



HAL
open science

APPLICATION DE LA MODÉLISATION DE L'APPAREIL PHONATOIRE À LA CARACTÉRISATION DE LA PAROLE HYPERBARE

J. Crestel, M. Guitton

► **To cite this version:**

J. Crestel, M. Guitton. APPLICATION DE LA MODÉLISATION DE L'APPAREIL PHONATOIRE À LA CARACTÉRISATION DE LA PAROLE HYPERBARE. Journal de Physique Colloques, 1990, 51 (C2), pp.C2-479-C2-482. <10.1051/jphyscol:19902112>. <jpa-00230393>

HAL Id: jpa-00230393

<https://hal.science/jpa-00230393v1>

Submitted on 4 Feb 2008

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



HAL Authorization

1er Congrès Français d'Acoustique 1990

APPLICATION DE LA MODÉLISATION DE L'APPAREIL PHONATOIRE À LA CARACTÉRISATION DE LA PAROLE HYPERBARE

J. CRESTEL et M. GUITTON

Laboratoire d'Analyse des Systèmes de Traitement de l'Information,
E.N.S.S.A.T., BP. 447, F-22305 Lannion, France

Résumé - Cet article présente la méthodologie et les résultats d'une étude théorique de l'incidence sur la phonation des mélanges respiratoires synthétiques utilisés actuellement dans le contexte de la plongée profonde. L'étude est fondée sur une hypothèse de validité du modèle n-tubes pour le conduit vocal et du modèle à 2 masses pour la glotte. On montre en particulier que la modification de la fonction de transfert du conduit vocal peut être caractérisée avec une bonne approximation sans que la connaissance de la configuration articulaire soit requise, et que pour un mélange respiratoire donné l'enveloppe spectrale de l'onde glottique est sensible à la pression.

Abstract - This paper describes the methodology and results of a theoretical study of the effect of synthetic respiratory mixtures currently used in deep diving on phonation. The study is based on an assumption of the validity of the n-tube model for the vocal tract and of the two mass model for the vocal folds. It particularly shows that the modification of the vocal tract transfer function can be characterised with a good approximation whatever the articulatory configuration, and that for a given respiratory mixture the spectral envelope of the glottal wave is sensitive to pressure.

I- INTRODUCTION

Les plongeurs professionnels qui travaillent à grande profondeur sont amenés à vivre dans une ambiance "haute pression" pendant un laps de temps pouvant atteindre plusieurs semaines: la plongée est dite en "saturation". Les facultés physiques, mentales, psychiques, physiologiques du plongeur sont très sensibles à la nature du gaz respiré. Ainsi l'air est toxique à partir d'une profondeur de quelques dizaines de mètres. Par contre des mélanges respiratoires synthétiques (héliox, trimix, hydréliox, hydrox) permettent des plongées en saturation à des profondeurs très supérieures à 100 m.

Dans tous les cas la pression partielle de l'oxygène est sensiblement égale à 0.5 bar. L'emploi de ces mélanges synthétiques, satisfaisant quant aux performances physiologiques, a néanmoins un effet secondaire critique: les plongeurs produisent une parole quasi-inintelligible.

L'efficacité des appareils correcteurs actuellement commercialisés s'avère insuffisante aux profondeurs supérieures à 300 m. La définition de procédés de corrections performants, nécessaire, est conditionnée par une connaissance préalable fine des phénomènes de déformation de la parole hyperbare pour tout mélange respiratoire. Deux investigations sont menées parallèlement par le L.A.S.T.I. La première est de nature expérimentale. La seconde est de nature fondamentale et fait l'objet de cette communication. Elle consiste à étudier le comportement d'un modèle de l'appareil phonatoire en conditions hyperbares.

Les résultats des simulations du fonctionnement en conditions hyperbares du conduit vocal et des cordes vocales qui sont présentés dans les § 2 et 3 sont fondées sur une extrapolation de l'application de modèles "air" classiques: le modèle n-tubes pour le conduit vocal, le modèle à 2 masses pour les cordes vocales.

II- MODÉLISATION DU CONDUIT VOCAL

La fonction de transfert du conduit vocal est définie comme le rapport de la pression acoustique aux lèvres au débit au niveau de la glotte. Les paramètres retenus pour la caractérisation de la fonction de transfert sont les fréquences et les bandes passantes des 3 premiers formants. L'étude vise à déterminer le déplacement des formants et la variation de leur bande passante relativement aux paramètres des mélanges respiratoires. La modélisation du conduit vocal relative aux voyelles s'appuie sur les fonctions d'aires définies par Mrayati [2]. L'analogie pression - tension et débit - courant caractérise par un quadripôle [3] les tubes du conduit vocal discrétisés. La mise en oeuvre du modèle assure la prise en compte des paramètres du mélange sous la forme d'un mélange fictif: choix de la célérité du son (c), de la masse volumique (ρ), du coefficient de viscosité, ou choix d'un mélange réel (air, héliox, hydrox). Les phénomènes secondaires (pertes par friction, par conduction, par vibration des parois, par couplage source - conduit vocal) sont introduits de façon optionnelle. Des lois sont établies par confrontation des résultats de simulations pour plusieurs configurations articulaires et des résultats de calculs issus de la modélisation du conduit vocal uniforme (voyelle [ə]) par une ligne de transmission.

II-1 RESULTATS GENERAUX

L'effet de friction dû à la viscosité du mélange respiratoire induit un déplacement des formants suffisamment faible -de l'ordre du % - pour être considéré négligeable. Les pertes par friction et transfert de chaleur contribuent à augmenter les bandes passantes des formants proportionnellement à $(c/p)^{1/2}$. Leur contribution devient négligeable aux fortes profondeurs.

Le déplacement relatif des fréquences de formants $\delta F/F$ induit par le rayonnement aux lèvres est fonction de la voyelle mais indépendant du mélange respiratoire. La contribution du rayonnement à la bande passante d'un formant est proportionnelle à $(2n-1)^2 c$, ce qui la rend prépondérante dès le second formant.

Le phénomène de vibration de parois affecte essentiellement le premier formant. Il est responsable d'une augmentation de la fréquence de ce formant et de la quasi-totalité de sa bande passante. Le résultat essentiel de l'étude concerne le déplacement relatif de fréquence qui s'avère extrêmement lié à la bande passante, indépendamment des paramètres physiques des mélanges (fig.1).

Le couplage source-conduit vocal est également responsable d'une modification de fréquence et de bande passante des formants. Une adaptation de la modélisation dynamique [2] du conduit vocal au voisinage d'un formant par un circuit de Foster à 2 cellules met en évidence une augmentation de fréquence du premier formant de l'ordre de 10 % quasiment indépendante de la masse volumique; la bande passante du premier formant est au contraire sensiblement proportionnelle à la masse volumique. L'augmentation fréquentielle n'est pas intégrée dans la suite de l'étude.

La comparaison de la fonction de transfert du conduit vocal "air" et du conduit vocal "hyperbare" met en évidence un étalement fréquentiel global proportionnel à la célérité du son et une modification de la répartition des formants d'autant plus importante que les fréquences sont basses. Il est généralement admis que la loi de Fant [4] caractérise correctement cette modification. La simulation confirme cette loi en ce qui concerne les fréquences des formants; par contre les conclusions relatives aux bandes passantes sont divergentes. La simulation, contrairement à la loi de Fant, prédit une augmentation sensible des bandes passantes.

II-2 CARACTERISATION DU PREMIER FORMANT

La caractérisation de la fonction de transfert du conduit vocal "air" à partir de la fonction de transfert du conduit vocal "hyperbare" suppose au minimum l'évaluation des fréquences et des bandes passantes des formants. L'identification des deuxième et troisième formants est immédiate si on néglige les phénomènes secondaires autres que le rayonnement aux lèvres

$$BP \text{ air} = BP \text{ hyperbare} \cdot ca / ch$$

$$F \text{ air} = F \text{ hyperbare} \cdot ca / ch$$

L'identification du premier formant est plus complexe. La méthode proposée s'appuie directement sur les résultats de la modélisation et tout particulièrement sur ceux qui concernent les vibrations de parois. Les informations requises sont les suivantes:

- 1- la nature du mélange respiratoire, la masse volumique et / ou la célérité du son (on montre que ces paramètres sont liés [1]).
- 2- les résultats de simulations présentés sur la figure 1. Ils précisent la contribution des pertes par vibration de parois relativement aux pertes totales pour le mélange considéré et pour l'air.
- 3- la relation entre la bande passante et le déplacement de fréquence imputables aux vibrations des parois, représentée par la figure 2:

$$BP \text{ vib} = f (\delta F / F)$$

- 4- la connaissance pour l'air de la bande passante relative aux vibrations de parois en fonction de la fréquence du formant en l'absence de ce phénomène.

Les étapes de la caractérisation du formant sont les suivantes:

- 1- la bande passante "hyperbare" due aux vibrations des parois est déduite de la bande passante globale (fig.1).
- 2- la fréquence F_{hr} du formant fictif "hyperbare" en l'absence de vibrations de parois est déduite de la fréquence du formant F_h et de la bande passante B_h via la figure 2.
- 3- la fréquence du formant fictif "air" en l'absence de vibrations de parois est évaluée par la relation

$$F_{ar} = F_{hr} \cdot ca / ch$$
- 4- la contribution des vibrations de parois à la bande passante du formant "air" est déterminée par la figure 3.
- 5- les fréquence et bande passante du formant "air" sont évaluées en exploitant les figures 4 et 1.

La méthode a été vérifiée en comparant ses résultats avec ceux donnés directement par la simulation, pour un ensemble de mélanges respiratoires et de configurations articulatoires. Les écarts relatifs faibles obtenus pour les fréquences et les bandes passantes confirment la cohérence de la méthode.

III- MODELISATION DE LA SOURCE GLOTTIQUE

L'inintelligibilité de la parole hyperbare résulte, relativement à l'air, de la modification des caractéristiques des conduits vocal et nasal et de l'excitation. Pour les sons voisés l'excitation est l'onde glottique. L'incidence des paramètres intrinsèques du mélange respiratoire sur l'onde glottique est évaluée, comparativement à l'air, à partir d'une étude de comportement du modèle de source à 2 masses [6]. Il s'agit d'un modèle dont les valeurs des paramètres de commande "air" ont été précisément définies [7]. Dans cette étude ces valeurs sont étendues aux gaz

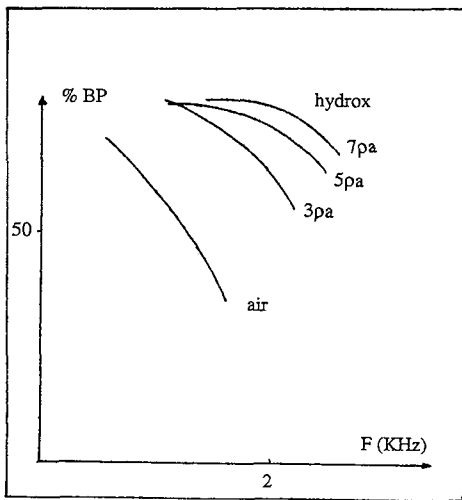


Fig. 1 Contributions relatives des pertes par vibration de parois à la bande passante du 1^{er} formant .

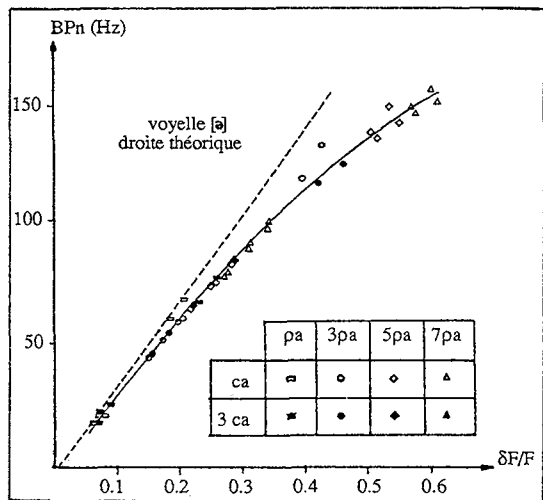


fig. 2 Vibration des parois: relation BP = f (delta F/F).

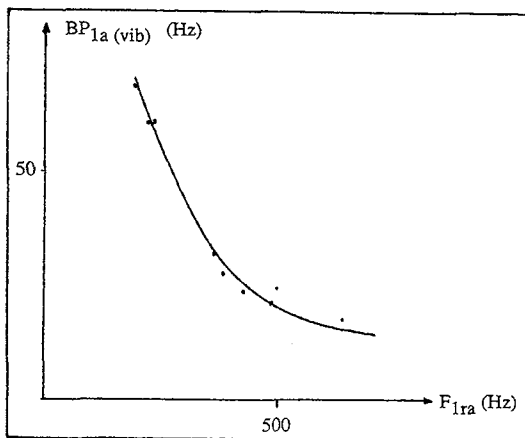


fig. 3 Relation BP1a = f (F1ra).
BP1a: bande passante induite par vibration des parois.
F1ra: fréquence des voyelles simulées sans pertes, self de rayonnement incluse.

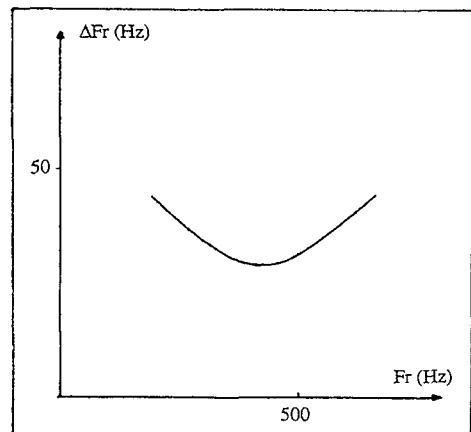


fig. 4 Variation de fréquence induite par les vibrations des parois.

hyperbares. Les paramètres mécaniques liés à la physiologie des cordes vocales (dimensions, masses, tensions, amortissements) sont considérés indépendants du mélange respiratoire. Par contre la masse volumique et la viscosité de ce mélange interviennent directement dans les équations dites aérodynamiques et indirectement -de même que la célérité du son- par le couplage source-conduit vocal [7]. L'influence du couplage se manifeste pour les fréquences inférieures à celles du second formant.

La simulation numérique de la source pour la production de la voyelle [a] a été effectuée pour expliciter la sensibilité de l'onde glottique aux paramètres physiques du mélange respiratoire en termes de pitch, de quotient d'ouverture, d'enveloppe spectrale et d'énergie. La célérité du son peut être considérée sans influence. Globalement le coefficient de viscosité n'a qu'une incidence très faible compte-tenu de son faible intervalle de variation pour les mélanges respiratoires considérés. La masse volumique a par contre un effet significatif. La sensibilité du pitch exprimée sous la forme $\Delta T/Ta$ (Ta : pitch "air") et le quotient d'ouverture Q.O. sont inversement proportionnels à la masse volumique dans l'intervalle [pa..6pa] (fig.5a,5b). La pente du spectre de l'onde glottique calculé par la transformée de Fourier diminue en première approximation de 3 dB pour une augmentation pa de la masse volumique (fig. 5c): cette information est importante pour la définition d'un algorithme de correction de la parole par prédiction linéaire [5]. La puissance rayonnée aux lèvres -calculée numériquement en associant les modèles de la source, du conduit vocal et de la charge rayonnée aux lèvres assimilée à l'impédance de rayonnement d'un piston vibrant dans un baffle plan infini- est pratiquement indépendante du milieu ambiant lorsque la pression subglottique est supposée constante.

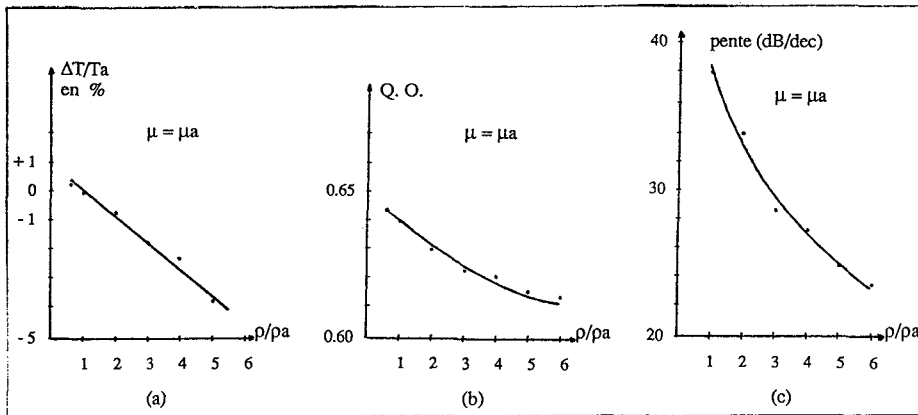


Fig. 5 Sensibilité de l'onde glottique à la masse volumique du mélange respiratoire.

IV- CONCLUSIONS

Dans la première partie de l'étude l'effet prépondérant de la célérité du son et de la masse volumique du mélange respiratoire sur la fonction de transfert du conduit vocal est quantifié, en termes de fréquence et de bande passante des formants. Les résultats semblent cohérents avec ceux extraits de l'analyse de signal de parole hyperbare. Dans la seconde partie on montre que la masse volumique est le seul paramètre qui, intrinsèquement, modifie sensiblement l'onde glottique. L'objectivité de l'extension du modèle à 2 masses n'a pas encore été vérifiée par l'analyse expérimentale. Seul le pitch peut être extrait de l'analyse de parole réelle: une diminution sensible est observée, mais la corrélation avec les paramètres du mélange respiratoire n'est pas mise en évidence. Une investigation expérimentale de la source glottique en conditions hyperbares s'avère nécessaire. Une expérience d'observation directe des vibrations des cordes vocales par vidéo-stroboscopie va être conduite par le L.A.S.T.I. au cours de la plongée expérimentale "HYDRA IX" à la COMEX (oct.89-déc.89).

REFERENCES

- [1] M. GUITTON
Contribution à l'amélioration de l'intelligibilité de la communication orale en plongée hyperbare:
- modélisation du conduit vocal.
- implémentation temps réel d'un algorithme de correction.
Thèse d'Université (Rennes, 1987)
- [2] M.MRAYATI
Contributions aux études sur la production de la parole.
Thèse de Docteur d'Etat (1976). Université de Grenoble.
- [3] J. L. FLANAGAN
Speech analysis synthesis and perception.
Springer-verlag Berlin Heidelberg New-York 2nd Edition (1972)
- [4] G.FANT, J. LINDQUIST
Pressure and gas mixture effects on diver's speech.
STL-QPSR 7-17/1968
- [5] J. CRESTEL
Contribution à l'amélioration de l'intelligibilité de la communication orale en plongée hyperbare:
- modélisation de la source glottique.
- algorithme de correction par prédiction linéaire.
Thèse d'Université (Rennes, 1987)
- [6] K. ISHISAKA, J. L. FLANAGAN
Synthesis of voiced sounds from a two-mass model of the vocal cords.
The Bell System Technical Journal Vol. 51 n°6 pp. 1233-1268
- [7] B. GUERIN
Contributions aux recherches sur la production de la parole.
Étude du fonctionnement de la source vocale. Simulation d'un modèle.
Thèse d'Etat (Grenoble, 1978)