



HAL
open science

La croissance du conduit vocal du fœtus à l'adulte : une étude longitudinale

Guillaume Barbier, Louis-Jean Boë, Guillaume Captier

► To cite this version:

Guillaume Barbier, Louis-Jean Boë, Guillaume Captier. La croissance du conduit vocal du fœtus à l'adulte : une étude longitudinale. *Biométrie Humaine et Anthropologie - revue de la Société de biométrie humaine*, 2012, 30 (1-2), pp.11-22. hal-00787759

HAL Id: hal-00787759

<https://hal.science/hal-00787759>

Submitted on 3 Dec 2018

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.

La croissance du conduit vocal du fœtus à l'adulte : une étude longitudinale

Vocal tract growth from fetus to adulthood: a longitudinal study

Guillaume Barbier^{1*}, Louis-Jean Boë¹, Guillaume Captier²

¹ GIPSA-lab, Département Parole et Cognition, UMR 5216 CNRS, Grenoble Universités, 11 rue des Mathématiques - Domaine universitaire - BP 46, 38402 Saint Martin d'Hères Cedex.

² Université Montpellier I, Laboratoire d'Anatomie de Montpellier, 2 rue de l'École de Médecine, 34000 Montpellier

* auteur correspondant : guillaume.barbier@gipsa-lab.grenoble-inp.fr

Résumé : Les archives radiographiques de 68 individus blancs nord-américains suivis longitudinalement entre 1 mois et 25 ans ont été utilisées afin de quantifier la croissance du conduit vocal. 966 téléradiographies sagittales de la tête et du cou provenant de l'Association Américaine des Orthodontistes ont été utilisées, incluant un grand nombre de radiographies couvrant les premières années de vie, période cruciale pour l'acquisition de la parole. Les coupes anatomiques de 12 fœtus ont été ajoutées afin d'assurer une continuité de données pour la période périnatale. Huit variables sont présentées afin de décrire en détail la croissance du conduit vocal : (1) la longueur de la cavité orale, (2) la longueur du palais dur, (3) la longueur du palais mou, (4) la hauteur de la cavité pharyngale, (5) la longueur totale du conduit vocal, (6) la position de la glotte (7) la position de l'os hyoïde et (8) la position de la troisième vertèbre cervicale, relativement au plan occlusal. Les courbes de croissance et les vitesses de croissance sont calculées. Des tests statistiques sont effectués dans le but d'observer l'émergence du dimorphisme sexuel. Ces données sont une source d'information pour modéliser la croissance du conduit vocal et permettent également de mieux comprendre les liens entre anatomie et acoustique au cours de l'ontogenèse.

Mots-clés : conduit vocal, croissance, anatomie, production de parole, acoustique.

Abstract: Longitudinal radiographic archives of 68 Caucasian American people followed between 1 month and 25 years were used in order to quantify the growth of the vocal tract. 966 sagittal cephalometric radiographs from the American Association of Orthodontists were used, including a large number of radiographs covering the early years, which is a critical period for speech acquisition. The anatomical sections of 12 fetuses were added to ensure the continuity of data around birth. Eight variables are presented to specify in detail the growth of the vocal tract. These are (1) the oral cavity length; (2) the hard palate length; (3) the soft palate length; (4) the pharyngeal cavity height; (5) the estimated vocal tract length; (6), (7), and (8) the vertical position of each the glottis, the hyoid bone and the third cervical vertebra relative to the occlusal plane, in order to better estimate the vertical evolution of the pharyngeal cavity. Growth curves and growth rates are also computed. Finally, statistical tests are conducted in order to observe the onset of sexual dimorphism. These data are a source of information for the modeling of the vocal tract during ontogenesis, and for the study of articulatory-acoustic relationships during growth.

Keywords: vocal tract, growth, anatomy, speech production, acoustics.

I - Introduction

Le conduit vocal, ou voies aéro-digestives supérieures, peut être considéré comme un tuyau s'étendant de la glotte (l'orifice au niveau duquel sont situées les cordes vocales) aux lèvres. Sa fonction initiale, dédiée aux systèmes respiratoire et digestif, a été détournée pour devenir un formidable instrument de communication [1]. Afin de produire un son de parole, la vibration produite par les cordes vocales est transformée, modulée par les gestes des articulateurs de la parole, à savoir les lèvres, la langue, la mandibule et le velum, qui modifient la forme du conduit vocal, et par là même, le son produit à la sortie de ce conduit : c'est donc la forme du conduit vocal qui détermine le son produit [2].

Plusieurs études ont montré que le conduit vocal d'un enfant n'est pas une mise à l'échelle linéaire de celui d'un adulte [3-6] mais que la croissance du conduit vocal est une véritable anamorphose. Dès lors, comment les enfants, avec un instrument de forme très différente de celui de l'adulte, parviennent-ils à déformer leurs conduits vocaux de manière à atteindre des configurations proches de celles observées chez les adultes, dans le but de produire des sons de parole intelligibles ?

La croissance globale du conduit vocal a d'importantes conséquences acoustiques : les fréquences des résonances créées au sein du conduit vocal, appelées formants, sont globalement inversement proportionnelles à la longueur totale du conduit vocal [2, 7]. Ainsi, les femmes adultes et encore davantage les enfants, ont en moyenne des formants plus élevés que les hommes adultes en raison de leur plus petit conduit vocal et plus précisément en raison de leur plus petite cavité pharyngale [8].

Au cours de l'ontogenèse, la croissance osseuse non linéaire a pour conséquence de modifier la taille des différentes cavités (orale et pharyngale) et leurs proportions relatives (ou ratio), ce qui a nourri le désormais célèbre débat autour de l'origine phylogénétique de la parole :

l'anatomie est-elle une contrainte majeure pour la production de la parole [9, 10] ? Plus exactement, le fait de posséder une cavité pharyngale de petite taille empêche-t-elle d'atteindre certaines configurations du conduit vocal, donc la production de certains sons ?

Un peu plus en détail, la croissance osseuse a pour conséquence de modifier, au cours de l'ontogenèse, la longueur des fibres musculaires de la langue ainsi que leur orientation. Avec un système périphérique de production de parole si différent de celui de l'adulte, d'un point de vue du contrôle moteur - ou contrôle neuromusculaire - pour la production de la parole, quelles commandes musculaires (ou motrices) le système nerveux central de l'enfant doit-il envoyer à son système périphérique (ses articulateurs) pour atteindre une configuration du conduit vocal correspondant à un son de sa langue maternelle ?

Afin d'apporter des éléments de réponse à ces questions, cette étude présente, pour la première fois, des mesures biométriques longitudinales de la croissance du conduit vocal et de ses constituants du fœtus à l'âge adulte, permettant de quantifier la croissance de l'instrument vocal et d'en établir le profil ontogénétique. Ces données permettent une lecture détaillée de la croissance osseuse et des tissus mous constitutifs de l'instrument vocal, afin d'établir précisément les relations entre anatomie et acoustique au cours de la croissance.

II - Matériels et Méthodes

A. Sujets

Quatre archives radiographiques longitudinales rendues disponibles par *the American Association of Orthodontists* ont été utilisées dans cette étude : *Denver, Iowa, Michigan* et *Oregon growth studies (the AAOF Craniofacial Growth Legacy Collection* peut être consultée à l'adresse suivante : www.cril.org/aaof/aaof_home.asp). Ces téléradiographies sagittales de la tête et du cou ont été prises entre 1931 et 1970 chez des sujets sains nord-américains blancs (sans pathologie, sans malocclusion : tous présentent une Classe I, cf. [11]) dans le but d'observer la mise en place de la dentition au cours du développement typique. Au total, 68 individus, 35 hommes et 33 femmes, ont été suivis longitudinalement entre 1 mois et 25 ans, avec en moyenne une quinzaine de radiographies couvrant cette période. Pour chaque radiographie, nous disposons de l'âge, du sexe, de la classe dentaire, d'un code identifiant le sujet anonymement et du ratio pixel/millimètre de l'image. En tout et pour tout, 966 radiographies sagittales de la tête et du cou (496 pour les hommes, 470 pour les femmes) ont été utilisées dans cette étude.

Nous disposons d'un grand nombre de radiographies couvrant les 5 premières années de vie (227 exactement, cf. [12] pour une étude détaillée de la croissance du conduit vocal durant cette période), période cruciale pour l'acquisition de la parole. Nous disposons également d'un nombre environ égal de radiographies d'hommes et de femmes, ce qui permet une analyse statistique robuste du dimorphisme sexuel.

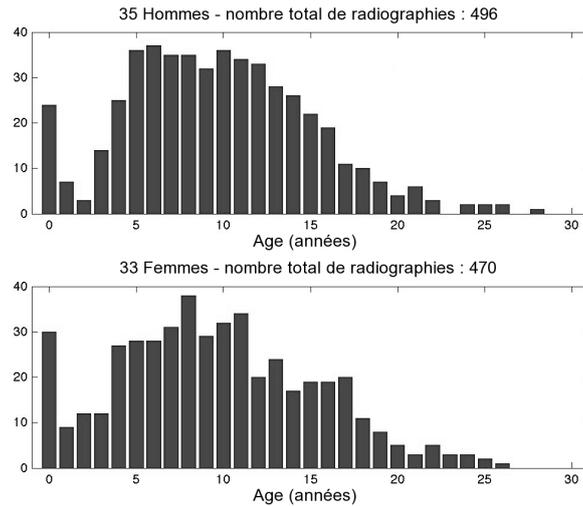


Figure 1 - Répartition du nombre de radiographies en fonction de l'âge pour les hommes (haut) et les femmes (bas) par groupes d'un an.

À cette importante base de données radiographique ont été ajouté 12 fœtus appartenant à la collection du Laboratoire d'Anatomie de l'Université Montpellier I, afin d'apporter une continuité de données pour la période périnatale. L'origine et l'histoire de ces fœtus étant inconnue, les principes de la déclaration de Helsinki ont été suivis. Ces fœtus n'étaient pas déformés et leur morphologie externe a été examinée afin de détecter quelque malformation, écrasement ou déformation. Même si le formol contribue à l'écrasement des tissus mous, le pourcentage de différence entre fœtus fixé et non fixé est faible (environ 1%), d'après [13]. L'âge estimé en semaines de gestation a été calculé d'après les mesures du diamètre bipariétal, de la taille des individus, de la longueur du pied, et ces mesures ont été comparées à des mesures de référence [14]. Les individus sont âgés de 14 à 37 semaines de gestation estimées, et le dimorphisme sexuel n'a pas été considéré pour ces fœtus. Les têtes ont été congelées puis découpées le long du plan médio-sagittal passant par la fontanelle antérieure, le nasion, la pointe du nez et le milieu du menton. Chaque héli-tête a été scannée et numérisée à 600 dpi. Les mesures ont été effectuées sur ces images numériques. Une description plus complète de ces fœtus est disponible dans [15].

B. Repères

Huit repères majeurs, pointés sur chaque radiographie et chaque image de fœtus, ont été utilisés afin de permettre la mesure des structures constituant le conduit vocal (cf. Figure 2). Ces repères sont : le prosthion (Pr), l'épine nasale antérieure (ENa), l'épine nasale postérieure (ENp), l'extrémité du velum (Ve), le point pharyngal (Ph, situé à l'intersection du plan occlusal et de la paroi pharyngale), le point le plus postérieur du corps de l'os hyoïde (Hy), le centre de la glotte (Gc), et le centre de la troisième vertèbre cervicale (C3c).

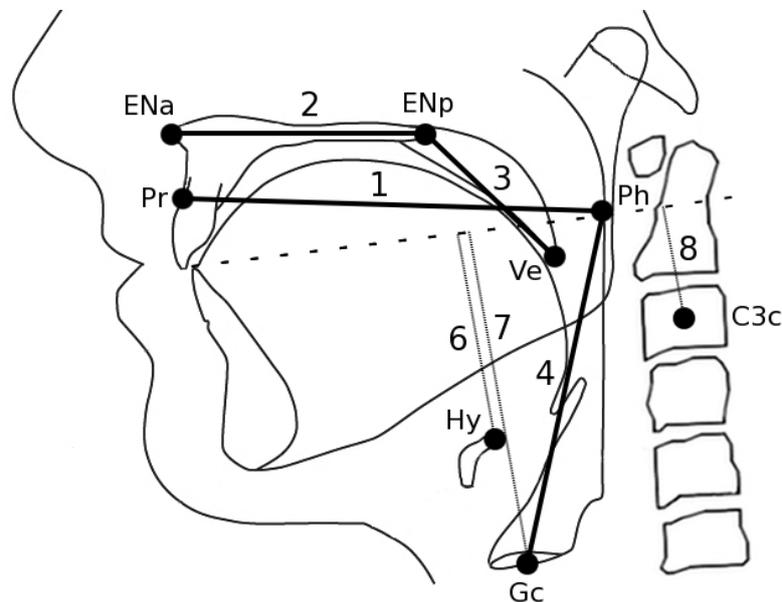


Figure 2 - Repères utilisés : Pr : Prosthion ; ENa : Epine Nasale antérieure ; ENp : Epine Nasale postérieure ; Ve : extrémité du Velum ; Gc : centre de la Glotte ; Ph : Point Pharyngal ; C3c : centre de la 3^{ème} vertèbre Cervicale ; pointillés : plan occlusal. **Distances étudiées :** (1) Longueur de la Cavité Orale ; (2) Longueur du Palais Dur ; (3) Longueur du Palais Mou ; (4) Hauteur de la Cavité Pharyngale ; (6) Déplacement vertical de l'os hyoïde ; (7) Déplacement vertical de la glotte ; (8) Déplacement du centre de C3 (adapté de Goldstein, 1980).

C. Mesures

Les 8 variables présentées dans cette étude et définies ci-dessous peuvent être identifiées sur les figures 2 et 3 (la figure 3 illustre l'estimation de la longueur du conduit vocal). Ces variables sont : **(1)** La Longueur de la Cavité Orale, ou distance horizontale du conduit vocal, définie comme la distance Euclidienne entre le prosthion (Pr) et le point pharyngal (Ph) ; **(2)** La Longueur du Palais Dur, définie comme la distance Euclidienne entre les deux épines nasales (ENa et ENp). **(3)** La Longueur du Palais Mou, définie comme la distance Euclidienne entre l'épine nasale postérieure (ENp) et l'extrémité du velum (Ve) ; **(4)** La Hauteur de la Cavité Pharyngale, ou distance verticale du conduit vocal, définie comme la distance Euclidienne entre le point pharyngal (Ph) et le centre de la glotte (Gc) ; **(5)** La Longueur du Conduit Vocal, estimée à partir d'un modèle de conduit vocal [16, 17] adapté à chaque radiographie à l'aide de 3 repères majeurs : le prosthion (Pr), le point pharyngal (Ph) et le centre de la glotte (Gc). Elle est définie comme la distance curvilinéaire de la glotte aux lèvres passant par la section médiane de ce modèle ; **(6)** la distance verticale séparant le plan occlusal de l'os hyoïde (Hy) ; **(7)** la distance verticale séparant le plan occlusal du centre de la glotte (Gc) ; et **(8)** la distance verticale séparant le plan occlusal du centre de la troisième vertèbre cervicale (C3c).

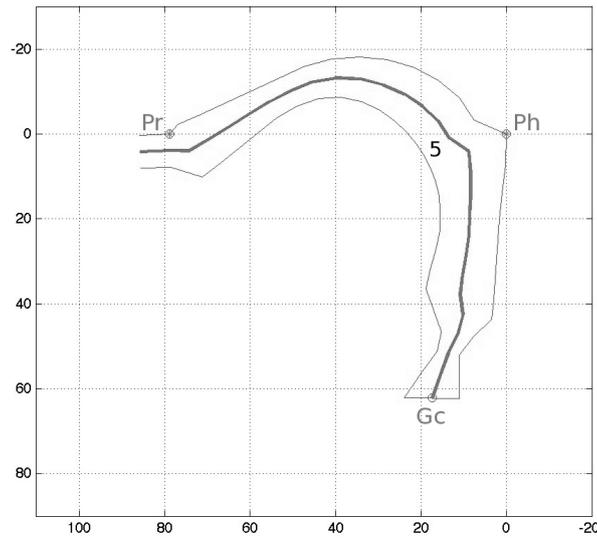


Figure 3 - Illustration de la méthode de l'estimation de la longueur totale du conduit vocal : le modèle VLAM est adapté à l'âge et à la morphologie d'un homme de 16 ans à partir des repères Pr, Ph et Gc. La distance curvilinéaire ainsi calculée (en gras) correspond à la Longueur du Conduit Vocal (**5**).

D. Courbes de croissance

Une courbe de croissance pour chaque variable en fonction de l'âge, pour les hommes et les femmes séparément, est calculée à l'aide d'un modèle de double logistique (appelé aussi double sigmoïde). Ce modèle est bien connu des études portant sur la croissance [18] et particulièrement des études de la croissance humaine [3, 19], puisqu'il présente des paramètres interprétables en termes de croissance (les paramètres A et D représentent les deux plateaux de la courbe) et que la courbe qu'il propose est continuellement croissante et dérivable. Le modèle de double logistique est présenté par l'équation (1) ci-dessous, dans laquelle y est la fonction qui modélise la croissance, t est le temps, et A, B, C, D, E et F sont les paramètres déterminés par une régression non linéaire.

$$(1) \quad y = \frac{A}{1+e^{B-C^2t}} + \frac{D}{1+e^{E-F^2t}}$$

Une double logistique est une courbe continument croissante en fonction du temps, qui présente 2 pics de croissance. Sa dérivée nous indique la vitesse de croissance de la structure étudiée à chaque pas de temps, et permet de bien visualiser les deux pics de croissance.

III - Résultats

A. Précision des mesures

Toutes les mesures, effectuées sur les images numériques, ont été réalisées à partir de logiciels développés à GIPSA-lab (cf. [20] pour une étude plus complète de ces données). L'échelle de chaque image a été calculée à partir de l'échelle visible sur la radiographie ou du facteur pixel/millimètre fourni par les responsables des archives radiographiques. La précision des mesures a été effectuée en pointant 10 fois, à des jours différents, les repères d'une image sélectionnée aléatoirement. Pour les huit repères utilisés dans cette étude, l'erreur moyenne par point varie entre 0,25 et 0,45 mm selon les repères, avec une erreur moyenne de 0,33 mm.

B. Courbes de croissance

Nous avons comparé les optimisations effectuées par des doubles logistiques avec celles effectuées par des modèles polynomiaux, utilisés dans [6], une étude similaire portant sur la croissance du conduit vocal. Les doubles logistiques offrent, pour toutes les variables de cette étude, de meilleures courbes de croissance que les modèles polynomiaux, dans le sens où l'erreur moyenne par point est plus petite pour les courbes issues de modèles doubles logistiques que celles issues de modèles polynomiaux, y compris pour les modèles polynomiaux du 6^{ème} degré. De plus, les courbes issues de modèles doubles logistiques sont continuellement croissantes, ce qui offre des profils de croissance plus réalistes et permet de calculer une vitesse de croissance positive en tous points.

C. Croissance des principales structures et du conduit vocal

Les figures 4 à 10 détaillent la croissance des structures constitutives du conduit vocal : la cavité orale (Fig. 4), le palais dur (Fig. 5), le palais mou (Fig. 6), la cavité pharyngale (Fig. 7), la longueur totale du conduit vocal (Fig. 8), ainsi que l'évolution verticale de la glotte, de l'os hyoïde et de la troisième vertèbre cervicale relativement au plan occlusal (Fig. 9 pour les

femmes, Fig. 10 pour les hommes ; attention, l'axe des abscisses a été inversé). L'évolution de chaque distance (ou variable) en fonction du temps ainsi que les courbes de croissance pour les hommes et les femmes sont présentées dans la partie gauche des figures 4 à 10. Les dérivées des courbes de croissance, rendant compte des vitesses de croissance de chaque structure, sont présentées dans la partie droite des figures 4 à 10. Toutes ces figures illustrent une très claire continuité entre données fœtales et radiographiques.

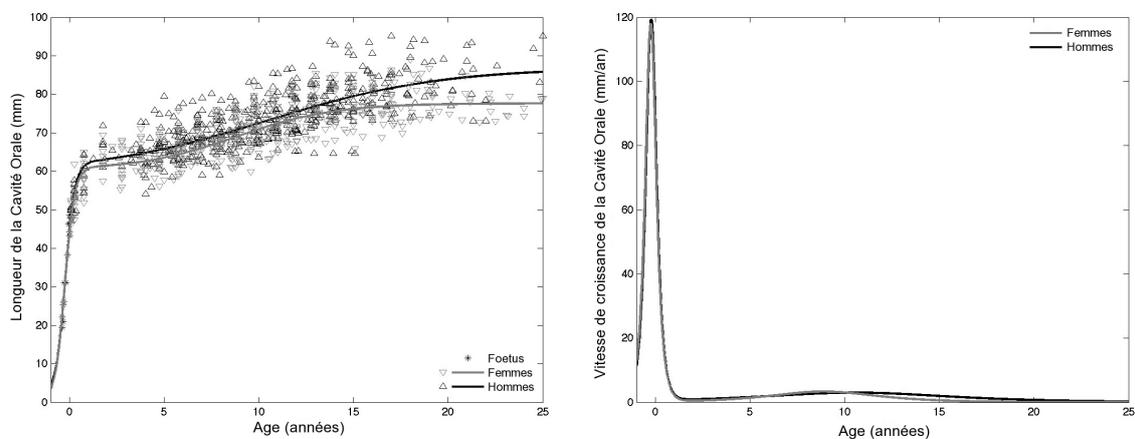


Figure 4 - Croissance de la Cavité Orale. Partie gauche : mesure de la cavité orale (en mm) en fonction de l'âge pour les hommes (triangles noirs pointant vers le haut) et les femmes (triangles gris pointant vers le bas), et courbes de croissance (noir : hommes ; gris : femmes). **Partie droite :** Vitesses de croissance de la cavité orale (en mm/an) pour les hommes (noir) et les femmes (gris).

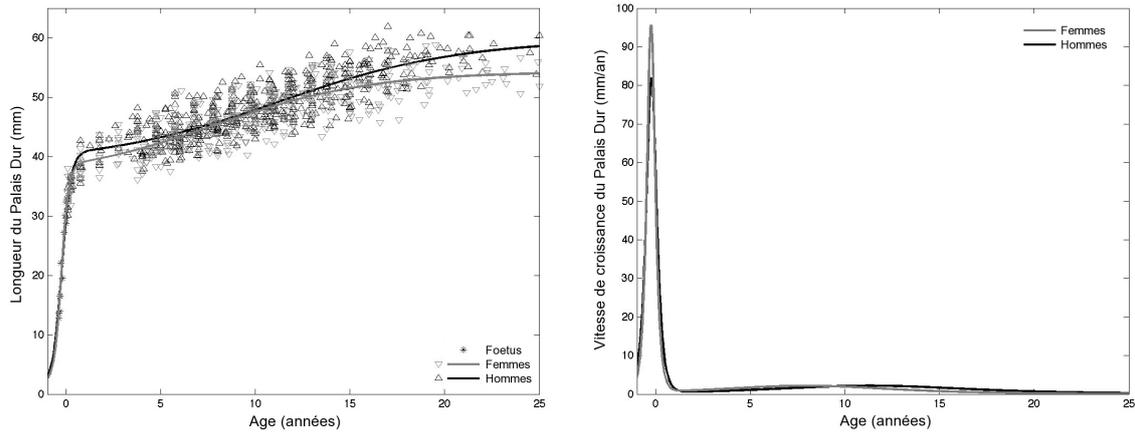


Figure 5 - Croissance du Palais Dur. Partie gauche : mesure de la longueur du palais dur (en mm) en fonction de l'âge pour les hommes (triangles noirs pointant vers le haut) et les femmes (triangles gris pointant vers le bas), et courbes de croissance (noir : hommes ; gris : femmes). **Partie droite :** Vitesses de croissance du palais dur (en mm/an) pour les hommes (noir) et les femmes (gris).

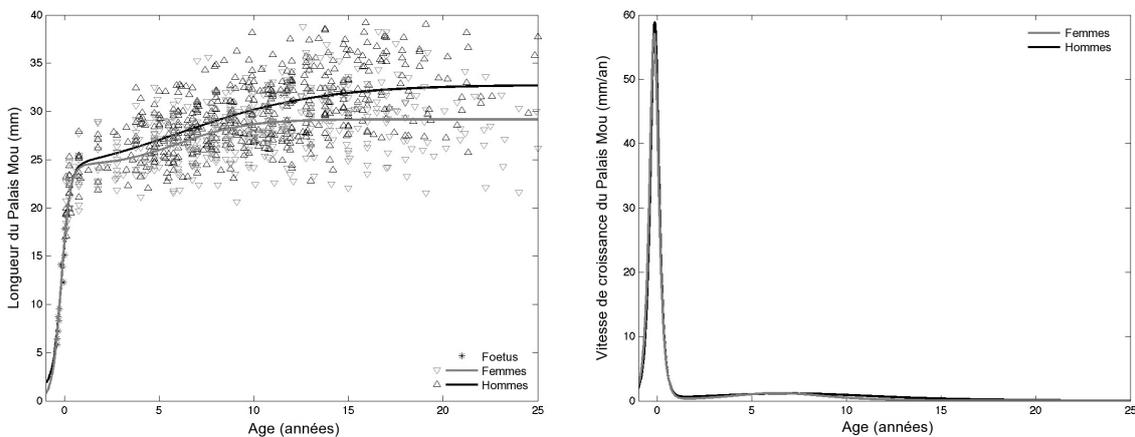


Figure 6 - Croissance du Palais Mou. Partie gauche : mesure de la longueur du palais mou (en mm) en fonction de l'âge pour les hommes (triangles noirs pointant vers le haut) et les femmes (triangles gris pointant vers le bas), et courbes de croissance (noir : hommes ; gris : femmes). **Partie droite :** Vitesses de croissance du palais mou (en mm/an) pour les hommes (noir) et les femmes (gris).

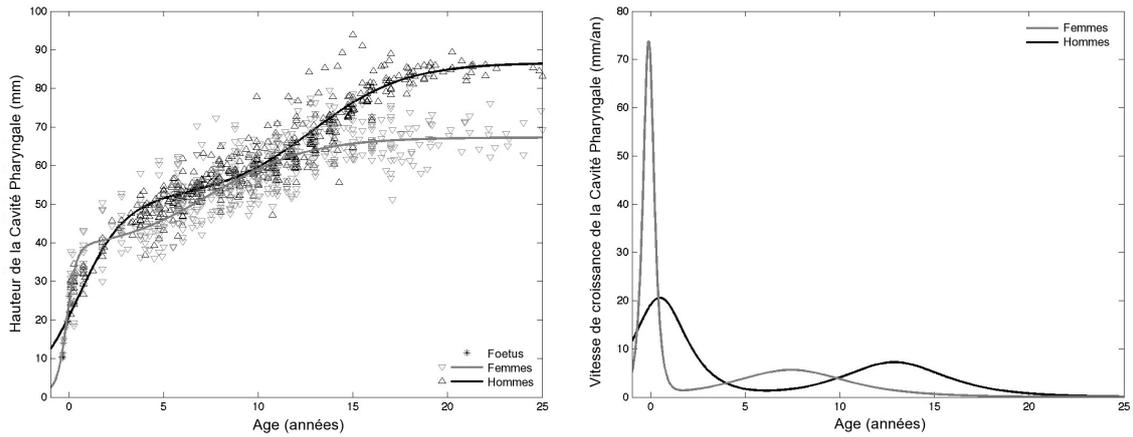


Figure 7 - Croissance de la Cavité Pharyngale. Partie gauche : mesure de la hauteur de la cavité pharyngale (en mm) en fonction de l'âge pour les hommes (triangles noirs pointant vers le haut) et les femmes (triangles gris pointant vers le bas), et courbes de croissance (noir : hommes ; gris : femmes). **Partie droite :** Vitesses de croissance de la cavité pharyngale (en mm/an) pour les hommes (noir) et les femmes (gris).

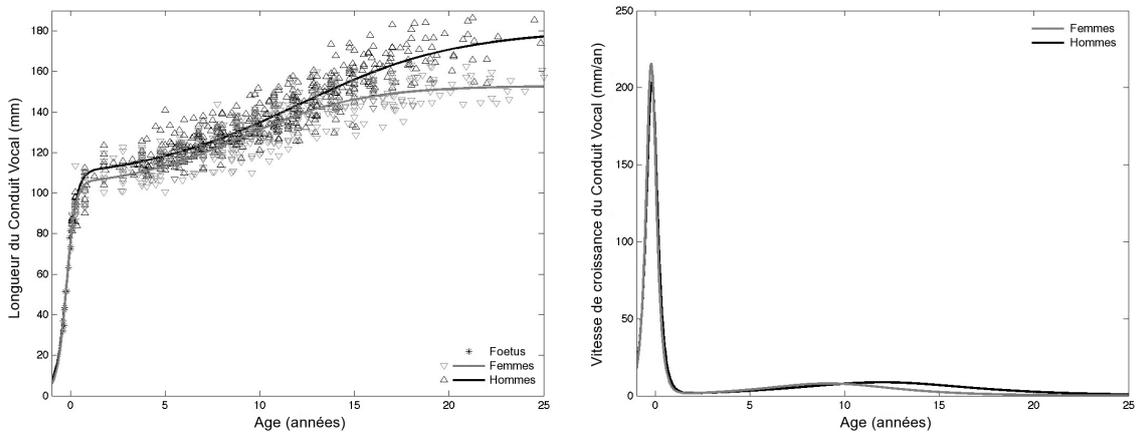


Figure 8 - Croissance de la Longueur du Conduit Vocal. Partie gauche : mesure de la longueur du conduit vocal (en mm) en fonction de l'âge pour les hommes (triangles noirs pointant vers le haut) et les femmes (triangles gris pointant vers le bas), et courbes de croissance (noir : hommes ; gris : femmes). **Partie droite :** Vitesses de croissance du conduit vocal (en mm/an) pour les hommes (noir) et les femmes (gris).

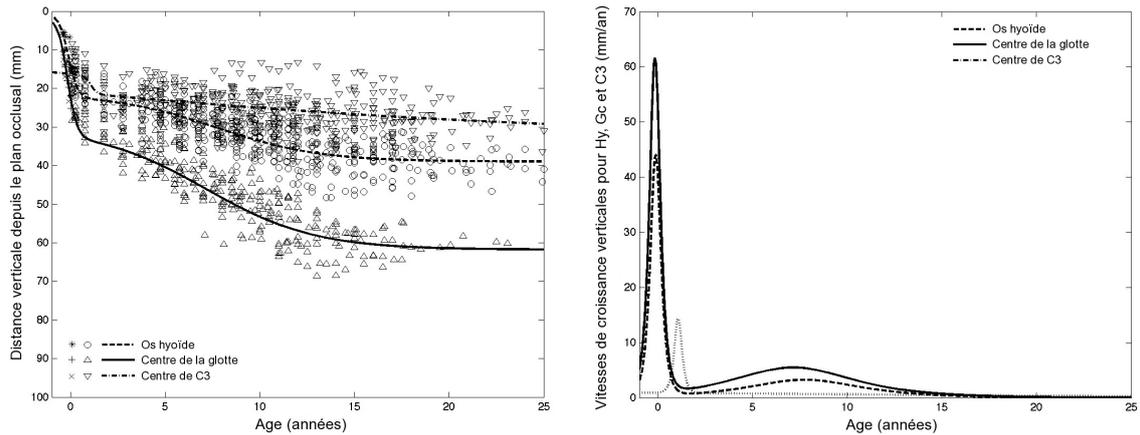


Figure 9 - Détail de la croissance de la cavité pharyngale chez les Femmes. **Partie gauche** : En mm par rapport au plan occlusal : déplacement du centre de C3 (triangles pointant vers le bas), de l'os hyoïde (cercles) et de la glotte (triangles pointant vers le haut) en fonction de l'âge et courbes de croissance. Noter que l'axe des abscisses est inversé pour rendre compte de l'abaissement du larynx au cours de la croissance. **Partie droite** : Vitesses de croissance (en mm/an) de l'os hyoïde (pointillés noirs), de la glotte (trait plein) et de C3 (pointillés gris).

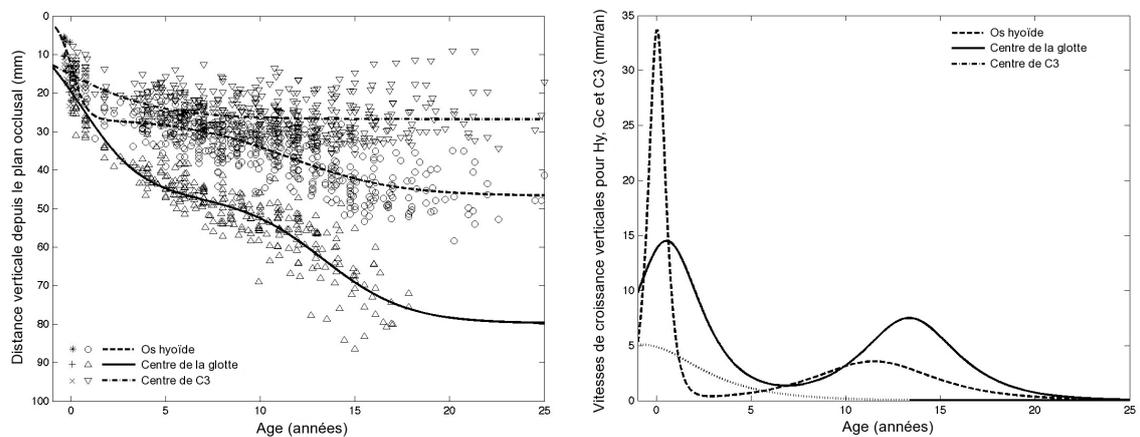


Figure 10 - Détail de la croissance de la cavité pharyngale chez les Hommes. **Partie gauche** : En mm par rapport au plan occlusal : déplacement du centre de C3 (triangles pointant vers le bas), de l'os hyoïde (cercles) et de la glotte (triangles pointant vers le haut) en fonction de l'âge et courbes de croissance. Noter que l'axe des abscisses est inversé pour rendre compte de l'abaissement du larynx au cours de la croissance. **Partie droite** : Vitesses de croissance (en mm/an) de l'os hyoïde (pointillés noirs), de la glotte (trait plein) et de C3 (pointillés gris).

Une première visualisation de ces données permet d'observer que la croissance des distances horizontales (la cavité orale (Fig. 4) et le palais dur (Fig. 5)) est très lente après la naissance, comme celle du palais mou (Fig. 6). Dans la partie droite de ces figures, le pic de croissance de la période périnatale masque le second pic de croissance correspondant à la croissance pubertaire. En revanche, la croissance des distances verticales (la cavité pharyngale (Fig. 7) et l'évolution verticale de l'os hyoïde, de la glotte et de C3, Fig. 9 et 10) est substantielle après la naissance, et le second pic de croissance pubertaire est clairement visible dans la partie droite de ces figures. Globalement, après la naissance, la croissance verticale est plus importante que la croissance horizontale. La longueur totale du conduit vocal (Fig. 8) présente, comme toutes les autres structures, deux pics de croissance, le premier durant la période périnatale et le second durant la puberté, ce qui justifie l'utilisation de modèles doubles logistiques.

Pour toutes les structures, le pic de croissance le plus important est celui de la période fœtale et de la première année de vie. Mais il est à noter des différences de croissance importantes entre ces structures : certaines présentent une faible croissance après la naissance (les distances horizontales) et d'autres une croissance importante (les distances verticales), ce qui donne à la longueur totale du conduit vocal ce profil avec deux pics de croissance, le second étant relativement marqué et davantage présent chez les hommes.

Si on étudie plus finement ces courbes de croissance, on se rend compte que chaque structure constitutive du conduit vocal a son rythme de croissance propre. Comme noté par [21] et [6], les différentes structures atteignent leur taille adulte entre 7 et 20 ans : la croissance crânienne est très rapide, la croissance verticale du cou est substantielle, et l'avancement de la face est lent et constant. Cela souligne que la croissance du conduit vocal ne peut être linéaire, puisqu'elle résulte d'un remodelage osseux non linéaire et très différent d'une structure à l'autre : la croissance du conduit vocal est une véritable anamorphose.

Les dérivées des courbes de croissance (partie droite des figures 4 à 10), indiquant la vitesse de croissance de chaque structure, montrent globalement que la croissance est très importante autour de la naissance. Elles montrent également qu'il existe un second pic de croissance durant la puberté, plus précoce moins marqué chez les femmes, et apparaissant plus tard mais étant plus marqué chez les hommes. Cela est particulièrement visible sur les figures 7, 9 et 10 présentant la croissance des distances verticales.

D. Analyse statistique du dimorphisme sexuel

Dans le but d'observer l'émergence du dimorphisme sexuel pour chaque mesure (défini comme l'âge à partir duquel des différences statistiquement significatives sont observées entre les hommes et les femmes), les données ont été organisées en groupes d'âge d'un an (0 étant le groupe d'âge entre la naissance et 11 mois) et des tests statistiques (*t*-tests) ont été effectués pour chacun de ces groupes d'âge. Si une différence statistiquement significative (notée par un astérisque) est observée entre les hommes et les femmes d'un groupe d'âge donné, et que cette différence est également significative pour les groupes d'âge suivants, alors le premier groupe d'âge est considéré comme étant l'âge de l'émergence du dimorphisme sexuel.

Une correction de Bonferroni a été appliquée pour rendre compte de comparaisons multiples. Le seuil que nous avons fixé était $p = 0,05$. Puisque 19 tests sont appliqués à des données qui ne sont pas indépendantes les unes des autres, la valeur de p après correction de Bonferroni a été fixée à $p = 0,0025$.

Tableau I - Analyse statistique du dimorphisme sexuel. Ce tableau présente des *t*-tests avec correction de Bonferroni pour 19 groupes d'âge de 1 an. Les degrés de liberté (colonne 2) et les seuils de significativité (*t*, colonne 3) sont donnés pour chaque groupe d'âge. Pour chaque variable et chaque groupe d'âge, les valeurs de *t* (colonnes 4 à 8) sont calculées et comparées au seuil de significativité : les différences statistiquement significatives sont indiquées par un astérisque.

Groupes d'âge	Degrés de liberté	Valeurs seuil de <i>t</i>	Longueur du conduit vocal	Cavité orale	Cavité pharyngale	Palais mou	Palais dur
0	53	3.261	0.1877	0.3314	1.2593	0.1816	0.6814
1	15	3.733	1.3257	2.1970	1.0339	0.9512	0.1598
2	14	3.787	0.9688	1.1872	0.3643	0.9651	1.9285
3	25	3.450	1.4040	1.6741	0.3899	2.2658	0.3604
4	51	3.261	1.9617	1.9624	1.1206	0.4456	0.8775
5	63	3.232	2.0305	2.0705	1.1037	0.0525	0.5469
6	64	3.232	1.7783	2.2241	0.5195	0.6834	3.3875*
7	65	3.232	1.0864	0.7894	1.3211	0.1067	1.0543
8	72	3.195	2.6813	2.8956	0.5434	1.1187	1.3907
9	60	3.232	1.4723	0.8260	1.9474	0.7413	3.4131*
10	67	3.232	2.0590	1.5810	1.7946	0.4950	1.5821
11	67	3.232	1.8163	2.0083	0.6738	1.1282	1.1859
12	52	3.261	1.0632	1.5402	0.2764	0.0717	0.1819
13	51	3.261	2.2899	1.8538	1.7111	1.4755	1.7240
14	42	3.307	2.4547	1.3264	2.8519	0.7925	1.4387
15	40	3.307	3.7377 *	1.5869	5.5239*	2.3948	3.0344
16	37	3.385	6.4245 *	2.5130	7.7717*	3.4973*	2.2245
17	30	3.385	6.4472 *	2.6928	7.9958*	2.0403	2.6494
18	20	3.552	4.2103 *	1.6185	8.3467*	2.4059	2.2714
19	14	3.787	4.0959 *	1.4607	11.7048*	2.1484	1.4325

Ces résultats indiquent que les différences statistiquement significatives observées entre les hommes et les femmes apparaissent à partir de 15 ans, et sont observées principalement concernant la hauteur de la cavité pharyngale [2, 8]. Ces résultats vont dans le sens de ceux de [4] et [5].

Le dimorphisme sexuel ne semble se manifester que pour les distances verticales. Aucune distance horizontale, à l'exception du palais dur pour le groupe d'âge de 16 ans, ne présente de dimorphisme sexuel. Nous supposons donc que le dimorphisme sexuel observé concernant la longueur totale du conduit vocal est principalement dû à des différences dans la hauteur de la cavité pharyngale. La différence de croissance de la région pharyngale entre les hommes et les femmes est clairement visible dans nos données : les valeurs de *t* concernant la cavité pharyngale sont hautement significatifs à partir de 15 ans (tableau I), et le second pic de

croissance du pharynx très marqué chez les hommes situant son maximum autour de 13 ans (Fig. 10) est nettement moins marqué chez les femmes et se situe bien avant, autour de 7-8 ans (Fig. 9).

E. Analyse longitudinale de la longueur du conduit vocal

Afin d'exploiter pleinement la dimension longitudinale de ces données, un travail sur la variation interindividuelle a été amorcé. Ce travail a consisté en : (1) le calcul de courbes de croissance sujet par sujet (2) le calcul des dérivées de chacune de ces courbes, donnant les vitesses de croissance individuelles du conduit vocal, (3) le calcul des maxima de chacune de ces vitesses de croissance, indiquant l'âge du pic de croissance pour chaque individu, et (4) une première analyse de la variation interindividuelle et du dimorphisme sexuel (sur la base de ces optimisations et des maxima de vitesse de croissance) a été effectuée. Ce travail reprend pour l'essentiel les travaux de [22], basés sur les données recueillies et analysées dans [20]. Nous présentons ci-dessous les courbes de croissance individuelles pour les femmes (Fig. 11) et pour les hommes (Fig. 12) ainsi que les maxima de vitesse de croissance pour chaque courbe (donc pour chaque individu).

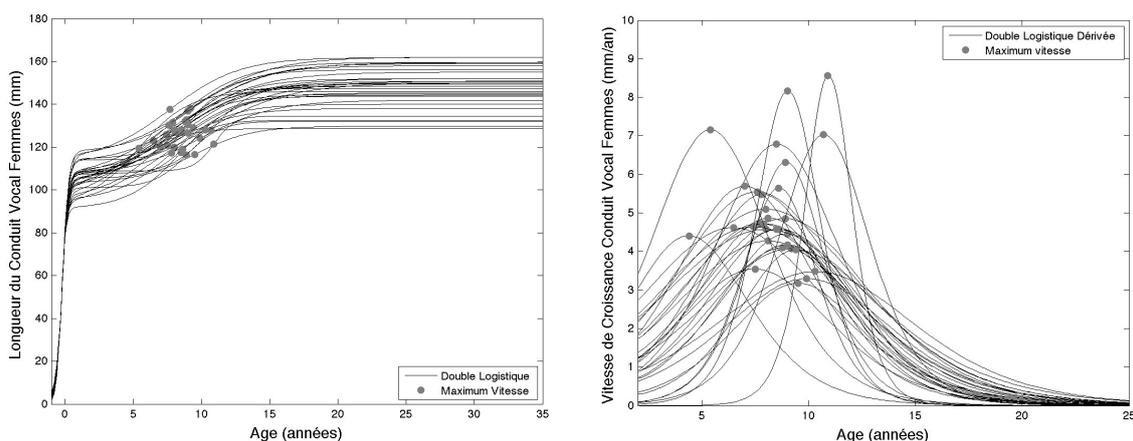


Figure 11 - Croissance individuelle de la longueur du conduit vocal pour les Femmes. **Partie gauche** : Les courbes de croissance (doubles logistiques) sont calculées pour chaque individu, et les maxima des vitesses de croissance (maximum de la dérivée de la double logistique) sont indiqués sur ces

courbes pour chaque individu. **Partie droite** : Les dérivées de ces courbes de croissance individuelles permettent de calculer les vitesses individuelles de croissance en tout point et leurs maxima.

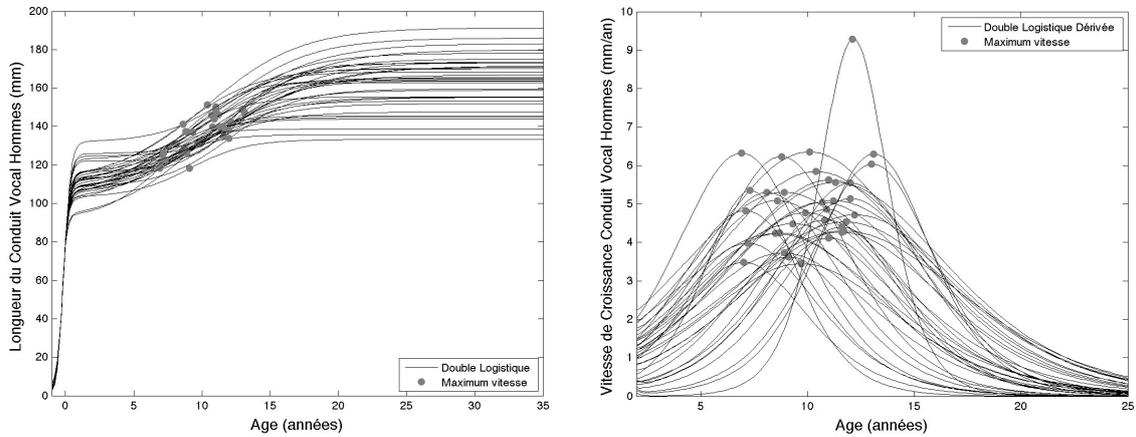


Figure 12 - Croissance individuelle de la longueur du conduit vocal pour les Hommes. **Partie gauche** : Les courbes de croissance (doubles logistiques) sont calculées pour chaque individu, et les maxima des vitesses de croissance (maximum de la dérivée de la double logistique) sont indiqués sur ces courbes pour chaque individu. **Partie droite** : Les dérivées de ces courbes de croissance individuelles permettent de calculer les vitesses individuelles de croissance en tout point et leurs maxima.

Une première analyse de ces données montre que le pic de croissance postnatal (le second pic de croissance) est plus précoce chez les femmes (8,37 ans en moyenne) que chez les hommes (10,07 ans en moyenne). On observe également une variabilité plus importante chez les hommes que chez les femmes, concernant l'âge de ce pic de croissance postnatal mais également concernant la longueur totale du conduit vocal à l'âge adulte. Enfin, la partie de droite de ces figures, indiquant la vitesse de croissance du conduit vocal à chaque instant, illustre bien la variation interindividuelle des profils de croissance.

IV - Discussion

Cette étude a quantifié certains aspects de la croissance du conduit vocal durant l'ontogénèse. Nos résultats indiquent globalement que : **(1)** la longueur du conduit vocal double pendant la vie (il mesure environ 80 mm à la naissance, environ 155 mm chez la femme adulte et environ 175 mm chez l'homme adulte) ; **(2)** la croissance du conduit vocal après la naissance se fait principalement dans la direction verticale ; **(3)** le profil de croissance des principales structures constitutives du conduit vocal présente deux pics de croissance, le premier durant la période périnatale et le second à l'adolescence (ce second pic étant plus précoce et moins marqué chez les femmes, plus tardif et plus marqué chez les hommes) ; **(4)** le dimorphisme sexuel apparaît autour de 15 ans et semble être essentiellement dû à une différence de hauteur de la cavité pharyngale, qui présente un second pic de croissance à la puberté marqué uniquement chez les hommes ; **(5)** la taille du velum est très importante à la naissance en regard de la taille des autres structures ; **(6)** la croissance la plus importante se fait pendant la période périnatale ; et **(7)** les profils de croissance, selon les structures, sont très différents, et la croissance globale du conduit vocal est non linéaire : la croissance ontogénétique du conduit vocal est donc une véritable anamorphose.

Nos mesures ont été comparées à celles des précédentes études portant sur la croissance du conduit vocal [3-6]. Les mesures de toutes ces études sont cohérentes avec les nôtres, ce qui appuie la validité de nos résultats. Nos données sont particulièrement proches de celles de [3] et [6], ce qui souligne la validité de ces précédentes études transversales. Nos courbes de croissance sont également très proches de celles proposées par ces deux études, mais sont en revanche nettement affinées en ce qui concerne la période périnatale.

A. Implications acoustiques

La croissance du conduit vocal a d'importantes implications acoustiques, notamment concernant la façon dont est contraint l'espace acoustique de la production des voyelles, appelé Espace Vocalique Maximal [23]. Cet espace dépend en effet directement de la longueur du conduit vocal [7, 8]. L'étude de la croissance du conduit vocal et l'estimation systématique de sa longueur sont donc des étapes nécessaires dans le but de comprendre les relations entre acoustique et anatomie au cours de l'ontogenèse.

Dans ce but, l'un des outils les plus prometteurs, permettant de mesurer directement l'effet d'un changement de l'anatomie sur le produit acoustique, est très certainement l'outil de modélisation. Quelques travaux pionniers ont été effectués dans ce domaine [3, 17, 24, 25, 26], dans le but de comprendre comment les enfants parviennent à déformer leurs conduits vocaux de manière à atteindre des configurations proches de celles observées chez les adultes, dans le but de produire des sons de parole intelligibles. Les études de Ménard et al. [24-26] ont montré que pour la production d'un objet acoustique donné (une voyelle, qui doit avoir des propriétés acoustiques communes qu'elle soit produite par un adulte ou par un enfant), les enfants doivent adopter une position de la langue plus antérieure que les adultes, afin de compenser la petite taille de leur cavité pharyngale.

Dans la même veine, nos futurs travaux iront vers l'exploitation d'un modèle biomécanique de la langue de l'enfant de 4 ans [27], et la confrontation de ce modèle à des données articulatoires (échographie linguale, permettant le suivi en temps réel du contour supérieur de la langue) permettra d'aller vers une meilleure compréhension de la mise en place du processus de production de parole d'un point de vue du contrôle neuromusculaire.

B. Implications dans le débat autour de l'origine du langage

Le rôle de l'anatomie dans le processus de production de la parole est un sujet très discuté, particulièrement d'un point de vue évolutionniste. Le ratio entre cavité orale et cavité pharyngale [9, 10] et la taille absolue de la cavité pharyngale [28] sont encore aujourd'hui des questions scientifiques fondamentales permettant d'aller vers une meilleure compréhension de l'émergence de la communication parlée au cours de l'évolution humaine. Pour Lieberman et collègues [9], le fait de posséder un ratio entre longueur des cavités orale et pharyngale proche de 1 apparaît comme un avantage pour l'émergence de la parole. Au contraire, pour Boë et collègues [10], ce ratio comme la taille absolue de la cavité pharyngale ne sont pas des contraintes majeures pour la production de la parole : pour eux, l'émergence de la parole est davantage due à l'évolution du contrôle neuromusculaire des articulateurs de la parole qu'à l'évolution anatomique de l'instrument vocal.

Sans créer de lien direct entre ontogenèse et phylogenèse, cette étude apporte des données dans lesquelles une évolution claire entre longueur de la cavité orale et de la cavité pharyngale est visible. La mise en relation de ces données anatomiques avec des données acoustiques au cours du développement permet de mieux comprendre si la taille de la cavité pharyngale est une contrainte pour la production de la parole.

Les données anatomiques permettent d'observer qu'un enfant de 3 ans possède une cavité pharyngale courte (environ 40 mm) relativement à sa cavité orale (environ 60 mm) et à la longueur totale de son conduit vocal (environ 110 mm). Or les données acoustiques tirées de la littérature [29-31] montrent qu'à cet âge, l'enfant possède un Espace Vocalique Maximal aussi large que celui de l'adulte (il est capable de produire toutes les voyelles de sa langue maternelle), et dispose également d'un inventaire phonétique important (l'enfant est capable de produire un grand ensemble de sons différents, consonnes et voyelles confondues).

Ces données anatomiques, mises en relation avec des données acoustiques, soutiennent l'hypothèse que la taille de la cavité pharyngale n'est pas une contrainte majeure pour la production de la parole, puisqu'un enfant de 3 ans (possédant une cavité pharyngale courte) est capable de produire l'ensemble des voyelles de sa langue maternelle comme le fait un adulte (possédant une cavité pharyngale importante). Cette étude apporte un argument supplémentaire à la théorie de Boë et collègues [10] soutenant que l'émergence de la production de la parole a davantage été favorisée par l'évolution des capacités de contrôle des articulateurs de la parole qu'à l'évolution anatomique de l'instrument vocal.

V - Conclusion

Cette étude, la première à présenter des mesures longitudinales et fœtales, a permis de quantifier la croissance du conduit vocal et d'en définir le profil ontogénétique. Le détail de la croissance des principales structures constitutives du conduit vocal a été présenté, ainsi que les profils et vitesses de croissance de ces structures pour les hommes et pour les femmes. A l'aide de tests statistiques, l'émergence du dimorphisme sexuel a été étudiée. Cette étude longitudinale offre de nouvelles perspectives pour étudier l'acquisition de la production de la parole en ontogenèse, non plus seulement dans le domaine acoustique, mais en tenant compte des relations entre anatomie et acoustique au cours de la croissance, et apporte un éclairage supplémentaire à la question de l'origine phylogénétique de la parole.

Remerciements

Ce travail s'inscrit dans le cadre du projet ANR *SkullSpeech*, (responsables : Pascal Perrier et Louis-Jean Boë). Nous tenons également à remercier *the American Association of Orthodontists* ainsi que Daniel E. Lieberman (*Harvard University*) concernant l'accès aux archives radiographiques. Nous tenons également à remercier Pascal Perrier (GIPSA-lab, Grenoble) pour ses conseils et critiques constructives.

Références bibliographiques

- [1] Gould SJ, Vrba ES. Exaptation; a missing term in the science of form. *Paleobiology* 1982; 81: 4-15.
- [2] Fant G. *Acoustic Theory of Speech Production*. The Hague: Mouton, 1960; 107–135.
- [3] Goldstein UG. *An Articulatory Model for the Vocal Tract of the Growing Children*. Ph.D. thesis, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, Massachusetts, 1980.
- [4] Fitch WT, Giedd J. Morphology and development of the human vocal tract. A study using magnetic resonance imaging. *J. Acoust. Soc. Am.* 1999; 106: 1511–1522.
- [5] Lieberman DE, McCarthy RC, Hiemae KM, Palmer JB. Ontogeny of larynx and hyoid descent in humans: implications for deglutition and vocalization. *Archives of Oral Biology* 2001; 46: 117–128.
- [6] Vorperian HK, Wang S, Chung MK, Schimek EM, Durtschi RB, Kent RD, Ziegert AJ, Gentry LR. Anatomic development of the oral and pharyngeal portions of the vocal tract: An imaging study. *J. Acoust. Soc. Am.* 2009; 125: 1666–1678.
- [7] Mol H. *Fundamentals of Phonetics II: Acoustical Modes Generating the Formants of the Vowel Phonemes*. Mouton, La Haye, 1970; 62–71.
- [8] Fant G. A note on vocal tract size factors and non-uniform F-pattern scalings. *Speech Transactions Laboratory Quarterly Progress and Status Report* 1966; 4: 22–30.
- [9] Lieberman P, Crelin ES, Klatt DH. Phonetic ability and related anatomy of the newborn, adult human, Neanderthal man, and the chimpanzee. *Am. Anthropol.* 1972; 74: 287–307.
- [10] Boë L-J, Heim J-L, Honda K, Maeda S, Badin P, Abry C. The vocal tract of newborn

humans and Neanderthals: Acoustic capabilities and consequences for the debate on the origin of language. A reply to Lieberman. *J. Phonetics* 2007; 35: 564–581.

[11] Angle EH. Treatment of malocclusion of the teeth and Fractures of the maxillæ, Angle's system, 6th edition. S.S. White Dental Manufacturing Company, Philadelphia, 1900; 34–44.

[12] Captier G, Boë L-J, Barbier G. Anatomie et croissance du conduit vocal du fœtus à l'enfant de 5 ans. *Biométrie Humaine et Anthropologie* 2010 ; 28 : 3-15.

[13] Scammon R, Calkins L. The Development and Growth of the External Dimensions of the Human Body in the Fetal Period. Minneapolis, University of Minnesota Press, 1929; 15–29.

[14] Guihard-Costa A-M, Larroche J-C. Fetal biometry. *Fetal Diagn. Ther.* 1995; 10: 212–278.

[15] Captier G, Faure J-M, Bäumlér M, Bonnel F, Daures J-P. Anatomy and growth of the fetal soft palate: A cadaveric study to improve its ultrasonographic observation. *Cleft Palate–Craniofacial Journal* 2008; 45 (4): 439–445.

[16] Maeda S. (1990). Compensatory articulation during speech: evidence from the analysis and synthesis of vocal-tract shapes using an articulatory model. In: Hardcastle WJ, Marchal A, editors. *Speech Production and Speech Modelling*. Dordrecht, Kluwer Academic Publishers; 1990. p. 131-149.

[17] Boë L-J, Maeda S. Modélisation de la croissance du conduit vocal. Espace vocalique des nouveau-nés et des adultes. Conséquences pour l'ontogenèse et la phylogenèse. *Journées d'Études Linguistiques. La Voyelle dans Tous ces États*, Nantes, 1998; 98–105.

[18] Meyer P. Bi-Logistic Growth. *Technological Forecasting and Social Change* 1994; 47: 89-102.

- [19] Pineau H. La croissance et ses lois. Thèse de Doctorat, Paris, 1965.
- [20] Barbier G. Croissance du conduit vocal de la naissance à l'âge adulte : étude radiographique longitudinale. Mémoire de Master en Sciences du Langage. Université Stendhal, Grenoble, 2010.
- [21] Fenart R. Crâniographie vestibulaire. Analyse morphométrique positionnelle. *Biométrie Humaine et Anthropologie* 2003 ; 21 : 231–284.
- [22] Said N. Optimisation des données biométriques de croissance relatives au conduit vocal - Dimorphisme sexuel. Mémoire de Master 2 en Modélisation et Apprentissage statistiques en Sciences Sociales, Université Pierre Mendès-France, Grenoble, 2012.
- [23] Boë L-J, Perrier P, Guérin B, Schwartz J-L. Maximal Vowel Space, 1st European Conference on Speech Communication and Technology, 1989; 2: 281-284.
- [24] Ménard L, Schwartz J-L, Boë L-J. Auditory normalization of French vowels synthesized by an articulatory model simulating growth from birth to adulthood. *J. Acoust. Soc. Am.* 2002; 111: 1892–1905.
- [25] Ménard L, Schwartz J-L, Boë L-J. Role of vocal tract morphology in speech development: Perceptual targets and sensorimotor maps for synthesized French vowels from birth to adulthood. *J. Speech Lang. Hear. Res.* 2004; 47: 1059–1080.
- [26] Ménard L, Schwartz J-L, Boë L-J, Aubin J. Articulatory-acoustic relationships during vocal tract growth for French vowels: Analysis of real data and simulations with an articulatory model. *J. Phonetics* 2007; 35: 1–19.
- [27] Barbier G. Production de la parole chez l'enfant de 4 ans : modélisation biomécanique de la langue, échographie linguale et contrôle moteur. Mémoire de Master 2 en Sciences

Cognitives, Institut National Polytechnique de Grenoble et Grenoble Universités, 2011.

[28] Fitch WT. The evolution of speech: A comparative review. *Trends Cogn. Sci.* 2000; 4: 258–267.

[29] Eguchi S, Hirsh IJ. Development of speech sounds in children. *Acta Otolaryngologica* 1969; 257: 5–51.

[30] Hodge M. A comparison of spectral–temporal measures across speaker age: Implications for an acoustic characterization of speech maturation. Ph.D. thesis, University of Wisconsin-Madison, 1989.

[31] Assmann PF, Katz WF. Time-varying spectral change in the vowels of children and adults. *J. Acoust. Soc. Am.* 2000; 108: 1856–1866.