

L'impact des variations temporelles intrinsèques et extrinsèques de la voyelle sur la relation consonne-voyelle : Étude translinguistique sur l'arabe jordanien et le français

Mohammad Abuoudeh Olivier Crouzet

Laboratoire de Linguistique de Nantes UMR 6310 CNRS / Université de Nantes

Chemin de la Censive du Tertre 44312 NANTES

mohammad.abuoudeh@univ-nantes.fr, olivier.crouzet@univ-nantes.fr

RÉSUMÉ

Cette étude permet d'explorer les variations spectrales engendrées par deux types de variations temporelles qui résultent respectivement de l'opposition de longueur vocalique et des variations de débit de parole. Deux protocoles expérimentaux ont été conçus, l'un en arabe jordanien et l'autre en français, pour examiner ce phénomène. Un intérêt particulier a été porté aux occlusives produites dans des séquences CVC dans le but d'étudier la consonne en position initiale et la coarticulation anticipatoire. La durée des voyelles et la fréquence des trois premiers formants au début et au milieu de chaque séquence ont été mesurées dans chaque condition de longueur / débit. Les équations de locus ont été utilisées afin de décrire la relation CV quand elle subit ces deux types de variations. Selon les résultats, la qualité de la voyelle et de la consonne est influencée dans l'opposition de durée et dans le débit de parole. Ce changement généré par les variations temporelles est détecté à l'aide des équations de locus. Ces dernières révèlent qu'il existe un chevauchement coarticulatoire plus important quand la durée de la voyelle décroît.

ABSTRACT

The impact of extrinsic and intrinsic vowel temporal variations on the consonant-vowel relationship : A trans-linguistic investigation on Jordanian arabic and French

This aims at examining the different spectral variations that are produced by two types of vowel time variations : phonological vowel length opposition and differing speaking rates. Two experiments on Jordanian Arabic and on French were conducted to investigate this phenomenon. We were interested in stop consonants produced in the initial position in CVC sequences. Vowel duration and the frequency of the first three formants were measured for each vowel length / speech rate. In addition, locus equations were computed to measure the impact of time variations on CV coarticulation. According to our results, it seems that both vowel length opposition and speaking rates had an impact on consonant and vowel quality as well as on CV coarticulation. For the two time variation types, when the time decreases (more coarticulation overlap) locus equation slopes tend to have higher values.

MOTS-CLÉS : longueur vocalique, débit de parole, transitions formantiques, arabe jordanien, français.

KEYWORDS: vowel length, speaking rate, formant transitions, Jordanian Arabic, French.

1 Introduction

Les variations temporelles d'une voyelle sont associées à l'opposition de durée phonologique dans certaines langues. Cette opposition (voyelle longue vs. courte) est intrinsèquement liée à la voyelle, autrement dit les voyelles longues sont physiquement plus longues que les voyelles courtes. Les variations temporelles d'une voyelle peuvent aussi dépendre des variations de débit de parole. Ce phénomène extrinsèque à la voyelle change également la durée ; les voyelles produites à débit lent sont physiquement plus longues que les mêmes voyelles produites à débit rapide. L'objectif de ce travail est d'étudier l'impact de ces différents types de variations temporelles sur les qualités spectrales de la voyelle et de la consonne ainsi que sur la relation coarticulaire entre la consonne et la voyelle. Plusieurs études ont été menées pour comprendre les différences entre voyelles longue et courte au niveau quantitatif (durée) et qualitatif (fréquence). Hadding-Koch & Abramson (1964) révèlent que le critère de quantité des voyelles n'est pas suffisant pour percevoir la distinction entre voyelles longue et courte en suédois. Dans la plupart des cas, la qualité des voyelles est indispensable pour différencier les deux. Dans une étude translinguistique sur l'arabe, le japonais et le thaï, Tsukada (2009) observe que l'influence de la quantité de la voyelle sur sa qualité est faible dans toutes les langues étudiées.

Il existe par ailleurs un débat à propos de l'impact du débit de parole sur les propriétés spectrales. Lindblöm (1963) observe que la qualité des voyelles (en suédois) est modifiée quand elles subissent des changements de débit. Il propose ainsi la notion d'*undershoot* : les voyelles n'atteignent pas leur cible articulatoire / acoustique quand elles sont confrontées à certains phénomènes dont la variation du débit de parole. Dans l'étude de Gay (1978), l'impact des variations de débit sur les propriétés spectrales des voyelles de l'anglais semble négligeable. Ce sont plutôt les consonnes (les F_{onsets}) qui seraient influencées par ce phénomène. Sur le même sujet d'étude, O'Shaughnessy (1986) a étendu le travail de Gay (1978) au français québécois en mettant en évidence que les variations temporelles attachées au débit de parole ne jouent pas directement un rôle sur la composition spectrale des voyelles et des consonnes. Selon lui, les indices spectraux restent relativement stables sous l'effet des variations temporelles. Il conclut que c'est essentiellement la vitesse des transitions formantiques qui varie en fonction du débit de parole. Harrington (2010) commente ce débat en soulignant que "*l'influence du débit sur l'espace vocalique n'est pas toujours claire, pas seulement parce que les locuteurs n'augmentent pas le débit par le même facteur, mais aussi parce qu'il pourrait y avoir des réorganisations articulatoires accompagnant les variations de débit.*"¹

Les études classiques sur les relations articulatoire / acoustique associées aux occlusives (Delattre *et al.*, 1955; Öhman, 1966; Kewley-Port, 1982) ont cherché à identifier des propriétés acoustiques invariantes pour décrire le lieu d'articulation. Le concept de locus formantique a été proposé par Delattre *et al.* (1955). Ce paramètre étant sensible aux contextes vocaliques (Öhman, 1966; Kewley-Port, 1982), il a fallu chercher des indices plus fiables qui prendraient en compte les aspects dynamiques de la production de la parole. Les équations de locus ont été proposées comme étant des invariants relationnels du lieu d'articulation (Sussman *et al.*, 1991; Sussman & Shore, 1996; Sussman *et al.*, 1998; Lindblöm & Sussman, 2012). Elles sont aussi de bons indicateurs du degré de coarticulation entre consonne et voyelle (Lindblöm, 1963; Krull, 1989; Duez, 1992; Fowler, 1994). Dans ces études, les équations de locus ont été mesurées indépendamment des phénomènes temporels que sont la longueur et la durée des voyelles ; à l'exception des études de Krull (1989) et Duez (1992) qui montrent un effet des durées sur les paramètres des équations de locus en comparant parole spontanée et parole contrôlée. Plus récemment, Berry & Weismer (2013) ont étudié le degré de coarticulation

1. Traduction française du paragraphe page 92.

dans différents débits de parole. Les résultats mettent en exergue que lorsque le débit augmente, la pente des équations de locus devient plus élevée tandis que l'ordonnée à l'origine baisse. Une pente proche de 1 indique une forte coarticulation alors qu'une pente proche de 0 révèle une absence de coarticulation. L'accélération du débit provoquerait donc un accroissement du chevauchement coarticulatoire.

Dans cet article, l'impact de l'opposition de longueur vocalique et des variations de débit de parole sur les propriétés spectrales de séquences occlusive-voyelle est évalué. De même, le degré de coarticulation et son influence sur les coefficients de l'équation de locus sont abordés.

2 Expérience I

2.1 Participants

Sept locuteurs jordaniens masculins âgés de 27 à 35 ans ont participé à cette expérience. L'un des locuteurs est le premier auteur. Ils sont originaires de 3 régions différentes de Jordanie (Ma'an, Amman et Jerash). Ils ne présentent aucun trouble du langage.

2.2 Stimuli

Les locuteurs devaient lire des séquences CVC enchâssées dans une phrase porteuse (/ħaka CVC hassa/ : « Il a dit CVC à l'instant »). Les séquences apparaissaient l'une après l'autre en alphabet arabe vocalisé (les diacritiques représentant les voyelles) sur un écran d'ordinateur.

Trois occlusives voisées et deux occlusives non-voisées ont été étudiées /b,d,g,t,k/. Chacune de ces occlusives apparaissait dans un mot de la langue ayant une structure CVC. Ces 5 occlusives cibles ont été combinées avec 6 voyelles : 3 courtes –{i, a, u}– et 3 longues –{i:, a:, u:}/ dans deux positions lexicales (initiale $C_{cible}VC$ vs. finale CVC_{cible}). L'autre consonne du mot était sélectionnée au hasard en fonction des mots existant dans le vocabulaire en arabe jordanien, soit un total de 80 mots différents. La fréquence des mots n'a pas été contrôlée.

2.3 Procédure

Il était demandé aux locuteurs de lire les séquences de la manière la plus naturelle possible sans chercher à parler correctement. Un programme écrit en Python² avec les bibliothèques Pygame³ et pyfribidi⁴ contrôlait le cours de l'expérience (durées d'affichage, écriture de droite à gauche, ordre de présentation des séquences). Les séquences (mot en contexte avec la phrase porteuse) étaient présentées sur l'écran d'ordinateur dans un ordre aléatoire et à un rythme relativement soutenu mais confortable (une phrase toutes les 1500 ms). Les participants ne connaissaient pas les séquences avant le début de l'enregistrement. Chaque mot était répété 10 fois. Au final, 600 séquences ont été obtenues par locuteur (5 consonnes × 2 positions syllabiques × 6 voyelles × 10 répétitions).

Les séquences CVC ont été segmentées et transcrites à la main avec le logiciel Praat (Boersma & Weening, 2012). Les fréquences des 3 premiers formants de chaque séquence CV/VC cible et leurs coordonnées temporelles ont été extraites automatiquement grâce à un script Praat développé par les

2. <http://www.python.org>

3. <http://www.pygame.org>

4. <http://pyfribidi.sourceforge.net/>

auteurs. L'algorithme d'extraction *Burg* (analyse LPC par auto-corrélation) a été employé avec une fenêtre d'analyse de 0.025s et un pas de 0.00625s.

Ces données ont été placées dans un fichier de résultats unique et ensuite traitées par un script R (R Core Team, 2012) chargé de procéder à l'analyse des données. Dans un premier temps, les tracés formantiques ont été lissés par moyennage glissant sur toutes les suites de 2 valeurs successives afin de compenser les variations trop rapides des fréquences formantiques (filtrage passe-bas). Les fréquences initiales / finales (en fonction de la position de l'occlusive étudiée dans le mot) et médianes des 3 premiers formants de chaque tracé formantique ont été sélectionnées et associées aux variables contrôlées dans l'expérience (occlusive cible, longueur vocalique, timbre vocalique, position de l'occlusive dans le mot, locuteur). Les positions de début et de fin de chaque voyelle, et la durée associée, ont été déterminées à partir du début de l'apparition des résonances formantiques des deux premiers formants en incluant les transitions formantiques *on-glide* et *off-glide*.

Des régressions linéaires ont ensuite été produites à partir de ces points afin de calculer les paramètres de chacune des 80 équations de locus (5 consonnes \times 2 longueurs vocaliques \times 2 positions syllabiques \times 4 locuteurs). Les mesures, dont le résidu (l'erreur), entre la valeur observée dans l'espace $F2_{onset} \sim F2_{mid}$ et celle prédite par la régression était supérieur à la moyenne des valeurs absolues des résidus $+1.5$ fois l'écart-type, ont été identifiées comme *outlier* et retirées de l'analyse afin d'éviter l'impact de valeurs extrêmes sur les pentes des équations de locus. Suite à cette première phase d'analyse, une seconde phase de régressions linéaires a été produite sans ces valeurs. Ces données extrêmes représentent 7% des données⁵. Les données de position finale (VC) ne sont pas discutées ici.

2.4 Résultats

2.4.1 Durée des voyelles

Comme attendu, les voyelles longues ont bien des durées plus longues que les voyelles courtes. Ces données sont présentées dans la Table 1. Cet effet est significatif dans une ANOVA à deux facteurs à mesures répétées avec les locuteurs comme facteur aléatoire ($F_{(1,4)} = 57.92, p < 0.01$).

	i	a	u
courte	77 (25)	90 (24)	78 (21)
longue	135 (37)	162 (47)	134 (35)

TABLE 1 – Moyenne (et écart-type) des valeurs de la durée vocalique en ms. des voyelles longues comparées aux voyelles courtes.

2.4.2 Propriétés spectrales des formants

Les fréquences des trois premiers formants au début (F_{onset}) et au milieu (F_{mid}) de la voyelle ont été mesurées pour chaque séquence afin d'observer l'impact de la longueur vocalique sur la consonne et sur la voyelle. La Figure 1 illustre la distribution de ces changements de qualité spectrale (sur $F2$ uniquement) des consonnes ($F2_{onset}$) et des voyelles ($F2_{mid}$), en association avec les variations de durée vocalique, en fonction de la longueur phonologique de la voyelle. Dans les deux représentations de la Figure 1, la distribution horizontale des points indique la variation temporelle des voyelles au fil du temps et celle correspondant à l'axe vertical révèle leur répartition fréquentielle. La distribution

5. L'usage de méthodes de régression robuste est en cours afin d'adopter une meilleure approche des données extrêmes.

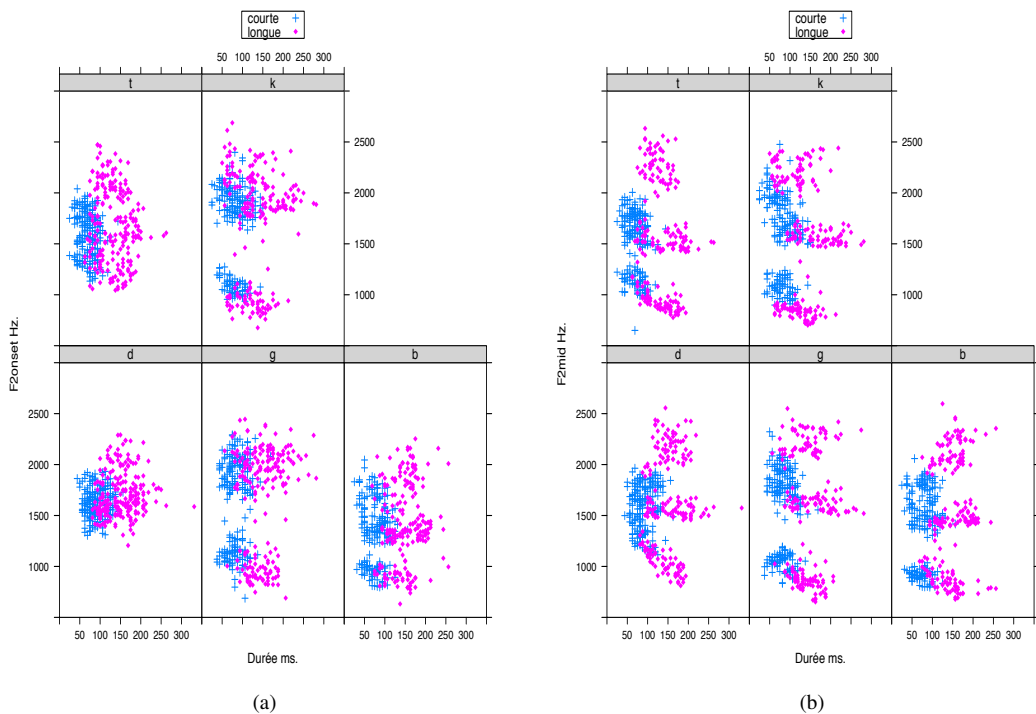


FIGURE 1 – Illustration de la distribution des fréquences (axe vertical) de $F2_{onset}$ (a) et $F2_{mid}$ (b) et des durées de la voyelle (axe horizontal) pour chaque consonne en fonction de la longueur vocalique.

des voyelles longues ($F2_{mid}$ dans la Figure 1(b)) distingue 3 groupes qui correspondent aux 3 timbres vocaliques : {i,a,u}. Les voyelles longues sont plus dispersées sur l'axe horizontal que les voyelles courtes et elles sont facilement distinctes des voyelles courtes. Le même phénomène est remarqué sur l'axe vertical ; les fréquences des voyelles longues sont plus dispersées que celles des voyelles courtes. Ces dernières sont plus concentrées sur les deux axes que les voyelles longues. Cette concentration est plus importante dans la distribution des $F2_{onset}$ (dans la Figure 1(a)) que celle des $F2_{mid}$. Une tendance globale est observée (nettement plus claire en $F2_{mid}$) lorsque la durée des voyelles décroît, les points se dirigent vers une zone de fréquence centrale.

2.4.3 Coarticulation CV

Les équations de locus ont été mesurées pour chaque consonne dans chaque catégorie de longueur vocalique afin d'explorer l'impact des variations temporelles provoquées par l'opposition de longueur vocalique sur la coarticulation CV. La Table 2 présente les valeurs moyennes des pentes et des ordonnées à l'origine ainsi que les R^2 pour les 5 occlusives en contexte de voyelle courte vs. longue. Il apparaît que les consonnes produites avec des voyelles courtes ont des pentes relativement plus élevées et des ordonnées à l'origine globalement plus basses que lorsqu'elles sont produites en coarticulation avec une voyelle longue. Ces différences sont significatives pour la pente ($F_{(1,6)} = 9.74, p < 0.05$) et pour l'ordonnée à l'origine ($F_{(1,6)} = 20.62, p < 0.01$).

C	Pente		Ordonnée à l'origine		R^2	
	V courtes	V longues	V courtes	V longues	V courtes	V longues
b	0.77	0.69	244	363	0.94	0.90
d	0.54	0.39	774	1083	0.86	0.84
g	1.03	0.85	60	334	0.94	0.86
t	0.69	0.62	551	698	0.93	0.93
k	1.09	0.94	-49	210	0.94	0.93

TABLE 2 – Valeurs moyennes des pentes, des ordonnées à l'origine et des R^2 des équations de locus calculées pour chaque consonne coarticulée avec les voyelles courtes et les voyelles longues en position initiale (Expérience I).

3 Expérience II

3.1 Participants

Quatre locuteurs français masculins âgés de 22 à 28 ans ont participé à cette expérience. Ils étaient étudiants à l'Université de Nantes lors de l'enregistrement et ne présentent aucun trouble du langage.

3.2 Stimuli

Les locuteurs devaient lire des séquences CVC enchâssées dans une phrase porteuse (« Il a dit CVC huit fois »). Les phrases à prononcer apparaissaient sur un écran d'ordinateur à 3 débits différents en 3 blocs successifs (rapide, puis moyen et enfin lent). Une barre de progression s'affichait progressivement sous les phrases pour donner une indication aux participants du débit voulu, avec une vitesse « cible » de 70, 140 et 210 ms / syllabe respectivement pour les débits rapide, moyen et lent. Chaque mot était répété 7 fois dans un ordre aléatoire à l'intérieur du bloc.

Au total, 3 occlusives voisées et 3 occlusives non-voisées ont été examinées /b,d,g,p,t,k/. Chacune de ces occlusives apparaissait dans un mot de la langue ayant une structure CVC. Ces 6 occlusives cibles ont été combinées avec 4 voyelles {i, a, u, y} dans 2 positions lexicales (initiale $C_{cible}VC$ vs. finale CVC_{cible}). L'autre consonne du mot était sélectionnée au hasard en fonction des mots existant dans le vocabulaire français. Au total, 48 mots différents (produits à 3 débits) ont été prononcés. La fréquence des mots n'a pas été contrôlée. Les mêmes procédures de segmentation et d'extraction des données spectrales ont été employées que celles mises en œuvre dans l'expérience I.

3.3 Résultats

3.3.1 Durée des voyelles

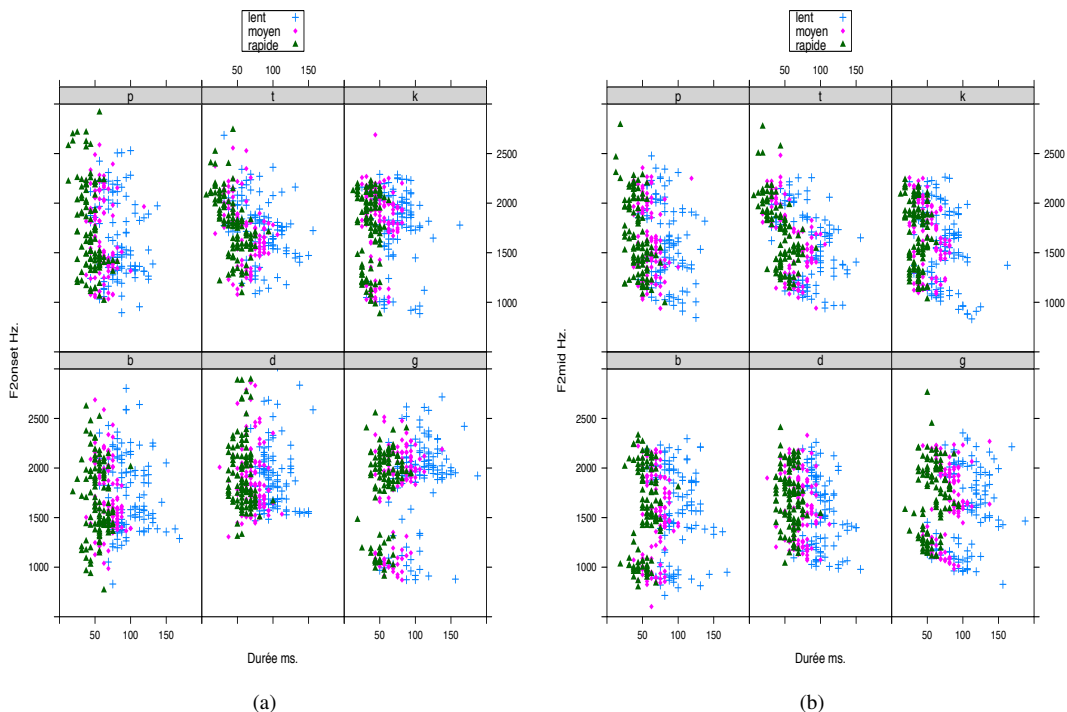
La Table 3 présente les durées moyennes et leur dispersion pour chaque condition de débit. L'effet global du débit sur la durée est significatif ($F_{(2,6)} = 12.85, p < 0.01$).

3.3.2 Propriétés spectrales des formants

L'analyse des données a été restreinte aux 3 voyelles cardinales {i, a, u} afin de pouvoir comparer plus nettement les données de l'arabe jordanien et du français (dans cette section uniquement).

	i	a	u	y
rapide	43 (13)	43 (12)	45 (10)	44(14)
moyen	58 (15)	80 (10)	62 (12)	62(18)
lent	82 (24)	105 (21)	87 (21)	80(27)

TABLE 3 – Moyenne (et écart-type) des durées vocaliques (en ms) pour les 3 débits.


 FIGURE 2 – Illustration de la distribution des fréquences (axe vertical) de $F2_{onset}$ –Fig. 2(a)– vs. $F2_{mid}$ –Fig. 2(b)– et des durées des voyelles /i,a,u/ (axe horizontal) pour chaque consonne en fonction du paramètre de débit (Expérience II).

Contrairement à la distribution des voyelles de l’arabe, celle des $F2_{mid}$ du français (Figure 2(b)) différencie peu les 3 groupes qui correspondent aux 3 voyelles : {i,a,u} . De plus, les 3 débits ne sont pas dissociables, ils présentent plutôt une répartition continue. Par comparaison avec les données de l’arabe, il apparaît que la distribution verticale des points est plus étendue pour $F2_{onset}$ et $F2_{mid}$ et celle horizontale moins étendue. La fréquence des voyelles tend très légèrement à se diriger vers une zone de fréquence centrale à débit rapide mais ce phénomène est nettement moins marqué que dans les données de l’arabe.

3.3.3 Coarticulation CV

Les équations de locus ont été calculées pour chaque consonne associée à chaque débit afin d’explorer l’impact du débit de parole sur la coarticulation CV. Les $F2_{onset}$ et $F2_{mid}$ ont été employés afin de calculer les paramètres des équations de locus. La Table 4 présente les valeurs moyennes des pentes, des ordonnées à l’origine et des R^2 pour les 6 occlusives produites aux 3 débits. Les pentes et les ordonnées à l’origine sont influencées par le débit : les consonnes produites avec un débit rapide ont

des pentes relativement plus élevées et des ordonnées à l'origine relativement moins élevées que celles des mêmes consonnes produites avec un débit lent. L'effet global du débit (3 niveaux) est significatif pour les pentes ($F_{(2,6)} = 5.595, p < 0.05$) et les ordonnées à l'origine ($F_{(2,6)} = 9.478, p < 0.05$).

C	Pente			Ordonnée à l'origine			R^2		
	rapide	moyen	lent	rapide	moyen	lent	rapide	moyen	lent
b	0.73	0.57	0.56	806	834	516	0.73	0.69	0.51
d	0.49	0.32	0.22	996	1295	1449	0.63	0.64	0.45
g	1.02	0.99	0.74	114	197	701	0.70	0.68	0.53
p	1.06	0.86	0.93	-75	277	139	0.80	0.62	0.76
t	0.81	0.75	0.57	412	526	851	0.92	0.73	0.73
k	1.03	0.84	0.83	45	422	646	0.93	0.72	0.78

TABLE 4 – Valeurs moyennes des pentes, des ordonnées à l'origine et des R^2 des équations de locus calculées pour chaque consonne en débit rapide, moyen et lent.

4 Discussion

L'impact de 2 types de variations temporelles (débit et longueur phonologique) sur les propriétés spectrales et coarticulatoires a été étudié dans 2 langues différentes. Ces 2 types modifient globalement la qualité de la voyelle et celle de la consonne à des niveaux différents. Dans les 2 langues, quand la durée décroît, les fréquences des voyelles et des consonnes se dirigent vers une zone de fréquence centrale. Ce phénomène est mieux visible en arabe et sur $F2_{mid}$. Ces résultats sont en accord avec les travaux de Lindblöm (1963) et de Berry & Weismer (2013).

La variation temporelle de la voyelle en arabe jordanien est notamment liée à l'opposition de durée phonologique. La qualité de la consonne semble être plus stable que celle de la voyelle ; autrement dit l'opposition voyelles longue vs. courte est moins marquée en $F2_{onset}$ qu'en $F2_{mid}$. Néanmoins, l'opposition de durée phonologique influence la relation coarticulatoire CV. Le chevauchement coarticulatoire entre la consonne et la voyelle est plus important pour les voyelles courtes que dans le cas des voyelles longues. Les résultats de cette étude mettent en relief que les pentes des voyelles courtes sont plus élevées et leurs ordonnées à l'origine sont plus basses que celles des voyelles longues.

En français, l'impact des variations temporelles liées au débit de parole paraît avoir un comportement similaire au précédent. Par contre, les qualités de la voyelle et de la consonne sont influencées d'une manière moins importante lorsque le débit de parole change. Par ailleurs, la relation CV est sensible aux variations de débit de parole : en fonction de l'augmentation du débit, la valeur de la pente s'accroît et la valeur des ordonnées à l'origine diminue.

Les fréquences des $F2_{onset}$ dans les deux langues ont un comportement similaire. La concentration de points en un nuage signifie que la consonne est moins coarticulée. Les alvéolaires /d,t/ semblent être relativement résistantes : les points sont concentrés dans une zone de fréquence globalement réduite pour /d/ et plus importante pour /t/. Quant aux vélaires /k,g/, elles forment 2 nuages de points désignant l'antériorité / postériorité des voyelles longues et courtes avec lesquelles elles sont produites. Les bilabiales /b,p/ ne semblent pas influencer les voyelles puisque la dispersion des points des $F2_{onset}$ est aussi importante que celle des $F2_{mid}$. Cette différence de coarticulation est démontrée par les valeurs de pente et d'ordonnée à l'origine pour chaque consonne.

Références

- BERRY J. & WEISMER G. (2013). Speaking rate effects on locus equation slope. *Journal of Phonetics*, **41**, 468–478.
- BOERSMA P. & WEENING D. (2012). Praat : Doing phonetics by computer. Computer program.
- DELATTRE P., LIBERMAN A. & COOPER F. (1955). Acoustical loci and transitional cues for consonants. *The Journal of the Acoustical Society of America*, **27**(4), 769–773.
- DUEZ D. (1992). Second formant locus-nucleus patterns : An investigation of spontaneous french speech. *Speech Communication*, **11**(4-5), 471–427.
- FOWLER C. (1994). Invariants, specifiers, cues : An investigation of locus equations as information for place of articulation. *Perception and Psychophysics*, **55**, 597–610.
- GAY T. (1978). Effect of speaking rate on vowel formant movements. *Journal of the Acoustical Society of America*, **63**, 223–30.
- HADDING-KOCH K. & ABRAMSON A. S. (1964). Duration versus spectrum in swedish vowels : Some perceptual experiments. *Studia Linguistica*, **18**(2), 94–107.
- HARRINGTON J. (2010). *Acoustic Phonetics*, In *The Handbook of Phonetic Sciences*, p. 81–129. Blackwell Publishing Ltd.
- KEWLEY-PORT D. (1982). Measurement of formant transitions in naturally produced stop consonant-vowel syllables. *Journal of the Acoustical Society of America*, **72**(2), 379–389.
- KRULL D. (1989). Second formant locus patterns and consonant-vowel coarticulation in spontaneous speech. *Phonetic experimental research at the institute of linguistics university of Stockholm-PERILUS*, **10**, 87–108.
- KWELEY-PORT D. (1982). Measurement of formant transitions in naturally produced stop consonant-vowel syllables. *Journal of the Acoustical Society of America*.
- LINDBLÖM B. (1963). Spectrographic study of vowel reduction. *Journal of the Acoustical Society of America*, **35**(11), 1773–1781.
- LINDBLÖM B. & SUSSMAN H. M. (2012). Dissecting coarticulation : How locus equations happen. *Journal of Phonetics*, **40**(1), 1–19.
- ÖHMAN S. (1966). Coarticulation in VCV utterances : Spectrographic measurements. *The Journal of the Acoustical Society of America*, **39**(1), 151–168.
- O'SHAUGHNESSY D. (1986). The effects of speaking rate on formant transitions in French synthesis-by-rule. In *Acoustics, Speech, and Signal Processing, IEEE International Conference on ICASSP '86.*, volume 11, p. 2027–2030.
- R CORE TEAM (2012). *R : A Language and Environment for Statistical Computing*. Vienna, Austria : R Foundation for Statistical Computing. ISBN 3-900051-07-0.
- SUSSMAN H. M., FRUCHTER D., HILBERT J. & SIROSH J. (1998). Linear correlates in the speech signal : The orderly output constraint. *Behavioral and Brain Sciences*, **21**, 241–299.
- SUSSMAN H. M., MCCAFFREY H. A. & MATTHEWS S. A. (1991). An investigation of locus equations as a source of relational invariance for stop consonant place categorization. *Journal of the Acoustical Society of America*, **90**, 1309–1325.
- SUSSMAN H. M. & SHORE J. (1996). Locus equation as phonetic descriptors of consonantal place of articulation. *Psychonomic Society, Inc.*, **58**(6), 936–946.
- TSUKADA K. (2009). An acoustic comparison of vowel length contrasts in Arabic, Japanese and Thai : Durational and spectral. *International Journal on Asian Language Processing*, **19**(4), 127–138.