

De l'anatomie fonctionnelle du carrefour aérodigestif à la physiologie de la déglutition

La description d'un processus aussi complexe que la déglutition fait référence à des bases anatomiques qui conditionnent les possibilités dynamiques des différentes structures du carrefour aérodigestif. La présentation des différentes régions participant à la déglutition étant disponible dans tous les manuels d'anatomie, nous développerons ici les points d'anatomie fonctionnelle du carrefour aérodigestif et de neuroanatomie nécessaires à la compréhension de la physiopathologie des troubles de la déglutition.

Au niveau du carrefour aéro-digestif, les dynamiques des structures sont exploitées lors de la déglutition et constituent des éléments de physiologie d'un point de vue biomécanique. Au niveau cérébral, la neuroanatomie et la neurophysiologie de la déglutition permettront de décrire le contrôle neurologique de la déglutition. Enfin, ce chapitre est complété par l'évolution de la déglutition avec l'âge en ciblant le développement de la déglutition chez l'enfant et le vieillissement de cette fonction.

Anatomie fonctionnelle

Dynamique labio-jugale

Les muscles de l'étage inférieur de la face forment une sangle labio-jugale indispensable à la préhension labiale et au maintien de la continence de la cavité orale. Le muscle orbiculaire de la bouche est le seul muscle constricteur (fermeture de la fente orale), contrairement aux autres muscles labio-jugaux qui sont dilatateurs de la fente orale. Ces derniers se terminent sur le muscle orbiculaire de la bouche, notamment au niveau du modiolus, au voisinage de la commissure labiale où ils forment un réseau musculaire "intriqué". Ils assurent une véritable synergie fonctionnelle de contrôle de la forme de la fente orale et de sa continence.

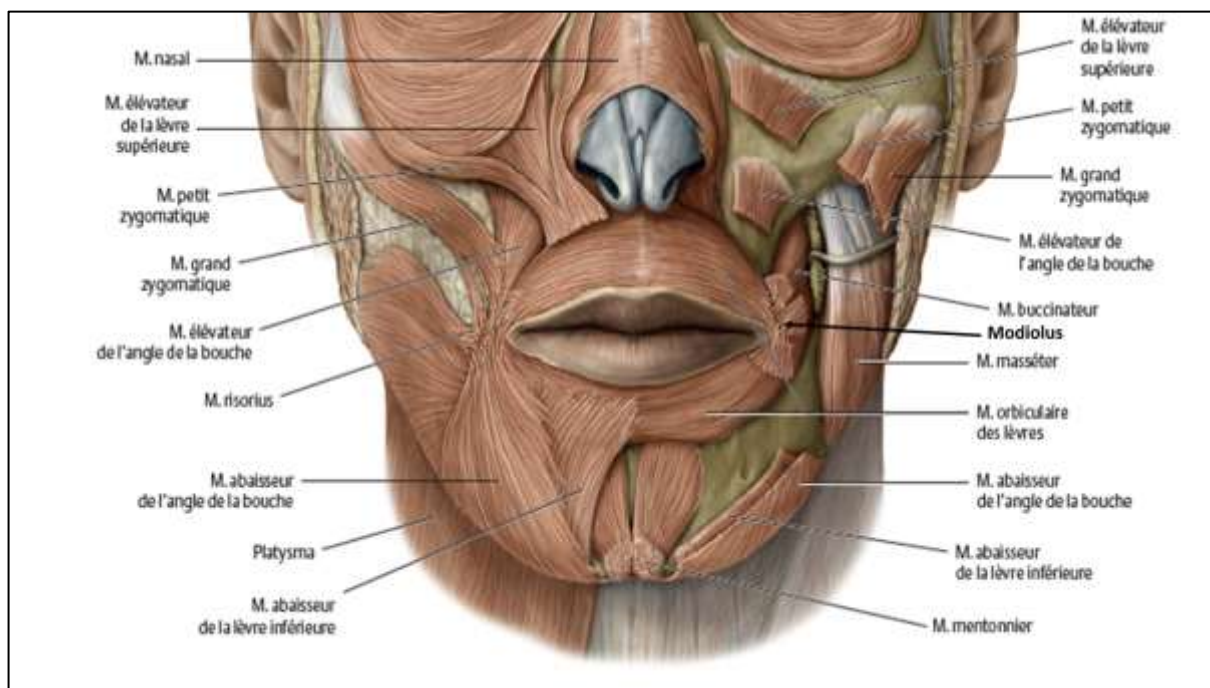


Figure 1 : Vue antérieure des muscles de la partie inférieure de la face.

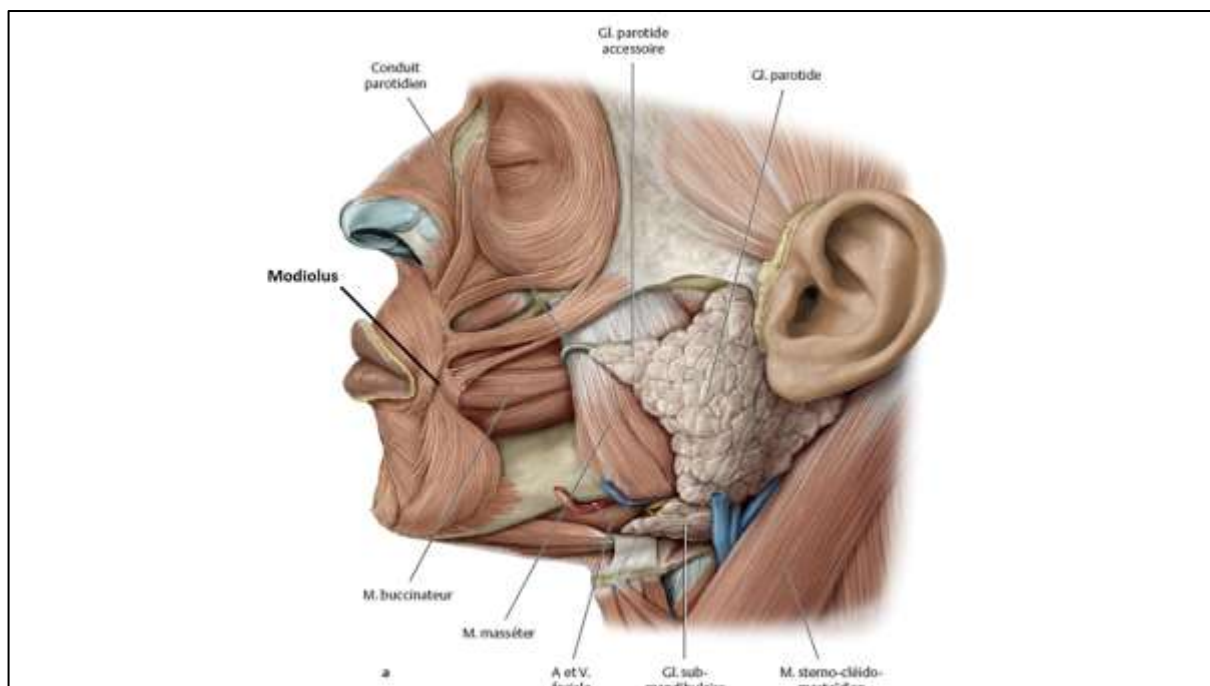


Figure 2 : Vue latérale des muscles de la sangle labio-jugale.

Le muscle orbiculaire des lèvres est composé de deux parties : l'une périphérique (appelée latérale), l'autre centrale (appelée médiale). La partie périphérique est en fait constituée de quatre faisceaux musculaires, deux pour chaque lèvre. Ils comprennent des fibres musculaires extrinsèques provenant entre autres des muscles buccinateurs. Son rôle déterminant dans l'occlusion labiale est modulé par les muscles dilatateurs qui tendent à étirer ou écarter les lèvres.

Les muscles dilatateurs rayonnent des lèvres vers les différentes régions de la face. Le fonctionnement des lèvres n'est donc pas sphinctérien : leur dynamique répond à une sectorisation en quartiers supérieur et inférieur, droite et gauche.

Le muscle buccinateur se situe à la partie profonde de la joue. Il s'insère en arrière sur le ligament ptérygomandibulaire et le fascia bucco-pharyngien, le bord antérieur de la branche de la mandibule et le maxillaire. En avant ses fibres s'entrecroisent au voisinage de la commissure labiale. Son rôle est particulièrement important au moment de la mastication en rétrécissant le vestibule (espace compris entre l'arcade dentaire et la face interne de la joue et des lèvres), toujours en synergie avec l'orbiculaire.

Au niveau du temps de transport oral, la sangle labio-jugale oppose une résistance musculaire à la pression intraorale développée au moment de la propulsion du bolus. L'augmentation du tonus des muscles est ainsi proportionnelle à l'augmentation de la pression intraorale.

Tous ces muscles sont innervés de chaque côté par le nerf facial homolatéral (septième paire de nerfs crâniens (VII)).

Dynamique mandibulaire

La dynamique mandibulaire a un rôle fondamental dans la fermeture et l'ouverture de la bouche. Au repos, la fente orale est normalement fermée et la respiration est nasale. La mandibule est libre, suspendue

grâce aux résistances élastiques des muscles masticateurs alors que les arcades dentaires sont espacées de quelques millimètres

Elle joue particulièrement un rôle dans la préhension et la préparation du bol alimentaire pour le rendre avalable quand cela est nécessaire. Cette dynamique est contrôlée de façon indépendante de celle de la sangle labio-jugale, et en est complémentaire.

Elle implique l'articulation temporo-mandibulaire et deux groupes musculaires antagonistes,

- les muscles éleveurs/suspenseurs de la mandibule (les muscles masticateurs) pour la fermeture
- les muscles abaisseurs de la mandibule (les muscles supra-hyoïdiens) pour l'ouverture de la bouche.

Les muscles ptérygoïdiens latéraux ont un rôle plus complexe contribuant avec les autres muscles aux mouvements masticatoires.

L'articulation temporo-mandibulaire

La mandibule est suspendue au neuro-crâne par l'intermédiaire de deux articulations condyliques, les articulations temporo-mandibulaires. Ces articulations synoviales possèdent un disque articulaire.

La position de référence est considérée comme la position en fermeture de la bouche. Les éléments de stabilisation de la mandibule en fermeture sont le disque articulaire et la capsule articulaire, les ligaments péri-articulaires, les muscles suspenseurs de la mandibule, et enfin l'appui des deux arcades dentaires.

L'abaissement de la mandibule permet l'ouverture de la bouche. Ce mécanisme est complexe car il associe une rotation de la tête mandibulaire, puis une translation au-delà de 15° d'ouverture.

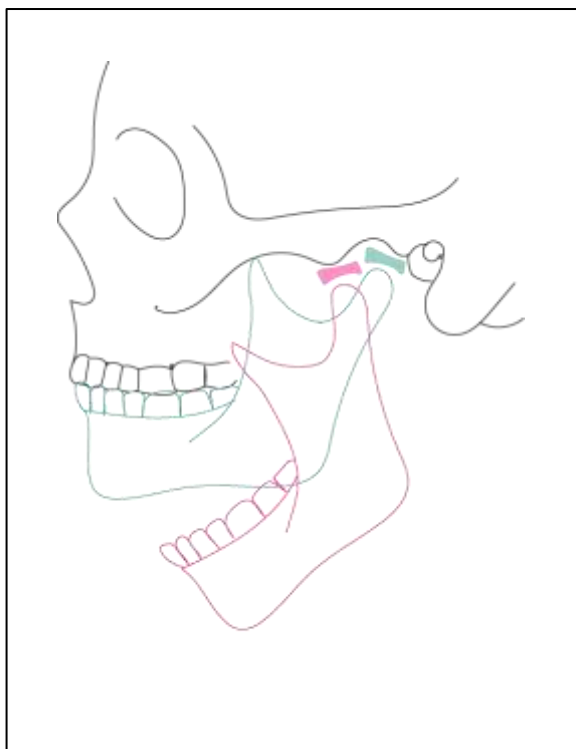


Figure 3 : Vue latérale du crâne. Le mouvement d'ouverture de la mandibule associe une rotation dans l'axe du condyle et une translation de ce dernier accompagné du disque articulaire.

Les muscles masticateurs

Ils conditionnent plusieurs mouvements (Tableau I).

Mouvements	Élévation/suspension (Contraction bilatérale)	Propulsion/rétropulsion (Contraction bilatérale)	Diduction
<u>Muscles</u>	Masséter Ptérygoïdien médial Fibres antérieures du muscle temporal Faisceau supérieur du muscle ptérygoïdien latéral	Rétropulsion : Fibres postérieures des muscles temporaux Propulsion : Faisceaux inférieurs des muscles ptérygoïdiens latéraux	Par leur contraction unilatérale : Faisceau inférieur du muscle ptérygoïdien latéral : Mouvements vers le côté controlatéral Faisceau supérieur du muscle ptérygoïdien latéral : Retour depuis une position controlatérale vers une position médiane.

Tableau I : Muscles impliqués dans les différentes dynamiques mandibulaires.

Ainsi, le faisceau supérieur et le faisceau inférieur du muscle ptérygoïdien latéral ont une activité réciproque. Le faisceau inférieur a un rôle dans l'ouverture, la propulsion et la diduction controlatérale. Il est en synergie avec les muscles supra-hyoïdiens dans l'ouverture de la bouche. Le faisceau supérieur du muscle ptérygoïdien latéral a un rôle dans la fermeture, la rétropulsion et la diduction homolatérale.

Tous ces muscles sont innervés par le nerf mandibulaire, branche terminale inférieure de la cinquième paire crânienne (V3).

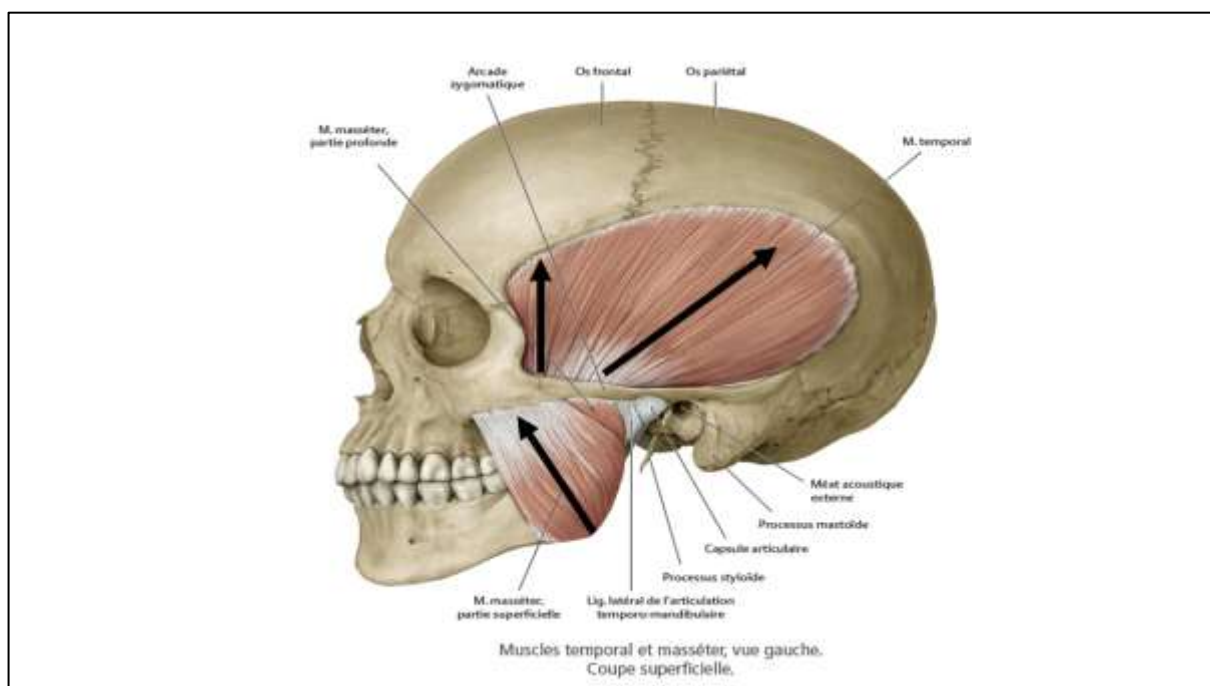


Figure 4. Vue latérale gauche du crâne montrant le muscle masséter : élévateur de la mandibule.

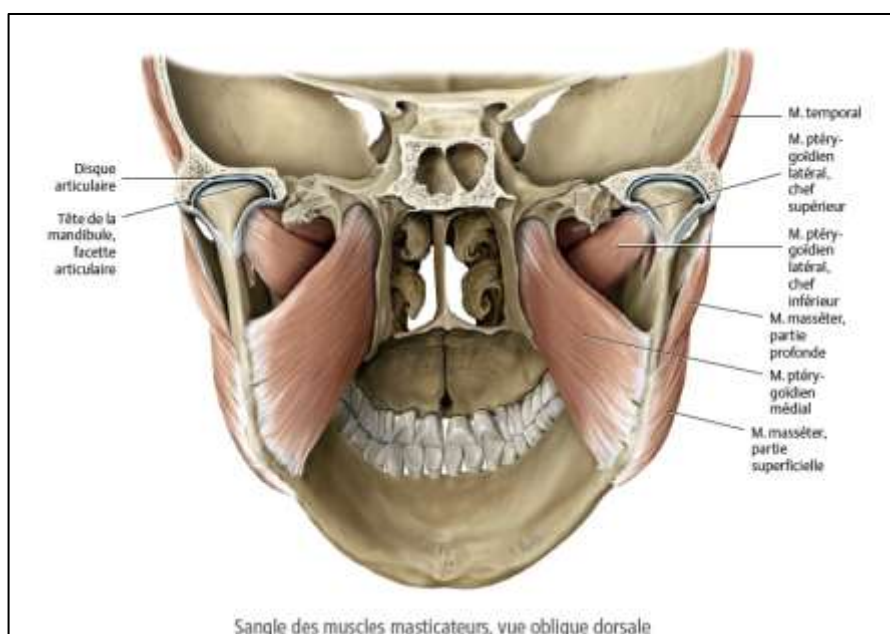


Figure 5. Vue postérieure montrant les muscles ptérygoïdiens

Les muscles supra-hyoïdiens

Ils comprennent les muscles : digastrique, stylo-hyoïdien, mylo-hyoïdien et génio-hyoïdien.

Le ventre antérieur du muscle digastrique, le mylo-hyoïdien et le génio-hyoïdien composent le plancher buccal (figures 6 et 7). Ils forment un hamac tendu entre la mandibule et l'os hyoïde.

Ce dernier est le seul os du corps humain « libre » de toute articulation. Il fait partie du squelette ostéo-membraneux de la langue et présente des points d'insertion pour des muscles provenant de l'ensemble du carrefour aérodigestif.

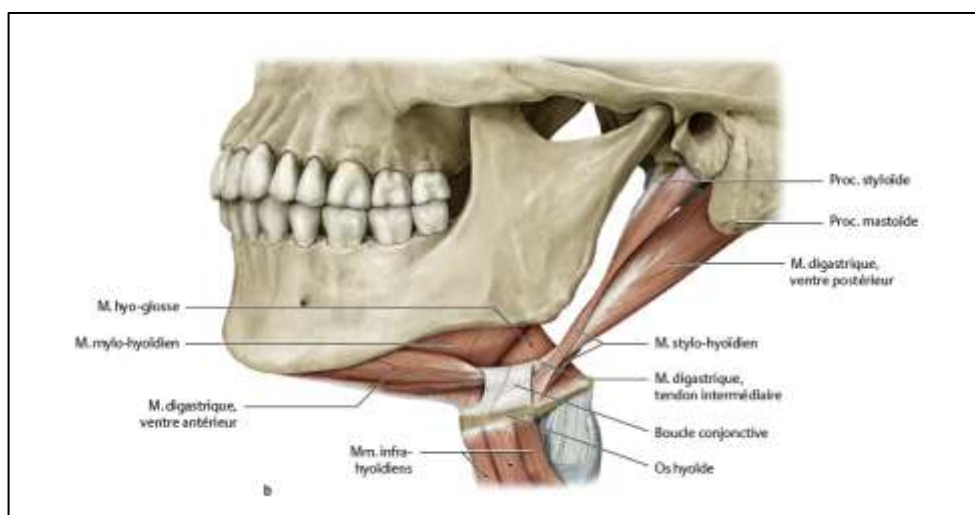


Figure 6. Vue latérale des muscles du plancher buccal.

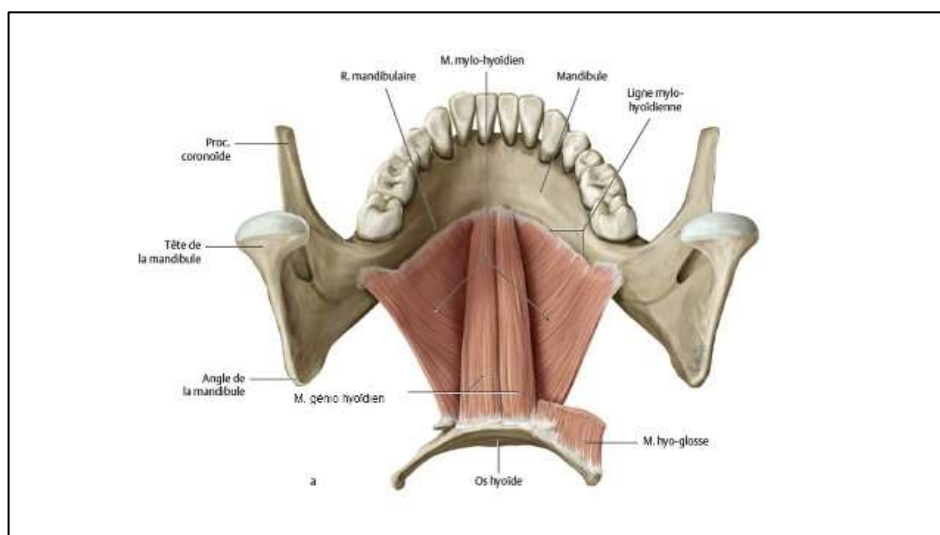


Figure 7. Vue supérieure des muscles du plancher buccal

De ce fait la fonction des muscles du plancher dépend de la mobilité de leurs insertions et donc principalement des moyens de mobilisation ou de stabilisation de la mandibule (décrits ci-dessus) et de l'os hyoïde.

En ce qui concerne l'os hyoïde, ces moyens dépendent des forces musculaires produites par les autres muscles supra-hyoïdiens (ventre postérieur du muscle digastrique et muscle stylo-hyoïdien) et les muscles infra-hyoïdiens. Ils sont déterminants pour le déroulement de l'ensemble du processus oro-pharyngé de la déglutition comme le résume le **tableau II**.

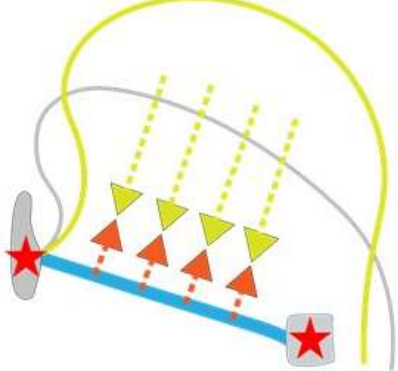
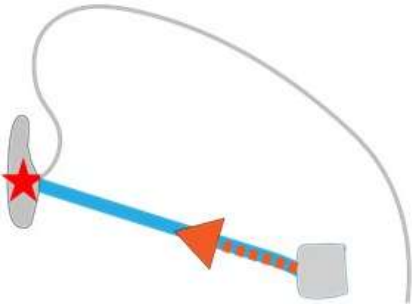
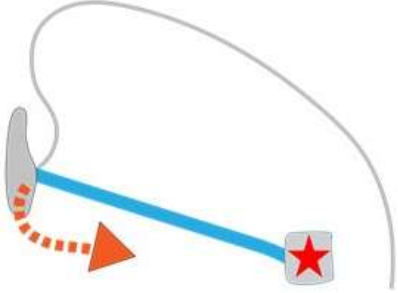
	Os hyoïde Stabilisé	Os hyoïde non stabilisé
Mandibule stabilisée	Contraction isométrique servant d'appui à la langue/ Phase préparatoire et phase orale 	Ascension et propulsion de l'os hyoïde/ Entraînant le larynx pendant la phase pharyngée 
Mandibule non stabilisée	Abaissement de la mandibule/ Ouverture de la bouche 	

Tableau II : fonction des muscles du plancher buccal en fonction de la stabilisation ou non de la mandibule et de l'os hyoïde.

Ces muscles sont innervés par :

- le nerf hypoglosse, douzième paire crânienne (XII) pour le muscle génio-hyoïdien
- le rameau masticateur du nerf mandibulaire (V3), branche terminale du nerf trijumeau (cinquième paire crânienne) pour le ventre antérieur du digastrique et le muscle mylo-hyoïdien
- Un rameau du nerf facial (VII), septième paire crânienne pour le ventre postérieur du muscle digastrique et le muscle stylohyoïdien.

En résumé :

[Tapez ici]

[Tapez ici]

[Tapez ici]

Le fonctionnement des lèvres n'est pas sphinctérien mais sectorisé en 4 quartiers.

La dynamique mandibulaire complète celle de la dynamique labio-jugale dans la préhension et le contrôle du bolus dans la cavité buccale.

La fermeture de la fente orale fait intervenir les muscles masticateurs et une partie des muscles de la partie inférieure de la face. La contraction des muscles masticateurs assure la fermeture et sa position dans le plan horizontal.

L'ouverture de la bouche comprend plusieurs mécanismes en fonction de la qualité de cette ouverture :

- le mécanisme principal est le relâchement des muscles élévateurs de la mandibule,
- les autres mécanismes font intervenir la contraction des muscles péribuccaux, de la langue et des muscles supra-hyoïdiens.

Dans le mécanisme principal, la relaxation du muscle ptérygoïdien latéral est incomplète avec la contraction du faisceau inférieur nécessaire à la libération de l'articulation temporo-mandibulaire.

Au cours de la mastication, l'activité des muscles temporaux et des muscles masséters est synchrone, le temps de repos est plus long que le temps d'activité. Le rythme est plus élevé pour les aliments durs. Chez les édentés à 70 % sans prothèse, pour les aliments mous, il y a participation de tous les muscles faciaux et de la langue (aide à la mastication).

Au cours du temps de transport oropharyngé de la déglutition, l'activité des muscles temporaux et des muscles masséters est normalement minime. En effet, la mandibule doit simplement être stabilisée (sans que la fermeture complète soit nécessaire) afin d'assurer un point fixe à l'ensemble de la musculature supra-hyoïdienne.

Dynamique linguale

La langue a un rôle clé dans toutes les phases de la déglutition oropharyngée. La dynamique linguale résulte d'une combinaison de mobilisations et de déformations de sa masse musculaire.

Les déterminants de la dynamique linguale

Cette masse musculaire est fixée sur un squelette ostéo-membraneux mobile. Elle comprend au moins 17 muscles (chiffre variable en fonction des auteurs) répartis en une musculature intrinsèque (insertions exclusivement au sein de la langue) et une musculature extrinsèque (au moins une insertion musculaire en dehors de la langue) (Figure 8). La masse linguale est ancrée sur l'os hyoïde, la mandibule, et les raphés hyo-mandibulaires. La position de la langue dépend de l'action des muscles extrinsèques, et sa forme dépend des muscles intrinsèques.

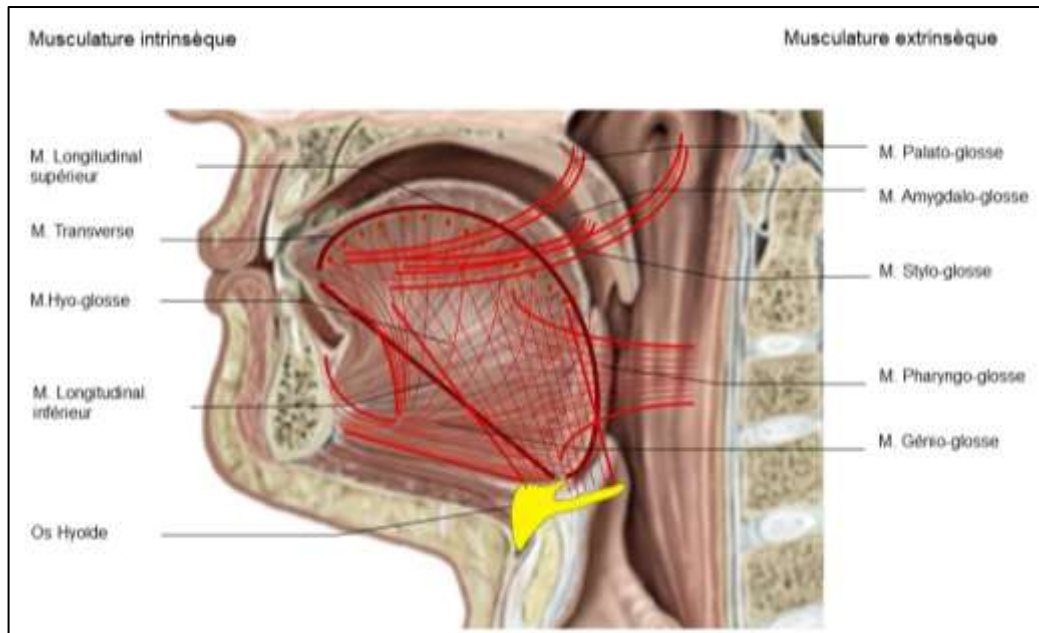


Figure 8. Schéma de la musculature linguale

Les mécanismes de la déformation de la langue sont complexes. La langue doit être considérée comme un hydrostat, c'est-à-dire que son volume reste constant (Hermant, 2017). Ainsi l'action de chaque muscle a des conséquences non seulement dans la direction du raccourcissement de ses fibres musculaires, mais elle entraîne également des déplacements liés à la nécessaire conservation du volume lingual.

Sa dynamique est également conditionnée par la position et la dynamique du plancher buccal, de la mandibule et/ou de l'os hyoïde, en particulier pour ses déplacements et déformations verticaux (voir Tableau II).

La division fonctionnelle de la langue :

Sur le plan morphologique, la langue est classiquement divisée en deux parties par le V lingual, considérant ainsi le corps de la langue, horizontal et en position intraorale, et la racine de la langue, verticale et en position pharyngée. Elle est en fait divisée en trois parties sur le plan fonctionnel qui considère une partie antérieure et une partie moyenne dans le corps de la langue, la partie postérieure correspondant à la racine. Cette division fonctionnelle de la langue se superpose à la segmentation fonctionnelle de son muscle principal, le génioglosse. Chaque segment de ce muscle a une action indirecte sur les autres segments de la langue (Figure 9).

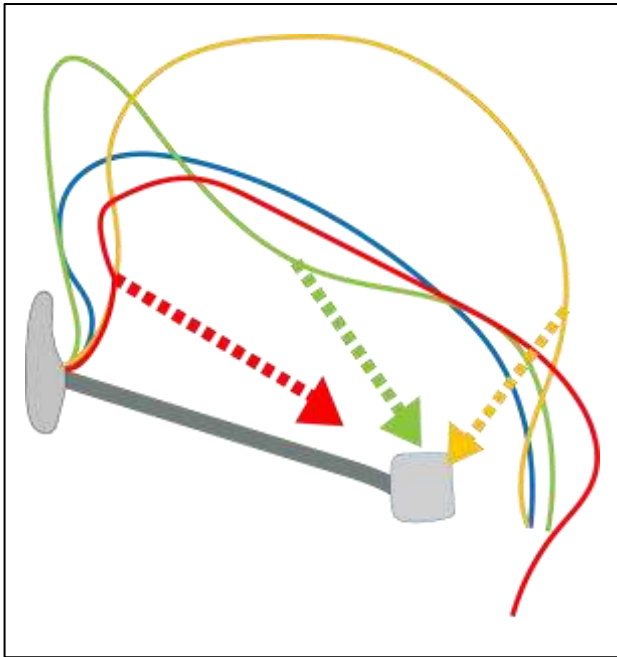


Figure 9 : Schéma d'une coupe sagittale de la langue montrant les effets de la contraction musculaire de chaque partie du génio-glosse (flèches) sur la forme générale de la langue (contour). En bleu : position de repos de la langue ; en rouge : effet de la contraction de la partie antérieure ; en vert : effet de la contraction de la partie moyenne ; en jaune : effet de la contraction de la partie postérieure.

La partie antérieure de la langue réalise le point d'articulation des phonèmes antérieurs en parole. Ce mouvement participe au déplacement et à la déformation de langue nécessaires pour aller chercher des aliments déposés sur le plancher buccal pour les ramener sur la langue. Au moment de la déglutition, l'appui progressif d'avant en arrière contre le palais est sous l'action des muscles longitudinaux supérieur et inférieur, du muscle transverse, et des parties moyennes et postérieures du muscle génioglosse.

La partie moyenne de la langue s'élève pour la réalisation des phonèmes dorso-vélaire. Au contact du voile du palais au moment de la déglutition, elle participe à la contention postérieure de la cavité buccale. L'élévation est surtout liée aux muscles extrinsèques dont les muscles stylo-glosses et palato-glosses, et à la contraction des parties antérieure et postérieure du génio-glosse. Ensuite, elle se déforme pour laisser passer le bol alimentaire dans le pharynx. Elle s'abaisse et se comprime contre le plancher buccal sous l'action du muscle hyo-glosse et de la partie moyenne du muscle génio-glosse, ce mouvement entraîne également un recul de la racine de la langue.

La partie postéro-inférieure ou racine (communément appelée « base de la langue ») permet la réalisation de phonèmes pharyngés dans certains systèmes linguistiques. Elle réalise un mouvement postérieur de recul quand les aliments passent dans le pharynx, qui est un élément fonctionnel fondamental de la propulsion pharyngée. La synergie avec les muscles pharyngés est assurée par le muscle pharyngo-glosse et le lien étroit existant entre le muscle hyo-glosse et le muscle constricteur moyen du pharynx. Bien que cette partie de la langue soit largement occupée par la partie postérieure du muscle génio-glosse, le recul de la racine de la langue est sous la dépendance des contractions des parties antérieures et moyennes de ce muscle qui créent le déplacement en arrière de la racine de la langue en raison du caractère hydrostatique de cette dernière.

En résumé,

La dynamique linguale est dominée par ses capacités de déformation à volume constant (hydrostat) et des liens synergiques avec les structures adjacentes par sa musculature extrinsèque.

Le muscle génioglosse a un rôle important avec des effets différents en fonction de sa zone de contraction. Ainsi, les mouvements de l'un des secteurs de la langue résultent de la contraction du génioglosse dans les autres secteurs, en synergie avec les muscles intrinsèques.

La dynamique vélaire

Le voile du palais a un rôle de protection des voies aériennes en assurant la fermeture postérieure de la cavité buccale et la fermeture du rhinopharynx ou cavum.

Description du voile

La musculature du voile du palais comprend cinq paires de muscles. Ils ont tous une insertion sur l'aponévrose palatine (figure 10).

Les muscles palato-glosses rejoignent les bords latéraux de la langue. Ils font également partie des muscles extrinsèques de la langue. Ces muscles réduisent l'isthme du gosier en rapprochant la partie arrière de la langue du voile du palais, principalement en abaissant ce dernier.

Les muscles palato-pharyngiens présentent des insertions basses au niveau du pharynx et du larynx et des insertions hautes, dont une au niveau de l'hamulus ptérygoïdien, permettant une continuité avec le constricteur supérieur du pharynx. Ils abaissent le voile du palais et ils raccourcissent le pharynx.

Les muscles élévateur du voile et tenseur du voile s'insèrent en haut au niveau de la base du crâne. Le muscle tenseur du voile a la particularité de posséder un tendon qui se réfléchit dans le sillon de l'hamulus et se termine en intriquant ses fibres avec le tendon opposé, participant à la formation de l'aponévrose palatine.

Enfin, les muscles uvulaires sont les seuls muscles intrinsèques du voile du palais. Leur contraction crée une augmentation de volume postéro-supérieur du voile du palais, ce qui favorise son accolement avec la paroi pharyngée postérieure.

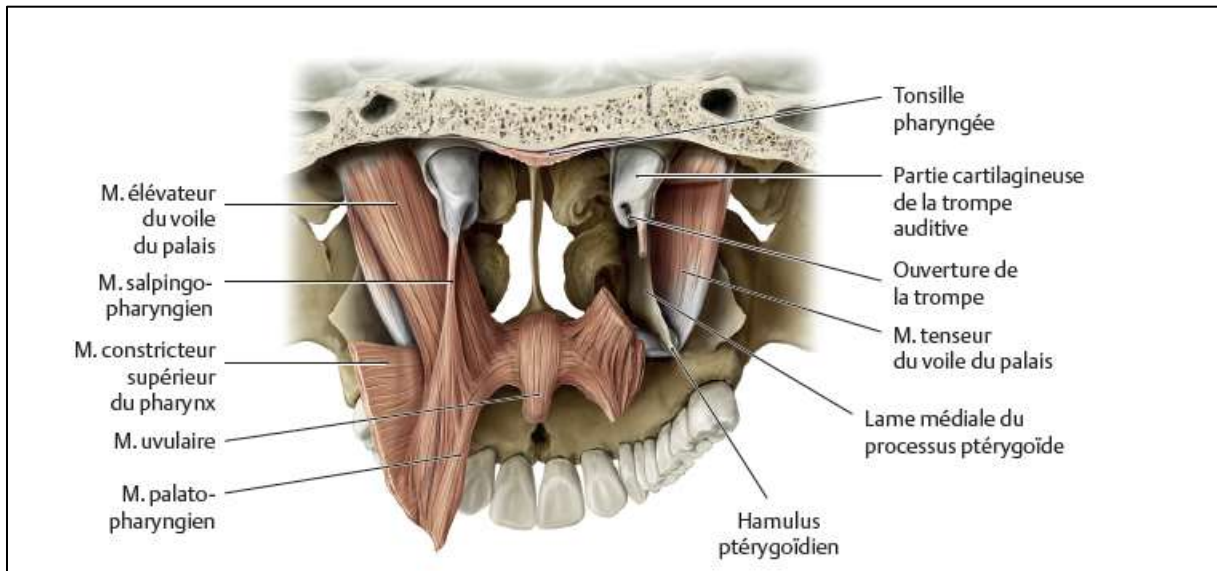


Figure 10. Vue postérieure des muscles du voile du palais

Ces muscles sont innervés par :

- le nerf glossopharyngien (IX- neuvième paire crânienne) et le nerf vague (X- dixième paire crânienne) pour les muscles uvulaires, les muscles élévateurs et palato-pharyngiens,
- une branche du nerf mandibulaire (V3- cinquième paire crânienne) pour le muscle tenseur du voile,
- le nerf hypoglosse (XII- douzième paire crânienne) et le nerf vague (X- dixième paire crânienne) pour le muscle palatoglosse.

Fermeture vélo-linguale et fermeture vélo-pharyngée

La dynamique du voile du palais permet deux types d'occlusions (figure 11) :

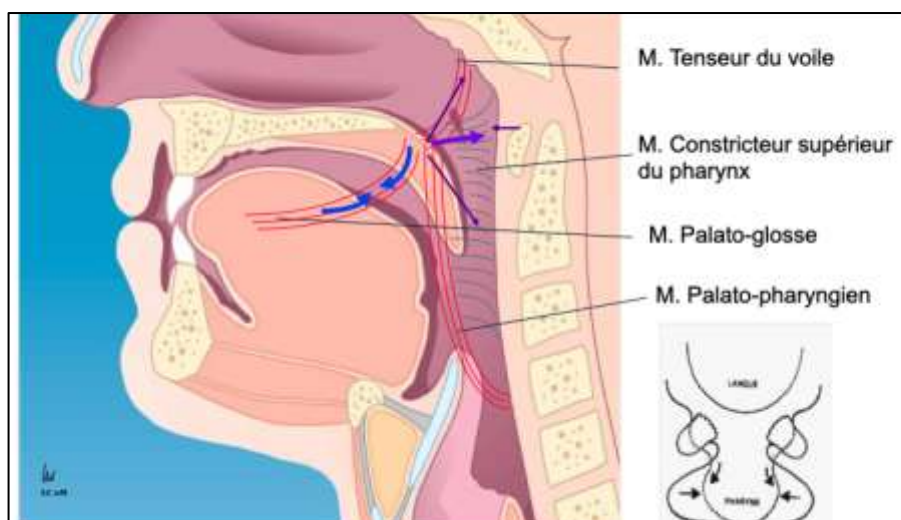


Figure 11. Schéma des forces résultant des muscles du voile impliqués dans la fermeture vélo-linguale et vélo-pharyngée.

L'occlusion vélo-linguale est assurée par le muscle palato-glosse et les muscles élévateurs de la partie moyenne de la langue, en particulier le stylo-glosse et la partie postérieure du génio-glosse. Elle permet la fermeture de la communication oropharyngée, donc la continence orale postérieure, pendant la mastication et le début du temps oral.

L'occlusion vélo-pharyngée est différente en fonction du type de fonction réalisée, la « force » de la fermeture étant corrélée à la pression oropharyngée. Ainsi, au moment de la déglutition, cette pression est beaucoup plus élevée du fait de la propulsion linguale, que lors de la réalisation des phonèmes oraux. L'occlusion vélo-pharyngée démarre à la fin du temps oral et doit être maintenue pendant toute la durée du temps pharyngé. Elle fait alors intervenir un double processus :

- la contraction synergique du palato-pharyngien et du constricteur supérieur du pharynx qui efface les couloirs postérieurs et latéraux du pharynx,
- la contraction des muscles élévateur et tenseur du voile, et du muscle uvulaire.

En résumé :

Le voile du palais est un organe de jonction entre la cavité orale et le pharynx, et entre l'oropharynx et le rhino-pharynx. Il participe au contrôle de la transition phase orale-phase pharyngée par la transition d'une occlusion vélo-linguale puis d'une occlusion vélo-pharyngée.

La musculature vélaire est en synergie avec les muscles de la langue et du pharynx avec un rôle particulièrement important du palato-pharyngien pour la synchronisation des événements de la déglutition.

La dynamique laryngée

Le larynx a un rôle majeur par ses capacités d'occlusion mais aussi par ses capacités de déplacements verticaux et antérieurs au sein du carrefour aéro-digestif.

Les trois étages du larynx

Le larynx est divisé en 3 parties par rapport au plan glottique (figure 12).

- Le plan glottique comprend les plis vocaux et le plancher du ventricule laryngé.
- La région sous-glottique correspond à la face médiale du cartilage cricoïde.
- La région sus-glottique est divisée en vestibule laryngé et en aditus laryngé (ou « margelle laryngée ». Le vestibule est formé par le ventricule, les plis vestibulaires (communément appelés « bandes ventriculaires »), la face laryngée de l'épiglotte et la face médiale des aryénoïdes.

L'aditus laryngé, ou margelle laryngée (par analogie au rebord d'un puits) constitue l'orifice d'entrée dans le larynx et sa frontière avec le laryngo-pharynx. Elle est orientée en bas et en arrière. Elle comprend le

bord libre de l'épiglotte, les replis ary-épiglottiques, le sommet des massifs aryténoïdiens et l'incisure inter-aryténoïdienne.



Figure 12. Coupe sagittale du larynx montrant ses différents étages.

Les déterminants de la dynamique et les différents niveaux de fermeture laryngée

Comme la musculature linguale et vélaire, la musculature laryngée est divisée en musculature intrinsèque (cinq paires de muscles, tous innervés par des branches du nerf vague (X)) et musculature extrinsèque comprenant des muscles décrits au niveau du plancher buccal, de la langue, du pharynx ou de la musculature cervicale.

La musculature intrinsèque est responsable de la mobilité des structures intra-laryngées et donc de la forme de la filière laryngée. Tous les muscles, à l'exception des muscles crico-aryténoïdiens postérieurs, ont une action d'adduction c'est-à-dire de fermeture. Ce déséquilibre est lié à la structure élastique du squelette cartilagineux laryngé qui tend à le maintenir ouvert lors de la respiration et assure une composante mécanique passive à la réouverture après un mouvement d'occlusion laryngée.

Le larynx a la propriété de se fermer avec un degré d'occlusion plus ou moins important selon la fonction qu'il doit assurer (Figure 13).

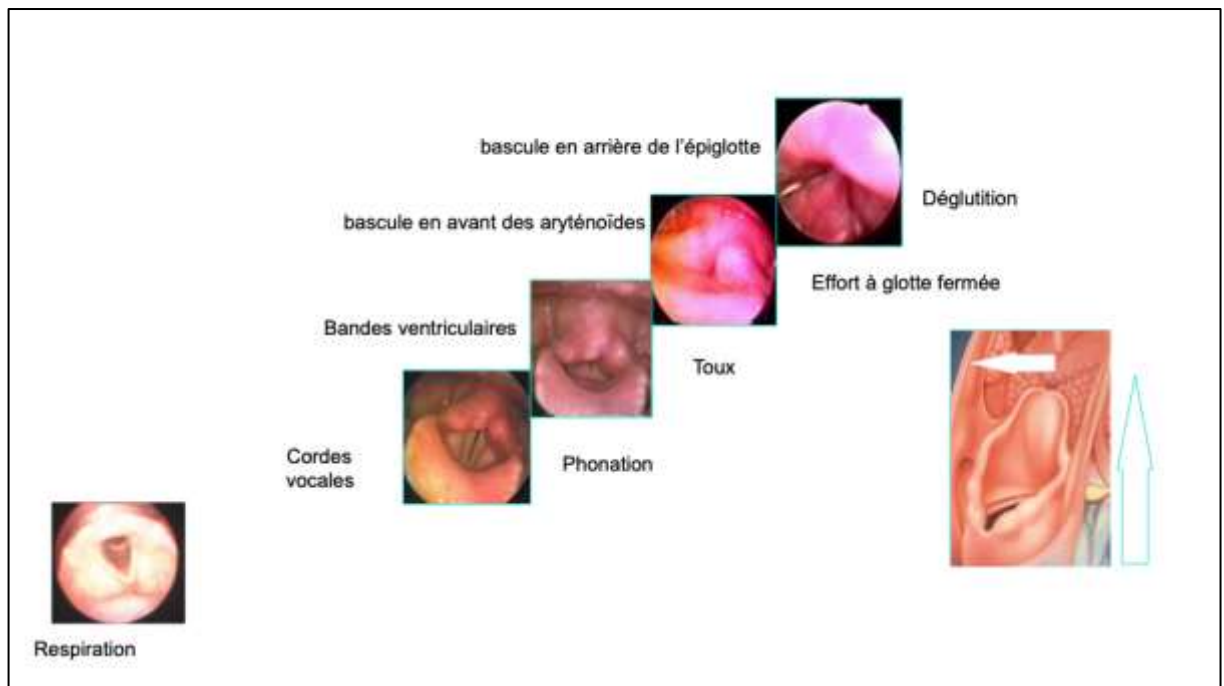


Figure 13 : Les différents niveaux de fermeture laryngée

Le premier niveau est simplement glottique avec une adduction des plis vocaux en phonation.

Le deuxième niveau correspond à la toux ou au hémage avec au-dessus des cordes vocales, l'adduction des bandes ventriculaires.

Le troisième correspond à l'effort à glotte fermée, l'occlusion est complétée par la bascule en avant des aryénoïdes.

Le quatrième niveau est réalisé au moment de la déglutition par la bascule en arrière de l'épiglotte. Cette bascule est principalement passive car elle résulte du mouvement de recul de la base de la langue associé à l'ascension et à la projection en avant du larynx. La contraction des muscles présents dans les replis ary-épiglottiques reste marginale. Enfin l'inversion complète de la courbure de l'épiglotte survient sous l'effet de la contraction péristaltique du pharynx lors de la déglutition.

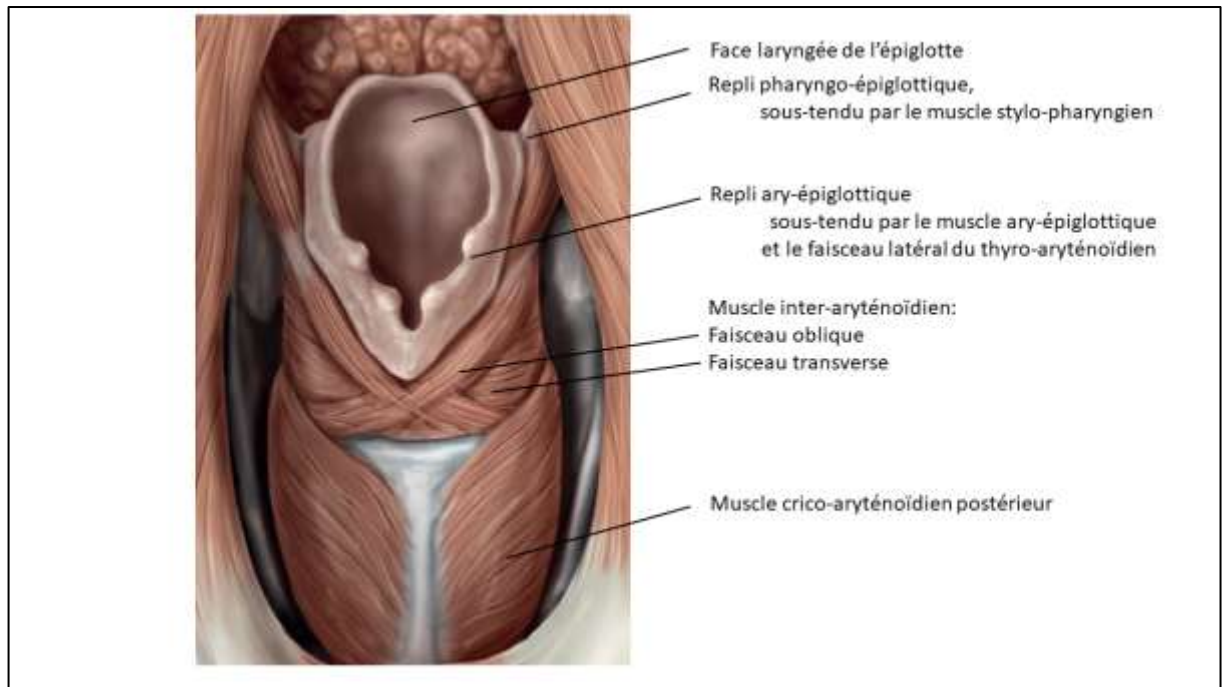


Figure 14. Vue postérieure de la musculature intrinsèque du larynx

Cette occlusion complète du larynx s'effectue de bas en haut de manière séquentielle, ce qui permet aux particules alimentaires ayant éventuellement pénétré dans le larynx au début du temps pharyngé, d'être chassées dans le pharynx.

Sur le plan anatomique cette fermeture laryngée met en jeu des faisceaux musculaires contigus allant, en partant du bas, des muscles crico-aryténoïdiens latéraux, thyro-aryténoïdiens, inter-aryténoïdiens, ary-épiglottiques (cheminant dans les replis du même nom) puis aux muscles stylo-pharyngiens (muscles pharyngés formant le relief du repli pharyngo-épiglottique) (Figure 14). Cette séquence anatomique met en exergue les liens existant entre une fermeture laryngée complète et la synchronisation des composantes extrinsèques notamment pharyngées.

Ainsi, la dynamique laryngée est souvent qualifiée de manière erronée de sphinctérienne alors qu'elle est comparable, d'après Fink, à un « repliement » (Fink, 1956). De manière imagée, la comparaison peut être faite avec la fermeture d'un carton comprenant deux volets latéraux (plis vocaux et bandes ventriculaires), un volet postérieur (aryténoïdes) et un volet antérieur (épiglotte).

La musculature intrinsèque du larynx est innervée par les nerfs laryngés récurrents et supérieurs, tous deux issus du nerf vague (X).

La toux, qui est un mécanisme de protection des voies aériennes inférieures, consiste en une fermeture laryngée obtenue de manière volontaire ou réflexe. Le mécanisme réflexe comprend une afférence médiée par le nerf laryngé supérieur et une efférence par le nerf laryngé inférieur ou récurrent.

Le déplacement du larynx et synergie : Musculature extrinsèque

La musculature extrinsèque du larynx au sens strict comprend :

- Des muscles d’origines supra-hyoïdiennes : les muscles stylo-pharyngiens et les muscles palato-pharyngiens,
- Des muscles infra-hyoïdiens : les muscles sterno-thyroïdiens et thyro-hyoïdiens,
- Les muscles constricteurs inférieurs du pharynx.

Les muscles sterno-thyroïdiens et thyro-hyoïdiens, de par leur insertion au niveau de la ligne oblique du cartilage thyroïde, participent à l’occlusion laryngée. En effet cette zone du cartilage thyroïde est stratégique pour une légère plicature des ailes thyroïdiennes. La contraction du sterno-thyroïdien en attirant le larynx vers le bas écarte les ailes thyroïdiennes alors que la contraction du muscle thyro-hyoïdien, en rapprochant le cartilage thyroïde de l’os hyoïde, tend à rapprocher les ailes l’une de l’autre. Le rôle du muscle stylo-pharyngien dans la fermeture laryngée a déjà été décrit.

Les fibres antérieures du muscle palato-pharyngien s’insèrent à leur extrémité inférieure sur la partie latérale du bord supérieur et au bord postérieur du cartilage thyroïde en se confondant partiellement avec le stylo-pharyngien. Le muscle palato-pharyngien participe par les mécanismes décrits pour les muscles précédents à la fermeture laryngée.

L’insertion proximale du muscle stylo-pharyngien est la base du processus styloïde de l’os temporal. Il présente un faisceau d’insertion épiglottique, un faisceau qui s’insère sur la corne supérieure et le bord supérieur du cartilage thyroïde, et un faisceau pharyngé. Il participe à l’élévation du larynx et à sa fermeture par les mécanismes décrits plus haut, et à la synchronisation avec la dynamique pharyngée.

Globalement, la dynamique d’ascension du larynx favorise sa fermeture et les muscles extrinsèques contribuent à la synchronisation de celle-ci par rapport à la dynamique d’autres structures (voile, pharynx...).

Sur le plan fonctionnel, la notion de musculature extrinsèque du larynx est étendue à l’appareil suspenseur du larynx assuré principalement par l’intermédiaire de l’os hyoïde, et il est commun de parler de « complexe hyo-laryngé ». La musculature extrinsèque permet alors les déplacements verticaux et antéro-postérieurs du larynx. Elle comprend alors en plus (Figure 15) :

- les muscles sus-hyoïdiens qui suspendent le larynx à la base du crâne (muscle stylo-hyoïdien et ventre postérieur du muscle digastrique), et à la mandibule (muscles du plancher buccal),
- les autres muscles sous-hyoïdiens qui amarrent l’os hyoïde vers le bas. Il s’agit des muscles omo-hyoïdiens et sterno-hyoïdiens (en plus des muscles sterno-thyroïdiens et thyro-hyoïdiens).

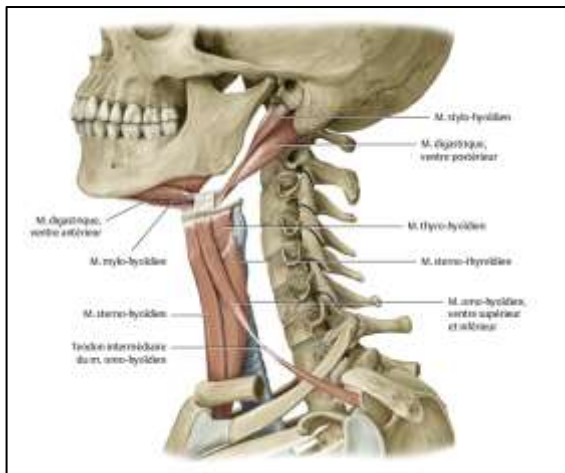


Figure 15. Vue latérale des muscles laryngés extrinsèques. Le muscle constricteur inférieur du pharynx et les muscles stylo-pharyngien et palato-pharyngien ont été omis sur ce schéma.

La statique céphalique

Le carrefour aérodigestif ne peut pas être isolé sur le plan fonctionnel de son cadre cervico-céphalique. Sa dynamique est soumise aux contraintes posturales avec en premier lieu la statique céphalique. La pesanteur attire la tête en bas et en avant et la musculature cervico-céphalique, incluant les muscles crânio-cervico-mandibulaires et hyo-pharyngo-laryngés a pour fonction de stabiliser la tête malgré cette contrainte. Enfin, la statique céphalique est en inter-relation avec la posture corporelle et la respiration.

Comme le montre le schéma de Brodie (Figure 16), l'ensemble crânio-cervico-mandibulaire et l'os hyoïde sont interdépendants et les groupes musculaires assurant cette statique font partie de la musculature extrinsèque du larynx.

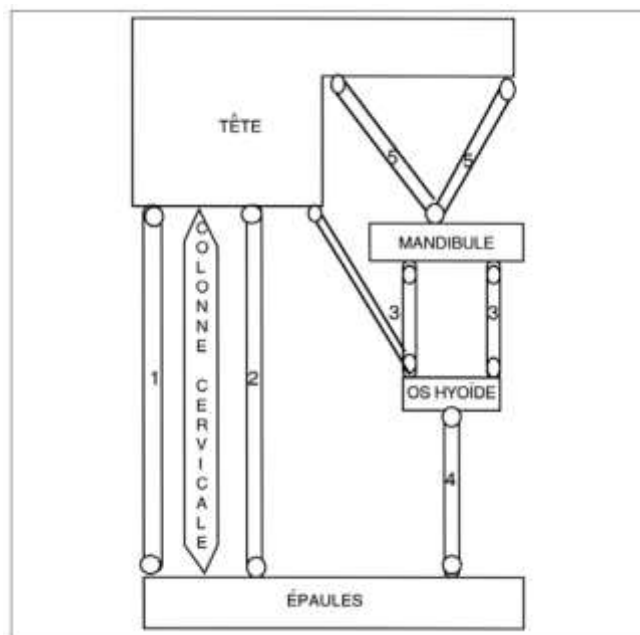


Figure 16. Schéma de Brodie. 1 : Muscles posturaux ; 2 : Muscles spinaux profonds ; 3 : Muscles sus-hyoïdiens ; 4 : Muscles sous-hyoïdiens ; 5 : Muscles masticateurs.

La dynamique pharyngée

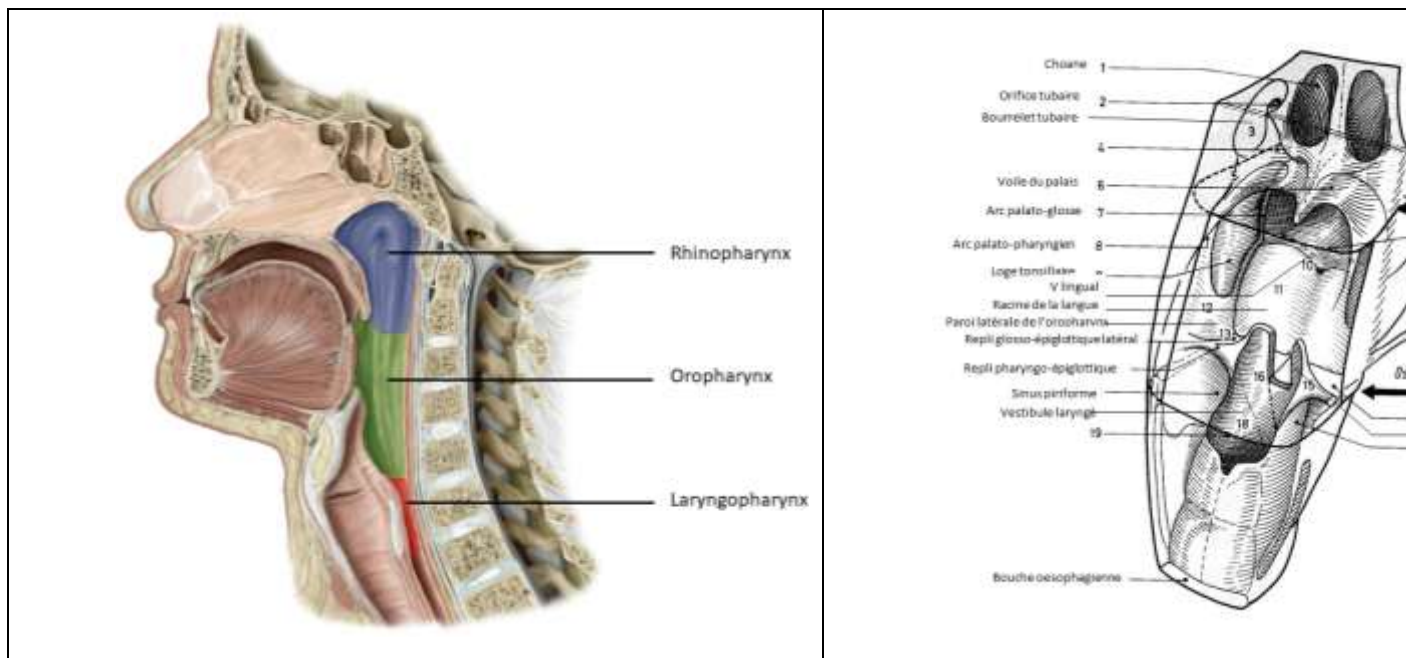


Figure 17 : Gauche : Coupe sagittale du pharynx montrant ses trois étages. Droite : vue postéro-latérale du pharynx ouvert.

Le pharynx se divise en trois parties :

- 1) Le rhinopharynx correspond à la partie du pharynx située en arrière des fosses nasales, au-dessus du niveau du voile du palais quand celui-ci est relevé. Il n'intervient pas dans la déglutition normale de laquelle il est exclu par la fermeture vélo-pharyngée.
- 2) L'oropharynx est la région située en arrière de la cavité buccale. L'oropharynx comprend la racine de la langue et la vallécule ainsi que la face linguale de l'épiglote.

Ses limites sont (figures 18 et 19) :

- en avant l'isthme du gosier, constitué du bord libre du voile du palais, des arcs palato-glosses, et du V lingual .
- en haut la projection du bord du voile du palais (quand il est relevé) sur la paroi pharyngée postérieure,
- en bas le bord de l'épiglote et sa projection sur la paroi pharyngée postérieure.

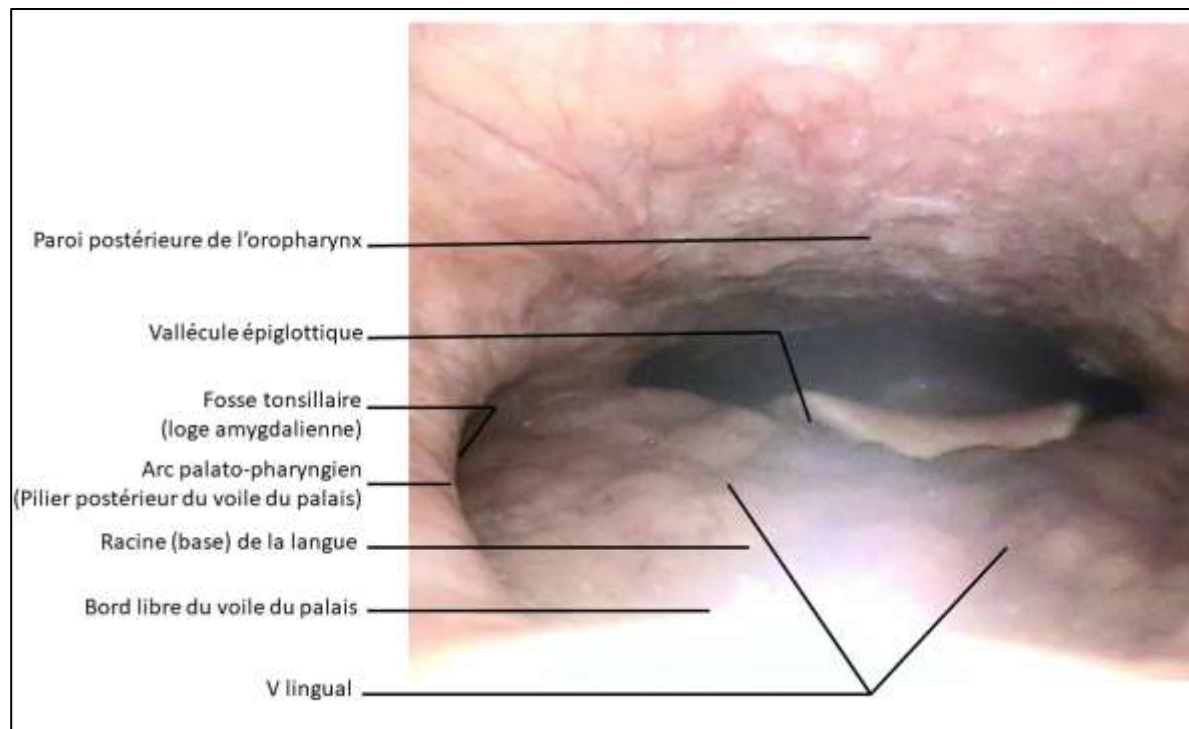


Figure 18 : vue endoscopique de l'oropharynx

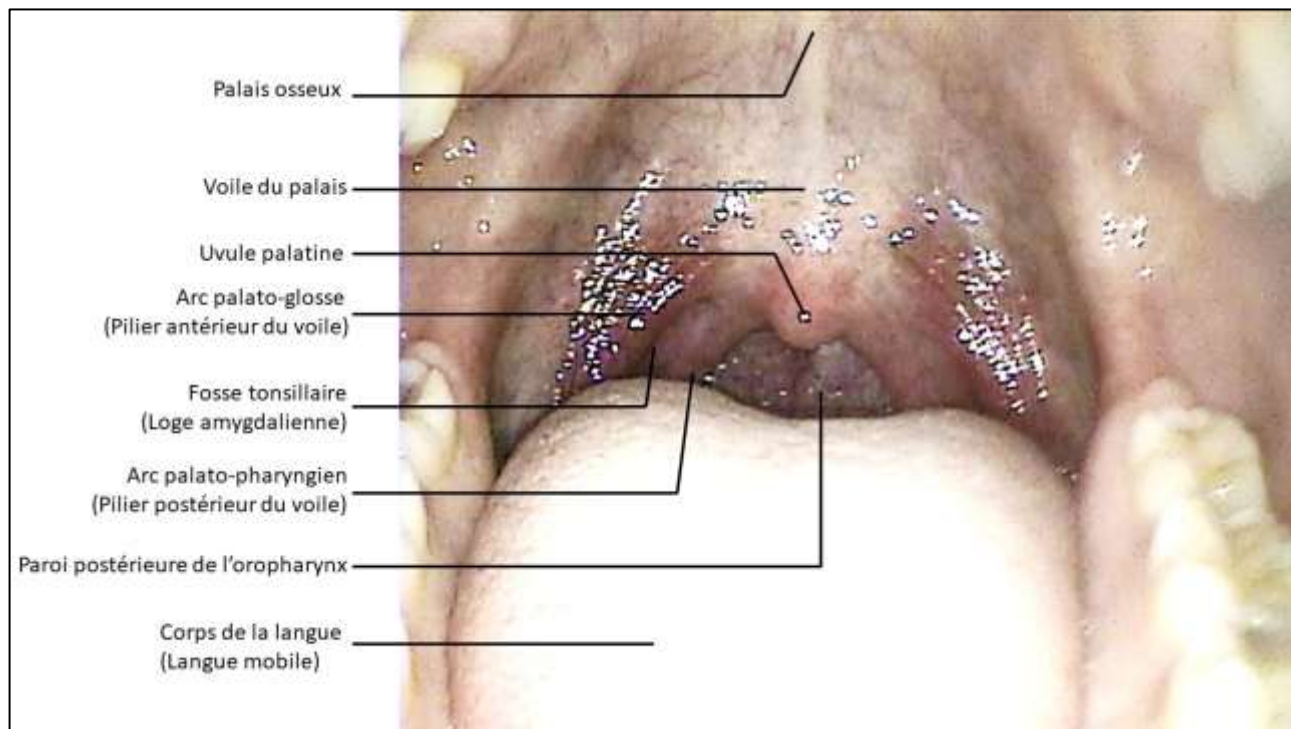


Figure 19. Oropharynx vu depuis la cavité buccale

3) Le laryngopharynx (ou hypopharynx) a la forme d'un entonnoir encerclant latéralement et en arrière le larynx (figures 20 et 21). Les sinus piriformes sont constitués par l'invagination de la muqueuse qui tapisse en avant et en dehors l'angle entre le larynx et l'hypopharynx. La partie inférieure de l'entonnoir pharyngé est en continuité avec l'œsophage.

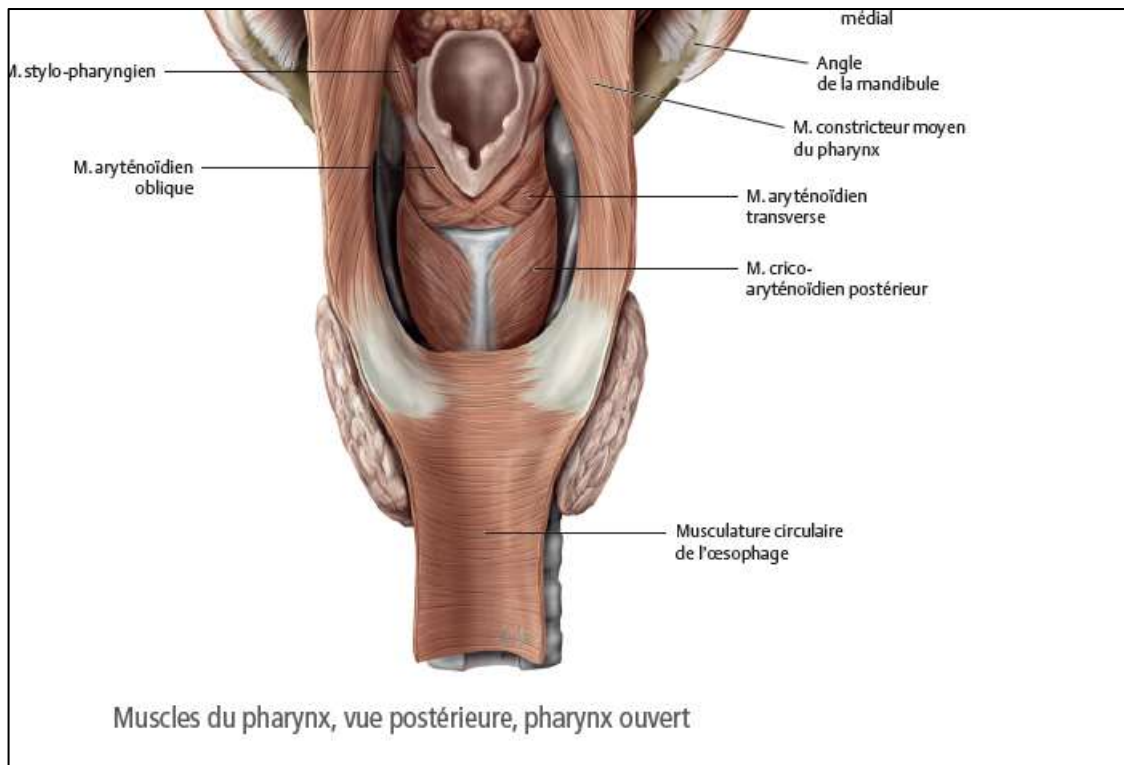


Figure 20. Vue postérieure du laryngo-pharynx (après section des muscles constricteurs).

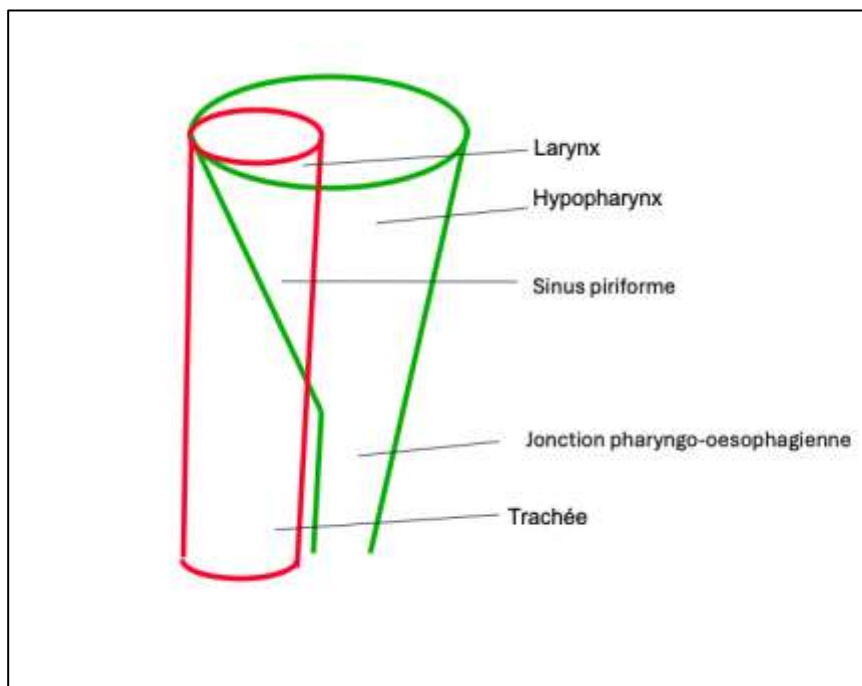


Figure 21. Schéma de profil des rapports entre le larynx et l'hypopharynx (profil droit).

L'aponévrose pharyngée constitue le squelette fibreux du pharynx. La musculature se répartit en deux groupes : les muscles constricteurs et les muscles élévateurs du pharynx (Figure 22).

Les muscles constricteurs sont au nombre de trois : les constricteurs supérieur, moyen et inférieur. Ces trois muscles plats se réunissent à ceux du côté opposé en formant une gouttière musculaire concave en

avant. Ils s'imbriquent les uns sur les autres en se recouvrant partiellement. Ils ont une action synergique à l'origine d'une contraction progressive du haut vers le bas, diminuant le calibre latéral et antéropostérieur du pharynx. Cette contraction est à l'origine du terme de péristaltisme pharyngé qui chasse les aliments vers l'œsophage au moment de la déglutition.

Le muscle constricteur inférieur du pharynx est une zone critique pour la physiologie de la déglutition. Il présente deux faisceaux : le faisceau thyro-pharyngien qui s'insère sur le cartilage thyroïde et le faisceau crico-pharyngien qui s'insère sur la face externe du cartilage cricoïde.

Le faisceau thyro-pharyngé a une action de compression des ailes thyroïdiennes participant ainsi à la fermeture laryngée concomitante de la propulsion pharyngée.

Le faisceau crico-pharyngé est souvent identifié comme le muscle de la « bouche de l'œsophage » alors que le sphincter supérieur de l'œsophage correspond à la région de transition entre le pharynx et l'œsophage sans limite anatomique définie.

Ces muscles sont innervés par le plexus pharyngien formé de branches du nerf glossopharyngien (IX) et du nerf vague (X). Le constricteur inférieur reçoit également des rameaux du nerf laryngé inférieur ou récurrent, branche du nerf vague (X).

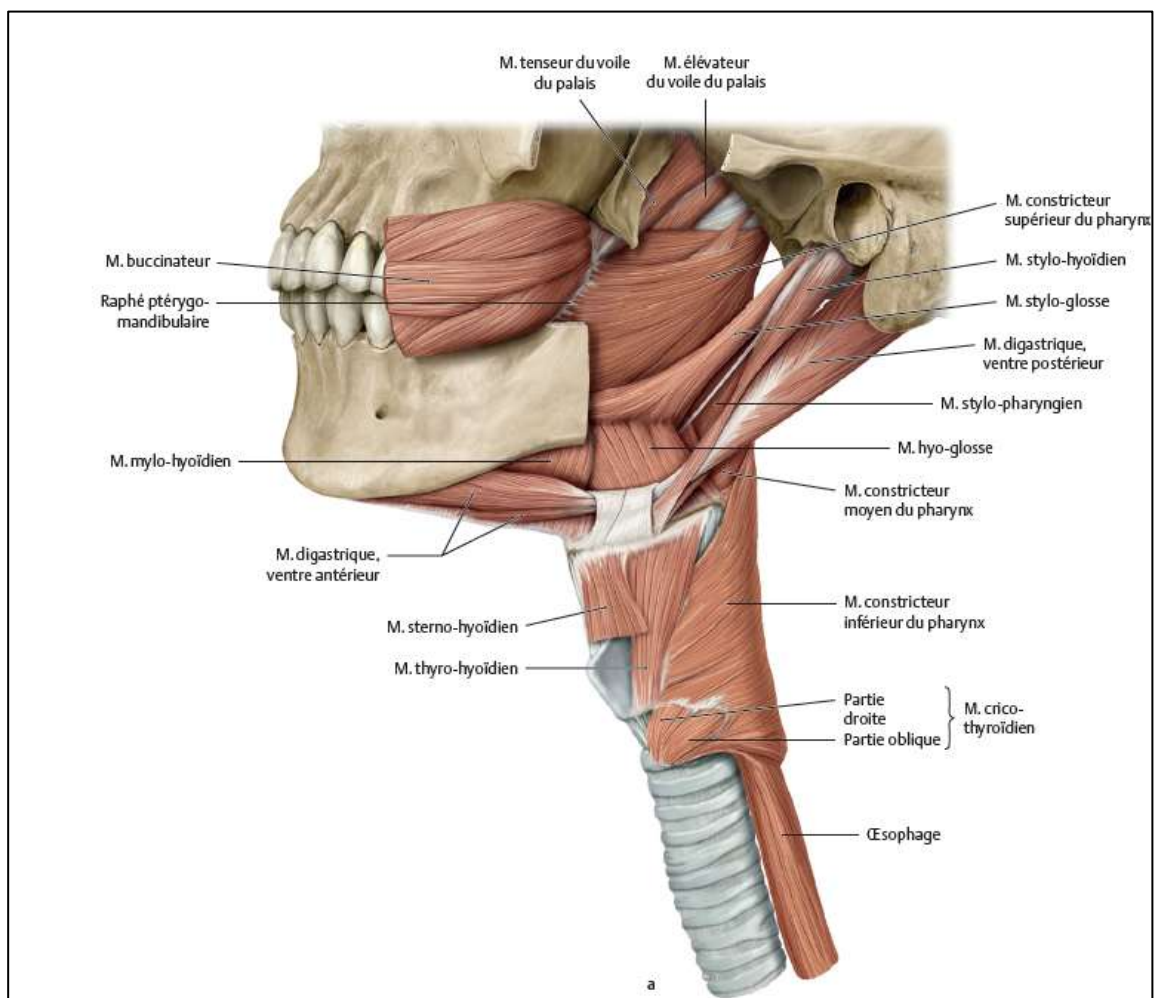


Figure 22. Les muscles du pharynx.

Les muscles élévateurs (raccourcisseurs) du pharynx sont :

- le muscle stylo-pharyngien : il présente un faisceau qui se perd dans l'aponévrose pharyngée, outre ses faisceaux d'insertion sur le larynx (voir Le déplacement du larynx et synergie : Musculature extrinsèque). Il participe ainsi à l'élévation concomitante du pharynx et du larynx. Il reçoit directement un rameau du nerf glossopharyngien (IX), en plus de l'innervation par le plexus pharyngien (dépendant des paires crâniennes IX et X),
- le muscle palato-pharyngien (voir la dynamique vélaire),
- le muscle salpingo-pharyngien qui assure l'ouverture de la trompe auditive (au cours de la déglutition ou du bâillement). Il est innervé par le plexus pharyngé (IX et X).

L'œsophage

L'œsophage est le dernier organe de transit du bolus avant l'estomac.

L'œsophage est un conduit musculo-membraneux qui donne suite au laryngopharynx. Après un court segment cervical, son segment thoracique traverse la partie postérieure du médiastin puis il traverse le hiatus œsophagien du muscle diaphragme pour devenir abdominal. Il se termine dans l'abdomen en s'abouchant dans l'estomac. L'origine de l'œsophage correspond au bord inférieur du cricoïde.

La composition de l'œsophage comprend, de la lumière à la périphérie :

- Une muqueuse qui est un épithélium pluri-stratifié non kératinisant
- Une musculeuse constituée de deux couches musculaires. Dans la couche interne, les fibres ont une orientation circulaire ; dans la couche externe, elles sont longitudinales. La musculature striée du pharynx est remplacée progressivement par des fibres musculaires lisses qui constituent la musculeuse du corps de l'œsophage. Ainsi, les fibres musculaires striées sont majoritaires dans le tiers supérieur, alors que le tiers inférieur ne comporte que des fibres musculaires lisses.
- Une couche fibreuse ou adventice.

La jonction pharyngo-œsophagienne est marquée en manométrie par une zone d'hyperpression correspondant à l'extrémité inférieure du pharynx et aux premiers centimètres de l'œsophage : il s'agit du Sphincter Supérieur de l'œsophage (SSO). Le SSO est ainsi constitué par la partie inférieure du constricteur inférieur du pharynx (faisceau crico-pharyngé), et la partie haute de la musculature œsophagienne. Son ouverture relève de plusieurs composantes. La première, neuromusculaire, est le relâchement des muscles formant cette région par une inhibition du tonus de repos, sous le contrôle du nerf vague. La deuxième est liée au déplacement en avant et en haut du larynx qui ouvre au sens propre le sphincter. Enfin, elle est induite par la force exercée par le bolus lui-même, propulsé par le pharynx, sur les parois du sphincter. Ce point d'anatomie est fondamental car la relaxation du muscle crico-pharyngien ne crée pas de lumière au niveau du sphincter. Son rôle est permissif, il va favoriser les composantes mécaniques.

Cette région a pour fonction d'empêcher les reflux œso-pharyngés alimentaires, bilieux, ou aériques.

La lumière de l'œsophage au repos est normalement virtuelle, l'œsophage se distend pour laisser passer le bolus. Ses contractions musculaires propulsent le bolus vers l'estomac, il s'agit du péristaltisme œsophagien.

L'extrémité inférieure de l'œsophage est le siège d'une nouvelle hyperpression de repos en manométrie, appelée sphincter inférieur de l'œsophage (SIO). La fermeture fonctionnelle de l'extrémité

inférieure de l'œsophage est un mécanisme important pour empêcher le reflux gastro-œsophagien ou la sortie du contenu acide en dehors de l'estomac.

Le sphincter supérieur de l'œsophage

Constitué par la partie inférieure du constricteur inférieur du pharynx (faisceau crico-pharyngé), et la partie haute de la musculature œsophagienne, son ouverture relève de deux composantes. La première, neuromusculaire, est le relâchement des muscles formant cette région. La deuxième est mécanique, liée au mouvement en avant et en haut du larynx qui ouvre au sens propre le sphincter et à la force exercée par le passage du bolus sous l'effet de la propulsion du bolus. Ce point d'anatomie est fondamental car la relaxation du muscle crico-pharyngien ne crée pas de lumière au niveau du sphincter. Son rôle est seulement permissif.

L'unité anatomo-fonctionnelle du carrefour aérodigestif

L'unité anatomique et fonctionnelle que constitue la musculature pharyngée avec ses expansions vélaire, buccale et otique a été décrite par A. Chancholle. L'étude anatomique lui permet de comprendre le vélo-pharynx comme un des éléments d'un système complexe de boucles musculo-aponévrotiques fonctionnant schématiquement à la façon d'un sphincter. Ces boucles se développent à partir du muscle constricteur supérieur du pharynx et de ses trois extensions ([figure 23](#)).

Cette conception semble pouvoir être étendue au larynx par l'intermédiaire de la musculature extrinsèque. Ainsi dans un plan vertical, le muscle stylopharyngien et le muscle palatopharyngien pourraient s'intégrer dans une unité pharyngo-laryngée. En fait, à chaque étage du pharynx, existe une unité fonctionnelle avec les structures mobiles situées en avant ([Tableau III](#)).

Cette conceptualisation traduit les intrications neuromusculaires à la base du fonctionnement des différentes structures anatomiques au cours des différentes fonctions du carrefour aérodigestif. Ainsi les synchronisations dynamiques ne dépendent pas uniquement de la commande neurologique, mais relèvent aussi du fonctionnement interdépendant des différentes structures au sein d'une unité fonctionnelle.

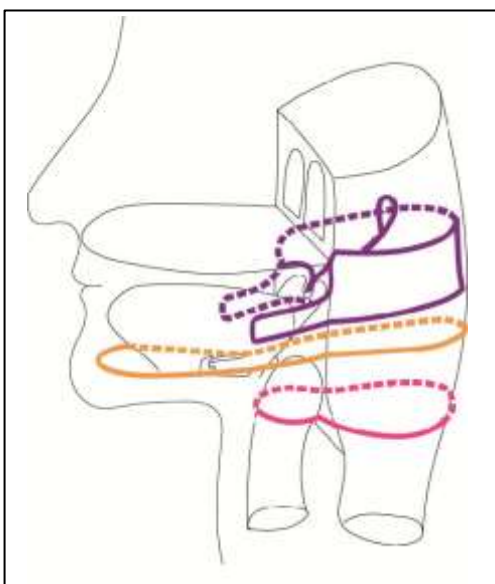


Figure 23. Les boucles musculo-aponévrotiques, unités fonctionnelles des voies aérodigestives supérieures. (D'après A. Chancholle).

M. constricteurs	Partie du muscle	Rapport	Unité fonctionnelle avec
Supérieur	Ptérygopharyngienne	M. Palatopharyngien	Voile
	Buccopharyngienne	M. Buccinateur	Sangle Labiojugale
	Mylopharyngienne	M. Mylohyoïdien	Plancher Buccal
	M. Pharyngoglosse	M. Transverse	Langue
Moyen	Chondropharyngienne	M. Génio-glosse	Langue
	Cératopharyngienne	Os Hyoïde	Appareil hyoïdien
Inférieur	Thyro-pharyngienne	Thyroïde	Larynx
	Cricopharyngienne	Cricoïde	Larynx
Muscles élévateurs		Rapport	Unité fonctionnelle avec
Stylopharyngien		M. Aryépiglottique	Larynx
Palatopharyngien			Voile Larynx

Tableau III. Les unités fonctionnelles à partir de la musculature pharyngée.

Au cours de la déglutition, les intrications fondamentales suivantes peuvent être soulignées :

- l'élévation de la partie arrière de la langue et l'abaissement du voile du palais dans la fermeture vélo-linguale,
- la fermeture vélo-pharyngée complète, le début du péristaltisme pharyngé et le début de l'ascension laryngée par la boucle entre la partie ptérygo-pharyngienne du muscle constricteur supérieur et le muscle palato-pharyngien,
- le recul de la base de la langue par la contraction du muscle pharyngo-glosse qui correspond à la partie glosso-pharyngienne du constricteur supérieur,
- l'occlusion de la margelle laryngée et l'ascension laryngée,
- l'ascension et la projection antérieure du larynx et l'ouverture mécanique du sphincter supérieur de l'œsophage.

La physiologie de la déglutition (biomécanique)

La déglutition est classiquement décrite comme le processus par lequel les aliments sont transportés de la bouche à l'estomac en assurant la protection des voies aériennes.

Or la grande majorité des déglutitions effectuées quotidiennement sont des déglutitions non alimentaires identifiant l'importance de la composante oro-pharyngée. En effet, la déglutition est une activité biologique de base essentielle par son rôle dans la protection des voies aériennes autant que par sa fonction d'assurer l'état nutritionnel. Son mécanisme consiste à reconfigurer l'oropharynx d'un appareil respiratoire en une voie « alimentaire » de déglutition pendant moins d'une seconde (Vose & Humbert, 2019), événement qui se produit plus de 600 fois par jour. Ces 2 aspects de la déglutition renvoient à la notion d'efficacité de la déglutition qui concerne la capacité à faire passer des aliments ou autres substances à partir de la bouche et/ou de la gorge dans l'œsophage, et à la notion de sécurité de la déglutition qui consiste en empêcher que ces substances entrent dans le poumon.

La déglutition alimentaire

La classique description de la déglutition alimentaire en trois temps : oral, pharyngé et œsophagien de la déglutition, repose sur des bases anatomiques (Matsuo & Palmer, 2008).

L'intégration des données de biomécanique et des données du contrôle neurologique de la déglutition a conduit à subdiviser le temps oral en temps de préparation du bol alimentaire et temps de transport oral (Kendall, 2002). Cette redistribution de la division en 4 phases de la déglutition correspond à un modèle mieux adapté à la réalité clinique de la dysphagie oropharyngée (Matsuo & Palmer, 2008). Dans tous les cas, ces 2 descriptions ne reflètent pas la diversité de l'alimentation humaine du fait des différents modes de préhension et de préparation du bol alimentaire qui dépendent sur le plan neurologique d'acquisitions praxiques de localisations cérébrales différentes (mastication, succion, aspiration...).

De plus, le temps de transport oral et le temps de transport pharyngé correspondent à un phénomène continu qui pourrait être regroupé en un temps de transport oropharyngé.

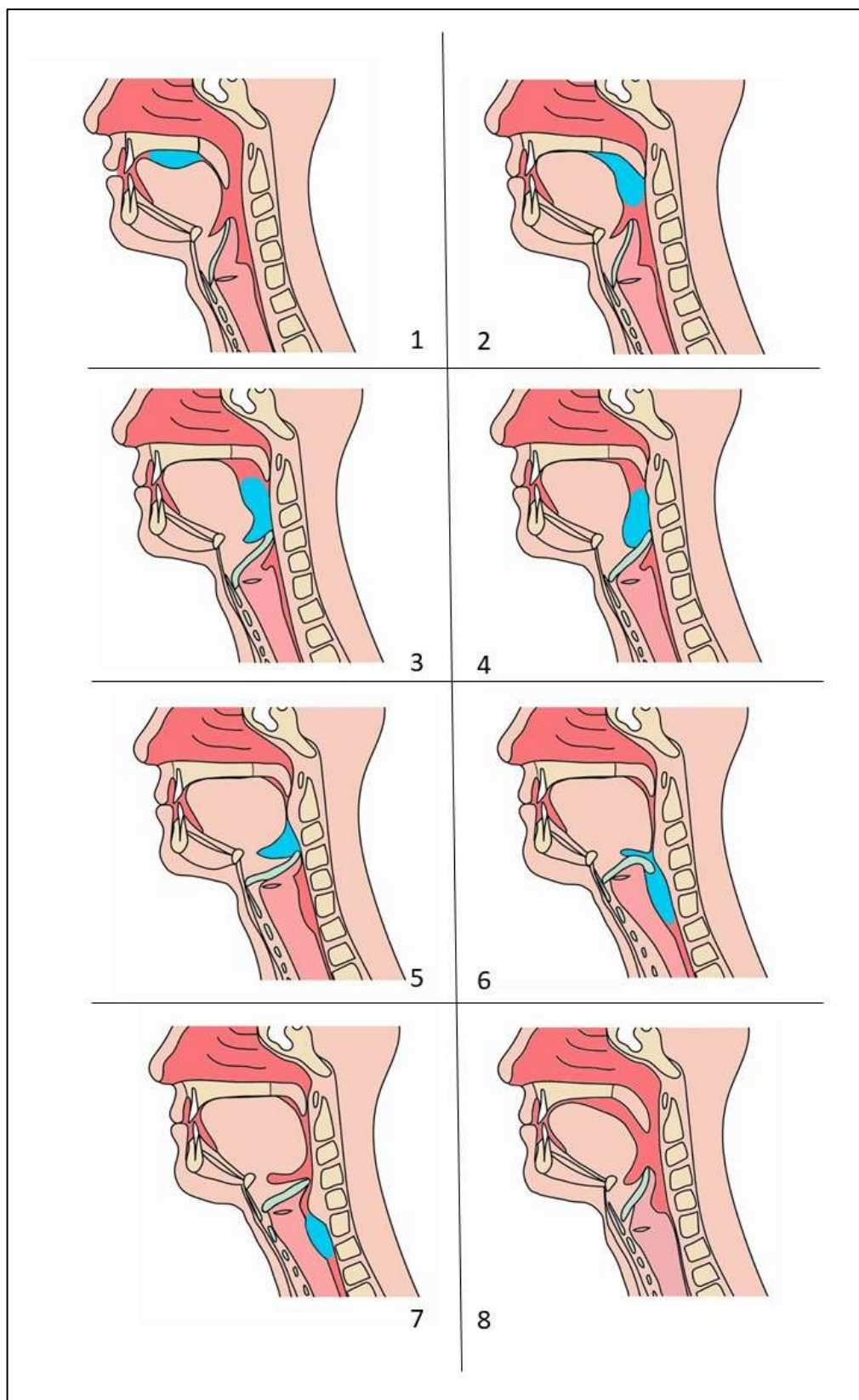


Figure 24. Différentes phases de la déglutition.

Le temps de préparation du bol alimentaire

Le temps de préparation permet de donner aux aliments des propriétés physico-chimiques appropriées à une bonne déglutition. Il comporte une succession d'actes volontaires :

- préhension et introduction des aliments dans la cavité buccale,
- préparation et un degré d'insalivation adaptés à la texture de l'aliment,
- contention des aliments dans la cavité buccale pour éviter les pénétrations pharyngées d'aliments alors que la respiration nasale est en cours.

Cette phase nécessite donc la coordination de différents phénomènes neuromusculaires :

- la fermeture de la fente orale,
- la tonicité de la musculature faciale notamment labio-jugale,
- les mouvements de la mandibule,
- les mouvements de la langue,
- la fermeture vélo-linguale.

Ce temps est très variable en fonction des situations alimentaires : quasi-absent pour la déglutition des liquides, il peut se limiter au maintien du liquide dans la partie antérieure du plancher de la bouche ou sur la surface de la langue contre le palais dur, entouré par l'arcade dentaire supérieure. Il peut être allongé pour des motifs gustatifs.

Le temps de transport oral

Le transport vers le pharynx du bol alimentaire rendu avalable par le temps de préparation orale, correspond au temps oral de transport proprement dit.

Au début du temps oral, la bouche étant fermée et la position de mandibule fixée, la pointe de la langue se relève et s'applique contre la crête alvéolaire des incisives supérieures si cela n'était pas sa position à la fin du temps de préparation, le bol glisse sur le dos de la langue qui forme une dépression en forme de cuillère.

Rassemblé en une masse unique sur la face dorsale de la langue (figure 24, dessin 1), le bol est déplacé vers l'arrière par la langue mobile qui s'applique progressivement sur la surface dure du palais d'avant en arrière, pressant ainsi le bolus le long du palais vers le voile. Pendant toute cette période, le bol alimentaire est maintenu dans la cavité buccale en avant grâce à la fermeture de la fente orale. Le voile du palais appliqué sur le dos de la langue (fermeture vélo-linguale) réalise la fermeture de l'oropharynx et prévient la pénétration d'aliments dans le pharynx alors que le larynx est encore ouvert (figure 24, dessin 1).

A la fin du temps oral, la partie moyenne et la base de la langue se déforment et forment un plan incliné en bas et en arrière ouvrant l'arrière de la cavité buccale. Dans le même temps, le voile du palais s'élève en s'appliquant sur le bolus qui est ainsi exprimé par la pince « glosso-vélique » (figure 24, dessin 2) dans le pharynx. En plus d'un effet « toboggan » permettant la bascule du bolus dans la cavité oropharyngée, ce mouvement génère une force de propulsion et guide le bolus vers l'arrière et le bas.

Lorsqu'on boit des liquides, la fermeture laryngée survient normalement pendant la propulsion orale impliquant des événements du temps pharyngé.

Cette phase nécessite donc :

- la fermeture de la fente orale,
- le positionnement de la langue
- l'application séquentielle d'avant en arrière de la partie mobile de langue sur le palais
- l'élévation du voile du palais
- la déformation de la partie moyenne de la langue

Parallèlement à l'élévation du voile, la protection des voies aériennes débute en lien avec l'inhibition respiratoire centrale de la respiration et le début de la fermeture laryngée.

Le temps pharyngé

Le temps pharyngé réalise le transport des aliments à travers le pharynx jusqu'à l'œsophage en assurant la protection des voies aériennes. Ce temps dure normalement moins d'une seconde.

Le bolus, guidé dans le pharynx par la déformation de la partie moyenne et la base de la langue, est poussé vers le bas par la contraction péristaltique du pharynx à l'origine d'une force dirigée vers le bas, s'exerçant sur la « queue du bol alimentaire ». Le reflux des aliments vers les fosses nasales est contrôlé par la fermeture vélo-pharyngée, et la contraction du constricteur supérieur nécessaire à cette fermeture correspond au début de la contraction péristaltique du pharynx.

Le recul de la base de la langue crée ensuite une force qui chasse le bolus dans l'hypopharynx. Associé à la poursuite de la contraction péristaltique, ce mouvement permet de franchir le SSO, zone la plus étroite pour entrer dans l'œsophage.

Dans le même temps, l'occlusion séquentielle du larynx débute au niveau des cordes vocales et se poursuit vers le haut, permettant aux particules alimentaires qui seraient entrées dans le larynx d'être chassées dans le pharynx (figure 24, dessins 3, 4, 5). Elle est favorisée par l'ascension et la projection antérieure du larynx qui, associée au recul de la base de la langue, place le larynx sous la masse de la langue et complète la bascule en arrière de l'épiglotte.

L'ouverture mécanique du sphincter supérieur est le résultat de ce déplacement du larynx alors que sa relaxation permet le passage des aliments dans l'œsophage avec une continuité entre le péristaltisme pharyngé et le péristaltisme œsophagien (figure 24, dessins 7 et 8). La composante mécanique de l'ouverture du sphincter supérieur de l'œsophage semble être l'élément principal dans la déglutition des petits volumes de liquide. Cependant, l'amplitude des mouvements n'augmente pas parallèlement au volume du bolus. L'amplitude d'ouverture du SSO résulte de l'équilibre entre la pression exercée par le bolus sur les parois et la compliance du SSO. La relaxation de la composante musculaire du SSO survient au cours de l'élévation laryngée, environ 0,1 s avant l'ouverture du SSO. La fermeture du SSO coïncide avec l'arrivée de la contraction pharyngée et se produit lors du mouvement descendant du SSO vers sa position de repos.

Les composantes neuromusculaires du temps pharyngé sont :

- la fermeture vélo-pharyngée, à partir de la levée progressive de la fermeture vélo-linguale, elle est complète au moment où débute le péristaltisme pharyngé.
- l'occlusion laryngée, débutant par la fermeture du plan glottique, théoriquement premier événement du temps pharyngé, parfois plus précoce.

- l'ascension et la projection antérieure du larynx, maximale au moment du recul de la base de la langue.
- le recul de la base de la langue, complet quand la base de la langue vient au contact de la paroi pharyngée postérieure.
- le péristaltisme pharyngé, réalisé par contraction propagée des muscles constricteurs du pharynx à une vitesse de l'ordre de 10 à 15 cm/s. Cette vitesse varie peu, quels que soient le volume ou la viscosité du bolus.
- l'ouverture du sphincter supérieur de l'œsophage (SSO).

La coordination temporelle des événements de la déglutition pharyngée semblerait indépendante du volume du bolus (Krishnan, Goswani & Rangarathnam, 2020).

Le temps œsophagien

Le temps œsophagien assure le transport des aliments jusqu'à l'estomac. La déglutition oropharyngée et la distension de l'œsophage sont les deux principaux stimuli qui commandent le péristaltisme œsophagien et la relaxation de la jonction œsogastrique.

Une fois le sphincter supérieur de l'œsophage refermé, le transport est assuré par une contraction séquentielle de l'œsophage générant une onde péristaltique dite primaire qui pousse les aliments vers l'estomac. L'onde péristaltique se compose de deux parties principales : une onde initiale de relaxation qui permet d'accueillir le bolus, suivie d'une onde de contraction qui le propulse. La gravité assiste le péristaltisme en position verticale. Elle s'applique surtout sur la queue du bol alimentaire.

La relaxation du sphincter œsophagien inférieur induite par la déglutition commence dans les 2 secondes suivant le début de la déglutition et dure 6 à 10 secondes. Elle se termine par l'arrivée de la contraction péristaltique de l'œsophage et est suivie d'une post-contraction qui peut durer jusqu'à 10 secondes.

Les aliments résiduels dans l'œsophage peuvent être éliminés par une onde péristaltique secondaire. Le péristaltisme secondaire n'implique pas de séquence complète de déglutition. Il s'agit plutôt d'un réflexe qui implique des afférences œsophagiennes et une activité péristaltique limitée à l'œsophage. En effet, la distension de l'œsophage provoque l'activation des nerfs sensitifs locaux qui induit la contraction au-dessus de la distension et la relaxation en dessous. La vague de contraction progresse alors vers la distalité, déplaçant le bolus alimentaire devant elle.

Les contractions péristaltiques sont toujours précédées d'une inhibition, appelée inhibition de déglutition, importante pour les enchaînements rapides de déglutitions, fréquents pour la prise des liquides.

Les variations

La déglutition des solides

Lorsqu'on observe des sujets sains mangeant des aliments solides, on constate que les aliments triturés (mâchés et humidifiés) peuvent passer dans l'oropharynx et s'y accumuler tandis que des aliments restent dans la cavité buccale et que la mastication se poursuit (Matsuo & Palmer, 2008). C'est pourquoi les événements observables pendant l'alimentation solide sont mieux décrits par le modèle dit « du processus ».

1. Lorsqu'un aliment est introduit dans la bouche, la langue transporte l'aliment vers la région post-canine et tourne latéralement, plaçant l'aliment sur la surface occlusale des dents inférieures pour sa préparation.

2. Pour la préparation, les particules alimentaires sont réduites en taille par la mastication et adoucies par la salivation jusqu'à ce que la consistance des aliments soit optimale pour la déglutition et que toute la nourriture soit prête à être avalée. La langue et le palais mou bougent tous deux de manière cyclique en association avec le mouvement de la mâchoire, permettant une communication ouverte entre la cavité buccale et le pharynx. Ces mouvements pompent l'air dans la cavité nasale à travers le pharynx, délivrant l'arôme des aliments aux chémorécepteurs dans le nez. L'os hyoïde, jouant un rôle important dans le contrôle des mouvements de la mâchoire et de la langue, se déplace également constamment pendant ce temps.

3. Lorsqu'une portion de nourriture est prête à être avalée, elle est placée sur la surface de la langue et propulsée vers l'arrière à travers par un mouvement similaire à celui de la phase propulsive orale pour un bolus liquide. Mais si de la nourriture reste dans la cavité buccale, la mastication continue et le bolus dans l'oropharynx augmente par les cycles subséquents de transport. La durée de l'agrégation du bolus dans l'oropharynx varie d'une fraction de seconde à environ dix secondes chez les individus normaux mangeant des aliments solides.

La déglutition des liquides

Déglutition gorgée par gorgée

Il existe une variabilité importante dans la séquence des événements du temps oropharyngé.

Le volume moyen d'ingestion auto-sélectionné est de 16,66 $\pm$ 7,70 ml (Colevas et al., 2021). Il est plus important chez l'homme (Kendall, 2002). En général, le début de la fermeture laryngée commence avant que la tête du bolus arrive dans les vallécules et la bascule en avant des aryténoïdes commence avant que l'os hyoïde ne commence à s'élever. Un renversement de cette relation temporelle est décrit dans 20 % des cas, et est plus fréquent avec des bolus de petite taille. Il semble que les bolus de grande taille traversent l'oropharynx plus rapidement et que les individus réagissent à cette situation par des gestes de protection des voies respiratoires plus précoces et plus cohérents. Par contre, le moment de l'élévation de l'os hyoïde n'est pas influencé par les changements de volume de liquide entre 1 et 20 ml.

La comparaison des déglutition oropharyngées en position debout ou couché et couché pendant le sommeil ou éveillé ne montre pas différence du temps pharyngé entre debout et couché éveillé contrairement à ce qui est décrit pour le transit œsophagien où la gravité joue un rôle plus important (Hernandez et al., 2019). Par contre, les pressions sont plus élevées et la durée est plus longue pour la déglutition volontaire en état éveillé, indiquant que l'entrée corticale joue un rôle important dans la modulation de la déglutition pharyngée.

Déglutition pour des prises avec une paille ou au verre

A la paille, l'analyse vidéofluoroscopique a révélé trois schémas distincts de mouvement du complexe hyo-laryngé : ouverture du vestibule laryngé après chaque déglutition (Type I, 53 %), fermeture continue du vestibule après chaque déglutition (Type II, 27 %), et alternance entre ouverture et fermeture du vestibule pendant la séquence de déglutition (Mixte, 20 %). L'accumulation de bol alimentaire dans le pharynx avant la déglutition, courante pendant la mastication, est associée au schéma avec ouverture du vestibule laryngé après chaque déglutition (Daniels & Founda, 2001).

Au verre (90 ml), ces 3 types sont retrouvés dans la littérature avec des pourcentages un peu différents : le Type I (ouverture des voies respiratoires, épiglote revenant à la ligne de base) et le Type II (voies respiratoires restant fermées, épiglote restant inversée) surviennent le plus fréquemment (47 % chacun), suivis par le Type mixte (6 %) (Ambrocio et al., 2023).

La position du bolus au moment de l'initiation de la déglutition est modifiée par la déglutition séquentielle de liquide. La tête du bolus atteint souvent les vallécules avant l'initiation de la déglutition pharyngée, surtout lorsque le larynx reste fermé entre les déglutitions.

La déglutition des aliments à textures multiples

Pour les aliments ayant à la fois des phases liquide et solide, Saitoh et al. (2007) ont démontré que chez les jeunes adultes, la tête de la composante liquide de l'aliment entre souvent dans l'hypopharynx avant le début de la déglutition oropharyngée. Le liquide pénètre dans l'hypopharynx pendant la mastication et s'approche de la margelle laryngée à un moment où le larynx reste ouvert.

Déglutition pharyngée isolée

Une déglutition pharyngée isolée peut survenir au cours d'une prise alimentaire (Kagaya, 2015). Ces déglutitions comportent une phase pharyngée et une phase œsophagienne. Leur fréquence est estimée à 7% des déglutitions avec une prépondérance pour les aliments de consistances mixtes comprenant une phase liquide et une phase plus solide.

Cette séquence pharyngée évoque la situation, alors que nous avons la bouche pleine, de devoir avaler comme si nous sentions qu'il y a quelque chose dans notre gorge à évacuer avant. Elle correspond à la même séquence motrice que la déglutition non alimentaire déclenchée en réponse à une stimulation sensitive.

Cette constatation pose la question de la notion de déclenchement ou d'initiation de la phase pharyngée au cours de la déglutition. Dans un contexte non pathologique, le transport oropharyngé est continu. L'initiation de la phase pharyngée était jusqu'alors définie lors des examens radioscopiques de la déglutition par le franchissement du ramus mandibulaire par la tête du bol alimentaire alors que l'événement en général retenu comme marqueur du début du temps pharyngé est le début du déplacement de l'os hyoïde ou, lors des examens électromyographiques par le pic de contraction des muscles du plancher buccal. Ce dernier choix est en lien avec l'identification du rôle du muscle mylohyoïdien comme premier muscle impliqué dans la phase plus "automatique" de la déglutition oropharyngée. Après son activation, une séquence de muscles se contracte et se relâche dans le but de forcer le bol alimentaire vers le sphincter supérieur de l'œsophage (SSO). Ces muscles sont : le ventre antérieur du digastrique, le génioglosse, le stylohyoïdien, le styloglosse, la portion postérieure de la langue, les constricteurs supérieur/moyen/inférieur, le palatoglosse et le palatopharyngien. Cette séquence de contractions musculaires a été décrite dans la littérature comme le complexe initiateur de la déglutition (Sasegbon & Hamdi, 2017). Le processus d'activité musculaire séquentielle se poursuit avec la contraction des constricteurs moyen et inférieur du pharynx respectivement. Ces données sont confortées par les observations colligées par la revue de la littérature (Zancan et al. 2017): le déclenchement de la phase pharyngée est observé le plus fréquemment dans les vallécules en l'absence de troubles de la déglutition. Mais il peut l'être au niveau de la cavité buccale, la base de la langue, du dos de la langue, et plus particulièrement chez les sujets âgés ou présentant des comorbidités dans l'hypopharynx et les sinus piriformes.

La déglutition non alimentaire

Les déglutitions non alimentaires sont décrites dans 2 situations.

La première est le déclenchement irrépessible d’une déglutition en réponse à une stimulation sensitive communément appelée « déglutition réflexe », la seconde est la déglutition de salive.

La déglutition « réflexe » de protection des voies aériennes

Cette séquence de déglutition semble la même que la déglutition pharyngée isolée. Elle n’induit pas l’appui progressif d’avant en arrière de la langue sur le palais dur. Les expériences à partir d’injection d’eau dans les vallécules révèlent que la déglutition pharyngée n’est pas déclenchée jusqu’à ce que les liquides débordent et atteignent les plis ary-épiglottiques ou les sinus piriformes (Pouderoux et al., 1996 ; Shaker, 1995).

La latence des déglutitions pharyngées diminue inversement à la vitesse d’instillation, et demeure inchangée par le goût, la température du bolus ou la position du corps. Le volume-seuil est significativement plus élevé chez les personnes âgées que chez les jeunes. La variation de latence entre les débits est principalement due à la durée de rétention du liquide dans les vallécules (Shaker et al., 1994). Cela suggère que les vallécules agissent pour contenir les sécrétions et les résidus pharyngés et empêcher les fausses routes en détournant leur contenu autour du larynx avant la déglutition.

Ce type de déglutition s’inscrit dans le continuum des mécanismes de protection des voies aériennes comprenant le versant prévention, l’orientation ou la réorientation des substances endogènes vers l’œsophage et le versant éjection, la toux (Troche et al. 2014).

	Prévention	Déglutition
		Fermeture glottique en lien avec le réflexe d’adduction laryngée
		Réflexe d’expiration
		Effort expiratoire
		Raclement de gorge
	Ejection	Toux

Ainsi au niveau du larynx, en cas de pénétration accidentelle de particules alimentaires, les réflexes d’adduction laryngée, de la simple fermeture laryngée jusqu’au réflexe de toux assurent la protection de l’arbre bronchique. Ils sont déclenchés différemment en fonction de nombreux facteurs, notamment de la caractéristique physico-chimique des aliments et de leur vitesse d’écoulement.

La déglutition de salive

La salive a de nombreuses propriétés bénéfiques sur le plan physiologique (Pedersen et al., 2018). Elle joue un rôle important dans les processus digestifs tels que le goût, la décomposition initiale des aliments, la mastication, la formation du bol alimentaire et la déglutition. Mais elle aussi fondamentale pour le maintien de l’intégrité dentaire et l’intégrité de la muqueuse des digestives hautes du pharynx à l’estomac. Elle sert particulièrement à lubrifier et faciliter le passage du bolus préparé à travers le pharynx. Malgré cette place fondamentale, la littérature est très pauvre quant au mécanisme de la déglutition de salive décrite comme une déglutition spontanée.

La fréquence de déglutition spontanée est de est de de 0,21/min [0.09; 0.52] pour Les sujets <60 ans en bonne santé , et un taux plus élevé de déglutition spontanée a été rapportée chez les femmes (Bulmer et al., 2021).

La coordination déglutition-respiration

L'alimentation, la déglutition et la respiration sont étroitement coordonnées (Matsuo & Palmer, 2008). La respiration cesse brièvement pendant la déglutition, non seulement en raison de la fermeture physique des voies respiratoires, mais aussi en raison de l'inhibition neurologique de la respiration dans le tronc cérébral.

Sur le plan biomécanique, les muscles de la langue, du pharynx, du larynx et de l'œsophage cervical sont tous actifs à des degrés divers pendant une respiration calme et facilitent la perméabilité des voies respiratoires (Martin-Harris et al., 2023). Pendant l'inspiration, la langue avance, le pharynx s'élargit, les plis vocaux s'écartent et le larynx descend en raison de la contraction du diaphragme. La direction des mouvements inspiratoires est alors opposée à celle des mouvements nécessaires pour une déglutition sûre et efficace. En revanche, la phase expiratoire de la respiration entraîne un positionnement postérieur de la langue, un rétrécissement du pharynx, un positionnement supérieur du larynx et une position moins ouverte des plis vocaux et des aryténoïdes. La phase expiratoire crée des conditions efficaces pour les mouvements de déglutition nécessaires pour fermer en toute sécurité les voies respiratoires et transférer le bolus jusqu'à l'estomac. Ainsi, la déglutition est généralement initiée à un volume respiratoire moyen ou faible, entre le niveau expiratoire moyen et le niveau expiratoire au repos, également propice au transit œsophagien.

La déglutition provoque une apnée et une réinitialisation de la phase du rythme respiratoire (Paydarfar et al., 1995). La plupart des déglutitions se produisent de la fin de l'inspiration au milieu de l'expiration (transition inspiration-expiration). La pause respiratoire se poursuit pendant 0,5 à 1,5 seconde pendant la déglutition, et la respiration reprend généralement par une expiration. Cette reprise est considérée comme l'un des mécanismes qui empêche l'inhalation d'aliments restant dans le pharynx après la déglutition. Les déglutitions initiées près de la transition Expiration-Inspiration pourraient être les plus susceptibles de provoquer une fausse route du bolus, en particulier dans les conditions pathologiques qui affaiblissent l'impact de la déglutition sur le rythme respiratoire ou ralentissent le transport du bolus à travers le pharynx.

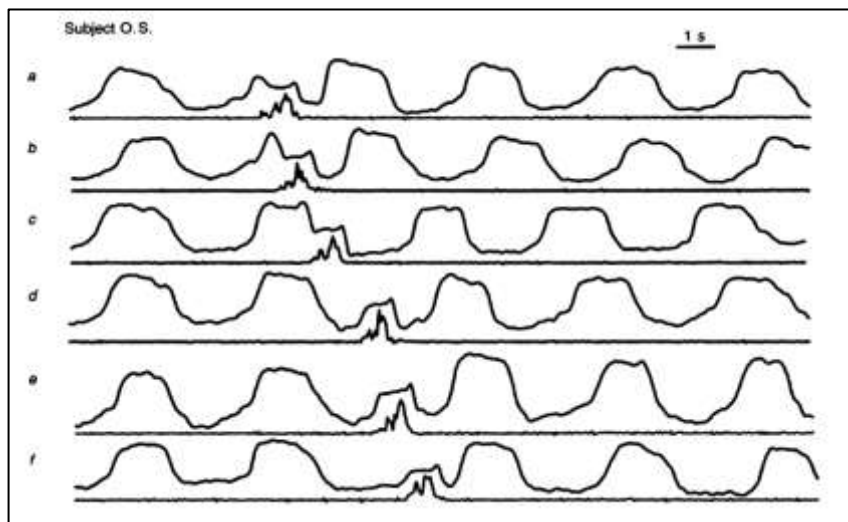


Figure 25. Effet de la déglutition sur le rythme respiratoire, débit d'air (ligne du haut pour chaque segment a à f) et activité EMG sous-mentale (ligne du bas) intégrée pour 6 passages (a-f) chez le sujet O. S. (Paydarfar et al. 1995)

La durée de l'apnée de déglutition pour les déglutitions spontanées est plus courte que celle des déglutitions de bolus de liquide de 5 ml, et n'est pas affectée par la phase respiratoire d'initiation de la déglutition.

Lors de déglutitions séquentielles en buvant à partir d'un verre, la respiration peut reprendre par une inspiration.

Pour les solides, le rythme est perturbé dès le début de la mastication. La durée du cycle respiratoire diminue pendant la mastication, mais augmente avec la déglutition. La relation temporelle « expiration – déglutition – expiration » persiste pendant l'alimentation. Cependant, les pauses respiratoires sont plus longues, commençant souvent bien avant l'initiation de la déglutition (Matsuo & Palmer 2008).

La période d'expiration après la déglutition est plus longue pour les déglutitions initiées à la transition Inspiration-Expiration, et la plus courte pour les déglutitions initiées à la transition Expiration-Inspiration.

Le déclenchement de la phase pharyngée de la déglutition au moment de la phase expiratoire autour de l'apnée paraît indépendant du volume, de la consistance ou du goût, mais dans sa revue systématique Krishnan et al. (2020) a montré que cette initialisation pharyngée changeait en fonction des variations de température selon les groupes d'âge. Les rapports sont divergents quant à la durée de l'apnée respiratoire et à la longueur des cycles respiratoires avant et après l'apnée. La coordination temporelle des événements de la déglutition pharyngée semblait indépendante du volume du bolus. Cette revue a conclu que les caractéristiques du bolus ont des effets différents sur les fonctions respiratoires pendant la déglutition au-delà d'un « seuil sensoriel central ».

A noter que le réajustement du rythme respiratoire n'est pas affecté quantitativement par le blocage de la branche interne du nerf laryngé supérieur.

Description synthétique

Dans la mesure où plusieurs de ces composantes sont intriquées dans le temps et dans l'espace, la déglutition peut être résumée de manière synthétique, plus proche des mécanismes physiopathologiques de la déglutition.

En ce qui concerne les principaux événements physiologiques marquants, la liste est variable selon les auteurs. Suivant Martin-Harris et al. en 2008 , les composants physiologiques de la déglutition sont :

1. Fermeture des lèvres
2. Position de maintien/commande de la langue
3. Préparation/mastication du bolus
4. Mouvement de transport/lingual du bolus
5. Résidu oral
6. Initiation de la déglutition pharyngée
7. Élévation du voile
8. Élévation laryngée
9. Mouvement antérieur de l'hyoïde
10. Mouvement épiglottique
11. Fermeture du larynx
12. Vague de vidange pharyngée
13. Contraction du pharynx
14. Ouverture du Sphincter supérieur de l'œsophage
15. Recul de la base de la langue
16. Résidu pharyngé
17. Clairance de l'œsophage en position verticale

En considérant uniquement le temps oropharyngé et en répartissant les mécanismes en lien avec le transport du bol alimentaire par rapport à la protection des voies aériennes, nous pouvons proposer le tableau ci-dessous

<u>Le transport du bolus</u>	<u>La protection des voies aériennes</u>
Tonicité de la sangle labio-jugale Stabilité de la mandibule	(Fermeture de la fente orale) Fermeture vélo-linguale Partie moyenne de la langue au contact du

	Voile du palais abaissé
Contrôle et propulsion linguale Positionnement de la langue Appui progressif d'avant en arrière	Fermeture vélo-pharyngée Elévation et mise en tension du voile Contraction des muscles pharyngés
Ouverture de l'isthme du gosier Elévation du voile du palais Déformation de la partie moyenne de la langue	Fermeture laryngée Fermeture du plan glottique Fermeture sus-glottique Elévation du larynx
Propulsion pharyngée Péristaltisme pharyngé Recul de la base de la langue	Intégrité des réflexes de protection des voies aériennes
Ouverture du SSO Relaxation du SSO Projection antérieure du larynx	
Péristaltisme œsophagien	

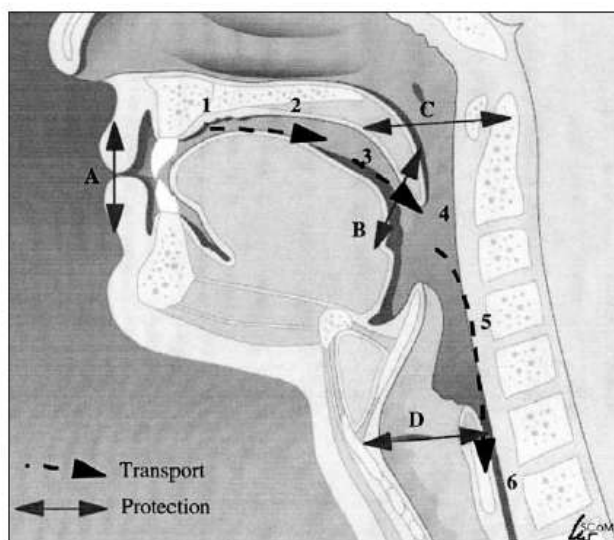


Figure 26. Description synthétique de la déglutition. Protection : A. Fermeture de la fente orale, B. Fermeture vélo-linguale, C. Fermeture vélo-pharyngée, D. Fermeture laryngée,

Transport : 1. Initiation du temps de transport oral, 2. Contrôle et propulsion linguale, 3. Ouverture de l'isthme du gosier, 4. Déclenchement du temps pharyngé, 5. Propulsion pharyngée, 6. Ouverture du SSO et péristaltisme œsophagien

Neuroanatomie de la déglutition

Le rôle des structures neuronales infratentorielles, y compris le centre de la déglutition et les noyaux des nerfs crâniens, a été particulièrement étudié pour le temps pharyngé de la déglutition. Nous décrivons ici les structures impliquées dans la séquence de déglutition.

Neuro-anatomie du système nerveux périphérique

Les récepteurs sensitifs

Les récepteurs sensitifs se situent au niveau des extrémités périphériques des fibres nerveuses, dans les parois des organes de la déglutition. Lorsque le seuil de déclenchement lié à une stimulation est atteint, le récepteur transmet une dépolarisation au neurone afférent qui la propage jusqu'au tronc cérébral. Ils comprennent des chémorécepteurs, des mécanorécepteurs et des récepteurs thermo-algésiques.

Les chémorécepteurs sont réunis sous la forme de bourgeons gustatifs au niveau de la langue, du palais et de l'épiglotte (Chaudhari & Roper, 2010). Les cellules gustatives (Alvarez-Berrdugo et al., 2016) transmettent certaines informations sensibles concernant la nature et la concentration du bolus alimentaire en plus de la perception sensorielle et la distinction des cinq goûts fondamentaux : salé, sucré, acide, amer, umami. Les chémorécepteurs au niveau du larynx sont semblables aux récepteurs du goût mais ils ne sont pas réunis sous la forme de bourgeons (Yoshida et al., 1986). Ils sont principalement localisés à l'entrée du larynx, au niveau de l'épiglotte et des replis ary-épiglottiques. Ces récepteurs répondent aux stimuli s'éloignant de la composition saline du sérum physiologique (154 mmol/L de NaCl), ou de son pH (<4,5 ou >8,7). L'eau en particulier est un stimulus puissant.

Les mécanorécepteurs tactiles sont particulièrement concentrés au niveau de la pointe de la langue et de part et d'autre de la ligne médiane du palais. Lorsque ces récepteurs sont stimulés par la pression d'un aliment, ils sont capables de déclencher des mouvements péristaltiques de la langue. Plusieurs études ont montré que l'amplitude de ces mouvements est modulée par la densité des aliments et, par conséquent, par la pression exercée par ces derniers sur ces récepteurs. Le volume du bolus n'a qu'une influence relative sur l'amplitude, la durée ou la vitesse de ces mouvements.

Au niveau du larynx, les mécanorécepteurs sont moins fréquents. Ils se répartissent en deux groupes : des récepteurs superficiels proches de la muqueuse, et des récepteurs profonds dans les muscles et les articulations laryngées. Ces récepteurs semblent stimulés lors de la respiration normale, mais également lors des mouvements laryngés (Yoshida et al., 1986). Ces récepteurs sont plus sensibles aux liquides qu'à la pression de stimulation réalisée par les aliments.

De nombreuses régions de la cavité buccale et du pharynx sont capables, à partir de stimulations tactiles, de déclencher un réflexe de déglutition. La sensibilité de chacun de ces sites dépend de la pression appliquée dans cette région. Des pressions très légères appliquées au niveau des piliers antérieurs permettent d'évoquer un réflexe de déglutition chez environ 50 % des sujets normaux. Il s'agit du site le plus sensible.

Pour l'ensemble des voies aérodigestives, les stimulations dynamiques sont plus efficaces que les stimulations statiques et ceci est démontré également pour les fluides dans la région pharyngée .

Les mécanorécepteurs proprioceptifs ont un rôle de rétroaction proprioceptive concernant la position des structures. Au niveau de la cavité buccale, ils sont situés dans les muscles, les ligaments parodontaux, les articulations temporo-mandibulaires, etc. (Takeda & Saitoh, 2016). Par conséquent, la rétroaction proprioceptive concernant la position de la langue, des lèvres, et du palais a un impact sur la précision de la continence et la mastication du bolus alimentaire, et la précision de l'articulation (Calhoun & al. 1992). Dans le larynx, ils sont retrouvés au niveau du muscle vocal, et sur le processus vocal du cartilage aryénoïde. Les thermorécepteurs sont particulièrement présents dans les régions du palais et de la langue qui sont au contact l'un de l'autre lors de la déglutition.

Les voies afférentes

Les fibres nerveuses somesthésiques sont toujours associées aux récepteurs, mais leurs propriétés réactionnelles peuvent être différentes. En effet, la vitesse de conduction des informations sensibles est déterminée par plusieurs éléments (Purves et al., 2019) :

- Le diamètre des fibres : les fibres innervant les récepteurs sensitifs des muscles possèdent un plus grand diamètre que celui des fibres innervant les récepteurs sensitifs de la peau ;
- La taille du champ récepteur des fibres afférentes (la densité de fibres). Par exemple, la partie antérieure et l'apex de la langue sont plus sensibles que la partie postérieure car elles possèdent une plus grande concentration de terminaisons nerveuses.

Les fibres afférentes sensibles peuvent avoir des réponses dynamiques différentes face à une stimulation sensitive tout comme les mécanorécepteurs auxquels elles sont connectées. Ainsi, les fibres en relation avec les récepteurs sensitifs superficiels à adaptation rapide assurent la transmission des informations au début et à l'arrêt de la stimulation. Les fibres en relation avec les récepteurs sensitifs plus profonds, à adaptation lente, assurent la transmission d'informations concernant la taille et la forme du stimulus en déchargeant des potentiels d'action de façon continue (Haggard & de Boer, 2014).

Les voies afférentes périphériques jouent un rôle essentiel dans l'initiation et le contrôle de la déglutition. Trois nerfs afférents sont impliqués dans le contrôle de la déglutition.

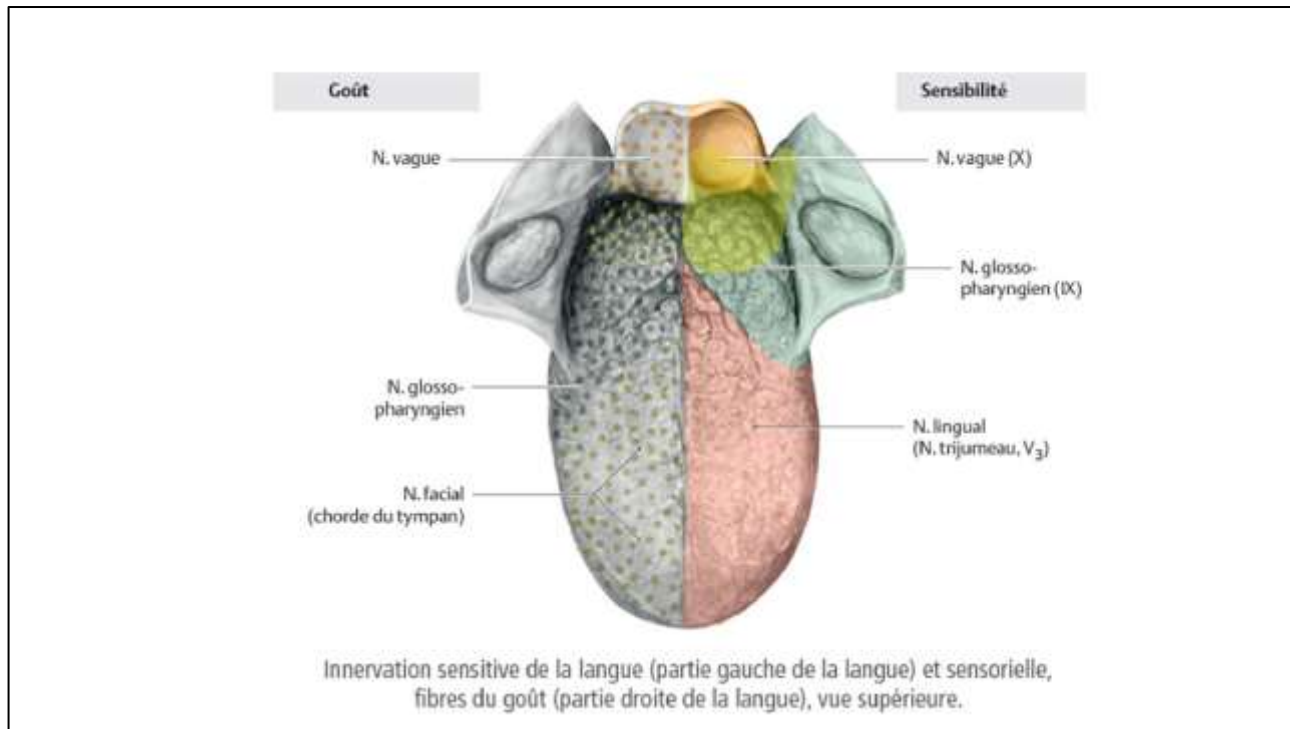


Figure 27. Vue supérieure de la langue montrant les territoires sensitifs et sensoriels des nerfs afférents.

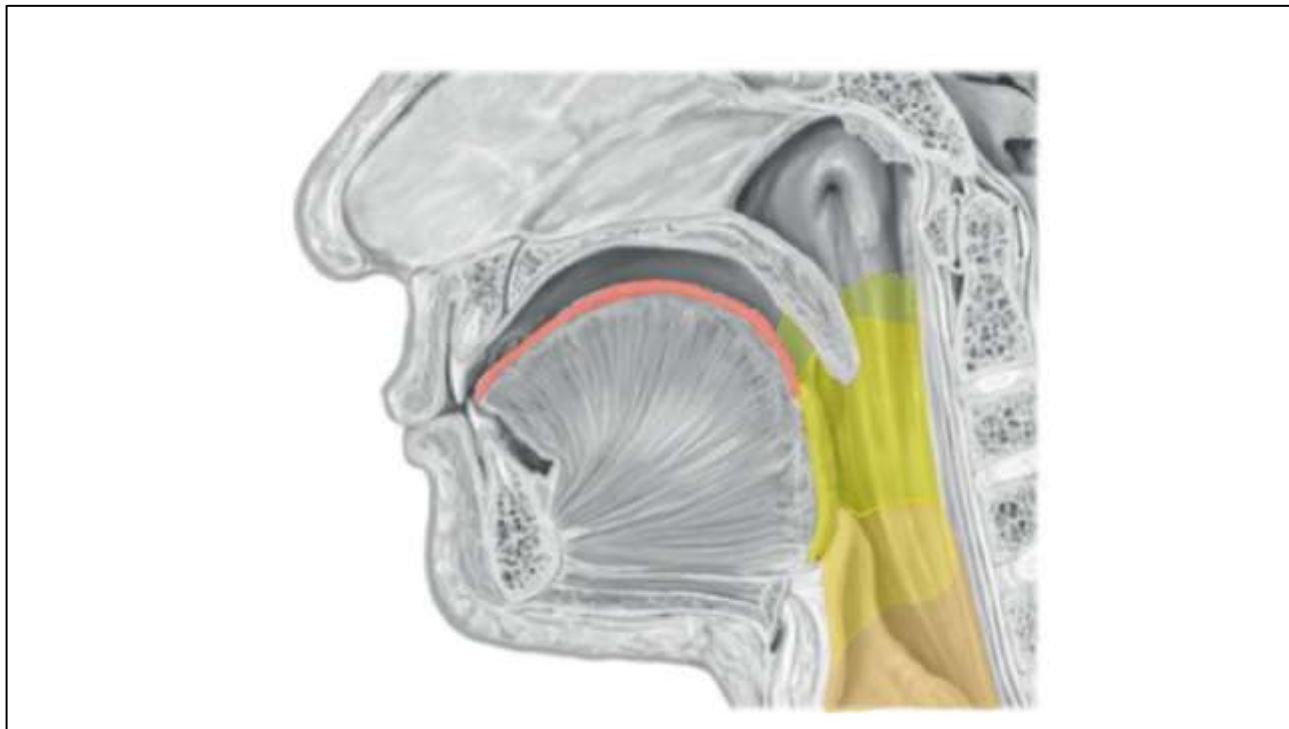


Figure 28. Coupe sagittale montrant les territoires sensitifs du pharynx et de la langue.

Le nerf trijumeau

Au niveau de la sensibilité extéroceptive de la cavité buccale, l'origine des voies afférentes commence au niveau des récepteurs sensitifs (mécanorécepteurs tactiles) situés aux extrémités dendritiques des fibres nerveuses (neurones de premier ordre). Les neurones de premier ordre de la chaîne de cellules nerveuses sont constitués de corps cellulaires qui s'agglutinent dans le ganglion de Gasser (ganglion trigéminal) du nerf trijumeau (V). Ensuite, les axones des neurones de premier ordre font synapse avec les neurones de deuxième ordre dans les noyaux du complexe sensitif trigéminal du tronc cérébral. Les neurones de deuxième ordre des noyaux trigéminaux du tronc cérébral envoient quant à eux des axones vers le noyau ventro-postéro-médian du thalamus. Enfin, les neurones du noyau ventro-postéro-médian qui représentent le dernier maillon de la chaîne de cellules nerveuses font synapse avec les neurones de troisième ordre qui aboutissent dans le cortex somesthésique primaire et secondaire (Purves et al., 2019 ; Gouazé, 1978).

Le nerf glossopharyngien et le nerf laryngé supérieur

Au sein de la cavité buccale, toutes les informations sensibles sont perçues grâce aux rameaux linguaux du nerf glossopharyngien (IX) et de la branche mandibulaire du nerf trijumeau (Alvarez-Berdugo et al., 2016). Les sensations perçues sur les piliers du voile du palais, la base de la langue et les muqueuses oropharyngées sont quant à elles perçues par le nerf glossopharyngien (IX) et le nerf laryngé supérieur (X). Les voies afférentes des nerfs glossopharyngé (IX) et du nerf laryngé supérieur (X) convergent vers le noyau du tractus solitaire au sein du tronc cérébral (Ludlow, 2015).

En résumé :

Les chémorécepteurs, afférence de la sensibilité gustative, sont surtout situés dans la cavité buccale au niveau de la langue.

Les mécanorécepteurs, afférence de la sensibilité tactile, déclenchent le réflexe de déglutition, certains ont aussi un rôle proprioceptif, adaptant précision et tonus lors du temps oral.

Les récepteurs thermo-algiques quant à eux ont plutôt un rôle inhibiteur sur la déglutition

Les informations sensibles sont véhiculées par les nerfs trijumeau, facial, glossopharyngien et vague. Le nerf laryngé supérieur permet d'obtenir la déglutition la plus efficace, suivi par le nerf glosso-pharyngien.

La stimulation du nerf trijumeau est par contre relativement inefficace et la stimulation du nerf lingual peut même inhiber le réflexe de déglutition.

Les nerfs efférents

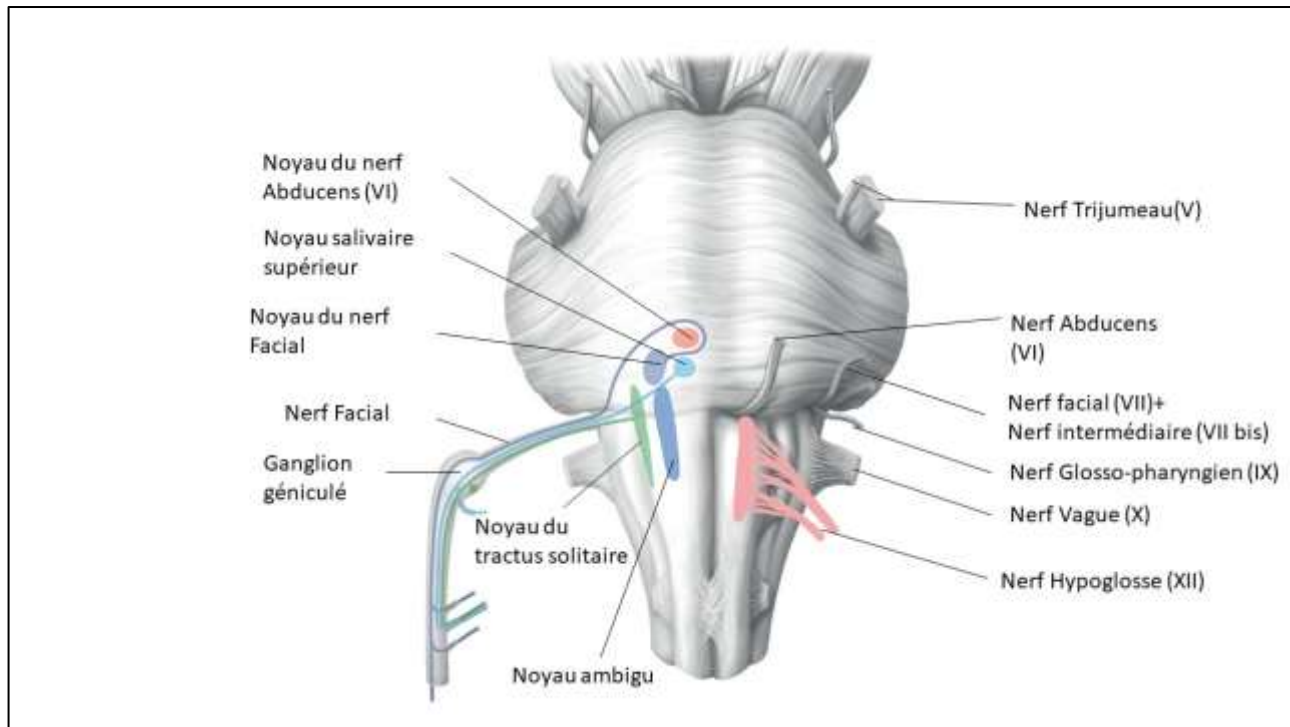


Figure 29 : Origine réelle et apparente des nerfs facial (VII), glosso-pharyngien (IX), vague et hypoglosse (XII).

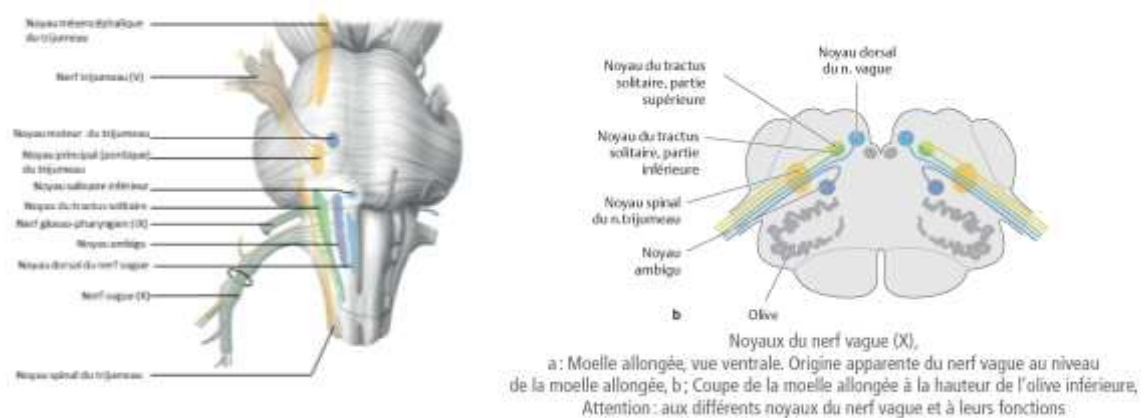


Figure 30. A gauche : vue antérieure du tronc cérébral avec la projection des noyaux des nerfs trijumeau (V), glosso-pharyngien (IX) et vague (X). A droite : coupe horizontale passant par les noyaux du nerf vague.

La plupart des muscles impliqués dans la déglutition sont innervés par des motoneurons regroupés en noyaux moteurs au niveau du tronc cérébral (Figure 29): les noyaux ambigus, outre leur rôle intégrateur sont également les noyaux moteurs des IX et X paires crâniennes qui innervent en particulier les muscles de la région pharyngée et laryngée impliqués dans la déglutition, les noyaux des nerfs faciaux (VII) et hypoglosses (XII) paires crâniennes, par leur innervation des muscles de la face et de la cavité buccale jouent un rôle également. Nous rappelons ici le rôle central du nerf vague (X) dans la déglutition, en relation avec ses

fonctions sensitive et motrice d'une partie du voile du palais et de la langue, du pharynx, du larynx et de l'œsophage.

Neuro-anatomie du système nerveux central

Le tronc cérébral

Localisation et morphologie du tronc cérébral

Le tronc cérébral est situé en dessous du cerveau avec lequel il est en continuité, et en avant du cervelet qui l'entoure latéralement et en arrière et avec lequel il est également en continuité. Il se poursuit en bas avec la moelle spinale (Figure 30).

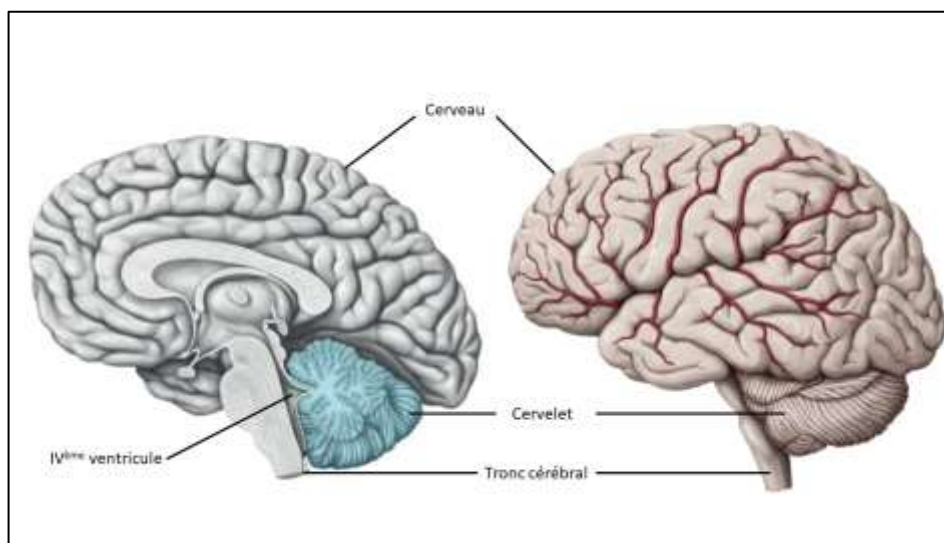


Figure 31. Localisation du tronc cérébral et rapports avec les autres structures de l'encéphale (cerveau et cervelet) sur une vue latérale gauche (à droite) et sur une coupe sagittale (à gauche).

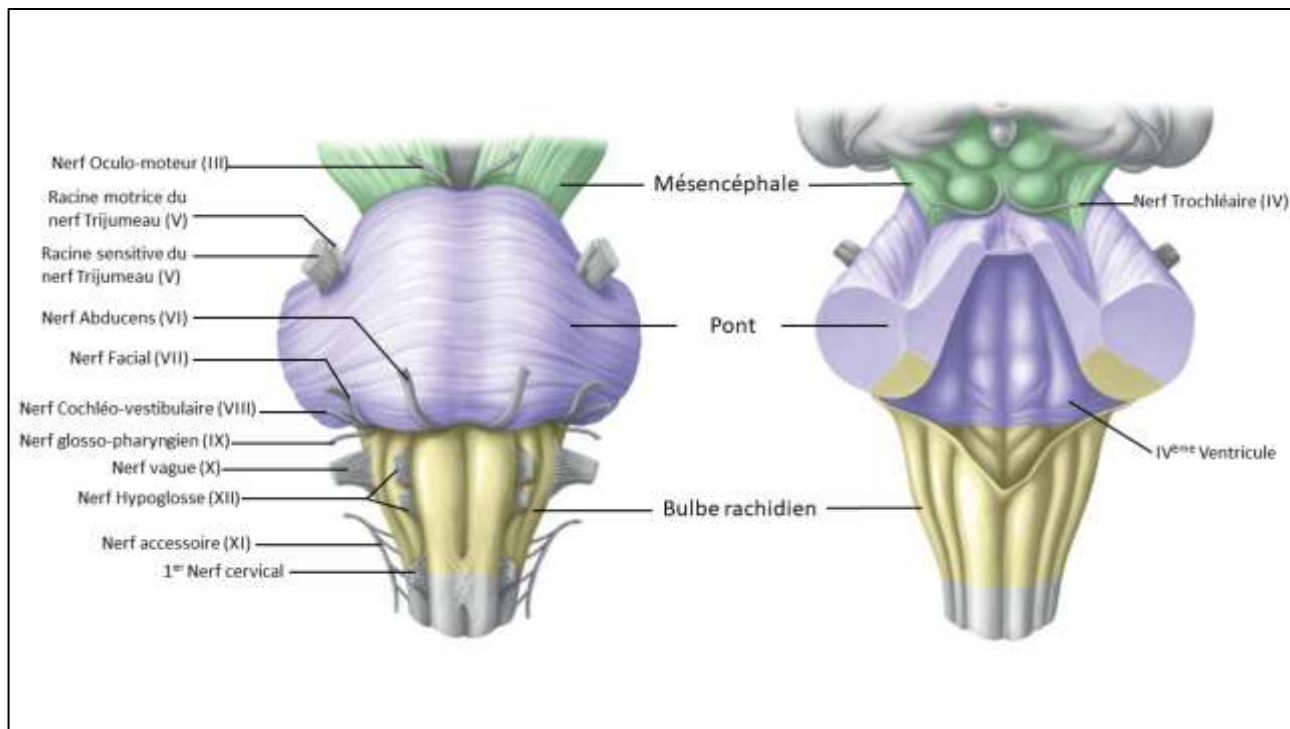


Figure 32. A gauche : Vue antérieure du tronc cérébral. A droite : vue postérieure du tronc cérébral après résection du cervelet.

Le centre intégrateur du tronc cérébral = le centre générateur des patrons de déglutition (CPG)

Le CPG de la déglutition est un réseau de neurones connectés. Il est composé d'un groupe dorsal et d'un groupe ventral de neurones. Deux CPG existent, un de chaque côté du bulbe rachidien. Ils fonctionnent en synchronie étroite et peuvent être considérés comme une seule unité fonctionnelle. Ils sont situés à proximité du noyau du tractus solitaire et du noyau ambigu.

Lors du déroulement de la déglutition, une fois que les voies somesthésiques ascendantes ont atteint les noyaux des nerfs afférents situés au niveau du bulbe rachidien (noyaux du tractus solitaire, noyaux trigéminaux) dans le tronc cérébral, elles convergent vers les neurones du groupe dorsal de la déglutition (DSG). Les entrées sensibles du noyau du tractus solitaire et du DSG sont ensuite relayées vers le pont dans la formation réticulée située en arrière du noyau trigéminal. A ce niveau, le tronc cérébral reçoit à la fois des afférences sensibles périphériques (y compris gustatives) et des afférences corticales et sous-corticales assurant ainsi la structuration de la phase pharyngée de la déglutition (Ludlow, 2015).

Il stimule les neurones prémoteurs du groupe ventral de la déglutition (VSG) qui vont eux-mêmes activer les motoneurones des deux côtés du tronc cérébral en particulier dans les noyaux ambigus qui contrôlent les muscles pharyngés et laryngés pendant la déglutition. Ce système est également connecté à de nombreux autres motoneurones du visage, de la langue, de la mâchoire, des lèvres et du pharynx afin de contrôler les mouvements de la tête et du cou.

A retenir : Fonction des structures corticales/fonction du tronc cérébral

La séquence d'activation musculaire nécessaire à la réalisation de réflexes de déglutition se poursuit même après l'ablation des structures corticales et sous-corticales impliquées dans la déglutition. Ces observations réalisées chez l'animal ont été confirmées chez l'homme. L'existence de dommages importants du cortex n'entraîne pas systématiquement une disparition des réflexes de déglutition. De même on a décrit des cas de nouveau-nés anencéphales qui continuaient à avoir une activité musculaire coordonnée comparable à la phase pharyngée et œsophagienne de la déglutition. Enfin il a été démontré que, chez le fœtus humain normal, les mouvements de déglutition apparaissent avant la maturation du faisceau cortico-sous-cortical.

Tous ces éléments suggèrent donc que les centres bulbaires de la déglutition et leurs afférences sont les structures essentielles des réflexes de déglutition et que le cortex n'exerce qu'un effet facilitateur accessoire sur l'initiation de la déglutition.

Enfin, les régions corticales impliquées dans la déglutition sont représentées et se projettent de façon bilatérale sur les noyaux du tronc cérébral. Ceci autorise une récupération fonctionnelle après lésion hémisphérique unilatérale.

Le cortex cérébral

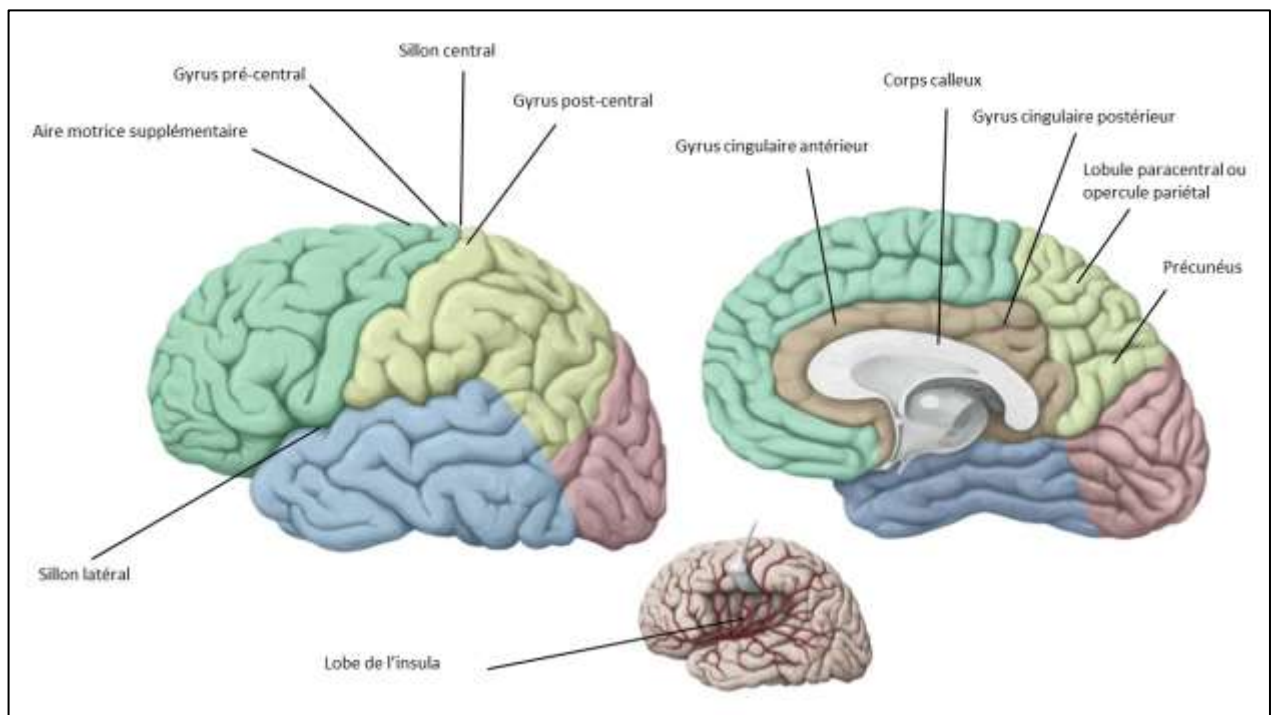


Figure 33 : Morphologie externe du cerveau en vue latérale (figure de gauche et du bas), et vue médiale d'une coupe sagittale (figure de droite).

Le cortex sensorimoteur

Le cortex sensorimoteur est composé du cortex moteur primaire localisé au niveau du gyrus pré-central, c'est à dire en avant du sillon central (anciennement scissure de Rolando) dans le lobe frontal et du cortex sensitif primaire localisé au niveau du gyrus post-central (en arrière du sillon central) au niveau du lobe pariétal. L'organisation topographique du cortex sensorimoteur, appelée

homonculus moteur et sensoriel, contient des représentations motrices ou sensorielles de certaines parties du corps, y compris celles utilisées pour la déglutition, telles que le visage, les lèvres, les dents, les gencives, la mâchoire, la langue, le larynx et le pharynx.

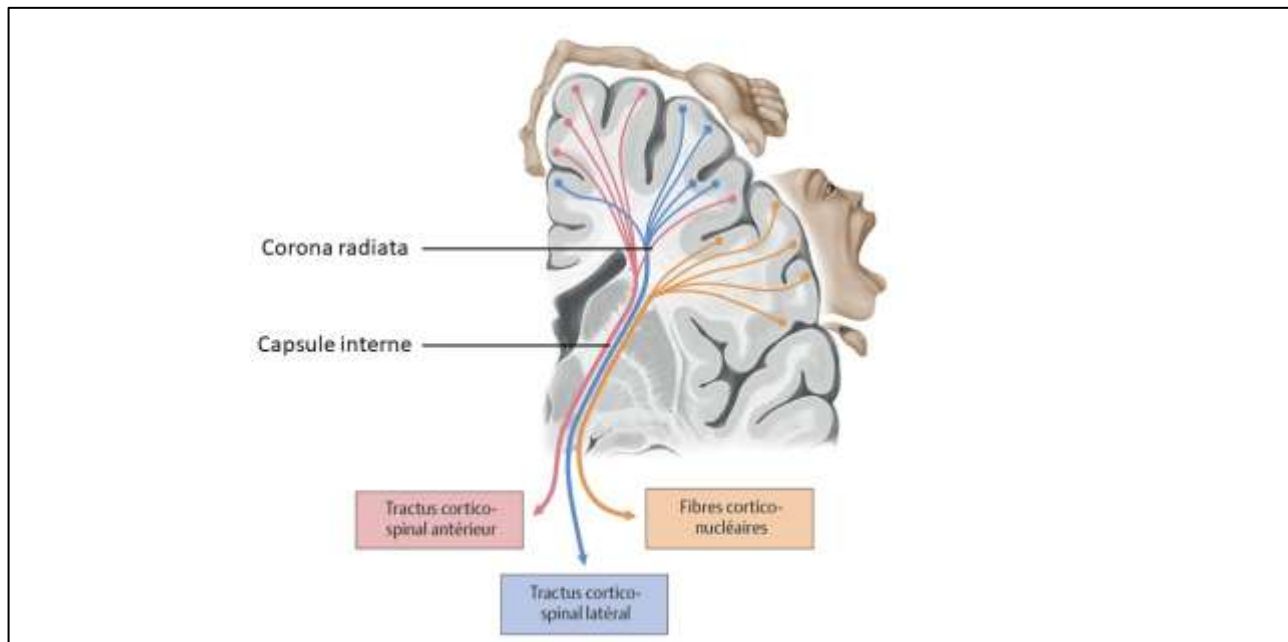


Figure 34. Coupe frontale : Représentation somatotopique de la musculature squelettique dans le gyrus pré-central (Homonculus moteur) et voies efférentes du cortex moteur primaire. La même somatotopie existe dans le gyrus post-central (homonculus sensitif).

Le tractus cortico-bulbaire relie les régions corticales au tronc cérébral. Ainsi, le cortex sensorimoteur initie la déglutition volontaire en activant et en fournissant des signaux corticaux au CPG (générateur central de schéma), et reçoit des signaux afférents des noyaux des nerfs crâniens au niveau du tronc cérébral.

Le cortex pariéto-temporal

Cette région du cortex est potentiellement impliquée dans la transmission des informations sensorielles afférentes au réseau moteur de la déglutition

Le cortex Insulaire

Le cortex insulaire est situé au fond du sillon latéral. Il contient le cortex gustatif primaire, qui encode les informations chimiosensorielles des aliments et peut jouer un rôle dans les préférences alimentaires. De plus, il présente une connectivité abondante avec les régions corticales et sous-corticales du cerveau (bulbe olfactif, le système limbique, le cortex sensoriel, le thalamus, le cortex frontal, le noyau du tractus solitaire) impliquées dans des fonctions telles que le goût, la motivation et l'initiation de la déglutition, ainsi que la planification motrice. En raison de son implication multifactorielle dans la déglutition, le cortex insulaire est considéré comme un centre d'intégration central du réseau de déglutition.

Le cortex cingulaire

Il est situé au niveau du gyrus cingulaire sur la face médiale des hémisphères, au-dessus du corps calleux. C'est une structure hétérogène, qui peut être divisée en cortex cingulaire antérieur (CCA) et postérieur (CCP). La partie antérieure occupe un rôle dans les états affectifs et dans le choix des réponses. Le cortex cingulaire postérieur, quant à lui, tient une place dans la fonction mémorielle et participe au traitement des informations visuo-spatiales.

Pour la déglutition, le rôle du CCA reste mal défini avec possible participation fonctionnelle aux aspects volontaires et involontaires des tâches de déglutition.

Par contre, l'activation du CCP en conjonction avec d'autres zones sensorielles (y compris le cortex somatosensoriel primaire, le thalamus et le pré-cuneus) pendant la déglutition pourrait indiquer que les informations sensorielles de la zone oropharyngée et de l'œsophage sont reçues et traitées dans ces régions. En outre, ces informations sensorielles moduleraient la réponse motrice via des connexions avec le cortex moteur et l'insula.

Les régions sous corticales

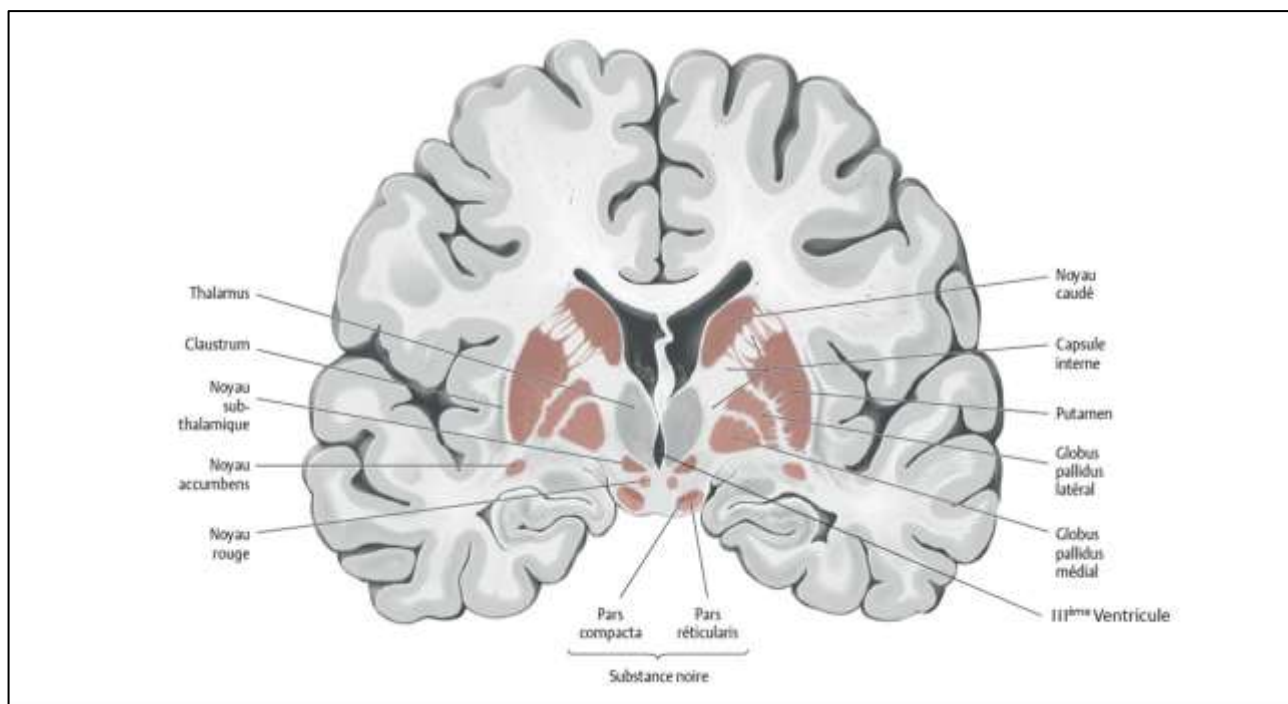


Figure 35. Coupe frontale du cerveau montrant la substance blanche et les noyaux gris centraux

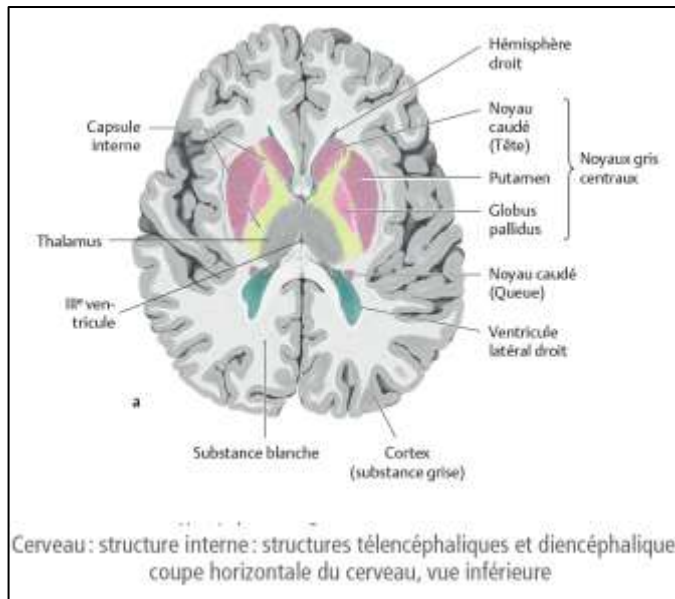


Figure 36. Coupe horizontale du cerveau montrant la substance blanche et les noyaux gris centraux.

Le thalamus et les ganglions de la base

Le thalamus est le plus volumineux des noyaux gris centraux. Il est pair, situé de part et d'autre du III^e ventricule dont il constitue les parois latérales. Il est responsable de la transmission des informations sensorielles et motrices entre les structures neuronales corticales et sous-corticales. Il est considéré comme contribuant à l'intégration sensori-motrice pendant la déglutition.

Les autres noyaux gris centraux (NGC), ou ganglions de la base, sont composés de noyaux interconnectés comprenant en particulier le striatum (noyau caudé et putamen), le globus pallidus, le noyau subthalamique et la substance noire situés dans le mésencéphale. Les NGC jouent un rôle important dans le contrôle et la coordination des mouvements, les tâches cognitives et les fonctions limbiques en intégrant les informations provenant des régions corticales et en renvoyant ces informations vers les régions corticales.

Dans la boucle thalamo-corticale des NGC, les informations sensorielles du processus de déglutition sont transmises par le thalamus, tandis que les ganglions de la base « surveillent » la précision et la progression des mouvements. En plus de la boucle cortico-striato-thalamo-corticale, le thalamus pourrait également affecter le processus de déglutition par sa connexion avec le cervelet.

Les capsules interne et externe, et la corona radiata

Il s'agit de 3 zones différenciées de la substance blanche du cerveau. Elles sont considérées comme un système de connexion-clé entre les régions corticales et les NGC.

La capsule interne est une épaisse lame de matière blanche du cerveau située entre le thalamus et le noyau caudé d'une part, et le noyau lenticulaire (putamen et globus pallidus) d'autre part.

La corona radiata représente l'ensemble des fibres myélinisées de projection rayonnant en éventail juste en dessous du cortex vers et depuis la capsule interne (Figure 34).

Ainsi les fibres ascendantes et descendantes, y compris les tractus cortico-bulbaires s'étendant caudalement à partir de la corona radiata, sont organisées de manière somatotopique dans la capsule interne. Sur la base de ces données, cette région est considérée comme une partie intégrante du réseau neuronal complexe de la déglutition.

La capsule externe se situe entre le segment le plus latéral du noyau lenticulaire et le claustrum (lui-même située en dedans du lobe de l'insula). Elle est considérée comme une connexion-clé entre les régions motrices corticales et les NGC, et pourrait contribuer à l'implication des NGC dans le contrôle moteur.

Le faisceau longitudinal supérieur

Ce faisceau de substance blanche constitue un volumineux faisceau d'association intra-hémisphérique étendu de l'extrémité antérieure et inférieure du lobe frontal aux lobes temporal et occipital. Il contourne par sa concavité inférieure le bord supérieur du noyau lenticulaire. Il reste en dehors de la corona radiata et s'engage dans la partie supérieure de la capsule externe. Il est constitué de fibres superficielles rectilignes, fronto-occipitales, et de fibres profondes arquées, fronto-temporales formant le faisceau arqué.

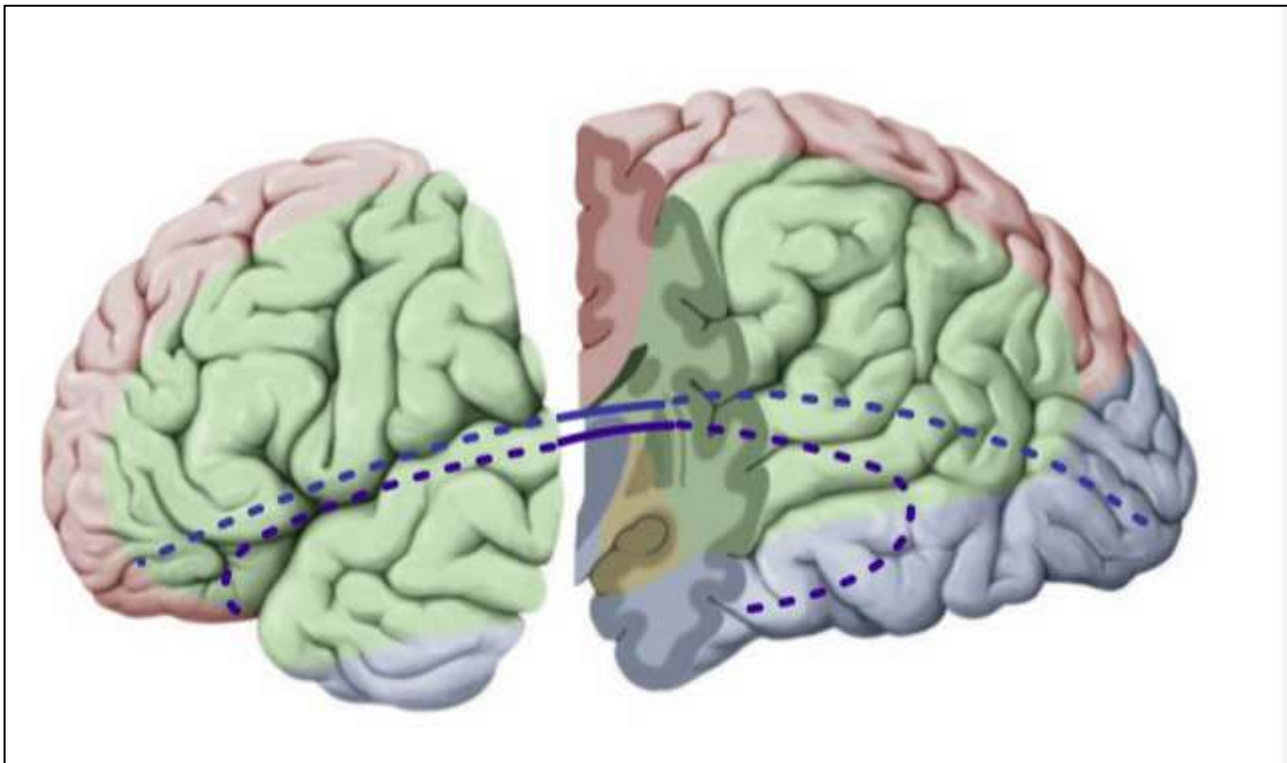


Figure 37. Trajet du faisceau longitudinal supérieur

Le cervelet

Bien que la plupart des voies sensori-motrices passent par lui, le cervelet joue un rôle relativement mineur dans le déroulement de la déglutition. Selon la plupart des auteurs, il est responsable de la modulation des mouvements. Son rôle assure la précision, la fluidité et la coordination de la dynamique de déglutition (Ludlow, 2015 ; Sasegbon & Hamdy, 2021). Son contrôle se situe essentiellement lors du temps de préparation orale, régulant l'amplitude, le tonus et la synchronisation des différentes séquences motrices. Cependant Iosif et al. (2023), dans leur revue de la littérature, nous rappellent l'intervention du cervelet dans les circuits de régulation homéostatique et hédonique du comportement alimentaire ainsi que son rôle dans la régulation du système autonome.

Contrôle neurologique de la déglutition

Jusque dans les années 1980, la déglutition était considérée comme un processus automatique, médié au niveau du tronc cérébral et était souvent qualifiée de « réflexe ». Cependant, les recherches actuelles sur la base des nouvelles techniques d'exploration du fonctionnement cérébral ont conduit à des connaissances plus précises, qualifiant la déglutition de réponse structurée, médiée par des processus neurophysiologiques bien plus complexes qu'on ne le pensait auparavant. Ces connaissances évoluent et commencent à intégrer les différences entre les déglutitions alimentaires et non alimentaires.

Neuro-physiologie de la déglutition comme mécanisme de protection des voies aériennes : la toux et la déglutition

Une protection efficace des voies aériennes nécessite un continuum de comportements, y compris la déglutition et la toux (Kendall, 2002). Les deux partagent les mêmes afférences essentielles pour le tronc cérébral.

Au niveau du tronc cérébral, l'assembleur de contrôle comportemental (BCA) reçoit les informations afférentes et exerce le contrôle sur les centres générateurs de patrons (CPG) de déglutition et de toux, afin de produire la protection appropriée des voies respiratoires. Cette information est envoyée aux noyaux moteurs des nerfs efférents.

Les informations afférentes du tronc cérébral sont également projetées depuis des noyaux sensitifs vers le cortex via le thalamus (Th), permettant la somato-sensation du stimulus. Ainsi, la sensation consciente d'une urgence à agir sur le stimulus est présente avant la sortie du schéma moteur, autorisant la suppression ou régulation du comportement protecteur des voies respiratoires par le contrôle volontaire. Cette information neuronale est transmise par des voies descendantes au tronc cérébral. A noter que la toux et la déglutition peuvent également être initiées sur commande.

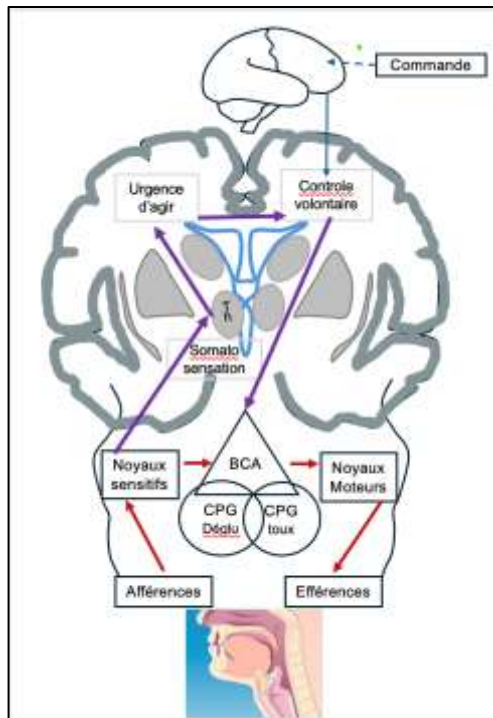


Figure 38 : Schéma du contrôle neurologique de la protection des voies respiratoires, d'après Troche et al., 2014.

En fonction des afférences, la réponse de la toux ou de la déglutition est façonnée par les interneurons excitateurs et inhibiteurs au sein de leurs centres générateurs de patrons respectifs. Ils servent à initier une sortie motrice complexe et standardisée, tout en régulant la quantité, la durée et la relation temporelle de l'activation musculaire requise pour la tâche.

Bien que ces CPG de la toux et de la déglutition soient des entités distinctes, des recherches indiquent qu'ils convergent tous deux vers le réseau neuronal respiratoire et le reconfigurent (Bolser et al. 2013). Cela entraîne une modification du modèle de respiration ventilatoire nécessaire à l'exécution du comportement approprié de protection des voies aériennes. Ainsi le concept d'assembleur de contrôle comportemental (*behavioral control assembly (BCA)*) est proposé pour expliquer comment des populations partagées de neurones respiratoires contrôlent la génération de divers comportements de protection des voies aériennes en fonction des stimuli afférents. Le BCA assurerait la production du comportement approprié (c'est-à-dire la toux, la déglutition, le raclement de gorge, l'expiration) en exerçant un contrôle sur les CPG.

Dans tous les cas, l'information provenant des noyaux sensoriels du tronc cérébral passe par des voies ascendantes vers le cortex via le thalamus, permettant la somato-sensation du stimulus.

Le thalamus intègre toutes les informations afférentes provenant de la périphérie et inclut ou exclut l'entrée sensorielle transmise au cortex en fonction de la pertinence et de la redondance du signal afférent. Des études d'IRM fonctionnelle ont montré que le thalamus est actif lors de la stimulation par jet d'air pharyngé, de la toux et de la déglutition, fournissant ainsi des preuves supplémentaires de la modulation sensorielle.

La transmission de l'information au cortex avant la sortie motrice génère avant la sortie motrice, une éventuelle « urgence » d'agir sur le stimulus. Cela permet de supprimer ou d'augmenter

le comportement protecteur des voies aériennes via le contrôle volontaire. Cette information neuronale passe ensuite par les voies descendantes vers le tronc cérébral, puis via les efférents vers la périphérie.

Neuro-physiologie de la déglutition volontaire

Les connaissances actuelles ne permettent pas de décrire précisément le contrôle neurologique des déglutitions alimentaires en fonction des consistances liquides ou solides et encore moins les déglutitions spontanées de salive qui ne dépendent pas uniquement d'une commande volontaire.

Le contrôle neurologique d'un acte volontaire sensorimoteur

Le contrôle neurologique sensorimoteur d'un acte volontaire est bien décrit de manière générale (Figure 39).

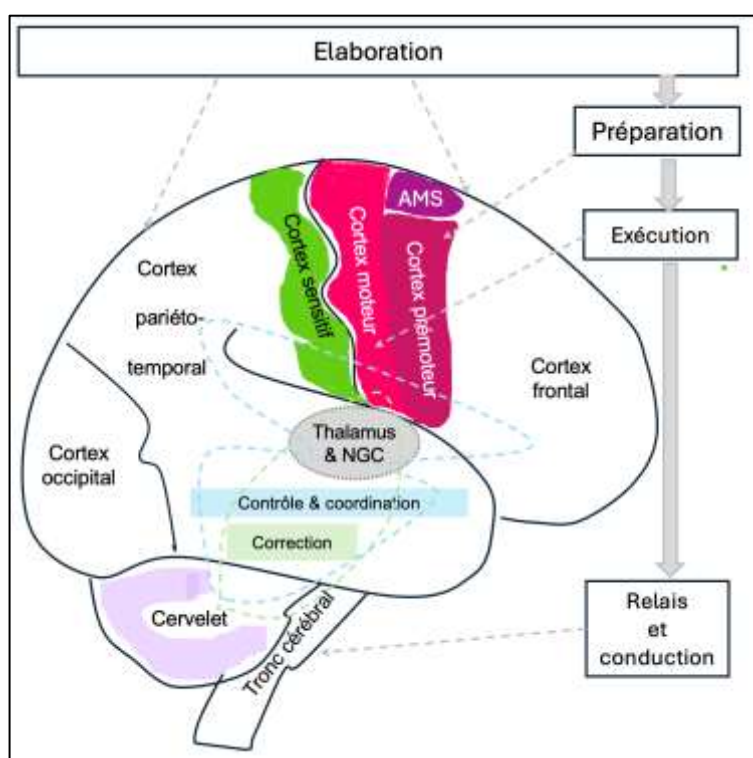


Figure 39. Schéma du contrôle sensorimoteur d'un acte volontaire.

Il comprend une phase d'élaboration de la séquence motrice en termes de sélection et de structuration de réponse. La sélection de la séquence motrice est adaptée à la situation et implique les cortex frontal, pariétal et temporal. La phase de préparation de cette séquence définit les caractéristiques de la réponse. Ce rôle est assuré par le cortex pré-moteur. L'information transmise au cortex moteur contigu permet l'activation des motoneurones. Elle est ensuite véhiculée dans les faisceaux cortico-spinaux ou cortico-nucléaires pyramidaux en passant par la corona radiata et la capsule interne pour relayer cette information au niveau du tronc cérébral et de la moelle spinale. Le contrôle et la coordination de la séquence motrice sont assurés par des boucles entre le cortex, les

noyaux de la base et le cervelet via le thalamus. La correction des erreurs pouvant survenir lors du déroulé de la séquence dépend surtout du cervelet grâce à différentes boucles impliquant également le thalamus.

Les spécificités du contrôle neurologique de la déglutition

Le CPG (Centre générateur de patrons de la déglutition)

Son rôle exact dans le contexte d'une déglutition reste encore une question de recherche concernant sa localisation, ses voies de transmission de l'information et les systèmes de régulation qui lui sont plus spécifiquement dédiés (comme nous l'avons vu pour la déglutition, mécanisme de protection des voies aériennes).

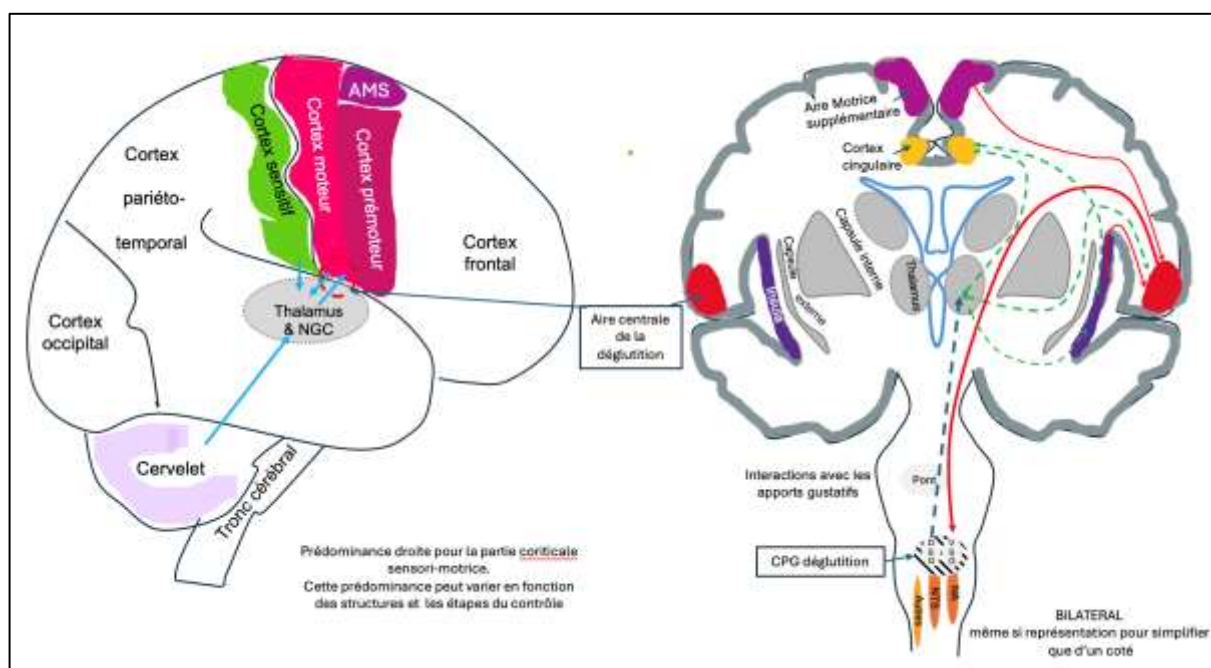


Figure 40. Le contrôle neurologique de la déglutition, d'après Wei et al., 2024 et Ludlow, 2015.

Le thalamus et le cortex sensoriel

Le thalamus a un rôle important dans la régulation des afférences sensibles vers le cortex cérébral. Il est composé de plusieurs noyaux. Les afférences sensibles, après un premier relai dans les noyaux du tractus solitaire, sont ensuite transmises au noyau ventral postérieur du thalamus selon une organisation somatotopique. Ce noyau assure leur intégration. Puis les informations sensibles sont acheminées vers le cortex sensoriel primaire dédié aux régions bucco-faciales.

Les informations sensibles et sensorielles (le toucher, la pression, la vibration, la position des membres, le froid, le chaud, la douleur, le goût, la stéréognosie) sont transmises séparément dans les circuits corticaux du cortex somesthésique primaire, puis elles sont distribuées vers l'aire somesthésique secondaire (champs corticaux d'ordre supérieur). Le cortex somesthésique secondaire est situé sur le sillon latéral au niveau de l'opercule pariétal. Il permet de répondre aux stimuli

somatosensoriels plus complexes. Par exemple, il répond aux combinaisons de stimuli tactiles et proprioceptifs (Purves et al., 2019).

D'après Wei et al (2024), le cortex sensorimoteur contrôlant la déglutition reçoit également :

- du cortex pariétal-temporal : des informations sensorielles (visuelles, tactiles, olfactives) pour générer du mouvement
- de la partie antérieure du cortex cingulaire : la connaissance d'activité viscérale telle que la fonction digestive et l'état émotionnel
- de la partie postérieure du cortex cingulaire : l'intégration de l'information sensorielle par une connexion réciproque avec le thalamus ce qui peut pourrît moduler davantage la réponse motrice de la déglutition

L'intégration corticale

Le contrôle cortical de la déglutition est principalement impliqué dans le déroulement de la phase orale et en particulier dans l'initiation des mécanismes de la déglutition. Le contrôle de la phase pharyngée paraît plus compliqué. L'initiation du temps pharyngé serait sous contrôle cortical volontaire alors que le tronc cérébral synchronise les mouvements oropharyngés et laryngés. Cela explique que les individus peuvent apprendre à modifier et à contrôler la phase pharyngée et la protection des voies respiratoires par le biais par exemple de manœuvres de déglutition comme la manœuvre de Mendelsöhn (Ludlow, 2015).

L'aire centrale de la déglutition se situe dans le lobe frontal, à proximité de la représentation des régions bucco-faciales et pharyngo-laryngées des cortex sensitif et moteur péri-centraux. La stimulation de l'aire centrale de la déglutition permet d'évoquer un réflexe de déglutition le plus souvent associé à un réflexe de mastication. Cette région est capable d'évoquer ce réflexe même si le cortex moteur primaire est détruit. Ces éléments démontrent l'indépendance de cette région dans le contrôle de la déglutition.

Outre les afférences d'origine thalamique et de l'aire sensitive primaire, l'aire centrale de la déglutition reçoit des afférences :

- de l'aire motrice supplémentaire,
- de la partie antérieure de l'insula. En effet le cortex insulaire a un rôle majeur dans le contrôle de la déglutition (Wei et al., 2024). Il agit comme le centre d'intégration du réseau de déglutition et participe à la motivation et à l'initiation de la déglutition et de la planification motrice. Lui-même reçoit des afférences du cortex cingulaire antérieur.

Le contrôle cortical de la déglutition est bilatéral et asymétrique, propre à chaque individu. L'hémisphère droit est plus souvent l'hémisphère dominant de la déglutition (Robbins et al.1993, Robbins, 1999) et plus souvent impliqué dans le contrôle de la phase pharyngée (Wilmskoetter et al., 2018). Cependant, la plasticité cérébrale permet que lorsque l'hémisphère dominant est atteint, la représentation corticale non dominante de l'hémisphère controlatéral non affecté est capable de se réorganiser et d'augmenter sa surface (dans les trois premiers mois suivant l'AVC) (Hamdy & Rothwell,1998).

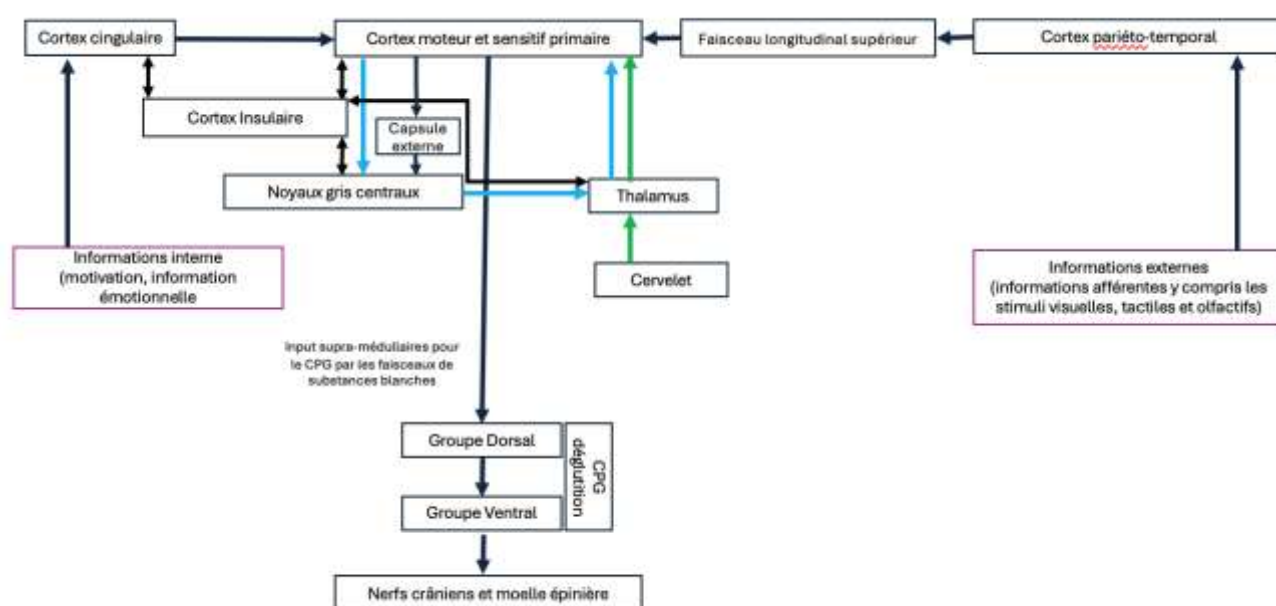


Figure 41. Schéma des interactions entre les régions corticales et sous-corticales et le CPG de la déglutition d'après Wei 2024. En bleu : la boucle cortico-striato-thalamo-corticale, En vert : la boucle cérébello-thalamo-corticale.

L'intégration des efférences

Les efférences de l'aire centrale de la déglutition se font bilatéralement par la voie cortico-nucléaire (voie pyramidale). Tous comme les autres axones efférents, les fibres passent dans la corona radiata, puis dans la capsule interne.

La régulation extra-pyramidale

Les voies cortico-nucléaires issues de l'aire centrale de la déglutition passent par la capsule interne puis traversent les régions sous-thalamiques au niveau de la substance noire de la formation réticulée mésencéphalique pour atteindre le groupe dorsal du CPG de la déglutition (DSG) situé dans le tronc cérébral.

Les voies extra-pyramidales forment des boucles de régulation entre le cortex cérébral et les noyaux gris centraux afin de réguler la programmation des ordres moteurs automatiques envoyés vers la périphérie. Dans l'hypothalamus et le tegmentum, les informations concernant de nombreuses fonctions viscérales sont intégrées. Il a été démontré que l'application de dopamine sur ces structures permettait de faciliter la déglutition. Ces résultats suggèrent que la région amygdalo-hypothalamique, qui intègre l'alimentation aux réponses viscérales et somatiques, est capable de modifier le seuil des réflexes de déglutition.

Ainsi, la déglutition est un processus sophistiqué impliquant la coordination précise et synchronisée des systèmes nerveux central et périphérique, ainsi que des musculatures de la cavité buccale, du pharynx et des voies respiratoires.

La figure 42 (modifiée d'après Mélotte et al., 2023) propose une synthèse du contrôle neurologique des différentes phases de la déglutition avec une phase orale plus accessible à la conscience et au contrôle volontaire, malgré des phénomènes automatiques, une phase pharyngée réputée réflexe car elle est moins aisément contrôlée volontairement, et une phase œsophagienne végétative.

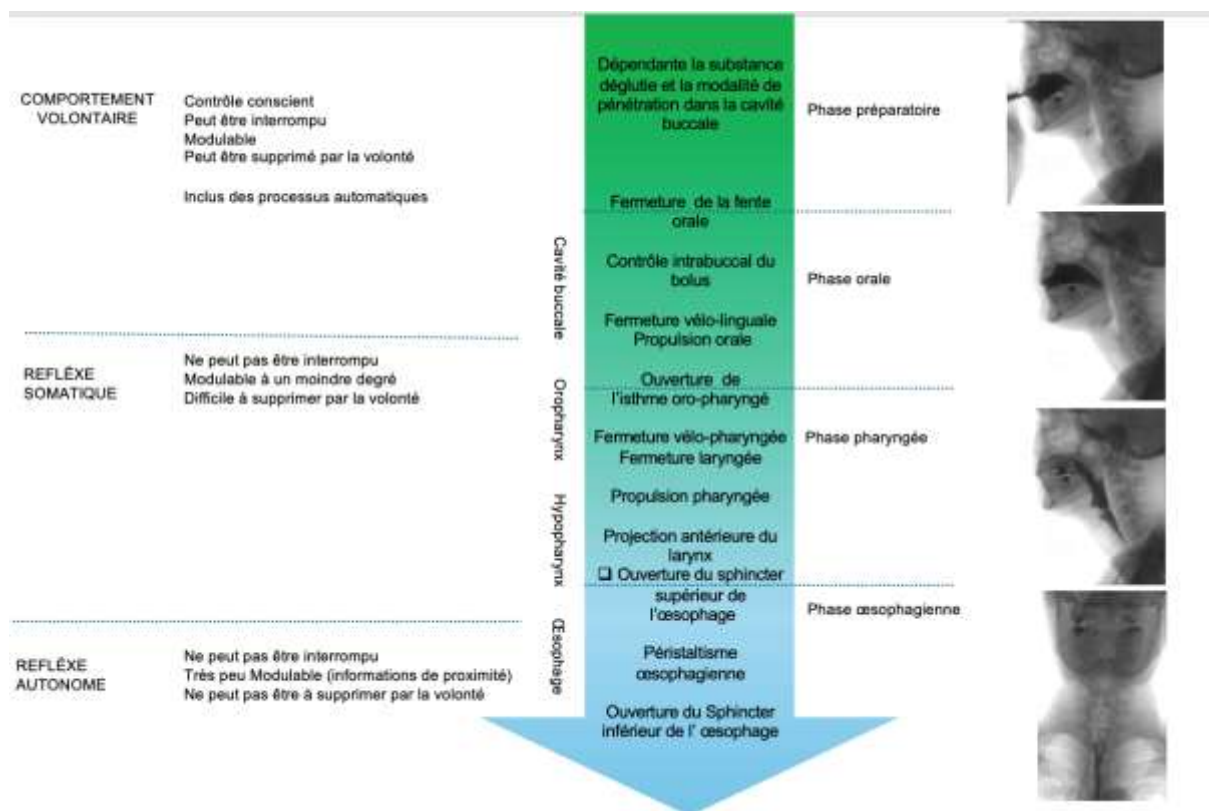


Figure 42. Synthèse du contrôle neurologique des différentes phases de la déglutition (modifiée d'après Mélotte et al., 2023).

Evolution de la déglutition

Développement de la déglutition (ontogénèse)

L'évolution de la déglutition est un continuum qui débute dans la période intra-utérine, se maturant et s'organisant progressivement sur les premières années de vie jusqu'à 6 ans pour la majorité des auteurs, 10 ans pour certains, si la phase anticipatoire est considérée. (O Schindler, communication orale à l'Update European Dysphagia 2009).

A la naissance, le nouveau-né doit s'adapter à la vie extra-utérine, passer d'un milieu liquidien à un milieu aérique tout en se sevrant brutalement de la nutrition continue extra-digestive du cordon placentaire. Comme tout mammifère il doit manger pour survivre et ceci grâce à un programme précis ayant débuté dans la période pré-natale. Les rythmes primaires se mettent en place, éveil-sommeil, faim-satiété. La succion-déglutition doit être fonctionnelle pour permettre un nourrissage efficace.

Bien que le schéma moteur de succion-déglutition soit inné, il va dépendre de l'embryo-morphogénèse et des premiers circuits sensorimoteurs mis en place sous contrôle de progéniteurs spécifiques de différenciations cellulaires des os et muscles maxillo-faciaux ainsi que de leurs innervations. (Alexander et al 2009, Cobourne et al 2019)

Le développement intra-utérin

L'architecture oro-faciale de l'embryon est issue de la migration des cellules qui se détachent du tube neural et migrent dorso-ventralement formant au niveau du rhombencéphale les bourgeons ectodermiques faciaux. La compréhension de ce développement explique les grands tableaux de dysmaturité du tronc cérébral qui associent dysmorphies cranio-faciales et atteintes des paires crâniennes. En effet, les rhombomères contiennent des unités de neurones qui ne se mélangent pas avec ceux des autres rhombomères et qui sont spécifiques quant à leur futur organe cible avant même leur migration. Dès la 7ème semaine d'âge gestationnel le tronc cérébral reçoit les premières informations sensorielles du pharyngo-larynx. Les effecteurs sensoriels sont en place dès la fin de la période embryonnaire, de même que les principales structures anatomiques telles que la mandibule à la 4ème semaine, le palais qui se développe entre 6 et 12ème semaine et l'œsophage à la 7ème semaine. Le fœtus commence à déglutir le liquide amniotique. Dès la 10ème semaine des déglutitions pharyngées sont observables en échographie (Miller et al. 2003). Les mouvements linguaux apparaissent entre la 18 et 24ème semaine de gestation avec la succion non nutritive à la 15ème semaine et la succion-déglutition fonctionnelle entre la 34 et 37ème semaine. La succion fœtale a un rôle important dans la morphogénèse des cavités oropharyngées, la déglutition quant à elle participe au développement du tube digestif, à la trophicité fœtale et son équilibre hydro-sodé. C'est aussi le moment des premières expériences alimentaires, les particules olfactives traversant la barrière foeto-placentaire. L'observation et l'analyse de ces différentes suctions et déglutitions, lors des échographies des deuxième et troisième trimestre de grossesse, vont permettre de prédire ce que seront celles du bébé à naître. (Couly et al., 2009).

A la naissance

L'adaptation extra-utérine nécessite pour le nouveau-né de respirer et déglutir de façon autonome. Ceci dépend à la fois de l'efficacité et de la coordination des différents groupes de muscles impliqués ainsi que d'une synchronisation motrice très précise (Amaizu, Shulman et al. 2008). A ce

stade et durant le premier mois de vie la déglutition est purement réflexe. La succion est dite nutritive si du liquide est exprimé du mamelon ou de la tétine du biberon, il est alors dégluti. Elle est non nutritive sur le doigt ou la sucette. Comme l'a décrit Palmer les rythmes de succion nutritive ou non nutritive sont différents (Palmer et al., 1993). Ce sont des trains de 1 par seconde pour la nutritive alors que la non-nutritive est plus rapide non synchronisée à la déglutition salivaire. Pour que l'alimentation orale soit efficace il faut, comme a pu le démontrer C Lau chez des enfants nés prématurément, un pattern de succion mature (Lau et al., 2000). La contraction musculaire péri-orale est synchrone avec la force de pression de succion, le liquide est ainsi exprimé du mamelon ou de la tétine. L'ouverture et fermeture de la mandibule intimement liées aux mouvements de langue permettent le transport du bolus vers le pharynx (Ono et al., 2004).

Les différents niveaux de contrôle et leur évolution

Contrôle succion-déglutition

Le rythme et l'alternance succion-déglutition va varier au cours du premier mois de vie chez l'enfant né à terme sans pathologie, la diade succion-déglutition (ratio 1.1) étant la plus fréquente (78,8%) puis vont apparaître des trains de 2 ou 3 suctions pour une déglutition comme si l'enfant adaptait son rythme pour devenir plus efficace (Qureshi et al., 2002). Dans les premières semaines de vie, l'enfant se nourrit de façon réflexe sans contrôle supra-bulbaire (Stevenson & Allaire, 1991). Au cours du premier trimestre, le nourrisson devient capable de modifier ces différents rythmes et développe de nouvelles stratégies alimentaires, c'est l'apparition du vouloir dépendant des premières expériences sensorimotrices et alimentaires qui se développent parallèlement à la maturation corticale. Le comportement réflexe devient un fonctionnement automatique renforcé par l'acquisition d'une motricité intentionnelle.

Contrôle de la respiration

Pendant la succion non nutritive, l'enfant ne déglutit qu'un peu de sa salive, la coordination succion-respiration n'est alors pas primordiale pour éviter les inhalations. Au contraire lors des suctions nutritives les alternances entre succion, déglutition et respiration sont étroitement liées et interdépendantes. Pour être efficace, le nouveau-né doit prendre son lait sans inhalation, sans désaturation ni bradycardie et sans apnée. Les patterns succion : déglutition : respiration les plus fréquemment rencontrés sont 1:1:1 ou 2:2:1. (Lau et al., 2003). En période néonatale, pour les bébés prématurés, les difficultés d'autonomie alimentaire sont principalement liées au défaut de coordination entre déglutition et respiration. Lors des suctions nutritives, le nouveau-né déglutit lors de l'apnée, préférentiellement au début de la phase inspiratoire ou en fin d'expiration, période où l'ampliation pulmonaire est réduite, cependant au cours des premières expériences d'alimentation orale, il peut aussi bien déglutir en fin d'inspiration-début d'expiration ou lors de la phase inspiratoire. Après 12 mois, c'est le schéma déglutition suivie de l'expiration, comme chez l'adulte, qui est le plus fréquent.

Mécanismes de protection

Les réflexes laryngés chimio-sensibles provoquent sursaut, déglutition rapide, apnée, fermeture laryngée, montée tensionnelle et bradycardie. Ils sont provoqués par le contact en rétrocricoïdien et interaryténoïdien de solution acide ou basique (Thach, 2008). Au cours de la

maturation apnées et déglutitions rapides diminuent en fréquence tandis que sursaut et toux réflexe augmentent.

Contrôle sensorimoteur de la déglutition

La constitution des circuits neuronaux, comme l'ont démontré Hanson et Landmesser (2004), est plus dépendante des mouvements eux-mêmes que de la programmation génétique. Les mouvements de déglutition fœtaux vont donc avoir un rôle majeur dans l'organisation du contrôle neuronal de l'oralité de l'enfant à naître. Le feedback sensoriel des afférences gustatives et somato-esthésiques module progressivement les schémas moteurs du lapement, de la succion, de la déglutition, puis plus tard du malaxage et de la mastication.

Contrôle postural

Le nouveau-né à terme sans pathologie est en flexion discrètement asymétrique, ce qui associé aux réflexes primaires (rooting, grasping), favorise une prise alimentaire efficace. Les capacités de contrôle de la tête sont aussi importants dans les premiers jours de vie. Le contrôle postural dépend du niveau de maturation des fonctions sensorimotrices.

À la naissance, jusqu'à six semaines avant et six semaines après le terme de 40 SA, la motricité du nourrisson est contrôlée par le tronc cérébral. Pendant cette période, l'alimentation est réflexe.

Le développement fonctionnel du système nerveux dépend de la maturation des 2 systèmes moteurs centraux. L'inférieur, issu du tronc cérébral, dont la maturation suit une vague ascendante précoce. La synaptogénèse commence autour de 6-8 semaines de gestation. Le développement de dendrites et des connexions synaptiques est une procédure dynamique dont le développement maximal se situe après la naissance. La structuration des circuits neuronaux dépend davantage des mouvements que d'un programme génétique pré-établi. Le système moteur supérieur issu du cortex hémisphérique a, quant à lui, une maturation descendante plus tardive (32^{ème} semaine de gestation) et plus prolongée (jusqu'à 2 ans).

De même que les capacités d'alimentation mûrissent, le contrôle moteur est modulé progressivement par les voies supra-bulbaires : c'est le processus d'encéphalisation, voie motrice descendante du cortex vers la moelle épinière. Les feedbacks sensoriels, et somesthésiques vont progressivement transformer les schémas moteurs du lapement et de succion, en temps de préparation orale et déglutition.

Contrôle neuro-endocrinien

Les centres de contrôle de l'alimentation sont situés dans les noyaux hypothalamiques. L'équilibre entre calories dépensées et ingérées permet le contrôle de l'homéostasie. L'alternance des rythmes éveil/sommeil et faim/satiété y est primordial.

Pour résumer :

Les capacités de déglutition de l'enfant évoluent parallèlement à son développement neuromoteur.

Cette longue période d'acquisition sensorimotrice se décline avec l'évolution des voies corticobulbaires. C'est la période de l'encéphalisation, le réflexe devient geste moteur intentionnel puis automatisme. Le suckling, mouvements antéropostérieurs de la langue correspond aux capacités motrices du nourrisson jusqu'aux alentours de 6 mois. La posture axiale en flexion évoluant progressivement du décubitus vers la station assise, les mouvements mandibulaires sont alors plus libres permettant l'acquisition du sucking, mouvements verticaux de la langue. Suckling et sucking se combinent entre 6 et 12 mois. Ils sont le préalable à la capacité de malaxage du bol alimentaire dans la cavité buccale qui préfigure la mastication. L'enfant semble évoluer d'une macro-motricité vers une motricité de plus en plus fine, la pression alternative précédant le malaxage puis la mastication. A 2 ans la phase de préparation orale commence à être en place avec une mastication de plus en plus efficace. La déglutition secondaire (propulsion du bolus par appui de l'apex au palais) se met en place progressivement entre 1 et 2 ans avec persistance d'éléments primaires jusqu'à 5 ans (suction persistante sur des textures mixées hydratées ou liquides).

Le développement du comportement alimentaire, lui, va dépendre de l'intégrité structurelle et de la maturation neurologique. De plus c'est une progression apprise dépendant des liens parents-enfants, ainsi que de l'environnement social et culturel. Ce comportement alimentaire va aussi être modulé par les différentes expériences orales et le développement morphologique et moteur.

Tout obstacle dans l'évolution et le développement de cet ensemble de processus complexes peut occasionner des troubles de la déglutition mais aussi de l'alimentation et aura un impact sur la déglutition de l'adulte en devenir (Figure 43).

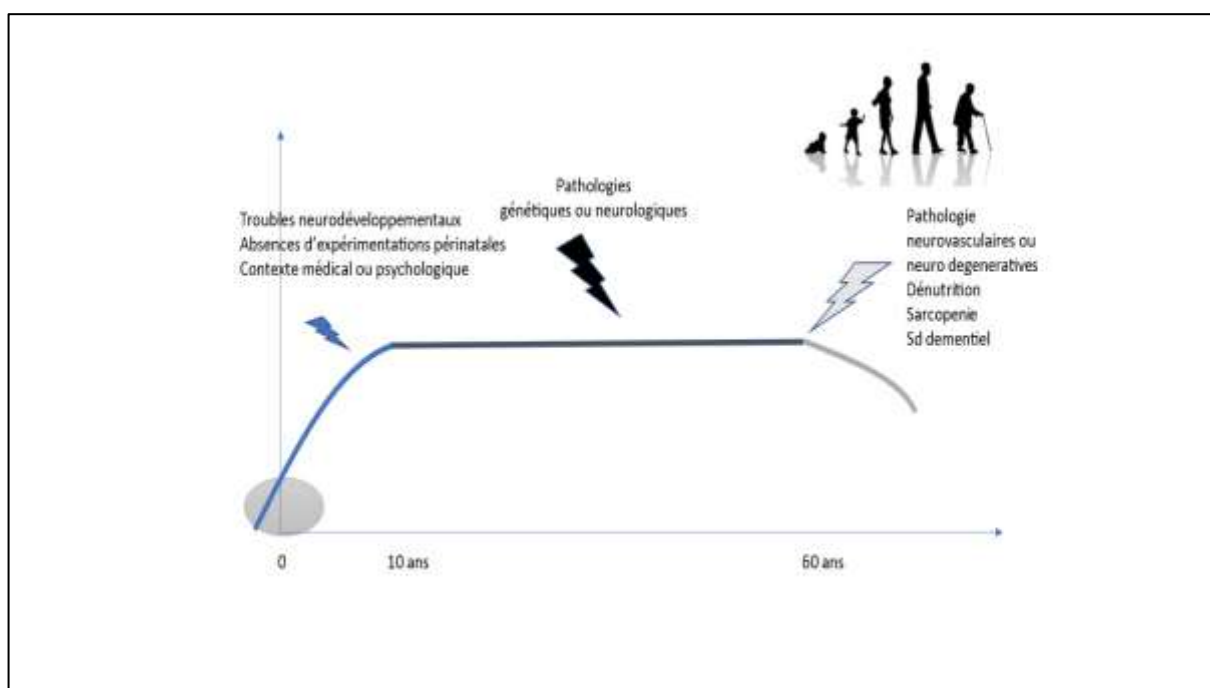


Figure 43. Schéma de l'évolution de la déglutition au cours de la vie

Vieillessement de la déglutition

Vieillessement des fonctions impactant la déglutition

La déglutition subit les modifications inhérentes au vieillissement physiologique des différents tissus et organes mais également des modifications d'autres fonctions qui concourent à son bon déroulement. L'ensemble de ces modifications impacte la physiologie de la déglutition. La presbyphagie primaire correspond au vieillissement de diverses structures et à l'affaiblissement des réflexes entraînant un ralentissement généralisé mais non pathologique du processus de déglutition.

Ainsi, différents changements physiologiques en lien avec l'âge vont impacter la déglutition :

- Le fléchissement neurologique et cognitif :

Le système nerveux évolue avec le temps vers une baisse du nombre de neurones et des connexions synaptiques avec des répercussions sur la rapidité et la précision des mouvements. Avec l'avancée en âge, on observe une diminution de la vitesse de traitement de l'information, une perte des capacités attentionnelles, et des troubles liés à la baisse de la capacité d'inhibition. La mémoire de travail, qui permet de stocker et manipuler des informations pendant un temps court, devient également moins efficace.

- Le vieillissement musculo-squelettique :

Les articulations s'altèrent avec une diminution de la taille et de la forme des cartilages et des tendons qui conduisent à des déformations, des douleurs et un enraidissement. Le vieillissement osseux peut également conduire à des déformations ayant des répercussions sur la déglutition. Cela peut être le cas d'ostéophytes cervicaux à l'origine d'une obstruction pharyngo-œsophagienne haute. La densité osseuse diminue au fur et à mesure des années. Des tassements vertébraux peuvent également modifier la statique rachidienne et céphalique.

L'avancée en âge s'associe à une perte progressive de la masse musculaire globale. Celle-ci s'associe à une baisse de force musculaire, parfois accélérée par des comorbidités ou des facteurs de risque individuels (génétiques ou mode de vie). Il est désormais bien montré que la sarcopénie, terme associant cette perte de masse et de force musculaire, du fait de ses conséquences délétères sur l'autonomie fonctionnelle et la morbi-mortalité, doit être diagnostiquée, prise en charge et prévenue le plus précocement possible (Cruz-Jentoft & Sayer, 2019). L'atteinte sarcopénique de la langue chez le sujet âgé est bien documentée (Nukaya et al., 2024).

- L'évolution sur le plan sensoriel :

L'altération sensorielle est fréquente chez les personnes âgées. Dans les deux tiers des cas, l'atteinte est multisensorielle (deux sens concernés ou plus). Les altérations du goût et du toucher sont les plus fréquemment retrouvées (Correia et al., 2016). L'âge entraîne une perte physiologique de 60% des bourgeons du goût, et l'odorat est également réduit.

- Les fonctions ventilatoires et digestives :

Il est observé au cours des années une dégradation globale des fonctions respiratoires même si celles-ci restent très variables selon la fonction et l'individu. L'évaluation de ces fonctions peut s'avérer plus difficile lorsque les personnes présentent des co-morbidités, en particulier des troubles

cognitifs. Il existe une diminution du volume et de l'élasticité pulmonaire ainsi qu'une réduction de la compliance thoracique.

Avec l'âge, le tube digestif devient moins performant. Il existe des troubles de la motilité pouvant favoriser l'apparition de polypes et pouvant conduire globalement à un ralentissement du transit. Les sphincters sont également moins fonctionnels avec des conséquences potentielles (reflux...). L'œsophage se contracte avec moins de force de même que le Sphincter Supérieur de l'Œsophage (SSO). La muqueuse gastrique devient plus fragile vis-à-vis des agressions et la vidange gastrique moins efficace sans que cela ne soit généralement symptomatique en l'absence de facteur surajouté.

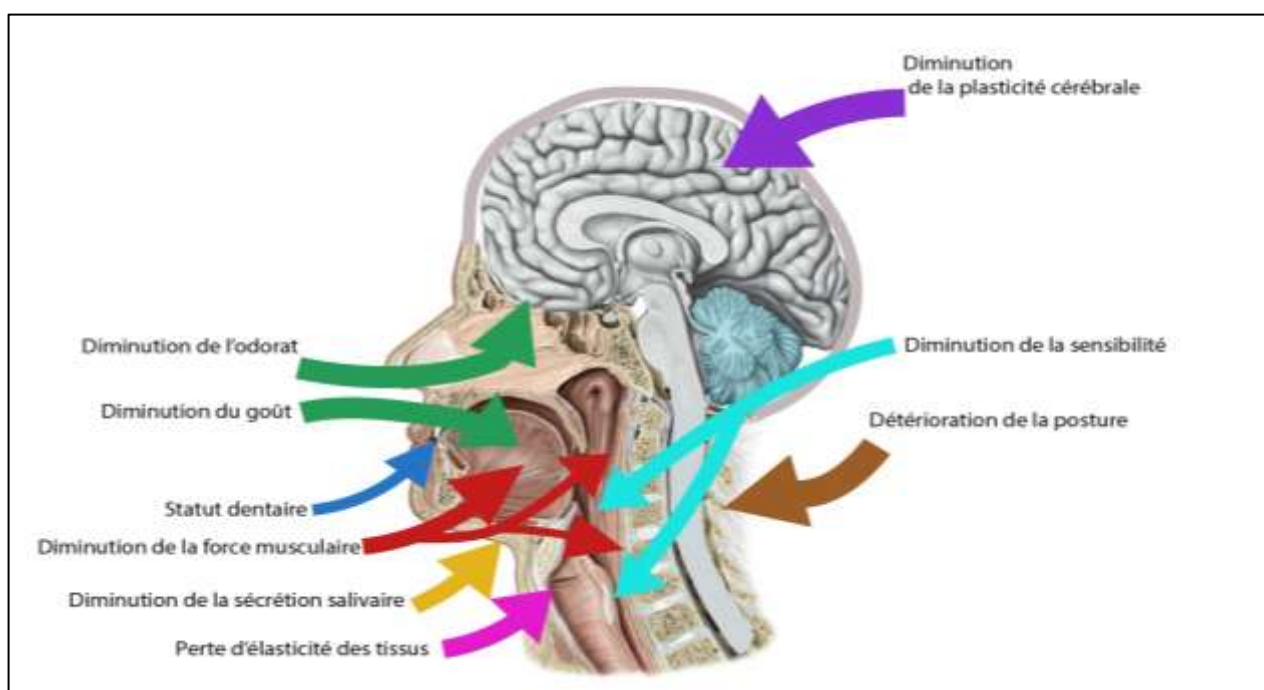


Figure 44. Physiopathologie du vieillissement de la fonction de déglutition (presbyphagie), d'après Muhle et al. 2015

Vieillessement de la physiologie de la déglutition

Les structures bucco-dentaires, pharyngées, laryngées et œsophagiennes sont touchées, et des modifications physiologiques de la déglutition sont observables dans les trois phases (Allepaert et al., 2008).

Avant même la phase orale, la réduction des habiletés motrices, les difficultés de gestion des aliments dans l'assiette puis du geste de mise en bouche entraînent une augmentation de la durée du repas et une réduction des prises alimentaires.

La déglutition des solides

La déglutition des solides est surtout impactée par les modifications de la phase orale. Les difficultés de mastication et les troubles de l'insalivation rendent la préparation des aliments solides plus difficile et peuvent entraîner une moins bonne homogénéité du bol alimentaire, une réduction de l'efficacité de sa propulsion. L'affaiblissement du tonus labial provoque un contrôle réduit du bol alimentaire, pouvant entraîner des bavages. Enfin, la réduction de sensibilité de la langue et la

diminution de ses mouvements provoquent un contrôle réduit du bolus en bouche, des stases buccales, et un risque de fuites vers le pharynx.

Enfin, le péristaltisme pharyngé n'est plus aussi efficace et la durée du transit pharyngé augmente. De multiples déglutitions sont nécessaires pour chasser les stases se trouvant dans les vallécules et les sinus piriformes.

La phase œsophagienne est également impactée avec une prévalence accrue des troubles de la relaxation du sphincter supérieur ou inférieur de l'œsophage et des troubles du péristaltisme œsophagien.

La déglutition des liquides

La déglutition des liquides se modifie significativement avec un volume moyen d'ingestion auto-sélectionné par les sujets âgés de plus de 60 ans significativement plus élevé que chez les sujets de moins de 40 ans. Ceci est associé à une coordination différente de la respiration lors des prises au verre, à des déglutitions de Type II (voies respiratoires restant fermées, épiglotte restant inversée) et à un temps de transit pharyngé plus long (temps de déclenchement, durée plus longue jusqu'à l'élévation maximale de l'os hyoïde). Le déclenchement du temps pharyngé pour les liquides se fait plus facilement au niveau des sinus piriformes.

Au cours de la phase pharyngée, le réflexe de toux peut être amoindri et des fuites prématurées vers le pharynx peuvent survenir en raison d'une perte de la sensibilité bucco-pharyngée et d'un seuil plus élevé pour la détection des stimuli entraînant un retard du réflexe de déglutition. Une diminution de l'amplitude de l'élévation laryngée est également observée.

La déglutition salivaire

Enfin, concernant les déglutitions spontanées de salive, les personnes âgées déglutissent moins souvent spontanément (FDS moyenne de 0.98/min [CI: 0.67; 1.42] pour les sujets de plus de 60 ans en bonne santé, au lieu de 2.1/ min [0.09-0.52] avant 60 ans.

Références

- Alexander T, Nolte C, Krumlauf R. Hox genes and segmentation of the hindbrain and axial skeleton. *Annu Rev Cell Dev Biol.* 2009;25:431-56. doi: 10.1146/annurev.cellbio.042308.113423. PMID: 19575673.
- Allepaerts S, Delcourt S, Petermans J. Les troubles de la déglutition du sujet âgé: un problème trop souvent sous-estimé [Swallowing disorders in the elderly: an underestimated problem]. *Rev Med Liege.* 2008;63(12):715-721.
- Alvarez-Berdugo D, Rofes L, Casamitjana JF, Padrón A, Quer M, Clavé P. Oropharyngeal and laryngeal sensory innervation in the pathophysiology of swallowing disorders and sensory stimulation treatments. *Ann N Y Acad Sci.* 2016;1380(1):104-120. doi:10.1111/nyas.13150
- Ambrocio KR, Miles A, Bhutada AM, Choi D, Garand KL. Defining Normal Sequential Swallowing Biomechanics. *Dysphagia.* 2023;38(6):1497-1510. doi:10.1007/s00455-023-10576-z
- Bolser DC, Gestreau C, Morris KF, Davenport PW, Pitts TE. Central neural circuits for coordination of swallowing, breathing, and coughing: predictions from computational modeling and simulation. *Otolaryngol Clin North Am.* 2013;46(6):957-964. doi:10.1016/j.otc.2013.09.013
- Bulmer JM, Ewers C, Drinnan MJ, Ewan VC. Evaluation of Spontaneous Swallow Frequency in Healthy People and Those With, or at Risk of Developing, Dysphagia: A Review. *Gerontol Geriatr Med.* 2021;7:23337214211041801. Published 2021 Sep 27. doi:10.1177/23337214211041801
- Calhoun KH, Gibson B, Hartley L, Minton J, Hokanson JA. Age-related changes in oral sensation. *Laryngoscope.* 1992;102(2):109-116. doi:10.1288/00005537-199202000-00001
- Chaudhari N, Roper SD. The cell biology of taste [published correction appears in J Cell Biol. 2010 Oct 18;191(2):429]. *J Cell Biol.* 2010;190(3):285-296. doi:10.1083/jcb.201003144
- Cobourne MT, Iseki S, Birjandi AA, Adel Al-Lami H, Thauvin-Robinet C, Xavier GM, Liu KJ. How to make a tongue: Cellular and molecular regulation of muscle and connective tissue formation during mammalian tongue development. *Semin Cell Dev Biol.* 2019 Jul;91:45-54. doi: 10.1016/j.semcdb.2018.04.016. Epub 2018 May 18. PMID: 29784581
- Colevas SM, Stalter LN, Jones CA, McCulloch TM. The Natural Swallow: Factors Affecting Subject Choice of Bolus Volume and Pharyngeal Swallow Parameters in a Self-selected Swallow. *Dysphagia.* 2022;37(5):1172-1182. doi:10.1007/s00455-021-10373-6
- Correia C, Lopez KJ, Wroblewski KE, et al. Global Sensory Impairment in Older Adults in the United States. *J Am Geriatr Soc.* 2016;64(2):306-313. doi:10.1111/jgs.13955
- Couly G, Aubry MC, Abadie V. Le syndrome foetal d'immobilité orale (SFIO) [Fetal oral immobility syndrome]. *Arch Pediatr.* 2010;17(1):1-2. doi:10.1016/j.arcped.2009.10.011
- Cruz-Jentoft AJ, Sayer AA. Sarcopenia [published correction appears in Lancet. 2019 Jun 29;393(10191):2590. doi: 10.1016/S0140-6736(19)31465-5]. *Lancet.* 2019;393(10191):2636-2646. doi:10.1016/S0140-6736(19)31138-9
- Daniels SK, Foundas AL. Swallowing physiology of sequential straw drinking. *Dysphagia.* 2001;16(3):176-182. doi:10.1007/s00455-001-0061-0

- Danoy MC, Heuillet G, Sermet M, Thomassin JM. Anatomie fonctionnelle du pharynx [Functional anatomy of the pharynx]. *Rev Laryngol Otol Rhinol (Bord)*. 1991;112(4):365-370.
- Devauchelle B . Langue et dysmorphie. (1996) Paris : Masson.
- Dodds WJ, Stewart ET, Logemann JA. Physiology and radiology of the normal oral and pharyngeal phases of swallowing. *AJR Am J Roentgenol*. 1990;154(5):953-963. doi:10.2214/ajr.154.5.2108569
- Fink BR. The mechanism of closure of the human larynx. *Trans Am Acad Ophthalmol Otolaryngol*. 1956;60(1):117-129.
- Gouaze, A. (1978). Neuroanatomie clinique. Paris : Expansion scientifique française (3ème revue)
- Guiu Hernandez E, Gozdzikowska K, Jones RD, Huckabee ML. Pharyngeal Swallowing During Wake and Sleep. *Dysphagia*. 2019;34(6):916-921. doi:10.1007/s00455-019-09989-6
- Haggard P, de Boer L. Oral somatosensory awareness. *Neurosci Biobehav Rev*. 2014;47:469-484. doi:10.1016/j.neubiorev.2014.09.015
- Hamdy S, Rothwell JC. Gut feelings about recovery after stroke: the organization and reorganization of human swallowing motor cortex. *Trends Neurosci*. 1998;21(7):278-282. doi:10.1016/s0166-2236(97)01212-5
- Hanson MG, Landmesser LT. Normal patterns of spontaneous activity are required for correct motor axon guidance and the expression of specific guidance molecules. *Neuron*. 2004;43(5):687-701. doi:10.1016/j.neuron.2004.08.018
- Hermant N, Perrier P, Payan Y. Chapter 19 - Human Tongue Biomechanical Modeling, p. 395-411, In Translational Epigenetics, Biomechanics of Living Organs, Volume 1, Academic Press, 2017. Editor(s): Payan Y, Ohayon J. ISSN 25425358, ISBN 9780128040096, <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-804009-6.00019-5>.
- Iosif CI, Bashir ZI, Apps R, Pickford J. Cerebellar Prediction and Feeding Behaviour. *Cerebellum*. 2023;22(5):1002-1019. doi:10.1007/s12311-022-01476-3
- Kagaya H, Yokoyama M, Saitoh E, et al. Isolated pharyngeal swallow exists during normal human feeding. *Tohoku J Exp Med*. 2015;236(1):39-43. doi:10.1620/tjem.236.39
- Kendall KA. Oropharyngeal swallowing variability. *Laryngoscope*. 2002;112(3):547-551. doi:10.1097/00005537-200203000-00025
- Krishnan G, Goswami SP, Rangarathnam B. A Systematic Review of the Influence of Bolus Characteristics on Respiratory Measures in Healthy Swallowing. *Dysphagia*. 2020;35(6):883-897. doi:10.1007/s00455-020-10103-4
- Lagier A. Toute l'anatomie pour l'orthophonie. (2019). Louvain-la-Neuve : De Boeck supérieur.
- Lau C, Alagugurusamy R, Schanler RJ, Smith EO, Shulman RJ. Characterization of the developmental stages of sucking in preterm infants during bottle feeding. *Acta Paediatr*. 2000;89(7):846-852.

- Lau C, Smith EO, Schanler RJ. Coordination of suck-swallow and swallow respiration in preterm infants. *Acta Paediatr.* 2003;92(6):721-727.
- Laude M, Doual JM, Doual-Bisser A. Modifications morphologiques du squelette cervico-céphalique en fonction de l'âge. Etude radio-céphalométrique [Morphological changes in the head-neck skeleton as a function of age. A radiocephalometric study]. *Bull Group Int Rech Sci Stomatol Odontol.* 1985;28(1):27-45.
- Leenhardt S. (2000). L'os hyoïde dans l'anatomie fonctionnelle du carrefour aérodigestif. Thèse de médecine. Toulouse III.
- Logemann JA. Manual for the videofluorographic study of swallowing. (1986). Austin : Pro-Ed.
- Ludlow CL. Central Nervous System Control of Voice and Swallowing. *J Clin Neurophysiol.* 2015;32(4):294-303. doi:10.1097/WNP.000000000000186
- Mahan PE, Wilkinson TM, Gibbs CH, Mauderli A, Brannon LS. Superior and inferior bellies of the lateral pterygoid muscle EMG activity at basic jaw positions. *J Prosthet Dent.* 1983;50(5):710-718. doi:10.1016/0022-3913(83)90214-7
- Martin-Harris B, Brodsky MB, Michel Y, et al. MBS measurement tool for swallow impairment-MBSImp: establishing a standard. *Dysphagia.* 2008;23(4):392-405. doi:10.1007/s00455-008-9185-9
- Martin-Harris B, Kantarcigil C, Reedy EL, McFarland DH. Cross-System Integration of Respiration and Deglutition: Function, Treatment, and Future Directions. *Dysphagia.* 2023;38(4):1049-1058. doi:10.1007/s00455-022-10538-x
- Matsuo K, Palmer JB. Anatomy and physiology of feeding and swallowing: normal and abnormal. *Phys Med Rehabil Clin N Am.* 2008;19(4):691-vii. doi:10.1016/j.pmr.2008.06.001
- Mélotte E, Maudoux A, Panda R, et al. Links Between Swallowing and Consciousness: A Narrative Review. *Dysphagia.* 2023;38(1):42-64. doi:10.1007/s00455-022-10452-2
- Miller AJ. Deglutition. *Physiol Rev.* 1982;62(1):129-184. doi:10.1152/physrev.1982.62.1.129
- Miller JL, Sonies BC, Macedonia C. Emergence of oropharyngeal, laryngeal and swallowing activity in the developing fetal upper aerodigestive tract: an ultrasound evaluation. *Early Hum Dev.* 2003;71(1):61-87. doi:10.1016/s0378-3782(02)00110-x
- Mistry S, Verin E, Singh S, et al. Unilateral suppression of pharyngeal motor cortex to repetitive transcranial magnetic stimulation reveals functional asymmetry in the hemispheric projections to human swallowing. *J Physiol.* 2007;585(Pt 2):525-538. doi:10.1113/jphysiol.2007.144592
- Muhle P, Wirth R, Glahn J, Dziewas R. Schluckstörungen im Alter, Physiologie und Pathophysiologie [Age-related changes in swallowing. Physiology and pathophysiology]. *Nervenarzt.* 2015;86(4):440-451. doi:10.1007/s00115-014-4183-7
- Nukaya Y, Matsui D, Watanabe I, et al. Association Between Oral Hypofunction and Maximum Gait Speed in Older Adults: A Cross-Sectional Study. *J Oral Rehabil.* Published online November 24, 2024. doi:10.1111/joor.13910
- Ono T, Hori K, Nokubi T. Pattern of tongue pressure on hard palate during swallowing. *Dysphagia.* 2004;19(4):259-264. doi:10.1007/s00455-004-0010-9

- Palmer MM, Crawley K, Blanco IA. Neonatal Oral-Motor Assessment scale: a reliability study. *J Perinatol*. 1993;13(1):28-35.
- Paydarfar D, Gilbert RJ, Poppel CS, Nassab PF. Respiratory phase resetting and airflow changes induced by swallowing in humans. *J Physiol*. 1995;483 (Pt 1)(Pt 1):273-288. doi:10.1113/jphysiol.1995.sp020584
- Pedersen A, Sørensen CE, Proctor GB, Carpenter GH. Salivary functions in mastication, taste and textural perception, swallowing and initial digestion. *Oral Dis*. 2018;24(8):1399-1416. doi:10.1111/odi.12867
- Plant RL. Anatomy and physiology of swallowing in adults and geriatrics. *Otolaryngol Clin North Am*. 1998;31(3):477-488. doi:10.1016/s0030-6665(05)70065-7
- Pouderoux P, Logemann JA, Kahrilas PJ. Pharyngeal swallowing elicited by fluid infusion: role of volition and vallecular containment. *Am J Physiol*. 1996;270(2 Pt 1):G347-G354. doi:10.1152/ajpgi.1996.270.2.G347
- Purves D., Augustine G.-J., Fitzpatrick D., Hall W.-C., LaMantia A.-S., McNamara J.-O., & White L.-E. (2019). Neurosciences. Paris : De Boeck, 2019, 6ème édition.
- Putz R, Pabst R. (Eds.) (1984). Sobotta : Atlas d'anatomie humaine. Tome 1 : Tête, cou, membre supérieur (3e éd.). Paris : Technique & documentation Lavoisier.
- Qureshi MA, Vice FL, Taciak VL, Bosma JF, Gewolb IH. Changes in rhythmic suckle feeding patterns in term infants in the first month of life. *Dev Med Child Neurol*. 2002;44(1):34-39. doi:10.1017/s0012162201001621
- Robbins J. The evolution of swallowing neuroanatomy and physiology in humans: a practical perspective. *Ann Neurol*. 1999;46(3):279-280. doi:10.1002/1531-8249(199909)46:3<279::aid-ana1>3.0.co;2-1
- Robbins J. The evolution of swallowing neuroanatomy and physiology in humans: a practical perspective. *Ann Neurol*. 1999;46(3):279-280. doi:10.1002/1531-8249(199909)46:3<279::aid-ana1>3.0.co;2-1
- Rouvière H. Anatomie Humaine : descriptive, topographique et fonctionnelle. Tome 1 : Tête et cou (12e éd.). (1990). Paris : Masson.
- Saitoh E, Shibata S, Matsuo K, Baba M, Fujii W, Palmer JB. Chewing and food consistency: effects on bolus transport and swallow initiation. *Dysphagia*. 2007;22(2):100-107. doi:10.1007/s00455-006-9060-5
- Sasegbon A, Hamdy S. The anatomy and physiology of normal and abnormal swallowing in oropharyngeal dysphagia. *Neurogastroenterol Motil*. 2017;29(11):10.1111/nmo.13100. doi:10.1111/nmo.13100
- Sasegbon A, Hamdy S. The Role of the Cerebellum in Swallowing. *Dysphagia*. 2023;38(2):497-509. doi:10.1007/s00455-021-10271-x
- Shaker R, Ren J, Zamir Z, Sarna A, Liu J, Sui Z. Effect of aging, position, and temperature on the threshold volume triggering pharyngeal swallows. *Gastroenterology*. 1994;107(2):396-402. doi:10.1016/0016-5085(94)90164-3

- Shaker R. Airway protective mechanisms: current concepts. *Dysphagia*. 1995;10(4):216-227. doi:10.1007/BF00431413
- Stevenson RD, Allaire JH. The development of normal feeding and swallowing. *Pediatr Clin North Am*. 1991;38(6):1439-1453. doi:10.1016/s0031-3955(16)38229-3
- Takeda H, Saitoh K. Impact of proprioception during the oral phase on initiating the swallowing reflex. *Laryngoscope*. 2016;126(7):1595-1599. doi:10.1002/lary.25638
- Thach BT. Some aspects of clinical relevance in the maturation of respiratory control in infants. *J Appl Physiol (1985)*. 2008;104(6):1828-1834. doi:10.1152/japplphysiol.01288.2007
- Troche MS, Brandimore AE, Godoy J, Hegland KW. A framework for understanding shared substrates of airway protection. *J Appl Oral Sci*. 2014;22(4):251-260. doi:10.1590/1678-775720140132
- Vose A, Humbert I. "Hidden in Plain Sight": A Descriptive Review of Laryngeal Vestibule Closure. *Dysphagia*. 2019;34(3):281-289. doi:10.1007/s00455-018-9928-1
- Wei KC, Wang TG, Hsiao MY. The Cortical and Subcortical Neural Control of Swallowing: A Narrative Review. *Dysphagia*. 2024;39(2):177-197. doi:10.1007/s00455-023-10613-x
- Wilmskoetter J, Martin-Harris B, Pearson WG Jr, et al. Differences in swallow physiology in patients with left and right hemispheric strokes. *Physiol Behav*. 2018;194:144-152. doi:10.1016/j.physbeh.2018.05.010
- Yoshida Y, Tanaka Y, Mitsumasu T, Hirano M, Kanaseki T. Peripheral course and intramucosal distribution of the laryngeal sensory nerve fibers of cats. *Brain Res Bull*. 1986;17(1):95-105. doi:10.1016/0361-9230(86)90165-6
- Zancan M, Luchesi KF, Mituuti CT, Furkim AM. Onset locations of the pharyngeal phase of swallowing: meta-analysis. Locais de início da fase faríngea da deglutição: meta-análise. *Codas*. 2017;29(2):e20160067. Published 2017 Mar 16. doi:10.1590/2317-1782/20172016067