

SIMULATION DE LA SOURCE VOCALE

EFFET DU COUPLAGE AVEC LE CONDUIT VOCAL

H.TEFFAHI, S. KHEROUF

Laboratoire de Communication Parlée et Traitement du Signal
Faculté d'Electronique et d'Informatique /USTHB
BP 32 El alia
Alger - Algerie
hteffahi@gmail.com, kherouf_samy@yahoo.fr

RESUME : Nous présentons une simulation de la source vocale, connu comme modèle à deux masses. Ce modèle simule le fonctionnement des cordes vocales humaines. Une étude qualitative des effets du couplage source-conduit sur la forme et le spectre de l'onde de débit de la glotte est entreprise. Cette simulation va permettre de mieux cerner le processus acoustique de production de la parole.

MOTS-CLES : Glotte, Modèle à deux masses, couplage, conduit vocal.

1 INTRODUCTION

L'étude de la parole à l'aide d'analogues du conduit vocal permet de mieux cerner le processus acoustique de sa production. Une bonne connaissance des relations existant entre la forme du conduit vocal et les caractéristiques acoustiques est essentielle, tant pour la réalisation des modèles articulatoires que pour des études phonétiques ; mais celle-ci n'ont pas encore été systématiquement établies dans le cas général d'un modèle du conduit vocal avec pertes.

Les associations entre les caractéristiques d'un son et la disposition du conduit vocal représentent un aspect important de la description phonétique. Par ailleurs, elles facilitent la commande d'un modèle. Malheureusement, ce type d'association ni trivial ni facile à interpréter.

Le but de ce papier est de présenter les effets du couplage entre la source vocale et le conduit vocal. Les effets de ce couplage sont étudiés pour des configurations variables du conduit vocal, configurations retenues lors de la production des voyelles orales françaises.

Le conduit vocal est simulé par un modèle basé sur la théorie de propagation d'une onde acoustique dans un tube non uniforme. Ce modèle utilise les coefficients de réflexion telle que proposé par Kelly & Lochbaum (Teffahi, 2007). Dans ce modèle à paramètres localisés, les variations de géométrie du conduit vocal sont représentées par une succession de coefficients de réflexions. Par ailleurs, ce modèle inclut toutes les pertes : à savoir, pertes par viscosité- chaleur, par vibrations des parois et par rayonnement aux lèvres.

En reprenant certains travaux (Guerin, 1978) (Titze, 1994) (Henrich, 2001) (Sciamarella, 2002) (Vilain, 2002) et en les complétant, nous étudierons successivement l'influence du couplage sur :

- La forme et le spectre de l'onde de débit ;
- La fréquence fondamentale intrinsèque des voyelles orales françaises ;
- La puissance intrinsèque des voyelles.

2 DESCRIPTION DU MODELE A DEUX MASSES

Le schéma du modèle est donné sur la figure 1. On peut voir, à gauche, la trachée qui amène l'air des poumons. A droite, se trouve le tube du larynx qui réalise la liaison glotte – conduit vocal. Ces deux tubes, trachée et larynx, sont supposés cylindriques et de dimensions invariables. Les cordes vocales elles-mêmes sont divisées en une partie supérieure et une partie inférieure. Chacune des parties est représentée par un ensemble mécanique comprenant une masse m , d'épaisseur d , un ressort de tension s et un amortissement r (Falek and Teffahi, 2009). Les deux masses peuvent se déplacer latéralement, d'une valeur notée x . Elles sont reliées par un ressort de raideur k_{12} . Le déplacement de chacune des parties ne se fait donc que dans un seul plan, perpendiculairement à l'axe du système, à partir d'une position de repos (notée x_0). Les différents facteurs notés sur la figure 1 sont :

l_g : la longueur effective des cordes vocales,

d_1 et d_2 : l'épaisseur des deux parties d'une corde vocale,

s_1 et s_2 : les tensions équivalentes des deux parties ,

r_1 et r_2 : les résistances de viscosité équivalentes,

Ag_{01} et Ag_{02} : les sections transversales de la glotte lorsque les masses m_1 et m_2 sont au repos (aire de phonation neutre) ,

U_g : le débit à travers la glotte ,

Ps : la pression sub-glottique par rapport à la pression atmosphérique.

P_{CV} : la pression à l'entrée du conduit vocal.

Compte tenu de la symétrie du modèle, les aires d'ouverture de la glotte pour les deux masses sont :

$$A_{g1} = A_{g01} + 2l_g x_1 = 2l_g (x_{01} + x_1) \quad (1)$$

$$A_{g2} = A_{g02} + 2l_g x_2 = 2l_g (x_{02} + x_2) \quad (2)$$

Les équations mécaniques régissant ce système s'écrivent:

$$m_1 \frac{d^2 x_1}{dt^2} + r_1 \frac{dx_1}{dt} + s_1(x_1, x_{01}) + k_{12}(x_1 - x_2) = l_g d_1 P_{m1} \quad (3)$$

$$m_2 \frac{d^2 x_2}{dt^2} + r_2 \frac{dx_2}{dt} + s_2(x_2, x_{02}) + k_{12}(x_2 - x_1) = l_g d_2 P_{m2} \quad (4)$$

P_{m1} et P_{m2} sont les pressions agissant sur chacune des masses.

$s_1(x_1, x_{01})$ et $s_2(x_2, x_{02})$ sont les tensions équivalentes.

La résolution du système d'équations différentielles donne les valeurs de déplacement x des masses. On peut alors en déduire l'aire de la glotte:

$$A_{g_i}(t) = A_{g_i} + 2l_g x_i(t) = 2l_g(x_i(t) + x_{0_i}) \quad i = 1,2 \quad (5)$$

Dans l'analogie habituelle mécanique-électrique, la glotte peut être représentée par un circuit électrique composé de résistances et d'inductances. Le circuit équivalent obtenu est donné figure 2 (Guerin, 1978). Le conduit vocal est représenté par son impédance d'entrée. Les valeurs des différents éléments sont les mêmes que ceux donnés en (Falek and Teffahi, 2009).

Alors, à l'aide de la figure 2, on peut déduire la pression sur chacune des masses et l'équation différentielle donnant $U_g(t)$:

$$P_{m1} = P_S - R_{k1}U_g - \frac{R_{V1}U_g + L_{g1} \frac{dU_g}{dt}}{2} \quad (6)$$

$$P_{m2} = P_{CV} + R_{k2}U_g + \frac{R_{V2}U_g + L_{g2} \frac{dU_g}{dt}}{2} \quad (7)$$

$$P_S - P_{CV} = (R_{K1} + R_{V1} + R_{K12} + R_{V2} + R_{K2})U_g + (L_{g1} + L_{g2}) \frac{dU_g}{dt} \quad (8)$$

Pour résoudre le système d'équations mécaniques (équations 3 et 4), nous avons utilisé la méthode de Runge-Kutta à quatre approximations, le système d'équations étant transformé en quatre équations de premier ordre.

Le calcul s'effectue de la manière suivante : on se donne, au départ, les aires de repos A_{g01} et A_{g02} et on calcule le premier échantillon de $U_g(t)$. Cette valeur permet de calculer P_{m1} et P_{m2} , puis de résoudre le système d'équations mécanique. On dispose alors de $A_{g1}(t)$ et $A_{g2}(t)$ qui permettront d'évaluer un nouvel échantillon de $U_g(t)$, ce qui correspond à la première étape décrite dans ce paragraphe. Le cycle décrit peut alors recommencer.

L'absence d'une relation simple entre les paramètres de contrôle du modèle et la physiologie de la glotte est une des faiblesses principales des modèles de production vocale. Même si la plupart des paramètres de contrôle sont choisies d'après des mesures physiologiques, ces paramètres doivent néanmoins être réglés pour compenser les simplifications du modèle.

La démarche adoptée par la plupart des utilisateurs du modèle à deux masses consiste à étudier l'évolution des grandeurs de sortie, telle que la fréquence fondamentale d'oscillation, la puissance de l'onde de débit, le quotient d'ouverture des cordes vocales (paramètres acoustiques), en fonction de certains paramètres (physiques) clés qui ont été jugé très significatifs dans la simulation du mouvement des cordes vocales (Ishizaka and Flanagan, 1972). Les six paramètres de commande concernés sont les suivants : P_S , m_1 , m_2 , k_1 , k_2 , k_{12} , c'est à dire : la pression subglottique, les deux masses et les raideurs (Tableau 1). Les aires initiales A_{g0i} ont été fixées à 0.05 cm^2 et les résistances de viscosité identiques à celles précisées par Ishizaka et Flanagan.

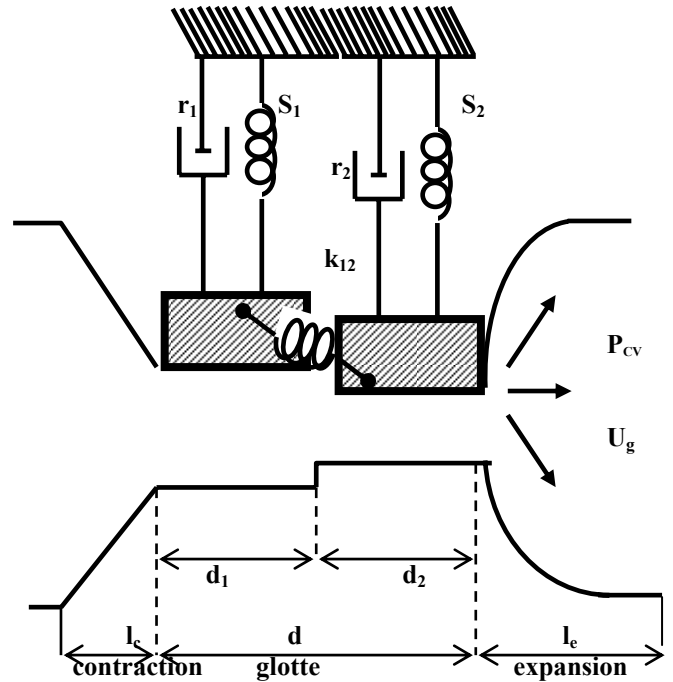


Figure 1: Modèle à deux masses des cordes vocales.

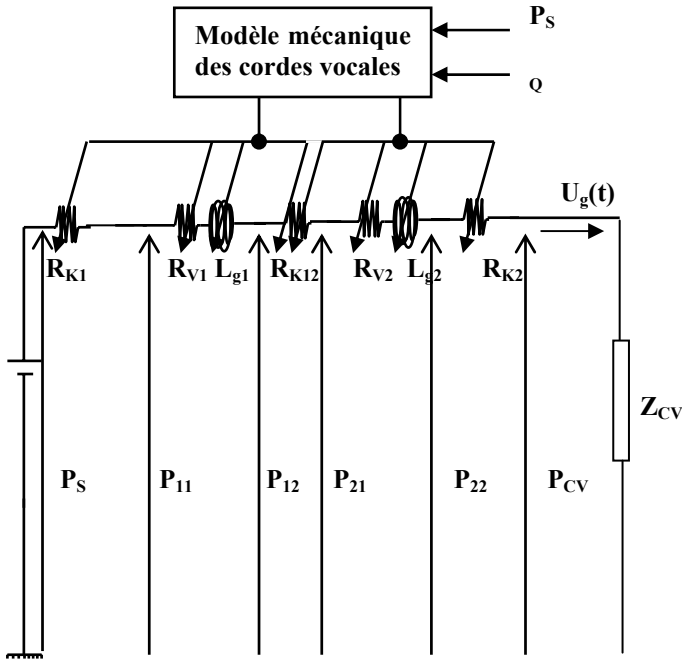


Figure 2: Modèle électrique équivalent de la source vocale à deux masses couplé au conduit vocal.

Ps (cm H ₂ O)	m ₁ (mg)	m ₂ (mg)	k ₁ (kdynes/cm)	k ₂ (kdynes/cm)	k ₁₂ (kdynes/cm)
3-19	100-380	10-70	10-80	2-10	6.5-30

Tableau 1: Domaine d'évolution des paramètres de commande (Guerin, 1978). (1 dyne = 10⁻⁵ N).

Une étroite dépendance entre les masses et les raideurs a été constatée, en particulier celle qui lie la masse m_1 à tous les autres paramètres. Les régressions suivantes ont été obtenues pour les six paramètres (Guerin, 1978):

$$m_2 = 0.14 m_1 + 5.9 \quad \frac{m_2}{m_1} = \frac{k_2}{k_1} = 0.17$$

$$k_1 = -0.10 m_1 + 57 \quad k_2 = -1.8 \cdot 10^{-2} m_1 + 9.9$$

$$k_{12} = -3.7 \cdot 10^{-2} m_1 + 27$$

A partir de ces relations, nous avons proposé (Falek and Teffahi, 2009) un paramètre de contrôle unique à partir duquel seront déterminés tous les autres, mis à part P_s qui est indépendant. A cet effet, la masse m_1 est représentée par le rapport entre une masse globale unique et un paramètre masse/tension noté Q , tel que :

$$\begin{cases} m_1 = \frac{M}{Q} \\ k_1 = k \cdot Q \end{cases} \quad (9)$$

avec comme valeurs de bases

$$\begin{cases} M = 380 \text{ mg} \\ k = 25 \text{ Kdynes / cm} \end{cases} \quad k_{12} = (10+5 \cdot Q) \text{ Kdynes/cm} \quad (10)$$

$$\frac{m_2}{m_1} = \frac{k_2}{k_1} = 0.17$$

Nous voyons que si le paramètre Q augmente, les deux masses diminuent et les raideurs croissent. Il s'agit donc d'un paramètre qui rend compte de l'étirement et de l'effilement des cordes vocales ; c'est-à-dire pour l'essentiel de l'effet observé sur les cordes vocales réelles.

3. INFLUENCE DU COUPLAGE SOURCE-VOCAL CONDUIT VOCAL SUR LA FORME ET LE SPECTRE DE L'ONDE DE DEBIT

L'étude de l'influence du couplage source vocale-conduit vocal sur la forme de l'onde de débit glottique a été effectuée dans le cas des différentes productions vocaliques. On a utilisé le modèle à deux masses défini et présenté en (Falek and Teffahi, 2009), le conduit vocal étant représenté par le modèle analogue SIMCV présenté en (Teffahi, 2007).

Nous avons vu que la commande de la source vocale pouvant être effectuée à partir de deux paramètres : la pression subglottique P_s et un paramètre Q qui rend compte à la fois de l'étirement et de l'amincissement des cordes vocales sous l'action conjuguée des tensions passives et actives. Les mesures qui seront effectuées sur l'onde de débit nous permettront d'évaluer les grandeurs suivantes (figure 3) :

- Quotient d'ouverture Q_0 de la glotte : correspond au rapport entre la durée d'ouverture de la glotte et la période de l'impulsion glottale, soit $Q_0 = \frac{t_1 + t_2}{T}$;
- Quotient de dissymétrie Q_D : correspond au rapport du temps t_1 d'établissement de l'ouverture des cordes vocales eu temps t_2 de retour à la fermeture, soit $Q_D = \frac{t_1}{t_2}$

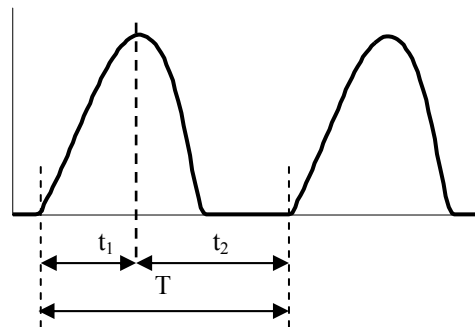


Figure 3 : caractérisation de la forme de l'onde de débit de la source vocale.

Pour caractériser le spectre de l'onde de débit de la source vocale, nous avons mesuré sa pente moyenne d'affaiblissement α , en dB/octave. Notre étude porte sur les trois voyelles cardinales : [i], [a] et [u]; les paramètres de la source vocale ont pris les valeurs suivantes :

$$\begin{matrix} Q = 1.5 & 2 & 2.7; \\ P_S = 6 & 8 & 10 & 12 \text{ (cm H}_2\text{O)}. \end{matrix}$$

Cette étude nécessite 36 simulations. Dans ce qui suit, nous allons évoquer successivement le quotient d'ouverture Q_0 , le quotient de dissymétrie Q_D et la pente du spectre α . (1 cm H₂O=98.0638 Pa).

3.1 Analyse des résultats concernant le quotient d'ouverture Q_0 .

Sur les résultats des 36 simulations, nous avons opéré un traitement statistique afin de dégager les influences respectives des paramètres de commande pour chacune des voyelles.

On observe que le Q_0 moyen est pratiquement le même pour les trois ensembles de simulations, à savoir 0.67, les valeurs extrêmes étant aussi voisines (tableau 2).

Voyelles	[i]	[a]	[u]
Valeurs extrêmes	0.63-0.71	0.63-0.71	0.59-0.71
Valeurs moyennes	0.67	0.67	0.66

Tableau 2: Résultats concernant le quotient d'ouverture Q_0 .

Pour chacune des voyelles, nous avons déterminé les droites de régression qui lient Q_0 aux paramètres de commande P_S et Q . On obtient :

- Pour la voyelle [i] $Q_0(\%) = -0.67 P_S + 2.8 Q + 68$
- Pour la voyelle [a] $Q_0(\%) = -0.72 P_S + 2.7 Q + 68$
- Pour la voyelle [u] $Q_0(\%) = -0.61 P_S + 2.7 Q + 66$

On constate que ces trois relations sont assez voisines, ce qui indique que cette caractéristique Q_0 n'est pas sensiblement affectée par la configuration du conduit vocal.

Les observations faites par (Guerin, 1978) sur des voyelles du français concordent avec les nôtres, il a relevé une valeur moyenne de 0.64 pour les trois voyelles [i, a, u].

3.2 Analyse des résultats concernant le quotient de dissymétrie Q_D .

Pour le quotient de dissymétrie, les écarts extrêmes et les valeurs moyennes présentent de nettes différences pour les trois voyelles (tableau 3) :

Voyelles	[i]	[a]	[u]
Valeurs extrêmes	1.86-2.49	1.65-2.05	1.90-4.25
Valeurs moyennes	1.87	1.85	3.10

Tableau 3 : Résultats concernant le quotient d'ouverture Q_D .

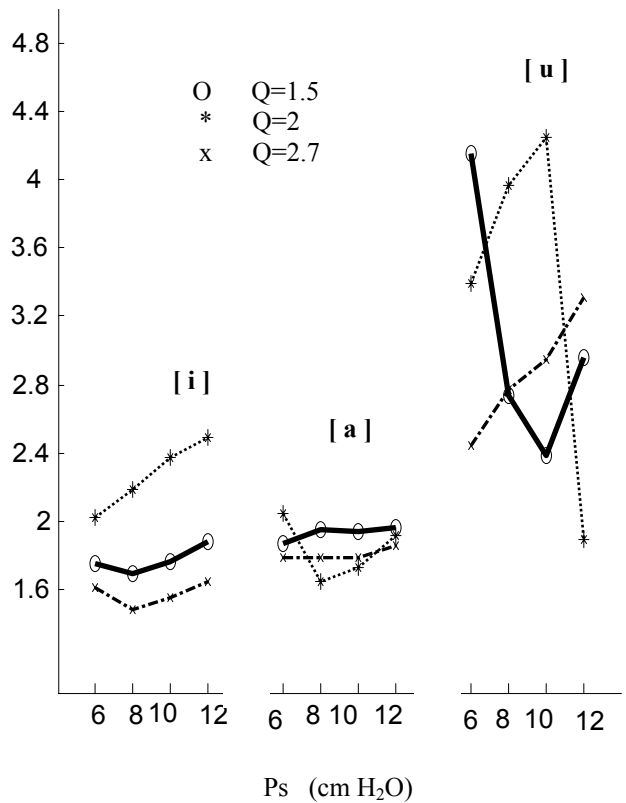


Figure 4 : Relations entre le quotient de dissymétrie Q_D et la pression subglottique P_S , pour différentes valeurs du paramètre Q en fonction de la nature de la voyelle.

Pour la mise en évidence des influences de P_S et Q , on ne peut exploiter les droites de régression linéaire comme on peut le constater sur la figure 4. Des résultats présentés sur cette figure, il se dégage des tendances : Q_D augmenterait avec P_S et Q mais les liens entre ces paramètres ne sont pas linéaires. Les variations du quotient de dissymétrie avec la pression subglottique et la tension des cordes vocales sont dépendantes du couplage source-conduit vocal. Le couplage source-conduit vocal est à l'origine d'une sur-oscillation de l'onde glottique, le déplacement de cette sur-oscillation par rapport à la forme moyenne provoque une variation importante de la valeur de Q_D (figure 5).

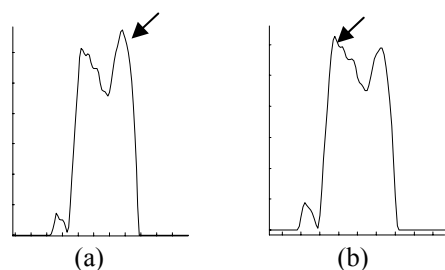


Figure 5 : (a) Forme de l'onde de débit avec P_s donnée ; (b) Forme de l'onde de débit avec P_s supérieure : l'ondulation s'est déplacée vers la gauche provoquant une variation importante de Q_D .

3.3 Analyse des résultats concernant la pente du spectre α .

Pour le domaine de variation défini au paragraphe 3, la pente du spectre de l'onde de débit, exprimée en dB/octave, évolue dans les limites suivantes (tableau 4) :

Voyelles	[i]	[a]	[u]
Pente du spectre α (valeurs extrêmes)	-12.8 à -5.82	-13.14 à -5.77	-12.66 à -6.26
Pente du spectre α (valeurs moyennes)	-7.57	-8.21	-8.30

Tableau 4 : Résultats concernant la pente du spectre α .

En examinant les résultats donnés dans le tableau 4 ou ceux tirés des spectres de la figure 6, on ne trouve pas de nettes différences concernant les pentes pour les diverses voyelles. Les valeurs sont légèrement inférieures à celles qui ont été mesurées au cours de la phonation (Henrich and Doval, 2000).

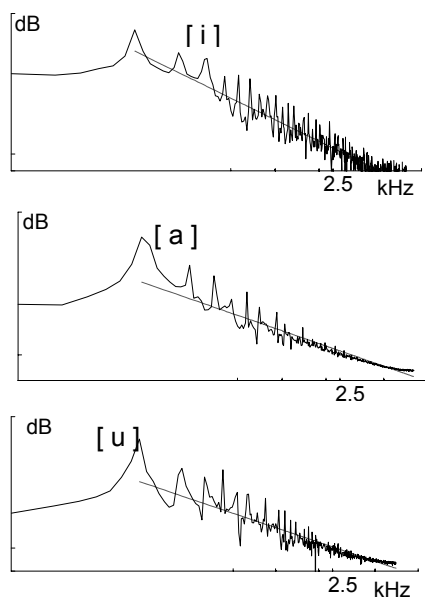


Figure 6 : Spectre de l'onde de débit pour chacune des trois voyelles dans les conditions suivantes : $P_s= 8$; $Q=2$.

Les effets de la pression subglottique et du facteur Q sont très nettes pour les trois ensembles de simulation (figure 7).

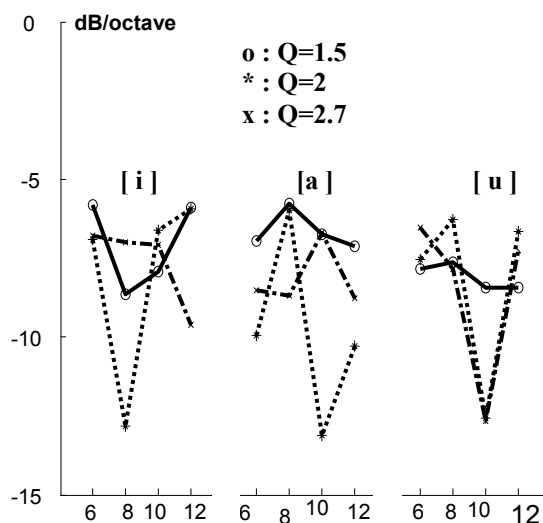


Figure 7 : Relation entre la pente α du spectre de l'onde de débit et la pression subglottique P_s pour différentes valeurs de Q et pour diverses voyelles.

Comme nous l'avons vu plus haut, les paramètres P_s et Q exercent une influence sur la forme de l'onde (ce qui a été exprimé par les données des quotients d'ouverture et de dissymétrie). Pour l'onde glottique (Guerin, 1978) a proposé une relation empirique permettant de relier la pente de son spectre aux deux quotients (Q_0 et Q_D) :

$$\alpha = k \frac{Q_0}{Q_D} \text{ avec } k = -28$$

Cette formulation s'explique facilement : si la phase de fermeture et la dissymétrie du signal augmentent, le spectre s'enrichit en composantes de fréquences élevées. A ceci s'ajoute une caractéristique propre au signal glottique : la forme de l'onde est généralement d'autant plus arrondie que le Q_0 est grand. Nous avons évalué séparément les valeurs de k pour les trois voyelles, les résultats sont regroupés dans le tableau 5 :

Voyelles	[i]	[a]	[u]
k (valeur moyenne)	-21	-23	-39
Ecart type	7.2	5.9	16.4

Tableau 5 : Résultats concernant les valeurs de k .

Pour l'ensemble des valeurs confondues, on obtient $k = -27.93$, ce qui est très voisin des valeurs relevées par (Guerin, 1978).

4. INFLUENCE DU COUPLAGE SOURCE-VOCAL CONDUIT -VOCAL SUR LA FREQUENCE FONDAMENTALE

Plusieurs études (Vilain, 2002) (Henrich and Doval, 2000) (Titze, 1994) (Falek and Teffahi, 2009) ont montré que le couplage source-vocal conduit vocal a un effet

minime sur la fréquence fondamentale de vibration des cordes vocales. C'est pour préciser l'importance de cet effet que nous avons mesuré la fréquence fondamentale du modèle de notre source à deux masses dans le cas des configurations des onze voyelles orales du français. Les paramètres de commande de la source sont la pression subglottique P_s et le facteur Q et les différentes configurations du conduit vocal, pour les onze voyelles orales françaises considérées, sont traduites par la fonction d'aire du conduit vocal. Cette fonction d'aire est constituée d'une succession de sections élémentaires (Teffahi, 2007).

Sur la figure 8, nous avons noté les valeurs des fréquences fondamentales pour les onze voyelles françaises et pour différents paramètres de la source vocale.

On remarque que l'étendue du domaine de variation de F_0 augmente lorsque Q augmente, c'est-à-dire lorsque la tension des cordes vocales croît. Pour une fréquence fondamentale d'environ 130 Hz (valeur moyenne pour une voix d'homme), l'excursion est de 10 Hz. Ceci confirme bien que le couplage source conduit vocal a un effet minime sur la fréquence fondamentale.

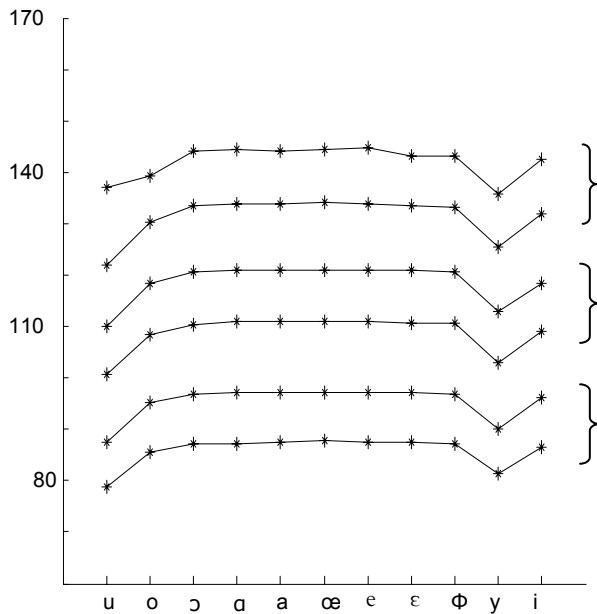


Figure 8 : Fréquence fondamentale pour onze voyelles françaises et pour diverses valeurs des paramètres de la source vocale.

- 1) $Q=2.5$, 2) $Q=2$ et 3) $Q=1.5$
 a) $P_s=6 \text{ cm H}_2\text{O}$ et b) $P_s=10 \text{ cm H}_2\text{O}$

5. INFLUENCE DU COUPLAGE SOURCE-VOCALE CONDUIT-VOCAL SUR LA PUISSANCE INTRINSEQUE DES VOYELLES

Pour une même langue, dans des conditions contextuelles et prosodiques identiques, les niveaux d'intensité moyens (aussi appelés puissance intrinsèque) sont significativement différents. Cette intensité, indice du timbre

vocalique, est qualifiée d'intrinsèque dans la mesure où, étroitement liée au processus de production, elle n'intervient pas directement pour différencier les voyelles entre elles ; par ailleurs, elle est modifiée par l'accent et l'intonation (Vilain, 2002) (Titze, 1994) (Rossi, 1971). On voit donc que l'étude de cet indice est importante, pour la compréhension de la cause physiologique de ces différences d'intensité au niveau de la production. En effet, si toutes les mesures ont permis de mettre en évidence que les voyelles fermées sont moins intenses que les voyelles ouvertes (Rossi, 1971), il n'existe pas d'explications globales concernant ce phénomène.

Dans le cadre de la production des voyelles, le signal de parole résulte d'un seul signal source (l'onde de débit glottique) modifié par le conduit vocal. En toute logique, les caractéristiques intrinsèques d'intensité peuvent donc être attribuées à plusieurs causes ne s'excluant pas mutuellement. Deux hypothèses sont alors possibles :

PREMIERE HYPOTHESE

Les caractéristiques intrinsèques d'intensité sont imputables à la source.

Pour vérifier cette hypothèse, nous avons mesuré l'intensité du signal de la source pour deux ensembles de commande et pour des couplages correspondants à toutes les voyelles orales du français. Si nous prenons comme référence la voyelle la plus intense, c'est-à-dire la voyelle postérieure [ɑ] ce que nous ferons d'ailleurs systématiquement par la suite, on constate des faibles différences entre les niveaux d'intensité (I) du signal source. Alors, l'hypothèse de l'influence du couplage, agissant sur l'intensité du signal glottique et provoquant une variation de l'intensité n'est pas vérifiée.

Intensité du signal source (dB)										
[u]	[o]	[ɔ]	[a]	[ɑ]	[œ]	[e]	[ε]	[ø]	[y]	[i]
-2,49	-0,05	-0,01	-0,02	0,00	-0,15	-0,04	-0,14	-0,08	-1,40	0,04
-2,62	-0,41	-0,09	-0,01	0,00	-0,08	-0,01	-0,13	-0,01	-1,67	-0,47

Tableau 6 : Niveau Intensité du signal source (onde de débit de la source vocale). Valeurs référencées par rapport à [ɑ] pour deux ensembles de commande ($[P_s=6, Q=1.5]$ puis $[P_s=8, Q=2]$).

DEUXIEME HYPOTHESE

C'est au niveau de la configuration du conduit vocal qu'il faut chercher l'origine des indices d'intensité vocalique. Nous avons effectué des simulations du conduit vocal en mesurant l'intensité du signal émis pour les configurations vocaliques du français. Les résultats obtenus sont résumés dans le tableau 7.

En valeur absolue et en évolution, nous retrouvons bien les valeurs des caractéristiques intrinsèques des voyelles

naturelles (Vilain, 2002) (Titze, 1994) (Rossi, 1971) et (Guerin, 1978). Pour les deux simulations (tableau 7), les intensités intrinsèques sont corrélées deux à deux, le couplage n'apporte pas de modifications importantes par rapport à l'action globale du conduit vocal. Comme pour la parole naturelle, les intensités sont corrélées (au seuil de 0.001) avec le premier Formant F_1 . Nos diverses observations nous conduisent à conclure que ce sont les

Intensité du signal de sortie (dB)											
[u]	[o]	[ɔ]	[a]	[ɑ]	[œ]	[e]	[ɛ]	[ɸ]	[y]	[i]	voyelle
328	438	492	656	672	531	344	516	406	260	281	F_1 (Hz)
-5.8	0.7	-0.7	-0.9	0.00	-3.1	-2.9	-4.2	-2.3	-6.7	-5.1	$P_s=8$ Q=2
-8.5	-0.5	0.00	-0.8	0.00	-1.7	-4.8	-3.1	-3.7	-8.8	-6.9	$P_s=12$ Q=2.7

caractéristiques acoustiques du conduit vocal, et un degré moindre ceux de la source, qui déterminent les intensités intrinsèques des voyelles.

Tableau 7 : Niveau Intensité du signal de sortie (onde de débit à la sortie du conduit vocal) pour les voyelles du français. Valeurs référencées par rapport à [a] pour deux ensembles de commande.

6. CONCLUSIONS

Ce travail a permis d'étudier l'influence du conduit vocal sur le comportement de la source vocale. Le premier volet de cette étude a porté sur la forme de l'onde de débit et son spectre pour plusieurs configurations du conduit vocal. On a vérifié que la configuration du conduit vocal avait une influence sur la forme de l'onde de débit, principalement le quotient de dissymétrie. Par contre, la pente du spectre est peu perturbée par le couplage source – conduit vocal.

Nous avons montré que ce sont les paramètres de la source vocale qui agissent sur la fréquence fondamentale F_0 et que le couplage source – conduit vocal a un effet minime. Ainsi, le couplage physiologique est le principal responsable de l'effet observé dans la parole réelle ; il compense l'effet du couplage acoustique et s'avère prédominant.

Enfin, une partie de notre travail a été consacrée à la puissance intrinsèque des voyelles françaises. Nos résultats montrent que la puissance intrinsèque est déterminée essentiellement par la fonction de transfert du conduit vocal. Les perturbations apportées par le conduit vocal, sur la source vocale, n'ont pas d'effet décisif sur la puissance intrinsèque.

Dans leur ensemble, nos recherches ont montré que le modèle de la source vocale à deux masses peut être

considéré comme ayant un comportement conforme à celui de la source réelle et que ce modèle pourra être utilisé dans les systèmes de synthèse de la parole de haute qualité.

REFERENCES

- Falek, L., Teffahi.H. and A. Djeradi, 2009. Simulation d'un modèle de la source vocale et détermination des paramètres de commande. *Canadian journal of Physics*. vol. 87(2), p. 111-116.
- Guerin, B., 1978. *Contribution aux recherches sur la production de la parole, Etude du fonctionnement de la source vocale, simulation d'un modèle*. Thèse de Doctorat, Institut National Polytechnique, Grenoble, France.
- Henrich, N., B. Doval, C. D'alessandro and M. Castellingo, 2000. Open quotient measurements on EEG, speech and singing signals. *4th Intern. Workshop on Advances in Quantitative Laryngoscopy, Voice and Speech research.*, Jena., Germany., 23(6)., p. 587-596 .
- Henrich.N. 2001. *Etude de la source glottique en voix parlée et chantée*. Thèse de Doctorat de l'Université Paris 6.
- Ishizaka, K., and J.L. Flanagan, 1972. *Synthesis of voiced sounds from a two-mass model of the vocal cords.*, Bell. Syst. Tech. Journal., vol.51,p.1233-1268.
- Rossi, M, 1971. De l'intensité spécifique des voyelles. *Phonetica*. Vol. 24, p. 129-161.
- Sciamarella.C and C. d'Alessandro. 2002. A study of the Two-Mass Model in terms of Acoustic parameters. *Proc. ICSLP*. p.2313-2316.
- Teffahi, H, 2007. SIMCV: un simulateur analogue de la propagation du son dans le conduit vocal. *Canadian journal of Physics*. Vol. 87(7), p. 1325-1341.
- Titze. IR, 1994. Generation and propagation of sound. In: *Principles of voice production*. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall. P. 112-135
- Vilain.C.E. 2002. *Contribution à la synthèse de parole par modèle physique. Application à l'étude des voix pathologiques*. Thèse de Doctorat, Institut National Polytechnique, Grenoble, France.