

ETUDE PAR SIMULATION DES CARACTÉRISTIQUES ACOUSTIQUES DU CONDUIT VOCAL AVEC PERTES

H.Teffahi, B.Guerin and A.Djeradi

Université des sciences et de la technologie Houari Boumediène (USTHB)
 Laboratoire de communication parlée et de traitement du signal Faculté d'Electronique et d'Informatique
 BP 32, El alia, Alger, ALGERIE; E-mail :hteffahi@usthb.dz

RÉSUMÉ

Après avoir étudié théoriquement la propagation du son dans un conduit vocal avec pertes, on décrit le simulateur mis au point. La méthode retenue permet d'obtenir la fonction de transfert, la valeur des fréquences des formants et les bandes passantes du conduit vocal. Le simulateur permet de déterminer la contribution des différentes sources de pertes au niveau des fréquences et des bandes passantes des formants.

ABSTRACT

Wave propagation in a lossy vocal-tract with yielding walls is studied. Simulation method of this vocal-tract is described. The method adopted allowed us to calculate the transfer function, the formant frequencies and the formant bandwidths of the vocal-tract. The results obtained permit the determination of the differential contribution of the different loss sources for formant frequencies and formant bandwidths.

1. Introduction

L'étude de la parole à l'aide d'analogues temporels du conduit vocal permet de mieux connaître les processus acoustiques se produisant dans le conduit vocal. Une connaissance des relations existant entre les différents types de pertes et leurs effets sur les caractéristiques acoustiques du conduit vocal est essentielle tant pour la réalisation des modèles articulatoires que pour l'analyse de la parole.

Le but de ce papier est de présenter un simulateur analogue du conduit vocal, basé sur la théorie de propagation d'une onde acoustique dans un tube non uniforme. En reprenant certains travaux et en les complétant, nous avons essayé de déterminer avec précision les caractéristiques acoustiques des voyelles du français par simulation numérique.

Par la suite, nous ferons tout d'abord une étude théorique du modèle puis nous présenterons les différents types de pertes. Enfin, nous discuterons les résultats obtenus avec notre simulateur.

2. Rappels theoriques et modele utilise

2.1 Cas général

Le modèle mathématique présenté a pour but de reproduire d'une manière simple le fonctionnement du conduit vocal. Ce dernier est assimilé à un tube de section variable et à parois non rigides. Le modèle discrétise le conduit vocal en un assemblage de tubes élémentaires cylindriques. On se ramène ainsi à l'étude de la propagation à travers une série de tubes cylindriques mis bout à bout d'une onde plane, en tenant compte des différentes conditions aux limites

(viscosité, chaleur, vibrations des parois et rayonnement aux lèvres).

Considérons un élément de masse $dm = \rho d\tau$ où ρ est la densité volumique de l'air et $d\tau$ l'élément de volume. Si en ce point règne la pression $P(x,t)$, l'élément considéré sera soumis à la force :

$$F = -\frac{\partial P}{\partial x} d\tau \tag{1}$$

en utilisant la deuxième loi de Newton, on peut écrire :

$$F = dm\gamma = \frac{d}{dt}(\rho V d\tau) = \rho d\tau \frac{dV}{dt} \tag{2}$$

où V est la vitesse corpusculaire, l'élément de masse étant considéré constant, on a :

$$\frac{d}{dt} \rho d\tau = 0 \tag{3}$$

nous avons aussi :

$$\frac{d}{dt} V = \frac{\partial V}{\partial t} + \frac{\partial x}{\partial t} \frac{\partial V}{\partial x} \tag{4}$$

Dans cette expression, la variation de x n'est pas quelconque, elle est donnée par la vitesse de la particule $dx = V.dt$, on aura donc:

$$\frac{d}{dt}V = \frac{\partial V}{\partial t} + V \frac{\partial V}{\partial x} \quad (5)$$

On obtient en égalant les deux types de force :

$$-\frac{\partial P}{\partial x} = \rho \frac{\partial V}{\partial t} + \rho V \frac{\partial V}{\partial x} \quad (6)$$

Considérons la masse m du volume d'air τ inclus entre deux sections planes $A(x)$ et $A(x+dx)$ du conduit vocal, $A(x)$ est l'aire de la section à l'abscisse x et au temps t . Cette masse est égale à :

$$dm = \iint_{A(x)} \rho dA dx \quad (7)$$

et la variation du flux à travers les deux sections est égale à :

$$-\frac{\partial}{\partial x} \left[\iint_{A(x)} \rho V dA \right] dx \quad (8)$$

écrivons que la masse se conserve au cours du temps :

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[\iint_{A(x)} \rho V dA \right] dx = \frac{d}{dt} \iint_{A(x)} \rho dA dx \quad (9)$$

Les relations (6) et (9) sont des expressions non linéaires de P , V et ρ . A l'état d'équilibre, on a les valeurs P_0 , V_0 et ρ_0 . La propagation du son apporte des perturbations p , v et ρ' , on peut écrire :

$$\begin{aligned} P &= P_0 + p; \\ V &= V_0 + v; \\ \rho &= \rho_0 + \rho'. \end{aligned} \quad (10)$$

L'air étant considéré comme un gaz parfait, la propagation du son est adiabatique (Morse, 1968); on peut en dériver une expression entre ρ et p , à savoir :

$$\rho = \rho_0 \left(1 + \frac{1}{\rho_0 c^2} p \right) \quad (11)$$

où c est la vitesse du son.

En reportant les expressions de P , V et ρ dans les équations (6) et (9) et en négligeant les termes de perturbation du second ordre, on obtient :

$$-\frac{\partial p}{\partial x} = \rho_0 \frac{\partial v}{\partial t} + \rho_0 V_0 \frac{\partial v}{\partial x} \quad (12.a)$$

$$-\frac{\partial}{\partial x} \iint_{A(x)} \left(v + \frac{1}{\rho_0 c^2} p V_0 \right) dA = \frac{\partial}{\partial t} \iint_{A(x)} \left(1 + \frac{1}{\rho_0 c^2} p \right) dA \quad (12.b)$$

En première approximation, étant donné que le gaz est parfait, on peut poser :

$$u = \iint_{A(x)} v dA = vA \quad (13)$$

$$pA = \iint_{A(x)} p dA \quad (14)$$

$v = \frac{u}{A}$; où u est la vitesse volumique.

On obtient:

$$\frac{\partial p}{\partial x} = \rho_0 \frac{\partial u}{\partial t} + \rho_0 V_0 \frac{\partial u}{\partial x} \quad (15.a)$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} - \frac{1}{\rho_0 c^2} V_0 \frac{\partial (pA)}{\partial x} = \frac{\partial A}{\partial t} + \frac{1}{\rho_0 c^2} \frac{\partial (pA)}{\partial t} \quad (15.b)$$

1. Nous supposons des parois rigides

$$\frac{\partial A}{\partial t} = 0 \quad (16)$$

$$\frac{\partial (u/A)}{\partial x} = \frac{1}{A} \frac{\partial u}{\partial x} \quad (17)$$

2. Généralement, la vitesse corpusculaire V_0 est faible devant la vitesse du son c :

$$V_0 \frac{\partial (u/A)}{\partial x} = 0 \quad (18)$$

$$V_0 \frac{\partial (pA)}{\partial t} = 0 \quad (19)$$

Les équations (15) s'écrivent donc (Stevens, Kasowski & Fant, 1957):

$$-\frac{\partial p}{\partial x} = \rho_0 \frac{\partial (u/A)}{\partial t} \quad (20.a)$$

$$-\frac{\partial u}{\partial x} = \frac{\partial A}{\partial t} + \frac{1}{\rho_0 c^2} \frac{\partial (pA)}{\partial t} \quad (20.b)$$

Les équations régissant la propagation d'une onde acoustique dans un tube rigide, appelées "équations de Webster", s'écrivent finalement:

$$-\frac{\partial p}{\partial x} = \frac{\rho_0}{A} \frac{\partial u}{\partial t} \quad (21.a)$$

$$-\frac{\partial u}{\partial x} = \frac{A}{\rho_0 c^2} \frac{\partial p}{\partial t} \quad (21.b)$$

Les équations (21) représentent un système aux dérivées partielles décrivant la propagation

unidimensionnelle d'une onde acoustique, dans un tube uniforme, à parois rigides.

Pour notre cas, nous allons résoudre ces équations dans le cas d'un conduit vocal statique (synthèse des voyelles).

2.2 Le modèle de Kelly & Lochbaum

Notre simulateur est une application directe du modèle de Kelly & Lochbaum avec pertes (Kelly, 1962).

Si l'aire $A(x,t)$ est constante, le système d'équations (21) admet des solutions de la forme:

$$U_k(x,t) = U_k^+(t - \frac{x}{c}) - U_k^-(t + \frac{x}{c}) \quad (22)$$

$$P_k(x,t) = \frac{\rho c}{A_k} (U_k^+(t - \frac{x}{c}) + U_k^-(t + \frac{x}{c})) \quad (23)$$

avec U_k^+ onde se propageant dans le sens positif et U_k^- onde se propageant dans le sens négatif.

Nous étudions maintenant la jonction entre deux tubes élémentaires, ceci en tenant compte de la continuité pression et débit de part et d'autre de la jonction:

$$P_k(l_k, t) = P_{k+1}(0, t) \quad (24)$$

$$U_k(l_k, t) = U_{k+1}(0, t) \quad (25)$$

Ce système peut être schématisé par la figure 1 :

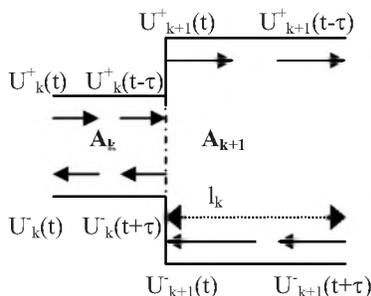


Figure 1. Jonction entre le tube k et le tube $k+1$.

Nous en déduisons le système suivant:

$$[U_k^+(t - \tau_k) + U_k^-(t + \tau_k)] = \frac{A_k}{A_{k+1}} U_{k+1}^+(t) + U_{k+1}^-(t)$$

$$U_k^+(t - \tau_k) - U_k^-(t + \tau_k) = U_{k+1}^+(t) - U_{k+1}^-(t)$$

Ce système, une fois résolu s'écrit:

$$U_{k+1}^+(t) = (1 + r_k)U_k^+(t - \tau_k) + r_k U_{k+1}^-(t) \quad (26)$$

$$U_k^-(t + \tau_k) = -r_k U_k^+(t - \tau_k) + (1 - r_k)U_{k+1}^-(t)$$

avec

$$r_k = \frac{A_{k+1} - A_k}{A_{k+1} + A_k} \quad -1 \leq r_k \leq 1$$

r_k est le coefficient de réflexion de la k ième jonction

Si nous raisonnons en terme de pressions, le système d'équations (21) admet aussi comme solutions:

$$P_k(x,t) = P_k^+(t - \frac{x}{c}) + P_k^-(t + \frac{x}{c}) \quad (27.a)$$

$$U_k(x,t) = \frac{A_k}{\rho c} (P_k^+(t - \frac{x}{c}) - P_k^-(t + \frac{x}{c})) \quad (27.b)$$

De la même manière, la résolution de ce système d'équations donne une solution en ondes de pressions de la forme :

$$P_{k+1}^+(t) = (1 - r_k)P_k^+(t - \tau_k) + r_k P_{k+1}^-(t) \quad (28.a)$$

$$P_k^-(t + \tau_k) = -r_k P_k^+(t - \tau_k) + (1 + r_k)P_{k+1}^-(t) \quad (28.b)$$

3. Conditions aux limites et diverses pertes dans le conduit vocal

Dans la réalité, la propagation des ondes dans le conduit vocal se fait avec des pertes, une partie est due au déplacement de la masse d'air à l'intérieur du conduit vocal, l'autre partie provient du rayonnement de l'onde acoustique aux lèvres.

3.1. Pertes dues au déplacement de l'air à l'intérieur du conduit vocal

a- Vibration des parois

Les parois n'étant pas rigides, celles-ci se déforment sous l'influence de l'onde sonore: l'expression de l'aire de la section devient dépendante du temps, $A(x,t)$, sous l'influence de la pression $p(x,t)$ régnant à cet endroit (Figure 2):

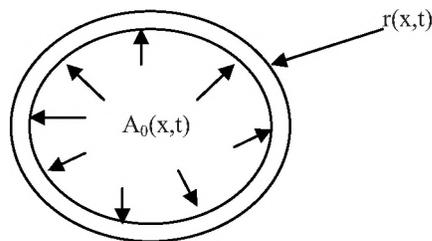


Figure 2. Vibration des parois.

Si l'on note $A_0(x,t)$ et $S_0(x,t)$ les valeurs respectives de la fonction d'aire et de la circonférence d'une section donnée, $A(x,t)$ sera liée à cette valeur par l'expression suivante :

$$A(x,t) = A_0(x,t) + r(x,t).S_0(x,t) \quad (29)$$

$r(x,t)$ est le déplacement de cette section. Chaque élément de parois peut être considéré comme un système mécanique composé d'une masse (M_p) reliée à un ressort avec amortissement (b_p), qui oscille localement sans liaison, ni couplage avec les éléments voisins. Comme il s'avère que les fréquences d'oscillation propres de ce système sont faibles (Fant, 1972), on peut, dans la plupart des cas, négliger le ressort. Dans ces conditions, $r(x,t)$ obéit à la relation suivante :

$$p - b_p \frac{\partial r}{\partial t} = M_p \frac{\partial^2 r}{\partial t^2} \quad (30)$$

Le report de cette nouvelle valeur de $A(x,t)$ dans les équations (21) après avoir négligé les termes du second ordre, conduit à :

$$-\frac{\partial p}{\partial x} = \frac{\rho_0}{A_0} \frac{\partial u}{\partial t} \quad (31.a)$$

$$-\frac{\partial u}{\partial x} = \frac{A_0}{\rho_0 c^2} \frac{\partial p}{\partial t} + S_0 \frac{\partial y}{\partial t} \quad (31.b)$$

Ce système s'écrit alors :

$$-\frac{\partial p}{\partial x} = Zu \quad (32.a)$$

$$-\frac{\partial u}{\partial x} = Yp + Y_p p \quad (32.b)$$

Dans lesquelles Z , Y et Y_p deviennent fonction de la section considérée :

$$Z(\omega, x) = j\omega \frac{\rho_0}{A_0(x)} \quad (33)$$

$$Y(\omega, x) = j\omega \frac{A_0(x)}{\rho c^2} \quad (34)$$

$$Y_p(\omega, x) = \frac{1}{j\omega M_p(x) + b_p(x) + \frac{k_p(x)}{j\omega}} \quad (35)$$

Enfin, l'impédance des parois peut être représentée par la connexion série d'une résistance et d'une inductance :

$$Z_p = \frac{R_p + j\omega L_p}{S.l} \quad (36)$$

où

S est la circonférence de la section considérée et l sa longueur. Avec $R_p = b_p = 1600 \text{ g.cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ et $L_p = M_p = 1.4 \text{ g.cm}^{-2}$ (par unité de surface) (Mrayati, 1976).

Pour notre cas, cette impédance a été simulée par un tube élémentaire en dérivation à chaque jonction, terminé par une résistance $Z_t = R_p$ (Figure 3) (Degryse, 1981).

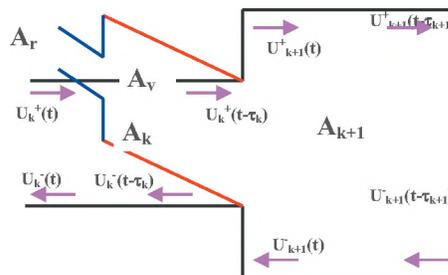


Figure 3. Tube élémentaire en dérivation d'une jonction.

A_v représente l'aire du tube équivalent à l'inductance A_r représente l'aire du tube équivalent à la résistance

$$\text{Avec } A_v = \frac{\rho_0 l^2 S}{L_p} \text{ et } A_r = \frac{\rho_0 c S l}{R_p}$$

Par conséquent, le coefficient de réflexion à la jonction entre A_v et A_r s'exprime par :

$$R_v = \frac{A_v - A_r}{A_v + A_r} = \frac{R_p - L_p \frac{c}{l}}{R_p + L_p \frac{c}{l}}$$

Dans ce cas, les équations de propagation en pressions, s'écrivent :

$$P_{k+1}^+(t) = \frac{2A_k}{A_{k+1} + A_k + A_v} P_k^+(t - \tau_k) + \frac{A_{k+1} - (A_k + A_v)}{A_{k+1} + A_k + A_v} P_{k+1}^-(t) + \frac{2A_v}{A_{k+1} + A_k + A_v} P_v(t)$$

$$P_k^-(t - \tau_k) = \frac{A_k - (A_{k+1} + A_v)}{A_{k+1} + A_k + A_v} P_k^+(t - \tau_k) + \frac{2A_{k+1}}{A_{k+1} + A_k + A_v} P_{k+1}^-(t) + \frac{2A_v}{A_{k+1} + A_k + A_v} P_v(t)$$

$$P_v(t) = (P_k^+(t) + P_k^-(t))R_v$$

b- Pertes par viscosité/chaaleur

Généralement, on introduit ces pertes dans le modèle sous forme d'une atténuation par cellules. Dans notre cas, les pertes par viscosité-chaaleur sont introduites en branchant une résistance R à la jonction entre les deux tubes. Cette résistance s'écrit d'après (Fant, 1960) :

$$R = \frac{S}{A^2} \sqrt{\omega \mu \frac{\rho}{2}} \quad (37)$$

S étant la circonférence du tube, A son aire, ρ la masse volumique de l'air, μ le coefficient de viscosité et ω la pulsation. Un terme de pertes D est introduit

comme étant le rapport de la résistance R sur la somme des impédances des tubes de la jonction. Ce terme s'écrit :

$$D = \frac{\pi}{c} \sqrt{\frac{f\mu}{\rho A}} \quad (38)$$

et numériquement si f s'écrit en Hz et A en m^2 :

$$D = 3,626 \cdot 10^{-5} \sqrt{\frac{f}{A}} \quad (39)$$

Pour introduire ces pertes dans les équations de propagation, on ajoute le terme D aux coefficients de réflexions de chaque équation de propagation, et on divise toute l'expression par $(1+D)$. On aboutit au système d'équations suivant:

$$P_{k+1}^+(t) = \frac{1}{1+D} [(1-r_k)P_k^+(t-\tau_k) + (r_k+D)P_{k+1}^-(t)]$$

$$P_k^-(t+\tau_k) = \frac{1}{1+D} [(-r_k+D)P_k^-(t-\tau_k) + (1+r_k)P_{k+1}^-(t)]$$

3.2. Pertes dues au rayonnement aux lèvres

L'impédance du rayonnement aux lèvres est définie comme étant celle d'un piston dans un baffle infini (Morse, 1968).

$$Z_r = \frac{\omega^2 \rho}{2\pi c} + j\omega \left(\frac{8\rho}{3\pi\sqrt{\pi A}} \right) \quad (40)$$

avec ρ la densité de l'air et A l'aire aux lèvres.

Cette impédance a été adaptée au modèle de Kelly & Lochbaum par Degryse (1981). Elle peut être approchée comme une connexion en parallèle sur le dernier tube du conduit d'une inductance L et d'une résistance R .

$$\text{Avec : } L = \frac{8\rho}{3\pi\sqrt{\pi A}} \quad \text{et} \quad R = \left(\frac{\rho c}{A} \right) \left(\frac{128}{9\pi^2} \right)$$

Dans notre modèle, nous avons simulé l'inductance L par une aire A_L , et la résistance R par une aire A_R , comme le montre la figure 4.

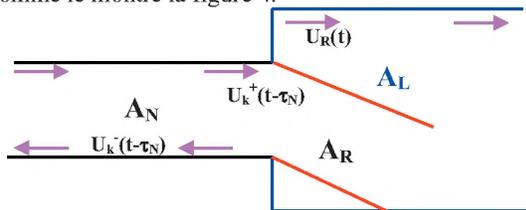


Figure 4. Jonction entre le dernier tube et le tube de rayonnement.

Avec
 A_N aire du dernier tube du conduit vocal.

A_L aire équivalente à l'inductance L et qui s'exprime par

$$L = \frac{3\pi\sqrt{\pi A_N} l}{8}$$

A_R aire équivalente à la résistance R et qui s'exprime

$$\text{par } R = \frac{9\pi^2 A_N}{128}$$

Sachant qu'il n'y a pas d'onde se propageant dans le sens négatif dans l'aire A_L , les équations (28) deviennent alors :

$$P_N^-(t + \tau_k) = \frac{A_N - (A_L + A_R)}{A_N + A_L + A_R} P_N^+(t - \tau_k) -$$

$$\frac{2A_L}{A_N + A_L + A_R} P_r(t)$$

$$P_r(t) = \frac{2A_N}{A_N + A_L + A_R} P_N^+(t - \tau_k) + \frac{(A_N + A_R) - A_L}{A_N + A_L + A_R} P_r(t)$$

avec :

P_N^+ onde de pression positive du dernier tube ;

P_N^- onde de pression négative du dernier tube ;

P_r onde de pression au rayonnement.

4. Validation de SIMCV

4.1 calcul des fréquences des trois premiers formants des voyelles orales du Français

Dans cette partie, nous allons développer une méthode de validation objective de notre simulateur, baptisé SIMCV, en se basant sur la caractérisation acoustique des voyelles orales du français.

Dans une première étape, nous déterminons les fonctions de transfert des onze voyelles orales du Français. Dans une seconde étape, nous déterminons la valeur des fréquences des trois premiers formants, et leurs bandes passantes correspondantes. Les tableaux 1 et 2 donnent les configurations vocaliques adoptées pour les voyelles du Français ainsi que les caractéristiques formantiques de chaque voyelle (Majid, 1986).

Les fonctions de transfert obtenues à l'aide de SIMCV sont données à la figure 5.

Sur la Figure 6, nous avons ordonné les voyelles pour obtenir une représentation qui nous permet une comparaison avec le nomogramme de Majid. Nous remarquons que les formants mesurés par notre simulateur sont assez proches de ceux de Majid, et que l'évolution de ces formants sur l'axe des voyelles est quasi-identique.

4.2 calcul des bandes passantes des trois premiers formants des voyelles du Français

Les valeurs des bandes passantes des formants sont étroitement liées avec les pertes dans le conduit vocal. Leur mesure expérimentale sur de la parole réelle est assez délicate et doit être du type statistique, car les valeurs varient beaucoup d'un locuteur à un autre, d'un contexte à un autre. Notre méthode consiste à mesurer directement, sur les fonctions de transfert, les bandes

passantes à -3 dB. La figure 7 donne les résultats obtenus pour les voyelles orales simulées par notre logiciel (SIMCV), et ceux donnés par Majid (1986).

Nous remarquons que l'évolution des bandes passantes est assez proche de la parole naturelle.

5. Effets des pertes

Dans ce paragraphe, nous allons étudier l'effet des différentes pertes sur les caractéristiques acoustiques du conduit vocal. Pour cela, nous calculons avec notre simulateur temporel (SIMCV) dans les mêmes conditions précédentes, la fonction de transfert du conduit vocal pour chaque voyelle orale du Français, en éliminant à chaque fois un type de perte, on calcule, après, pour chaque cas les fréquences des formants, et leurs bandes passantes.

Sur la Figure 8, nous avons représenté la contribution de chacun des éléments de pertes aux fréquences des formants et nous pouvons constater ceci:

1/ La prise en compte de l'effet de vibration des parois introduit un amortissement supplémentaire. Il y a deux conséquences:

l'amortissement en basses fréquences de la fonction de transfert et la modification de la valeur du premier formant essentiellement aux fréquences basses. La Figure 8.a montre clairement la tendance de F vers F' au-delà de 800 Hz.

2/ L'effet des pertes par viscosité/chaleur est négligeable pour les trois formants (figure 8.b).

3/ L'effet des pertes par rayonnement est d'autant plus important que la fréquence est élevée, ceci est bien vérifié sur la Figure 8.c, où on voit clairement que l'écart en fréquence entre chaque formant augmente avec la fréquence.

Sur la Figure 9, nous avons représenté l'effet de chaque type de pertes sur les bandes passantes et trois constatations principales se déduisent :

1/ Aux fréquences basses (zone du premier formant), les pertes prépondérantes sont dues aux vibrations des parois.

2/ Aux fréquences moyennes (zone du second formant), l'effet des pertes est moins sensible.

3/ Aux fréquences hautes (zone du troisième formant), l'effet prépondérant provient du rayonnement aux lèvres.

Enfin, nous remarquons que nos constatations sont en parfait accord avec la littérature (Mrayati, 1976, Majid, 1986).

6. CONCLUSIONS

Les différents résultats et les conclusions qui en découlent seront utiles lors de la conception d'un synthétiseur analogue-dynamique du conduit vocal et lors de sa mise en œuvre. Ils pourront également contribuer aux recherches d'une parole de synthèse de très bonne qualité, se voulant proche de la parole naturelle.

En reconnaissance automatique de la parole, une meilleure connaissance des valeurs des bandes

passantes peut être utile pour décider de la validité d'une détection de formant par exemple. On peut introduire ainsi une contrainte puissante.

Pour les voyelles ayant un premier formant assez bas, cette simulation donne des résultats plus précis que les mesures sur des signaux réels, car le nombre d'harmoniques est alors trop faible.

Bibliographie

Badin P. & Fant G. (1984). "Note on vocal tract computation" STL-QPSR 2-3, pp. 53-107.

Degryse.D (1981). "Temporal simulations of wave propagation in the lossy vocal tract", 4th FASE symposium, pp. 193-196.

Fant G. (1972). "Vocal tract wall effects, losses and resonance bandwidths", STL-QPSR, Vol. 2-3., pp. 25-52.

Fant G. (1960). "Acoustic theory of speech production", STL-QPSR, Mouton & Co.'s-Gravenhage the Hague.

Flanagan J. (1972). "Speech analysis, synthesis and perception", Springer-Verlag, New York.

Fujimura O. & Lindquist J. (1971). "Sweep-tone measurements of vocal-tract characteristics", J. Acoust. Soc. Am., Vol.49., pp. 541-558.

Kelly.J.R & Lockbaum.C(1962). "Speech synthesis", Proc. Stockholm- speech communication seminar, pp. 193-196.

Liljencrants J. (1985). "speech synthesis with a reflexion type line analog", Thesis Dr sciences R.I.T., Stockholm.

Majid.R (1986). "Modélisation articulaire du conduit vocal, exploration et exploitation." doctorat thesis, INPG, Grenoble.

Mrayati M. (1976) Doctorat thesis, INP Grenoble (France).

Morse M. (1948). "Vibration and sound", Mc Graw-hill, Book company-inc. New York.

Straka G. (1985). "Album phonétique". Les presses de l'université de Laval

Stevens, K.N., Kasowski, S. & Fant, G. (1957). "An electrical analog of the vocal tract" J. Acoust. Soc. Am., 55, 1070-1075.

Voyelle	[u]	[o]	[ɔ]	[a]	[ɑ]	[ɛ]	[e]	[i]	[y]	[Φ]	[œ]
glotte											
1	2.2538	1.7532	2.0745	1.8232	1.6665	1.9099	1.9099	2.5099	2.0798	2.1232	1.8232
2	7.8677	8.4082	5.1492	2.2783	2.3143	5.8209	6.6713	9.8356	3.9450	5.9946	3.0606
3	6.1991	8.0651	3.3784	1.5579	4.0388	8.0184	9.8875	12.966	9.6677	8.3483	4.7337
4	3.0925	2.8169	0.9750	2.2634	3.0317	10.459	10.415	12.763	10.500	7.0596	4.9660
5	2.5600	1.3543	1.8206	2.2597	2.5206	8.3417	6.8314	9.6199	9.2847	3.8769	4.0000
6	2.2356	3.1855	3.0155	4.1532	5.3031	5.4808	4.2314	3.4939	4.9385	1.8748	3.8997
7	2.7320	5.7613	5.7185	7.0087	7.8929	3.9753	2.0546	0.9716	1.5845	1.4414	3.9705
8	6.5382	8.6890	9.4010	7.9538	9.3563	3.3000	2.7577	0.5433	0.6941	2.2079	4.5512
9	13.000	13.1288	10.300	6.8966	8.8997	4.1524	5.2507	1.0114	1.4002	3.0050	5.4356
10	3.2311	7.7889	6.9713	5.0456	8.0521	6.8696		3.8305	1.5736	4.1504	5.6700
11 lèvres	0.5845 cm2	3.2000 cm2	cm2	cm2	cm2	cm2	cm2	cm2	1.5396 cm2	5.5200 cm2	5.6700 cm2

Tableau 1. Configurations vocaliques adoptées pour les voyelles orales du Français (Majid, 1986).

Voyelles	[u]	[o]	[ɔ]	[a]	[ɑ]	[ɛ]	[e]	[i]	[y]	[Φ]	[œ]
F1	295	419	519	650	658	538	371	293	285	401	531
F2	734	867	1090	1356	1244	1802	2145	2247	1777	1691	1485
F3	2401	2363	2310	2413	2371	2435	2554	2586	2313	2358	2353
B1	67	48	51	45	51	45	54	61	63	44	41
B2	37	35	36	38	38	71	64	43	41	51	51
B3	35	46	36	64	56	82	119	127	38	41	42

Tableau 2. Fréquences et bandes passantes des trois premiers formants (Hz) des onze voyelles du Français (Majid, 1986).

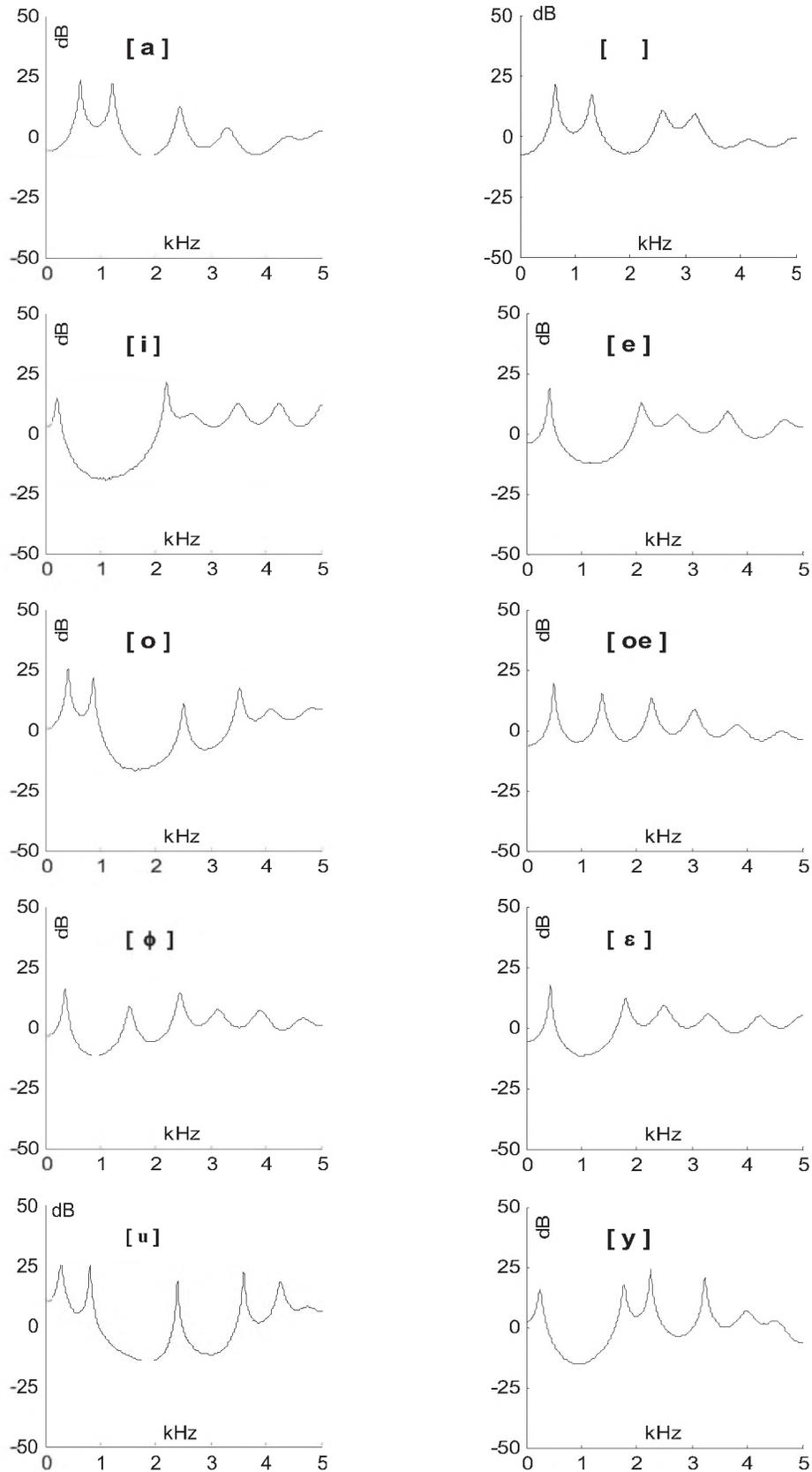


Figure 5. Fonctions de transfert obtenues.

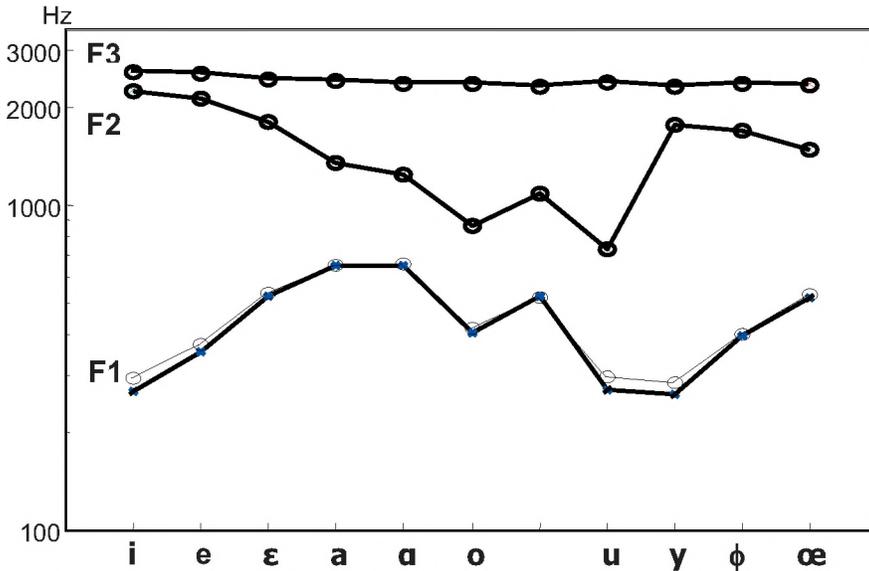


Figure 6. Nomogramme des voyelles orales du Français selon les valeurs des trois premiers formants (échelle logarithmique). x : Valeurs calculées par SIMCV. o : Valeurs calculées Majid (1986).

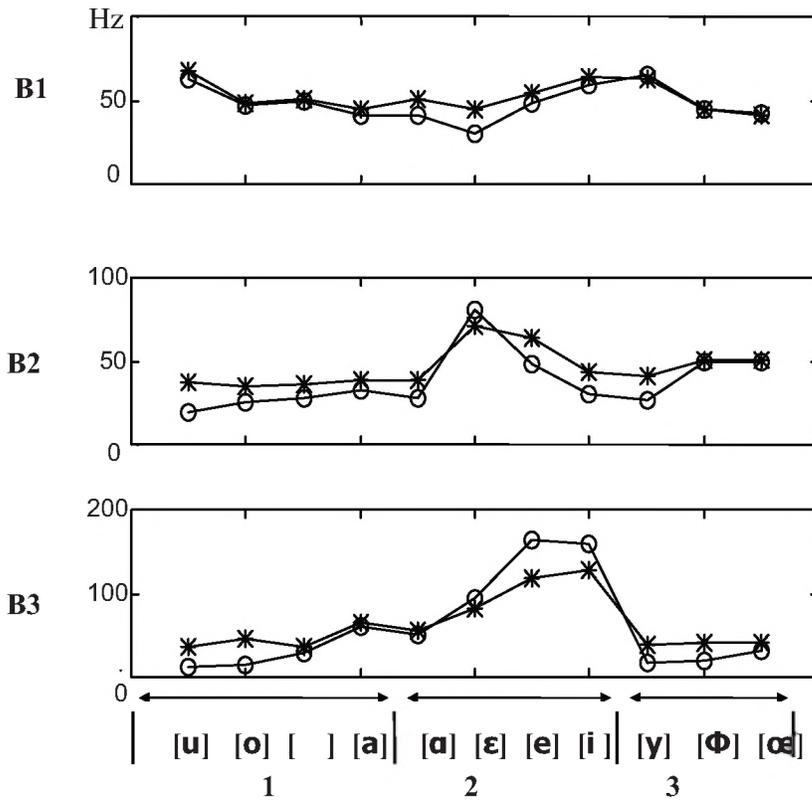


Figure 7. Bandes passantes des trois premiers formants. Comparaison avec valeurs calculées par Majid. (o) : Majid ; (*) : SIMCV. – 1. voyelles arrière ; 2. voyelles avant non arrondies ; 3. voyelles avant arrondies.

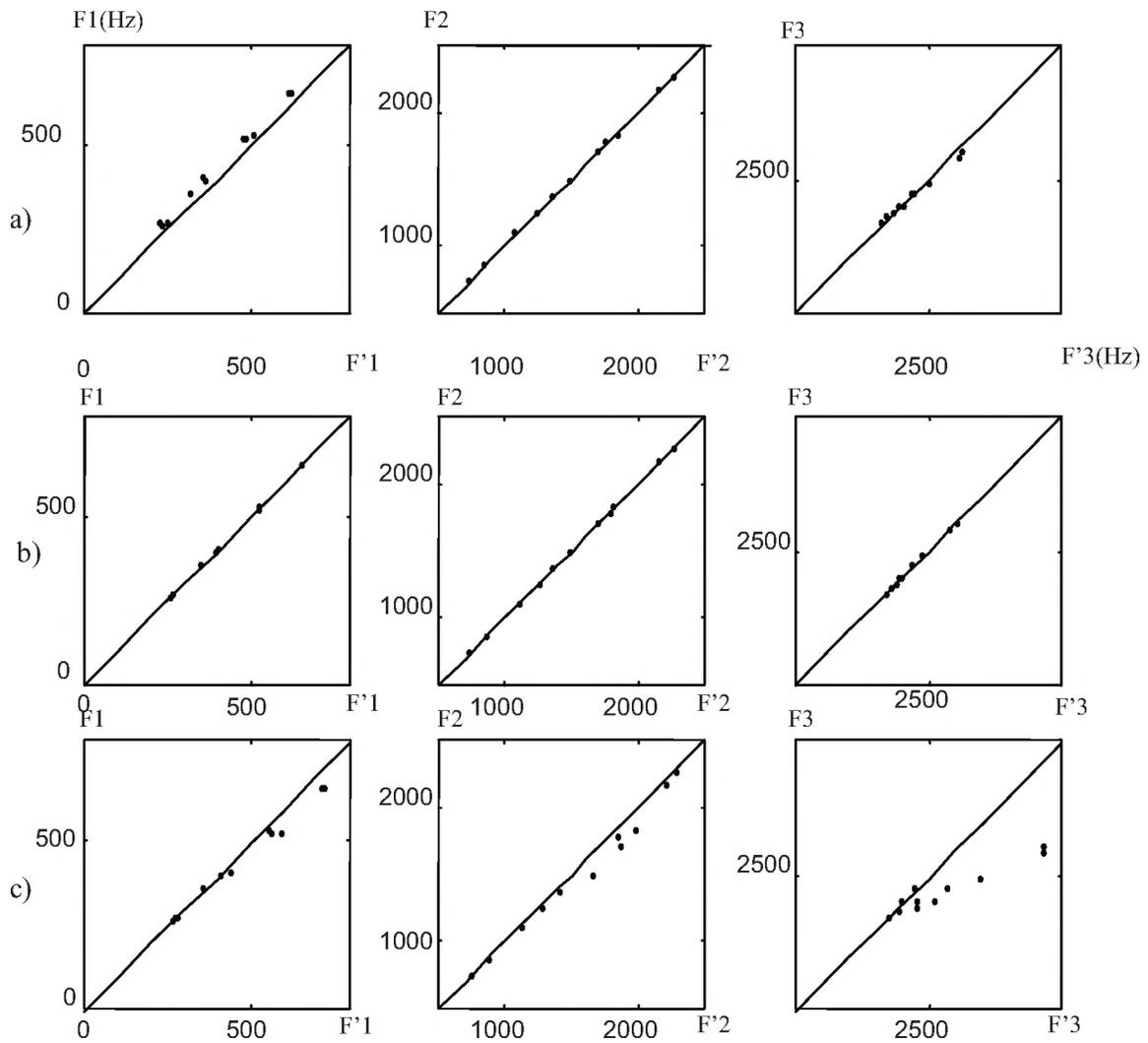


Figure 8. Effets de chacun des éléments de pertes sur les fréquences des formants. a) Effet des pertes par vibrations des parois; b) Effet des pertes par viscosité/chaaleur ; c) Effet des pertes par rayonnement aux lèvres.

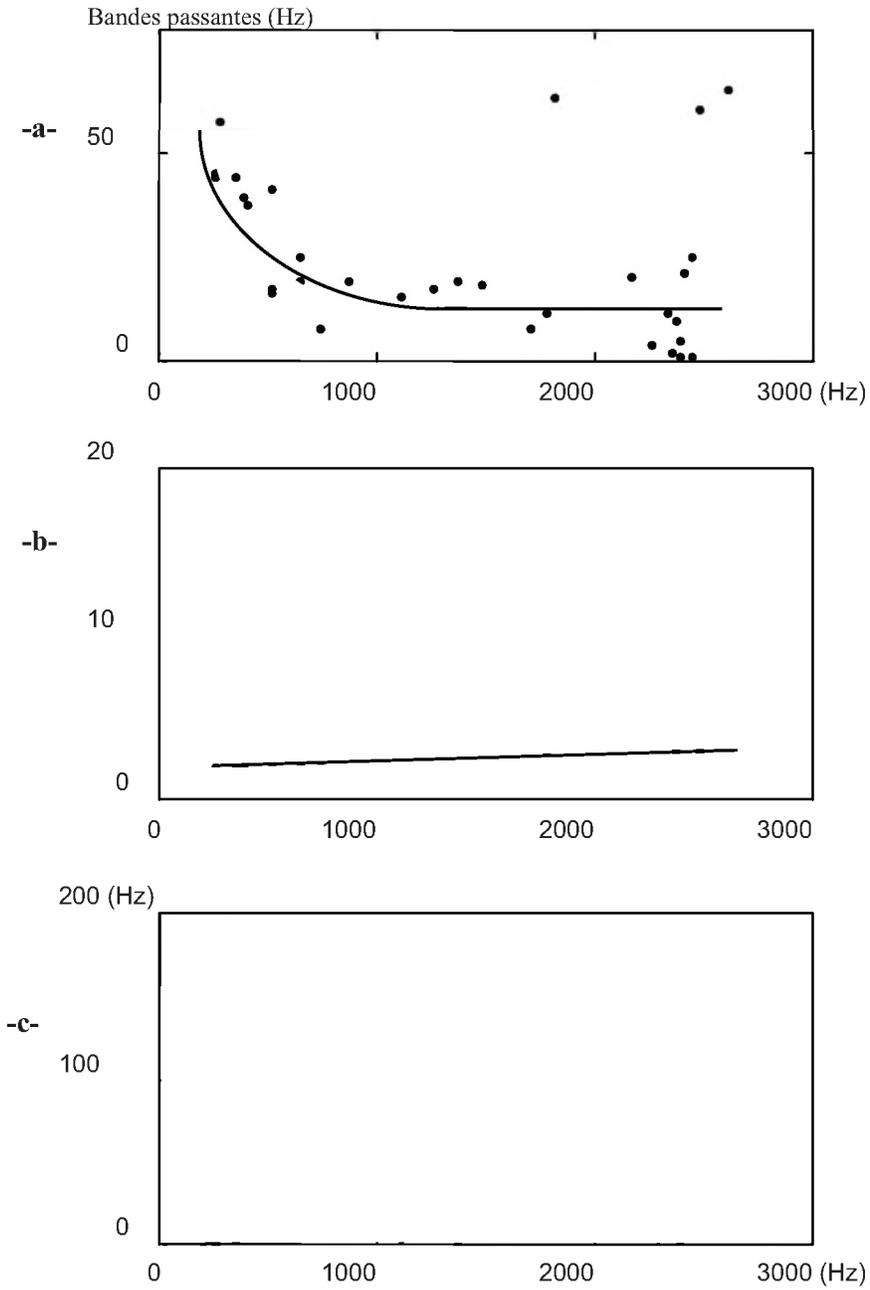


Figure 9. Contribution de chacun des éléments de pertes aux bandes passantes. a) Effets des pertes par vibrations des parois; b) Effets des pertes par viscosité/chaleur; c) Effets des pertes par rayonnement aux lèvres.

ACOustics Begins With ACO™

ACOustical
Interface™

» Systems
PS9200KIT
SI7KIT
Simple
Intensity™
New 7052SYS

Includes:
4212 CCLD Preamp
for ICP™ Applications
7052S Type 1.5"
2 Hz to >20 kHz
Titanium Diaphragm
WS1 Windscreen
Measurement
Microphones
Type 1
1" 1/2" 1/4"
2Hz to 120 kHz
<10 dBA Noise
>175 dB SPL

Polarized and Electret
NEW PSIEPE4
and ICP1248

ICP™(PCB) Adaptors for
PS9200 and Phantom



ACO Pacific, Inc.

2604 Read Ave., Belmont, California, 94002, USA

Tel: 650-595-8588 Fax: 650-591-2891

e-Mail: acopac@acopacific.com Web Site: www.acopacific.com

Very Random™
Noise Generator
White, Pink, 1kHz
SPL Calibrator
New 511ES124
124 dB SPL @ 1 kHz
ACOtron™ Preamps
4022, 4012, 4016
4212 CCLD
for ICP™ Applications
NEW RA and RAS
Right Angle
Preamps
DM2-22
Dummy Mic
WS1 and WS7
Windscreens
NEW -80T Family
Hydrophobically
Treated
NEW SA6000
Family
ACOustAlarm™
with
ACOustAlert™