

# ÉTAT DE L'ART DE LA CHIRURGIE OTOLOGIQUE ET SINUSIENNE

---

## 2.1 Introduction

Le robot porte-endoscope doit agir dans un environnement anatomique bien particulier, celui de l'oreille et du massif facial, incluant les sinus et fosses nasales. Cette anatomie est relativement complexe, et présente des rapports avec des structures importantes à connaître et à respecter.

Ce chapitre vise à familiariser le lecteur avec l'anatomie de l'oreille et des sinus, afin de répondre aux questions suivantes :

- *quelles sont les caractéristiques anatomiques de l'oreille et des sinus ?*
- *quelles sont les modalités des chirurgies le plus souvent pratiquées dans ces régions anatomiques jusqu'à présent ?*

Pour répondre à ces questions, la première partie exposera l'anatomie de l'oreille (2.2), puis les principes de la chirurgie de l'oreille (2.3), sous microscope et plus récemment sous endoscope. La seconde partie étudiera, de la même manière, l'anatomie du massif facial (2.4) puis la chirurgie des sinus (2.5), le plus souvent endoscopique.

## 2.2 Anatomie de l'oreille

L'oreille est un organe sensoriel permettant l'audition et l'équilibre. Pour entendre, l'oreille doit être capable de capter le son, de le transmettre à l'organe récepteur et de le traduire en signaux électriques à destination du cerveau. Ces trois mécanismes sont respectivement assurés par les trois parties de l'oreille, représentés Figure 2.1 : l'oreille externe, moyenne et interne.

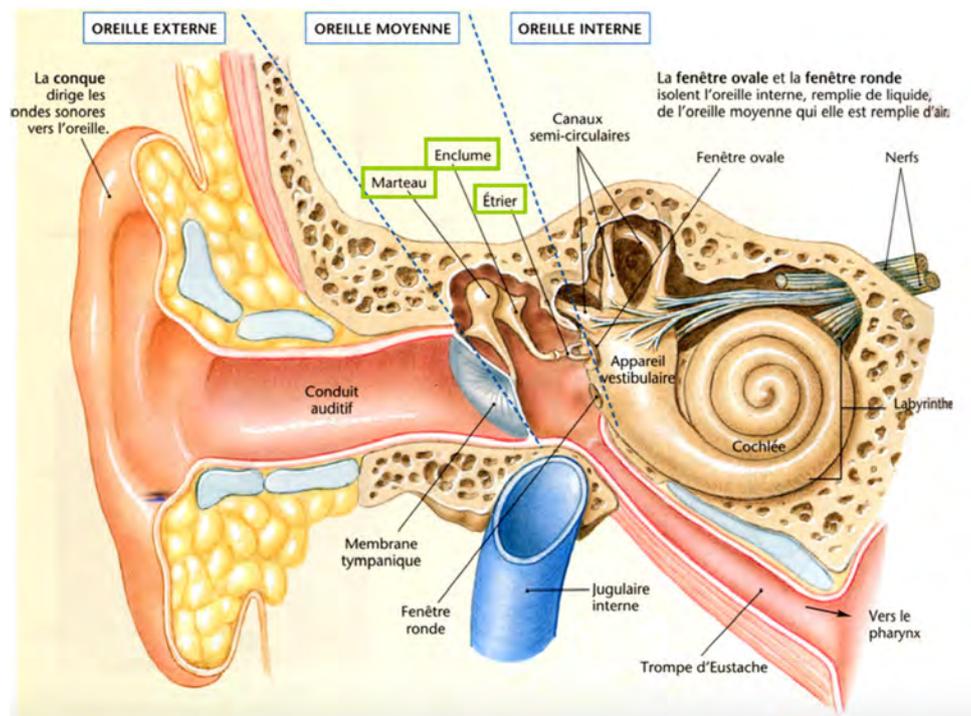


FIGURE 2.1 – Vue schématique de l'oreille [1].

L'oreille externe est composée du pavillon et du conduit auditif externe (CAE) : elle capte le son et aide à la localisation spatiale du son. L'oreille moyenne est composée de la membrane tympanique et des osselets : le malleus (marteau), l'incus (enclume) et le stapes (étrier). L'oreille moyenne permet de transmettre la vibration du son à l'oreille interne. L'oreille interne est composée de la cochlée et du vestibule, et permet la transduction du signal mécanique en signal électrique.

L'espace de travail concernant la chirurgie endoscopique comprendra le CAE et la caisse du tympan ; nous détailleront donc plus précisément l'anatomie de l'oreille externe et moyenne, sans insister sur l'anatomie de l'oreille interne.

### 2.2.1 Oreille externe

L'oreille externe est composée du pavillon et du CAE. Le pavillon est constitué d'une charpente cartilagineuse, recouverte de peau. À sa suite, le CAE présente deux portions : un tiers externe fibro-cartilagineux, puis deux tiers internes osseux. Il a un trajet oblique de dehors en dedans et d'arrière en avant, avec une forme de S italique dans le plan axial, comme représenté Figure 2.2. Il forme ainsi un coude à concavité postérieure, puis

s'oriente vers l'avant et la membrane tympanique.

La peau de la première portion du CAE est épaisse, doublée de tissu graisseux et recouverte de poils. Le derme contient des glandes sébacées. Le tissu sous-cutané contient des glandes cérumineuses, sécrétant le cérumen. A l'inverse, la portion osseuse du CAE présente une peau fine et sèche, dénuée de glandes accessoires.

Le CAE mesure en moyenne 25 mm de long pour 10 mm de diamètre. Mais ses dimensions sont très variables selon les individus. Exceptées les aplasies congénitales (i.e. absence de pavillon et/ou de CAE), les patients peuvent présenter des CAE étroits, le plus souvent au niveau du tiers externe. Une incision du tissu cutané peut alors permettre de faciliter l'accès à l'oreille moyenne.

## 2.2.2 Oreille moyenne

L'oreille moyenne comprend :

- la membrane tympanique : membrane tendue entre oreille externe et moyenne, insérée au conduit osseux par l'annulus (anneau fibreux circonférentiel, tel une jante de vélo). On distingue une partie rigide car pourvue d'une couche fibreuse entre couches épidermique et muqueuse, la pars tensa ; et une partie plus fragile car dépourvue de couche fibreuse, la pars flaccida. La pars flaccida est située à la partie supérieure de la membrane tympanique, au-dessus des ligaments tympano-malléaires. La membrane tympanique mesure environ 10 mm de diamètre pour une épaisseur de 0.07 mm.
- le malleus ou marteau, mesurant environ 8 mm. Le manche du malleus est inclus dans la membrane tympanique, adhérent à la couche fibreuse. Le col répond à la pars flaccida et supporte la tête, située dans l'attique et s'articulant avec l'incus, comme sur la Figure 2.3a.
- l'incus ou enclume, mesurant environ 6 mm de large pour 7 mm de haut. Son corps s'articule avec la tête du malleus au niveau de l'attique (Figure 2.3b). On note une branche courte, postérieure, vers l'antre mastoïdien ; et une branche longue ou descendante, partant verticalement en dedans et en arrière du marteau. Elle se termine par un renflement : l'apophyse lenticulaire, qui s'articule avec le stapes (Figure 2.3a).
- le stapes ou étrier, plus petit (4 mm) et plus léger (2 mg) os du corps humain. Sa tête, cylindrique, s'articule avec l'incus. Le tendon du muscle stapédien s'y insère, et

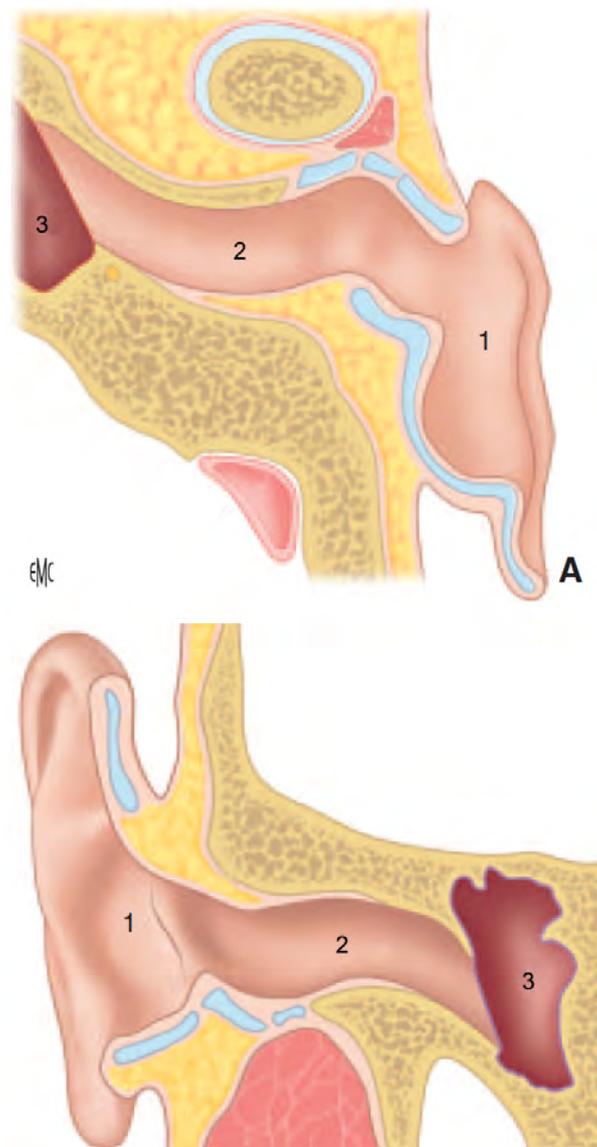
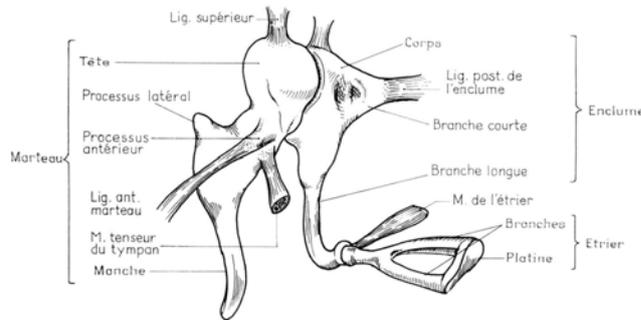
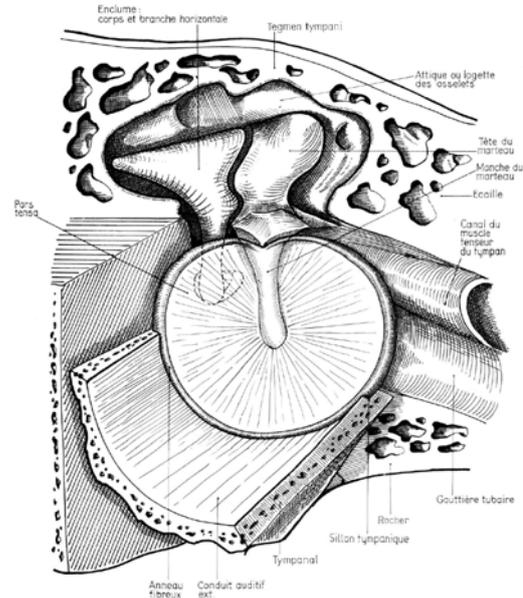


FIGURE 2.2 – Coupes horizontale (A) et frontale (B) du conduit auditif externe [2].  
1= pavillon ; 2= CAE ; 3= caisse du tympan.



(a) Vue antéro-interne de la chaîne ossiculaire.



(b) Vue latérale de la membrane tympanique et des osselets en rapport.

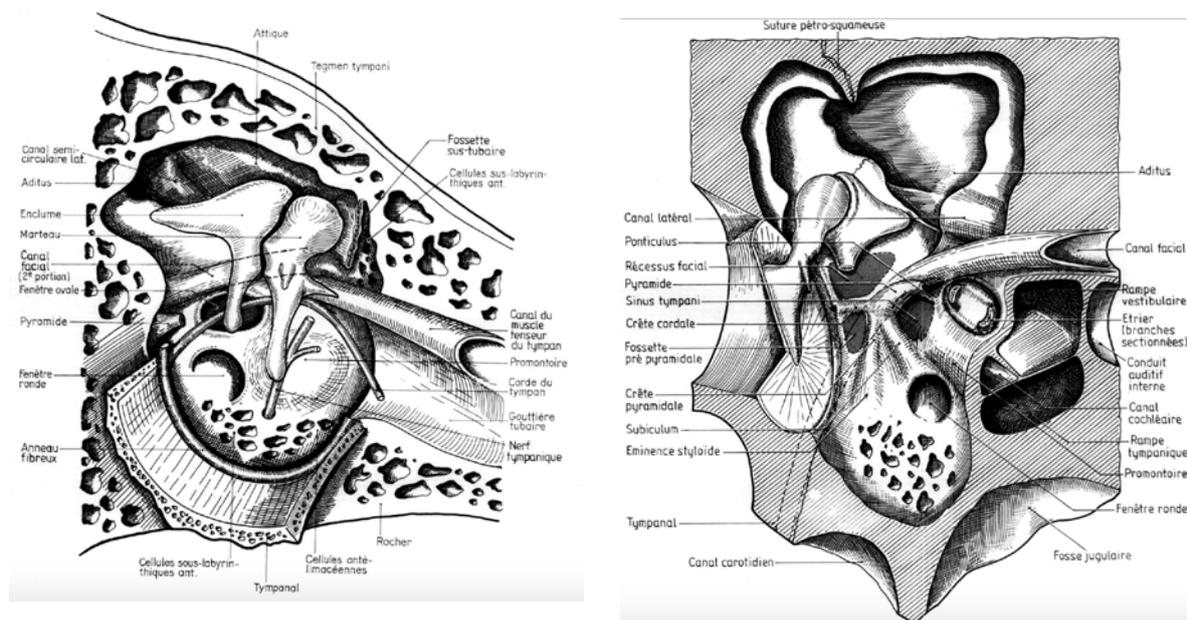
FIGURE 2.3 – Membrane tympanique et chaîne ossiculaire [3].

médie le réflexe stapédien, soit la rigidification de la chaîne ossiculaire à un son fort pour protéger l'oreille interne. De la tête du stapes partent deux branches, antérieure et postérieure, puis la platine (Figure 2.3). C'est une mince lame irrégulière, ovale, de  $3.2\text{mm}^2$  de surface et de 250 à 420  $\mu\text{m}$  d'épaisseur. La platine est reliée à la fenêtre ovale par le ligament annulaire, en rapport avec le labyrinthe membraneux. Elle sépare ainsi l'oreille moyenne de l'oreille interne.

— la caisse du tympan, représentée sur la Figure 2.4. C'est la cavité qui contient les osselets, entre membrane tympanique et oreille interne (Figure 2.2). Elle est divisée en plusieurs étages :

— la partie supérieure de la caisse, nommée épitympanum ou attique, comprend la tête du malleus, le corps de l'incus et la deuxième portion du nerf facial. Elle est limitée en haut par le toit de l'oreille, ou tegmen, qui sépare l'oreille de la méninge temporale.

— la partie médiane, appelée atrium ou mésotympanum. Elle comprend le stapes, la branche descendante de l'incus, le manche du malleus. Sa paroi médiale est complexe (Figure 2.4a), et comprend les fenêtres ovale et ronde, zones de jonction vers l'oreille interne. Le promontoire est le relief de la cochlée



(a) Paroi médiale de la caisse du tympan, chaîne ossiculaire en place.

(b) Paroi postérieure de la caisse du tympan.

FIGURE 2.4 – Schémas de la caisse du tympan [3].

au niveau de cette paroi médiale. La paroi postérieure, ou rétrotyimpanum (Figure 2.4b), présente de nombreux reliefs, dont la pyramide d'où part le muscle stapédien, et le nerf facial.

- la partie inférieure, ou hypotympanum, est limitée en bas par le canal carotidien et la fosse jugulaire (Figure 2.4b).

La corde du tympan, branche du nerf facial, est responsable du goût des 2/3 antérieurs de la langue et traverse la caisse du tympan d'arrière en avant, entre malleus et incus.

- la trompe d'Eustache. La trompe d'Eustache s'étend de la partie antérieure de la caisse du tympan jusqu'au rhinopharynx. Sa fonction est d'équilibrer la pression à l'intérieur de la caisse du tympan avec la pression atmosphérique.

### 2.2.3 Oreille interne

L'oreille interne est constituée d'un labyrinthe membraneux, rempli d'endolymphe, située dans un labyrinthe osseux empli de périlymphe.

Il faut distinguer deux parties du labyrinthe (Figure 2.5 :

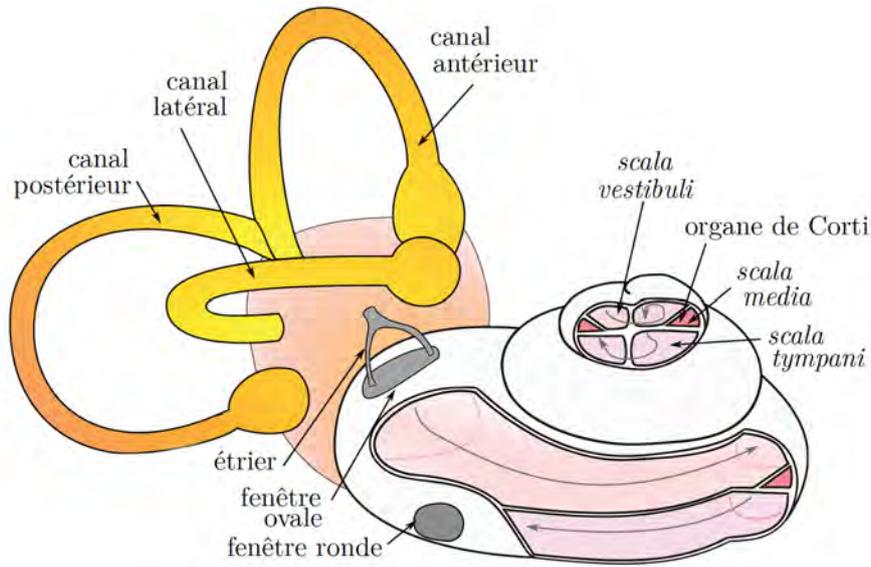


FIGURE 2.5 – Schéma simplifié de l'oreille interne [4]

- le labyrinthe antérieur permet la transduction du signal sonore au niveau de la cochlée, et plus précisément au niveau de son organe neuro-sensoriel (organe de Corti). La cochlée est enroulée sur deux tours et demi de spire autour d'un axe central, le modiolus. Au niveau de l'organe de Corti, les cellules ciliées sont mobilisées par la vibration de la membrana tectoria induite par les mouvements de l'endolymphe, et transmettent un signal électrique vers le nerf cochléaire puis le cortex.
- le labyrinthe postérieur est responsable de l'équilibre. Ce système vestibulaire est formé de trois canaux semi-circulaires dans les trois plans de l'espace, du saccule et de l'utricule. Les canaux sont sensibles aux mouvements de la tête, tandis que saccule et utricule renseignent sur la position de la tête.

## 2.3 Chirurgie endoscopique de l'oreille

La chirurgie de l'oreille se fait classiquement sous microscope. Cela permet au chirurgien de garder ses deux mains libres pour utiliser, le plus souvent, une micro-aspiration d'une main et un micro-instrument de l'autre main, comme visualisé sur la Figure 1.1.

Cependant, la chirurgie sous microscope ne permet de voir qu'en ligne droite ; le champ de vision est donc très limité par le conduit auditif externe, et nécessite régulièrement un fraisage osseux pour visualiser des zones d'intérêt. En effet, la vue lors d'une chirurgie sous

microscope est limitée par le segment le plus étroit du conduit auditif externe (Figure 2.6, à gauche). Cette limitation du champ visuel oblige souvent le chirurgien à créer un passage parallèle à travers la mastoïde pour accéder à l'attique par exemple (Figure 2.6, au centre).

A l'inverse, l'endoscope traverse le conduit auditif externe pour entrer directement dans la caisse du tympan, offrant au chirurgien un champ de vision beaucoup plus large (Figure 2.6, à droite).

Cette différence de visualisation entre microscopie et endoscopie est illustrée par des prises de vues opératoires sur la Figure 2.7. La vision sous microscope, à gauche, montre des éléments d'intérêt (incus, stapes) à fort grossissement mais en ligne droite ; la vision sous endoscope, à droite, permet de visualiser les branches du stapes mais aussi le nerf facial, puisque l'endoscope a pu être introduit directement dans la caisse du tympan.

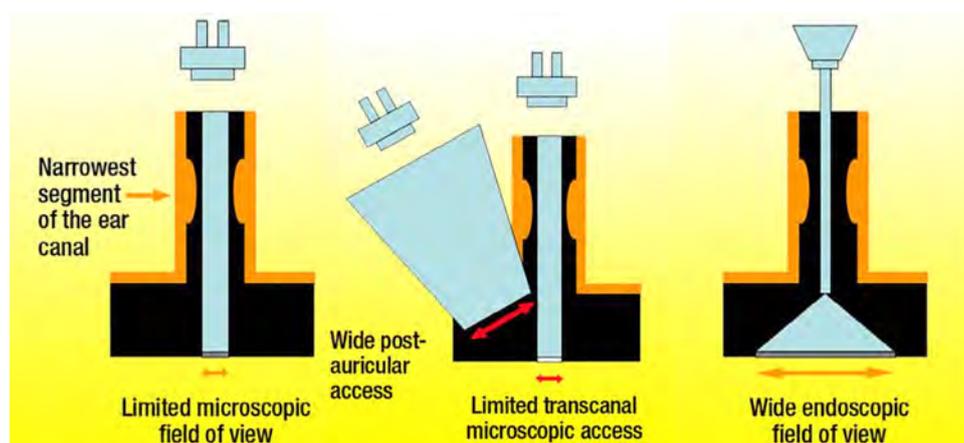


FIGURE 2.6 – Champ de vision selon l'utilisation du microscope (à gauche), souvent élargi par un fraisage mastoïdien (au centre), par rapport à l'endoscopie (à droite) [5].

Une étude de Bennett et al. réalisée en 2016 [6] comparait les zones de l'oreille moyenne visibles et non visibles en microscopie et en endoscopie, avec des endoscopes de différentes angulations, sur des modèles 3D réalisés d'après scanner. Les auteurs retrouvaient une vision significativement meilleure de toutes les régions de l'oreille moyenne sous endoscopie, dès l'utilisation d'une optique 0°, comme représenté Figure 2.8.

Ainsi, la chirurgie de l'oreille sous endoscopie s'est fortement développée ces dernières années. Elle était déjà décrite dans les années 90 par certains auteurs pour la meilleure visualisation de fistules périlymphatiques [37] ou l'exérèse de cholestéatomes au sein de l'oreille moyenne [38].

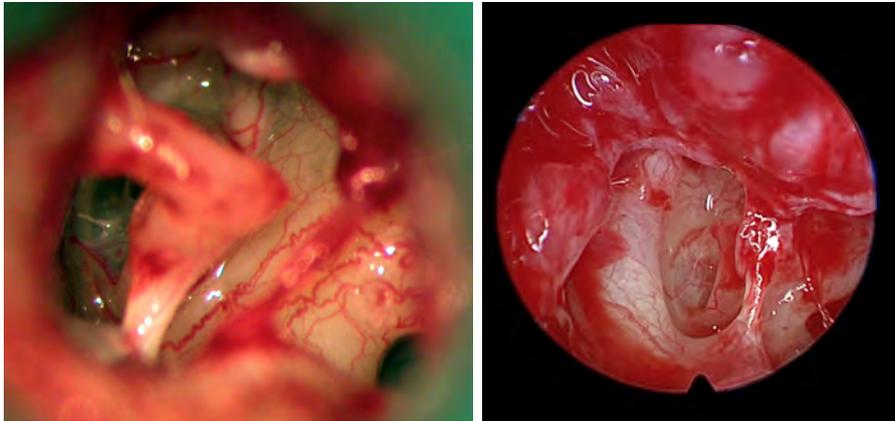


FIGURE 2.7 – Vues per-opératoires de la zone du stapes, sous microscope (à gauche) et sous endoscope (à droite).

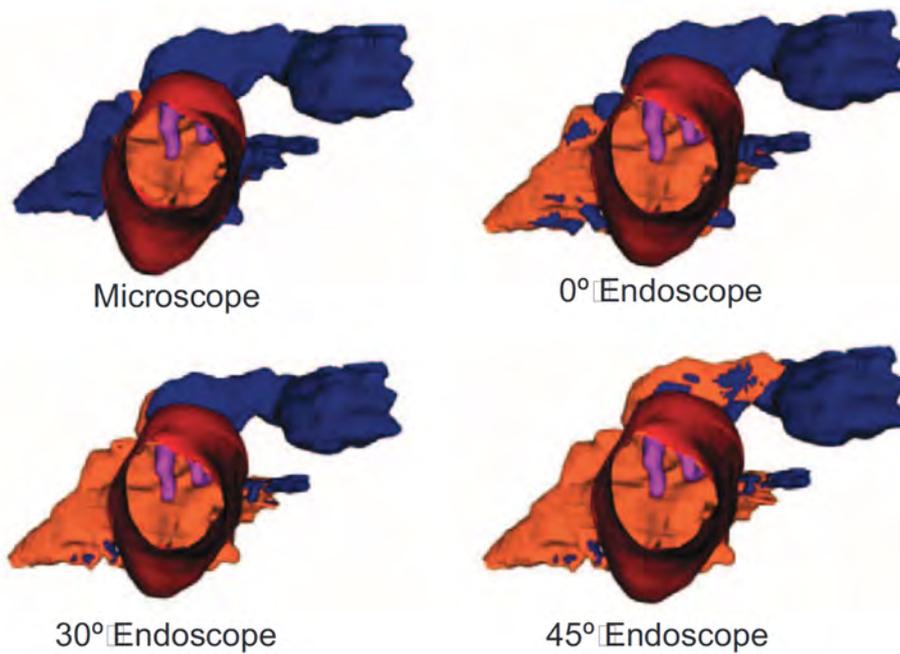


FIGURE 2.8 – Comparaison des zones anatomiques visualisées *en orange* ou non *en bleu* selon l'utilisation de microscope ou d'endoscopes de différentes angulations [6].

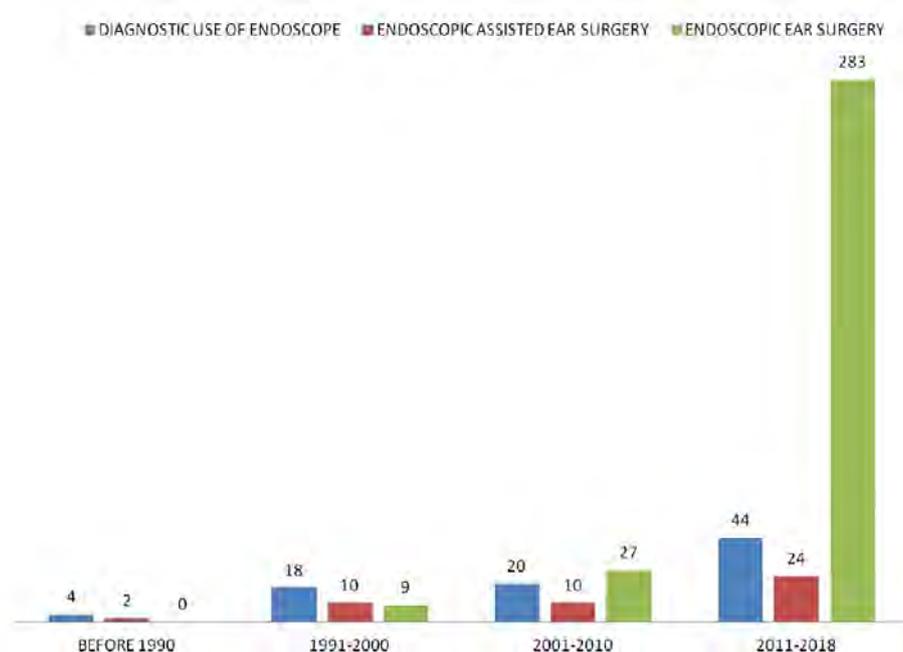


FIGURE 2.9 – Nombre de publications selon le type d'utilisation de l'endoscopie en chirurgie de l'oreille lors des quarante dernières années [5].

Mais l'essor de l'endoscopie s'est fait dans les années 2000 avec le développement des colonnes vidéo haute-définition retransmettant les images des endoscopes. Une récente méta-analyse [5] retrouve cet engouement pour l'oto-endoscopie, avec une pratique d'exérèse de cholestéatome par endoscopie passant de 14 % en 2010 à 53 % en 2018 d'après un sondage réalisé pour cette étude. L'évolution du nombre d'articles publiés à propos de la chirurgie endoscopique de l'oreille est un autre indice de la modification récente des pratiques chirurgicales [5], comme représenté sur la Figure 2.9.

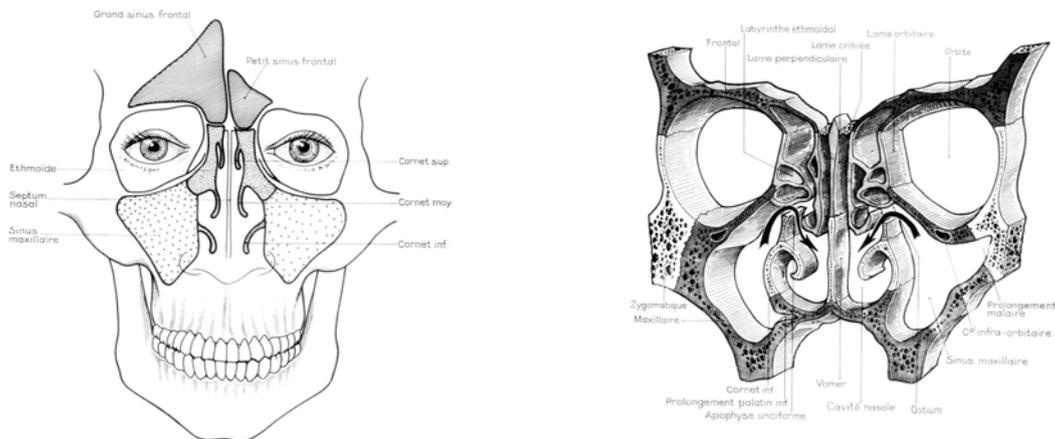
La chirurgie du cholestéatome sous endoscopie a ainsi montré un excellent contrôle à long terme [39], avec une douleur post-opératoire diminuée et un temps de cicatrisation plus court qu'après chirurgie sous microscope [36]. L'utilisation de l'endoscope a également montré son intérêt pour dépister des récurrences de cholestéatomes dans des zones difficiles d'accès [35].

Cependant, la principale limite de la chirurgie oto-endoscopique est la nécessité de maintenir l'endoscope à une main, et donc d'opérer avec la main restante, comme l'illustre la Figure 1.1 dans le chapitre d'introduction (1).

Cette chirurgie pratiquée à une main est responsable d'une longue courbe d'apprentissage et de grandes difficultés à réaliser l'hémostase lors de saignements [6]. Cela explique que l'oto-endoscopie restait minoritaire en 2019, avec seulement 7500 opérations réalisées estimées par an (*source HAS, Observatoire de la santé*). Par ailleurs, la perte de la vision binoculaire est une autre limite de la chirurgie endoscopique.

## 2.4 Anatomie du massif facial

Le massif facial comprend les fosses nasales et les sinus de la face, qui sont des cavités pneumatiques creusées dans les os du massif facial, tel que représenté Figure 2.10.



(a) Projection des sinus au niveau de la face.

(b) Coupe coronale du massif facial.

FIGURE 2.10 – Sinus paranasaux et fosses nasales [3].

Les cavités nasales ont un double rôle respiratoire et sensoriel et sont associées aux cavités sinusiennes qui filtrent, réchauffent, humidifient l'air inspiré et se drainent dans les cavités nasales [7]. Les fosses nasales sont centrales, et les sinus paranasaux, pairs, s'organisent autour et comprennent : les sinus maxillaires, ethmoïdaux, frontaux et sphénoïdaux. Les cavités naso-sinusiennes se développent de façon variable au cours de l'enfance, et il en résulte des tailles variables selon les individus et selon l'âge. En effet, le sinus ethmoïdal est le premier sinus à être pneumatisé chez l'enfant, puis le sinus maxillaire qui croît jusqu'à l'âge de 15 ans. Le sinus sphénoïde est visible radiologiquement à l'âge de 4 ans, puis le sinus frontal à 7 ans et croît jusqu'à 20 ans.

### 2.4.1 Fosses nasales

Les fosses nasales sont deux cavités symétriques situées de part et d'autre du septum nasal. Le septum nasal est constitué d'une lame cartilagineuse en avant, de la lame perpendiculaire de l'ethmoïde en haut et du vomer en arrière. La communication entre les deux fosses nasales ne se fait qu'en arrière du vomer, soit au niveau du rhinopharynx.

La paroi inférieure, ou plancher, est constituée par le palais, visible sur les Figures 2.10b et 2.11. Sa limite antérieure est le vestibule narinaire, et en arrière la choane, zone de jonction avant le rhinopharynx.

La paroi latérale des fosses nasales est plus complexe, représentée sur la Figure 2.11. Elle constitue la cloison inter-sinuso-nasale. Elle est majoritairement recouverte par des cornets, lames osseuses à implantation latérale. Chaque cornet délimite avec la paroi externe de la fosse nasale une région appelée méat. On retrouve ainsi :

- le cornet inférieur, délimitant le méat inférieur, où s'abouche le canal lacrymal.
- le cornet moyen, occupant toute la longueur de l'ethmoïde, qu'il déborde en avant et en arrière. Il recouvre la région du méat moyen, zone d'abouchement des sinus maxillaire, frontal et ethmoïdal antérieur.
- le cornet supérieur, délimitant le méat supérieur, où se drainent les cellules ethmoïdales postérieures.
- le cornet suprême, inconstant, au-dessus du cornet supérieur (Figure 2.11). On peut y trouver le méat de Santorini, inconstant, zone de drainage de cellules ethmoïdales postérieures.

La paroi supérieure des fosses nasales, ou toit, appartient à la base du crâne. Elle est constituée par : médialement, la lame criblée, zone de passage des filets nerveux olfactifs ; latéralement, le toit de l'ethmoïde, séparant la fosse nasale du lobe frontal.

### 2.4.2 Sinus maxillaire

Le sinus maxillaire a une forme pyramidale, à sommet latéral et à base médiane. Sa face supérieure correspond au plancher orbitaire (Figure 2.12). Sa paroi antérieure répond à la joue, et sa face postérieure à la fosse infra-temporale. Médialement, la cloison inter-sinuso-nasale le sépare des fosses nasales. Son orifice de drainage se situe sous le cornet moyen, au niveau de la région du méat moyen (Figure 2.11). Le plancher du sinus maxillaire est en rapport avec les alvéoles dentaires, qui y font une saillie plus ou

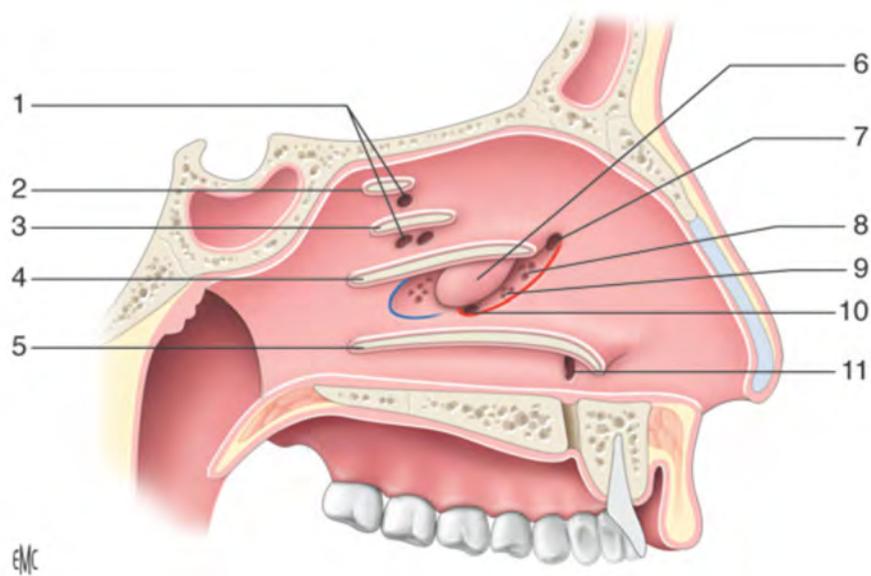


FIGURE 2.11 – Paroi latérale de la fosse nasale gauche [7].

1. Méats des cellules ethmoïdales postérieures ; 2. Cornet suprême ; 3. Cornet supérieur ;
4. Cornet moyen ; 5. Cornet inférieur ; 6. Bulle ethmoïdale ; 7. Canal naso-frontal ; 8.
- Méats des cellules unciformiennes ; 9. Méats des cellules méatiques : 10. Ostium du sinus maxillaire ; 11. Orifice du canal lacrymal.

moins marquée (Figure 2.12). Cela explique la fréquence des sinusites maxillaires d'origine dentaire.

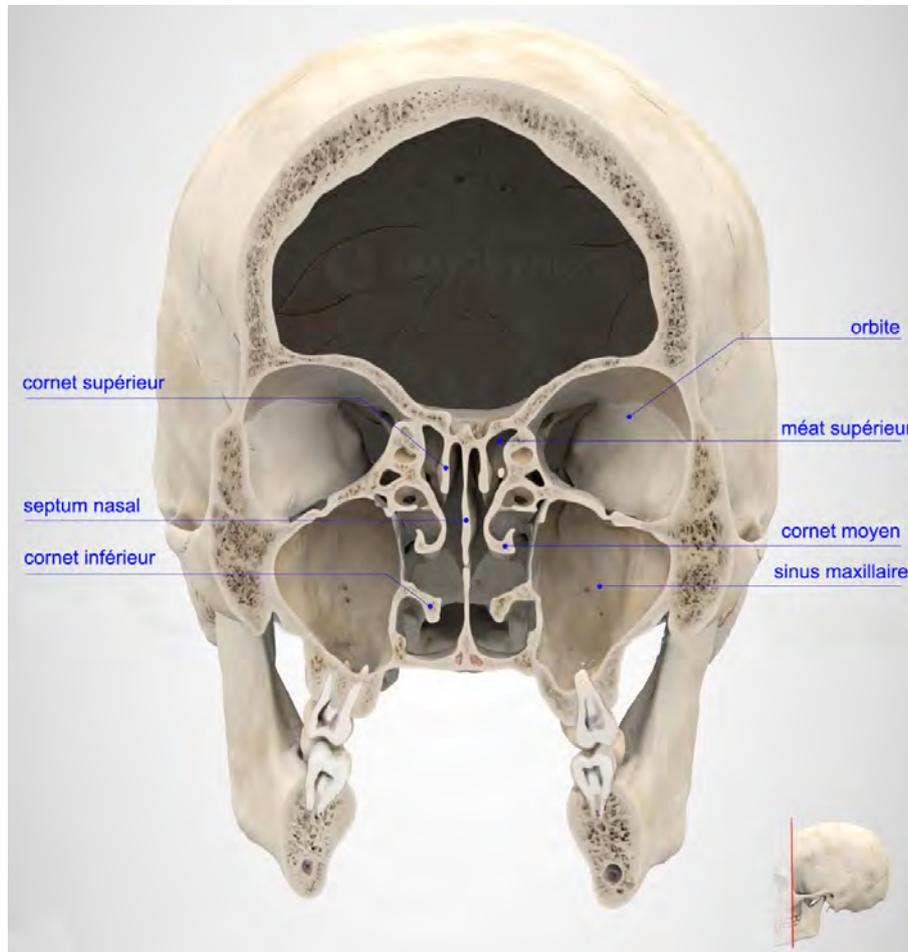


FIGURE 2.12 – Coupe frontale passant par le sinus maxillaire, permettant de visualiser ses rapports avec le globe oculaire en haut et les racines dentaires en bas [8].

### 2.4.3 Sinus ethmoïdal

Le sinus ethmoïdal, ou labyrinthe ethmoïdal, est schématiquement de forme parallélogramme occupant la totalité de la masse latérale de l'os ethmoïdal. Il est plus large en arrière et en bas qu'en avant et en haut [7]. Chaque sinus ethmoïdal est formé de 5 à 14 cellules selon les individus (Figure 2.10b). Ces cellules sont séparées entre elles par des racines cloisonnantes appartenant aux trois cornets principaux. On distingue : les cellules ethmoïdales antérieures (en avant de la racine cloisonnante du cornet moyen),

se drainant dans le méat moyen ; les cellules ethmoïdales postérieures (en arrière de la racine cloisonnante du cornet moyen), se drainant dans le méat supérieur.

Les rapports du sinus ethmoïdal sont l'orbite latéralement et l'endocrâne en haut (Figure 2.12).

#### 2.4.4 Sinus frontal

Les sinus frontaux sont deux cavités pneumatiques asymétriques séparées par une cloison et développées dans l'épaisseur de l'os frontal (Figure 2.10a). Ils se drainent dans la fosse nasale homolatérale par le canal nasofrontal, qui s'abouche dans le méat moyen.

Le sinus frontal est le sinus qui présente les plus importantes variations anatomiques, avec une taille très variable selon les individus, et entre les deux côtés chez une même personne.

#### 2.4.5 Sinus sphénoïdal

Le sinus sphénoïdal est également pair et asymétrique, situé au centre et en profondeur du massif facial. Une cloison sépare les deux sinus sphénoïdaux. Chaque sinus s'ouvre dans la fosse nasale au niveau du récessus sphéno-ethmoïdal, en postéro-supérieur.

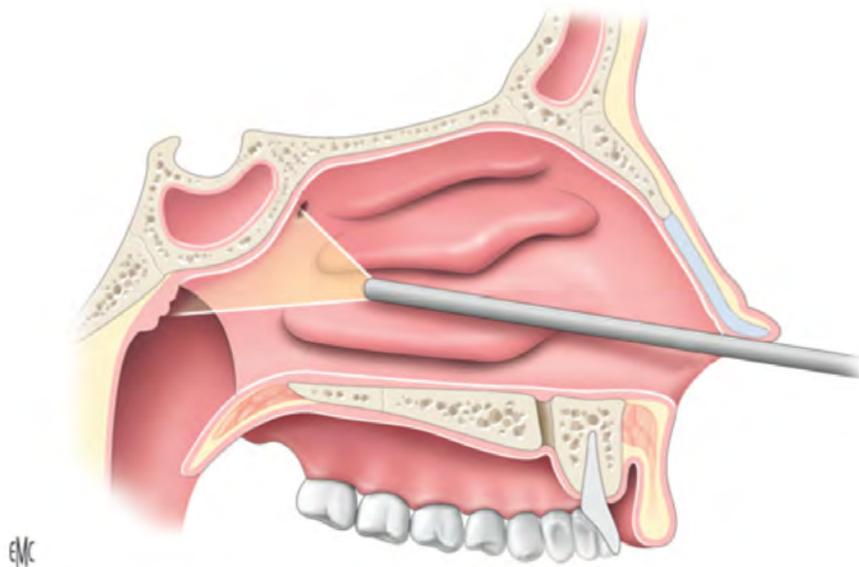


FIGURE 2.13 – Vue sagittale d'un endoscope éclairant l'ostium du sinus sphénoïdal [7].

Le sinus sphénoïdal a des rapports avec plusieurs structures importantes : le nerf optique, l'artère carotide interne, le sinus caverneux et l'endocrâne en dehors ; l'hypophyse en haut, ce qui fait de la voie trans-sphénoïdale une voie d'abord de choix pour la chirurgie hypophysaire. Comme pour le sinus frontal, il existe de très grandes variations de taille selon les individus.

## 2.5 Chirurgie endonasale

A la différence de la chirurgie endoscopique de l'oreille, bénéficiant d'un engouement récent, la chirurgie endonasale est la technique de référence pour opérer les fosses nasales et les sinus depuis trente ans.

Initialement réalisée par voie externe, la chirurgie des sinus s'est développée dans les années 1960 grâce au développement d'optiques miniaturisées pouvant être introduites dans les fosses nasales, par Hopkins [40]. Comme aujourd'hui, les endoscopes mesuraient 4 mm de diamètre, avec des angulations de 0°, 30° et 70°. L'avènement de techniques d'imagerie précises pour le bilan pré-opératoire puis de caméras permettant de retransmettre la chirurgie endoscopique sur écran a ensuite contribué à l'essor de cette technique [40].

Ainsi, bien que les premières endoscopies diagnostiques aient été décrites en 1901 (Hirschman) et 1925 (Maltz), c'est dans les années 1960 que la chirurgie endonasale a permis de réaliser gestes fonctionnels simples [41], grâce aux inventions de Hopkins. Les indications se sont ainsi étendues dans les années 1990, du traitement de pathologies inflammatoires aux tumeurs sinuso-nasales, jusqu'aux pathologies de la base du crâne et aux pathologies orbitaires.

Actuellement, la procédure de référence est donc la chirurgie endonasale, avec une main tenant l'endoscope, et une autre main les instruments. Les optiques sont le plus souvent entourées d'une gaine permettant de nettoyer l'extrémité de l'endoscope, en actionnant une pédale au pied du chirurgien. Cela est rendu possible par la taille des fosses nasales, et ne pourrait être faisable en chirurgie otologique. De son autre main, le chirurgien alterne entre des pinces de différentes angulations et parfois pourvues d'une aspiration intégrée, et des moteurs ou des aspirations plus ou moins larges ou courbes.

De nombreuses études ont démontré l'intérêt de la prise en charge endonasale, avec

des taux de complications moindres comparativement à la chirurgie par voie externe [42] et une meilleure qualité de vie en post-opératoire [43].

Cependant, des progrès restent possibles : en termes de navigation per-opératoire et de réalité augmentée d'une part ; en terme d'ergonomie d'autre part.

En effet, l'analyse de vidéos opératoires [13] de plusieurs chirurgiens seniors révèle que 20 à 50 % du temps chirurgical est dédié à des tâches telles que l'aspiration de sang pour permettre de voir la zone opératoire.

Une autre difficulté constatée est l'impossibilité, à une main, de tendre un tissu avant de le couper. La plupart de ces limites pourraient être améliorées en permettant au chirurgien de travailler avec ses deux mains plutôt qu'avec une seule, et vraisemblablement de diminuer le temps opératoire [13].

## **2.6 Conclusion**

Dans ce chapitre, nous avons précisé les caractéristiques anatomiques des régions dans lesquelles le futur robot sera amené à travailler.

La région anatomique de l'oreille présente un espace étroit, microscopique, avec de nombreuses structures osseuses et nerveuses à préserver. Les principes de la chirurgie otologique ont été exposés, avec les avantages et inconvénients de l'endoscopie dans cette chirurgie.

De la même manière, l'anatomie des sinus a été présentée, plus large que celle de l'oreille mais également confinée dans un espace entre plusieurs structures à risque, telles que les cavités orbitaires et la base du crâne. Les principes de la chirurgie de cette région anatomique ont été présentés, bien que pour le massif facial, le recours à l'endoscopie se soit démocratisé depuis de nombreuses années.