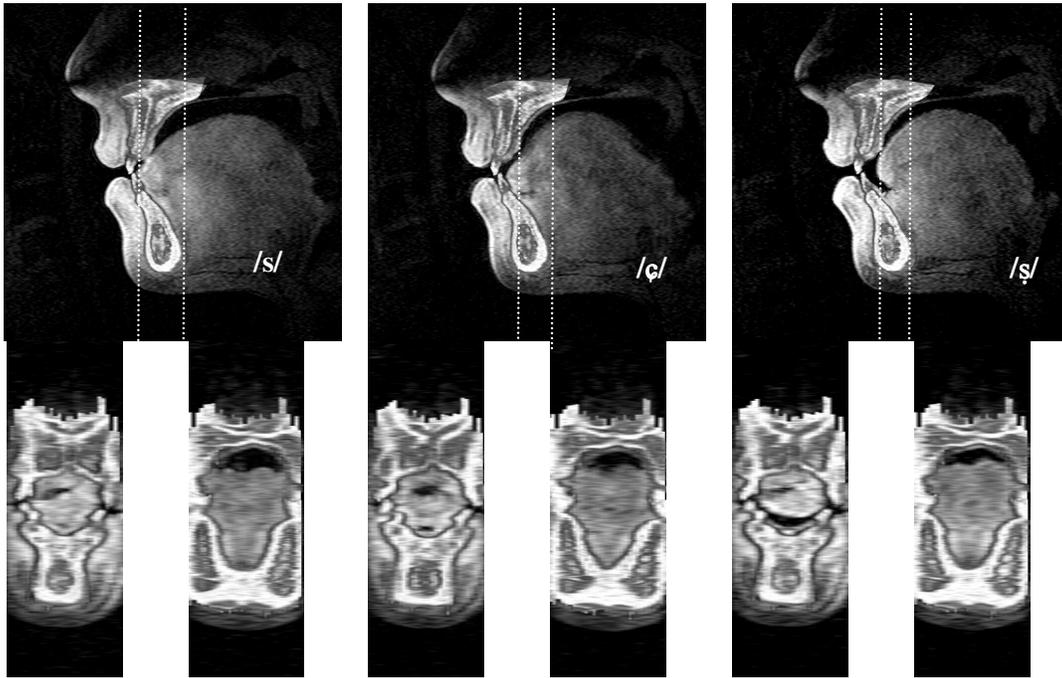


Figure 149. Coupes médio-sagittales (haut) et coronales (bas) des données IRM complétées des dents. A gauche, /s/ ; au centre, /ç/ ; à droite, /ʃ/. Les lignes pointillées blanches sur les profils sagittaux indiquent l'emplacement approximatif des coupes coronales.

La locutrice C2 est une locutrice de chinois (dialecte apparentée au mandarin). Elle était âgée d'une vingtaine d'années au moment de l'enregistrement.

Le dos de la langue est bombé dans les trois sibilantes, et à un degré accru pour /ç/ et /ʃ/. La différence entre /ç/ et /ʃ/ réside dans le contact ou l'absence de contact, respectivement, de la langue avec les incisives inférieures. En suivant la forme des alvéoles et du palais, la région laminaire à prédorsale de la langue et légèrement concave sur le plan sagittal pour /ç/. Pour /ç/, la langue est en contact avec la base des incisives inférieures et il n'y a pas de cavité orale antérieure distincte. Les fonctions d'aire suggèrent que la différence entre /s/ et les deux autres sibilantes consiste en un moindre degré de palatalisation, tandis que la différence entre /ç/ et /ʃ/ réside dans la taille de la cavité orale antérieure.

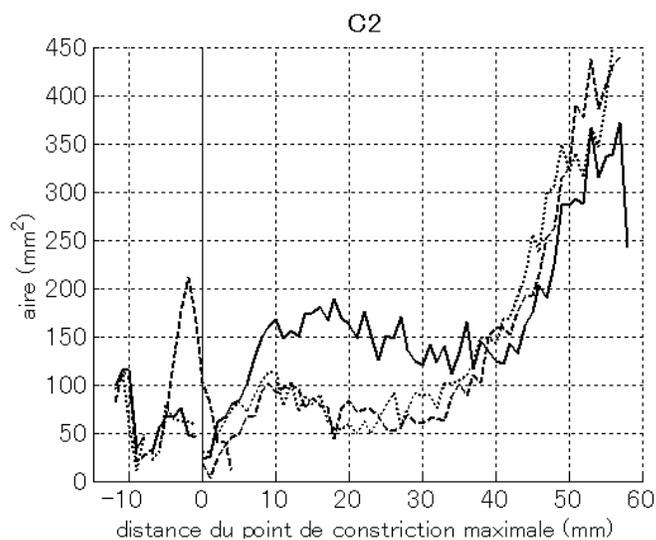


Figure 150. Fonctions d'aire ; mesures effectuées sur les coupes coronales perpendiculaires aux images d'origine. Lignes pleines : /s/ ; lignes interrompues : /ʃ/ ; lignes pointillées : /ç/.

Tableau 39. Description articulatoire qualitative de la locutrice C2.

	/s/	/ç/	/ʃ/
Articulateur de la langue	lame	lame et dos	lame et dos
Cible supérieure	alvéolaire	dentale à palatale	alvéolaire à palatale
Forme du dos de la langue	bombé	très bombé	très bombé
bas-pharynx	étroit	étroit	étroit
Lèvres	pas de nette différence entre les consonnes		

Locuteur C3

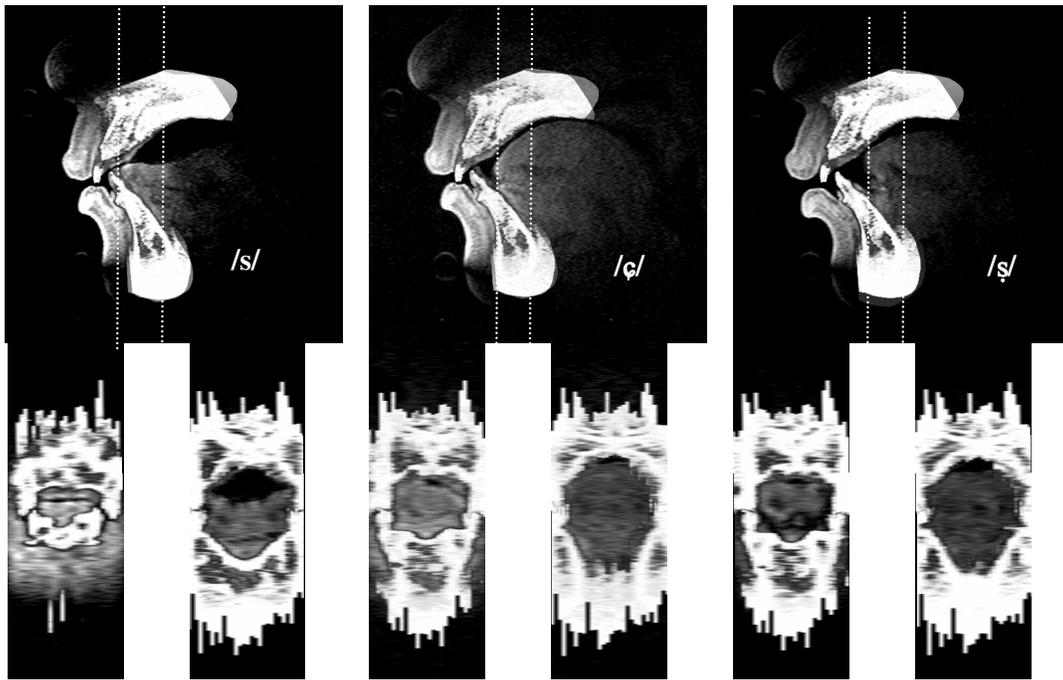


Figure 151. Coupes médio-sagittales (haut) et coronales (bas) des données IRM complétées des dents. A gauche, /s/ ; au centre, /ç/ ; à droite, /ʃ/. Les lignes pointillées blanches sur les profils sagittaux indiquent l'emplacement approximatif des coupes coronales.

Le locuteur C3 est un locuteur de chinois (dialecte apparenté au mandarin). Il était âgé d'une quarantaine d'années au moment de l'enregistrement.

Ce locuteur présente un dos de la langue concave pour /s/ et bombé pour /ç/ et /ʃ/. Ces deux dernières sibilantes, à leur tour, s'opposent par la taille de la cavité antérieure, qui est la plus grande pour /ʃ/. Bien que toutes deux présentent une langue bombée, /ç/ est plus palatalisé que /ʃ/ (v. fonction d'aire). On distingue une protrusion labiale pour /ʃ/.

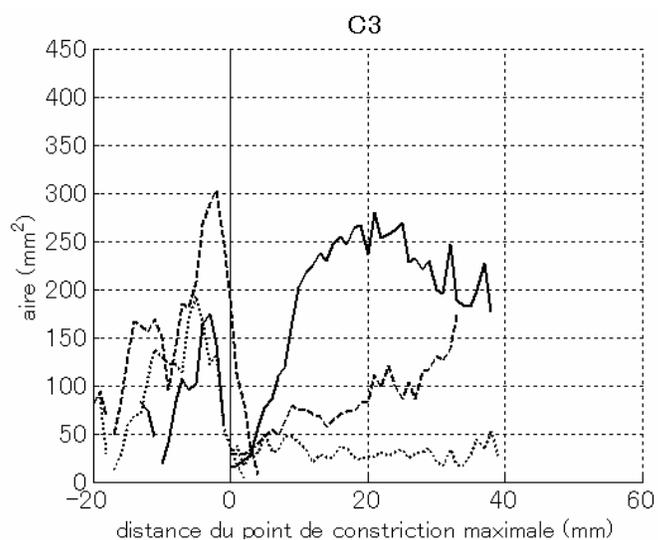


Figure 152. Fonctions d'aire ; mesures effectuées sur les coupes coronales perpendiculaires aux images d'origine. Lignes pleines : /s/ ; lignes interrompues : /ʃ/ ; lignes pointillées : /ç/.

Tableau 40. Description articulatoire qualitative du locuteur C3.

	/s/	/ç/	/ʃ/
Articulateur de la langue	pointe de la langue	lame et dos	lame et predorsum
Cible supérieure	alvéolaire	post-alvéolaire à palatale	post-alvéolaire
Forme du dos de la langue	concave	très bombé	bombé
Lèvres			protrusion par rapport à /s/ et /ç/

Locuteur C4

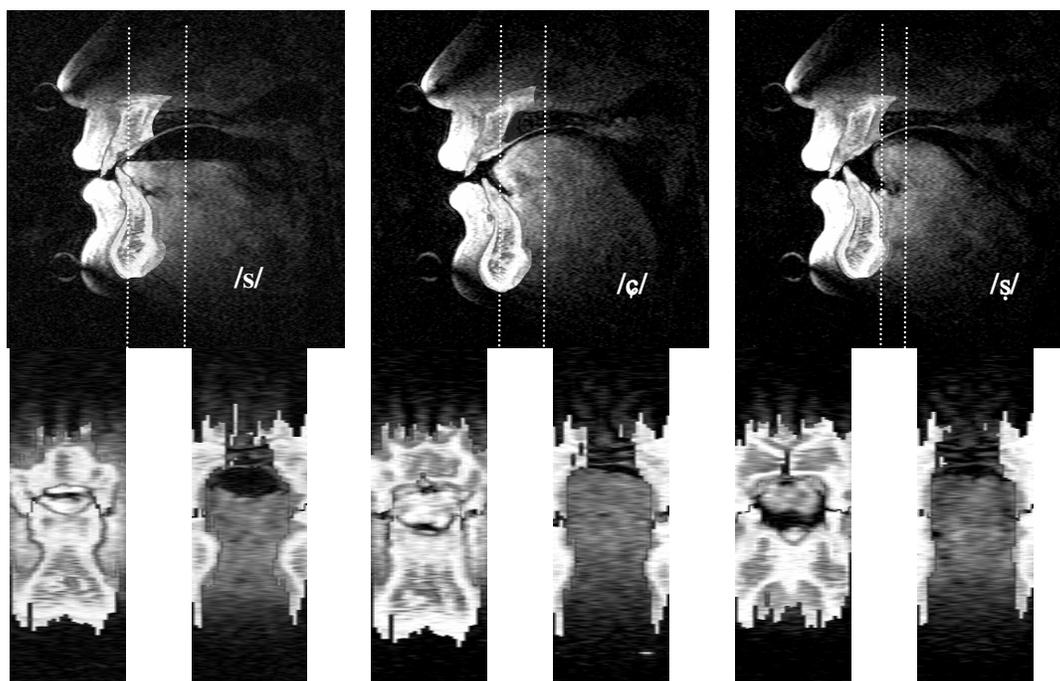


Figure 153. Coupes médio-sagittales (haut) et coronales (bas) des données IRM complétées des dents. A gauche, /s/ ; au centre, /ç/ ; à droite, /ʃ/. Les lignes pointillées blanches sur les profils sagittaux indiquent l'emplacement approximatif des coupes coronales.

Le locuteur C4 est un locuteur de chinois, âgé d'une quarantaine d'année au moment de l'acquisition des données. On peut distinguer trois formes différentes de la langue. /s/ présente une langue plate, /ʃ/ un predorsum bombé, et /ç/ le dos de la langue bombé. Le point de constriction est le plus postérieur pour /s/, suivi de /ç/. Une cavité orale antérieure est observée pour ces deux sibilantes, d'une taille supérieure pour /ʃ/. Il n'existe pas de nette protrusion labiale pour /s/, mais lèvres, de même que les incisives, sont légèrement écartées dans /ç/.

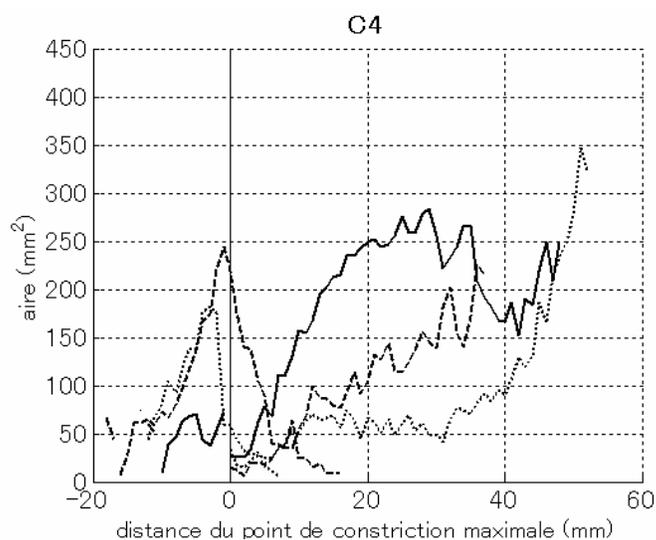


Figure 154. Fonctions d'aire ; mesures effectuées sur les coupes coronales perpendiculaires aux images d'origine. Lignes pleines : /s/ ; lignes interrompues : /ʃ/ ; lignes pointillées : /ç/.

Tableau 41. Description articulatoire qualitative du locuteur C4.

	/s/	/ç/	/ʃ/
Articulateur de la langue	pointe	lame et dos	lame
Cible supérieure	dentale à alvéolaire	post-alvéolaire à palatale	post-alvéolaire à prépalatale
Forme du dos de la langue	plate	très bombée	bombée
région pharyngale	étroite	large	étroite
Lèvres		ouvertes par rapport à /s/ et /ʃ/	

Récapitulation : description articulatoire qualitative, chinois

/s/

Bien que le nombre de locuteurs soit restreint, au regard des données dont nous disposons, ainsi que celles publiées dans Ladefoged et Wu (1984) (figure XXX), il apparaît que le /s/ en chinois est une consonne généralement apicale (notre locutrice C2 constitue une exception) La cible articulatoire peut s'étendre de la région dento-alvéolaire (C1, C4), à la région alvéolaire (C2, C3). Il est difficile de déterminer avec précision la cible articulatoire dans les données de Ladefoged et Wu, mais nous pouvons raisonnablement considérer qu'elle est comparable à nos données. La forme de la langue, comme pour le /s/ japonais, est généralement concave ou plate, la locutrice C2 échappant à ce standard. Toutefois, même pour cette locutrice, /s/ présente la langue la moins bombée de toutes les trois sibilantes.

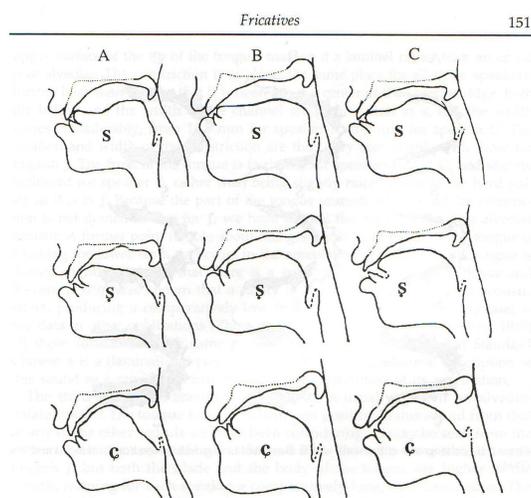


Figure 5.9 Tracings from x-rays of three speakers producing Standard Chinese sibilant fricatives, based on Ladefoged and Wu (1984).

Figure 155. Profils sagittaux des sibilantes du mandarin d'après Ladefoged et Wu (1984 : p. 269) repris dans Ladefoged et Maddieson, 1996 : p. 151.

/ç/

La sibilante /ç/ est réalisée avec le dos de la langue bombée de façon constante. La longueur de la constriction formée par le dos de la langue bombé peut cependant varier d'un locuteur à l'autre. Le locuteur C1 présente une constriction moins étroite en région palatale que les autres locuteurs.

La présence ou l'absence d'une cavité orale antérieure de petite taille (ou l'absence ou la présence, respectivement, d'un contact de la langue avec les incisives inférieures) dépend des locuteurs. C'est en partie pour cette raison, en plus du fait que le trait [distribué] suffit comme trait distinctif, que nous n'avons pas précisé s'il s'agissait d'une sibilante

antérieure ou non antérieure. La locutrice C2 ne présente pas de cavité orale antérieure pour /ç/. Son articulation s'apparente au /s^j/ japonais. De même, aucun locuteur ne présente une telle cavité dans l'étude de Ladefoged et Wu. Toutefois, nous ne sommes pas certain que les tracés de cette région soient hautement fiables, en raison des dents et de la mandibule qui peuvent masquer la partie inférieure de la langue.

/ʃ/

La sibilante /ʃ/ est réalisée avec le point d'articulation le plus postérieur parmi les sibilantes sourdes du chinois, avec l'absence systématique de contact de la langue avec les incisives inférieures et la création d'une cavité sublinguale. La cavité orale antérieure est toutefois plus réduite que certains locuteurs du français et de l'anglais (Fr6, E3). La même observation peut être faite pour les données de Ladefoged et Wu. Cela suggère donc qu'il s'agirait d'une caractéristique phonétique pertinente plus que le hasard des spécificités individuelles. On peut attribuer cette relative antériorité de l'articulation à l'existence d'une fricative vélaire /x/, qui n'est pas une sibilante mais dont on peut imaginer que le spectre de bruit de friction peut éventuellement concurrencer celui de /ʃ/ dans le cas où le lieu d'articulation des deux fricatives seraient trop proches. Une telle fricative vélaire n'existe pas en anglais et en français. La sibilante /ʃ/ présente également une constriction plus courte que /ç/, avec un moindre degré de soulèvement du dos de la langue. De ce point de vue, elle diffère de certaines réalisations individuelles de /ʃ/ (Fr3, Fr5, Fr6, E2) en français et en anglais, où la langue est très bombée. Toutefois, elle présente une grande similitude avec d'autres /ʃ/ (Fr2, Fr7, E1, E4). Il semble évident que les catégories phonétiques des phonèmes dans des langues différentes présentent des chevauchements, et que la réalisation d'un phonème dans une langue donnée dépend de l'inventaire.

Locuteur P2

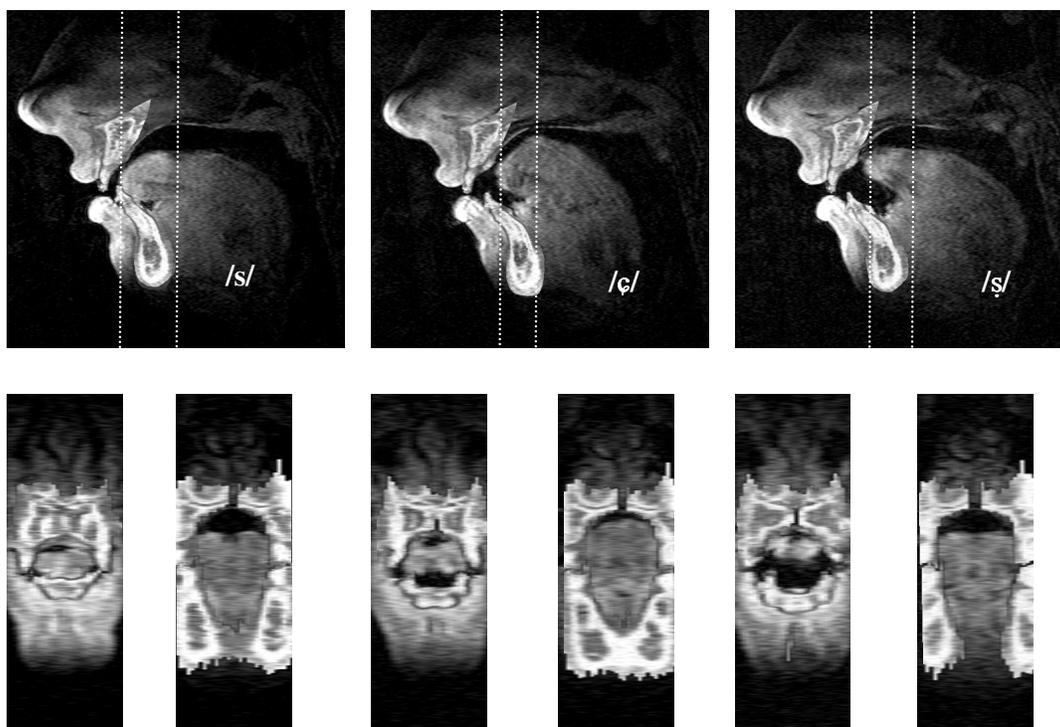


Figure 156. Coupes médio-sagittales (haut) et coronales (bas) des données IRM complétées des dents. A gauche, /s/ ; au centre, /ç/ ; à droite, /ʃ/. Les lignes pointillées blanches sur les profils sagittaux indiquent l'emplacement approximatif des coupes coronales.

Le locuteur P2 est un locuteur de polonais âgé d'une vingtaine d'années au moment de l'enregistrement. Il présente une forme de la langue relativement plate pour /s/ et /ʃ/, cette dernière, comme le locuteur P1, étant réalisée bien en arrière, de telle sorte qu'il en résulte une grande cavité orale antérieure en partie sublinguale. Le soulèvement de la pointe de la langue permet d'atteindre la région post-alvéolaire sans impliquer le bombement de la langue, caractéristique de /ç/. Dans cette dernière, une cavité orale antérieure en partie sublinguale est toutefois visible, à la différence du locuteur P1, bien que sa taille reste plus réduite en comparaison à /ʃ/. Ce locuteur présente une occlusion labio-dentale pour les trois sibilantes. Sans préjuger d'une relation causale, aucune protrusion nette n'est observée.

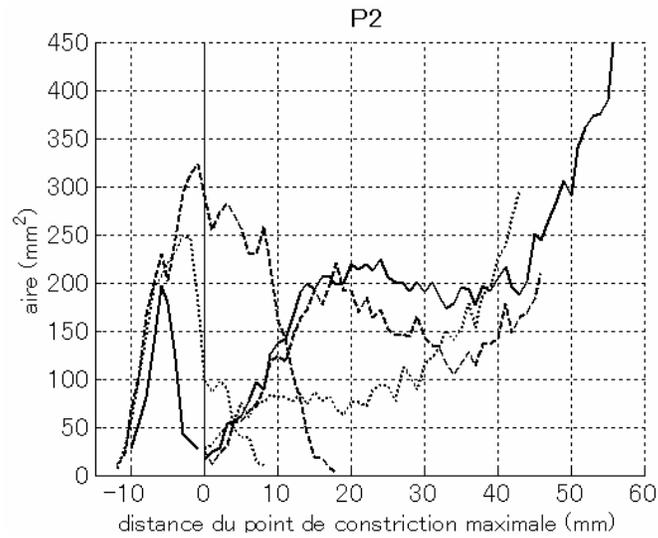


Figure 157. Fonctions d'aire ; mesures effectuées sur les coupes coronales perpendiculaires aux images d'origine. Lignes pleines : /s/ ; lignes interrompues : /ʃ/ ; lignes pointillées : /ç/.

Tableau 42. Description articulatoire qualitative du locuteur P2.

	/s/	/ç/	/ʃ/
Articulateur de la langue	lame	lame et predorsum	pointe
Cible supérieure	dentale à alvéolaire	alvéolaire à palatale	post-alvéolaire
Forme du dos de la langue	bombée	très bombée	plate
région pharyngale	moyenne	large	étroite
Lèvres	pas de nette différence entre les consonnes		

Locuteur S

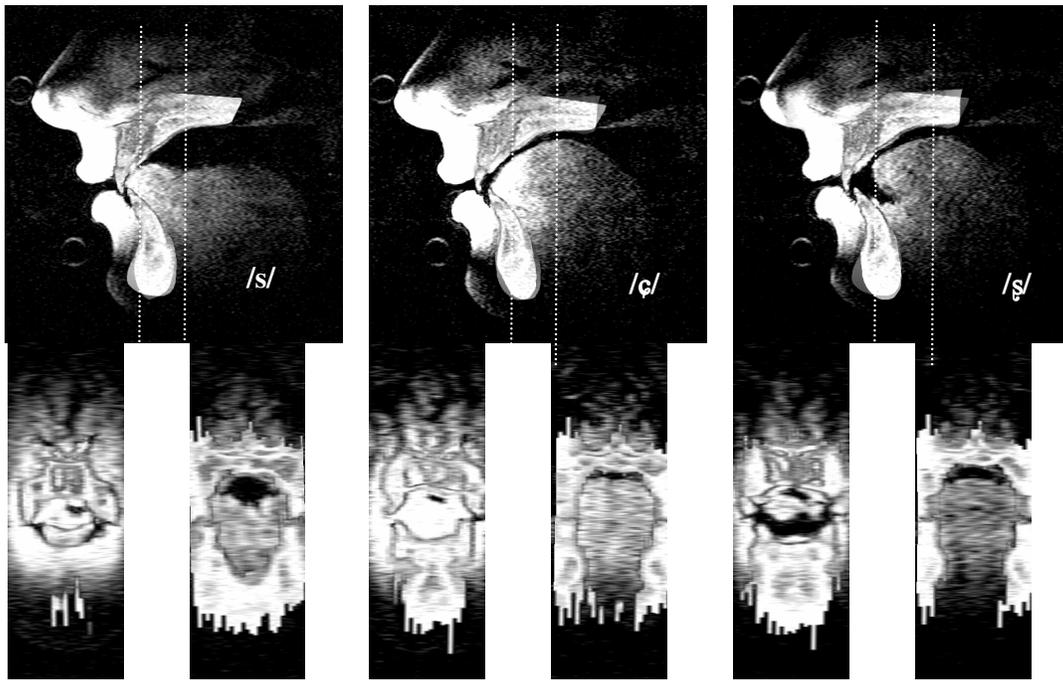


Figure 158. Coupes médio-sagittales (haut) et coronales (bas) des données IRM complétées des dents. A gauche, /s/ ; au centre, /ç/ ; à droite, /ʃ/. Les lignes pointillées blanches sur les profils sagittaux indiquent l'emplacement approximatif des coupes coronales.

Le locuteur S est un locuteur de suédois âgé d'une vingtaine d'années au moment de l'acquisition. Il représente une variété dialectale où la suite /rs/ a donné lieu à un son unique, sibilant, qualifié de rétroflexe. Dans l'ensemble, les trois sibilantes telles que produites par ce locuteur sont proches des sibilantes du chinois. Les trois sons sont caractérisés par trois degrés de soulèvement du dos de la langue dans l'ordre /s/ < /ʃ/ < /ç/. La sibilante /ç/ est toutefois réalisée avec la pointe de la langue en contact avec les incisives inférieures, tel que pour le /s^j/ japonais. Il est difficile de distinguer une cavité orale antérieure distincte de la constriction sur le plan sagittal, mais la fonction d'aire rend compte de l'élargissement latéral de celle-ci juste en arrière des incisives.

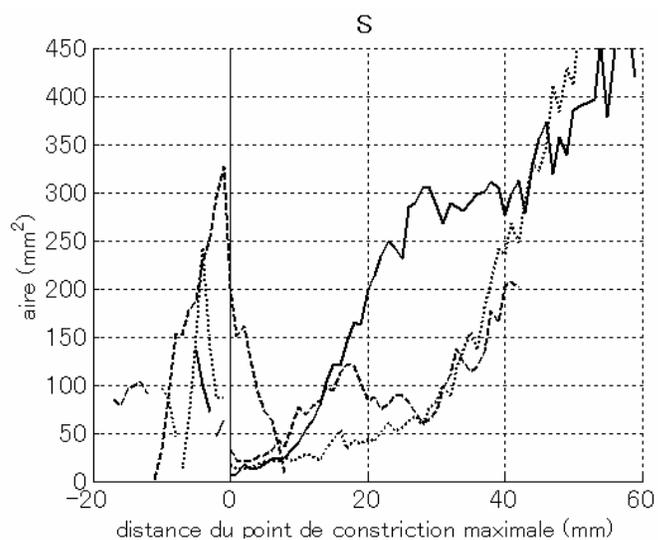


Figure 159. Fonctions d'aire ; mesures effectuées sur les coupes coronales perpendiculaires aux images d'origine. Lignes pleines : /s/ ; lignes interrompues : /ʃ/ ; lignes pointillées : /ç/.

Tableau 43. Description articulatoire qualitative du locuteur S.

	/s/	/ç/	/ʃ/
Articulateur de la langue	lame	lame et dos	lame
Cible supérieure	denti-alvéolaire	alvéolaire à palatale	post-alvéolaire à palatale
Forme du dos de la langue	concave	très bombé	bombé
Région pharyngale	moyenne	large	moyenne
Lèvres	pas de différence très nette entre les trois sibilantes		

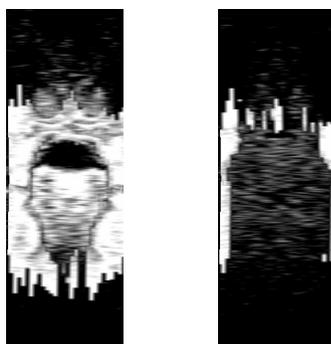
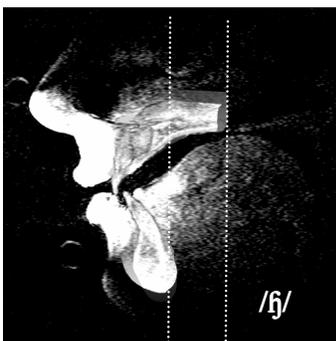


Figure 160. Coupes sagittale et coronales de la fricative /ɧ/. L'impression subjective de cette fricative l'apparenterait à [x] (v. chapitre acoustique). Un spectre de bruit se trouve en Annexe V (Figure 196).

Le symbole « ɧ », qui décrit le son « ʃ et x produits simultanément », est à notre connaissance strictement réservé au suédois. Chez ce locuteur, cette fricative est produite avec les incisives supérieures et inférieures rapprochées, comme pour les sibilantes. Cette articulation est probablement une réminiscence historique, car cette sibilante provient de la suite */sk/. L'impression auditive n'est toutefois pas stridente, et nous suggère une parenté avec [x].

La relative antériorité du /ɧ/ suédois, du moins chez ce locuteur, peut être comparée à celle du /ɕ/ chinois. L'autre point commun étant qu'il existe une fricative vélaire dans les deux langues. Bien que les sibilantes soient réputées être discriminées des non sibilantes par l'intensité de leur bruit de friction, la frontière entre les deux catégories ne seraient peut-être pas si imperméable. En effet, en plus des mécanismes de la source (à laquelle on attribue la stridence), leur « lieu d'articulation » pourrait également être différencié, au vu de ces données de chinois et de suédois, de façon à éviter tout risque de confusion.

Annexes

Locutrice R

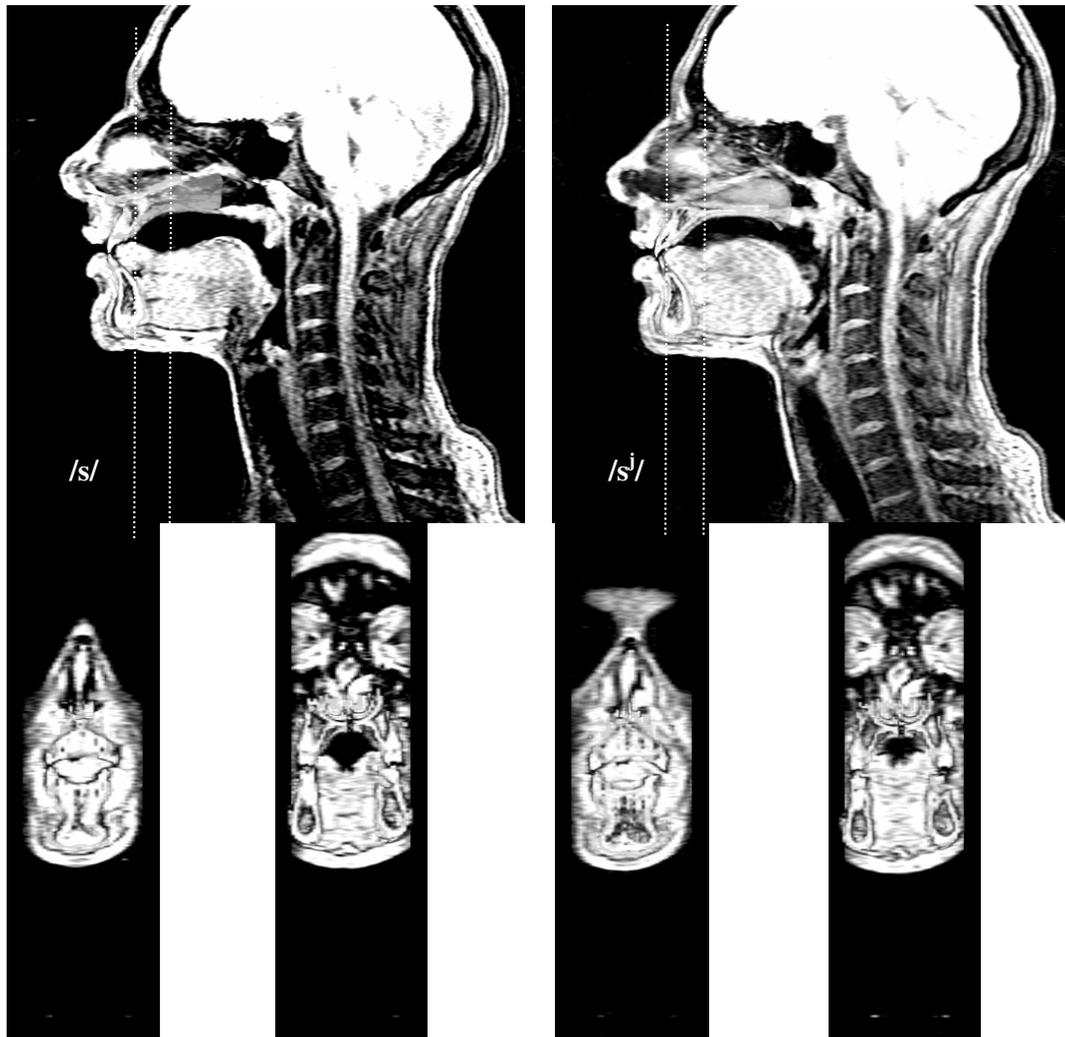


Figure 161. Coupes médio-sagittales (haut) et coronales (bas) des données IRM complétées des dents. A gauche, /s/ ; à droite, /s^h/. Les lignes pointillées blanches sur les profils sagittaux indiquent l'emplacement approximatif des coupes coronales.

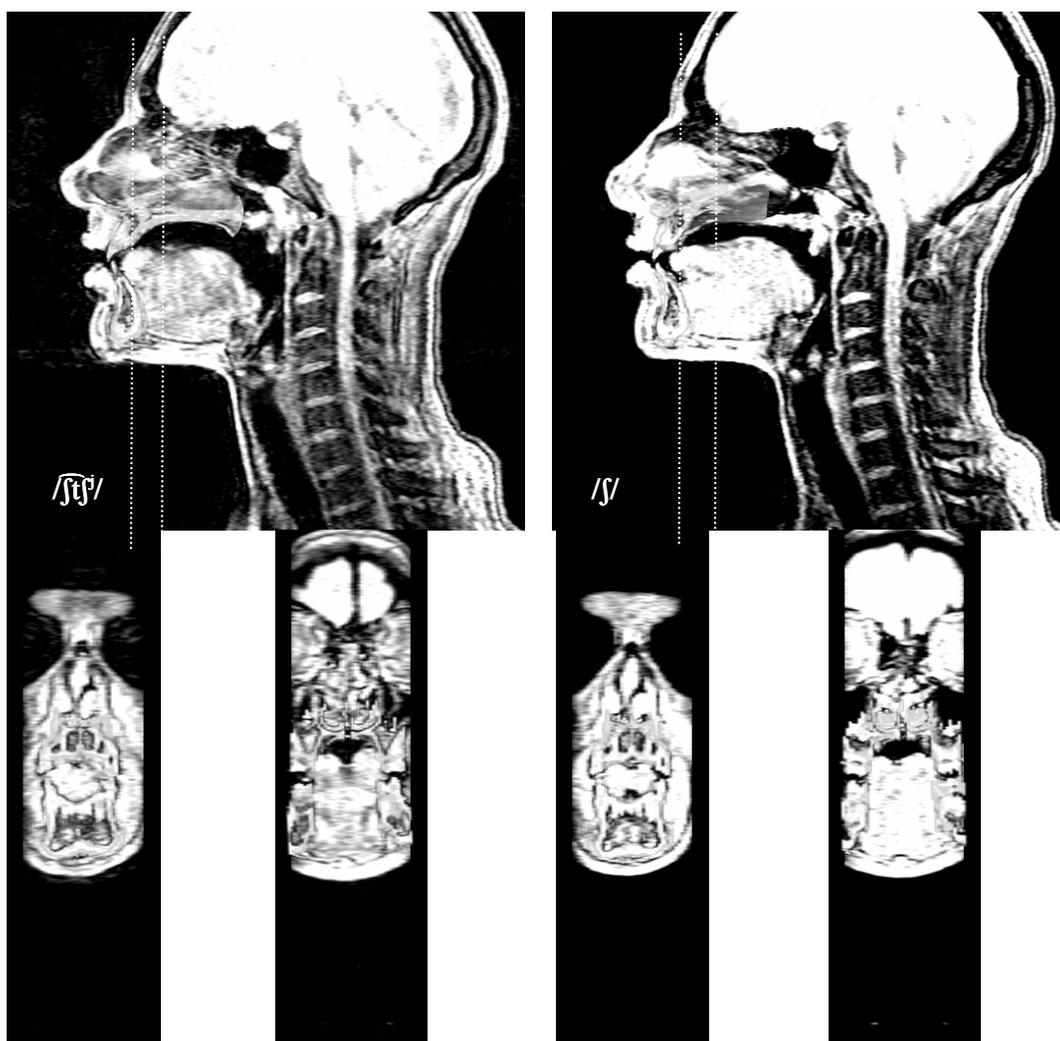


Figure 162. Coupes médio-sagittales (haut) et coronales (bas) des données IRM de la locutrice R complétées des dents. A gauche, /ʃtʃj/ ; à droite, /ʃ/. Les lignes pointillées blanches sur les profils sagittaux indiquent l'emplacement approximatif des coupes coronales.

La locutrice R est une locutrice de russe âgée d'une trentaine d'années au moment de l'acquisition. En vue de simulations acoustiques avec le conduit vocal entier, un protocole d'acquisition différent des autres locuteurs a été choisi. La résolution spatiale des images est d'un quart par rapport aux autres locuteurs.

Cette locutrice présente des nuances subtiles, mais certaines, entre les différentes sibilantes du russe. Les /s/ « dur » et « doux » (Figure 161, gauche et droite, respectivement) sont tous les deux articulés très en avant, avec une cible denti-alvéolaire, sans qu'une cavité orale antérieure puisse être différenciée de la constriction sur le plan sagittal. La langue est toutefois plus concave, avec un rétrécissement du conduit vocal en région vélaire-uvulaire, pour le /s/ « dur ». La sibilante douce non antérieure, /ʃtʃj/, est très proche de /s^j/, en particulier pour la forme de la langue qui est relativement plate, mais la

Annexes

pointe de la langue touche à peine les incisives inférieures, ce qui fait qu'il existe une cavité orale antérieure, petite, mais distincte de la constriction elle-même. Bien qu'il s'agisse d'une consonne phonologiquement palatalisée, le dos de la langue est toutefois relativement plat, et la constriction est courte. Les fonctions d'aire montrent, du reste, qu'aucune sibilante n'est franchement palatalisée, en comparaison aux données du chinois, par exemple. Ces images nous poussent à penser que la palatalisation phonologique des consonnes, en tout cas pour cette locutrice, est surtout portée par la qualité de la voyelle, antérieure (avec les consonnes palatalisées ou « douces ») ou non antérieure (avec les consonnes non palatalisées, ou « dures »), qui apparaît de manière évidente des enregistrements sonores (v. chapitre *acoustique*).

La sibilante « dure » non antérieure /ʃ/ présente la cavité orale antérieure la plus grande de toutes les sibilantes produites par cette locutrice, bien que la taille de cette cavité demeure relativement petite en comparaison au /ʃ/ en français ou en anglais. De ce point de vue, cette sibilante ressemble davantage au /ʃ/ chinois. Il est intéressant de remarquer que comme en chinois, il existe en russe une paire de fricatives palatale (douce) et vélaire (dure) en russe. La relative antériorité de /ʃ/ pourrait être liée à la nécessité de maintenir un contraste suffisant avec la fricative vélaire.

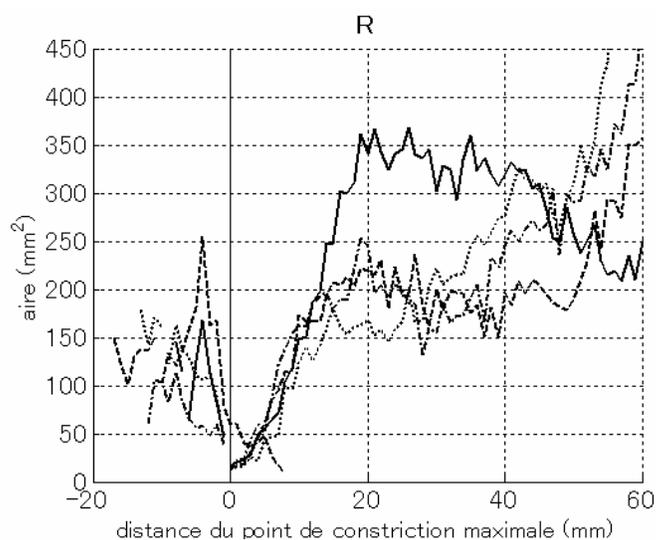


Figure 163. Fonctions d'aire ; mesures effectuées sur les coupes coronales perpendiculaires aux images d'origine. Lignes pleines : /s/ ; lignes interrompues par des points : /sʰ/ ; lignes interrompues /ʃ/ ; lignes pointillées : /ç/.

Tableau 44. Description articulatoire qualitative de la locutrice R.

	/s/	/sʰ/	/ç/	/ʃ/
Articulateur de la langue	pointe	pointe	pointe	pointe
Cible supérieure	denti-alvéolaire	denti-alvéolaire	alvéolaire	alvéolaire
Forme du dos de la langue	concave	plat	plat	plat
Région pharyngale	étroite	étroite	large	étroite
Lèvres				protrusion en référence à toutes les autres

ANNEXE IV : **DESCRIPTIONS ARTICULATOIRES QUANTITATIVES DIVERSES**

Nous avons donc exploré un grand nombre de mesures quantitatives permettant de décrire la morphologie individuelle ou le type d'articulation, dans le but de dégager les relations systématiques qui peuvent exister entre elles.

Le palais

Le palais, qui est rigide, varie en morphologie d'un locuteur à un autre. Il peut donc être suspecté d'être une source de variabilité (en soi, ou en conditionnant une variation articulatoire). Nous avons montré (Toda, 2005) que les palais plats ou bombés sur une vue coronale étaient partiellement corrélés avec la fréquence de coupure du bruit de friction de certaines sibilantes. Dans cette thèse, nous explorons plus en détail la morphologie du palais, dans le but d'identifier les caractéristiques essentielles qui expliquent l'articulation individuelle et les caractéristiques acoustiques (ce dernier aspect est traité dans le chapitre II *acoustique*).

La position relative des incisives

La définition articulatoire des fricatives sibilantes est le rapprochement (occlusion) des incisives supérieures et inférieures (Ladefoged et Maddieson, 1996). La présence des incisives (obstacle) sur le passage du flux d'air sortant de la constriction linguale serait responsable de la source de bruit de forte intensité des sibilantes (Shadle, 1985 ; Pastel, 1987 ; Howe et McGowan, 2005). Par ailleurs, une étude de simulations CFD¹³⁶ et CAA¹³⁷ (Nozaki, 2005) a montré que l'overjet et l'overbite permettaient d'expliquer une partie de la variation du bruit résultant (le modèle utilisé était créé à partir du moulage dentaire des mâchoires supérieure et inférieure, et ne comportait pas de langue). Cette étude suggère que l'occlusion des incisives supérieures et inférieures permet de donner lieu à une source de bruit pas uniquement en agissant comme obstacle, mais par la constiction qu'elle crée.

Il est donc intéressant d'examiner le positionnement relatif des incisives supérieures et inférieures pendant la production de chacune des fricatives sibilantes. Toutefois, le positionnement relatif des incisives peut ne pas être lié uniquement à la création de la source. Les articulateurs étant liés, le positionnement de la mandibule peut participer à

¹³⁶ Computational fluid dynamics. Cette méthode a servi pour calculer le débit d'air.

¹³⁷ Computational aero-acoustics. Cette méthode a servi pour localiser la source de bruit et calculer les propriétés acoustiques du bruit, après propagation jusqu'au point d'observation.

l'ajustement de l'articulation de la langue¹³⁸.

L'articulation

Enfin, plusieurs variables sont destinées à la description articulaire. Ces mesures concernent les cavités antérieures (lèvres, cavité orale antérieure) et le chenal palatal. La partie pharyngale du conduit vocal n'étant pas visible dans toutes les données, nous ne l'avons pas pris en considération.

Les résultats d'analyse statistique sont présentés dans **Tableau 45** à

Tableau 48, et les mesures qui rendent le mieux compte des corrélations sont présentées par la suite sous forme de figures.

Cette analyse quantitative s'intéresse uniquement aux langues pour lesquelles le nombre de locuteurs est relativement important : le français (7) et l'anglais (5), qui ont un système de sibilantes semblable et ont par conséquent été groupées (12), et le japonais (9). Ainsi, nous espérons pouvoir distinguer de manière plus fiable les propriétés individuelle (liées aux sujets) de celles qui sont liées au type phonologique de la langue.

Quantification

Courbure du palais sur le plan sagittal, coronal et axial



Figure 164. Longueur de la surface du palais comprise entre la base des incisives médianes supérieures et l'épine nasale postérieure, ligne pointillée (Slen), et distance entre ces deux points de référence, ligne pleine (Sdst), sur le plan sagittal. Le rapport Slen/Sdst donne l'indice d'arcure palatale sur le plan

¹³⁸ Pour déterminer si le positionnement des incisives est actif (ajustement de la source de bruit) ou passif (ajustement de la langue), il pourrait être utile d'effectuer une expérience de perturbation articulaire où le mouvement de la mandibule serait contraint, avec et sans feedback auditif.

sagittal, SAG. L'épine nasale postérieure est indiquée sur les images à l'aide d'une croix. Le locuteur de gauche (Fr1) présente un palais plat, avec un indice de courbure proche de 1, tandis que le locuteur de droite (E1) présente un palais bombé, qui se traduit en un indice de courbure élevé.

La courbure du palais sur le plan sagittal est quantifiée à l'aide du rapport entre la longueur de la courbe palatale et la distance entre deux points de références tel qu'illustré en Figure 164. Plus le palais est bombé ou les alvéoles protruses, plus l'indice de courbure est élevé.

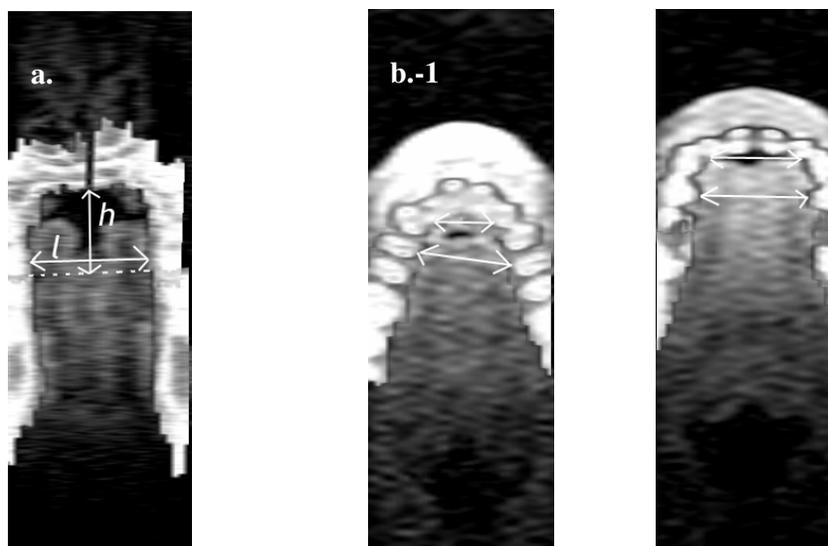


Figure 165. (a) Hauteur palatale H, largeur palatale W, et rapport largeur/hauteur sur le plan coronal, COR (sujet E2). La coupe coronale utilisée est alignée au centre des premières prémolaires. Plus l'indice est élevé, plus le palais est plat ; inversement, plus l'indice est petit, plus le palais est profond. (b) Largeur palatale pré-alvéolaire Ant ++ (espace entre les deuxièmes incisives), largeur palatale post-alvéolaire Ant + (distance entre les premières prémolaires), et indice d'arcure palatale sur le plan axial, AX, qui est le rapport de largeur pré-alvéolaire/ post-alvéolaire. Le sujet de gauche (b.-1), FR1, présente un palais en forme de V et un petit indice d'arcure axiale, tandis que le sujet de droite (b.-2), J7, présente un palais en forme de U et un indice élevé (plus proche de 1).

La morphologie du palais a également été examinée sur d'autres coupes, présentées en Figure 165. Les mesures brutes de distance ne tiennent pas compte des possibles variations individuelle d'échelle, tandis que les indices de rapport tendraient à neutraliser ce facteur. Les deux types de mesure, partiellement redondantes, ont été examinées.

L'occlusion des incisives (overjet et overbite) durant la production des sibilantes

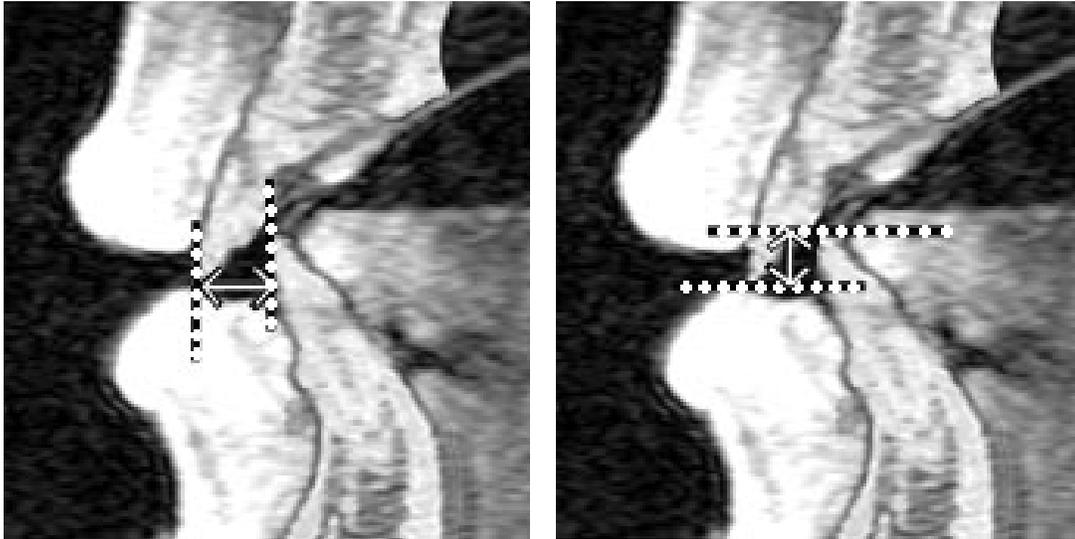


Figure 166. (a) Overjet, OJ ; et (b) overbite, OB, des incisives. Il s'agit d'une variable articulatoire : contrairement en dentisterie, les mesures sont effectuées sur les données où le sujet était en train de produire des fricatives sibilantes (ici, [s], locuteur C4). L'overjet, OJ, est la distance antéro-postérieure entre la pointe des incisives centrales inférieure et supérieure. L'overbite, OB, est la distance verticale entre ces deux points de référence.

La figure suivante illustre des mesures basées sur les fonctions d'aire. En effet, plusieurs variables, certainement redondantes, ont été examinées afin de trouver celles qui sont les plus appropriées pour décrire l'articulation des sibilantes. Contrairement aux mesures présentées dans le corps de la thèse, ils tiennent compte de la morphologie tridimensionnelle du conduit vocal. Cependant, comme les coupes ne sont pas nécessairement perpendiculaires au conduit vocal, les mesures de longueur peuvent être légèrement plus courtes que la réalité. Les volumes, quant à eux, devraient être assez fidèles aux données.

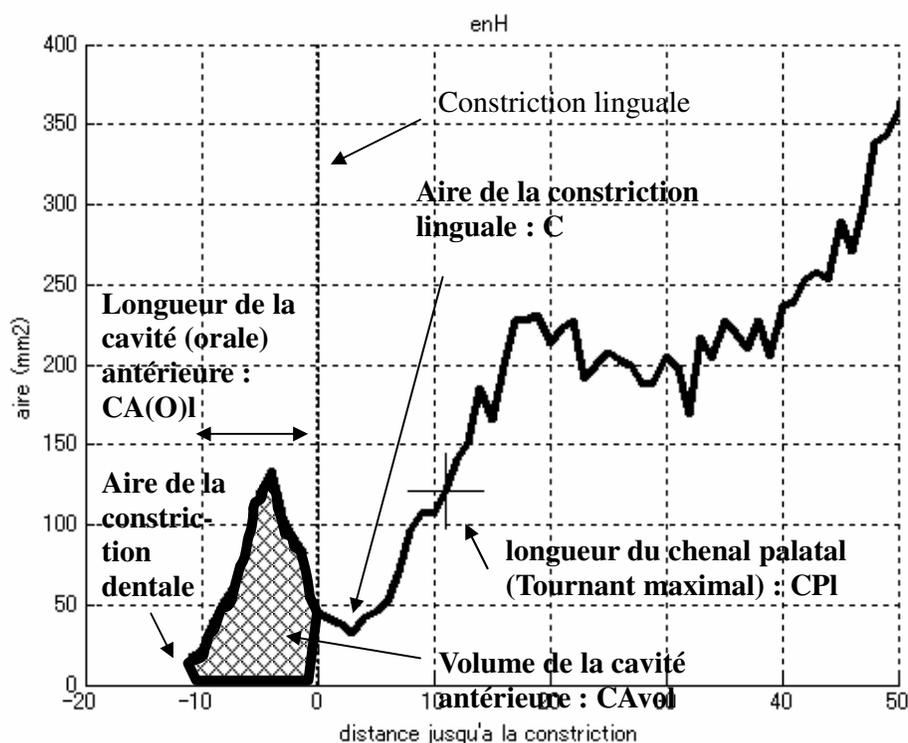


Figure 167. Fonction d'aire (ici, [s], sujet E3) et les différents points de références et mesures servant à la description quantitative de l'articulation : longueur de la cavité antérieure (CAI), qui inclut la portion labiale, ou de la cavité orale antérieure (CAOI) sans les lèvres ; volume de la cavité antérieure (CAvol) ; longueur du chenal palatal (CPI - valeur maximale de la première dérivée avec une fenêtre glissante de 9 points (= 9 mm), indiquant le tournant maximal).

Quelques variables sont liées aux fonctions d'aire, présentées dans la section précédente (*description articulatoire qualitative*) : volume (CAvol) et longueur de la cavité antérieure, avec (CAI) et sans la cavité labiale¹³⁹ (CAOI), aire de la constriction (C), et longueur du chenal palatal (CPI). Cette dernière mesure a été estimée par une procédure automatique. Le tournant maximal sur toute la cavité postérieure (partie du conduit vocal qui se situe en arrière de la constriction) a été détecté sur la première dérivée calculée avec une fenêtre glissante de 9 points (longueur de 9mm). Cette fenêtre glissante a comme but de lisser la courbe d'origine. D'après l'inspection visuelle du point de tournant maximal sur chacune des fonctions d'aire, il nous semble que cette mesure rend

¹³⁹ Plusieurs fonctions d'aire, dont surtout les /s/, ne comportent pas de cavité labiale distincte. En effet, les commissures latérales des lèvres se situaient sur la même coupe coronale que les incisives, voire plus en arrière. L'aire labiale ne pouvait donc être mesurée.

bien compte du degré de palatalisation, avec un tournant autour de 10 mm en arrière de la constriction pour les articulations les moins palatalisées, et autour de 40 mm pour les articulations les plus palatalisées.

Corrélations

La corrélation entre les variables anatomiques entre elles, les variables articulatoires entre elles et la combinaison des deux a été examinée. Les variables dérivées (rapport) n'ont pas été combinées avec les mesures d'origine qui ont servi à les calculer. Toutes les variables examinées sont supposées indépendantes.

Les tableaux Tableau 45 à Tableau 47 récapitulent les résultats pour les combinaisons de toutes ces variables. Seules les lignes et colonnes qui contiennent au moins une corrélation significative modérée à forte ($r^2 > 0,5$ ou $|r| > 0,7071$) ont été représentées.

Tableau 45. Corrélations entre variables morphologiques ; français, anglais et japonais (n=21).

	ant+ FAJ	Sdst FAJ
ant++ FAJ	p = 2.0682e-005; r2 = 0.62366	n. s.*
Slen FAJ		p = 2.6728e-013; r2 = 0.94331

* résultat non significatif

Le **Tableau 45** indique qu'il existe une corrélation significative entre la largeur palatal au niveau dental (Ant++) et celle au niveau post-alvéolaire (ANT+). Cette corrélation est positive (**Figure 168**). Ce résultat suggère que la forme axiale du palais est relativement constante, mais qu'entre les locuteurs, la différence réside plutôt dans la largeur du palais (l'échelle), avec des locuteurs de palais étroits et des locuteurs de palais larges. Des résultats similaires sont obtenus lorsque les deux groupes linguistiques sont pris séparément, avec une corrélation légèrement plus forte pour le japonais (**Tableau 47**).

De même que pour la forme axiale du palais, les variables de la dimension sagittale (forte corrélation positive entre la distance et la longueur du palais) suggèrent qu'il existe entre les locuteurs là encore une différence d'échelle (de taille du palais), avec une relative homogénéité de forme (courbure sagittale du palais ; **Figure 169**). Cette corrélation est également observée lorsque les deux groupes linguistiques sont considérés séparément (**Tableau 46** et **Tableau 47**).

Il est intéressant de noter qu'aucune corrélation n'est observée entre la hauteur et la largeur du palais sur le plan coronal. De même, il n'existe pas de corrélation entre les variables morphologiques sagittales, coronales et axiales lorsque tous les locuteurs sont considérés ensemble. Toutefois, comme nous l'indiquons plus bas, il existe de telles relations pour les locuteurs japonais (**Tableau 47**).

Annexes

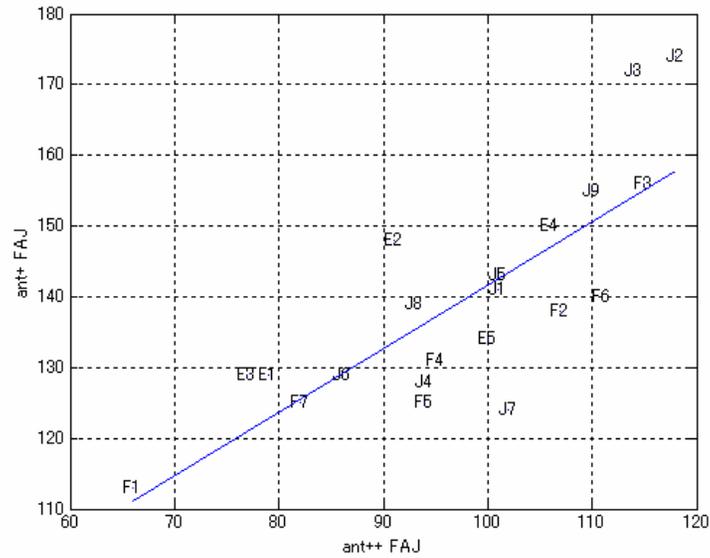


Figure 168. Largeur du palais au niveau post-alvéolaire (Ant+) en fonction de la largeur au niveau dental (Ant++), français, anglais et japonais.

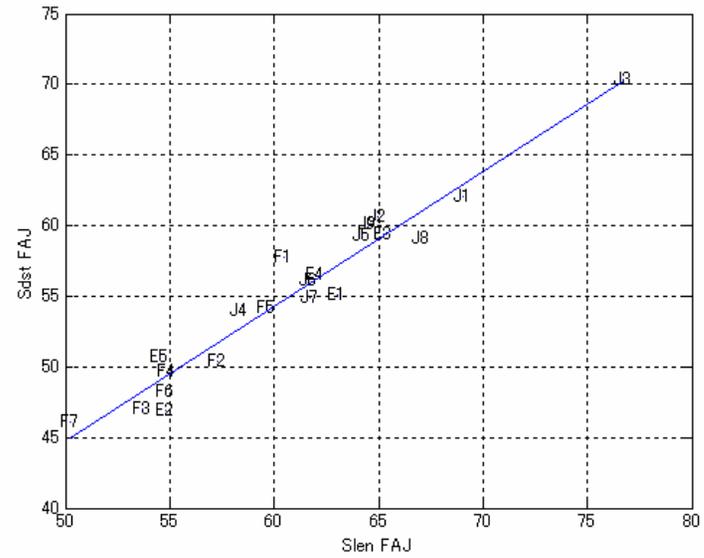


Figure 169. Distance entre la base des incisives médianes supérieures et l'épine nasale postérieure (Sdst) en fonction de la longueur de la surface du palais compris entre ces deux points de référence sur le plan sagittal (Slen) pour les locuteurs de français, anglais et japonais.

Annexes

Tableau 46. Corrélations entre variables morphologiques et articulatoires ; français et anglais (n=12).

	ant+ FA	Sdst FA	CAvol FA s	CAOI FA s	CPI FA s	OJ FA s	CAvol FA sh	CAI FA sh	CAOI FA sh
AX FA	-- *	n. s.	n. s.	p = 0.006012; r2 = 0.54643	n. s.	n. s.	n. s.	n. s.	n. s.
SAG FA	--	n. s.	n. s.	n. s.	p = 0.0058699; r2 = 0.54846	n. s.	n. s.	n. s.	n. s.
COR FA	n. s.	n. s.	p = 0.0094421; r2 = 0.50641	n. s.	n. s.	n. s.	n. s.	n. s.	n. s.
ant++ FA	p = 0.0019256; r2 = 0.63461	n. s.	n. s.	n. s.	n. s.	n. s.	n. s.	n. s.	n. s.
Slen FA		p = 6.8618e-006; r2 = 0.87854	n. s.	n. s.	n. s.	n. s.	n. s.	n. s.	n. s.
H FA			n. s.	n. s.	p = 0.0086356; r2 = 0.51457	n. s.	n. s.	n. s.	n. s.
C FA s					p = 0.00073261; r2 = 0.69661	--	--	--	--

Annexes

	ant+ FA	Sdst FA	CAvol FA s	CAOI FA s	CPI FA s	OJ FA s	CAvol FA sh	CAI FA sh	CAOI FA sh
CAa FA sh							p = 1.1814e-007; r2 = 0.94577	p = 0.0019031; r2 = 0.63543	p = 0.0012381; r2 = 0.6643
CAvol FA sh								p = 0.00027593; r2 = 0.74899	p = 0.0002769; r2 = 0.74882
CAI FA sh									p = 8.7487e-005; r2 = 0.79946

* les traits « -- » indiquent que cette combinaison de variables n'a pas été prise en compte.

Pour le groupe de locuteurs de français et d'anglais, il n'existe pas de corrélation significative à l'intérieur des variables morphologiques autre que celles commentées précédemment.

En ce qui concerne les variables articulatoires liées à la cavité antérieure, l'indice d'arcure axial du palais (AX) et la longueur de la cavité orale antérieure (CAOI) sont modérément corrélées pour /s/ (**Figure 170**), mais pas pour /ʃ/. Les palais en forme V (par opposition à la forme en U) ont donc tendance à présenter une cavité orale antérieure plus longue pour /s/. Les autres variables liées à la cavité orale antérieure ne sont pas corrélées avec AX.

Annexes

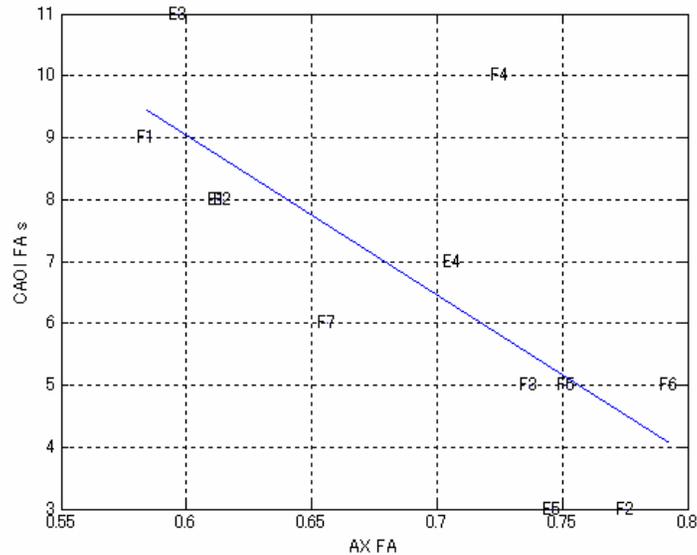


Figure 170. Longueur de la cavité orale antérieure (CAOI) en fonction de l'indice d'arcure axiale (AX), /s/, français et anglais.

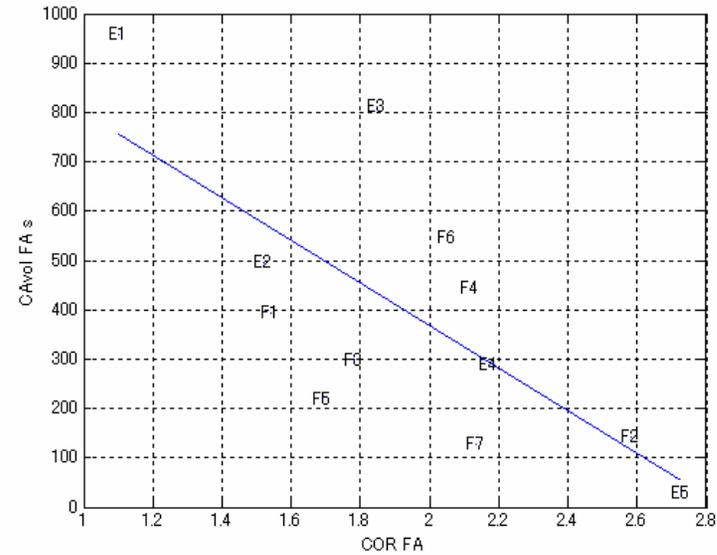


Figure 171. Volume de la cavité orale antérieure (CAVol) en fonction de l'indice d'arcure coronale (COR), /s/, français et anglais.

De même, l'indice d'arcure coronal (COR) est modérément corrélé avec le volume de la cavité antérieure (CAVol) pour /s/ seulement, avec un plus grand volume pour les palais profonds (**Figure 174**).

Bien que les variables morphologiques AX et COR, ni SAG, n'aient pas de valeur prédictive pour /j/, plus la cavité orale (CAOI) antérieure est longue, plus elle tend à présenter un grand volume (CAVol ; **Figure 172**). Aussi, plus l'aire sur le plan sagittal (CAa) est grande, plus le volume est grand (CAVol ; **Figure 173**) pour /j/. En effet, bien que la corrélation soit plus ou moins forte, les mesures de la cavité orale

antérieure sont toutes corrélées entre elles pour /ʃ/.

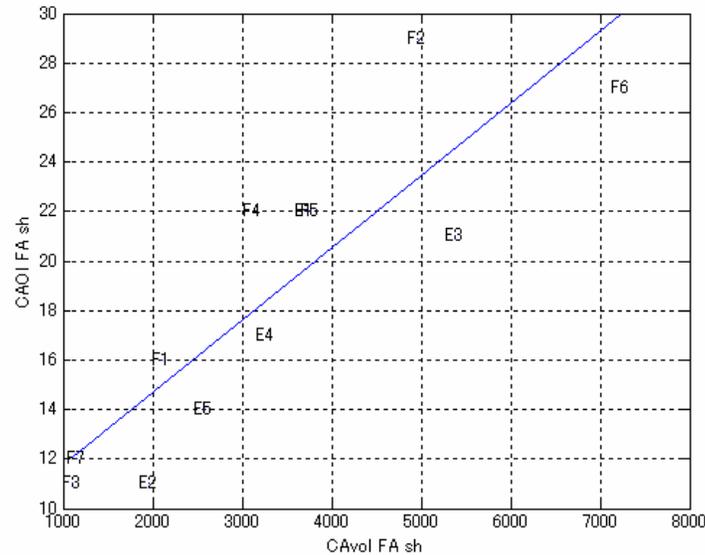


Figure 172. Volume de la cavité antérieure (CAvol) en fonction de la longueur de la cavité orale antérieure (CAOl), /ʃ/, français et anglais.

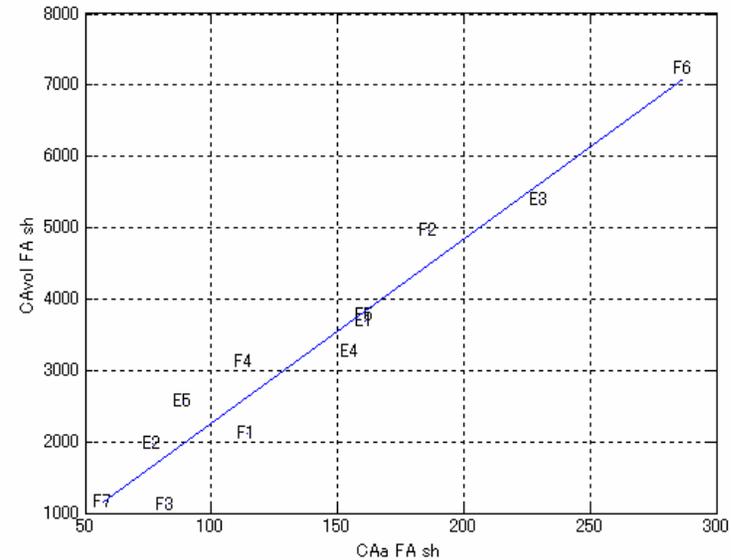


Figure 173. Volume de la cavité antérieure (CAvol) en fonction de l'aire de la cavité antérieure (CAa), /ʃ/, français et anglais.

En ce qui concerne les variables liées au chenal palatal, seules l'indice d'arcure sagittale du palais (SAG) et la hauteur (profondeur) du palais au niveau des premières prémolaires (H) sont modérément corrélés avec l'indice de longueur du chenal palatal (CPI) pour /s/ (**Figure 174** et **Figure 175**). Plus le palais est plat sur le plan sagittal et coronal, plus on a tendance à observer un chenal palatal long pour /s/. Pour /ʃ/, il n'existe aucune tendance consistante en ce qui concerne le chenal palatal.

Annexes

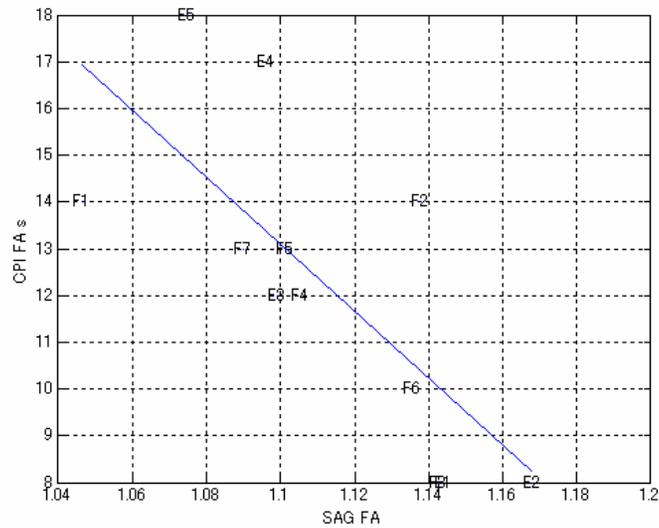


Figure 174. Indice de longueur du chenal palatal en fonction de l'indice de courbure du palais sur le plan sagittal ; /s/, français et anglais.

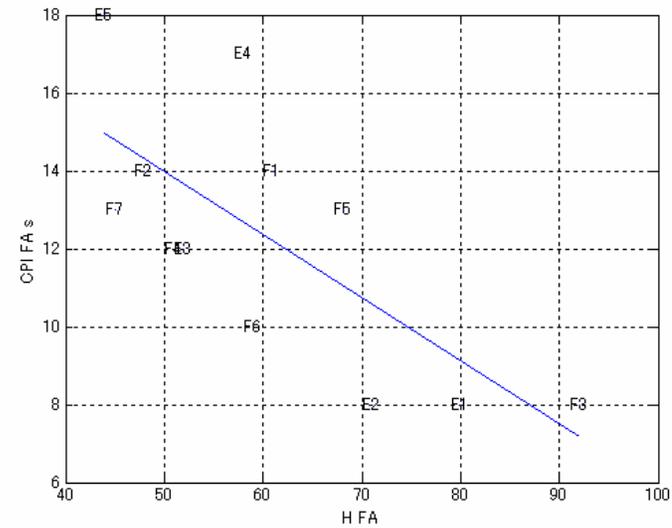


Figure 175. Indice de longueur du chenal palatal en fonction de la hauteur du palais sur le plan coronal ; /s/, français et anglais.

Enfin, il est intéressant de noter que l'overjet (OJ) est modérément corrélé avec l'aire de la constriction (C) pour /s/. Plus l'avancement de la pointe des incisives supérieure par rapport à la pointe des incisives inférieure est grande, plus l'aire de la constriction tendrait à être grande pour /s/. Cependant, la dispersion des données individuelles (Figure 176) suggère qu'une valeur atypique (sujet E3) est responsable de cette tendance.

Annexes

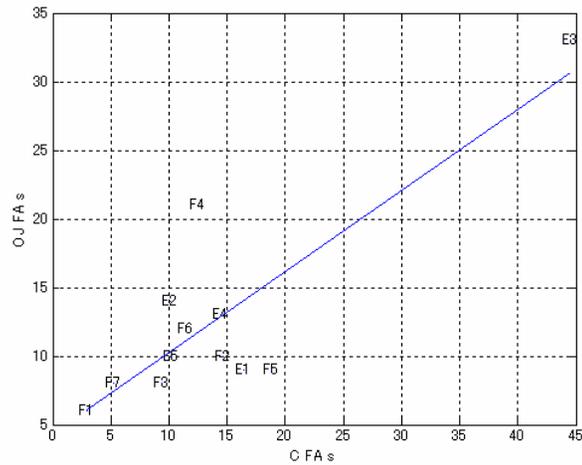


Figure 176. Overjet en fonction de l'aire de la constriction, /s/, français et anglais.

Tableau 47. Corrélations entre variables morphologiques et articulatoires, japonais.

	ant++ J	ant+ J	Sdst J	W J
SAG J	--	--	n. s.	n. s.
COR J	p = 0.0034142; r2 = 0.72866	p = 0.00056845; r2 = 0.83505	p = 0.026053; r2 = 0.53052	--
ant++ J		p = 0.0028777; r2 = 0.74113	n. s.	--
ant+ J			p = 0.010403; r2 = 0.63239	--
Slen J			p = 1.8233e-005; r2 = 0.93748	--
Sdst J				p = 0.012416; r2 = 0.61448

Annexes

Pour le japonais, on observe une corrélation entre des variables morphologiques qui n'avaient pas été observées pour le groupe français/anglais. Il s'agit de l'indice de courbure du palais sur le plan coronal (COR) avec la largeur du palais au niveau pré-alvéolaire et au niveau post-alvéolaire (Ant++ et Ant+), et dans une moindre mesure avec la distance du palais sur le plan sagittal (Sdst). Pour les premières combinaisons, lorsqu'on observe la dispersion des valeurs individuelles (**Figure 178**), les sujets se séparent en deux groupes : un groupe avec un palais creux (ou profond), et étroit (en bas, à gauche), et l'autre avec un palais plat (peu profond) et large. Nous pensons que cette relation, qui n'est pas observée pour le groupe français-anglais, est due à la faible variabilité de la hauteur palatale (H ; **Figure 177**) pour les locuteurs japonais. Par conséquent, la variable COR reflèterait plus directement la largeur entre les premières prémolaires (W), qui est une mesure très proche de Ant + et Ant ++.

Annexes

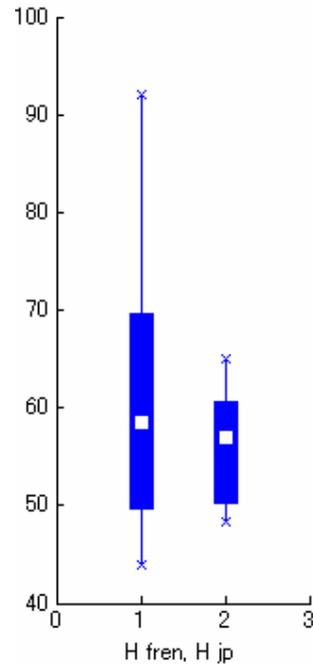


Figure 177. Distribution de la hauteur palatale sur le plan coronal (H) pour le groupe français-anglais et japonais. Les croix correspondent aux maximum et minimum, les rectangles médians à l'intervalle entre le premier et le troisième quartile, et le point blanc indique la médiane.

La distance sagittale du palais (Sdst) est également corrélée avec la largeur post-alvéolaire du palais (Ant+ ; **Figure 179**) et avec la largeur entre les premières prémolaires (W) qui sont des mesures similaires, où les palais longs sur le plan sagittal ont tendance à être plus large au niveau post-alvéolaire. Ceci est cohérent avec les observations que nous avons émises à propos des variables morphologiques, toutes langues confondues (cf. **Tableau 45**), dans le sens où les palais de grande dimension se caractérisent à la fois par une largeur et une longueur supérieures.

Annexes

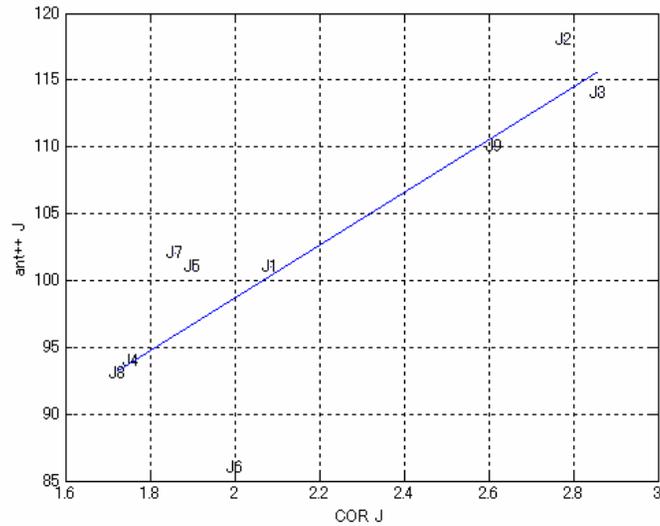


Figure 178. Largeur du palais au niveau post-alvéolaire (Ant+ en fonction de l'indice de courbure du palais sur le plan coronal (COR), japonais.

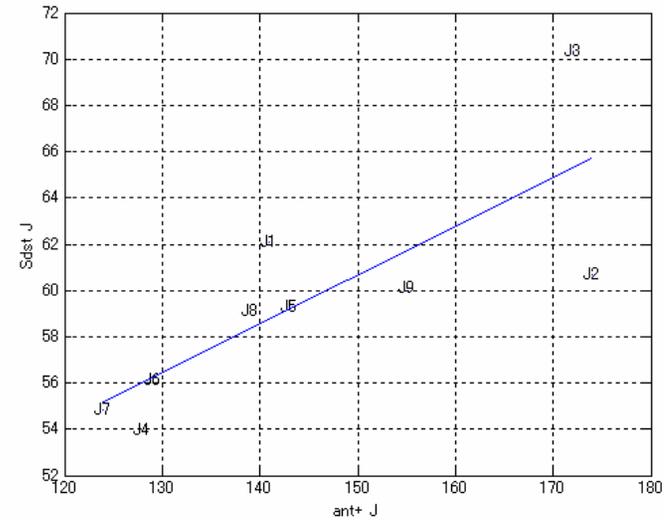


Figure 179. La longueur du palais sur le plan sagittal (Sdst) en fonction de la largeur du palais au niveau post-alvéolaire (Ant+), japonais.

Tableau 48. Corrélation entre variables articulatoires et morphologiques, japonais (n=9).

	CAvol J s	CAOI J s	CPI J s	OB J s	PALi J sj	CAvol J sj	CAI J sj	CAOI J sj	C J sj
SAG J	n. s.	n. s.	n. s.	p = 0.030214;	n. s.	n. s.	n. s.	p = 0.020605;	n. s.

Annexes

				r2 = 0.51193				r2 = 0.55869	
Slen J	p = 0.019311;	n. s.	n. s.	n. s.	n. s.	n. s.	p = 0.015445;	n. s.	n. s.
	r2 = 0.56621						r2 = 0.59126		
Sdst J	p = 0.02952;	n. s.	n. s.	n. s.	n. s.	n. s.	n. s.	n. s.	n. s.
	r2 = 0.51489								
W J	n. s.	n. s.	p = 0.020787;	n. s.	n. s.	n. s.	n. s.	n. s.	n. s.
			r2 = 0.55767						
H J	n. s.	n. s.	n. s.	n. s.	p = 0.024483;	n. s.	n. s.	n. s.	n. s.
					r2 = 0.53813				
CAvol J s	p = 0.021601;	n. s.	n. s.		--	--	--	--	--
	r2 = 0.55315								
CAI J s	p = 0.0046457;	p = 0.0019492;	n. s.		--	--	--	--	--
	r2 = 0.70473	r2 = 0.76754							
CAa J sj					n. s.	p = 4.2136e-005;	n. s.	n. s.	n. s.
						r2 = 0.92073			
CPI J sj								p = 0.00018987;	
								r2 = 0.87875	

Annexes

Bien que la corrélation soit modérée, les palais profonds (fortement incurvés) sur le plan sagittal (SAG) sont associés à une superposition verticale plus importante des incisives supérieures et des incisives inférieures (OB) pendant la production du /s/ japonais. Il s'agit de la seule corrélation significative entre les variables morphologiques et les variables articulatoires liées à l'occlusion des incisives.

Voici les principaux résultats qui concernent la cavité (orale) antérieure. Les variables morphologiques ont une capacité de prédiction, là encore assez limitée, avec des coefficients de corrélation modérés. Contrairement à toute attente, plus un palais est court (Slen et Sdst), plus le volume de la cavité orale antérieure (CAvol) tend à être grand pour /s/ (**Figure 180**). Toutes choses égales par ailleurs, si le lieu de constriction du /s/ était proportionnel à la taille du palais, on aurait prédit le phénomène inverse.

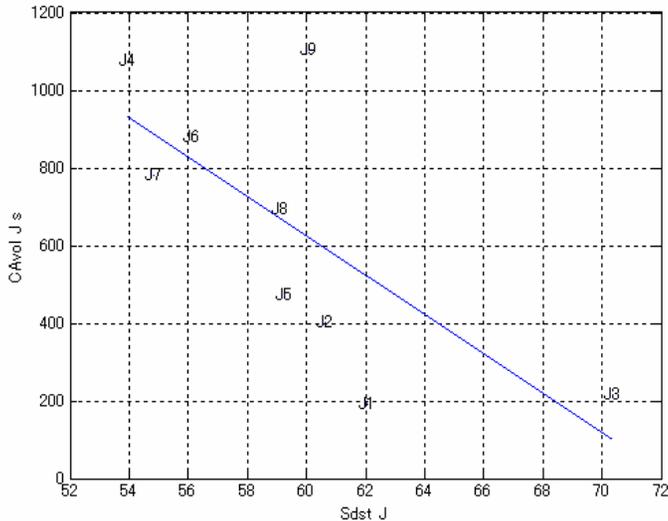


Figure 180 Le volume de la cavité orale antérieure (CAvol) en fonction de la longueur du palais sur le plan sagittal (Sdst), japonais.

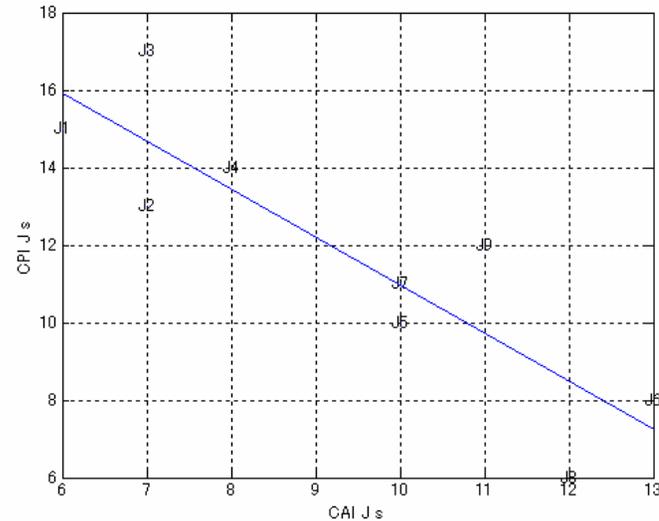


Figure 181 Indice de longueur du chenal palatal (CPI) en fonction de la longueur de la cavité antérieure (CAI), japonais.

Annexes

De même, plus la surface du palais est longue sur le plan sagittal (Slen ; palais long *ou* fortement incurvé), moins la cavité antérieure (comprenant la cavité labiale) est longue (CAI) pour /s^ʃ/. Ces tendances apparemment contradictoire peuvent être le reflet d'une volonté de normalisation inter-locuteur (chaque locuteur viserait à atteindre une cible acoustique moyenne), mais un examen approfondi serait nécessaire pour comprendre ce dont il s'agit précisément. Ce point sera discuté à nouveau en relation avec les variables acoustiques (chapitre *acoustique*).

En relation avec la cavité antérieure, plus le palais est incurvé sur le plan sagittal (SAG), moins la longueur de la cavité orale antérieure (CAOI) est longue pour /s^ʃ/. Cette dernière relation pourrait être simplement due à la distorsion de la longueur de la cavité orale lors de l'estimation de la fonction d'aire. Plus le conduit vocal est incurvé sur le plan sagittal, plus il est vraisemblable que l'angle des plans perpendiculaires au sens du conduit vocal dans la région de la cavité orale antérieure en référence aux coupes coronales soit important. La longueur de la cavité orale tendrait dans ce cas à être sous-estimée.

Comme pour le /ʃ/ du groupe français/anglais, le volume de la cavité orale antérieure (CAvol) est fortement corrélé avec son aire (CAa) sur le plan sagittal pour /s^ʃ/. Comme le /s/ du groupe français/anglais, ceci n'est pas valable pour le /s/ japonais. Toutefois, la longueur de la cavité orale antérieure (CAOI) est corrélée avec son volume (CAvol) et la longueur qui inclut les lèvres (CAI) pour /s/.

En ce qui concerne le chenal palatal, plus le palais est large (W), plus le chenal palatal tend à être long (CPI) pour /s/. De plus, on observe pour /s/ une corrélation entre la longueur de la cavité antérieure (CAI) et l'indice de longueur du chenal palatal (CPI). Plus la cavité orale est longue (le lieu d'articulation est postérieur), moins le chenal palatal est long (**Figure 181**) pour /s/. Par ailleurs, plus le palais est plat (H), plus l'articulation est palatalisée (PALi) pour /s^ʃ/. Enfin, plus le chenal palatal est long (CPI), plus l'aire de constriction est grande pour /s^ʃ/. Ces dernières variables présentent une forte corrélation.

ANNEXE V : DESCRIPTION ACOUSTIQUE INDIVIDUELLE

Dans cette annexe, le spectre moyen du bruit de friction tenu en position allongée est fourni pour les 29 locuteurs de toutes les langues. Ce spectre est moyenné sur 200 fenêtres prélevées sur les 80 % du centre de l'occurrence. Une deuxième courbe représente le spectre lissé (LPC avec 48 coefficients). Les chiffres à la droite de la figure indiquent la durée totale (en secondes) de l'occurrence qui a été utilisée. Le centre de gravité et le pic spectral sont indiqués sur ces courbes. Pour le polonais, les transitions formantiques sont également fournies.

Français

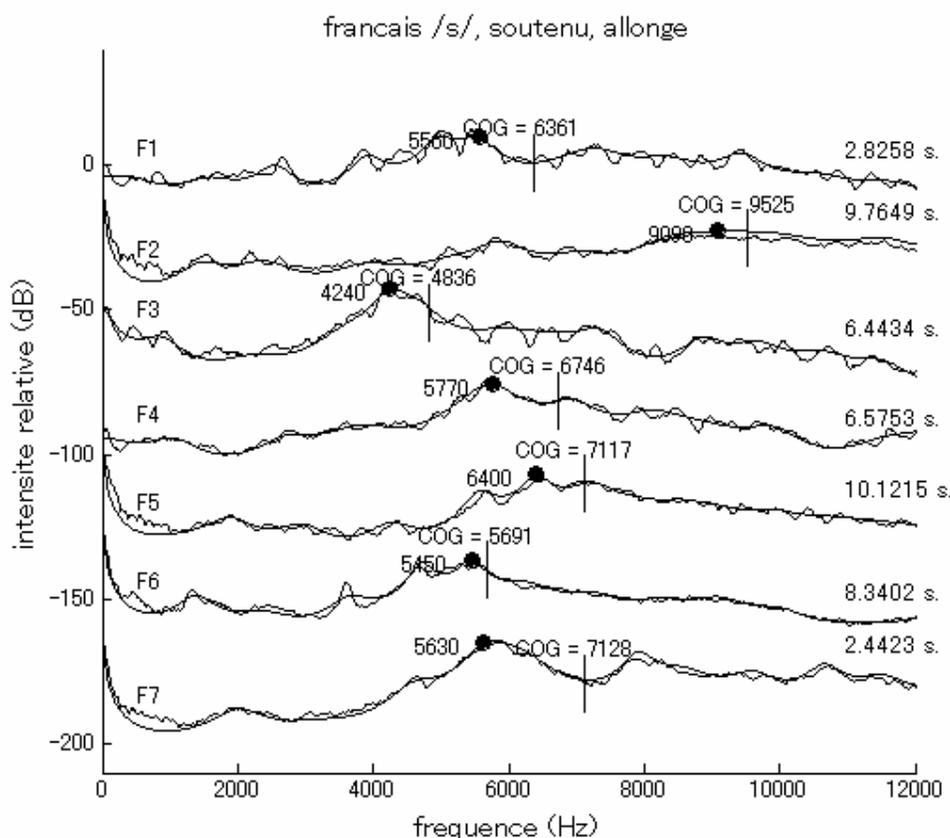


Figure 182. Spectres moyens, /s/, français. Les courbes sont décalées de 30 dB entre elles pour une meilleur lisibilité. Le chiffre à droite indique la durée du bruit tenu (en secondes).

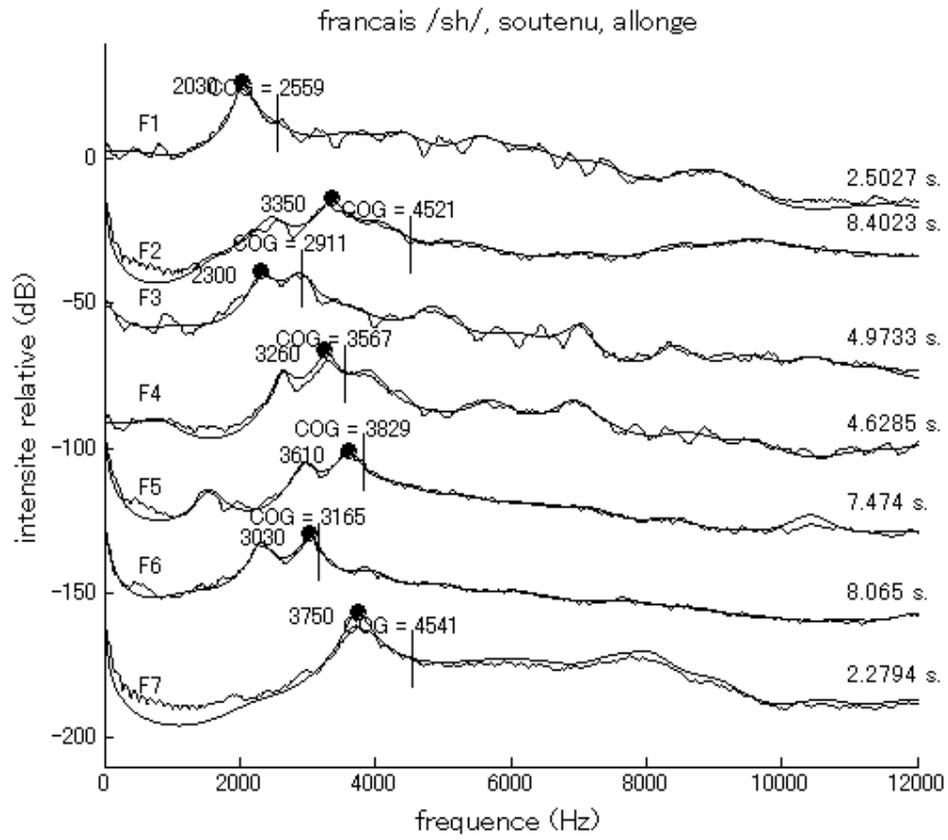


Figure 183. Spectres moyens, /ʃ/, français.

Anglais

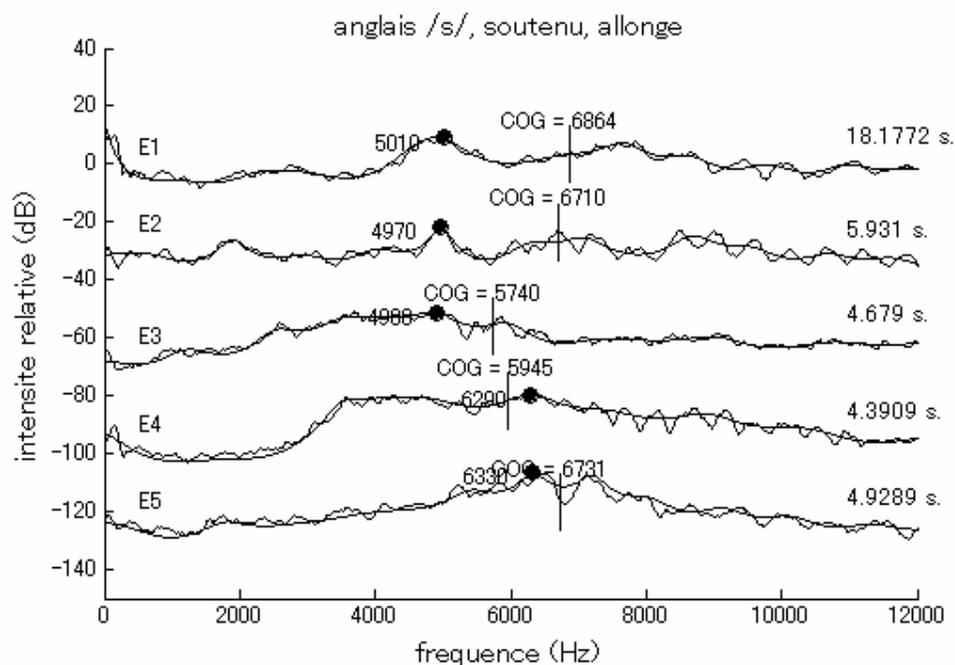


Figure 184. Spectres moyens, /s/, anglais.

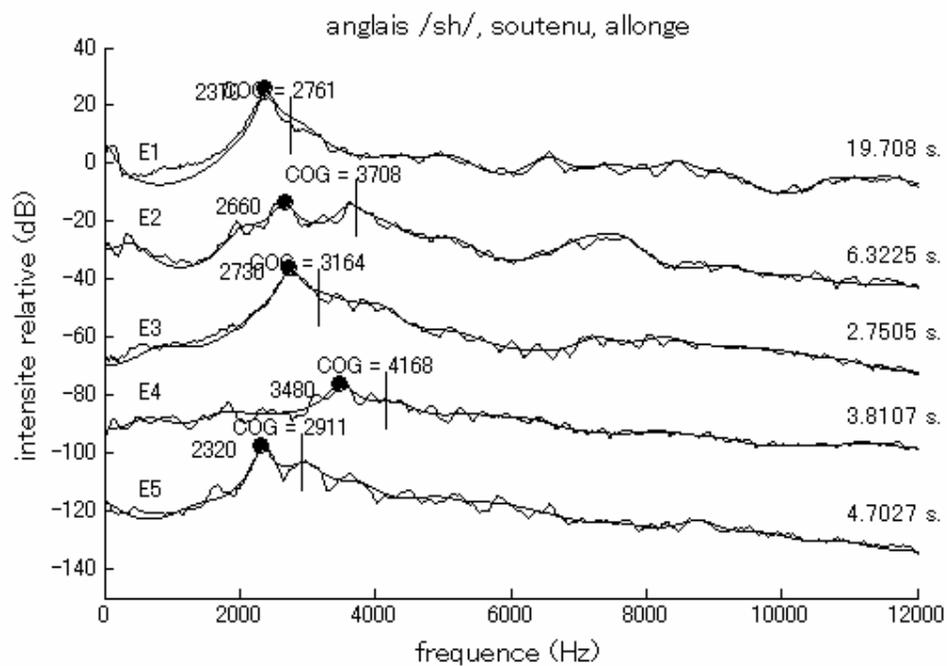


Figure 185. Spectres moyens, /ʃ/, anglais.

Japonais

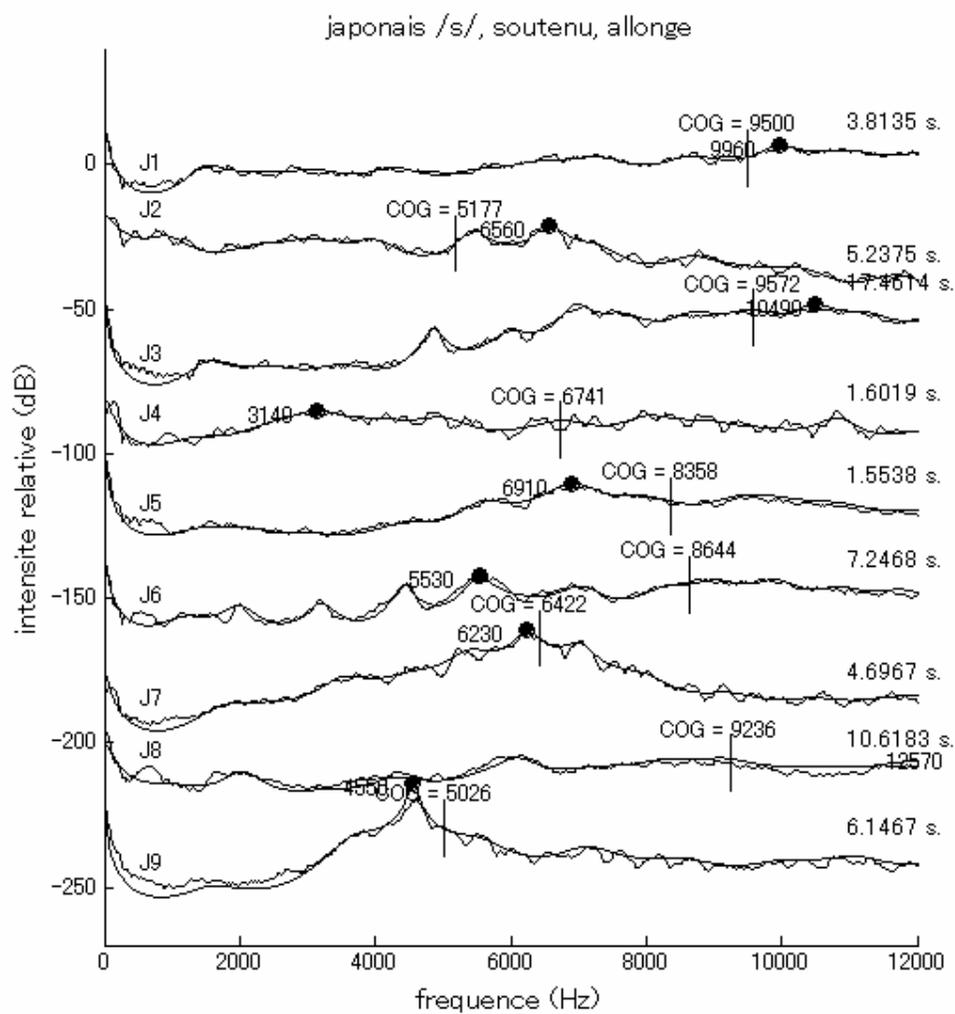


Figure 186. Spectres moyens, /s/, japonais.

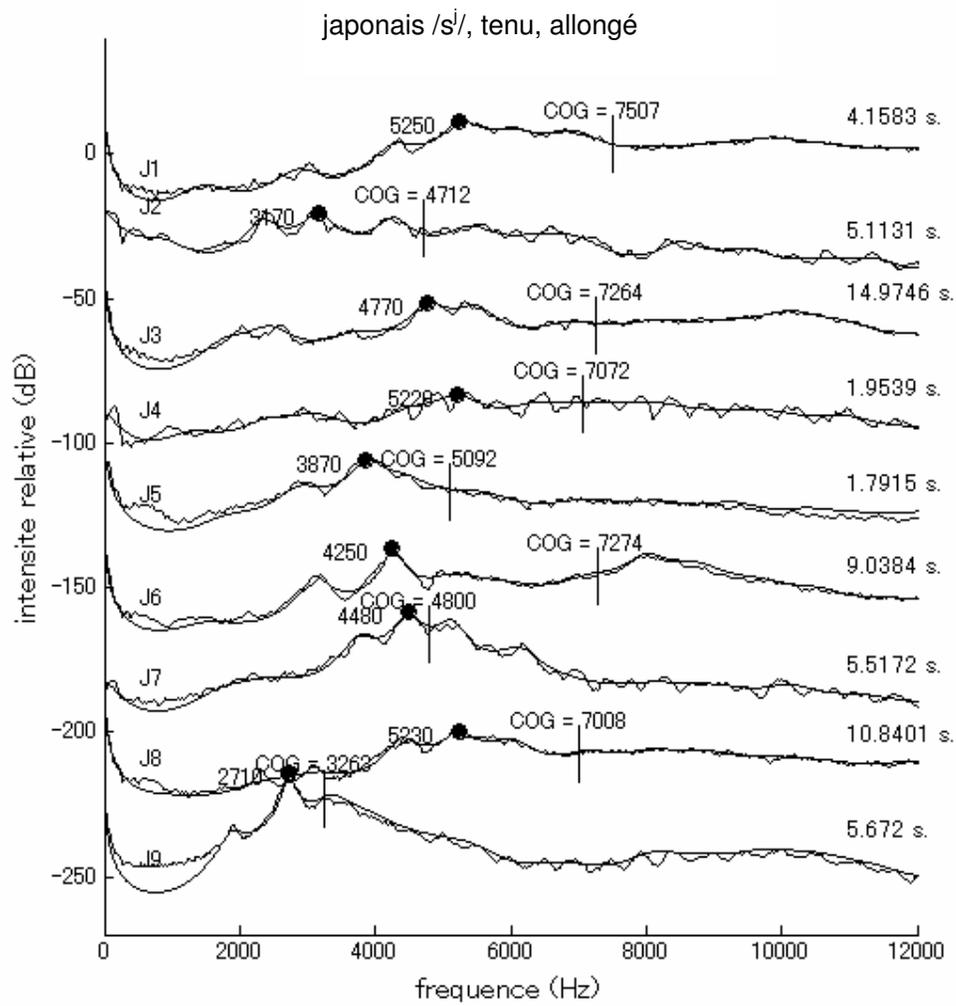


Figure 187. Spectres moyens, /s^h/, japonais.

Chinois

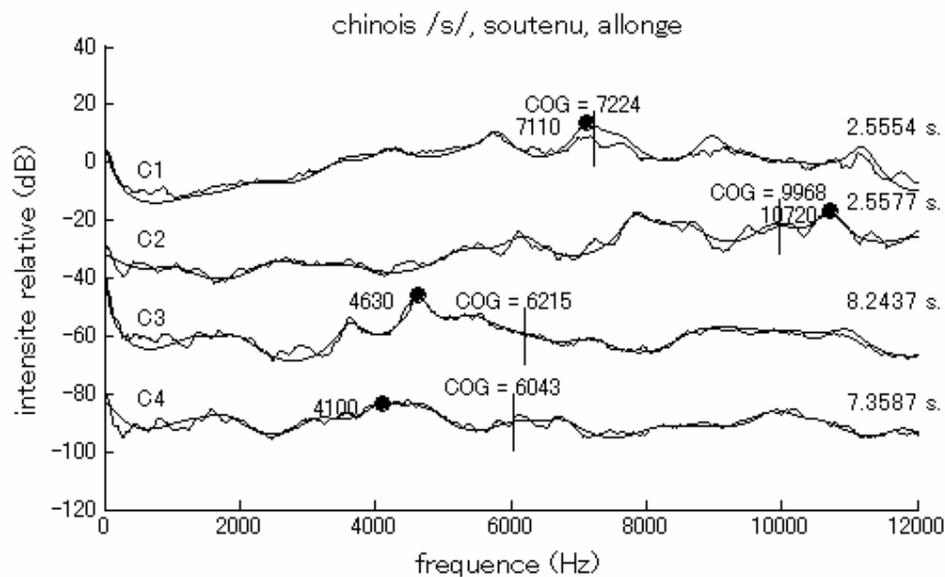


Figure 188. Spectres moyens, /s/, chinois.

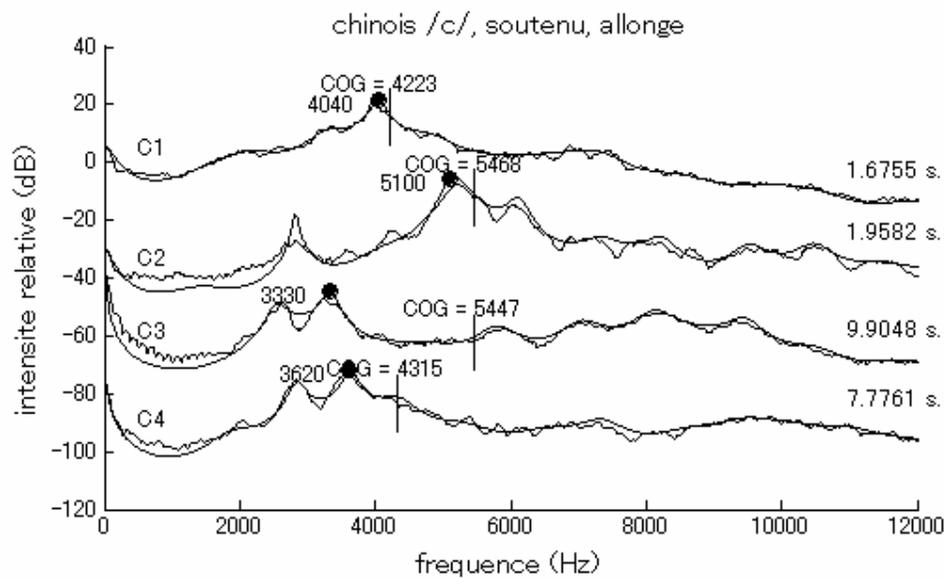


Figure 189. Spectres moyens, /ç/, chinois.

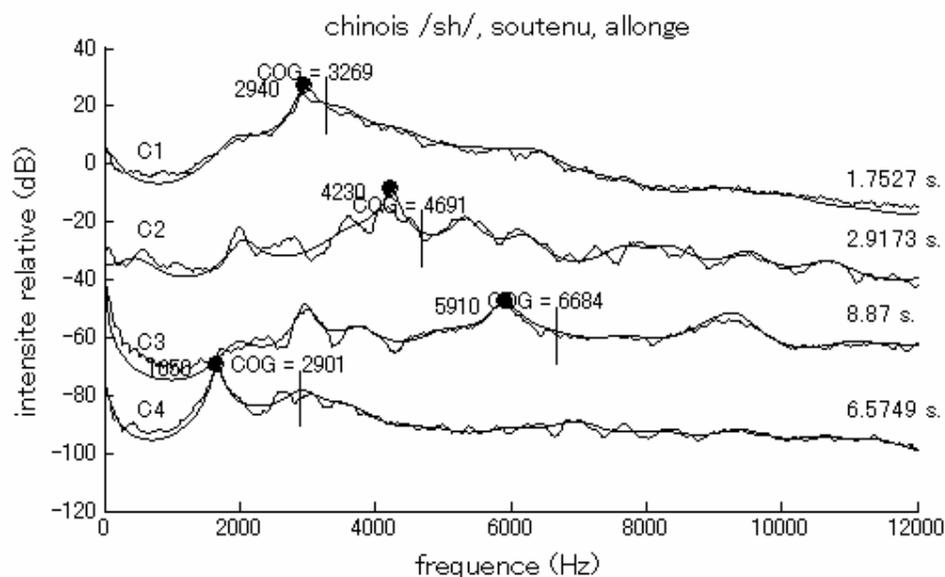
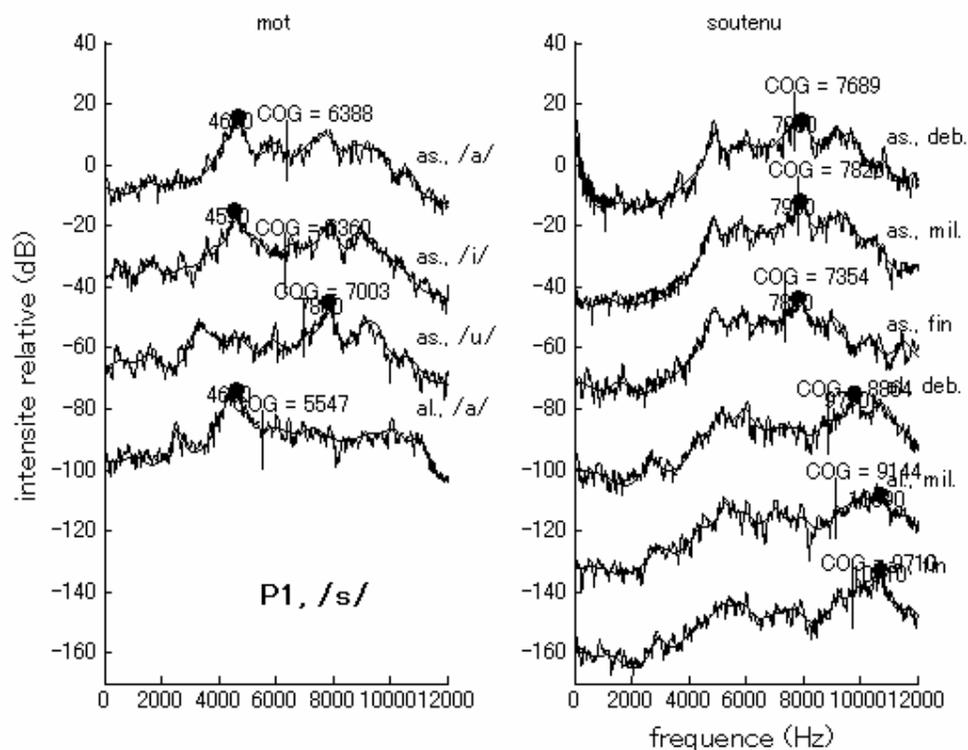


Figure 190. Spectres moyens, /s/, chinois.

Polonais



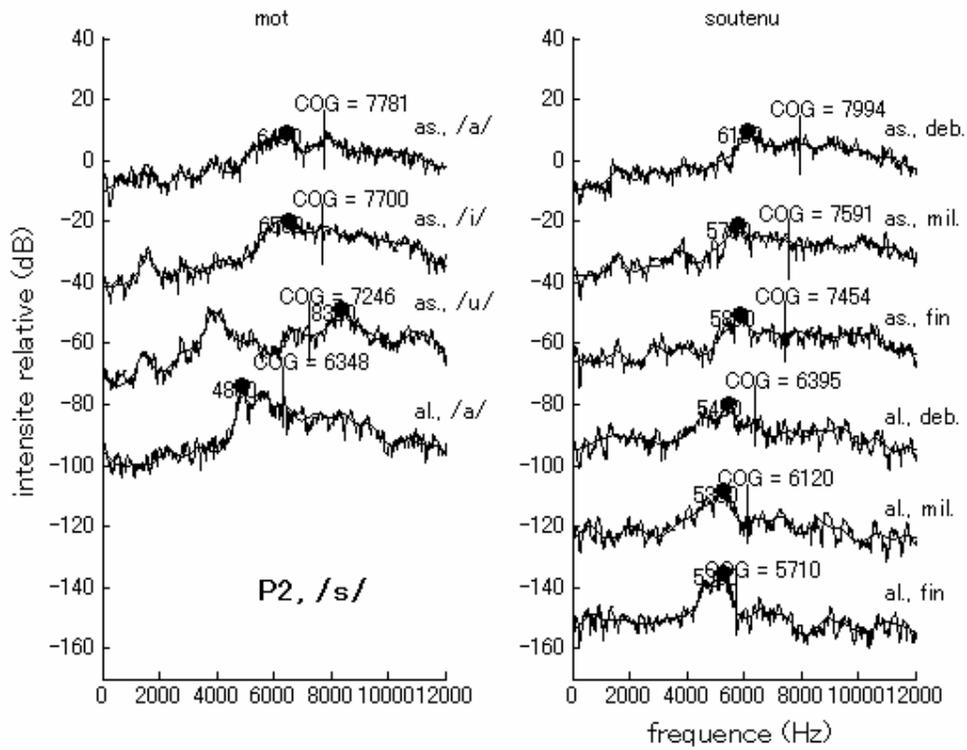


Figure 191. Spectres moyens, /s/, polonais.

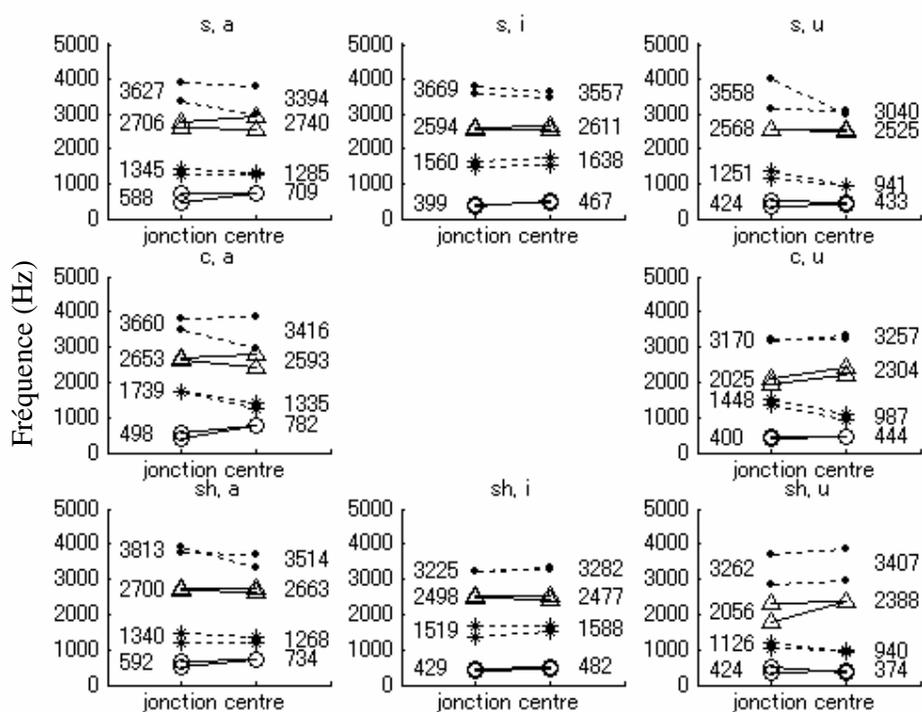


Figure 192. Fréquence des formants F1 à F4, à la jonction entre sibilante et voyelle et au centre de la voyelle post-fricative pour les /s/ (haut), /ʃ/ (milieu) et /ʂ/ (bas) du polonais.

Suédois

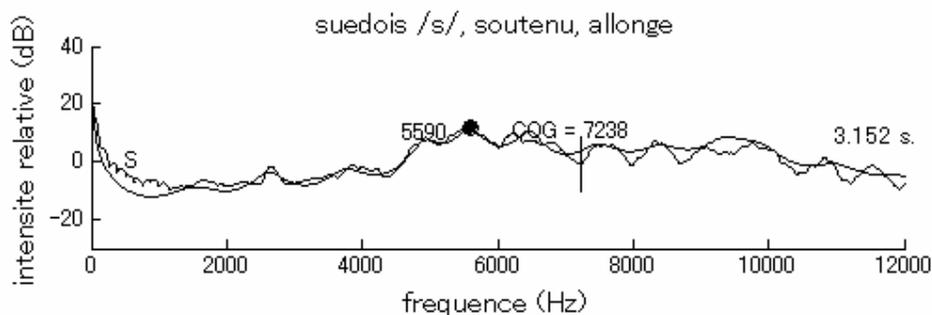


Figure 193. Spectre moyen, /s/, suédois.

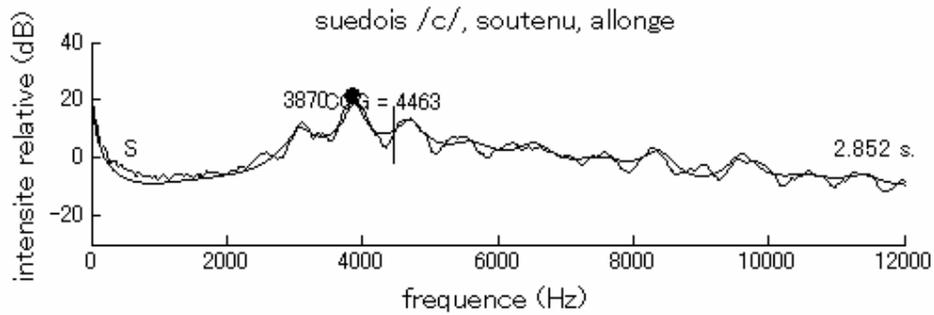


Figure 194. Spectre moyen, /ç/, suédois.

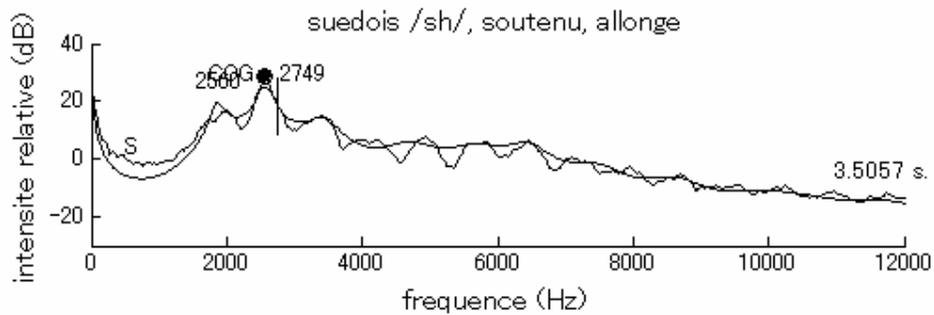


Figure 195. Spectre moyen, /š/, suédois.

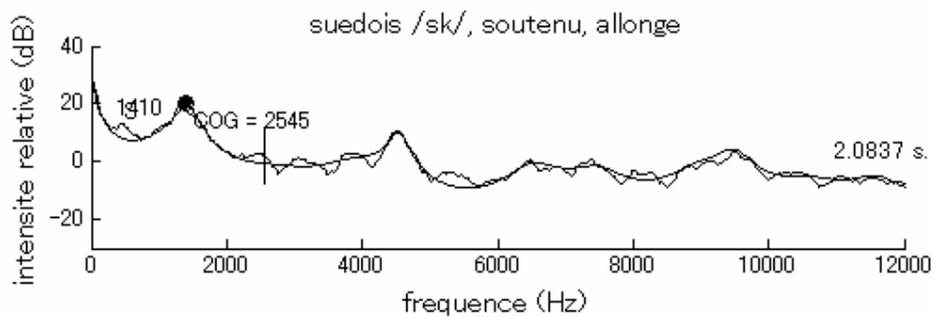


Figure 196. Spectre moyen, /š/, suédois (la consigne était de produire de manière tenue la consonne initiale du mot « sked » /šje:d/).

Russe

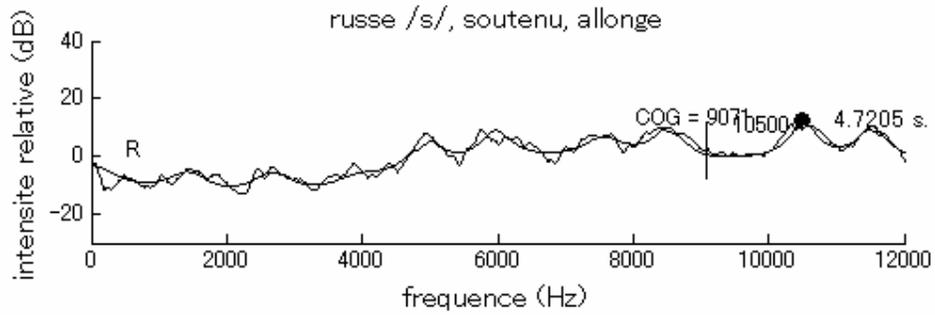


Figure 197. Spectre moyen, /s/, russe.

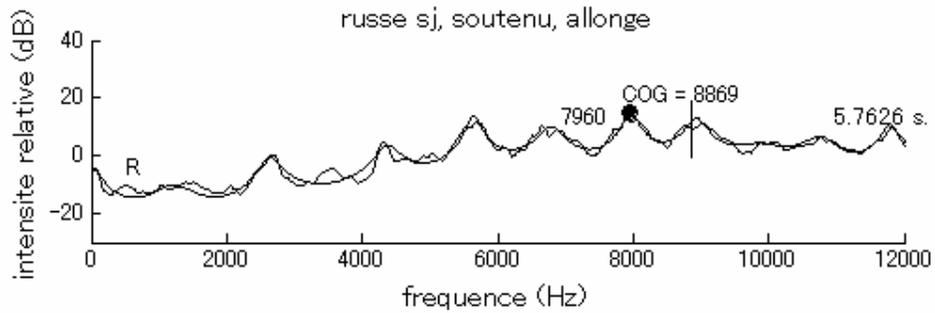


Figure 198. Spectre moyen, /sʲ/, russe.

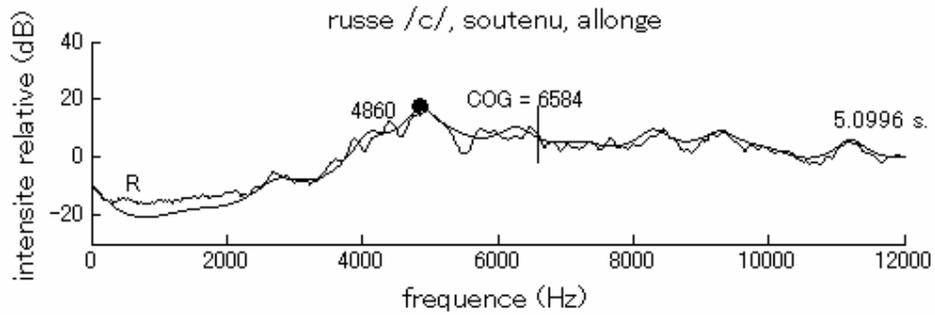


Figure 199. Spectre moyen, /ç/, russe.

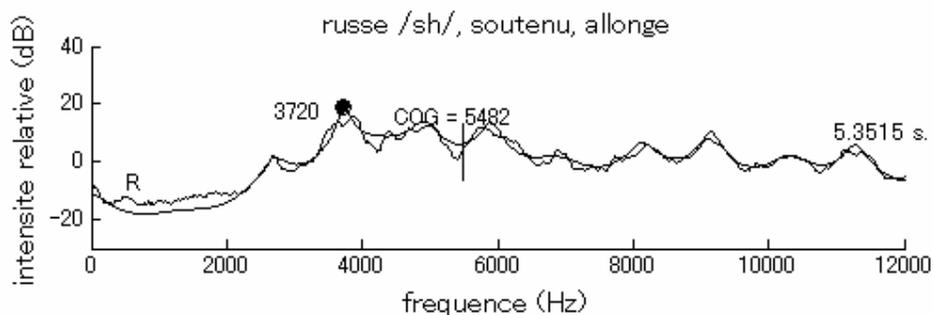
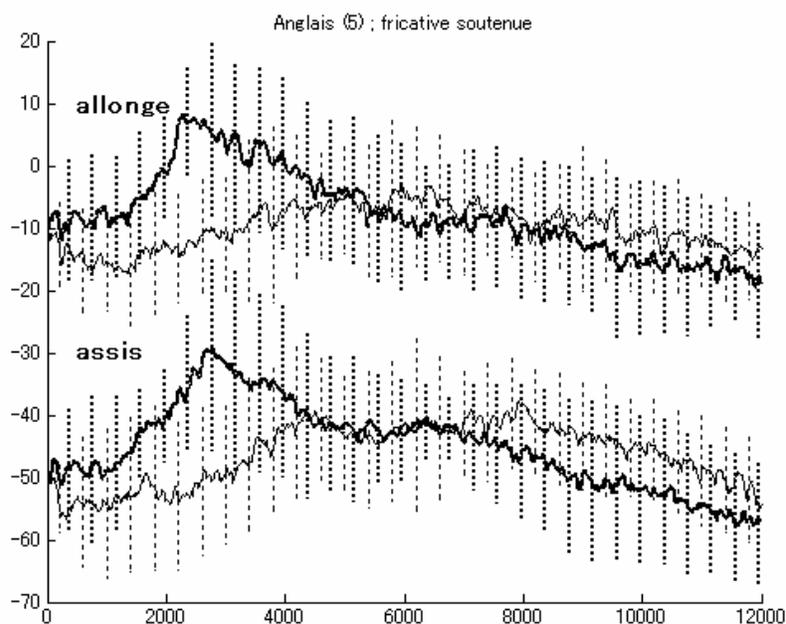


Figure 200. Spectre moyen, /ʃ/, russe.

Spectres moyens

Les spectres moyens inter-locuteurs ont été calculées pour les langues où les locuteurs étaient les plus nombreux : japonais (9), français (7 ; dans le corps principal de la thèse) et anglais (5). Il s'agit de la moyenne (moyennage effectué dans le domaine dB) des spectres moyens individuels calculés sur un intervalle de 62 ms au centre du bruit de friction (moyenne des spectres FFT de 10 fenêtres hamming de 8 ms avec une superposition de 2 ms).

Anglais



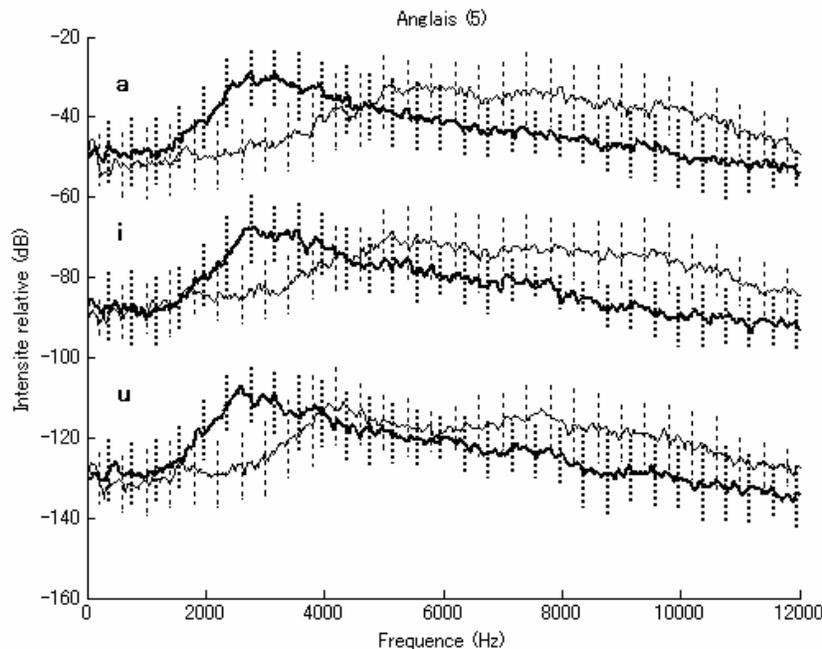


Figure 201. Spectres moyens pour l'anglais. Les lignes épaisses correspondent à /ʃ/ et les lignes fines à /s/. V. légende de la Figure 41.

Les spectres moyens calculés pour l'anglais sont assez proches de ceux du français, avec une première plage fréquentielle où les deux courbes sont maximale-ment distantes entre 2 et 4 kHz et une deuxième entre 6 (voire 8) et 12 kHz. En moyenne, les locuteurs anglais possèdent une prééminence spectrale du /ʃ/ plus basse (environ 3 kHz) que les locuteurs français examinés dans cette étude (autour de 3,5 kHz, mais plus variable selon les conditions). En contexte /u/ (panneau inférieur), contrairement au français, le pic de /ʃ/ se maintient approximativement dans les mêmes fréquences que pour les autres contextes vocaliques. Le pic inférieur de /s/ en contexte /u/ est plus bas que dans les autres contextes d'environ 1 kHz, une différence qui est moins importante qu'en français, dans le même contexte, où le pic inférieur est au moins 2 kHz plus bas que dans les contextes non arrondis.

Japonais

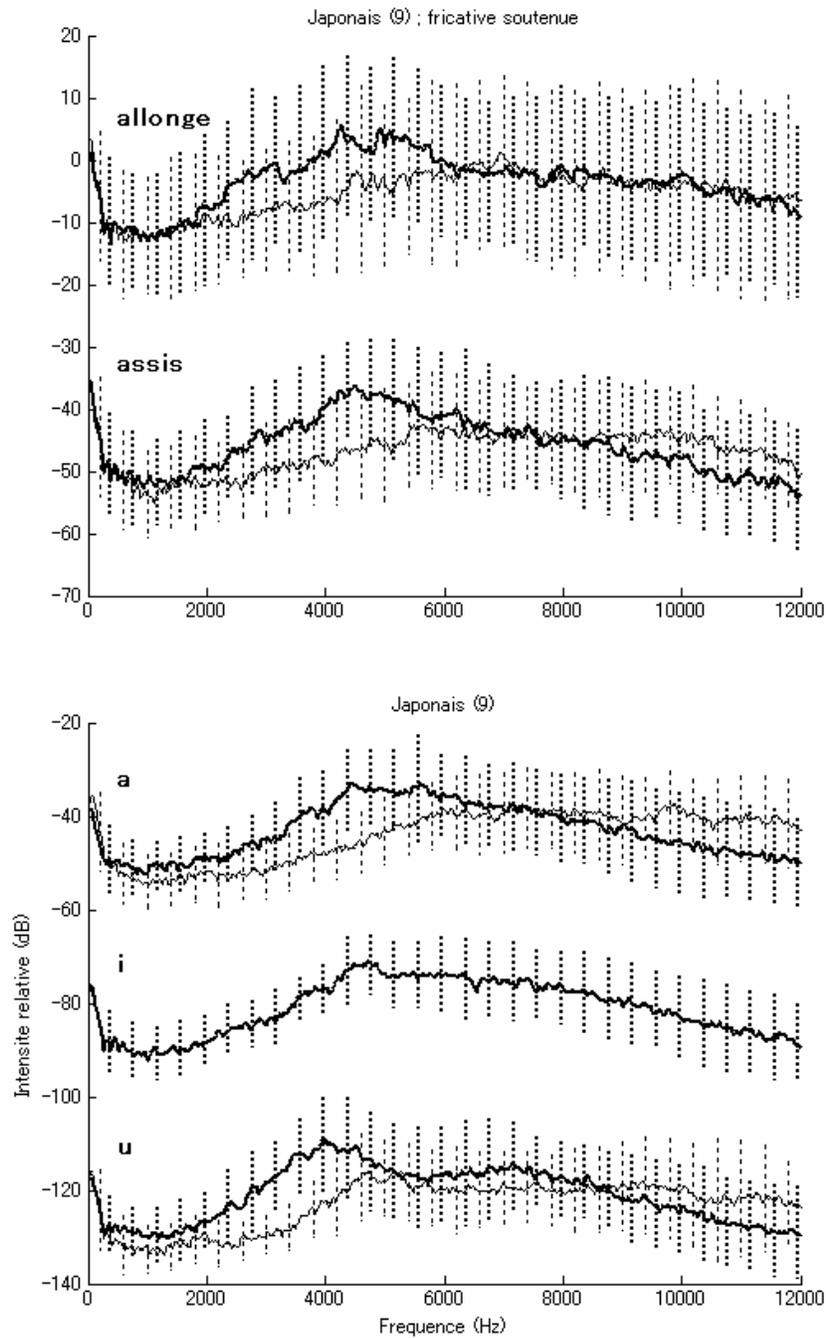


Figure 202. Spectres moyens pour le japonais. Les lignes épaisses correspondent à /sʲ/ et les lignes fines à /s/. V. légende de la Figure 41.

Annexes

Le spectre moyen (tous locuteurs confondus) des sibilantes japonaises présente une plage de fréquences où le spectre des deux sibilantes est maximalelement distant : entre 2 et 6 kHz pour le contexte /a/ et en production tenue et entre 2 et 5 kHz pour le contexte /u/ (uu). Les deux courbes se distancient à nouveau dans les très hautes fréquences, à partir de 9 kHz excepté pour la production tenue en position allongée, où les deux courbes sont au même niveau dans les hautes fréquences.

ANNEXE VI : SIMULATION ACOUSTIQUE 1D À PARTIR DE FONCTIONS D'AIRES MESURÉES

P1 /s/

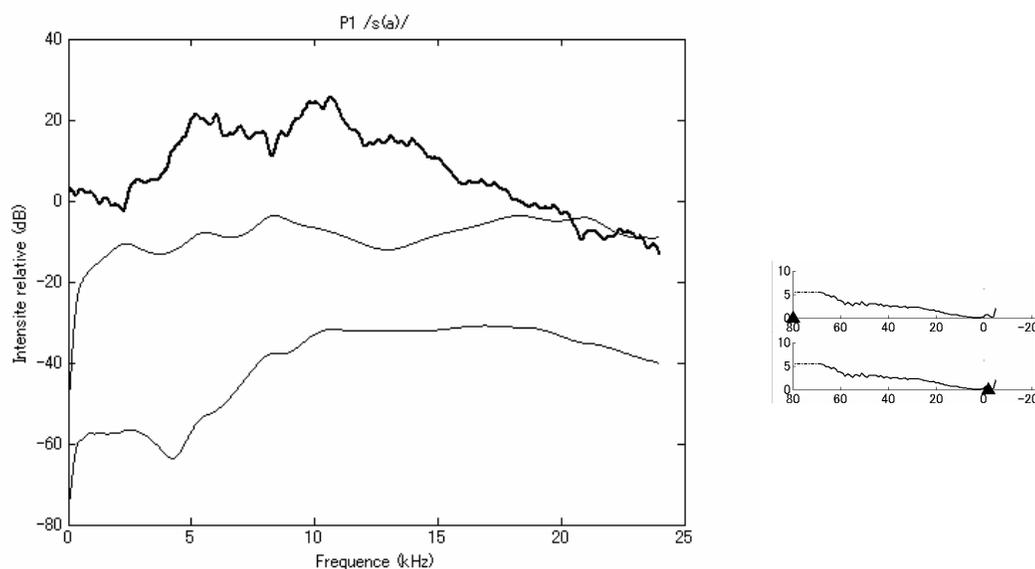


Figure 203. Spectre moyen (ligne épaisse) et fonctions de transfert pour /s/, P1. La première fonction de transfert a été obtenue avec le modèle original (de la région vélaire aux lèvres) avec une source dentale. La deuxième fonction de transfert avec un modèle antérieur tronqué à la constriction ; la dernière avec un modèle postérieur. Les courbes ont été décalée de 30 dB entre elles pour une meilleure visibilité.

La fonction d'aire de /s/, pour P1 du moins, semble moins apte à reproduire les caractéristiques du spectre moyen (**Figure 203**). Dans cette configuration articulaire du /s/, il n'existe pas de cavité orale antérieure distincte de la constriction. On peut comparer cette configuration à la configuration simplifiée de la **Figure 51** (III-1). L'absence de cavité labiale fidèle au conduit vocal d'origine porte probablement préjudice à la simulation. En effet, la cavité labiale, étant donnée sa longueur d'environ 1 cm (et dont la résonance quart d'onde serait attendue théoriquement vers 9 kHz) pourrait être responsable du pic principal du spectre moyen.

P2 /s/

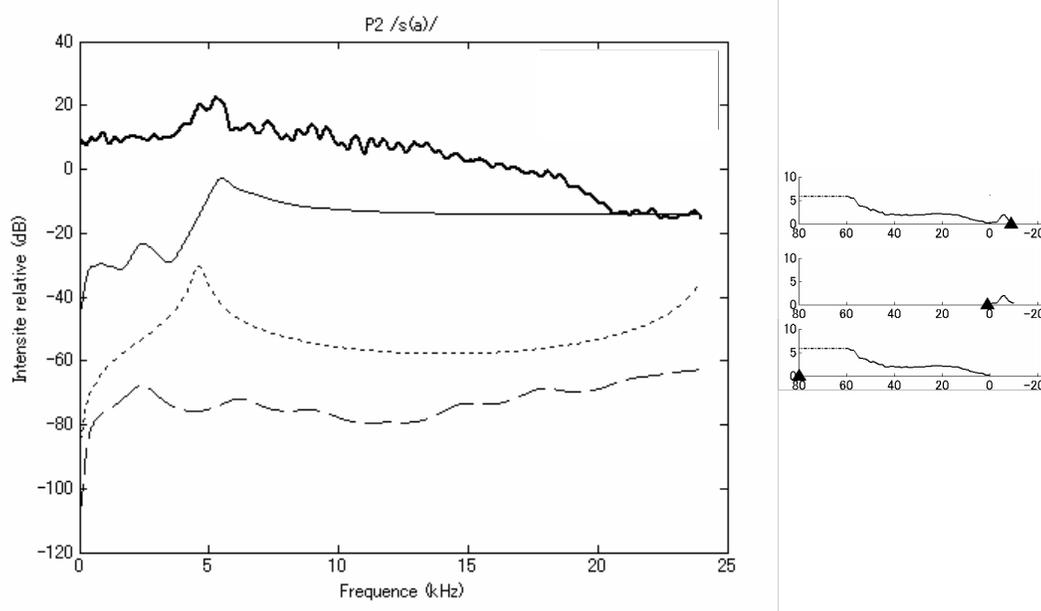


Figure 204. Spectre moyen (ligne épaisse) et fonctions de transfert obtenues avec le modèle original (source dentale), un modèle antérieur tronqué à la constriction, et un modèle postérieur. Les courbes ont été décalée de 30 dB entre elles pour une meilleure visibilité.

Le spectre moyen de P2, caractérisé par un pic dépassant d'un spectre relativement plat, est plus ressemblant (**Figure 204**) à la fonction de transfert calculée (modèle original) en comparaison à P1. Le pic principal provient probablement de la cavité antérieure.

ANNEXE VII : SIMULATION ACOUSTIQUE 3D

Effet de la finesse du maillage

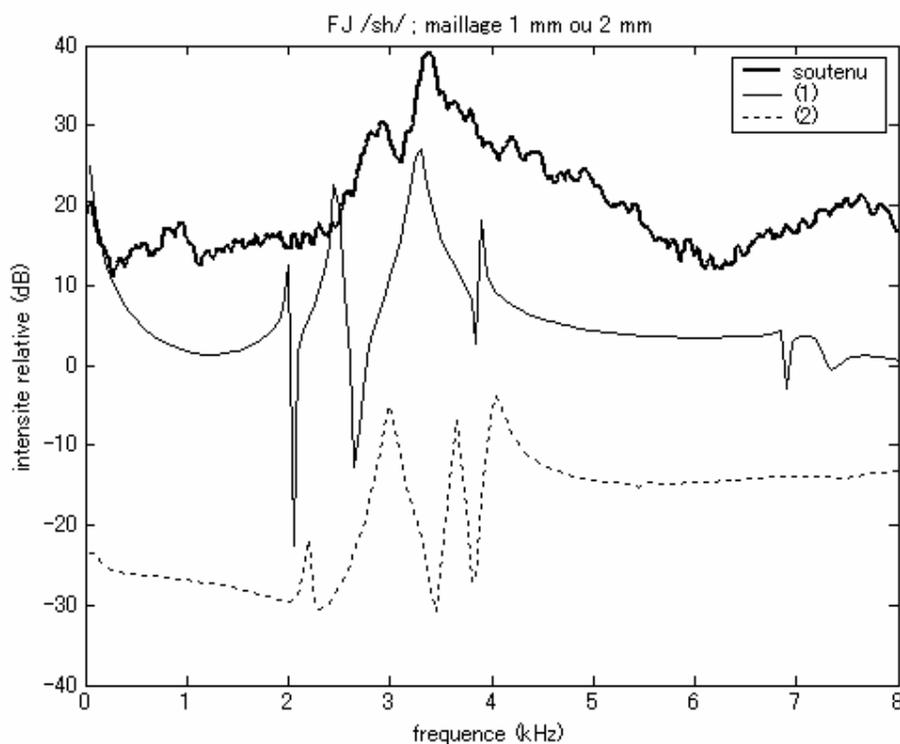


Figure 205. Spectre moyen du bruit de friction tenu de /ʃ/ (ligne foncée) et fonctions de transfert calculées à l'aide de la méthode des éléments finis. (1) Conduit vocal 3D tronqué dans la région vélaire, construit à partir d'un maillage de 1 mm ; (2) conduit vocal 3D tronqué dans la région vélaire, construit à partir d'un maillage de 2 mm. Les fonctions de transfert sont décalées entre elles de 20 dB pour une meilleure lisibilité.

La **Figure 205** présente la fonction de transfert calculée avec des conduits vocaux 3D construits à partir de maillages plus ou moins fins (eux-mêmes issus des mêmes données IRM). L'aspect général des courbes est assez semblable, avec un groupement de pics et de creux entre 2 et 4 kHz. La fréquence individuelle de chacun de ces pics est cependant différente selon le conduit vocal 3D, avec une tendance plus élevée pour le maillage moins fin. Cette différence pourrait provenir de la déformation du conduit vocal lors de la construction des maillages.

Effet de la taille de l'espace de rayonnement

La fonction de transfert est calculée habituellement à partir de la variation de pression

acoustique rayonnée, c'est-à-dire à un point suffisamment éloigné de la sortie du conduit vocal de telle sorte que l'onde acoustique devient plane. Toutefois, la mesure de la variation de pression près des lèvres peut être une approximation acceptable pour les fricatives sibilantes où l'orifice labial est relativement petit. En effet, l'aire des lèvres détermine la distance nécessaire jusqu'au point de mesure. Dans les expériences de simulation, l'annexion d'une grande cavité de rayonnement entraîne une augmentation considérable du temps de calcul. Il était donc difficile d'atteindre une taille suffisamment grande pour pouvoir mesurer la pression rayonnée. Nous nous sommes donc contentée de mesurer la pression acoustique légèrement en avant des lèvres. La principale conséquence prévisible est une différence de pente spectrale, étant donné que la pression à ce point peut ne pas avoir atteint la pression atmosphérique. Ce phénomène n'est pas gênant dans la mesure où l'objectif est d'établir un lien entre les cavités de résonance et les pics spectraux.

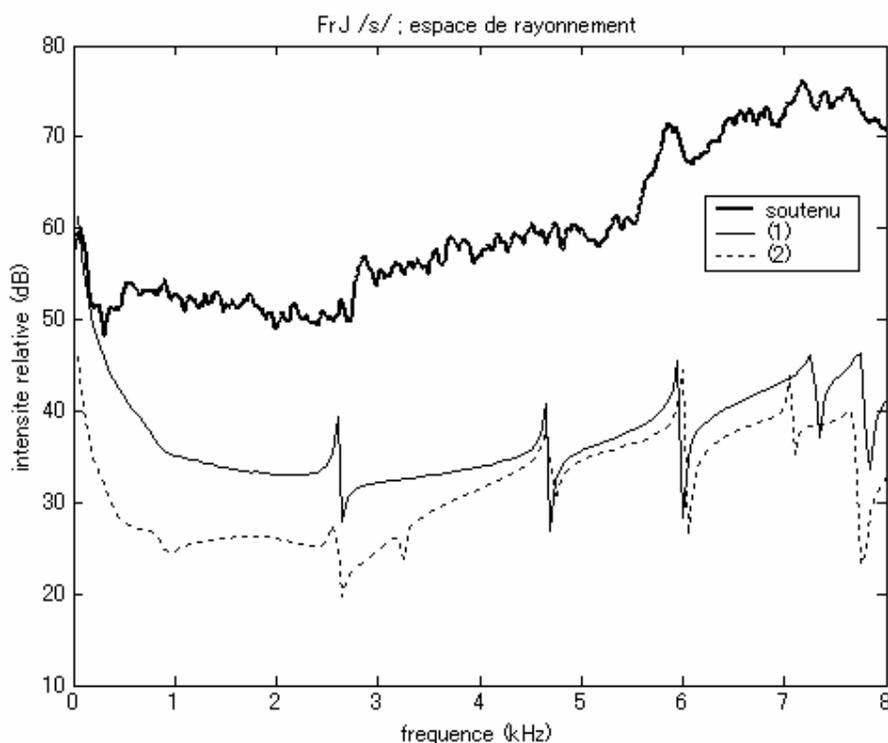


Figure 206. Spectre moyen (ligne épaisse) de /s/ et fonctions de transfert calculées à l'aide de la méthode des éléments finis avec (1) un petit espace de rayonnement (de l'ordre de 5 cm x 5 cm x 5 cm), maillage de 2 mm ; et (2) un grand espace de rayonnement (de l'ordre de 10 cm de haut x 10 cm de profondeur x 5 cm de large), maillage de 1 mm, pour FrJ /s/fr. Ces courbes sont identiques à celles présentées en Figure 85.

La **Figure 206** montre des fonctions de transfert calculées avec des conduits vocaux 3D possédant un espace de rayonnement plus ou moins grand. Les deux courbes, comme

attendu, présentent une différence de pente, avec un gain supérieur pour le modèle avec un grand espace de rayonnement. Le décalage des pics dans les hautes fréquences peut être dû à une différence de finesse du maillage du conduit vocal 3D (cf. **Figure 205**) plutôt qu'à la différence de taille de l'espace de rayonnement et/ou le différent point de mesure de la pression à la sortie du conduit vocal.

Effet de la position et de l'orientation de la source

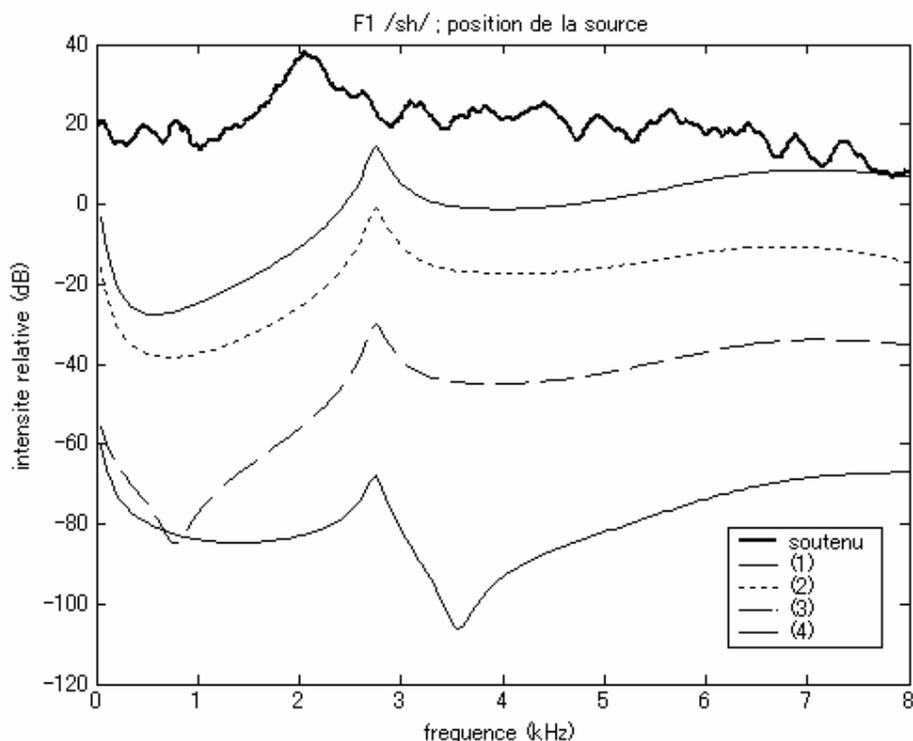


Figure 207. Spectre moyen du bruit de friction tenu (ligne foncée) et fonctions de transfert calculées à l'aide de la méthode des éléments finis pour Fr1 /ʃ/ (maillage de 1,5 mm). (1) Source localisée entre les incisives ; (2) source localisée en avant de la constriction dentale ; (3) source localisée à l'intérieure de la cavité orale antérieure ; (4) source localisée près de la paroi, à droite, à l'intérieur de la cavité orale antérieure. Les fonctions de transfert sont décalées entre elles de 20 dB pour une meilleure lisibilité.

La **Figure 207** présente différentes fonctions de transfert calculées avec le même conduit vocal 3D, avec une source orientée dans la dimension antéro-postérieure, mais localisée à des endroits différents. Il est clairement visible que la fréquence du pic (vers 2,7 kHz) ne change pas de fréquence, ce qui n'est pas le cas pour les zéros. Ces résultats sont analogues aux simulations 1D. La comparaison des **Figure 210**, **Figure 211** et **Figure**

212, où trois orientations de la source ont été examinées, conduit aux mêmes observations.

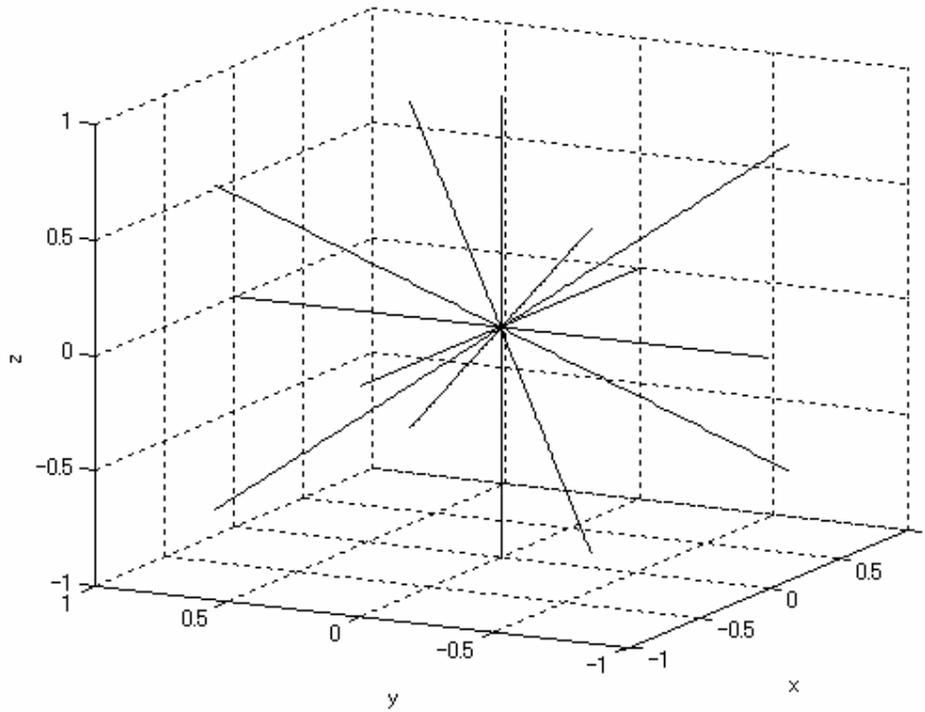


Figure 208. Axes d'orientation de la source (cf. Figure 209).

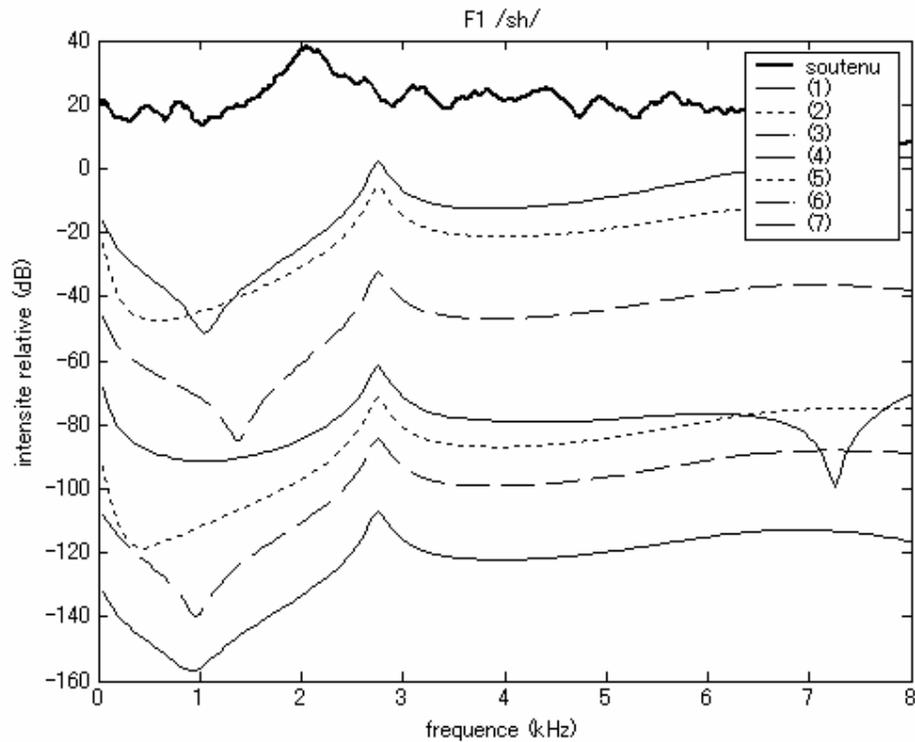


Figure 209. Spectre moyen du bruit de friction tenu (ligne foncée) et fonctions de transfert calculées à l'aide de la méthode des éléments finis pour FR1 /ʃ/ (maillage de 1,5 mm). La source est localisée entre les incisives supérieures et inférieures. (1) – (3) Source orientée dans les dimensions antéro-postérieure, gauche-droite et haut-bas, respectivement. (4) – (7) Source orientée dans les dimensions intermédiaires (v. Figure 208). Les fonctions de transfert sont décalées de 20 dB entre elles pour une meilleure lisibilité.

La **Figure 209** présente le résultat de simulations avec une source localisée au même endroit, mais orientée différemment (v. **Figure 208**). Là encore, la fréquence du pic vers 2,7 kHz ne change pas, mais des antiformants de différentes fréquences apparaissent.

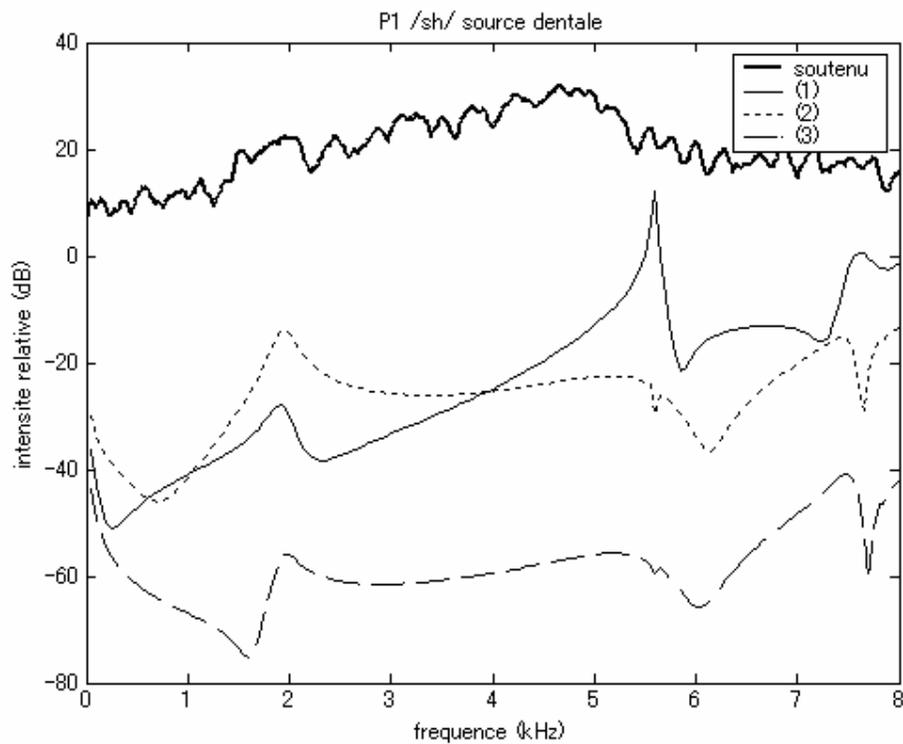


Figure 210. Spectre moyen du bruit de friction tenu (ligne foncée) et fonctions de transfert calculées à l'aide de la méthode des éléments finis pour P1 /ṣ/ (maillage de 1,5 mm) avec une source localisée en arrière de la constriction dentale. (1) Source orientée dans l'axe droite-gauche ; (2) source orientée dans l'axe antéro-postérieure ; (3) Source orientée dans l'axe haut-bas. Les fonctions de transfert sont décalées de 20 dB entre elles pour une meilleure lisibilité.

Les **Figure 210**, **Figure 211** et **Figure 212** conduisent aux mêmes constats que la figure précédente : l'orientation de la source dans un modèle 3D modifie la fréquence des zéros mais pas celle des pôles.

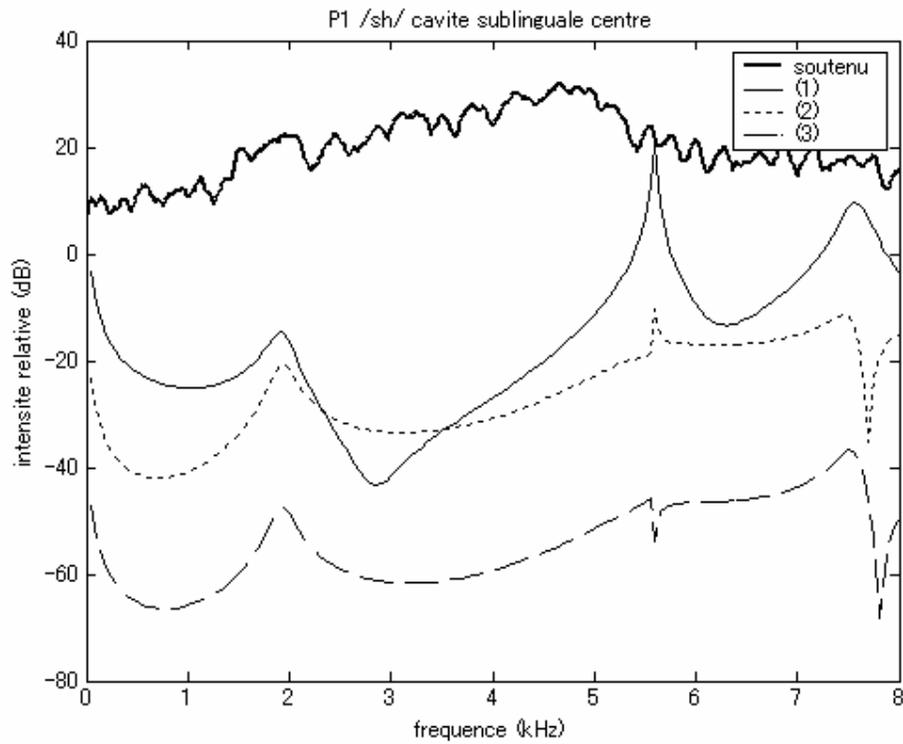


Figure 211. Spectre moyen du bruit de friction tenu (ligne foncée) et fonctions de transfert calculées à l'aide de la méthode des éléments finis pour P1 /s̥/ (maillage de 1,5 mm) avec une source localisée au centre de la cavité orale antérieure (qui comprend une partie sublinguale). (1) Source orientée dans l'axe droite-gauche ; (2) source orientée dans l'axe antéro-postérieure ; (3) Source orientée dans l'axe haut-bas. Les fonctions de transfert sont décalées de 20 dB entre elles pour une meilleure lisibilité.

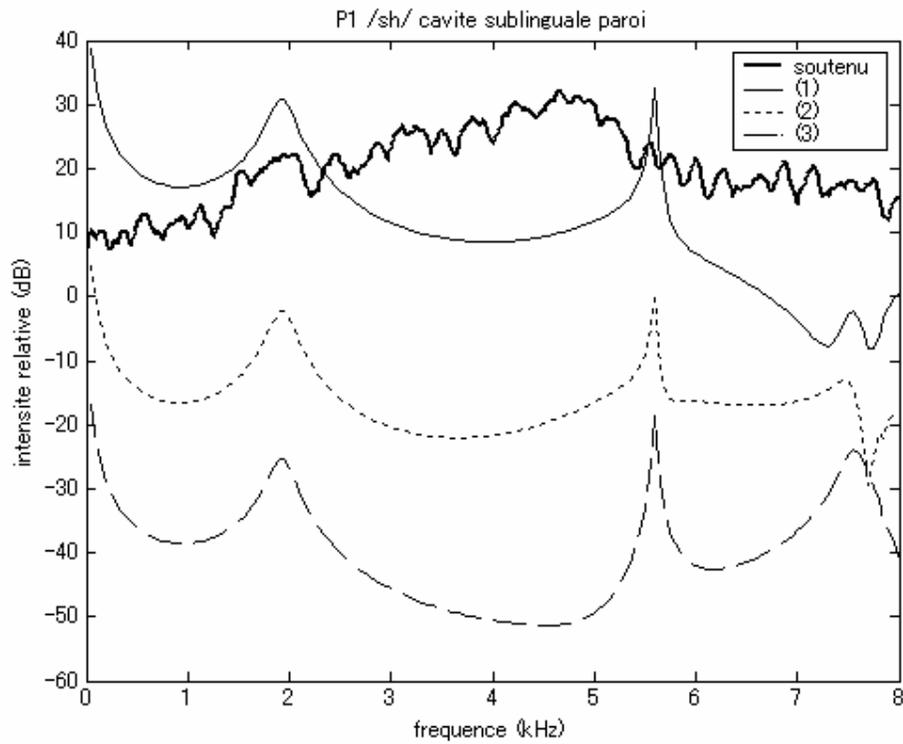


Figure 212. Spectre moyen du bruit de friction tenu (ligne foncée) et fonctions de transfert calculées à l'aide de la méthode des éléments finis pour P1 /s/ (maillage de 1,5 mm) avec une source localisée sur une paroi latérale de la cavité orale antérieure. (1) Source orientée dans l'axe droite-gauche ; (2) source orientée dans l'axe antéro-postérieure ; (3) Source orientée dans l'axe haut-bas. Les fonctions de transfert sont décalées de 20 dB entre elles pour une meilleure lisibilité.

Effet du point de mesure

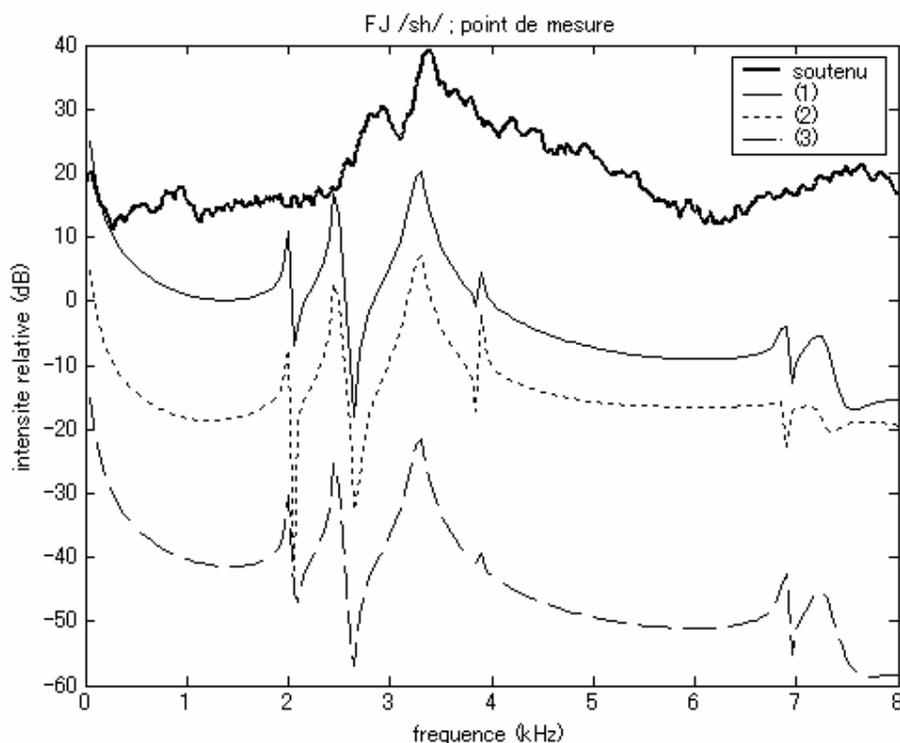


Figure 213. Spectre moyen du bruit de friction tenu (ligne foncée) et fonctions de transfert calculées à l'aide de la méthode des éléments finis pour FJ /s/fr (maillage de 1 mm ; modèle tronqué à la constriction linguale) avec une source localisée en arrière de la constriction dentale et orientée dans l'axe antéro-postérieur. (1) Pression mesurée en avant, vers le bas gauche de l'espace de rayonnement ; (2) pression mesurée vers le centre de l'espace de rayonnement ; (3) pression mesurée vers le bas, à gauche, de l'espace de rayonnement, près du visage. Les fonctions de transfert sont décalées de 20 dB entre elles pour une meilleure lisibilité.

Contrairement à la position et à l'orientation de la source, le point de mesure de la pression à l'extérieur du conduit vocal donne lieu à des fonctions de transfert peu différentes les unes des autres. Le point de mesure le plus éloigné des lèvres (2) donne lieu à une courbe plus montante que les autres points de mesure. La fréquence et la dynamique des pics et des creux restent comparables entre les différents points de mesure.