

La parole à la portée du conduit vocal de l'homme de Neandertal. Nouvelles recherches, nouvelles perspectives

Jean-Louis Heim^{a,*}, Louis-Jean Boë^b, Christian Abry^b

^a Musée de l'Homme, 17, place du Trocadéro, 75016 Paris, France

^b Institut de la communication parlée, CNRS UMR 5009, INPG/Université Stendhal, BP 25, 38040 Grenoble cedex 9, France

Reçu le 14 mai 2001 ; accepté le 28 janvier 2002

Présenté par Yves Coppens

Abstract – Neandertal vocal tract adequate for speech. New investigations, new prospects. Investigations about the origin of articulated language result in different interpretations dealing with the phonetic capacity of our ancestors, namely after the discovery of the Neandertals. According to anatomic arguments now called to question, principally the position of the larynx as regard to the basis of skull, some authors claimed that these fossil humans could not be endowed with speech. From a new reconstruction of the estimated position of the larynx and the vocal tract, articulatory simulations were undertaken in order to propose some potential vocalic [i a u] prototypes for Neandertals. And we can show Neandertals could pronounce vowels as differentiated as those of modern humans. *To cite this article: J.-L. Heim et al., C. R. Palevol 1 (2002) 129–134.* © 2002 Académie des sciences / Éditions scientifiques et médicales Elsevier SAS

vocal tract / larynx / speech / acoustic simulation / Neandertals

Résumé – Les recherches consacrées à l'origine du langage articulé ont fait l'objet d'interprétations diverses concernant les aptitudes phonatoires de nos lointains ancêtres, notamment après la découverte des hommes de Neandertal dès 1856. Certains auteurs ont cru affirmer, sur des bases anatomiques aujourd'hui remises en question, et principalement la position du larynx par rapport à la base du crâne que ces Hommes fossiles ne pouvaient être doués de la parole. À partir d'une nouvelle reconstruction de la position estimée du larynx et du conduit vocal, nous avons entrepris des simulations articulatoires pour proposer des prototypes vocaliques [i a u] potentiels pour les hommes de Neandertal. Ainsi, nous pouvons montrer que, quelle que soit la hauteur du larynx, les néandertaliens avaient pu produire des voyelles aussi différenciées que celles de l'Homme moderne. *Pour citer cet article : J.-L. Heim et al., C. R. Palevol 1 (2002) 129–134.* © 2002 Académie des sciences / Éditions scientifiques et médicales Elsevier SAS

conduit vocal / larynx / langage / simulation acoustique / Néandertaliens

Abridged version

Since Lieberman and Crelin postulated the theory that Neandertals were a speechless species, their speech capability has been a subject to controversies for over 30 years, and remains as an unresolved question. These authors claimed that the development of a high laryngeal position during evolution and human growth were necessary conditions for having a vowel space large enough to re-

alise the vocalic contrasts necessary for speech. Moreover Neandertals, unlike newborn infants, did not possess this anatomical base and therefore could not speak, presumably causing their extinction. This position has been obtained from Boule's former reconstruction and from corresponding casts, which did not display the correct reconstruction and position of the landmarks. In this study, we refute the articulatory and acoustic arguments developed by Lieberman and Crelin in their theory.

* Correspondance et tirés à part.
Adresses e-mail : heim@mnh.fr (J.-L. Heim), boe@icp.inpg.fr (L.-J. Boë), abry@icp.inpg.fr (C. Abry).

Honda and Tiede [15] showed that dimensions of the oral cavity is correlated to the position of the larynx, which could allow us to reconstruct the position of the larynx of fossil populations. So, it has been possible to define an index using the length of the vocal tract and the height of the larynx. The measures were established on adults from IRM images of the vocal tract in rest position. To be able to better understand the palaeontological genesis of the human phonetic capacity, we can reconstruct soft tissue landmarks of the skull and the mandible from nasion, gnathion (or pogonion) and basion by adding a corrective index. Quantifying the vocal tract geometry by a *Larynx Height Index* (LHI) corresponding to the *ratio* of the length of the pharyngeal cavity to the length of the oral cavity, and using a database of biometric data (modern humans, Egyptian and Amerindian skulls and data from the Neandertal skulls from La Chapelle-aux-Saints and La Ferrassie 1), we show that the estimated laryngeal position for these two Neandertals is similar to that of modern man variations. Due to the increase in oral cavity length caused by the facial elongation, the LHI of these two Neandertals corresponds to that of a modern female adult or child.

Using an anthropomorphic articulatory model, we introduce variations of the LHI corresponding to that of a typical vocal tract for a newborn infant, a child, a female adult, and a male adult. We show that the potential maxi-

mal vowel spaces corresponding to these LHI variations do not exhibit any significant differences.

It appears that both adult Neandertal skulls possess a vocal tract morphologically similar to that of modern humans, with a larynx situated at the same height in spite of the maxillary length. Given that some differences in the index between length and height of the vocal tract (connected to the position of the pharynx) introduce only simple frequential gaps without modifying structurally, for all that, the acoustic space of speech sounds, it is reasonable to assume that Neandertals had a vocal tract adequate for speech. We therefore infer that Neandertal man could have had a vowel space not smaller than that of a modern human, and we propose vowel simulations to corroborate this hypothesis. Our study is strictly limited to morphological and acoustic aspects of the vocal tract, and we cannot therefore offer any definitive answer to the question as to whether Neandertals actually spoke or not. However, we do feel safe in saying that Neandertals were not morphologically handicapped for speech. A low larynx (and large pharynx) cannot be considered to be the ‘anatomical basis’ for speech. There is no reason to think that a lowering of the larynx and an increase in pharynx size constitute necessary evolutionary pre-adaptations for speech.

Au cours du XX^e siècle, les débats sur l’origine du langage se sont développés à partir des réflexions de naturalistes et biologistes, de neuro-anatomistes, d’anthropologues et de philosophes, les linguistes s’interdisant, dans leur grande majorité, d’y participer (cf. les statuts de 1866 de la Société de linguistique de Paris). Les controverses avaient débuté dès 1856, avec la découverte de l’homme de Neandertal et celle d’autres sujets, notamment l’homme de La Chapelle-aux-Saints (Corrèze), dont la description de Marcelin Boule [8–10] a longtemps servi de référence.

On trouve maintes fois citée et largement diffusée la thèse de Lieberman et Crelin (L&C) [16], selon laquelle la production de la parole n’est devenue possible au cours de l’évolution que grâce à une flexion suffisante de la base du crâne, s’accompagnant d’un abaissement du larynx, en regard de la quatrième vertèbre cervicale pour un homme, avec pour conséquence une augmentation du volume de la cavité pharyngée. C’est à cette condition que l’espace acoustique des sons serait potentiellement assez étendu pour réaliser les contrastes vocaliques universels de type [i a u], quasiment présents dans toutes les langues du monde. L’acquisition de cette base anatomique aurait été la condition nécessaire (associée à des développements corticaux et cognitifs importants) pour que nos ancêtres puissent articuler les sons de la parole. Selon cette thèse, les néandertaliens ne pos-

sédaient pas cette base anatomique, ils ne pouvaient donc pas parler, ce qui a vraisemblablement entraîné leur disparition. Le nouveau-né humain, qui présente un larynx en position haute, ne peut, pas plus que le singe, produire de voyelles. Au cours de la croissance, son larynx s’abaisse progressivement et, à partir d’un an, le pharynx atteint un volume suffisant pour que le jeune enfant commence à différencier [i a u], les voyelles à contraste maximal. Cette croissance du conduit vocal, favorisant davantage le pharynx que la cavité buccale, reflète, d’après L&C, la phylogenèse de la parole d’*Homo sapiens*. Cette base anatomique permettrait d’opposer, d’une part, le singe, le néandertalien et le nouveau-né et, d’autre part, l’Homme moderne, le seul capable de parler.

Les recherches que nous avons reprises sur cette question ont abouti à des résultats différents, compte tenu du fait que les données de L&C présentaient de sévères lacunes.

Tout d’abord, le moulage du crâne de La Chapelle-aux-Saints, sur lequel reposait leur théorie, était celui réalisé par Boule et Papoint peu après la découverte et reflétait les idées alors en vigueur sur la position supposée intermédiaire entre le singe et l’homme ; la position du larynx apparaissait nettement trop haute. Aussi, la démonstration de L&C sur le statut des néandertaliens en fonction de cette base anatomique

et sur la génération potentielle des voyelles s'avère aujourd'hui obsolète.

En effet, Boule ne disposait d'aucun élément de comparaison pour reconstituer la base du crâne. Aussi, pour la rendre compatible avec la position du corps qu'il supposait fléchie, il plaça le centre de gravité de la tête trop en avant, en donnant au basion et au trou occipital une position exagérément reculée. La nouvelle reconstitution proposée par l'un de nous [12, 13] a rétabli des relations cranio-faciales plus conformes à la réalité anatomique, selon lesquelles la position de la tête et de la base du crâne au-dessus de la colonne vertébrale ne diffèrent guère fondamentalement de celle de l'homme moderne. Autrement dit, le larynx du néandertalien devait, selon toute vraisemblance, occuper la même position que chez nous.

Par ailleurs, même si le néandertalien avait un larynx en position haute (ce qui ne semble pas être le cas) et donc un pharynx peu volumineux, il aurait très bien pu produire les trois voyelles [i a u] tout aussi facilement que les conduits vocaux des femmes et des enfants.

Enfin, les fonctions d'aire uniques de [i a u] sur lesquelles repose la simulation acoustique ne sont pas acceptables pour générer des contrastes vocaliques maximaux. Dans le raisonnement de L&C, on pourrait même relever avec Pinker [22, p. 352] un quatrième biais linguistique : « Quoi qu'il en soit, un langage, avec un petit nombre de voyelles, peut rester très expressif ; nous ne pouvons donc pas conclure qu'un hominidé doté d'un espace vocalique restreint ne possédait guère de langage. »

Un autre élément anatomique vient confirmer notre point de vue, à savoir la découverte en 1985 à Kébara (Israël) d'un premier os hyoïde néandertalien, parfaitement conservé. Son identité morphologique et dimensionnelle avec celui de l'homme moderne, ainsi que la disposition des insertions musculaires de la mandibule, ont conduit Arensburg et al. [1, 2] à la même conclusion que Heim : « *there has been little or no change in the visceral skeleton (including the hyoid [...] and inferentially the larynx) during the past 60 000 years of human evolution.* »

Récemment, Honda et Tiede [7] ont proposé une nouvelle méthode pour caractériser globalement la proportion entre dimension antéro-postérieure et pharyngale du conduit vocal. L'index de la hauteur du larynx (LHI *Larynx Height Index* = LH/PD), c'est-à-dire le rapport entre la dimension verticale (LH *Larynx Height*) et la dimension antéro-postérieure du conduit vocal (PD *Palatal Distance*), est évalué à partir de mesures relevées par IRM sur les parties osseuses du crâne et sur les parties molles du conduit vocal. En prolongeant cette approche, Heim et al. [14] ont montré qu'il est possible de prédire la position du larynx à partir de la seule architecture crâ-

nienne et mandibulaire, en utilisant un repère nasion–gnathion–basion et un indice correcteur, établi d'après la moyenne des populations modernes considérées, pour tenir compte des parties molles. Les données ont été analysées sur deux crânes néandertaliens (La Ferrassie 1 et La Chapelle-aux-Saints) à partir de radiographies de momies et de mesures crâniennes (adultes et enfants) provenant d'Égypte, d'Amérique et de sujets contemporains (hommes, femmes et enfants). Les résultats montrent que la valeur du LHI des deux néandertaliens se situe dans les limites des valeurs actuelles. Plus précisément, on constate qu'ils ont un LHI correspondant à celui d'une femme et d'un enfant moderne. Ceci est dû au fait que, bien qu'ils aient un larynx dans la même position qu'un homme moderne, la longueur antéro-postérieure de leur face (valeur importante de PD) entraîne un abaissement de leur valeur de LHI. Le LHI est donc un important paramètre articulatoire, puisqu'il reflète à la fois des différences de croissance de la naissance à l'âge adulte, des différences liées au sexe (homme/femme) et des différences entre *Homo sapiens* et le néandertalien.

Tout important qu'il soit pour caractériser la morphologie et par conséquent le contrôle du conduit vocal, ce paramètre a peu d'influence sur la réalisation des contrastes vocaliques maximaux comme ceux de [i a u], dans la mesure où la gestuelle articulatoire permet de compenser ces différences de rapport entre les dimensions du conduit vocal.

Nous avons mené des simulations articulatoires et acoustiques du conduit vocal pour prédire les contrastes vocaliques maximaux correspondant à différentes valeurs du LHI et proposer des prototypes vocaliques [i a u] potentiels pour les hommes de Néandertal. Une description détaillée du modèle articulatoire [5, 18] et de sa version *Variable Linear Acoustic Model* (VLAM) permet d'intégrer des valeurs différentes de l'indice de hauteur du larynx (LHI) [4, 5]. Le modèle génère la coupe sagittale d'un conduit vocal à partir de huit paramètres : deux pour les lèvres, un pour la mâchoire, trois pour la langue, un pour la position du larynx et un pour fixer le LHI. Il ne restitue que le contour des parties molles du conduit vocal et ne permet donc pas de retrouver exactement les mêmes points de repère que ceux utilisés par Honda et Tiede ou Heim et al. Pour proposer, avec le modèle, un rapport voisin du LHI, nous avons retenu les incisives, un point de la paroi pharyngale et la position de la glotte (Fig. 1). Pour le néandertalien, la valeur de la distance palatine (PD) a été estimée, par comparaison avec un homme adulte, par la distance entre l'arc dentaire et le foramen magnum du crâne (Tableau 1).

Par la simulation acoustique [3], il est alors possible de calculer l'espace vocalique maximal : un espace à n dimensions, dans lequel sont situées les n premiers formants de toutes les réalisations vocaliques

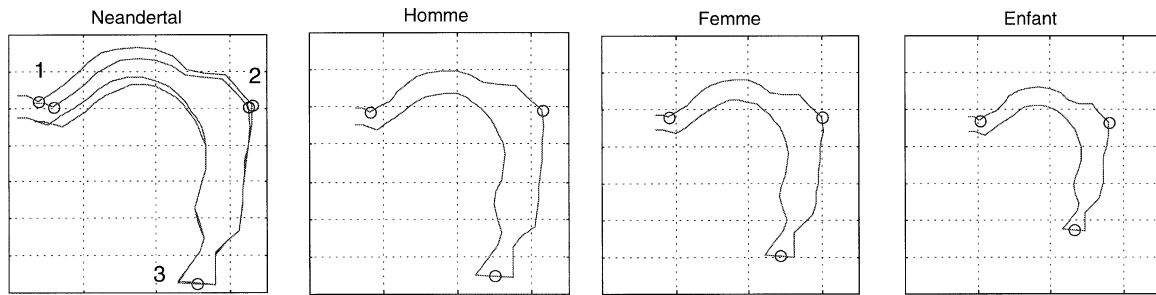


Figure 1. Coupe sagittale générée par le modèle articulatoire pour un homme (21 ans), Neandertal La Ferrassie et La Chapelle-aux-Saints (le plus prognathe), une femme adulte et un enfant (10 ans) et points de référence (1, incisives ; 2, repère pharyngal ; 3, position de la glotte) utilisés pour quantifier le *Larynx Height Index* ($LHI = d_{23}/d_{12}$).

Figure 1. Sagittal sections of the vocal track of four individuals using three landmarks (incisor, pharyngeal, glottal) for quantifying the larynx height index ($LHI = d_{23}/d_{12}$).

Tableau 1. D’après les estimations de Heim et al. [14] : valeurs de LH (mm), PD (mm) et LHI (LH/PD) adoptées dans les simulations avec le modèle *Variable Linear Acoustic Model* de Maeda des conduits vocaux de La Ferrassie et La Chapelle-aux-Saints (le plus prognathe), d’un homme, d’une femme adulte et d’un enfant, avec les longueurs du conduit vocal correspondantes.

Table 1. Values of larynx height, palatal distance and larynx height index adopted in simulations with the ‘Variable Linear Acoustic Model’ of the vocal tracts.

	Hauteur du larynx (LH) (mm)	Distance palatine (PD) (mm)	LHI (LH/PD)	Longueur du conduit vocal (mm)
Néandertaliens adultes				
La Ferrassie 1	133	140	0,95	194
La Chapelle-aux-Saints	135	154	0,88	209
Homme adulte (21 ans)	123	123	1,00	178
Femme adulte	105	111	0,95	157
Enfant (10 ans)	82	93	0,88	129

possibles pour un conduit vocal donné et possédant un LHI donné. Depuis de nombreuses années, l’espace 3D des trois premiers formants a fait l’objet de mesures systématiques [21] et de modélisation [11]. L’utilisation d’un modèle articulatoire réaliste permet évidemment une meilleure appréciation des limites de cet espace [6].

Si l’espace des paramètres de commande du modèle articulatoire est exploré en extension, tout en respectant les conditions aux limites des productions vocaliques (aire de la constriction $\geq 0,35 \text{ cm}^2$ et aire aux lèvres $\geq 1 \text{ cm}^2$), il est alors possible d’obtenir par simulation l’espace vocalique maximal $F_1F_2F_3$ (et notamment les projections F_1F_2 et F_2F_3), dans lequel sont localisées toutes les voyelles potentielles. Cette approche nous semble plus rigoureuse que celle qui consiste à proposer des fonctions d’aire, sans s’assurer qu’elles correspondent à des contrastes maximaux.

À la suite des travaux de Liljencrants et Linblom [17], on peut faire l’hypothèse, selon la théorie de la dispersion focalisation [23], que les voyelles [i a u] correspondent aux bornes de cet espace maximal. Compte tenu de sa forme, il est possible de montrer [7] que :

– [i] se caractérise par un F_3 maximum, ce qui implique un F_1 minimum et un F_2 maximum ;

– [a] correspond à un F_1 maximum (ce qui fixe les valeurs de F_2 et de F_3) ;

– [u] présente un F_2 minimum, et donc un F_1 (minimum) et la valeur de F_3 .

La génération de l’espace maximal et la prédictions des distinctions maximales permet de choisir des prototypes vocaliques. La Fig. 2 présente la simulation de l’espace vocalique maximal et les trois voyelles extrêmes, en l’occurrence pour un conduit vocal de femme.

Les échelles en *bark* permettent d’obtenir une représentation perceptive. Ces quatre simulations de conduit vocal, qui correspondent à des *Larynx Height Index* variant entre 1 et 0,88, présentent des espaces de taille très comparable.

La Fig. 3 présente les espaces maximaux obtenus (avec 12 500 items vocaliques) pour un conduit vocal de Neandertal (La Ferrassie et La Chapelle-aux-Saints présentant des espaces très voisins), celui d’un homme adulte (21 ans), ceux d’une femme et d’un enfant de dix ans. Ces espaces acoustiques maximaux sont bien conformes aux prédictions de la théorie acoustique [11] des différences homme, femme et enfant [20] et des données vocaliques [21]. On a montré qu’une transformation linéaire de facteur k sur la longueur du conduit vocal entraîne une évolution des

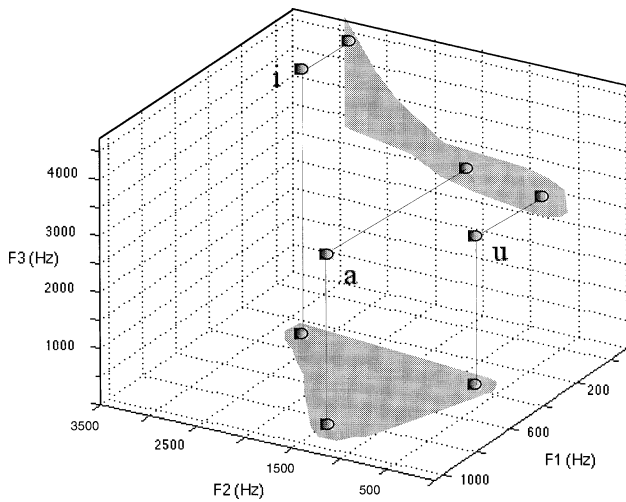


Figure 2. Les voyelles à contraste maximal [i a u] placées dans l'espace maximal $F_1F_2F_3$, simulé à partir du modèle articulaire (par exemple pour une femme adulte).

Figure 2. The vowels of maximal contrast [i a u] placed in the maximal space $F_1F_2F_3$ simulated from the articulatory model of an adult woman.

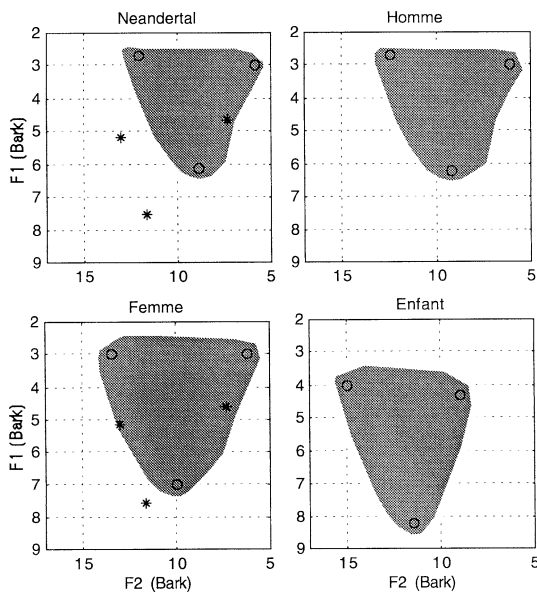


Figure 3. Espace vocalique maximal de Neandertal (La Ferrassie et La Chapelle-aux-Saints confondus) d'un homme adulte (21 ans), d'une femme adulte et d'un enfant (10 ans) avec les trois voyelles [i a u].

Figure 3. Maximal vocalic space of two Neandertals, and three modern individuals, obtained with the three basic vowels.

fréquences formantiques en $1/k$. Avec des échelles de type logarithmique, on doit retrouver des espaces vocaliques de même dimension et translétés en fréquence. Sur la Fig. 3, ils sont présentés dans un repère en bark (de type logarithmique), c'est-à-dire un repère perceptif. On constate qu'ils ont tous à peu près la même dimension : pour produire les mêmes contrastes

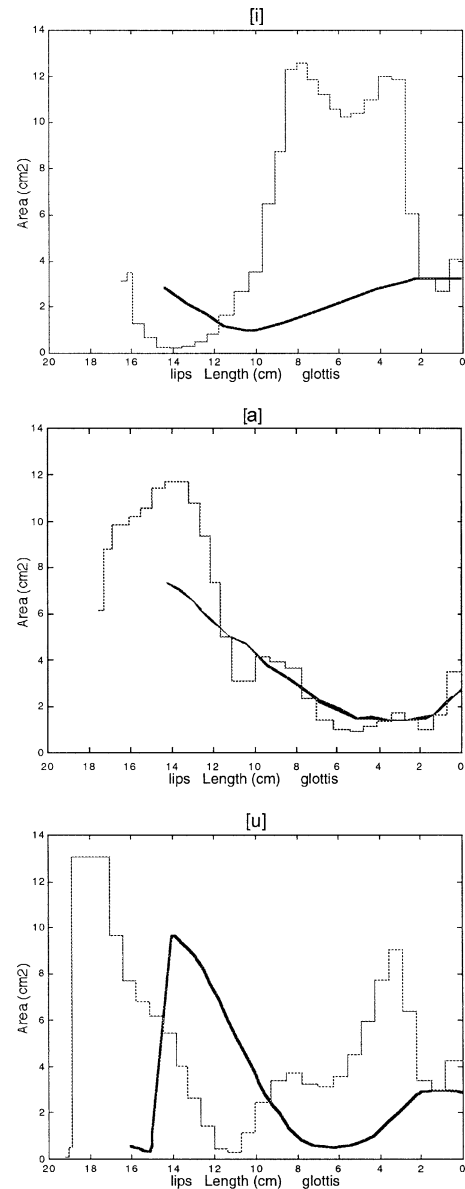


Figure 4. Pour l'homme de Neandertal : comparaison des fonctions d'aire obtenues par simulation pour les voyelles à contraste maximal [i a u]. Les traits continus correspondent à celles proposées par Liebermann and Crelin [16] et les fonctions en escalier à celles générées par simulation avec le modèle articulaire.

Figure 4. For Neandertal: functions of area obtained by simulation of [i a u]. Continuous lines correspond to the model of Liebermann and Crelin; the scale lines are generated by simulation with our articulatory model.

structuraux avec des conduits vocaux présentant des LHI différents, il est possible d'opérer des compensations (pour l'essentiel une avancée du point d'articulation, compensant un pharynx moins volumineux [19]). Les points repérés par des astérisques (*) correspondent aux trois voyelles que Liebermann and Crelin avaient proposé pour [i a u]. Dans l'espace vocalique du néandertalien, il est possible de retrouver parmi

l'ensemble des items vocaliques simulés ceux qui correspondent aux voyelles extrêmes, de représenter les fonctions d'aire correspondantes et de les comparer aux fonctions d'aire proposées par L&C (Fig. 4). Avec des constrictions de longueur insuffisante et trop peu accentuées, L&C ont en fait généré des voyelles de type [e o a], pour un conduit vocal de femme.

Conclusion

Notre étude s'est strictement limitée aux aspects anatomiques, morphologiques et acoustiques du conduit vocal et de la production de la parole. Il n'était pas dans notre propos de répondre définitivement à la question de savoir si les hommes de Neandertal parlaient ou non, mais simplement de mettre en évidence leurs capacités potentielles et de lever les biais

de la théorie de Lieberman et Crelin. Si les hommes de Neandertal ne parlaient pas, ce n'était de toute évidence pas à cause de la conformation de leur conduit vocal : avec un larynx en position haute, et donc un petit pharynx, comme celui du nouveau-né, il est toujours possible de disposer d'un espace vocalique aussi important que celui d'un adulte ayant un larynx en position basse et donc un pharynx plus volumineux. En conséquence, même si les néandertaliens avaient un larynx en position haute, ce qui n'était vraisemblablement pas le cas, ils auraient pu produire des voyelles aussi différenciées que celles de l'homme moderne.

Enfin, concernant les pré-requis nécessaires à l'émergence de la parole, il n'y a manifestement aucune raison de considérer que l'augmentation de la taille du pharynx a constitué une pré-adaptation nécessaire au cours de l'évolution vers l'émergence de la parole.

Remerciements. Denis Autesserre, Pierre Badin, Denis Beautemps, Barabara Davis, Didier Demolin, Arturo Galvan, Kiyoshi Honda, Rafael Laboissière, Peter MacNeilage, Shinji Maeda, Lucie Ménard, Gordon Ramsay, Solange Rossato, Philippe Rubin, Jean-Luc Schwartz pour leurs critiques constructives, leurs données, logiciels, suggestions, corrections et encouragements.

Références

- [1] B. Arensburg, O. Bar-Yosef, M. Chech, P. Goldberg, H. Laville, L. Meignen, Y. Rak, E. Tchernov, A.-M. Tillier, B. Vandermeersch, Une sépulture néandertalienne dans la grotte de Kébara (Israël), *C. R. Acad. Sci. Paris, série II* 300 (6) (1985) 227–230.
- [2] B. Arensburg, A.-M. Tillier, B. Vandermeersch, H. Duda, L.A. Schepartz, Y. Rak, A Middle Paleolithic human hyoid bone, *Nature* 338 (1989) 758–760.
- [3] P. Badin, G. Fant, Notes on vocal tract computations, *STL Quarterly Progress Status Report* 2–3 (1984) 53–108.
- [4] L.-J. Boë, Modelling the growth of the vocal tract vowel spaces of newly-born infants and adults: consequences for ontogenesis and phylogenesis, in: 14th International Congress of Phonetic Sciences, Vol. 3, 1999, pp. 2501–2504.
- [5] L.-J. Boë, S. Maeda, Modélisation de la croissance du conduit vocal, in: *Journées d'études linguistiques, La voyelle dans tous ses états*, Nantes, 1998, pp. 98–105.
- [6] L.-J. Boë, P. Perrier, B. Guérin, J.-L. Schwartz, Maximal vowel space, *Eurospeech* 89 (2) (1989) 281–284.
- [7] L.-J. Boë, S. Maeda, C. Abry, J.-L. Heim, [i a u] ? À la portée d'un conduit vocal de Neanderthal, in: *XXII^e Journées d'Études sur la Parole*, Martigny, Suisse, 1998, pp. 245–248.
- [8] M. Boule, L'homme fossile de la Chapelle-aux-Saints, *Ann. Paléontol.* 6 (1911) 109.
- [9] M. Boule, L'homme fossile de la Chapelle-aux-Saints, *Ann. Paléontol.* 7 (1912) 21–85.
- [10] M. Boule, L'homme fossile de la Chapelle-aux-Saints, *Ann. Paléontol.* 8 (1913) 1.
- [11] G. Fant, *Acoustic theory of speech production*, Mouton, La Haye, 1960.
- [12] J.-L. Heim, Une nouvelle reconstitution du crâne néandertalien de la Chapelle-aux-Saints, *C. R. Acad. Sci. Paris, série II* 308 (6) (1989) 1187–1192.
- [13] J.-L. Heim, La nouvelle reconstitution du crâne néandertalien de La Chapelle-aux-Saints. Méthode et résultats, *Bull. Mém. Soc. Anthropol. Paris* 6 (1–2) (1990) 94–117.
- [14] J.-L. Heim, L.-J. Boë, S. Maeda, Essai de la détermination de la position du larynx à partir de repères craniométriques : application à la paléontologie humaine, in: *L'identité humaine en question. Nouvelles problématiques et nouvelles technologies en Paléontologie humaine et en Paléanthropologie biologique*, Artcom, Paris, 2000, pp. 187–204.
- [15] K. Honda, M.K. Tiede, An MRI study on the relationship between oral cavity shape and larynx position, in: *5th International Conference on Spoken Language Processing*, Vol. 2, 1998, pp. 437–440.
- [16] P. Lieberman, E.S. Crelin, On the speech of the Neanderthal man, *Linguistic Inquiry* 2 (2) (1971) 203–222.
- [17] J. Liljencrants, B. Lindblom, Numerical simulation of vowel quality systems: the role of perceptual contrast, *Language* 48 (1972) 839–862.
- [18] S. Maeda, Compensatory articulation during speech: evidence from the analysis and synthesis of vocal-tract shapes using an articulatory model, in: W.J. Hardcastle, A. Marchal (Eds.), *Speech Production and Modelling*, Kluwer Academic Publishers, 1989, pp. 131–149.
- [19] L. Ménard, L.-J. Boë, Exploring vowel production strategies from infant to adult by means of articulatory inversion of formant data, in: *6th International Conference on Spoken Language Processing*, Beijing (China), Vol. 1, 2000, pp. 465–468.
- [20] H. Mol, Fundamental of Phonetics II: acoustical modes generating the formants of the vowel phonemes, Mouton, La Haye, 1970.
- [21] G.E. Peterson, H.L. Barney, Control methods used in a study of vowels, *J. Acoust. Soc. Am.* 24 (1952) 175–184.
- [22] S. Pinker, *L'instinct du langage*, Odile-Jacob, Paris, 1999.
- [23] J.-L. Schwartz, L.-J. Boë, N. Vallée, C. Abry, The dispersion-focalization theory of vowel systems, *J. Phonetics* 25 (1997) 255–286.