

L'oreille et le contrôle de la voix



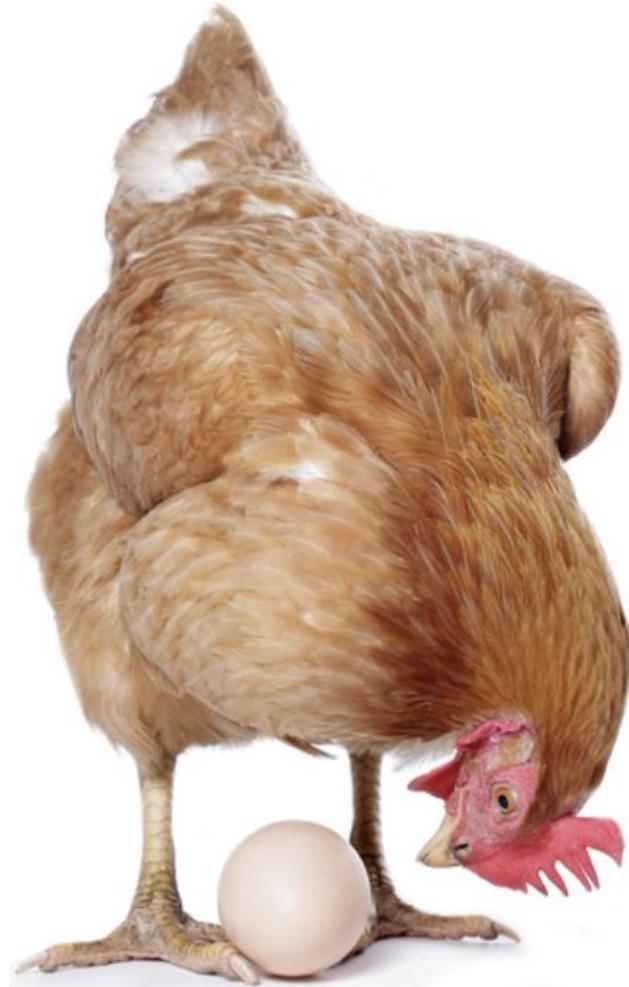
Une brève histoire de la boucle audio-phonatoire

Dr Elisabeth PERI FONTAA
Phoniatre
Strasbourg

Aix Les Bains 13/10/2023

La boucle audio-phonatoire: Qui de la poule ou de l'œuf...?

- A l'échelle de la vie d'un être humain, la production vocale est en permanence sous le contrôle de l'audition :
 - C'est par mimétisme de la voix des autres que se façonne notre voix
 - Sans le contrôle de l'audition, la voix perd ses caractéristiques « classiques »
- A l'échelle de l'évolution de l'espèce humaine, qui de l'un a façonné l'autre ?
 - Les capacités auditives de l'espèce humaine ont-elles contraint l'appareil phonatoire à produire les caractéristiques acoustiques de la voix humaine ?
 - Les possibilités de vocalisation liées à la morphologie de l'appareil phonatoire ont-elles spécialisé l'audition dans les limites fréquentielles des sons du langage ?





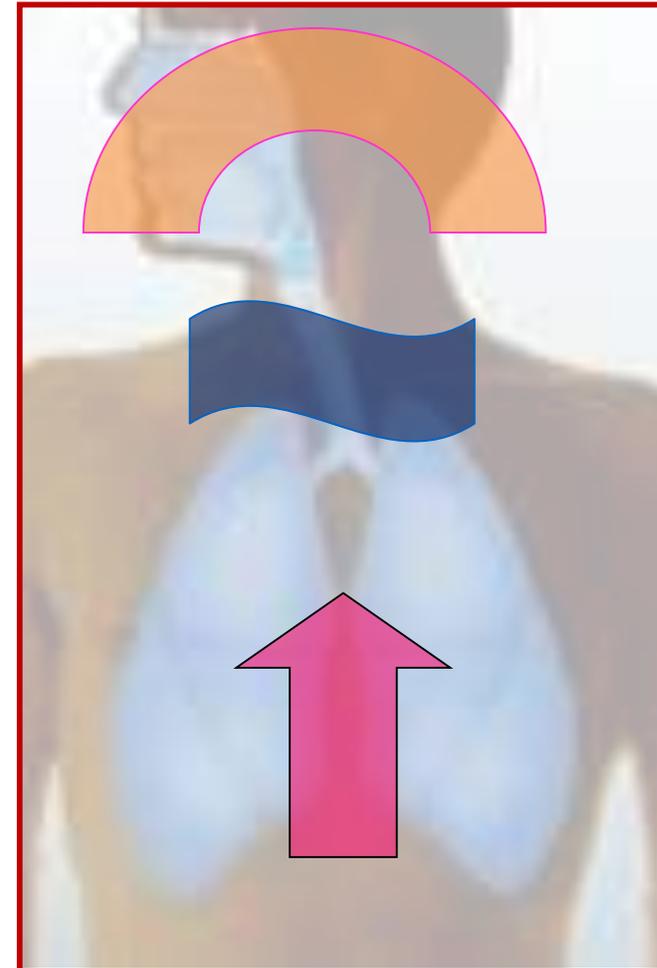
L'appareil
phonatoire



Voix:

Phénomène sonore produit par la vibration des cordes vocales, modifié puis expulsé hors du corps

- Air en mouvement: énergie mécanique (soufflerie)
- Énergie mécanique ➤ oscillation des CV (vibrateur): énergie acoustique
- Fourniture laryngée ➤ modifiée par les cavités aériennes supra-glottiques (résonateurs)



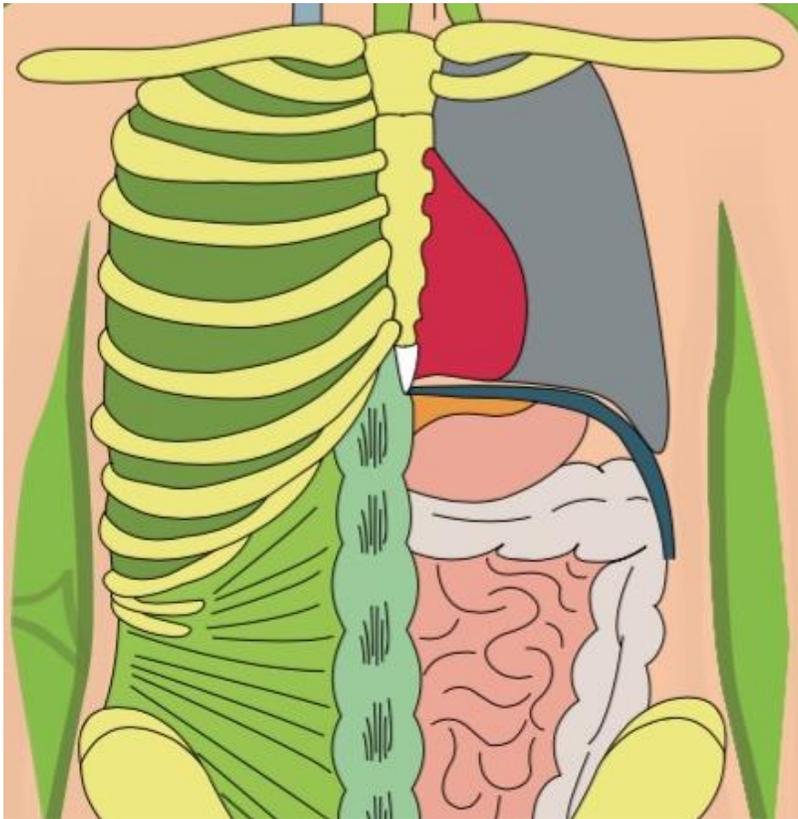




Articulation
Résonance
Amplification



Vibration
Précision
Modulation



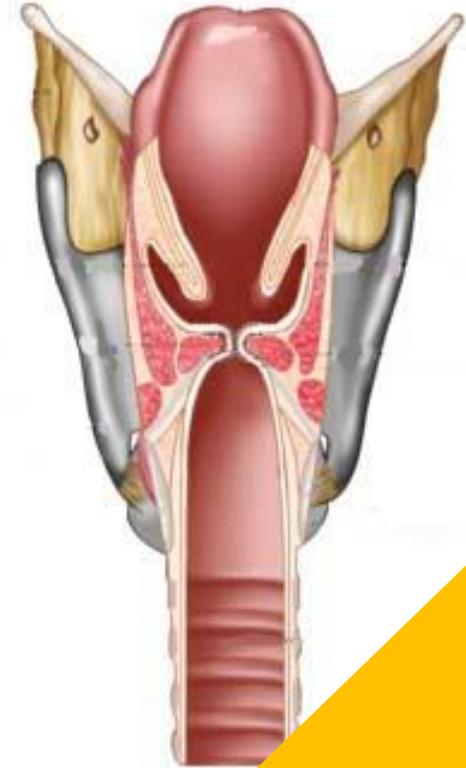
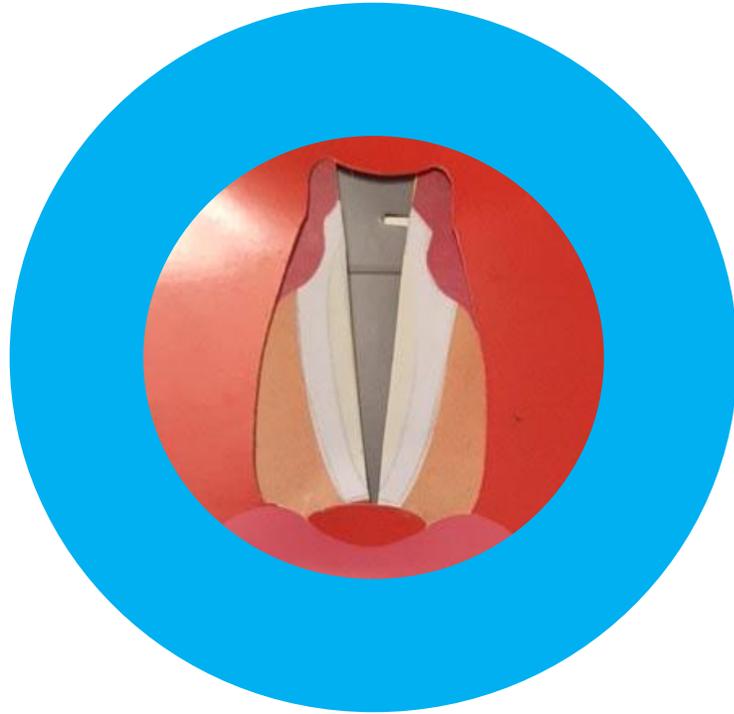
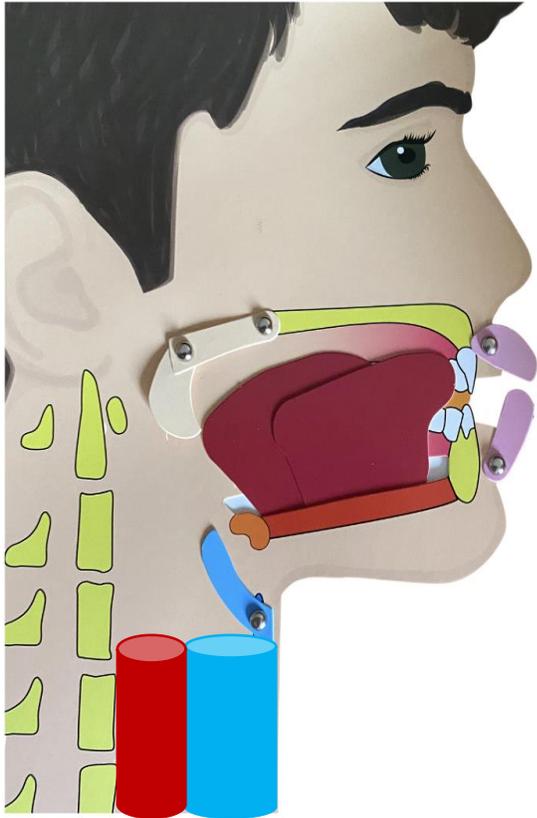
Ventilation
Grands volumes
Pression
Force musculaire

La production vocale

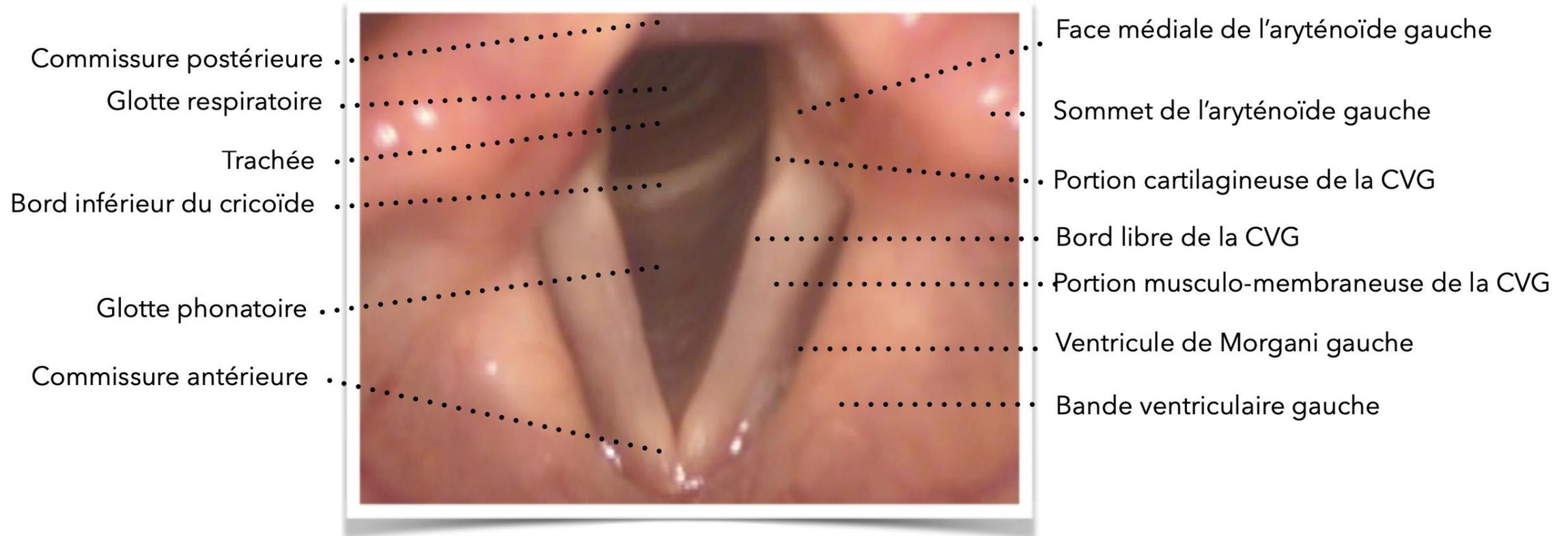
Un peu
d'anatomie...



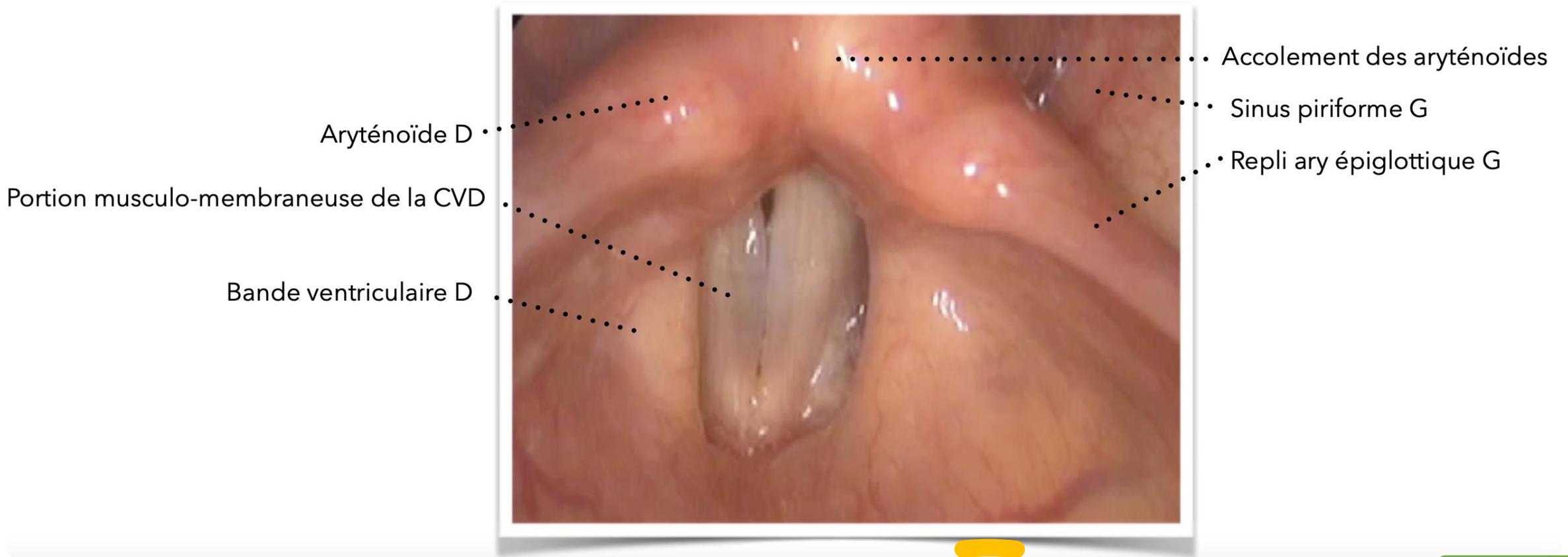
Le larynx



Pendant la ventilation

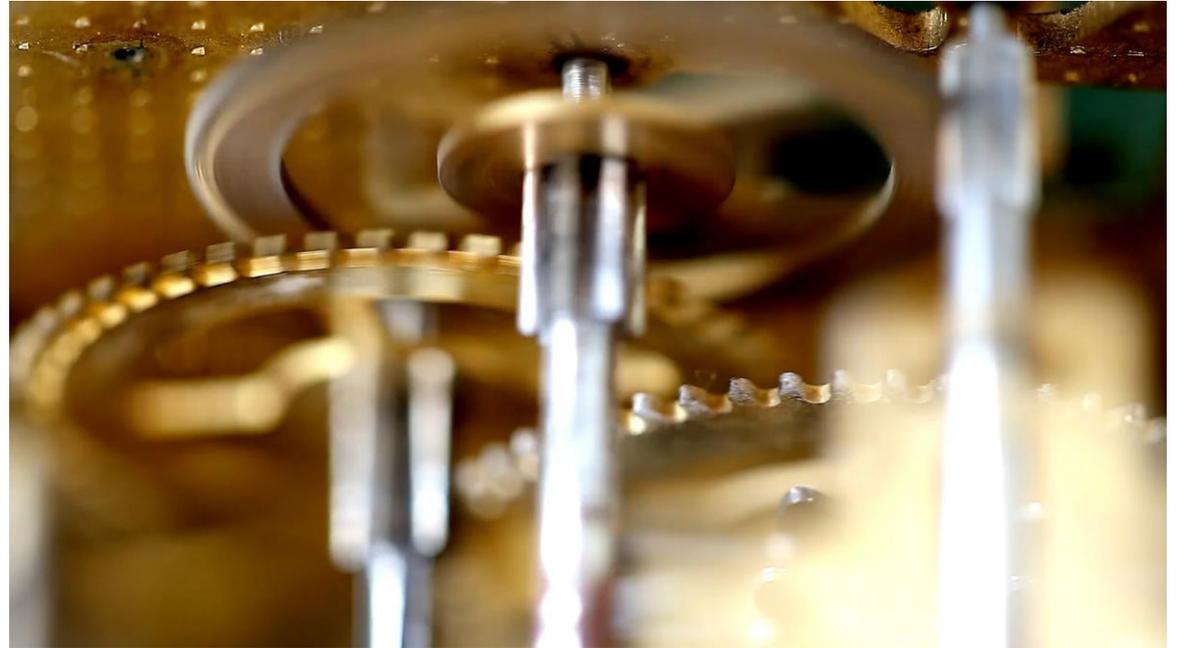


Pendant la phonation



La production vocale

Un peu de
physiologie...



*A l'origine du son :
la vibration des cordes vocales*



La vibration cordale

Se caractérise par une oscillation auto-entretenu des bords libres des CV

Alternance de phases d'accolement et d'écartement des bords libres

Durée de chaque phase dépend du mécanisme laryngé utilisé



Facteurs influençant la vibration cordale

Dynamique laryngée

Geste respiratoire

Posture

Fonctionnement des résonateurs



Dynamique
laryngée

The background features a series of horizontal, wavy lines that transition from a bright white on the left to a deep blue on the right. These lines are composed of many thin, parallel strands, giving them a textured, fiber-like appearance. Scattered throughout these strands are numerous small, bright white and blue particles, some of which appear to be in motion, creating a sense of dynamic energy and depth.

A l'intérieur
du larynx...

Fréquence vibratoire

Mécanismes vibratoires

Attaques du son

Participation des bandes
ventriculaires

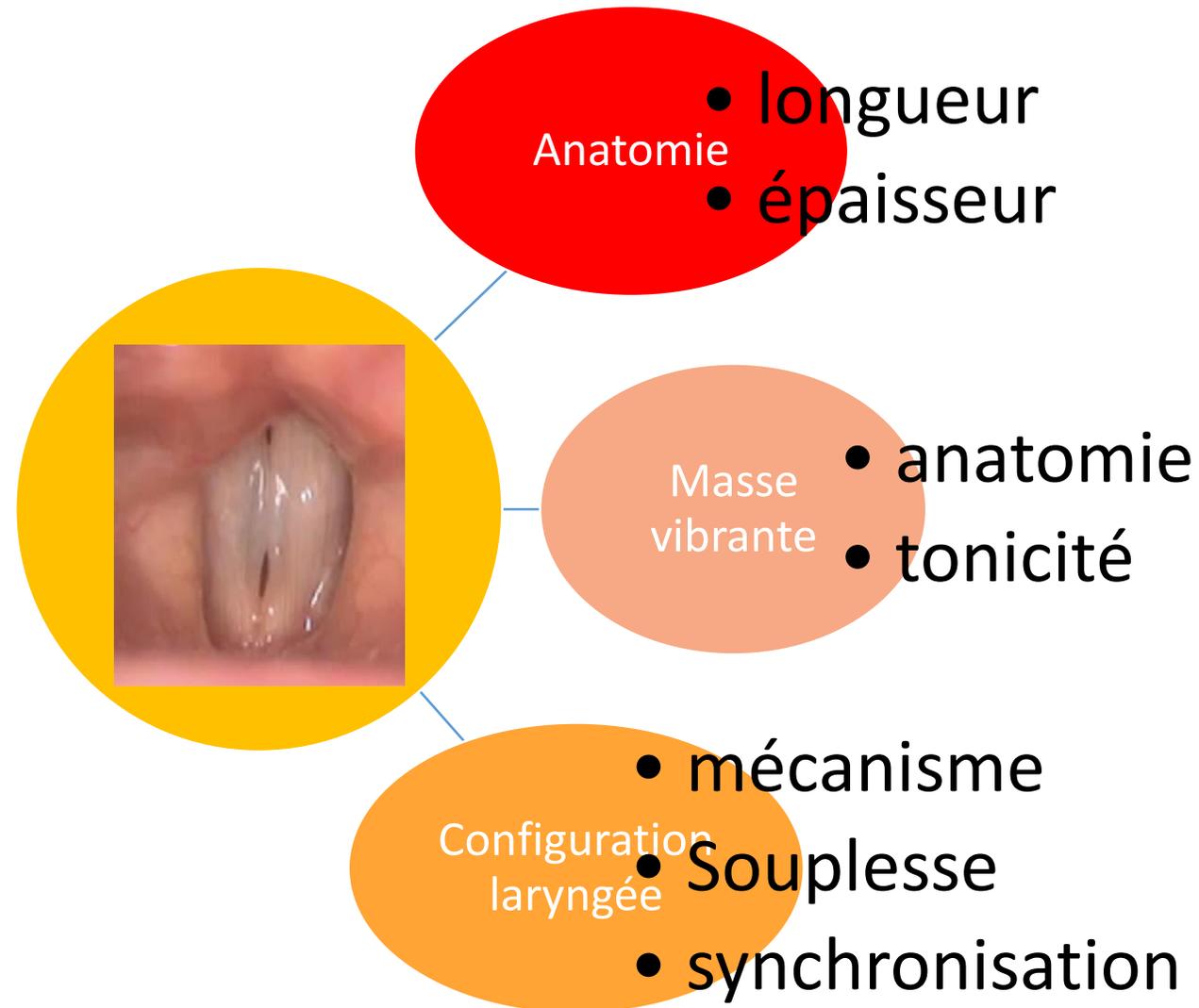
Fréquence vibratoire des cordes vocales

D'un point de vue perceptif, la hauteur de la voix correspond à la fréquence fondamentale de vibration des bords libres des CV : il s'agit du nombre de cycles vibratoires réalisés par les CV en une seconde (alternance de mouvements d'ouverture et de fermeture des bords libres des CV).

La fréquence fondamentale (F_0) est liée à la quantité de masse vibrante au niveau des CV, et dépend donc, du moins partiellement, de la taille et de l'épaisseur des CV, du niveau de tonicité laryngée et du mécanisme laryngé utilisé pour produire la vibration cordale

La valeur de la F_0 n'est pas stable au cours des productions vocales, car elle s'adapte aux contraintes phonétiques (différentes voyelles et consonnes) mais également aux types de phrases (déclaratives, interrogatives, affirmatives...), aux conditions d'utilisation vocale (voix parlée, criée, chantée...).

Fréquence vibratoire des CV



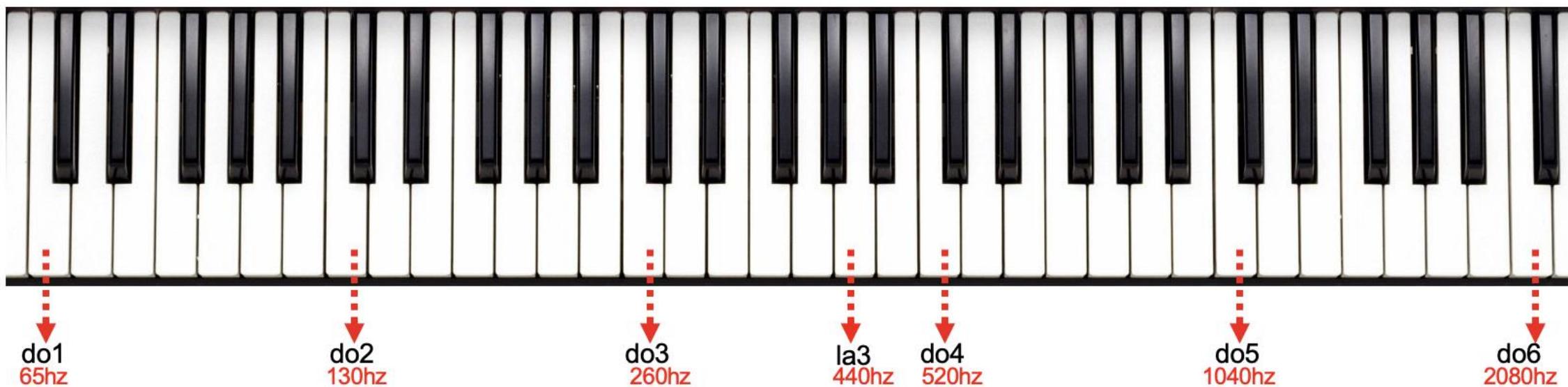
Mécanismes vibratoires des cordes vocales

L'étendue de la voix d'un même individu peut couvrir jusqu'à 5 octaves (de 40 Hz à 2000 Hz). Du son le plus grave au son le plus aigu, l'appareil phonatoire modifie sa configuration et ses activités musculaires, entraînant des changements de qualité vocale.

Le rendu acoustique est très différent selon la hauteur des sons émis, et certaines qualités vocales vont être plus ou moins développées en fonction de sa pratique vocale.

Le contrôle de la hauteur est lié à des activités musculaires laryngées différenciées. Chaque individu a la possibilité d'utiliser 4 mécanismes différents pour produire les notes de son étendue vocale.

La tessiture de la voix dépend notamment de la qualité des ajustements musculaires et va se développer par le travail technique vocal.



Les 4 mécanismes vibratoires laryngés

- **Le mécanisme 0 (M0, fry, Stroh bass, pulse, slack)**

Ce mécanisme permet d'émettre les sons les plus graves de l'étendue vocale humaine. La fréquence vibratoire est basse, instable, et l'étendue limitée. Le relâchement des CV permet d'utiliser ce mécanisme comme un exercice de « relaxation cordale ».

- **Le mécanisme 1 (M1, lourd, modal, épais)**

Ce mécanisme est utilisé par les hommes et les femmes adultes pour la voix parlée chantée.

- **Le mécanisme 2 (M2, léger, falsetto, mince, loft)**

Ce mécanisme est utilisé par les femmes et les enfants dans la voix parlée et chantée. Certains hommes l'utilisent également pour la voix chantée (contre ténor, yoddlé...)

- **Le mécanisme 3 (M3, sifflet, flageolet)**

Ce mécanisme est utilisé par certaines chanteuses soprano pour atteindre les notes les plus aiguës de leur tessiture. Les enfants le produisent très facilement, notamment lors de colère...

Passage d'un mécanisme à l'autre

- Le passage d'un mécanisme à un autre correspond à un ajustement physiologique de la configuration cordale et des activités musculaires laryngées.
- Il s'accompagne d'une perte momentanée du contrôle de la fréquence fondamentale (modification brutale de la masse vibrante), lors du changement de mécanisme vibratoire.
- Le passage ne correspond pas à une hauteur précise mais à un groupe de notes: 2 mécanismes se recouvrent ainsi sur les notes du passage (une même note peut être émise dans 2 mécanismes contigus)

Passage d'un mécanisme à l'autre

- Chez la plupart des locuteurs, le passage correspond à une zone de la tessiture où le timbre est altéré.
- Mais, alors que sur le plan physiologique, le passage est brutal, il peut être « lisse » sur le plan acoustique, en particulier chez le chanteur entraîné
- Les instabilités du passage sont masquées par un effet acoustique lié à une adaptation des résonateurs (« couverture des sons », « voix mixte ») : la configuration des cavités de résonance va permettre d'homogénéiser le timbre
- Dans certaines pratiques vocales, le chanteur recherche au contraire à mettre en valeur le contraste acoustique lié à l'utilisation de 2 mécanismes différents

Les différents
mécanismes
laryngés

mécanisme lourd





Le jeu des mécanismes dans le chant...

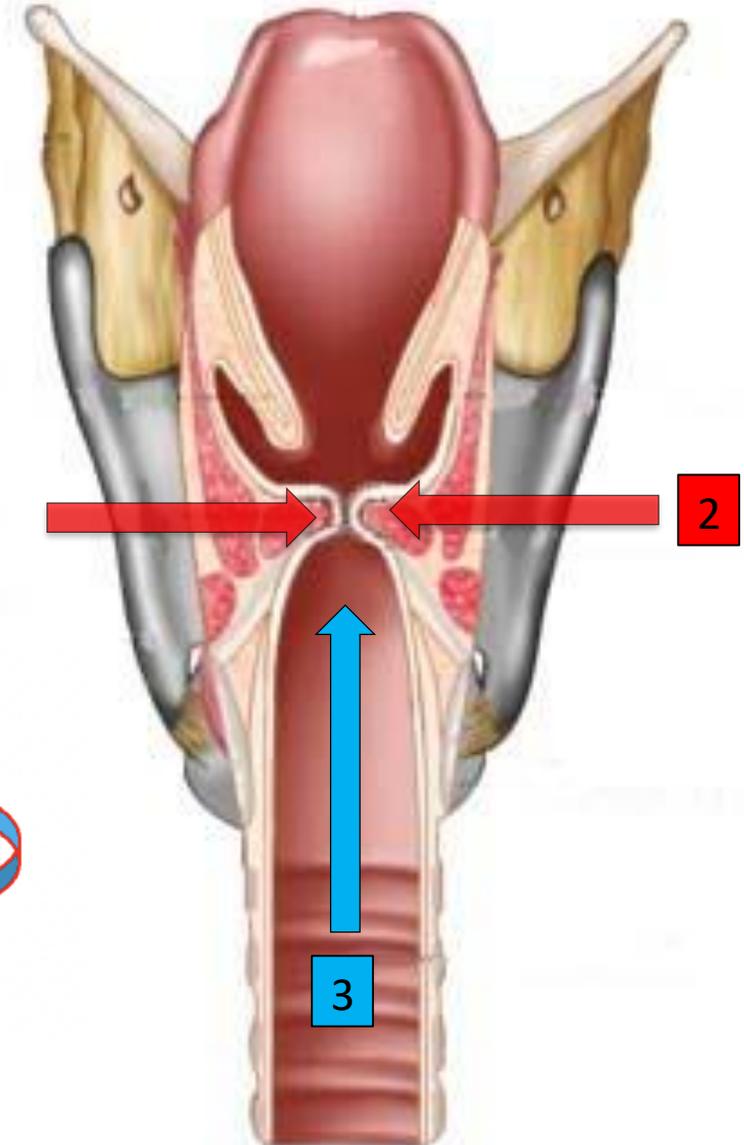
- Colm Wilkinson <https://youtu.be/qsYnhVITf9E>
- Hank Williams <https://youtu.be/mDspMN0V4Nc>
- Clarence « frogman » Henry <https://youtu.be/SZ9IPzAotT8>
- P. Jaroussky et M.N Lemieux <https://youtu.be/d8BewQfolHE>

Les 4 phases de l'attaque du son

1. Mise en position phonatoire
2. Réalisation de l'occlusion glottique
3. Déclenchement de la poussée expiratoire
4. Début de l'émission sonore

L'attaque du son

1. Mise en position phonatoire
2. Réalisation de l'occlusion glottique
3. Déclenchement de la poussée expiratoire
4. Début de l'émission sonore



Les 3 types d'attaques vocales

- L'attaque douce (ou normale ou équilibrée ou simultanée)

La poussée expiratoire et la fermeture de la glotte sont parfaitement synchrones, donnant au démarrage du son une impression auditive de douceur

- L'attaque soufflée (ou aspirée)

La poussée expiratoire précède la fermeture de la glotte, laissant entendre un bruit de souffle au démarrage du son

- L'attaque dure (ou pressée)

La fermeture de la glotte précède la poussée expiratoire, donnant une impression auditive de dureté



Les 3 types d'attaques vocales

attaque "pressée"

Participation des bandes ventriculaires

- Les bandes ventriculaires (BV) sont des replis situés au-dessus des CV
- Leur rôle physiologique est d'augmenter la force d'accolement des CV
- Leur rapprochement impacte le mouvement vibratoire des cordes vocales
- L'utilisation des BV dans la phonation peut être volontaire (recherche d'une acoustique vocale particulière) ou involontaire (comportement de forçage vocal, hypertonie laryngée, compensation d'un dysfonctionnement des CV...)
- L'activité des BV peut aboutir à un rapprochement allant jusqu'au contact, et dans certaines situations à une vibration ventriculaire

Activité des
bandes
ventriculaires
pendant la
phonation en
voix parlée





Vibration des
bandes
ventriculaires
pendant la
phonation en
voix chantée

Dans le « Growl » (ou grognement) : dans le *blues*, dans le *gospel* et le *jazz*, conférant à la voix un timbre guttural.

Dans la « voix saturée » du *métal* : co vibration CV/BV dans le registre grave

Dans certains chants diphoniques : certaines techniques mettent en jeu une co vibration CV/BV.

Dans le *chant de gorge*: technique de chant diphonique avec co vibration CV/BV

Le *Bassu* (voix la plus basse des quatuors polyphoniques sardes) se caractérise par une co vibration CV/BV



Le jeu des bandes ventriculaires dans le chant...

- Jinjer <https://youtu.be/SQNtGoM3FVU>
- Polyphonies sardes <https://youtu.be/z-m3V1cwnPY>
- Chant de gorge <https://youtu.be/jVC99SrrpXU>

A l'extérieur du larynx...

Activité des muscles du cou

Position de la tête et colonne cervicale

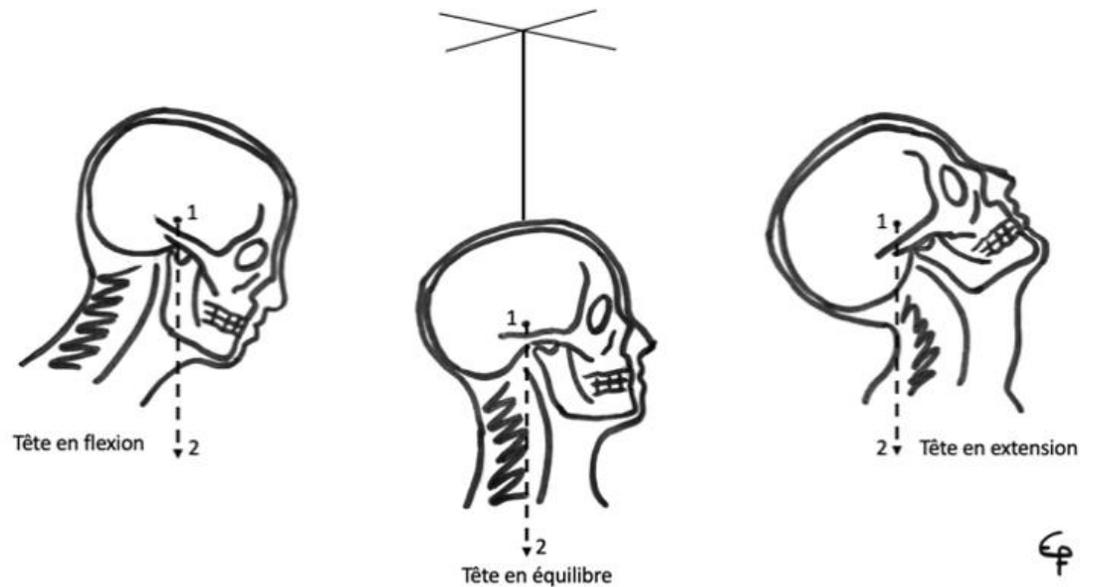
Modalités ventilatoires

Utilisation des résonateurs

Activité
des
muscles
du cou



La position de la tête influence la dynamique laryngée



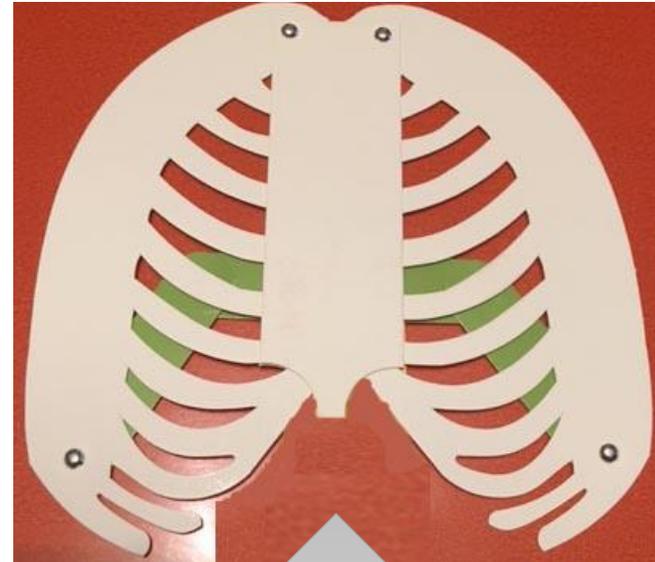


Geste respiratoire

Le diaphragme

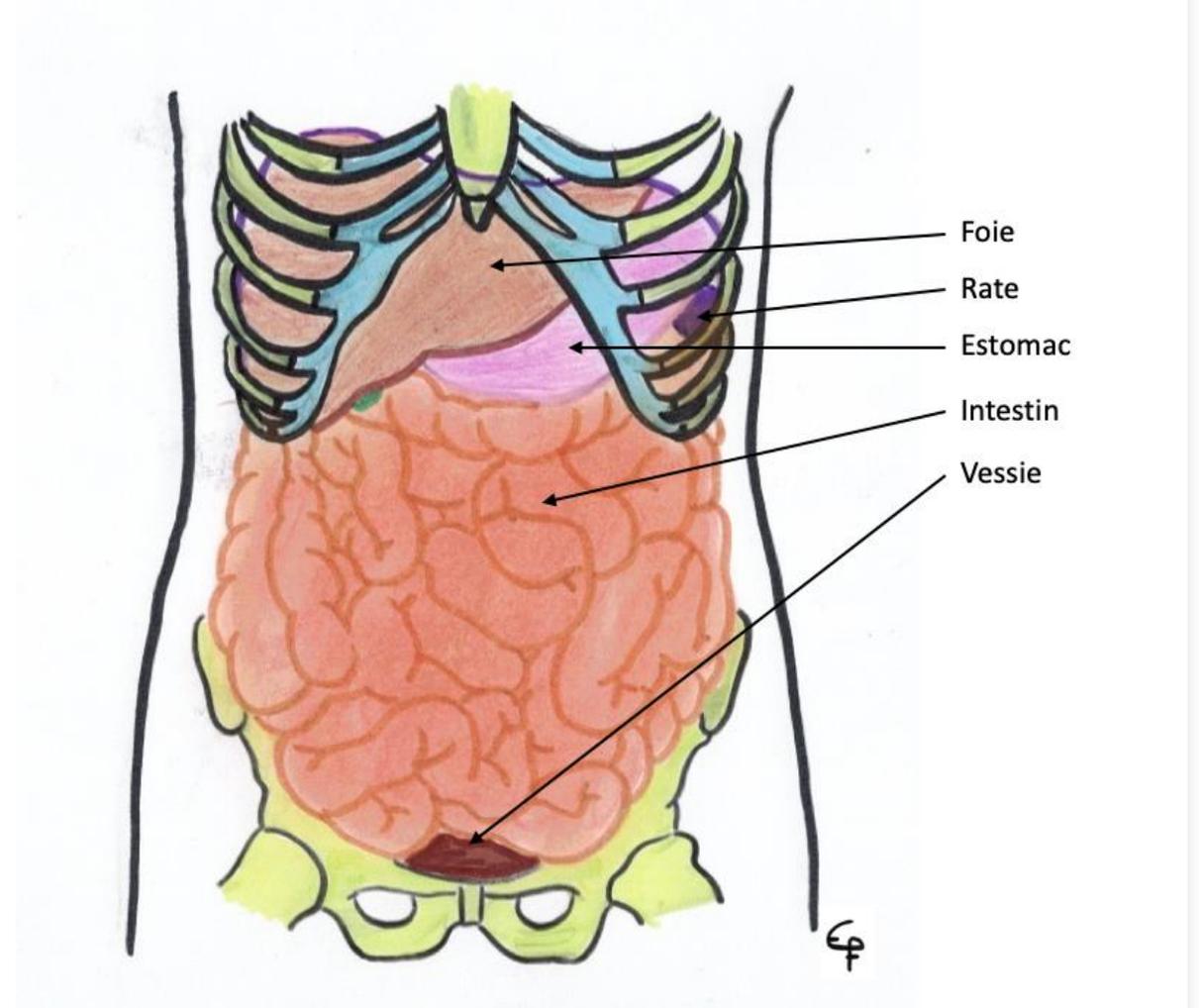


Inspiration:
diaphragme contracté

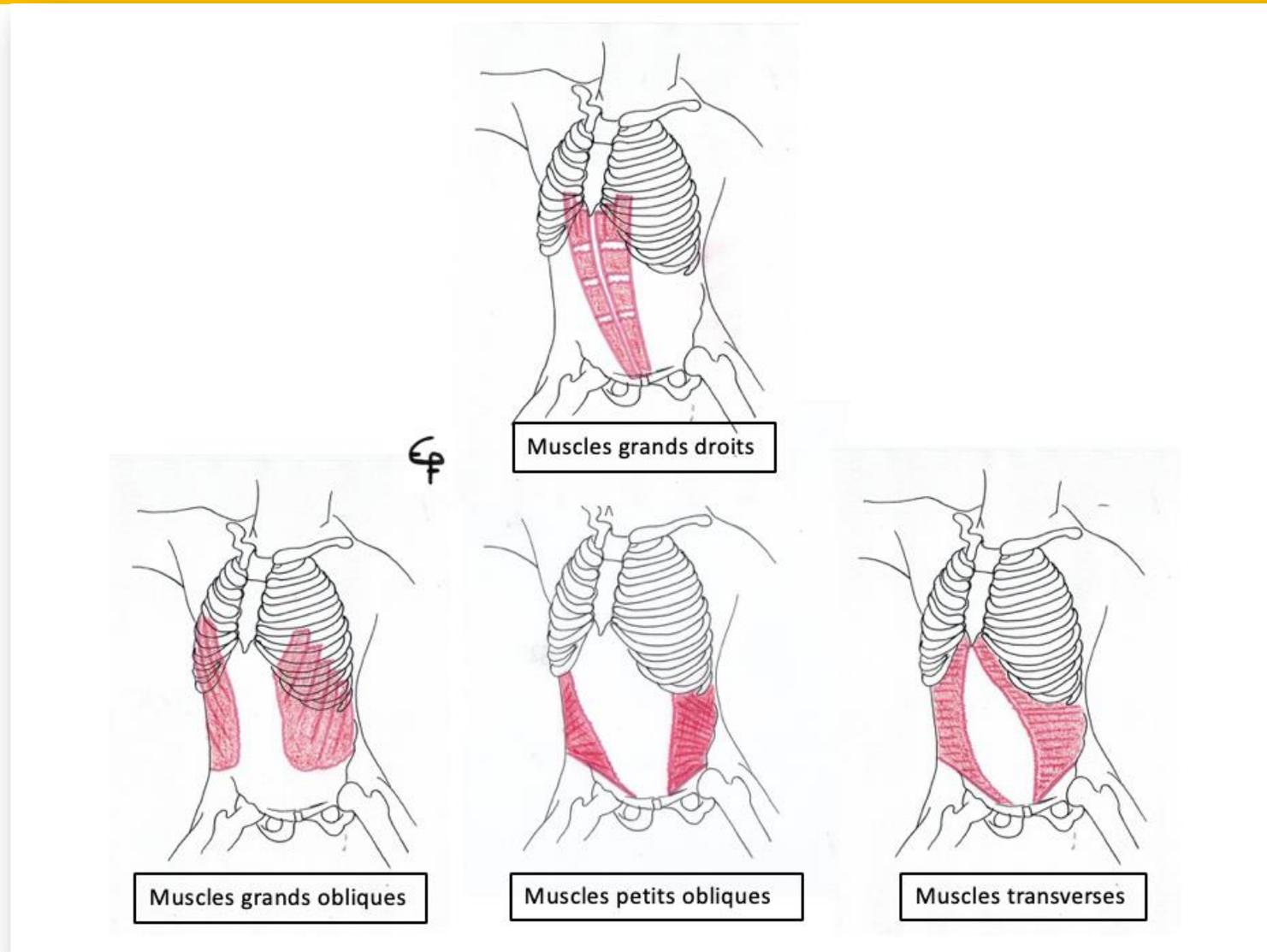


Expiration:
diaphragme relâché

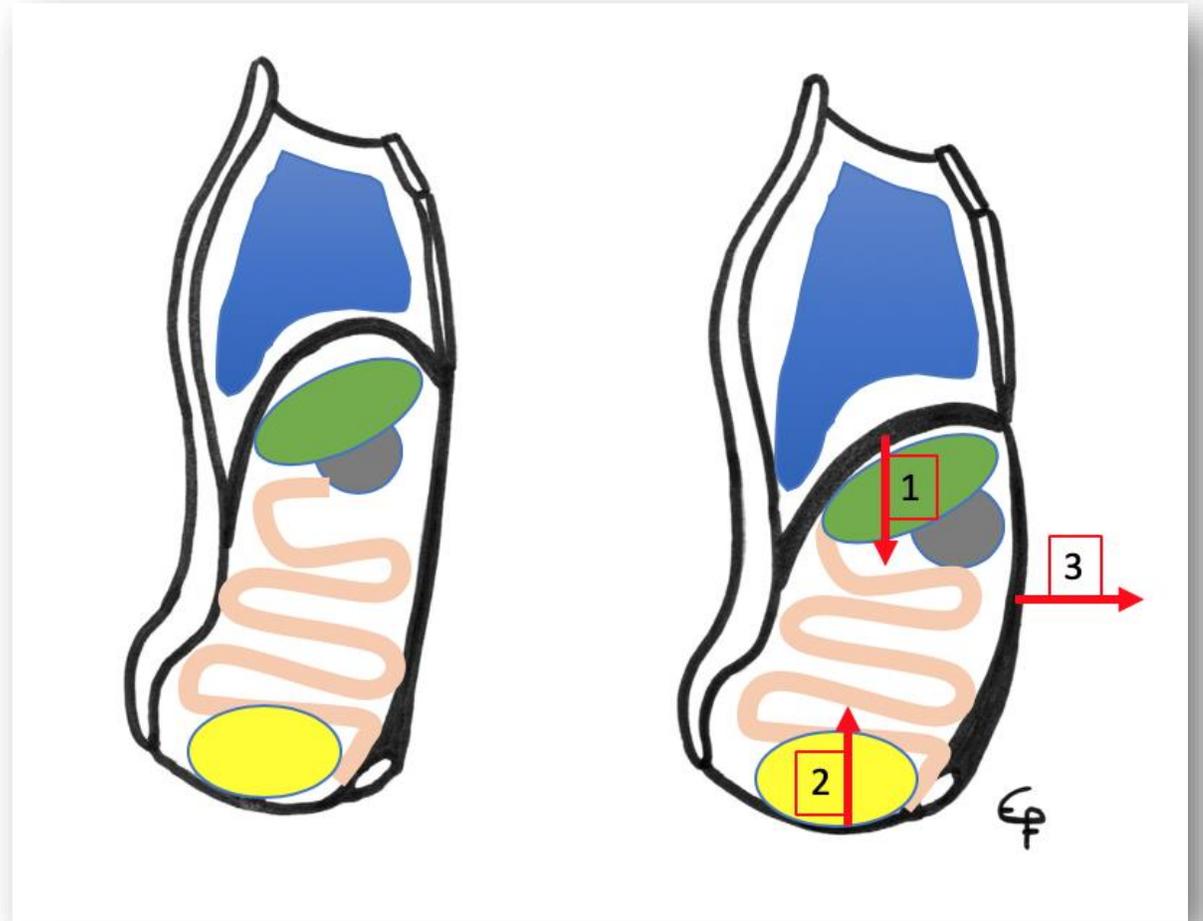
Les rapports du diaphragme



Les muscles de la paroi abdominale



Enceinte périnéo-abdomino-diaphragmatique



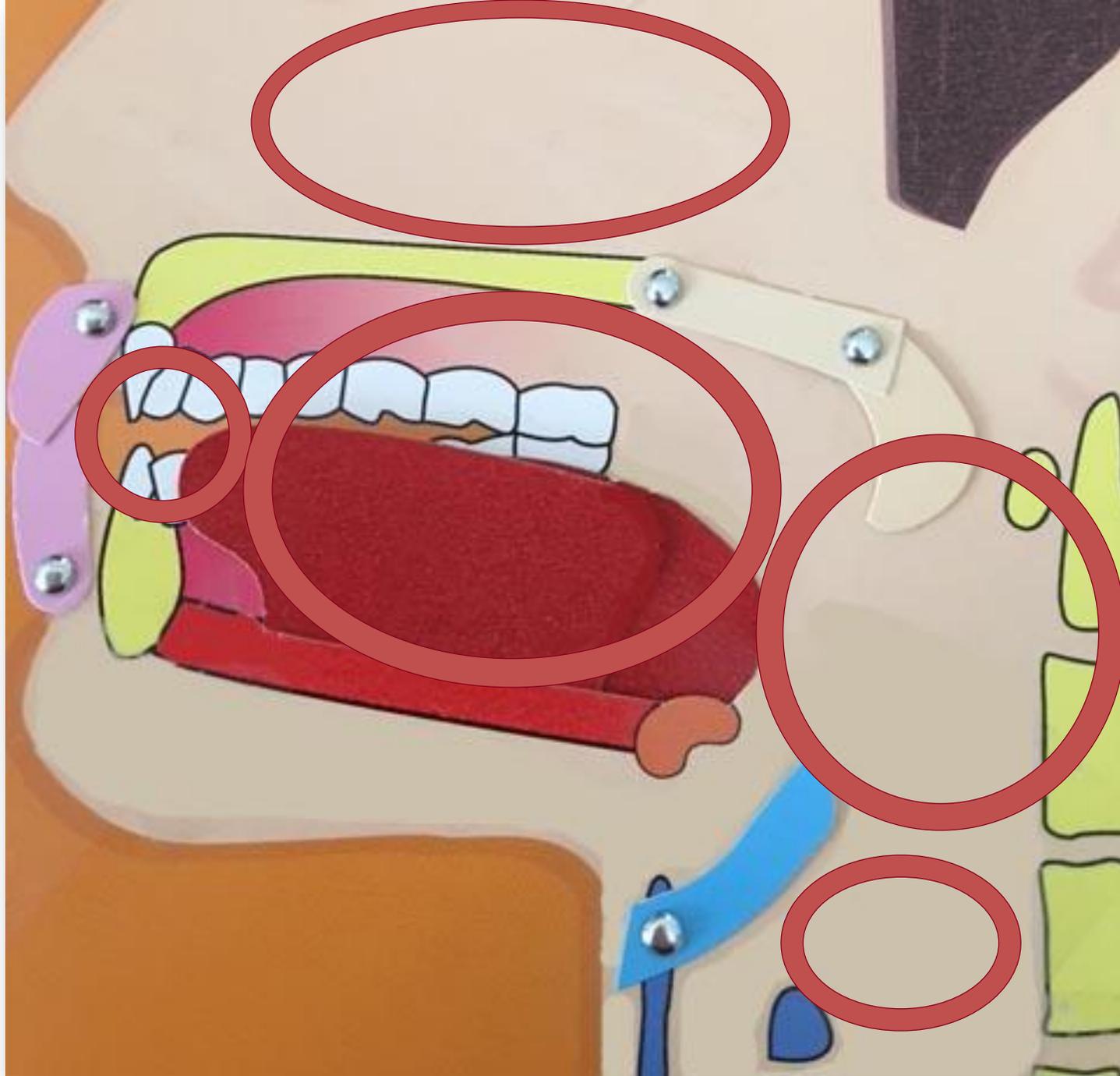
A savoir...

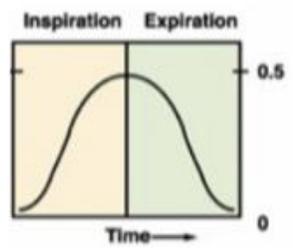
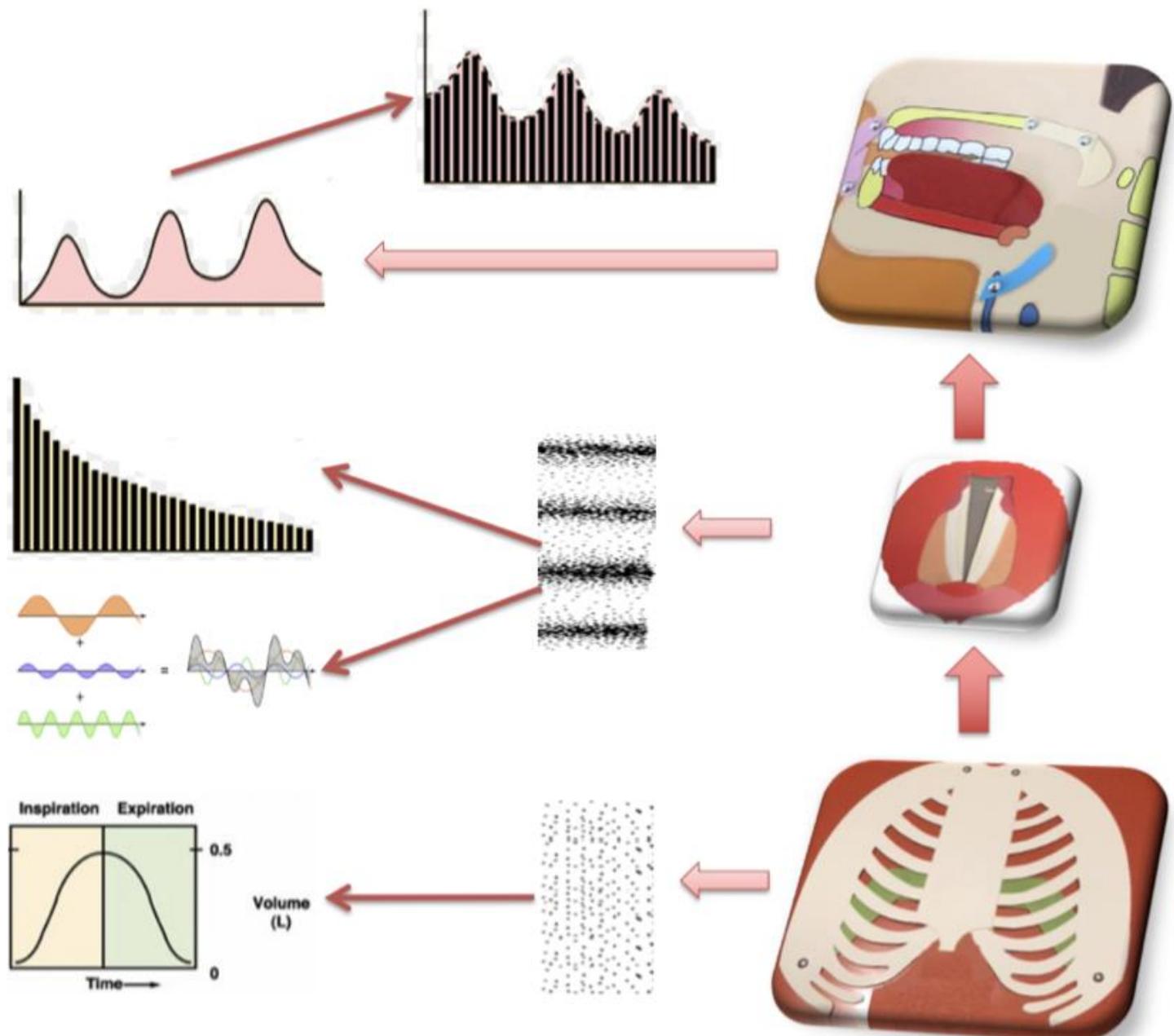
- Le diaphragme est un muscle qu'on ne peut pas « palper » : enfoui dans la profondeur du tronc, il est recouvert par d'autres organes « palpables »
- Nous percevons les conséquences de son activité sur les organes avec lesquels il entre en rapport, mais pas sa contraction
- Le diaphragme a une contraction d'autant plus efficace qu'il est étiré (donc que l'expiration qui précède sa contraction est profonde)
- Le diaphragme est d'autant plus efficace qu'on ventile avec de faibles volumes d'air
- Le diaphragme est d'autant plus efficace qu'on redresse la colonne vertébrale



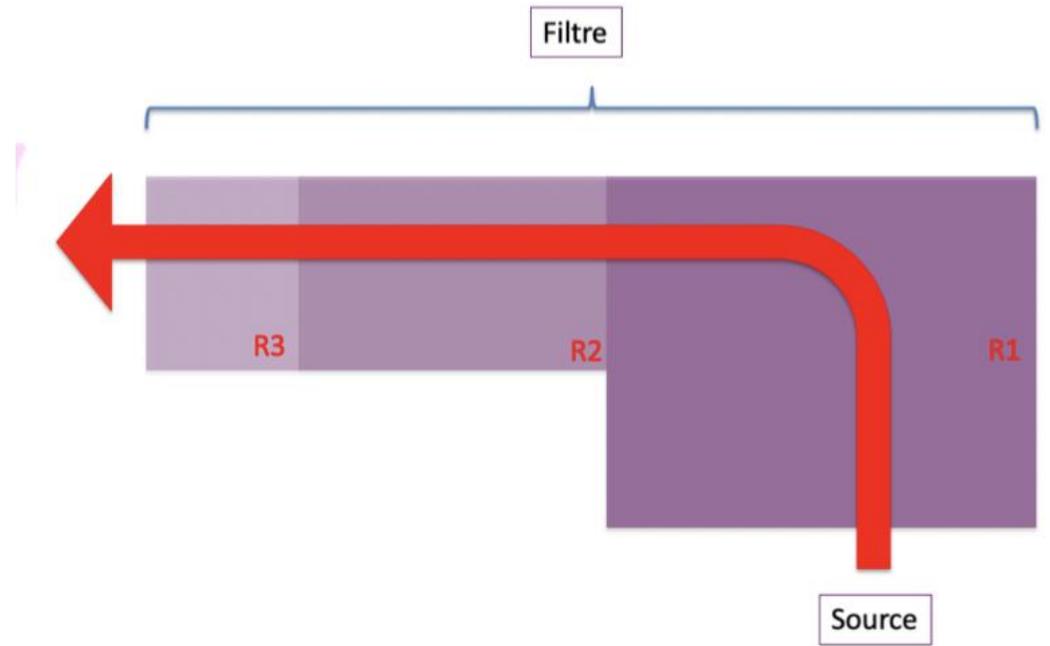
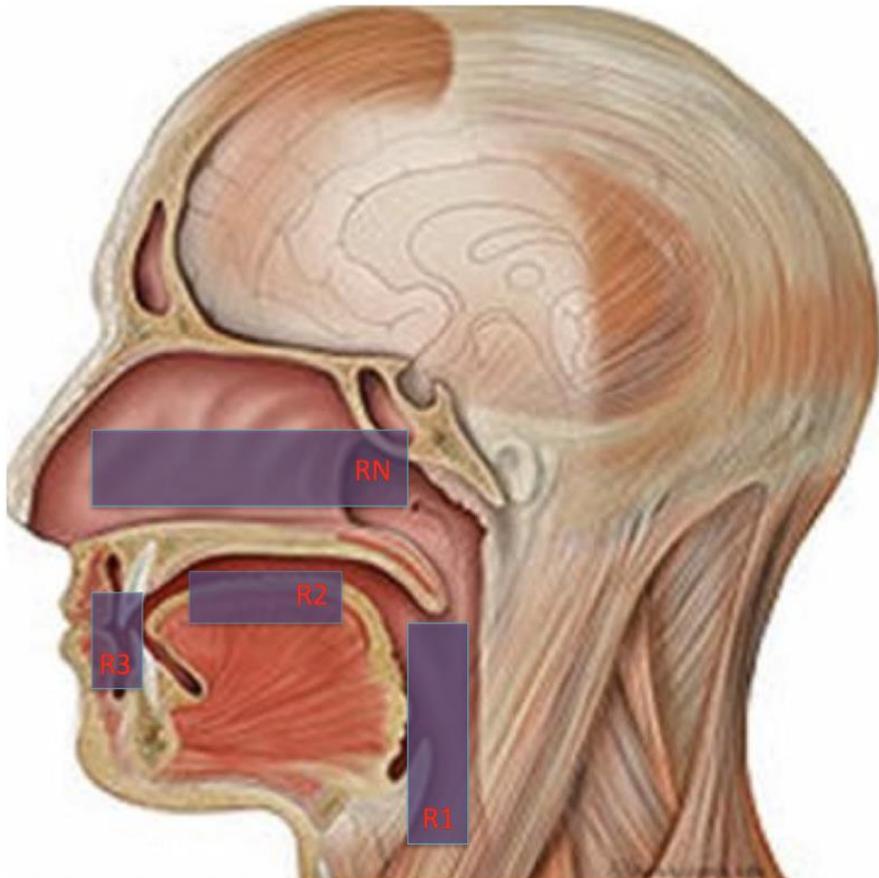
Fonctionnement des résonateurs

The background features a series of horizontal, wavy lines that transition from a bright white glow on the left to a deep blue on the right. These lines are composed of many fine, parallel strands, and the blue sections are filled with numerous small, bright white particles, creating a sense of motion and energy.

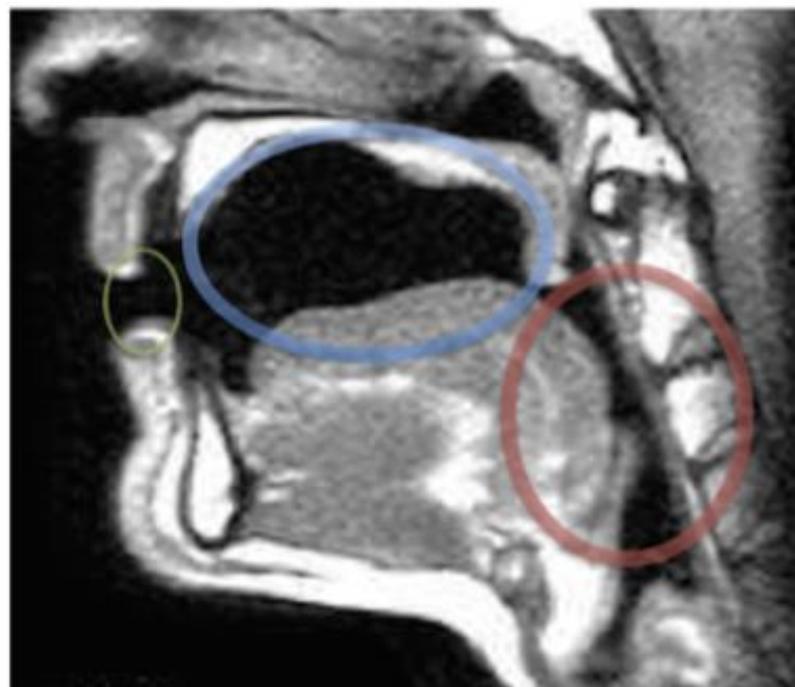
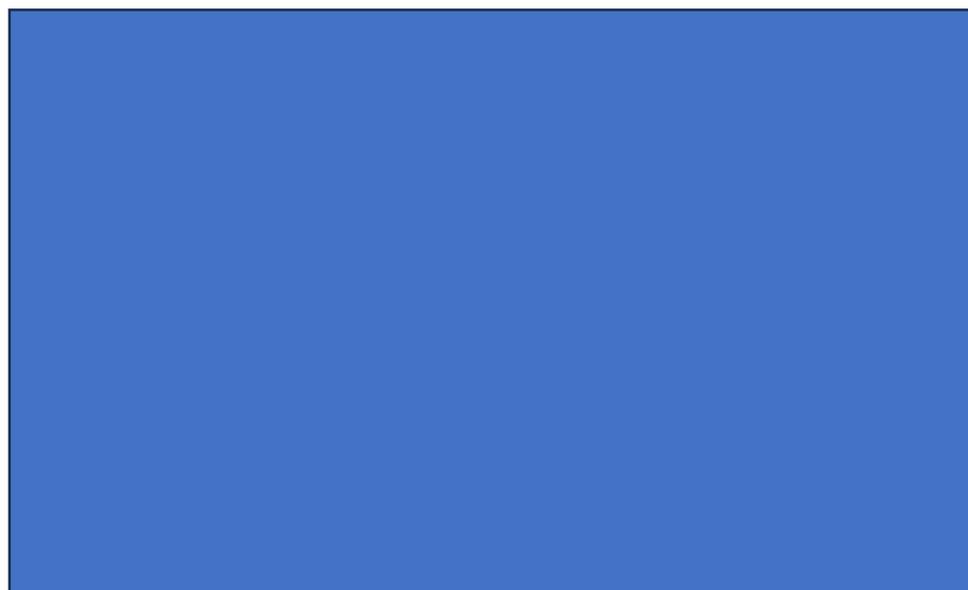




Le timbre vocalique



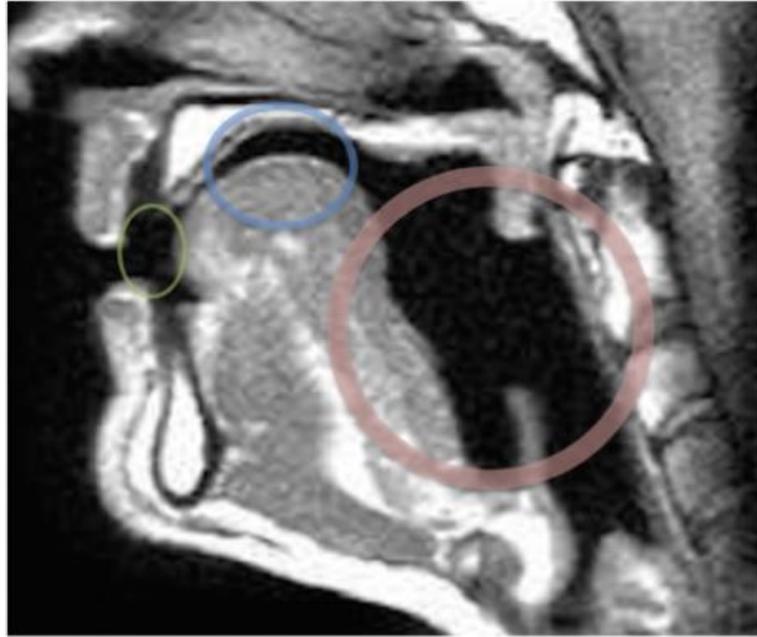
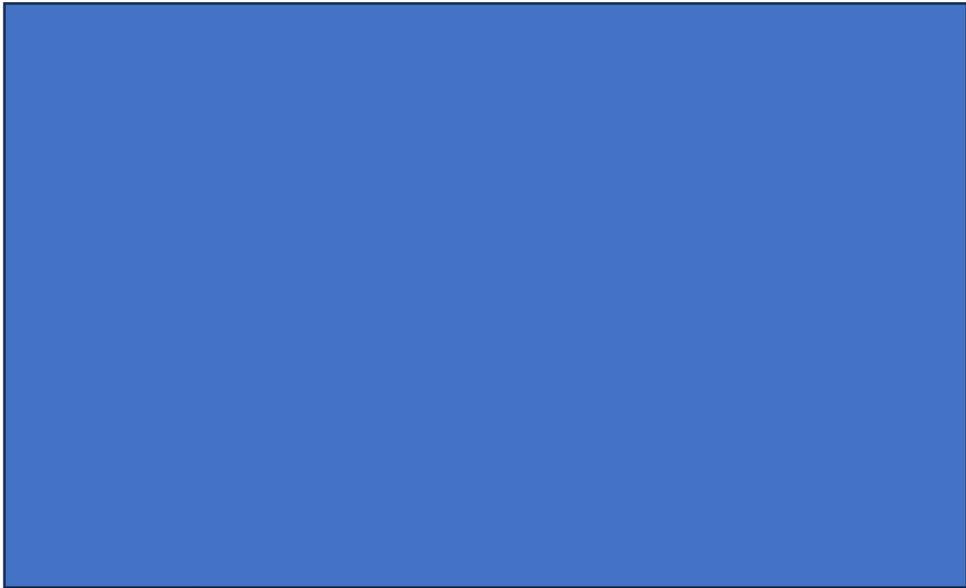
Chaque voyelle se caractérise par un volume particulier de chaque résonateur, auquel correspond un profil de résonance particulier et donc des valeurs particulières des formants.



C
T

- R1 — F1= 800 Hz
- R2 — F2= 1200 Hz
- R3 — F3= 2600 Hz

www.researchgate.net/publication/301111111



N
A

- R1 → F1= 200 Hz
- R2 → F2= 2200 Hz
- R3 → F3= 3200 Hz

Le timbre extra vocalique

- Le timbre extra-vocalique, spécifique de chaque personne, permet la reconnaissance des individus par le contour fréquentiel global de leur voix.
- Il dépend de nombreux facteurs:
 - Taille et forme du tractus vocal
 - Composition de la fourniture laryngée
 - Mode de fonctionnement des résonateurs
 - État des muqueuses de la sphère ORL
 - Influence des modèles acoustiques et psychomoteurs...

Le 4^{ème} formant

- Renforcement énergétique supplémentaire produit par certains orateurs/chanteurs, permettant la portée de la voix
- Ce "formant du chanteur" (ou « Shimmer », « Ring », « Singing Formant ») est situé aux alentours de 3000 Hz (zone de sensibilité auditive maximale)
- On ne sait pas encore actuellement où est le siège de cette résonance particulière. Certains auteurs pensent que ce phénomène acoustique est lié :
 - aux sinus piriformes (et notamment à leur dilatation dans le chant)
 - au ventricule de Mogagni
 - au rapport de taille entre les différents résonateurs du conduit vocal...

Les adaptations phono- résonantielles

- La vibration des CV produit une série harmonique de fréquences, dont certaines sont amplifiées par les résonances du conduit vocal
- Les fréquences harmoniques qui ne se trouvent pas à proximité d'une fréquence de résonance du conduit vocal vont être atténuées, et elles ne rayonneront pas de façon efficace vers le milieu extérieur.
- Pour produire sa voix avec des caractéristiques particulières (hauteur, intensité, timbre, esthétique...) le chanteur doit trouver un équilibre entre la vibration laryngée, la propagation du son dans les cavités de résonance, son rayonnement vers le milieu extérieur et les auditeurs potentiels...
- Pour cela, il réalise un accord phono-résonantiel, notamment entre les deux premières résonances du conduit vocal, R1 et R2 , et les fréquences des premiers harmoniques (F0, H1 ...)

Au final...

- Peut-on maîtriser sa voix sans rien connaître du fonctionnement de l'appareil phonatoire ?
- Tout connaître du fonctionnement de l'appareil phonatoire est-il la promesse d'une voix performante ?
- C'est lorsque le projet vocal n'est pas à la hauteur de nos espérances que le besoin de connaissances et de contrôle se fait jour...

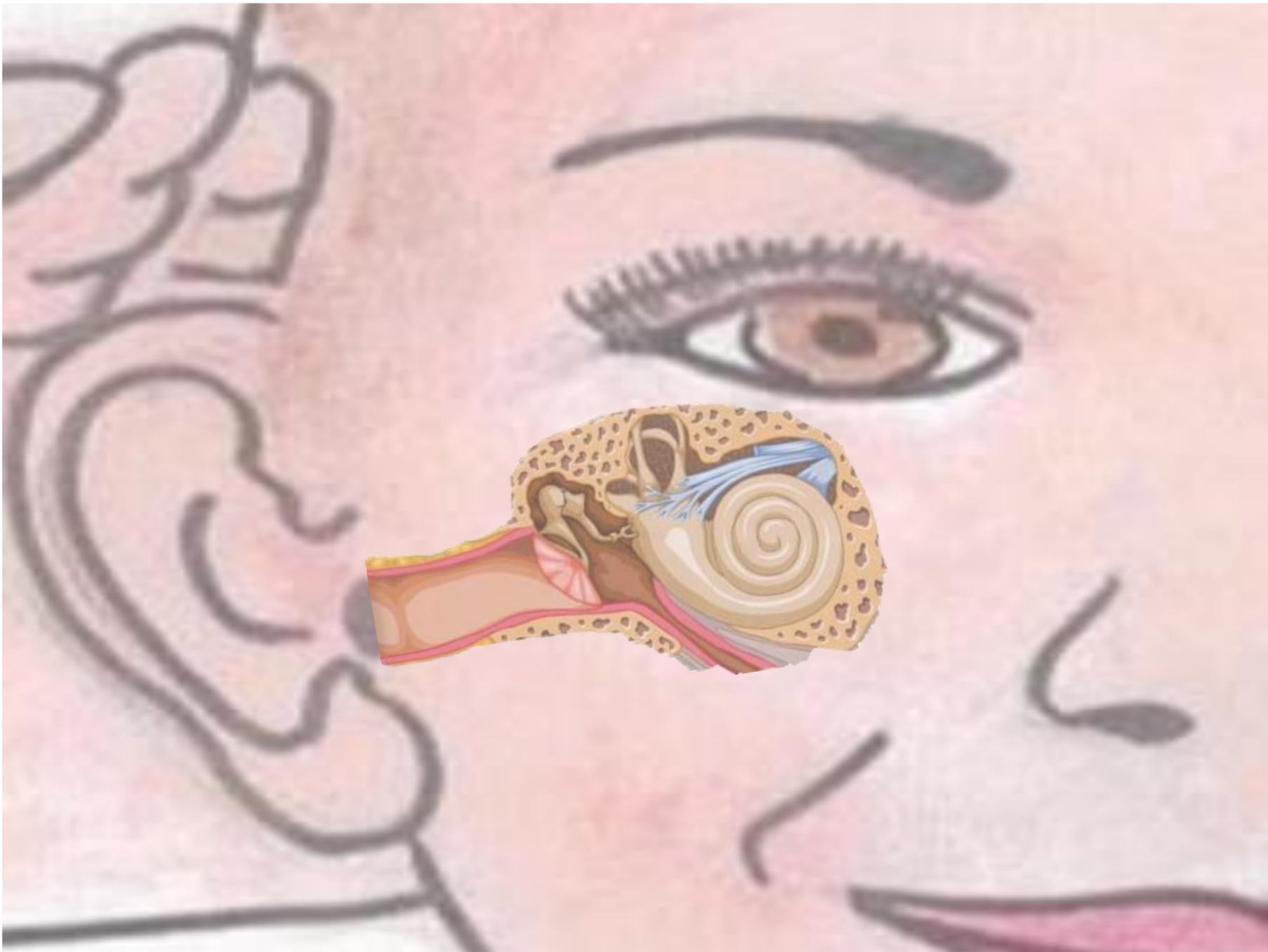
Mais comment contrôle-t-on notre voix ?

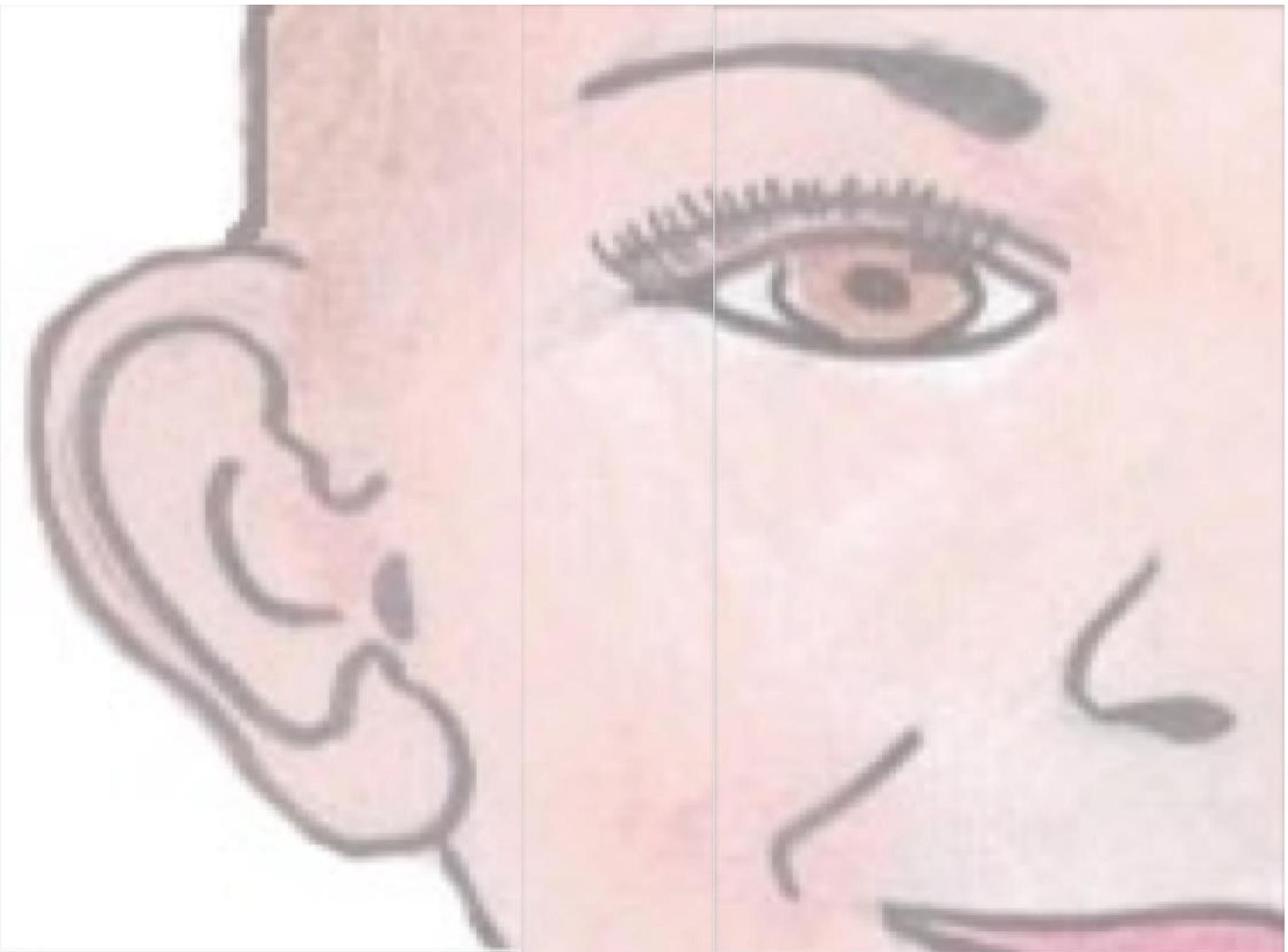
Entendre, comment ça marche ?

- L'oreille: un appareil de réception et de transformation des sons, depuis l'espace qui nous entoure vers le cerveau...
- Entendre : capter des phénomènes mécaniques (vibrations) et les transformer en impulsions électriques que le cerveau peut interpréter





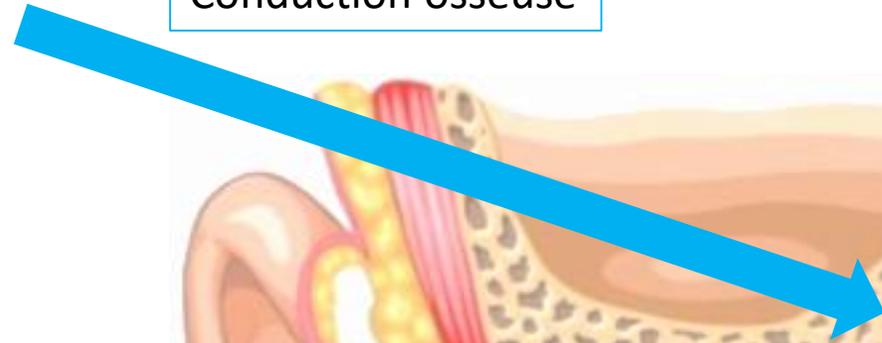




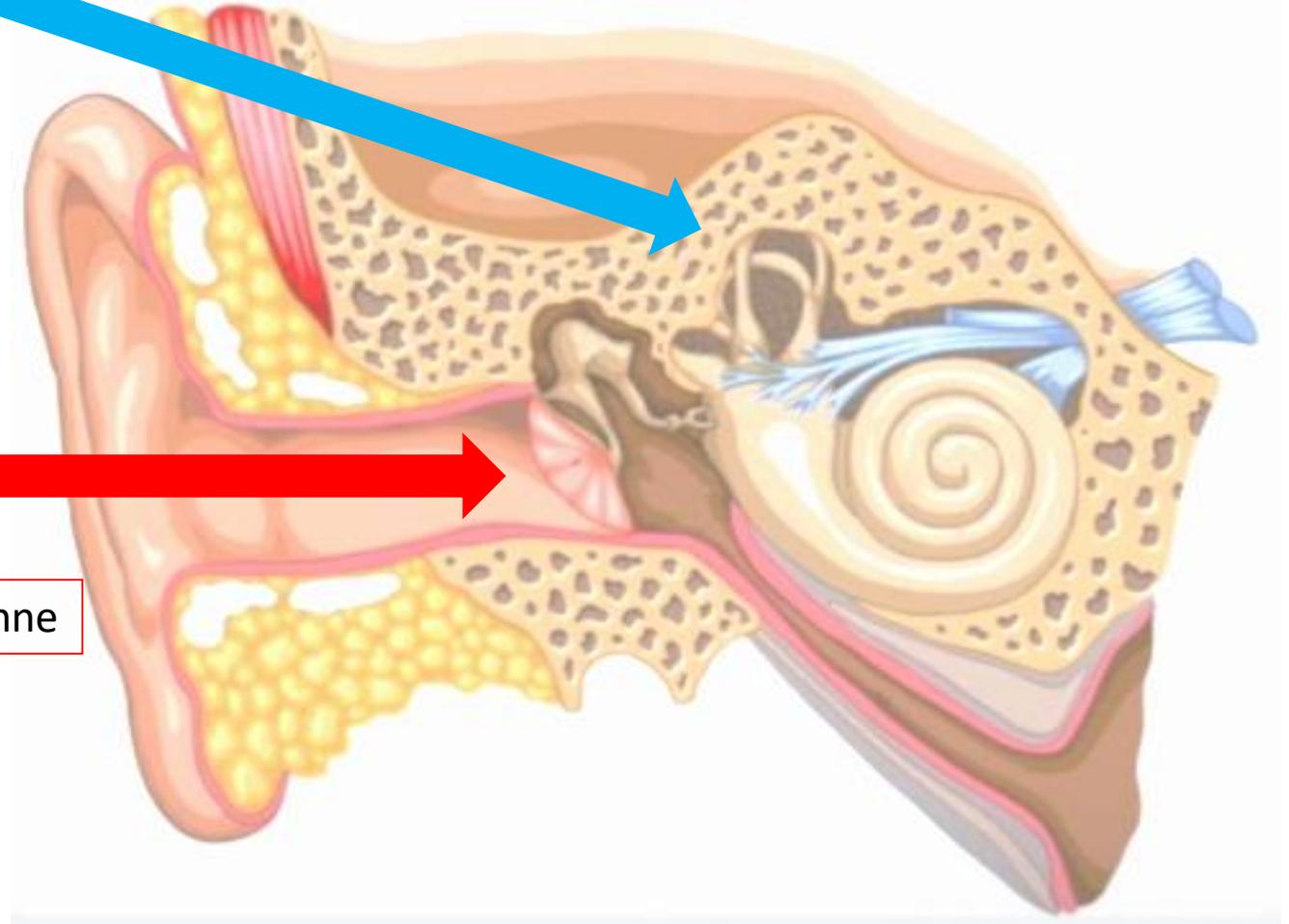




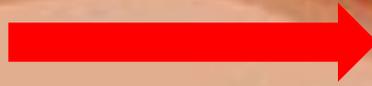
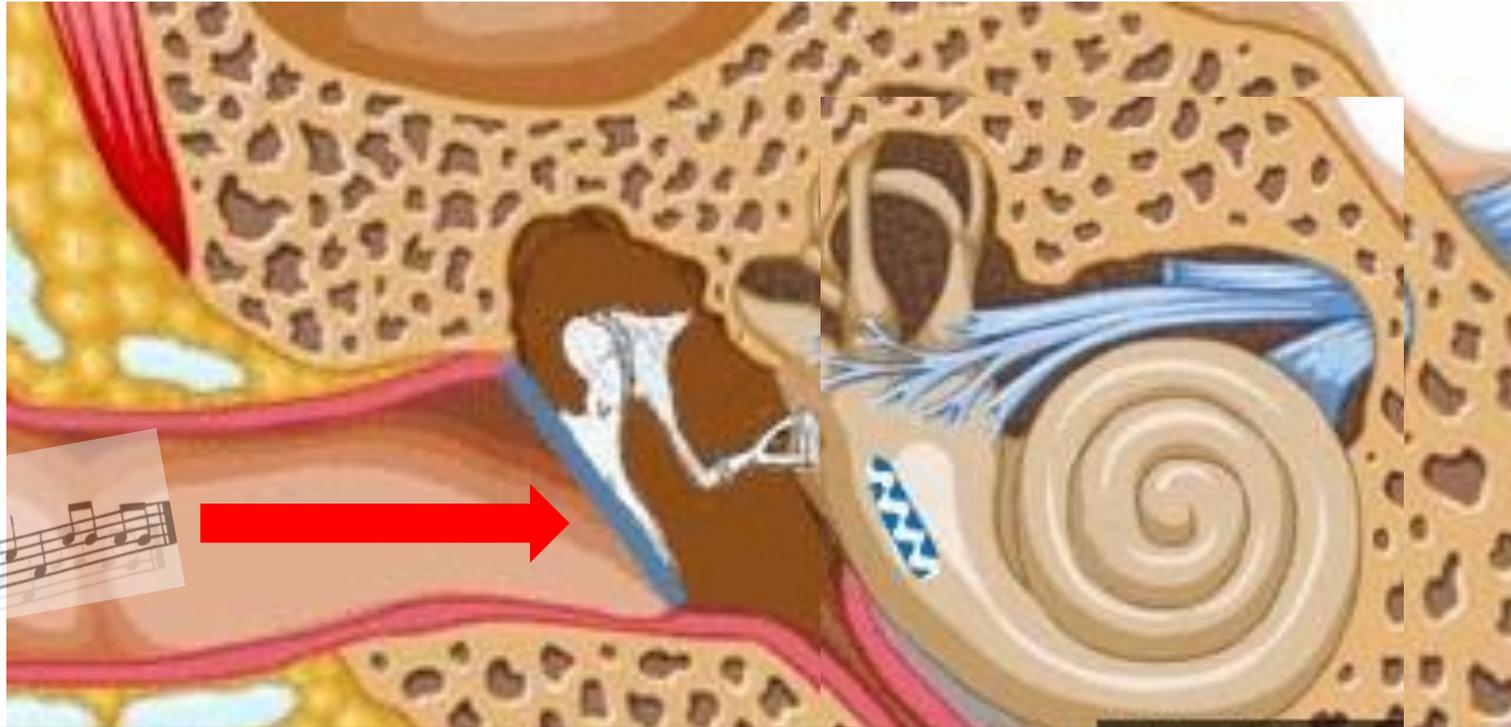
Conduction osseuse



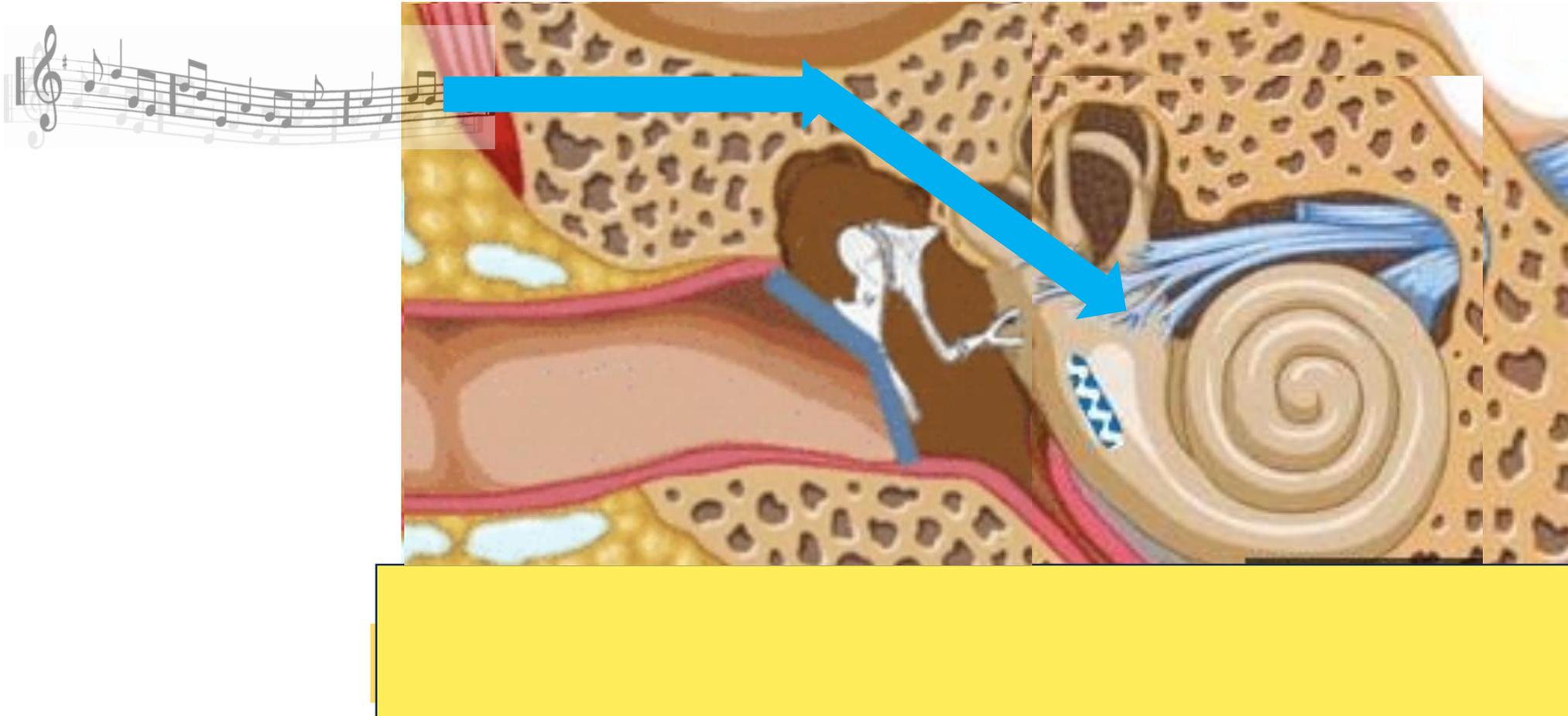
Conduction aérienne



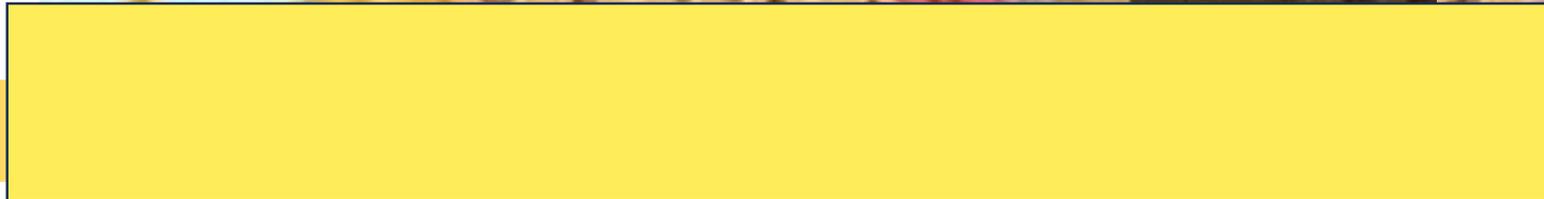
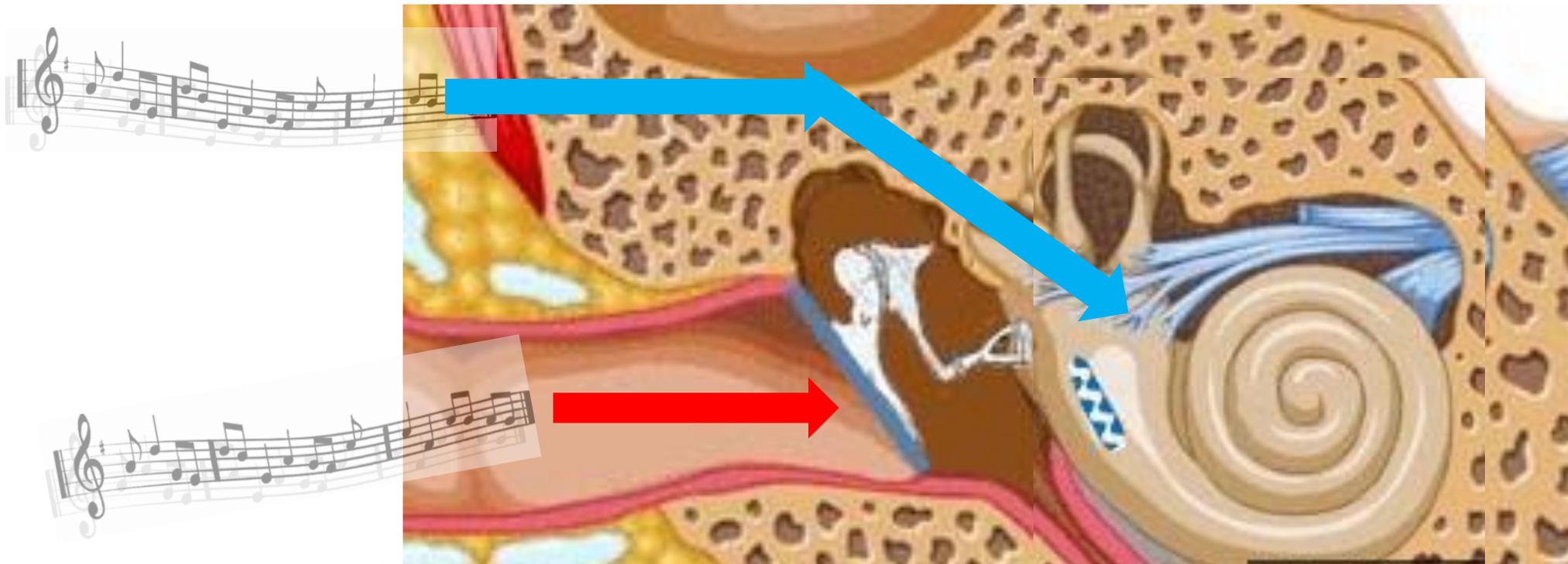
CONDUCTION AERIENNE



CONDUCTION OSSEUSE



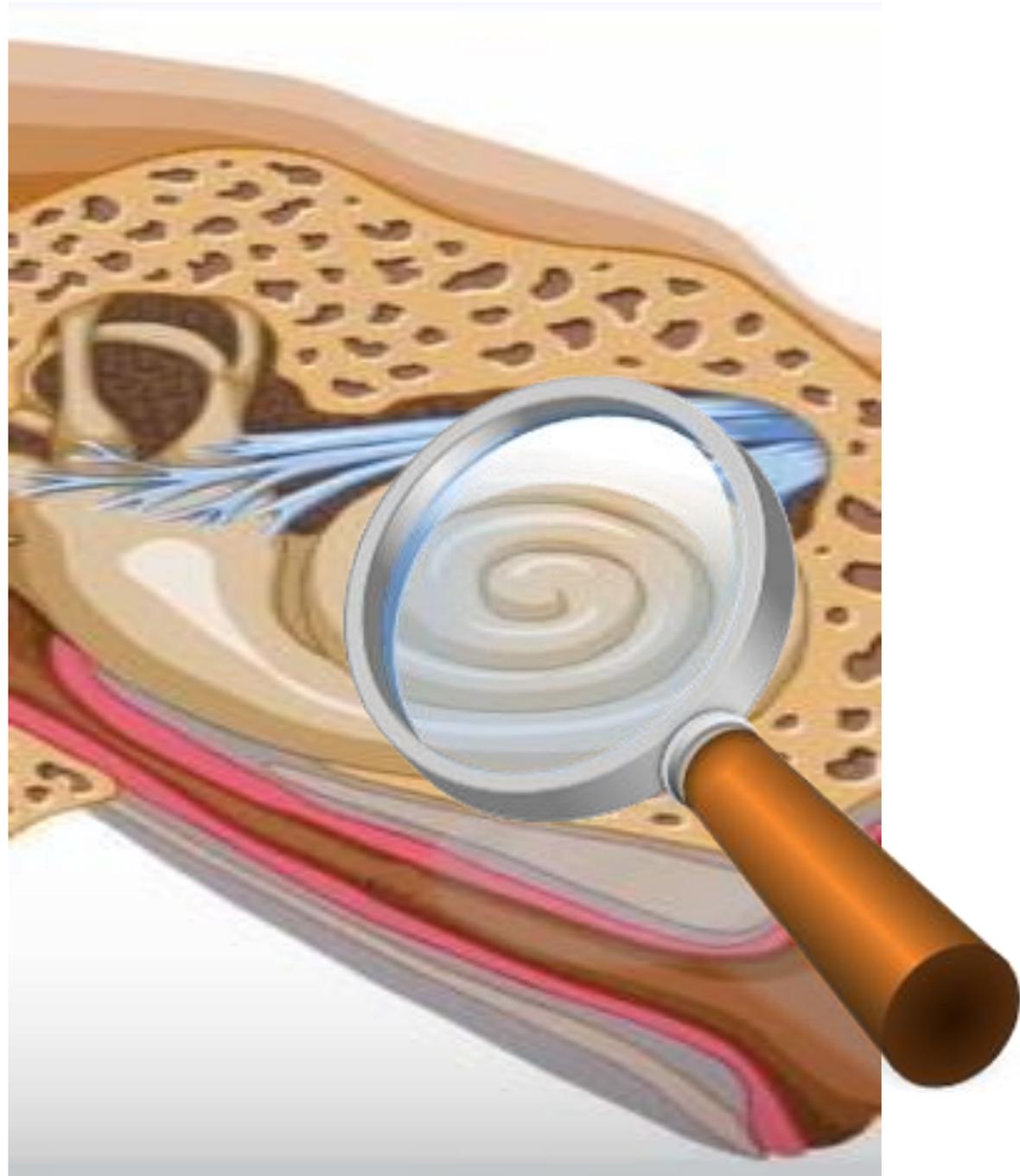
CONDUCTION AERIENNE ET OSSEUSE



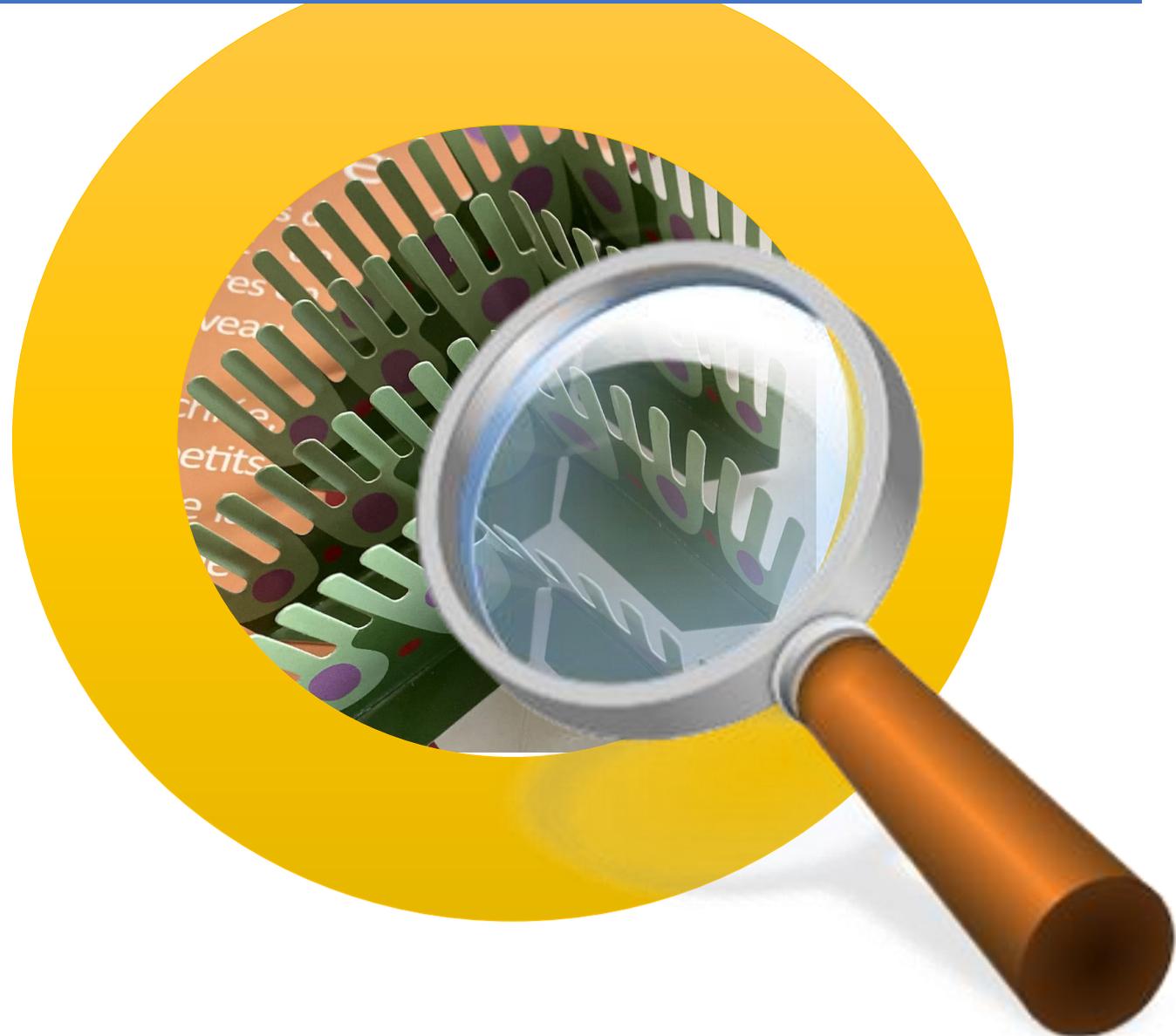
Entendre par voie osseuse

- La conduction osseuse est un processus naturel de transmission des ondes acoustiques vers l'oreille interne par l'intermédiaire des tissus osseux et cartilagineux du corps
- Pour l'audition des sons en provenance de l'environnement, la conduction des sons par voie osseuse ne joue pratiquement aucun rôle, car l'énergie arrivant à l'oreille interne par cette voie est d'environ 50 dB inférieure à celle apportée par la voix aérienne
- Mais pour l'audition des sons produits par notre corps et notamment à proximité du système auditif, la conduction des sons par voie osseuse prend de l'importance

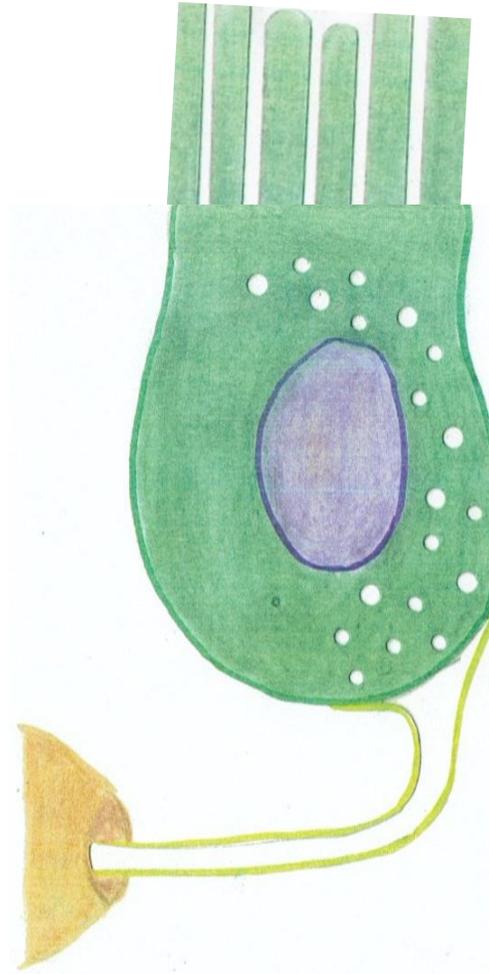


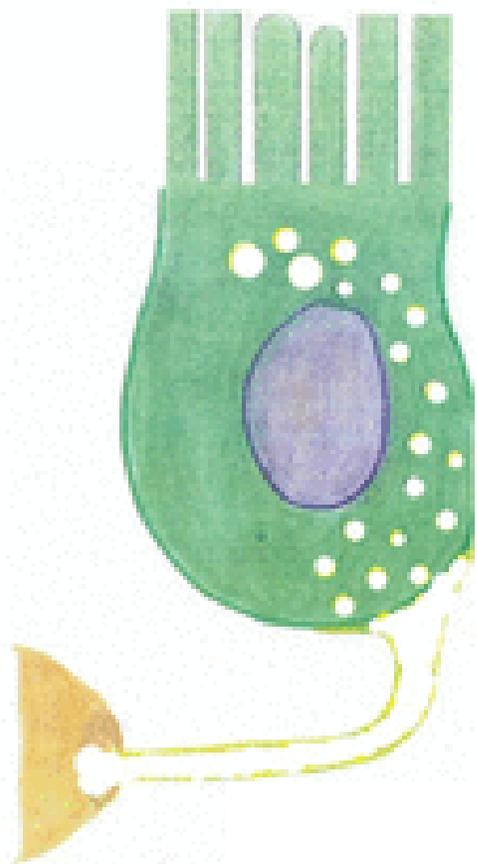


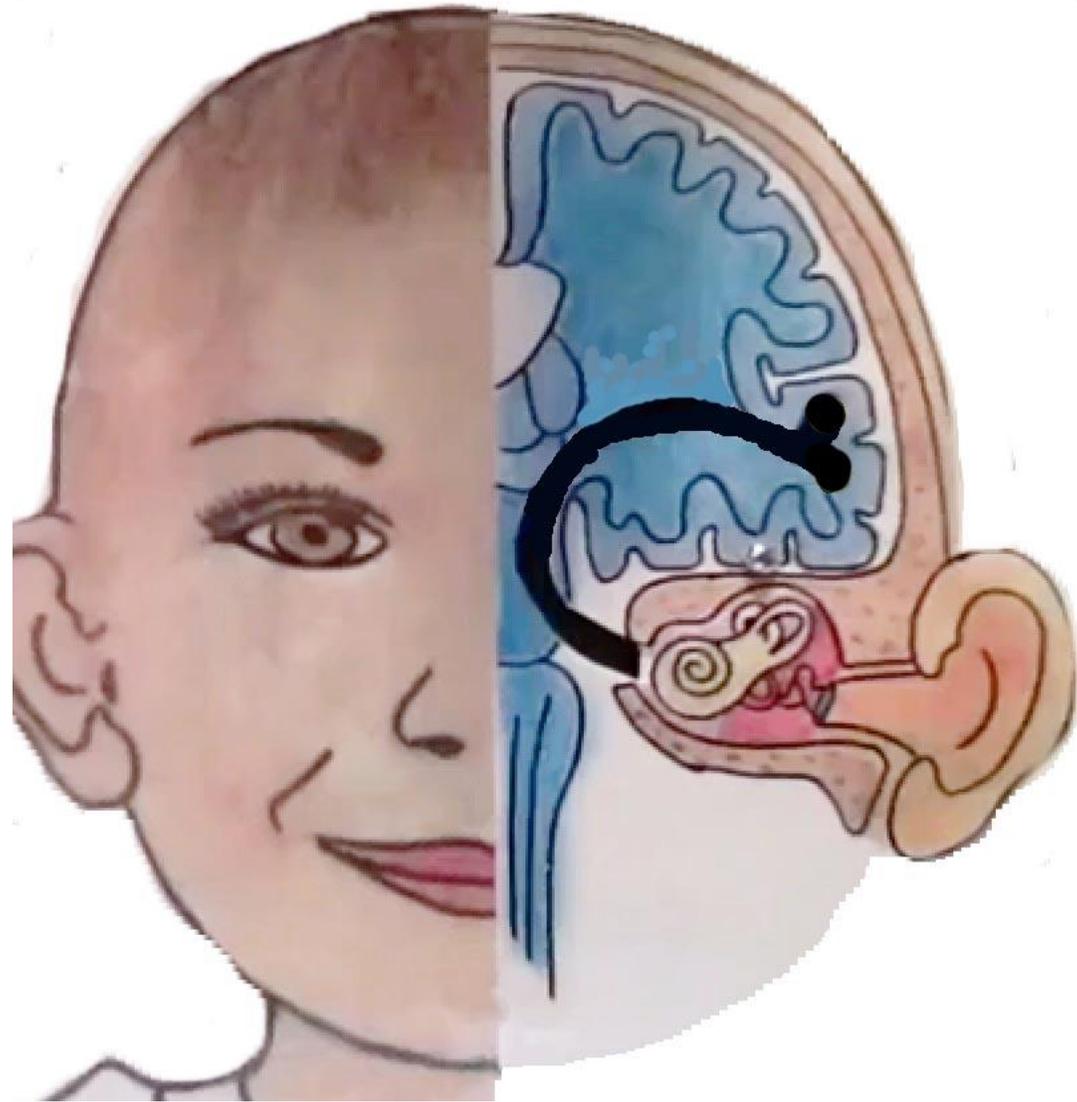
LES CELLULES CILIÉES

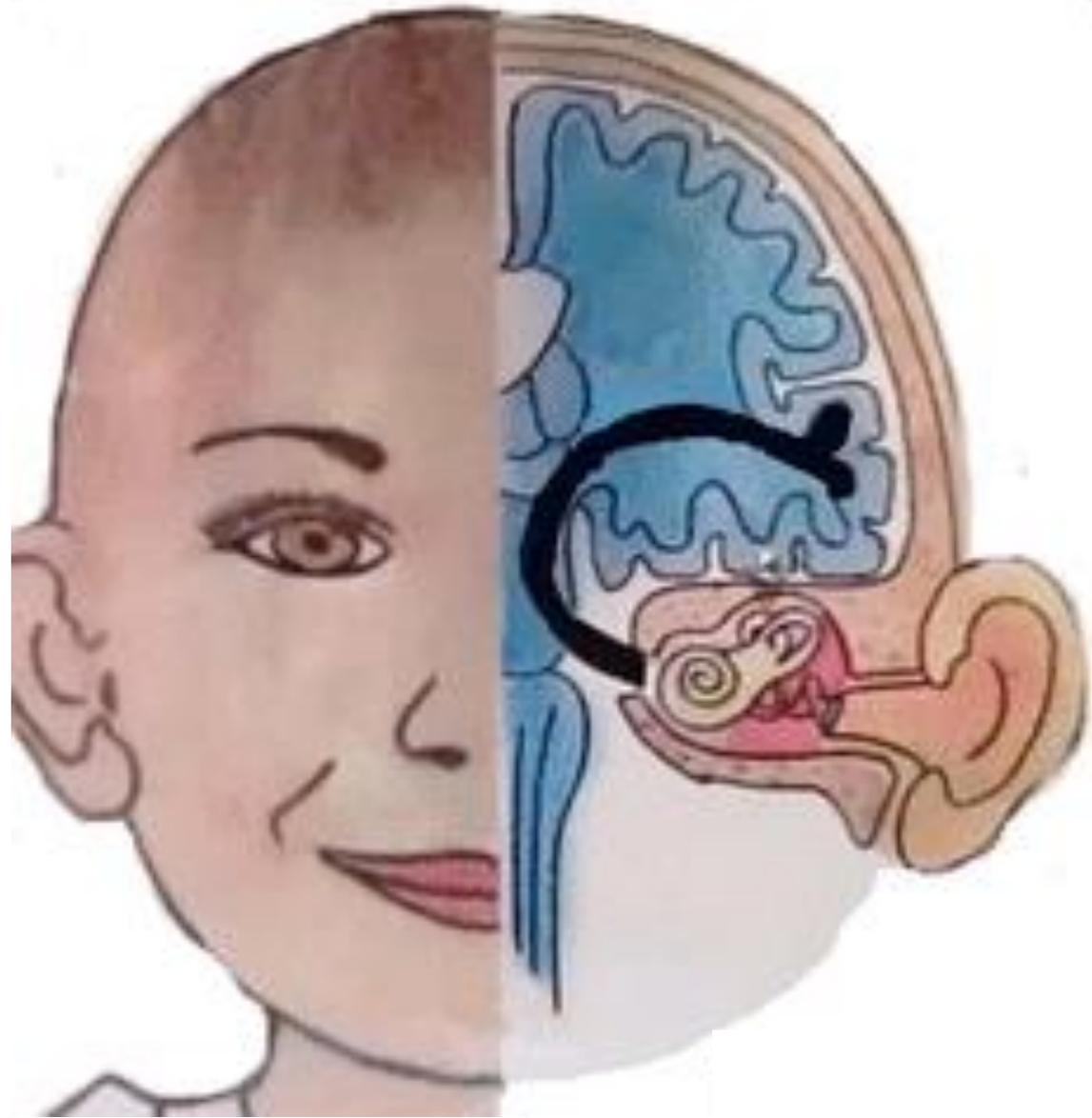


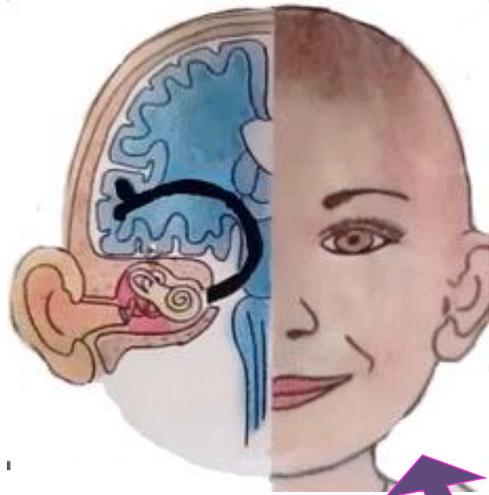
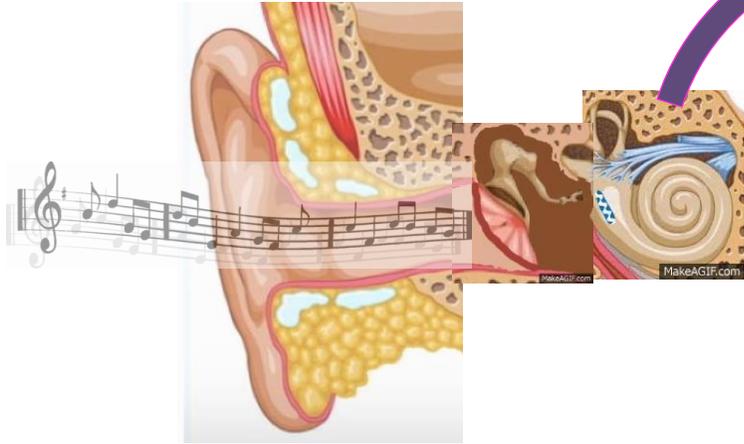
LA CELLULE CILIÉE INTERNE









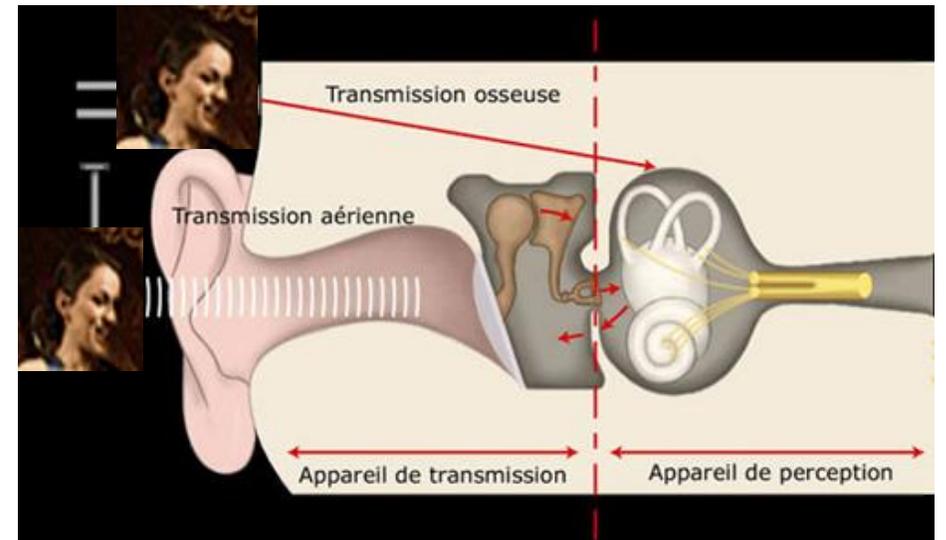




Comment entend-on la voix ?

Comment entend-on la voix des autres ?

- Voix : phénomène sonore projeté dans l'environnement
- Perception par voie aérienne : la voix est transmise à l'oreille interne par voie aérienne
- Perception par voie osseuse : la voix est transmise à l'oreille interne par voie osseuse (mais négligeable car 50 dB de moins que la voie aérienne)



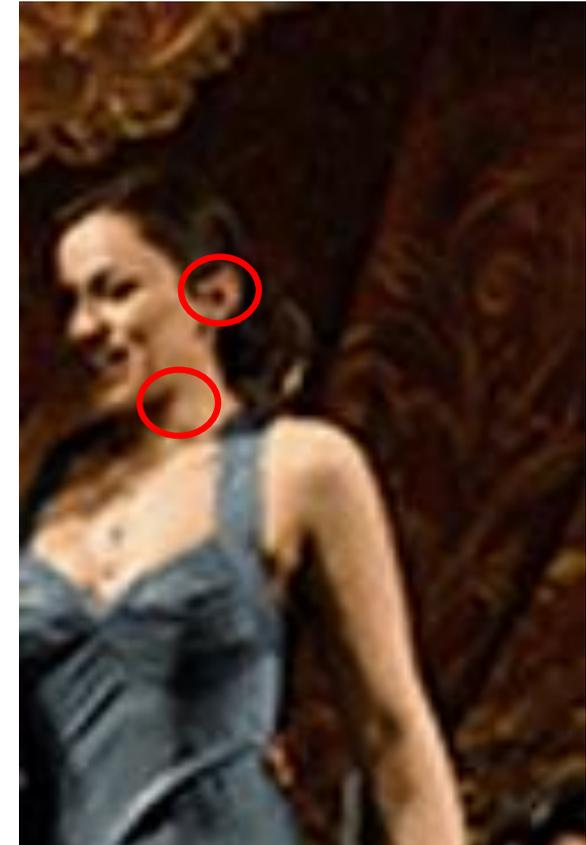


La voix des autres: voix « aérienne »

- La voix, onde sonore, naît de la vibration des CV
- Elle est modifiée par les résonateurs, puis projetée hors du corps du locuteur
- Elle est modifiée par les caractéristiques acoustiques du lieu dans laquelle elle est produite : certaines harmoniques sont renforcées, d'autres atténuées
- Puis elle parvient à l'oreille de l'auditeur qui la perçoit par voie aérienne uniquement

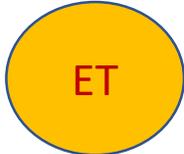
Comment entend-on notre propre voix ?

- Voix : perçue à la fois par voie aérienne et par voie osseuse
- La voix aérienne : onde sonore née de la vibration des CV est projetée hors du corps après son passage au travers des résonateurs (« voix externalisée »), puis est transmise à l'oreille interne par voie aérienne
- La voix solidienne : les vibrations produites par l'appareil phonatoire sont directement transmises à l'oreille interne par voie osseuse
- L'intensité de la perception de notre propre voix par voie osseuse et celle par voie aérienne sont du même ordre de grandeur





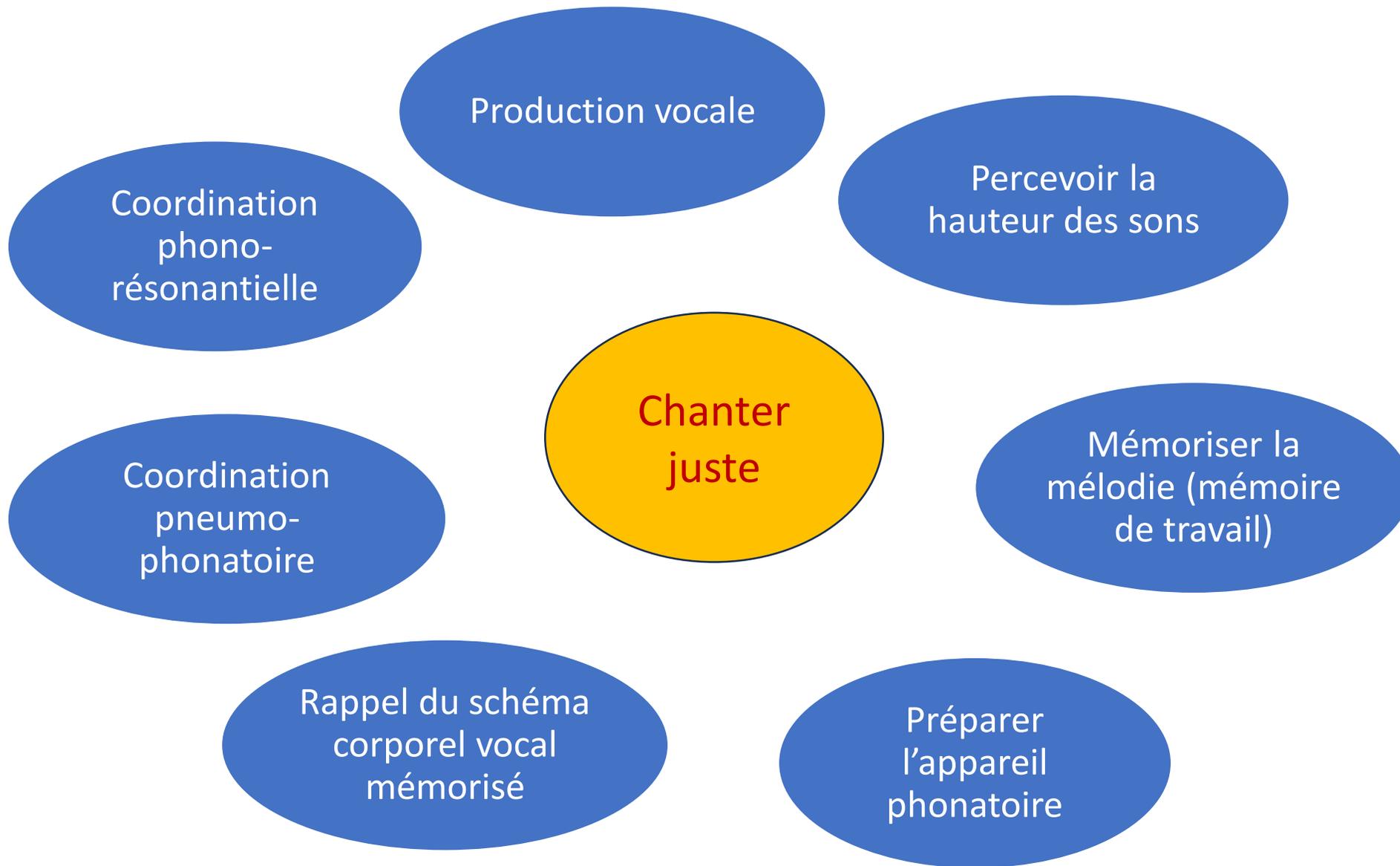
Comment entend-on notre propre voix ?

- Par conduction osseuse ou solidienne
 - La conduction osseuse favorise la transmission des fréquences graves
 - Le timbre de la voix solidienne ou voix osseuse est très riche en fréquences graves
-  ET
- Par conduction aérienne
 - Comme tous les autres signaux acoustiques
 - Lorsqu'on entend notre voix sur un enregistrement, nous sommes surpris du caractère aigu de notre voix

Notre propre voix : à la fois étrangère et familière

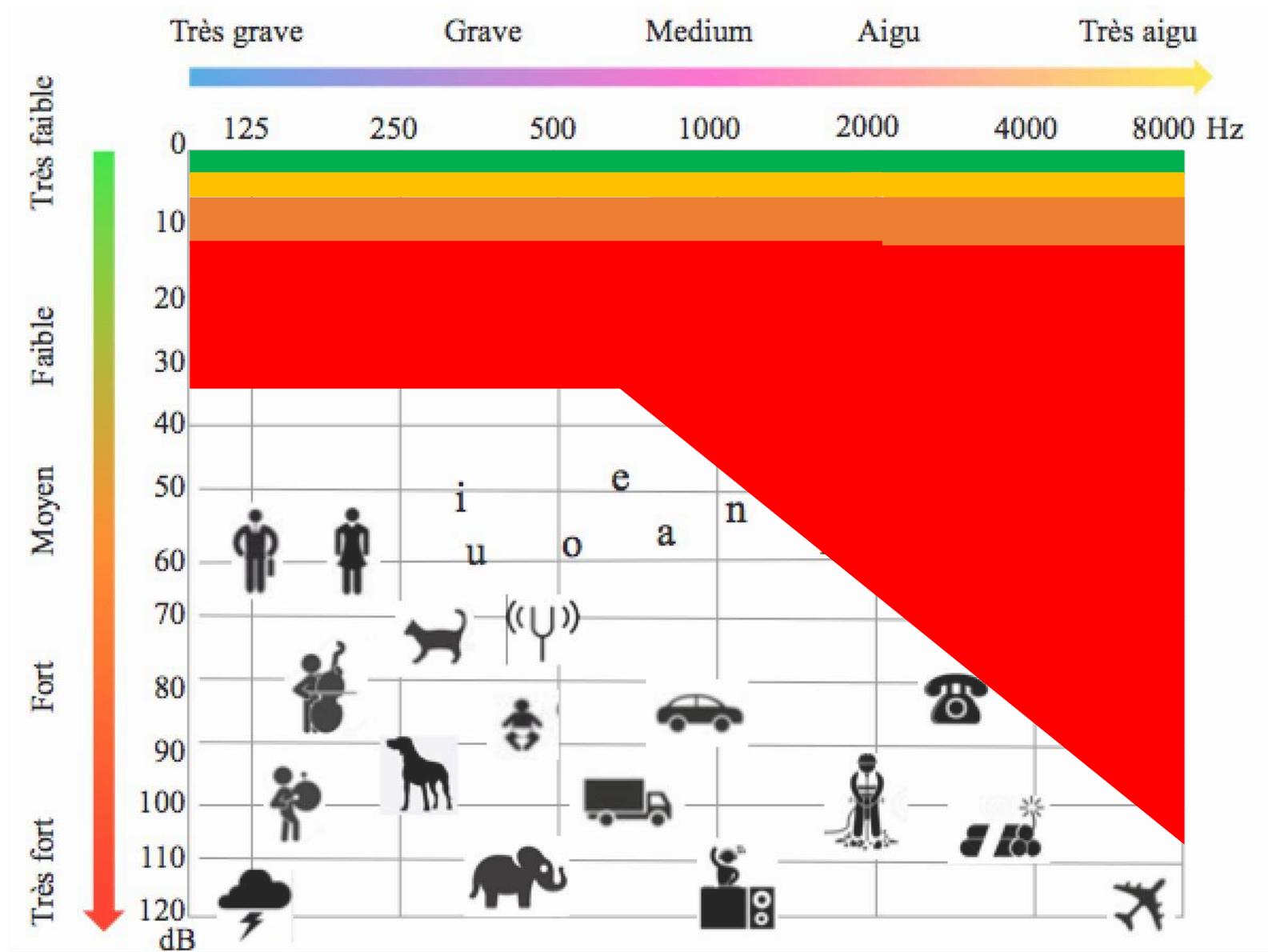
- Lorsque nous entendons un enregistrement de notre propre voix, cette expérience acoustique est très différente de celle que nous faisons au moment où nous parlons
- Dans les années 1960, une étude* a permis de dégager 5 phases dans le processus d'écoute de sa propre voix :
 - Le sujet perçoit un écart entre ce qu'il a entendu et ce qu'il s'attendait à entendre
 - Cet écart s'accompagne d'une réaction affective le plus souvent négative (« ce n'est pas moi! »)
 - Les caractéristiques acoustiques de sa voix lui semblent anormales ou singulières (« elle est trop aiguë! »)
 - L'étrangeté est ressentie comme un conflit personnel (« c'est la voix de ma mère...»)
 - Le sujet accepte progressivement la voix et rapidement le conflit ressenti s'amenuise
- L'interprétation des auteurs est que la perception de sa propre voix est une expérience perturbatrice qui génère un sentiment troublant d'étrangeté
- La confrontation à sa voix aérienne amène le sujet à prendre conscience d' aspects inconnus de sa propre voix
- Il faut se familiariser avec sa voix aérienne !

* *Holzman and Rousey 1966*



Le vieillissement auditif: conséquences pour la perception de la parole

- Le vieillissement auditif est physiologique, mais variable selon les personnes
- La perte de la capacité à entendre des sons faibles domine sur les fréquences aiguës, alors que les sons graves sont longtemps préservés
- La personne presbycousique entend parfaitement les sons graves (les voyelles), mais ne perçoit plus certains éléments phonétiques aigus (les consonnes) : ce déséquilibre entraîne des difficultés de compréhension du message verbal



V_CH_



VACHE

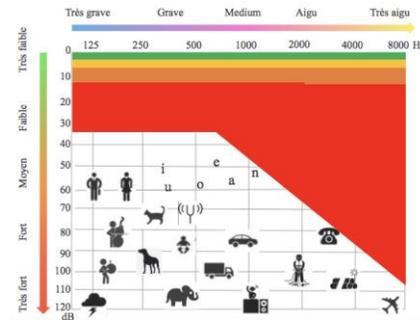
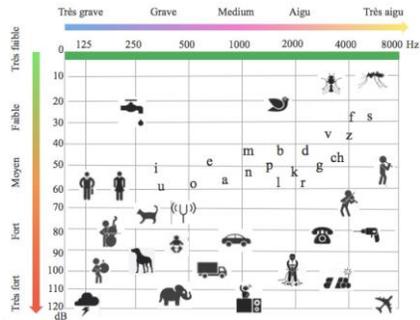
_E_A_



CHEVAL

Le chat et le soleil

Maurice Carême



Le chat ouvrit les yeux, le soleil y entra
Le chat ferma les yeux, le soleil y resta

_oilà pou__ uoi le _oi_, _uand le __at _e _é_eille
_aper_ois _ans le _oir, _eux _or_eaux de _oleil

Le chat et le soleil

Le chat ouvrit les yeux, le soleil y entra

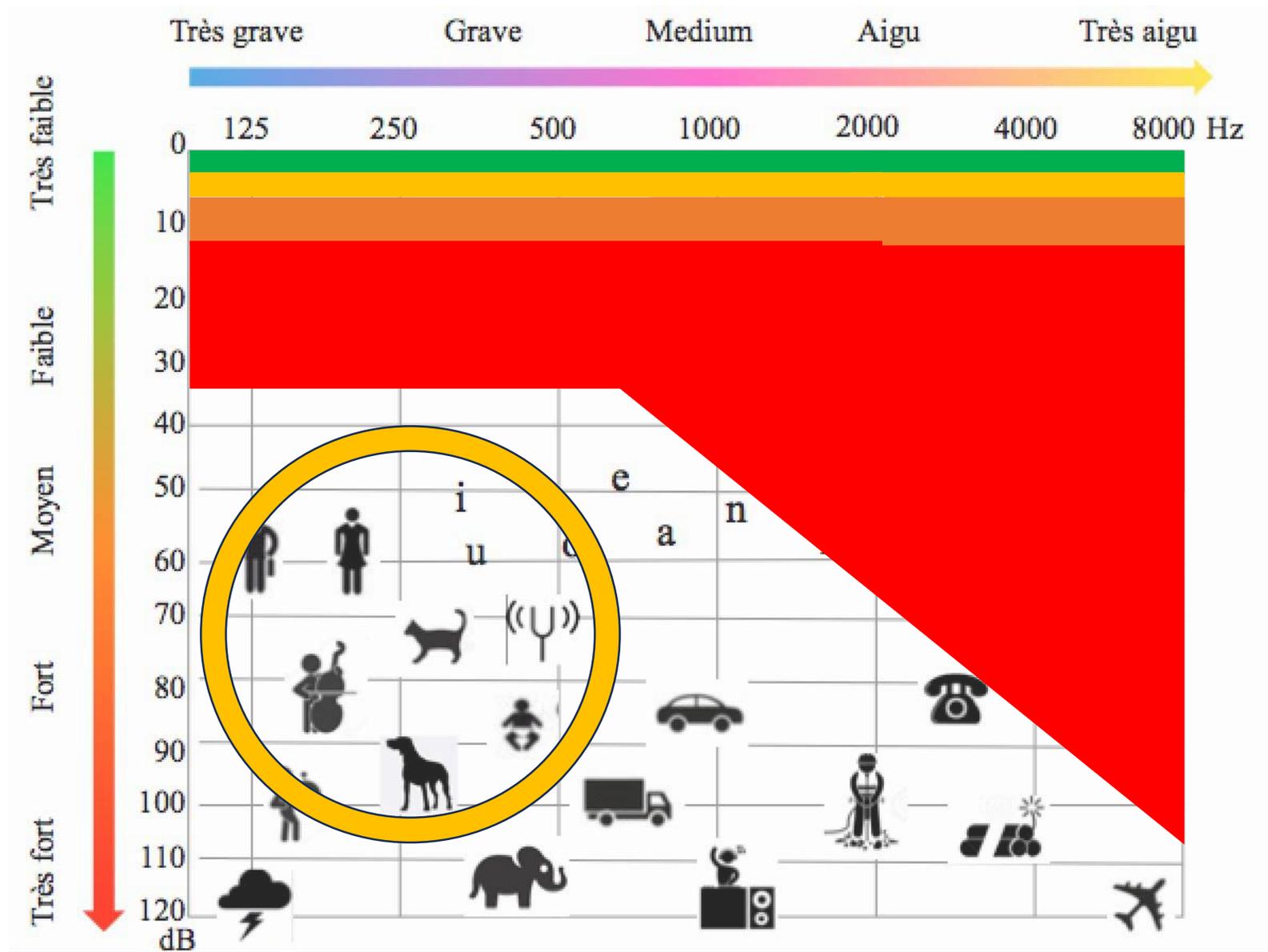
Le chat ferma les yeux, le soleil y resta

Voilà pourquoi le soir, quand le chat se réveille

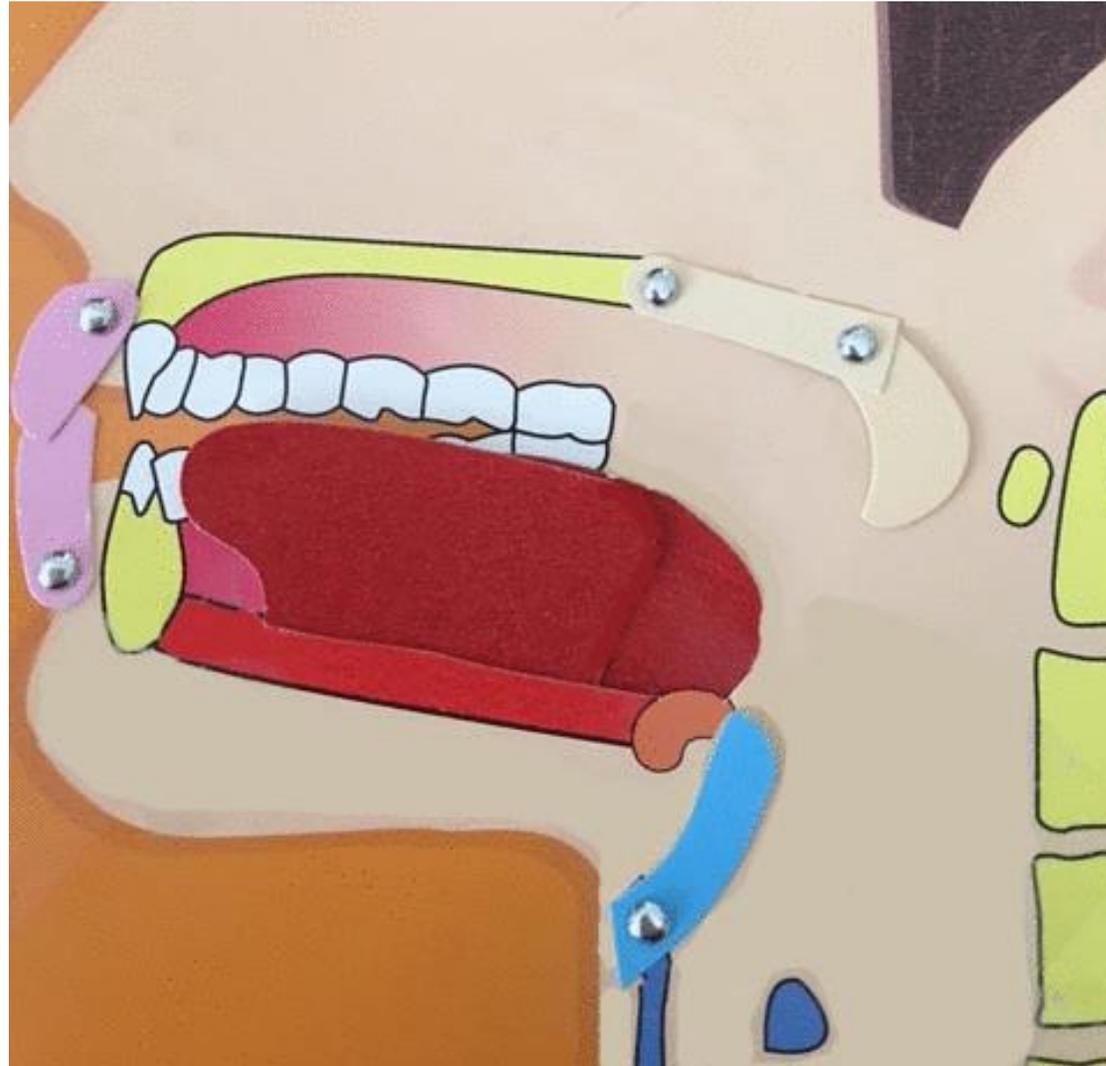
J'aperçois dans le noir, deux morceaux de soleil

Le vieillissement auditif: conséquences pour le contrôle de la voix

- La voix humaine s'étend de 40 à 2000 Hz
- La personne presbycousique, sur le plan auditif, perçoit de manière juste les différentes hauteurs, et notamment celles de la voix
- La perte des fréquences les plus aiguës modifie le timbre des voix



Merci !



Dr PERI FONTAA Elisabeth: perifontaa@free.fr

Bibliographie « voix »

- Amy de la Bretèque, B. (1997). L'équilibre et le rayonnement de la voix. Marseille : Solal, 127 p.
- Arnold, A. (2015). *La voix genrée, entre idéologies et pratiques*
- Bailly, L. "Interaction entre cordes vocales et bandes ventriculaires en phonation : exploration in-vivo, modélisation physique, validation in-vitro", *Thèse de Doctorat de l'Université du Maine* (2009).
- Henrich-Bernardon, N. (2015). *La voix chantée Entre sciences et pratiques*. Solal.
- Fournier, C. (1989). La voix : un art et un métier. Grenoble : CCL Editions, 2^{ème} édition, Collection jardins d'Isère, 258 p.
- Hutois, M., & Scotto di Carlo, N. (2006). Analyse anatomo-physiologique des systèmes ostéoarticulaire et ventilatoire impliqués dans le chant . *Médecine des Arts*.
- Klein-Dallant, C. (2016). *De la voix parlée à la voix chantée*.
- Lamesch, S. (2010). *Mécanismes laryngés et voyelles en voix chantée*. Retrieved septembre 2019, from <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00488701>
- Le Huche, F., Allali, A. (1984). La voix, anatomie et physiologie. Paris : Edition Masson, collection phoniatrie,
- Pillot, C. (2004). Sur l'efficacité vocale dans le chant lyrique : aspects physiologique, cognitif, acoustique et perceptif. Thèse de Doctorat de Phonétique, Université de Paris III Sorbonne Nouvelle, 480 p.
- Pillot-Loiseau, C. (2011). Pression sous-glottique et débit oral d'air expiré comme aides à la pose du diagnostic de dysodie; implications pour la rééducation vocale. . *Entretiens d'orthophonie* , (pp. 32-45). Paris.
- Roubeau, B. (1993). Mécanismes vibratoires laryngés et contrôle neuro-musculaire de la fréquence fondamentale. Université Paris XI, Orsay.
- Scotto di Carlo, N. (2006). Indices acoustiques et perceptifs des dysfonctionnements de la voix chantée. In *VOIX PARLEE ET CHANTEE*. Paris: Editions Klein-Dallant.
- Titze, I. R. (1994). Principles of Voice Production.

Bibliographie « audition »

- Aglieri, V., Chaminade, T., Takerkart, S., & Belin, P. (2018). Functional connectivity within the voice perception network and its behavioural relevance. *Neuroimage*, 183, 356-365
- Belin P. (2000) Voice-selective areas in human auditory cortex [Nature](#) 403(6767):309-12
- Brown S. (2008) A larynx area in the human motor cortex *Cereb Cortex*;18(4):837-45
- Cerri G. (2014) The Mirror Neuron System and The Strange Case of Broca's Area [Human Brain Mapping](#) 36(3)
- Granier-Deferre, C., & Busnel, M.-C. (2011). L'audition prénatale, quoi de neuf ? *Spirale*, n° 59(3), 17-32.
- Hickok G. (2007) The Cortical Organization of Speech Processing [Nature reviews Neuroscience](#) 8(5):393-402
- Kohler E. (2002) Hearing sounds, understanding actions: action representation in mirror neurons *Science*. Aug 2;297(5582)
- Peri Fontaa Elisabeth (2019) Entendre, comment ça marche [editionsperifontaa.com](#)
- Plaza, M. (2014). Le développement du langage oral. *Contraste*, N° 39(1), 99-118.
- Scotto di Carlo N. (2016) Rôle des SIP dans le contrôle de la voix chantée *Médecine des Arts*, 1993, 3 : 5-12
- Selleck, M. A., & Sataloff, R. T. (2014). The Impact of the Auditory System on Phonation: A Review. *Journal of Voice*, 28(6), 688-693.