

## ANATOMIE ET CROISSANCE DU CONDUIT VOCAL DU FŒTUS A L'ENFANT DE 5 ANS ANATOMY AND GROWTH OF THE VOCAL TRACT FROM FETUS TO 5 YEARS

GUILLAUME CAPTIER<sup>1</sup>, LOUIS-JEAN BOË<sup>2</sup>, GUILLAUME BARBIER<sup>2</sup>

### RESUME

La faculté de parler se construit durant les premières années de vie : de la phonation sans articulation (aux alentours de 2-3 mois) à la production des premiers mots (18-20 mois), en passant par le babillage (autour de 7 mois, étape clé de la production de la parole). Cette faculté se construit avec la maturation progressive de l'anatomie et grâce à celle du contrôle neuromusculaire des différents articulateurs impliqués dans la production de la parole. Pour comprendre comment se développe cette faculté, et simuler les productions acoustiques au cours de la croissance, il est d'abord indispensable de comprendre l'évolution anatomique de cet instrument.

Cette étude se propose de décrire la croissance du conduit vocal et de ses constituants, depuis la période fœtale jusqu'à 5 ans. Les données biométriques présentent l'évolution de ces structures au cours de cette période cruciale. Elles pourront servir à modéliser le conduit vocal du nouveau-né et du jeune enfant, en vue de simuler les productions acoustiques.

**Mots-clés : Conduit vocal, croissance, fœtus, nouveau-né, jeune enfant.**

### SUMMARY

*The faculty of speech in humans is emerging during the first years of life: from first vocal folds control (around 2-3 month) to first words (around 18-20 month) through canonical babbling (around 7 month), this faculty is developing thanks to the progressive maturation of the neuromuscular control of speech articulators. Prior to understand how this faculty is evolving, and to simulate the acoustic productions during ontogeny, it is crucial to understand the anatomical development of the vocal tract.*

*This study aims at observing the growth of the vocal tract and its constituents, from birth to 5 years. The biometric data presented here allow a better understanding of the evolution of these structures during ontogeny, and will be used in order to build models of newborn's and early child's vocal tracts, to simulate acoustic productions.*

**Key words : Vocal tract, growth, fetus, newborn, early child.**

### INTRODUCTION

La production de la parole est réalisée à partir d'une source sonore générée par la vibration des cordes vocales situées au niveau du larynx et d'un conduit aérien, le conduit vocal, qui s'étend de la glotte à la fente orale avec une possible dérivation par les fosses nasales (FANT 1960). La constitution du conduit vocal fait appel à plusieurs structures anatomiques de constitution et de rôles différents. La portion supraglottique du larynx intervient dans la respiration alors que le pharynx, la cavité orale, le palais, les dents et les lèvres interviennent dans l'ingestion alimentaire (préhension, déglutition) et le premier temps de la digestion (mastication, insalivation). Le pharynx et le palais mou ont un rôle supplémentaire de carrefour entre les voies aériennes et digestives. Dans la parole, ces articulateurs ont été utilisés à des fins différentes de leurs fonctions initiales. On parle alors d'exaptation, une notion introduite en phylogénèse (GOULD et VRBA, 1982). En fait, la parole est le résultat d'un remarquable bricolage (tinkering) au sens de François Jacob (JACOB, 1977) : l'utilisation d'un système respiratoire et digestif sophistiqué transformé en un instrument vocal capable de produire des sons complexes.

Le conduit vocal s'intègre dans l'architecture cartilagineuse du larynx et osseuse du crâne avec la mandibule et de la colonne vertébrale cervicale. Le son émis par les cordes vocales est transformé par les gestes des articulateurs, la langue et les lèvres essentiellement, qui modifient la forme du conduit. Chez l'enfant, le conduit vocal n'est pas homothétique de celui d'un adulte car il présente une véritable anamorphose au cours de la croissance avec une évolution différenciée de la taille du pharynx par rapport à celle de la cavité orale (LIEBERMAN, MCCARTHY et al., 2001). La période cruciale pour l'apprentissage de la parole se situe entre 7 mois et 4 ans : de l'apparition de babillage (*baba, dada...*) à la maîtrise des mots et des phrases. Jusqu'alors, le nouveau-né n'utilisait ce conduit que pour les fonctions primitives de succion-déglutition et de respiration dont la maturation fonctionnelle est un processus continu qui démarre chez le fœtus et ce poursuit chez le nouveau-né avant la naissance (MILLER, SONIES et MACEDONIA, 2003 ; DELANEY et ARVEDSON, 2008).

<sup>1</sup> Université Montpellier 1, Laboratoire d'Anatomie de Montpellier, Montpellier, F-34000, France

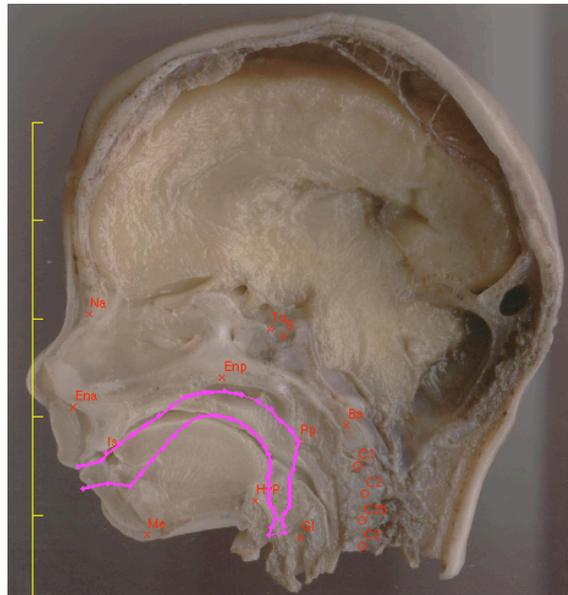
<sup>2</sup> GIPSA-lab, UMR CNRS 5216 & Grenoble Universités, Grenoble, France

L'objectif de notre étude consiste en la description biométrique de la croissance crânio-vertébrale du fœtus et de l'enfant pour déterminer un profil ontogénique dans toute sa continuité. Ces données permettront d'affiner et de calibrer les modèles de conduit vocal déjà existants (MAEDA, 1990 ; PAYAN et PERRIER, 1997) qu'ils soient géométriques ou biomécaniques. Pour comprendre l'évolution du contrôle moteur des articulateurs de la parole, les modèles de conduit vocal sont effectivement un outil de choix. Mais cette modélisation n'est possible que si l'on dispose de données morphologiques. Les données prénatales et postnatales seront comparées à deux bases de données existantes de la croissance du conduit vocal (GOLDSTEIN, 1980) et du squelette crâniofacial (FENART, 2003).

## MATERIELS ET METHODES

### LES DONNEES PRENATALES

L'étude prénatale est basée sur une série de 18 fœtus dont la conservation et la préparation ont été décrites ailleurs (CAPTIER, FAURE et al., 2008). L'acquisition des points de repères a été faite sur les coupes sagittales de 12 fœtus car la glotte n'était pas visible dans 6 cas. L'étude a été complétée par des radiographies standard de 12 hémitêtes droites et de 14 hémitête gauches pour étudier la croissance de la mandibule qui n'est pas visible sur les coupes sagittales.

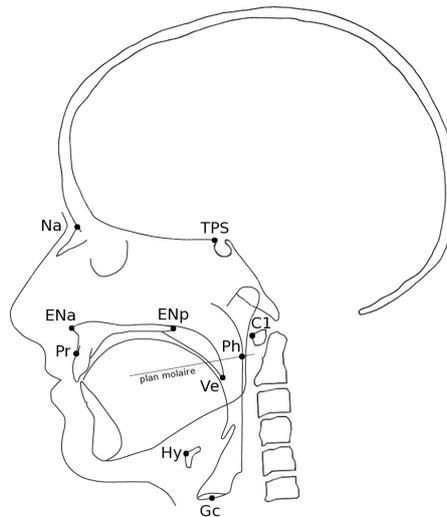


Positionnement du conduit vocal par un modèle articulatoire pour une position neutre avec le voile du palais relevé.

FIGURE 1. — Mesures effectuées chez le fœtus sur les coupes sagittales et sur la radiographie.

### LES DONNEES POSTNATALES

L'acquisition de 49 points de repères a été réalisée à partir de 966 radiographies issues des collections orthodontiques de l'Iowa, du Michigan, de l'Oregon et de Denver (pour plus de détails, cf. BARBIER, 2010). Il s'agit de radiographies céphalométriques de la tête et du cou de profil réalisées pour 68 individus suivis longitudinalement de 1 mois et 25 ans, avec 15 radiographies en moyenne par individu. Les repères osseux du crâne, de la face, de la mandibule et de la colonne vertébrale mais également les contours du palais dur, du palais mou, de la langue et de la mandibule ont été tracés selon la description de GOLDSTEIN (cf. figure 2). L'étude a été centrée sur les données de la naissance à 5 ans, ce qui correspond à la période critique de remodelage du tractus. En ce qui concerne cette période qui nous intéresse tout particulièrement, nous disposons de 227 radiographies.



Principaux points de repère utilisés sur les radiographies.

FIGURE 2. — Points de repère radiographiques.

## ANALYSE DES DONNEES

### L'optimisation des données de croissance

Les données prénatales et postnatales ont été représentées en prenant comme variable indépendante l'âge ( $t$ ). Pour chaque variable, l'optimisation la plus adaptée a été choisie. L'optimisation des données a été menée essentiellement à partir de doubles logistiques dont on connaît bien la validité pour l'étude de la croissance humaine (PINEAU, 1965, 1991 ; GOLDSTEIN, 1980).

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

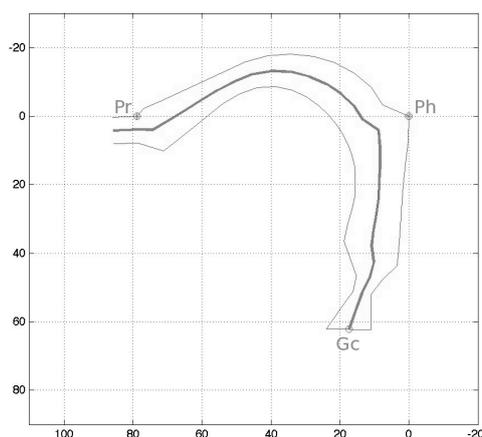
Les optimisations ont été effectuées sur les données qui couvrent la période fœtale jusqu'à 15 ans, âge à partir duquel apparaît le dimorphisme sexuel. Nous ne présentons ces optimisations que jusqu'à 5 ans.

Bien que les mesures ne soient pas effectuées sur le même matériel, les variables ont été représentées sur le même graphique.

Les données prénatales et postnatales ont été comparées aux données de croissance existantes du crâne et de la face, FENART (2003) et du conduit vocal, GOLDSTEIN (1980) et VORPERIAN et al. (2005, 2009).

### La longueur du conduit vocal

Elle correspond à la distance curviligne de la glotte aux lèvres mesurée pour une position neutre des articulateurs (ce n'est pas le cas pour les données utilisées dans cette étude). Pour en donner une estimation, on positionne un modèle du conduit vocal en prenant trois points de repère : le prosthion, le point pharyngal, et le centre de la glotte. Ce modèle de conduit vocal a été décrit par ailleurs (BOË et MAEDA, 1998, MAEDA, 1990).



Calcul de la longueur du conduit vocal à l'aide du modèle de Maeda calibré par rapport au prosthion, à la glotte et au point pharyngal, pour une position neutre des articulateurs.

FIGURE 3. — *Calcul de la longueur du conduit vocal.*

### Position de la glotte

Pour étudier l'évolution de la position verticale de la glotte par rapport à l'architecture osseuse, nous avons choisi comme référence la droite reliant le Nasion au Tubercule Pituitaire de la Selle turcique (cf. figure 2). La distance de la glotte à cette droite a été comparée à celles de la première vertèbre cervicale et de l'os hyoïde.

## RESULTATS

### DIMORPHISME SEXUEL

Le dimorphisme sexuel a été analysé à l'aide d'un test de Student, pour chaque dimension mesurée et par groupe d'âge d'un an. Aucune différence significative n'a été relevée entre 0 et 5 ans, nous avons donc regroupé les filles et les garçons pour l'étude.

TABLEAU 1. — VALEURS DE *t* DE STUDENT, POUR CHAQUE VARIABLE ET POUR CHAQUE AGE

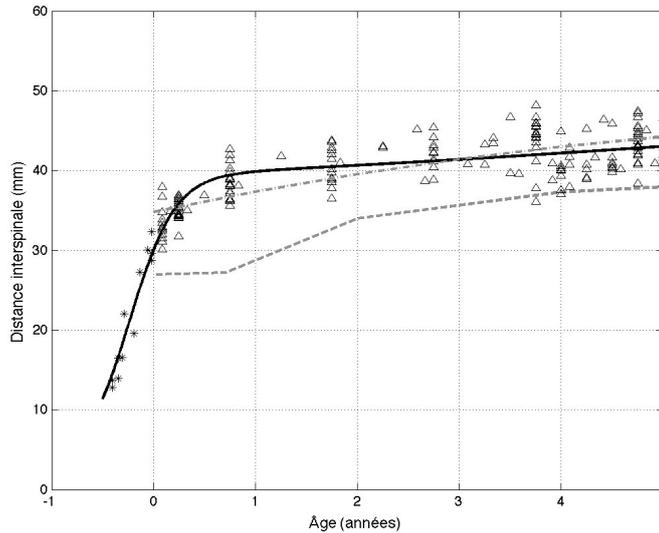
Âge (an)	0	1	2	3	4	5
Distance horizontale	0.36	2.2	1.2	1.7	1.97	2.1
Palais dur	0.3	0.97	0.98	2.25	0.48	0.1
Palais mou	0.7	0.18	1.9	0.38	0.9	0.56
Distance verticale	0.2	0.17	1.18	0.8	1.78	1.82
Longueur du conduit vocal	0.25	1.98	1.1	1.98	2.45	2.75
Degrés de liberté	53	15	14	25	51	63
Valeurs de <i>t</i> pour $p = 0.01$	2.576	2.947	2.977	2.787	2.576	2.576

Toutefois, on remarque que la mesure de la longueur totale du conduit vocal à 5 ans semble être significativement différente entre les filles et les garçons. Si l'on retourne aux données, cette différence significative est due à un seul individu, qui s'écarte de la moyenne.

## CROISSANCE DU PALAIS

### Palais dur

**Défini par la distance entre ENa et ENp**, il mesure 13 mm à 16 semaines d'aménorrhée (ci-après SA) et 30 mm en moyenne à la naissance : soit une croissance de plus du double pendant la période fœtale étudiée. Puis de la naissance à l'âge de un an, le palais dur croît de 10 mm environ. La croissance est donc encore très importante durant la première année de vie. Le palais dur mesure un peu plus de 40 mm à 5 ans. La croissance du palais dur va se ralentir à partir de la fin de la première année de vie.



Noir : nos données, fœtus (étoiles) et enfants (triangles) ; Gris : données de Goldstein et données de Fenart (légèrement inférieures).

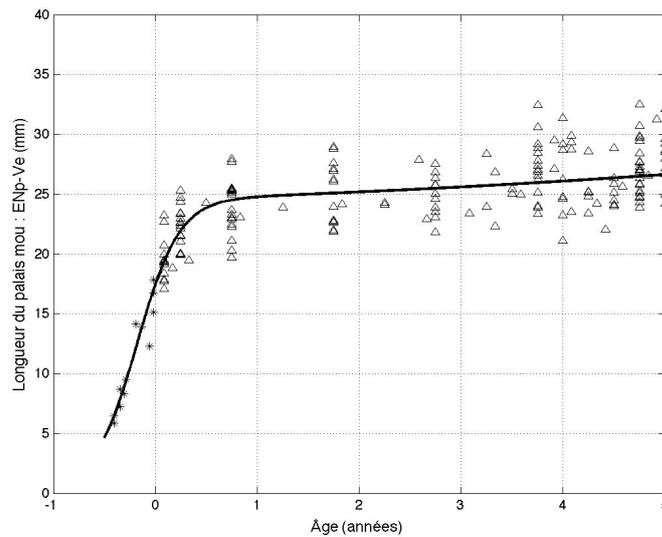
FIGURE 4. — *Croissance du palais dur.*

Les données de Fenart, de dimension plus réduite, présentent le même profil de croissance. Dans la période étudiée, les profils de croissance de Goldstein sont presque superposables. L'intégration des données périnatales et postnatales nous permet d'affiner les courbes de croissance dans cette période cruciale de développement, ce que ne permettaient pas les données rassemblées par Goldstein.

### Palais mou

**Défini par la distance entre ENp et Ve**, il présente le même type de profil de croissance que le palais dur. De 6 mm à 16 SA à 17,5 mm en moyenne à la naissance, la taille du velum a plus que triplé pendant la période fœtale. Cette distance continue d'augmenter pendant la première année de vie, passant de 17,5 à 25 mm, puis se stabilise.

Le palais mou est absent des études de FENART et al. (2003) et de GOLDSTEIN (1980). Pour VORPERIAN et al (2005), la distance curviligne du palais mou augmente de 1cm de la naissance à 7 ans. Ceci est tout à fait comparable avec la croissance observée dans cette étude.



Fœtus (étoiles) et enfants (triangles).

FIGURE 5. — Croissance du palais mou.

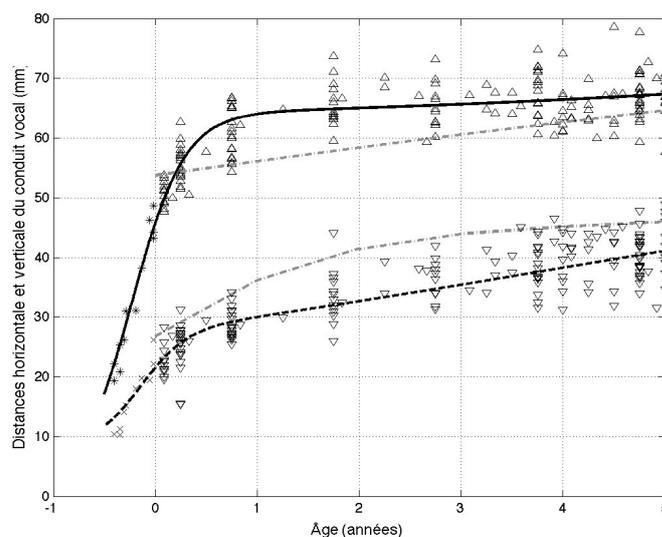
### CREISSANCE DU CONDUIT VOCAL

#### Longueur horizontale du conduit vocal

Mesurée par la distance entre Prosthion et point pharyngal, elle croît de 20 mm à 16 SA à plus de 45 mm à la naissance. Elle est également très importante durant la première année de vie, passant de 45 mm à presque 65 mm à 1 an. Puis, de 1 à 5 ans, celle-ci ralentit.

#### Longueur verticale du conduit vocal

Mesurée par la distance entre point pharyngal et le centre de la glotte, elle croît de 10 mm à 16 SA pour atteindre plus de 20 mm à la naissance. Elle atteint 30 mm à un an, et un peu plus de 40 mm à 5 ans.



Distances horizontale (trait plein) et verticale (pointillés) du conduit vocal, pour les fœtus (étoiles) et les enfants (triangles). Données de Goldstein en gris.

FIGURE 6. — Croissance des distances horizontale et verticale du conduit vocal.

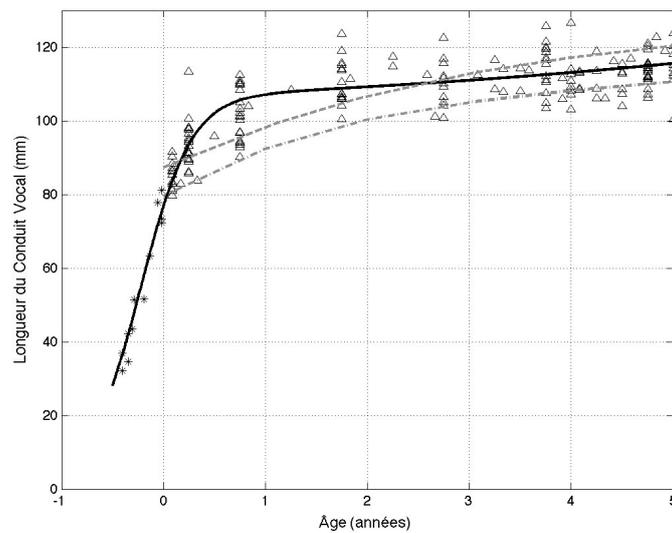
On observe que pendant la période fœtale jusqu'à la fin de la première année de vie, la croissance de la longueur horizontale est beaucoup plus importante que celle de la longueur verticale. Après un an, cette tendance s'inverse, avec une croissance plus rapide de la partie verticale.

Concernant la longueur horizontale, les données sont comparables à celles de Goldstein, mais globalement supérieures, alors que légèrement inférieures concernant la longueur verticale.

### Longueur du conduit vocal

Le conduit vocal mesure environ 35 mm à 16SA, et 80 mm à la naissance. La croissance du conduit vocal est donc particulièrement importante pendant la période fœtale ainsi que durant la première année de vie. À un an, celui-ci mesure déjà 107 mm, et environ 115 mm à 5 ans.

Les données de cette étude sont tout à fait comparables à celles de GOLDSTEIN (1980) et de VORPERIAN et al., 2005 ; 2009)

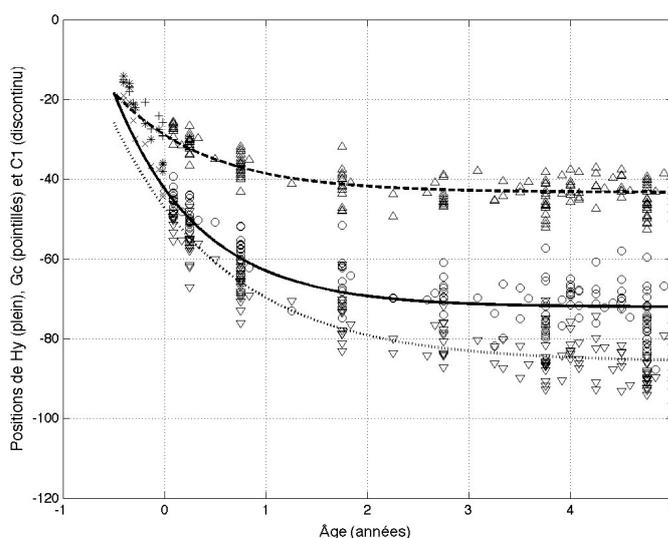


Longueur totale du conduit vocal, pour les fœtus (étoiles) et les enfants (triangles). Données de Goldstein et de Vorperian (optimisation la plus proche de la nôtre) en gris.

FIGURE 7. — Croissance de la longueur totale du conduit vocal.

### CROISSANCE ET POSITION DE LA GLOTTE

À 16 SA, C1 est à 20 mm de la droite Na - TPS, l'os hyoïde et la glotte sont à la même hauteur que C1. À la naissance, C1 est à 30 mm de la droite Na - TPS, l'os hyoïde à 38 mm et la glotte à 43 mm. Puis, à 5 ans, C1 est à plus de 40 mm de cette droite, l'os hyoïde à plus de 70 mm et la glotte à environ 85 mm. Il existe donc une importante translation verticale caudale de l'os hyoïde et de la glotte, improprement appelée descente du larynx. Ce phénomène est bien connu des études de croissance du conduit vocal (GOLDSTEIN, 1980, p. 76), avec laquelle notre étude est concordante.



Positions verticales de C1 (en pointillés ; croix droite pour les fœtus et triangles vers le haut pour les enfants), de l'os hyoïde (trait plein ; étoiles pour les fœtus et ronds pour les enfants) et de la glotte (en pointillés ; croix pour les fœtus et triangles vers le bas pour les enfants).

FIGURE 8. — Evolution des positions verticales de la glotte, de l'os hyoïde et de C1.

## DISCUSSION

Le focus de ces données sur la période périnatale et postnatale permet de mettre en évidence la non-linéarité de la croissance des parties constitutives du conduit vocal et donc de sa longueur totale. Il ne semble pas, pour ces données, exister de dimorphisme sexuel jusqu'à l'âge de 5 ans. La croissance de chaque élément constitutif du conduit vocal est importante pendant la période fœtale et durant la première année de vie. On observe une croissance importante et continue de la dimension verticale. On observe que la distance entre la glotte et l'os hyoïde augmente après 1 an, ce qui est probablement dû à la croissance du cartilage thyroïde.

La base de données de Fenart est constituée de crânes secs français du début du XX<sup>e</sup> siècle. Il s'agit donc d'un échantillon différent de celui sur lequel ont porté nos données, il est possible que cela soit la raison des différences que nous avons observées. En particulier, toutes les mesures sont légèrement supérieures dans notre étude, ce qui peut être lié à un effet de croissance séculaire (SUSANNE, et al. 1988 ; JONKE et al. 2007).

Les différences notées avec les données de Goldstein, concernant les distances horizontale et verticale du conduit vocal, sont très probablement dues au choix du point pharyngal. Celui utilisé par Goldstein, situé en regard de C1, apparaît comme un bon repère pour le conduit vocal de l'adulte. Pour le jeune enfant, le nouveau-né et le fœtus, C1 se situe en regard des fosses nasales. Nous avons donc proposé une nouvelle localisation du point pharyngal, situé sur le plan molaire (cf. figure 2), qui permet, tout au long de la croissance, de rendre compte de la dimension horizontale du conduit vocal. Ce point est situé légèrement plus bas (de 8 à 10 mm pour l'adulte) que le point adopté par Goldstein.

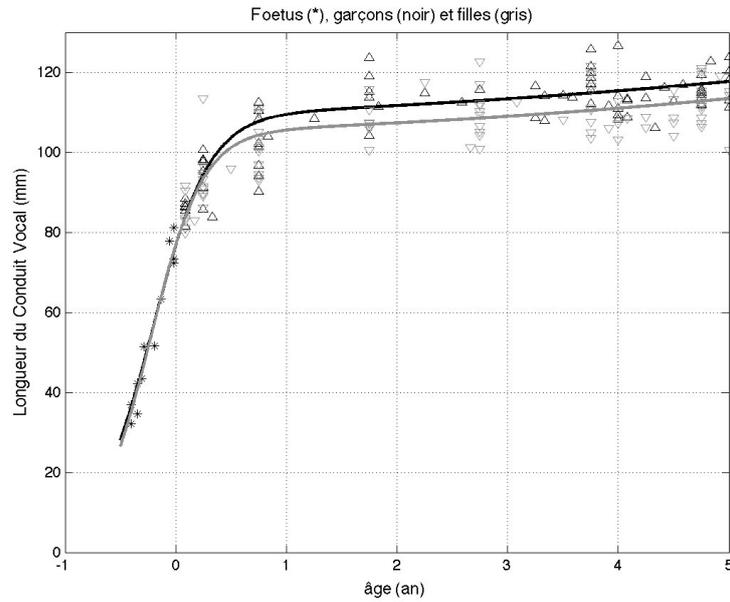
Ces données sont indispensables à la calibration précise de modèles géométriques du conduit vocal, utilisés pour la simulation du développement de la parole. Ces modèles sont cruciaux pour simuler l'évolution des productions acoustiques.

Afin de comprendre l'influence du remodelage du conduit vocal sur les productions acoustiques, mais aussi d'évaluer la maturité du contrôle neuromusculaire des articulateurs de parole, nos efforts iront vers la construction d'un modèle biomécanique du conduit vocal de l'enfant (intégrant les muscles de la langue et de la mandibule). Ce type de modèle nous informant sur les commandes motrices nécessaires à la production d'un geste articulaire donné, il rend possible l'évaluation du degré de maturité du système moteur.

Les données de GOLDSTEIN (1980) et de VORPERIAN (2009) constituent les études de référence pour la croissance du conduit vocal : elles sont les seules à couvrir la période de la naissance à l'âge adulte. De plus, l'étude de VORPERIAN 2005 apporte des précisions entre 0 et 5 ans.

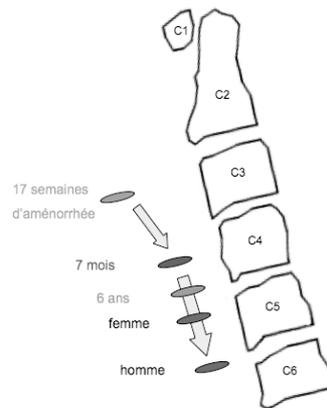
Nous apportons par rapport à ces études, davantage de données (227 sujets), ainsi que des données longitudinales, et enfin des données fœtales (12 sujets). Le profil de croissance peut ainsi être nettement affiné en ce qui concerne cette période cruciale de l'acquisition de la parole.

Or, c'est justement pendant cette période que le conduit vocal de l'enfant subit un remodelage complexe. Et pourtant, dans de telles conditions, il parvient à atteindre des cibles acoustiques stables, malgré un conduit vocal en transformation.



Croissance de la longueur du conduit vocal pour les fœtus (étoiles), pour les garçons (noir ; triangles vers le haut) et les filles (gris ; triangles vers le bas). On observe bien la proximité des données et des optimisations entre filles et garçons.

FIGURE 9. — Illustration de l'absence de dimorphisme sexuel avant l'âge de 5 ans.



Déplacement de la glotte en regard des vertèbres cervicales. Positions moyennes pour le fœtus, le bébé, le jeune enfant, la femme et l'homme adulte.

FIGURE 10. — Schématisation du déplacement de la glotte.

## BIBLIOGRAPHIE

- BARBIER, G. (2010). – Croissance du conduit vocal de la naissance à l'âge adulte : étude radiographique longitudinale. Mémoire de Master Sciences du Langage. Université Stendhal, Grenoble.
- BOË, L.J., MAEDA, S. (1998). – Modélisation de la croissance du conduit vocal. Journées d'Études Linguistiques, La voyelle dans tous ses états, Nantes, 98-105.
- BOTHOREL, A., SIMON, P. et al. (1986). – Cinéradiographie des voyelles et consonnes du français. Travaux de l'Institut de Phonétique de Strasbourg.
- CAPTIER, G., FAURE, J. M. et al. (2008). – Anatomy and growth of the fetal soft palate: A cadaveric study to improve its ultrasonographic observation. Cleft Palate-Craniofacial Journal 45(4): 439-445.
- DELANEY, A. L., ARVEDSON J. C. (2008). – Development of swallowing and feeding: prenatal through first year of life. Developmental

Disabilities Research Reviews 14(2): 105-117.

GOLDSTEIN, U.G. (1980) – An articulatory model for the vocal tract of the growing children. Thesis of Doctor of Science, MIT, Cambridge, Massachusetts.

GOULD, S.J., VRBA, E.S. (1982) – Exaptation; a missing term in the science of form. *Paleobiology*, 81, 4-15.

FANT, G. (1960). – Acoustic Theory of Speech Production. The Hague, Mouton.

FENART, R. (2003). – Crâniographie vestibulaire. Analyse morphométrique positionnelle. *Biométrie Humaine et Anthropologie*, 21, 231–284.

FITCH, W. T., GIEDD, J. (1999). – Morphology and development of the human vocal tract. A study using magnetic resonance imaging, *Journal of the Acoustical Society of America*, 106, 1511-1522.

JACOB, F. (1977). – Evolution and tinkering, *Science*, 196, 4295, 1161-1166.

JONKE, E., PROSSINGER, H., et al. (2007). – Secular trends in the facial skull from the 19th century to the present, analyzed with geometric morphometrics. *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics* 132(1), 63-70.

LIEBERMAN, D. E., MCCARTHY, R. C., HIIEMAE, K. M. et PALMER, J. B. (2001). – Ontogeny of larynx and hyoid descent in humans: implications for deglutition and vocalization. *Archives of Oral Biology*, 46, 117–128.

MAEDA, S. (1990). – Compensatory articulation during speech: evidence from the analysis and synthesis of vocal-tract shapes using an articulatory model, in W. J. Hardcastle, et A. Marchal (Ed.), *Speech production and speech modelling*, (pp. 131-149), Dordrecht, Kluwer Academic Publishers.

MÉNARD, L., J. L. Schwartz, et al. (2004). – Role of vocal tract morphology in speech development: perceptual targets and sensorimotor maps for synthesized French vowels from birth to adulthood. *Journal of Speech Language and Hearing Research* 47(5): 1059-1080.

MILLER, J. L., SONIES, B. C. et MACEDONIA, C. (2003). – Emergence of oropharyngeal, laryngeal and swallowing activity in the developing fetal upper aerodigestive tract: an ultrasound evaluation. *Early Human Development* 71(1): 61-87.

PAYAN, Y. et PERRIER, P. (1997). – Synthesis of V-V sequences with a 2D biomechanical tongue model controlled by the equilibrium point hypothesis. *Speech Communication*, 22(2–3) : 185– 205.

PERRIER, P., BOË, L.J. et al. (1992). – "Vocal tract area function estimation from midsagittal dimensions with CT scans and a vocal tract cast: modeling the transition with two sets of coefficients." *Journal of Speech and Hearing Research* 35(1): 53-67.

PINEAU, H. (1965). – La croissance et ses lois. Thèse de Doctorat ès Sciences de l'Université de Paris 307p. *Cahiers d'Anthropologie et Biométrie Humaine*, 1991, 9, 1-307.

SONDHI, M. M. (1974). – Model for wave propagation in a lossy vocal tract. *Journal of the Acoustical Society of America* 55(5): 1070-1075.

SUSANNE, C., VERCAUTEREN, M., KRASNICANOVA, H., JAIGER, V., HAUSPIE, R., BRUZEK, J. (1988). – Évolution séculaire des dimensions céphaliques. *Bulletins et mémoires de la société d'anthropologie de Paris* (5), 5-3, 151-162.

VORPERIAN, H.K., KENT, R.D., LINDSTROM, M.J., KALINA, C.M., GENTRY, L.R. et YANDELL, B.S. (2005). – Development of vocal tract length during early childhood: A magnetic resonance imaging study. *Journal of the Acoustical Society of America* 117(1), 338-350.

VORPERIAN, H.K., WANG, S., CHUNG, M.K., SCHIMEK, E.M., DURTSCHI, R.B., KENT, R.D., ZIEGERT, A.J., GENTRY, L.R. (2009). – Anatomic development of the oral and pharyngeal portions of the vocal tract: An imaging study. *Journal of the Acoustical Society of America* 125(3), 1666-1678.