

La « voyelle apicale » n'est pas une voyelle : étude acoustique et articulatoire de la voyelle apicale en chinois de Jixi

Bowei Shao & Rachid Ridouane

Laboratoire de Phonétique et Phonologie, CNRS/Sorbonne Nouvelle

19, rue des Bernardins, 75005 Paris, France

bowei.shao@sorbonne-nouvelle.fr, rachid.ridouane@sorbonne-nouvelle.fr

RÉSUMÉ

Cette étude s'intéresse à la « voyelle apicale », notée /z/, telle qu'elle est attestée en chinois de Jixi. L'objectif est de déterminer sa nature phonétique sur la base de données acoustiques et articulatoires. Phonologiquement, ce segment est un phonème distinct qui s'oppose à /i/ dont il est issu diachroniquement. Il est exclusivement attesté en position noyau de syllabe où il constitue une unité porteuse de ton. Sur le plan articulatoire, les données ultrasoniques démontrent que, quand il est précédé de consonnes bilabiales /p, p^h, m/, il présente un geste articulatoire semblable à celui de la fricative alvéolaire /s/. Ce geste est réalisé de manière anticipatoire durant la tenue des bilabiales. Une des conséquences de cette réalisation est que le relâchement de /p^h/ présente les mêmes caractéristiques acoustiques que le bruit de friction de la fricative /s/, comme l'atteste la ressemblance de leur centre de gravité. Ces résultats montrent que la voyelle apicale en chinois de Jixi est mieux définie, au moins du point de vue phonétique, comme une fricative alvéolaire.

ABSTRACT

The 'apical vowel' is not a vowel: An acoustic and articulatory study of the apical vowel in Jixi-Hui Chinese
This study focuses on the 'apical vowel', noted /z/, as attested in Jixi-Hui Chinese. The objective is to determine its phonetic nature on the basis of acoustic and articulatory data. Phonologically, this segment is a distinct phoneme that opposes to /i/ from which it is diachronically derived. It is exclusively attested in the syllable nucleus position where it constitutes a tone-bearing unit. On the articulatory level, the ultrasonic data show that when it is preceded by the bilabial consonants /p, p^h, m/, it presents an articulatory gesture which is virtually identical to that of the alveolar fricative /s/. This gesture is realised in an anticipatory way during the bilabials. One of the consequences of such a realisation is that the release phase of /p^h/ exhibits the same acoustic characteristics as the friction noise of the fricative /s/, as evidenced by the resemblance of their centre of gravity. These results show that the apical vowel in Chinese Jixi is better defined, at least phonetically, as an alveolar fricative.

MOTS-CLÉS : Voyelles apicale, chinois de Jixi, acoustique, ultrason.

KEYWORDS: Apical vowel, Jixi-Hui Chinese, acoustics, ultrasound.

1 Introduction

Les langues chinoises sont connues pour avoir une série de segments atypiques, nommés « voyelles apicales » (Karlsgren, 1915). Le cas le plus connu est attesté en chinois standard (CS), où ces segments n'apparaissent qu'après des sibilantes alvéolaires [s, ts, ts^h] ou post-alvéolaires [ʃ, tʃ, tʃ^h], et sont considérés comme homorganiques avec celles-ci (Dell, 1994 ; Duanmu, 2007). En CS, cette série de

segments est traditionnellement considérée comme variante allophonique en distribution complémentaire avec la voyelle [i] (Hartman, 1944). Ils occupent, comme les autres voyelles de la langue, la position noyau de syllabe et fonctionnent comme unités porteuses de ton (UPT). Il n'existe pas de consensus sur leur nature phonétique, mais l'homorganicité avec les attaques sibilantes et l'existence d'un bruit de friction durant cette série de segments sont souvent notées dans les différentes descriptions. Troubetzkoy (1949 : 198) remarque ainsi qu'ils sont « *une sorte de voyelle ayant un degré d'aperture très petit et un point d'articulation beaucoup plus en avant que celui de i par exemple, de sorte que dans son émission on entend un bruit fricatif semblable à un bourdonnement* ». Se basant sur l'homorganicité avec les attaques sibilantes et la présence de bruit de friction, Ladefoged & Maddieson (1996 : 314) les décrivent comme « voyelles fricatives » qui sont produites avec la langue la plupart du temps dans la même position que les sibilantes en attaques. Les données acoustiques et articulatoires de Lee-Kim (2014) montrent qu'il n'y a pas de bruit de friction chez la majorité des locuteurs qu'elle a enregistrés, mais indiquent en revanche que ces segments sont effectivement homorganiques avec les sibilantes qui les précèdent.

En considérant leur statut et fonction phonologique (*i.e.* allophonique avec [i], en position noyau d'une syllabe), cette série de segments est analysée comme voyelles apicales (Karlsgren, 1915 ; Hartman, 1944) ou voyelles fricatives (Ladefoged & Maddieson, 1996). En se basant sur leurs caractéristiques phonétiques (*i.e.* présence de bruit de friction et homorganicité avec les attaques sibilantes), d'autres chercheurs ont analysé ces segments comme fricatives/sibilantes syllabiques (Dell, 1994 ; Yu, 1999 ; Duanmu, 2007), ou comme approximantes syllabiques (Lee & Zee, 2003 ; Lee-Kim, 2014). Ainsi, la particularité de ces segments est que leur statut et leurs fonctions phonologiques suggèrent qu'il s'agirait de voyelles, alors que leurs caractéristiques phonétiques suggèrent qu'il s'agirait plutôt de consonnes (fricatives ou approximantes). Pour arriver à une meilleure compréhension des voyelles apicales dans les langues chinoises, nous présentons ici une étude acoustique et articulatoire de la voyelle apicale que l'on trouve en chinois de Jixi (CJ). Cette nouvelle étude empirique montre que la voyelle apicale en CJ, qui sera notée ici /z/, s'apparente plutôt à une consonne fricative.

1.1 La voyelle apicale du chinois de jixi : phonologie et phonétique

La langue chinoise de Jixi 绩溪 (CJ) est une langue du groupe Hui 徽, parlée dans le district Jixi, au sud de la province de l'Anhui 安徽 (Zhao, 2003 ; Hirata, 1998). Les descriptions existantes de cette langue sont faites à partir de la variante parlée dans la ville de Jixi. Notre étude est aussi basée sur des données émanant de cette variante. La voyelle apicale /z/ en CJ, contrairement au même segment en CS, est un phonème qui s'oppose à la voyelle /i/, comme le montrent les paires minimales suivantes : [tsɿ] 'poule' vs [tsi] 'un nom de famille' ; [tsʰɿ] 'déception' vs [tsʰi] 'automne' ; [sɿ] 'soie' vs [si] 'réparer'. De plus, il a une distribution plus large qu'en CS. Il apparaît en effet dans les syllabes [pɿ, pʰɿ, mɿ, nɿ] en plus de [tsɿ, tsʰɿ, sɿ] et ces syllabes ne sont pas lexicalement rares, comptant pour 7,2% des entrées monosyllabiques du dictionnaire du CJ (Zhao, 2003). Comme ces syllabes le montrent, /z/ n'est pas systématiquement homorganique avec les consonnes précédentes, puisqu'il apparaît à la fois à la suite des consonnes bilabiales /p, pʰ, m/ et des consonnes alvéolaires /s, ts, tsʰ, n/.

Nos études précédentes sur ce segment ont permis de clarifier certaines de ces caractéristiques phonétiques qui nous ont permis de l'analyser comme une fricative alvéolaire syllabique. Au niveau

acoustique (Shao & Ridouane, 2018), la majorité des réalisations du segment /z/ en CJ contient du bruit de friction au début du segment (voir FIGURE 1), et le lieu d'articulation de la consonne en attaque n'a pas d'effet important sur la quantité de bruit observée. Quand le bruit de friction diminue, la structure formantique devient plus nette. Cette structure formantique est qualitativement différente de celle de la voyelle /i/, mais présente un F1 similaire à celui de /u/ et un F2 similaire à celui de /u/.

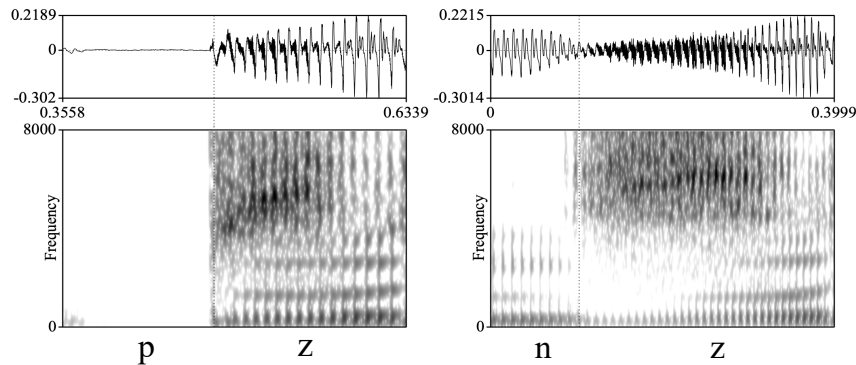


FIGURE 1 : Signaux acoustiques et spectrogrammes des formes /pz/ et /nz/ produites par MS3 (fenêtre temporelle : 5 ms) (Shao & Ridouane, 2018).

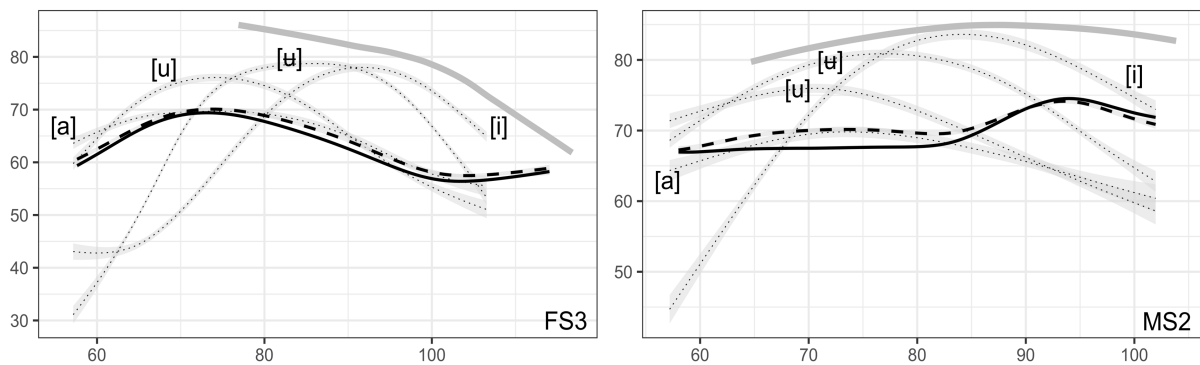


FIGURE 2 : Contours de langue de deux locuteurs en coupe sagittale, extraits en coordonnées (mm) x/y à l'image ultrason correspondant au milieu de chaque segment (en se basant sur le signal acoustique). Ces contours ont été généralisés en SS ANOVA avec l'intervalle de confiance bayésienne à 95%. Les tracés solides représentent /z/. Les tracés discontinus représentent la consonne /s/ en attaque de syllabe. Les tracés pointillés représentent les voyelles /i, u, a/. Les tracés gris et pleins représentent le palais. Les noyaux /z, i, u, a/ sont généralisés à partir des contextes consonantiques /p, p^h, m, n, ts, ts^h, s/, l'attaque /s/ est généralisée à partir des contextes nucléiques /z, i, u, a/. La pointe de la langue est à droite (Shao & Ridouane, 2019).

Au niveau articulaire, /z/ est produit avec une configuration linguale semblable à celle de la consonne /s/ (Shao & Ridouane, 2019). La FIGURE 2 montre les contours de la langue pour deux locuteurs, généralisés en SS ANOVA (smoothing-spline analysis of variance). Dans cette figure, les tracés des noyaux /z, i, u, a/ sont généralisés à partir de sept contextes consonantiques différents. À titre comparatif, les contours de la langue pour la consonne attaque /s/ est aussi présentée. Nous observons deux stratégies articulatoires pour /z/. Pour le locuteur FS3, la pointe de la langue est élevée mais le dos de la langue est encore plus élevée que la pointe. Pour MS2, la pointe de la langue est élevée, mais le dos de la langue reste plat, laissant ainsi la pointe de la langue plus élevée que le dos. Cependant pour chacun des deux locuteurs, les contours de /z/ sont quasi-identiques aux contours de /s/. Nous avons par ailleurs montré que la nature de la consonne attaque (coronale ou labiale) n'a pas d'effet sur la configuration linguale de /z/.

2 Problématique

Les résultats des études acoustiques et articulatoires citées ci-dessus montrent que la voyelle apicale en CJ est mieux analysée comme une fricative alvéolaire, puisqu'elle présente un geste articulatoire semblable à celui de la fricative alvéolaire /s/, et contient du bruit de friction. Ces deux caractéristiques sont observées quand /z/ est précédé des consonnes alvéolaires et labiales. Dans cette étude, nous nous intéressons plus spécifiquement aux caractéristiques acoustiques et articulatoires de /z/ dans le contexte des consonnes labiales. L'idée est que ces consonnes, n'impliquant pas d'articulation linguale, doivent avoir un minimum d'impact sur la réalisation apicale de /z/. Les caractéristiques acoustiques et articulatoires observées dans ce contexte doivent ainsi être considérées comme propres à ce segment /z/.

3 Méthode

Les données acoustiques examinées dans cette étude émanent de dix locuteurs natifs, cinq hommes (MS1-5) et cinq femmes (FS1-5). Ils sont nés entre 1964 et 1974 (âge moyen : $49 \pm 3,8$). Tous les locuteurs ont grandi dans la ville de Jixi avec leurs parents qui sont eux aussi nés et ont grandi dans la même ville. Ils parlent la même variante du CJ dans leurs milieux familiaux et professionnels et se considèrent comme locuteurs natifs sans accent. Les sessions d'enregistrement acoustique ont été effectuées dans la ville de Jixi, dans un studio de télévision locale à l'aide d'un micro-casque hypercardioïde (AKG C520), d'une carte son Edirol UA25 et avec le logiciel Audacity (V2.1.0). Les données ultrasoniques sur le plan mid-sagittal ont été obtenues un an après les données acoustiques, dans les mêmes conditions et avec un sous ensemble des mêmes locuteurs (FS1, FS3, FS5 et MS2, MS3, MS5). L'enregistrement a été effectué à l'aide de l'*Ultrasound Stabilisation Headset* (Articulate Instruments Ltd., 2008) et du logiciel AAA (*Articulate Assistant Advanced*) (V217.03) (Articulate Instruments Ltd., 2012). Les données ont été enregistrées avec une probe d'ultrason microconvex à 40 mm de diamètre, le champ de vision a été fixé à 92°. En raison des spécificités morphologiques des locuteurs, la profondeur a été ajustée pour avoir une vue maximale de la langue, résultant en des fréquences d'images différentes (82,1 fps pour les femmes et 81,4 fps pour les hommes). La synchronisation des enregistrements échographiques et de l'audio correspondant a été effectuée automatiquement par le logiciel AAA. Pendant les sessions d'enregistrement, les locuteurs étaient assis dans un fauteuil, et il leur a été demandé de lire de manière naturelle une liste de mots en les incorporant dans une phrase porteuse. Pour l'enregistrement des données ultrason, la liste a été enregistrée phrase par phrase, avec une pose de quelques secondes entre chaque phrase porteuse prononcée.

Nous avons établi une liste de monosyllabes avec /a, i, u, ʊ, z/ comme noyaux, et /p, p^h, m, n, ts, ts^h, s/ comme attaques. Ces syllabes ont les tons /ᵛ, ˩, ˨˩, ˥/ et forment des mots réels, inclus dans la phrase cadre /kiᵛ ɕoᵛ _ ɕoᵛ soᵛ faᵛ/ 'Il écrit _ trois fois'. Les phrases ont été répétées cinq fois pour l'enregistrement acoustique et trois fois pour l'enregistrement ultrasonique. Les syllabes cibles ont été segmentées manuellement en utilisant Praat et AAA. La frontière gauche des noyau /a, i, u, ʊ/ est basée sur le relâchement des attaques plosives et la fin de la friction des attaques sibilantes ; leur frontière droite est basée sur la fin de la structure formantique. La segmentation du noyau /z/ est basée sur la première « pulse » détectée par Praat pour la frontière gauche, en raison de la continuité de bruit de friction entre les attaques /p^h, ts, ts^h, s/ et le noyau /z/ (Shao & Ridouane, 2018). La frontière droite de /z/ a été délimitée par la fin de la structure formantique.

Deux paramètres acoustiques ont été mesurés : la durée de la voyelle apicale dans différents contextes consonantiques, et le centre de gravité (COG) de la phase d'aspiration de la consonne /p^h/ que nous avons comparé avec le COG de la consonne /s/. Les contours de langues obtenus pour l'analyse articulatoire sont extraits en coordonnées x/y à l'image correspondant au milieu de chaque segment, sauf pour la consonne /p^h/. Cette consonne a été divisée en deux phases, la phase d'occlusion et la phase d'aspiration, et deux images ont ainsi été obtenues correspondant au milieu de la phase d'occlusion et au milieu de la phase d'aspiration, respectivement. Les coordonnées en x/y sont généralisées en SS ANOVA (Davidson, 2006) à l'aide de R et le package gss (Gu, 2014). SS ANOVA est une procédure statistique qui permet d'étudier les similitudes et les différences de formes de courbes (Davidson, 2006 ; Lee-Kim, 2014). Cette méthode permet de générer une courbe lisse qui correspond le mieux aux différentes répétitions des segments cibles. Les palais sont obtenus et moyennés à partir de six taches séparées où chaque locuteur a été enregistré en train d'avaler de l'eau.

4 Résultats

4.1 La durée de la voyelle apicale dans les syllabes /pz, p^hz, mz/

Nous avons observé des différences importantes de durée entre les voyelles apicales précédées par /p^h/ et les voyelles apicales précédées par /p, m/ (voir FIGURE 3). Cette différence systématique est spécifique à ce noyau, et n'a pas été observée dans les autres contextes. La durée de /z/ précédé par les attaques labiales est en distribution normale selon le test de Shapiro-Wilk ($p=0,25$). Le test ANOVA sur la durée de /z/ confirme qu'il y a une différence significative entre les trois contextes ($F(2, 229)=21,12$; $p<0,001$). Le test post-hoc TukeyHSD indique que cela est dû à la différence entre /p^h/ d'un côté et /p, m/ de l'autre (/p^h/ vs /p/ ($p<0,001$), /p^h/ vs /m/ ($p<0,001$)). La différence de durée entre les contextes /m/ et /p/ n'est pas significative ($p=0,74$).

La durée des voyelles dans les langues chinoises est susceptible d'être influencée par les tons lexicaux. Ainsi un ton de type descendant-montant a tendance à allonger les voyelles porteuses de ce ton (Ho, 1976 ; Howie, 1976). Nous avons analysé ces différences de durée uniquement pour le ton /˥/ (le plus nombreux dans nos données), et nous avons observé que la différence reste significative ($F(2, 134)=20,18$; $p<0,001$). Le test post-hoc TukeyHSD indique là aussi que cela est dû à la différence entre les contextes /p^h/ et /p/ ($p<0,001$), et entre les contextes /p^h/ et /m/ ($p<0,001$). La différence de durée entre les contextes /m/ et /p/ n'est pas significative ($p=0,81$). Nous allons tenter d'expliquer plus loin cette différence de durée avec nos données acoustiques et articulatoires. Notre hypothèse est que cette différence de durée est due au chevauchement des gestes articulatoires entre les attaques bilabiales /p, p^h, m/ et le noyau /z/. Notre critère de segmentation joue aussi un rôle important dans cette différence de durée.

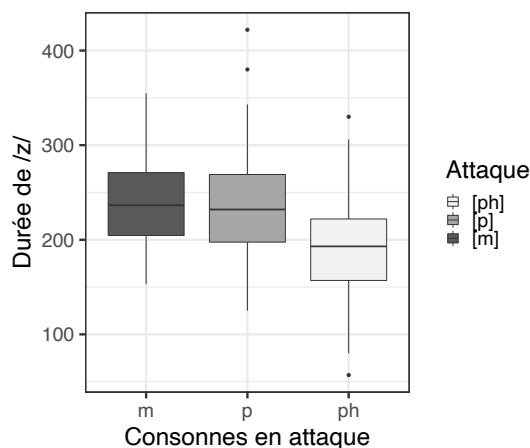


FIGURE 3 : Durée (ms) de la voyelle apicale /z/ dans 3 contextes consonantiques différents /p, p^h, m/.

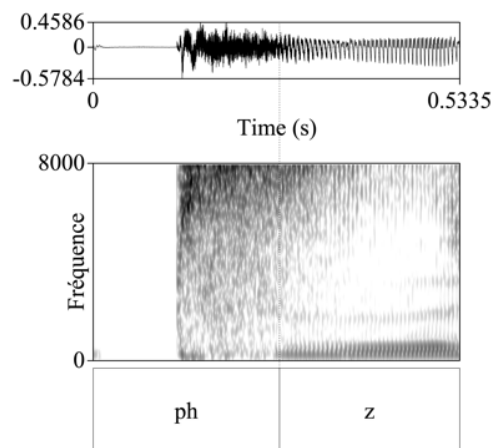


FIGURE 4 : Le signal acoustique et le spectrogramme de la forme /p^hzɹ/, produite par FS1.

4.2 Le chevauchement des gestes : données acoustiques et articulatoires

La voyelle apicale a le geste articulatoire d'une fricative alvéolaire (Shao & Ridouane, 2019) et cette cible serait atteinte de manière anticipatoire, pendant la tenue de la consonne en attaque. Pour /p/ et /m/, cette réalisation anticipatoire n'a pas d'indice acoustique majeur sur le signal, puisque la cavité orale est fermée pendant ces deux consonnes, et que le relâchement de /p/ est très court. Pour /p^h/, cependant, ce chevauchement a des conséquences acoustiques visibles : la phase du relâchement de /p^h/ est fortement perturbée par le bruit de friction généré par le geste fricatif alvéolaire. Nos données acoustiques et articulatoires présentées ci-après permettent de l'affirmer.

Trois phases sont généralement visibles sur le signal acoustique d'une occlusive sourde aspirée quand elle est suivie d'une voyelle : (i) la barre d'explosion, sous forme de barre verticale sur le spectrogramme, d'une durée très brève ; (ii) la phase de friction, où le bruit de turbulence généré au niveau de la constriction supraglottale excite principalement la cavité devant la constriction ; et (iii) l'aspiration proprement dite, où le bruit de turbulence généré au niveau glottal excite tout le conduit vocal (Fant, 1973 ; Stevens, 1998 : 457–465 ; Ridouane, Clements & Khatiwada, 2011). La phase d'aspiration est donc définie comme de la friction glottale qui se traduit acoustiquement sous forme de structure formantique plus ou moins masquée par du bruit, d'une durée supérieure à 30–40 ms. Dans nos données, nous avons observé que les phases (i) et (iii) sont bien présentes pour /p^h/ dans les syllabes /p^hu, p^hɹ, p^ha/. La phase (ii) n'est pas observée car la consonne /p^h/ a une constriction bilabiale, sans cavité devant la constriction. Une configuration différente a été observée pour /p^h/ quand il est suivi de la voyelle apicale, avec un bruit de friction en hautes fréquences pendant la phase du relâchement de cette consonne. Ce bruit de friction continue jusqu'au noyau /z/ (voir FIGURE 4). La raison de la présence de ce bruit de friction est que la phase d'ouverture glottale pendant le relâchement de /p^h/ coïncide avec une constriction supraglottale étroite correspondant à la tenue de /z/. La conséquence de ce chevauchement est que le bruit de friction supraglottale généré par /z/ domine le bruit glottal de /p^h/, donnant ainsi lieu à une phase qui a des caractéristiques acoustiques ressemblant à celles d'une consonne /s/.

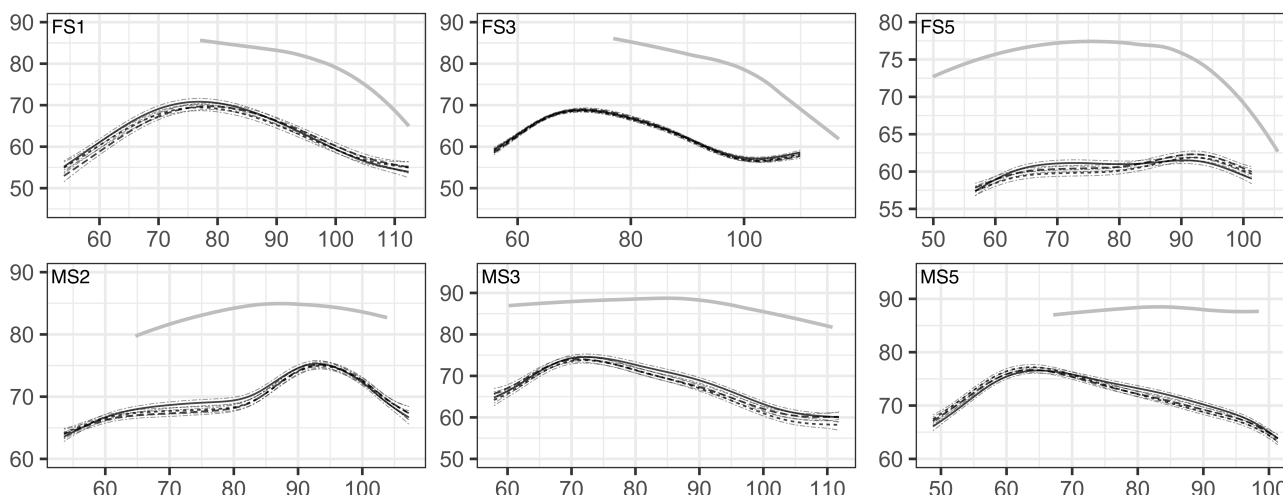


FIGURE 5 : Contours de langue pour les six locuteurs en coupe sagittale, extraits en coordonnées (mm) x/y à l'image d'ultrason correspondant au milieu de trois phases de la syllabe /pʰz/. Les tracés pleins, pointillés, et discontinus représentent le milieu de la phase d'occlusion de /pʰ/, le milieu du relâchement de /pʰ/ et le milieu de /z/, respectivement. Les contours ont été généralisés en SS ANOVA avec l'intervalle de confiance bayésienne à 95%. Les tracés gris et pleins représentent le palais. La pointe de la langue est à droite.

Les données articulatoires ont permis une observation directe de la nature du chevauchement des gestes entre les consonnes labiales et la voyelle apicale /z/. Nous présentons ici le cas de la syllabe /pʰz/ pour illustration. Comme le montre la FIGURE 5, la cible articulatoire pour la voyelle apicale /z/ est déjà atteinte pendant la phase d'occlusion de l'attaque /pʰ/. Une fois cette cible atteinte, la forme de la langue ne change plus jusqu'au milieu de la voyelle apicale. Le même phénomène a été observé pour les formes /pz/ et /mz/. La FIGURE 5 montre aussi que la configuration linguale pour /z/ ressemble quasi à l'identique à celle de la consonne fricative /s/, les locuteurs appliquant les mêmes stratégies articulatoires pour les deux segments. Une telle configuration dans le contexte des labiales montre que le geste de fricative alvéolaire est inhérent à la voyelle apicale /z/.

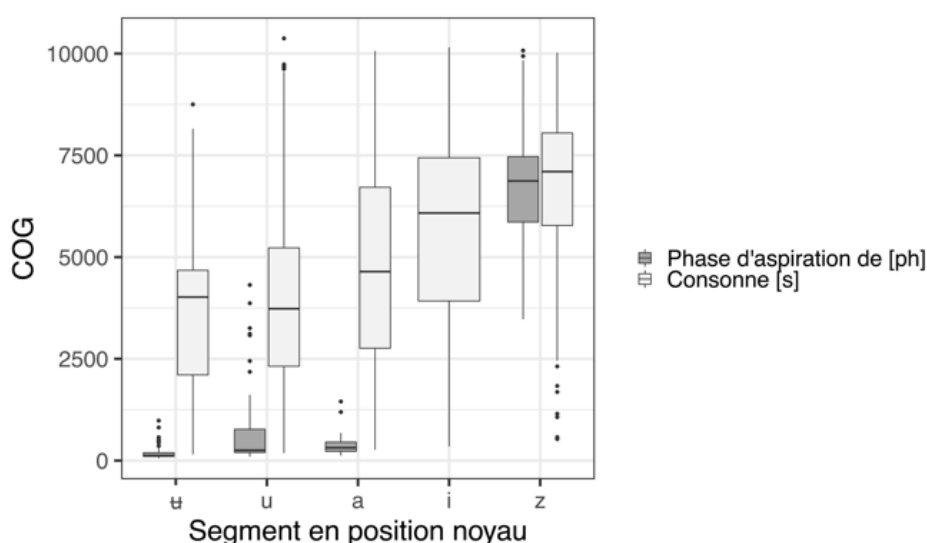


FIGURE 6 : Centre de gravité (Hz) de la consonne /s/ et de la phase de relâchement de la consonne /pʰ/ dans différents contextes vocaliques. Les données pour /pʰ/ sont obtenues avec les syllabes /pʰi, pʰu, pʰʉ, pʰa, pʰz/, et celles de /s/ sont obtenues avec les syllabes /si, su, sʉ, sa, sz/ (/pʰ/ n'apparaît pas devant /i/).

Le chevauchement entre le geste lingual et le geste labial induit un effet sur les caractéristiques acoustiques du relâchement de /p^h/. Pour confirmer qualitativement que la phase de relâchement de cette occlusive labiale a les caractéristiques acoustiques d'une fricative /s/, nous avons comparé le COG du relâchement de /p^h/ à celui de /s/. Comme le montre la FIGURE 6, le COG de la consonne /s/ est toujours plus élevé que celui de la phase d'aspiration de /p^h/ dans le même contexte, sauf quand ces deux consonnes sont suivies de la voyelle apicale /z/. Dans ce dernier cas, le COG de la consonne /s/ et la phase de relâchement de /p^h/ ne présentent pas de différence significative ($t(164,54)=0,19$, $p=0,85$).

Le chevauchement entre le geste lingual et le geste labial, couplé avec le critère de segmentation que nous avons choisi, peut expliquer la durée plus courte de /z/ dans la syllabe /p^hz/. Pour rappel, nous avons choisi le début du voisement de /z/ comme onset de ce segment. Puisque la phase d'aspiration de /p^h/ est réalisée comme un bruit de friction supraglottale et que ce bruit continue jusqu'au noyau /z/, il a été particulièrement difficile de déterminer la frontière exacte entre cette phase et la voyelle apicale /z/ (voir FIGURE 4). Les données articulatoires, montrant que la langue est déjà dans une configuration apicale pendant la tenue des consonnes labiales, suggèrent ainsi que l'onset du noyau /z/ dans la forme /p^hz/ pourrait avoir commencé bien avant le premier pulse détecté par Praat (*i.e.* pendant la phase de relâchement). Dans ce contexte, l'ouverture glottale caractéristique des occlusives aspirées est parmi les principales causes du dévoisement de /z/.

5 Conclusion

Cette étude, basée sur des données acoustiques et articulatoires, montre que la voyelle apicale en CJ a le geste articulatoire d'une fricative alvéolaire. La configuration linguale de /z/, observée dans un contexte bilabial minimisant les effets de la coarticulation, montre que le geste fricatif alvéolaire de /z/ fait bien partie de son articulation. Ce geste lingual est réalisé de manière anticipatoire durant la tenue des consonnes labiales dans les syllabes /pz, mz, p^hz/. Une conséquence de cette configuration est que la phase de relâchement de /p^h/ est réalisée avec des caractéristiques acoustiques semblables à celles d'une fricative /s/.

Remerciements

Nous tenons à remercier tous les locuteurs qui ont participé à l'acquisition des données, ainsi que les trois relecteurs anonymes pour leurs nombreux commentaires et suggestions. Ce travail a bénéficié partiellement d'une aide de l'État gérée par l'Agence Nationale de la Recherche au titre du programme « Investissements d'Avenir » portant la référence ANR-10-LABX-0083. Il contribue à l'IdEx Université de Paris - ANR-18-IDEX-0001.

Références

- ARTICULATE INSTRUMENTS Ltd. (2008). *Ultrasound Stabilisation Headset User's Manual: Revision 1.5*. Edinburgh, UK: Articulate Instruments Ltd.
- ARTICULATE INSTRUMENTS Ltd. (2012). *Articulate Assistant Advanced User Guide: Version 2.14*. Edinburgh, UK: Articulate Instruments Ltd.
- DAVIDSON L. (2006). Comparing tongue shapes from ultrasound imaging using smoothing spline analysis of variance. *Journal of the Acoustical Society of America* 120(1), 407–415.
- DELL F. (1994). Consonnes à prolongement syllabique en Chine. *Cahiers de linguistique-Asie orientale* 23(1), 87-94.
- DUANMU S. (2007). *The phonology of standard Chinese*. New York : Oxford University Press.
- FANT G. (1973). Stops in CV syllables. In *Speech Sounds and Features*, 110–139. Cambridge, MA : MIT Press.
- GU C. (2014). Smoothing Spline ANOVA Models: R Package gss. *Journal of Statistical Software* 58(5), 1–25. DOI : 10.18637/jss.v058.i05.
- HARTMAN L. M. (1944). The segmental phonemes of the Peiping dialect. *Language* 20(1), 28–42.
- HIRATA S. (1998). *Huizhou Fangyan Yanjiu* [Etude sur les dialectes du Huizhou]. Tokyo : Kohbun Press.
- HO, A. T. (1976). The acoustic variation of Mandarin tones. *Phonetica* 33(5), 353–367.
- HOWIE, J. M. (1976). *Acoustical studies of Mandarin vowels and tones*. New York: Cambridge University Press.
- KARLGREN B. (1915). *Etudes sur la phonologie chinoise*. Uppsala : KW Appelberg.
- LADEFOGED P. & MADDIESON I. (1996). *The sounds of the world's languages*. Oxford & Malden, MA : Blackwell.
- LEE W.-S. & ZEE E. (2003). Standard Chinese (Beijing). *Journal of the International Phonetic Association* 33(1), 109–112.
- LEE-KIM S.-I. (2014). Revisiting Mandarin ‘apical vowels’: An articulatory and acoustic study. *Journal of the International Phonetic Association* 44(3), 261–282.
- RIDOUANE R., CLEMENTS G. N. & KHATIWADA R. (2011). Language-independent bases of distinctive features. In J. A. Goldsmith, E. Hume, L. Wetzels, Éd., *Tones and Features: Phonetic and Phonological Perspectives*, 264–287.
- SHAO B. & RIDOUANE R. (2018). La « voyelle apicale » en chinois de Jixi : caractéristiques acoustiques et comportement phonologique. In M. COOKE, B. BIGI & J. LAVAUD, Éd., *Actes de XXXIe Journées d'Études sur la Parole*, p. 685–693. Aix-en-Provence, France.
- SHAO B. & RIDOUANE R. (2019) Apical vowels in Jixi-Hui Chinese: an articulatory study. In S. Calhoun, P. Escudero, M. Tabain & P. Warren, Éd., *Proceedings of the 19th International Congress of Phonetic Sciences*, p. 2358–2362. Melbourne, Australia.
- STEVENS K. N. (1998). *Acoustic Phonetics*. Cambridge, MA : MIT Press.
- TROUBETZKOY N. S. (1949). *Principes de Phonologie*. Paris: Librairie C. Klincksieck.
- YU A. (1999). Aerodynamic constraints on sound change: The case of syllabic sibilants. *Journal of the Acoustical Society of America* 105(2), 1096–1097.
- ZHAO R. (2003). *Jixi Fangyan Cidian* [Dictionnaire du dialecte jixi]. Nanjing : Jiangsu Jiaoyu Chubanshe.