



HAL
open science

Évaluation de la croissance mandibulaire par la modélisation 3D

Maria Colombani

► **To cite this version:**

Maria Colombani. Évaluation de la croissance mandibulaire par la modélisation 3D. Chirurgie. 2021. dumas-03638210

HAL Id: dumas-03638210

<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-03638210v1>

Submitted on 12 Apr 2022

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Distributed under a Creative Commons Attribution - NonCommercial - NoDerivatives 4.0 International License

THÈSE

***POUR OBTENIR LE DIPLOME D'ETAT
DE DOCTEUR EN CHIRURGIE DENTAIRE***

Présentée et publiquement soutenue devant

Aix-Marseille Université
(Président : Monsieur le Professeur Éric BERTON)

Faculté des Sciences Médicales et Paramédicales
(Doyen : Monsieur le Professeur Georges LEONETTI)

Ecole de Médecine Dentaire
(Directeur : Monsieur le Professeur Bruno FOTI)

***Evaluation de la croissance mandibulaire
par la modélisation 3D***

Présentée par

COLOMBANI Maria

Née le 12 Juillet 1995

A BASTIA

Thèse soutenue le **Vendredi 25 Juin 2021**

Devant le jury composé de

Président : Professeur LE GALL Michel

Assesseurs : Docteur ROCHE-POGGI Philippe

Docteur PHILIP-ALLIEZ Camille

Docteur ARNIER Canelle

THÈSE

***POUR OBTENIR LE DIPLOME D'ETAT
DE DOCTEUR EN CHIRURGIE DENTAIRE***

Présentée et publiquement soutenue devant

Aix-Marseille Université
(Président : Monsieur le Professeur Éric BERTON)

Faculté des Sciences Médicales et Paramédicales
(Doyen : Monsieur le Professeur Georges LEONETTI)

Ecole de Médecine Dentaire
(Directeur : Monsieur le Professeur Bruno FOTI)

***Evaluation de la croissance mandibulaire
par la modélisation 3D***

Présentée par

COLOMBANI Maria

Née le 12 Juillet 1995

A BASTIA

Thèse soutenue le **Vendredi 25 Juin 2021**

Devant le jury composé de

Président : Professeur LE GALL Michel

Assesseurs : Docteur ROCHE-POGGI Philippe

Docteur PHILIP-ALLIEZ Camille

Docteur ARNIER Canelle

ADMINISTRATION

Mise à jour : sept. 2020

Doyens Honoraires

Professeur Raymond SANGIUOLO[†]
Professeur Henry ZATTARA
Professeur André SALVADORI
Professeur Jacques DEJOU

Doyen Assesseurs

Professeur Bruno FOTI
Professeur Michel RUQUET
Professeur Anne RASKIN

Directeurs de Départements

Formation Initiale
Recherche
Formation Continue

Professeur Michel RUQUET
Professeur Anne RASKIN
Professeur Frédéric BUKIET

Charges de missions

Relations Internationales
Internat et Diplômes d'études spécialisées
Affaires générales

Professeur Hervé TASSERY
Professeur Virginie MONNET-CORTI
Docteur Patrick TAVITIAN

Responsable des Services Administratifs et Techniques

Madame Katia LEONI

LISTE DES ENSEIGNANTS

PROFESSEURS DES UNIVERSITES – PRATICIENS HOSPITALIERS DES CSERD

BUKIET Frédéric (58-01)
FOTI Bruno (56-02)
LE GALL Michel (56-01)
MONNET-CORTI Virginie (57-01)
ORTHLIEB Jean-Daniel (58-01)
RASKIN Anne (58-01)
RUQUET Michel (58-01)
TARDIEU Corinne (56-01)
TARDIVO Delphine (56-02)
TASSERY Hervé (58-01)

PROFESSEUR DES UNIVERSITES

ABOUT Imad (65)

PROFESSEURS EMERITES

DEJOU Jacques
HUE Olivier

MAITRES DE CONFERENCES DES UNIVERSITES – PRATICIENS HOSPITALIERS DES CSERD

ABOUDHARAM Gérard (58-01)	LAN Romain (56-02)
BANDON Daniel (56-01)	LAURENT Michel (58-01)
BELLONI Didier (57-01)	LAURENT Patrick (57-01)
BOHAR Jacques (56-01)	MAILLE Gérald (58-01)
CAMOIN Ariane (56-01)	PHILIP-ALLIEZ Camille (56-01)
CAMPANA Fabrice (57-01)	POMMEL Ludovic (58-01)
CATHERINE Jean-Hugues (57-01)	PRECKEL Bernard-Éric (58-01)
GAUBERT Jacques (56-01)	RÉ Jean-Philippe (58-01)
GIRAUD Thomas (58-01)	ROCHE-POGGI Philippe (57-01)
GIRAUDEAU Anne (58-01)	STEPHAN Grégory (58-01)
GUIVARC'H Maud (58-01)	TAVITIAN Patrick (58-01)
JACQUOT Bruno (58-01)	TERRER Elodie (58-01)
LABORDE Gilles (58-01)	TOSELLO Alain (58-01)

MAITRES DE CONFERENCES DES UNIVERSITES ASSOCIES

BALLESTER Benoît (58-01)
BLANCHET Isabelle (56-01)
MENSE Chloé (58-01)
SILVESTRI Frédéric (58-01)

ASSISTANTS HOSPITALIERS ET UNIVERSITAIRES

AL AZAWI Hala (56-01)	HAHN-GOLETTI Larissa (58-01)
ANTEZACK Angeline (57-01)	LAURENT Camille (58-01)
ARNIER Canelle (56-01)	LIOTARD Alicia (58-01)
BAUDINET Thomas (58-01)	MADENIAN Pauline (58-01)
BRINCAT Arthur (57-01)	MANSUY Charlotte (58-01)
BROS Agnès (56-01)	MARTIN William (56-01)
CASAZZA Estelle (56-01)	MATERRA Rémi (58-01)
CASTRO Romain (57-01)	PARFU Anne (58-01)
CHIARINI Thomas (58-01)	PASCHEL Laura (58-01)
DAVID Laura (56-01)	PILLIOL Virginie (58-01)
DRAUSSIN Thierry (57-01)	ROUSCOFF Eva (56-01)
DUMAS Cathy (57-01)	SANTUNIONE Charlotte (58-01)
FAURE-BRAC Mathias (57-01)	VINAÏ Michael (56-01)
FERRE Enzo (58-01)	
HADJ-SAID Mehdi	

ASSISTANTS DES UNIVERSITES ASSOCIES

GRINE Ghilès (57-01)
HOUVENAEGHEL Brice (57-01)

Intitulés des sections CNU :

- 56^{ème} section : Développement, croissance et prévention
- 56-01 Odontologie pédiatrique et orthopédie dento-faciale
- 56-02 : Prévention – Epidémiologie – Economie de la santé – Odontologie légale
- 57^{ème} section : Chirurgie orale ; Parodontologie ; Biologie Orale
- 57-01 : Chirurgie orale – Parodontologie – Biologie orale
- 58^{ème} section : Réhabilitation orale
- 58-01 : Dentisterie restauratrice – Endodontie – Prothèses – Fonction-Dysfonction – Imagerie – Biomatériaux

L'auteur s'engage à respecter les droits des tiers, et notamment les droits de propriété intellectuelle. Dans l'hypothèse où la thèse comporterait des éléments protégés par un droit quelconque, l'auteur doit solliciter les autorisations nécessaires à leur utilisation, leur reproduction et leur représentation auprès du ou des titulaires des droits. L'auteur est responsable du contenu de sa thèse. Il garantit l'Université contre tout recours. Elle ne pourra en aucun cas être tenue responsable de l'atteinte aux droits d'un tiers

Remerciements

A mon Président de jury, Monsieur le Docteur Michel LE GALL,

*Je vous remercie de me faire l'honneur de présider ce jury de thèse.
Merci pour votre soutien, votre dévouement à notre égard, votre humilité et votre disponibilité. Vous êtes toujours présent pour nous, pour nous épauler, pour nous transmettre vos connaissances. Ce fut très enrichissant d'apprendre à vos côtés.*

Toujours motivé et plein d'énergie chaque jour, vous rendez ainsi ce service agréable et rassurant. Grâce à cette ambiance familiale que vous avez su instaurer, j'ai passé un très bel internat et je vous en remercie.

Je vous remercie de nous transmettre votre passion pour l'orthopédie dento-faciale, de toujours nous tirer vers le haut et nous donner envie de donner le meilleur de nous-mêmes.

Je vous prie de bien vouloir trouver ici l'expression de ma profonde admiration.

A Monsieur le Docteur Philippe ROCHE-POGGI,

Je vous remercie d'avoir accepté de siéger dans mon jury de thèse. Je vous suis reconnaissante pour votre gentillesse ainsi que pour votre enseignement de grande qualité.

Ce fut un plaisir de partager mes vacations d'urgence à vos côtés, vos précieux conseils cliniques m'auront beaucoup appris. De plus, j'ai apprécié nos discussions car comme nous partageons les mêmes origines, elles me rappelaient mon île qui me manquait tant.

Veillez trouver ici le témoignage de tout mon respect.

A ma directrice de thèse, Madame le Docteur Camille PHILIP-ALLIEZ

Je vous remercie de m'avoir fait l'honneur de diriger ce travail de thèse. Merci pour votre présence, votre gentillesse et votre douceur. Vous êtes un véritable soleil, c'est un plaisir de travailler avec vous.

Merci car vous m'avez appris qu'avec de la volonté et de la confiance en soi on peut tout réussir. Je vous remercie pour m'avoir encadrée et rassurée tout au long de mes études.

Recevez ici toute ma reconnaissance et mon respect.

A Madame le Docteur Canelle ARNIER,

Je vous remercie d'avoir accepté de faire partie de mon jury de thèse. Merci pour votre gentillesse, votre pédagogie et votre rigueur. Vous m'avez énormément appris avec vos conseils cliniques et techniques et je vous remercie pour votre patience. Vous répondez toujours présente quand nous avons besoin de vous et vous avez toujours envie de transmettre vos connaissances, c'est un plaisir de travailler avec vous.

Je vous remercie également pour m'avoir rassurée, aidée et donné de nombreux conseils pour mon exercice futur en Corse.

Je vous prie de recevoir ma profonde gratitude et reconnaissance.

Table des matières

Introduction	- 3 -
I. Rappels sur la croissance mandibulaire	- 5 -
I.1. Généralités	- 5 -
I.2. Embryologie de la mandibule	- 6 -
I.2.1. Le chondrocrâne	- 6 -
I.2.2. Formation de la mandibule	- 9 -
I.2.2.1. Formation de la branche horizontale	- 9 -
I.2.2.2. Formation de la région symphysaire	- 10 -
I.2.2.3. Formation de la branche montante, du coroné et du condyle	- 10 -
I.2.2.4. Formation de l'articulation temporo-mandibulaire.....	- 11 -
I.3. Croissance du condyle	- 12 -
I.3.1. Structure du condyle	- 12 -
I.3.2. Potentiel de croissance	- 13 -
I.3.3. Direction de croissance	- 14 -
I.3.4. Rythme de croissance	- 15 -
I.4. Croissance de la mandibule	- 16 -
I.4.1. Théories explicatives sur la croissance	- 16 -
I.4.1.1. Le courant génétique	- 16 -
I.4.1.2. Le courant fonctionnel.....	- 16 -
I.4.1.3. Le courant synthétique	- 17 -
I.4.2. Schéma de la croissance mandibulaire	- 18 -
I.4.3. Les rotations mandibulaires	- 20 -
I.4.3.1. Etude de BJÖRK	- 20 -
I.4.3.2. Les rotations antérieures.....	- 21 -
I.4.3.3. Les rotations postérieures	- 23 -
I.4.3.4. Signes structuraux de la croissance	- 24 -
I.4.3.5. Conception ce RICKETTS	- 26 -
II. Modélisation de la mandibule	- 27 -
II.1. Définition et intérêts de la modélisation 3D	- 27 -
II.2. Propriétés mécaniques de l'os mandibulaire	- 28 -
II.2.1. Essais mécaniques	- 28 -

II.2.2. Module d'Young de l'os cortical mandibulaire.....	- 30 -
II.3. Protocole de mise en œuvre.....	- 32 -
II.3.1. Importation des fichiers	- 32 -
II.3.2. La segmentation	- 33 -
II.3.4. Modèle éléments finis	- 34 -
II.4. Intérêts cliniques de la modélisation mandibulaire	- 36 -
II.4.1. La biomécanique faciale.....	- 36 -
II.4.2. Traumatologie faciale.....	- 36 -
II.4.3. Chirurgie orthognathique	- 36 -
II.4.4. Occlusodontie.....	- 37 -
II.4.5. Implantologie	- 37 -
II.4.6. Orthodontie	- 38 -
II.5. Evaluer la croissance mandibulaire à l'aide de la modélisation 3D	- 39 -
II.5.1. Intérêts et limites	- 39 -
II.5.2. Méthodes.....	- 40 -
II.5.2.1. Méthode à l'aide de landmarks	- 40 -
II.5.2.2. Méthode à l'aide de superpositions sur les structures stables de BJÖRK ..	- 45 -
Conclusion	- 48 -
Bibliographie.....	I
Table des illustrations.....	V
Table des Tableaux.....	X

Introduction

La croissance cranio-faciale est l'expression complexe de phénomènes génétiquement déterminés et de phénomènes adaptatifs suivant l'expression des matrices fonctionnelles environnantes. Elle a lieu d'une part par le jeu des sutures membraneuses et cartilagineuses et d'autre part par des phénomènes de remodelage périosté. La croissance cranio-faciale est donc sous l'influence de facteurs héréditaires mais également de facteurs environnementaux morphogéniques. En effet, si le potentiel de croissance est en grande partie sous la dépendance de facteurs génétiques, il ne peut s'exprimer sans l'influence de l'environnement. La croissance cranio-faciale subit l'influence des grandes fonctions oro-faciales dont la face est le support : ventilation, mastication, déglutition et phonation.

Il est indispensable de connaître les phénomènes de la croissance cranio-faciale car ils interviennent dans les traitements en orthopédie dento-faciale dès qu'ils s'adressent aux jeunes patients. L'orthodontie n'est pas seulement une science qui permet un alignement dentaire mais elle a également pour objectif de rétablir un bon équilibre facial en ajustant la croissance de la face supérieure et de la face inférieure. Ceci, bien entendu, pour obtenir un résultat esthétique mais aussi, pour installer un meilleur équilibre facial fonctionnel et une bonne stabilité du traitement.

Les appareillages utilisés à des fins orthopédiques agissent sur les bases osseuses en influençant la croissance faciale. Il faut donc prendre en considération le développement de l'enfant et plus particulièrement la croissance faciale. Il est donc important de situer l'enfant sur sa courbe de croissance, notamment pouvoir déterminer la période du pic pubertaire, pour entreprendre le traitement à la période la plus favorable. Le résultat d'un traitement orthodontique dépend souvent de la croissance du complexe cranio-facial et, en particulier de la croissance mandibulaire.

La croissance mandibulaire a été étudiée de nombreuses fois par ENLOW (1) et MOSS (2) au XX^{ème} siècle mais l'évolution des techniques et le progrès dans le domaine informatique permettent d'appréhender plus précisément ce phénomène. La croissance mandibulaire a toujours été analysée sur des radiographies 2D mais grâce à la modélisation 3D une analyse en trois dimensions est maintenant possible. Cela permet de mieux comprendre ce processus de croissance.

La première partie sera consacrée à des rappels sur la croissance de la mandibule, indispensables à connaître afin d'en comprendre le mécanisme.

La seconde partie développera l'intérêt de la modélisation 3D pour étudier la croissance mandibulaire.

I. Rappels sur la croissance mandibulaire

I.1. Généralités

La mandibule, os impair et médian, est le seul os mobile de la face. Elle est reliée postérieurement à la base du crâne par l'intermédiaire des condyles dans les cavités glénoïdes de l'os temporal (articulation temporo-mandibulaire) et antérieurement au maxillaire (articulation dento-dentaire) (3).

La mandibule possède une forme de fer à cheval à concavité postérieure. Elle est composée de trois parties :

- Le corps de la mandibule (ou corpus) : impair et médian qui sert de support à l'implantation des dents.
- Les branches montantes (ou ramus) qui portent à leur extrémité supérieure :
 - Le condyle mandibulaire, s'articulant avec l'os temporal pour former l'articulation temporo-mandibulaire, impliquée dans les mouvements de la mandibule.
 - Le processus coronoïde servant d'attache au muscle temporal qui a pour rôle de soulever la mandibule pendant la mastication.

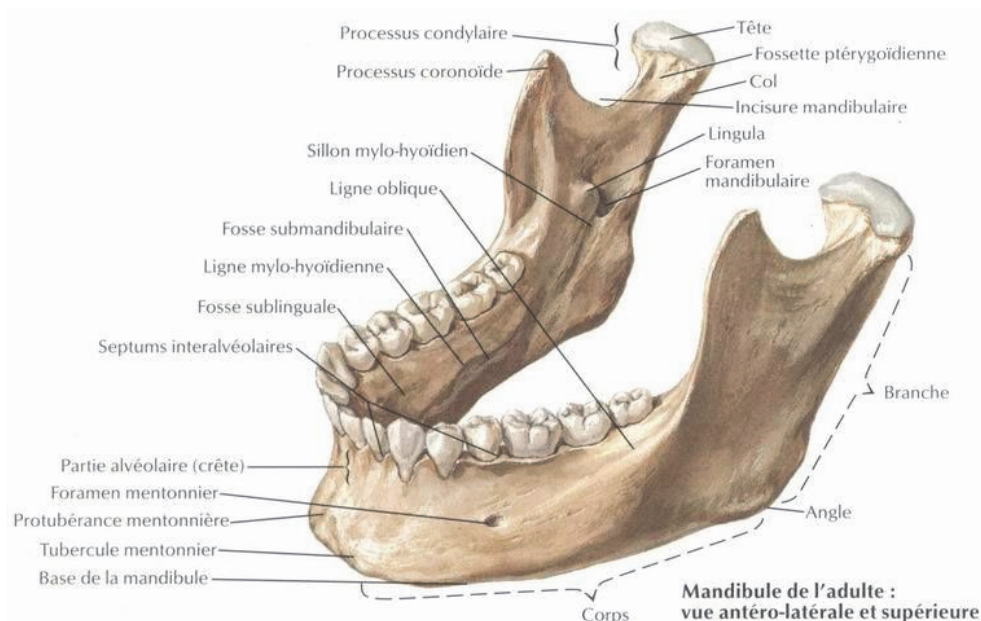


Figure 1 : Vue antéro-latérale supérieure d'une mandibule adulte (4).

I.2. Embryologie de la mandibule

I.2.1. Le chondrocrâne

Le massif crânio-facial est formé à partir des bourgeons faciaux :

- Le bourgeon fronto-nasal permet la formation du neurocrâne, et participe à la formation du viscérocrâne,
- Les deux bourgeons maxillaires et mandibulaires (issus du premier arc branchial) participent à la formation du viscérocrâne.

Le neurocrâne peut être divisé en deux éléments :

- Le neurocrâne cartilagineux ou chondrocrâne qui formera la base du crâne. Il se développe à partir d'une maquette cartilagineuse qui se transforme en tissu osseux par ossification endochondrale,
- Le neurocrâne membraneux ou desmocrâne qui se forme par ossification membraneuse.

La face (viscérocrâne) se forme par ossification mixte, à prédominance membraneuse.

L'ossification membraneuse se réalise lorsque l'ossification se fait directement au sein du mésenchyme. Lorsque l'os est formé à partir d'une maquette cartilagineuse (cartilage hyalin), c'est l'ossification endochondrale. Pour certains os, il y a l'association des deux phénomènes, il s'agit alors d'une ossification mixte (3).

Le neurocrâne cartilagineux ou chondrocrâne consiste initialement en une série de points de cartilage qui vont fusionner puis par ossification endochondrale, former la base du crâne (5).

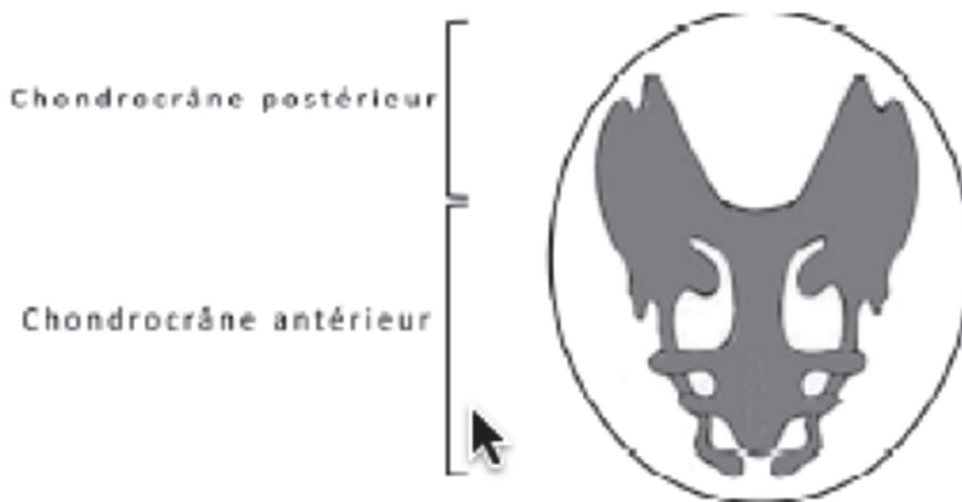


Figure 2 : Vue du chondrocrâne par sa face supérieure avant le 2^{ème} mois in utero (6).

On distingue le chondrocrâne postérieur et le chondrocrâne antérieur.

L'ossification va se dérouler en plusieurs étapes :

- La chondrogenèse aboutissant à la formation d'une ébauche cartilagineuse ;
- La poursuite de la différenciation terminale des chondrocytes jusqu'au stade hypertrophique ;
- La calcification de la matrice cartilagineuse ;
- L'invasion vasculaire du cartilage calcifié ;
- La résorption de la matrice cartilagineuse ;
- Remplacement du cartilage par de l'os endochondral.

Le chondrocrâne forme dans sa partie antérieure une image de "loup de carnaval" comme l'a évoqué MUGNIER (6). Il émet en bas et en avant : une lame cartilagineuse verticale qui arme le septum nasal médian ; deux auvents latéraux accolés par leurs bords internes qui constituent la capsule nasale ; des tiges de cartilages primaires, les cartilages de Meckel et les cartilages de Reichert (7).

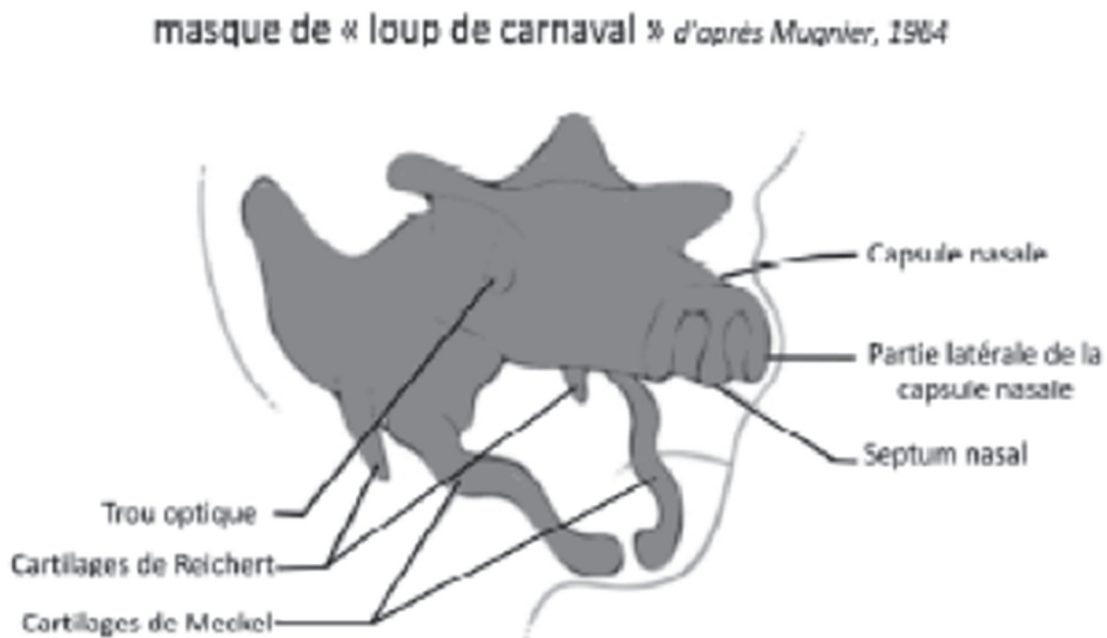


Figure 3 : Masque de « loup de Carnaval » d'après MUGNIER (6).

L'ectomésenchyme peuplant le premier arc pharyngé va donner naissance à deux cartilages primaires, les cartilages de Meckel.

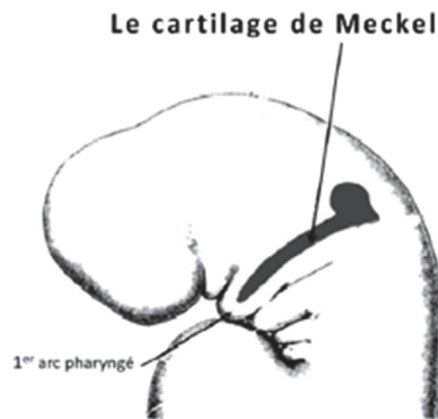


Figure 4 : Le cartilage de Meckel provient du premier arc pharyngé (8).

Le cartilage de Meckel est considéré comme le tuteur de la croissance de la mandibule. Il est formé de deux languettes cartilagineuses qui se rejoignent au niveau de la future symphyse mentonnière. Il est visible avant tout point d'ossification qui apparaîtra en dehors du cartilage de Meckel, en même temps que se développera l'innervation mandibulaire, avec l'apparition des nerfs mandibulaires et de ses différentes branches, linguale, alvéolaire, mentonnière et incisive.

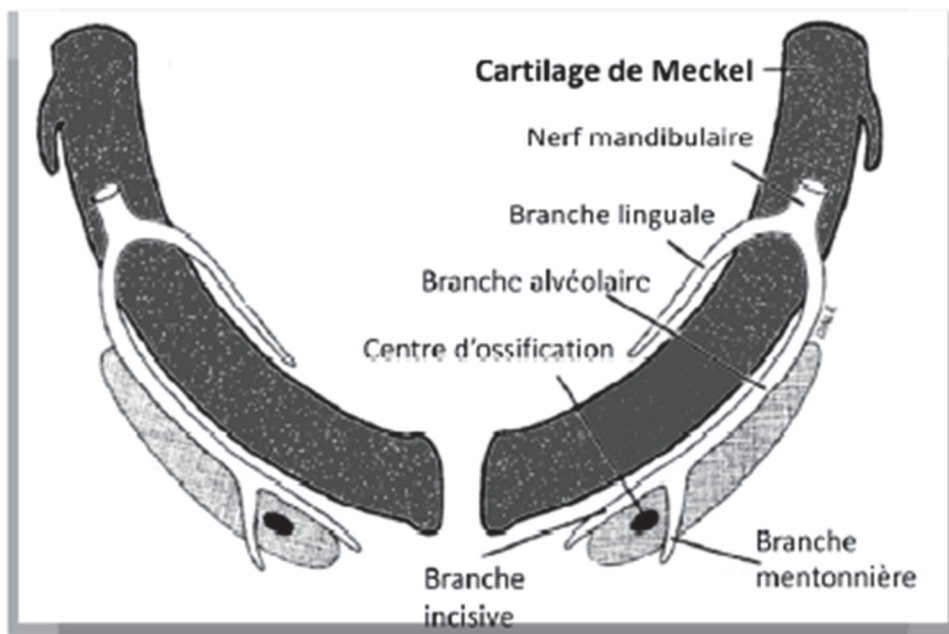


Figure 5 : Le cartilage de Meckel : tuteur de l'ossification de la mandibule (6).

I.2.2. Formation de la mandibule

I.2.2.1. Formation de la branche horizontale

Le corps de la mandibule va se former en dehors du cartilage de Meckel par ossification membraneuse. Les premiers points d'ossification de la mandibule apparaissent (un de chaque côté) aux environs du quarantième jour embryonnaire, dans le mésenchyme situé en dehors du cartilage de Meckel, en regard du nerf mandibulaire.

Ces points d'ossification se développent par ossification progressive de l'ectomésenchyme situé exclusivement en dehors du cartilage de Meckel. Ils vont former une lame osseuse : la lame externe qui va s'épaissir et émettre un prolongement interne qui constituera la lame interne. Ils vont donc former une gouttière osseuse comportant une lame externe et interne (9).

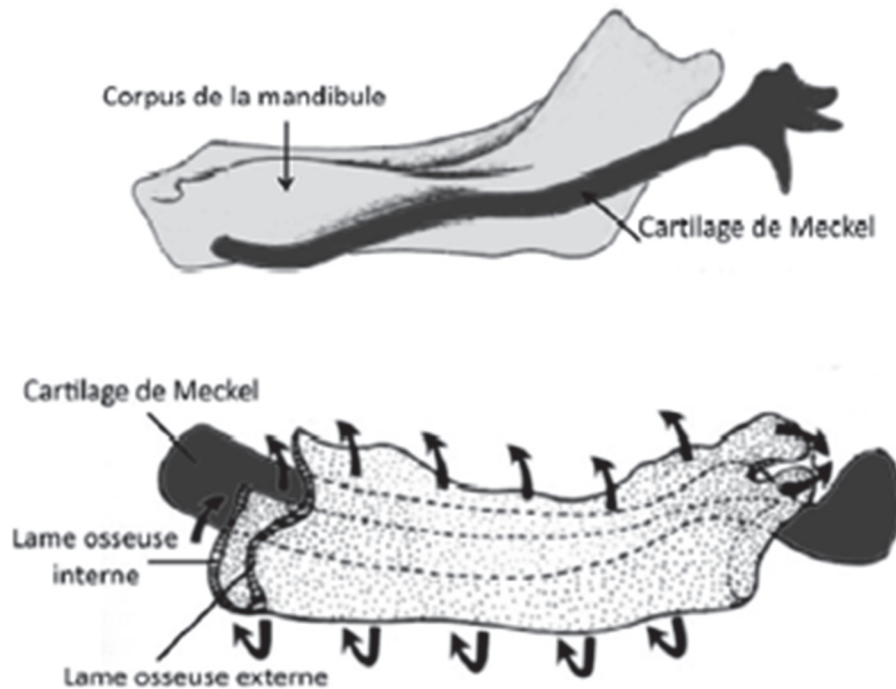


Figure 6 : Ossification du corps mandibulaire en dehors du cartilage de Meckel (6).

Il se forme, ainsi, une gouttière osseuse, ouverte en haut, dans laquelle se trouvent de bas en haut (9) :

- Une veine dans le canal de Serre ;
- Le nerf mandibulaire et l'artère dentaire inférieure ;
- Une gouttière folliculaire qui comporte tous les follicules dentaires.

Le follicule de la première molaire temporaire va produire de l'os alvéolaire, et va ainsi transformer la gouttière mandibulaire en canal. Les mêmes phénomènes se produisent plus en arrière, au niveau de la deuxième molaire temporaire.

Les branches horizontales mandibulaires s'étendent donc d'avant en arrière autour du nerf mandibulaire d'où le nom d'« unité neurale » qui leur a été donné par MOSS (9).

1.2.2.2. Formation de la région symphysaire

Un point osseux mentonnier se forme dans le tissu conjonctif de la région symphysaire, il se soudera vers le neuvième mois avec le prolongement antérieur de l'os mandibulaire. La trace de cette soudure n'est plus visible au bout de deux ans.

Selon certains auteurs, l'extrémité antérieure du cartilage de Meckel deviendrait de petites pièces osseuses appelées ossicula mentalia de Meckel. Une petite zone de la partie antérieure de la mandibule serait donc due à un phénomène de substitution. Ces petits os prendraient une part importante dans le développement ultérieur de la saillie mentonnière.

Le cartilage de la symphyse mentonnière forme une synchondrose qui contribue à la croissance en largeur de la mandibule pendant les premiers mois de la vie. Elle cesse son activité avant la fin de la première année d'après SCOTT et SYMONS (5). Pour SICHER (5), les deux moitiés de la mandibule opèrent une jonction qui ne joue aucun rôle significatif en tant que zone de croissance, bien qu'elle soit identique à une suture (5).

1.2.2.3. Formation de la branche montante, du coroné et du condyle

La gouttière mandibulaire s'infléchit vers le haut pour former la plus grande partie de la branche montante.

Vers le troisième ou le quatrième mois, des cartilages secondaires apparaissent au niveau de la mandibule. Il s'agit des cartilages angulaires, coronéidiens et condylien. Leur existence est de courte durée : six à huit mois pour le cartilage angulaire, à la naissance pour le cartilage coronéidien et jusqu'à vingt-et-un ans pour le cartilage condylien (5).

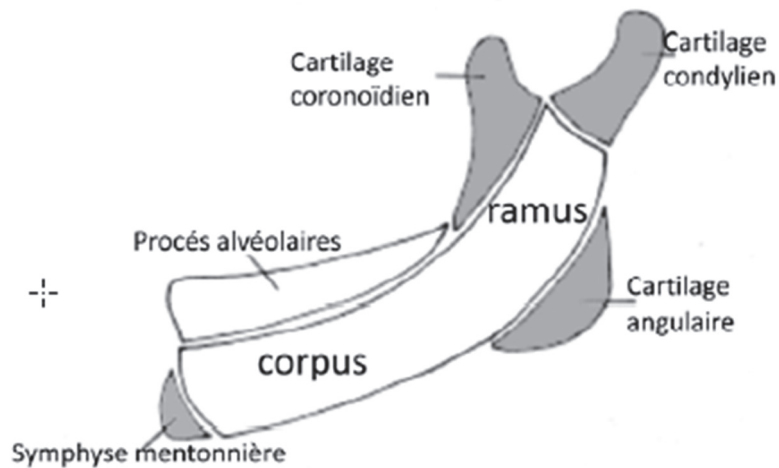


Figure 7 : Les cartilages secondaires de la mandibule (6).

Le ramus et le corpus de la mandibule se développent par ossification membraneuse. Cependant, la croissance est réalisée par ces cartilages secondaires.

1.2.2.4. Formation de l'articulation temporo-mandibulaire

Le cartilage condylien est séparé de la partie membraneuse du temporal par du tissu conjonctif qui se transformera pour devenir un tissu fibreux puis fibro-cartilagineux.

Ce tissu se compose de trois zones :

- La partie inférieure entoure la tête du noyau condylien et devient la surface articulaire inférieure de l'articulation temporo-mandibulaire ;
- La partie supérieure recouvre le condyle et devient la surface articulaire supérieure ;
- La partie moyenne forme le ménisque inter articulaire.

La partie non articulaire du condyle vient de la transformation du cartilage condylien et la zone articulaire est due à la différenciation du conjonctif péri-condylien. Le condyle a donc une double origine (10).

I.3. Croissance du condyle

I.3.1. Structure du condyle

Le cartilage condylien est le centre le plus important de la croissance mandibulaire. Il contribue à l'accroissement en hauteur et en largeur de la mandibule (5).

On distingue histologiquement 5 zones :

- Une zone superficielle de fibrocartilage qui forme la zone articulaire du condyle ;
- Un périchondre, comportant des précurseurs de cellules cartilagineuses ou chondroblastes ;
- Une zone intermédiaire de cartilage hyalin où les chondrocytes se différencient et prolifèrent. Dans la zone profonde, les chondrocytes deviennent hypertrophiques ;
- Une zone de cartilage calcifié où les chondrocytes hypertrophiques meurent par apoptose ;
- Et enfin une zone d'ossification endochondrale au sein de laquelle le cartilage est résorbé et remplacé par de l'os spongieux.

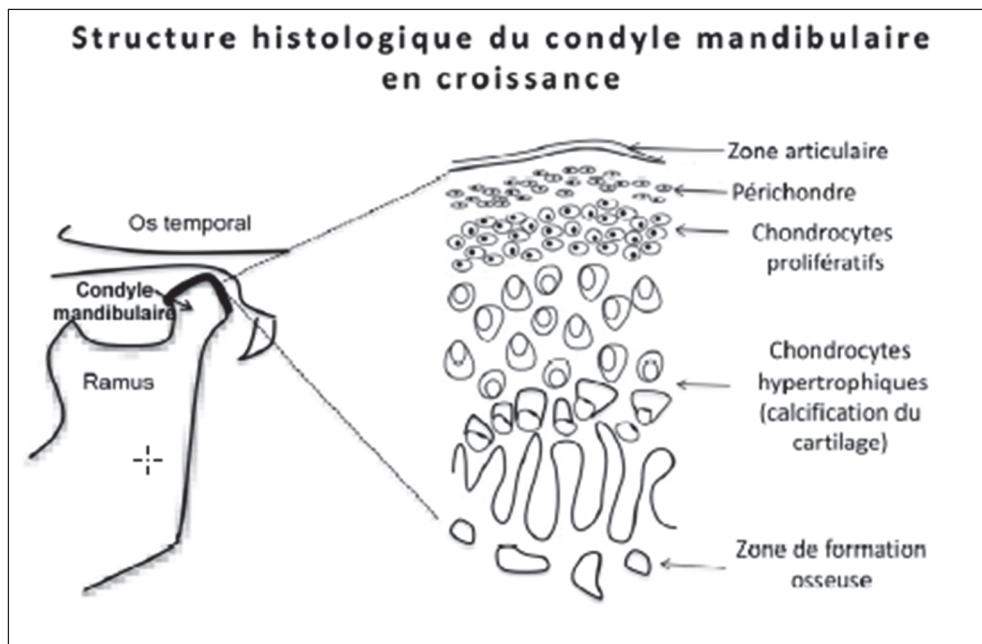


Figure 8 : Structure histologique du condyle mandibulaire en croissance (6).

I.3.2. Potentiel de croissance

Chez l'Homme, le condyle a pour rôle principal de stabiliser le corps mandibulaire et de permettre sa bonne mobilisation, mais il contribue aussi à son avancement et à son abaissement (notamment de sa partie postérieure). A ce titre, il possède un rôle actif dans la croissance mandibulaire, variable selon le potentiel primaire du cartilage condylien.

Bien que le cartilage condylien soit d'apparition et de type secondaire, il possède néanmoins un potentiel autonome de croissance, variable selon les individus. Ce potentiel et la capacité de réponse du condyle aux hormones de croissance influent sur la position du corps mandibulaire, donc indirectement sur sa croissance (9).

Selon WEIMANN et SICHER (9), la croissance de la mandibule dépend essentiellement de l'activité du cartilage condylien. Celui-ci est un centre de croissance très spécial et très actif, qui ne peut se comparer à aucun autre cartilage. Il s'accroît par apposition à partir du tissu conjonctif de recouvrement.

Selon ENLOW (9), la croissance sagittale de la mandibule se fait essentiellement au niveau du condyle par l'action de son cartilage. Le condyle étant recouvert par une épaisse couche de tissu conjonctif, il existe non seulement une croissance appositionnelle classique mais également une croissance interstitielle lui permettant d'augmenter en épaisseur et ainsi de se déplacer en haut et en arrière. Le mouvement lui permet également d'être responsable en partie de la croissance verticale de la mandibule, et également de la croissance transversale du fait de l'orientation divergente des branches montantes.

En revanche selon KOSKI (9), le cartilage condylien n'est pas l'unique responsable de l'accroissement antéro-postérieur de la mandibule. En effet, la condylectomie bilatérale et même l'absence congénitale de la branche montante n'ont que peu d'effet sur la croissance du reste de la mandibule. D'après KOSKI (9), « si l'on peut considérer le cartilage condylien comme site de croissance, on ne doit en aucun cas penser qu'il peut être un centre de croissance ».

I.3.3. Direction de croissance

L'étude architecturale et structurale de la mandibule donne de bons renseignements sur le potentiel de croissance du condyle.

La situation verticale de l'angle mandibulaire et l'aspect de la région pré-angulaire (donnée constitutionnelle, « primaire ») et de l'orientation de l'apophyse condylienne (phénomène « secondaire », adaptatif) reflètent bien ce potentiel.

Ainsi en cas de croissance insuffisante du condyle, la partie postérieure du bord basilaire de la mandibule (et du plan d'occlusion) est située au-dessus de leur niveau normal, il existe une encoche pré-angulaire accentuée et le condyle mandibulaire est petit (9).

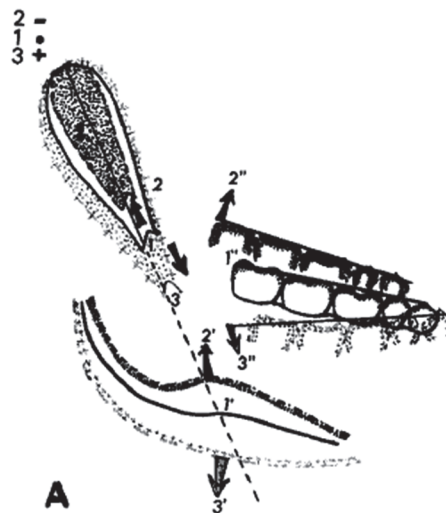


Figure 9 A : Croissance insuffisante du condyle mandibule (9).

C'est l'inverse en cas d'hypercondylie, le bord basilaire est plus abaissé et plus horizontal que normalement, et l'encoche pré-angulaire est remplacée par une convexité (aspect en « rocking chair »).

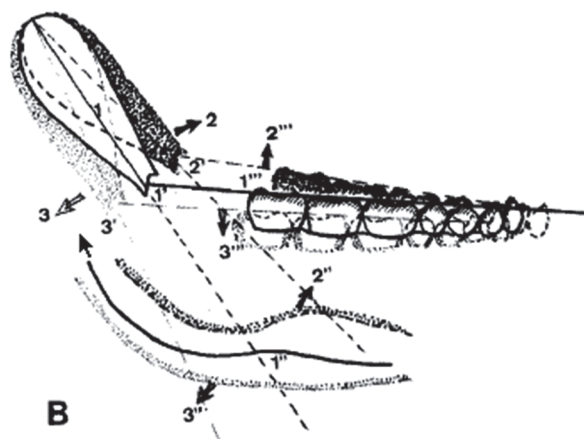


Figure 9 B : Croissance importante du condyle mandibulaire (9).

Pour une même quantité de croissance condylienne, le niveau vertical, l'orientation et l'aspect du bord basilaire peuvent aussi varier, en fonction de l'orientation du condyle.

I.3.4. Rythme de croissance

Selon BJÖRK (11), les courbes de croissance staturale, suturale et condylienne présentent le même profil, avec pic de croissance pubertaire.

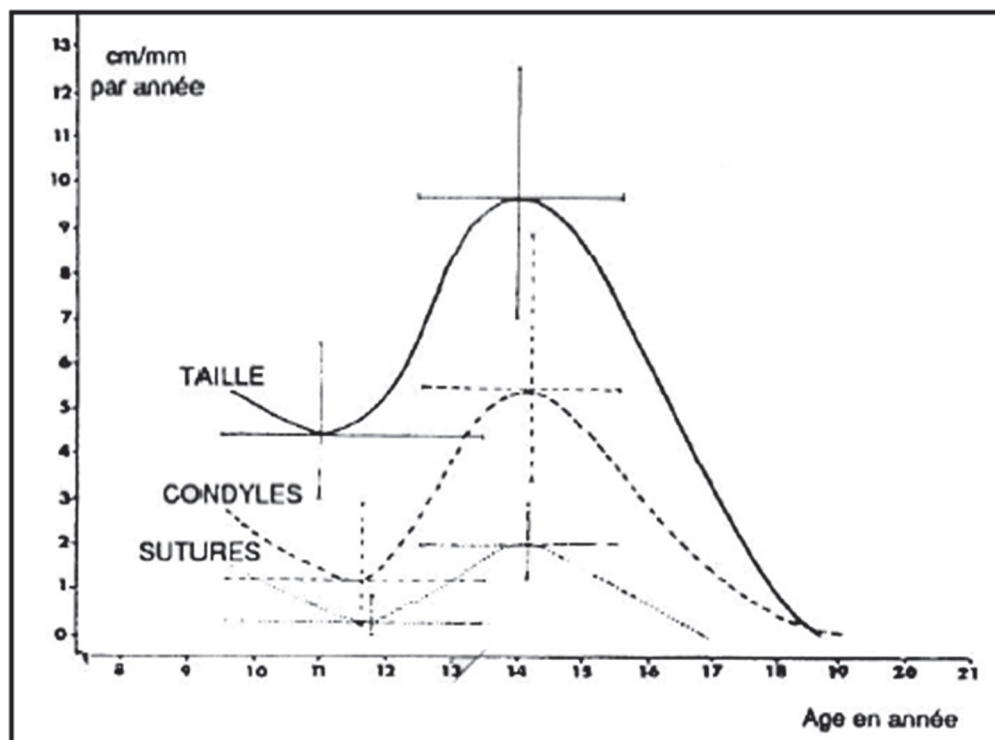


Figure 10 : Courbes de croissance staturale, suturale et condylienne (11).

Selon BJÖRK (11), on constate :

- Une similitude entre les courbes de croissance suturale, staturale et condylienne malgré un décalage de la croissance staturale ;
- Une poursuite de la croissance condylienne chez les sujets en classe I squelettique au-delà de la croissance suturale et un peu après la croissance staturale, jusqu'à 22 ans chez le garçon et 18 ans chez la fille. Selon d'autres auteurs, cette croissance continuerait même encore plus tard.

I.4. Croissance de la mandibule

I.4.1. Théories explicatives sur la croissance

Les théories explicatives de la croissance faciale ont toujours servi de support fondamental aux courants thérapeutiques en orthodontie. Trois courants peuvent se dégager :

- Un courant génétique,
- Un courant fonctionnel,
- Un courant synthétique.

Les théories explicatives de la croissance faciale reposaient tout d'abord sur un rôle prépondérant des facteurs génétiques dont l'expression morphologique ne pouvait être affectée, ni par les tissus adjacents, ni par l'environnement fonctionnel. Par la suite, de nombreuses études ont montrées que les tissus mous et les fonctions en association avec les facteurs génétiques étaient responsables de la croissance (2).

I.4.1.1. Le courant génétique

Il est principalement représenté par la théorie de WEIMANN et SICHER (2) qui affirme que la croissance se fait par des phénomènes d'apposition-résorption sur les surfaces périostées et par croissance suturale.

Les sutures jouent un rôle actif et comme les cartilages de conjugaison, elles bénéficient de potentiel génétique de croissance. La régulation de la croissance suturale est contrôlée par des facteurs génétiques intrinsèques et seule la donne génétique établit une liaison entre les différents constituants cranio-faciaux qui font chacun leur propre croissance en harmonie avec leurs voisins (2).

I.4.1.2. Le courant fonctionnel

Selon MOSS (2), la matrice fonctionnelle est constituée de tous les tissus, organes, cellules non squelettiques et espaces fonctionnels nécessaires à l'accomplissement d'une fonction. Les matrices périostées agissent directement par modelage osseux (transformation active par apposition ou par résorption périostées) et les matrices capsulaires indirectement en augmentant de volume et repoussant les parois squelettiques du fait de leur expansion (translation passive).

La translation active est directement associée aux matrices fonctionnelles périostées péri mandibulaires (tendons, muscles, espaces cellulaires, dents, vaisseaux, nerfs...), à leurs fonctions et à leurs croissances qui modifient l'environnement matriciel au niveau de l'interface avec le squelette.

La translation passive de la mandibule, elle, est due à l'accroissement du contenu et des fonctions de la capsule orale (langue, système dentaire, mastication) qui transportent littéralement la mandibule en bas et en avant (2).

1.4.1.3. Le courant synthétique

La théorie synthétique est fondée sur la théorie de VAN LIMBORGH (2). Il reconnaît à chacune des précédentes théories des parcelles de vérité et va les harmoniser.

Selon cette théorie, les facteurs génétiques, épigénétiques et environnementaux contrôlent la croissance.

Les facteurs génétiques intrinsèques interviennent d'une manière différenciée sur la croissance des cartilages. Leur action est forte sur les cartilages primaires de la base du crâne et sur l'expansion faciale du septum nasal cartilagineux. Elle est faible sur le cartilage secondaire condylien. Les facteurs épigénétiques généraux interviennent aussi d'une manière différente sur ces constituants cartilagineux.

Les facteurs environnementaux locaux (actions mécaniques de la confrontation occluso-articulaire, de la langue, du frein méniscal et du ptérygoïdien latéral, association ptérygo-condylien...) ou généraux (vascularisation du frein méniscal postérieur) sont également impliqués dans les mécanismes de croissance.

Selon DELAIRE (5), le concept de quantité de croissance uniquement d'origine condylienne n'est plus d'actualité. Il faut envisager celle de l'ensemble de la mandibule. En effet, il y a des cas où il n'y a pas de condyle (hypo ou acondylie), ni même de ramus alors que le corps mandibulaire est subnormal. C'est le cas, par exemple, dans certaines microsomies hémifaciales. SARLAT (12) a également montré que la résection du condyle chez le jeune singe rhésus n'empêche pas la croissance convenable de la mandibule.

Selon DELAIRE (12), le ligament sphéno-mandibulaire qui est un reliquat de la gaine du cartilage de Meckel, est étendu entre l'épine du sphénoïde et l'épine de spix. Le corps mandibulaire avance sous l'influence notamment des poussées linguales, cela met en tension

ce ligament, qui en tirant sur le périoste de la région spigienne, entraîne une apposition périostée. L'ossification du corps mandibulaire est donc due à la fonction.

La mandibule, dépend en partie pour sa croissance d'un léger potentiel primaire (génétique) du cartilage condylien, mais surtout de ses capacités adaptatives de croissance en réponse à l'environnement au niveau de ses deux sites de croissance que sont le condyle et la région spigienne.

I.4.2. Schéma de la croissance mandibulaire

Ainsi la croissance condylienne n'est pas le seul phénomène qui se poursuit. Sur toute la surface de l'os mandibulaire, il existe toute une série de zone d'apposition et de résorption osseuse, qui modèle sans cesse l'os, non seulement dans ses formes mais également à un degré moindre, dans sa taille. C'est la croissance modelante (5).

Selon ENLOW (1) :

- Au niveau du col du condyle :
 - Apposition osseuse au niveau des faces postérieures et antéro-interne ;
 - Résorption osseuse sur la face antéro-externe.

- Au niveau du coroné :
 - Apposition postéro-interne ;
 - Résorption antéro-externe.

- Au niveau de l'échancrure sigmoïde :
 - Apposition interne et au niveau du rebord supérieur ;
 - Résorption externe.

- Au niveau de l'angle goniale :
 - Apposition externe et postérieure ;
 - Résorption interne.

- Au niveau de la branche montante :
 - Apposition postérieure ;
 - Apposition sur les 2/3 inférieurs de la face externe et résorption du dessus ;
 - Résorption sous la ligne oblique interne, face externe.

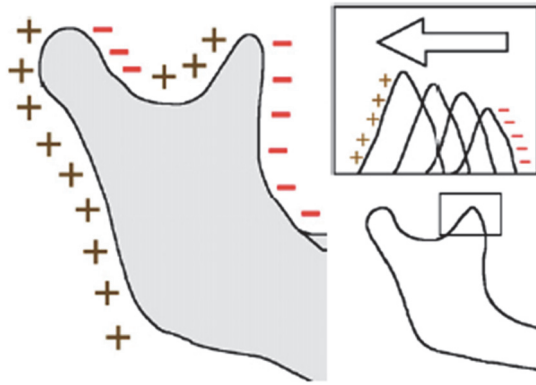


Figure 11 : Phénomènes d'apposition/résorption de la branche montante mandibulaire (1).

- Au niveau de la branche horizontale :
 - Apposition face externe ;
 - Apposition face inférieure ;
 - Apposition face interne au-dessus de la ligne oblique interne et une résorption au-dessous.

- Au niveau de la symphyse :
 - Apposition inférieure ;
 - Apposition au niveau du pogonion ;
 - Résorption au niveau du point B.

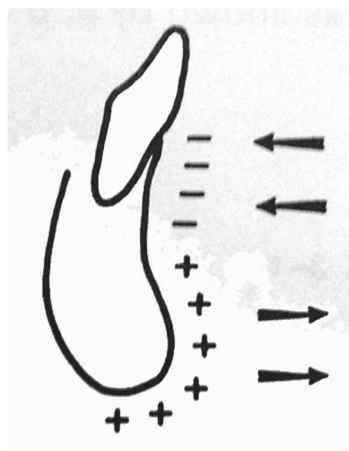


Figure 12 : Phénomènes d'apposition/résorption au niveau de la symphyse (1).

La croissance alvéolaire intervient peu dans la croissance en largeur et sagittale. Elle est un élément important de l'accroissement en hauteur. Le développement de l'os alvéolaire disparaît avec la chute des dents et ne se forme pas dans les cas d'anodontie.

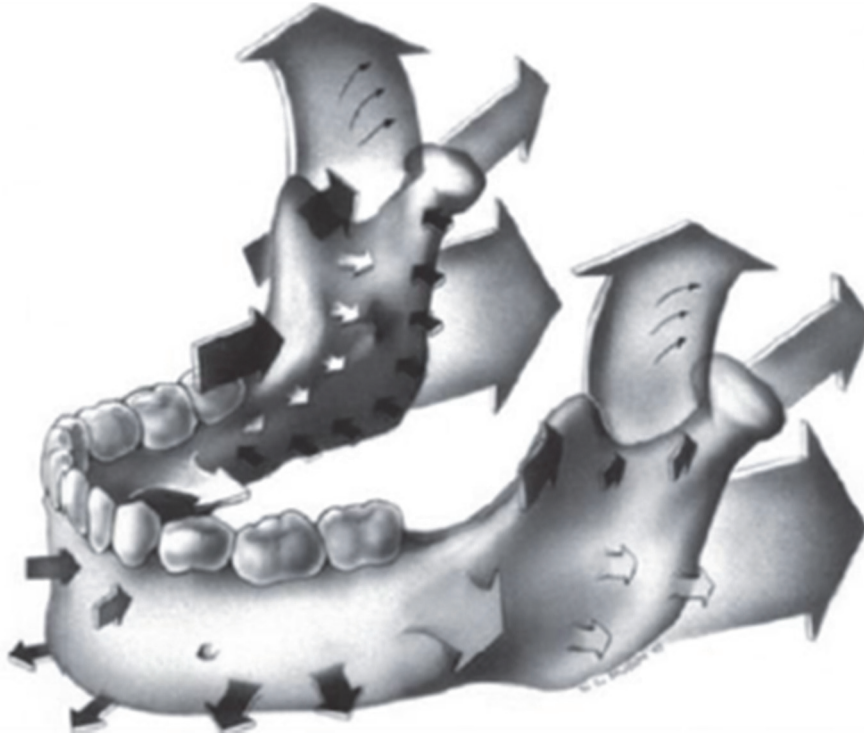


Figure 13 : Phénomènes d'apposition/résorption de la mandibule (5).

La croissance mandibulaire est un phénomène complexe qui se produit en 3 dimensions jusqu'à la fin de l'adolescence. La première dimension à cesser de croître est la dimension transversale et ceci se produit relativement tôt vers l'âge de 5 – 6 ans ou lorsque les premières molaires permanentes ont fait éruption. Les dimensions antéro-postérieure et verticale continuent, elles, leur croissance jusqu'à l'adolescence par des phénomènes de résorptions appositions osseuses.

I.4.3. Les rotations mandibulaires

I.4.3.1. Etude de BJÖRK

BJÖRK (13) met en place des implants en tantale sous anesthésie locale au maxillaire et à la mandibule. Ces implants sont faciles à insérer car ils ont des dimensions réduites et sont fortement radio-opaques.

Ils sont implantés dans des zones considérées comme stables :

- A la mandibule :
 - Dans la symphyse mentonnière sous les apex ;
 - Sous les trous mentonniers ;
 - En avant du ramus, en dehors et en bas.

Ces implants sont d'excellents marqueurs de permanence de l'os sur les radiographies du fait de l'absence de croissance interstitielle dans le tissu osseux squelettique. Leur fiabilité est contrôlée en s'assurant de leur stabilité les uns par rapport aux autres.

Le déplacement de ces implants par rapport à la base du crâne révèle l'intensité et le sens de la rotation de croissance.

La superposition sur ces implants de deux radiographies successives permet de préciser les transformations associées aux rotations de croissance mais également de déterminer des zones anatomiques de stabilité :

- A la mandibule :
 - Contour interne inférieur de la symphyse ;
 - Canal dentaire inférieur ;
 - Limite cervicale des cryptes osseuses des germes avant l'édification radiculaire.

BJÖRK (13) démontre ainsi que la croissance condylienne et les modifications provoquées par le phénomène de remodelage font que la mandibule effectue une rotation au cours de sa croissance. Les variations individuelles sont telles que la rotation mandibulaire ne se fera pas toujours dans la même direction.

BJÖRK (13) établit l'existence de trois rotations antérieures et de deux rotations postérieures.

1.4.3.2. Les rotations antérieures

La rotation antérieure de type I :

- Centre de rotation : le centre du condyle ;
- Causes :
 - Perte de dents ;
 - Pression musculaire trop forte.
- Conséquences : Deep bite

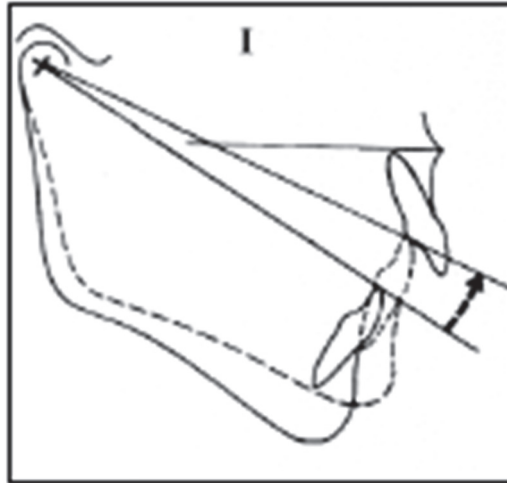


Figure 14 : Rotation antérieure de type I (11).

La rotation antérieure de type II :

- Centre de rotation : bord libre des incisives inférieures
- Causes :
 - Développement trop marqué de la hauteur postérieure de la face ;
 - Insertion musculaires trop antérieures.

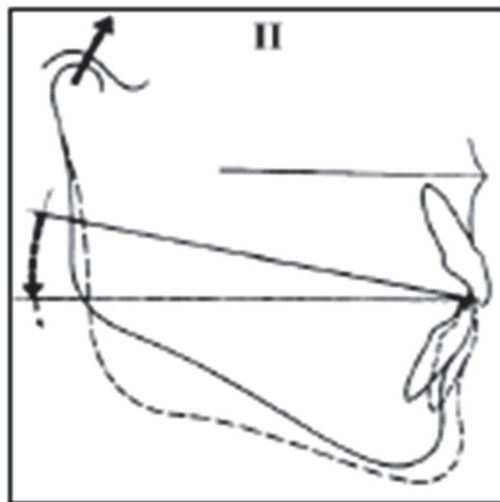


Figure 15 : Rotation antérieure de type II (11).

La rotation antérieure de type III :

- Centre de rotation : au niveau des prémolaires.
- Causes :
 - Hypodéveloppement de la hauteur antérieure ;
 - Hyperdéveloppement de la hauteur postérieure de la face.
- Conséquence : Deep bite.

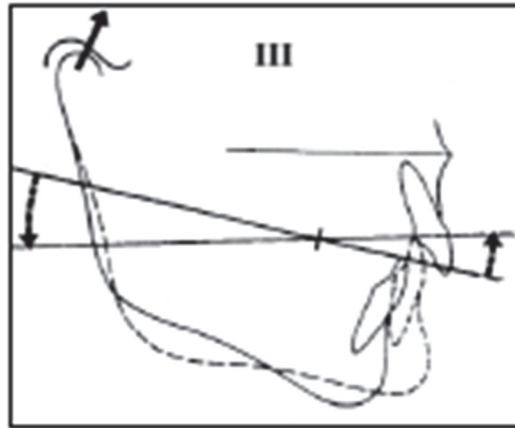


Figure 16 : Rotation antérieure de type III (11).

I.4.3.3. Les rotations postérieures

La rotation postérieure de type I :

- Centre de rotation : le centre du condyle ;
- Causes :
 - Surélévation d'occlusion ;
 - Hypodéveloppement de la hauteur postérieure de la face.
- Conséquence : Open-bite.

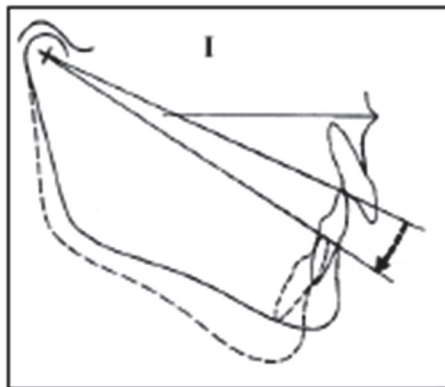


Figure 17 : Rotation postérieure de type I (11).

La rotation postérieure de type II :

- Centre de rotation : la molaire la plus distale ;
- Causes :
 - Croissance trop sagittale au niveau des condyles ;
 - Insertions musculaires trop postérieures.

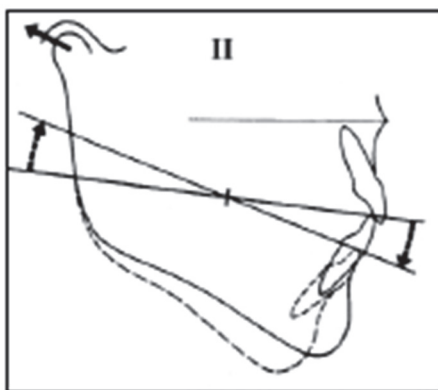


Figure 18 : Rotation postérieure de type II (11).

I.4.3.4. Signes structuraux de la croissance

BJÖRK (11) a mis en évidence des signes structuraux caractéristiques qui permettent de prévoir le sens de la rotation mandibulaire à partir d'une téléradiographie de profil (14) :

- Inclinaison en avant ou en arrière de la tête condylienne ;
- La courbure du canal mandibulaire ;
- L'arrondissement de la partie antéro-inférieure du corpus ;
- L'inclinaison de la symphyse et son épaisseur ;
- Les angles inter-incisifs, inter-molaires, inter-prémolaires ;
- La compression ou l'hyper-développement de la partie inférieure de la face.

<u>Caractères</u>	<u>Rotation antérieure</u>	<u>Rotation postérieure</u>
Direction du col du condyle	Trapu et dirigé en avant	Allongé, grêle et incliné en arrière
Image du canal dentaire inférieur	Courbe	Rectiligne
Angle mandibulaire	Fermé	Ouvert
Echancrure pré angulaire	Bord inférieur de la mandibule en rocking chair	Existence d'une échancrure pré angulaire
Angle inter incisif	Ouvert	Fermé
Symphyse mentonnière	Epaisse	Peu épaisse
Corticale osseuse	Epaisse	Mince
Angle postérieur entre les axes des dents de 6 ans	> 180°	< 180°
Hauteur de l'étage inférieur	Diminuée	Augmentée

Tableau 1 : Signes structuraux de la croissance établis par BJÖRK (11).

I.4.3.5. Conception ce RICKETTS

Se référant aux travaux de BJÖRK (13), RICKETTS (15) détermine deux types de croissance mandibulaire, en superposant des clichés téléradiographiques sur le germe de la troisième molaire et le canal mandibulaire (15) :

- Un type de croissance horizontale : le type brachyfacial ;
- Un type de croissance vertical : le type dolichofacial.

Croissance mandibulaire type brachyfacial :

La mandibule accomplit une rotation antérieure, ce qui aboutit à une diminution de la hauteur antérieure de la face en comparaison avec l'augmentation de la hauteur postérieure. C'est la croissance très verticale du condyle qui provoque cette réflexion. Il y a également un épaissement de la symphyse, une égression molaire plus importante que l'égression incisive, ce qui semble prouver que le plan occlusal basculera dans un sens opposé à celui de la rotation.

Croissance mandibulaire type dolichofacial :

La mandibule effectue une flexion postérieure, ce qui provoque une augmentation de la hauteur antérieure de la face, et une diminution de la hauteur postérieure.

Il y a une bascule vers l'arrière de la symphyse et une rotation de plan d'occlusion opposée à la rotation de la mandibule par égression incisive plus importante que l'égression molaire.

II. Modélisation de la mandibule

II.1. Définition et intérêts de la modélisation 3D

Le progrès rapide du domaine informatique et la baisse des coûts du matériel ont permis un développement des techniques numériques. Notamment, la modélisation 3D et la méthode d'éléments finis qui permettent de fournir des informations difficiles à obtenir dans la cavité buccale (16). L'industrie utilise déjà ces méthodes depuis longtemps ainsi le rapprochement entre ingénieurs et médecins a permis d'étendre leur application aux sciences médicales.

La modélisation tridimensionnelle consiste à créer, dans un logiciel de modélisation 3D, un objet en trois dimensions, par ajout, soustraction et modification de ses constituants.

En revanche, la méthode par éléments finis est utilisée pour résoudre numériquement des équations aux dérivées partielles. En utilisant les images 3D et les essais de caractérisation in vitro de l'os cortical, la modélisation par éléments finis permet donc d'étudier le comportement de l'os mandibulaire, du ligament dentaire et d'estimer les propriétés mécaniques du tissu osseux.

L'analyse tridimensionnelle par éléments finis représente une méthode moderne pour des simulations numériques de processus mécaniques, qui offre plusieurs avantages tels que :

- La précision des représentations de géométrie complexe ;
- La modification facile des modèles ;
- La représentation de l'état interne de stress et autres contraintes mécaniques.

Ces méthodes sont utilisées dans de nombreuses études dans le domaine implantaire et orthodontique car elles sont considérées comme une approche valide et fiable pour l'évaluation quantitative de la contrainte-déformation et du déplacement des structures dento-alvéolaires dans les trois dimensions de l'espace (16).

II.2. Propriétés mécaniques de l'os mandibulaire

La modélisation par éléments finis nécessite de connaître la loi de comportement biomécanique du matériau que l'on cherche à modéliser. Ainsi, il faut définir le module d'élasticité de l'os cortical mandibulaire pour construire un modèle mandibulaire tridimensionnel afin de simuler la répartition des contraintes dans la mandibule au cours de situation de chocs variés (17).

II.2.1. Essais mécaniques

Différents tests peuvent être réalisés pour étudier le comportement mécanique de l'os. L'essai de compression est très souvent utilisé pour déterminer le module d'Young de l'os cortical. Il permet d'obtenir le module d'élasticité et la résistance mécanique pour une direction de sollicitation (18).

L'essai de traction consiste à soumettre une traction à une éprouvette osseuse. Cet essai est très peu utilisé pour étudier l'os car peu d'énergie est dissipée. Cela ne permet pas de dégager les lois de comportement de l'os (18).

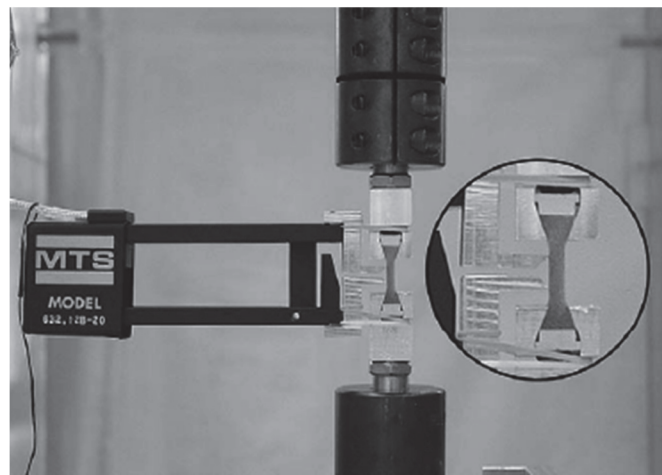


Figure 19 : Essai de traction sur un échantillon osseux (18).

L'essai de cisaillement nécessite un usinage spécifique de l'échantillon qui est très difficile à obtenir pour de l'os cortical mandibulaire. Cet essai est donc utilisé uniquement pour l'os spongieux.

L'essai en flexion est très souvent utilisé pour comparer le module d'élasticité de l'os cortical et celui du tissu trabéculaire sur des échantillons de crête iliaque (18).

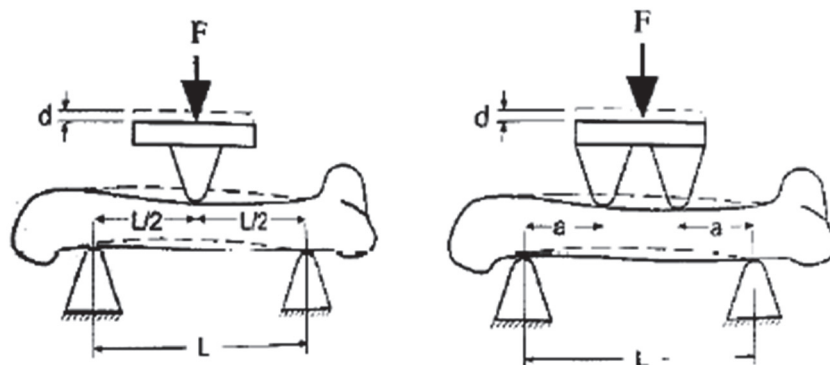


Figure 20 : Essais de flexion en 3 et 4 points (18).

La microscopie acoustique basée sur la réflexion des ondes ultrasonores permet également de caractériser l'os cortical. Le signal réfléchi dépend de la densité et des propriétés élastiques du matériau et permet ainsi de déterminer le module d'Young du matériau.

L'essai de fatigue impose à une éprouvette osseuse une force ou un déplacement périodique. Cela permet de mieux comprendre les propriétés mécaniques et physiologiques en réponse par exemple à la mise en place d'implants dentaires. Le but est de définir la limite d'endurance de l'os c'est-à-dire l'amplitude maximale qu'il peut supporter sans rupture (18).

II.2.2. Module d'Young de l'os cortical mandibulaire

Le tableau synthétise les résultats des principales études relevées dans la littérature et réalisées sur l'os mandibulaire. Ces études ont été effectuées selon 3 types d'essais mécaniques (compression, flexion en 3 points et méthode acoustique) sur des échantillons d'os mandibulaires standardisés (18).

Références	Méthode d'essai	Usinage/Site/ dentaire	statut	Os	N échantillons/ N cadavres	Ec (GPa) Min-Max	Es(MPa) Min-Max
Nakajima & al (1984)	Compression Isotropique	Standard/ édenté	mandibule/	C	-	1,5-15	-
Tamatsu & al (1996)	Flexion (3-points) Anisotropique	Standard/ édenté	mandibule/	C	/4	12,6-21	-
Hara & al (1998)	Flexion (3-points) Anisotropique	Standard/ édenté	mandibule/	C	/20	5,4-17,8	-
Misch & al (1999)	Compression Isotropique	Standard/ édenté and	mandibule/ édenté	S	76/9	-	3,5-240
Scwartz-Dabney & Dechow (2003)	Acoustique Anisotropique	Standard/ édenté	mandibule/	C	31/10	10- 29,9	-
Lettry & al (2003)	Flexion (3-points) Anisotropique	Standard/ édenté	mandibule/	C	140/28	4,7-16	-
Stoppie & al (2006)	Compression Isotropique	Standard/ maxillaire/ édenté	mandibule et	C/S	24/8	-	22-950

Tableau 2 : Modules d'Young de l'os mandibulaire (18).

C : Cortical

C/S : cortical et spongieux

Ec : Module d'Young de l'os cortical

Es : Module d'Young de l'os spongieux

Ces résultats sont très hétéroclites. En effet plusieurs facteurs peuvent influencer la détermination du module d'Young :

- Le site de prélèvement : si la pièce osseuse est prélevée au niveau de la branche montante ou du corpus de la mandibule ;
- L'essai mécanique ;
- L'âge des cadavres et leur statut dentaire ;
- La porosité de l'os ;
- L'état d'hydratation ;
- La température de l'essai ;
- Le mode de conservation ;
- L'évaluation de l'anisotropie.

La valeur de 15 GPa est globalement admise dans la littérature pour le module d'Young de l'os mandibulaire (17).

II.3. Protocole de mise en œuvre

II.3.1. Importation des fichiers

Des modèles précis tridimensionnels sont construits à partir d'images de tomodensitométrie clinique. Des CBCT (Cone Beam Computed Tomography) sous format DICOM sont obtenus et importés dans un logiciel de segmentation afin d'obtenir un modèle 3D. Le format DICOM (Digital Imaging And Communication In Medecine) est une norme de fichier utilisée pour conserver la qualité de l'image codée et rendre les fichiers lisibles sur tout matériel informatique compatible.

Par exemple, dans une étude sur la réponse biomécanique de la mandibule après l'application d'une force dans le but de l'élargir, des CBCT de sujets pré-adolescents ont été utilisés (19).



Figure 21 : mandibule pré adolescente modélisée (19).

En revanche, les dispositifs prothétiques (implants, vis d'ostéosynthèse...) sont généralement élaborés à l'aide d'outils de conception assistée par ordinateur (CAO) (20).

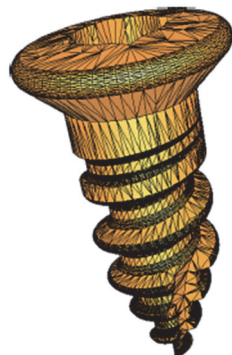


Figure 22 : Conception assistée par ordinateur d'une vis d'ostéosynthèse autoforante (20).

II.3.2. La segmentation

La première étape consiste à modéliser à partir d'images issues de l'imagerie médicale l'objet étudié à l'aide d'un logiciel de segmentation manuelle ou automatique afin de créer un modèle maillé en éléments finis.

Parfois une segmentation manuelle est nécessaire quand certaines structures ont des niveaux de gris similaires. Dans une étude sur la simulation 3D de l'ostéogenèse mandibulaire lors d'une distraction, une segmentation manuelle a été réalisée pour individualiser l'os spongieux, l'os cortical et les dents (21).

Cette segmentation permet d'obtenir une structure découpée en un nombre fini de sous-ensembles appelés éléments. Ces éléments, souvent hexaédriques ou tétraédriques sont formés d'un nombre fini de points appelés nœuds. Tous les éléments sont interconnectés par ces nœuds et forment ainsi le maillage de la structure initiale (20).

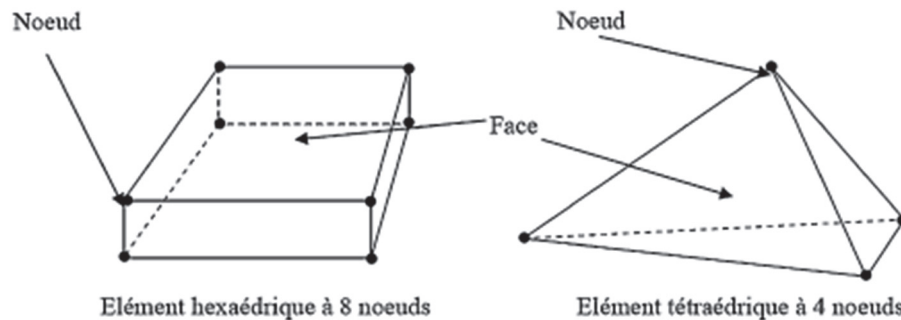


Figure 23 : *Eléments à géométrie tridimensionnelle (20).*

Les équations fondamentales de la mécanique des milieux continus sont alors étudiées en chacun des éléments et fournissent des solutions en chacun des nœuds du maillage.

II.3.4. Modèle éléments finis

Le modèle obtenu est alors exporté vers un logiciel de calcul par éléments finis. Les principaux logiciels d'analyse biomécanique commercialisés sont ABAQUS® et ANSYS®. Ils ont été conçus pour reproduire le plus fidèlement possible le comportement de matériaux vivants. Tous les paramètres nécessaires pour reproduire, lors de la simulation, les conditions d'expérimentation *in vivo* sont à renseigner :

- Les géométries et maillage des différents constituants ;
- La loi de comportement biomécanique de l'os spongieux et de l'os cortical ;
- Les conditions en effort et en déplacement relatives au type d'essai biomécanique ou encore aux forces de traction musculaire.

L'étape suivante est le calcul, à l'aide du logiciel de modélisation par éléments finis, de systèmes d'équations mécaniques et la détermination du déplacement (ou de la vitesse) aux nœuds du maillage. Les déplacements, déformations ou contraintes en tout point du maillage peuvent ensuite être déduites. La durée de calcul dépend du nombre d'éléments et du pas de temps sélectionné.

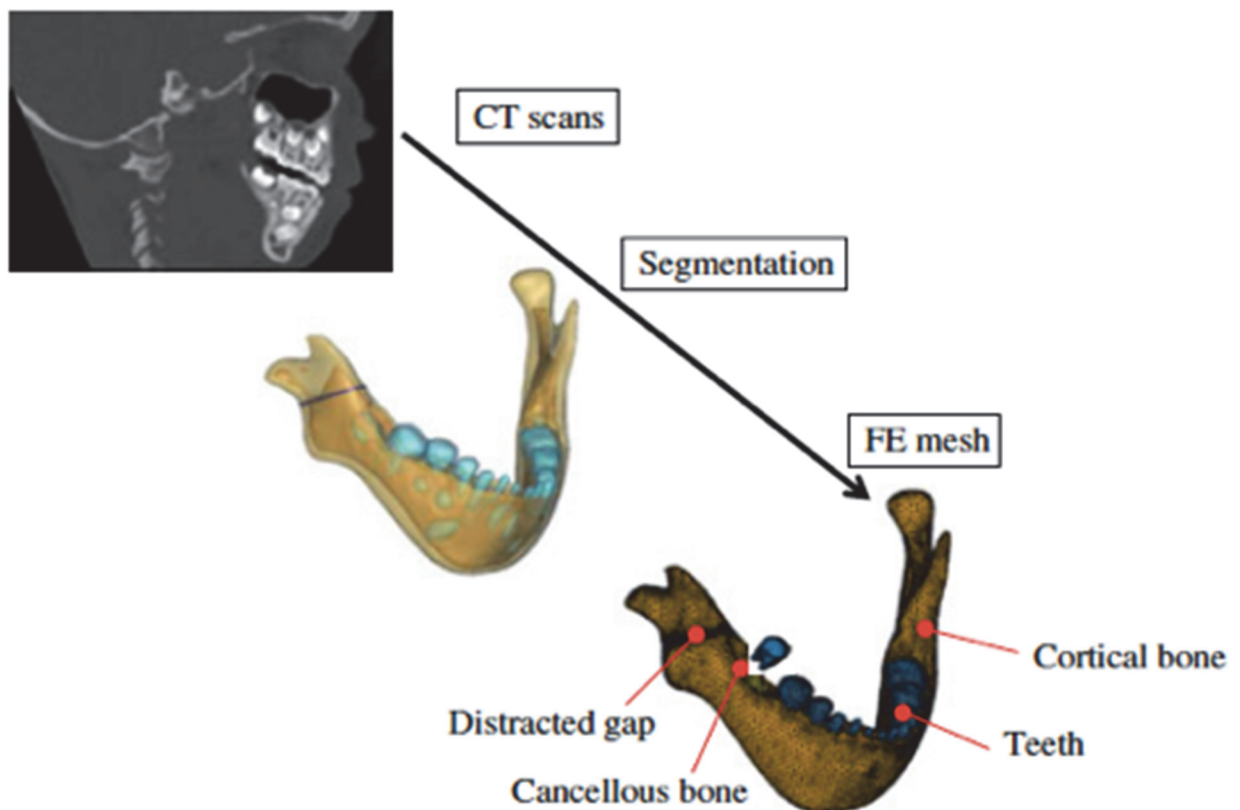


Figure 24 : Trois principales étapes pour obtenir le modèle élément fini mandibulaire pour étudier l'ostéogénèse lors d'une distraction (21).

Les résultats issus du calcul sont analysés de deux façons : sous forme de graphiques et sous forme de courbes. Les graphiques permettent de mettre en évidence la déformation du modèle sous l'effet des différentes charges appliquées. Toutes les variables recherchées (contraintes, vecteurs de déplacement...) peuvent être représentées sous formes d'isovaleurs (champs de couleur) associées à des échelles de valeurs. Les courbes montrent l'évolution de grandeurs mécaniques locales (contraintes ou endommagement local en un point) ou globales.

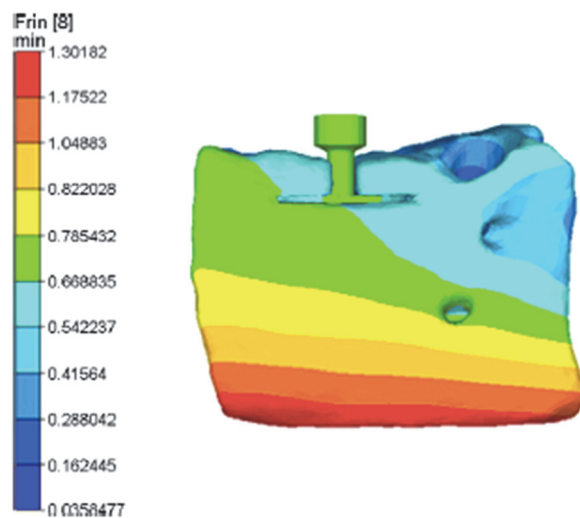


Figure 25 : Isovaleur de déplacement lors de la mise en charge verticale d'un implant à plateau d'assise, représentée par des champs de couleur (échelle millimétrique) (20).

II.4. Intérêts cliniques de la modélisation mandibulaire

II.4.1. La biomécanique faciale

Des modèles numériques mandibulaires ont été développés pour reproduire la répartition des contraintes biomécaniques et les déformations de l'os mandibulaire lors de la mastication. Cette approche numérique montre que la répartition des contraintes diffère dans les segments alvéolaires et médians de la mandibule et qu'elle développe un schéma alternatif entre les aspects buccaux et linguaux des côtés travaillant et équilibrant de la mâchoire (22).

II.4.2. Traumatologie faciale

Ces techniques numériques sont utiles dans l'évaluation des constructions de plaques d'ostéosynthèses selon les types et les sites de fractures. Cela permet d'élaborer des conceptions de mini-plaques adaptées et de réaliser des économies considérables en termes de temps, de matière et d'expérimentation animale dans le développement de matériaux et de techniques d'ostéosynthèse.

Une analyse par éléments finis a été réalisée pour évaluer la forme de plaque et la technique de fixation la plus appropriée pour des fractures du corpus mandibulaire. Quatorze configurations de fixations différentes de mini-plaques en titane ont été étudiées. Le déplacement et les contraintes appliquées sur ces plaques ont été étudiées. Cela a permis de conclure que l'utilisation de deux plaques droites est la fixation la plus solide pour ce type de fracture (23).

II.4.3. Chirurgie orthognathique

La méthode des éléments finis est appropriée pour simuler des situations de contraintes mécaniques dans la région maxillo-faciale.

ERKMEN et al (24) ont analysé la répartition des contraintes lors d'une avancée mandibulaire après ostéotomie sagittale des branches montantes. Ils comparaient l'ostéosynthèse par des vis bi-corticales en position linéaire ou en triangulation, par deux plaques parallèles ou par une plaque six trous en position oblique. L'approche numérique concluait que l'ostéosynthèse par des vis bi-corticales en triangulation répartissait mieux les contraintes avec une stabilité suffisante.

REINA-ROMO et al (21) ont montré que les modèles tridimensionnels sont des outils utiles dans l'évaluation prédictive de l'ostéogenèse par distraction mandibulaire. En effet, le comportement mécanobiologique de la mandibule d'un patient pédiatrique avec une microsomie hémifaciale au cours d'un processus de distraction a été étudié. Le résultat numérique prédit est comparé aux radiographies fournies par les chirurgiens, ce qui a permis de valider l'efficacité du modèle.

II.4.4. Occlusodontie

TANAKA et al (25) ont élaboré un modèle numérique précis des contraintes au sein de l'articulation temporo-mandibulaire lors de l'ouverture buccale à partir de coupes d'IRM. Cela a permis secondairement d'analyser les effets de frottements induits par le déplacement du disque articulaire au sein de l'articulation temporo-mandibulaire durant une phase d'intercuspidation maximale et prolongée. Lors de parafunctions, comme le bruxisme, ou la crispation des mâchoires, le coefficient de frottement entre les surfaces articulaires augmente. Le disque se déplace ainsi davantage vers l'avant. Cela indique que l'augmentation du coefficient de frottement entre les surfaces articulaires peut être une cause majeure du début du déplacement du disque (26).

II.4.5. Implantologie

Ce domaine est le plus productif d'étude avec des modèles éléments finis car le placement ou la forme des implants dentaires fait l'objet de nombreuses analyses afin d'en optimiser les propriétés biomécaniques (27). Ces modèles permettent d'étudier la répartition des contraintes au sein de l'implant endo-osseux. En effet, le succès clinique d'un implant est largement déterminé par la manière dont les contraintes mécaniques sont transférées de l'implant à l'os environnant sans générer des forces d'une ampleur qui saurait compromettre la longévité de l'implant et de la prothèse.

Ces modèles pourraient à l'avenir s'ajouter aux logiciels existants de simulation pré-implantaire. Ils permettent au praticien une simulation pour chaque patient des conséquences biomécaniques du positionnement d'un implant dentaire lors de sa mise en charge.

II.4.6. Orthodontie

La méthode des éléments finis a permis d'analyser le comportement et la réponse biomécanique de l'os mandibulaire et des dents soumis à différentes forces orthodontiques (28). Cela a également permis d'étudier les forces orthodontiques et les contraintes appliquées sur un parodonte réduit (29).

HAMANAKA et al (30) ont étudié les contraintes appliquées au ligament dentaire lors des déplacements orthodontiques. Une arcade maxillaire a été modélisée à l'aide de CBCT, le ligament a été construit sur la surface de la racine dentaire avec 8 éléments hexaédriques. A l'aide d'algorithmes, les centres de résistances des dents ont été calculés, le remaniement osseux lors du déplacement a été étudié ainsi que les contraintes appliquées au ligament dentaire.

ZHONG et al (31) se sont intéressés aux résorptions suite à un traitement orthodontique. Ils ont déterminé que les résorptions apparaissaient au niveau cervical de la dent en vestibulaire et au niveau apical en palatin. Des forces lourdes (225g) et des forces légères (25g) ont été comparées. Les forces lourdes induisent plus de contraintes hydrostatiques au niveau du ligament, jusqu'à 4 fois plus que les forces légères.

La méthode des éléments finis est un outil de calcul applicable à plusieurs domaines et permet d'obtenir des réponses difficilement accessibles dans la cavité buccale et plus rapidement qu'avec la méthode expérimentale. Grâce à ces informations numériques, le clinicien peut alors choisir la solution la plus adaptée et la plus efficace d'un point de vue biomécanique.

II.5. Evaluer la croissance mandibulaire à l'aide de la modélisation 3D

II.5.1. Intérêts et limites

La croissance de la mandibule a été largement étudiée par ENLOW (1) et MOSS (2) mais l'évolution des techniques et la modélisation 3D permettent de mieux comprendre ce phénomène. En effet, la compréhension de la croissance mandibulaire et du schéma squelettique individualisé pour chaque patient font partie des connaissances essentielles de l'orthodontiste, car seule cette connaissance de la croissance fondamentale permet d'établir une bonne stratégie de traitement.

Les principales études sur la croissance mandibulaire ont utilisé des techniques radiographiques bidimensionnelles. Ces techniques supposent de contrôler la posture de la tête pendant la réalisation de l'image : celle-ci doit être placée, à l'horizontal, selon le plan de Francfort pour éviter d'éventuelles distorsions de mesures. De plus, il y a de grands risques que les structures osseuses se superposent, rendant la lecture et l'interprétation de l'image difficile (32). Afin de s'affranchir de ces contraintes, il est intéressant d'étudier la croissance avec des techniques d'imageries en trois dimensions comme la tomodensitométrie.

MASPERO et al (33) ont réalisé une étude pour comparer la tomodensitométrie à faisceau conique (CBCT) et les radiographies bidimensionnelles pour évaluer la longueur et la croissance du corps mandibulaire. À partir de chaque CBCT, une téléradiographie a été obtenue, la longueur et la croissance du corps mandibulaire ont été mesurées. L'analyse des données a révélé une différence statistiquement et cliniquement significative entre le CBCT et les radiographies bidimensionnelles pour la longueur mandibulaire mais pas pour la croissance globale de la mandibule.

En revanche, il existe très peu d'études sur la croissance mandibulaire à l'aide de modèles 3D car obtenir des CBCT (Cone Beam Computed Tomography) de mandibules d'enfants sains est difficile d'un point de vue éthique.

Pour s'affranchir de cette contrainte, KRARUP et al (32) ont utilisé des données tomodensitométriques d'enfants atteints du syndrome d'Apert. Ce syndrome est une craniosynostose où la mandibule n'est pas affectée par la malformation. De plus, ces enfants bénéficient souvent de scanners cranio-faciaux pendant l'enfance pour la planification des chirurgies crâniennes et pour le suivi après la chirurgie.

II.5.2. Méthodes

II.5.2.1. Méthode à l'aide de landmarks

La morphométrie conventionnelle a pour but d'étudier les variations des dimensions d'un objet à l'aide de mesures linéaires et angulaires. Afin de présenter des résultats stables, certains auteurs (34) ont proposé d'étudier l'évolution morphologique de la mandibule en utilisant des points de repère anatomique, appelés landmarks, à partir desquels des distances sont calculées (35).

A partir de ces points de repère anatomique, différentes mesures linéaires et angulaires sont collectées : soit par la mesure directe entre deux points, soit par un calcul mathématique (distance euclidienne ou loi du cosinus). Concernant la mandibule, les premiers travaux ayant défini des landmarks sont basés sur l'étude de cadavres de fœtus et d'enfants (36). Par la suite, des travaux plus récents ont adapté cette méthode directement sur des modèles mandibulaires 3D afin d'optimiser la précision.

REMY et al (37) ont réalisé une étude pour comprendre comment la croissance mandibulaire est influencée par le développement dentaire et l'activation progressive des muscles masticateurs. Ils ont développé un protocole morphométrique afin de caractériser la morphologie mandibulaire globale et son évolution au cours de la période de croissance chez l'enfant sain. Pour cela, quatre cents quatre-vingt mandibules ont été modélisées à l'aide d'images de tomodensitométries cliniques d'enfants âgés de 36 semaines d'aménorrhée à 7 ans révolus. L'échantillon a été divisé en trois groupes selon le stade de développement des dents, défini par le nombre de dents temporaires et dents définitives apparentes sur le modèle 3D mandibulaire :

- 01 Pre : 0 à 2 dents temporaires ;
- 02 Post : 2 incisives centrales complètes à 8 dents ;
- 03 Post : 10 dents temporaires ou les premières molaires permanentes.

REMY et al (37) ont utilisé cette méthode ; quinze points de repère fixes ont été définis afin d'identifier certaines structures mandibulaires. Ces points sont directement apposés sur le modèle mandibulaire 3D.

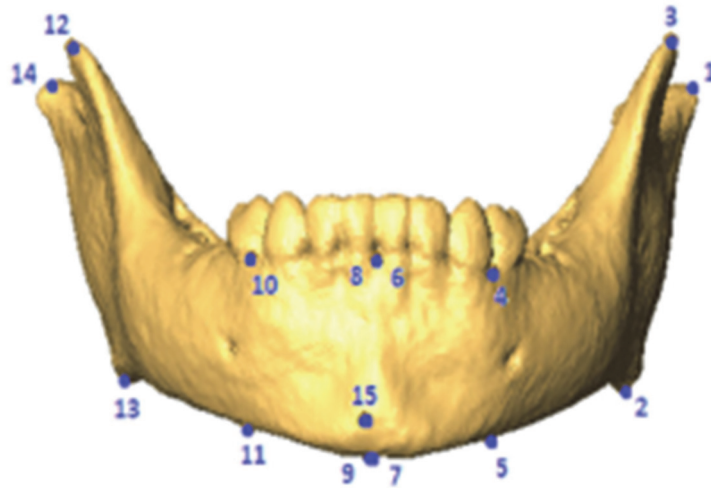


Figure 26 : Quinze landmarks fixés sur le modèle 3D mandibulaire (37).

A partir de ces coordonnées 3D, dix-neuf distances ont été calculées selon la formule euclidienne. Les angles goniaux gauche et droit, l'angle d'ouverture de l'arcade mandibulaire et l'angle symphysaire ont été calculés en appliquant la loi des cosinus (37).

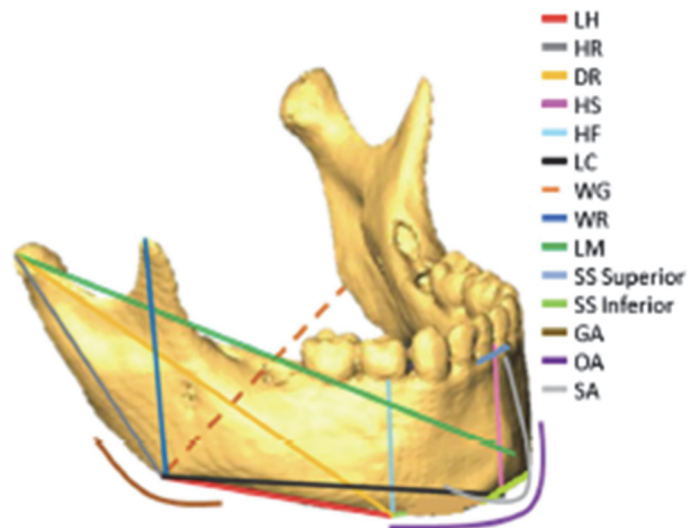


Figure 27 : Représentation des différentes mesures et angles collectés (37).

Name		Definition	Reference fixed landmarks
LH	Left Right	Length of the hemi-mandible	Gonion—Inferior foramen
HR	Left Right	Height of the ramus	Gonion—Condyle
DR	Left Right	Distance between the hemi-mandible and ramus	Condyle—Inferior foramen
HS	Left Right	Height of the medial border of the hemi-mandible	Superior symphysis—Inferior symphysis
SS	Inferior Superior	Distance between the medial borders of the two hemi-mandibles	Left symphysis—Right symphysis
HF	Left Right	Height of the mandibular corpus at the foramen	Superior foramen—Inferior foramen
LC	Left Right	Length of the mandibular corpus	Gonion—Inferior symphysis
LM	Left Right	Maximal length of the mandible	Condyle—Pogonion
WG		Width between both gonions	Left gonion—Right gonion
WR	Left Right	Width of the ramus	Gonion—Coronoid process
GA	Left Right	Gonial angle	Condyle—Gonion—Foramen inferior
OA		Mandibular arch opening angle	Left Gonion—Pogonion—Right Gonion
SA		Symphyseal angle	Pp—Pogonion—Superior symphysis

Tableau 3 : Noms, définitions et références des landmarks des distances et angles mesurés sur les modèles mandibulaires 3D (37).

Afin d'étudier la représentation globale de la morphologie mandibulaire, un ensemble de mille semi-marques de glissement a été extrait depuis ces landmarks. C'est un ensemble de points de glissement le long d'une surface 3D entre deux repères fixes. Cette méthode permet de représenter la morphologie globale d'un objet 3D, et est utilisée pour l'identification et la superposition des morphotypes.



Figure 28 : Représentation des mille semi-marques de glissement (37).

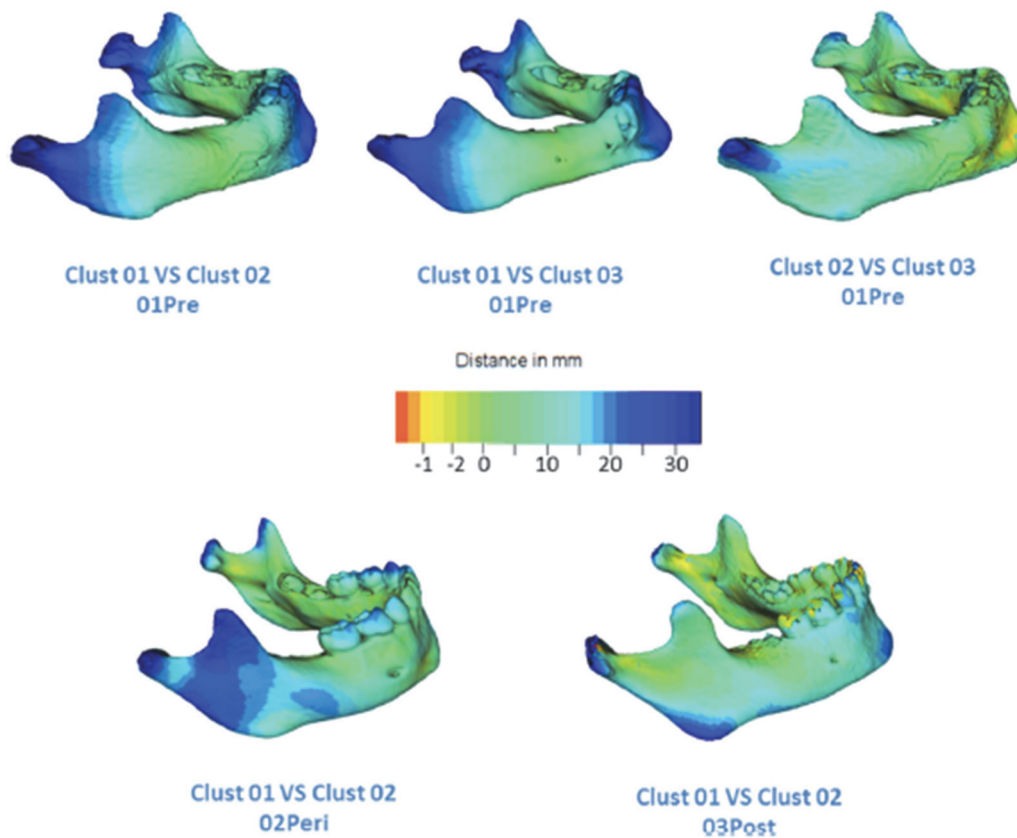


Figure 29 : Superpositions des morphotypes des sous-groupes identifiés dans les trois échantillons : l'échelle de couleur montre la quantité de différences entre les deux morphotypes superposés reflétant les régions les plus touchées par le remodelage osseux (dépôt osseux en bleu, et résorption osseuse en jaune) (37).

Cette étude permet de constater une diminution progressive de l'angle goniale, surtout pendant les deux premières années de vie. Les autres mesures, quant à elles, augmentent de manière significative entre la période fœtale et les premières années de vie : le corps mandibulaire s'allonge et les branches montantes s'élargissent.

Outre cette augmentation significative de l'ensemble des mesures, cette étude révèle une asymétrie mandibulaire en particulier quand la dentition déciduale est terminée. Selon la revue de la littérature de MELNIK (38), cette asymétrie de la mandibule chez l'enfant sain n'est pas reconnue par tous les auteurs. Cela pourrait s'expliquer par une mastication unilatérale alternée mais il faudrait réaliser des études supplémentaires pour le confirmer.

Cette étude a également montré qu'il existe un dimorphisme sexuel pendant la période de développement de la dentition déciduale et la période de stabilisation ; les mandibules des

garçons étaient plus grandes que celles des filles. Ce dimorphisme serait dû à une augmentation des taux d'hormones sexuelles dans la région alvéolaire de la mandibule pendant la période fœtale et la première année de vie. En effet, selon certains auteurs (39) (40) il serait possible, dès 7 mois (soit dès l'apparition des premières dents temporaires), de déterminer le sexe d'un individu à partir de l'analyse de sa mandibule.

De plus, cela a permis d'identifier trois morphotypes dans le premier groupe. Cette distinction dès les premières semaines post-natales pourrait s'expliquer par l'activation progressive de la langue et des muscles masticateurs, en lien avec l'alimentation. En effet, selon si le nouveau-né est nourri au sein ou au biberon, l'activité de la langue dans l'espace buccal est différente, d'où un développement morphologique différent de la mandibule (41) (42).

HAE et al (43) ont démontré que l'allaitement au sein favoriserait une respiration nasale normale, ce qui influencerait le remodelage osseux de la mandibule.

L'éruption complète de l'ensemble de la denture temporaire définit un tournant dans le schéma de croissance mandibulaire. A partir de quatre ans, le corps mandibulaire évolue indépendamment des branches montantes. Chez les individus plus jeunes, la croissance mandibulaire était davantage homothétique dans la mesure où la majorité des mesures évoluait en corrélation les unes avec les autres et avec l'âge. Ainsi, la croissance mandibulaire est davantage variable chez les individus plus âgés, probablement dû à l'influence de facteurs fonctionnels (comme l'alimentation ou la ventilation).

L'influence des fonctions péri-orales a ainsi été mise en évidence : l'évolution morphologique postnatale de la mandibule est fortement corrélée aux stades de développement dentaire et à l'activité des muscles oro-faciaux (muscles masticatoires et langue notamment).

KELLY et al (35) ont réalisé une étude sur des mandibules 3D afin d'observer l'apparition du dimorphisme sexuel. Des CBCT (Cone Beam Computed Tomography) de cinquante et un individus âgés d'un à dix-neuf ans ont été utilisés pour modéliser des mandibules 3D. Onze points de repères ont permis de définir six mesures linéaires et trois mesures angulaires. Cette étude a montré que les tendances de croissance mandibulaire et les taux de croissance n'étaient pas uniformes. Le dimorphisme sexuel s'est dissipé chez les individus pré-pubères mais il est réapparu pendant et après la puberté.

FAN et al (44) ont également réalisé une étude sur l'apparition du dimorphisme sexuel sur des mandibules 3D d'adolescents âgés de 9 à 19 ans. Ils ont utilisé la morphométrie tridimensionnelle pour comparer les mandibules des garçons par rapport aux mandibules des filles. Ils ont réalisé que le dimorphisme sexuel était déjà présent à 9 ans. De plus, les mandibules des garçons ont changé plus rapidement que celles des filles mais sur une période plus longue.

Cette méthode permet de quantifier la croissance mandibulaire en trois dimensions en utilisant une nouvelle approche impliquant le placement de repères anatomiques sur des modèles mandibulaires 3D. Cela permet d'obtenir des mesures linéaires et angulaires précises et fiables, ainsi que d'identifier des points communs de croissance (35).

II.5.2.2. Méthode à l'aide de superpositions sur les structures stables de BJÖRK (13)

KRARUP et al (32) ont réalisé une étude basée sur des superpositions de mandibules 3D sur les structures stables de la mandibule établies par BJÖRK (13). Des CBCT (Cone Beam Computed Tomography) de patients atteints du syndrome d'Apert ont été sélectionnés. Ces patients ont dû passer des CBCT cérébraux fréquemment, et ont ainsi pu être étudiés au cours du temps.



Figure 30 : structures stables de la mandibule (32).

- 1 : le contour antérieur de la symphyse ;
- 2 : le contour inférieur de la plaque corticale du bord inférieur de la symphyse ;
- 3 : toutes structures trabéculaires distinctes ;
- 4 : le contour du canal mandibulaire ;
- 5 : le contour inférieur du germe de la troisième molaire inférieure minéralisée.

Des points de repères ont été placés sur la surface de mandibules 3D, le long des canaux mandibulaires et du contour intérieur de la plaque corticale au bord inférieur de la symphyse. Des superpositions ont été réalisées sur ces points de repères pour étudier la croissance mandibulaire.

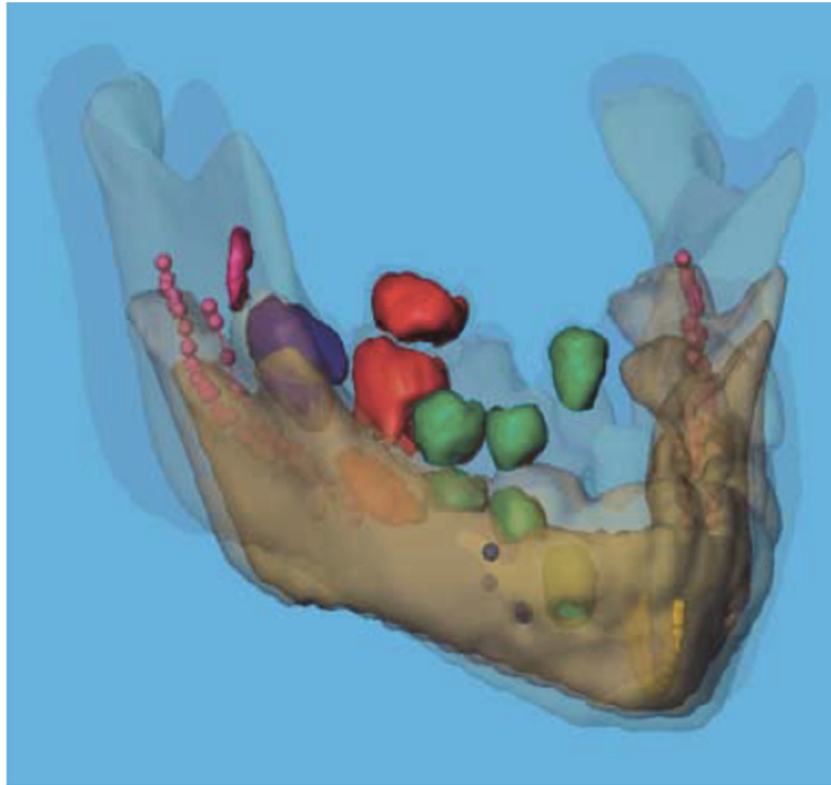


Figure 31 : Superpositions 3D sur des mandibules à quatre âges différents (0, 1, 7 et 10 ans) (32).

L'étude a confirmé les résultats de la stabilité de la symphyse et des canaux mandibulaires comme précédemment rapporté par BJÖRK (13). Cependant, les canaux mandibulaires étaient, en fait, déplacés latéralement pendant la croissance. Ainsi la méthode 3D semble offrir un nouvel aperçu de la croissance de la mâchoire.

NGUYEN et al (45) ont superposé des mandibules en 3D, ainsi, selon le taux de chevauchement des différentes régions anatomiques de la mandibule, il peut en être déduit des directions de croissance, interprétées comme les conséquences d'un remodelage osseux particulier.

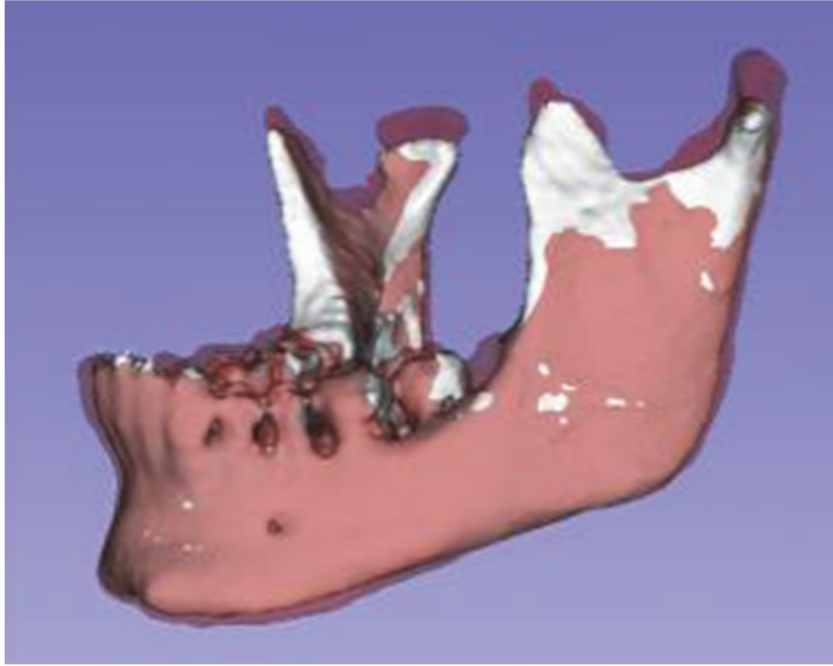


Figure 32 : Superposition de modèles mandibulaires reconstruits en 3 dimensions (le plus jeune en blanc, le plus âgé en rouge), montrant leurs différences morphologiques) (45).

La méthode de superposition mandibulaire en 3D pour étudier la croissance des sujets ne prend pas beaucoup de temps et est considérée comme une méthode précise pour l'évaluation des changements mandibulaires (46).

Conclusion

La croissance mandibulaire est un phénomène complexe qui a été étudié de nombreuses fois au cours du temps. Elle dépend du potentiel de croissance primaire du cartilage condylien mais aussi des capacités adaptatives de croissance en réponse à l'environnement. Elle est ainsi définie par des phénomènes d'apposition et de résorption osseuse.

L'analyse 3D de la croissance mandibulaire confirme les théories sur la croissance établies par BJORK (11) et ENLOW (1). Cependant, elle permet de fournir des informations plus précises qui constituent des connaissances indispensables pour la prise en charge clinique des patients et pour la planification du traitement orthodontique. En effet, cela est important afin d'initier nos traitements au bon moment chez les jeunes patients.

La méthode 3D offre donc un nouvel aperçu de la croissance de la mâchoire et de l'éruption dentaire mais très peu d'études ont été réalisées à ce sujet. Des études supplémentaires s'avèrent donc nécessaires pour comprendre davantage ce phénomène.

En effet, REMY et al (37) ont développé un protocole morphométrique précis et fiable pour étudier la croissance mandibulaire sur des enfants âgés de 36 semaines d'aménorrhée à 7 ans révolus. Ils ont ainsi mis en évidence l'influence des fonctions péri-orales dans la croissance.

Afin d'approfondir les connaissances acquises sur la croissance, nous avons trouvé judicieux de réaliser une étude, dans le cadre de mon mémoire, en utilisant ce protocole sur des enfants âgés de 7 à 12 ans. Ainsi, nous apporterons de nouvelles informations et nous permettrons de mieux comprendre ce phénomène.

Bibliographie

1. ENLOW DH. Facial growth and development. *Int J Oral Myol.* oct 1979;5(4):7-10.
2. LAUTROU A. Croissance faciale : théories explicatives et clinique orthodontique. *Rev Orthopédie Dento-Faciale.* déc 1994;28(4):433-53.
3. AKNIN J-J. Croissance cranio-faciale. EMC, Odontologie / Orthopédie dentofaciale, 23-455-C-10, 2008
4. BORIES J. LE CRANE HUMAIN : Ostéologie - Anatomie radiologique. Springer Science & Business Media; 1996. 316 p.
5. BARAT Y. De la croissance de la face. *Rev Orthopédie Dento-Faciale.* janv 1968;2(1):20-46.
6. MUGNIER A. Embryologie et développement bucco-facial. Masson et Cie, éditeurs Julien Prélat. Paris; 1964.
7. RAPHAEL B, LEBEAU J, BETTEGA G. Développement et croissance de la mandibule dans son environnement. *Ann Chir Plast Esthét.* janv 2001 ; 46(5) :478-94.
8. BOLENDER C. Croissance mandibulaire et prognathie. *Rev Orthopédie Dento-Faciale.* janv 1970;4(1):5-12.
9. DELAIRE J. Le rôle du condyle dans la croissance de la mâchoire inférieure et dans l'équilibre de la face. *Rev, Stomatol, Chir, maxillofac,* 1990;(n°3) :179-192.
10. SYMONS NBB. The development of the human mandibular joint. *J Anat.* juill 1952 ;86(Pt 3) :326-332.
11. BJÖRK A. Prediction of mandibular growth rotation. *Am J Orthod.* Juin 1969 ;55(6) :585-99.
12. DELAIRE J, HAROUN A. Le nouveau concept cortical : la mandibule (deuxième partie). *Bull L'Union Natl Pour L'Intérêt L'Orthopédie Dento-Faciale.* 2007;(32) :16-22.
13. BJÖRK A, SKIELLER V. Croissance mandibulaire normale et pathologique. *Rev Orthop Dento Faciale,* 1977, 11 : 357-402
14. BEN-MALEK M, BOILEAU M-J, DE BRONDEAU F. Étude des caractères structuraux de la mandibule dans la prévision du potentiel de croissance et de la rotation mandibulaires. *Int Orthod.* sept 2008;6(3):269-84.
15. LANGLADE M, PICAUD M. La prévision à longue échéance de la croissance mandibulaire selon RICKETTS. *Rev Orthopédie Dento-Faciale.* janv 1972;6(1):57-66.

16. CLEMENT R, SCHNEIDER J, BRAMBS H-J, WUNDERLICH A, GEIGER M, SANDER FG. Quasi-automatic 3D finite element model generation for individual single-rooted teeth and periodontal ligament. *Comput Methods Programs Biomed.* févr 2004;73(2):135-44.
17. BARRIERE P. Caractérisation des propriétés mécaniques de l'os cortical mandibulaire en situation dynamique [Thèse de doctorat]. [Strasbourg] (1971-2008, France): Université Louis Pasteur; 2008.
18. ODIN G, HAUDIN J-M. Modélisation numérique de l'os mandibulaire appliquée à l'implantologie dentaire et maxillo - faciale. Paris, France; 2008.
19. AIMERA DH, SINGH P, JINLIN Song, CHAO Wang, YUBO Fan, HARESH AD, et al. Analysis of Biomechanical Effects of Different Sites and Modes of Orthodontic Loading On Arch Expansion in a Preadolescent Mandible: An FEA Study. *J Clin Pediatr Dent.* juill 2018;42(4):314-23.
20. SAVOLDELLI C, TILLIER Y, BOUCHARD P-O, ODIN G. Apport de la méthode des éléments finis en chirurgie maxillofaciale. *Rev Stomatol Chir Maxillofac.* févr 2009;110(1):27-33.
21. REINA-ROMO E, GOMEZ-BENITO MJ, SAMPIETRO-FUENTES A, DOMINGUEZ J, GARCIA-AZNAR JM. Three-Dimensional Simulation of Mandibular Distraction Osteogenesis: Mechanobiological Analysis. *Ann Biomed Eng.* Janv 2011;39(1):35-43.
22. ICHIM I, KIESER JA, SWAIN MV. Functional significance of strain distribution in the human mandible under masticatory load: numerical predictions. *Arch Oral Biol.* mai 2007;52(5):465-73.
23. ARBAG H, KORKMAZ HH, OZTURK K, UYAR Y. Comparative evaluation of different miniplates for internal fixation of mandible fractures using finite element analysis. 2008 [cité 13 févr 2021]; Disponible sur: <http://acikerisim.selcuk.edu.tr/xmlui/handle/20.500.12395/22264>
24. ERKMEN E, SIMSEK B, YUCELI E, KURT A. Comparison of different fixation methods following sagittal split ramus osteotomies using three-dimensional finite elements analysis. Part 1: advancement surgery-posterior loading. *Int J Oral Maxillofac Surg.* juill 2005;34(5):551-8.
25. TANAKA E, RODRIGO DP, TANAKA M, KAWAGUCHI A, SHIBAZAKI T, TANNE K. Stress analysis in the TMJ during jaw opening by use of a three-dimensional finite element model based on magnetic resonance images. *Int J Oral Maxillofac Surg.* oct 2001;30(5):421-30.
26. TANAKA E, HIROSE M, KOOLSTRA JH, VAN EIJDEN TMGJ, IWABUCHI Y, FUJITA R, et al. Modeling of the effect of friction in the temporomandibular joint on displacement of its disc during prolonged clenching. *J Oral Maxillofac Surg Off J Am Assoc Oral Maxillofac Surg.* mars 2008;66(3):462-8.

27. VAN STADEN RC, GUAN H, LOO YC. Application of the finite element method in dental implant research. *Comput Methods Biomech Biomed Engin.* août 2006;9(4):257-70.
28. WU J, LIU Y, PENG W, DONG H, ZHANG J. A biomechanical case study on the optimal orthodontic force on the maxillary canine tooth based on finite element analysis. *J Zhejiang Univ Sci B.* juill 2018;19(7):535-46.
29. KETTENBEIL A, REIMANN S, REICHERT C, KEILIG L, JAGER A, BOURAUUEL C. Numerical simulation and biomechanical analysis of an orthodontically treated periodontally damaged dentition. *J Orofac Orthop Fortschritte Kieferorthopädie.* 1 nov 2013;74(6):480-93.
30. HAMANAKA R, YAMAOKA S, ANH TN, TOMINAGA J, KOGA Y, YOSHIDA N. Numeric simulation model for long-term orthodontic tooth movement with contact boundary conditions using the finite element method. *Am J Orthod Dentofacial Orthop.* nov 2017;152(5):601-12.
31. ZHONG J, CHEN J, WEINKAMER R, DARENDELILER MA, SWAIN MV, SUE A, et al. In vivo effects of different orthodontic loading on root resorption and correlation with mechanobiological stimulus in periodontal ligament. *J R Soc Interface [Internet].* mai 2019 [cité 23 janv 2021];16(154). Disponible sur: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC6544889/>
32. KRARUP S, DARVANN T, LARSEN P, MARSH J, KREIBORG S. Three-dimensional analysis of mandibular growth and tooth eruption. *J Anat.* nov 2005;207(5):669-82.
33. MASPERO C, FARRONATO M, BELLINCIONI F, CAVAGNETTO D, ABATE A. Assessing mandibular body changes in growing subjects: a comparison of CBCT and reconstructed lateral cephalogram measurements. *Sci Rep.* 16 juill 2020 ;10(1):11722.
34. LIU Y-P, BEHRENTS RG, BUSCHANG PH. Mandibular growth, remodeling, and maturation during infancy and early childhood. *Angle Orthod.* janv 2010;80(1):97-105.
35. KELLY MP, VORPERIAN HK, WANG Y, TILLMAN KK, WERNER HM, CHUNG MK, et al. Characterizing mandibular growth using three-dimensional imaging techniques and anatomic landmarks. *Arch Oral Biol.* mai 2017;77:27-38.
36. HUTCHINSON EF, KIESER JA, KRAMER B. Morphometric growth relationships of the immature human mandible and tongue. *Eur J Oral Sci.* juin 2014;122(3):181-9.
37. REMY F, GODIO-RABOUTET Y, CAPTIER G, BURGART P, BONNAURE P, THOLLON L, et al. Morphometric characterization of the very young child mandibular growth pattern: What happen before and after the deciduous dentition development? *Am J Phys Anthropol.* 2019;170(4):496-506.
38. MELNIK AK. A cephalometric study of mandibular asymmetry in a longitudinally followed sample of growing children. *Am J Orthod Dentofac Orthop Off Publ Am Assoc Orthod Its Const Soc Am Board Orthod.* avr 1992;101(4):355-66.

39. SCHUTKOWSKI H. Sex determination of infant and juvenile skeletons: I. Morphognostic features. *Am J Phys Anthropol.* févr 1993;90(2):199-205.
40. SCHEUER L. A blind test of mandibular morphology for sexing mandibles in the first few years of life. *Am J Phys Anthropol.* oct 2002;119(2):189-91.
41. COQUERELLE M, PRADOS-FRUTOS JC, BENAZZI S, BOOKSTEIN FL, SENCK S, MITTEROECKER P, et al. Infant growth patterns of the mandible in modern humans: a closer exploration of the developmental interactions between the symphyseal bone, the teeth, and the suprahyoid and tongue muscle insertion sites. *J Anat.* févr 2013;222(2):178-92.
42. AGARWAL SS, Nehra K, SHARMA M, JAYAN B, POONIA A, BHATTAL H. Association between breastfeeding duration, non-nutritive sucking habits and dental arch dimensions in deciduous dentition: a cross-sectional study. *Prog Orthod.* 31 oct 2014;15:59.
43. PARK EH, KIM J-G, YANG Y-M, JEON J-G, YOO J-I, KIM J-K, et al. Association Between Breastfeeding and Childhood Breathing Patterns: A Systematic Review and Meta-Analysis. *Breastfeed Med Off J Acad Breastfeed Med.* mai 2018;13(4):240-7.
44. FAN Y, PENINGTON A, KILPATRICK N, HARDIMAN R, SCHNEIDER P, CLEMENT J, et al. Quantification of mandibular sexual dimorphism during adolescence. *J Anat.* mai 2019;234(5):709-17.
45. NGUYEN T, CEVIDANES L, FRANCHI L, RUELLAS A, JACKSON T. Three-dimensional mandibular regional superimposition in growing patients. *Am J Orthod Dentofac Orthop Off Publ Am Assoc Orthod Its Const Soc Am Board Orthod.* mai 2018;153(5):747-54.
46. KOERICH L, WEISSHEIMER A, DE MENEZES LM, LINDAUER SJ. Rapid 3D mandibular superimposition for growing patients. *Angle Orthod.* 1 mai 2017 ;87(3):473-9.

Table des illustrations

- Figure 1 : Vue antéro-latérale supérieure d'une mandibule adulte** 5
BORIES J. LE CRANE HUMAIN : Ostéologie - Anatomie radiologique. Springer Science & Business Media ; 1996. 316 p.
- Figure 2 : Vue du chondrocrâne par sa face supérieure avant le deuxième mois in utero** 6
MUGNIER, A. : Embryologie et développement bucco-facial. Masson et cie, éditeurs, Julien prélat, éditeur 1964
- Figure 3 : Masque de « loup de Carnaval » d'après MUGNIER** 7
MUGNIER, A. : Embryologie et développement bucco-facial. Masson et cie, éditeurs, Julien prélat, éditeur 1964
- Figure 4 : Le cartilage de Meckel provient du premier arc pharyngé** 8
MUGNIER, A. : Embryologie et développement bucco-facial. Masson et cie, éditeurs, Julien prélat, éditeur 1964
- Figure 5 : Le cartilage de Meckel : tuteur de l'ossification de la mandibule** 8
MUGNIER, A. : Embryologie et développement bucco-facial. Masson et cie, éditeurs, Julien prélat, éditeur 1964
- Figure 6 : Ossification du corpus mandibulaire en dehors du cartilage de Meckel** 9
MUGNIER, A. : Embryologie et développement bucco-facial. Masson et cie, éditeurs, Julien prélat, éditeur 1964
- Figure 7 : Les cartilages secondaires de la mandibule** 11
MUGNIER, A. : Embryologie et développement bucco-facial. Masson et cie, éditeurs, Julien prélat, éditeur 1964
- Figure 8 : Structure histologique du condyle mandibulaire en croissance** 12
MUGNIER, A. : Embryologie et développement bucco-facial. Masson et cie, éditeurs, Julien prélat, éditeur 1964

Figure 9 A : Croissance insuffisance du condyle mandibulaire	14
<i>DELAIRE J. Le rôle du condyle dans la croissance de la mâchoire inférieure et dans l'équilibre de la face. Rev, Stomatol, Chir, maxillofac, 1990;(n°3): 179-192.</i>	
Figure 9 B : Croissance importante du condyle mandibulaire	14
<i>DELAIRE J. Le rôle du condyle dans la croissance de la mâchoire inférieure et dans l'équilibre de la face. Rev, Stomatol, Chir, maxillofac, 1990;(n°3) : 179-192.</i>	
Figure 10 : Courbes de croissance staturale, suturale et condylienne	15
<i>BJÖRK A. Prediction of mandibular growth rotation. Am J Orthod. 1 juin 1969;55(6):585 -99.</i>	
Figure 11 : Phénomènes d'apposition/résorption de la branche montante mandibulaire	19
<i>DELAIRE J, HAROUN A. Le nouveau concept cortical : la mandibule (deuxième partie). Bull L'Union Natl Pour L'Intérêt L'Orthopédie Dento-Faciale. 2007;(32) :16 -22.</i>	
Figure 12 : Phénomènes d'apposition/résorption au niveau de la symphyse	19
<i>ENLOW DH. Facial growth and development. Int J Oral Myol. oct 1979;5(4):7 -10</i>	
Figure 13 : Phénomènes d'apposition/résorption de la mandibule	20
<i>BARAT Y. De la croissance de la face. Rev Orthopédie Dento-Faciale. Janv 1968;2(1):20 -46.</i>	
Figure 14 : Rotation antérieure de type I	22
<i>BJÖRK A. Prediction of mandibular growth rotation. Am J Orthod. Juin 1969;55(6):585 -99.</i>	
Figure 15 : Rotation antérieure de type II	22
<i>BJÖRK A. Prediction of mandibular growth rotation. Am J Orthod. Juin 1969;55(6):585 -99.</i>	

Figure 16 : Rotation antérieure de type III	23
<i>BJÖRK A. Prediction of mandibular growth rotation. Am J Orthod. Juin 1969;55(6):585 -99.</i>	
Figure 17 : Rotation postérieure de type I	23
<i>BJÖRK A. Prediction of mandibular growth rotation. Am J Orthod. Juin 1969;55(6):585 -99.</i>	
Figure 18 : Rotation postérieure de type II	24
<i>BJÖRK A. Prediction of mandibular growth rotation. Am J Orthod. Juin 1969;55(6):585 -99.</i>	
Figure 19 : Essai de traction sur un échantillon osseux	28
<i>ODIN G, HAUDIN J-M. Modélisation numérique de l'os mandibulaire appliquée à l'implantologie dentaire et maxillo - faciale. Paris, France ; 2008</i>	
Figure 20 : Essais de flexion en 3 et 4 points	29
<i>ODIN G, HAUDIN J-M. Modélisation numérique de l'os mandibulaire appliquée à l'implantologie dentaire et maxillo - faciale. Paris, France ; 2008</i>	
Figure 21 : Mandibule pré adolescente modélisée	32
<i>AIMERA DH, SINGH P, JINLIN Song, CHAO Wang, YUBO Fan, HARESH AD, et al. Analysis of Biomechanical Effects of Different Sites and Modes of Orthodontic Loading On Arch Expansion in a Preadolescent Mandible: An FEA Study. J Clin Pediatr Dent. juill 2018;42(4):314 -23</i>	
Figure 22 : Conception assistée par ordinateur d'une vis d'ostéosynthèse autoforante	32
<i>SAVOLDELLI C, TILLIER Y, BOUCHARD P-O, ODIN G. Apport de la méthode des éléments finis en chirurgie maxillofaciale. Rev Stomatol Chir Maxillofac. févr 2009;110(1):27 -33</i>	

Figure 23 : Eléments à géométrie tridimensionnelle	33
<i>SAVOLDELLI C, TILLIER Y, BOUCHARD P-O, ODIN G. Apport de la méthode des éléments finis en chirurgie maxillofaciale. Rev Stomatol Chir Maxillofac. févr 2009;110(1):27-33</i>	
Figure 24 : Trois principales étapes pour obtenir le modèle élément fini mandibulaire pour étudier l'ostéogénèse lors d'une distraction	34
<i>REINA-ROMO E, GOMEZ-BENITO MJ, SAMPIETRO-FUENTES A, DOMINGUEZ J, GARCIA-AZNAR JM. Three-Dimensional Simulation of Mandibular Distraction Osteogenesis: Mechanobiological Analysis. Ann Biomed Eng. 1 janv 2011;39(1):35-43</i>	
Figure 25 : : Isovaleur de déplacement lors de la mise en charge verticale d'un implant à plateau d'assise, représentée par des champs de couleur (échelle millimétrique)	35
<i>SAVOLDELLI C, TILLIER Y, BOUCHARD P-O, ODIN G. Apport de la méthode des éléments finis en chirurgie maxillofaciale. Rev Stomatol Chir Maxillofac. févr 2009;110(1):27-33</i>	
Figure 26 : Quinze landmarks fixés sur le modèle 3D mandibulaire	41
<i>REMY F, GODIO-RABOUTET Y, CAPTIER G, BURGART P, BONNAURE P, THOLLON L, et al. Morphometric characterization of the very young child mandibular growth pattern: What happen before and after the deciduous dentition development? Am J Phys Anthropol. 2019;170(4):496-506</i>	
Figure 27 : Représentation des différentes mesures et angles collectés	41
<i>REMY F, GODIO-RABOUTET Y, CAPTIER G, BURGART P, BONNAURE P, THOLLON L, et al. Morphometric characterization of the very young child mandibular growth pattern: What happen before and after the deciduous dentition development? Am J Phys Anthropol. 2019;170(4):496-506</i>	
Figure 28 : Représentation des mille semi-marques de glissement	42

REMY F, GODIO-RABOUTET Y, CAPTIER G, BURGART P, BONNAURE P, THOLLON L, et al. Morphometric characterization of the very young child mandibular growth pattern: What happen before and after the deciduous dentition development? *Am J Phys Anthropol.* 2019;170(4):496-506

Figure 29 : Superpositions des morphotypes des sous-groupes identifiés dans les trois échantillons 43

REMY F, GODIO-RABOUTET Y, CAPTIER G, BURGART P, BONNAURE P, THOLLON L, et al. Morphometric characterization of the very young child mandibular growth pattern: What happen before and after the deciduous dentition development? *Am J Phys Anthropol.* 2019;170(4):496-506

Figure 30 : Structures stables de la mandibule 45

KRARUP S, DARVANN T, LARSEN P, MARSH J, KREIBORG S. Three-dimensional analysis of mandibular growth and tooth eruption. *J Anat.* nov 2005;207(5):669-82

Figure 31 : Superpositions 3D sur des mandibules a quatre âges différents (0, 1, 7 et 10 ans) 46

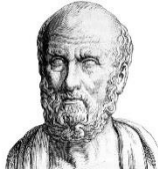
KRARUP S, DARVANN T, LARSEN P, MARSH J, KREIBORG S. Three-dimensional analysis of mandibular growth and tooth eruption. *J Anat.* nov 2005;207(5):669-82

Figure 32 : Superposition de modèles mandibulaires reconstruits en 3 dimensions 47

NGUYEN T, CEVIDANES L, FRANCHI L, RUELLAS A, JACKSON T. Three-dimensional mandibular regional superimposition in growing patients. *Am J Orthod Dentofac Orthop Off Publ Am Assoc Orthod Its Const Soc Am Board Orthod.* mai 2018;153(5):747-54

Table des Tableaux

Tableau 1 : Signes structuraux de la croissance établis par BJÖRK	25
<i>BJÖRK A. Prediction of mandibular growth rotation. Am J Orthod. 1 juin 1969;55(6):585 -99.</i>	
Tableau 2 : Modules d'Young de l'os mandibulaire	30
<i>ODIN G, HAUDIN J-M. Modélisation numérique de l'os mandibulaire appliquée à l'implantologie dentaire et maxillo - faciale. Paris, France ; 2008.</i>	
Tableau 3 : Noms, définitions et références des landmarks des distances et angles mesurés sur les modèles mandibulaires 3D.	42
<i>REMY F, GODIO-RABOUTET Y, CAPTIER G, BURGART P, BONNAURE P, THOLLON L, et al. Morphometric characterization of the very young child mandibular growth pattern: What happen before and after the deciduous dentition development? Am J Phys Anthropol. 2019;170(4):496 -506</i>	



SERMENT MEDICAL

En présence des Maîtres de cette Faculté, de mes chers condisciples, devant l'effigie d'HIPPOCRATE.

Je promets et je jure, d'être fidèle aux lois de l'honneur et de la probité dans l'exercice de la Médecine Dentaire.

Je donnerai mes soins à l'indigent et n'exigerai jamais un salaire au-dessus de mon travail, je ne participerai à aucun partage clandestin d'honoraires.

Je ne me laisserai pas influencer par la soif du gain ou la recherche de la gloire.

Admise dans l'intérieur des maisons, mes yeux ne verront pas ce qui s'y passe, ma langue taira les secrets qui me seront confiés et mon état ne servira pas à corrompre les mœurs ni à favoriser le crime.

Je ne permettrai pas que des considérations de religion, de nation, de race, de parti ou de classe sociale viennent s'interposer entre mon devoir et mon patient.

Même sous la menace, je n'admettrai pas de faire usage de mes connaissances médicales contre les lois de l'humanité.

J'informerai mes patients des décisions envisagées, de leurs raisons et de leurs conséquences. Je ne tromperai jamais leur confiance et n'exploiterai pas le pouvoir hérité des connaissances pour forcer les consciences.

Je préserverai l'indépendance nécessaire à l'accomplissement de ma mission. Je n'entreprendrai rien qui dépasse mes compétences. Je les entretiendrai et les perfectionnerai pour assurer au mieux les services qui me seront demandés.

Respectueux et reconnaissant envers mes Maîtres, je rendrai à leurs enfants l'instruction que j'ai reçue de leur père.

Que les hommes m'accordent leur estime si je suis fidèle à mes promesses.

Que je sois déshonorée et méprisée de mes confrères si j'y manque.

COLOMBANI Maria – Evaluation de la croissance mandibulaire par la modélisation 3D

Th. : Chir. dent. : Marseille : Aix-Marseille Université : 2021

Rubrique de classement : discipline odontologique de la thèse

Résumé :

La croissance mandibulaire est un phénomène complexe qui a été beaucoup étudié par ENLOW et MOSS au XX^{ème} siècle. Elle dépend d'un potentiel de croissance primaire du cartilage condylien mais aussi de capacités adaptatives de croissance en réponse à l'environnement. Elle est ainsi définie par des phénomènes d'apposition et de résorption osseuse. En revanche, l'évolution des techniques et le progrès dans le domaine informatique permettent d'appréhender plus précisément ce phénomène. La croissance mandibulaire a toujours été analysée sur des radiographies 2D ; grâce à la modélisation 3D une analyse en trois dimensions est possible. Cette analyse permet de fournir des informations plus précises, indispensables pour la planification du traitement orthodontique.

Mots-clés : Croissance mandibulaire, apposition/résorption, modèles éléments finis, modélisation 3D, landmarks,

COLOMBANI Maria – Assessment of mandibular growth by 3D modeling

Abstract:

Mandibular growth is a complex phenomenon that has been studied extensively by ENLOW and MOSS in the 20th century. It depends on the primary growth potential of the condylar cartilage but also on adaptive growth capacities in response to the environment. It is thus defined by phenomena of bone apposition and resorption. On the other hand, the evolution of techniques and the progress in the computer field make it possible to apprehend more precisely this phenomenon. Mandibular growth has always been analyzed on 2D radiographs; 3D modeling make possible a three-dimensional analysis. This analysis provides more precise information, essential for planning orthodontic treatment.

Keywords : Mandibular growth, apposition/resorption, finite element, 3D modeling, landmarks