

# Nouvelles pistes pour revisiter la production de la parole et son développement : données, modèles, représentation

Louis-Jean Boë<sup>1</sup>, Guillaume Captier<sup>2</sup>, Pierre Badin<sup>1</sup>, Pascal Perrier<sup>1</sup>  
Guillaume Barbier<sup>1</sup>, Antoine Serrurier<sup>3</sup>, Frédéric Berthommier<sup>1</sup>, Nicolas Kielwasser<sup>4</sup>

(1) GIPSA-lab, Grenoble (2) Laboratoire d'Anatomie, Montpellier

(3) ENSAM, Paris, (4) OsteoGraph, Cluses

prénom.nom@gipsa-lab.grenoble-inp.fr, gcaptier@free.fr

antoine.serrurier@ensam.eu, nkielwa@free.fr

## RÉSUMÉ

---

Depuis quelques années de nouvelles pistes sont explorées pour revisiter la production de la parole, son émergence et son développement. Les domaines pour lesquels il a semblé productif de croiser bases de données et modélisation concernent la génétique du développement de la tête (gènes HOX et non-HOX), du rachis cervical (C1-C7) et de l'os hyoïde, de la biométrie osseuse de la tête et du cou, de l'anatomie fonctionnelle des muscles impliqués dans production de la parole, de la phonétique du développement, de la modélisation du conduit vocal (géométrique et biomécanique) et de la physiologie de la déglutition. Pour pouvoir appréhender ces nouvelles pistes dans leur spécificité, un effort important de visualisation a été fait grâce à l'utilisation de la synthèse numérique dynamique appliquée à la croissance de l'architecture osseuse, du cerveau et du conduit vocal.

## ABSTRACT

---

### **New tracks to revisit speech production and speech development: data, models and representation**

Since several years new tracks are explored to revisit speech production, emergence and development. Data bases and modeling concerning genetics (HOX and noHOX genes), biometrical data of head, hyoid bone and cervical vertebrae (C1-C7), muscle anatomy, developmental phonetics, vocal tract modeling (geometrical and biomechanical), and swallowing physiology have been interwoven in order to provide new insights on speech production. This research integrates, along all the steps, the realization of computerized dynamic graphics and video illustrations. They will provide help for speech researchers, physicians and speech therapists.

---

MOTS-CLÉS : production et modélisation articulatoire, génétique, anatomie, biométrie, déglutition  
KEYWORDS : speech production and articulatory modeling, genetics, anatomy, biometry, swallowing

---

## 1 Le cadre

Depuis une dizaine d'années de nouvelles pistes sont explorées pour revisiter la production de la parole, son émergence et son développement. Un groupe pluridisciplinaire couvrant les domaines de la génétique, de l'anatomie, de la phonétique, de la modélisation a pu se constituer grâce à plusieurs projets nationaux et

européens (OHLL, OMLL, ANR SkullSpeech, The Hand to Mouth Research Network). Les domaines pour lesquels il semble productif de croiser données et modélisation concernent :

- la génétique du développement osseux (de l'embryon au fœtus, de la naissance à l'âge adulte), la biométrie physique du crâne de la face et du rachis tout au long de l'ontogenèse pour pouvoir disposer d'une vue d'ensemble dans la continuité ; une modélisation de cette croissance ;
- l'anatomie comparée des muscles impliqués dans la production de la parole et particulièrement celle de la langue permettant une modélisation biomécanique comparée de l'adulte et de l'enfant ;
- la déglutition qui mobilise en commun avec la production de la parole des éléments du système nerveux central et périphérique et tout un ensemble de muscles.

## 2 Les nouvelles pistes

Dans les manuels de référence consacrés à la production de la parole, le conduit vocal est décrit comme un tube modelé par la disposition des articulateurs, pour l'essentiel, par celle de la langue et des lèvres. Il n'est que peu fait référence à la mandibule (pourtant cruciale notamment pour le babillage) et que très rarement à l'architecture osseuse crano-cervico-faciale, dans laquelle et par rapport à laquelle, ce conduit est disposé. Il est important de suivre en détail la croissance de repères anatomiques osseux de la tête et du cou, tout au long de l'ontogenèse (de la gestation à l'âge adulte) pour en analyser les évolutions et en induire les conséquences pour la configuration conduit vocal, son contrôle et ses potentialités acoustiques ; et cela d'autant plus que le conduit vocal d'un nouveau-né n'est pas du tout l'homothétique de celui d'un enfant, d'un(e) adolescent ou d'un(e) adulte. La croissance du conduit vocal dépend essentiellement de celle du cerveau et du crâne, de la face et des vertèbres qui s'accompagne de la rotation basicranienne (du sphénoïde et du basi-occipital). Elle est orchestrée par la biologie du développement génétique.

### 2.1 Génétique

Les bases de données céphalométriques et orthodontiques (AAO) délivrent, tout au long de l'ontogenèse, les coordonnées 2D et 3D de points de repères anatomiques et géométriques, mais ces informations ne sont pas suffisantes pour interpréter, dans son ensemble, la morphogenèse de la tête et du cou et surtout pour en percevoir le fil directeur. Les avancées de la génétique, au cours de ces vingt dernières années, ont débouché sur une nouvelle approche permettant de rendre lisible ce qui n'était que visible de la croissance osseuse de la tête et du cou.

À partir des 15-20 premiers jours qui suivent la fécondation (Couly *et al.*, 1998), les gènes du développement, ou gènes homéotiques, sont responsables de la construction embryonnaire (figure 1a) et déterminent l'organisation antéropostérieure et dorso-ventrale de l'embryon, la mise en place de la base du crâne, de la tête et du corps. La synthèse de ce développement (Benoît, 2001) nous permet de disposer des grandes lignes de l'ossification de la tête, de l'os hyoïde, et du cou. Les gènes non HOX sont

responsables de l'ossification membranaire de la partie antérieure et supérieure de la tête et de la partie antérieure de la mâchoire ; les gènes HOX de l'ossification enchondrale de la partie postérieure du crâne (l'occipital), de la base du crâne, de l'os hyoïde, et du rachis cervical (les vertèbres C1 à C7). L'expression de ces gènes du développement architecture ainsi deux champs situés de part et d'autre d'une limite passant dans le plan sagittal médian par le point lambda (à la rencontre des sutures interpariétale et occipito-pariétales), la crête synostotique antérieure du sphénoïde, la projection de l'insertion inférieure (la lingula) du ligament sphéno-mandibulaire et le corps de l'os hyoïde (figure 1b). Pour une population d'enfants autour de 6 ans on retrouve bien, sur les structures osseuses de la tête et du cou, la partition entre l'influence des gènes HOX et non HOX ; avec, comme conséquence, la possibilité d'associer le déplacement ontogénétique vertical de repères du domaine HOX (par exemple celui de l'os hyoïde avec celui des vertèbres cervicales et de la partie postérieure de la mandibule).

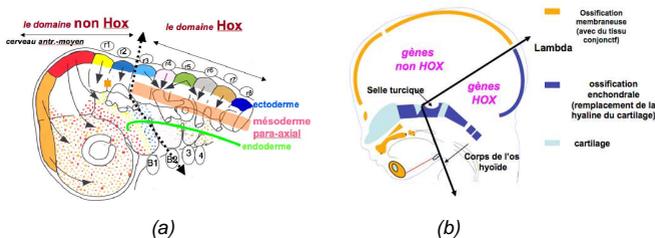


FIGURE 1 – (a) : L'expression des zones des gènes HOX non HOX. Représentation schématique de la migration et de la destination des cellules des crêtes neurales (d'après Charrier, Creuzet, 2007) ; (b) : zones d'influence des gènes HOX et non HOX sur les structures osseuses de la tête et du cou (d'après R. Benoît, 2001).

## 2.2 Biométrie des parties osseuses de la tête et du rachis cervical

Les données de la génétique rendent ainsi nettement plus lisibles et compréhensibles l'évolution de la structure osseuse du crâne, de la face et du rachis et, par cela même, celle du conduit vocal ; d'autant plus que l'on dispose maintenant des données de biométrie crânienne tout au long de l'ontogénèse. Ainsi Fenart (2003) permet de suivre les coordonnées 3D de points de repère couramment utilisés en anthropologie physique. Il s'agit de 142 marques pour le crâne, dont 18 pour la mandibule, avec 6 incidences principales (latérale, médiane, antérieure, postérieure, supérieure et inférieure) et pour 9 âges ontogéniques (fœtus de 5 et 7 mois, à la naissance, pour 8 mois et ½, 2 ans, 4 ans, 8 ans et ½, 14 ans et pour l'adulte (figure 2). Il faut noter que le crâne ne présente pas de dimorphisme sexuel marqué. On peut observer et quantifier (en composantes principales) un remodelage du crâne selon deux modes : (1) une expansion radiale, qui reflète le phénomène de croissance globale ; (2) une rotation de la partie occipitale et de la base du crâne (la rotation basicranienne) et qui est essentiellement due à la poussée du cerveau.

L'expansion radiale présente une forte hétérochronie : à quatre ans la taille de la boîte crânienne et du cerveau de l'enfant a atteint 80% de celle d'un adulte, alors qu'il faudra plus de 16 ans pour que la face ait terminé sa projection en avant et en bas et pour que la mandibule ait achevé sa croissance. Or le larynx est suspendu à la mandibule dans le hamac digastrique : la dimension verticale du conduit vocal va donc mettre près d'une vingtaine d'années pour atteindre sa configuration d'adulte. L'espèce humaine a donc favorisé une maturation du cerveau, beaucoup plus qu'elle n'a fait porter les premiers efforts de la croissance sur l'appareil masticatoire.

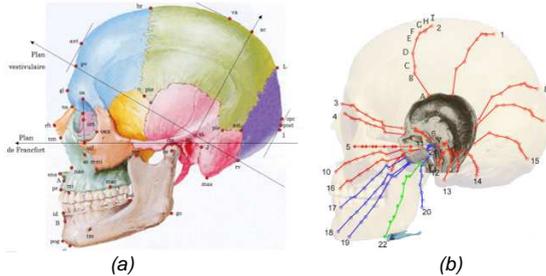


FIGURE 2. (a) Des points de repère de la base de données de Fenart (vue sagittale). (b) Leur déplacement ontogénétique pour 9 stades (de A à I) : pour des fœtus de 5 et 7 mois, à la naissance, à 8 mois ½, 2 ans, 4 ans, 8 ans ½, 14 ans et pour l'adulte (film OsteoGraph).

L'anatomie des structures osseuses et des parties molles qui délimitent et constituent le conduit vocal est bien connue pour l'adulte, l'adolescent et l'enfant, mais nettement moins décrite pour le nouveau-né et le fœtus. Les principales différences entre un fœtus de 5 mois et un adulte (Barbier, 2010 ; Captier *et al.*, 2011) se caractérisent par (figure 3) :

- la rotation basicranienne, due à la poussée du cerveau, qui peut être spécifiée par une diminution de l'angle sphénoïdal qui passe de 135° à 110° (nasion – selle turcique – basion) ;
- l'abaissement du palais dur par rapport à la base du crâne (le basion), dû à l'augmentation de la dimension verticale du maxillaire ;
- le déplacement antéro-postérieur du corps de la langue qui est associé à un rapprochement de la paroi pharyngale vers le rachis cervical ;
- un remodelage très important de la mandibule avec une diminution de l'angle gonionique, l'apparition du menton, la verticalisation du ramus et son rapprochement vers le rachis cervical ;
- le déplacement vertical de l'os hyoïde et du larynx, dû pour l'essentiel à la morphogenèse de la mandibule : à 5 mois les cordes vocales sont au niveau de la troisième vertèbre cervicale C3, pour une femme au niveau de C5 et pour un homme entre C5 et C6.

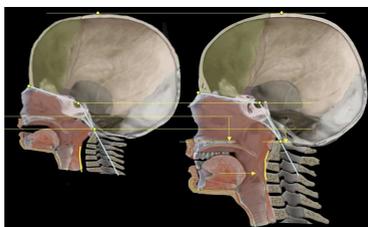


FIGURE 3. Les principales modifications du crâne qui déterminent celles du conduit vocal, du fœtus à l'âge adulte (homme) : diminution de l'angle sphénoïdal, déplacement du palais vers le bas, à hauteur du basion, rapprochement de la paroi pharyngale vers le rachis (tiré du film OsteoGraph croissance du fœtus de 5 mois à l'âge adulte).

## 2.3 Données anatomiques du conduit vocal

### 2.3.1 Suivi longitudinal de la croissance

Les bases de données de l'American Association of Orthodontist (AAO) ont constitué pour nous une source majeure. Ces archives radiographiques ont toutes été constituées par des orthodontistes américains dans le but d'effectuer une étude longitudinale concernant la dentition. Ces corpus radiographiques offrent les téléradiographies de profil de la tête et du cou de 68 individus leucodermes, 33 femmes et 35 hommes, suivis longitudinalement entre 1 mois et 25 ans avec en moyenne 15 radiographies par individu, pour un total de 966 radiographies triées par sexe, par âge et par classe dentaire. Ces archives permettent non seulement de mesurer des distances et des angles entre des points de repères anthropologiques et d'observer l'évolution moyenne de ces mesures au fil de la croissance, mais elles permettent également le suivi longitudinal de l'évolution de ces mesures chez un seul et même individu (figure 4). Ceci permet de comparer les profils de croissance des différentes parties constitutives du conduit vocal chez plusieurs individus, et de montrer ainsi l'importance de la variation interindividuelle. La taille conséquente de ces 4 archives regroupées permet également d'offrir des valeurs moyennes solides et d'observer la dispersion pour chacune des mesures effectuées.

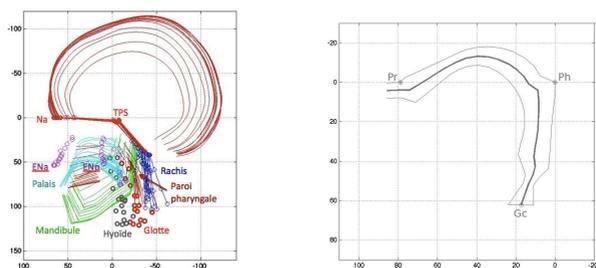


FIGURE 4. Croissance longitudinale mesurée sur un individu (à gauche) ; calage du conduit vocal sur le prosthion, le point pharyngal et la glotte (à droite).

Nous présentons ici les résultats de l'estimation de la longueur du conduit vocal. Les travaux sur la croissance (Pineau, 1965 ; Goldstein, 1980) montrent que certains paramètres sont optimisables par une double logistique (sigmoïde) correspondant à la croissance fœtale et à l'adolescence (figure 5). C'est le cas pour la longueur du conduit vocal. Nous pouvons ainsi modéliser la croissance du conduit vocal à partir de ces données (figure 6).

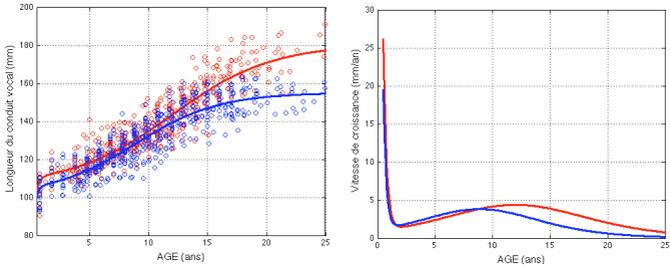


FIGURE 5. Pour 35 sujets masculins (en rouge) et 33 sujets féminins (en bleu), optimisation de la longueur du conduit vocal par une double logistique (à gauche) ; dérivées analytiques présentant la vitesse de croissance : maximale à la naissance puis après une très nette décroissance présentant l'effet de l'adolescence.

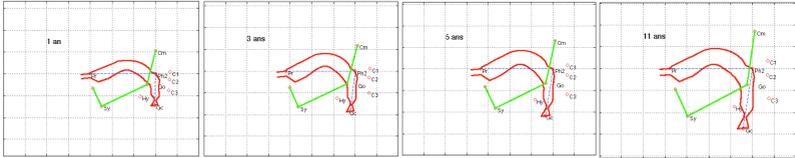


FIGURE 6. Modélisation de la croissance du conduit vocal à partir des radiographies de l'AAO (garçons de 1 an, 3 ans, 5 ans et 11 ans).

**2.3.2 Croissance et fibres musculaires**

Sur le plan musculaire, le remodelage de toute la structure osseuse du crâne de la face et du rachis provoque une relocalisation de l'ensemble des muscles de la langue avec des différences de volume importantes et des variations très nettes pour la longueur et l'angulation du styloglosse (figure 7), ce qui ne sera pas sans conséquences sur son recrutement (pour la voyelle [u] ou la consonne [k] par exemple).

L'organisation des fibres musculaires de la langue ne montre pratiquement aucune différence avec l'âge (figure 8). On dispose d'un modèle biomécanique du conduit vocal d'un adulte (Payan et Perrier, 1997), que nous avons adapté à la morphologie d'un enfant (figure 9).

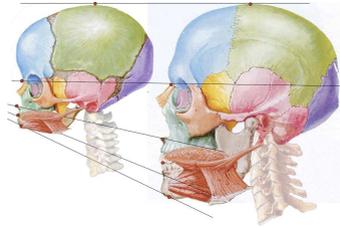


FIGURE 7. Modifications de la face et de la mandibule qui entraînent un remodelage de la morphologie des muscles de la langue et notamment de l'implantation et de la direction des fibres musculaires du styloglosse pour un nouveau-né et un adulte.

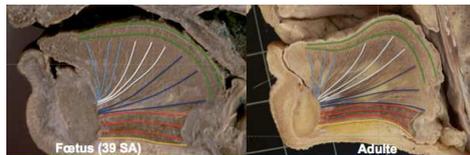


FIGURE 8. Fibres musculaires intrinsèques de la langue d'un fœtus de 39 semaines d'aménorrhée et d'un adulte.

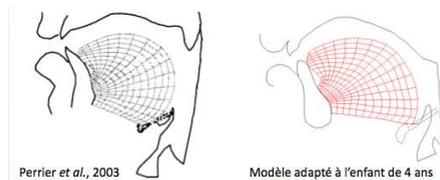


FIGURE 9. Adaptation du modèle biomécanique 2D de la langue de Perrier *et al.* à un enfant de 4 ans : l'orientation des fibres est respectée.

### 2.3.3 Les gestes linguaux de déglutition

Dès la naissance le nouveau-né déglutit du liquide (il avait déjà commencé durant la période fœtale). Pour accomplir cette fonction physiologique il déplace une ou deux zones de fermeture des lèvres jusqu'au pharynx. Il est donc capable de réaliser des gestes d'occlusion d'avant en arrière, tout au long du conduit vocal. Les premiers résultats qui mettent véritablement en évidence le recouplement de ces gestes avec ceux de la parole datent de 2002 (Hiimae *et al.*, 2002). Dans une autre étude (Serrurier *et al.*, 2012) deux modèles articulatoires ont été élaborés pour chacune des activités. Celui de mastication-déglutition se révèle plus général que celui de production de parole : il permet de reproduire, avec une bonne précision (erreurs inférieures au mm), non seulement les gestes de mastication-déglutition mais aussi ceux de parole. On peut faire l'hypothèse qu'au cours de la phylogenèse et de l'ontogenèse la parole a été et est acquise à partir d'une spécialisation des gestes de mastication-déglutition, mais aussi une réorganisation de leur contrôle.



FIGURE 10. Cinéradiographie d'un nouveau-né déglutissant du lait baryté (d'après le service d'ORL pédiatrique du CHU de la Timone, Marseille, Dr. D. Robert). Le crâne, la mandibule et la langue ont été reconstruits par OsteoGraph. En tenant compte de la tétine du biberon on peut considérer que le nouveau-né déplace un lieu d'occlusion des lèvres au palais et au velum (et jusque dans le pharynx), les trois lieux universels des plosives (Schwartz *et al.*, 2012).

## Remerciements

Ils s'adressent à Jean-Luc Schwartz, Roland Benoît, Jean Granat, Jean-Louis Heim, Alain Froment, Daniel Lieberman (AAO) et au Dr. Danièle Robert. Financements : OHLL *Origine de l'Homme du Langage et des Langues* ; OMLL *Origin of Man Language and Languages*, European Science Foundation, EUROCORES program ; *The Hand to Mouth Research Network*, European commission, NEST initiative ; *SkullSpeech*, projet ANR blanc.

## Références

- BARBIER, G. (2011) *Production de la parole chez l'enfant de 4 ans*. Master Sc. Cognitives, Univ. Grenoble.
- BENOÎT, R. (2001) Development biology, craniofacial genetics. *Edgewise J.*, 44, 9-40.
- BOË, L.J. *et al.* (2011) L'émergence de la parole: aspects historiques et épistémologiques d'une nouvelle réarticulation. *Faits de Langue* 37, 15-67.
- CAPTIER, G. *et al.* (2011) Anatomie et croissance du conduit vocal du fœtus à l'enfant de 5 ans. *Biométrie Humaine et Anthropologie* 28, 3-4, 65-73.
- CHARRIER, J.B., CREUZET S. (2007) Embryologie de la face et dysplasies otomandibulaires. *Orthodontie Française* 78, 7-24.
- GOLDSTEIN, G. (1980) *An articulatory model for the vocal tract of the growing children*. MIT PhD Thesis.
- HIEMAE, K. *et al.* (2002) Hyoid and tongue surface movements in speaking and eating. *Archives of Oral Biology* 47, 11-27.
- PAYAN, Y., PERRIER (1997). Synthesis of V-V sequences with a 2D biomechanical tongue. *Speech Communication* 22, 2-3, 185-205.
- SCHWARTZ, J.L. *et al.* (2012) Grounding stop place systems in the perceptuo-motor substance of speech: On the universality of the labial-coronal-velar stop series. *J. of Phonetics*, 40, 20-36.
- SERRURIER, A. *et al.* (2012) Comparative articulatory modelling of the tongue in speech and feeding. *J. of Phonetics* (in revision).
- PINEAU, H. (1991) La croissance et ses lois. *Cahiers d'Anthropologie et Biométrie Humaine*, 9, 1-307.