

LA VOIX : ANATOMIE, PHYSIOLOGIE ET EXPLORATIONS

Dirigé par Antoine Giovanni

Avec les enseignants du DESIU de Laryngo-Phoniatry

De Boeck Supérieur
5, allée de la Deuxième Division blindée
75015 Paris

Pour toute information sur notre fonds et les nouveautés dans votre domaine de spécialisation,
consultez notre site web :

www.deboecksuperieur.com

© De Boeck Supérieur SA,
rue du Bosquet 7, B-1348 Louvain-la-Neuve – Belgique

Tous droits réservés pour tous pays.

Il est interdit, sauf accord préalable et écrit de l'éditeur, de reproduire (notamment par photocopie) partiellement ou totalement le présent ouvrage, de le stocker dans une banque de données ou de le communiquer au public, sous quelque forme ou de quelque manière que ce soit.

Dépôt légal :

Bibliothèque royale de Belgique : 2021/13647/082

Bibliothèque nationale, Paris : octobre 2021

ISBN : 978-2-8073-2492-3

Sommaire

Anatomie

01. Anatomie comparée.....	3
02. Anatomie classique.....	7
03 Les plis vocaux	11
04. Contrôle neurologique du larynx (périphérique).....	13
05. Contrôle neurologique du larynx (central).....	17

Physiologie

06. Éléments sur les mécanismes respiratoires	21
07. Les muscles de l'ouverture / fermeture.....	24
08. Conception Schématique des différentes couches du pli vocal.....	27
09. La vibration vocale et la production du son.....	30
10. Réglage du volume sonore (intensité) de la voix.....	33
11. Voix et communication	36
12. La fréquence vibratoire des plis vocaux et son ajustement.....	39

Examen

13. Examen ORL	45
14. La stroboscopie	50
15. Les autres méthodes d'imagerie.....	53
16. L'électromyographie laryngée	56
17. L'interrogatoire du patient dysphonique	58
18. Le Voice Handicap Index et ses variantes.	60
19. L'évaluation perceptive de la qualité de la voix.....	68
20. Enregistrement vocal.....	78
21. Le bilan orthophonique de la phonation : analyse du geste et des compétences vocales	90

Les mesures instrumentales

22. Qu'est-ce que le signal vocal ?.....	101
23. L'amplitude du signal sonore.....	107
24. La fréquence du signal sonore.....	117
25. Les mesures d'instabilité du signal vocal.....	126
26. Le principe de l'analyse spectrale	134
27. Les mesures de signal sur bruit.....	145
28. À quoi sert l'analyse cepstrale ?	153
29. Les mesures du débit d'air.....	159
30. Les mesures de pression	172

Bilan de la voix : synthèse

31. Simplifier (enfin) le bilan vocal	183
---	-----

Bilans spécialisés

32. Les professionnels de la voix : physiopathologie d'une voix endurante et bilan vocal adapté – L'exemple des enseignants.....	193
33. Le bilan de la patiente transgenre dans le cadre d'une féminisation vocale	198
34. Les spécificités de la voix chantée	205
35. Dysodies, chants et chanteurs	212
36. Le bilan vocal du chanteur	216

Pour en savoir plus

37. Modéliser le fonctionnement des plis vocaux.....	225
38. Les résonateurs du conduit vocal	232

ANATOMIE

01. Anatomie comparée

• *Organisation générale du tractus aéro-digestif : fonctions du larynx et anatomie comparée*

Le larynx constitue l'extrémité supérieure des voies respiratoires à leur abouchement dans le carrefour aéro-digestif. La fonction première et vitale du larynx est celle de conduit aérifère, mais il assure également la sécurité des voies respiratoires contre les fausses routes lors de la déglutition. Sa fonction respiratoire est prioritairement d'assurer la protection des voies aériennes contre l'écrasement par les tissus cervicaux (grâce à la rigidité du cartilage thyroïde et du cartilage cricoïde qui sont le squelette du larynx). La fonction digestive du larynx est à l'inverse d'assurer l'occlusion des voies aériennes (avec les muscles et ligaments et avec les cartilages « mobiles » du larynx que sont l'épiglotte et les cartilages aryténoïdes).

Malgré toute son importance dans la communication, la fonction de phonation est finalement secondaire car elle ne met pas en jeu la vie de l'individu. Pour assurer toutes ces fonctions, le larynx prend la forme d'un conduit aérien à géométrie modulable en fonction de la tâche. La fonction phonatoire correspond à la vibration de l'air au niveau du larynx dans certaines circonstances : fermeture contrôlée du larynx pour produire un rétrécissement suffisant, mise en pression de l'air trachéal par une expiration active. C'est la position particulière du larynx à la partie inférieure du carrefour qui permet au pharynx et à la langue de modeler le son produit par les plis vocaux et de transformer ce son en parole. Il semble que l'évolution a ainsi privilégié la phonation avec une position basse du larynx offrant une grande liberté articulaire au pharynx et à la langue.

• *Le poisson*

Chez le poisson primitif, l'organisation générale est relativement simple avec un tube digestif médian et un système de branchies symétriques de part et d'autre (Negus, 1949). Lorsque le poisson respire, il ouvre la bouche et l'eau qui y pénètre est filtrée de part et d'autre par les branchies. Les branchies sont donc placées en dérivation de part et d'autre de la voie digestive. Il existe donc un appareil respiratoire constitué d'organes pairs et symétriques, organisation qui subsiste chez l'homme avec deux narines, deux fosses nasales, deux bronches principales et deux poumons. Une des grandes modifications structurelles de l'évolution a été l'apparition d'un carrefour entre la voie respiratoire et la voie digestive avec en particulier une fusion de l'ensemble des organes qui ont dû s'adapter pour conserver leur fonction spécifique. Il est intéressant de constater qu'en cas de lésion importante et grave du larynx, lorsqu'une laryngectomie totale est nécessaire, l'organisation post-opératoire revient à l'organisation initiale avec une séparation complète des deux voies.

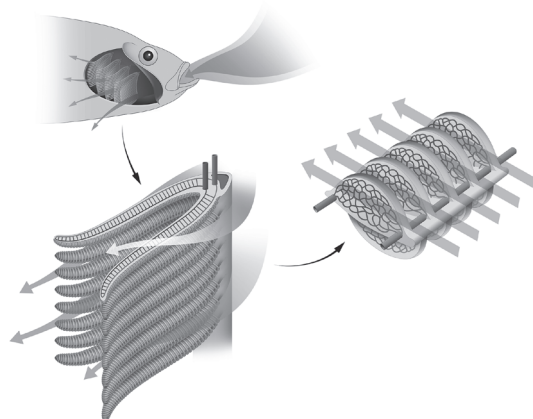


Figure 1-1. Chez le poisson, le flux d'eau emprunte le tube digestif au niveau de la bouche puis est filtré par les branchies.

• La respiration aérienne : le modèle des reptiles

Chez le poisson primitif lors de la survie entre deux trous d'eau ou en période de sécheresse, un simple diverticule tapissé de mucus et bordé de vaisseaux était suffisant. Mais lorsque la vie s'est déroulée toute entière sur la terre ferme, des besoins respiratoires plus importants se sont fait sentir comme chez certains amphibiens. Ces mouvements d'air plus importants ont eu comme conséquence l'apparition d'un effet Bernoulli et une tendance au collapsus des parois du diverticule aérien un peu comme un tuyau d'arrosage trop fin pour la pression utilisée. Pour éviter ce type de phénomène, des barres de cartilage placées latéralement sont retrouvées chez de nombreuses salamandres. Chez les reptiles les plus avancés, ces cartilages primitifs développent en certains points une structure annulaire très proche de la constitution de l'anneau cricoïdien. Chez l'homme cette organisation est conservée et toutes les structures qui participent à ce maintien ont des formes voisines en U ouvert en arrière depuis la mandibule jusqu'aux côtes en passant par l'os hyoïde, le cartilage thyroïde et les anneaux trachéaux. Seul le cartilage cricoïde a une structure annulaire. Rappelons que la partie postérieure du cou est rigide du fait de la présence des vertèbres du rachis cervical.

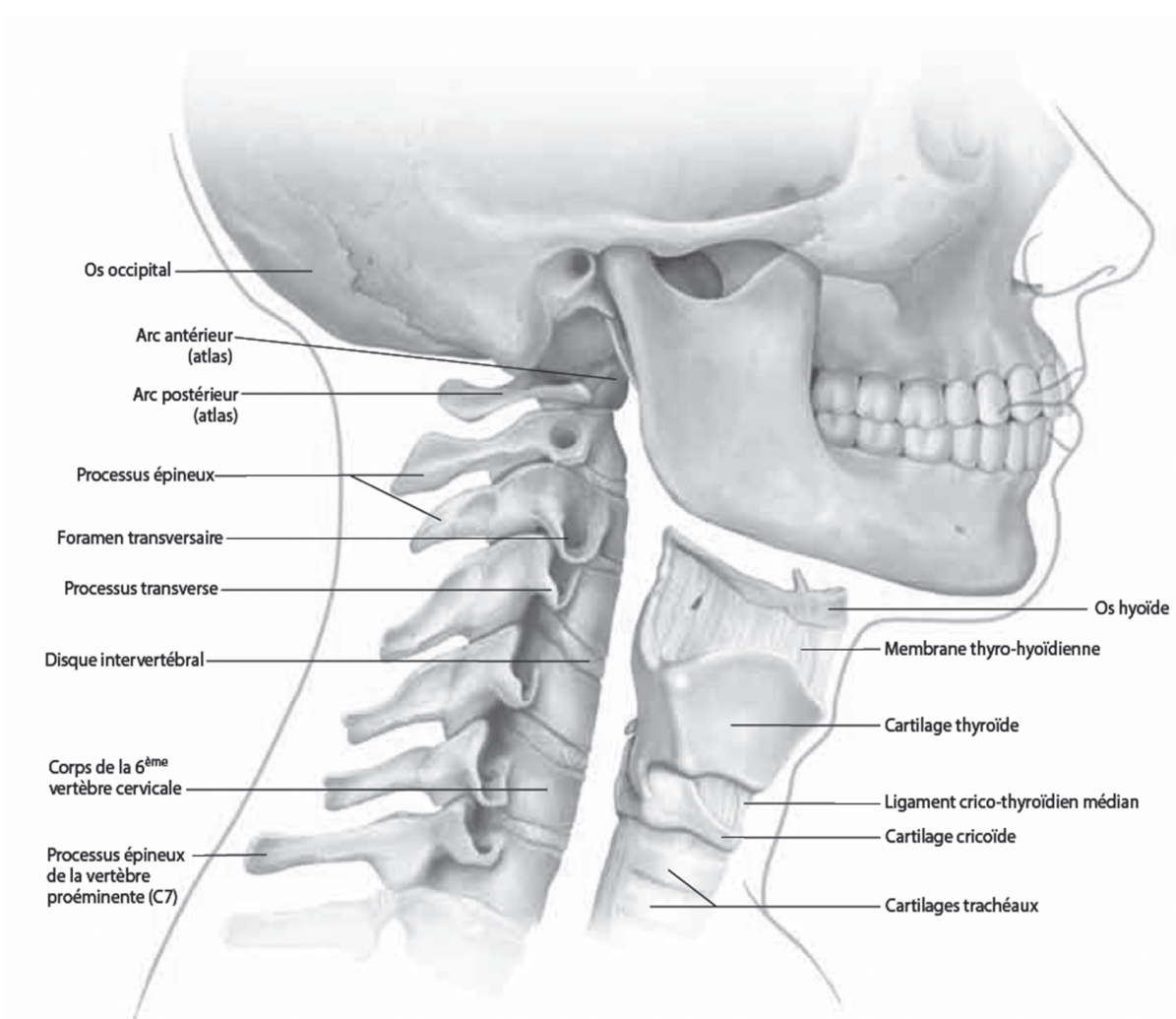


Figure 1-2. Le squelette de l'appareil respiratoire.

Parallèlement à cette évolution laryngo-trachéale, il faut citer l'évolution de l'appareil respiratoire lui-même. Le crocodile est le premier animal à disposer d'un muscle spécifiquement destiné à la respiration, le diaphragme. À partir du crocodile les animaux n'ont plus simplement « avalé » l'air mais ils ont commencé à employer l'activité musculaire pour inspirer véritablement.

L'apparition des narines, plus haut situées que la bouche et non plus situées de part d'autre du tube digestif comme chez le poisson permettait à ces animaux de respirer tout en gardant la bouche dans l'eau. Ce système a été particulièrement modifié chez les grands mammifères marins qui ont vu leurs narines migrer sur le sommet du crâne, leur permettant d'émettre des sons à travers l'évent en nageant en surface.

• La déglutition : le modèle des herbivores

La déglutition nécessite la protection de l'appareil respiratoire par occlusion du larynx. Chez les plus évolués des poissons on retrouvait déjà des fibres permettant l'ouverture et des fibres permettant la fermeture des voies respiratoires. L'étape phylogénétique suivante chez les animaux marins à poumons a donc été l'apparition d'une sorte de valve destinée à éviter l'entrée de l'eau ou des aliments dans les poumons. Chez la grenouille on voit ainsi apparaître non seulement des cartilages aryténoïdes mais aussi un véritable sphincter musculaire extrêmement bien développé. Pour compléter cette protection, de très nombreux mammifères présentent un certain degré de contact entre l'épiglotte et le palais mou ; chez les baleines ou les marsouins, l'épiglotte est même tubulaire et vient au contact du « blow-hole ». Cette relation particulière entre l'épiglotte et le palais mou est également prononcée dans la position « tête en bas » chez les herbivores (cheval, zèbre, bœuf par exemple) lorsque l'animal se nourrit. Il est essentiel pour ces animaux qui sont des proies potentielles de boire et de se nourrir sans cesser de respirer ni surtout de sentir les odeurs annonciatrices d'un danger. La projection de l'épiglotte au-dessus du plan du voile du palais crée ainsi un tube presque continu qui empêche l'entrée des aliments et de l'eau dans le tube respiratoire. Une configuration analogue est rencontrée chez le nouveau-né qui est donc un respirateur nasal exclusif mais dont l'épiglotte très haut placée le protège des fausses routes.

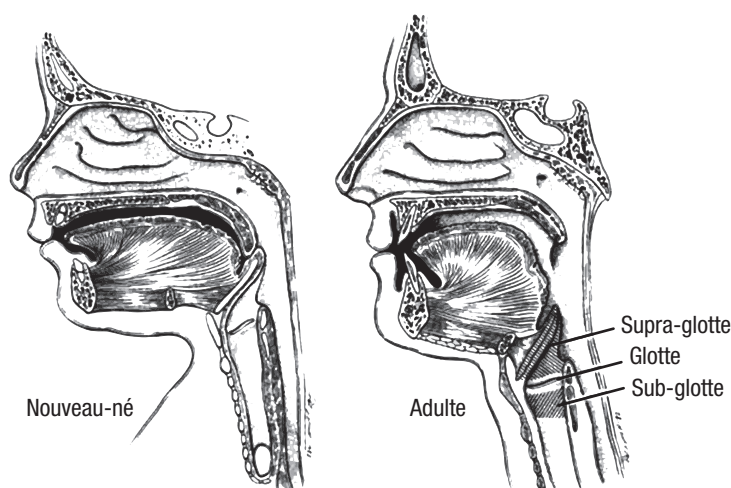


Figure 1-3. Comparaison de la position relative du larynx et du voile chez le nouveau-né et chez l'adulte.

• La phonation

La phonation primitive chez la salamandre et la grenouille est contemporaine de l'apparition des aryténoïdes. Un larynx de mammifère complètement développé avec tous les cartilages (aryténoïdes, thyroïde, cricoïde et épiglotte) est observé pour la première fois chez certains mammifères insectivores comme la gymnure ou la harpie silvicole. Des structures plus avancées comme l'association plis vestibulaires et plis vocaux séparés par une cavité ventriculaire bien définie apparaissent chez le singe rhésus.

Chez l'homme, il apparaît une structure particulière au niveau des plis vocaux : la lamina propria (voir plus loin) qui permet un découplage relatif entre l'épithélium de surface et le muscle vocal en profondeur. Ce découplage était plus rudimentaire chez les autres mammifères et n'est complètement constitué chez l'enfant qu'aux environs de 6 ans. Par ailleurs, le retrait de la face par rapport au crâne et la descente de l'os hyoïde sont le stade ultime de la verticalisation qui détermine la plicature à angle droit du pavillon pharyngo-buccal qui est un élément essentiel de l'articulation vocalique.

ANGLE ENTRE PREMIERE VERTEBRE CERVICALE ET LA BASE DU CRÂNE

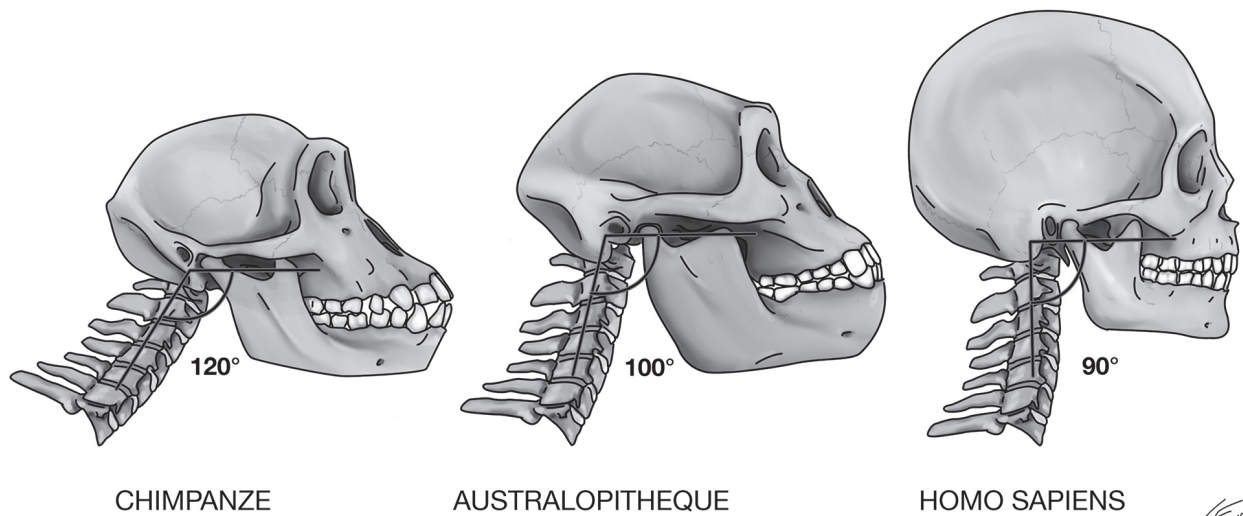


Figure 1-4. Comparaison de l'appareil phonatoire de l'australopithèque et de l'homo sapiens.

Le détail de l'anatomie et de la physiologie humaine seront précisés dans les chapitres suivants.

02. Anatomie classique

- *Squelette cartilagineux et muscles du larynx*

Les cartilages du larynx

Les cartilages du larynx peuvent être envisagés selon leur fonction principale : statique ou dynamique. Les cartilages dits statiques ont pour fonction principale le maintien de l'ouverture de la filière respiratoire. Il s'agit du cartilage thyroïde et du cartilage cricoïde. La fonction des cartilages dits dynamiques réside dans leur mobilité, visant à fermer la filière respiratoire lors de la déglutition ou de la phonation. Il s'agit du cartilage épiglottique et des cartilages aryténoïdes. Enfin, les cartilages accessoires sont à citer mais leur fonction est anecdotique : cartilages corniculés et cunéiformes (Lagier, 2019).

Le cartilage thyroïde est le cartilage le plus volumineux du larynx. Il se présente comme un livre ouvert en arrière avec deux ailes quadrangulaires présentant un angle de 120° chez la femme et de 90° chez l'homme. De chaque côté, deux processus se développent, respectivement les cornes supérieures et inférieures. Son angle rentrant, postérieur, sert de point d'insertion antérieure aux plis vocaux. Il est uni au cartilage cricoïde en arrière par les deux articulations crico-thyroïdiennes. En avant la membrane crico-thyroïdienne renforcée sur la ligne médiane par le ligament crico-thyroïdien médian l'unit à l'arc antérieur du cricoïde.

Le cartilage cricoïde est le cartilage inférieur du larynx. Il est le seul anneau complet de l'axe respiratoire et garantit le maintien du calibre de la filière respiratoire. Sa partie postérieure appelée plaque cricoïdienne est plus haute que sa partie antérieure ou arc cricoïdien qui est plus étroite. Le cricoïde comporte des surfaces articulaires planes ou presque planes pour les articulations crico-thyroïdiennes, situées sur la face latérale du cartilage, à la jonction arc-plaque. Il comporte également les surfaces articulaires crico-aryténoïdiennes, situées sur le bord supérieur de la plaque cricoïdienne, présentant une forme très convexe en antéro-postérieur et transversalement (articulation dite condylienne).

Les cartilages dynamiques sont situés à l'intérieur des précédents puisqu'ils modifient la géométrie interne du larynx. L'épiglotte est le cartilage le plus haut situé dans le larynx. Elle a une forme de feuille d'arbre avec son pétiole. Son extrémité supérieure, large, dépasse largement le niveau de l'os hyoïde et reste libre dans la lumière pharyngée où elle est aisément visible en endoscopie. Son extrémité inférieure est unie par un ligament à l'angle rentrant du cartilage thyroïde. L'épiglotte a pour principal rôle la fermeture du larynx au moment de la phase pharyngée de la déglutition.

Les cartilages aryténoïdes servent de chaque côté d'insertion postérieure aux plis vocaux. C'est sur leur mobilité que repose celle des plis vocaux pour leurs mouvements d'abduction / adduction. Ils ont une forme complexe qui s'apparente à une pyramide triangulaire, avec une base inférieure par l'intermédiaire de laquelle ils reposent sur le cricoïde. De cette base se détachent deux processus : le processus vocal et le processus musculaire. Le processus vocal sert d'insertion au pli vocal, il se développe vers l'avant et horizontalement prolongeant l'angle antérieur de la base de l'aryténoïde. Le processus musculaire se développe à partir du bord postérieur de la base, et se développe en bas et latéralement. Il sert d'insertion aux muscles crico-aryténoïdiens latéraux et postérieurs, inter-aryténoïdien, et au faisceau latéral du muscle thyro-aryténoïdien. La surface articulaire crico-aryténoïdienne prend place sur la base de l'aryténoïde et la face antéro-médiale du processus musculaire. Cette surface est très concave aussi bien transversalement que dans l'axe antéro-postérieur, répondant à la convexité de la surface cricoïdienne. Il en résulte que les mouvements de l'aryténoïde sont complexes et ne sont pas une simple rotation axiale. Il s'agit plutôt d'une bascule antéro-postérieure, d'une translation transversale et dans un moindre degré d'une rotation axiale (Prades *et al.* 2000).

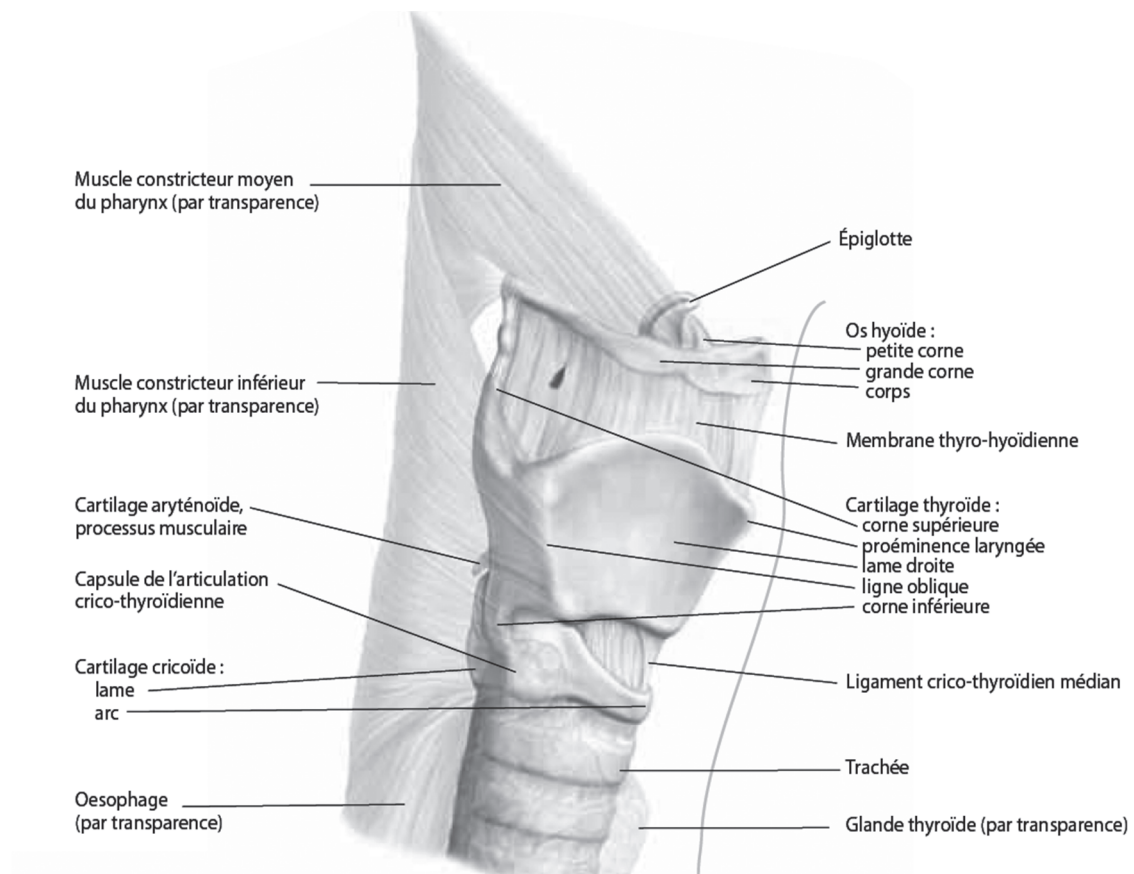


Figure 2-1. Larynx : vue latérale.



En bref

Les cartilages du larynx se répartissent en :

- cartilages quasiment statiques (squelette) : cartilage thyroïde et cartilage cricoïde ;
- cartilages mobiles, fonctionnels : cartilage épiglottique et les deux cartilages aryténoïdes.

• Les muscles laryngés

Muscle crico-aryténoïdien latéral (CAL)

Le muscle CAL s'insère sur le bord supérieur de la face latérale du cricoïde jusqu'à la face latérale du processus musculaire de l'aryténoïde homolatéral. Sa contraction entraîne une rotation de l'aryténoïde, conduisant à une rotation en dedans du processus vocal et ainsi une adduction, un allongement, un abaissement, un affinement et un raidissement des plis vocaux, leur donnant un bord libre plus tranchant.

Muscle inter-aryténoïdien (IA)

Le muscle inter-aryténoïdien (Brandon *et al.* 2003) est constitué de plusieurs faisceaux musculaires, orientés transversalement. Leur contraction rapproche les cartilages aryténoïdes entre eux, et les redresse avec pour effet de tendre les plis vocaux. Les fibres musculaires dites rapides prédominent dans ce muscle.

Certaines fibres ne s'arrêtent pas au sommet de l'aryténoïde mais se réfléchissent sur lui et continuent leur course vers le bord latéral du cartilage épiglottique. Ces fibres forment un mince faisceau appelé muscle ary-épiglottique.

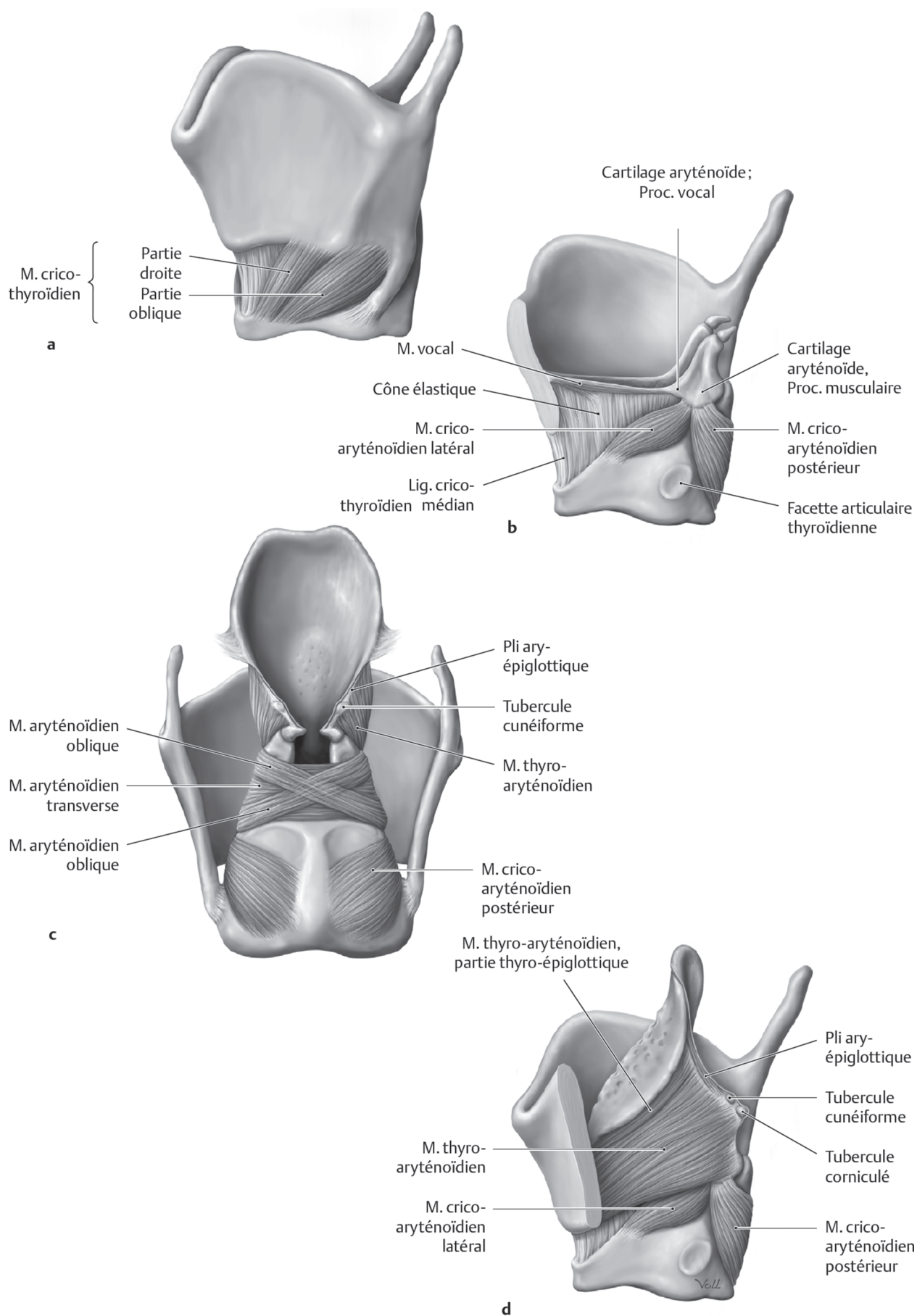


Figure 2-2. Muscles intrinsèques du larynx : a. Vue antéro-gauche ; b. Vue gauche après résection de l'aile thyroïdienne gauche ; c. Vue postérieure ; d. Vue postéro-gauche après résection de l'aile thyroïdienne gauche

Muscle crico-aryténoïdien postérieur (CAP)

Le muscle crico-aryténoïdien postérieur s'insère sur une large zone de la face postérieure du chaton cricoïdien et sur la face postérieure du processus musculaire de l'aryténoïde. On lui distingue deux compartiments : un horizontal et un oblique (ou vertical). L'action de ce muscle est l'abduction, l'élévation, l'élongation et l'amincissement des plis vocaux, en basculant l'aryténoïde en arrière et en dehors. Les deux compartiments comportent une majorité de fibres musculaires lentes, mais les fibres rapides sont plus représentées dans le faisceau oblique ou vertical (Asanau *et al.* 2011).

Muscle crico-thyroïdien (CT)

Le muscle crico-thyroïdien naît sur les parties antérieure et latérale de l'arc cricoïdien et comporte deux chefs. Son chef oblique se termine sur la moitié postérieure de la lame thyroïdienne, et sur la partie antérieure de la corne inférieure du même cartilage. Le chef vertical s'insère sur le bord inférieur de la partie antérieure du cartilage thyroïde. C'est le seul muscle laryngé intrinsèque innervé par le nerf laryngé externe, branche terminale du nerf laryngé supérieur, et non par le nerf laryngé inférieur qui innerve tous les autres muscles intrinsèques. Sa contraction conduit les plis vocaux en position paramédiane, il les abaisse, les allonge, les met en tension et les amincit. Il est le principal responsable de la tension longitudinale du pli vocal et par conséquent régule la hauteur de la voix.



En bref

- ▶ Le muscle crico-aryténoïdien postérieur (CAP) est le seul muscle abducteur des plis vocaux.
- ▶ Les autres muscles sont tous plus ou moins adducteurs des plis vocaux.
- ▶ Le muscle crico-thyroïdien est élongateur des plis vocaux.
- ▶ Le muscle vocal et le muscle crico-thyroïdien sont deux muscles antagonistes, leur co-contraction « règle » la longueur et la rigidité du pli vocal.

03 Les plis vocaux

• Anatomie macroscopique

Les plis vocaux constituent le véritable vibrateur laryngé en physiologie. La vibration de la muqueuse des plis vocaux, sous l'effet de l'air provenant des poumons, est à l'origine du son laryngé. Les plis vocaux s'étendent depuis l'angle rentrant du cartilage thyroïde en avant jusqu'au processus vocal de chaque cartilage aryténoïde. Ils sont prismatiques triangulaires : leur face latérale les unit à la paroi latérale du larynx, leur face supérieure est horizontale, leur face inférieure regarde en bas et en dedans. Leur bord libre dépasse normalement celui des plis vestibulaires. Ils ont un aspect blanc nacré caractéristique, contrastant avec la couleur rosée du reste de la muqueuse.

• Anatomie microscopique

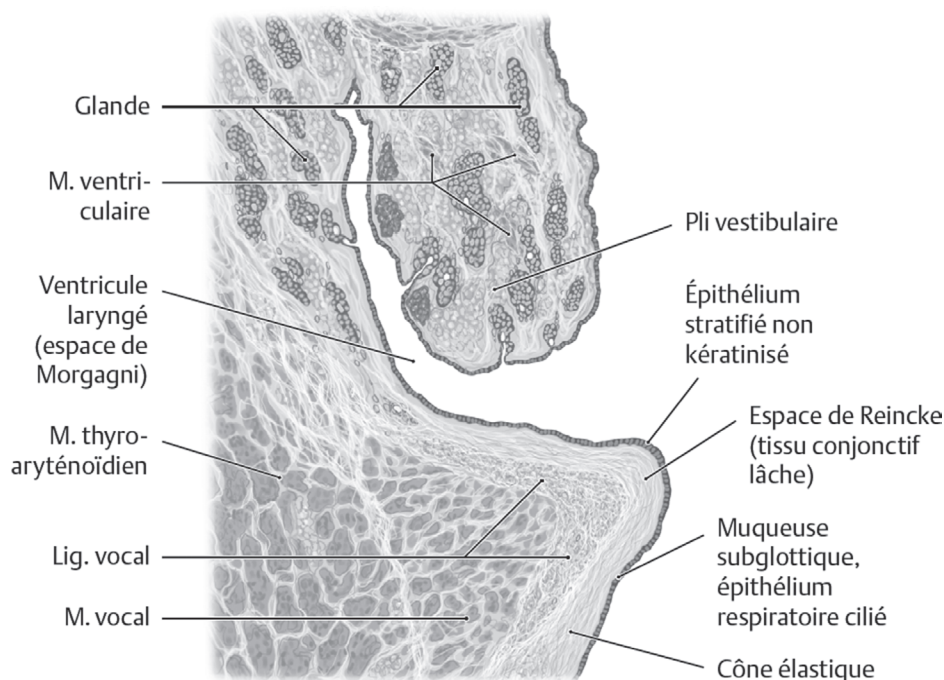


Figure 3-1. Structure d'un pli vocal, coupe histologique frontale schématisée ; vue postérieure

Le pli vocal, mécaniquement très sollicité, est tapissé d'un épithélium malpighien pluristratifié non kératinisé (pouvant être à l'origine d'un carcinome épidermoïde). Cet épithélium est dépourvu de glandes muqueuses au niveau du bord libre des plis. Au contraire, la muqueuse des étages adjacents est constituée d'un épithélium respiratoire cilié comportant des glandes muqueuses dont les sécrétions lubrifient le plan glottique. La membrane épithéliale basale est solidement amarrée à la couche sous-muqueuse par des protéines d'ancrage situées dans la membrane basale. L'épithélium, de 0,05 à 0,1 mm d'épaisseur, est plus épais au tiers moyen du pli vocal.

Le pli vocal a une structure pluristratifiée qui lui permet d'entrer en vibration sous l'effet de l'air expiré (Hirano, 1974). On décrit ainsi de la superficie à la profondeur :

- la muqueuse,
- la lamina propria elle-même séparée en plusieurs couches :
 - une couche superficielle ou espace de Reinke, constituée de tissu conjonctif très lâche,

- une couche intermédiaire qui est individualisée au tiers moyen des plis vocaux, et contient davantage de fibres, en particulier de l'élastine,
- une couche profonde, dont la densité de fibres est plus importante, et dont les fibres sont plus épaisses, le collagène prédomine.
- ▶ le ligament vocal correspond aux couches intermédiaire et profonde.
- ▶ le muscle vocal (faisceau médial du muscle thyro-aryténoïdien).

Cette organisation anatomique est à la base de la compréhension de la physiologie vibratoire et sera reprise dans le chapitre ad hoc.

Toutes les fibres conjonctives et musculaires ont un arrangement dans l'axe du pli vocal, et un potentiel d'élongation par une forme de repos ondulée qui permet de répondre aux modifications de la géométrie du pli (Bailly *et al.* 2018).

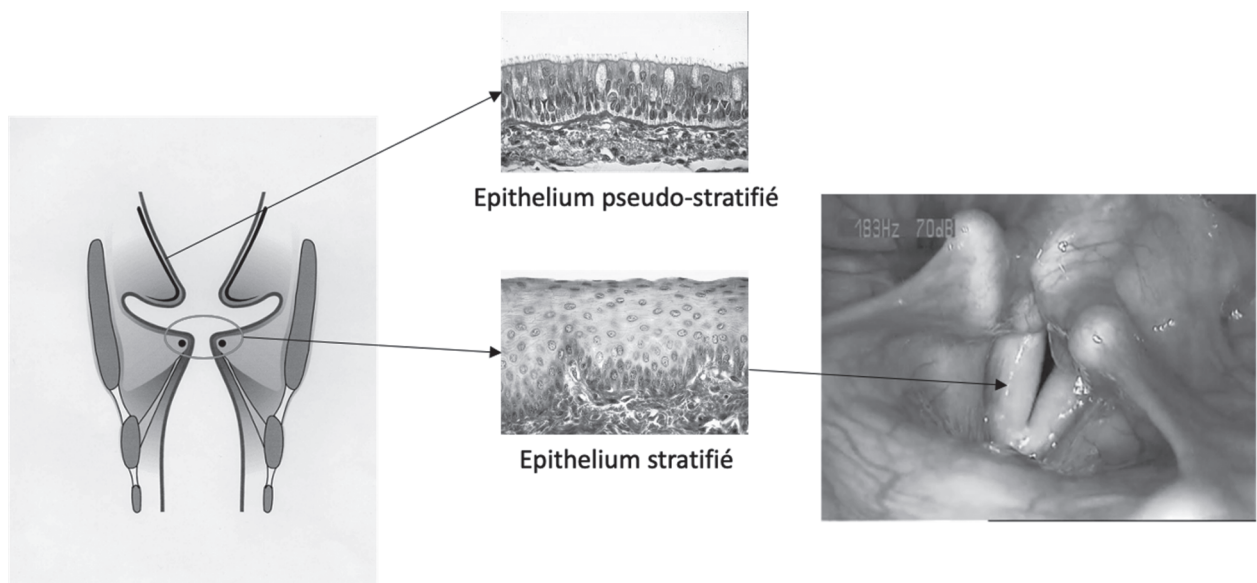


Figure 3-2. Différences de revêtement épithélial entre le pli vocal lui-même et le reste du larynx.

04. Contrôle neurologique du larynx (périphérique)

• *Le système nerveux périphérique*

L'ensemble de la sensibilité et de la motricité du larynx est sous la dépendance du nerf vague (dixième paire de nerfs crâniens). De chaque côté, le nerf vague est à l'origine du nerf laryngé récurrent et du nerf laryngé supérieur.

• *Noyaux du nerf vague dans le tronc cérébral*

Le noyau ambigu contient corps cellulaires des fibres motrices (branchiales) se distribuant aux nerfs laryngés supérieur et inférieur. Il a une organisation somatotopique : les neurones destinés au nerf laryngé supérieur sont situés crânialement et ceux du nerf laryngé inférieur sont en position caudale. Dans le noyau du tractus solitaire se terminent les prolongements centraux des cellules ganglionnaires pseudo-unipolaires du ganglion inférieur : fibres gustatives dont les prolongements périphériques viennent des bourgeons du goût situés au niveau de l'épiglotte, et fibres sensibles.

• *Trajet du nerf vague*

Le nerf vague sort de la base du crâne en traversant le foramen jugulaire, où il est en contact étroit avec le nerf glosso-pharyngien et le nerf accessoire, et à proximité immédiate du nerf hypoglosse. Juste sous la base du crâne, les rameaux pharyngiens et le nerf laryngé supérieur se détachent du nerf vague.

Le nerf vague traverse le cou de haut en bas dans l'angle dièdre postérieur entre l'artère carotide (interne puis commune) et la veine jugulaire interne, au contact de l'artère carotide. Il ne donne aucune branche habituellement au niveau cervical moyen. D'abord situé dans l'espace rétro-stylien à proximité des nerfs glosso-pharyngien et hypoglosse, il s'éloigne de ces nerfs à mesure qu'il descend dans le cou et que ces nerfs rejoignent leurs effecteurs.

• *Trajet des nerfs laryngés*

Les nerfs laryngés récurrents ont pour particularité de naître de façon différente à gauche et à droite pour des raisons embryologiques. Le nerf récurrent gauche naît sous l'arc aortique à la partie moyenne du médiastin dans le thorax, tandis que le nerf récurrent droit naît sous l'artère subclavière droite, dont au niveau basi-cervical droit. Dans 1 % des cas, le nerf laryngé inférieur droit naît au niveau cervical haut et n'a pas de trajet récurrent, il s'agit d'un nerf récurrent non récurrent. Cette variation anatomique est associée avec une variation dans la disposition des artères qui vascularisent le membre supérieur et l'extrémité céphalique (*arteria lusoria*). Ensuite les nerfs remontent vers le larynx (d'où leur nom de récurrents) en se plaçant dans l'angle dièdre entre la trachée et l'œsophage.

Le nerf laryngé récurrent devient nerf laryngé inférieur lorsqu'il entre dans le larynx. Placé dans l'angle dièdre entre la trachée et l'œsophage, il passe sous le muscle constricteur du pharynx en arrière de l'articulation crico-thyroïdienne. Dans cette première portion, verticale, il donne une branche sensitive pour la muqueuse de l'hypopharynx. Cette branche peut être en continuité avec une branche du rameau interne du nerf laryngé supérieur, formant la classique anse de Galien. Cette portion donne également naissance à une branche motrice destinée au muscle crico-aryténoïdien postérieur et parfois au muscle inter-aryténoïdien. Le nerf récurrent est également responsable de la sensibilité de la région sous-glottique du larynx et de la trachée. Il s'infléchit ensuite en avant et au-dessus de l'articulation crico-thyroïdienne et pénètre dans le larynx. Là, il va poursuivre sa course latérale par rapport au muscle crico-aryténoïdien latéral et distribue une branche pour chaque muscle intrinsèque à l'exception du muscle crico-thyroïdien.

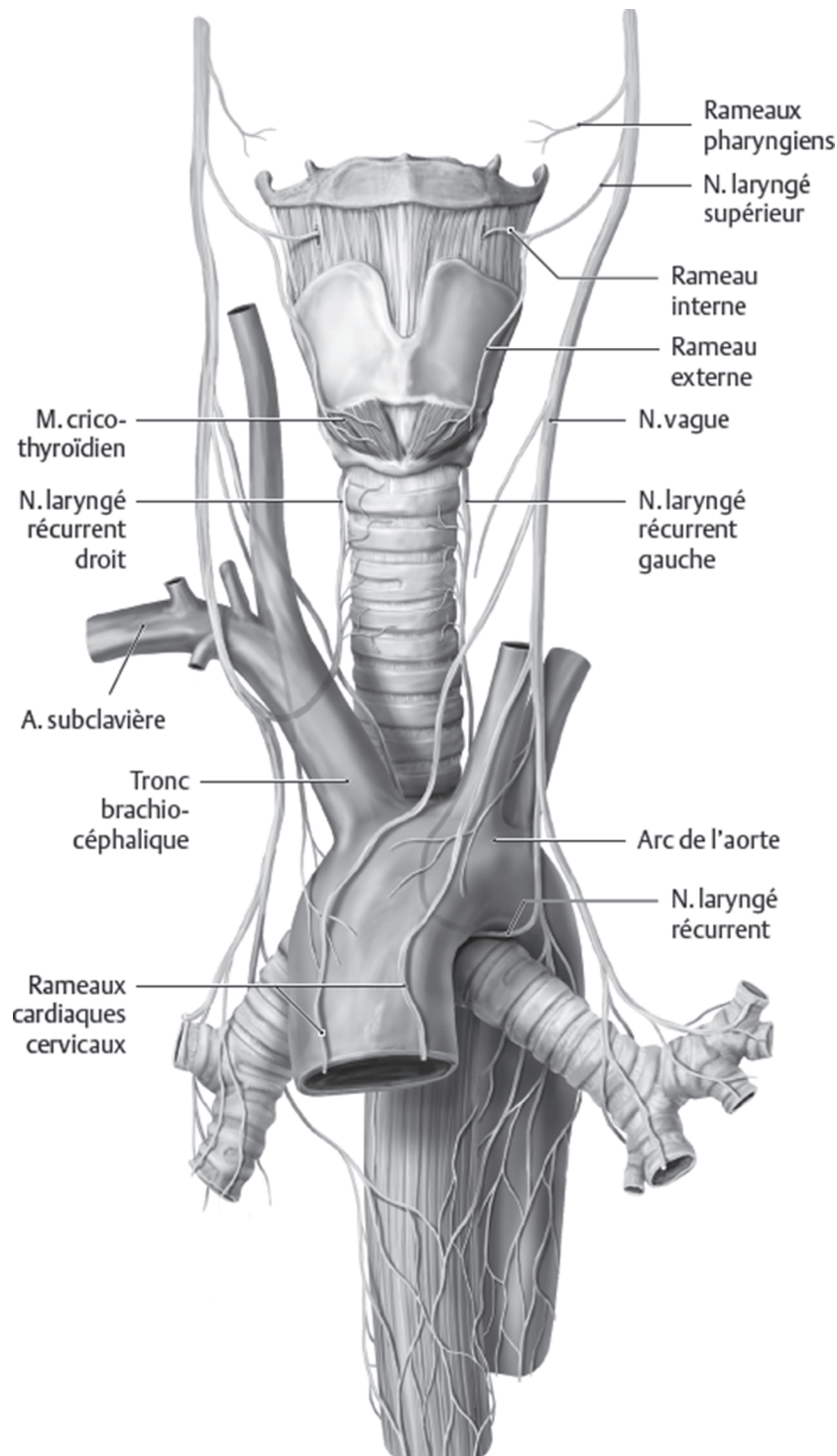


Figure 4-1. Branches du nerf vague, vue antérieure des régions cervicale et thoracique

Le nerf laryngé supérieur se divise en un rameau interne et un rameau externe. Le rameau interne pénètre dans le larynx en traversant la membrane thyro-hyôïdienne, et est responsable de la sensibilité du vestibule laryngé et du plan glottique, ainsi que de l'hypopharynx. Le rameau externe est une branche motrice qui innerve le muscle crico-thyroïdien. Ses rapports étroits avec le pédicule vasculaire supérieur de la thyroïde l'exposent au risque de lésions au cours des thyroïdectomies (Cernea *et al.* 1992).

Il existe de nombreuses variations dans les branches des nerfs laryngés, aussi bien supérieurs qu'inférieurs. Le nombre de branches et leurs territoires sont très variables, et il existe de nombreuses communications entre les branches des deux nerfs, ce qui permet au larynx une réinnervation spontanée très fréquente après une lésion aiguë d'un nerf, même si cette réinnervation ne s'accompagne pas toujours d'une remobilisation du pli vocal (Henry *et al.* 2017).

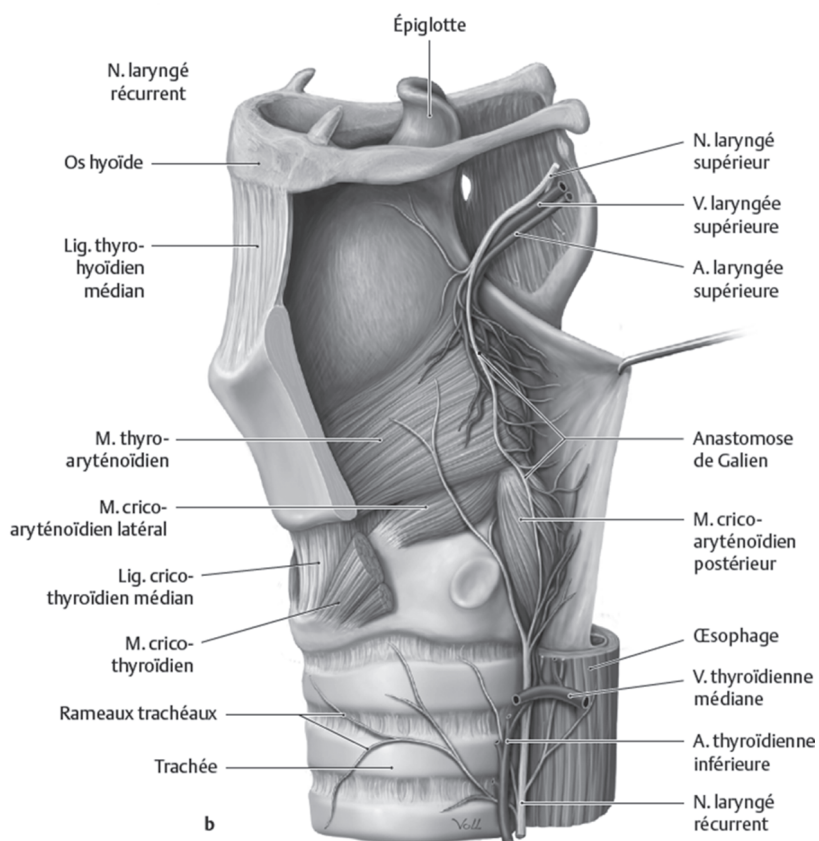
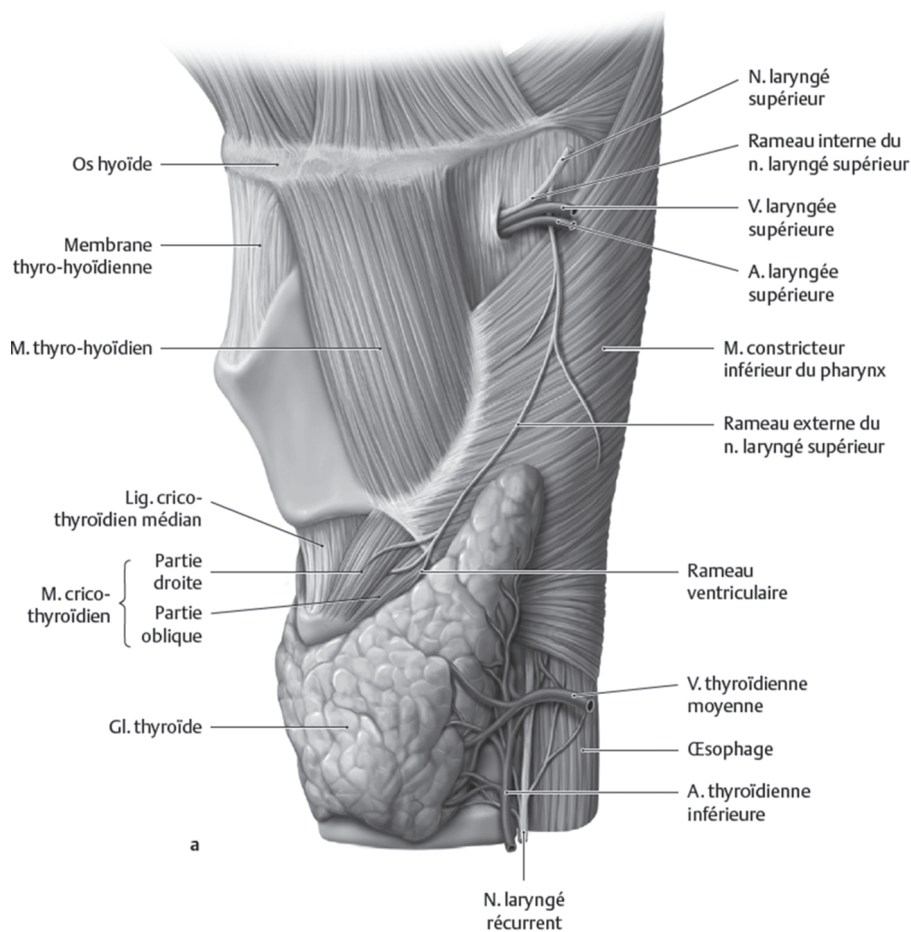


Figure 4-2. Innervation du larynx, vue gauche : a. Couche superficielle ; b. Couche profonde.

Toute l'innervation du larynx dépend du nerf vague, grâce aux nerfs laryngés supérieurs et récurrents qui s'en détachent.

Les nerfs laryngés inférieurs ou récurrents ont un trajet différent à gauche et à droite. Ils sont responsables de l'essentiel de la motricité du larynx. Leur fonction sensitive est moins importante.

Les nerfs laryngés supérieurs sont responsables de l'essentiel de la sensibilité du larynx, et ont une branche motrice pour le muscle crico-thyroïdien.

05. Contrôle neurologique du larynx (central)

• *Le système nerveux central*

Le contrôle cortical du larynx est bilatéral au sein de chaque hémisphère. Les zones cérébrales responsables du contrôle moteur du pharynx et du larynx sont situées dans la partie inférieure du gyrus précentral (c'est-à-dire le cortex moteur primaire) des deux hémisphères. Cette zone est responsable du contrôle volontaire du larynx pour la parole, la respiration et la déglutition (Simonyan & Horwitz, 2011).

Il existe de nombreuses connexions dans le cerveau, en particulier avec le cortex auditif (par exemple, le gyrus temporal supérieur) et les centres liés au langage (par exemple, le gyrus supramarginalis). Les voies associatives entre les régions motrices pharyngolaryngées et les zones auditives corticales et sous-corticales sont particulièrement importantes.

Les connections diffèrent selon les fonctions du larynx (phonation, respiration, déglutition). Ici seront décrites les connexions nécessaires pour la phonation.

La production de la voix dépend de la coordination neuromotrice de tous les muscles impliqués dans la phonation, allant des muscles de la posture et des muscles respiratoires aux muscles du larynx, du pharynx et de l'appareil articulaire bucco-labial (Webster, 1995). Il n'est pas facile de dissocier la voix et le contrôle de la parole. L'hypothalamus latéral, l'opercule pariétal, l'amygdale et le cervelet sont invoqués dans la non-parole et la vocalisation non volontaire (comme le rire, Wattendorf *et al.* 2013). La vocalisation non articulatoire volontaire implique, en plus du cortex moteur primaire et de l'aire pré-motrice, le cortex auditif, une partie du système limbique (cingulum antérieur) et la substance grise péri-aqueducule, bilatéralement. La vocalisation articulée et volontaire est associée à l'activation du cortex sensori-moteur bilatéralement mais considérablement plus du côté gauche (Louks *et al.* 2007). Le gyrus temporal supérieur gauche est également activé, même lorsque le participant ne peut pas entendre sa voix, ce qui suggère que les zones auditives contenant les cibles de la voix pour la parole ont été activées pendant la production des tâches apprises de contrôle laryngé (Louks *et al.* 2007). Il n'y a pas de preuve d'une intégration au niveau du tronc cérébral pour la phonation (Ludlow, 2015).

• *Contrôle audio-phonatoire (contrôle par rétroaction) et schéma interne (contrôle par feed-forward)*

La rétroaction auditive est une composante nécessaire du contrôle de la voix. Les relations fonctionnelles entre les zones corticales auditives et les zones dédiées à la phonation sont le substrat de ce contrôle auditif. Le contrôle audio-phonatoire dépend des commandes produites par les voies cortico-bulbaires en réponse à l'entrée acoustique arrivant dans le cortex auditif ainsi qu'à une série de réflexes acoustico-laryngés. Par exemple, certaines études ont observé l'adaptation de la fréquence lorsque le locuteur est exposé à une rétroaction auditive manipulée de sa propre voix (Larson *et al.* 2000, Jones & Munhall 2005). Il est intéressant de noter que lorsque la manipulation du feedback s'arrête, le locuteur maintient les adaptations apprises pendant l'expérience. Ceci est la preuve d'un contrôle de feed-forward basé sur la cible auditive du locuteur. Le contrôle de la rétroaction pendant la phonation a lieu pendant la période préphonatoire et pendant la production du son. Le réglage préphonatoire explique comment les chanteurs produisent des sons à une hauteur et une intensité prédéterminées. La régulation préphonatoire dans le cortex dépend de l'adéquation de l'entrée fournie par les mécanorécepteurs laryngés concernant la tension et la position des différents muscles et articulations, et les schémas internes de la cible sonore.



En bref

- ▶ Les aires corticales du larynx sont très liées aux aires du langage et de l'audition.
- ▶ Il existe plusieurs centres d'intégration au niveau diencéphalique, cérébelleux, mésencéphalique, et pontique.
- ▶ Toutes les commandes motrices se terminent dans le tronc cérébral au niveau du noyau moteur du nerf vague : le noyau ambigu.

Références

1. Asanau A, Timoshenko AP, Prades JM, Galusca B, Martin C, Féasson L. Posterior cricoarytenoid bellies: relationship between their function and histology. *J Voice*. 2011 Mar;25:e67-73. doi: 10.1016/j.jvoice.2010.11.004.
2. Bailly L, Cochereau T, Orgéas L, Henrich Bernardoni N, Rolland du Roscoat S, McLeer-Florin A, Robert Y, Laval X, Laurencin T, Chaffanjon P, Fayard B, Boller E. 3D multiscale imaging of human vocal folds using synchrotron X-ray microtomography in phase retrieval mode. *Sci Rep*. 2018;8:14003. doi: 10.1038/s41598-018-31849-w.
3. Brandon CA, Rosen C, Georgelis G, Horton MJ, Mooney MP, Sciote JJ. Staining of human thyroarytenoid muscle with myosin antibodies reveals some unique extrafusal fibers, but no muscle spindles. *J Voice*. 2003 Jun;17:245-54.
4. Cernea CR, Ferraz AR, Furlani J, Monteiro S, Nishio S, Hojaj FC, Dutra Júnior A, Marques LA, Pontes PA, Bevilacqua RG. Identification of the external branch of the superior laryngeal nerve during thyroidectomy. *Am J Surg*. 1992;164:634-9. doi: 10.1016/s0002-9610(05)80723-8.
5. Han Y, Wang J, Fischman DA, Biller HF, Sanders I. Slow tonic muscle fibers in the thyroarytenoid muscles of human vocal folds; a possible specialization for speech. *Anat Rec*. 1999;256(2):146-57. doi: 10.1002/(SICI)1097-0185(19991001)256:2<146::AID-AR5>3.0.CO;2-8.
6. Henry M, Pekala PA, Sanna B, Vikse J, Sanna S, Saganiak K, Tomaszewska IM, Tubbs RS, Tomaszewski KA. The Anastomoses of the Recurrent Laryngeal Nerve in the Larynx: A Meta-Analysis and Systematic Review. *J Voice*. 2017;31, 495-503. doi: 10.1016/j.jvoice.2016.11.004.
7. Hirano M. Morphological structure of the vocal cord as a vibrator and its variations. *Folia Phoniatr (Basel)*. 1974;26(2):89-94.
8. Jones JA, Munhall KG. Remapping auditory-motor representations in voice production. *Curr Biol*. 2005 Oct 11;15(19):1768-72. doi: 10.1016/j.cub.2005.08.063.
9. Lagier A. Toute l'anatomie pour l'orthophonie. De Boeck supérieur, Paris, 2019.
10. Larson CR, Burnett TA, Kiran S, Hain TC. Effects of pitch-shift velocity on voice Fo responses. *J Acoust Soc Am*. 2000 Jan;107(1):559-64. doi: 10.1121/1.428323.
11. Loucks TM, Poletto CJ, Simonyan K, Reynolds CL, Ludlow CL. Human brain activation during phonation and exhalation: common volitional control for two upper airway functions. *Neuroimage*. 2007;36:131-43. doi: 10.1016/j.neuroimage.2007.01.049.
12. Ludlow CL. Central Nervous System Control of Voice and Swallowing. *J Clin Neurophysiol*. 2015 ;32:294-303. doi: 10.1097/WNP.0000000000000186.
13. Negus V. The Comparative Anatomy and Physiology of the Larynx. W. Heinemann Medical Books, 1949
14. Prades JM, Dumollard JM, Timoshenko AP, Durand M, Martin C. Descriptive anatomy of the cricoarytenoid articulation: application to articular dynamics in carcinology. *Surg Radiol Anat*. 2000;22:277-82. doi: 10.1007/s00276-000-0277-y.
15. Reidenbach MM. The muscular tissue of the vestibular folds of the larynx. *Eur Arch Otorhinolaryngol*. 1998;255:365-7. doi: 10.1007/s004050050078.
16. Sataloff RT, Heman-Ackah YD, Hawkshaw MJ. Clinical anatomy and physiology of the voice. *Otolaryngol Clin North Am*. 2007 Oct;40:909-29.
17. Simonyan K, Horwitz B. Laryngeal motor cortex and control of speech in humans. *Neuroscientist*. 2011 Apr;17(2):197-208. doi: 10.1177/1073858410386727.
18. Wattendorf E, Westermann B, Fiedler K, Kaza E, Lotze M, Celio MR. Exploration of the neural correlates of ticklish laughter by functional magnetic resonance imaging. *Cereb Cortex*. 2013 ;23:1280-9. doi: 10.1093/cercor/bhs094.
19. Webster DB. Neuroscience of communication. Singular publishing, San diego, 1995.

PHYSIOLOGIE

06. Éléments sur les mécanismes respiratoires

Le moteur de la production vocale est l'air pulmonaire lorsqu'il est expulsé à travers des plis vocaux en position fermée. Il est donc nécessaire de connaître les grandes lignes du fonctionnement de l'appareil respiratoire.

L'inspiration est la conséquence de la contraction du muscle diaphragme. Il s'agit d'un muscle en forme de coupole qui ferme en bas la cage thoracique et sépare le contenu de la cage thoracique (principalement les poumons et le cœur) du contenu abdominal (foie, rate et tube digestif). La contraction du diaphragme entraîne son raccourcissement ce qui entraîne l'augmentation de volume de la cage thoracique et des poumons. Du fait de cet agrandissement de volume, la pression intra thoracique diminue, passant en dessous de la pression atmosphérique ambiante. Dès lors la pression intra-thoracique devient inférieure à la pression ambiante et il apparaît un flux d'air de l'extérieur vers l'intérieur qui correspond à l'inspiration. On note que pendant la phase de contraction du diaphragme la paroi abdominale est passivement repoussée vers l'avant du fait de la pression qu'exerce le diaphragme sur les viscères abdominaux.

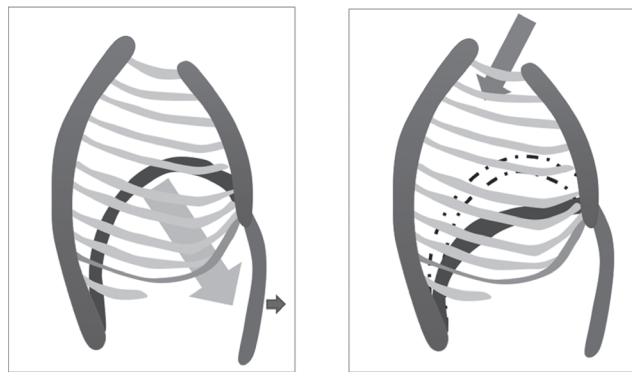


Figure 6-1. Mécanisme de l'agrandissement de la cage thoracique par la contraction du diaphragme

L'expiration commence avec la fin de la contraction du diaphragme. L'élasticité de celui-ci tend à lui faire retrouver sa forme initiale de coupole. La surpression intra-thoracique diminue et l'air thoracique s'évacue passivement vers l'extérieur. Cette phase de l'expiration est une phase de relaxation du muscle diaphragme. Dans l'expiration profonde ou la parole prolongée, les muscles abdominaux se contractent, ce qui repousse vers le haut les viscères abdominaux et donc le diaphragme en cours de relâchement, facilitant ainsi la « vidange » de la cage thoracique.

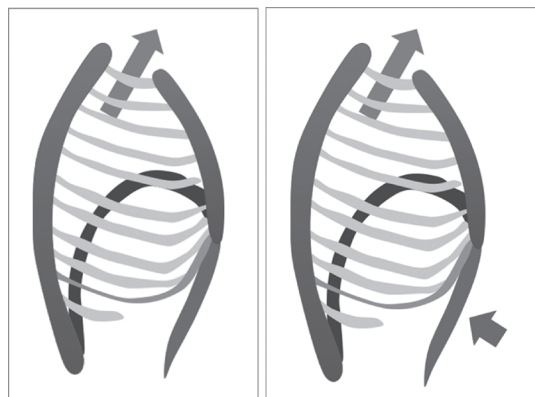


Figure 6-2. L'expiration commence par le relâchement du diaphragme, éventuellement assistée par la contraction des muscles abdominaux.

