

Modèle symétrique des cordes vocales: sensibilité acoustique aux variations des paramètres de contrôle

Denisse SCIAMARELLA, LIMSI-CNRS

Dans cet exposé, je présenterai d'abord les motivations de la modélisation physique de la production vocale et les questions ouvertes qui se posent dans le domaine. Ensuite j'exposerai quelques résultats parus dans des articles récents. Enfin pour conclure, je ferai une énumération des travaux en cours et des perspectives.

1) Rappel du principe de production vocale

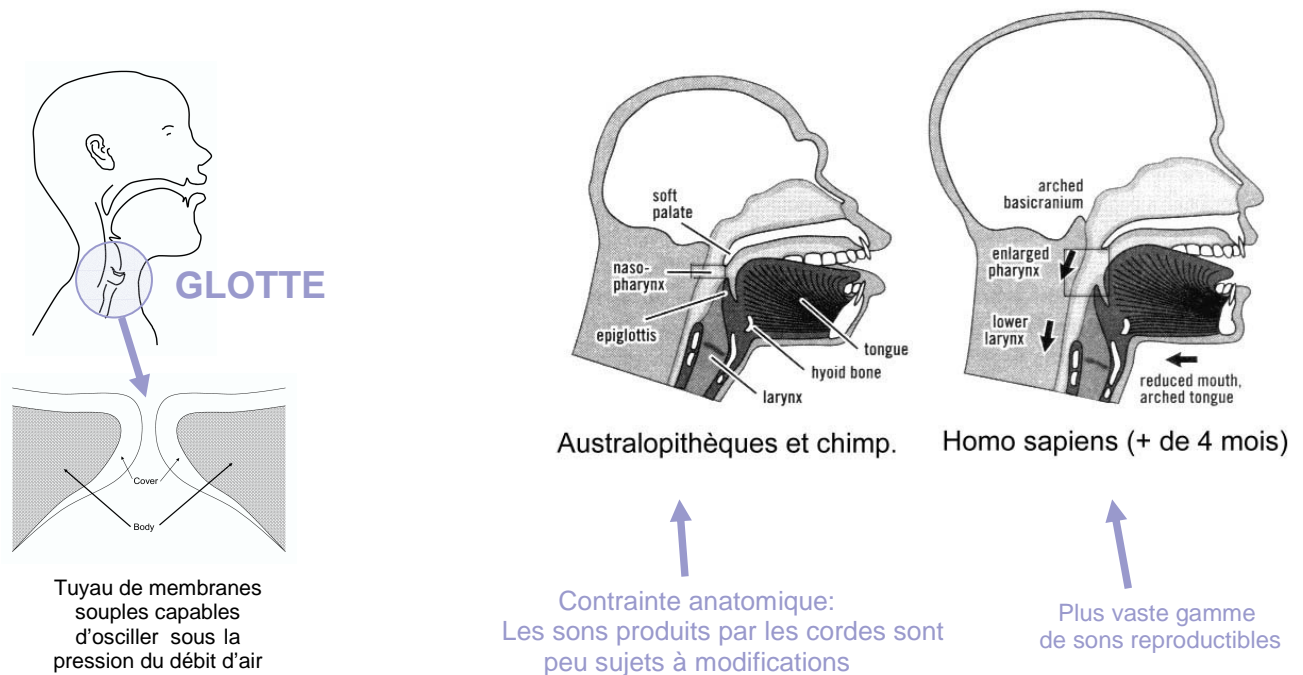
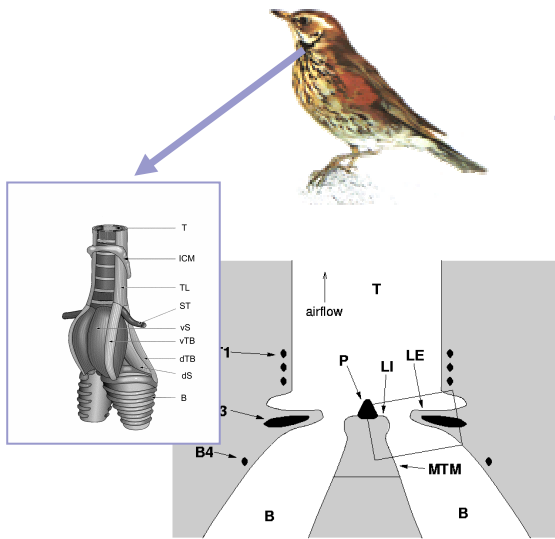


Fig1 : Représentation des cordes vocales

Fig2 : Appareil vocal des hommes comparé à celui des singes

Le principe de production vocale chez l'homme est commun à presque tous les mammifères. La différence essentielle entre l'homme adulte et les animaux est que chez les animaux le larynx a une position haute, ce qui leur permet de respirer et de s'alimenter simultanément. Du fait de cette position haute du larynx, la zone supra-laryngienne est très réduite : les sons produits par les cordes vocales sont donc peu sujets à des modifications. Ces animaux ne peuvent alors produire qu'un nombre limité de sons (contrainte anatomique), tandis que chez l'homme la cavité supra-laryngienne est plus volumineuse. Le son laryngé émit par les cordes vocales pourra donc être mieux modulé nous offrant une plus vaste gamme de sons productibles.

Merle à ventre rouge
ZORZAL COLORADO



Le syrinx: deux paires de membranes souples à une échelle plus petite

Fig3 : Représentation du Syrinx des oiseaux chanteurs

Le cas des oiseaux chanteurs est un peu différent. On parle d'oiseaux chanteurs puisque d'autres groupes d'oiseaux n'ont qu'un cri monotone ou ne produisent que des sons roques. Certains, comme la cigogne blanche manquent complètement d'organes vocaux et communiquent entre eux en claquant du bec. Chez les oiseaux chanteurs, l'organe vocal appelé *syrinx* est placé en arrière de la trachée, i. e. à la bifurcation des bronches: il est donc dupliqué. Les oiseaux peuvent se servir des deux sources simultanément pour produire des sons d'une grande complexité.

2) Modèles biomécaniques des cordes vocales

2.1) Eléments de la description et symétrie verticale

L'oscillation autoentretenu des cordes vocales est possible grâce à deux phénomènes qui permettent qu'il ait un transfert net d'énergie de l'écoulement aux cordes vocales:

- déformation non uniforme du tissu des cordes vocales (2 degrés de liberté: modèles à 2 masses depuis 1972)
- décollement de l'écoulement des parois à un point de séparation mobile (Pelorson *et al*, 1994 / Lous *et al* 2001) Le point de séparation introduit une asymétrie entre les phases d'ouverture et de fermeture qui ne doit plus être imposée de façon artificielle comme dans beaucoup de modèles précédents.

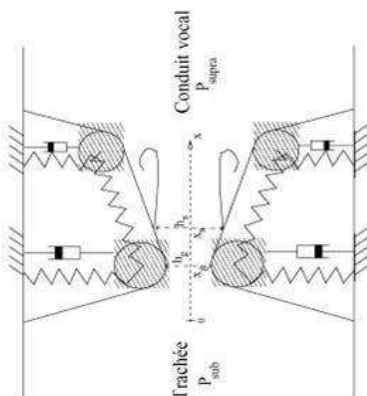


Fig4 : modèle à 2 masses

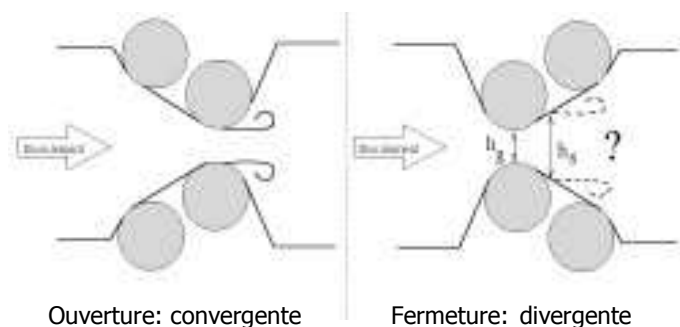


Fig5: Notion de point de point de séparation mobile

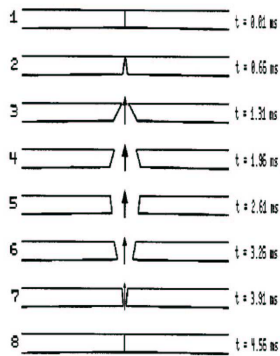


Fig6 : Représentation d'un cycle dans la vibration auto-entretenu des cordes vocales

2.2) Les éléments du modèle symétrique

Lorsqu'on parle de modèle symétrique, le mot symétrique fait allusion à la structure verticale des cordes vocales. Dans ce modèle, les cordes vocales sont considérées comme un système mécanique d'oscillateurs couplés de deux manières :

- par un couplage élastique entre la partie haute et basse des cordes
- par un couplage par collision entre les cordes gauche et droite

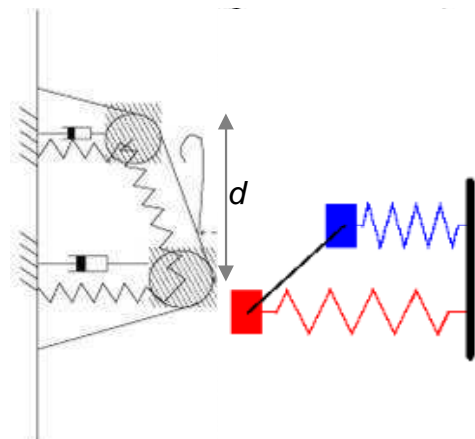


Fig7 : Représentation du modèle symétrique

Ce système constitue un exemple classique en dynamique non linéaire de système déterministe capable de présenter simultanément un comportement complexe. Au niveau énergétique, la collision est modélisée comme un changement abrupt de constants d'élasticité et dissipation. La dynamique des cordes vocales peut se décrire à l'aide de l'équation suivante:

$$m_i \frac{d^2 y_i}{dt^2} + r_i \frac{dy_i}{dt} + k_i y_i + k_c (y_j - y_i) = f_i(P_s, L_g, d)$$

Inertie, dissipation, élasticité, couplage, forçage hydrodynamique.

Fig8 : Conservation de l'énergie pendant la collision entre les deux membranes

3) Sensibilité acoustique du modèle symétrique

3.1) Revue des modèles à basse dimension

Voici représentés sur la figure 9 un récapitulatif des modèles biomécaniques classiques ayant plusieurs caractéristiques en commun.

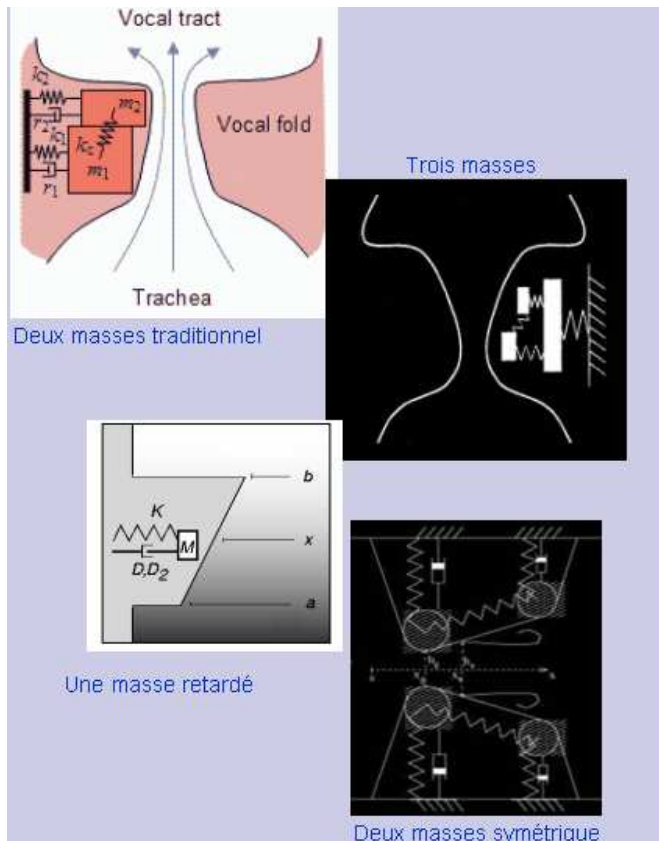


Fig9 : Récapitulatif des modèle biomécaniques à basse dimension

- Simplicité conceptuelle et puissance d'interprétation en dynamique non linéaire

[Sciamarella/Mindlin, PRL 82, 1450 (1999)]
 [Herzel et al, Chaos 5, 1 (1995)]
 [Titze I.R. "Vocal Fold Physiology" (1993)]

- Production d'une ample variété d'effets acoustiques

[Sciamarella/D'Alessandro, ICSLP (2002)]
 [Van Hirtum et al, VOQUAL (2003)]
 [Sciamarella, D'Alessandro/ ACTA ACUSTICA, in press (2004)]

- Association des effets acoustiques avec des actions physiologiques de la glotte

[Sciamarella/D'Alessandro, EUROSPEECH (2003)]

- Forçage contrôlé par variation des paramètres physiques et musculaires à dont la liaison se fait par de règles empiriques

[Titze/Story, JASA 112, 1064 (2002)]

L'examen et la validation des modèles demeurent essentiels au moment de choisir le modèle le plus adapté aux questions que l'on souhaite traiter.

3.2) Description de l'onde de débit glottique

Pour décrire l'onde de débit glottique (qu'elle soit mesurée ou générée par un modèle mécanique) il y a un ensemble de paramètres couramment utilisés dans les modèles phénoménologiques de signaux de parole. La variabilité de ces paramètres phénoménologiques (amplitude de voisement, quotient ouvert, quotient vitesse, etc) ont été étudiée en profondeur par N. Henrich et C. D'Alessandro, qui ont montré comment la qualité vocale en voix parlée et chantée peut être caractérisée en fonction de ces paramètres.

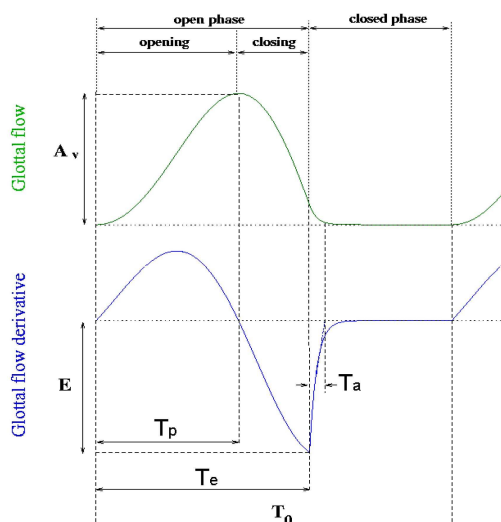


Fig10 : Description de l'onde de débit glottique (Henrich 2001)

Les résultats qui suivent montrent la variation des paramètres phénoménologiques en fonction des paramètres du contrôle du modèle mécanique symétrique des cordes vocales. Pour les obtenir, on a généré numériquement l'onde de débit glottique avec le modèle (en intégrant les équations) et on a mesuré sur le signal de sortie les paramètres phénoménologiques, aussi connus comme paramètres acoustiques.

Lorsqu'on augmente la tension musculaire et que l'on diminue la masse des cordes en vibration, cela a globalement pour résultat d'élever la fréquence fondamentale. En outre, lorsqu'on d'augmente la pression sousglottique et la rigidité des cordes vocales, l'intensité du son produit est plus élevée. (cf Fig11)

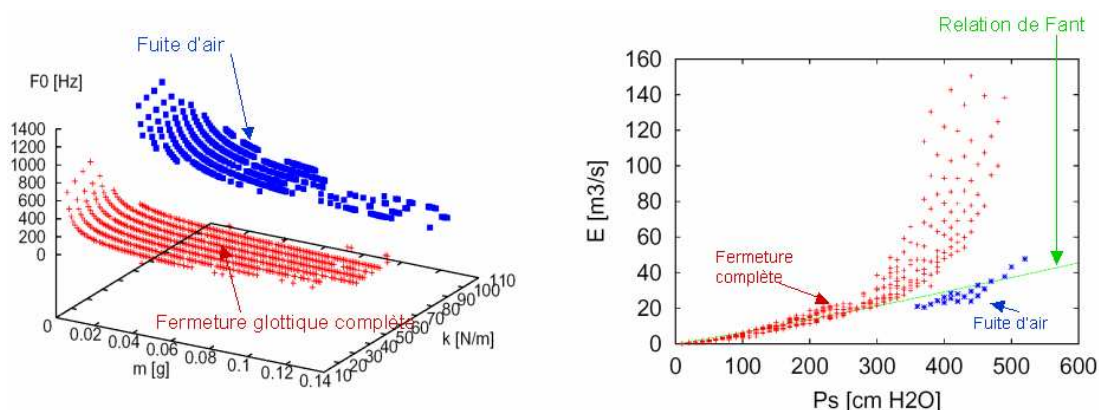


Fig11 : Modifications mécaniques imposées à la glotte modélisée pour produire des effets acoustiques différents

La pression sous-glottique a également une influence sur le quotient ouvert et le quotient vitesse (cf fig12), tout comme la tension des cordes vocales et la masse mise en vibration ont des implications sur la phase de retour. (cf fig13)

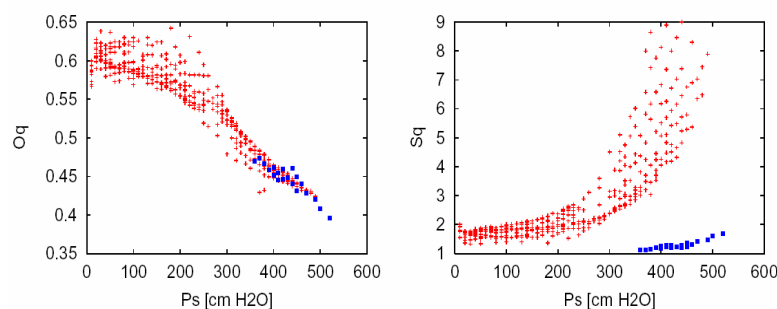


Fig12 : Variation maximale du quotient ouvert et du quotient vitesse en fonction de la pression sousglottique

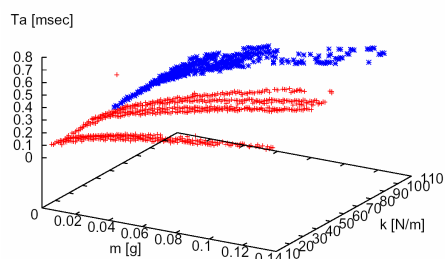


Fig13 : Variation maximale de la phase de retour en fonction de la tension et la masse en vibration

3.3) Prédictions du modèle symétrique: effets acoustiques vs. actions glottiques

Nous avons de même examiné si le modèle mécanique symétrique est capable de reproduire les différents modes de phonation, connus sous la dénomination de mécanismes laryngés. Les figures qui suivent montrent à quel point un modèle physique non linéaire simple est capable de reproduire des effets acoustiques complexes.

Voici par exemple un reproduction numérique des deux mécanismes laryngés différents lors de la variation de deux paramètres de contrôle: la tension et la largeur des cordes.

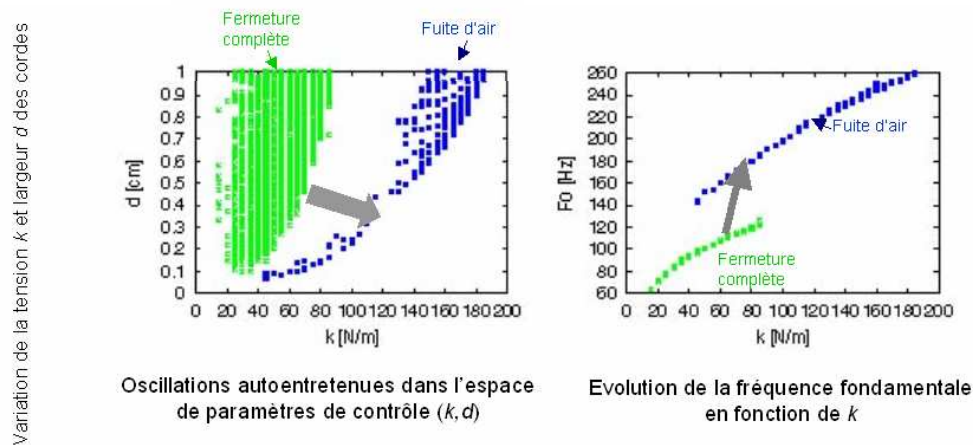


Fig14 : Influence de la largeur et de la tension des CV sur la fréquence fondamentale

La région en vert correspond à une vibration des cordes où la fermeture glottique est complète, et la région en bleu correspond aux oscillations avec une fuite d'air qui indique que les cordes ne se ferment pas complètement. Hors de ces deux régions le système n'arrive pas à établir des oscillations autoentretenuées.

La coexistence de régimes différents dans l'espace des paramètres de contrôle est typique des systèmes dynamiques non linéaires. En regardant l'évolution de la fréquence fondamentale pour chacune des régions, on s'aperçoit que les hautes fréquences sont atteintes par un changement de régime lorsque les cordes deviennent plus courtes et tendues (l'intensité se réduit et une légère fuite d'air apparaît). On observe un saut en fréquence plus ou moins brusque (selon la maîtrise du locuteur) à la transition entre les deux régimes.

- Le modèle prédit donc le saut en fréquence observé typiquement dans un glissando où l'on retrouve un passage laryngé (un changement de mécanisme).

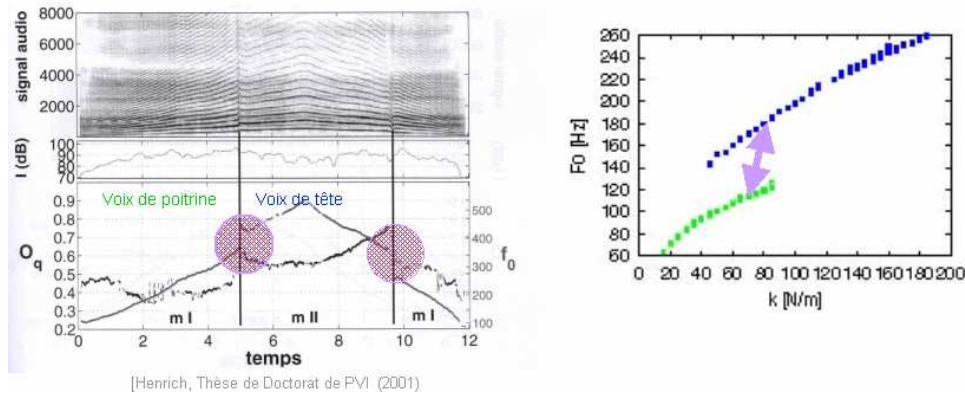


Fig15 : Sonagramme d'un glissando et saut de fréquence à la transition M1->M2 prédite par le modèle symétrique

Si l'on confronte ces résultats avec des données expérimentales, on voit que cet ensemble d'effets acoustiques correspondent bien à ceux observés dans les sonagrammes des glissandos où l'on retrouve des passages laryngés, c'est-à-dire des transitions entre la voix de poitrine et la voix de tête (ou falsetto). Un examen des propriétés acoustiques de chaque mécanisme révèle que le régime avec fermeture glottique complète du modèle correspond bien au mécanisme I.

- Le modèle permet également de reproduire numériquement des signaux électroglottographiques.

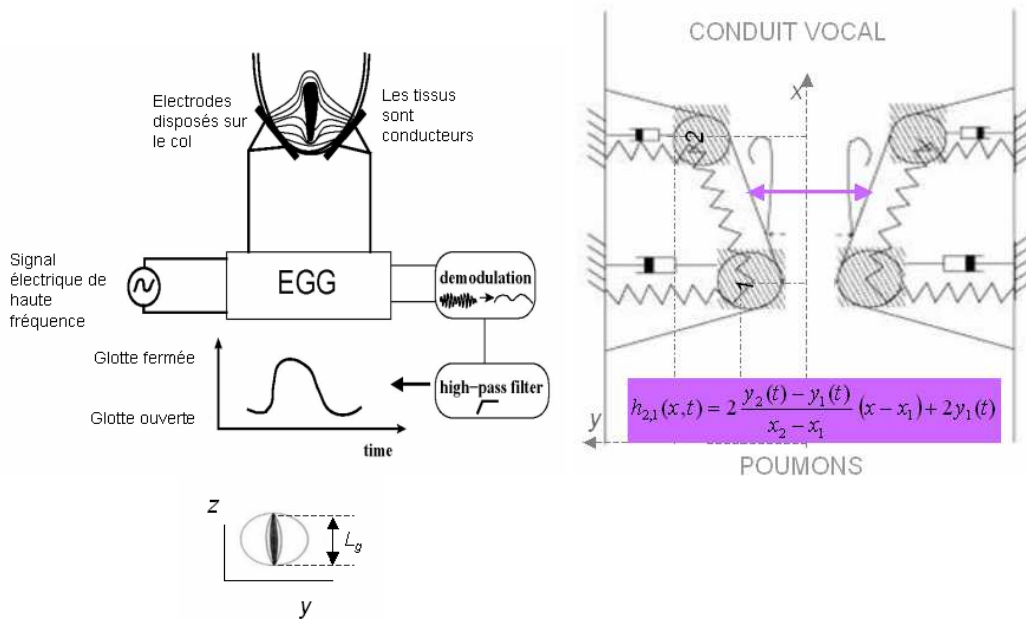


Fig16 :modélisation numérique du signal Electroglottographique

Outre à la réponse acoustique, on peut mesurer l'activité glottique avec un technique connue comme l'électroglottographie. Cette technique consiste à appliquer deux électrodes sur le cou du sujet et à faire passer un signal électrique de haute fréquence. Comme les tissus sont conducteurs, la résistance au courant est moindre lorsque la glotte est fermé.

Un signal EGG traduit la variation temporelle de l'aire de contact entre les cordes vocales. Nous avons incorporé à la simulation le calcul de l'aire de contact entre les cordes. Nous arrivons ainsi à reproduire numériquement le signal EGG.

- Le modèle prédit le doublement de pic observé expérimentalement pendant les passages laryngés lors de la fermeture des cordes.

Sur le signal Egg, on observe un doublement du pic de fermeture très pendant le changement de mécanisme laryngé.

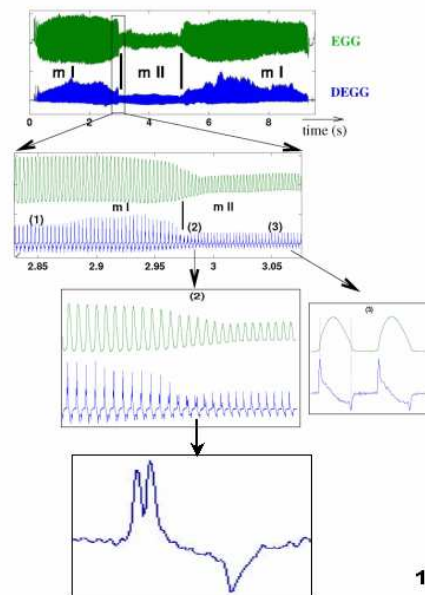


Fig17 : Représentation de la transition M1-> M2 sur un glissando. Signal Egg en vert, Degg en bleu

Notre modèle physique reproduit aussi le doubles pics de fermeture lors d'un passage laryngé avec la variation simultanée de la pression sousglottique et la rigidité des cordes.

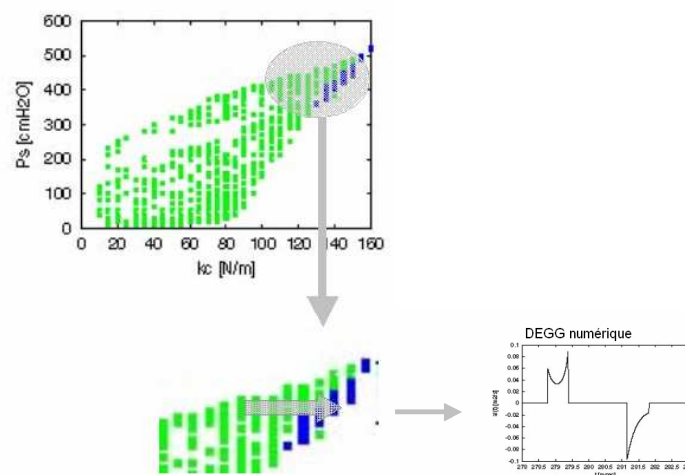


Fig18 : prédiction des dédoublements de pics par le modèle symétrique. (kc varie lentement pendant la transition).

Remarquez que la transition entre régimes n'est pas forcément le résultat d'une variation graduelle dans l'espace des paramètres. Ceci dépend fortement des paramètres choisis et de la région de l'espace des paramètres qui est visitée. En fait, nous avons déjà rencontré des exemples où le changement de mécanisme impose un saut en fréquence.

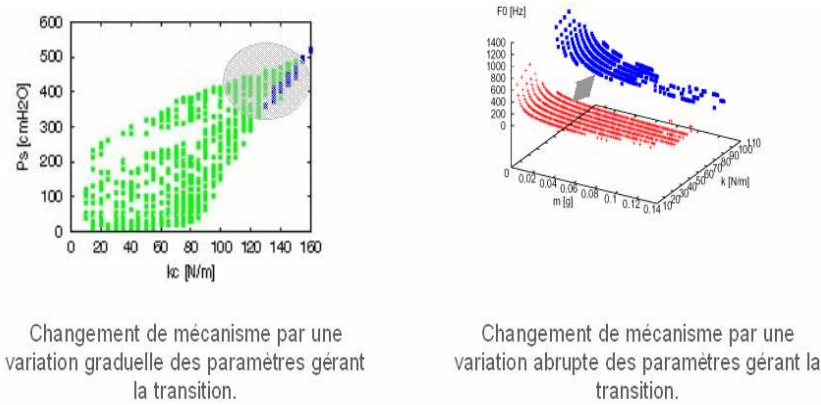


Fig19 : Conséquences de variations graduelles ou abruptes des paramètres géant la transition

3.2) Les paramètres de contrôle physiques et musculaires

Le choix des paramètres de contrôle est essentiel parce que le locuteur semble contrôler de façon directe les paramètres perceptifs et non pas les paramètres physiques. La corrélation entre les paramètres physiques et acoustique peut pourtant être absorbée par de règles empiriques d'activation musculaire.

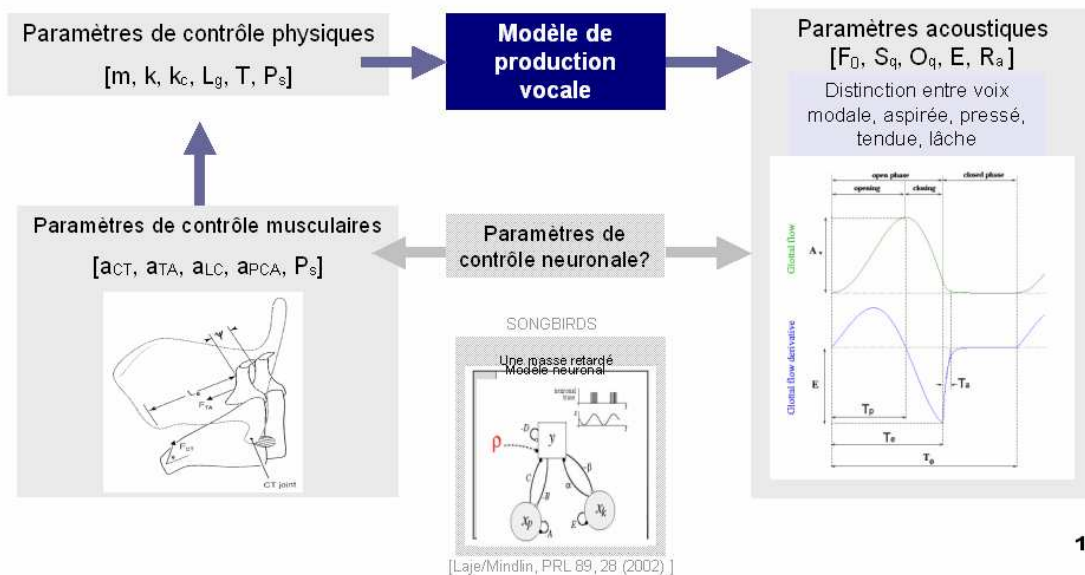


Fig20 : Représentation des espaces de contrôle de la production vocale

A longue terme, une question cruciale se pose : est-il envisageable alors de contrôler l'appareil vocal à partir d'instructions neuronales?

En fait, il est possible d'utiliser notre modèle mécanique symétrique des cordes vocales pour produire des effets acoustiques différents en fonction des paramètres de contrôle des muscles laryngés de la glotte modélisée. Dans les résultats qui

suivent, on voit que la variation des paramètres acoustiques est moins complexe sous l'action musculaire que sous l'action des paramètres du modèle physique. La complexité semble donc bien capturée par des règles empiriques comme celles développées dans Titze/Story, JASA 112, 1064 (2002).

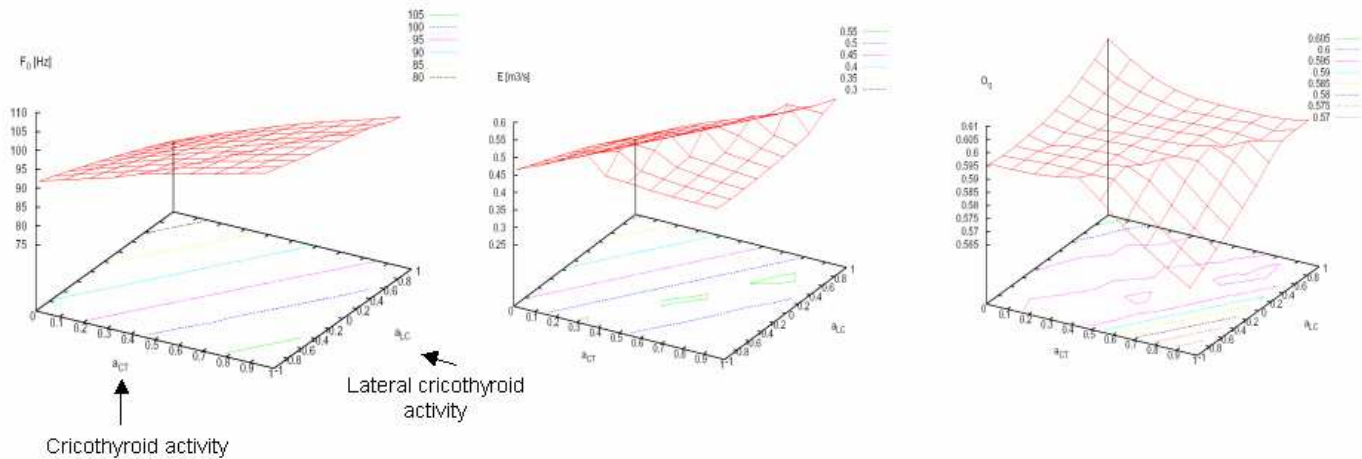


Fig22 : Activité du muscle cricothyroïdien

Cependant, les paramètres musculaires variables dans un modèle symétrique (a_{CT} , a_{LC}) ne permettent de visiter qu'une petite région de l'espace de paramètres, ce qui empêche le modèle d'atteindre toute la variété de comportements acoustiques dont il est capable à partir d'un simple contrôle de paramètres musculaires. Une des causes de cette contrainte est que l'activité du thyroarythénoïde (a_{TA}) reste fixe dans un modèle symétrique.

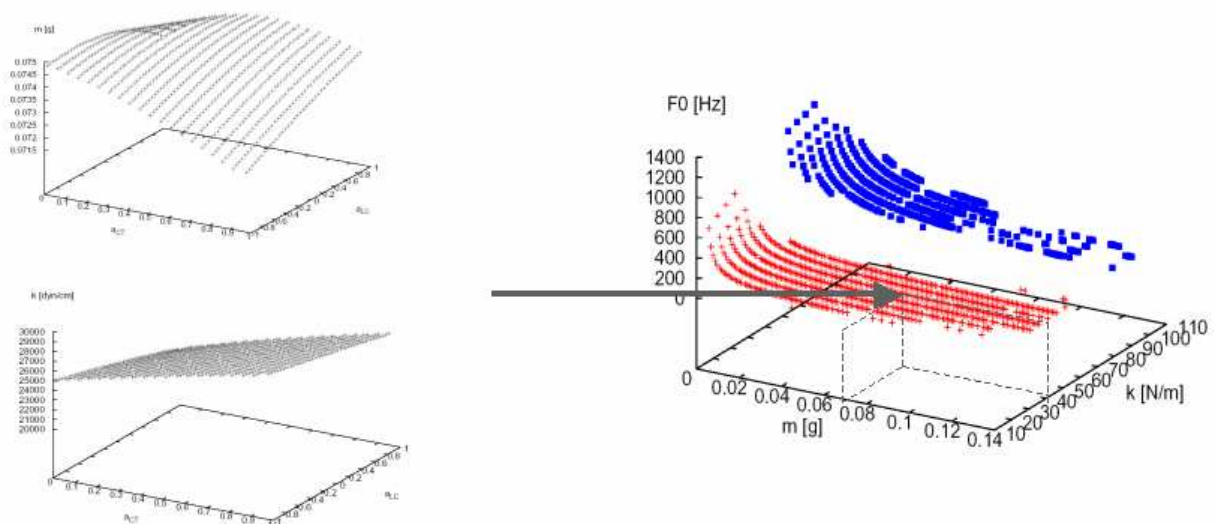


Fig23: Variation de la masse et de la tension des muscles laryngés

De plus, ces règles musculaires ne comprennent pas la variation de la pression. Il est bien probable que le contrôle des muscles laryngés soit dépendant de la pression sousglottique et d'un troisième degré de liberté dans le mouvement des cordes.

Ces recherches sont actuellement en cours. Notamment, on cherche à expliquer comment différents chemins dans l'espace des paramètres musculaires peuvent produire un résultat acoustique identique.

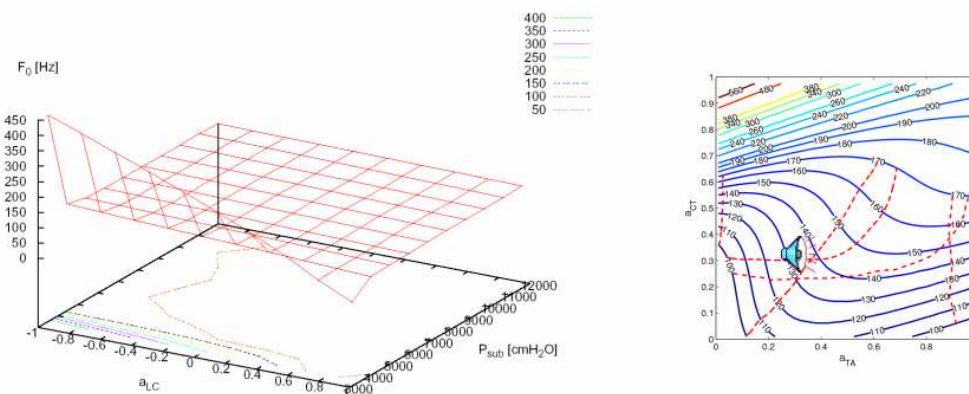


Fig24: Différents chemins dans l'espace des paramètres musculaires peuvent produire un même résultat acoustique

Conclusions

- Nous avons vu dans cette présentation l'importance du décollement de l'écoulement glottique des parois pendant la phase de fermeture du cycle glottique pour une modélisation *symétrique* de la structure des cordes vocales
- Afin de valider un modèle, il est utile de saisir les actions que la glotte modélisée emploie pour produire des effets acoustiques différents face à la variation des paramètres de contrôle
- Nous pouvons en conclure que le modèle symétrique à deux masses est suffisamment robuste pour reproduire une large gamme d'effets acoustiques, y compris les mécanismes laryngés.
- La complexité de la réponse acoustique des modèles à basse dimension peut être absorbée par de règles empiriques d'activation musculaire en cours de développement. Le locuteur semble contrôler de façon directe les paramètres perceptives et non pas les paramètres physiques. A long terme, une évolution du contrôle des modèles de l'appareil vocal à partir d'instructions neuronales est envisageable.

Bibliographie

D. Sciamarella, C. d'Alessandro, *On the acoustic sensitivity of a symmetrical two-mass model of the vocal folds to the variation of control parameters*, Acta Acustica 90, 746-751 (2004)

D. Sciamarella, *Le non linéaire et la production vocale*, Comptes Rendus du Rencontre de la 7ème Rencontre du Non Linéaire, pp. 275-280 (2004)

D. Sciamarella, *Acoustic sensitivity of a symmetrical two-mass model of the vocal folds to physiologic control parameters*, Proc. Joint Congress CFA/DAGA (2) p. 1139(2004)

D. Sciamarella, C. d'Alessandro, *Reproducing laryngeal mechanisms with a two-mass model*, Proc. of the 8th European Conference on Speech Communication and Technology, Eurospeech 2003, 2385-2388 (2003)

D. Sciamarella, C. d'Alessandro, *A study of the Two-Mass Model in terms of Acoustic parameters*, International Conference on Spoken Language Processing ICSLP, pp.2313-2316 (2002)