Aix Marseille Université

NNT : 0000AIXM0000

THÈSE DE DOCTORAT

Soutenue à Aix-Marseille Université
le 6 décembre 2024 par

Charlotte MANSUY DALMAS

Variabilité des densités osseuses de la zone pré-sinusienne chez l'édenté complet

Discipline
Sciences de l'environnement

Spécialité
Anthropologie biologique

École doctorale
ED 251 – Sciences de l'environnement

Laboratoire de recherche
UMR 7268 – Anthropologie Droit Éthique et Santé ADES

Composition du jury

Marie-Violaine BERTERETCHE PU-PH – Université de Paris	Rapporteuse
Delphine CARAYON MCU-PH – Université de Montpellier	Rapporteuse
Gérald MAILLE MCU-PH – Université Côte d'Azur	Examinateur
Rémi ESCLASSAN PU-PH – Aix-Marseille Université	Président du jury
Michel RUQUET PU-PH – Aix-Marseille Université	Directeur de thèse
Chloé MENSE MCU-PH – Aix-Marseille Université	Co-directrice de thèse

Faculté des sciences médicales et paramédicales Aix Marseille Université

ADES UMR 7268

AFFIDAVIT

Je soussignée, Charlotte Mansuy Dalmas, déclare par la présente que le travail présenté dans ce manuscrit est mon propre travail, réalisé sous la direction scientifique de Michel Ruquet et Chloé Mense, dans le respect des principes d'honnêteté, d'intégrité et de responsabilité inhérents à la mission de recherche. Les travaux de recherche et la rédaction de ce manuscrit ont été réalisés dans le respect à la fois de la charte nationale de déontologie des métiers de la recherche et de la charte d'Aix-Marseille Université relative à la lutte contre le plagiat.

Ce travail n'a pas été précédemment soumis en France ou à l'étranger dans une version identique ou similaire à un organisme examinateur.

Fait à Marseille, le 7 octobre 2024

Cette œuvre est mise à disposition selon les termes de la Licence Creative Commons Attribution - Pas d'Utilisation Commerciale - Pas de Modification 4.0 International.

LISTE DE PUBLICATIONS ET PARTICIPATION AUX CONFERENCES

1) Liste des publications réalisées dans le cadre du projet de thèse :

1. MANSUY C., SALIBA-SERRE B., MENSE C., HÜE O., TAVITIAN P., RUQUET M. Variabilité des densités osseuses de la zone pré-sinusienne chez l'édenté complet. Cah prothèses 2019;47:51-60.
   URL : https://www.editionscdp.fr/revues/les-cahiers-de-prothese/article/n-185/variabilite-des-densites-osseuses-de-la-zone-pre-sinusienne-chez-l-edente-complet-CDP_185_P51-P60.html?query=MANSUY&revues%5B0%5D=CLI&revues%5B1%5D=CDP&revues%5B2%5D=JPA&revues%5B3%5D=IMP&page=1&bypage=25&sortby=date (Annexe C.1.1).

2. MANSUY C., SALIBA-SERRE B., RUQUET M., RASKIN A., HÜE O., SILVESTRI F., MENSE C. Assessment of bone density in edentulous maxillae using cone beam computed tomography (CBCT). J Stomatol Oral Maxillofac Surg. 2024 Mar;16:101825. ISSN : 2468-7855. DOI: 10.1016/j.jormas.2024.101825. URL: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2468785524000612?via%3Dihub (Annexe C.1.2).

3. MANSUY C., SILVESTRI F., MOZZICONACCI L., ESCLASSAN R., HÜE O., RUQUET M., MENSE C. Quantitative evaluation of trabecular bone density and bone height in different regions of edentulous maxillae according to age and sex. En soumission au J Stomatol Oral Maxillofac Surg.

2) Participation aux conférences et écoles d'été au cours de la période de thèse :

1. MANSUY C., SALIBA-SERRE B., HÜE O., TAVITIAN P., RUQUET M. Variabilité des densités osseuses de la zone pré-sinusienne chez l'édenté complet. Communication affichée (poster) présentée aux 42èmes journées du Collège National des Enseignants en Prothèse Odontologique (CNEPO), Bordeaux, 14-15 septembre 2018. (Annexe C.2.1).

2. MANSUY C., SILVESTRI F., STEPHAN G. Extensions des prothèses complètes ostéo-ancrées mandibulaires : état des connaissances. Communication orale présentée au Symposium International sur le Traitement de l'Édentement Total (SITET), Annecy, 21 juin 2019 (Annexe C.2.2).

3. MANSUY C., MENSE C., TAVITIAN P. Choix et limites des conceptions prothétiques fixes ostéo-ancrées au maxillaire : à propos d'un cas. Communication affichée (poster) présentée aux 43èmes journées du CNEPO, Paris, 13-14 septembre 2019 (Annexe C.2.3).

4. MANSUY C., SALIBA-SERRE B., HÜE O., TAVITIAN P., RUQUET M. Variabilité des densités osseuses de la zone pré-sinusienne chez l'édenté complet. Communication affichée (poster) présentée au 28ème congrès des Doctorants en Sciences de l'Environnement (ED 251), Marseille, 14-15 avril 2021. URL : https://edsecongres.osupytheas.fr/wp-content/uploads/2021/04/livret-des-résumés_28ème-congrès-des-Doctorants-de-lED251.pdf (Annexe C.2.4).

5. MANSUY C., SALIBA-SERRE B., RUQUET M., RASKIN A., HÜE O., SILVESTRI F., MENSE C. Étude des variations des densités osseuses du maxillaire édenté à partir de CBCT. Communication orale présentée à la 4ème Journée Recherche de l'École de Médecine Dentaire, Marseille, 21 Mai 2024 (Annexe C.2.5).

6. MANSUY C., SALIBA-SERRE B., RUQUET M., HÜE O., SILVESTRI F., MENSE C. Étude des variations des densités osseuses du maxillaire édenté à partir de CBCT. Communication affichée présentée aux 46èmes Journées du Collège National des Enseignants en Prothèse et Réhabilitation Oro-Faciale (CNEPROF), Nice, 27-28 septembre 2024.
   URL : https://www.cneprof.com/poster/etude-des-variations-des-densites-osseuses-du-maxillaire-edente-a-partir-de-cbct/ (Annexe C.2.6).

RESUME

L'étude des modifications du squelette facial humain fournit des informations sur la relation entre structure osseuse et fonction. Le vieillissement et l'édentement complet maxillaire impliquent des conséquences anatomiques, fonctionnelles, esthétiques, sociales et psychologiques. La perte totale des dents engendre une diminution des forces masticatoires, une résorption tridimensionnelle irréversible de l'os alvéolaire et un remodelage de la structure osseuse.

Cette thèse a pour objectif d'étudier la variabilité de la densité de l'os maxillaire édenté chez l'être humain vivant, afin de mieux comprendre les adaptations de l'os maxillaire au vieillissement et à l'édentement.

L'étude de la zone pré-sinusienne de l'os maxillaire représente un défi majeur pour plusieurs raisons : son anatomie et ses relations avec les structures anatomiques nobles, son origine embryologique et le débat sur la persistance d'un os prémaxillaire chez l'Homme adulte, son architecture interne qui s'adapte aux contraintes biomécaniques, son rôle dans les fonctions orales (mastication, déglutition, phonation) et enfin son implication dans l'équilibre psychologique et social de l'individu.

De nombreuses classifications ont été proposées dans la littérature afin de quantifier les changements morphologiques et structurels du maxillaire après édentement. A ce jour, aucune classification ne tient compte à la fois de la variabilité morphologique et de la variabilité structurelle des os des mâchoires.

Les études menées dans le cadre de cette thèse nous permettent de conclure que :

- La variabilité inter-individuelle de la densité osseuse du maxillaire édenté peut être expliquée par des facteurs généraux (âge, sexe) et locaux (hauteur de l'os crestal).
- Concernant la variabilité intra-individuelle, la densité osseuse varie au sein même du maxillaire édenté : dans le sens vertical (diminution de la crête aux structures apicales), dans le sens transversal (diminution des sites incisifs aux sites prémolaires) et dans le sens vestibulo-palatin.

Mots clés : vieillissement, densité osseuse, résorption osseuse, tomographie volumique à faisceau conique, implant dentaire, mâchoire édentée, maxillaire

ABSTRACT

The study of changes in the human facial skeleton provides information about the relationship between bone structure and function. Aging and maxillary complete edentulism lead to anatomical, functional, aesthetic, social and psychological consequences. Total tooth loss causes a reduction in masticatory forces, irreversible three-dimensional resorption of alveolar bone, and remodeling of the bone structure.

This thesis aims to study the variability of the density in the edentulous maxilla in living humans, in order to better understand the adaptations of the maxilla to aging and edentulism.

Studying the area between the maxillary sinuses is challenging for many reasons: its anatomy and relationships with important anatomical structures, its embryological origin and the debate about the persistence of premaxilla in adult humans, its architecture adapted to mechanical loads, its contribution to oral functions (chewing, swallowing, phonation) and its implication in social and psychological balance.

Many classifications have been proposed in the scientific literature to determine the morphological and structural changes of the maxilla after tooth loss. There is currently no classification that considers both the morphological and structural variability of the jawbone.

The studies conducted as part of this thesis lead to the following conclusions:

- The inter-individual variability of bone density in the edentulous maxilla can be explained by general (age, sex) and local (crestal bone height) factors.
- As regards the inter-individual variability, there is a variation of bone density in vertical direction (reduction from crest to apical structures), in transverse direction (reduction from incisor sites to premolar sites), and in buccolingual direction.

Keywords : aging, bone density, bone resorption, cone beam computed tomography, dental implant, edentulous jaw, maxilla

REMERCIEMENTS

Remerciements au jury

A Monsieur le Professeur Michel RUQUET, directeur de thèse

Je vous remercie pour la confiance que vous m'avez accordée à l'issue de mon internat, en m'intégrant au sein de votre équipe. Merci de m'avoir incitée à d'approfondir les travaux de recherche de mon Master 2, en acceptant d'encadrer cette thèse. Vos encouragements ont été un moteur dans l'avancée de ce travail. Veuillez trouver dans cette thèse l'expression de ma reconnaissance.

A Madame le Docteur Chloé MENSE, co-directrice de thèse

Je te remercie d'avoir accepté de codiriger ce travail. Merci pour ton engagement, ta disponibilité et ta lecture assidue de chaque version de ce manuscrit. Tu as toujours été à l'écoute de mes interrogations, et tes conseils avisés ont grandement contribué à l'aboutissement de cette thèse. Je te prie de trouver dans ce travail le témoignage de ma sincère amitié.

A Monsieur le Professeur Rémi ESCLASSAN, président du jury

Je vous remercie d'avoir accepté de présider ce jury. Je suis honorée de travailler à vos côtés depuis un an, et de pouvoir bénéficier de votre expérience dans le domaine de la recherche. Votre bienveillance envers les étudiants et les praticiens, ainsi que votre enthousiasme sont une source d'inspiration. Veuillez trouver dans ce travail l'expression de mon profond respect.

A Madame le Professeur Marie-Violaine BERTERETCHE, rapporteuse

Je vous remercie sincèrement d'avoir accepté de participer à ce jury et de consacrer votre précieux temps à la relecture de ce manuscrit. Je suis honorée de bénéficier de votre expertise dans l'évaluation de cette thèse. Veuillez trouver dans ce travail l'expression de toute ma gratitude.

A Madame le Docteur Delphine CARAYON, rapporteuse

Je vous remercie sincèrement d'avoir réorganisé votre emploi du temps pour participer à ce jury et de prendre le temps de relire ce manuscrit. Je suis honorée de bénéficier de vos compétences dans l'évaluation de cette thèse. Veuillez trouver dans ce travail le témoignage de toute ma gratitude.

A Monsieur le Docteur Gérald MAILLE, examinateur

Je te remercie sincèrement d'avoir accepté de participer à ce jury. Je suis reconnaissante de bénéficier de tes compétences dans l'évaluation de mon travail. J'espère que cette thèse sera à la hauteur de ta rigueur et ton exigence, qui sont un exemple pour moi. Je te prie de trouver dans ce travail le témoignage de mon profond respect.

<u>A tous ceux qui m'ont accompagnée dans ce Doctorat d'Université</u>

Au Professeur Olivier HÜE, je vous remercie de m'avoir suggéré d'étudier les densités osseuses de l'os maxillaire lors de la constitution de mon projet de recherche de Master 2 en 2017. J'espère que cette thèse répondra à vos interrogations initiales et sera à la hauteur de vos attentes. Votre engagement et votre dévouement envers vos patients, les étudiants et les jeunes praticiens constituent un modèle qui me guidera tout au long de ma carrière.

Au Professeur Anne RASKIN, je vous remercie pour vos précieux conseils sur l'interprétation des analyses statistiques de cette thèse. Votre expérience dans le domaine de la recherche m'a aidée à améliorer la qualité de mon travail.

A Madame Bérengère SALIBA-SERRE, je vous remercie pour votre expertise en statistiques. Votre grande rigueur m'a guidée dans le choix d'analyses pertinentes pour la première étude menée dans le cadre de cette thèse.

Au Docteur Frédéric SILVESTRI, je te remercie pour ton accompagnement dans la publication de mes travaux de recherche. Tes conseils avisés m'ont été d'une grande aide dans la rédaction et la soumission d'articles scientifiques internationaux, et j'espère que nous aurons l'occasion de collaborer ensemble sur d'autres projets.

A la mémoire du Docteur Patrick TAVITIAN, qui m'a accompagnée au début de cette thèse et qui a su me transmettre sa passion pour l'implantologie et les prothèses supra-implantaires.

A l'ensemble de l'équipe de Prothèses et du Service de Réhabilitations Orales, je vous remercie de m'avoir intégrée au sein de votre équipe, de votre soutien et votre accompagnement dans ma carrière hospitalo-universitaire.

<u>A ma famille et mes amis :</u>

A mon mari Florian, pour son aide précieuse, sa patience et son amour, **et à mon fils Antoine** pour tous les petits bonheurs qu'il m'apporte.

A ma famille, qui m'a toujours encouragée et soutenue dans la poursuite d'une carrière hospitalo-universitaire.

A mes amis, pour leur soutien et leur amitié.

TABLE DES MATIERES

AFFIDAVIT 2

LISTE DE PUBLICATIONS ET PARTICIPATION AUX CONFERENCES 3

RESUME 5

ABSTRACT 6

REMERCIEMENTS 7

TABLE DES MATIERES 9

INTRODUCTION 14

1 POURQUOI QUANTIFIER LA STRUCTURE DE L'OS MAXILLAIRE TOTALEMENT ÉDENTÉ ? 15

1.1 L'os maxillaire : généralités 16

1.1.1 Anatomie 16

1.1.1.1 Anatomie de l'os maxillaire 16

1.1.1.2 Anatomie du sinus maxillaire 17

1.1.2 Embryologie et croissance de l'os maxillaire 18

1.1.2.1 Embryologie, développement fœtal : période pré-natale 18

1.1.2.2 Croissance : période post-natale 20

1.1.3 Histologie et architecture de l'os maxillaire 22

1.1.3.1 Le tissu osseux : os cortical et os trabéculaire 22

1.1.3.1.1 L'os cortical 22

1.1.3.1.2 L'os trabéculaire 23

1.1.3.2 Modelage et remodelage 23

1.1.3.3 Os basal et os alvéolaire 24

1.1.3.4 Adaptation de l'os maxillaire aux contraintes biomécaniques 25

1.1.4 Vieillissement « normal » ou physiologique des maxillaires 26

1.2 Spécificités de l'édentement complet 27

1.2.1 Épidémiologie de l'édentement complet 27

1.2.2 Conséquences de l'édentement complet 28

1.2.2.1 Conséquences anatomiques au niveau osseux : la résorption osseuse 28

1.2.2.2 Conséquences fonctionnelles 31

1.2.2.3 Conséquences esthétiques 33

1.2.2.4 Conséquences sociales et psychologiques 33

1.2.3 Vulnérabilité du sujet édenté complet au maxillaire 34

1.3 Pourquoi étudier la densité de l'os maxillaire ? 36

1.3.1 Intérêt en recherche fondamentale en anthropologie 36

1.3.1.1 L'os « prémaxillaire » 36

1.3.1.2 Étude des adaptations de l'os maxillaire au vieillissement 40

1.3.1.1 Étude des adaptations de l'os maxillaire à l'édentement 42

1.3.2 Intérêt en recherche clinique : réhabilitation implanto-prothétique du maxillaire édenté 43

1.3.2.1 La qualité de l'os et la densité de l'os 43

1.3.2.2 Densité et stabilité primaire : le succès des thérapeutiques implantaires 44

1.3.2.3 Densité, choix de l'implant et protocole chirurgical 45

1.3.2.4 Densité et protocole de mise en charge 46

2 PAR QUELS MOYENS ETUDIER LA VARIABILITE DE LA DENSITE DE L'OS MAXILLAIRE ? 48

2.1 Les différentes méthodes d'évaluation de la densité osseuse 49

2.1.1 Les méthodes subjectives : visuelles ou tactiles 49

2.1.1.1 L'évaluation visuelle sur radiographies ou coupes radiologiques 49

2.1.1.2 L'évaluation tactile lors du forage implantaire 49

2.1.2 Les méthodes objectives : quantitatives 50

2.1.2.1 Les méthodes objectives *ex vivo* 50

2.1.2.1.1 L'examen histomorphométrique des biopsies osseuses 50

2.1.2.1.2 La microtomodensitométrie (micro-CT *microcomputed tomograph*y) 50

2.1.2.2 Les méthodes objectives *in vivo* (non invasives) 51

2.1.2.2.1 Les radiographies en deux dimensions 51

2.1.2.2.2 L'ostéodensitométrie ou absorptiométrie biphotonique à rayons X (DXA Dual energy X-ray Absorptiometry) 51

2.1.2.2.3 La tomographie assistée par ordinateur (CT *Computed Tomography*) 52

2.1.2.2.4 La tomographie volumique à faisceau conique (CBCT Cone Beam Computed Tomography) 53

2.1.2.3 Les méthodes basées sur l'évaluation de la stabilité primaire de l'implant 56

2.1.2.3.1 Le *Periotest®* 56

2.1.2.3.2 La résistance au couple d'insertion 57

2.1.2.3.3 L'analyse de la fréquence de résonnance (RFA *resonance frequency analysis*) 57

2.2 Classifications 59

2.2.1 Classifications des résorptions (morphologie) 59

2.2.1.1 Classification quantitative de Lekholm et Zarb (1985) 59

2.2.1.2 Classification de Fallschüssel (1986) 60

2.2.1.3 Classification quantitative de Misch et Judy (1987) 60

2.2.1.4 Classification de Cawood et Howell (1988) 62

2.2.1.5 Classification HCV de Wang et Al-Shammari (2002) 62

2.2.1.6 Classification UCLA de El-Ghareeb et al. (2008) 63

2.2.1.7 Classification RDRC (Restoratively Driven Ridge Categorization) de Elian et al. (2009) 64

2.2.2 Classifications qualitatives : densité osseuse, structure 66
2.2.2.1 Classification de Linkow (1970) 66
2.2.2.2 Classification qualitative de Lekholm et Zarb (1985) 66
2.2.2.3 Classifications de Lindh et al (1996) 69
2.2.2.4 Classification qualitative de Misch (1988) 69
2.2.2.5 Classification HNS de Rebaudi et al. (2010) 71
2.2.2.6 Classification de Wang et al. (2023) 72
2.2.1 Classifications de structure (qualité) et de morphologie (quantité) 74
2.2.1.1 Classification HAC (Horizontal Alveolar Change Classification) de Pelegrine et al. (2018) 74
2.2.1.2 Classification de Shemtov-Yona (2021) 75

3 ÉTUDES DE LA VARIABILITÉ DE LA DENSITÉ DE L'OS CHEZ L'ÉDENTÉ COMPLET MAXILLAIRE A PARTIR DE CBCT 77

3.1 ÉTUDE N°1 : objectifs, matériels et méthodes, résultats 78
3.1.1 Objectifs de l'ÉTUDE N°1 78
3.1.2 Matériels et méthodes (ÉTUDE N°1) 78
3.1.2.1 Sujets 78
3.1.2.2 Acquisition des images CBCT 79
3.1.2.3 Mesures des densités osseuses à partir des CBCT 79
3.1.2.4 Analyses statistiques 80
3.1.2.4.1 Variabilité inter-individuelle 81
3.1.2.4.2 Variabilité intra-individuelle 81
3.1.2.5 Considérations éthiques 81
3.1.3 Résultats de l'ÉTUDE N°1 82
3.1.3.1 Statistiques descriptives 82
3.1.3.2 Variabilité inter-individuelle 83
3.1.3.2.1 Influence du sexe 83
3.1.3.2.2 Influence de l'âge 85
3.1.3.3 Variabilité intra-individuelle 86
3.1.3.3.1 Comparaison des densités osseuses en fonction du site implantaire 86
3.1.3.3.2 Comparaison des densités osseuses en trois points de l'implant 87
3.1.3.3.3 Comparaison des densités osseuses des zones vestibulaires et palatines 88

3.2 ÉTUDE N°2 : objectifs, matériels et méthodes, résultats 89
3.2.1 Objectifs de l'ÉTUDE N°2 89
3.2.2 Matériels et méthodes (ÉTUDE N°2) 89
3.2.2.1 Sujets 89
3.2.2.2 Acquisition des images CBCT 89
3.2.2.3 Mesures des densités osseuses à partir des CBCT 90
3.2.2.4 Analyses statistiques 90
3.2.2.4.1 Variabilité inter-individuelle 91
3.2.2.4.2 Variabilité intra-individuelle 92
3.2.2.5 Considérations éthiques 92

3.2.3 Résultats de l'ÉTUDE N°2 93
3.2.3.1 Statistiques descriptives 93
3.2.3.1 Variabilité inter-individuelle 94
3.2.3.1.1 Influence du sexe 94
3.2.3.1.2 Influence de l'âge 97
3.2.3.1.3 Influence du diabète 100
3.2.3.1.4 Influence de la durée d'édentement 101
3.2.3.1.5 Influence de la hauteur de la crête osseuse 103
3.2.3.1.6 Influence des variables quantitatives : âge, taille, poids, consommation de tabac, longueur moyenne des implants virtuels 105
3.2.3.2 Variabilité intra-individuelle 109
3.2.3.2.1 Comparaison des densités osseuses en fonction du site implantaire 109
3.2.3.2.2 Comparaison des densités osseuses en trois points de l'implant 111
3.2.3.2.3 Comparaison des densités osseuses des zones vestibulaires et palatines 112
3.3 Discussion 113
3.3.1 Forces des études 113
3.3.1.1 Études portant sur les sujets édentés complets au maxillaire 113
3.3.1.2 Protocole de mesure de la densité 114
3.3.1.3 Choix du CBCT 115
3.3.2 Comparaison avec les études précédentes 116
3.3.3 Variabilité inter-individuelle : étude de facteurs anthropologiques 120
3.3.3.1 Influence du sexe des individus 120
3.3.3.1 Influence de l'âge des individus 124
3.3.3.2 Influence de la pathologie diabétique 128
3.3.3.3 Influence de la durée d'édentement 129
3.3.3.4 Influence de la résorption (hauteur de la crête osseuse) 129
3.3.3.5 Étude multivariée des variables quantitatives : âge taille, poids, consommation de tabac, âge, longueur moyenne des implants virtuels 130
3.3.4 Variabilité intra-individuelle 132
3.3.4.1 Variabilité de la densité osseuse en fonction de la localisation sur l'arcade (sens transversal) 132
3.3.4.2 Variabilité de la densité osseuse dans le sens vertical 133
3.3.4.3 Variabilité de la densité osseuse dans le sens vestibulo-palatin 134
3.3.4.4 Implications cliniques de la variabilité intra-individuelle en implantologie 135
3.3.5 Limites de l'étude et perspectives 138
3.3.5.1 Population étudiée et échantillon 138
3.3.5.2 Caractère rétrospectif et données manquantes 138
3.3.5.3 Performances du CBCT 138
3.3.5.4 Influence de la résorption osseuse 139
3.3.5.5 Influence de l'épaisseur de l'os cortical 139
3.3.5.6 Influence sur la stabilité primaire et les taux de succès implantaires 139
3.4 Synthèse des études N°1 et N°2 140
CONCLUSION 141

BIBLIOGRAPHIE **145**

LISTE DES ACRONYMES **158**

TABLE DES FIGURES **159**

TABLE DES TABLEAUX **162**

ANNEXES **164**

A. Comité d' Éthique de l'Université d'Aix Marseille **164**

B. Tableaux annexes **165**

C. Recueil des publications **166**

1. Liste des publications réalisées dans le cadre du projet de thèse 166
2. Participation aux congrès au cours de la période de thèse 182

INTRODUCTION

Chez les vertébrés, la structure des os reflète l'histoire de l'évolution des espèces, ainsi que les adaptations physiologiques et comportementales aux changements environnementaux. L'étude des modifications du squelette facial des primates fournit des informations sur la relation entre structure osseuse et fonction. L'Homme constitue un primate modèle pour étudier la perte de fonction crânio-faciale après édentement.[1]

L'os maxillaire, qui occupe le tiers moyen du massif facial supérieur, est un os support de charge : il supporte des charges mécaniques volontaires impliquant des forces musculaires lors de la mastication. Conformément aux lois de Wolff, les contraintes biomécaniques transmises par les dents aux pièces squelettiques s'accompagnent de variations de microstructure de l'os cortical et de l'os trabéculaire. Ainsi, l'os maxillaire se forme, se remodèle et se résorbe en fonction des charges qu'il subit, et ses propriétés mécaniques sont ainsi modifiées.[2–5]

Le vieillissement et la perte des dents impliquent des conséquences anatomiques, fonctionnelles, esthétiques, sociales et psychologiques. L'édentement engendre une diminution des contraintes mécaniques et des forces masticatoires, et, par conséquent, il entraine une résorption tridimensionnelle irréversible de l'os alvéolaire. Cette résorption pourrait s'accompagner de modifications de la microstructure osseuse, et ainsi de variations de la densité osseuse. Ces changements de la crête alvéolaire pourraient être influencés par des facteurs généraux (hormonaux, pathologies, âge…) ou locaux (état initial de l'os, antécédents de maladie parodontale, port d'une prothèse…).[1,6–12]

Dans le cadre de cette thèse, nous étudierons la **densité de l'os maxillaire édenté de l'Homme** afin d'aborder les thèmes suivants :

- **Les caractéristiques de l'os maxillaire édenté** : Existe-t-il une adaptation osseuse liée à la perte des dents ? Si oui, comment cette adaptation se manifeste-t-elle ?
- **La variabilité inter-individuelle** : La densité est-elle influencée par l'âge et le sexe des individus ? Quels paramètres anthropologiques, locaux ou généraux, peuvent expliquer la variabilité du maxillaire édenté ?
- **La variabilité intra-individuelle** : L'architecture interne de l'os maxillaire édenté est-elle la même en tout point ? Si non, comment varie-t-elle ? Quelles sont les implications cliniques de ces variations ?

Cette thèse comprendra trois grandes parties, afin d'aborder successivement :

- L'intérêt de l'étude des variations de structure de l'os maxillaire édenté,
- Les moyens à notre disposition pour quantifier et classer la structure du maxillaire,
- Et enfin deux études visant à évaluer la variabilité de l'os maxillaire édenté.

1 POURQUOI QUANTIFIER LA STRUCTURE DE L'OS MAXILLAIRE TOTALEMENT ÉDENTÉ ?

Le massif facial est le siège du système cognitif et supporte la fonction essentielle de **phonation** par le biais de la cavité orale. La face assure la réception des messages, leur perception et la transmission au système nerveux central.[13,14]

L'os maxillaire occupe le tiers moyen du massif facial supérieur. Il présente un **os basal**, constituant la charpente du maxillaire, et un **os alvéolaire**, dont le volume est conditionné par la présence des dents.[8,11,14,15] La **perte des dents** entraine un remodelage et des modifications irréversibles de l'os maxillaire, et notamment de l'os alvéolaire.

Cette première partie abordera tout d'abord les **notions générales** d'anatomie, d'embryologie, d'histologie et de vieillissement physiologique de l'os maxillaire, puis elle présentera les **spécificités et conséquences de l'édentement complet**, pour enfin **expliquer l'intérêt de l'étude de la structure de l'os maxillaire totalement édenté**.

1.1 L'os maxillaire : généralités

1.1.1 Anatomie

1.1.1.1 Anatomie de l'os maxillaire

Selon l'***Académie Nationale de Médecine***[16], l'os maxillaire ou maxillaire supérieur est l'os « *pair du squelette de la face qui, articulé avec son homologue du côté opposé, constitue la majeure partie de la mâchoire supérieure* ». L'os maxillaire a la forme d'une pyramide triangulaire tronquée, située au-dessus de la cavité orale, au-dessous de l'orbite et en dehors de la cavité nasale.[13,16] Il présente un corps d'où se détachent quatre processus : zygomatique, frontal, alvéolaire et palatin.[14]

De forme pyramidale, le **corps** du maxillaire, présente trois faces[13,14] :

- La face supérieure ou orbitaire, qui forme la plus grande partie du plancher de l'orbite.
- La face antéro-externe ou jugale, qui présente, le long de son bord inférieur, les alvéoles dentaires, et un rebord saillant correspondant à la bosse canine.
- La face postéro-externe ou infratemporale ou ptérygo-maxillaire qui forme la paroi antérieure de la fosse ptérygo-maxillaire ; sa partie latérale présente une saille prolongeant le processus alvéolaire, appelée tubérosité maxillaire.

Le **sommet** de l'os maxillaire se situe à la jonction des trois faces de l'os maxillaire : externe, tronqué et déchiqueté, il s'articule avec l'os zygomatique.[13]

La **base** de l'os maxillaire, interne, est divisée en deux segments, nasal et buccal par le processus palatin.[13] Le segment nasal constitue la paroi latérale des fosses nasales.[13,14] Le segment buccal est une surface étroite comprise entre le processus palatin et le bord alvéolaire.[13] Le processus palatin, horizontal, sépare la fosse nasale de la cavité buccale. Il est formé d'os spongieux et présente :[13,14]

- Une face supérieure, gouttière sagittale, formant les deux tiers antérieurs du plancher des fosses nasales ;
- Une face inférieure formant les deux tiers antérieurs de la voûte palatine ou palais osseux : près du rebord interne, elle est renflée en un bourrelet longitudinal, le torus palatin ;
- Un bord externe qui s'implante sur la face interne du maxillaire ;
- Un bord postérieur s'articulant avec l'os palatin ;
- Une face interne s'unissant au bord interne du côté opposé, pour former la crête nasale et l'épine nasale antérieure à la face supérieure, le canal palatin antérieur ou incisif, puis la suture intermaxillaire et le foramen incisif ;
- Un bord antérieur.

La base du maxillaire comporte quatre bords :[13]

- Le bord inférieur ou alvéolaire, creusé par les alvéoles dentaires ;
- Le bord antérieur, s'unissant au maxillaire homologue du côté opposé ;
- Le bord postérieur, s'articulant avec l'os palatin, et limitant l'arrière-fond de la fosse ptérygo-maxillaire ;
- Le bord supérieur, s'articulant avec l'os ethmoïde dans ses trois quarts postérieurs.

1.1.1.2 Anatomie du sinus maxillaire

Le corps de l'os maxillaire est creusé d'une vaste cavité pneumatique aérienne : **le sinus maxillaire** ou antre de Highmore. Le sinus maxillaire est localisé au-dessus de la cavité buccale, sous la cavité orbitaire et en dehors des fosses nasales, et occupe les deux tiers supérieurs de l'os maxillaire.[17] Il communique avec la fosse nasale dans le méat nasal moyen par le hiatus semi-lunaire, sous le plancher du sinus.[8,13,14,16] La formation des sinus s'effectue par pneumatisation, c'est-à-dire par un processus de cavitation des pièces osseuses.[14]

Le sinus maxillaire a la forme d'une pyramide triangulaire présentant :[13,14]

- **Une paroi médiale ou interne**, **la cloison intersinuso-nasale,** qui constitue la moitié inférieure de la paroi latérale de la fosse nasale ;
- **Une paroi supérieure ou orbitaire**, mince et fragile, participant à la constitution du plancher de l'orbite ;
- **Une paroi antérieure ou jugale,** correspondant à la paroi d'abord chirurgical vestibulaire de Caldwell-Luc (chirurgie d'élévation sinusienne par abord latéral) : elle est constituée d'os compact mince au niveau de la fosse canine et épais en périphérie (au niveau des piliers osseux canins) ;
- **Une paroi postérieure ou ptérygo-maxillaire**, épaisse, en rapport avec la tubérosité maxillaire qui sépare le sinus de la fosse ptérygo-maxillaire ;
- **Une paroi inférieure, le plancher sinusien,** en relation avec les apex des prémolaires et des premières molaires. Une fine couche de tissu spongieux sépare les dents de la cavité sinusienne, mais il peut parfois être fin, la muqueuse sinusienne se trouvant alors au contact des racines. Chez les sujets édentés, cette paroi est localisée un centimètre en dessous du plancher des fosses nasales.
- **Un sommet externe**, qui répond au processus zygomatique du maxillaire.

Des cloisonnements ou septa peuvent être présents dans la cavité sinusienne.[13,14] Le volume des sinus maxillaires est très variable, en fonction de l'individu, de son âge et de l'édentement.[17]

1.1.2 Embryologie et croissance de l'os maxillaire

1.1.2.1 Embryologie, développement fœtal : période pré-natale

A la fin de la 4ème semaine de vie intra-utérine (IU), les **cinq bourgeons de la face**, issus de la crête neurale, apparaissent autour du stomodeum : un bourgeon nasofrontal, impair et médian, deux bourgeons maxillaires et deux bourgeons mandibulaires (Figure 1).[18,19] La fusion de ces cinq bourgeons intervient entre la 4ème et la 10ème semaine de vie IU.[19]

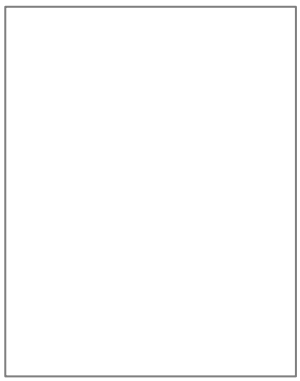


Figure 1 : Les cinq bourgeons de la face : le bourgeon nasofrontal (1), les deux bourgeons maxillaires (2) et les deux bourgeons mandibulaires (3) limitant la cavité stomodéale (*) (Illustration : Goldberg et al.[19])

Les bourgeons maxillaires proviennent des bourgeons latéraux du premier arc branchial ou arc maxillo-mandibulaire : ils constituent les limites latérales du **stomodeum** (Figures 1 et 2).[8,19] Au cours des 6ème et 7ème semaines de vie IU :

- Le bourgeon nasal interne et le bourgeon maxillaire convergent ;
- Le segment intermaxillaire, la partie moyenne du philtrum de la lèvre supérieure, la partie moyenne des maxillaires et le palais primaire se forment (Figure 2).[8,19]

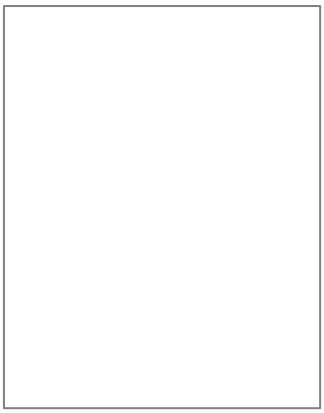


Figure 2 : Formation des maxillaires (Illustration : Goldberg[8])

(A) Les zones hachurées correspondent aux dérivés du premier arc branchial. Le bourgeon nasofrontal sépare les deux éléments des maxillaires. (B) La fusion des deux demi-arcs de la mandibule et les bourgeons issus du bourgeon nasofrontal contribuent à la formation des maxillaires. (C) Maxillaires et mandibule sont formés et en voie de développement.

Le **bourgeon nasofrontal** produit les os nasaux, les conches nasales et les os **prémaxillaires** ; il contribue à l'élaboration du segment intermaxillaire (Figure 3).[8,18] Le **bourgeon maxillaire** génère les os palatins, zygomatiques et **maxillaires** (Figure 3).[18] Enfin, le bourgeon mandibulaire donne naissance à la mandibule (Figure 3).[18] Les os lacrymaux et l'os vomer sont issus des cellules de la crête neurale mais leur origine exacte reste inconnue (Figure 3).[18]

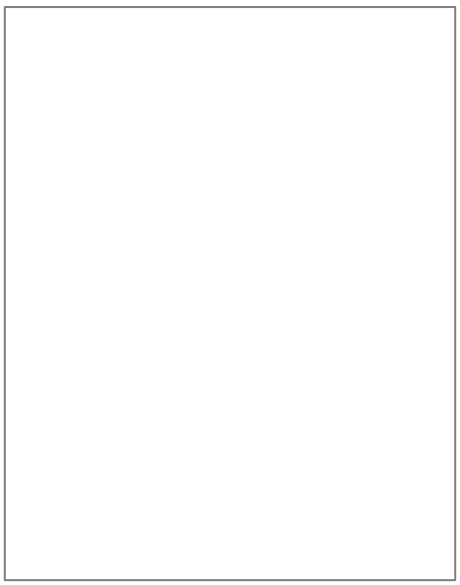


Figure 3 : Origine des os de la face humaine, par extrapolation des résultats obtenus chez l'oiseau (Illustration : Khonsari et Catala[18])

Le **palais** assure la séparation entre les fosses nasales et la cavité buccale.[18] C'est une région mixte, comprenant le palais primaire et le palais secondaire.[18]

- Le palais primaire, ou processus palatin médian, se développe entre la 5ème semaine et la 12ème semaine de vie IU, à partir du prémaxillaire et donc du bourgeon nasofrontal : il ne provient pas du premier arc branchial. Le palais primaire constitue la portion du palais osseux située en arrière de l'arcade dentaire antérieure (secteur incisif).[8,18,19]
- Le palais secondaire se développe vers la 6ème semaine de vie IU, à partir des cellules issues des bourgeons maxillaires : il constitue la portion plus postérieure du palais.[8,18]

Entre la 7ème et la 10ème semaine de vie IU, la croissance des structures du massif facial s'accompagne de la formation des **fosses nasales.** A la 8ème semaine de vie IU, les lames palatines s'élèvent, accompagnant la fermeture du palais secondaire.[8]

La fusion entre palais secondaire, palais primaire et septum nasal s'achève entre la 9ème et la 12ème semaine de vie IU.[19] Le palais primaire est constitué d'un os membraneux alors que le palais dur (palais secondaire) se développe par un processus d'ossification endochondrale.[19]

Vers la 10ème semaine de vie IU, la **pneumatisation** des maxillaires se produit. A ce stade, l'embryon a une apparence humaine typique.[8]

1.1.2.2 Croissance : période post-natale

Au cours de la croissance céphalique, l'os maxillaire se soude à son homologue pour former le tiers moyen du massif facial supérieur.[13] Contrairement aux autres sutures osseuses faciales, la suture palatine médiane reste ouverte dans sa partie postérieure, même chez le sujet âgé.[20]

L'os maxillaire présente une **croissance verticale** dominante associée à la base du crâne (Figure 4).[21,22] Au cours des dix premières années de vie, la croissance de l'os maxillaire est principalement horizontale, vers les régions antérieures et postérieures.[21] Puis au cours de la deuxième décennie, la croissance verticale prédomine.[21]

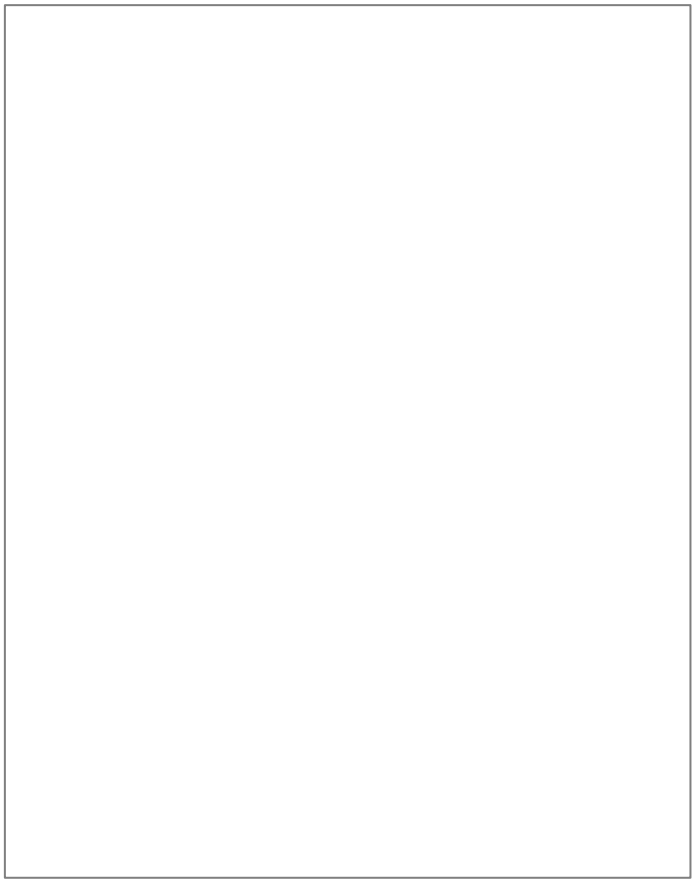


Figure 4 : Allongement et élargissement de la face lors de la croissance ; la croissance sagittale est limitée (Illustration : Bouaoud et al.[22])

La croissance verticale du maxillaire est influencée par la présence des germes dentaires, par la poussée du septum nasal, et par des facteurs extrinsèques comme la respiration nasale et la mastication.[22] **Contrairement aux grands singes,** chez l'Homme, la cloison nasale se prolonge au-dessus du prémaxillaire, entrainant un **aplatissement du plancher des fosses nasales et une diminution de la partie centrale du maxillaire** (Figure 5).[22]

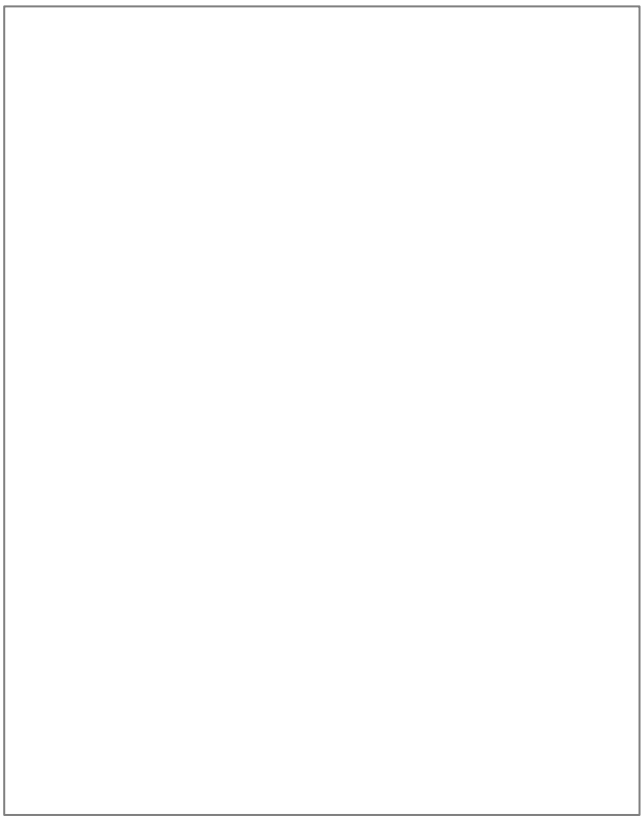


Figure 5 : Comparaison de la croissance faciale des humains et des chimpanzés : la croissance antéro-postérieure est plus limitée chez l'Homme, avec la présence d'une zone de résorption spécifique prémaxillaire. (Illustration : Bouaoud et al.[22])
(1) Arcade sourcilière, (2) Glabelle, (3) Portion nasale de l'os frontal, (4) Portion frontale de l'os frontal, (5) Trigone supraorbitaire.

Durant les premières années de vie, la croissance du **sinus maxillaire** s'effectue dans le sens antéro-postérieur. Elle dépend du développement de l'os maxillaire et des dents. A la naissance, c'est une cavité en forme de fente aplatie et de la taille d'une fève. A six ans, elle commence à s'individualiser nettement à la radiographie et prend la forme d'une pyramide. A 15 ans, la croissance s'achève, sauf au niveau de l'extrémité postéro-inférieure qui ne prend sa forme définitive qu'après l'éruption des dents de sagesse.[13]

1.1.3 Histologie et architecture de l'os maxillaire

1.1.3.1 Le tissu osseux : os cortical et os trabéculaire

Le tissu osseux est un tissu conjonctif de soutien.[5] Il est composé de deux types de structures :[4,5,23–25]

- **L'os cortical ou os compact haversien**, dense et compact, qui occupe la périphérie des os longs, autour de la cavité médullaire, et qui représente 80% de l'os squelettique total ;
- **L'os trabéculaire ou os spongieux,** poreux, qui est localisé dans les épiphyses et la métaphyse des os longs, formant les trabécules osseuses, et qui représente 20% de l'os squelettique total.

L'os maxillaire est un **os support de charge,** comme les tibias, fémurs, humérus, vertèbres, radius, mandibule, phalanges, poignets, hanches etc. Il supporte donc des charges mécaniques volontaires, impliquant les forces musculaires.[3]

1.1.3.1.1 L'os cortical

L'os cortical dense est organisé en **ostéons** compactés, alignés et disposés parallèlement au grand axe de la pièce squelettique, selon la ligne des contraintes subies par l'os (Figure 6).[5,24] Les ostéons sont constitués de lamelles concentriques organisées autour du **canal de Havers**.[24] Ils sont reliés entre eux par les **canaux de Volkmann**, transverses.[24]

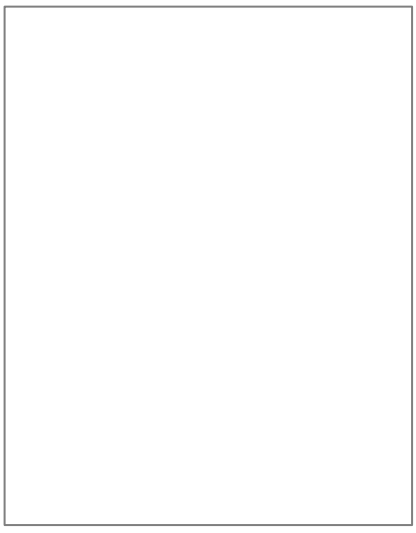


Figure 6 : Microarchitecture de l'os cortical en microscopie électronique à balayage.
(Illustrations : Chappard[5])

1.1.3.1.2 L'os trabéculaire

L'os trabéculaire est constitué de structures arciformes, formant des **travées** organisées en lamelles irrégulières et disposées parallèlement à la résultante des lignes de contrainte (Figure 7).[4,5] En effet, la microstructure de l'os trabéculaire s'adapte aux contraintes biomécaniques (compression, extension, flexion) qui s'exercent sur les pièces squelettiques, conformément aux lois Wolff.[2,4,5,13]

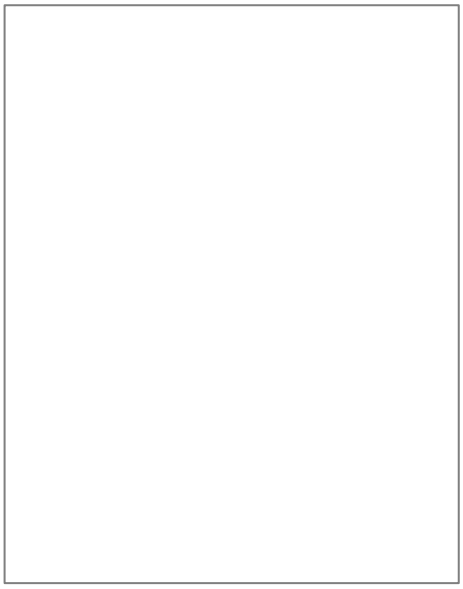


Figure 7 : Microarchitecture de l'os trabéculaire en microscopie électronique à balayage. (Illustrations : Chappard[5])

Dans le tissu osseux trabéculaire, on distingue deux types de structures : d'une part, les **plaques**, disposées parallèlement aux contraintes, et d'autre part, les **piliers transverses**, assurant une cohésion de l'ensemble du système.[5]

La microarchitecture de l'os trabéculaire est un facteur important d'appréciation de la qualité du tissu osseux et de sa valeur biomécanique.[5] Elle dépend également de l'âge et de l'ostéoporose.[4,5]

1.1.3.2 Modelage et remodelage

Le tissu osseux se modifie tout au long de la vie par deux processus fondamentaux : le modelage et le remodelage.[5]

Le **modelage** osseux permet l'acquisition de la forme et de la quantité d'os durant l'enfance et l'adolescence et assure la croissance des pièces squelettiques. Le modelage est caractérisé par une activité des ostéoblastes prédominante sur l'activité des ostéoclastes. La phase de modelage permet d'atteindre un pic de masse osseuse vers 25-30 ans.[5]

Le **remodelage** osseux permet l'adaptation du tissu osseux aux contraintes, aux changements hormonaux et aux changements métaboliques au cours de la vie.[5] Il est caractérisé par une action coordonnée des ostéoclastes et ostéoblastes organisés en ostéons ou unités multicellulaires de remodelage (BMU *Basic Multicellular Unit*). Il comprend une phase de résorption des zones osseuses moins performantes, puis une phase de formation de nouvelles unités de structure, mieux adaptées.[2,3,5,26] Le remodelage est indispensable au maintien de l'intégrité du squelette et de l'homéostasie phosphocalcique.[26] La durée d'un cycle de remodelage chez l'adulte est d'environ 4 mois.[26]

1.1.3.3 Os basal et os alvéolaire

L'os maxillaire est constitué de deux entités osseuses :[14]

- Un os alvéolaire, dont le volume dépend de la présence des dents ;
- Un os basal, qui a la même physiologie que les autres os du corps humain.

Le processus alvéolaire maxillaire est défini comme la portion d'os maxillaire dans laquelle les dents sont maintenues par les fibres du ligament parodontal autour des dents, et qui les soutient.[9,27] La dent est ancrée à l'os alvéolaire par l'intermédiaire d'un *os en faisceau* dans lequel pénètrent les fibres du ligament parodontal.[11] L'ensemble **dent – os alvéolaire** forme une **entité structurale physiopathologique**[8] : la présence de l'os alvéolaire est conditionnée par la présence des dents.[8,11,14,15] Son volume, sa forme et sa hauteur sont déterminés par la forme, l'axe et l'inclinaison des dents qu'il abrite.[9,11] La maladie parodontale entraine une résorption de l'os alvéolaire, sans affecter l'os basal.[6,8,28] Lors de la perte des dents, l'os alvéolaire subit une atrophie[8,11,29] : *l'os en faisceau* perd sa fonction et disparaît.[11]

Los alvéolaire est fragile et labile.[6] Il est composé de lames externes (vestibulaire et linguale / palatine) constituées d'os cortical, en continuité avec la corticale basale.[6,9] Son épaisseur varie en fonction de la région de la mâchoire.[9] La corticale palatine est généralement plus épaisse que la corticale vestibulaire.[9,29] La corticale vestibulaire est mince et tend à être plus épaisse dans les régions des deuxième et troisième molaires.[9] Malgré la similitude entre les deux mâchoires, le processus alvéolaire du maxillaire est plus spongieux que celui de la mandibule.[9]

L'os basal maxillaire est défini comme le tissu osseux du maxillaire, à l'exclusion processus alvéolaire.[27] Il constitue la charpente du maxillaire et se remodèle par des phénomènes d'apposition-résorption.[14,28]

1.1.3.4 Adaptation de l'os maxillaire aux contraintes biomécaniques

En 1892, **Julius Wolff** a proposé des lois décrivant les adaptations de l'os à son environnement :[2,3]

- L'os se forme et se résorbe en fonction des contraintes mécaniques qu'il subit ;
- Sa résistance varie en fonction des charges qu'il subit ;
- L'activité musculaire entraîne une modification des contraintes, et donc de l'activité osseuse.

Lors de la mastication, les pressions cycliques sur l'os transmises par les dents permettent une augmentation ou un maintien de l'os alvéolaire et de l'os basal de soutien.[2] Mais l'os maxillaire est soumis à de faibles sollicitations mécaniques par rapport à la mandibule : de faibles sollicitations musculaires (issues des muscles peauciers de la face) et des sollicitations majeures issues de la mastication.[25] L'architecture de l'os maxillaire est adaptée pour résister aux contraintes mécaniques verticales des forces de mastication grâce à **trois piliers ou poutres de résistance** :[13,25]

- Le pilier antérieur ou canin : il nait de la partie antérieure et interne de la face antéro-externe au niveau de l'alvéole de la canine, se poursuit dans l'épaisseur de la branche montante et se termine dans la paroi antérieure du sinus frontal et le rebord glabellaire de l'orbite. Il est constitué d'os haversien orienté, en continuité avec la trabécule osseuse de l'os basal. Ce pilier assure le soutien de la canine maxillaire et la charpente de protection nasale et des canaux lacrymo-nasaux.
- Le pilier latéral ou externe ou console maxillo-zygomatique : il nait de l'alvéole de la première molaire, suit le rebord inférieur du sommet de l'os maxillaire et se bifurque en un pilier vertical et un pilier sagittal postérieur ou zygomatique. Il est constitué d'os haversien orienté verticalement, en forme de S.
- Le pilier postérieur : il suit la paroi du fond de la fosse ptérygo-zygomatique.

Pauwels (1974) indique que « *Toute modification de la direction ou de l'intensité des forces exercées sur l'os entraînerait une modification des travées osseuses, voire une modification même de sa morphologie* ».[25]

1.1.4 Vieillissement « normal » ou physiologique des maxillaires

Le vieillissement « normal » ou physiologique est le vieillissement progressif subi par l'organisme en l'absence de pathologie.[30] On distingue le vieillissement « normal » du vieillissement lié à l'édentement.[20]

Le vieillissement physiologique se traduit par des **modifications histologiques du tissu osseux**.[5,28] La réduction du nombre de cellules osseuses (ostéocytes et ostéoblastes) et l'altération de leur fonction entrainent une diminution progressive de la densité minérale, ainsi qu'une réduction de la formation osseuse.[5,8] Il en résulte une augmentation des zones de résorption, un élargissement de la lumière centrale des systèmes haversiens, une diminution en volume et en nombre des trabécules osseuses, et une augmentation des adipocytes medullaires.[31]

Ainsi, la masse osseuse du squelette diminue progressivement avec l'âge : le métabolisme osseux diminue, plus propice aux phénomènes de **résorption** par rapport aux phénomènes d'apposition.[20,30,31] A partir de 40 ans, une perte osseuse minime, essentiellement trabéculaire se manifeste dans les deux sexes : elle atteint environ 3% tous les dix ans.[28] Entre 20 et 80 ans, la perte osseuse trabéculaire est en moyenne de 40% chez la femme et de 25% chez l'homme.[28]

Au cours du vieillissement, le remodelage de **l'os basal** maxillaire conduit à une **expansion** de celui-ci et non à une atrophie. En l'absence de facteurs extrinsèques (comme l'édentement), la largeur faciale, la hauteur et l'épaisseur sont inchangées ou sont augmentées au cours du vieillissement.[28]

L'os alvéolaire des mâchoires subit également des modifications physiologiques liées à l'âge.[30,31] Le vieillissement entraîne une **diminution progressive des crêtes alvéolaires et de l'os inter-radiculaire** en hauteur et en épaisseur.[30] Les changements hormonaux (réduction en estradiol suite à la ménopause chez les femmes, diminution de la testostérone sérique chez les hommes) accélèrent la perte osseuse.[8]

Au cours de la vie, **l'expansion du sinus** se poursuit, entrainant une diminution de la hauteur d'os résiduel sous-sinusien.[15,20] Selon **Dargaud et al.**[17]**,** en raison de l'édentement et de la résorption de l'os alvéolaire, le volume sinusal des patients âgés est plus important.

1.2 Spécificités de l'édentement complet

L'édentement est défini par l'**absence d'une ou plusieurs dents** : il est dit complet lorsqu'il touche une arcade entière, et total lorsque toutes les dents sont absentes.[15] Dans l'esprit collectif, l'édentement est associé aux personnes âgées, au vieillissement et à la précarité. Cet état a été longtemps caricaturé, que ce soit pas des expressions populaires (« sans-dents ») ou dans l'art.[15]

1.2.1 Épidémiologie de l'édentement complet

Les statistiques mondiales de l'édentement complet sont difficiles à établir. On estime qu'en 2010, l'édentement total concernait **158 millions de patients dans le monde**, soit **2,3% de la population mondiale**, avec une légère prédominance chez les femmes.[15,32]

Mais la prévalence de l'édentement complet varie d'un pays à un autre et d'une région à l'autre.[33–36] Les données épidémiologiques confirment les prévisions selon lesquelles la prévalence de l'édentement diminue dans les pays industrialisés : cette diminution serait liée aux progrès de la prévention et de la dentisterie restauratrice, favorisant la conservation des dents à un âge avancé.[34,35,37] En France, plus d'un tiers des personnes de plus de 65 ans serait édenté complet, soit environ 5 millions de personnes.[15]

Plusieurs auteurs soulignent que l'édentement augmente avec le niveau de pauvreté, qu'il est associé au statut socio-économique et à un faible niveau d'éducation, et que le nombre de dents absentes augmente avec la précarité.[15,33,34,38,39] De plus, la prévalence de l'édentement complet augmente avec l'âge.[14,31,34,40–42]

La combinaison de la maladie carieuse et de la maladie parodontale constitue la principale cause de la perte des dents.[28]

1.2.2 Conséquences de l'édentement complet

1.2.2.1 Conséquences anatomiques au niveau osseux : la résorption osseuse

La perte des dents entraine une **résorption tridimensionnelle, irréversible et continue de l'os alvéolaire**.[6–12] L'édentement complet modifie les dimensions tridimensionnelles (hauteur et épaisseur) et la morphologie des processus alvéolaires du maxillaire et de la mandibule.[6,11,14,15,43,44] En revanche, la forme du processus basal reste stable après édentement.[44]

La résorption post-extractionnelle suit plusieurs **stades** : l'organisation du caillot durant les 4 premières semaines, la formation d'os immature tissé entre 4 et 8 semaines, le développement de l'os mature lamellaire entre 8 et 12 semaines et la consolidation de l'os entre 12 et 16 semaines (4 mois) (Tableau 1).[43,45,46]

Après l'extraction d'une dent	0-4 semaines (1 mois)	4-8 semaines (2 mois)	8-12 semaines (3 mois)	12-16 semaines (4 mois)	5-6 mois à 1 an
Processus de cicatrisation	Organisation du caillot de fibrine	Formation d'os tissé	Formation d'os lamellaire	Consolidation de l'os	Processus de remodelage résiduel
Diminution de la largeur alvéolaire (moyenne)	←	2/3 de la perte osseuse horizontale	→	1/3 de la perte osseuse horizontale	
Diminution de la largeur et de la hauteur alvéolaire en mm (moyenne)	←	Largeur : 5 à 7 mm Hauteur : 1 mm		→	La résorption osseuse se poursuit

Tableau 1 : Chronologie du processus de cicatrisation après l'extraction d'une dent (D'après Tolstunov, 2007[43])

La résorption post-extractionnelle comporte **deux grandes étapes** :[6,14,15]

- Dans un premier temps, une résorption immédiate, qui fait suite à l'extraction des dents : elle dépend des conditions de l'extraction ;
- Puis une résorption à long terme jusqu'au remodelage définitif de la crête : elle varie en fonction des individus et dépend de facteurs généraux (hormonaux, pathologie, âge…) et locaux (état initial de l'os, forces exercées sur les structures osseuses, antécédent de maladie parodontale…). Une prothèse mal adaptée ou une pathologie parodontale favorisent la résorption osseuse à long terme.

Cependant, **Reich et al.**[47] ont étudié l'atrophie des mâchoires après édentement à partir des restes squelettiques d'une population d'Europe centrale issue d'un cimetière médiéval du VII-VIII^{ème} siècle après J.-C., non affectée par les traitements dentaires modernes. Ils ont mis en évidence que, **malgré l'absence de prothèses amovibles, ces populations étaient bien affectées par la résorption osseuses après extraction**, et que le schéma de résorption suivait le schéma décrit pour les populations modernes par Awood[48] et par Cawood et Howell[44].

Au cours de la première année qui suit l'extraction, la résorption est très importante, en particulier pendant les trois premiers mois :[6,15,49–51]

- **Schropp et al.**[49] ont rapporté que, suite à l'extraction d'une dent unitaire, **les deux tiers de la perte osseuse horizontale se produisent durant les premiers trois mois,** et que le tiers restant se produisait dans les neufs mois suivants. Ainsi, après un an, la largeur de la crête alvéolaire est réduite de moitié.
- **La résorption horizontale est plus importante que la résorption verticale**, à la fois en valeur absolue et pourcentage.[43,49,50] Durant les six premiers mois, la résorption horizontale atteint 5 à 7 mm, et la résorption verticale est d'environ 1 mm (Tableau 1).[43,49] Selon une revue de littérature menée par **Tan et al.**[50], à 6 mois, la résorption verticale atteint 11 à 22% alors que la résorption horizontale atteint 29 à 63%.

Dans le sens vestibulo-palatin, la **résorption de la corticale vestibulaire est plus importante que celle de la corticale palatine**.[11,50–52] **Araújo et Lindhe**[11] expliquent ce phénomène par la présence d'un **os en faisceau** en plus grande proportion au niveau de la corticale vestibulaire, tandis que la corticale palatine est constituée d'une combinaison d'os en faisceau et d'os lamellaire. La présence de l'os en faisceau était dépendante de la présence de la dent, il se résorbe rapidement après l'extraction dentaire et entraîne la perte d'une grande partie de la corticale vestibulaire.[11]

La présence ou l'absence de dents adjacentes au site d'extraction influence également le degré de résorption osseuse[29] : ainsi, la résorption osseuse sera plus importante chez les sujets totalement édentés.

Le schéma de résorption de l'os maxillaire diffère ce celui de la mandibule. **Au maxillaire,** la résorption de l'os alvéolaire est **centripète** en raison de la faible épaisseur des corticales (Figure 8) : l'arcade maxillaire devient plus étroite.[14,15,52–54] En revanche, à la mandibule, la résorption osseuse est centrifuge, et l'arcade mandibulaire devient plus large. Ces schémas de résorption entrainent une relation occlusale bord à bord ou inversée chez les sujets édentés totaux (Figure 9).[53] **La résorption du maxillaire est plus précoce mais plus lente que celle de la mandibule**.[7,15,20] En effet, la résorption mandibulaire est quatre fois plus élevée que la résorption maxillaire.[7,55] Selon **Atwood et Coy**[7] et **Tallgren**[55], la résorption maxillaire atteint 0,1 mm par an.

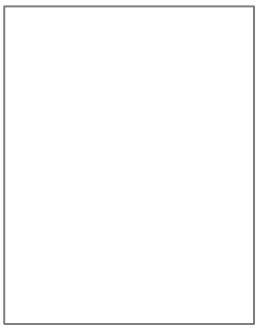


Figure 8 : Résorption osseuse centripète de l'os maxillaire à travers le temps
(Illustration : Rouche[56])

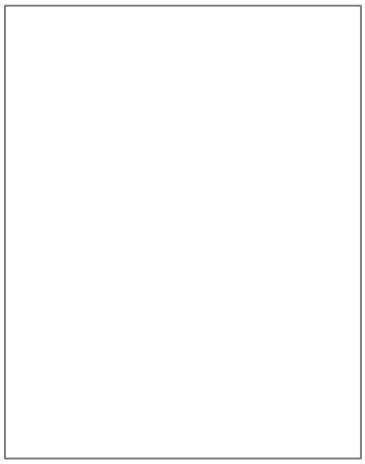


Figure 9 : Changements relatifs aux relations des mâchoires chez le sujet denté (à gauche) et chez le sujet édenté total (à droite), associés à une diminution de la hauteur de l'étage inférieur de la face (LFH) et une augmentation de la proéminence du menton
(Illustration : Cawood et Howell[54])

Dans le secteur incisivo-canin maxillaire, sous l'effet de la résorption, la hauteur osseuse sous l'épine nasale antérieure diminue et le sommet de la crête se rapproche du foramen incisif (Figure 10).[15] La hauteur crestale varie entre 8 et 20 mm.[20] **Dans le secteur prémolo-molaire**, bien que la résorption soit moins importante, le volume osseux sous sinusien dépend du degré de résorption mais également du niveau de pneumatisation du sinus qui se poursuit tout au long de la vie. La hauteur osseuse dans ce secteur varie entre 0,5 et 21 mm.[20] **Dans la région tubérositaire**, la résorption est minime : la distance entre la crête et le sinus varie entre 4 et 10 mm.[14,15,20,28] Ces particularités tomographiques conduisent à décrire trois secteurs du processus alvéolaire maxillaire édenté :[14]

- Le secteur antérieur, correspondant au prémaxillaire,
- Le secteur juxta-sinusien,
- Le secteur postérieur, correspondant à la région tubérositaire.

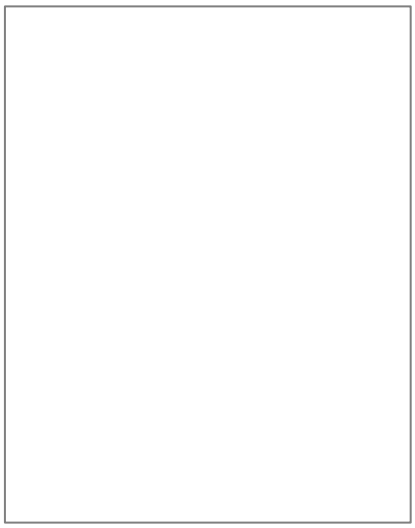


Figure 10 : Résorption centripète du maxillaire édenté : les foramina grand palatin (flèches noires) et incisifs (flèche blanche) se rapprochent du sommet crestal (Illustration : Tilotta et al.[15])

Ainsi, la perte des dents et l'atrophie des crêtes édentée peuvent modifier la qualité et la quantité d'os disponible.

1.2.2.2 Conséquences fonctionnelles

La cavité orale est impliquée dans plusieurs fonctions maintenant l'homéostasie de l'organisme. Elle est le siège des premières étapes de la digestion par le biais de la salivation, de la déglutition et de la mastication. Elle participe à la fonction de respiration et communication par le biais de la phonation. L'absence des dents perturbe le ces fonctions.[14]

Au niveau musculaire, les muscles de la cavité buccale deviennent progressivement superficiels (Figure 11).[54] L'épaisseur du muscle masséter est réduite chez les patients édentés complets, ce qui diminue la force de morsure.[33,37]

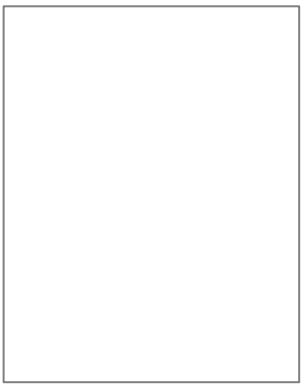


Figure 11 : Insertions des muscles de la cavité buccale au niveau du maxillaire denté (à gauche) et édenté (à droite) (Illustration : Cawood et Howell[54]).
1 : muscle dilatateur des narines, 2 : muscle compresseur des narines, 3 : muscle abaisseur du septum nasal, 4 : muscle buccinateur, 5 : muscle élévateur de l'angle de la bouche.

Concernant les forces occlusales, la perte totale des dents entraine une diminution de la force occlusale maximale.[14] Les patients porteurs de prothèses amovibles présentent des forces de morsure quatre à cinq fois inférieures à celles des patients présentant une dentition naturelle.[1]

L'édentement complet peut aussi modifier **la sécrétion salivaire** : bien que la perte des dents ne modifie pas le réflexe salivaire parotidien, le volume de salive sécrétée reste inférieur à celui des sujets dentés.[14]

Au niveau neuronal, l'absence des dents entraine des perturbations au niveau des neurones afférents primaires trigéminaux connectés aux mécanorécepteurs du ligament alvéolodentaire. Une dégénérescence de ces neurones entraine une réduction de la stéréognosie, c'est-à-dire de la capacité à reconnaître la forme et l'état de surface d'un objet.[14] L'édentement complet peut également induire une dyskinésie buccale : il s'agit de mouvements orofaciaux anormaux, involontaires, structurés ou stéréotypés et sans but.[33] En revanche, l'édentement n'altère pas le contrôle postural de la mandibule.[14]

Au niveau de l'articulation temporo-mandibulaire, l'édentement complet entraine une augmentation de pression au sein de l'articulation, un remodelage osseux ainsi qu'une modification du disque.[14,15,20]

Le nombre d'unités dentaires fonctionnelles constitue un indicateur de l'efficacité de la mastication[33] : ainsi, l'édentement complet affecte la **fonction masticatoire**. De plus, l'atrophie musculaire et la dégénérescence des neurones associés aux mécanorécepteurs desmodontaux favorisent la diminution de l'efficacité masticatoire.[14,37] Ainsi, l'activité musculaire diminue et le nombre de cycles masticatoires augmente.[14] En raison de la difficulté à mâcher des aliments durs, les patients édentés complets adoptent souvent des comportements alimentaires restrictifs.[14,33,37] Ils consomment des aliments transformés, pauvres en fibres, vitamines, calcium, protéines, riches en graisses saturées et glucides, et moins de fruits et légumes.[33,57] Lorsqu'ils sont appareillés par prothèses adjointes complètes, ces patients ne parviennent pas à obtenir un bol alimentaire comparable à celui des sujets dentés : le temps pour réduire un volume initial de moitié est sept fois plus long.[14]

Lors de la déglutition, les sujets édentés adoptent un comportement d'adaptation de la langue.[14]

En raison de l'absence des dents et de la résorption, l'édentement complet altère la **phonation** en modifiant la prononciation de certains phonèmes. : consonnes fricatives labiodentales ([f], [v]), consonnes occlusives alvéolo-dentaires ([t], [d]).[14] Au maxillaire, le port d'une prothèse adjointe complète ou d'une prothèse fixe implanto-portée a un retentissement sur la phonation.[58,59]

1.2.2.3 Conséquences esthétiques

L'édentement complet modifie l'aspect facial.

Dans le sens vertical, la réduction de la hauteur de l'os alvéolaire entraine une diminution de la hauteur des étages moyen et inférieur de la face.[20,28,33,54]

Dans le plan sagittal, en raison du schéma de résorption différent au maxillaire et à la mandibule, l'édentement entraine une tendance accentuée à la prognathie mandibulaire et une rétrusion du maxillaire (Figure 9).[20,28] Le menton devient proéminent, présentant un aspect en « menton de sorcière ».[20,28,33]

Au niveau cutané, la perte des dents et la résorption entrainent une perte de tonus des muscles de l'expression faciale, associés à une accentuation des plis naso-géniens. [20,28]

Au niveau labial, l'édentement entraine augmentation de l'angle nasolabial, une perte de projection labiale, un rétrécissement de la commissure labiale, une inversion de la courbure labiale (collapsus) et une proéminence de la lèvre inférieure.[14,33,54]

1.2.2.4 Conséquences sociales et psychologiques

Les effets psychologiques de l'édentement complet sont complexes et variés. Selon l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS), la perte des dents peut être traumatisante sur le plan psychologique et dommageable sur le plan social.[60]

Selon **Albrektsson et al.**[61], la perte des dents est un **handicap sévère**, similaire à la perte d'autres organes corporels, entrainant souvent une baisse de l'estime de soi et un isolement psychologique.

Sur le plan psychologique, les principaux thèmes identifiés en relation avec la perte des dents sont : le deuil, la perte de confiance en soi, les préoccupations concernant l'apparence et l'image de soi, un sujet tabou, le besoin d'intimité prothétique, le changement de comportement, le vieillissement prématuré et le manque de préparation à l'édentement.[62,63] La dégradation de son image ainsi que la sensation de gêne lors du sourire et de la parole favorisent l'isolement du sujet âgé et renforcent les syndromes dépressifs.

Sur le plan social, l'édentement complet a un impact sur les relations sociales et intimes : les sujets édentés complets sortent moins avec leurs amis et leur famille, évitent les sorties au restaurant, ne rient pas en public, et mettent la main devant la bouche pour se cacher.[37,63]

L'édentement complet a un également impact sur la **qualité de vie** des patients : il influence négativement la vie sociale et les activités quotidiennes.[33,64]

1.2.3 Vulnérabilité du sujet édenté complet au maxillaire

Bien que la perte des dents ne puisse pas être considérée comme faisant partie du vieillissement physiologique, la **prévalence de l'édentement complet augmente avec l'âge** (Figure 12).[14,31,34,40–42]

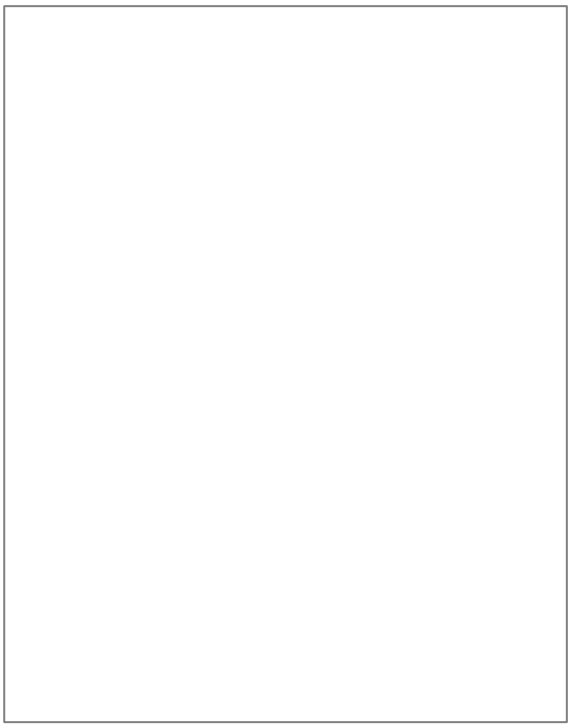


Figure 12 : Relations entre l'âge et l'édentement complet (Illustration : Mojon et al.[34])

Le sujet édenté complet au maxillaire est souvent une **personne âgée vieillissante**. En général, les patients âgés sont plus fragiles, présentent de multiples comorbidités et des troubles cognitifs.[37]

Le vieillissement physiologique, les pathologies chroniques et l'environnement psychosocial sont source de **vulnérabilité**.[65] Le vieillissement cause une myopathie dégénérative de l'ensemble des muscles de l'organisme, y compris des muscles masticateurs, entrainant une diminution de 30% de la masse musculaire totale entre 30 et 80 ans.[20,37] Au niveau de la cavité buccale, le vieillissement physiologique se traduit par des altérations fonctionnelles comme le gôut.[65] Le vieillissement physiologique atteint également l'intégrité mentale du sujet âgé : un déclin psychologique, des pathologies neurodégénératives, une diminution de la vigueur, des réponses aux stimuli sensoriels (goût, audition, odorat, toucher, vue), un ralentissement des transmissions nerveuses.[31,37] De plus, l'édentement complet peut entrainer une dégradation de l'image de soi, favorisant un isolement et renforçant les syndromes dépressifs et les perturbations alimentaires.[65]

Ainsi, **l'association de l'édentement et du vieillissement physiologique altère les fonctions orales (mastication, déglutition, phonation), mais également l'équilibre psychologique et les relations sociales des individus.**

Enfin, selon plusieurs auteurs[33,38], l'édentement complet est associé à de multiples **comorbidités** : obésité, malnutrition, troubles gastro-intestinaux, diabète non insulo-dépendant, broncho-pneumopathie chronique obstructive (BPCO), maladies cardio-vasculaires, cancers de la sphère digestive, de la tête et du cou, déclin des fonctions cognitives et déclin physique chez les personnes âgées. L'édentement non réhabilité serait même associé à une **augmentation du risque de mortalité**.[33,38,66] Cependant, les mécanismes associant l'état de santé général et l'édentement ne sont pas clairs : cette relation pourrait être due à la malnutrition et à la difficulté à atteindre les apports nutritionnels recommandés.[33]

1.3 Pourquoi étudier la densité de l'os maxillaire ?

1.3.1 Intérêt en recherche fondamentale en anthropologie

1.3.1.1 L'os « prémaxillaire »

Le terme « **os prémaxillaire** », appelé jadis **« os intermaxillaire »** ou encore **« os incisif », « os Goethei »** a souvent été employé par les professionnels de santé.[21,67–70] L'os prémaxillaire est associé au bourgeon embryonnaire prémaxillaire, dérivé du bourgeon nasofrontal et impliqué dans les fentes labiales.[71]

L 'os prémaxillaire est un os de la mâchoire supérieure apparent chez les mammifères[69,72] : chez la plupart des espèces, il est clairement délimité par trois sutures nettes (suture palatale, suture faciale et suture nasale), bien qu'il soit soudé au maxillaire.[69] Chez le chimpanzé il fusionne avec le maxillaire avant la naissance.[72] Sa position antérieure lui vaut le nom d'os prémaxillaire : il supporte les incisives, par opposition au maxillaire qui supporte les autres dents.[69]

Volcher Coiter (1573) a été le premier anatomiste à décrire la partie médiane de la mâchoire supérieure comme un os distinct dans le crâne des vertébrés.[21,68,70]

Au XVIII^{ème} siècle, le Hollandais **Petrus Camper** a démenti l'existence de cet os chez l'Homme : il a affirmé que l'absence de l'os prémaxillaire chez l'Homme constituait un trait anatomique distinctif entre l'Homme et le singe.[21,68,69,72,73]

En 1780, **Vicq d'Azyr** a décrit l'os prémaxillaire chez l'Homme et pour la première fois, il a noté son équivalence structurelle avec l'os prémaxillaire d'autres mammifères (Figure 13).[74] Il a affirmé : *« L'os maxillaire supérieur de l'homme présente souvent, surtout chez les jeunes sujets, derrière les trous incisifs et le long de la branche montante, une fêlure qui sépare la portion sur laquelle les dents incisives sont appuyées, d'avec le reste de l'os […] ; on ne peut s'empêcher de voir un rapport singulier et inattendu entre la structure de la portion osseuse qui, dans plusieurs quadrupèdes, sert à soutenir les dents incisives, et celle qui, chez les enfants au moins, a les mêmes usages* ».[74]

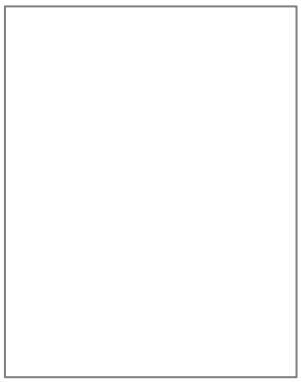


Figure 13 : Planches anatomiques de Vicq d'Azyr décrivant l'os maxillaire d'un sujet âgé (a) et celui d'un fœtus (b) (Illustration : Ashley-Montagu[74])
A. Foramen incisif, B. et C. Suture

La découverte de l'os prémaxillaire a souvent été attribuée à **Johann Wolfgang von Goethe** (1749-1832). Celui-ci s'oppose à la théorie de **Camper** : il compare les mâchoires de plusieurs animaux et d'êtres humains à leurs différents stades de développement et il publie ses recherches sur l'os intermaxillaire dans le crâne humain en 1784.[21,68,69,73,75] Selon Goethe, l'os prémaxillaire est la preuve qu'il y a chez les animaux une conformation primitive à partir de laquelle chaque branche, sous l'influence du milieu, a développé des spécificités.[72] Mais en 1820, sa théorie est rejetée par les autres anatomistes de l'époque.[68,69,73] Seuls **Julius Christian Loder** et **Spix** admettent l'existence de l'os prémaxillaire dans leurs publications.[69]

Depuis les travaux de Goethe, l'existence de l'os prémaxillaire chez l'Homme, fait toujours l'objet de **nombreuses controverses**[70,71,74,76–78] : pour certains auteurs, sa présence chez l'Homme est considérée comme une variation anatomique exceptionnelle.[71] A la fin du XIX^{ème} siècle et au début du XX^{ème} siècle, le nombre et la localisation des centres d'ossification et de sutures de cette zone ont également été sujets à débat.[70,71]

En 1869, **G.W. Callender** mène la première étude approfondie sur le développement du prémaxillaire chez l'Homme.[74] Il affirme que, chez l'Homme, le prémaxillaire est séparé de la face par le processus nasal et le processus incisif du maxillaire supérieur : ces processus s'étendent médialement à partir du corps des maxillaires et recouvrent les prémaxillaires dans leur portion faciale.[76,78]

En 1914, **F. Wood Jones**, ignorant les travaux de Callender, étudie le développement des os de la face humaine d'une série de crânes embryonnaires du Professeur Fawcett.[76,78] Il conclut que *« lorsque l'embryon humain ne mesure pas plus de 19 mm de long, le prémaxillaire perd son identité dans le cartilage du maxillaire, et lorsqu'il mesure 5 mm de plus, il a cessé d'exister en tant qu'entité distincte sur la face* ».[78] Jones a également déclaré que l'absence de prémaxillaire sur le visage humain est un caractère spécifique à l'Homme, qui le distinguait des primates non humains et des autres mammifères.[74,76]

Selon lui, l'absence de l'os prémaxillaire chez l'humain pourrait être liée à une acquisition phylogénétique très ancienne.[76]

En 1924, **Vallois** et **Cadenat** examinent le développement fœtal de l'os prémaxillaire. Il apparaît et se soude rapidement à l'os maxillaire : l'union de ces deux centres forme une lame osseuse bordant en dehors la lame dentaire.[67,79] Au cours du quatrième mois, le processus frontal du maxillaire se soude avec celui du prémaxillaire mais le bord postérieur du processus palatin limite la suture incisive. Au cours du cinquième et du sixième mois, le prémaxillaire perd une grande partie de son individualité : le processus facial du maxillaire recouvre l'os prémaxillaire et la suture disparaît.[74] Cependant, la croissance de l'os prémaxillaire reste indépendante de celle de l'os maxillaire.[79]

En 1937, **Edwin H. Johnson**[78] poursuit les travaux de Jones[76] sous sa direction, et conclut que :

- La suture entre le maxillaire et le prémaxillaire n'est jamais présente sur le visage humain, à aucun stade prénatal ou postnatal ;
- Au début de la vie embryonnaire, le maxillaire de chaque côté se développe en avant au-dessus de « l'anglage » du prémaxillaire et, en se rencontrant sur la ligne médiane de la mâchoire supérieure, les enveloppe complètement sur le plan facial (Figure 14) ;
- Chez les singes, les zones de la mâchoire supérieure supportant les incisives et les bords nasaux sont formées superficiellement à partir du prémaxillaire. Chez l'Homme, elles sont constituées par les processus incisifs et nasaux du maxillaire supérieur qui se rencontrent sur la ligne médiane.
- Comme l'ont montré **Jarmer** et Karl **Peter** en 1921, chez l'Homme, la séparation entre le maxillaire superficiel et le prémaxillaire profond est marquée par la « suture inter-alvéolaire » ; en effet, c'est seulement chez l'Homme que les alvéoles des incisives sont formées par le maxillaire labial (vestibulaire) et le prémaxillaire palatin.
- Chez l'Homme, la fusion précoce du maxillaire et du prémaxillaire serait la preuve d'une acquisition phylogénétique précoce.

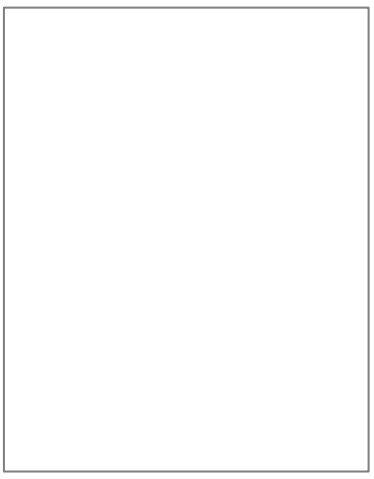


Figure 14 : Vue palatine d'un fœtus de 3 mois montrant la suture inter-alvéolaire, les parois antérieures des alvéoles des incisives étant formées par les maxillaires

(Illustration : Johnson, 1937[78])

A = épine nasale antérieure, B = maxillaire, C = suture inter-alvéolaire D = prémaxillaire, E = suture incisive, F = foramen palatin antérieur.

En revanche, la présence de l'os prémaxillaire a été confirmée jusqu'au australopithèques.[71] Selon **Jones**[76], cette différence fondamentale entre l'Homme et les autres primates semble avoir été ignorée lors de l'attribution du rang d'Hominidé aux crânes de « l'enfant de Taung » (*Australopithecus africanus*) et de Sterkfonstein. *Australopithecus* et *Plesianthropus* présentent des sutures faciales maxillaire-prémaxillaire bien définies, de forme typiquement simienne, et *Paranthropus* ne les présente pas car le spécimen a dépassé l'âge de leur oblitération, et non pas parce que la situation est similaire l'Homme. Selon lui, toutes ces formes sont des singes et ne nous éclairent pas sur les formes de primates ancêtres de l'*Homo.*[76]

De nos jour, l'existence ou non de l'os prémaxillaire fait toujours débat :

- **Vacher et al. (2001)**[80] n'ont trouvé qu'un point d'ossification maxillaire et considèrent qu'on ne peut pas dissocier la croissance de la partie antérieure du maxillaire de la croissance globale du maxillaire. Ces auteurs s'opposent donc l'emploi du terme prémaxillaire.
- En **2004, Bartecko et Jacob**[70] reprennent les idées de **Jarmer (1992), Peter (1924)** et **Shepherd et McCarthy (1955)** : ils considèrent que le prémaxillaire se développe à partir de trois structures qui ne sont pas complètement séparées, et qu'il agit comme un élément stabilisateur du squelette, comme la clé de voûte d'un arc romain.
- Après examen de spécimens de crânes humains, **Louryan et al. (2016)**[71] n'ont identifié aucun os prémaxillaire sur les crânes adultes humains. Mais ils ont observé clairement une suture prémaxillaire sur un crâne fœtal, avec un champ d'ossification membraneuse fragmenté au sein duquel il est possible d'identifier une partie prémaxillaire et une partie maxillaire.
- **Trevizan et Consolaro (2017)**[21] défendent l'existence de l'os prémaxillaire. Ils s'appuient sur les recherches précédentes de Trevisan sur des crânes fœtaux et post-nataux, et identifient la suture incisive séparant l'os maxillaire et l'os prémaxillaire. Ils concluent que l'os prémaxillaire est indépendant du maxillaire jusqu'à un stade précoce de la vie post-natale, mais qu'il peut être prolongé tout au long de la vie en étant semi-indépendant du maxillaire (Figure 15). En accord avec **Bartecko et Jacob**[70], **Trevizan et Consolaro**[21] décrivent l'os prémaxillaire comme élément de stabilisation du squelette facial, comparable à la pierre angulaire d'une arche romaine. Ils suggèrent qu'il pourrait servir de base aux thérapeutiques orthodontiques : expansion antéro-postérieure, traitement des fentes labiales et palatines,…

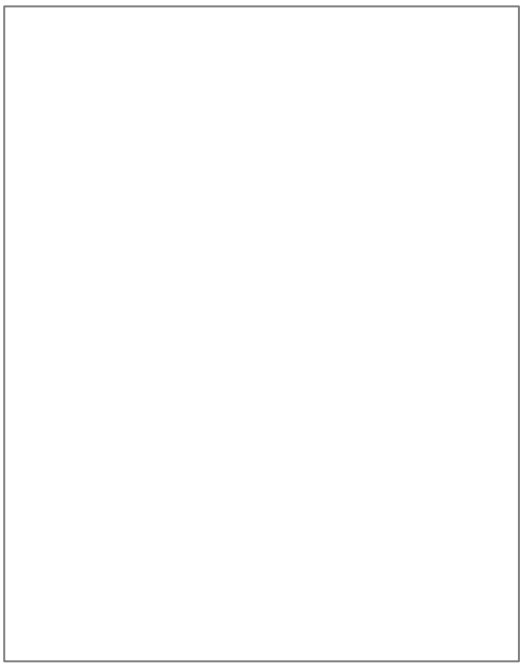


Figure 15 : Mise en évidence de l'os prémaxillaire et de la suture intermaxillaire sur des crânes humains enfant (A) et adulte (B) par Trevisan et Consolaro[21]
(Illustrations : Trevisan et Consolaro[21])

En raison de la persistance de ce débat et de l'identification difficile de la zone de la suture intermaxillaire chez l'adulte, **nous n'emploierons donc pas le terme « os prémaxillaire » dans le cadre de ce travail de thèse**.

Nous limiterons nos recherches à la **zone pré-sinusienne de l'os maxillaire**, c'est à dire la zone du maxillaire située entre les parois antérieures des sinus maxillaires droit et gauche. Pour **Tolstunov,**[43] la zone de la crête alvéolaire située en avant du sinus maxillaire comprend les huit dents antérieures (incisives, canines et premières prémolaires) et est considérée comme une zone « traumatique », car la perte des dents de cette zone est souvent liée à des antécédents de traumatisme.

1.3.1.2 Étude des adaptations de l'os maxillaire au vieillissement

L'anthropologie du vieillissement étudie un processus bio-culturel évolutif, complexe et multifactoriel, ainsi que ses interactions avec l'environnement physique, social et culturel des populations.[81] Ce processus commence dès la naissance et s'achève à la mort de l'individu.[81]

Le vieillissement est défini par l'OMS comme un « *processus graduel et irréversible de modification des structures et des fonctions de l'organisme résultant du passage du temps* ».[30,81] Le vieillissement est influencé par l'environnement physique dans lequel l'Homme vit, son mode de vie, son niveau économique et son niveau d'éducation.[81]

L'amélioration des conditions de vie et des performances médicales conduit à une **augmentation de l'espérance de vie**.[31,37] Ainsi, la proportion de sujets âgés ne cesse de croître. Selon l'OMS,[82] en Europe, le nombre de sujets âgés de plus de 60 ans augmente rapidement : l'Europe comptabilisait 215 millions de sujets de plus de 60 ans en 2021. Elle devrait atteindre 247 millions d'ici 2030 et plus de 300 millions d'ici 2050 selon l'OMS.[82] En France, la proportion de personnes âgées de plus de 65 ans est en constante augmentation : elle représentait 19,7% en 2018, 20,1% en 2019 et 20,5% en 2020.[83] L'Institut National de la Statistique et des Études Économiques (INSEE) estime que la proportion des sujets âgés de plus de 65 ans devrait fortement augmenter pour atteindre un quart de la population française en 2040 et 28,7% en 2070.[83]

Sur le plan anatomique et physiologique, le vieillissement entraine une dégénérescence progressive des organes ainsi qu'une augmentation de la prévalence des pathologies chroniques (diabète, hypertension, maladie cardio-vasculaires, ostéoporose…).[81] **Au niveau osseux, le vieillissement physiologique modifie la microarchitecture osseuse** : la diminution du nombre d'ostéoblastes et l'altération de leur fonction entraine un amincissement des travées osseuses.[5] Cette modification de la microarchitecture s'accompagne des conséquences biomécaniques : en effet, la résistance et le module d'élasticité de l'os sont directement liés à la densité osseuse et à la microarchitecture de l'os trabéculaire.[4,84]

L'ostéoporose est une maladie systémique du squelette caractérisée par une faible densité osseuse et une altération de la microarchitecture du tissu osseux, qui conduit à une susceptibilité accrue aux fractures osseuses.[8,85–89] Cette maladie est un problème de santé publique mondial : en 2003, l'OMS[86] estimait que l'ostéoporose touchait plus de 75 millions de personnes en Europe, au Japon et aux États-Unis et qu'elle serait responsable de plus de 2,3 millions de fractures par an en Europe et aux États-Unis. L'ostéoporose touche principalement les **femmes âgées** et d'âge moyen.[89] Elle est caractérisée par une inversion du rapport ostéoblastes / ostéoclastes.[28] Elle entraine une stimulation de l'activité de résorption des ostéoclastes et une réduction de l'ostéogénèse, laissant progressivement place à une adipogénèse de la moelle osseuse, c'est-à-dire l'augmentation du nombre d'adipocytes aux dépends des ostéoblastes.[5,8] Les modifications structurelles liées à l'ostéoporose affectent principalement l'os spongieux, en entrainant un amincissement des trabécules osseuses de l'os spongieux.[28,90] Mais l'os cortical peut également être compromis, en raison de la résorption endostéale et de l'expansion médullaire.

Actuellement, l'ostéodensitométrie (DXA Dual energy X-ray Absorptiometry) du squelette (colonne vertébrale et hanche) est considérée comme le *gold standard* pour le diagnostic de l'ostéoporose.[85,87,89,91] Elle permet de mesurer la Densité Minérale Osseuse DMO, le *T-score* et le *Z-score* :[87,88]

- Un *T-score* supérieur à -1 désigne une DMO normale ;
- Un *T-score* compris entre -1 et -2,5 désigne une ostéopénie ;
- Un *T-score* inférieur à -2,5 désigne une ostéoporose.

Bien que couramment utilisée dans le dépistage de l'ostéoporose, la DXA peut être coûteuse.[87,91] D'autres examens radiologiques pourraient aider au dépistage de l'ostéoporose, mais leur utilisation reste sujette à débat.[87,91] Plusieurs auteurs[92,93] ont suggéré que la densité osseuse du maxillaire antérieur pourrait être un indicateur de l'état physiologique de l'os par rapport au sexe et aux maladies systémiques de dégénérescence osseuse.

1.3.1.1 Étude des adaptations de l'os maxillaire à l'édentement

Au vieillissement physiologique et pathologique s'ajoutent **les effets liés à la perte des dents, d'un point de vue anatomique, histologique et biomécanique**.

La perte des dents entraine une atrophie irréversible de la crête osseuse alvéolaire.[6–12] Suite à l'édentement complet, en l'absence de prothèse adjointe ou implantaire, les forces masticatoires transmises à l'os alvéolaire par l'intermédiaire des racines disparaissent.[47] Selon les lois de Wolff et le modèle du *mécanostat*, l'absence des dents et la perte de stimulation mécanique associée entrainent une réduction de la masse osseuse.[3,47]

Cependant, la résorption des mâchoires varie d'un individu à un autre, et est influencée par des facteurs généraux (hormonaux, pathologie, âge…) et locaux (état initial de l'os, forces exercées sur les structures osseuses, antécédent de maladie parodontale…).[6] Elle varie également chez une même personne, à différents moments ou dans différentes régions de la mâchoire.[6,12,47]

De plus, l'étude des modifications structurelles du squelette facial des primates après la perte des dents fournit des informations sur la relation entre la structure osseuse et la fonction. L'édentation étant courante chez l'Homme, celui-ci peut être utilisé comme primate modèle pour étudier les modifications de structure osseuse suite à l'édentement et à la perte de fonction.[1]

Il est donc intéressant d'étudier **l'adaptation de la structure osseuse du maxillaire au vieillissement et à l'édentement,** en fonction de paramètres **anthropologiques** (âge, sexe), **anthropométriques** (taille, poids), **généraux** (pathologies systémiques telles que le diabète, facteurs hormonaux) et **locaux** (durée d'édentement, résorption osseuse, consommation de tabac).

1.3.2 Intérêt en recherche clinique : réhabilitation implanto-prothétique du maxillaire édenté

La réhabilitation prothétique du maxillaire édenté a pour objectif de restaurer la fonction et l'esthétique, de préserver les structures anatomiques et de contribuer à l'amélioration de la qualité de vie perçue par le patient.[94]

Suite à l'édentement, la réduction du volume crestal peut altérer la stabilisation des prothèses adjointes complètes.[28] L'essor de l'implantologie a permis d'apporter une solution confortable pour le remplacement des dents manquantes, en améliorant la qualité de vie des patients.[28]

La réhabilitation implantaire du maxillaire édenté est plus complexe que celle de la mandibule édentée, en raison d'une moindre qualité osseuse et de l'importance la gestion de la phonation et de l'esthétique.[95] Chez les patients édentés complets au maxillaire, la zone pré-sinusienne constitue la région de choix pour la pose d'implants en raison de la résorption osseuse postérieure et de la pneumatisation des sinus.[96] Au moins 4 implants sont nécessaires pour une réhabilitation implantaire maxillaire fixe ou amovible.[95]

L'os alvéolaire présente une grande variabilité en termes de quantité, de qualité et de densité disponibles.[23,84] Au sein d'une même coupe transversale, il est possible de détecter soit un seule qualité d'os, soit plusieurs types de densités osseuses ensemble.[23] Il est donc intéressant d'étudier les variations de qualité et quantité de l'os maxillaire en différents points du maxillaire édenté.

1.3.2.1 La qualité de l'os et la densité de l'os

Il existe de nombreuses définitions de la **qualité de l'os** mais celle-ci n'est pas clairement définie dans la littérature[97–99] : elle est généralement présentée comme la somme de toutes les caractéristiques influençant la résistance de l'os à la fracture.[100,101] Ce terme est global et fait référence à plusieurs aspects de la physiologie osseuse, aux propriétés mécaniques, à l'architecture, au degré de minéralisation de la matrice osseuse, à la chimie et à la structure des cristaux minéraux, ainsi qu'aux propriétés de remodelage de l'os.[5,90,93,97,98,101,102]

Le terme « **qualité osseuse** » a souvent été utilisé pour désigner la **densité de l'os.**[98,103,104] Cependant, les termes « *densité osseuse* » et « *qualité osseuse* » ne sont pas tout à fait synonymes.[93] En effet, pour certains auteurs[92,105,106], la notion de qualité de l'os comprend non seulement le degré global de minéralisation de l'os, les caractéristiques et motifs de l'os trabéculaire, mais également l'épaisseur de l'os cortical.

1.3.2.2 Densité et stabilité primaire : le succès des thérapeutiques implantaires

Il est admis dans la littérature que **la densité (« qualité ») et le volume (quantité) de l'os** sont des éléments important en implantologie : ils peuvent significativement influencer la stabilité primaire et le taux de succès des thérapeutiques implantaires.[107] Une quantité et une qualité osseuses médiocres sont considérées comme les principaux facteurs de risque d'échec implantaire, car elles peuvent être associées à une résorption osseuse excessive et à une altération du processus de cicatrisation par rapport à un os de densité supérieure.[107–110]

La stabilité primaire est définie comme l'absence de mouvement visuel et tactile de l'implant.[111,112] C'est un des facteurs clé pour le succès à long terme des traitements implantaires.[113] La stabilité primaire est une condition préalable à l'établissement d'un repos mécanique, essentiel pour une cicatrisation et l'obtention de l'ostéo-intégration.[113,114] En effet, un défaut de stabilité primaire peut induire des micromouvements de l'implant, conduisant à une fibroplasie, une perte d'ostéointégration et un échec de l'implant, en particulier dans les cas de mise en charge immédiate.[23,113,115]

La stabilité primaire est directement liée à la densité de l'os : un os dense augmente le pourcentage de contact os-implant et fournit ainsi une plus grande stabilité primaire.[116] Cependant, la qualité et la quantité de l'os varient d'un site à l'autre et d'un patient à l'autre.[55,117]

Plusieurs auteurs ont rapporté des **taux d'échecs implantaires liés à la qualité de l'os,** en particulier au niveau de la zone postérieure du maxillaire (Figure 16) :[84,111]

- **Engquist et al. (1988)**[118] ont observé que 78% des échecs implantaires se produisaient dans des types d'os mous.
- **Friberg et al. (1991)**[114] ont noté que 32% des échecs observés se produisaient dans un os extrêmement mou et/ou lorsque la stabilité primaire était insuffisante.
- **Herrmann et al. (2005)**[110] ont constaté que les échecs implantaires étaient fortement corrélés aux facteurs liés au patient, notamment à la qualité de l'os, en particulier lorsqu'ils étaient associés à un faible volume osseux.

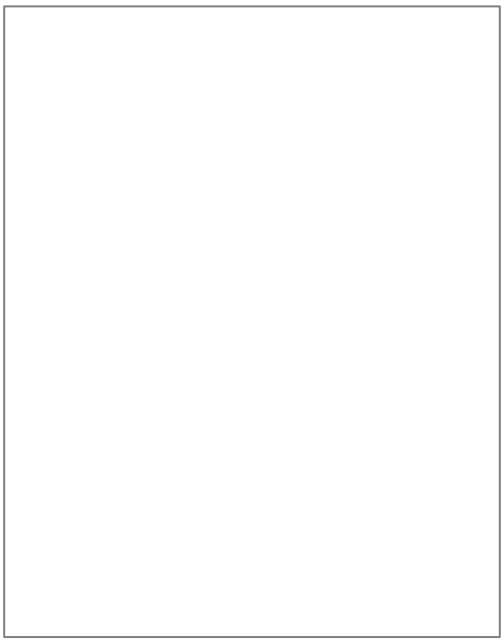


Figure 16 : Influence de la qualité osseuse sur les taux de succès implantaires (Illustration : Resnik et Misch[84])

1.3.2.3 Densité, choix de l'implant et protocole chirurgical

La stabilité primaire de l'implant étant influencée par la qualité de l'os, le praticien peut prédire la stabilité primaire avant l'insertion de l'implant grâce aux examens radiographiques tridimensionnels (tomographies).

Cette analyse précise de la densité osseuse de la mâchoire aide le praticien dans :[23,84,97,106,119–127]

- La sélection du patient (conditions de santé générale, site implantaire, qualité et quantité de l'os) ;
- L'établissement de son plan de traitement ;
- Le choix du type d'implant (diamètre, longueur, géométrie, filetage) : les implants coniques permettent d'obtenir un couple d'insertion plus élevé que les implants cylindriques ;
- Le choix de l'état de surface de l'implant ;
- La détermination de la technique chirurgicale : adapter la séquence de forage à la densité osseuse, tarauder dans un os dense pour éviter les microtraumatismes osseux ;
- La durée de cicatrisation ;
- Le choix du protocole de mise en charge ;
- Et enfin le choix de la conception prothétique finale.

1.3.2.4 Densité et protocole de mise en charge

Traditionnellement, la mise en charge occlusale fonctionnelle des implants est retardée de 3 à 6 mois afin de permettre l'ostéointégration, mais ce délai peut varier en fonction de la qualité et de la quantité d'os.[112] Ainsi, **la densité de l'os influence la durée de la période d'ostéointégration : son évaluation est essentielle pour déterminer la durée d'intervalle nécessaire entre la chirurgie de stade 1 et la seconde étape de mise en charge.**[93,97,123]

En 2004, **une conférence de consensus de l'ITI**[128] a défini les protocoles de mise en charge :

- La restauration immédiate (*immediate restauration*) est définie comme l'insertion d'une restauration provisoire dans les 48 heures suivant la pose de l'implant, mais qui n'est pas en occlusion avec la dentition antagoniste.
- La mise en charge immédiate (*immediate loading*) est définie comme la mise en place d'une restauration provisoire en occlusion avec la dentition antagoniste, dans les 48 heures suivant la pose de l'implant.
- La mise en charge conventionnelle (*conventional loading*) est définie comme la mise en place de la prothèse lors d'une seconde procédure intervenant trois à six mois après la pose de l'implant.
- La mise en charge précoce (*early loading*) est définie comme la mise en place d'une restauration provisoire en occlusion avec la dentition antagoniste, au moins 48 heures après la pose de l'implant et au maximum trois mois après la pose.
- La mise en charge différée (*delayed loading*) est définie comme la mise en place d'une prothèse fixée lors d'une seconde procédure, après la période de cicatrisation conventionnelle de trois à six mois.

En 2007, **une nouvelle déclaration de consensus**[129] a redéfini les protocoles de mise en charge et a émis de nouvelles recommandations :

- La mise en charge précoce survient entre 1 semaine et 2 mois après la pose de l'implant.
- La mise en charge immédiate intervient moins d'une semaine après la pose de l'implant.

Selon **Turkyilmaz et McGlumphy**,[120,130] le type et l'ampleur de la mise en charge peuvent influencer le processus d'ostéointégration : dans certains cas, elle pourrait même conduire à une déminéralisation de l'interface os-implant, à une perte de stabilité de l'implant et à un échec.

Selon **Sennerby et Meredith**[131], le succès de la mise en charge immédiate ou précoce dépend notamment de la capacité du praticien à déterminer le degré de stabilité primaire de l'implant. Ainsi, comme la qualité osseuse influence la stabilité primaire de l'implant, **la détermination de la densité osseuse devrait influencer le choix et le succès du protocole de mise en charge.**

En résumé

La zone pré-sinusienne du maxillaire édenté correspond à la zone du maxillaire située en avant de la paroi antérieure des sinus maxillaires. L'étude de cette zone anatomique représente un défi majeur pour plusieurs raisons :

- **Son anatomie** : elle en relation avec des structures anatomiques nobles (fosses nasales et sinus maxillaires).
- **Son origine embryologique :** la persistance d'un os prémaxillaire chez l'Homme adulte reste sujette à débat. Pour certains auteurs, la croissance de l'os prémaxillaire serait indépendante de celle de l'os maxillaire, ce qui pourrait avoir des conséquences sur le vieillissement de la zone antérieure du maxillaire.
- **Sa structure interne** : L'os basal, constitue la charpente de l'os maxillaire alors que le volume de l'os alvéolaire est conditionné par la présence des dents. L'architecture de l'os maxillaire est adaptée pour résister aux contraintes mécaniques de la mastication, grâce à trois poutres de résistance : antérieure (canine), latérale et postérieure. L'édentement provoque une résorption irréversible et un remodelage de l'os alvéolaire mais affecte peu l'os basal.
- **Ses fonctions** : lors de la mastication, les contraintes mécaniques sont transmises à l'os maxillaire par l'intermédiaire des dents. L'absence des dents maxillaires altère les fonctions orales de mastication, déglutition et phonation du fait de la résorption, de l'atrophie musculaire et de la diminution des forces masticatoires. Cette perte de fonction s'accompagne de modifications de la structure de l'os maxillaire.
- **Son implication dans l'équilibre psychologique et social de l'individu** : chez le sujet denté, la zone pré-sinusienne supporte les huit dents antérieures maxillaires , qui jouent un rôle important dans l'esthétique du sourire. La perte de ces dents affecte la confiance en soi et favorise l'isolement social. La restauration de l'esthétique du sourire constitue un défi majeur, afin d'améliorer la qualité de vie du sujet édenté complet.

Ainsi, l'étude des densités osseuses de l'os maxillaire édenté présente un intérêt en **anthropologie**, puisque le vieillissement pourrait affecter la structure et la morphologie du maxillaire, et en **implantologie**, puisque la densité influence nos choix thérapeutiques et le plan de traitement implantaire.

Mais comment étudier les variations de densité de l'os maxillaire ?

2 PAR QUELS MOYENS ETUDIER LA VARIABILITE DE LA DENSITE DE L'OS MAXILLAIRE ?

De nombreuses **méthodes** d'évaluation de la densité osseuse de l'os maxillaire ont été proposées dans la littérature. Ces méthodes ont conduit à une grande diversité de **classifications** des caractéristiques du tissus osseux.

Cette partie présentera l'ensemble de ces **méthodes**, qu'elles soient subjectives (c'est à dire visuelles et tactiles) ou objectives (quantitatives), puis elle détaillera les **classifications** de structure interne et/ou de morphologie existantes à l'heure actuelle, et applicables à l'os maxillaire après édentement.

2.1 Les différentes méthodes d'évaluation de la densité osseuse

2.1.1 Les méthodes subjectives : visuelles ou tactiles

2.1.1.1 L'évaluation visuelle sur radiographies ou coupes radiologiques

Lekholm et Zarb (1985)[103] ont initialement proposé d'évaluer visuellement la qualité osseuse du procès alvéolaire sur un film panthographique en fonction de la distribution entre tissu osseux cortical et tissu osseux spongieux.

Lindh et al.(1996)[102] ont ensuite proposé un indice visuel afin d'étudier le modèle trabéculaire à partir de radiographies péri-apicales.

Cependant, l'évaluation visuelle à partir de radiographies ou de coupes radiologiques reste approximative du fait de sa faible objectivité et de sa faible reproductibilité.[102,120,132]

Les radiographies panoramiques ont également été utilisées pour étudier la structure de l'os trabéculaire, mais elles présentent des inconvénients en raison de leur caractère bidimensionnel, de leur grossissement, de leur distorsion géométrique, de leur résolution réduite et de la présence d'artéfacts.[99,106,133]

2.1.1.2 L'évaluation tactile lors du forage implantaire

La sensation tactile lors de la préparation du site implantaire est très différente selon la densité de l'os, car la densité est directement liée à la résistance de l'os.[84] Cette évaluation par perception tactile permet d'adapter la séquence de forage avant la mise en place de l'implant.[84,111,126,134]

Cependant, cette méthode est influencée par la forme de l'implant, par la structure de l'implant et par la quantité d'os.[135] De plus, cette méthode subjective dépend de l'expérience du chirurgien et ne peut être mise en œuvre qu'au cours de l'intervention chirurgicale : elle ne permet donc pas d'étudier la densité osseuse lors de la planification du traitement implantaire.

L'intérêt des **méthodes d'évaluation subjectives** reste limité, tant dans la recherche que dans la pratique clinique courante. Les densités osseuses obtenues restent **approximatives**, en raison de la **variabilité inter-opérateur**. C'est pourquoi plusieurs auteurs recommandent le recours à des méthodes plus objectives.[117,120,123,130,136]

2.1.2 Les méthodes objectives : quantitatives

2.1.2.1 Les méthodes objectives *ex vivo*

Les méthodes objectives *ex vivo* sont basées sur l'histologie.[4] Elle permettent d'obtenir des analyses bidimensionnelles ou tridimensionnelles à partir d'échantillons de biopsies osseuses.[4] Mais elles sont **invasives** et difficilement applicables en pratique clinique.[23,137]

2.1.2.1.1 L'examen histomorphométrique des biopsies osseuses

L'histomorphométrie consiste à analyser une biopsie osseuse de l'os de la mâchoire.[123,137] Après prélèvement, la biopsie subit un traitement afin d'obtenir de fines coupes, puis l'analyse histomorphométrique est effectuée à l'aide d'un microscope.[123,137] Cet examen est basé sur le calcul plusieurs paramètres histomorphométriques :[115,138]

- Le volume osseux trabéculaire (BV *bone volume*) exprimé en %,
- Le volume total (TV *total volume*) exprimée en %,
- La fraction volumique de l'os (BV/TV *bone volume/total volume*), exprimée en %,
- Le nombre de travées (Tb.N *trabecular number*), qui correspond à la moyenne du nombre de trabécules dans un espace donné, exprimé en mm^{-1},
- L'épaisseur des travées (Tb.Th *trabecular thickness),* exprimée en µm,
- L'espace entre les travées (Tb.Sp *trabecular spacing),* exprimé en µm.

Il s'agit d'une méthode fiable et sûre pour évaluer la qualité de l'os, mais elle n'est pas applicable en pratique clinique. En effet, ses inconvénients majeurs sont qu'elle est très invasive et qu'elle ne peut être réalisée qu'en peropératoire.[23,137,139]

2.1.2.1.2 La microtomodensitométrie (micro-CT *microcomputed tomograph*y)

La micro-CT est présentée comme le *gold standard* pour l'analyse tridimensionnelle de la morphologie et de la microstructure osseuse.[4,23,115,140]

Elle est basée sur la reconstruction tridimensionnelle de coupes jointives à partir de projections bidimensionnelles acquises autour d'un axe de rotation.[4] Elle fournit une mesure quantitative de la densité et de la connectivité osseuse à très haute résolution. La connectivité osseuse est un indice important de la solidité osseuse : elle représente le nombre de nœuds et de piliers entre les travées de l'os spongieux.[23] Comme l'examen histomorphométrique des biopsies osseuses, la micro-CT permet de mesurer plusieurs paramètres histomorphométriques[4,115,140,141] : BV, BV/TV, Tb.N, Tb.Th, Tb.Sp.

Bien que la micro-CT constitue une méthode fiable et rapide pour évaluer la masse osseuse, le volume osseux et l'architecture trabéculaire tridimensionnelle, elle est limitée aux petits échantillons et reste une méthode de recherche qui ne peut pas être utilisée *in vivo*.[23,115,141]

2.1.2.2 Les méthodes objectives *in vivo* (non invasives)

Les méthodes objectives *in vivo* sont basées sur l'imagerie bidimensionnelle (radiographie) ou tridimensionnelle (tomographie).

2.1.2.2.1 Les radiographies en deux dimensions

Les radiographies bidimensionnelles standards comme la radiographie péri-apicale ou la radiographie panoramique reposent sur une **projection** bidimensionnelle du tissu osseux sur un film argentique ou sur un capteur numérique.[5,139]

L'étude quantitative des densités osseuses à partir de radiographies bidimensionnelles est basée sur le calcul des **dimensions fractales** de l'os trabéculaire.[99,135] Il s'agit d'une technique rapide, facile à mettre en œuvre et peu coûteuse pour apprécier approximativement la microarchitecture osseuse.[4,5,99]

De nos jour, des logiciels simplifient l'analyse des dimensions fractales sur les images bidimensionnelles, mais la mesure de densité osseuse à partir d'une radiographie bidimensionnelle correspond à la somme de la densité des tissus dans la direction de la projection : une évaluation objective est donc difficile.[84,99,135,139] Les radiographies bidimensionnelles ne peuvent détecter que des variations de densité osseuses supérieures à 40%.[139]

2.1.2.2.2 L'ostéodensitométrie ou absorptiométrie biphotonique à rayons X (DXA Dual energy X-ray Absorptiometry)

La DXA est une méthode fiable pour évaluer la **densité minérale osseuse (DMO)** : il s'agit de la méthode de référence (*gold standard*) pour étudier la densité osseuse squelettique au niveau des vertèbres et des hanches.[85,87,89,93] Elle repose sur les différentes propriétés d'atténuation de l'os et des tissus mous en fonction de l'énergie des photons.[88,142] Elle utilise une source de rayons X produisant un faisceau de deux énergies différentes, qui est atténué lorsqu'il traverse le patient.[142] L'évaluation de la densité de l'os maxillaire par DXA a été introduite par **Devlin et al**. en 1998.[135,142]

La DXA permet de mesurer :[87,88]

- La **DMO**, qui désigne la masse minérale par volume d'os exprimée en valeur absolue (g/cm^2).
- Le ***T-score*,** qui désigne les écarts-types supérieurs ou inférieurs à la valeur moyenne de DMO chez les adultes âgés de plus de 30 ans, de même sexe et de même ethnie. Une ostéopénie est définie par un *T-score* compris entre –2,5 et –1, et une ostéoporose est définie par un *T-score* inférieur ou égal à – 2,5.
- Le ***Z-score*,** qui désigne les écarts-types à la valeur moyenne de DMO d'une population de même âge et de même sexe.

La DMO mesurée par DXA est un **prédicteur de la résistance mécanique de l'os**.[4]

La DXA fournit une faible dose d'irradiation et permet une mesure rapide, non invasive, précise de la DMO.[135,142] Cependant, elle présente certains inconvénients tels que : son coût élevé, la taille importante de son équipement et la difficulté d'interprétation de ses résultats.[87] De plus, elle n'est pas adaptée à l'évaluation de la densité osseuse avant la pose d'un implant en raison de ses données limitées.[135]

2.1.2.2.3 La tomographie assistée par ordinateur (CT *Computed Tomography*)

La CT fournit une reconstruction mathématique informatique des données de transmission multidirectionnelle de rayons X à travers le corps, pour former une image électronique en coupe transversale de l'anatomie d'un patient.[27] Elle produit des sections tomographiques non déformées permettant de différencier et de quantifier les tissus durs et mous.[139]

Elle peut être utilisée pour la quantification objective des densités minérales de l'os trabéculaire et de l'os cortical, appelée **CT quantitative**. La densité osseuse est mesurée en **Unités Hounsfield (UH)** : ces unités sont directement liées au coefficient d'atténuation des rayons X dans les tissus.[92,101,123] L'échelle Hounsfield est une échelle standardisée, couramment utilisée pour évaluer la densité radiologique. Elle est basée sur la valeur de densité de référence de l'eau pure à 25°C (0 UH) et de l'air sec (-1000 UH).[27,90,117,119,123,127,133,135,143–147] Lorsqu'on mesure la densité des tissus mous, les valeurs obtenues sont très proches de 0, voire négatives.[123] L'os cortical peut présenter des valeurs comprises entre +1 000 et +1 600 UH, alors que l'os trabéculaire présente des valeurs plus faibles : des valeurs négatives peuvent indiquer que l'os trabéculaire a été principalement remplacé par de la graisse.[117,119,127,133,146]

De nombreux chercheurs[23,90,93,97,101,112,119,120,123,127,130,132,133,136] ont affirmé que la CT quantitative était un outil non invasif fiable pour évaluer la densité osseuse des sites implantaires. A l'aide de logiciels de planification implantaire, la densité peut facilement être mesurée en UH en plusieurs points, le long du contour de l'implant.[23] Mais la CT présente les inconvénients suivants : une dose d'irradiation élevée (3 mGy) et un coût important.[97,115,117,136,143,144]

Plusieurs auteurs ont comparé l'évaluation des densités osseuses par CT à d'autres méthodes subjectives ou objectives :

- **Norton et Gamble (2001)**[148] puis **Shahlaie et al. (2003)**[127] ont mis en évidence une forte corrélation entre la densité (trabéculaire et/ou corticale) mesurée en UH à partir de CT et le score de qualité subjectif évalué selon la classification de Lekholm et Zarb[103].
- **Lindh et al (2004)**[93] ont montré une corrélation significative entre la densité osseuse mesurée par CT quantitative au niveau de sites édentés des incisives maxillaires et la DMO du rachis lombaire mesurée par DXA.

- **Todisco et Trisi (2005)**[123] ont mis en évidence une corrélation statistiquement significative entre la densité osseuse mesurée par CT et le BV mesuré par histomorphométrie (*r* de Pearson = 0.691, *p* = 0.01).
- **Lee et al (2007)**[112] ont mis en évidence une corrélation significative entre la résistance subjective au forage mesurée selon la classification de Misch et l'évaluation objective par CT (*rho* de Spearman compris entre 0.58 et 0.61, $p \leq 0.001$).

2.1.2.2.4 La tomographie volumique à faisceau conique (CBCT Cone Beam Computed Tomography)

Depuis la fin des années 90, le CBCT a largement remplacé la CT pour l'imagerie orale et maxillo-faciale. Selon **Resnik**, elle est devenue le *gold standard* pour la planification du traitement en implantologie.[149] Le CBCT repose sur la dispersion de rayons X dans un faisceau divergent et sur la capture de données volumétriques numériques ou de voxels pour l'imagerie anatomique.[27]

Par rapport à la CT, le CBCT présente de multiples avantages : une réduction de la dose moyenne d'irradiation, un temps d'exposition plus court, une faible distorsion des images, une bonne résolution spatiale, un coût d'examen plus faible, et un équipement plus compact et moins onéreux, donc plus accessible aux chirurgiens-dentistes.[87,99,112,115,117,121,122,135,139,140,144,146,150–152] La dose d'irradiation correspond à environ 25% de celle d'une radiographie panoramique[117,139] et est 40 à 60 fois inférieure à celle de la CT[140]. Contrairement à la CT, le CBCT ne nécessite pas d'être calibré.[146]

Le CBCT répond au principe ALARA « *As Low As Reasonably Achievable* » (Aussi Bas que Raisonnablement Possible) qui correspond au principe d'optimisation en radioprotection. En France, ce principe est décrit dans l'article L-1333-2 du Code de la Santé Publique : *« 2° Le principe d'optimisation, selon lequel le niveau de l'exposition des personnes aux rayonnements ionisants résultant d'une de ces activités, la probabilité de la survenue de cette exposition et le nombre de personnes exposées doivent être maintenus au niveau le plus faible qu'il est raisonnablement possible d'atteindre, compte tenu de l'état des connaissances techniques, des facteurs économiques et sociétaux et, le cas échéant, de l'objectif médical recherché* ». Le principe ALARA, basé sur l'optimisation, a évolué vers le principe ALADA « *As Low as Diagnostically Acceptable* » (Aussi Bas que « *Diagnostiquement* » Acceptable), qui recherche un équilibre entre diagnostic de qualité et radioprotection.[153]

Les limites du CBCT sont un niveau de bruit plus élevé, une résolution de contraste limitée, la géométrie du faisceau, une moins bonne imagerie des tissus mous : ces inconvénients sont liés au durcissement du faisceau et à la diffusion du rayonnement qui nuisent à la qualité de l'image.[121,144,150,154] Cependant, les dernières machines présentent une amélioration de la résolution spatiale, du contraste et de la précision dimensionnelle.[150]

De nombreux auteurs ont suggéré l'utilisation du CBCT pour quantifier la densité osseuse des maxillaires.[92,106,112,115,117,121,124,140,146] Les CBCT peuvent générer des images DICOM (*Digital Imaging and Communication in Medicine*) pouvant être reformatées par des programmes informatiques (comme Simplant®, Mimics®, Denta CT®, DTX studio®…) afin d'obtenir une mesure quantitative de la densité osseuse.[106,121,145]

Mais l'utilisation du CBCT pour l'évaluation quantitative de la densité osseuse reste discutée puisqu'elle ne dispose pas de valeurs de voxels standardisées : elle repose sur des différences de niveaux de gris définies par les fabricants.[143,146] Le terme « niveau de gris » (GV *grey value*) désigne le niveau de luminosité d'un pixel. Dans le CBCT, les tissus durs (os, dents…) absorbent une plus grande quantité d'énergie radiologique que les tissus mous (peau, langue, gencives…) ce qui créé différentes nuances de gris sur les images.[87]

Certains auteurs ont donc soulevé des inquiétudes quant à l'efficacité de la reproductibilité du CBCT dans l'évaluation quantitative des densités osseuses. Par conséquent, l'échelle de gris du CBCT a été appliquée par les fabricants en tant qu'**équivalent non défini de l'échelle de Hounsfield** et est désignée comme « *niveaux de gris* » GV ou « *valeur de voxel* » VV. [106,144,146,147,150,152,154] Ces valeurs de densités de gris ne sont pas absolues mais **relatives**.[106,122,144,146,147,150,155]

Malgré ces controverses, plusieurs auteurs ont mis en évidence une corrélation entre les GV mesurés par CBCT et les densités UH mesurées par CT, ce qui confirme le potentiel du CBCT dans l'évaluation objective des densités osseuses :

- **Aranyarachkul et al. (2005)**[117] ont affirmé que la capacité du CBCT à reproduire les valeurs UH était très élevée : ils ont retrouvé une forte corrélation entre les densités osseuses mesurées par CBCT et celles mesurées par CT (*r* de Pearson compris entre 0,92 à 0,98). Les valeurs de densité osseuse mesurées par CBCT étaient généralement plus élevées que les valeurs CT correspondantes.
- **Naitoh et al. (2009**)[147] ont mis en évidence une forte corrélation entre les GV du CBCT et les UH de la CT multicoupe dans l'os spongieux de la mandibule ($r = 0.965$).
- **Valiyaparambil et al. (2012)**[106] ont trouvé une forte corrélation entre les GV issues du CBCT et les UH issues la CT multicoupe, mesurées à partir de fantômes radiographiques (*r* de Pearson = 0.99, $p < 0.0001$) : bien qu'il y ait des différences numériques entre GV et UH, une corrélation linéaire a été détectée entre GV du CBCT et la concentration en hydroxyapatite de calcium dans l'os trabéculaire et l'os cortical.
- **Parsa et al. (2012)**[152] ont mis en évidence une forte corrélation ($r = 0.968$) entre les GV du CBCT et les UH de la CT multicoupe mesurées à partir de sites édentés partiels mandibulaires issus de cadavres humains. Les valeurs mesurées par CBCT étaient significativement supérieures à celles mesurées par CT.
- **Cassetta et al. (2014**)[146] ont retrouvé une corrélation statistiquement significative entre les densités osseuses mesurées sur des CBCT et celles mesurées sur des CT à partir de mandibules de cadavres (*r* de Pearson compris entre 0.93 et 0,97, $p < 0.05$).

- **Parsa et al. (2015)**[115] ont trouvé une forte corrélation entre les valeurs de GV mesurés sur les examens CBCT et la densité osseuse en UH mesurée sur des examens CT multicoupe (*r* de Pearson = 0.89).
- **Bal et al (2020)**[156] ont mis en évidence une forte corrélation entre les densités osseuses issues d'examens CT et CBCT sur deux mandibules et deux maxillaires édentés de cadavres humains ($p < 0.01$). Les valeurs mesurées par CBCT étaient généralement plus élevées que celles obtenues par CT.
- Une récente méta-analyse menée en **2022** par **Selvaraj et al.**[143] a mis en évidence une corrélation positive entre les niveaux de gris du CBCT et les UH de la CT (*r* de Pearson = 0.669 ; $p < 0.05$) : **le CBCT pourrait donc être utilisée pour l'estimation quantitative de la densité osseuse avant la pose d'implants.**

Plusieurs auteurs ont proposé des équations visant à convertir les GV du CBCT (valeurs relatives) en valeurs absolues (en UH). Ces équations ont été dérivées en utilisant différents matériaux de densités connues et sont spécifiques à chaque machine CBCT.

- **Mah et al. (2010)**[154] ont proposé une équation de conversion basée sur les coefficients d'atténuation des matériaux *in vitro* : $UH = {(\mu_{matériau} - \mu_{eau})}/{\mu_{eau}} \times 1000$
- **Parsa et al. (2012)**[152] ont proposé une équation de conversion des GV du CBCT en UH de la CT multicoupe, à partir d'examens issus de cadavres de mandibules partiellement édentées : $UH = 0{,}67 \times valeur\ de\ gris\ du\ voxel\ CBCT - 171{,}80$
- **Cassetta et al. (2014)**[146] ont établi un ratio de conversion entre CT et CBCT à partir d'examens issus de mandibules de cadavres : $valeurs\ CT = 0.7 \times valeurs\ CBCT$. Cependant, ce rapport est approximatif et peut varier selon la machine CBCT utilisée.

Selon certains auteurs, le CBCT permettrait également d'évaluer la microstructure trabéculaire[99,115]. Plusieurs auteurs ont comparé les mesures de densités obtenues par CBCT aux examens histomorphométriques (biopsies, DXA, micro-CT)

- **González-García et Monje (2013)**[140] ont comparé la CBCT et la micro-CT : ils ont mis en évidence une corrélation positive entre la densité radiologique mesurée le long de l'axe de l'implant (RBD_{axial}) sur l'examen CBCT et la BV/TV (*r* de Pearson = 0.858, $p < 0.001$). Ils ont établi une équation de régression : ${BV}/{TV} = 14{,}258 + 0{,}072 \cdot RBD_{axial}$.
- En **2015**, **Parsa et al.**[115] ont également trouvé une forte corrélation entre la BV/TV calculée à partir de CBCT et la BV/TV mesurée par micro-CT (*r* de Pearson = 0.82).
- **Shokri et al. (2019)**[87] ont mis en évidence une forte corrélation entre les densités osseuses des sites maxillaires (de l'incisive à la tubérosité) obtenues par CBCT et les densités osseuses du squelette (colonne lombaire et col du fémur) obtenues par DXA.
- **Huang et al. (2023)**[157], ont mis en évidence une forte corrélation entre le CBCT et la micro-CT d'une part (*r* de Pearson = 0.97) et entre le CBCT et l'histomorphométrie d'autre part (*r* de Pearson = 0.98) dans l'estimation quantitative du type d'os.

Enfin, **Lee et al. (2007)**[112] ont mis en évidence une corrélation significative entre la résistance subjective au forage (estimée selon la classification de Misch) et l'évaluation quantitative objective des densités à partir de CBCT (*rho* de Spearman = 0.59, $p \leq 0.001$).

2.1.2.3 Les méthodes basées sur l'évaluation de la stabilité primaire de l'implant

Classiquement, la notion de stabilité primaire est **subjective** et est basée sur la perception tactile du chirurgien : elle est définie comme **l'absence de mouvement visuel et tactile de l'implant.**[111,112] On distingue 3 types de mobilités : un implant non mobile, un implant partiellement mobile (stable horizontalement mais qui tourne) et un implant mobile (présentant un mouvement latéral ou vertical).[111] La stabilité primaire dépend de la quantité, de la qualité osseuse, de la géométrie de l'implant (longueur, diamètre, type) et de la technique de forage (sous-forage, sur-forage, taraudage…).[132,136]

La stabilité primaire de l'implant peut être mesurée par des méthodes cliniques non invasives (tapotement, *Periotest*®, résistance au couple d'insertion, méthodes de vibration, analyse en fréquence de résonnance) ou des méthodes invasives (couple de retrait).[113,120,132,133,136] Selon **Meredith**[113], il est très souhaitable de disposer d'une méthode quantitative permettant d'évaluer la stabilité primaire de l'implant lors de sa mise en place : dans le cadre de ce travail, nous détaillerons uniquement les **méthodes quantitatives non invasives.**

Ces méthodes peuvent fournir des informations utiles sur la densité osseuse, mais elles ne peuvent être mises en œuvre qu'au cours de l'intervention chirurgicale ou après la pose de l'implant. Elles sont postérieures à l'évaluation du patient et elles ne permettent donc pas d'étudier la densité osseuse lors de la planification du traitement implantaire.[93,120,132,133,135,136,157] De plus, bien que la stabilité primaire soit liée à la densité osseuse du site, ces méthodes sont influencées par le choix de l'implant et du protocole de forage et **ne permettent donc pas une évaluation précise de la densité osseuse du maxillaire**.

2.1.2.3.1 Le *Periotest®*

Le *Periotest*® (Siemens®) est un instrument électronique permettant de mesurer quantitativement le taux d'amortissement du ligament parodontal entourant une dent, en établissant une valeur de sa mobilité : il a été également utilisé pour mesurer la mobilité des implants et la rigidité de l'interface os-implant.[113,120] Le *Periotest* consiste à mesurer le temps de contact os-implant en percutant l'implant avec une petite tige propulsée par un moteur électromagnétique et placée sur une pièce à main.[113,120,139] Cependant, certains facteurs, tels que l'angulation de la pièce à main, le point d'impact, la longueur du pilier la densité osseuse, le site implantaire peuvent influencer la valeur mesurée et la précision de la mesure de la stabilité.[113,139] Cette méthode est peu invasive mais son utilisation pour mesurer la stabilité de l'implant est limitée en raison de son manque de résolution, de sa faible sensibilité et de sa susceptibilité à l'opérateur.[113,120]

2.1.2.3.2 La résistance au couple d'insertion

L'évaluation objective de la stabilité primaire peut consister en la mesure en $N.cm^{-1}$ (Newton/Centimètre) du couple requis pour insérer complètement un implant en forme de vis. Le couple de résistance à l'insertion dépend notamment de la densité de l'os environnant.[112] Les moteurs d'implantologie actuels permettent de mesurer en temps réel et d'augmenter graduellement le couple d'insertion lors de la mise en place de l'implant.

Plusieurs auteurs[112,136] ont mis en évidence une corrélation entre la densité osseuse mesurée par CT ou CBCT d'une part et la stabilité primaire évaluée par le couple d'insertion des implants d'autre part.

Cette technique peut fournir des informations précieuses qui peuvent faciliter l'identification de la période de cicatrisation optimale avant la mise en place de l'implant, mais elle ne peut pas être employée lors de la planification implantaire.[113]

2.1.2.3.3 L'analyse de la fréquence de résonnance (RFA *resonance frequency analysis*)

La RFA, décrite par Meredith, est une méthode clinique sonique non invasive, déterminant objectivement la stabilité primaire ou secondaire de l'implant.[107,111,113,133]

La RFA est une des techniques les plus utilisées pour évaluer la stabilité de l'implant en pratique clinique.[158] Un transducteur électronique est fixé soit directement sur l'implant, soit sur le pilier prothétique.[111,133] Un courant de basse tension sinusoïdal est appliqué à travers ce transducteur à l'interface os-implant, et la résonance du système de résonance os-implant est capturée électroniquement.[111,113,133,158] La résistance aux vibrations du transducteur à l'os environnant est mesurée dans un logiciel, sous forme de valeurs du quotient de stabilité de l'implant (ISQ *Implant Stability Quotient*) variant entre 1 (stabilité la plus faible) et 100 (stabilité la plus élevée).[111,131,133,158] Les valeurs ISQ supérieures à 65 sont considérées comme les plus favorables à la stabilité de l'implant, tandis que des valeurs inférieures à 45 indiquent une mauvaise stabilité primaire.[107] La valeur de l'ISQ dépend de la rigidité de la structure : une diminution de la fréquence est liée à une diminution de la rigidité de l'interface ou de la rigidité de l'os environnant.[113] La machine *Osstell*® (Integration Diagnostics®) utilise la RFA pour mesurer l'ISQ. [131,139] Les valeurs obtenues sont plus sensibles que celles fournies par le *Periotest*®.[120]

Plusieurs études ont mis en évidence que les valeurs d'ISQ mesurées par RFA étaient corrélées avec densités osseuses mesurées par CT quantitative, et avec les valeurs de couple d'insertion.[98,120,130,132,136] Deux études ont trouvé une corrélation entre les valeurs d'ISQ mesurées par RFA et les densités osseuses mesurées à partir d'images CBCT.[121,159]

Récemment, une revue de littérature menée en 2020 par **Huang et al.**[158] a rapporté que l'ISQ était influencé par de nombreux facteurs : la direction de la mesure, le sexe, le site implantaire, le protocole d'implantation (immédiate ou différée), le diamètre et la longueur de l'implant, le couple d'insertion, la forme de l'implant, la qualité osseuse et l'épaisseur de l'os cortical, le nombre d'implants et le type de chirurgie.

2.2 Classifications

De nombreuses classifications ont été proposées afin d'étudier la variabilité de morphologie et de structure interne des os des mâchoires. Ces classifications sont nombreuses et décrivent la morphologie et la structure des os de manière indépendante ou combinée.

2.2.1 Classifications des résorptions (morphologie)

La quantité de l'os englobe à la fois la morphologie alvéolaire mais également les dimensions de l'os (hauteur et la largeur de la crête alvéolaire)[92,97,106]. Plusieurs classifications ont été proposées pour mettre en évidence la réduction des crêtes alvéolaires dans les trois plans de l'espace après édentement.

2.2.1.1 Classification quantitative de Lekholm et Zarb (1985)

En 1985, **Lekholm et Zarb**[103] ont décrit une classification qui comprend cinq stades de résorption osseuse (Figure 17) :

- Forme A : Résorption de la crête alvéolaire faible ;
- Forme B : Résorption de la crête alvéolaire modérée ;
- Forme C : Résorption avancée de la crête alvéolaire importante, jusqu'à la base de l'arcade dentaire ;
- Forme D : Résorption de l'os basal modérée ;
- Forme E : Résorption de l'os basal importante.

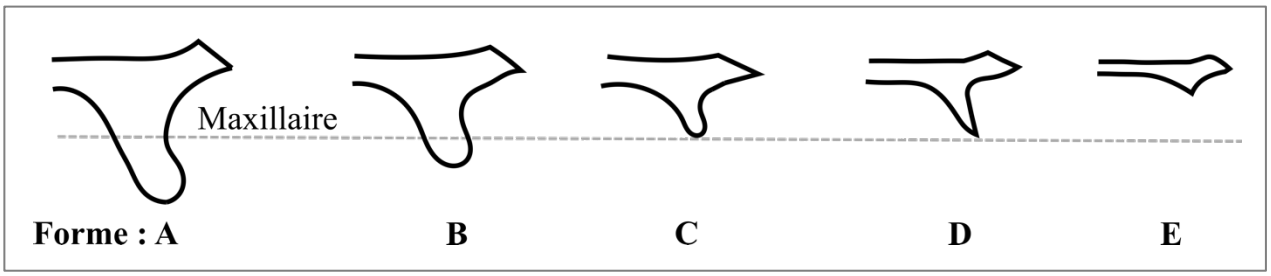


Figure 17 : Classification qualitative des résorptions osseuses de Lekholm et Zarb (Illustration personnelle, d'après Lekholm et Zarb[103])

2.2.1.2 Classification de Fallschüssel (1986)

En 1986, **Fallschüssel**[160] a proposé une classification des différents stades de la résorption osseuse maxillaire après extraction (Figure 18).

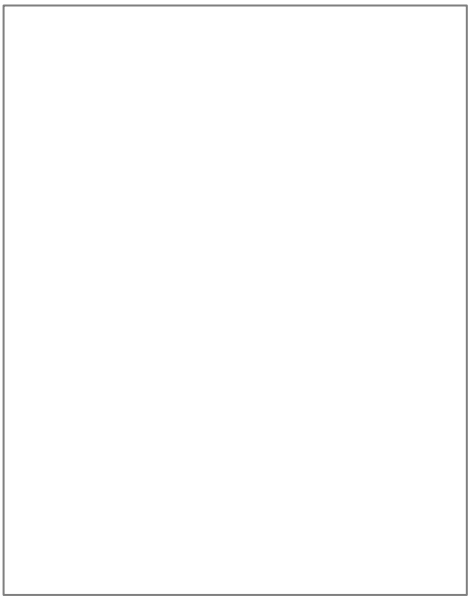


Figure 18 : Différents stades de résorption osseuse maxillaire en coupe para-sagittale après édentation selon Fallschüssel[160] (Illustration : Vacher[20])

2.2.1.3 Classification quantitative de Misch et Judy (1987)

En 1987, **Misch et Judy**[161] ont proposé quatre catégories d'os disponible selon les phénomènes de résorption naturelle de chaque région du maxillaire et de la mandibule partiellement édenté (Figure 19) :

- Division A : Os abondant.
- Division B : Os à peine suffisant.
- Division C : Os compromis, avec deux sous catégories : C-h (hauteur inadéquate) et C-w (largeur inadéquate).
- Division D : Os déficient.

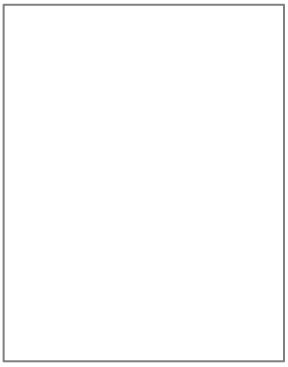


Figure 19 : Classification d'os disponible de Misch et Judy[161]
(Illustration : Misch et Resnik[162])

Cette classification a ensuite été adaptée aux sujets édentés complets, tout en étudiant le volume osseux en fonction de sa localisation. Misch définit trois régions au sein du maxillaire édenté, délimitées par le sinus maxillaire : la région antérieure, constituée par la région entre les premières prémolaires et antérieure au sinus maxillaire, la région postérieure droite, et la région postérieure gauche. Ces trois zones sont évaluées indépendamment les unes des autres : il peut ainsi y avoir une, deux ou trois divisions osseuses au sein d'une même arcade (Figure 20) :[163]

- Type 1 : La catégorie d'os est similaire dans les trois régions anatomiques ;
  - Type 1 Division A : l'os est abondant dans les trois régions ;
  - Type 1 Division B : l'os est suffisant dans les trois régions ;
  - Type 1 Division C-w : la hauteur d'os disponible est suffisante, mais la largeur est insuffisante ;
  - Type 1 Division C-h : la hauteur d'os disponible insuffisante ;
  - Type 1 Division D : l'os est déficient dans les trois régions.
- Type 2 : Les deux régions postérieures sont similaires, mais diffèrent de la région antérieure. La première lettre décrit la catégorie de la région antérieure et la seconde lettre décrit la catégorie des régions postérieures : par exemple Type 2 Division A, B, Type 2 Division A, C…
- Type 3 : Les régions postérieures droite et gauche sont différentes. Le volume antérieur est mentionné en premier, suivi de la région postérieure droite puis de la région postérieure gauche.

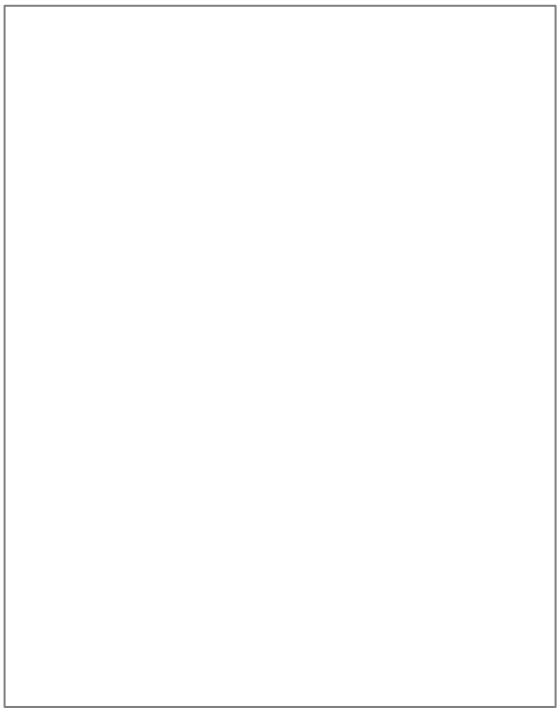


Figure 20 : Exemples de catégories de la classification de Misch et Judy appliquée aux arcades totalement édentées (Illustration : Misch et Resnik[163])

2.2.1.4 Classification de Cawood et Howell (1988)

En 1988, **Cawood et Howell**[44,54] ont proposé une classification descriptive des crêtes édentées en six classes. Cette classification repose sur l'étude d'une collection aléatoire de 300 crânes secs. Selon ces auteurs, suite à la perte des dents, les changements morphologiques du processus alvéolaire suivent un schéma prévisible (Figure 21) :

- Classe I : Denté.
- Classe II : Immédiatement après l'extraction.
- Classe III : Crête arrondie, de hauteur et de largeur adéquates.
- Classe IV : Crête en lame couteau, de hauteur adéquate et de largeur insuffisante.
- Classe V : Forme de crête plate, de hauteur et largeur insuffisantes.
- Classe VI : Forme de crête déprimée, associée une perte d'os basal.

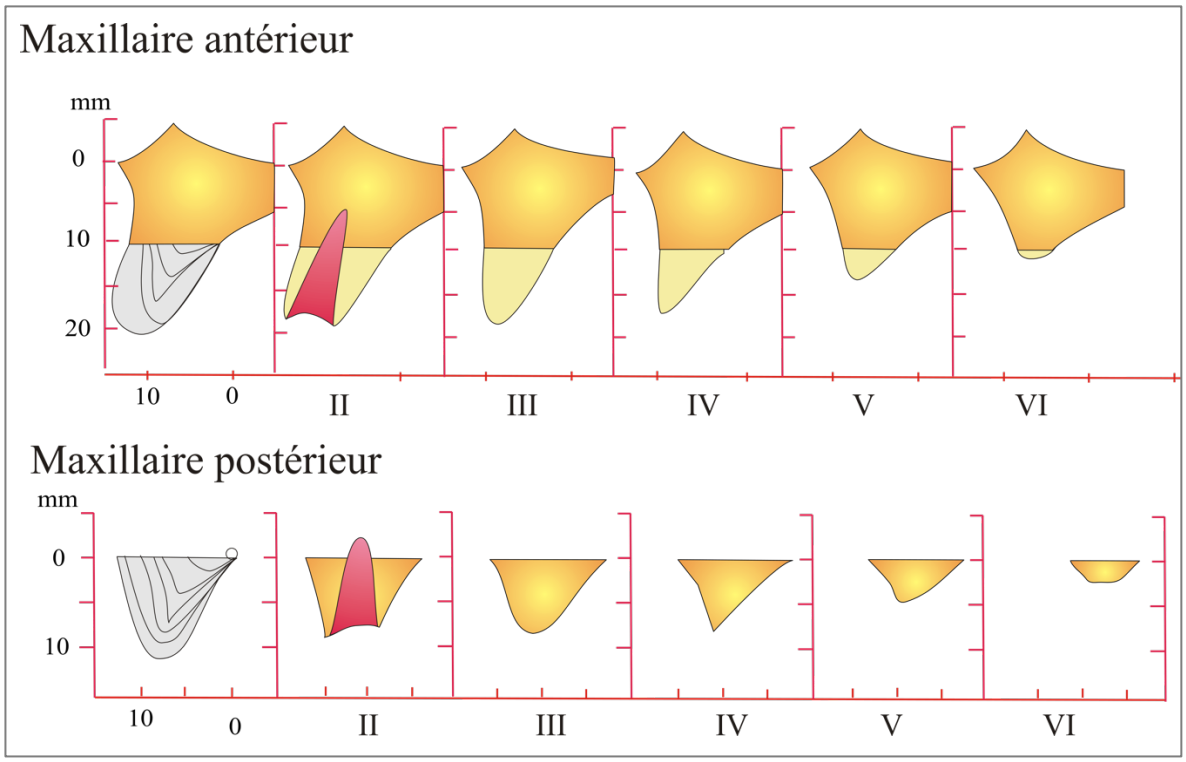


Figure 21 : Classification de Cawood et Howell au maxillaire antérieur et postérieur (Illustration d'après Cawood et Howell[44])

2.2.1.5 Classification HCV de Wang et Al-Shammari (2002)

En 2002, **Wang et Al-Shammari**[164] ont proposé un système de classification des défauts osseux orienté vers la thérapeutique : **la classification horizontale, verticale et combinée (HVC).** Les défauts sont classés en trois catégories, horizontaux (H), verticaux (V) ou combinés (C), et chaque catégorie est subdivisée en sous-catégories petite (s *small*, ≤ 3 mm), moyennes (m *medium*, 4 à 6 mm) et grandes (l *large*, ≥ 7 mm) (Figure 22). Les auteurs proposent des options thérapeutiques implantaires et prothétiques en fonction du type et de la taille du défaut.

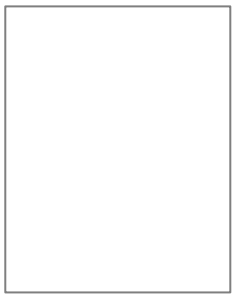


Figure 22 : Classification des crêtes HVC de Wang et Al-Shammari
(Illustration : Wang et Al-Shammari[164])

2.2.1.6 Classification UCLA de El-Ghareeb et al. (2008)

La **classification UCLA des crêtes alvéolaires partiellement édentées** a été proposée en 2008 par **El-Ghareeb et al.**[165] et comporte six classes :

- Classe I (Figure 23a) : Aucun défaut osseux vertical ou horizontal, que ce soit au niveau crestal ou apical.
- Classe II : Insuffisance horizontale crestale sans défaut osseux vertical.
  - Classe II mineure (Figure 23b) : insuffisance horizontale crestale mineure sans défaut horizontal apical.
  - Classe II majeure (Figure 23c) : insuffisance horizontale crestale majeure sans défaut horizontal apical.
- Classe III : Insuffisance horizontale apicale sans défaut osseux vertical.
  - Classe III mineure (Figure 23d) : insuffisance horizontale apicale mineure sans défaut horizontal crestal.
  - Classe III majeure (Figure 23e) : insuffisance horizontale apicale majeure sans défaut horizontal crestal.
- Classe IV (Figure 23f) : Insuffisance horizontale crestale et apicale, sans défaut osseux vertical.
- Classe V (Figure 23g) : Insuffisance osseuse verticale mais dimensions horizontales adéquates.
- Classe VI (Figure 23h) : Dimensions verticales et horizontales insuffisantes ; le défaut horizontal peut être apical et/ou crestal (comme indiqué dans les classes II-IV).

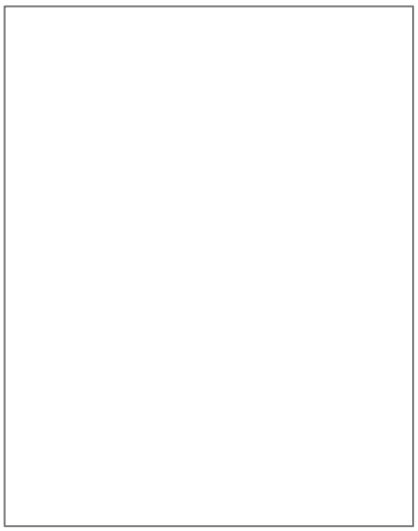


Figure 23 : Classification UCLA des crêtes alvéolaires partiellement édentées proposée par El-Ghareeb et al., 2008[165] (Illustration : El-Ghareeb et al.[165])
(a) classe I, (b) classe II mineure, (c) classe II majeure, (d) classe III mineure, (e) classe IV, (f) classe IV, (g) classe V, (h) classe VI.

En 2012, **Iida et son équipe**[92] ont proposé une version modifiée de cette classification :

- Type 1 (correspond aux classes I et II mineure) : Volume d'os alvéolaire suffisant pour les implants.
- Type 2 (correspond aux classes III majeure et mineure) : Volume d'os alvéolaire insuffisant en vestibulaire.
- Type 3 (correspond aux classes II majeure et IV) : Morphologie en lame de couteau, avec une hauteur d'os alvéolaire suffisante.
- Type 4 (correspond aux classes V et VI) : Hauteur d'os alvéolaire insuffisante.

2.2.1.7 Classification RDRC (Restoratively Driven Ridge Categorization) de Elian et al. (2009)

En 2009, **Elian et al**.[166] ont proposé une classification clinique de la qualité et de la quantité de l'os pour le traitement implantaire basée sur la position idéale de l'implant lors de la planification implantaire sur CT (Figure 24) :

- Groupe I : L'implant simulé est complètement entouré d'os, avec une épaisseur de la corticale vestibulaire supérieure ou égale à 2 mm (19.4% des crêtes).
- Groupe II : L'implant simulé est complètement entouré d'os, avec une épaisseur de la corticale vestibulaire inférieure à 2 mm (10.4% des crêtes).
- Groupe III : Présence de déhiscences au niveau vestibulaire et/ou palatin mais absence de fenestration (33.3% des crêtes).
- Groupe IV : Présence fenestrations au niveau vestibulaire et/ou palatin mais absence de déhiscence (6.3% des crêtes).
- Groupe V : Implant simulé présentant une déhiscence et un défaut de fenestration (30.6% des crêtes).

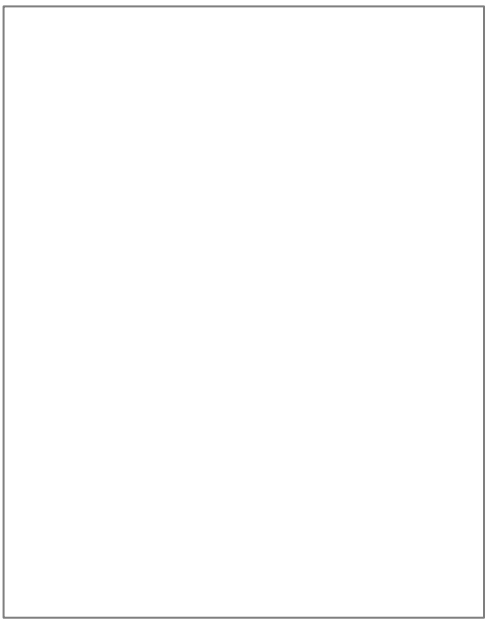


Figure 24 : Classification RDRC de Elian et al. (Illustrations : Elian et al.[166])

2.2.2 Classifications qualitatives : densité osseuse, structure

2.2.2.1 Classification de Linkow (1970)

En 1970, **Linkow et Chercheve**[167] ont classé les densités osseuses en trois catégories :

- Classe I : Trabécules uniformément espacées avec de petits espaces d'os spongieux.
- Classe II : Espaces spongieux plus larges avec une structure osseuse moins uniforme.
- Classe III : Larges travées remplies de moelle entre les trabécules.

2.2.2.2 Classification qualitative de Lekholm et Zarb (1985)

Lekholm et Zarb (1985)[103] ont classé les densités osseuses en 4 qualités en fonction de la distribution entre le tissu osseux cortical et le tissu osseux spongieux, après évaluation visuelle subjective sur un film pantographique (Figure 25) :

- Qualité Q1 : La quasi-totalité de la mâchoire est constituée d'un os compact homogène.
- Qualité Q2 : Couche épaisse d'os compact entourant un noyau d'os trabéculaire dense.
- Qualité Q3 : Fine couche d'os compact entourant un os trabéculaire dense de dimension favorable.
- Qualité Q4 : Fine couche d'os cortical entourant un noyau d'os trabéculaire de faible densité.

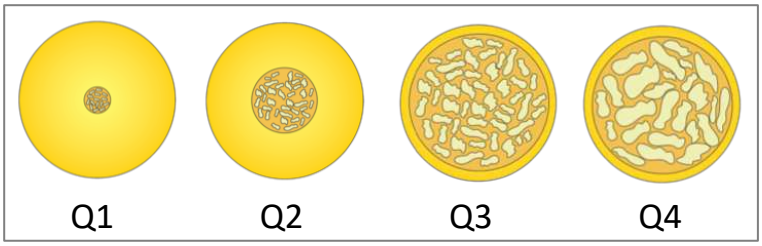


Figure 25 : Classification de Lekholm et Zarb (Illustration, d'après Lekholm et Zarb[103])

Bien que la densité osseuse influence les taux de succès implantaires, un os de qualité Q4 ne constitue pas une contre-indication en implantologie : il est recommandé de faire preuve de prudence, de rallonger le temps d'ostéointégration et de mettre en charge les implants progressivement.[90,122] A l'opposé, l'os de qualité Q1 présente un plus grand risque de surchauffe lors de la pose de l'implant.[122]

Cette classification, initialement basée sur une évaluation radiographique, a ensuite été modifiée par **Truhlar et al. (1997)**[116] pour inclure la sensation tactile lors du forage. Ces auteurs ont établi que :[116]

- Les qualités Q1 et Q4 étaient peu fréquentes.
- Les qualités Q2 et Q3 étaient présentes dans la plupart des sites implantaires : la qualité Q2 prédominait au niveau de la mandibule antérieure ou postérieure et la qualité Q3 prédominait au niveau du maxillaire antérieur ou postérieur.

Dans le système de classification proposé par Lekholm et Zarb, l'os cortical et l'os spongieux sont considérés comme une seule unité : plus l'os cortical est épais, plus l'os spongieux est dense.

Mais cette classification ne prend pas en compte toutes les conditions cliniques possibles de qualités osseuses.[108,155] Pour pallier à ce problème, en **2018, Al-Ekrish et al**.[108] ont proposé une version révisée de la classification de Lekholm et Zarb, afin de prendre en compte toutes les combinaison possibles d'os compact et d'os trabéculaire (Figure 26). Elle classe l'os cortical en fonction de son épaisseur (épais ou mince) et l'os trabéculaire en fonction de sa densité (dense, de densité moyenne ou de faible densité) :

- Qualité Q1 : Os compact entièrement homogène.
- Qualité Q2a : Couche épaisse d'os compact entourant un noyau d'os trabéculaire dense.
- Qualité Q2b : Couche épaisse d'os compact entourant un noyau d'os trabéculaire de densité moyenne.
- Qualité Q2c : Couche épaisse d'os compact entourant un noyau d'os trabéculaire de faible densité.
- Qualité Q3a : Couche mince d'os compact entourant un os trabéculaire dense.
- Qualité Q3b : Couche mince d'os compact entourant un noyau d'os trabéculaire de densité moyenne.
- Qualité Q4 : Couche mince d'os cortical entourant un noyau d'os trabéculaire de faible densité.

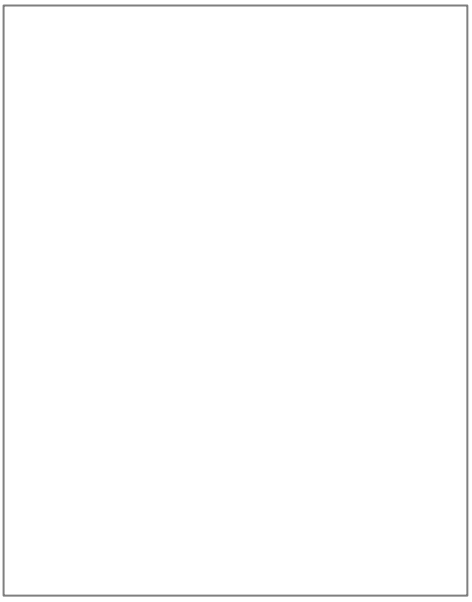


Figure 26 : Classification révisée selon Al-Ekrish et al. (Illustration : Al-Ekrish et al.[108])

La classification de Lekholm est Zarb est la plus utilisée pour l'évaluation pré-implantaire la qualité osseuse. Cependant, elle est subjective car elle repose sur une évaluation radiographique visuelle et la sensation tactile lors du forage, et elle est sensible à la variabilité inter-opérateur.

Plusieurs auteurs[127,148] ont mis en évidence une forte corrélation entre la densité (trabéculaire et/ou corticale) mesurée sur des CT ou des CBCT et le score de qualité subjectif selon la classification de Lekholm et Zarb[103]. Des échelles quantitatives objectivées basées sur la CT et le CBCT ont été proposées dans la littérature (Tableau 2) :

- **Norton et Gamble (2001)**[148] ont élaboré une échelle objective de la densité osseuse basée sur l'échelle Hounsfield selon le score de qualité subjectif. Ils proposent une catégorie supplémentaire (Qualité Q4*), correspondant à la zone de défaillance et présentant un mauvais pronostic. **De Oliveira et al. (2008)**[97] ont établi une échelle quantitative pour chaque classe de qualité osseuse selon la classification de **Lekholm et Zarb**[103] en se basant sur les densités osseuses **trabéculaires** mesurées en UH sur des CT. Ces deux auteurs [97,148] ont montré qu'il était difficile de classer les qualités Q2 et Q3 sur la base des densités osseuses mesurées par CT.
- **Hao et al**. (**2014**)[122] ont proposé une échelle quantitative à partir d'examens CBCT et basée sur la classification de Lekholm et Zarb. **Valiyaparambil et al.**[106] ont noté une tendance à la diminution des mesures issues de CBCT avec le type de qualité osseuse selon la classification de Lekholm et Zarb. Mais plusieurs auteurs[106,122] ont mis un évidence un chevauchement des qualités osseuses subjectives de type 2 et de type 3.

Échelle de densité en UH	Méthode d'évaluation de la densité : examen	Score de qualité osseuse selon la classification de Lekholm et Zarb[103]				
		Qualité 1 	Qualité 2 	Qualité 3 	Qualité 4 	Qualité 4*
Échelle de densité établie par **Norton et Gamble, 2001**[148]	CT scan	> 850 UH	500 à 850 UH		0 à 500 UH	< 0 UH
Échelle de densité trabéculaire établie par **de Oliveira et al., 2008**[97]	CT scan	> 400 UH	200 à 400 UH		< 200 UH	-
Échelle de densité établie par **Hao et al., 2014**[122]	CBCT	> 600 UH	200 à 600 UH		< 200 UH	-

UH : Unités Hounsfield, CT : Tomographie assistée par ordinateur, CBCT : Tomographie Volumique à Faisceau Conique

Tableau 2 : Valeurs de référence de la densité osseuse pour chaque type d'os selon la classification de Lekholm et Zarb
(D'après Norton et Gamble[148], de Oliveira et al.[97], Hao et al.[122])

D'un point de vue topographique, **Norton et Gamble (2001)**[148] ont indiqué que :

- La Qualité Q1 (> 850 UH) était retrouvée au niveau de la mandibule antérieure ;
- Les Qualités Q2-Q3 (500-850 UH) étaient retrouvées au niveau de la mandibule postérieure et du maxillaire antérieur.
- La Qualité Q4 (0-500 UH) était retrouvée au niveau du maxillaire postérieur.
- La Qualité Q4* (<0) était retrouvée au niveau de la tubérosité.

2.2.2.3 Classifications de Lindh et al (1996)

Lindh et al. (1996)[102] ont proposé un système de classification utilisant des images de référence pour évaluer le modèle trabéculaire à partir de radiographies péri-apicales de la mandibule avant traitement implantaire (Figure 27) :

- Classe A : Trabéculation dense ;
- Classe B : Alternance de trabéculation dense et clairsemée ;
- Classe C : Trabéculation clairsemée.

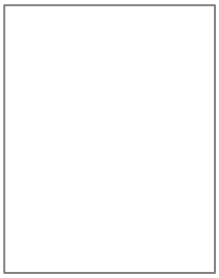


Figure 27 : Classification de Lindh et al. (Illustrations : Lindh et al.[102])

2.2.2.4 Classification qualitative de Misch (1988)

En 1988, **Misch**[84,126,168] a proposé 4 classes de densité osseuse indépendantes de la région des mâchoires, en se basant sur une évaluation subjective par le chirurgien-dentiste lors du forage implantaire (Figure 28) :

- L'os D1 est principalement constitué d'os cortical dense ;
- L'os D2 présente un os cortical dense épais et poreux sur la crête, entourant un os trabéculaire dense ;
- L'os D3 est constitué d'un os cortical poreux plus fin sur la crête et d'un os trabéculaire fin ;
- L'os D4 présente très peu ou pas d'os crestal, l'os trabéculaire fin composant la quasi-totalité du volume total de l'os.
- L'os D5 peut être décrit comme un os très mou, avec une minéralisation incomplète et de grands espaces inter-trabéculaire (os ostéoïde).

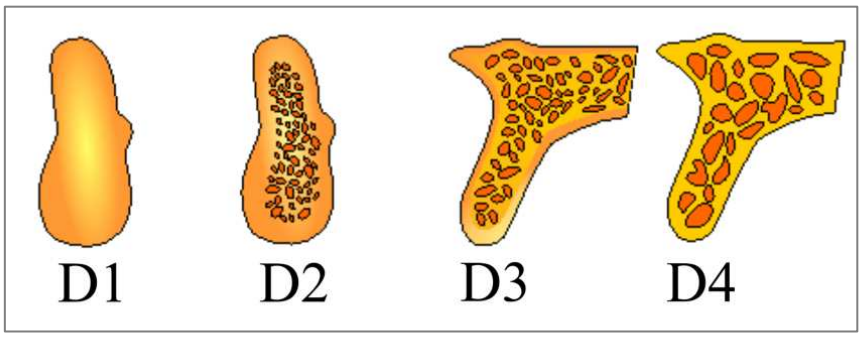


Figure 28 : Classification des densités osseuses de Misch (Illustration d'après Misch[84,126,168])

Le forage dans l'os D1 est semblable au forage du bois de chêne ou d'érable, dans l'os D2 est semblable au bois de pin blanc ou d'épicéa, dans l'os D3 est semblable au bois de balsa, dans l'os D4 est semblable au polystyrène et enfin dans l'os D5 est semblable à du polystyrène mou.[84]

D'un point de vue topographique, la localisation des différentes densités osseuses classées selon la classification de **Misch**[84,126] peut être superposée aux différentes régions de la bouche :

- L'os D1 se trouve principalement dans la partie antérieure de la mandibule, et n'est presque jamais observé au maxillaire.
- L'os D2 est la densité la plus souvent observée dans la mandibule antérieure (deux tiers des cas) ou postérieure (plus de la moitié des cas).
- L'os D3 est fréquent au maxillaire (plus de la moitié des cas) : maxillaire antérieur (75% des cas) ou postérieur (moitié des cas).
- L'os D4 est identifié dans la partie postérieure du maxillaire (40% des cas) ou dans la partie antérieure du maxillaire (10% des cas).
- L'os D5 correspond à une greffe osseuse faiblement minéralisée.

De Oliveira et al.[97] ont étudié la topographie des densités osseuses trabéculaires de six maxillaires et de six mandibules :

- L'os D1 était présent au maxillaire antérieur, à la mandibule antérieure ou postérieure ;
- Les os D2 et D3 étaient présents dans toutes les régions de la mâchoire (maxillaire ou mandibule, antérieur ou postérieur) ;
- L'os D4 n'était présent qu'au maxillaire antérieur ou postérieur.

Trisi et Rao (1999)[137] ont mis en évidence une corrélation positive entre la densité mesurée par histomorphométrie et le score subjectif estimé lors du forage à partir de la classification de Misch. Mais ils n'ont pas trouvé de différence statistiquement significatives entre l'os de type D2 et l'os de type D3 : le chirurgien peut donc présenter des difficultés à distinguer des catégories D2 et D3 par perception tactile. Par conséquent, dans la pratique clinique, la perception tactile permet de classer la qualité de l'os en trois catégories : os mou (D4), os normal (D2/D3) et os dense (D1).

Lee et al. (2007)[112] ont mis en évidence une faible corrélation entre la résistance subjective au forage selon la classification de Misch[84,126,168] et la densité osseuse radiographique subjective selon la classification de Lekholm et Zarb[103] (*rho* de Spearman = 0.53, $p \leq 0.01$). Ces mêmes auteurs ont mis en évidence un chevauchement significatif des valeurs de densités mesurées objectivement sur des examens radiologiques tridimensionnels, pour les évaluations de la résistance au forage : en moyenne, une différence radiographique de 180 UH était nécessaire pour identifier les différences entre les classes de résistance au forage consécutives. **Rebaudi et al. (2010)**[23] ont également suggéré qu'une division en trois groupes serait plus efficace et plus appropriée.

Du point de vue radiologique, dans une étude rétrospective basée sur des examens CT à visée implantaire, **Kircos et Misch (1999)**[169] ont établi une corrélation entre les UH de la CT et l'évaluation tactile lors du forage. La classification des densités de **Misch** peut être évaluée sur des images CT par corrélation avec une gamme d'UH :

- D1 : > 1250 UH,
- D2 : 850-1250 UH,
- D3 : 350-850 UH,
- D4 : 0-350 UH,
- D5 : < 0 UH.

2.2.2.5 Classification HNS de Rebaudi et al. (2010)

Rebaudi et al. (2010)[23] ont proposé une classification des densités osseuses, la **classification HNS,** basée sur les densités osseuses mesurées par CT, et sur 400 sections bidimensionnelles et une reconstruction tridimensionnelle issues d'examens micro-CT, effectués sur des spécimens de fémur et de hanche d'os bovins (Figure 29) :

- L'os dur / dense / *Hard* (H) correspond à l'os D1 selon la **classification de Misch** et à l'os Q1 selon la classification **de Lekholm et Zarb**. Il est constitué d'une structure lamellaire dense, interrompue par des canaux vasculaires et par des espaces radiotransparents occupés par du tissu mou hématopoïétique ou graisseux. Il présente de très bonnes propriétés mécaniques.
- L'os normal (N) correspond à l'os D2-D3 et à l'os Q2-Q3. Il présente plusieurs trabécules épaisses bien reliées entre elles, formant une structure solide.
- L'os mou / *Soft* (S) correspond à l'os D4 et à l'os Q4. Il présente des trabécules très fines et mal reliées entre elles, formant une structure aux propriétés mécaniques très faibles.

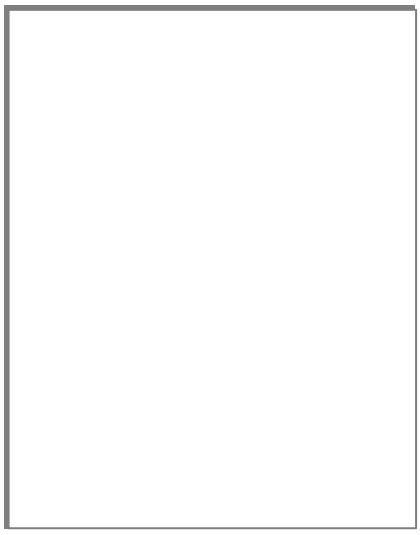


Figure 29 : Images micro-CT bidimensionnelles comparant les échantillons de différentes qualités osseuses en utilisant la classification HNS (Illustrations : Rebaudi et al.[23])

Les mesures effectuées par CT (UH) et micro-CT (BV%) étaient fortement corrélées (*rho* de Spearman = 0.9587, $p < 0.0001$). Les auteurs ont proposé une formule permettant de calculer précisément le pourcentage de volume osseux (BV%) à partir de la densité osseuse mesurée sur les examens CT (appelée HU) : $BV\% = 0{,}04\ HU + 14{,}5$ (Tableau 3).

Catégorie d'os selon la classification HNS et la classification de Misch	UH de la CT	BV de la Micro-CT
H = Hard / dur / dense = D1	> 1 000 UH	> 76,54 %
N = Normal = D2-D3	> 400 et < 1 000 UH	28,28 à 76,54 %
S = Soft = D4	< 400 UH	< 28,28 %

UH : Unités Hounsfield, CT : Tomographie assistée par ordinateur, BV : volume osseux

Tableau 3 : Classification HNS selon les seuils proposés par Trisi et Rao[137] et calculés approximativement par Rebaudi et al.[23] en utilisant une formule de conversion mathématique (D'après Rebaudi et al.[23])

Cependant, le système HNS est difficilement comparable aux autres classifications. En effet, celui-ci a été établi à partir de spécimens d'os bovins, qui est différent de l'os alvéolaire humain en termes de qualité, de structure et de distribution. Selon Rebaudi et al.[23], d'autres études cliniques et biomécaniques sont nécessaires pour déterminer précisément les valeurs seuils réelles d'intérêt clinique.

2.2.2.6 Classification de Wang et al. (2023)

Récemment, **Wang et al.**[155] ont proposé une nouvelle méthode de classification des sites implantaires à partir de l'analyse d'images CBCT (Tableau 4). Cette classification est basée sur la mesure de l'épaisseur de l'os cortical et sur la densité de l'os spongieux, et comporte :

- Trois classes d'épaisseurs de l'os cortical :
  - Classe A : > 1.1 mm,
  - Classe B : comprise entre 0.7 et 1.1 mm,
  - Classe C : < 0.7 mm,
- Trois classes de densité de l'os trabéculaire (exprimée en GV) :
  - Classe 1 : > 600 GV (= 420 g/cm^3),
  - Classe 2 : comprise entre 300 et 600 GV (= 160 g/cm^3 à 420 g/cm^3),
  - Classe 3 : < 300 GV (= 160 g/cm^3).

Épaisseur d'os cortical / Densité de l'os trabéculaire (GV)	> 1.1 mm	0,7-1.1 mm	< 0.7 mm
> 600 GV (420g/cm^3)	**A1**	**B1**	**C1**
300-600 GV (160-420g/cm^3)	**A2**	**B2**	**C2**
300 GV (160g/cm^3)	**A3**	**B3**	**C3**

GV : niveaux de gris

Tableau 4 : Classification de Wang et al. (Illustrations : Wang et al.[155])

D'un point de vue topographique, les proportions des quatre régions (maxillaire antérieur, mandibule antérieure, maxillaire postérieur, mandibule postérieure) ont été comptabilisées :[155]

- La classe A1 se trouvait principalement dans la région mandibulaire (59% postérieure et 20% antérieure) ;
- La classe A3 se trouvait principalement dans la région mandibulaire postérieure (54%) ;
- La classe C1 se trouvait principalement dans la région postérieure du maxillaire (43%).
- Le maxillaire antérieur était le plus souvent constitué d'os B2 (33%), B1 (18%) ou C2 (18%).
- Le maxillaire postérieur était le plus souvent constitué d'os C2 (26%), B2 (23%) ou C3(18%).

2.2.1 Classifications de structure (qualité) et de morphologie (quantité)

2.2.1.1 Classification HAC (Horizontal Alveolar Change Classification) de Pelegrine et al. (2018)

En 2018, **Pelegrine et al.**[170] ont établi **la classification HAC** qui permet de classer les défauts osseux horizontaux du maxillaire et/ou de la mandibule, en fonction de la présence ou de l'absence de tissu osseux spongieux (Tableau 5). Cette classification est définie en fonction de l'aspect morphologique de l'os résiduel à partir d'images issues de CBCT :

- HAC1 : Légère résorption osseuse avec présence d'os spongieux entre les corticales vestibulaire et linguale/palatine, rendant possible la pose de l'implant dans une position idéale sans greffe.
- HAC2 : Légère résorption osseuse avec présence d'os spongieux entre les corticales vestibulaire et linguale/palatine, nécessitant une reconstruction osseuse mineure avec un biomatériau ostéoconducteur et une approche chirurgicale en un temps.
- HAC3 : Résorption osseuse modérée, avec présence d'os spongieux, nécessitant une reconstruction osseuse importante avec un biomatériau ostéoconducteur et une approche chirurgicale en deux temps.
- HAC4 : Résorption osseuse sévère, sans os spongieux résiduel, nécessitant une reconstruction osseuse importante avec un matériau ostéoconducteur, ostéoinducteur et ostéogénique et une approche chirurgicale en deux temps.

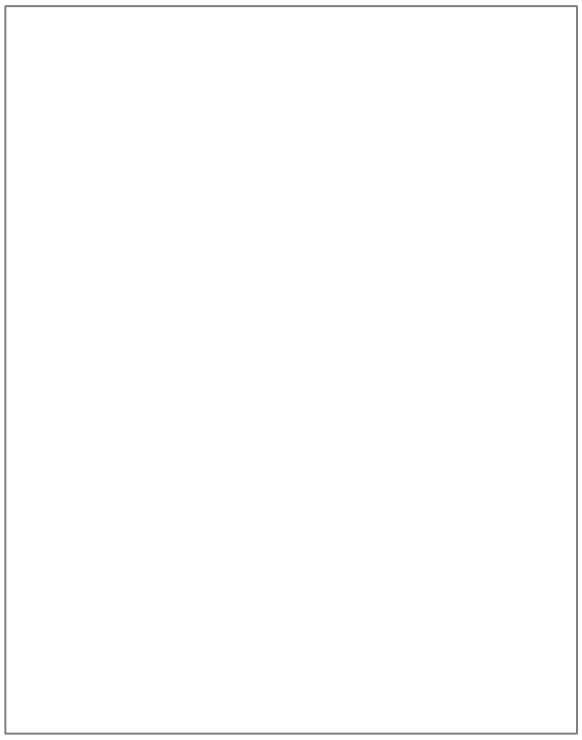
Classification	Résorption osseuse horizontale	Approche chirurgicale	Présence d'os spongieux	Nécessité d'une reconstruction osseuse et matériau	Aspect du maxillaire en tomographie
HAC1	Légère	1 temps	Oui	Non	
HAC2	Légère	1 temps	Oui	Oui, ostéoconducteur	
HAC3	Modérée	2 temps	Oui	Oui, ostéoconducteur	
HAC4	Sévère	2 temps	Non	Oui, ostéoconducteur, ostéoinducteur et ostéogénique	

Tableau 5 : Classification HAC de Pelegrine et al. (Illustrations : Pelegrine et al.[170])

2.2.1.2 Classification de Shemtov-Yona (2021)

En 2021, à l'issue d'une méta-analyse, **Shemtov-Yona**[9] a proposé une classification quantitative basée sur la géométrie de l'os alvéolaire, en fonction de la région de la mâchoire : cette classification inclut l'épaisseur de la crête alvéolaire, de la corticale vestibulaire, de la corticale palatine et de l'os spongieux, et le calcul de l'épaisseur de l'os spongieux (Figure 30)

- Type 1 : La proportion relative de l'os cortical (os vestibulaire + os palatin/lingual) dans la largeur totale de la crête est supérieure à 75 %.
- Type 2 : La proportion de l'os cortical dans la largeur totale de la crête est comprise entre 0,75 % et 50 %.
- Type 3 : La proportion relative de l'os cortical dans la largeur totale de la crête est comprise entre 0,50 % et 25 %.
- Type 4 : La proportion relative de l'os cortical dans la largeur totale de la crête est inférieure à 25 %.



BW : épaisseur de la corticale vestibulaire (ligne rouge), CaW : épaisseur d'os spongieux calculée (ligne verte), PW : épaisseur de la corticale palatine (ligne bleue), RW : épaisseur de la crête (ligne noire). Les lignes en pointillés représentent des épaisseurs estimées.

Figure 30 : La crête édentée maxillaire selon Shemtov-Yona[9]
(Illustration : Shemtov-Yona et al.[9])

D'un point de vue topographique, les résultats de la méta-analyse ont montré que :[9]

- La zone antérieure du maxillaire édenté était constitué d'os de type 2 (ou d'os D2 ou D3 selon la classification de Misch) ;
- La zone prémolaire du maxillaire édenté était principalement constituée d'os de type 3 (ou d'os D3 selon la classification de Misch) ;
- La zone postérieure du maxillaire édenté était principalement constituée d'os de type 3 (ou d'os D3 ou D4 selon la classification de Misch).

<u>En résumé</u>

De nombreuses méthodes et classifications ont été proposées dans la littérature afin d'étudier la variabilité des os des mâchoires.

Grâce à ses multiples avantages, **le CBCT** est une méthode fiable pour quantifier la densité osseuse des mâchoires des **sujets humains vivants** : il fournit une mesure quantitative et objective de la densité osseuse, grâce à l'évaluation différentielle des niveaux de gris.

De nombreuses **classifications** décrivent la morphologie et la structure interne (densité) des os des mâchoires. Les classifications visuelles ou tactiles sont subjectives et déconseillées car elles sont sensibles à la variabilité inter-opérateur. Nous retiendrons deux classifications quantitatives et objectives :

- **La classification de Wang et al.** (2023), basée sur la mesure de l'épaisseur de l'os cortical et de la densité de l'os spongieux (mesurée à partir de CBCT), mais cette classification ne tient pas compte du volume osseux (hauteur et épaisseur).
- **La classification de Shemtov-Yona** (2021), basée sur les mesures des épaisseurs de la crête alvéolaire, des corticales vestibulaire et palatine, et de l'os spongieux, mais cette classification ne prend en compte ni la densité de l'os trabéculaire, ni la hauteur de la crête alvéolaire.

A ce jour, aucune classification ne tient compte à la fois de la variabilité morphologique et de la variabilité structurelle des os des mâchoires : **les classifications actuelles sont insuffisantes.**

3 ÉTUDES DE LA VARIABILITÉ DE LA DENSITÉ DE L'OS CHEZ L'ÉDENTÉ COMPLET MAXILLAIRE A PARTIR DE CBCT

De nombreuses études précédentes ont évalué les variations de densité de l'os maxillaire, mais les tailles d'échantillons restaient limitées, et jusqu'à présent, **aucune de ces études n'a été menée à partir d'un échantillon constitué exclusivement de patients édentés complets au maxillaire.**

Dans le cadre de cette thèse, **DEUX ÉTUDES** ont été menées, avec pour **OBJECTIF PRINCIPAL COMMUN d'étudier les variations de la densité osseuse dans différentes régions du maxillaire édenté à partir de CBCT**, afin de mieux comprendre les caractéristiques de l'os alvéolaire maxillaire, et de comprendre les adaptations au vieillissement et à l'édentement.

La première étude, préliminaire, appelée **ÉTUDE N°1**, portait sur un échantillon de 69 sujets et étudiait les variations de densités au sein du maxillaire édenté, ainsi que l'influence de l'âge et du sexe sur la densité du maxillaire édenté.[171] En raison de la taille de l'échantillon limitée, l'**ÉTUDE N°1** a analysé l'influence de seulement deux facteurs anthropologiques (âge et sexe).

Une seconde étude, appelée **ÉTUDE N°2** a donc été menée afin d'augmenter la taille de l'échantillon (31 sujets supplémentaires, soit 100 sujets au total), d'étudier l'influence d'autres facteurs et préciser l'explication de la variabilité du maxillaire édenté.

Ainsi, la dernière partie de cette thèse comprendra trois sous-parties :

- Une première sous-partie portant sur l'**ÉTUDE N°1** : objectifs, matériels et méthodes, résultats ;
- Une deuxième sous-partie portant sur l'**ÉTUDE N°2** : objectifs, matériels et méthodes, résultats ;
- Une troisième sous-partie **discutant** des résultats des **ÉTUDES N°1 et N°2 ;**
- Et enfin dernière sous-partie établissant une **synthèse** des **ÉTUDES N°1 et N°2**

3.1 ÉTUDE N°1 : objectifs, matériels et méthodes, résultats

L' **ÉTUDE N°1** a fait l'objet d'un article publié dans une revue internationale indexée : *MANSUY C., SALIBA-SERRE B., RUQUET M., RASKIN A., HÜE O., SILVESTRI F., MENSE C. Assessment of bone density in edentulous maxillae using cone beam computed tomography (CBCT). J Stomatol Oral Maxillofac Surg. 2024 Mar;16:101825 (Annexe B.1.2)*[171]

3.1.1 Objectifs de l'ÉTUDE N°1

L'objectif principal de **l'ÉTUDE N°1** était **d'étudier les variations de la densité osseuse dans différentes régions du maxillaire édenté à partir de CBCT**, afin de mieux comprendre les caractéristiques de l'os alvéolaire maxillaire, et de comprendre les adaptations du maxillaire au vieillissement et à l'édentement.

Les objectifs secondaires de l'**ÉTUDE N°1** étaient :

- **Étudier la variabilité intra-individuelle**, c'est-à-dire les variations de densité osseuse dans le sens transversal (en fonction de la localisation sur l'arcade), dans le sens vertical et dans le sens vestibulo-palatin ;
- **Étudier la variabilité inter-individuelle,** en étudiant l'influence de l'âge et du sexe sur les densités osseuses du maxillaire édenté.

Les hypothèses nulles de l'**ÉTUDE N°1** étaient :

- Il n'existe pas de variations de densité osseuse entre les différentes régions du maxillaire édenté.
- Ni l'âge ni le sexe n'influencent la densité osseuse du maxillaire édenté.

3.1.2 Matériels et méthodes (ÉTUDE N°1)

3.1.2.1 Sujets

L'**ÉTUDE N°1** a été menée à partir de l'analyse d'un recueil rétrospectif de dossiers médicaux et d'examens CBCT. Ont été inclus des patients ayant effectué un examen CBCT au sein du Pôle Odontologie du Centre Hospitalier Universitaire (CHU) de la Timone de Marseille (Assistance Publique des Hôpitaux de Marseille, APHM), **entre juin 2016 et décembre 2019 (N = 69).**

Les patients étaient complétement édentés au maxillaire depuis au moins trois mois. Les critères de non-inclusion étaient : la prise de médicaments perturbant le remodelage osseux (biphosphonates), une maladie systémique pouvant influencer le métabolisme osseux (maladie de Paget, ostéomalacie et hyperparathyroïdie[28]), des antécédents de traumatisme, de tumeur des maxillaires, de radiothérapie cervico-faciale, des séquelles

chirurgicales, des dents incluses. Les patients présentant une résorption extrême du maxillaire ont été exclus.

3.1.2.2 Acquisition des images CBCT

Tous les examens CBCT ont été effectués par le même opérateur, avec le même appareil PlanMeca ProMax 3D® (PlanMeca®, Helsinki, Finlande). Les paramètres d'exposition étaient les suivants : champ de vision (FOV *field of view*) 501 × 501 × 301, tension 90 kV, intensité 12 mA, temps de balayage moyen 12 secondes, taille de voxel de 200 µm, avec une dose de rayonnement de 780 mGy.cm^3. Le calibrage de l'appareil était réalisé une fois par an, conformément aux recommandations du fabricant. Dans la mesure où les examens complémentaires ont été réalisés dans le cadre d'un bilan pré-implantaire, aucune irradiation supplémentaire n'a été nécessaire dans le cadre de l'étude.

3.1.2.3 Mesures des densités osseuses à partir des CBCT

Les données DICOM issues des examens CBCT ont été exportées dans le logiciel DTX Studio® (version 3.6.4.2, Nobel Biocare AB®, Göteborg, Suède) pour une planification pré-implantaire. Ce logiciel permet au praticien de sélectionner des implants de longueurs et diamètres adaptés au site implantaire et inclut un outil pour mesurer la densité en UH sur un point donné. Pour chaque sujet, une planification implantaire virtuelle a été effectuée. Six implants, parallèles entre eux et perpendiculaires au plan d'occlusion, ont été virtuellement placés en avant de la paroi antérieure du sinus, à partir de coupes transversales : deux implants au niveau des incisives, deux implants au niveau des canines, et deux implants au niveau des prémolaires (Figure 31). Les longueurs et diamètres des implants ont été choisis en fonction du volume osseux disponible, tout en respectant les distances de sécurité avec les obstacles anatomiques.

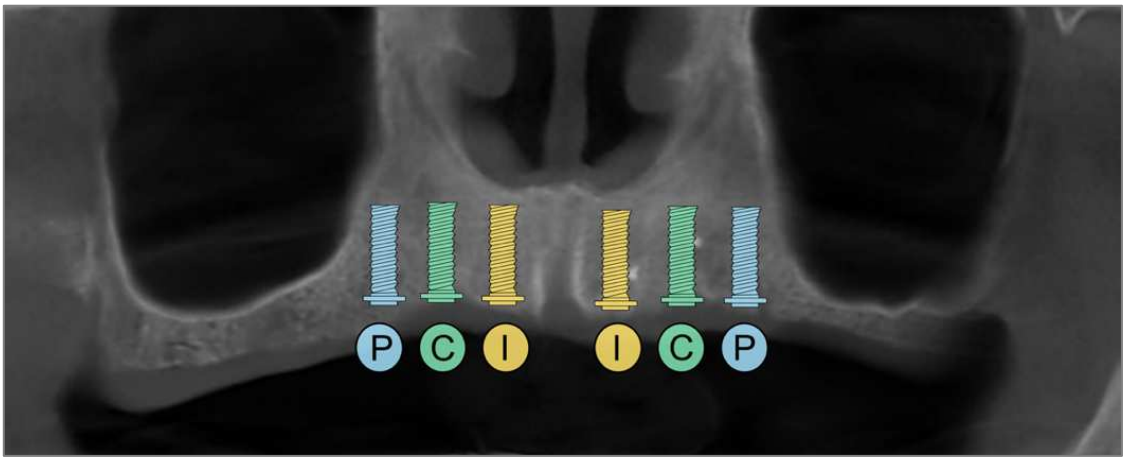


Figure 31 : Illustration schématique des six implants virtuels positionnés en avant de la paroi antérieure du sinus, au niveau des sites incisifs (I), canins (C), et prémolaires (P).

Pour chaque implant, sur une coupe transversale, six points de mesures (de 1 mm de diamètre) de la densité osseuse (en UH) ont été relevés en utilisant l'outil de mesure de densité du logiciel au niveau du col, de la partie médiane du corps et de l'apex des zones vestibulaires et palatines de chaque implant virtuel, soit 36 points de mesure par individu (Figure 32). Ce protocole de mesure de la densité osseuse avait été décrit dans une étude précédente de **Tavitian et al.**[172] portant sur des mandibules édentées. Toutes les planifications implantaires et toutes les mesures ont été réalisées par un seul et même opérateur pour tous les sujets.

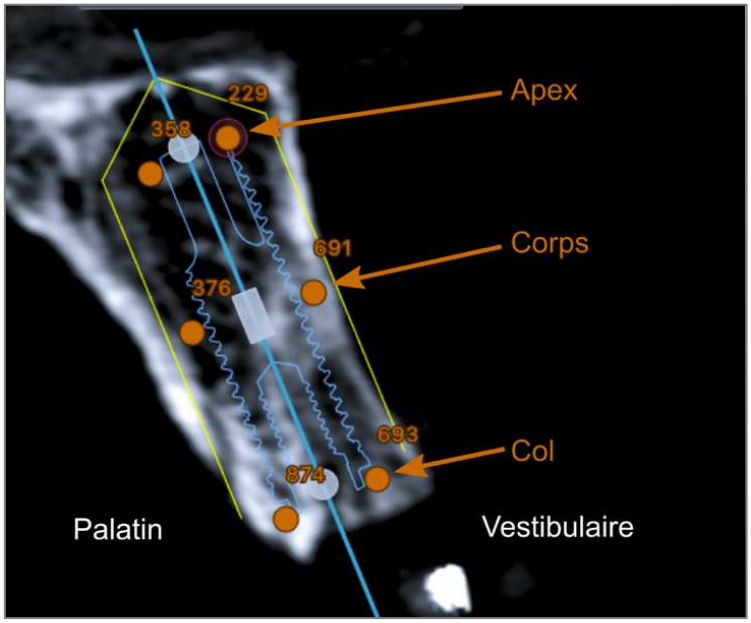


Figure 32 : Mesures de la densité osseuse en unités Hounsfield (UH) au niveau du col, de la partie médiane du corps et de l'apex des zones vestibulaires et palatines de chaque implant virtuel, grâce à l'outil de mesure de la densité du logiciel DTX®

3.1.2.4 Analyses statistiques

Les données anonymisées ont été collectées dans un tableur Excel® (Microsoft Corporation®, Redmond, Washington, États-Unis) et importées dans le logiciel R® (version 4.1.3, R Foundation for Statistical Computing, Vienne, Autriche) et sa plateforme RStudio® (version 2024.04.2) afin de réaliser l'analyse statique. Pour tous les tests et analyses statistiques, le seuil de significativité a été fixé à $p < 0.05$.

Les densités osseuses ont été exprimées par leur moyenne assortie de leur écart-type, leur minimum, leur maximum, leur intervalle interquartile [Q1;Q3] et leur médiane, tous exprimés en UH.

La distribution normale des données a été préalablement examinée à l'aide du test de Shapiro-Wilk, et de l'analyse visuelle des graphes *QQ plots* et des histogrammes.

Les analyses statistiques visaient à étudier la variabilité inter-individuelle et la variabilité intra-individuelle.

3.1.2.4.1 Variabilité inter-individuelle

Concernant la variabilité inter-individuelle, **l'ÉTUDE N°1** a analysé l'influence de deux facteurs généraux : **l'âge** et le **sexe** des individus.

- Pour étudier l'influence du **sexe**, les valeurs moyennes des densités osseuses des hommes et des femmes ont été comparées à l'aide du test de Student à deux échantillons.
- La relation entre les densités osseuses moyennes de la zone pré-sinusienne et **l'âge** a été analysée par un test de corrélation de Spearman.

3.1.2.4.2 Variabilité intra-individuelle

La variabilité intra-individuelle a été étudiée dans les trois sens de l'espace : **transversal** (incisive, canine, prémolaire), **vertical** (col, corps, apex) et **vestibulo-palatin**.

- Une analyse de variance sur mesures répétées (ANOVA, avec la fonction R *ezANOVA* du package *ez*), suivie comparaisons deux-à-deux par des tests de Student pour échantillons appariés (avec la fonction R *pairwise.t.test* du packages *stats*) a analysé d'une part les différences de densités moyennes entre les trois sites implantaires (incisive, canine, prémolaire), et d'autre part les différences de densités moyennes entre les trois parties de l'implant (col, corps, apex). Pour toutes les comparaisons deux-à-deux, la correction par la méthode Benjamini-Yekutieli (BY) de l'approche *False Discovery Rate* FDR[173] a été utilisée pour les corriger les erreurs liées aux tests multiples.
- Les densités osseuses moyennes vestibulaires et palatines ont été comparées à l'aide d'un test de Student pour échantillons appariés.

3.1.2.5 Considérations éthiques

L'étude a été approuvée par le Comité d'éthique de l'Université d'Aix-Marseille (AMU, Marseille, France, Annexe A) et enregistrée sur le Portail d'Accès aux Données de Santé (PADS) de l'APHM sous le numéro PADS19-378.

3.1.3 Résultats de l'ÉTUDE N°1

3.1.3.1 Statistiques descriptives

Les CBCT de 69 maxillaires édentés ont été obtenus chez **69 patients d'âge moyen 59.98 ± 9.02 ans** à la date du CBCT : 30 femmes d'âge moyen 60.50 ± 10.40 ans et 39 hommes d'âge moyen 59.59 ± 7.91 ans (Tableau 6). Les 69 CBCT ont fourni un total de 414 sites implantaires : 138 sites incisifs, 138 sites canins et 138 sites prémolaires.

Variable	Âge (ans)		
Échantillon	[min; max]	Moyenne (± SD)	Médiane [Q1 ; Q3]
Femmes (n = 30)	[42 ; 85]	60.5 (± 10.40)	59.5 [54 ; 67]
Hommes (n = 39)	[40 ; 78]	59.59 (± 7.91)	59 [55 ; 65]
Échantillon total (n = 69)	[40 ; 85]	59.98 (± 9.02)	59 [54 ; 66]

max = maximum, min = minimum, SD = écart-type, [Q1-Q3] = intervalle interquartile

Tableau 6 : Statistiques descriptives de la variable âge, en fonction du sexe des individus (ÉTUDE N°1)

La densité osseuse moyenne de la zone pré-sinusienne de l'échantillon était de **695.81 ± 129.49 UH.** La répartition des densités osseuses moyennes de la zone pré-sinusienne chez les 69 patients est présentée dans la figure 33. Les densités osseuses moyennes calculées pour chaque zone sont présentées en Annexe B.1.

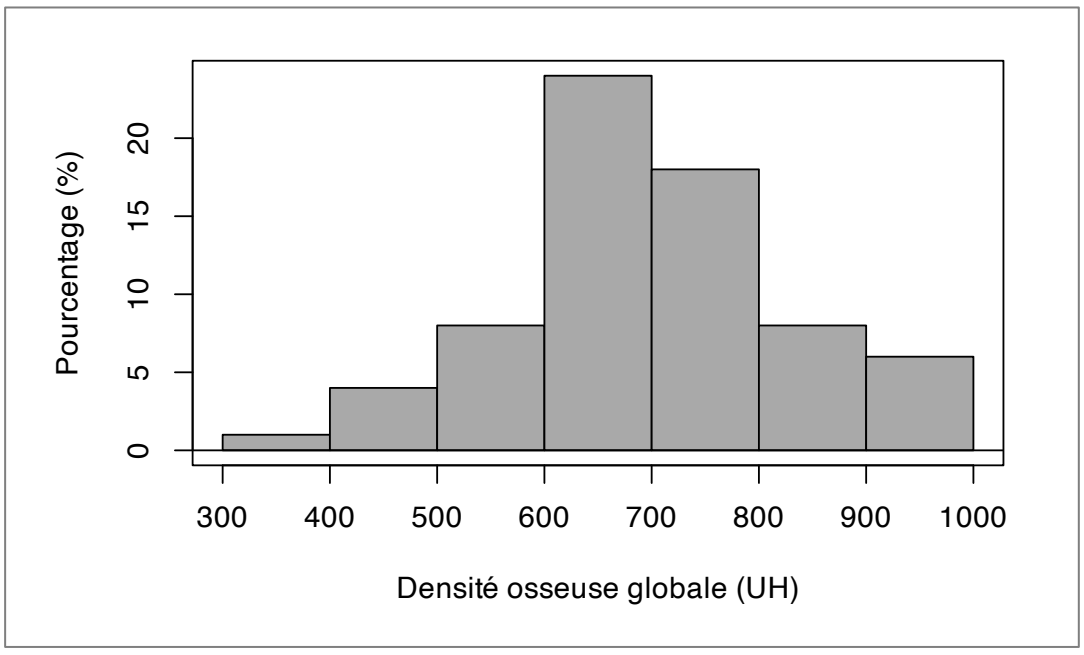


Figure 33 : Distribution des densités osseuses moyennes de la zone pré-sinusienne (en UH) chez les 69 individus (ÉTUDE N°1)

3.1.3.2 Variabilité inter-individuelle

3.1.3.2.1 Influence du sexe

La figure 34 illustre la distribution de la densité osseuse globale de la zone pré-sinusienne, en fonction du sexe des individus.

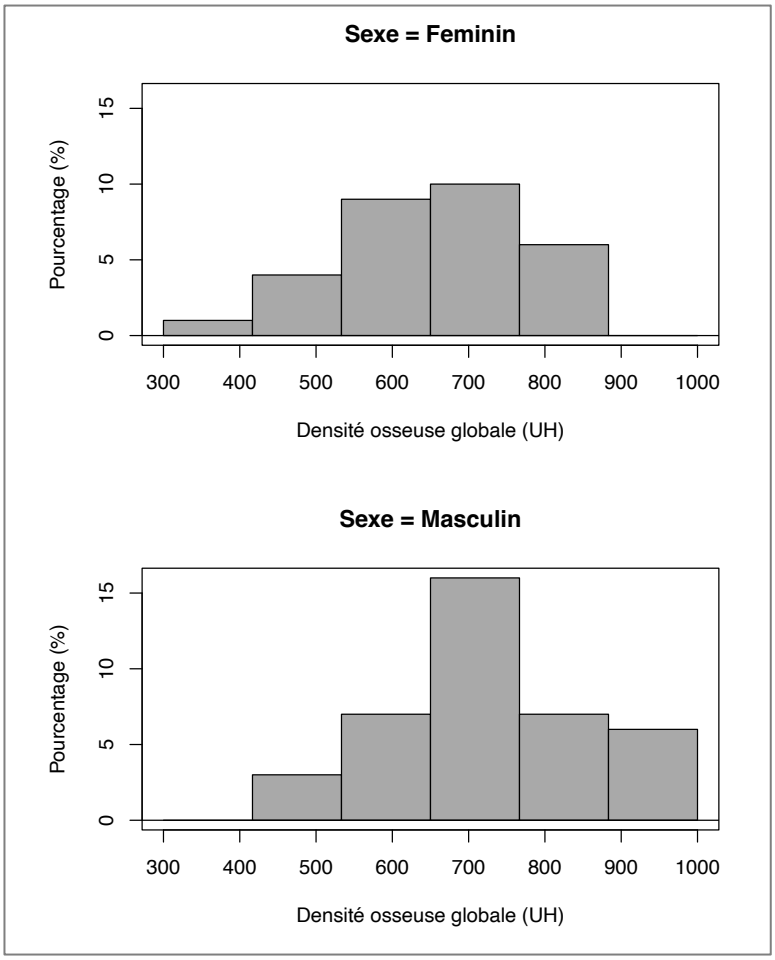


Figure 34 : Distribution de la densité osseuse moyenne de la zone pré-sinusienne (en UH) selon le sexe des individus (ÉTUDE N°1)

Le test de Student a mis en évidence que la densité osseuse moyenne de la zone pré-sinusienne **chez les hommes était significativement supérieure à celle des femmes** (***p* = 0.044**) (Tableau 7). Il a également mis en évidence des différences statistiquement significatives au niveau les densités osseuses moyennes **des zones apicales** (***p* < 0.001)** et des **zones incisives** entres les hommes et les femmes (***p* = 0.019**).

Zone	Sexe	Densité osseuse (UH)			*p*
		[min; max]	Moyenne (±SD)	Médiane [Q1; Q3]	
Zone pré-sinusienne	Échantillon total	[320.75; 952.39]	695.81 (± 129.49)	695.28 [621.17; 783.17]	
	Femmes	[320.75; 882.33]	660.10 (± 125.29)	672.40 [576.18; 717.87]	**0.044***
	Hommes	[430.11; 952.39]	723.28 (± 127.45)	695.53 [651.99; 796.79]	
Zone crestale (col)	Échantillon total	[451.92; 1050.25]	769.65 (± 127.61)	754.25 [693.42; 830.33]	
	Femmes	[451.92; 1050.25]	770.27 (± 131.54)	742.08 [701.00; 829.69]	0.972
	Hommes	[486.67; 1049.58]	769.18 (± 126.23)	760.50 [679.96; 834.54]	
Zone médiane (corps)	Échantillon total	[317.75; 1088.67]	698.14 (± 147.27)	690.83 [608.25; 785.58]	
	Femmes	[317.75; 943.67]	661.32 (± 140.15)	680.67 [537.83 ; 750.58]	0.068
	Hommes	[435.58; 1088.67]	726.47 (± 148.08)	698.08 [636.83 ; 795.96]	
Zone apicale (apex)	Échantillon total	[192.58; 932.42]	619.64 (± 161.49)	630.58 [490.67; 713.33]	
	Femmes	[192.58; 932.42]	548.72 (± 156.03)	542.37 [450.83; 665.35]	**<0.001****
	Hommes	[364.92; 930.67]	674.19 (± 145.13)	676.83 [611.50; 765.79]	
Incisive	Échantillon total	[289.25 ; 1019.17]	728.67 (± 139.78)	714.00 [657.08; 809.92]	
	Femmes	[289.25; 971.92]	684.35 (± 131.74)	683.54 [640.35; 719.81]	**0.019***
	Hommes	[493.25; 1019.17]	762.76 (± 137.75)	750.17 [694.29; 826.88]	
Canine	Échantillon total	[297.17; 1001.50]	703.23 (± 138.59)	695.00 [617.83; 807.33]	
	Femmes	[297.17; 927.25]	676.91 (± 134.85)	686.21 [583.94; 772.52]	0.168
	Hommes	[369.68; 1001.50]	723.47 (± 139.73)	695.00 [654.75; 820.38]	
Prémolaire	Échantillon total	[375.83; 975.75]	655.54 (± 141.65)	656.58 [565.58; 762.17]	
	Femmes	[375.83; 910.50]	619.04 (± 143.69)	619.00 [520.00; 717.31]	0.060
	Hommes	[421.83; 975.75]	683.62 (± 135.24)	676.75 [613.08; 762.63]	

*max = maximum, min = minimum, SD = écart-type, UH = unités Hounsfield, [Q1-Q3] = intervalle interquartile, *p < 0.05, **p < 0.01.*

Tableau 7 : Statistiques descriptives de la densité osseuse moyenne de la zone pré-sinusienne et des densités osseuses moyennes au niveau des trois sites (incisive, canine, prémolaire) et à trois niveaux des implants (col, corps, apex) en fonction du sexe, et résultats des tests de Student (ÉTUDE N°1)

3.1.3.2.2 Influence de l'âge

La figure 35 illustre le nuage de points exprimant la densité moyenne de la zone pré-sinusienne en fonction de l'âge des individus, et selon leur sexe. Le test de corrélation de Spearman n'a pas mis en évidence de corrélation entre la densité osseuse moyenne de la zone pré-sinusienne et l'âge des individus (*rho* = −0.130, *p* = 0.284), tous sexes confondus. Chez les hommes, il n'y avait pas de corrélation entre la densité osseuse moyenne et l'âge (*rho* = −0.002, *p* = 0.992). En revanche, il y avait une **faible corrélation négative** statistiquement significative entre la densité osseuse moyenne de la zone pré-sinusienne et **l'âge** chez les **femmes** (***rho* = -0.368, *p* = 0.045**).

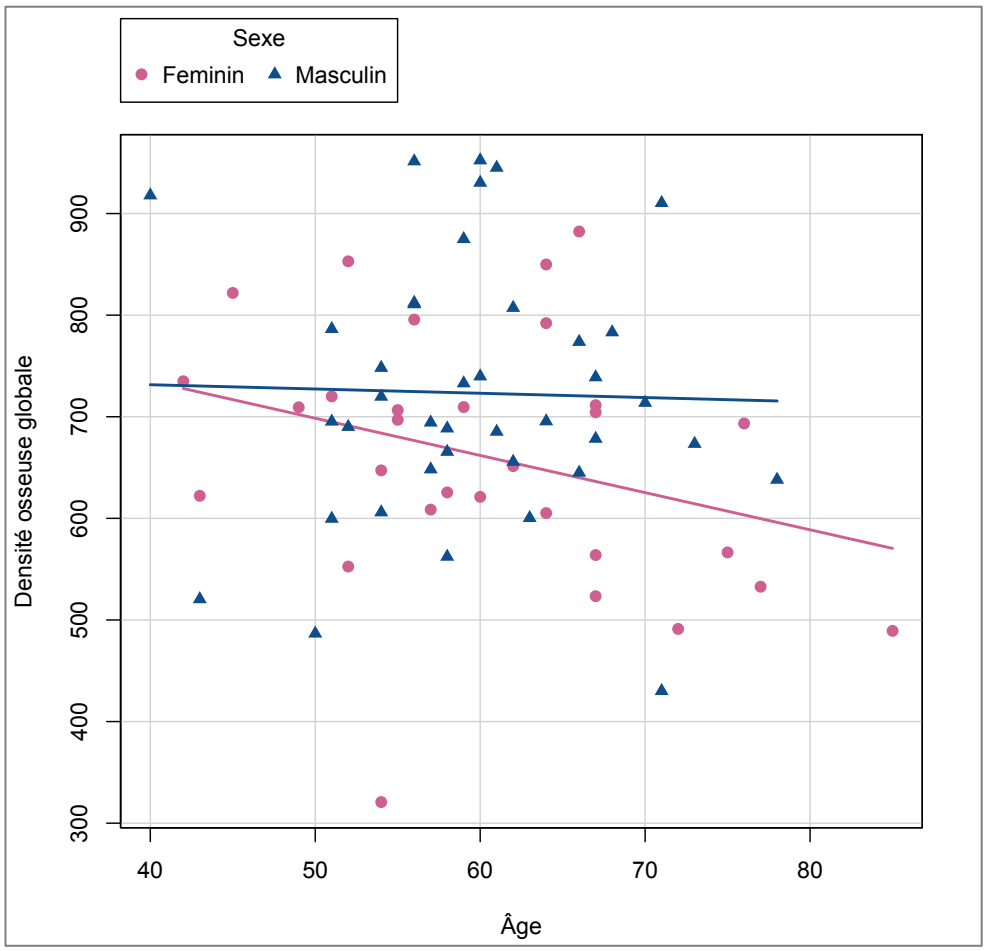


Figure 35 : Relations entre la densité osseuse moyenne de la zone pré-sinusienne (en UH) et l'âge des individus, en fonction du sexe des individus (ÉTUDE N°1).
La ligne de régression représente la corrélation entre la densité osseuse et l'âge.

3.1.3.3 Variabilité intra-individuelle

3.1.3.3.1 Comparaison des densités osseuses en fonction du site implantaire

La figure 36 illustre les valeurs moyennes des densités osseuses (± écarts-types) en fonction de la position de l'implant (incisive, canine, prémolaire) et de la partie de l'implant (apex, corps, col). Les densités osseuses moyennes étaient plus élevées dans les sites incisifs (728.67 ± 139.78 UH) suivis des sites canins (703.22 ± 138.59 UH) et des sites prémolaires (655.54 ± 141.65 UH) (Figure 36).

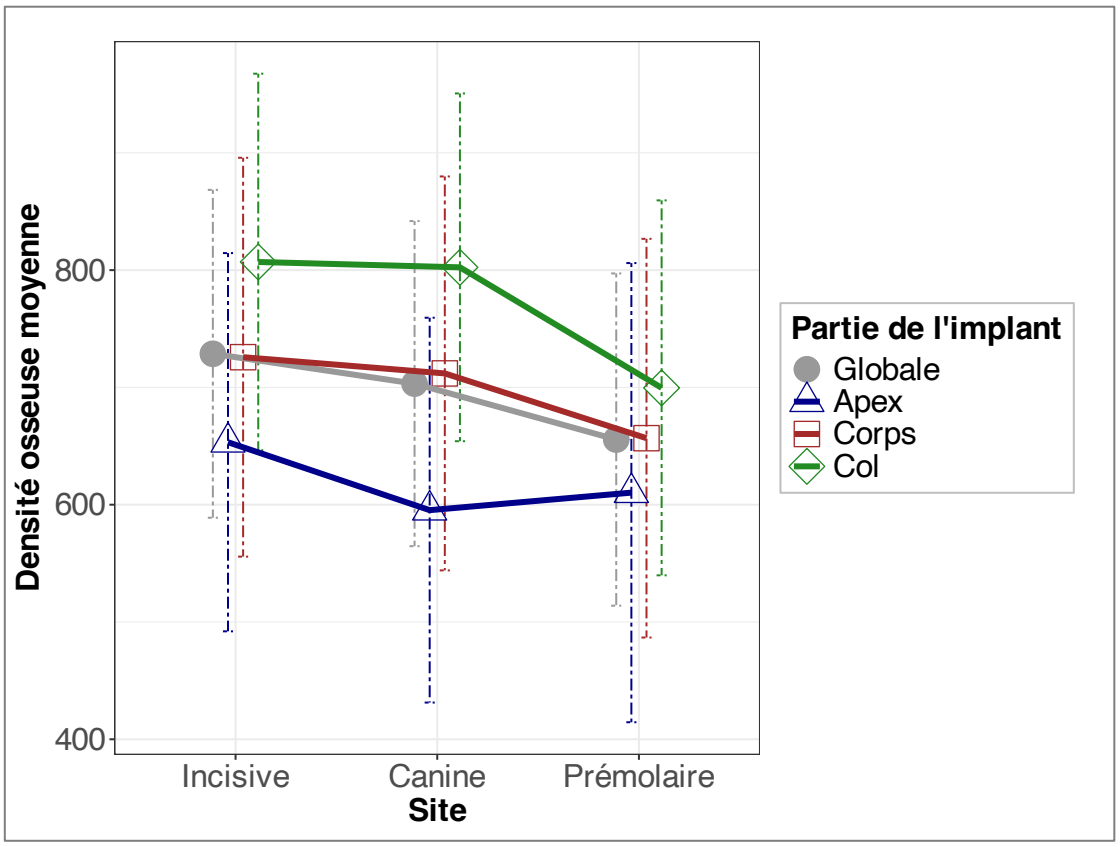


Figure 36 : Graphe des densités osseuses moyennes (± écarts-types, en UH) en fonction du site (incisive, canine, prémolaire), et de la partie de l'implant (apex, corps, col) (ÉTUDE N°1)

L'analyse de variance ANOVA sur mesures répétées a mis en évidence une différence statistiquement significative entre les densités osseuses des trois sites (***p* < 0.001**). Les tests de Student (avec correction par la méthode BY du FDR) ont mis en évidence que les densités moyennes étaient **statistiquement différentes entre les sites incisifs et les sites canins**, **entre les sites incisifs et les sites prémolaires** et **entre les sites canins et les sites prémolaires** (Tableau 8).

Sites implantaires	*p*	p_{FDR}
Incisive *vs* Canine	0.018*	**0.033***
Incisive *vs* Prémolaire	<0.001**	**<0.001****
Canine *vs* Prémolaire	< 0.001**	**< 0.001****

** p < 0.05; ** p < 0.01. Les valeurs p en gras indiquent une signification statistique au niveau 0.05 après FDR. Les résultats ont été interprétés sur la base de ces valeurs p corrigées par la méthode du FDR (p_{FDR}). Les valeurs p avant correction (p) sont données à titre indicatif.*

Tableau 8 : Résultats des tests de Student comparant les densités osseuses des trois sites du maxillaire édentés (ÉTUDE N°1)

3.1.3.3.2 Comparaison des densités osseuses en trois points de l'implant

La figure 37 illustre les valeurs moyennes des densités osseuses (± écarts-types) en fonction de la zone de l'implant (apex, corps, col) et de la zone vestibulaire ou palatine. Les valeurs moyennes de densités osseuses au niveau du col (769.65 ± 127.61 UH) étaient plus élevées par rapport au corps (698.14 ± 147.27 UH) à l'apex des implants (619.64 ± 161.49 UH) (Figure 37).

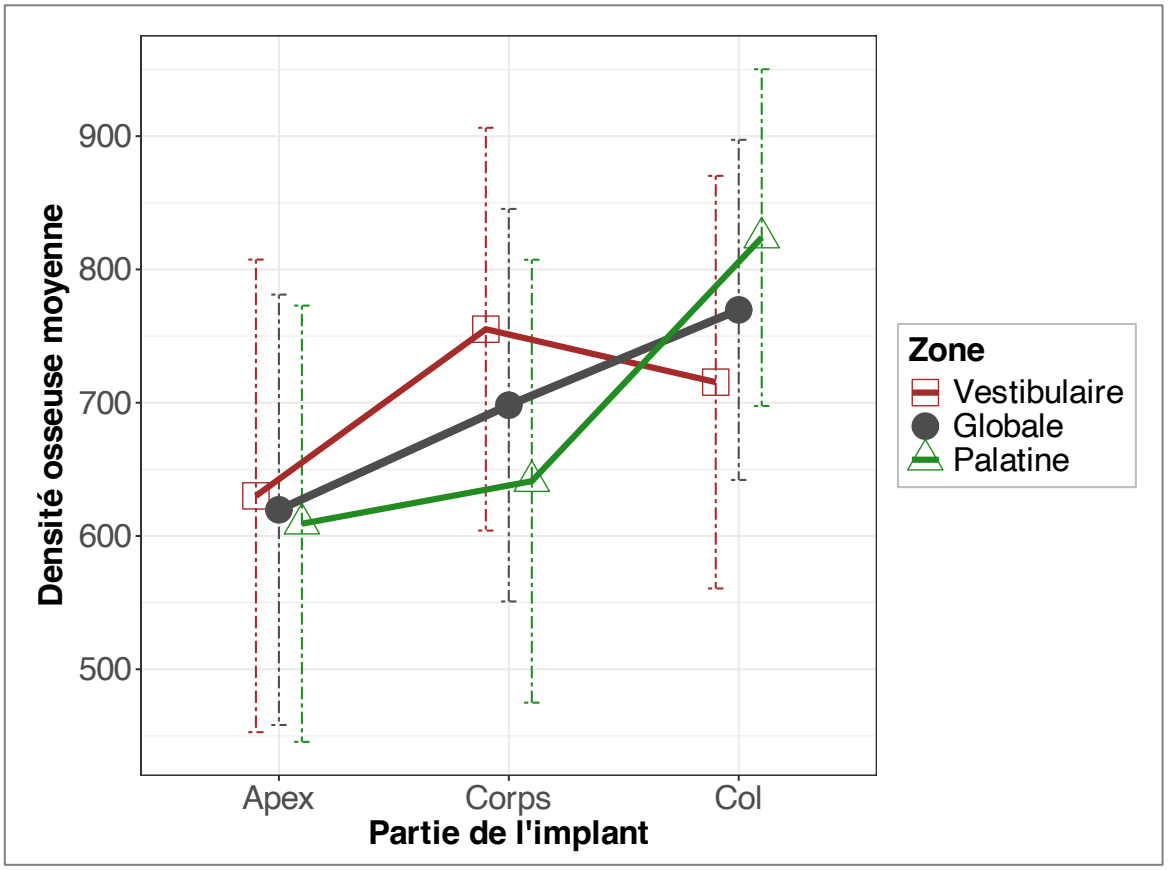


Figure 37 : Graphe des densités osseuses moyennes (± écarts-types, en UH) en fonction de la partie de l'implant (apex, corps, col) et de la zone vestibulaire ou palatine (ÉTUDE N°1)

L'analyse de variance ANOVA sur mesures répétées a mis en évidence une différence statistiquement significative entre les densités osseuses mesurées au niveau des 3 parties de l'implant (***p* < 0.001**). Les tests de Student (avec correction par la méthode BY du FDR) ont mis en évidence que les densités moyennes étaient **statistiquement différentes entre apex et corps, entre apex et col, et entre corps et col** (***p* < 0.001** après correction par la méthode BY du FDR).

3.1.3.3.3 Comparaison des densités osseuses des zones vestibulaires et palatines

Le test de Student n'a pas mis en évidence de différence statistiquement significative entre la densité osseuse moyenne des zones vestibulaires (700.23 ± 138.89 UH) et des zones palatines (691.39 ± 133.24 UH) ($p = 0.384$).

Au niveau du **col**, la densité osseuse moyenne **palatine** était significativement supérieure à la densité osseuse moyenne vestibulaire (***p* < 0.001**). Au niveau du **corps** de l'implant, la densité osseuse moyenne vestibulaire était significativement supérieure à la densité osseuse moyenne palatine (***p* < 0.001**). Au niveau de l'apex de l'implant, aucune différence statistiquement significative n'a été mise en évidence entre les densités osseuses moyennes vestibulaires et palatines ($p = 0.120$) (Figure 37).

3.2 ÉTUDE N°2 : objectifs, matériels et méthodes, résultats

3.2.1 Objectifs de l'ÉTUDE N°2

L'objectif principal de **l'ÉTUDE N°2** était le même que celui de l' ÉTUDE N°1 : **étudier les variations de la densité osseuse dans différentes régions du maxillaire édenté à partir de CBCT**, afin de mieux comprendre les caractéristiques de l'os alvéolaire maxillaire, et de comprendre les adaptations du maxillaire au vieillissement et à l'édentement.

Les objectifs secondaires de l'**ÉTUDE N°2** étaient :

- **Étudier la variabilité intra-individuelle**, c'est-à-dire les variations de densité osseuse dans le sens transversal (en fonction de la localisation sur l'arcade), dans le sens vertical et dans le sens vestibulo-palatin (objectif commun avec l' ÉTUDE N°1).
- **Étudier la variabilité inter-individuelle**, en étudiant l'influence de l'âge, du sexe, de la taille, du poids, du diabète, de la consommation de tabac, de la durée d'édentement et de la hauteur de la crête osseuse sur les densités du maxillaire édenté.

Les hypothèses nulles de l'**ÉTUDE N°2** étaient :

- Il n'existe pas de variations de densité osseuse entre les différentes régions du maxillaire édenté.
- Aucun paramètre (âge, sexe, taille, poids, tabac, durée d'édentement) n'influence la densité osseuse du maxillaire édenté.

3.2.2 Matériels et méthodes (ÉTUDE N°2)

3.2.2.1 Sujets

Comme l'ÉTUDE N°1, **l'ÉTUDE N°2** a été menée à partir de l'analyse d'un recueil rétrospectif de dossiers médicaux et d'examens CBCT. Ont été inclus des patients ayant effectué un examen CBCT au sein du Pôle Odontologie du CHU de la Timone de Marseille (APHM) **entre juin 2016 et décembre 2021 (N = 100)**.

Les critères d'inclusion, non-inclusion et d'exclusion des sujets étaient les mêmes que ceux de l'ÉTUDE N°1.

3.2.2.2 Acquisition des images CBCT

Le protocole d'acquisition des images CBCT était le même que celui de l'ÉTUDE N°1.

3.2.2.3 Mesures des densités osseuses à partir des CBCT

L'**<u>ÉTUDE N°2</u>** reprenait le protocole de planification des implants virtuels et de mesure des densités osseuses décrit dans l'ÉTUDE N°1 (Figures 31 et 32). Comme dans l'ÉTUDE N°1, après planification de six implants virtuels en avant de la paroi antérieur du sinus, les densités osseuses ont été mesurées au niveau du col, de la partie médiane du corps et de l'apex des zones vestibulaires et palatines de chaque implant virtuel (Figure 32).

Mais dans le cadre de l'**<u>ÉTUDE N°2,</u>** une mesure supplémentaire des densités osseuses a été effectuée au milieu de l'apex de l'implant : cette mesure correspond à l'ancrage apical de l'implant et fournit une estimation de **la densité trabéculaire à l'apex de l'implant**. Elle sera nommée « ***Densité apicale trabéculaire*** » (Figure 38). Afin de suivre le même protocole que celui de l'**<u>ÉTUDE N°1</u>**, cette mesure n'a pas été prise en compte dans les calculs des densités moyennes de la zone pré-sinusienne et des densités moyennes par site ou par zone (verticale ou vestibulo-linguale).

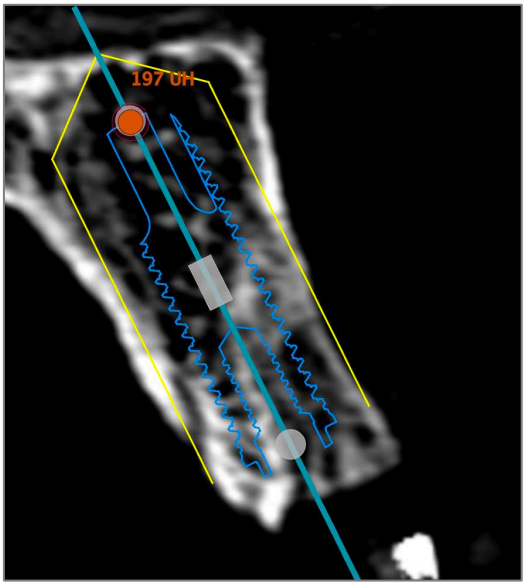


Figure 38 : Illustration de la mesure de la « densité apicale trabéculaire », au niveau de la pointe de l'implant dans le cadre de l'ÉTUDE N°2.
Les 6 autres points de mesure de la densité osseuse ont été masqués afin d'améliorer la lisibilité de la figure.

3.2.2.4 Analyses statistiques

Comme dans l'ÉTUDE N°1, les données anonymisées ont été collectées dans un tableur Excel® (Microsoft Corporation®, Redmond, Washington, États-Unis) et importées dans le logiciel R® (version 4.4.1**,** R Foundation for Statistical Computing, Vienne, Autriche) et sa plateforme RStudio® (version 2024.04.2) afin de réaliser l'analyse statique. Pour tous les tests et analyses statistiques, le seuil de significativité a été fixé à $p < 0.05$.

Les densités osseuses étaient exprimées par leur moyenne assortie de leur écart-type, leur minimum, leur maximum, leur intervalle interquartile [Q1;Q3] et leur médiane, tous exprimés en UH.

La distribution normale des données a été préalablement examinée à l'aide du test de Shapiro-Wilk, et de l'analyse visuelle des graphes *QQ plots* et des histogrammes.

Les analyses statistiques visaient à étudier la variabilité inter-individuelle et la variabilité intra-individuelle.

3.2.2.4.1 Variabilité inter-individuelle

L'**ÉTUDE N°2** a analysé l'influence de facteurs généraux et locaux sur la densité osseuse moyenne de la zone pré-sinusienne du maxillaire édenté, et sur la densité osseuse moyenne apicale trabéculaire :

- Les facteur généraux étudiés étaient l'âge, le sexe, la taille, le poids, le diabète et la consommation de tabac ;
- Les facteurs locaux étudiés étaient la durée d'édentement et la hauteur de la crête osseuse (représentée par la longueur moyenne des implants virtuels).

L'**ÉTUDE N°2** a analysé l'influence du **sexe** et de **l'âge** des individus sur les densités osseuses moyennes et sur la hauteur de crête osseuse (représentée par la longueur moyenne des implants virtuels) :

- L'influence du **sexe** a été étudiée à l'aide du test de Student à deux échantillons.
- L'influence de **l'âge** a été analysée grâce à un test de corrélation de Spearman.

Une matrice de corrélation a également été effectuée à l'aide de la fonction *corrplot* du package *corrplot* (à partir de tests de corrélations de Spearman), afin d'étudier la relation entre **l'âge** des individus et les densités moyennes en différents points du maxillaire édenté.

Pour étudier l'influence du **diabète**, les valeurs moyennes des densités osseuses des sujets diabétiques et non diabétiques ont été comparées à l'aide du test non paramétrique de la somme des rangs de Wilcoxon.

Pour étudier l'influence de la **durée d'édentement**, les densités osseuses moyennes des sujets édentés depuis moins d'un an ont été comparées aux densités osseuses moyennes des sujets édentés depuis plus d'un an à l'aide du test non paramétrique de la somme des rangs de Wilcoxon.

Pour étudier l'influence de la **hauteur de la crête osseuse**, la longueur des implants moyenne des implants virtuels a été calculée et les sujets ont été divisés en deux sous-groupes : un sous-groupe [7-10] (longueur moyenne des 6 implants virtuels inférieure ou égale à 10 mm) et un sous-groupe [10-15] (longueurs moyenne des 6 implants virtuels supérieure à 10 mm). Les densités osseuses moyennes du sous-groupe [7-10] et du sous-groupe [10-15] ont été comparées à l'aide du test de Student à deux échantillons.

Pour étudier l'influence de la **hauteur de la crête osseuse sur les densités,** en fonction du **sexe** des individus, les densités moyennes du sous-groupe [7-10] et du sous-groupe [10-15] ont été comparées à l'aide du test non paramétrique de la somme des rangs de Wilcoxon au seins de deux sous-échantillon distincts : « Féminin » et « Masculin ».

Afin d'étudier les corrélations entre les **densités trabéculaires apicales** et les **variables quantitatives (âge, taille, poids, consommation de tabac exprimée en paquets-années (PA), hauteur de crête**), des matrices de corrélation été réalisées chez l'ensemble des individus puis chez les hommes et chez les femmes séparément. Ces matrices ont été établies à l'aide de la fonction *corrplot* du package *corrplot* et calculées à partir de tests de corrélations de Spearman.

Puis une analyse en composantes principales (ACP) a été effectuée grâce aux fonctions R *PCA* et *plot.PCA* du package *FactoMineR* et aux fonction R *get_eig*, *fviz_eig* et *fviz_pca_var, fviz_contrib, fviz_pca_ind get_pca_var* du package *factoextra*. L'ACP a été menée à partir des densités osseuses moyennes de la zone pré-sinusienne, des densités moyennes apicales trabéculaires, de **l'âge**, de la **taille**, du **poids**, de la **consommation de tabac** (exprimées en PA), et de la **hauteur de crête**. La densité osseuse moyenne de la zone pré-sinusienne était considéré comme une variable quantitative illustrative et le sexe était considéré comme une variable qualitative illustrative.

3.2.2.4.2 Variabilité intra-individuelle

Concernant la variabilité intra-individuelle, les analyses statistiques étaient les mêmes que celles menées dans le cadre de l'ÉTUDE N°1.

3.2.2.5 Considérations éthiques

L'étude a été approuvée par le Comité d'éthique de l'Université d'Aix-Marseille (AMU, Marseille, France, Annexe A) et enregistrée sur le PADS de l'APHM sous le numéro PADS19-378.

3.2.3 Résultats de l'ÉTUDE N°2

3.2.3.1 Statistiques descriptives

Les CBCT de 100 maxillaires édentés ont été obtenus chez **100 patients d'âge moyen 61.72 ± 9.19 ans** à la date du CBCT : 42 femmes d'âge moyen 63.02 ± 10.72 ans et 58 hommes d'âge moyen 60.78 ± 7.87 ans (Tableau 9). Les 100 CBCT ont fourni un total de 600 sites implantaires : 200 sites incisifs, 200 sites canins et 200 sites prémolaires.

Variable	Âge (ans)		
Échantillon	[min ; max]	Moyenne (± SD)	Médiane [Q1 ; Q3]
Femmes (n = 42)	[42 ; 88]	63.02 (± 10.72)	64 [55.25 ; 69.5]
Hommes (n = 58)	[40 ; 78]	60.78 (± 7.87)	60 [56.25 ; 66.75]
Échantillon total (n = 100)	[40 ; 88]	61.72 (± 9.19)	60.5 [56 ; 67.25]

max = maximum, min = minimum, SD = écart-type, [Q1-Q3] = intervalle interquartile

Tableau 9 : Statistiques descriptives de la variable âge, en fonction du sexe des individus (ÉTUDE N°2)

La densité osseuse moyenne de la zone pré-sinusienne de l'échantillon était de **666.64 ± 143.22 UH.** La répartition des densités osseuses moyennes de la zone pré-sinusienne chez les 100 sujets est présentée dans la figure 39 .

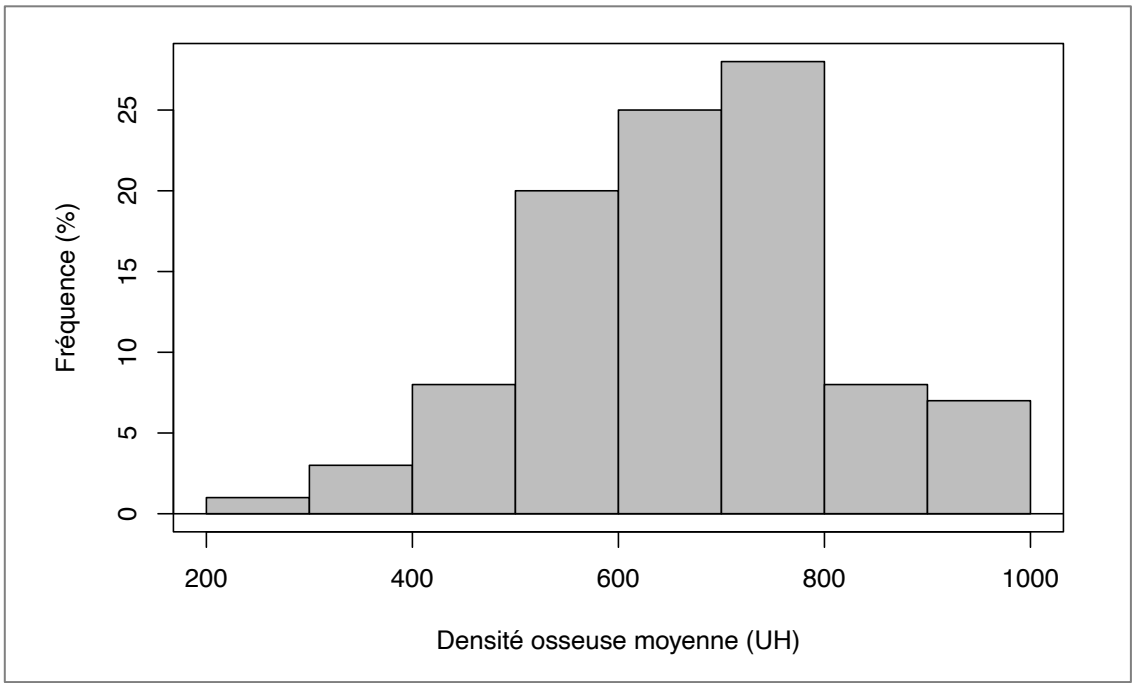


Figure 39 : Distribution des densités osseuses moyennes de la zone pré-sinusienne (en UH) chez les 100 individus (ÉTUDE N°2)

3.2.3.1 Variabilité inter-individuelle

3.2.3.1.1 Influence du sexe

La figure 40 illustre la distribution de la **densité osseuse moyenne de la zone pré-sinusienne** en fonction du sexe des individus.

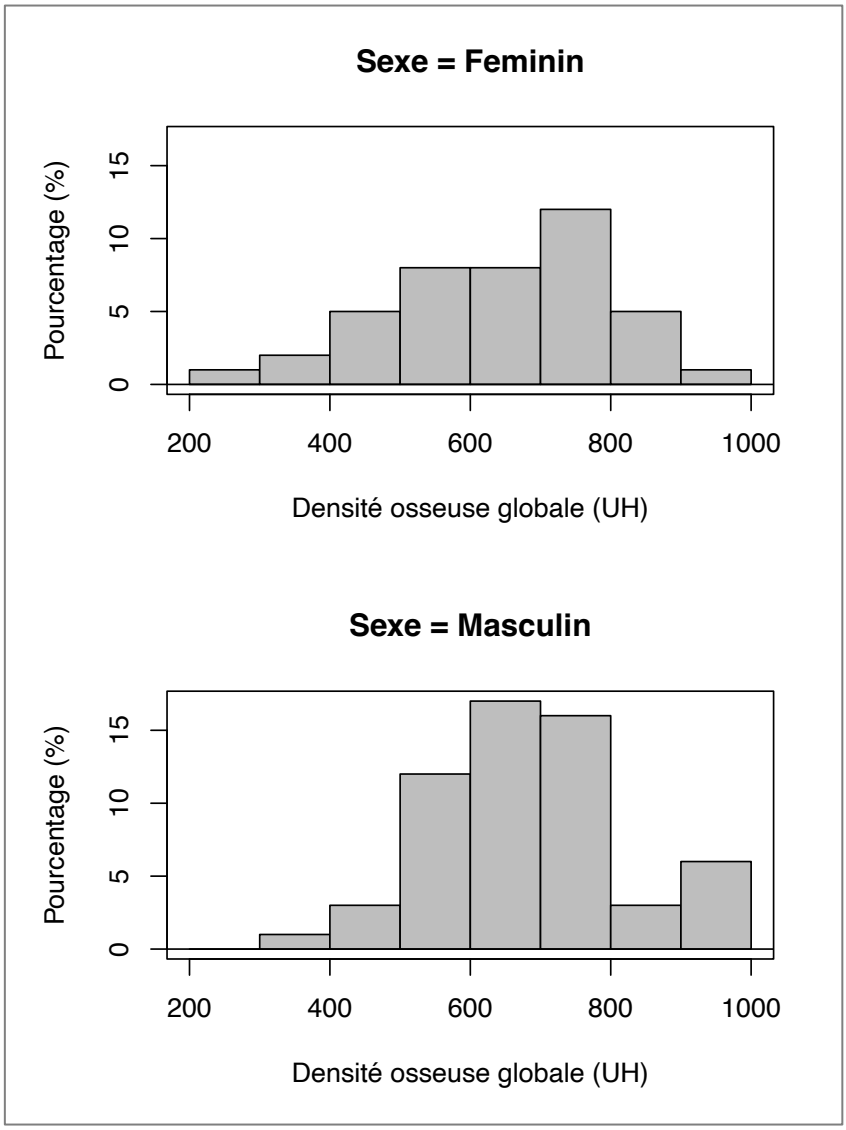


Figure 40 : Distribution de la densité osseuse moyenne de la zone pré-sinusienne (en UH) selon le sexe des individus (ÉTUDE N°2)

Le test de Student n'a pas mis en évidence de différence statistiquement significative entre la densité osseuse moyenne de la zone pré-sinusienne des hommes et celle des femmes (p = 0.229) (Tableau 10). En revanche, les **densités osseuses moyennes trabéculaires apicales des hommes** étaient **significativement supérieures** à celles des femmes (**p = 0.033**) (Tableau 10).

Zone	Sexe	Statistiques descriptives			*p*
		[min; max]	Moyenne (±SD)	Médiane [Q1; Q3]	
Densité de la zone pré-sinusienne (UH)	Éch total	[294.14; 955.94]	666.64 (± 143.22)	688.56 [571.26; 747.72]	0.229
	Femmes	[294.14; 900.61]	646.33 (± 154.14)	669.68 [564.54; 744.81]	
	Hommes	[342.92; 955.94]	681.35 (± 134.21)	599.41 [342.92; 748.00]	
Densité de la zone crestale (col) (UH)	Éch total	[320.25; 1050.25]	745.79 (± 142.17)	738.75 [658.98; 830.67]	0.877
	Femmes	[425.42; 1050.25]	748.40 (± 150.73)	726.62 [635.79; 831.33]	
	Hommes	[320.25; 1049.58]	743.90 (± 136.94)	740.33 [663.67; 823.96]	
Densité de la zone médiane (corps) (UH)	Éch total	[241.83; 1088.67]	664.99 (± 158.63)	671.83 [551.46; 758.87]	0.160
	Femmes	[241.83; 943.67]	638.77 (± 169.13)	647.79 [533.21 ; 766.62]	
	Hommes	[435.58; 1088.67]	683.99 (± 149.19)	678.12 [593.12 ; 753.25]	
Densité de la zone apicale (apex) (UH)	Éch total	[192.58; 932.42]	589.14 (± 171.12)	610.87 [474.35; 694.67]	0.063
	Femmes	[192.58; 932.42]	551.82 (± 185.95)	544.54 [412.33; 674.44]	
	Hommes	[258.08; 930.67]	616.18 (± 155.63)	629.58 [489.21; 698.29]	
Densité des sites incisifs (UH)	Éch total	[287.58; 1019.17]	711.15 (± 158.50)	713.62 [633.73; 810.06]	0.086
	Femmes	[287.58; 991.17]	679.18 (± 170.38)	693.17 [597.58; 756.88]	
	Hommes	[395.00; 1019.17]	734.30 (± 146.48)	739.12 [658.42; 817.37]	
Densité des sites canins (UH)	Éch total	[297.17; 1001.50]	670.71 (± 150.51)	671.83 [568.48; 780.04]	0.727
	Femmes	[297.17; 933.00]	664.48 (± 162.94)	681.37 [566.96; 803.33]	
	Hommes	[369.67; 1001.50]	675.22 (± 142.13)	671.83 [570.33; 755.67]	
Densité des sites prémolaire (UH)	Éch total	[196.75; 975.75]	618.07 (± 151.78)	625.71 [512.29; 697.71]	0.204
	Femmes	[196.75; 910.50]	595.33 (± 159.76)	585.12 [475.08; 704.75]	
	Hommes	[230.08; 975.75]	634.54 (± 144.90)	653.08 [539.04; 696.44]	
Densité trabéculaire apicale (pointe) (UH)	Éch total	[112.67; 947.67]	533.69 (± 183.10)	538.25 [398.04; 664.75]	**0.033 ***
	Femmes	[112.67; 947.67]	488.00 (± 203.54)	480.50 [361.21; 619.21]	
	Hommes	[246.83; 931.83]	566.77 (± 160.56)	594.58 [453.54; 673.54]	
Longueur moyenne des implants virtuels (mm)	Éch total	[7.00; 14.33]	10.18 (± 1.83)	10.13 [8.94; 11.50]	**0.003 ***
	Femmes	[7.00; 14.00]	9.54 (± 1.66)	9.50[8.56; 10.44]	
	Hommes	[7.00; 14.33]	10.64 (± 1.81)	10.63 [9.13; 12.00]	

*Éch = échantillon, max = maximum, min = minimum, SD = écart-type, UH = unités Hounsfield, [Q1-Q3] = intervalle interquartile, *p < 0.05*

Tableau 10 : Statistiques descriptives de la densité osseuse moyenne de la zone pré-sinusienne, de la densité moyenne au niveau des trois sites (incisive, canine, prémolaire) et à trois niveaux des implants (col, corps, apex), des densités trabéculaires apicales moyennes, et de la longueur moyenne des implants virtuels, en fonction du sexe des individus, et résultats des tests de Student (ÉTUDE N°2)

La figure 41 illustre la distribution de la **longueur moyenne des implants virtuels** en fonction du sexe des individus.

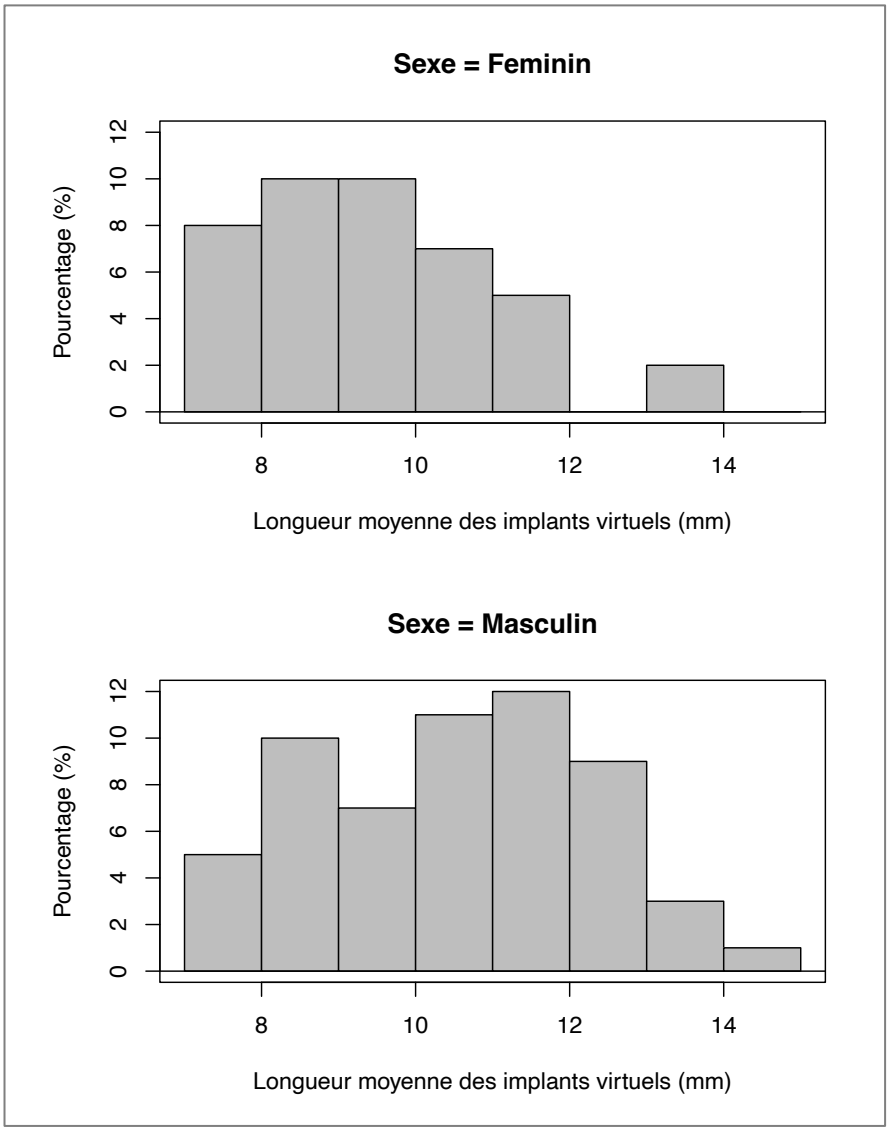


Figure 41 : Distribution de la longueur moyenne des implants virtuels (en mm) selon le sexe des individus (ÉTUDE N°2)

Le test de Student a mis en évidence que **la longueur moyenne des implants virtuels des hommes était significativement supérieure à celle des femmes** (***p* = 0.003**) (Tableau 10).

3.2.3.1.2 Influence de l'âge

La figure 42 illustre le nuage de points exprimant la **densité moyenne de la zone pré-sinusienne en fonction de l'âge** des individus, et selon leur **sexe**. Le test de corrélation de Spearman n'a pas mis en évidence de corrélation entre la densité osseuse moyenne de la zone pré-sinusienne et l'âge des individus (*rho* = -0.184, *p* = 0.067), tous sexes confondus. Chez les hommes, il n'y avait pas de corrélation entre la densité osseuse moyenne de la zone pré-sinusienne et l'âge (*rho* = −0.013, *p* = 0.923). Mais **chez les femmes,** il y avait une **faible corrélation négative** statistiquement significative entre la densité osseuse moyenne de la zone pré-sinusienne et **l'âge** (***rho* = -0.367, *p* = 0.017**).

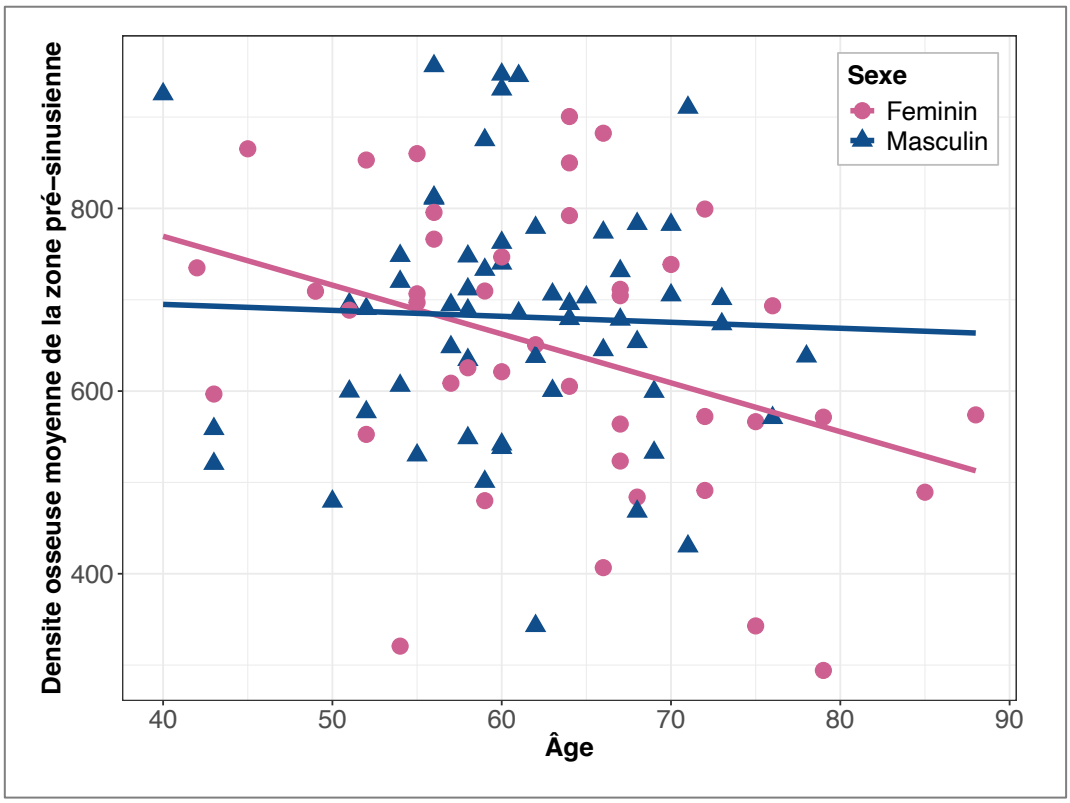


Figure 42 : Relations entre la densité osseuse moyenne (en UH) de la zone pré-sinusienne et l'âge des individus, en fonction du sexe (ÉTUDE N°2).
La ligne de régression représente la corrélation entre la densité osseuse et l'âge.

La figure 43 représente la matrice de corrélation entre les densités osseuses moyennes calculées en différents points du maxillaire d'une part, et l'âge des individus d'autre part, chez les femmes. Il y avait notamment une corrélation **modérée négative** statistiquement significative entre la densité osseuse moyenne des **zones prémolaires et palatine** d'une part et l'âge d'autre part **chez les femmes** (*rho* = -0.446, *p* =0.003 et *rho* = -0.437 et *p* = 0.004, respectivement).

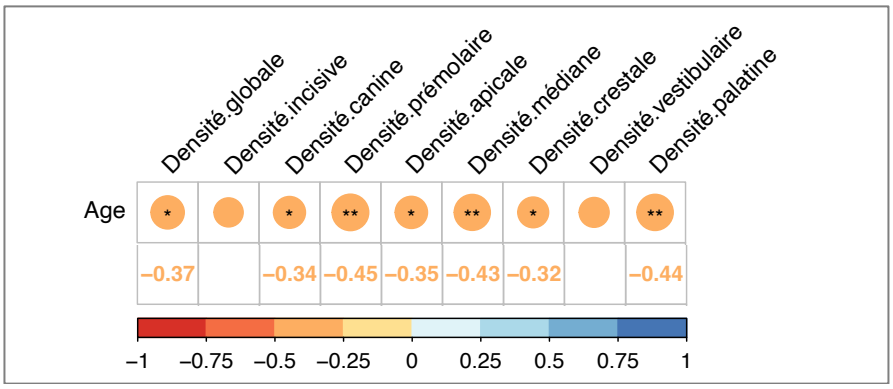


Figure 43 : Matrice de corrélation chez les femmes entre les densités osseuses moyennes calculées en différents points du maxillaire d'une part, et l'âge des individus d'autre part. (ÉTUDE N°2)

La première ligne représente la valeur de p après test de corrélation de Spearman (p < 0.05, ** p < 0.01). La seconde ligne représente la valeur de rho après test de corrélation de Spearman.*

La figure 44 illustre le nuage de points exprimant la **densité moyenne trabéculaire apicale en fonction de l'âge** des individus, et selon leur **sexe**. Le test de corrélation de Spearman n'a pas mis en évidence de corrélation entre la densité osseuse moyenne trabéculaire apicale et l'âge des individus (*rho* = -0.148, *p* = 0.141), tous sexes confondus. Chez les hommes, il n'y avait pas de corrélation entre la densité osseuse trabéculaire et l'âge (*rho* = 0.048, *p* = 0.719). Chez les **femmes**, il y avait une **faible corrélation négative** statistiquement significative entre la **densité moyenne trabéculaire apicale et l'âge** (***rho* = -0.352, *p* = 0.022**).

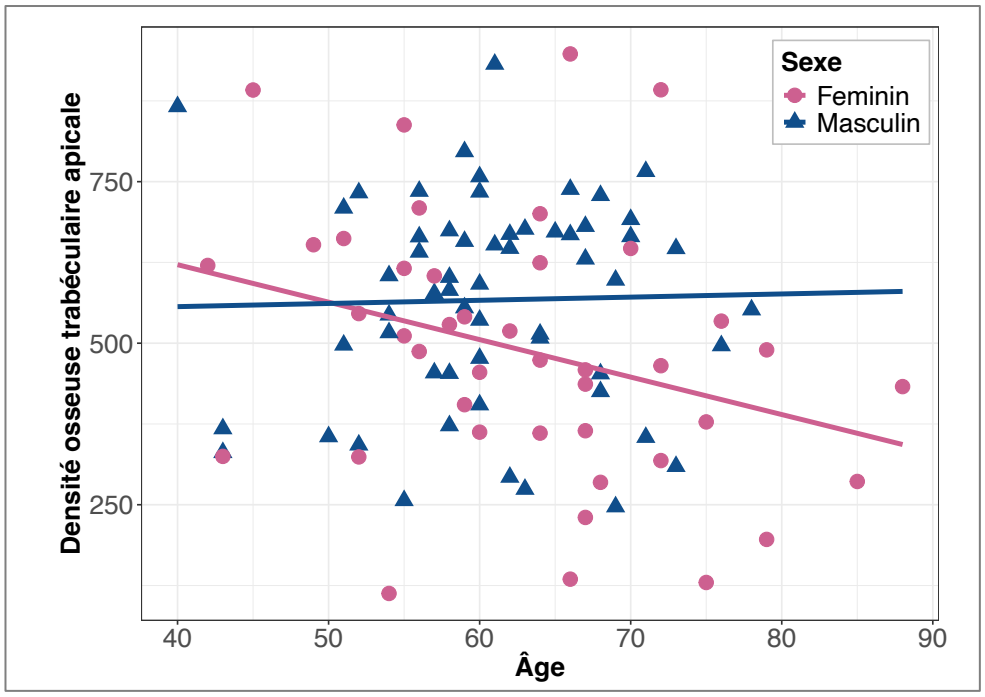


Figure 44 : Relations entre la densité osseuse moyenne trabéculaire apicale (en UH) et l'âge des individus, en fonction du sexe (ÉTUDE N°2).

La ligne de régression représente la corrélation entre la densité osseuse et l'âge.

La figure 45 représente la matrice de corrélation entre les densités osseuses trabéculaires apicales mesurées en différents points du maxillaire d'une part, et l'âge des individus d'autre part, chez les femmes. Chez les femmes, il y avait notamment une **corrélation modérée négative** statistiquement significative entre la densité osseuse moyenne trabéculaire apicale mesurée **au niveau des sites prémolaires,** et **l'âge** (*rho* = -0.456, ***p* = 0.002**).

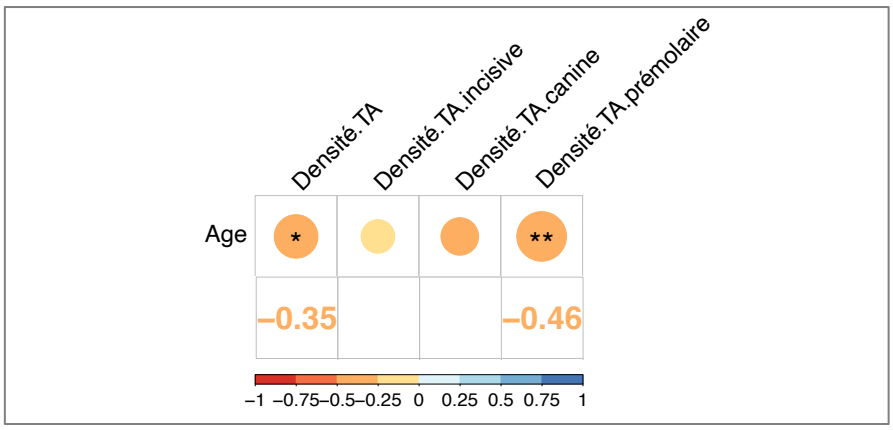


Figure 45 : Matrice de corrélation chez les **femmes** entre les densités osseuses trabéculaires apicales (TA), mesurées en différents points du maxillaire d'une part, et l'âge des individus d'autre part (ÉTUDE N°2).

La première ligne représente la valeur de p après test de corrélation de Spearman (p < 0.05, ** p < 0.01). La seconde ligne représente la valeur de rho après test de corrélation de Spearman.*

La figure 46 illustre le nuage de points exprimant la **longueur moyenne des implants virtuels en fonction de l'âge** des individus, et selon leur **sexe**.

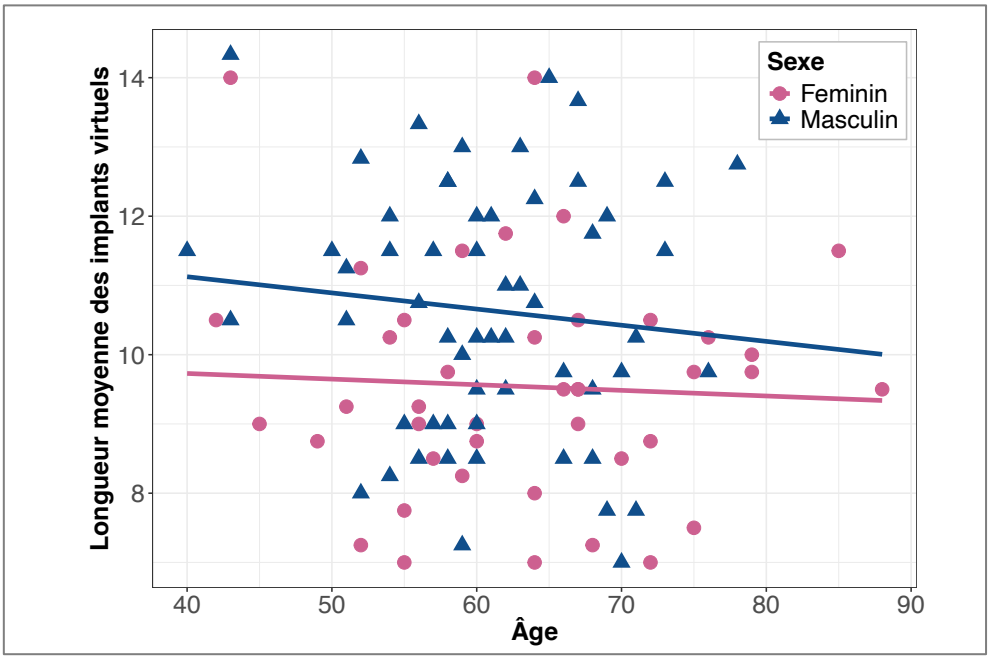


Figure 46 : Relations la longueur moyenne des implants virtuels (en mm) et l'âge des individus, en fonction du sexe (ÉTUDE N°2).

Le test de corrélation de Spearman n'a pas mis en évidence de corrélation entre longueur moyenne des implants virtuels et l'âge des individus tous sexes confondus (*rho* = -0.071, *p* = 0.484), chez les hommes (*rho* = -0.059, *p* = 0.661) ou chez les femmes (*rho* = 0.015, *p* = 0. 925).

3.2.3.1.3 Influence du diabète

L'influence du diabète a été étudiée chez 87 individus : 10 individus diabétiques d'âge moyen 66.30 ± 10.33 ans, et 77 individus non diabétiques d'âge moyen 61.10 ± 9.20 ans (Tableau 11). En raison du caractère rétrospectif de l'étude, le statut vis-à-vis du diabète de 13 sujets n'était pas connu et n'a donc pas été pris en compte dans les analyses statistiques.

Zone	**Statut vis-à-vis du diabète**	**Densité osseuse (UH)**			***p***
		[min ; max]	Moyenne (± SD)	Médiane [Q1 ; Q3]	
Zone pré-sinusienne	Diabétique (n = 10)	[480.00; 773.72]	623.60 (± 98.86)	644.041 [549.11; 695.47]	0.229
	Non diabétique (n = 77)	[320.75; 955.94]	669.99 (± 143.91)	690.06 [570.69; 747.58]	
Pointe de l'implant (Densité trabéculaire apicale)	Diabétique (n = 10)	[286.00; 738.17]	518.67 (± 170.06)	501.92 [404.71; 682.38]	0.847
	Non diabétique (n = 77)	[112.67; 947.67]	532.16 (± 186.03)	545.83 [372.33; 662.00]	

min = minimum, max = maximum, SD = écart-type, [Q1-Q3] = intervalle interquartile, UH = unités Hounsfield

Tableau 11 : Statistiques descriptives des variables densité osseuse de la zone pré-sinusienne et densité trabéculaire apicale, en fonction du statut des individus vis-à-vis du diabète, et résultats des tests de la somme des rangs de Wilcoxon (ÉTUDE N°2)

La figure 47 illustre la distribution de la densité osseuse moyenne de la zone pré-sinusienne, en fonction de la présence ou non d'un diabète.

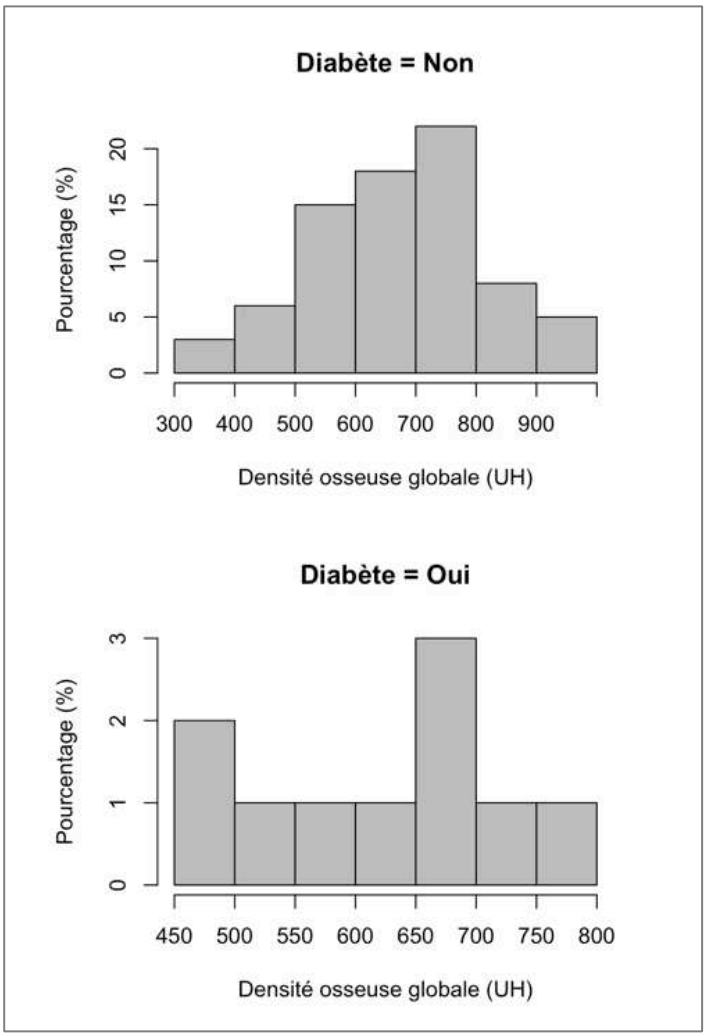


Figure 47 : Distribution de la densité osseuse moyenne de la zone pré-sinusienne (en UH) selon la présence ou non d'un diabète (ÉTUDE N°2)

Le test de la somme des rangs de Wilcoxon n'a pas mis en évidence de différence statistiquement significative entre la densité osseuse moyenne de la zone pré-sinusienne des sujets diabétiques et celle des sujets non diabétiques (p = 0.229). De même, il n'y avait pas de différence statistiquement significative entre la densité osseuse moyenne apicale trabéculaire des sujets diabétiques et celle des sujets non diabétiques (p = 0.847).

3.2.3.1.4 Influence de la durée d'édentement

L'influence de la durée d'édentement a été étudiée chez 48 individus : 34 individus édentés depuis moins d'un an (d'âge moyen 61.65 ± 8.55 ans) et 14 individus édentés depuis plus d'un an (d'âge moyen 61.57 ± 7.47 ans) (Tableau 12). En raison du caractère rétrospectif de l'étude, le statut vis-à-vis de l'édentement de 52 sujets n'était pas connu et n'a donc pas été pris en compte dans les analyses statistiques.

Zone	Durée d'édentement	Densité osseuse (UH)			*p*
		[min ; max]	Moyenne (± SD)	Médiane [Q1 ; Q3]	
Zone pré-sinusienne	Inférieure à un an (n = 34)	[320.75; 900.61]	649.06 (± 118.16)	675.861 [564.54; 710.98]	0.745
	Supérieure à un an (n =14)	[342.92; 955.94]	649.24 (±176.88)	588.19 [554.13; 734.51]	
Pointe de l'implant (Densité trabéculaire apicale)	Inférieure à un an (n = 34)	[112.67; 947.67]	529.04 (± 168.27)	547.67 [384.79; 656.33]	0.884
	Supérieure à un an (n = 14)	[256.50; 757.67]	534.42 (± 167.20)	546.92 [432.21; 668.54]	

min = minimum, max = maximum, SD = écart-type, [Q1-Q3] = intervalle interquartile, UH = unités Hounsfield

Tableau 12 : Statistiques descriptives des variables densité osseuse de la zone pré-sinusienne et densité trabéculaire apicale, en fonction du statut des individus vis-à-vis de l'édentement, et résultats des tests de la somme des rangs de Wilcoxon (ÉTUDE N°2)

La figure 48 illustre la distribution de la densité osseuse moyenne de la zone pré-sinusienne, en fonction de la durée d'édentement (inférieure ou supérieure à un an).

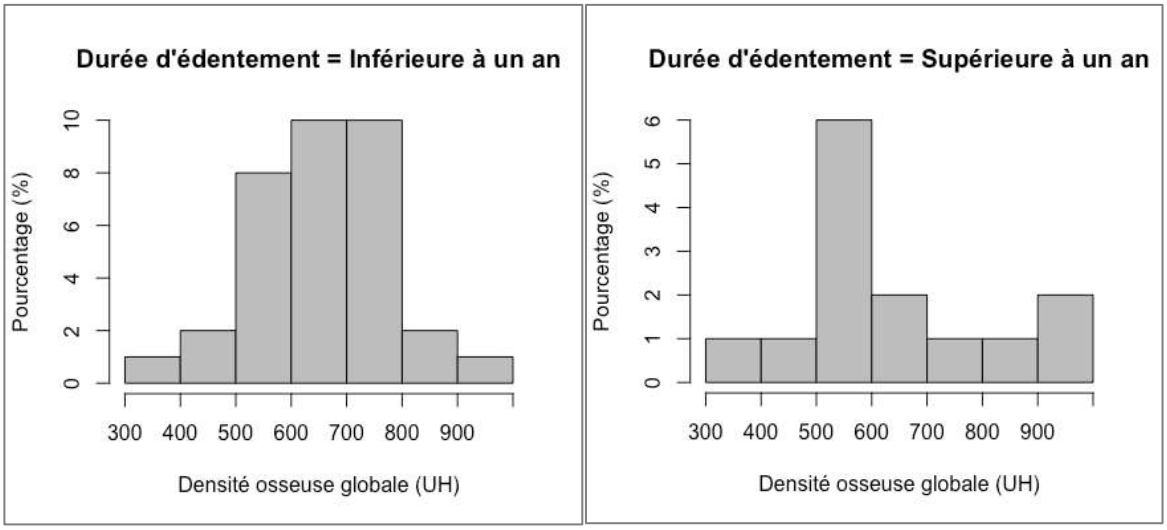


Figure 48 : Distribution de la densité osseuse moyenne de la zone pré-sinusienne (en UH) selon la durée d'édentement (ÉTUDE N°2)

Le test de la somme des rangs de Wilcoxon n'a pas mis en évidence de différence statistiquement significative entre la densité osseuse moyenne de la zone pré-sinusienne des sujets édentés depuis moins d'un an et celle des sujets édentés depuis plus d'un an ($p = 0.745$).

De même, il n'y avait pas de différence statistiquement significative entre la densité osseuse moyenne apicale trabéculaire des sujets édentés depuis moins d'un an et celle des sujets édentés depuis plus d'un an ($p = 0.884$).

3.2.3.1.5 Influence de la hauteur de la crête osseuse

L'influence de la hauteur la crête osseuse a été étudiée à partir de la longueur moyenne des implants virtuels chez 100 individus : 49 individus présentant une longueur moyenne des implants virtuels inférieure ou égale à 10 mm (sous-groupe [7-10], d'âge moyen 62.87 ± 8.64 ans) et 51 individus présentant une longueur moyenne des implants virtuels supérieure à 10 mm (sous-groupe [10-15], d'âge moyen 60.37 ± 9.45 ans) (Tableau 13).

Zone	**Longueur moyenne des implants virtuels**	**Densité osseuse (UH)**			***p***
		[min ; max]	Moyenne (± SD)	Médiane [Q1 ; Q3]	
Zone pré-sinusienne	[7-10] (n = 49)	[294.14; 946.69]	677.09 (± 150.36)	690.06 [571.44; 783.17]	0.477
	[10-15] (n= 51)	[320.75; 955.94]	656.60 (± 136.75)	685.31 [567.85; 725.64]	
Pointe de l'implant (Densité trabéculaire apicale)	[7-10] (n = 49)	[129.67; 947.67]	559.85 (± 186.34)	554.83 [452.67; 674.00]	0.163
	[10-15] (n= 51)	[112.67; 931.83]	508.56 (± 178.14)	518.83 [358.08; 643.75]	

min = minimum, max = maximum, SD = écart-type, [Q1-Q3] = intervalle interquartile, UH = unités Hounsfield, [7-10] = longueur moyenne des implants virtuels inférieure à 10 mm, [10-15] = longueur moyenne des implants virtuels supérieure à 10 mm.

Tableau 13 : Statistiques descriptives des variables densité osseuse de la zone pré-sinusienne et densité trabéculaire apicale, en fonction du statut des individus vis-à-vis de la hauteur de la crête osseuse (représentée par la longueur moyenne des implants virtuels), et résultats des tests Student (ÉTUDE N°2)

La figure 49 illustre la distribution de la densité osseuse moyenne de la zone pré-sinusienne, en fonction de la longueur moyenne des implants virtuels (inférieure ou égale à 10 mm pour le sous-groupe [7-10], et supérieure à 10 mm pour le sous-groupe [10-15]).

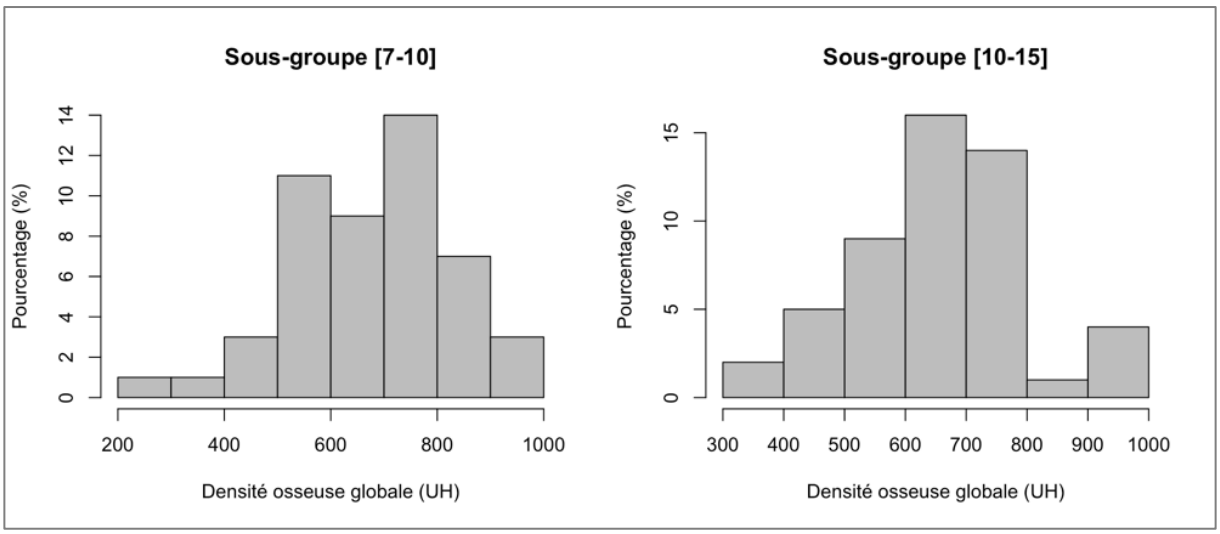


Figure 49 : Distribution de la densité osseuse moyenne de la zone pré-sinusienne (en UH) selon la longueur moyenne des implants virtuels (ÉTUDE N°2)

Le test de Student à deux échantillons n'a pas mis en évidence de différence statistiquement significative entre la densité osseuse moyenne du sous-groupe [7-10] et celle du sous-groupe [10-15] (p = 0.477) (Tableau 13). De même, il n'y avait pas de différence statistiquement significative entre la densité osseuse moyenne apicale trabéculaire du sous-groupe [7-10] et celle du sous-groupe [10-15] (p = 0.163) (Tableau 13).

Dans le sous-échantillon « Féminin » (regroupant uniquement les 42 individus de sexe féminin), l'influence de la hauteur la crête osseuse a été étudiée à partir de la longueur moyenne des implants virtuels chez 42 femmes (Tableau 14).

SEXE = FEMININ **Zone**	**Longueur moyenne des implants virtuels**	**Densité osseuse (UH)**			***p***
		[min ; max]	Moyenne (± SD)	Médiane [Q1 ; Q3]	
Zone pré-sinusienne	[7-10] (n = 27)	[294.14; 900.61]	681.75 (± 156.28)	709.33 [573.04; 797.46]	**0.021 ***
	[10-15] (n= 15)	[320.75; 792.14]	582.57 (± 132.07)	596.75 [490.24; 695.19]	
Pointe de l'implant (Densité trabéculaire apicale)	[7-10] (n = 27)	[129.67; 947.67]	543.5556 (± 212.91)	540.83 [405.50; 657.17]	**0.013 ***
	[10-15] (n= 15)	[112.67; 620.33]	388.01 (± 143.10)	404.83 [321.17; 492.58]	

*min = minimum, max = maximum, SD = écart-type, [Q1-Q3] = intervalle interquartile, UH = unités Hounsfield, [7-10] = longueur moyenne des implants virtuels inférieure à 10 mm, [10-15] = longueur moyenne des implants virtuels supérieure à 10 mm, *p < 0.05*

Tableau 14 : Statistiques descriptives des variables densité osseuse de la zone pré-sinusienne et densité trabéculaire apicale **chez les femmes**, en fonction du statut des individus vis-à-vis de la hauteur de la crête osseuse, et résultats des tests Student (ÉTUDE N°2)

Le test de la somme des rangs de Wilcoxon a mis en évidence des différences statistiquement significatives au sein du sous-échantillon « Féminin » (Tableau 14) :

- La densité osseuse moyenne de la zone pré-sinusienne du sous-groupe [7-10] était significativement supérieure à celle du sous-groupe [10-15] (p = 0.021) ;
- De même, il y avait une différence statistiquement significative entre la densité osseuse trabéculaire apicale du sous-groupe [7-10] et celle du sous-groupe [10-15] (p = 0.013).

En revanche, dans le sous-échantillon « Masculin » (regroupant uniquement les 58 individus de sexe masculin), l'étude de l'influence de la hauteur de la crête osseuse n'a pas mis en évidence de différence statistiquement significative entre les sous-groupes [7-10] et [10-15].

3.2.3.1.6 Influence des variables quantitatives : âge, taille, poids, consommation de tabac, longueur moyenne des implants virtuels

La figure 50 illustre la matrice de corrélation entre les variables quantitatives suivantes : densité osseuse moyenne de la zone pré-sinusienne, densité osseuse moyenne trabéculaire apicale, âge, taille, poids, consommation de tabac exprimée en PA, longueur moyenne des implants virtuels chez l'ensemble des individus (a), chez les hommes (b), et chez les femmes (c).

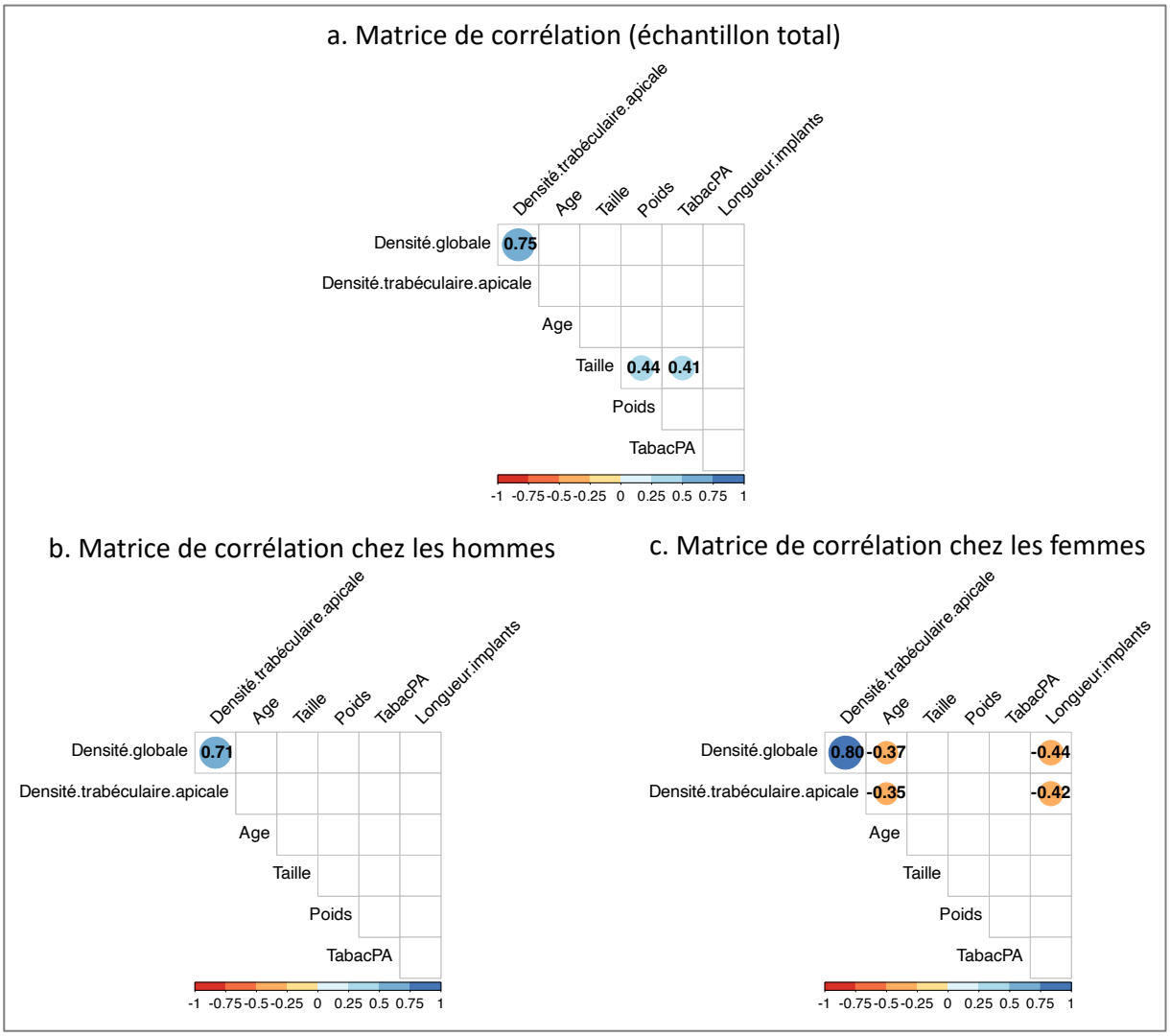


Figure 50 : Matrices de corrélation entre les variables quantitatives : densité osseuse moyenne de la zone pré-sinusienne, densité osseuse moyenne trabéculaire apicale, âge, taille, poids, consommation de tabac, longueur moyenne des implants virtuels, chez l'ensemble des individus (a), chez les hommes (b), et chez les femmes (c) (ÉTUDE N°2)

Les cases blanches indiquent des résultats statistiquement non significatifs ($p \geq 0.05$). Les cases colorées présentent la valeur de rho en cas de résultat statistiquement significatif suite au test de corrélation de Spearman ($p < 0.05$).

Sur l'ensemble de l'échantillon (hommes et femmes confondus) et chez les hommes, aucune corrélation statistiquement significative n'a été mise en évidence entre les densités osseuses moyennes et les autres variables quantitatives (Figure 50 a et b).

Chez les femmes, il existait une **corrélation négative modérée statistiquement significative** entre :

- la **longueur moyenne des implants** virtuels d'une part,
- et la **densité osseuse moyenne de la zone pré-sinusienne ou la densité osseuse moyenne trabéculaire apicale** d'autre part (*rho* = -0.439, *p* =0.004 et *rho* = - 0.425 et *p* = 0.005, respectivement) (Figure 50 c).

Si l'on compare les densités osseuses moyennes de la zone pré-sinusienne et les densités osseuses moyennes apicales trabéculaires, il existait une **forte corrélation positive** statistiquement significative quel que soit l'échantillon (échantillon total, hommes, femmes) (Figure 50 a, b et c).

Une ACP a été effectuée à partir des densités moyennes apicales trabéculaires (« Densité trabéculaire apicale »), et des facteurs suivants : la taille, le poids, la consommation de tabac (« TabacPA ») et la longueur moyenne des implants virtuels (« Longueur implant »). Les variables « Densité globales » (Densité osseuse moyenne de la zone pré-sinusienne) et « Sexe » étaient considérées comme des variables illustratives.

En raison du caractère rétrospectif de l'étude, certaines variables présentent des valeurs manquantes. Le tableau 15 représente la proportion des valeurs manquantes pour chaque variable étudiée dans l'ACP. Au moins 48% des valeurs étaient manquantes pour les variables taille, poids et consommation de tabac.

Variable	Nombre de valeurs manquantes	Proportion des valeurs manquantes
Densité globale	0	0.00
Densité trabéculaire apicale	0	0.00
Taille	48	0.48
Poids	53	0.53
TabacPA	46	0.46
Age	0	0.00
Longueur implants	0	0.00
Sexe	0	0.00

Tableau 15 : Nombre et proportion des valeurs manquantes pour chaque variable (quantitative ou qualitative) étudiée dans l'ACP (ÉTUDE N°2)

Les dimensions (ou composantes principales) 1 et 2 représentaient 47.9% des variances exprimées dans l'ACP (Figure 51).

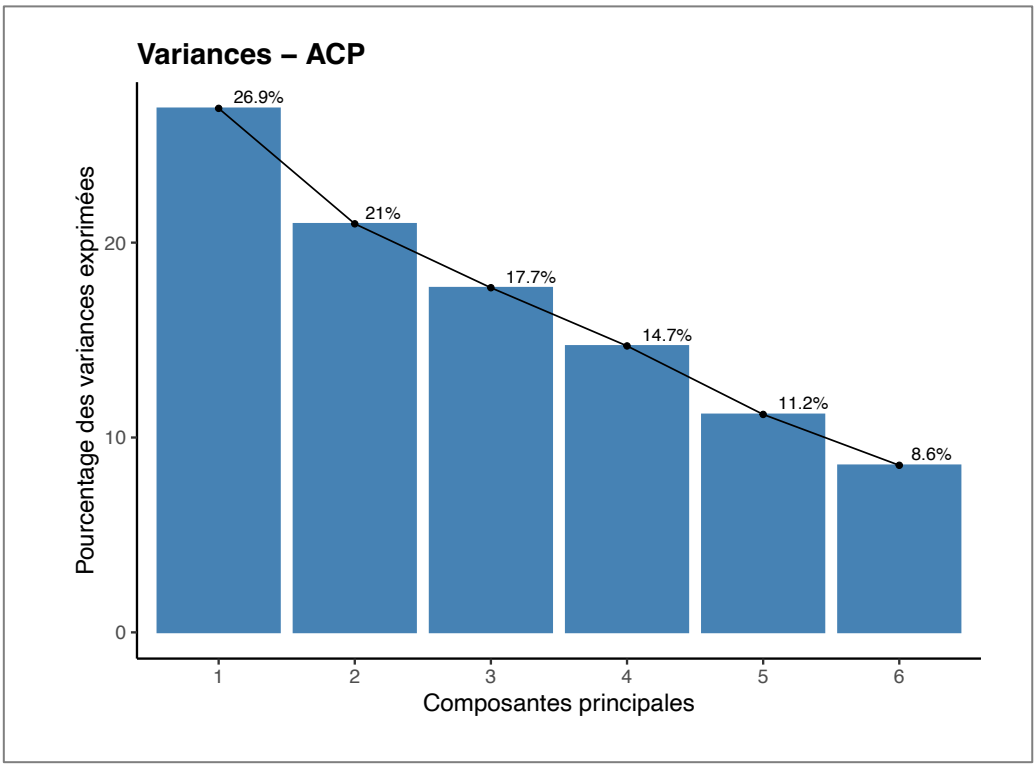


Figure 51 : Pourcentage des variances exprimées pour chaque composante de l'ACP (ÉTUDE N°2)

Le graphe des variables a été représenté en fonction de la contribution de chaque variable aux dimensions 1 et 2 (Figure 52). Les variables « Taille » et « Poids » représentaient la plus grande contribution à la dimension 1 (41.3% et 25.8% respectivement). Les variables « Densité trabéculaire apicale », « Longueur implant » et « TabacPA » représentaient la plus grande contribution à la dimension 2 (47.7%, 22.0% et 20.8% respectivement). La variable quantitative « Densité globale » (densités osseuses moyennes de la zone pré-sinusienne) était considérée comme une variable quantitative supplémentaire, et n'intervenait pas dans le calcul des axes.

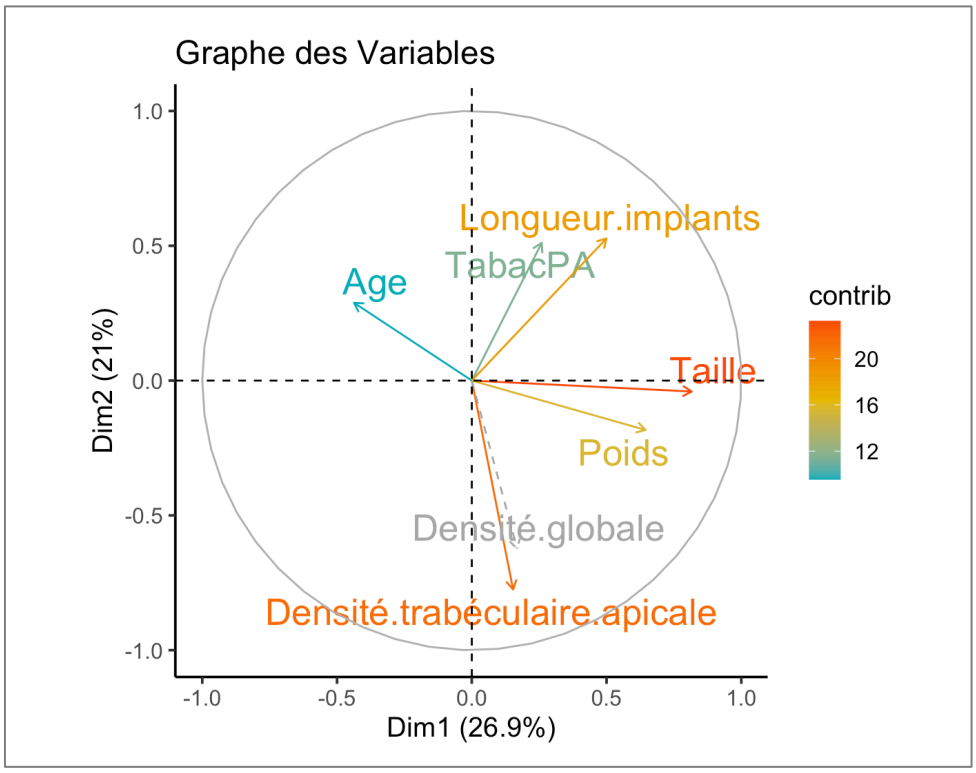


Figure 52 : Graphe des variables de l'analyse en composantes principales (ACP) (ÉTUDE N°2)
L'échelle de couleur indique le pourcentage de contribution des variables aux dimensions 1 et 2 de l'ACP. La variable quantitative « Densité globale » était considérée comme une variable illustrative.

La variable qualitative « Sexe » était considérée comme une variable illustrative. Sur le nuage de points des individus, la position des modalités « Masculin » et « Féminin » représente le barycentre de chaque groupe (Figure 53).

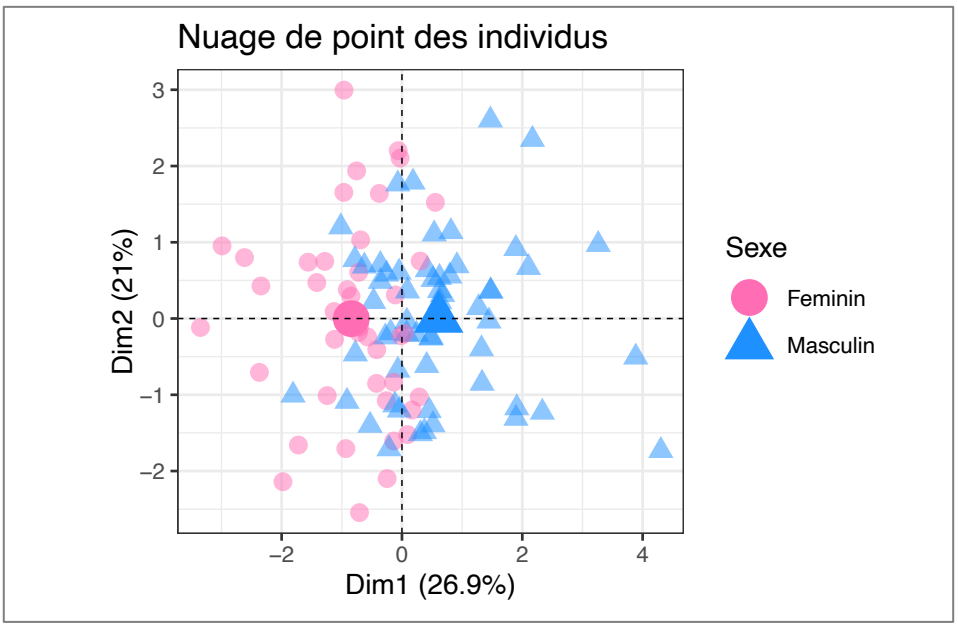


Figure 53 : Graphe (nuage de points) des individus de l'ACP (ÉTUDE N°2)
La variable qualitative « Sexe » est considérée comme variable une illustrative.

3.2.3.2 Variabilité intra-individuelle

3.2.3.2.1 Comparaison des densités osseuses en fonction du site implantaire

La figure 54 illustre les valeurs moyennes des densités osseuses (± écarts-types) en fonction de la position de l'implant (incisive, canine, prémolaire) et de la partie de l'implant (apex, corps, col).

Les densités osseuses moyennes étaient plus élevées dans les sites incisifs (711.15 ± 158.50 UH) suivis des sites canins (670.71 ± 150.51 UH), et des sites prémolaires (618.07 ± 151.78 UH) (Figure 54).

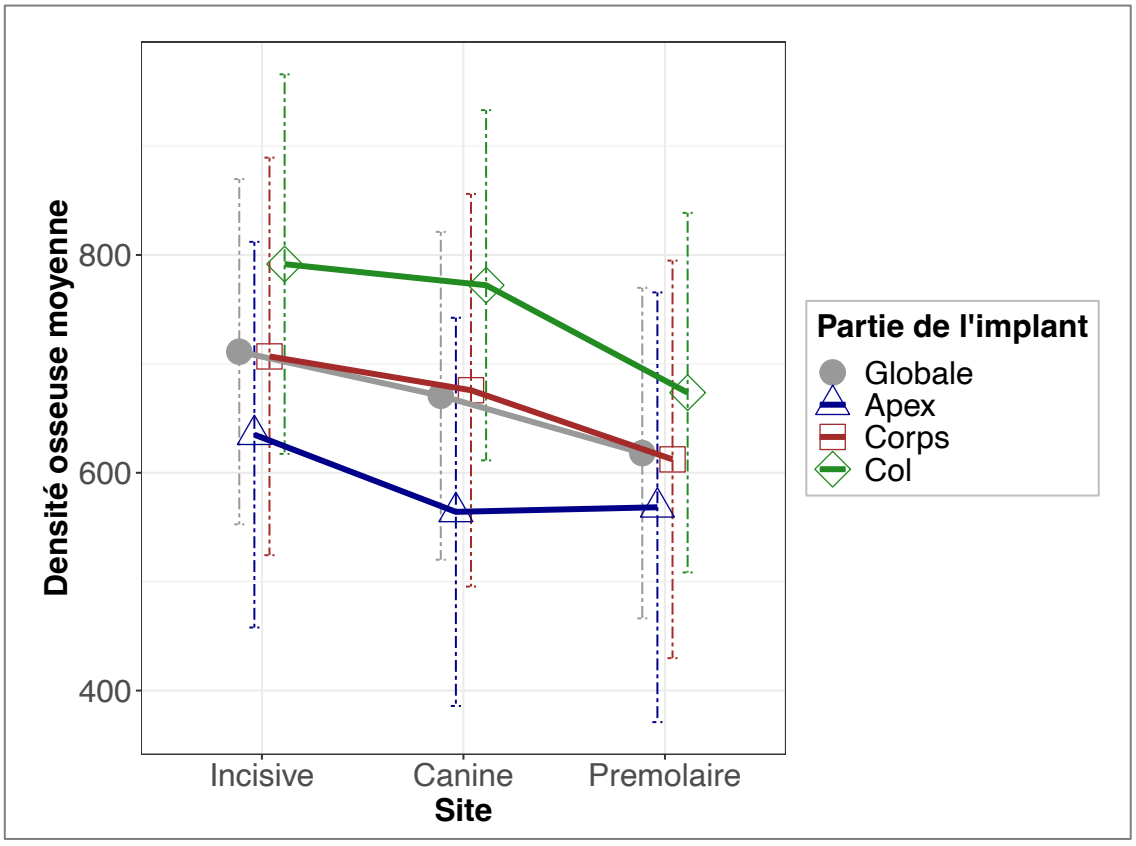


Figure 54 : Graphe des densités osseuses moyennes (± écarts-types, en UH) en fonction du site (incisive, canine, prémolaire), et de la partie de l'implant (apex, corps, col) (ÉTUDE N°2)

L'analyse de variance ANOVA sur mesures répétées a mis en évidence une différence statistiquement significative entre les densités osseuses moyennes des trois sites (***p* ≤ 0.001**). Les tests de Student ont mis en évidence que les densités moyennes étaient **statistiquement différentes entre les sites incisifs et les sites canins**, **entre les sites incisifs et les sites prémolaires** et **entre les sites canins et les sites prémolaires** (***p* ≤ 0.001** avant et après correction par la méthode BY du FDR).

Si on considère les **densités trabéculaires apicales**, les densités osseuses moyennes étaient plus élevées dans les sites incisifs (586.14 ± 215.27 UH) par rapport aux sites canins (509.53 ± 202.66 UH) et aux sites prémolaires (505.39 ± 206.70 UH) (Figure 55). L'analyse de variance ANOVA sur mesures répétées a mis en évidence une différence statistiquement significative entre les densités osseuses moyennes des trois sites (***p* < 0.001***). Les tests de Student ont mis en évidence que les densités trabéculaires apicales étaient **statistiquement différentes entre les sites incisifs et les sites canins**, **entre les sites incisifs et les sites prémolaires** (***p* < 0.001*** avant et après correction par la méthode BY du FDR). Il n'y avait pas de différence statistiquement significative entre les densités trabéculaires apicales des sites canins et celles des sites prémolaires (p = 0.81 avant la correction par la méthode BY du FDR et p = 1 après la correction par la méthode BY du FDR) (Tableau 16).

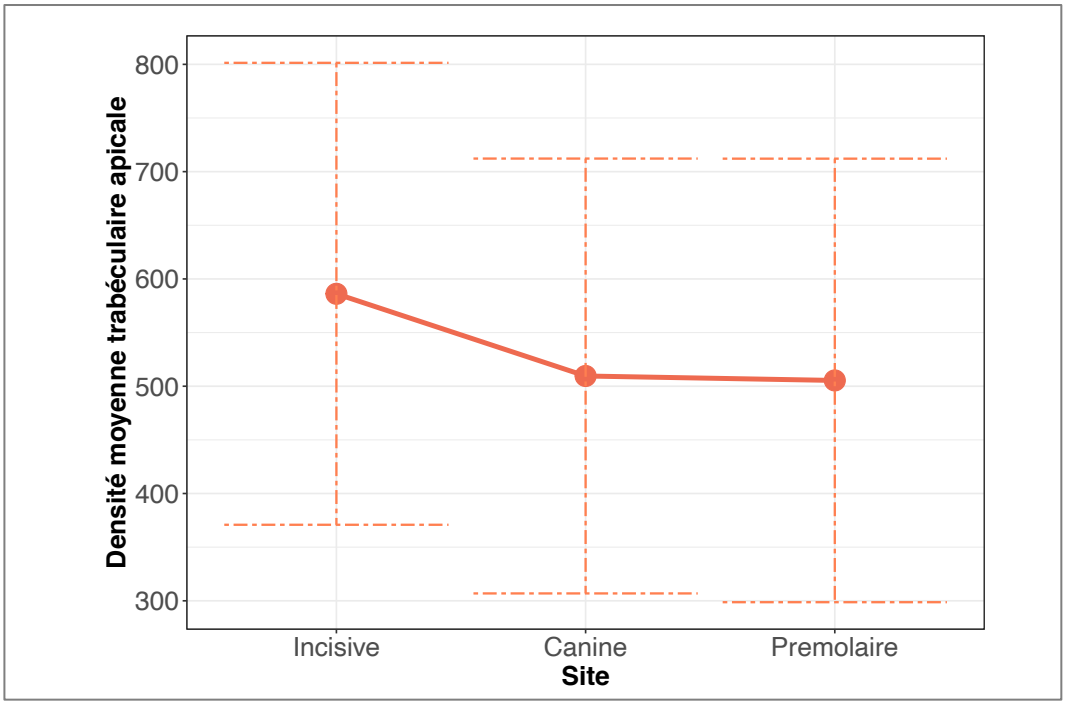


Figure 55 : Graphe des densités osseuses trabéculaires apicales moyennes (± écarts-types, en UH) en fonction du site (incisive, canine, prémolaire) (ÉTUDE N°2)

Densités trabéculaires apicales		
Sites implantaires	***p***	p_{FDR}
Incisive *vs* Canine	<0.001**	**<0.001****
Incisive *vs* Prémolaire	<0.001**	**<0.001****
Canine *vs* Prémolaire	0.81	1

*** p < 0.01. Les valeurs p en gras indiquent une signification statistique au niveau 0.05 après FDR. Les résultats ont été interprétés sur la base de ces valeurs p corrigées (p_{FDR}). Les valeurs p avant correction (p) sont données à titre indicatif.*

Tableau 16 : Résultats des tests de Student comparant les densités osseuses trabéculaires apicales des trois régions du maxillaire édentés (ÉTUDE N°2)

3.2.3.2.2 Comparaison des densités osseuses en trois points de l'implant

La figure 56 illustre les valeurs moyennes des densités osseuses (± écarts-types) en fonction de la zone de l'implant (apex, corps, col) et de la zone vestibulaire ou palatine. Les valeurs moyennes de densités osseuses au niveau du col (745.79 ± 142.17 UH) étaient plus élevées par rapport au corps (664.99 ± 158.63 UH) et par rapport à l'apex des implants (589.14 ± 171.12 UH) (Figure 56).

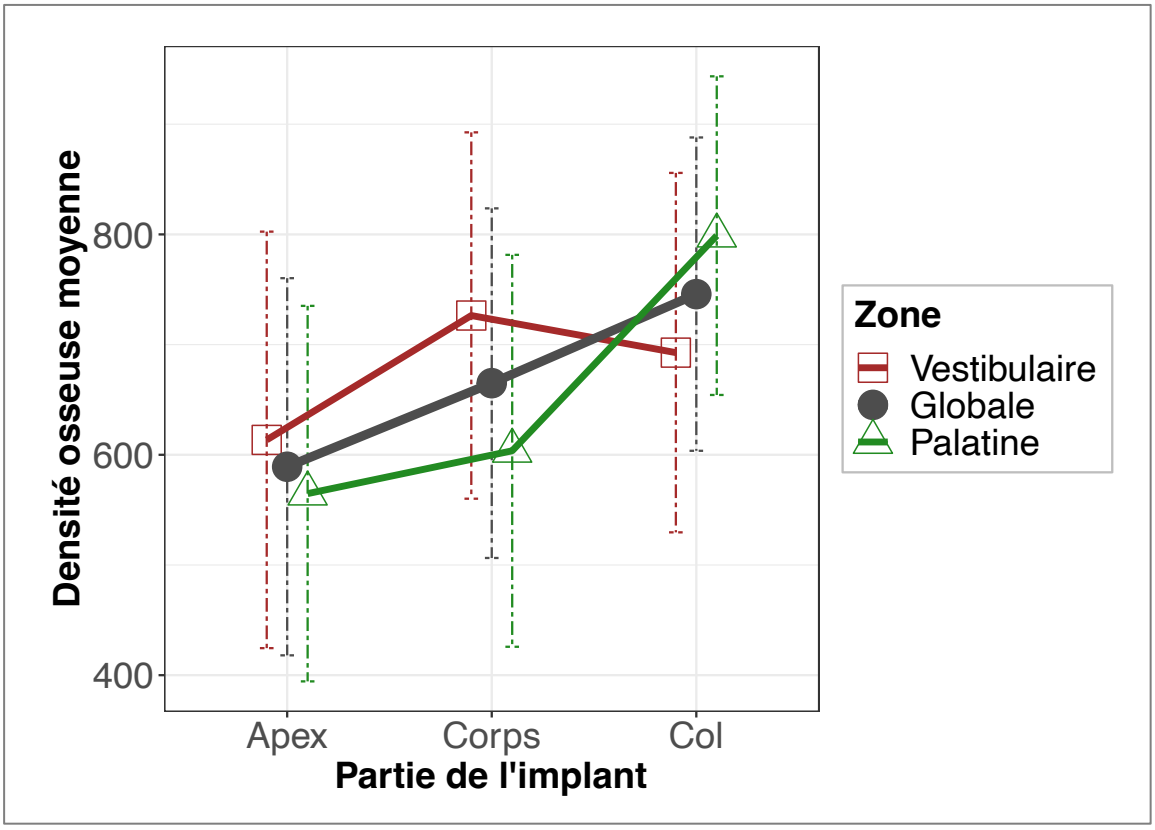


Figure 56 : Graphe des densités osseuses moyennes (± écarts-types, en UH) en fonction de la partie de l'implant (apex, corps, col) et de la zone vestibulaire ou palatine (ÉTUDE N°2)

L'analyse de variance ANOVA sur mesures répétées a mis en évidence une différence statistiquement significative entre les densités osseuses mesurées au niveau des 3 parties de l'implant (***p* < 0.001**). Les tests de Student ont mis en évidence que les densités osseuses moyennes étaient **statistiquement différentes entre apex et corps, entre apex et col, et entre corps et col** (***p* < 0.001** avant et après correction par la méthode BY du FDR).

3.2.3.2.3 Comparaison des densités osseuses des zones vestibulaires et palatines

Les densités osseuses moyennes étaient plus élevées dans les zones vestibulaires (677.54 ± 153.84 UH) par rapport aux zones palatines (655.75 ± 144.99 UH). Le test de Student a mis en évidence une différence statistiquement significative entre la densité osseuse moyenne des zones vestibulaires et celle des zones palatines (***p* = 0.012***) (Tableau 17).

Si l'on dissocie les zones verticales, d'autres différences ont été observées (Figure 56) :

- Au niveau du **col**, la densité osseuse moyenne **palatine** était significativement supérieure à la densité osseuse moyenne vestibulaire (***p* < 0.001***).
- Au niveau du **corps** de l'implant, la densité osseuse moyenne **vestibulaire** était significativement supérieure à la densité osseuse moyenne palatine (***p* < 0.001***).
- Au niveau de l'**apex** de l'implant, la densité osseuse **vestibulaire** était significativement supérieure à la densité osseuse moyenne palatine (***p* < 0.001***).

Zone	Zone vestibulaire ou palatine	Densité osseuse (UH)			*p*
		[min; max]	Moyenne (±SD)	Médiane [Q1; Q3]	
Zone pré-sinusienne	Vestibulaire	[280.28; 1026.33]	677.54 (± 153.84)	688.03 [583.97; 775.40]	**0.012***
	Palatine	[307.67; 999.11]	655.75 (± 144.99)	649.86 [579.54; 737.71]	
Zone crestale (col)	Vestibulaire	[267.00; 1109.00]	692.71 (± 163.08)	670.17 [598.67; 783.96]	**<0.001 ****
	Palatine	[373.50; 1112.83]	789.86 (± 144.57)	812.83 [708.46; 900.54]	
Zone médiane (corps)	Vestibulaire	[271.83; 1100.67]	726.37 (± 166.22)	738.25 [609.92; 831.50]	**<0.001 ****
	Palatine	[160.83; 1135.33]	603.62 (± 177.82)	588.33 [494.46; 735.62]	
Zone apicale (apex)	Vestibulaire	[141.33; 980.67]	613.53 (± 188.99)	623.08 [458.46; 748.33]	**<0.001 ****
	Palatine	[141.83; 949.00]	564.76 (± 170.38)	562.42 [442.04; 654.71]	

*max = maximum, min = minimum, SD = écart-type, UH = unités Hounsfield, [Q1-Q3] = intervalle interquartile, *p < 0.05*

Tableau 17 : Statistiques descriptives de la densité osseuse moyenne de la zone pré-sinusienne et des densités osseuses moyennes à trois niveaux des implants (col, corps, apex) en fonction de la localisation vestibulaire ou palatine, et résultats des tests de Student (ÉTUDE N°2)

3.3 Discussion

L'évaluation de la densité osseuse est un facteur critique pour la sélection des sites implantaires, de l'état de surface, de la morphologie et des dimensions des implants, de la procédure chirurgicale permettant d'obtenir une bonne stabilité primaire, de la période de cicatrisation et du protocole de mise en fonction.[23,97,111,119,121,123,174,175]

Ces études sont les premières à analyser la densité osseuse sur des échantillons constitués exclusivement de patients édentés complets au maxillaire.

Ces études ont analysé les variations de la densité osseuse dans trois régions de la zone pré-sinusienne du maxillaire édenté, à partir de CBCT, au niveau de 414 sites implantaires (**ÉTUDE N°1**) puis de 600 sites implantaires (**ÉTUDE N°2**).

La **première hypothèse nulle a été rejetée** pour les deux études : la densité osseuse variait au sein du maxillaire édenté. La seconde hypothèse nulle a été partiellement rejetée pour chacune des études :

- Dans l'**ÉTUDE N°1,** la densité osseuse était influencée par l'âge chez les femmes d'une part, et par le sexe d'autre part.
- Dans l'**ÉTUDE N°2,** la densité osseuse moyenne de la zone pré-sinusienne était influencée par l'âge chez les femmes. La densité trabéculaire apicale était influencée par le sexe. Chez les femmes, la densité trabéculaire apicale était influencée par l'âge et par la hauteur de la crête osseuse.

3.3.1 Forces des études

3.3.1.1 Études portant sur les sujets édentés complets au maxillaire

Ces études sont originales : il s'agit des premières études analysant la densité osseuse sur des échantillons constitués exclusivement de patients édentés complets au maxillaire, et en différents points du maxillaire édenté.

Ainsi, du point de vue de la localisation sur l'arcade, les échantillons étaient très homogènes, puisque la répartition entre les sites implantaires était la même pour l'ensemble des sujets. Ainsi, les résultats concernant la variabilité inter-individuelle n'étaient pas influencés par la répartition entre les sites incisifs, canins et prémolaires.

De plus, l'absence de dents adjacentes limitait le risque d'artéfact métallique (lié à une couronne métallique, un inlay-core…) pouvant altérer la mesure de la densité osseuse.

Enfin, l'ensemble des CBCT a été effectué avec la même machine et les mêmes paramètres d'acquisition, ce qui limitait les défauts de reproductibilité des mesures liées aux disparités entre les machines et aux variations du FOV.

3.3.1.2 Protocole de mesure de la densité

De nombreux auteurs ont précédemment étudié la densité osseuse de sites édentés du maxillaire antérieur partir d'images issues d'examens CT[90,92,93,97,101,119,120,123,132,133,136,141,148,176] ou CBCT[105,121,122,140,145,159,177].

Quel que soit l'examen radiologique tridimensionnel utilisé, deux protocoles principaux de mesures de la densité ont été employés dans la littérature :

- Certain auteurs[90,119,120,122,132,133,136,145,148,176] ont mesuré la densité osseuse d'un site implantaire ou autour d'un implant, prenant en compte ainsi à la fois l'os cortical et l'os trabéculaire : la densité osseuse obtenue est **cortico-trabéculaire.**
- D'autres auteurs[92,97,101,105,123,141] ont limité les mesures de la densité à l'os **trabéculaire** dans une région d'intérêt du site implantaire (rectangle, cylindre…).

Dans les **ÉTUDES N°1 et N°2,** la densité autour de chaque implant virtuel a été mesurée grâce à des points de mesure situés à 1 mm autour de l'implant, conformément au protocole d'une étude précédente effectuée sur des mandibules édentées.[172] Cette méthode a permis d'obtenir des informations sur la densité de l'os au contact du futur implant, et donc sur la stabilité primaire du futur implant.[116] En effet, dans le protocole initial de l'**ÉTUDE N°1**, nous avons choisi de ne pas mesurer la densité osseuse trabéculaire à l'intérieur de l'implant (cylindre ou rectangle) car cette région d'intérêt de l'os n'est pas en contact direct avec le futur implant et est éliminée lors de la préparation du site implantaire par forage.

Cependant, cette mesure « cortico-trabéculaire » située 1 mm autour de l'implant prenait en compte soit l'os trabéculaire seul, soit l'os cortical seul, soit l'os cortical et l'os trabéculaire simultanément. Ce type de mesure pourrait alors induire des variations lors de l'étude de la variabilité inter-individuelle, en fonction de la résorption osseuse horizontale et verticale. Pour cette raison, dans l'**ÉTUDE N°2,** une mesure supplémentaire, appelée « ***Densité apicale trabéculaire*** » a été effectuée au milieu de l'apex de l'implant afin de prendre en compte uniquement l'os trabéculaire à l'apex de l'implant. Afin de suivre le même protocole que celui de l'**ÉTUDE N°1**, cette mesure n'a pas été prise en compte dans les calculs des densités moyennes de la zone pré-sinusienne et des densités moyennes par site ou par zone (verticale ou vestibulo-linguale).

3.3.1.3 Choix du CBCT

Il a été montré dans la littérature que la CT et le CBCT étaient des **méthodes fiables pour étudier la densité osseuse des mâchoires**.[23,90,92,93,97,101,106,112,115,117,119–121,123,124,127,130,133,136,140,146] Durant les dernières décennies, le CBCT a progressivement remplacé la CT en imagerie orale et maxillo-faciale, en raison de ses multiples avantages : une bonne résolution spatiale, des images de haute qualité, un équipement plus compact, des doses d'irradiation réduites et un coût réduit.[87,99,112,115,117,121,122,135,139,140,144,146,150–152] En effet, la dose d'irradiation est 40 à 60 fois inférieure à celle de la CT.[117]

Dans nos études, les examens CBCT ont été réalisés dans le cadre d'un bilan pré-implantaire : aucune irradiation supplémentaire n'a donc été nécessaire pour mener ces études. Ces études étaient en accord avec les principes ALARA et ALADA grâce à l'utilisation du CBCT, et en évitant la dose d'irradiation élevée de la CT.[175,178] Le principe ALARA, basé sur l'optimisation, a évolué vers le principe ALADA, qui recherche un équilibre entre diagnostic de qualité et radioprotection.[153]

Mais contrairement à la CT, les densités osseuses mesurées à l'aide du CBCT sont basées sur des différences de niveaux de gris définies par les fabricants[143,146] : les niveaux de gris obtenues par CBCT ne doivent pas être considérées comme des valeurs absolues, mais des **valeurs relatives**.[106,122,144,146,147,150,152,154] Afin de convertir les valeurs relatives du CBCT en valeurs absolues, plusieurs auteurs ont proposé des équations de conversion.[143,146,152,154]

Des études précédentes[106,115,117,143,146,147,152,156] ont mis en évidence une **forte corrélation entre les densités mesurées à l'aide du CBCT et les densités mesurées à l'aide de la CT**, ce qui confirme le potentiel du CBCT dans l'évaluation objective des densités osseuses. Les densités mesurées sur les images CBCT sont comparables à celles des images CT, mais leurs **valeurs** sont généralement **plus élevées**.[112,115,117,143,146,150,152,156] Une **forte corrélation entre la BV/TV de la micro-CT et la densité mesurée par CBCT** a également été rapportée.[115,140] Une étude récente[157] a également affirmé que le CBCT était une méthode fiable pour estimer le type d'os des sites implantaire.

3.3.2 Comparaison avec les études précédentes

Les résultats des études portant sur la densité osseuse de sites édentés du maxillaire antérieur partir d'images CT ou CBCT sont résumés dans le tableau 18.

Certaines études ont inclus des patients totalement édentés[92,93,97,101,119–122,132,133,136,148,159], mais **aucune étude antérieure n'a étudié spécifiquement la densité du maxillaire complètement édenté.** Les densités osseuses rapportées dans les **ÉTUDES N°1 et N°2** étaient en général supérieures à celles mesurées dans d'autres études (Tableau 18). Mais la comparaison de nos résultats avec ceux des études précédentes reste difficile, en raison des différences d'approches méthodologiques et de conception :

- **La population étudiée :**
  - Les caractéristiques démographiques (âge, sexe) de l'échantillon ;
  - L'inclusion ou non de patients édentés partiels ;
  - L'inclusion de spécimens de cadavres : il existe des différences physiologiques entre l'os non vivant et l'os vital.[23,119]
- **Le type d'examen utilisé** (CT ou CBCT) : les valeurs de densité obtenues par CBCT sont généralement plus élevées que celles obtenues par CT.[112,115,117,143,146,150,152,156] Cet écart peut être attribué à différents facteurs : le durcissement du faisceau de rayon X, l'augmentation du rayonnement diffusé, le niveau de bruit, un effet de discontinuité des données de projection, ainsi que des artéfacts spécifiques à la technologie du scanner, qui fonctionne à un kilovoltage plus faible que la CT et la micro-CT.[115,146,150]
- **La machine utilisée**[87,105,115,123,146,152]: en raison de l'absence de norme de développement des CBCT, il existe une grande disparité dans les paramètres physiques de chaque machine (tension, courant, temps, résolution), pouvant contribuer aux différences de densités entre les différentes études.
- **L'unité de mesure de la densité utilisée :** unités Hounsfield (UH) [90,92,93,97,101,119,120,122,123,132,133,136,141,145,148,159,176,177] ou niveaux de gris (GV)[105,121].
- **Le choix du logiciel**[97,101] : **de Oliveira et al.**[97] ont indiqué que l'utilisation de différents logiciels peut fournir des valeurs de densités différentes à partir des mêmes images CT, mais une forte corrélation a été retrouvée entre les densités mesurées à l'aide de deux logiciels distincts (eFilm® et DentaCT®, r de Pearson = 0.95, $p < 0.001$).
- **Le protocole de mesure de la densité :** en raison de la densité plus élevée de l'os cortical, les études mesurant des densités osseuses trabéculaires[92,93,97,101,105,123,140,141] ont obtenu des résultats inférieurs à ceux rapportés par les études mesurant des densités cortico-trabéculaires[90,93,119,120,122,132,133,136,140,145,148,159,176].

Étude	Échantillon et édentement	Examen radiologique	Logiciel	Type de mesure de la densité	Nombre de sites du maxillaire antérieur	Densité osseuse moyenne ± SD
ETUDE N°1[171]	**Complet**	**CBCT**	**DTX studio®**	**Cortico-trabéculaire** : points de mesure de 1 mm de diamètre autour de l'implant	Total : 414	696 ± 129 UH
					Incisive : 138	729 ± 140 UH
					Canine : 138	703 ± 139 UH
					Prémolaire : 138	655 ± 142 UH
ETUDE N°2	**Complet**	**CBCT**	**DTX studio®**	**Cortico -trabéculaire** : points de mesure de 1 mm de diamètre autour de l'implant	Total : 600	667 ± 143 UH
					Incisive : 200	711 ± 158 UH
					Canine : 200	671 ± 151 UH
					Prémolaire : 200	618 ± 152 UH
				Trabéculaire : à l'apex de l'implant	600	534 ± 183 UH
Singh et al. 2022[177]	Partiel	**CBCT**	*Non précisé*	*Non précisé*	*Non précisé*	786.1 UH
Haghanifar et al. 2022[159]	*Non précisé*	**CBCT**	Kaveh surgical guide et Ondemand 3D	**Cortico-trabéculaire**	Total : 6 *(1 sujet)*	
					Incisive latérale : 2	622 UH
					Canine : 2	438 UH
					1ère prémolaire : 2	408 UH
Wang et al., 2020[105]	Partiel	**CBCT**	Mimics®	**Trabéculaire** : cylindre	42	542 ± 208 GV
Almasoud et al., 2016[145]	Partiel	**CBCT**	Simplant®	**Cortico-trabéculaire** : 1 mm autour de l'implant	38	314 ± 191 UH
Hao et al., 2014[122]	Partiel ou **complet**	**CBCT**	Simplant®	**Cortico-trabéculaire** : 1 mm autour de l'implant	29	460 ± 136 UH
González-García et Monje, 2013[140]	Partiel	**CBCT**	**Nobel Guide®**	**Axiale** le long de l'axe de l'implant	15	445 ± 205
				Corticale		628 ± 164
				Trabéculaire		408 ± 183
Wakimoto et al., 2012[92]	Partiel ou **complet**	CT	Simplant®	**Trabéculaire** : zone carrée	Total : 33	
					Incisive : 23	517 ± 226 UH
					Canine : 10	345 ± 143 UH
Fuster-Torres et al., 2011[121]	Partiel ou **complet**	**CBCT**	Implametric®	**Trabéculaire** ou **Cortico-trabéculaire** : densité moyenne de la zone implantaire	9	560 ± 107 GV
Hiasa et al., 2011[176]	*Non précisé*	CT	Simplant®	**Cortico-trabéculaire** : 1 mm autour et à l'intérieur de l'implant	11	641 ± 173 UH
Fuh et al., 2010[101]	Partiel ou **complet**	CT	Mimics®	**Trabéculaire** : cylindre	47	516 ± 132 UH
De Oliveira et al., 2008[97]	Partiel ou **complet**	CT	eFilm®	**Trabéculaire**	6	287 ± 181 UH
			Denta CT®	**Trabéculaire**		370 ± 177 UH

Étude	Échantillon et édentement	Examen radiologique	Logiciel	Type de mesure de la densité	Nombre de sites du maxillaire antérieur	Densité osseuse moyenne ± SD
Turkyilmaz et McGlumphy, 2008a[120]	Partiel ou **complet**	CT	Siemens®	**Cortico-trabéculaire**	70	591 ± 176 UH
Turkyilmaz et al., 2008b[133]	Partiel ou **complet**	CT	StentCad® ou Siemens®	**Cortico-trabéculaire** : 1 mm autour d'un rectangle ou site implantaire	102	708 ± 277 UH
Turkyilmaz et al., 2007a[119]	Partiel ou **complet**	CT	Siemens®	**Cortico-trabéculaire** : rectangle	24	716 ± 190 UH
Turkyilmaz et al., 2007b[132]	Partiel ou **complet**	CT	Siemens®	**Cortico-trabéculaire** : rectangle + 1 mm d'os environnant	45	732 ± 16 UH
Turkyilmaz et al., 2006[136]	Partiel ou **complet**	CT	Siemens®	**Cortico-trabéculaire** : rectangle	31	751 ± 181 UH
Shapurian et al., 2006[90]	*Non précisé* **Cadavres** humains	CT	Simplant®	**Cortico-trabéculaire** : à 0.25-1 mm du périmètre de l'implant	44	517 ± 177 UH
Todisco et Trisi, 2005[123]	*Non précisé*	CT	Simplant®	**Trabéculaire** : cylindre	*Non précisé*	399 ± 211 UH
Lindh et al., 2004[93]	Partiel ou **complet**	CT	*Non précisé*		Total : 54	
				Cortico-trabéculaire	Incisive : 18	500 ± 87 UH
					Canine Droite : 18 Canine G : 18	489 ± 83 UH 477 ± 85 UH
					Prémolaire Droite : 18 Prémolaire G : 18	356 ± 97 UH 390 ± 105 UH
				Trabéculaire	Incisive : 18	432 ±122 UH
					Canine Droite : 18 Canine Gauche : 18	397 ± 138 UH 360 ± 131 UH
					Prémolaire Droite : 18 Prémolaire Gauche : 18	265 ± 106 UH 314 ± 141 UH
Fanuscu et Chang, 2004[141]	*Non précisé*, **Cadavre** humain	CT	Logiciel du CT	**Trabéculaire**	1	389 UH
Norton et Gamble, 2001[148]	Partiel ou **complet**	CT	Simplant	**Cortico-trabéculaire** : rectangle et 1mm d'os environnant	42	696 ± 244 UH

CBCT : tomographie volumique à faisceau conique, CT : tomographie assistée par ordinateur, GV : valeurs de gris, SD : écart-type, UH : Unités Hounsfield

Tableau 18 : Méthodologie et résultats des études précédentes ayant analysé les densités de sites édentés du maxillaire antérieur

Dans les **ÉTUDES N°1 et N°2**, les densités osseuses (**cortico-trabéculaires**) moyennes de la zone pré-sinusienne du maxillaire édenté étaient respectivement de 696 ± 129 UH et 667 ± 143 UH. Ces résultats sont supérieurs à ceux rapportés par d'autres études portant sur la densité cortico-trabéculaire du maxillaire antérieur à partir de CBCT de patients partiellement ou complètement édentés (Tableau 17) :

- Dans l'étude de **Hao et al.**[122], la densité osseuse moyenne de 29 sites du maxillaire antérieur était 460 ± 136 UH. Ce grand écart de résultats nous conduit à ne pas classer nos résultats selon l'échelle quantitative établie par **Hao et al.**[122] et basée sur la classification de Lekholm et Zarb[103] (Tableau 2), car les densités moyennes obtenues dans les **ÉTUDES N°1 et N°2** sont largement supérieures à celles obtenues par **Hao et al.**[122] (différence supérieure à 200 UH).
- **Fuster-Torres et al.**[121] ont rapporté une densité osseuse moyenne du maxillaire antérieur de 560 ± 107 GV, avec seulement 9 sites.

Dans l'**ÉTUDE N°2**, la densité osseuse moyenne apicale **trabéculaire** de la zone pré-sinusienne du maxillaire édenté était de 534 ± 183 UH, à partir de 600 sites. Ce résultat est comparable à ceux d'autres études portant sur la densité trabéculaire du maxillaire antérieur à partir de CBCT de patients partiellement ou complètement édentés (Tableau 17) :

- **Wang et al.**[105] ont rapporté une densité osseuse moyenne de 542 ± 208 GV à partir 42 sites du maxillaire antérieur : nos résultats sont très proches de ceux de **Wang et al.**[105].
- Dans l'étude de **González-García et Monje**[140], la densité osseuse moyenne de 15 sites du maxillaire antérieur était de 408 ± 183.

Les différences avec les études de **Hao et al.**[122], **Fuster-Torres et al.**[121] et **González-García et Monje**[140] pourraient être dues à des différences dans les caractéristiques démographiques des échantillons étudiées (âge, sexe) [119,120,122,133], à des différences liées aux paramètres d'acquisition des machines CBCT[87,105,115,123], à l'utilisation de différents logiciels[97,101], à l'emploi de différentes méthodes de mesure de la densité et à une répartition différente des sites implantaires[119].

3.3.3 Variabilité inter-individuelle : étude de facteurs anthropologiques

3.3.3.1 Influence du sexe des individus

Les **ÉTUDES N°1 et N°2** ont mis en évidence des résultants divergents concernant la variabilité des densités osseuses en fonction du sexe :

- Dans l'**ÉTUDE N°1,** la densité osseuse moyenne de la zone pré-sinusienne des hommes était significativement supérieure à celle des femmes.
- Dans l'**ÉTUDE N°2,** il n'y avait pas de différence significative entre la densité osseuse moyenne de la zone pré-sinusienne des hommes et celle des femmes, mais la moyenne des densités osseuses trabéculaires apicales des hommes était significativement supérieure à celle des femmes.

De nombreux auteurs ont étudié l'influence du sexe sur la densité osseuse des mâchoires : leurs résultats sont présentés dans le tableau 19 (page 122). Les résultats sont assez contradictoires.

Certains auteurs ont mis en évidence des différences significatives entre la densité osseuse des mâchoires des hommes et celle des femmes :

- **Ulm et al. (1999)**[138] ont étudié la structure de l'os trabéculaire de maxillaires édentés issus de cadavres humains à partir d'examens histomorphométriques de biopsies osseuses prélevées dans les régions incisive, prémolaire et molaire : ils ont mis en évidence des différences significatives entre hommes et femmes. Les femmes présentaient une quantité plus faible d'os spongieux, avec une connectivité plus faible que les hommes. Dans la région antérieure (incisive latérale), les différences entre les deux sexes étaient significatives pour tous les paramètres histomorphométriques étudiés. Les auteurs ont suggéré que ces différences étaient dues à une perte osseuse post-ménopausique plus importante chez les femmes.
- A plusieurs reprises, les équipes de **Turkyilmaz (2006, 2007, 2008)**[119,120,130,132,133,136] ont mis en évidence que les densités osseuses cortico-trabéculaires des hommes, mesurées par CT, étaient significativement supérieures à celles des femmes ($p < 0.001$[119,120,130,136] ou $p < 0.05$[133]). Selon les auteurs, ces différences n'étaient liées ni à la répartition des sites implantaires entre les classes de sexe, ni à l'âge des patient. Mais elles pourraient être expliquées par des différences hormonales chez les femmes et une masse osseuse généralement plus élevée chez les hommes.
- **Hiasa et al. (2011)**[176] ont mis en évidence que la densité osseuse cortico-trabéculaire mesurée par CT chez les hommes était significativement supérieure à celle des femmes ($p < 0.01$).
- **Wakimoto et al. (2012)**[92] ont retrouvé que la densité osseuse trabéculaire mesurée par CT des hommes était significativement supérieure à celle des femmes ($p = 0.001$).

- **Ling et al. (2014**)[91] ont mis en évidence de multiples caractéristiques de texture de l'os trabéculaire des mâchoires à partir de CBCT, en corrélation avec les variations croisées du sexe sur les modèle trabéculaires.
- **Rai et al. (2020)**[179] ont mis en évidence que les densités osseuses corticales et trabéculaires mesurées par CBCT chez les hommes étaient significativement supérieures à celles mesurées chez les femmes (p = 0.047 et p = 0.040, respectivement).

D'autres auteurs n'ont pas mis en évidence de différences de densités osseuses des mâchoires selon le sexe ; toutes ces études étaient basées sur la mesure de la densité cortico-trabéculaire :

- Dans une étude portant sur des examens CT de cadavres humains, **Shapurian et al. (2006)**[90] n'ont retrouvé aucune association entre la densité osseuse cortico-trabéculaire et le sexe (p = 0.326).
- Dans une étude basée sur des CBCT des mâchoires, **Fuster-Torres et al. (2011)**[121] n'ont pas mis en évidence de différence de densité entre les hommes et les femmes ($p \geq 0.05$).
- **Almasoud et al. (2016)** [145] n'ont pas retrouvé de différence significative entre les densités cortico-trabéculaires mesurées à partir de CBCT de 50 hommes et 50 femmes de la population saoudienne.

Pour conclure, **il semblerait que le sexe ait une influence sur la densité osseuse trabéculaire.** Les études[90,121,145] ne montrant d'influence du sexe sur la densité osseuse étaient basées sur des mesures cortico-trabéculaires : en fonction de la résorption osseuse, la mesure de la densité a pu être effectué au niveau de l'os cortical ou de l'os trabéculaire, ce qui rend difficile la comparaison entre les sujets. C'est pour cette raison que dans l'**ÉTUDE N°2,** l'influence du sexe sur la densité apicale **trabéculaire** a également été étudiée et a révélé une densité significativement supérieure chez les hommes par rapport aux femmes. De plus, les études précédentes incluaient des sites variés du maxillaire et de la mandibule en fonction des individus ; ainsi, la répartition des sites pouvait ainsi être hétérogène selon les sujets. En revanche, les **ÉTUDES N°1 et N°2** portaient sur les mêmes sites (incisifs, canins, prémolaires du maxillaire édenté) pour tous les individus : la répartition des sites était donc homogène et les résultats sont donc plus facilement comparables.

Cette différence de densité entre hommes et femmes pourrait être expliquée par les **variations hormonales chez les femmes et à une masse osseuse plus élevée chez les hommes.**[119,120,130,132,133,136]

Étude	Examen radiologique	Nombre de sites		Âge moyen ± sd (ans)	Nombre de sujets		Type de mesure de densité	Analyse statistique selon le sexe
		Max	Mand		F	H		
ETUDE N°1[171]	CBCT	414	0	60 ± 10	30	39	Cortico-trabéculaire	Densité osseuse de la zone pré-sinusienne des H significativement supérieure à celle des F
ETUDE N°2	CBCT	600	0	62 ± 9	42	58	Cortico-trabéculaire	Absence de différence entre densité osseuse de la zone pré-sinusienne des H et des F
							Trabéculaire	Densité osseuse apicale des H significativement supérieure à celle des F
Rai et al., 2020[179]	CBCT	*Non renseigné*		*Non renseigné*	*Non renseigné*		Corticale Trabéculaire	Densités osseuses corticales et trabéculaires des H significativement supérieures à celle des F
Almasoud et al., 2016[145]	CBCT	74	146	36 ± 11	50	50	Cortico-trabéculaire	Absence de différence significative de densité osseuse entre H et F
Wakimoto et al., 2012[92]	CT	33	0	54 ± 14	20	13	Trabéculaire	Densité osseuse des H significativement supérieure à celle des F
Fuster-Torres et al., 2011[121]	CBCT	34	48	54 ± 8	15	7	Trabéculaire ou Cortico-trabéculaire	Absence de différence significative de densité entre H et F
Hiasa et al., 2011[176]	CT	31	73	H : 56 ± 12 F : 57 ± 11	33	18	Cortico-trabéculaire	Densité osseuse des H significativement supérieure à celle des F
Turkyilmaz et McGlumphy, 2008a[120]	CT	70	70	55 ± 11	55	56	Cortico-trabéculaire	Densité osseuse des H significativement supérieure à celle des F
Turkyilmaz et al., 2008b[133]	CT	199	173	51 ± 11	71	69		
Turkyilmaz et McGlumphy, 2008c[130]	CT	20	80	56 ± 11	20	22		
Turkyilmaz et al., 2007a[119]	CT	45	86	52 ± 12	39	33		
Turkyilmaz et al., 2007b[132]	CT	100	130	52 ± 12	60	48		
Turkyilmaz et al., 2006[136]	CT	59	99	52 ± 13	48	37		
Shapurian et al., 2006[90]	CT	99	120	18-89	65	36	Cortico-trabéculaire	Absence de corrélation entre densité et sexe
Ulm et al 1999[138]	HBO	56	0	H : 70 ± 17 F : 74 ± 7	29	23	Paramètres histomorphométriques	Différences significatives entre paramètres histomorphométriques des H et des F

sd : écart-type, CT : tomographie assistée par ordinateur, CBCT : tomographie volumique à faisceau conique, HBO : histomorphométrie des biopsies osseuses, Max : maxillaire, Mand : mandibule, H : hommes, F : femmes

Tableau 19 : Méthodologie et résultats des études précédentes ayant analysé l'influence du sexe sur les densités des mâchoires

Concernant l'influence du sexe sur la hauteur de crête, la **longueur des implants virtuels** a permis d'estimer de la hauteur de crête dans l'**ÉTUDE N°2**. Les longueurs des implants étaient choisies en fonction du volume osseux disponible, tout en respectant les distances de sécurité avec les obstacles anatomiques : ainsi, la longueur des implants virtuels reflétait le **degré de résorption verticale** de la crête osseuse. Dans l'**ÉTUDE N°2** la longueur moyenne des implants virtuels des hommes était significativement supérieure à celle des femmes. Ainsi, **chez les femmes, la hauteur de crête du maxillaire antérieur édenté était plus faible : ce résultat suggère que la résorption verticale serait plus importante que celle des hommes**.

Ces résultats sont en accord avec les études précédentes :

- **Güler et al. (2005)**[180] ont mesuré les hauteurs crestales de 173 maxillaires édentés sur des radiographies panoramiques : ils ont mis en évidence que les hauteurs mesurées au niveau inter-incisif et au niveau de la première prémolaire étaient significativement plus grandes chez les hommes édentés que chez les femmes édentées.
- **Andrés-Veiga et al. (2012)** ont mesurés la hauteur crestale de 308 sites édentés localisés dans le prémaxillaire : ils ont mis en évidence que les crêtes osseuses des femmes étaient significativement plus petites que celles des hommes.
- Dans une étude menée sur 103 CBCT de mandibules édentées, **Mense et al. (2021)**[175] ont mis en évidence que la réduction de la hauteur de la symphyse mandibulaire était liée au sexe des individus, avec une hauteur de symphyse plus faible chez les femmes.

Ainsi, comme au niveau de la symphyse mandibulaire, **la résorption verticale du maxillaire antérieur édenté serait plus importante chez les femmes**

3.3.3.1 Influence de l'âge des individus

Les **ÉTUDES N°1 et N°2** n'ont pas mis en évidence de corrélation entre la densité osseuse moyenne de la zone pré-sinusienne et l'âge des individus, tous sexes confondus. En revanche, il existait une **faible corrélation négative** statistiquement **significative entre la densité osseuse moyenne (cortico-spongieuse) de la zone pré-sinusienne et l'âge des femmes** dans les deux études.

Dans l'**ÉTUDE N°2,** l'analyse de la densité osseuse trabéculaire apicale a mis en évidence une **corrélation faible négative** statistiquement significative entre la **densité osseuse trabéculaire apicale et l'âge chez les femmes**, et une **corrélation modérée négative** statistiquement significative entre la densité trabéculaire mesurée **au niveau de l'apex des sites prémolaires et l'âge chez les femmes.**

Le vieillissement altère la structure de l'os alvéolaire.[30,31] Lors du vieillissement, la réduction du nombre de cellules osseuses (ostéocytes et ostéoblastes) et l'altération de leur fonction entrainent une diminution progressive de la densité minérale, une réduction de la formation osseuse et un amincissement des travées osseuses.[5,8] Plusieurs auteurs ont étudié l'influence de l'âge sur la densité osseuse des mâchoires : leurs résultats sont présentés dans le tableau 20 (page 127).

En accord avec les **ÉTUDES N°1 et N°2**, certains auteurs n'ont pas trouvé de corrélation entre densité et âge, ou de différence significative de densité en fonction de l'âge, tous sexes confondus :

- Dans une étude menée sur des cadavres humains, **Shapurian et al. (2006)**[90] n'ont retrouvé aucune association entre la valeur de densité osseuse et l'âge (r = 0.099, p = 0.146).
- **Wakimoto et al. (2012)**[92] n'ont pas mis en évidence de différence significative de densité trabéculaire entre sujets jeunes (21-50 ans) et sujets âgés (51-74 ans).
- **Rai et al (2020)**[179] n'ont pas mis en trouvé de différence statistiquement significative entre les densités osseuses moyennes corticales et spongieuses de trois groupes d'âges : 31-50 ans, 51-70 ans et supérieur à 70 ans (p = 0,642 et p= 0,593 respectivement).

Avant les ÉTUDES N°1 et N°2, seules deux études ont analysé la relation entre la densité osseuse et l'âge en fonction du sexe à partir d'examens radiologiques :

- **Wakimoto et al. (2012)**[92] ont mis en évidence une différence statistiquement significative entre les groupes d'âge chez les femmes. Les femmes jeunes (21-50 ans) présentaient une densité osseuse trabéculaire significativement supérieure à celle des femmes âgées (51-74 ans). Selon ces auteurs, cette corrélation significative pourrait refléter les changements ostéoporotiques dans le groupe des femmes ménopausées.

- **Ling et al. (2014**)[91] ont étudié les différences de structure de l'os trabéculaire en fonction de l'âge (supérieur ou inférieur à 40 ans) et du sexe. Les zones trabéculaires étudiées étaient situées à l'apex des prémolaires maxillaires, des incisives latérales mandibulaires, des premières molaires mandibulaires et des condyles. De nombreuses caractéristiques de texture sur les CBCT (149 sur 432) étaient significativement corrélées aux variations croisées de l'âge et du sexe. Ces auteurs suggèrent l'utilisation du CBCT pour une analyse trabéculaire avancée et comme outil de dépistage de l'ostéoporose au niveau des mâchoires.

En revanche, trois études précédentes ont révélé des résultats en désaccord avec les **ÉTUDES N°1 et N°2** :

- **Ulm et al. (1999)**[138] ont étudié la structure de l'os trabéculaire de maxillaires édentés issus de cadavres humains à l'aide d'examens histomorphométriques de biopsies osseuses prélevées dans les régions de l'incisive latérale, de la première prémolaire et de la première molaire. Il n'ont pas retrouvé de corrélation entre les paramètres histomorphométriques et l'âge chez les hommes ou chez les femmes. Cependant, l'âge moyen de l'échantillon était supérieur à 70 ans, ce qui limitait l'interprétation de ces résultats selon les auteurs.
- Dans quatre études successives, **Turkyilmaz et al**.[119,132,133,136] ont trouvé des différences statistiquement significatives de densités entre deux classes d'âge : la valeur moyenne des densités osseuses des « sujets jeunes » [22 ou 23-50 ans] était significativement inférieure à celle des « sujets âgés » [51-76 ans] ($p < 0.001$). Cependant, les auteurs ont suggéré que cette différence serait liée à une répartition hétérogène des sites implantaires dans les classes d'âges : le groupe « sujets âgés » comprenait plus de sites antérieurs mandibulaires, avec une densité osseuse élevée, entraînant des valeurs d'UH plus élevées.
- **Fuster-Torres et al. (2011)**[121] ont mis en évidence que les densités osseuses moyennes des sujets jeunes (41-50 ans) étaient significativement supérieures à celles des sujets âgés (plus de 50 ans), mais selon les auteurs, cette différence pourrait être due à la faible différence d'âge entre les deux groupes.

Les résultats des **ÉTUDES N°1 et N°2** suggèrent **que la densité osseuse du maxillaire antérieur édenté pourrait refléter les changements relatifs à l'ostéoporose, qui est liée à l'âge chez les femmes.**

Plusieurs auteurs[181,182] ont suggéré que le CBCT pourrait être un outil utile pour le dépistage d'une faible densité minérale osseuse ou d'une ostéoporose chez les femmes post-ménopausées, mais ces études étaient menées à partir de mesures au niveau des vertèbres cervicales ou de la mandibule. Une récente revue de littérature (2023)[183], incluant 16 études, a confirmé les perspectives du CBCT en tant qu'outil diagnostic de dépistage de l'ostéoporose.

La DXA est la méthode de référence (*gold standard*) pour la mesure de la densité minérale osseuse squelettique et pour le diagnostic de l'ostéoporose au niveau squelettique.[85,87,89,93,98] .

- En 2004, **Lindh et al. (2004)**[93] ont trouvé une corrélation significative entre la densité osseuse mesurée par CT quantitative au niveau de sites édentés des incisives maxillaires et la densité du rachis lombaire mesurée par DXA.
- De même, **Merheb et al. (2015)**[85] ont montré une corrélation significative entre la densité osseuse des sites édentés du maxillaire mesurée par CT et la densité osseuse squelettique de la colonne vertébrale mesurée par DXA.
- Plus récemment, en **2019**, **Shokri et al.**[87] ont mis en évidence une corrélation entre la densité osseuse mesurée par CBCT au niveau des sites maxillaires (de l'incisive à la tubérosité) et la densité osseuse du squelette (moelle osseuse lombaire et col du fémur) mesurée par DXA. Selon ces auteurs, cette corrélation pourrait être liée à une irrigation sanguine plus riche du maxillaire par rapport à la mandibule en raison d'un plus grand volume d'os spongieux, ce qui affecterait davantage le maxillaire aux changements hormonaux, qui constituent eux-mêmes des facteurs de risque de l'ostéoporose.

Ainsi, l'étude des densités osseuses du prémaxillaire, en particulier la densité trabéculaire mesurée au niveau des sites prémolaires (en avant de la paroi antérieure du sinus) pourrait être un **outil pour la détection précoce de l'ostéoporose chez les femmes : les patientes pourraient être adressées pour une DXA afin de confirmer une suspicion de faible densité osseuse.**

Concernant l'influence de l'âge sur la hauteur de crête, la **longueur des implants virtuels** a permis d'estimer de la hauteur de crête dans l'**ÉTUDE N°2**. Il n'y avait pas de corrélation entre la longueur moyenne des implants virtuels et l'âge, quel que soit le sexe des patients. Ces résultats suggèrent que **la résorption verticale ne serait pas influencée par l'âge des individus**.

Étude	Examen	Nombre de sites		Âge moyen ± sd (ans)	Classes d'âge (ans)		Nombre de sujets		Type de mesure de la densité	Différences selon l'âge
		Max	Mand		Jeunes	Âgés	H	F		
ETUDE N°1[171]	CBCT	414	0	60 ± 10	*Pas de classes d'âge*		39	30	Cortico-trabéculaire	**Absence de corrélation** densité-âge **Corrélation** densité-âge chez les **F**
ETUDE N°2	CBCT	600	0	62 ± 9	*Pas de classes d'âge*		42	58	Cortico-trabéculaire Trabéculaire	**Absence de corrélation** densité-âge **Corrélation** densité-âge chez les **F**
Rai et al., 2020[179]	CBCT	*Non renseigné*		*Non renseigné*	[31-50]	[50-70] [70- ∞]	*Non renseigné*		Corticale Trabéculaire	**Absence de différence** significative entre les 3 groupes d'âge
Wakimoto et al., 2012[92]	CT scan	33	0	54 ± 14	[21-50]	[51-74]	13	20	Trabéculaire	**Absence de différence** significative entre sujets jeunes et âgés
Fuster-Torres et al., 2011[121]	CBCT	34	48	54 ± 8	[41-50]	[50- ∞]	7	15	Trabéculaire ou Cortico-trabéculaire	Densité des sujets **jeunes significativement supérieure** à celle des sujets âgés
Turkyilmaz et al., 2008b[133]	CT scan	199	173	51 ± 11	[22-50]	[51-76]	69	71	Cortico-trabéculaire	Densité des sujets **jeunes significativement inférieure** à celle des sujets âgés
Turkyilmaz et al., 2007a[119]	CT scan	45	86	52 ± 12	[23-50]	[51-76]	33	39		
Turkyilmaz et al., 2007b[132]	CT scan	100	130	52 ± 12	[23-50]	[51-76]	48	60		
Turkyilmaz et al., 2006[136]	CT scan	59	99	52 ± 13	[23-50]	[51-76]	37	48		
Shapurian et al., 2006[90]	CT scan	99	120	18-89	*Pas de classes d'âge*		36	65	Cortico-trabéculaire	**Absence de corrélation** densité-âge
Ulm et al. 1999[138]	HBO	56	0	H : 70 ± 17 F : 74 ± 7	*Pas de classes d'âge*		23	29	Paramètres histomorphométriques	**Absence de corrélation** entre mesures histomorphométriques et âge (Sous-groupes selon le sexe)

sd : écart-type, CT : tomographie assistée par ordinateur, CBCT : tomographie volumique à faisceau conique, HBO : histomorphométrie des biopsies osseuses, Max : maxillaire, Mand : mandibule, H : hommes, F : femmes

Tableau 20 : Méthodologie et résultats des études ayant analysé l'influence de l'âge sur les densités des mâchoires

3.3.3.2 Influence de la pathologie diabétique

L'**ÉTUDE N°2** n'a pas mis en évidence de différence statistiquement significatives entre les densités (densités moyennes de la zone pré-sinusienne ou densités moyennes apicales trabéculaires) de 10 individus diabétiques et celles de 77 individus non diabétiques.

A l'opposé, plusieurs études ont retrouvé des différences de densité en fonction du statut vis-à-vis de la pathologie diabétique :

- Une **revue de littérature de 2019**[184] a mis en évidence que les études portant sur les patients édentés diabétiques présentaient une structure osseuse trabéculaire moins dense (densité osseuse radiologique, $p < 0,05$).
- Dans une étude menée à partir de CBCT du maxillaire et de la mandibule, **Rai et al. (2020)**[179] n'ont pas mis en évidence de différence statistiquement significative entre les densités corticales des sujets diabétiques (158 sites) et celles des sujets non diabétiques (164 sites). En revanche, la densité spongieuss des sujets diabétiques était significativement inférieure à celle des sujets non diabétiques ($p < 0.001$).

En revanche, nos résultats sont en accord avec ceux de **Jolly et al. (2015)**[185] Ces auteurs ont mesuré la densité osseuse à partir de CT de 40 sujets édentés totaux bimaxillaires, et n'ont pas mis en évidence de différences significatives entre les densités osseuses (trabéculaires ou corticales) de 20 individus diabétiques de type II équilibrés et celles de 20 individus non diabétiques, au maxillaire et à la mandibule.

La taille réduite du sous-échantillon des individus diabétiques (10 individus) limite l'interprétation des résultats de l'**ÉTUDE N°2** et pourrait expliquer les désaccords avec certains résultats de la littérature. Une étude sur un échantillon plus grand serait nécessaire.

3.3.3.3 Influence de la durée d'édentement

L'**ÉTUDE N°2** n'a pas mis en évidence de différence statistiquement significatives entre les densités (densités moyennes de la zone pré-sinusienne ou densités moyennes apicales trabéculaires) de 34 individus édentés depuis moins d'un an et celles de 14 individus édentés depuis plus d'un an.

Bien que la perte osseuse des mâchoire édentées présente un schéma cohérent, la résorption et la forme de la crête sont influencées par la durée d'édentement.[94] En effet, c'est au cours de la première année après avulsion dentaire que la résorption osseuse est la plus importante, et en particulier les trois premiers mois.[6,15,49–51] C'est pour cette raison que la limite entre les deux sous-échantillons a été fixée à un an.

L'influence de la durée d'édentement sur les densités osseuses des maxillaires n'est pas documentée dans la littérature scientifique. De manière générales, les études s'intéressaient plutôt à l'influence de la durée d'édentement sur le degré de résorption.[186]

La taille réduite du sous-échantillon des individus édentés depuis plus d'un an (14 individus) limite l'interprétation des résultats de l'**ÉTUDE N°2** : une étude plus approfondie portant sur un échantillon plus grand serait nécessaire.

3.3.3.4 Influence de la résorption (hauteur de la crête osseuse)

L'influence de la **hauteur la crête osseuse** a été étudiée à partir de la **longueur moyenne des six implants virtuels**.

L'**ÉTUDE N°2** n'a pas mis en évidence de différence statistiquement significatives entre les densités (densités moyennes de la zone pré-sinusienne ou densités moyennes apicales trabéculaires) des 49 individus du sous-groupe [7-10] et celles des 51 individus du sous sous-groupe [10-15]).

En revanche, chez les femmes, les densités osseuses moyenne de la zone pré-sinusiennes et les densités moyennes apicales trabéculaires du sous-groupe [7-10] étaient significativement supérieures à celles du sous-groupe [10-15]. Cela signifiait que **la densité osseuse des femmes présentant une crête résorbée était significativement supérieure à celle des femmes présentant une crête peu résorbée**.

3.3.3.5 Étude multivariée des variables quantitatives : âge taille, poids, consommation de tabac, âge, longueur moyenne des implants virtuels

Dans L'**ÉTUDE N°2**, quel que soit l'échantillon (échantillon total, hommes, femmes), il existait une **forte corrélation positive** statistiquement significative entre les densités osseuses moyennes de la zone pré-sinusienne et les densités osseuses moyennes apicales trabéculaires.

Sur l'échantillon total (tous sexes confondus), il n'existait pas corrélation statistiquement significative entre les densités (densités moyennes de la zone pré-sinusienne ou densités moyennes apicales trabéculaires) et les variables quantitatives étudiées.

En revanche, **chez les femmes**, l'**ÉTUDE N°2** a révélé une **corrélation négative modérée statistiquement significative** entre les densités (densités moyennes de la zone pré-sinusienne ou densités moyennes apicales trabéculaires) et la longueur moyenne des implants virtuels (qui correspond à la hauteur de crête osseuse). **Il semblerait donc que, chez les femmes, la densité osseuse de la zone pré-sinusienne soit affectée par la résorption de la crête osseuse.**

Dans l'ACP, les variables « Taille » et « Poids » représentaient la plus grande contribution à la dimension 1 ; les variables « Densité trabéculaire apicale », « Longueur implant » et « TabacPA » représentaient la plus grande contribution à la dimension 2. Ces quatre variables étaient bien représentées sur le graphe des variables.

La proximité des variables « Densité trabéculaire apicale » et « Densité globale » sur le graphe des variables indiquait que ces deux variables étaient assez corrélées entre elles. Ce résultat s'inscrit dans la continuité des résultats de la matrice des corrélation. Le graphe des individus semble indiquer des relations entre les variables :

- « Taille » et « Poids »
- « Longueur implant » et « TabacPA ».

En revanche, la variable « Taille » n'était pas en relation avec la variable « Densité trabéculaire apicale ». **Il semblerait ainsi que la densité osseuse de la zone pré-sinusienne ne soit pas affectée par la taille des individus**.

Sur le graphe des variables, la situation opposée entre « Densité trabéculaire apicale » et « Longueur implant » suggère une **relation opposée entre la densité trabéculaire et la longueur moyenne des implants virtuels.** Cette relation laisse supposer que la densité osseuse pourrait être influencée négativement par la **hauteur d'os crestal**, et donc par la résorption osseuse verticale, en particulier chez les femmes (conformément à la matrice de corrélation chez les femmes).

Il serait intéressant de d'approfondir ces études en mesurant les hauteurs et épaisseurs d'os crestal pour chaque site, à partir d'un protocole standardisé afin d'étudier l'influence de la résorption osseuse horizontale et verticale sur la densité osseuse des sites du maxillaire édenté. En effet, les implants virtuels étant disponibles dans des dimensions standardisées (7, 8, 10, 11.5, 13, 15), leurs longueurs étaient basées sur un écart de 1 à 2 mm : les mesures obtenues pourraient ainsi manquer de précision. De plus, la mesure de la longueur des implants virtuels ne comptabilisait pas la distance de sécurité vis-à-vis des structures anatomiques (sinus, fosses nasales…).

De même, la situation opposée entre « Densité trabéculaire apicale » et « TabacPA » suggère une **relation opposée entre la densité trabéculaire et la consommation de tabac exprimée en paquet-années.** Cependant, la matrice de corrélation n'a pas mis en évidence de corrélation significative entre ces deux variables. Nous pouvons ainsi supposer que la consommation de tabac pourrait avoir une influence sur la densité osseuse, mais cette influence serait moindre comparée aux changements de densité liés à la perte des dents et aux autres facteurs (tels que l'âge, le sexe…). Dans une étude menée à partir de CBCT, **Almasoud et al**.[145] n'ont pas mis en évidence de différences de densités des mâchoires entre 25 sujets fumeurs et 75 sujets non-fumeurs. En raison des valeurs manquantes et du caractère rétrospectif de l'étude, la taille de l'échantillon limite l'interprétation de ces résultats. Une étude prospective sur un échantillon plus grand serait nécessaire afin d'analyser l'influence de la consommation de tabac. De plus, la consommation de tabac en paquet-années peut se heurter à un biais de mémorisation chez les sujets âgés ou chez les sujets dont la consommation a considérablement varié au cours de la vie.

3.3.4 Variabilité intra-individuelle

3.3.4.1 Variabilité de la densité osseuse en fonction de la localisation sur l'arcade (sens transversal)

Dans les **ÉTUDES N°1 et N°2**, les différences de densité osseuse cortico-trabéculaires entre les trois régions du maxillaire édenté étaient significatives, la région incisive fournissant une valeur de densité osseuse moyenne plus élevée, suivie de la région canine et de la région prémolaire.

Dans l'**ÉTUDE N°2**, la densité trabéculaire apicale de la région incisive était statistiquement supérieure à celles des régions canine et prémolaire, mais il n'y avait pas de différence statistiquement significative entre les densités trabéculaires apicales des régions canine et prémolaire. Cette différence de densité trabéculaire et donc de structure pourrait être expliquée par une origine embryologique distincte. En effet, d'un point de vue embryologique, l'os prémaxillaire, qui supporte les incisives, est issu du bourgeon nasofrontal, alors que l'os maxillaire, qui supporte les canines, prémolaires et molaires est issu du bourgeon maxillaire.

Seuls **Wakimoto et al**.[92] ont comparé les densités entre différents sites du maxillaire antérieur : les zones incisives présentaient des densités trabéculaires significativement plus élevées que celles des zones canines ($p = 0.042$). Les résultats des **ÉTUDES N°1 et N°2** sont donc en accord avec ceux de **Wakimoto et al**.[92].

3.3.4.2 Variabilité de la densité osseuse dans le sens vertical

Dans les **ÉTUDES N°1 et N°2**, les différences de densité osseuse entre les trois zones de l'implant (apex, corps, col) étaient statistiquement significatives : la densité osseuse moyenne était décroissante du col vers l'apex.

Seules deux études[117,127], basées un même échantillon issus de **cadavres humains**, ont mesuré les densités osseuses au niveau des trois portions de l'implant (col, corps, apex), mais aucune de ces études n'a effectué de comparaison statistique entre ces mesures. A ce jour, **aucune étude n'a analysé les différences statistiques de densités du maxillaire dans le sens vertical**.

Shahlaie et al. (2003)[127] ont étudié les densités en différents points de la crête grâce à la CT quantitative au sein de sites implantaires de cadavres humains. Ils ont mesuré la densité osseuse moyenne en UH sur des coupes vestibulo-palatines issues d'examens CT de neuf cadavres humains, en délimitant trois zones d'un implant virtuel (4,1 x 10.5 mm) : zones coronaire (C), médiane (M) et apicale (A) (avec un écart de 3,5 mm entre les zones). Les densités étaient souvent plus élevées dans le tiers coronaire par rapport aux tiers médian et apical, les écarts s'élevant parfois à plusieurs centaines d'UH. Des différences de plusieurs centaines d'UH ont également été observées entre tiers médian et tiers apical. Cependant, les auteurs ont seulement étudié la distribution des fréquences en fonction de la zone mais ils n'ont pas effectué de tests statistiques afin de comparer l'ampleur de ces différences.

Sur le même échantillon, **Aranyarachkul et al. (2005)**[117] ont également effectué des mesures de densité au niveau de trois zones verticales d'une zone rectangulaire : zone coronaire (C), médiane (M) et apicale (A) (avec un écart de 3,5 mm) sur des coupes issues d'examens CBCT. Les densités les plus élevées ont été mesurées dans la partie coronaire de la zone rectangulaire.

Ainsi, des comparaisons statistiques entres les densités moyennes mesurées autour de l'implant, selon trois zones verticales (col, corps, apex), ont été réalisées pour la première fois dans les **ÉTUDES N°1 et N°2** : nos résultats sont en accord avec ceux de **Shahlaie et al.**[127] et **Aranyarachkul et al.**[117] .

Dans les études de **Shahlaie et al.**[127], **Aranyarachkul et al.**[117] et les **ÉTUDES N°1 et N°2**, les densités mesurées dans les trois zones verticales étaient cortico-trabéculaires. Selon les mesures de l'épaisseur des crêtes édentées maxillaires décrites par **Shemtov-Yona**[9] (Figure 30), la crête édentée est plus étroite au niveau crestal par rapport au niveau apical : il est plus probable que les mesures de densités crestales se situent dans l'os cortical par rapport aux mesures des densités médianes ou apicales. Cela pourrait expliquer pourquoi la densité était décroissante du col vers l'apex.

3.3.4.3 Variabilité de la densité osseuse dans le sens vestibulo-palatin

Les **ÉTUDES N°1 et N°2** sont les premières à comparer les densités osseuses moyennes entre zone vestibulaire et zone palatine du maxillaire. Les résultats des ÉTUDES N°1 et N°2 présentaient quelques divergences :

- L'**ÉTUDE N°1** n'a pas mis en évidence de différence statistiquement significative entre la densité osseuse moyenne des zones vestibulaires et celle des zones palatines. Mais, si on considère le sens vertical, au niveau crestal (col), la densité osseuse palatine moyenne était significativement supérieure à la densité osseuse vestibulaire moyenne, alors qu'au niveau médian (corps), la densité osseuse vestibulaire moyenne était significativement supérieure à la densité osseuse palatine moyenne.
- Dans l'**ÉTUDE N°2,** la moyenne des densités osseuses des zones vestibulaires était significativement supérieure à celle des zones palatines. Si on considère le sens vertical , les résultats étaient similaires à l'**ÉTUDE N°1** au niveau du col et du corps : au niveau crestal, la densité osseuse palatine était significativement supérieure à la densité osseuse vestibulaire crestale ; au niveau médian, la densité osseuse vestibulaire était significativement supérieure à la densité osseuse palatine. Au niveau apical, la densité osseuse vestibulaire était significativement supérieure à la densité osseuse palatine, ce qui n'était pas démontré dans l'**ÉTUDE N°1**.

Il semblerait que la densité osseuse soit différente entre zone vestibulaire et zone palatine. Dans les deux études, nous pouvons noter un **changement au niveau de la transition entre le col et le corps.** Ce changement pourrait être en lien avec l'épaisseur de l'os cortical, qui n'est pas la même en vestibulaire et en palatin.[9,155] En effet, d'un point de vue anatomique, la corticale palatine est généralement plus épaisse que la corticale vestibulaire.[29] De plus, plusieurs auteurs affirment que la résorption post-extractionnelle affecte davantage la corticale vestibulaire que la corticale palatine.[11,50–52] Dans une récente méta-analyse incluant 30 études, **Shemtov-Yona (2021)**[9] a montré qu'au maxillaire, l'épaisseur de la corticale vestibulaire était significativement plus faible que celle de la corticale palatine ($p < 0.001$, quelle que soit la localisation maxillaire). La corticale palatine étant plus épaisse que la corticale vestibulaire, les mesures de densité autour de l'implant impliquaient probablement plus souvent l'os cortical au niveau palatin qu'au niveau vestibulaire dans les **ÉTUDES N°1 et N°2** : cela pourrait expliquer qu'au niveau crestal, la densité palatine était supérieure à la densité vestibulaire, contrairement aux zones médiane (corps) et apicale (apex).

Ces différences entre densités osseuses vestibulaire et palatine pourraient également être expliquées par une origine embryologique différente : selon **Johnson**[78], les alvéoles des incisives maxillaires sont formées en vestibulaire par l'os maxillaire et en palatin par l'os prémaxillaire, dont le centre d'ossification est différent de celui de l'os maxillaire.

3.3.4.4 Implications cliniques de la variabilité intra-individuelle en implantologie

Il est admis dans la littérature que la quantité et la qualité de l'os influencent le taux de succès des thérapeutiques implantaires.[107–110] **Misch et Resnik**[84] estiment que la qualité de l'os peut influencer le plan de traitement en implantologie selon quatre principes :

- (1) La résistance de l'os est directement liée à la densité osseuse ;
- (2) La densité osseuse affecte le module d'élasticité de l'os ;
- (3) Les différences de densité entrainent des pourcentages différents de surface de contact os-implant (BIC *Bone Implant Contact*) ;
- (4) Les différences de densité osseuse entraînent une distribution différente des contraintes, et des déformations de l'interface os-implant lors de la mise en charge des implants.

La stabilité primaire de l'implant, c'est à dire l'absence de mouvement visuel et tactile, est un facteur de succès un implantologie : elle est directement liée à la densité de l'os.[111–113] Une densité osseuse élevé augmente la BIC et ainsi la stabilité primaire.[116] En effet, plusieurs études ont mis en évidence une corrélation entre la densité osseuse mesurée sur des CBCT[121,159] ou sur des CT[98,119,120,132,136] et la stabilité primaire obtenue par RFA.

Les **ÉTUDES N°1 et N°2** ont mis en évidence que la densité osseuse moyenne des sites implantaires était décroissante des sites incisifs vers les sites prémolaires. Ainsi, au niveau des sites canins et prémolaires, la densité osseuse étant plus faible, le praticien devra optimiser ses choix thérapeutiques afin d'améliorer la stabilité primaire.

Concernant le choix du diamètre implantaire, l'augmentation du diamètre implantaire permet de réduire les contraintes en augmentant la surface de contact :[84,111,187] pour chaque augmentation de 0,5 mm, la surface augmente de 10 à 15% avec un implant cylindrique, et davantage avec un implant au filetage marqué.[84,187] Ainsi, en présence d'un os peu dense, l'augmentation du diamètre implantaire devrait permettre d'atteindre l'os cortical au niveau du tiers cervical de l'implant, et ainsi d'améliorer la stabilité primaire : les implants larges devront être favorisés dans les sites prémolaires par rapport aux sites incisifs et canins. Cependant, le choix d'un implant large doit être guidé par le volume osseux en accord avec les distances de sécurité, afin de préserver la corticale vestibulaire.

Concernant le choix de la longueur de l'implant, un implant court (8 mm) est acceptable dans un os dense, tandis qu'un os moins dense exigera un implant plus long (12 mm).[162] En effet, **Friberg et al.**[114] ont mis en évidence que les implants courts (7 mm) présentaient un taux d'échec plus élevé dans les mâchoires édentées. Cependant, la densité osseuse étant décroissante du col vers l'apex dans les **ÉTUDES N°1 et N°2,** le choix d'un implant plus long ne permettra pas d'atteindre des zones avec une densité osseuses plus élevée. En revanche, l'inclinaison des implants, comme c'est le cas dans le concept all-on-four®[188–190] décrit par Paulo Maló devrait permettre d'atteindre des zones avec une meilleure densité osseuse.

Concernant le choix de la morphologie (macrogéographie) de l'implant, il est admis dans la littérature que la morphologie de l'implant influence la distribution des contraintes osseuses, et joue un rôle dans la stabilité primaire.[107,174] En général, les implants cylindriques sont préférés dans un os dense, alors que les implants coniques sont indiqués dans un os peu dense. En effet, l'utilisation d'un implant conique favorise une compression latérale au niveau de l'os cortical lors de l'insertion de l'implant et augmente ainsi la stabilité primaire.[107,133,187,191] Le filetage de l'implant (c'est à dire les spires : leur pas, leur profondeur et leur forme) influence également la répartition des contraintes péri-implantaires et la stabilité primaire.[174] Un filetage de forme carré optimiserait le BIC et la stabilité primaire, et serait le plus favorable pour une mise en charge immédiate.[174,192,193] Les implants autotaraudants ont été développés en 1983 et ont été principalement utilisés dans les régions où la densité osseuse était faible, comme le maxillaire.[116,194] **Marković et al.**[191] ont mis en évidence que l'utilisation d'implants autotaraudants permettait d'obtenir des valeurs ISQ élevées par rapport aux implants non autotaraudants. Récemment, des implants plus « agressifs », cylindriques, avec un filetage progressif variable, et autotaraudants ont montré des valeurs ISQ plus élevées par rapports à des implants cylindriques standard.[195,196]

Concernant le choix de l'état de surface implantaire (microgéographie), les états de surface actuels permettent d'augmenter le pourcentage de BIC et donc améliorer la stabilité primaire.[84] La BIC et la résistance au couple d'insertion semblent être améliorées par l'utilisation d'implant à surface rugueuse c'est-à-dire enduite (hydroxyapatite ou projection de dioxyde de titane), sablée, mordancée à l'acide ou décapée.[107,111,123,174] De plus, les surfaces lisses présentent des taux d'échecs significativement supérieurs après mise en charge par rapport aux implants à surface rugueuse.[111] Cependant, les états de surfaces rugueux présentent des inconvénients : la perte osseuse et le taux d'échec sont plus élevés, et ils favorisent la rétention de plaque lorsque la surface implantaire est exposée.[84,111] Ainsi, de nos jours, un état de surface lisse limité au col a été développé afin de diminuer le risque de péri-implantite.

Concernant la technique chirurgicale, le praticien pourra également adapter son protocole de forage afin d'améliorer la stabilité primaire en présence d'un os de faible densité. La première technique repose sur un sous-forage : le forage est sous-dimensionné, c'est-à-dire que la séquence de forage ne comprend pas le passage du dernier foret (le plus large) ou bien le dernier foret est utilisé mais qu'il n'atteint pas la longueur totale de l'implant.[107,111,133] Ce sous-forage favorise les forces de compression le long de l'interface os/implant, améliorant ainsi la stabilité primaire.[133] Une autre technique repose sur l'utilisation d'ostéotomes afin de favoriser une condensation osseuse.[23,107,111] Après le passage du foret pilote, l'os est progressivement compacté à l'aide d'ostéotomes de diamètres croissants, afin d'augmenter la densité et d'améliorer le BIC.[107,191] **Marković et al.**[191] ont mis en évidence que la condensation osseuse par ostéotomes permettait d'améliorer significativement la stabilité primaire par rapport au forage conventionnel.

En résumé, dans les sites prémolaires, les praticiens devraient choisir des implants larges (lorsque le volume osseux le permet), coniques, « agressifs » avec des filetages carrés ou variables, et une surface rugueuse au niveau du corps (par exemple l'implant NobelActive TiUltra® de NobelBiocare® (Figure 57), et ajuster le protocole de forage afin d'améliorer la stabilité primaire des implants.

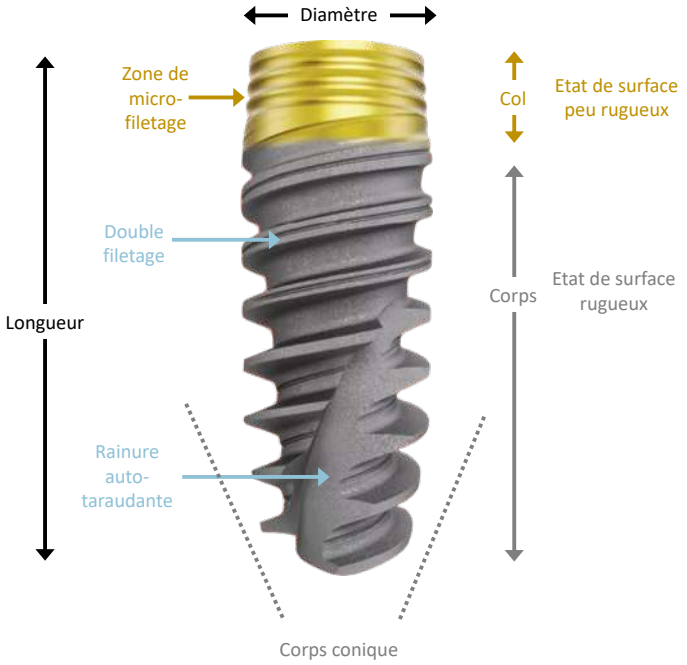


Figure 57 : Exemple d'un implant pouvant être utilisé dans un os peu dense : l'implant NobelActive TiUltra® de NobelBiocare®

Si l'on considère uniquement la densité osseuse trabéculaire apicale, la densité moyenne était de 586.14 ± 215.27 UH dans les sites incisifs, 509.53 ± 202.66 UH dans les sites canins et 505.39 ± 206.70 UH dans les sites prémolaires. Ces valeurs correspondent à la Classe 2 des densités trabéculaires selon la classification de **Wang et al. (2023)**[155] (Tableau 4), qui comprend les densités de l'os trabéculaires comprises entre 300 et 600 GV, et correspond à une DMO comprise entre 160 g/cm^3 à 420 g/cm^3. Il aurait été intéressant de connaître et de classer l'épaisseur de l'os cortical de chaque site de notre échantillon. En effet, **Wang et al.**[155] ont affirmé que les sites édentés du maxillaire antérieur étaient le plus souvent constitués d'os B2 (33%), B1 (18%) ou C2 (18%).

Dans le sens vestibulo-palatin, les **ÉTUDES N°1 et N°2** ont révélé un **changement au niveau de la transition entre le col et le corps,** et ce changement pourrait être en lien avec l'épaisseur de l'os cortical.[9,155] Au niveau crestal, la densité palatine était supérieure à la densité vestibulaire, contrairement aux zones médiane (corps) et apicale (apex) : ainsi, l'ancrage cortical crestal des implants pourrait être plus important en palatin qu'en vestibulaire. La corticale palatine pourrait donc être essentielle pour la stabilité primaire des implants dans le maxillaire antérieur édenté.

3.3.5 Limites de l'étude et perspectives

3.3.5.1 Population étudiée et échantillon

Les sujets inclus dans ces études étaient issus du CHU de la Timone à Marseille (APHM), qui draine une population issue de la région Sud-Est et plus particulièrement les Bouches-du-Rhône. La généralisation de ces résultats à une population ayant une origine géographique distincte nécessite des recherches plus approfondies sur un échantillon plus large (par exemple plusieurs sites d'inclusion des sujets) ; des comparaisons entre populations d'origine géographiques différentes pourraient ainsi être étudiées.

La taille réduite des sous-échantillons, notamment pour l'étude de l'influence du diabète, de la durée d'édentement, et de la consommation de tabac limite l'interprétation des résultats de l'**ÉTUDE N°2** et pourrait expliquer des désaccords avec certains résultats de la littérature. Une étude approfondie sur un échantillon plus grand serait nécessaire afin d'analyser l'influence de ces facteurs.

3.3.5.2 Caractère rétrospectif et données manquantes

En raison du caractère rétrospectif de l'étude, certaines variables étudiées (notamment dans les facteurs diabète, durée d'édentement, taille, poids, consommation de tabac) présentaient des « valeurs manquantes ». Il en résulte une réduction de la taille des sous-échantillons pouvant conduire à l'emploi de tests non-paramétriques. Il serait intéressant de mener une étude prospective afin de disposer, pour chaque sujet inclus, de l'ensemble des données des variables étudiées, et de mener les analyses statistiques sur l'ensemble de l'échantillon pour tous les facteurs étudiés.

3.3.5.3 Performances du CBCT

Les densités mesurées peuvent varier selon la machine utilisée et selon les réglages de la machine[87,105,106,115,123].

Selon **Valiyaparambil et al. (2012)**[106], les valeurs de densités mesurées par CBCT sont affectées par le FOV : plus le champ de vision augmente, plus la densité mesurée augmente. En effet, avec un FOV plus grand, le volume de tissu irradié est plus important, entrainant une augmentation du rayonnement diffusé et donnant ainsi une valeur de niveaux gris moins précise.[106] De même, selon **Shokri et al. (2018)**, les paramètre d'acquisition de l'image, la position de l'objet dans le champ de vision , la taille du FOV, les artéfact et les différents appareils de CBCT peuvent affecter les valeurs de gris mesurées par CBCT.[87,197] Cependant, dans notre étude, aucun de ces éléments n'a pu affecter les résultats, puisque l'ensemble des CBCT avait été effectué avec la même machine et avec des paramètres d'exposition identiques.

Todisco et Trisi[123] ont utilisé un fantôme de calibrage afin d'obtenir des valeurs de densité indépendantes des réglages de la machine : les valeurs mesurées ont ainsi été converties en valeurs universelles de densité osseuse. De même, **Valiyaparambil et al**.[106] recommandent l'utilisation de fantômes de calibrage afin de fournir une référence de calibrage standard des densités osseuses.

3.3.5.4 Influence de la résorption osseuse

Il serait intéressant d'approfondir ces recherches en mesurant les hauteurs et épaisseurs d'os crestal pour chaque site, à partir d'un protocole standardisé afin d'étudier l'influence de la résorption osseuse horizontale et verticale sur la densité osseuse des sites du maxillaire édenté.

3.3.5.5 Influence de l'épaisseur de l'os cortical

Plusieurs études récentes ont couplé l'étude de l'épaisseur de l'os cortical à celle des densités osseuses.[105,155,198] Il aurait été intéressant de mesurer l'épaisseur de l'os cortical au niveau de chaque site implantaire afin d'étudier la relation entre les densités mesurées et l'épaisseur de l'os cortical, et de classer l'épaisseur de l'os cortical de chaque site de notre échantillon selon la classification de **Wang et al. (2023).**[155]

Cependant, **Ko et al. (2017)**[199] recommandent une taille de voxel de 150 µm pour mesurer l'épaisseur de l'os cortical crestal au niveau de sites implantaires. Dans les **ÉTUDES N°1 et N°2**, la résolution des CBCT était de 200 µm, ce qui rendait difficile les mesures de l'épaisseur de l'os cortical. D'autres études portant sur des CBCT « petit champ », avec une taille de voxel de 150 µm pourraient être développées afin d'étudier l'influence de l'épaisseur de l'os cortical.

3.3.5.6 Influence sur la stabilité primaire et les taux de succès implantaires

Cette étude rétrospective a évalué les variations de densité osseuse avant la chirurgie implantaire, mais les patients n'ont pas fait l'objet d'un suivi pour déterminer les taux de succès après la pose des implants. Les études prospectives futures pourraient analyser la relation entre d'une part la densité osseuse du maxillaire édenté, et d'autre part la stabilité primaire des implants et leurs taux de succès.

3.4 Synthèse des études N°1 et N°2

Compte tenu des limites des **ÉTUDES N°1 et N°2**, les conclusions suivantes peuvent être dégagées :

- La densité osseuse varie au sein du maxillaire édenté. La densité osseuse de la zone pré-sinusienne diminue des sites incisifs aux sites prémolaires et de la zone crestale à la zone apicale.
- La densité osseuse de la zone pré-sinusienne du maxillaire édenté est influencée par le sexe et par la hauteur d'os crestal.
- Chez les femmes, la densité osseuse trabéculaire et cortico-spongieuse diminue avec l'âge. Les densités osseuses du maxillaire, en particulier les mesures effectuées à proximité de la paroi antérieure du sinus, pourraient être un indicateur d'une ostéoporose ou d'une ostéopénie chez les femmes.
- La compréhension des variations de densité osseuse dans les sites maxillaires édentés devrait permettre de mieux planifier les procédures implantaires (choix des implants, protocole de forage et de mise en charge) afin d'améliorer la stabilité primaire et ainsi le taux de succès des thérapeutiques implantaires chez les patients édentés complets au maxillaire.

CONCLUSION

L'objectif de cette thèse était d'étudier les variations de la densité de l'os maxillaire édenté, afin de mieux comprendre les caractéristiques de l'os alvéolaire maxillaire, et de comprendre ses adaptations au vieillissement et à l'édentement.

La zone pré-sinusienne de l'os maxillaire constitue une région de choix pour la réhabilitation implantaire du maxillaire édenté complet. Mais l'étude de cette zone anatomique représente un défi majeur pour plusieurs raisons :

- **Son anatomie** : la zone pré-sinusienne est en relation avec des structures anatomiques nobles (les fosses nasales dans sa partie supérieure et les sinus maxillaires dans sa partie postérieure). Ces structures peuvent constituer des obstacles anatomiques en cas de résorption osseuse extrême.
- **Son origine embryologique** : l'os maxillaire humain est issu de deux bourgeons distincts ; le bourgeon nasofrontal donnant naissance au prémaxillaire et le bourgeon maxillaire donnant naissance au maxillaire. Mais l'existence et la persistance d'un os prémaxillaire chez l'Homme adulte restent sujettes à débat. Pour certains auteurs, la croissance de l'os prémaxillaire serait indépendante de celle de l'os maxillaire, ce qui pourrait avoir des répercussions sur le vieillissement de la zone antérieure du maxillaire.
- **Sa structure interne** : l'os maxillaire est caractérisé par la présence de deux entités osseuses, l'os basal et l'os alvéolaire. L'os basal, de soutien, constitue la charpente de l'os maxillaire. Le volume et la morphologie de l'os alvéolaire sont déterminés par la forme, l'axe et l'inclinaison des dents. L'architecture de l'os maxillaire est adaptée pour résister aux contraintes mécaniques de la mastication, grâce à trois poutres de résistance : antérieure (canine), latérale et postérieure. L'édentement provoque une résorption irréversible de l'os alvéolaire mais affecte peu l'os basal.
- **Ses fonctions** : lors de la mastication, les contraintes mécaniques sont transmises à l'os maxillaire par l'intermédiaire des dents. L'absence des dents maxillaires altère les fonctions orales de mastication, déglutition et phonation du fait de la résorption, de l'atrophie musculaire et de la diminution des forces masticatoires. Cette perte de fonction s'accompagne de modifications de la structure de l'os maxillaire.
- **Son implication dans l'équilibre psychologique et social de l'individu** : chez le sujet denté, la zone pré-sinusienne supporte les huit dents antérieures maxillaires jouant un rôle important dans l'esthétique du sourire. La perte de ces dents affecte la confiance en soi et favorise l'isolement social. La restauration de l'esthétique du sourire constitue un défi majeur, afin d'améliorer la qualité de vie du sujet édenté complet.

Les résultats de cette thèse portent essentiellement sur la réponse aux trois questions suivantes, posées en préambule sur les densités de l'os maxillaire humain édenté.

<u>Question N°1</u> : Existe-t-il une adaptation osseuse liée à la perte des dents ? Si oui, comment cette adaptation se manifeste-t-elle ?

La perte des dents entraine des modifications morphologiques et structurelles de l'os maxillaire.

D'un point de vue morphologique, l'édentement entraine une **résorption** tridimensionnelle irréversible, continue, horizontale et verticale. Cette résorption ne serait pas exclusivement liée au port d'une prothèse amovible complète, mais aussi au remodelage osseux après la perte des dents. L'os maxillaire suit un schéma de résorption centripète, en raison d'une résorption accrue de la corticale vestibulaire par rapport à la corticale palatine : une relation inter-arcades inversée est souvent retrouvée chez les sujets édentés totaux.

D'un point de vue structurel, l'édentement provoque un **remodelage** osseux, entrainant des modifications de structure et donc de **densité** de l'os alvéolaire. La qualité osseuse de l'os maxillaire est généralement inférieure à celle de la mandibule.

De nombreuses **classifications** ont été proposées dans la littérature afin de quantifier les changements morphologiques et structurels du maxillaire après édentement. Nous retiendrons :

- **La classification de Wang et al. (2023),** basée sur la mesure de l'épaisseur de l'os cortical et de la densité de l'os spongieux (à partir de CBCT), mais cette classification ne tient pas compte du volume osseux (hauteur et épaisseur).
- **La classification de Shemtov-Yona (2021),** basée sur les mesures des épaisseurs de la crête alvéolaire, des corticales vestibulaire et palatine, et de l'os spongieux, mais cette classification ne prend en compte ni la densité de l'os trabéculaire, ni la hauteur de la crête alvéolaire.

A ce jour, aucune classification ne tient compte à la fois de la variabilité morphologique et de la variabilité structurelle des os des mâchoires.

<u>Question N°2</u> : La densité de la zone pré-sinusienne est-elle influencée par l'âge et le sexe des individus ? Quels paramètres anthropologiques, locaux ou généraux, peuvent expliquer la variabilité du maxillaire édenté ?

La densité osseuse pourrait être influencée par le sexe des individus. En effet, la densité osseuse trabéculaire du maxillaire antérieur édenté des hommes est supérieure à celle des femmes. Cette différence de densité entre hommes et femmes pourrait être expliquée par les variations hormonales chez les femmes et par une masse osseuse plus élevée chez les hommes.

La résorption crestale verticale est plus importante chez les femmes que chez les hommes.

Chez les femmes, les densités trabéculaire et cortico-spongieuse diminuent avec l'âge. Chez les femmes édentées, les densités osseuses du maxillaire antérieur, en particulier les mesures effectuées dans le site de la première prémolaire (à proximité de la paroi antérieure du sinus), pourraient être un outil pour la détection précoce de l'ostéoporose. Les patientes pourraient ainsi être adressées pour une DXA afin de confirmer une suspicion de faible densité osseuse.

Ainsi, la variabilité de la densité osseuse du maxillaire édenté pourrait être expliquée par :

- Des facteurs généraux : **l'âge** (chez les femmes) et le **sexe** ;
- Un facteur local : la **hauteur de l'os crestal**. La densité osseuse (trabéculaire ou cortico-trabéculaire) pourrait être influencée par la résorption osseuse verticale.

Il serait intéressant d'approfondir les recherches visant à étudier les relations entre densité trabéculaire et résorption (verticale et horizontale), en suivant un protocole de mesure standardisé de la hauteur et de l'épaisseur de la crête osseuse.

Cependant, l'interprétation des résultats de l'étude des facteurs « diabète », « consommation de tabac » et « durée d'édentement » reste limitée en raison de la taille réduite des sous-échantillons : une étude approfondie sur un échantillon plus grand serait nécessaire afin de développer l'analyse de l'influence de ces facteurs.

<u>Question N°3</u> : L'architecture interne de l'os maxillaire édenté est-elle la même en tout point ? Si non, comment varie-t-elle ? Quelles sont les implications cliniques de ces variations ?

La densité osseuse varie au sein même du maxillaire édenté.

Dans le sens vertical, la densité osseuse cortico-trabéculaire diminue de la zone crestale à la zone apicale.

Dans le sens transversal, la densité osseuse cortico-trabéculaire diminue des sites incisifs aux sites prémolaires. La densité trabéculaire des sites incisifs est supérieure à celle des sites canins et prémolaires. La différence de structure trabéculaire entre sites incisifs d'une part et sites canins et prémolaires d'autre part pourrait être expliquée par une origine embryologique distincte. En effet, d'un point de vue embryologique, l'os prémaxillaire, qui supporte les incisives, est issu du bourgeon nasofrontal, alors que l'os maxillaire, qui supporte les autres dents (canines, prémolaires et molaires) est issu du bourgeon maxillaire.

Dans le sens vestibulo-palatin, il semblerait que la densité cortico-spongieuse soit différente entre zone vestibulaire et zone palatine. Ces différences pourraient être expliquées par l'épaisseur de l'os cortical, la corticale vestibulaire étant plus affectée par la résorption que la corticale palatine. Elle pourrait également être expliquée par une origine embryologique et un centre d'ossification distincts : dans la région antérieure du maxillaire, l'os vestibulaire serait issu de l'os maxillaire alors que l'os palatin serait issu de l'os prémaxillaire.

Ces variations de la densité osseuse au sein des sites maxillaires édentés influencent le plan de traitement implantaire. La connaissance et la compréhension de ces variations devraient permettre de mieux planifier les procédures implantaires afin d'améliorer la stabilité primaire et le taux de succès des thérapeutiques implantaires chez les patients édentés complets au maxillaire, en particulier lorsqu'un protocole de mise en charge immédiate est envisagé.

Enfin, il serait intéressant d'étudier les implications biomécaniques des variations de densités osseuses au sein de l'os maxillaire, à l'aide d'une modélisation en éléments finis de maxillaires édentés.

BIBLIOGRAPHIE

1. Dechow PC, Wang Q, Peterson J. Edentulation alters material properties of cortical bone in the human craniofacial skeleton: functional implications for craniofacial structure in primate evolution. Anat Rec Hoboken NJ 2007. 2010 Apr;293(4):618–29.
2. Bert M. Chapitre 3 - Les lois de Wolf. In: Bert M Implantologie, bases fondamentales, conséquences cliniques. Parresia. 2021. p. 57–77. (Repères).
3. Frost HM. A 2003 update of bone physiology and Wolff's Law for clinicians. Angle Orthod. 2004 Feb;74(1):3–15.
4. Chappard C. Microarchitecture assessment of human trabecular bone: description of methods. Med Sci MS. 2012 Dec;28(12):1111–5.
5. Chappard D. La microarchitecture du tissu osseux. Bull Académie Natl Médecine. 2010 Nov;194(8):1469–81.
6. Bodic F, Hamel L, Lerouxel E, Baslé MF, Chappard D. Bone loss and teeth. Jt Bone Spine Rev Rhum. 2005 May;72(3):215–21.
7. Atwood DA, Coy WA. Clinical, cephalometric, and densitometric study of reduction of residual ridges. J Prosthet Dent. 1971 Sep;26(3):280–95.
8. Goldberg M. Os des maxillaires et de la mandibule. EMC - Médecine Buccale. 2015;10(5):1–13.
9. Shemtov Yona K. Quantitative assessment of the jawbone quality classification: A meta-analysis study. PloS One. 2021;16(6):e0253283.
10. Couso-Queiruga E, Stuhr S, Tattan M, Chambrone L, Avila-Ortiz G. Post-extraction dimensional changes: A systematic review and meta-analysis. J Clin Periodontol. 2021 Jan;48(1):126–44.
11. Araújo MG, Lindhe J. Dimensional ridge alterations following tooth extraction. An experimental study in the dog. J Clin Periodontol. 2005 Feb;32(2):212–8.
12. Atwood DA. Reduction of residual ridges: a major oral disease entity. J Prosthet Dent. 1971;26(3):266–79.
13. Couly G. Anatomie du massif facial. EMC Elsevier Masson SAS Paris. 2008;Stomatologie 22-001-B-05, 1978, Médecine buccale 28-050-J-10, 2008:1–15.
14. Preckel BE, Hue O. Anatomie et physiologie de l'édenté total. EMC - Médecine Buccale. 2019;14(4):1–17.
15. Tilotta F, Lazaroo B, Gaudy JF. Anatomie de l'édenté. EMC - Chir Orale Maxillo-Faciale. 2022;35(4):1–12.
16. Dictionnaire de l'Académie Nationale de Médecine [Internet]. Dictionnaire de l'Académie Nationale de Médecine. Available from: http://dictionnaire.academie-medecine.fr/search/results?titre=maxillaire
17. Dargaud J, Cotton F, Buttin R, Morin A. The maxillary sinus: evolution and function in aging. Morphol Bull Assoc Anat. 2003 Mar;87(276):17–22.

18. Khonsari RH, Catala M. Développement de la face. EMC - Oto-Rhino-Laryngol. 2018;13(2):1–10.
19. Goldberg M, Opsahl Vital S, Barbet P. Embryologie craniofaciale (II). Embryologie de la face et des structures squelettiques céphaliques : morphogenèse des maxillaires, de la mandibule et du crâne. EMC Elsevier Masson SAS Paris. 2011;28-020-D-10,.
20. Vacher C. Anatomie du vieillissement cranio-facial. EMC Elsevier Masson SAS Paris. 2010;28-105-P-10.
21. Trevizan M, Consolaro A. Premaxilla: an independent bone that can base therapeutics for middle third growth! Dent Press J Orthod. 2017;22(2):21–6.
22. Bouaoud J, Corre P, Khonsari RH. Croissance craniofaciale. EMC - Chir Orale Maxillo-Faciale. 2018;13(3):1–19.
23. Rebaudi A, Trisi P, Cella R, Cecchini G. Preoperative evaluation of bone quality and bone density using a novel CT/microCT-based hard-normal-soft classification system. Int J Oral Maxillofac Implants. 2010 Feb;25(1):75–85.
24. Bert M. Chapitre 1 - L'os : Composition, vascularisation, innervation. In: Bert M Implantologie, bases fondamentales, conséquences cliniques. Parresia. 2021. p. 4–36. (Repères).
25. Bert M. Chapitre 4 - L'ostéo-architecture. In: Bert M Implantologie, bases fondamentales, conséquences cliniques. Parresia. 2021. p. 79–118. (Repères).
26. Bert M. Chapitre 2 - L'os : remaniement et cicatrisation. In: Bert M Implantologie, bases fondamentales, conséquences cliniques. Parresia. 2021. p. 38–55. (Repères).
27. The Glossary of Prosthodontic Terms: Ninth Edition. J Prosthet Dent. 2017 May;117(5S):e1–105.
28. Kappes F, Etchebarne M, Devoize L, Dang NP, Barthélémy I. Stomatologie et chirurgie maxillofaciale gériatrique. EMC - Chir Orale Maxillo-Faciale. 2021;34(3):1–16.
29. Merheb J, Quirynen M, Teughels W. Critical buccal bone dimensions along implants. Periodontol 2000. 2014 Oct;66(1):97–105.
30. Touzi S, Cavelier S, Chantereau C, Tavernier B. Vieillissement des structures dentaires et péridentaires. EMC Elsevier Masson SAS Paris. 2011;28-020-I–10:11.
31. Braux J, Coeuriot JL. Sénescence et parodonte. In: Bouchard P Parodontologie & dentisterie implantaire Volume 1, Médecine Parodontale. Lavoisier Médecine Sciences. Paris; 2015. p. 578–88.
32. Vos T, Flaxman AD, Naghavi M, Lozano R, Michaud C, Ezzati M, et al. Years lived with disability (YLDs) for 1160 sequelae of 289 diseases and injuries 1990-2010: a systematic analysis for the Global Burden of Disease Study 2010. Lancet Lond Engl. 2012 Dec 15;380(9859):2163–96.
33. Emami E, de Souza RF, Kabawat M, Feine JS. The impact of edentulism on oral and general health. Int J Dent. 2013;2013:498305.
34. Mojon P. The world without teeth : demographic trends. In: Implants overdentures : the standard of care for edentulous patients. Carol Stream: Quintessence; 2003.
35. Mojon P, Thomason JM, Walls AWG. The impact of falling rates of edentulism. Int J Prosthodont. 2004;17(4):434–40.

36. Müller F, Naharro M, Carlsson GE. What are the prevalence and incidence of tooth loss in the adult and elderly population in Europe? Clin Oral Implants Res. 2007 Jun;18 Suppl 3:2–14.

37. Müller F. Interventions for edentate elders--what is the evidence? Gerodontology. 2014 Feb;31 Suppl 1:44–51.

38. Felton DA. Complete Edentulism and Comorbid Diseases: An Update. J Prosthodont Off J Am Coll Prosthodont. 2016 Jan;25(1):5–20.

39. Tung HJ, Ford R. Incident edentulism and number of comorbidities among middle-aged and older Americans. Gerodontology. 2023 Dec;40(4):484–90.

40. Steele JG, Treasure E, Pitts NB, Morris J, Bradnock G. Total tooth loss in the United Kingdom in 1998 and implications for the future. Br Dent J. 2000 Dec 9;189(11):598–603.

41. Musacchio E, Perissinotto E, Binotto P, Sartori L, Silva-Netto F, Zambon S, et al. Tooth loss in the elderly and its association with nutritional status, socio-economic and lifestyle factors. Acta Odontol Scand. 2007 Apr;65(2):78–86.

42. Pengpid S, Peltzer K. The prevalence of edentulism and their related factors in Indonesia, 2014/15. BMC Oral Health. 2018 Jul 3;18(1):118.

43. Tolstunov L. Implant Zones of the Jaws: Implant Location and Related Success Rate. J Oral Implantol. 2007 Aug;33(4):211–20.

44. Cawood JI, Howell RA. A classification of the edentulous jaws. Int J Oral Maxillofac Surg. 1988 Aug;17(4):232–6.

45. Saldanha JB, Casati MZ, Neto FH, Sallum EA, Nociti FH. Smoking may affect the alveolar process dimensions and radiographic bone density in maxillary extraction sites: a prospective study in humans. J Oral Maxillofac Surg Off J Am Assoc Oral Maxillofac Surg. 2006 Sep;64(9):1359–65.

46. Pietrokovski J. The bony residual ridge in man. J Prosthet Dent. 1975 Oct 1;34(4):456–62.

47. Reich K, Huber C, Lippnig W, Ulm C, Watzek G, Tangl S. Atrophy of the residual alveolar ridge following tooth loss in an historical population: Natural course of jaw atrophy. Oral Dis. 2011 Jan;17(1):33–44.

48. Atwood DA. Postextraction changes in the adult mandible as illustrated by microradiographs of midsagittal sections and serial cephalometric roentgenograms. J Prosthet Dent. 1963;13(5):810–24.

49. Schropp L, Wenzel A, Kostopoulos L, Karring T. Bone healing and soft tissue contour changes following single-tooth extraction: A clinical and radiographic 12-month prospective study. Int J Periodontics Restorative Dent. 2003 Aug;23(4):313–23.

50. Tan WL, Wong TLT, Wong MCM, Lang NP. A systematic review of post-extractional alveolar hard and soft tissue dimensional changes in humans. Clin Oral Implants Res. 2012 Feb;23 Suppl 5:1–21.

51. Johnson K. A study of the dimensional changes occurring in the maxilla following tooth extraction. Aust Dent J. 1969 Aug;14(4):241–4.

52. Pietrokovski J, Massler M. Alveolar ridge resorption following tooth extraction. J Prosthet Dent. 1967 Jan;17(1):21–7.

53. Pietrokovski J, Starinsky R, Arensburg B, Kaffe I. Morphologic characteristics of bony edentulous jaws. J Prosthodont Off J Am Coll Prosthodont. 2007 Apr;16(2):141–7.

54. Cawood JI, Howell RA. Reconstructive preprosthetic surgery. I. Anatomical considerations. Int J Oral Maxillofac Surg. 1991 Apr;20(2):75–82.

55. Tallgren A. The continuing reduction of the residual alveolar ridges in complete denture wearers: a mixed-longitudinal study covering 25 years. 1972. J Prosthet Dent. 2003 May;89(5):427–35.

56. Rouche J. Aménagement chirurgical des crêtes édentées. In: Bouchard P Parodontologie & dentisterie implantaire Volume 2, Thérapeutiques chirurgicales. Paris, France: Lavoisier Médecine Sciences; 2015. p. 283–97.

57. Tsakos G, Herrick K, Sheiham A, Watt RG. Edentulism and fruit and vegetable intake in low-income adults. J Dent Res. 2010 May;89(5):462–7.

58. Braud A, Berteretche MV. Edentement complet et phonation : impact d'une solution amovible conventionnelle. Inf Dent. 2012;(12):49–54.

59. Bert M. Edentement maxillaire : Les complications phonétiques. Inf Dent. 2017;(39):20–7.

60. World Health Organization. Oral health [Internet]. World Health Organization. 2023. Available from: https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/oral-health

61. Albrektsson T, Blomberg S, Branemark A, Carlsson G. Edentulousness - an Oral Handicap - Patient Reactions to Treatment with Jawbone-Anchored Prostheses. J Oral Rehabil. 1987 Nov;14(6):503–11.

62. Fiske J, Davis DM, Frances C, Gelbier S. The emotional effects of tooth loss in edentulous people. Br Dent J. 1998 Jan;184(2):90–3.

63. Davis D, Fiske J, Scott B, Davis DD. The emotional effects of tooth loss: a preliminary quantitative study. Br Dent J. 2000 May 13;188(09):503–6.

64. Rodrigues SM, Oliveira AC, Vargas AMD, Moreira AN, E Ferreira EF. Implications of edentulism on quality of life among elderly. Int J Environ Res Public Health. 2012 Jan;9(1):100–9.

65. Ruquet M, Hüe O, Tosello A. « Le sujet âgé » Spécificités odonto-stomatologiques et examen clinique. Actual Odonto-Stomatol. 2012 Mar;(257):73–87.

66. Bond JC, McDonough R, Alshihayb TS, Kaye EA, Garcia RI, Heaton B. Edentulism is associated with increased risk of all-cause mortality in adult men. J Am Dent Assoc 1939. 2022 Jul;153(7):625-634.e3.

67. Ashley-Montagu MF. The Premaxilla in Man. J Am Dent Assoc 1922. 1936;23(11):2043.

68. Hwang K, Yun SM. The human premaxilla and Goethe. Arch Craniofacial Surg. 2019 Aug;20(4):217–8.

69. Schmitt S. La répétition des parties et la notion de type chez Goethe. In: Histoire d'une question anatomique : La répétition des parties [Internet]. Paris: Publications

scientifiques du Muséum; 2019. p. 87–130. (Archives). Available from: http://books.openedition.org/mnhn/1992

70. Barteczko K, Jacob M. A re-evaluation of the premaxillary bone in humans. Anat Embryol (Berl). 2004 Mar;207(6):417–37.
71. Louryan S, Vanmuylder N, Daumas M, Beauthier JP. Os pré-maxillaire, mythe ou réalité ? Apports des collections du musée d'anatomie et embryologie de l'ULB. Morphologie. 2016 Sep 1;100(330):122.
72. Froment A. Chapitre IV - La tête. In: Froment A Anatomie impertinente: Le corps humain et l'évolution. Odile Jacob. Odile Jacob; 2013. p. 117–67.
73. Hellmich S, Hellmich J. The intermaxillary bone and Goethe's Mephistopheles. Laryngol Rhinol Otol (Stuttg). 1982 Oct;61(10):552–6.
74. Ashley-Montagu MF. The Premaxilla in the Primates. Q Rev Biol. 1935 Mar;10(1):32–59.
75. Ponsolle G. Goethe et l'interdisciplinarité active : l'os intermaxillaire. In: Journées de l'interdisciplinarité [Internet]. Université de Limoges; 2022. Available from: https://www.unilim.fr/journees-interdisciplinarite/454
76. Jones FW. The premaxilla and the ancestry of man. Nature. 1947 Mar 29;159(4039):439.
77. Clark WELG. The premaxilla and the ancestry of man. Nature. 1947 Apr 19;159(4042):546.
78. Johnson EH. The Narial Margins in Man. J Anat. 1937 Apr;71(Pt 3):356–61.
79. Delaire J. Considérations sur l'accroissement du pré-maxillaire chez l'homme. Rev Stomatol. 1974;75(7):951–70.
80. Vacher C, Onolfo JP, Lézy JP, Copin H. The growth of the maxilla in humans. What place for the premaxilla? Rev Stomatol Chir Maxillofac. 2001 Jun;102(3–4):153–8.
81. Chapuis-Lucciani N, Drusini A. Anthropologie du vieillissement et de la longévité. In: Guihard-Costa AM, Boetsch G, Froment A, editors. L'homme et sa diversité : Perspectives en enjeux de l'anthropologie biologique [Internet]. Paris: CNRS Éditions; 2007. p. 57–68. (Hors collection). Available from: https://books.openedition.org/editionscnrs/2998
82. World Health Organization. Ageing Europe [Internet]. https://www.who.int/. 2024. Available from: https://www.who.int/europe/health-topics/ageing
83. INSEE. Population par âge – Tableaux de l'économie française | Insee [Internet]. https://www.insee.fr/. 2020. Available from: https://www.insee.fr/fr/statistiques/4277619?sommaire=4318291
84. Resnik RR, Misch CE. Bone Density A Key Determinant for Treatment Planning. In: Resnik R Misch's Contemporary Implant Dentistry. 2020. p. 450–66.
85. Merheb J, Temmerman A, Coucke W, Rasmusson L, Kübler A, Thor A, et al. Relation between Spongy Bone Density in the Maxilla and Skeletal Bone Density. Clin Implant Dent Relat Res. 2015 Dec;17(6):1180–7.
86. WHO Scientific Group on the Prevention and Management of Osteoporosis (2000 : Geneva, Switzerland)., editor. Prevention and management of osteoporosis : report

of a WHO scientific group. [Internet]. World Health Organization; 2003. Available from: https://apps.who.int/iris/handle/10665/42841](https://apps.who.int/iris/handle/10665/42841)

87. Shokri A, Ghanbari M, Maleki FH, Ramezani L, Amini P, Tapak L. Relationship of gray values in cone beam computed tomography and bone mineral density obtained by dual energy X-ray absorptiometry. Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol. 2019 Sep;128(3):319–31.
88. Funck-Brentano T, Orcel P. Ostéoporose. EMC - Traité Médecine AKOS. 2010 Jan;5(3):1–12.
89. Güngör E, Yildirim D, Çevik R. Evaluation of osteoporosis in jaw bones using cone beam CT and dual-energy X-ray absorptiometry. J Oral Sci. 2016;58(2):185–94.
90. Shapurian T, Damoulis PD, Reiser GM, Griffin TJ, Rand WM. Quantitative evaluation of bone density using the Hounsfield index. Int J Oral Maxillofac Implants. 2006 Apr;21(2):290–7.
91. Ling H, Yang X, Li P, Megalooikonomou V, Xu Y, Yang J. Cross gender-age trabecular texture analysis in cone beam CT. Dento Maxillo Facial Radiol. 2014;43(4):20130324.
92. Wakimoto M, Matsumura T, Ueno T, Mizukawa N, Yanagi Y, Iida S. Bone quality and quantity of the anterior maxillary trabecular bone in dental implant sites. Clin Oral Implants Res. 2012 Nov;23(11):1314–9.
93. Lindh C, Obrant K, Petersson A. Maxillary bone mineral density and its relationship to the bone mineral density of the lumbar spine and hip. Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod. 2004 Jul;98(1):102–9.
94. Cawood JI, Stoelinga PJW, International Academy for Oral and Facial Rehabilitation. International academy for oral and facial rehabilitation--Consensus Report. Int J Oral Maxillofac Surg. 2006 Mar;35(3):195–8.
95. Lamy M. Le maxillaire édenté. Critères de choix d'une réhabilitation prothétique implantaire. Rev Odontostomatol (Paris) [Internet]. 2011 May [cited 2019 Jul 14];40(2). Available from: https://orbi.uliege.be/handle/2268/96328
96. Eckerdal O, Kvint S. Presurgical planning for osseointegrated implants in the maxilla: A tomographic evaluation of available alveolar bone and morphological relations in the maxilla. Int J Oral Maxillofac Surg. 1986 Dec 1;15(6):722–6.
97. de Oliveira RCG, Leles CR, Normanha LM, Lindh C, Ribeiro-Rotta RF. Assessments of trabecular bone density at implant sites on CT images. Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod. 2008 Feb;105(2):231–8.
98. Bergkvist G, Koh KJ, Sahlholm S, Klintström E, Lindh C. Bone density at implant sites and its relationship to assessment of bone quality and treatment outcome. Int J Oral Maxillofac Implants. 2010 Apr;25(2):321–8.
99. Ibrahim N, Parsa A, Hassan B, van der Stelt P, Wismeijer D. Diagnostic imaging of trabecular bone microstructure for oral implants: a literature review. Dento Maxillo Facial Radiol. 2013;42(3):20120075.

100. Fyhrie DP. Summary - Measuring “bone quality.” J Musculoskelet Neuronal Interact. 2005 Dec;5(4):318–20.

101. Fuh LJ, Huang HL, Chen CS, Fu KL, Shen YW, Tu MG, et al. Variations in bone density at dental implant sites in different regions of the jawbone. J Oral Rehabil. 2010 May 1;37(5):346–51.

102. Lindh C, Petersson A, Rohlin M. Assessment of the trabecular pattern before endosseous implant treatment: diagnostic outcome of periapical radiography in the mandible. Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod. 1996 Sep;82(3):335–43.

103. Lekholm U, Zarb G. Patient selection and preparation. In: In: Brånemark P-I, Zarb GA, Albrektsson T, editors: Tissue-integrated prostheses: osseointegration in clinical dentistry. Chicago: Quintessence Pub Co; 1985. p. 199–209.

104. Molly L. Bone density and primary stability in implant therapy. Clin Oral Implants Res. 2006 Oct;17(S2):124–35.

105. Wang SH, Shen YW, Fuh LJ, Peng SL, Tsai MT, Huang HL, et al. Relationship between Cortical Bone Thickness and Cancellous Bone Density at Dental Implant Sites in the Jawbone. Diagn Basel Switz. 2020 Sep 17;10(9).

106. Valiyaparambil JV, Yamany I, Ortiz D, Shafer DM, Pendrys D, Freilich M, et al. Bone quality evaluation: comparison of cone beam computed tomography and subjective surgical assessment. Int J Oral Maxillofac Implants. 2012 Oct;27(5):1271–7.

107. Javed F, Ahmed HB, Crespi R, Romanos GE. Role of primary stability for successful osseointegration of dental implants: Factors of influence and evaluation. Interv Med Appl Sci. 2013 Dec;5(4):162–7.

108. Al-Ekrish AA, Widmann G, Alfadda SA. Revised, Computed Tomography-Based Lekholm and Zarb Jawbone Quality Classification. Int J Prosthodont. 2018 Aug;31(4):342–5.

109. Jaffin RA, Berman CL. The excessive loss of Branemark fixtures in type IV bone: a 5-year analysis. J Periodontol. 1991 Jan;62(1):2–4.

110. Herrmann I, Lekholm U, Holm S, Kultje C. Evaluation of patient and implant characteristics as potential prognostic factors for oral implant failures. Int J Oral Maxillofac Implants. 2005 Apr;20(2):220–30.

111. Martinez H, Davarpanah M, Missika P, Celletti R, Lazzara R. Optimal implant stabilization in low density bone. Clin Oral Implants Res. 2001 Oct;12(5):423–32.

112. Lee S, Gantes B, Riggs M, Crigger M. Bone density assessments of dental implant sites: 3. Bone quality evaluation during osteotomy and implant placement. Int J Oral Maxillofac Implants. 2007 Apr;22(2):208–12.

113. Meredith N. Assessment of implant stability as a prognostic determinant. Int J Prosthodont. 1998;11(5):491–501.

114. Friberg B, Jemt T, Lekholm U. Early failures in 4,641 consecutively placed Brånemark dental implants: a study from stage 1 surgery to the connection of completed prostheses. Int J Oral Maxillofac Implants. 1991;6(2):142–6.

115. Parsa A, Ibrahim N, Hassan B, van der Stelt P, Wismeijer D. Bone quality evaluation at dental implant site using multislice CT, micro-CT, and cone beam CT. Clin Oral Implants Res. 2015;26(1):e1-7.

116. Truhlar RS, Orenstein IH, Morris HF, Ochi S. Distribution of Bone Quality in Patients Receiving Endosseous Dental Implants. J Oral Maxillofac Surg. 1997 Dec;55(12):38–45.

117. Aranyarachkul P, Caruso J, Gantes B, Schulz E, Riggs M, Dus I, et al. Bone density assessments of dental implant sites: 2. Quantitative cone-beam computerized tomography. Int J Oral Maxillofac Implants. 2005 Jun;20(3):416–24.

118. Engquist B, Bergendal T, Kallus T, Linden U. A retrospective multicenter evaluation of osseointegrated implants supporting overdentures. Int J Oral Maxillofac Implants. 1988;3(2):129–34.

119. Turkyilmaz I, Tözüm TF, Tumer C. Bone density assessments of oral implant sites using computerized tomography. J Oral Rehabil. 2007 Apr;34(4):267–72.

120. Turkyilmaz I, McGlumphy EA. Influence of bone density on implant stability parameters and implant success: a retrospective clinical study. BMC Oral Health. 2008 Nov 24;8:32.

121. Fuster-Torres MÁ, Peñarrocha-Diago M, Peñarrocha-Oltra D, Peñarrocha-Diago M. Relationships between bone density values from cone beam computed tomography, maximum insertion torque, and resonance frequency analysis at implant placement: a pilot study. Int J Oral Maxillofac Implants. 2011 Oct;26(5):1051–6.

122. Hao Y, Zhao W, Wang Y, Yu J, Zou D. Assessments of jaw bone density at implant sites using 3D cone-beam computed tomography. Eur Rev Med Pharmacol Sci. 2014;18(9):1398–403.

123. Todisco M, Trisi P. Bone mineral density and bone histomorphometry are statistically related. Int J Oral Maxillofac Implants. 2005 Dec;20(6):898–904.

124. Liu J, Chen HY, DoDo H, Yousef H, Firestone AR, Chaudhry J, et al. Efficacy of Cone-Beam Computed Tomography in Evaluating Bone Quality for Optimum Implant Treatment Planning. Implant Dent. 2017 Jun;26(3):405–11.

125. Romanos GE. Bone quality and the immediate loading of implants-critical aspects based on literature, research, and clinical experience. Implant Dent. 2009 Jun;18(3):203–9.

126. Misch CE. Density of bone: effect on treatment plans, surgical approach, healing, and progressive bone loading. Int J Oral Implantol Implantol. 1990;6(2):23–31.

127. Shahlaie M, Gantes B, Schulz E, Riggs M, Crigger M. Bone density assessments of dental implant sites: 1. Quantitative computed tomography. Int J Oral Maxillofac Implants. 2003 Apr;18(2):224–31.

128. Cochran DL, Morton D, Weber HP. Consensus statements and recommended clinical procedures regarding loading protocols for endosseous dental implants. Int J Oral Maxillofac Implants. 2004;19 Suppl:109–13.

129. Weber HP, Morton D, Gallucci GO, Roccuzzo M, Cordaro L, Grütter L. Consensus Statements and Recommended Clinical Procedures Regarding Loading Protocols. In:

International Journal of Oral & Maxillofacial Implants. Quintessence Publishing Company Inc.; 2009. p. 180–3.

130. Turkyilmaz I, McGlumphy EA. Is there a lower threshold value of bone density for early loading protocols of dental implants? J Oral Rehabil. 2008 Oct;35(10):775–81.
131. Sennerby L, Meredith N. Implant stability measurements using resonance frequency analysis: biological and biomechanical aspects and clinical implications. Periodontol 2000. 2008 Jun;47(1):51–66.
132. Turkyilmaz I, Tumer C, Ozbek EN, Tözüm TF. Relations between the bone density values from computerized tomography, and implant stability parameters: a clinical study of 230 regular platform implants. J Clin Periodontol. 2007 Aug;34(8):716–22.
133. Turkyilmaz I, Ozan O, Yilmaz B, Ersoy AE. Determination of bone quality of 372 implant recipient sites using Hounsfield unit from computerized tomography: a clinical study. Clin Implant Dent Relat Res. 2008 Dec;10(4):238–44.
134. Linck GKSB, Ferreira GM, De Oliveira RCG, Lindh C, Leles CR, Ribeiro-Rotta RF. The Influence of Tactile Perception on Classification of Bone Tissue at Dental Implant Insertion. Clin Implant Dent Relat Res. 2016 Jun;18(3):601–8.
135. Jeong KI, Kim SG, Oh JS, Jeong MA. Consideration of various bone quality evaluation methods. Implant Dent. 2013 Feb;22(1):55–9.
136. Turkyilmaz I, Tözüm TF, Tumer C, Ozbek EN. Assessment of correlation between computerized tomography values of the bone, and maximum torque and resonance frequency values at dental implant placement. J Oral Rehabil. 2006 Dec;33(12):881–8.
137. Trisi P, Rao W. Bone classification: clinical-histomorphometric comparison. Clin Oral Implants Res. 1999 Feb;10(1):1–7.
138. Ulm C, Kneissel M, Schedle A, Solar P, Matejka M, Schneider B, et al. Characteristic features of trabecular bone in edentulous maxillae: Trabecular bone in edentulous maxillae. Clin Oral Implants Res. 1999 Dec;10(6):459–67.
139. Zanetti EM, Pascoletti G, Calì M, Bignardi C, Franceschini G. Clinical Assessment of Dental Implant Stability During Follow-Up: What Is Actually Measured, and Perspectives. Biosensors. 2018 Jul 13;8(3):1–18.
140. González-García R, Monje F. The reliability of cone-beam computed tomography to assess bone density at dental implant recipient sites: a histomorphometric analysis by micro-CT. Clin Oral Implants Res. 2013 Aug;24(8):871–9.
141. Fanuscu MI, Chang TL. Three-dimensional morphometric analysis of human cadaver bone: microstructural data from maxilla and mandible. Clin Oral Implants Res. 2004 Apr;15(2):213–8.
142. Devlin H, Horner K, Ledgerton D. A comparison of maxillary and mandibular bone mineral densities. J Prosthet Dent. 1998 Mar;79(3):323–7.
143. Selvaraj A, Jain RK, Nagi R, Balasubramaniam A. Correlation between gray values of cone-beam computed tomograms and Hounsfield units of computed tomograms: A systematic review and meta-analysis. Imaging Sci Dent. 2022 Jun;52(2):133–40.

144. Andruch K, Płachta A. Evaluating Maxilla Bone Quality Through Clinical Investigation of Voxel Grey Scale Values from Cone-Beam Computed Tomography for Dental Use. Adv Clin Exp Med Off Organ Wroclaw Med Univ. 2015;24(6):1071–7.

145. Almasoud NN, Tanneru N, Marei HF. Alveolar bone density and its clinical implication in the placement of dental implants and orthodontic mini-implants. Saudi Med J. 2016 Jun;37(6):684–9.

146. Cassetta M, Stefanelli LV, Pacifici A, Pacifici L, Barbato E. How accurate is CBCT in measuring bone density? A comparative CBCT-CT in vitro study. Clin Implant Dent Relat Res. 2014 Aug;16(4):471–8.

147. Naitoh M, Hirukawa A, Katsumata A, Ariji E. Evaluation of voxel values in mandibular cancellous bone: relationship between cone-beam computed tomography and multislice helical computed tomography. Clin Oral Implants Res. 2009 May;20(5):503–6.

148. Norton MR, Gamble C. Bone classification: an objective scale of bone density using the computerized tomography scan. Clin Oral Implants Res. 2001 Feb;12(1):79–84.

149. Resnik RR. Radiographic Evaluation In Oral Implantology. In: Resnik R Misch's Contemporary Implant Dentistry. 2020. p. 275–330.

150. Arisan V, Karabuda ZC, Avsever H, Özdemir T. Conventional multi-slice computed tomography (CT) and cone-beam CT (CBCT) for computer-assisted implant placement. Part I: relationship of radiographic gray density and implant stability. Clin Implant Dent Relat Res. 2013 Dec;15(6):893–906.

151. Salimov F, Tatli U, Kürkçü M, Akoğlan M, Oztunç H, Kurtoğlu C. Evaluation of relationship between preoperative bone density values derived from cone beam computed tomography and implant stability parameters: a clinical study. Clin Oral Implants Res. 2014 Sep;25(9):1016–21.

152. Parsa A, Ibrahim N, Hassan B, Motroni A, van der Stelt P, Wismeijer D. Reliability of voxel gray values in cone beam computed tomography for preoperative implant planning assessment. Int J Oral Maxillofac Implants. 2012 Dec;27(6):1438–42.

153. Distefano S, Cannarozzo MG, Spagnuolo G, Bucci MB, Lo Giudice R. The "Dedicated" C.B.C.T. in Dentistry. Int J Environ Res Public Health. 2023 May 25;20(11):5954.

154. Mah P, Reeves TE, McDavid WD. Deriving Hounsfield units using grey levels in cone beam computed tomography. Dento Maxillo Facial Radiol. 2010 Sep;39(6):323–35.

155. Wang SH, Hsu JT, Fuh LJ, Peng SL, Huang HL, Tsai MT. New classification for bone type at dental implant sites: a dental computed tomography study. BMC Oral Health. 2023 May 25;23(1):324.

156. Bal C, Unsal GS, Turkyilmaz I. Comparative analysis of bone density measurements by using multislice spiral and cone-beam computed tomography. J Dent Sci. 2020 Sep;15(3):388–9.

157. Huang H, Chen D, Lippuner K, Hunziker EB. Human Bone Typing Using Quantitative Cone-Beam Computed Tomography. Int Dent J. 2023 Apr;73(2):259–66.

158. Huang H, Wu G, Hunziker E. The clinical significance of implant stability quotient (ISQ) measurements: A literature review. J Oral Biol Craniofacial Res. 2020;10(4):629–38.

159. Haghanifar S, Shafaroudi AM, Nasiri P, Amin MM, Sabet JM. Evaluation of bone density by cone-beam computed tomography and its relationship with primary stability of dental implants. Dent Res J. 2022;19:22.

160. Fallschüssel GKH. Untersuchungen zur Anatomie des zahnlosen Oberkiefers. Z Zahnärztl Implant. 1986;41:64–72.

161. Misch CE, Judy KW. Classification of partially edentulous arches for implant dentistry. Int J Oral Implantol Implantol. 1987;4(2):7–13.

162. Misch CE, Resnik RR. Available Bone And Dental Implant Treatment Plans. In: Resnik R Misch's Contemporary Implant Dentistry. 2020. p. 415–35.

163. Misch CE, Resnik RR. Treatment Plans for Partially and Completely Edentulous Arches in Implant Dentistry. In: Resnik R Misch's Contemporary Implant Dentistry. 2020. p. 480–94.

164. Wang HL, Al-Shammari K. HVC ridge deficiency classification: a therapeutically oriented classification. Int J Periodontics Restorative Dent. 2002 Aug;22(4):335–43.

165. El-Ghareeb M, Moy PK, Aghaloo TL. The single-tooth dental implant: practical guidelines for hard tissue augmentation. J Calif Dent Assoc. 2008 Nov;36(11):869–84.

166. Elian N, Ehrlich B, Jalbout Z, Cho SC, Froum S, Tarnow D. A restoratively driven ridge categorization, as determined by incorporating ideal restorative positions on radiographic templates utilizing computed tomography scan analysis. Clin Implant Dent Relat Res. 2009 Dec;11(4):272–8.

167. Linkow LI, Chercheve R. Theories and techniques of oral implantology. Vol. 1. CV Mosby Co.; 1970.

168. Misch CE. Bone character: second vital implant criterion. Dent Today. 1988;7(5):39–40.

169. Kircos LT, Misch CE. Kircos LT, Misch CE: Diagnostic imaging and techniques. In: Misch CE Contemporary Implant Dentistry. 2nd ed. St Louis, Missouri: Mosby; 1999. p. 73–87.

170. Pelegrine AA, Romito G, Villar CC, Macedo LGS de, Teixeira ML, Aloise AC, et al. Horizontal Bone Reconstruction on sites with different amounts of native bone: a retrospective study. Braz Oral Res. 2018;32:1–8.

171. Mansuy C, Saliba-Serre B, Ruquet M, Raskin A, Hüe O, Silvestri F, et al. Assessment of bone density in edentulous maxillae using cone beam computed tomography (CBCT). J Stomatol Oral Maxillofac Surg. 2024 Mar 16;101825.

172. Tavitian P, Ruquet M, Mensé C, Nicolas E, Hue O. A Numeric Analysis of Bone Density in the Edentulous Interforaminal Region. Int J Prosthodont. 2017;30(6):526–9.

173. Benjamini Y, Hochberg Y. Controlling the False Discovery Rate - a Practical and Powerful Approach. J R Stat Soc Ser B-Methodol. 1995;57(1):289–300.

174. Huang YC, Huang YC, Ding SJ. Primary stability of implant placement and loading related to dental implant materials and designs: A literature review. J Dent Sci. 2023 Oct;18(4):1467–76.

175. Mense C, Saliba-Serre B, Ferrandez AM, Hüe O, Ruquet M, Lalys L. Cone beam computed tomography analysis of the edentulous mandibular symphysis. J Dent Sci. 2021 Jan;16(1):115–22.

176. Hiasa K, Abe Y, Okazaki Y, Nogami K, Mizumachi W, Akagawa Y. Preoperative computed tomography-derived bone densities in hounsfield units at implant sites acquired primary stability. ISRN Dent. 2011;678729.

177. Singh N, Sonkesriya S, Bagewadi SB, Anwar S, Abraham S, Parihar AS, et al. Clinical Assessment of Bone Quality at Implant Site using CBCT and Hounsfield Unit. J Pharm Bioallied Sci. 2023 Jul;15(Suppl 2):S1305–7.

178. Di Stefano DA, Arosio P, Capparè P, Barbon S, Gherlone EF. Stability of Dental Implants and Thickness of Cortical Bone: Clinical Research and Future Perspectives. A Systematic Review. Mater Basel Switz. 2021 Nov 25;14(23):7183.

179. Rai S, Misra D, Misra A. Cone-beam computed tomography assessment of bone using grayscale values in patients with diabetes mellitus. A case-control observational study. J Indian Soc Periodontol. 2020 Dec;24(6):560–6.

180. Güler AU, Sumer M, Sumer P, Biçer I. The evaluation of vertical heights of maxillary and mandibular bones and the location of anatomic landmarks in panoramic radiographs of edentulous patients for implant dentistry. J Oral Rehabil. 2005 Oct;32(10):741–6.

181. Kato CN, Tavares NP, Barra SG, Amaral TM, Brasileiro CB, Abreu LG, et al. Digital panoramic radiography and cone-beam CT as ancillary tools to detect low bone mineral density in post-menopausal women. Dento Maxillo Facial Radiol. 2019 Feb;48(2):20180254.

182. Guerra ENS, Almeida FT, Bezerra FV, Figueiredo PTDS, Silva MAG, De Luca Canto G, et al. Capability of CBCT to identify patients with low bone mineral density: a systematic review. Dento Maxillo Facial Radiol. 2017 Dec;46(8):20160475.

183. Poiana IR, Dobre R, Popescu RI, Pituru SM, Bucur A. Utility of Cone-Beam Computed Tomography in the Detection of Low Bone Mass-A Systematic Review. J Clin Med. 2023 Sep 11;12(18):5890.

184. Pachêco-Pereira C, Almeida FT, Chavda S, Major PW, Leite A, Guerra ENS. Dental imaging of trabecular bone structure for systemic disorder screening: A systematic review. Oral Dis. 2019 May;25(4):1009–26.

185. Jolly SJ, Hegde C, Shetty NS. Assessment of Maxillary and Mandibular Bone Density in Controlled Type II Diabetes: A Computed Tomography Study. J Oral Implantol. 2015 Aug;41(4):400–5.

186. Klemetti E, Lassila L, Lassila V. Biometric design of complete dentures related to residual ridge resorption. J Prosthet Dent. 1996 Mar;75(3):281–4.

187. Petrie CS, Williams JL. Comparative evaluation of implant designs: influence of diameter, length, and taper on strains in the alveolar crest - A three-dimensional finite-element analysis. Clin Oral Implants Res. 2005 Aug;16(4):486–94.

188. Del Fabbro M, Pozzi A, Romeo D, de Araújo Nobre M, Agliardi E. Outcomes of Fixed Full-Arch Rehabilitations Supported by Tilted and Axially Placed Implants: A Systematic Review and Meta-Analysis. Int J Oral Maxillofac Implants. 2022;37(5):1003–25.

189. Del Fabbro M, Bellini CM, Romeo D, Francetti L. Tilted implants for the rehabilitation of edentulous jaws: a systematic review. Clin Implant Dent Relat Res. 2012 Aug;14(4):612–21.

190. Maló P, de Araújo Nobre M, Lopes A, Francischone C, Rigolizzo M. "All-on-4" immediate-function concept for completely edentulous maxillae: a clinical report on the medium (3 years) and long-term (5 years) outcomes. Clin Implant Dent Relat Res. 2012 May;14 Suppl 1:e139-150.

191. Marković A, Calvo-Guirado JL, Lazić Z, Gómez-Moreno G, Ćalasan D, Guardia J, et al. Evaluation of primary stability of self-tapping and non-self-tapping dental implants. A 12-week clinical study. Clin Implant Dent Relat Res. 2013 Jun;15(3):341–9.

192. Chatvaratthana K, Thaworanunta S, Seriwatanachai D, Wongsirichat N. Correlation between the thickness of the crestal and buccolingual cortical bone at varying depths and implant stability quotients. PloS One. 2017;12(12):e0190293.

193. Steigenga JT, al-Shammari KF, Nociti FH, Misch CE, Wang HL. Dental implant design and its relationship to long-term implant success. Implant Dent. 2003;12(4):306–17.

194. Marković A, Mišić T, Mančić D, Jovanović I, Šćepanović M, Jezdić Z. Real-time thermographic analysis of low-density bone during implant placement: a randomized parallel-group clinical study comparing lateral condensation with bone drilling surgical technique. Clin Oral Implants Res. 2014 Aug;25(8):910–8.

195. Antonelli A, Barone S, Attanasio F, Salviati M, Cerra MG, Calabria E, et al. Effect of Implant Macro-Design and Magnetodynamic Surgical Preparation on Primary Implant Stability: An In Vitro Investigation. Dent J. 2023 Sep 24;11(10):227.

196. Pérez-Pevida E, Cherro R, Camps O, Piqué N. Effects of Drilling Protocol and Bone Density on the Stability of Implants According to Different Macrogeometries of the Implant Used: Results of an In Vitro Study. Int J Oral Maxillofac Implants. 2020 Oct 9;35(5):955–64.

197. Shokri A, Ramezani L, Bidgoli M, Akbarzadeh M, Ghazikhanlu-Sani K, Fallahi-Sichani H. Effect of field-of-view size on gray values derived from cone-beam computed tomography compared with the Hounsfield unit values from multidetector computed tomography scans. Imaging Sci Dent. 2018 Mar;48(1):31–9.

198. Merheb J, Van Assche N, Coucke W, Jacobs R, Naert I, Quirynen M. Relationship between cortical bone thickness or computerized tomography-derived bone density values and implant stability. Clin Oral Implants Res. 2010 Jun;21(6):612–7.

199. Ko YC, Huang HL, Shen YW, Cai JY, Fuh LJ, Hsu JT. Variations in crestal cortical bone thickness at dental implant sites in different regions of the jawbone. Clin Implant Dent Relat Res. 2017;1–7.

LISTE DES ACRONYMES

ACP	Analyse en Composantes Principales
ALARA	*As Low As Reasonably Achievable* = Aussi Bas que Raisonnablement Possible
ALADA	*As Low as Diagnostically Acceptable* = Aussi Bas que « Diagnostiquement » Acceptable
AMU	Université d'Aix-Marseille
APHM	Assistance Publique des Hôpitaux de Marseille
BIC	*Bone Implant Contact* = Contact os-implant
BMU	*Basic Multicellular Unit* = Unité muticellulaire de remodelage
BPCO	Broncho-Pneumopathie Chronique Obstructive
BV	*Bone volume* = Volume total
BV/TV	*Bone volume / total volume* = Fraction volumique de l'os
BY	Benjamini-Yekutieli
CBCT	*Cone Beam Computed Tomography* = Tomographie volumique à faisceau conique
CHU	Centre Hospitalo-Universitaire
CT	*Computed Tomography* = Tomographie assistée par ordinateur
DICOM	*Digital Imaging and Communication in Medicine*
DMO	Densité Minérale Osseuse
DXA	*Dual energy X-ray Absorptiometry* = Ostéodensitométrie ou absorptiométrie biphotonique à rayons X
FDR	*False Discovery Rate*
FOV	*Field Of View* = Champ de vision
GV	*Grey value* = Niveau de gris
INSEE	Institut National de la Statistique et des Études Économiques
ISQ	*Implant Stability Quotient* = Quotient de stabilité de l'implant
IU	Intra-utérine
Micro-CT	*Microcomputed tomography* = Microtomodensitométrie
OMS	Organisation Mondiale de la Santé
RFA	*Resonance frequency analysis* = Analyse de la fréquence de résonnance
PA	Paquets-années
PADS	Portail d'Accès aux Données de Santé
Tb.N	*Trabecular number* = Nombre de travées
Tb.Sp	*Trabecular spacing* = Espace entre les travées
Tb.Th	*Trabecular thickness* = Épaisseur des travées
TV	*Total volume* = Volume total
UH	Unités Hounsfield
VV	Valeur de voxel

TABLE DES FIGURES

- Figure 1 : Les cinq bourgeons de la face : le bourgeon nasofrontal (1), les deux bourgeons maxillaires (2) et les deux bourgeons mandibulaires (3) limitant la cavité stomodéale (*) (Illustration : Goldberg et al.[19]) 18
- Figure 2 : Formation des maxillaires (Illustration : Goldberg[8]) 18
- Figure 3 : Origine des os de la face humaine, par extrapolation des résultats obtenus chez l'oiseau (Illustration : Khonsari et Catala[18]) 19
- Figure 4 : Allongement et élargissement de la face lors de la croissance ; la croissance sagittale est limitée (Illustration : Bouaoud et al.[22]) 20
- Figure 5 : Comparaison de la croissance faciale des humains et des chimpanzés : la croissance antéro-postérieure est plus limitée chez l'Homme, avec la présence d'une zone de résorption spécifique prémaxillaire. (Illustration : Bouaoud et al.[22]) 21
- Figure 6 : Microarchitecture de l'os cortical en microscopie électronique à balayage. (Illustrations : Chappard[5]) 22
- Figure 7 : Microarchitecture de l'os trabéculaire en microscopie électronique à balayage. (Illustrations : Chappard[5]) 23
- Figure 8 : Résorption osseuse centripète de l'os maxillaire à travers le temps 30
- Figure 9 : Changements relatifs aux relations des mâchoires chez le sujet denté (à gauche) et chez le sujet édenté total (à droite), associés à une diminution de la hauteur de l'étage inférieur de la face (LFH) et une augmentation de la proéminence du menton 30
- Figure 10 : Résorption centripète du maxillaire édenté : les foramina grand palatin (flèches noires) et incisifs (flèche blanche) se rapprochent du sommet crestal 31
- Figure 11 : Insertions des muscles de la cavité buccale au niveau du maxillaire denté (à gauche) et édenté (à droite) (Illustration : Cawood et Howell[54]). 31
- Figure 12 : Relations entre l'âge et l'édentement complet (Illustration : Mojon et al.[34]) 34
- Figure 13 : Planches anatomiques de Vicq d'Azyr décrivant l'os maxillaire d'un sujet âgé (a) et celui d'un fœtus (b) (Illustration : Ashley-Montagu[74]) 37
- Figure 14 : Vue palatine d'un fœtus de 3 mois montrant la suture inter-alvéolaire, les parois antérieures des alvéoles des incisives étant formées par les maxillaires 38
- Figure 15 : Mise en évidence de l'os prémaxillaire et de la suture intermaxillaire sur des crânes humains enfant (A) et adulte (B) par Trevisan et Consolaro[21] 40
- Figure 16 : Influence de la qualité osseuse sur les taux de succès implantaires 45
- Figure 17 : Classification qualitative des résorptions osseuses de Lekholm et Zarb 59
- Figure 18 : Différents stades de résorption osseuse maxillaire en coupe para-sagittale après édentation selon Fallschüssel[160] (Illustration : Vacher[20]) 60
- Figure 19 : Classification d'os disponible de Misch et Judy[161] 60
- Figure 20 : Exemples de catégories de la classification de Misch et Judy appliquée aux arcades totalement édentées (Illustration : Misch et Resnik[163]) 61

- Figure 21 : Classification de Cawood et Howell au maxillaire antérieur et postérieur (Illustration d'après Cawood et Howell[44]) 62
- Figure 22 : Classification des crêtes HVC de Wang et Al-Shammari 63
- Figure 23 : Classification UCLA des crêtes alvéolaires partiellement édentées proposée par El-Ghareeb et al., 2008[165] (Illustration : El-Ghareeb et al.[165]) 64
- Figure 24 : Classification RDRC de Elian et al. (Illustrations : Elian et al.[166]) 65
- Figure 25 : Classification de Lekholm et Zarb (Illustration, d'après Lekholm et Zarb[103]) 66
- Figure 26 : Classification révisée selon Al-Ekrish et al. (Illustration : Al-Ekrish et al.[108]) 67
- Figure 27 : Classification de Lindh et al. (Illustrations : Lindh et al.[102]) 69
- Figure 28 : Classification des densités osseuses de Misch (Illustration d'après Misch[84,126,168]) 69
- Figure 29 : Images micro-CT bidimensionnelles comparant les échantillons de différentes qualités osseuses en utilisant la classification HNS (Illustrations : Rebaudi et al.[23]) 71
- Figure 30 : La crête édentée maxillaire selon Shemtov-Yona[9] 75
- Figure 31 : Illustration schématique des six implants virtuels positionnés en avant de la paroi antérieure du sinus, au niveau des sites incisifs (I), canins (C), et prémolaires (P). 79
- Figure 32 : Mesures de la densité osseuse en unités Hounsfield (UH) au niveau du col, de la partie médiane du corps et de l'apex des zones vestibulaires et palatines de chaque implant virtuel, grâce à l'outil de mesure de la densité du logiciel DTX® 80
- Figure 33 : Distribution des densités osseuses moyennes de la zone pré-sinusienne (en UH) chez les 69 individus (ÉTUDE N°1) 82
- Figure 34 : Distribution de la densité osseuse moyenne de la zone pré-sinusienne (en UH) selon le sexe des individus (ÉTUDE N°1) 83
- Figure 35 : Relations entre la densité osseuse moyenne de la zone pré-sinusienne (en UH) et l'âge des individus, en fonction du sexe des individus (ÉTUDE N°1). 85
- Figure 36 : Graphe des densités osseuses moyennes (± écarts-types, en UH) en fonction du site (incisive, canine, prémolaire), et de la partie de l'implant (apex, corps, col) (ÉTUDE N°1) 86
- Figure 37 : Graphe des densités osseuses moyennes (± écarts-types, en UH) en fonction de la partie de l'implant (apex, corps, col) et de la zone vestibulaire ou palatine (ÉTUDE N°1) 87
- Figure 38 : Illustration de la mesure de la « densité apicale trabéculaire », au niveau de la pointe de l'implant dans le cadre de l'ÉTUDE N°2. 90
- Figure 39 : Distribution des densités osseuses moyennes de la zone pré-sinusienne (en UH) chez les 100 individus (ÉTUDE N°2) 93
- Figure 40 : Distribution de la densité osseuse moyenne de la zone pré-sinusienne (en UH) selon le sexe des individus (ÉTUDE N°2) 94
- Figure 41 : Distribution de la longueur moyenne des implants virtuels (en mm) selon le sexe des individus (ÉTUDE N°2) 96

- Figure 42 : Relations entre la densité osseuse moyenne (en UH) de la zone pré-sinusienne et l'âge des individus, en fonction du sexe (ÉTUDE N°2). 97
- Figure 43 : Matrice de corrélation chez les femmes entre les densités osseuses moyennes calculées en différents points du maxillaire d'une part, et l'âge des individus d'autre part. (ÉTUDE N°2) 98
- Figure 44 : Relations entre la densité osseuse moyenne trabéculaire apicale (en UH) et l'âge des individus, en fonction du sexe (ÉTUDE N°2). 98
- Figure 45 : Matrice de corrélation chez les **femmes** entre les densités osseuses trabéculaires apicales (TA), mesurées en différents points du maxillaire d'une part, et l'âge des individus d'autre part (ÉTUDE N°2). 99
- Figure 46 : Relations la longueur moyenne des implants virtuels (en mm) et l'âge des individus, en fonction du sexe (ÉTUDE N°2). 99
- Figure 47 : Distribution de la densité osseuse moyenne de la zone pré-sinusienne (en UH) selon la présence ou non d'un diabète (ÉTUDE N°2) 101
- Figure 48 : Distribution de la densité osseuse moyenne de la zone pré-sinusienne (en UH) selon la durée d'édentement (ÉTUDE N°2) 102
- Figure 49 : Distribution de la densité osseuse moyenne de la zone pré-sinusienne (en UH) selon la longueur moyenne des implants virtuels (ÉTUDE N°2) 103
- Figure 50 : Matrices de corrélation entre les variables quantitatives : densité osseuse moyenne de la zone pré-sinusienne, densité osseuse moyenne trabéculaire apicale, âge, taille, poids, consommation de tabac, longueur moyenne des implants virtuels, chez l'ensemble des individus (a), chez les hommes (b), et chez les femmes (c) (ÉTUDE N°2) 105
- Figure 51 : Pourcentage des variances exprimées pour chaque composante de l'ACP (ÉTUDE N°2) 107
- Figure 52 : Graphe des variables de l'analyse en composantes principales (ACP) (ÉTUDE N°2) 108
- Figure 53 : Graphe (nuage de points) des individus de l'ACP (ÉTUDE N°2) 108
- Figure 54 : Graphe des densités osseuses moyennes (± écarts-types, en UH) en fonction du site (incisive, canine, prémolaire), et de la partie de l'implant (apex, corps, col) (ÉTUDE N°2) 109
- Figure 55 : Graphe des densités osseuses trabéculaires apicales moyennes (± écarts-types, en UH) en fonction du site (incisive, canine, prémolaire) (ÉTUDE N°2) 110
- Figure 56 : Graphe des densités osseuses moyennes (± écarts-types, en UH) en fonction de la partie de l'implant (apex, corps, col) et de la zone vestibulaire ou palatine (ÉTUDE N°2) 111
- Figure 57 : Exemple d'un implant pouvant être utilisé dans un os peu dense : l'implant NobelActive TiUltra® de NobelBiocare® 137

TABLE DES TABLEAUX

- Tableau 1 : Chronologie du processus de cicatrisation après l'extraction d'une dent 28
- Tableau 2 : Valeurs de référence de la densité osseuse pour chaque type d'os selon la classification de Lekholm et Zarb 68
- Tableau 3 : Classification HNS selon les seuils proposés par Trisi et Rao[137] et calculés approximativement par Rebaudi et al.[23] en utilisant une formule de conversion mathématique (D'après Rebaudi et al.[23]) 72
- Tableau 4 : Classification de Wang et al. (Illustrations : Wang et al.[155]) 73
- Tableau 5 : Classification HAC de Pelegrine et al. (Illustrations : Pelegrine et al.[170]) 74
- Tableau 6 : Statistiques descriptives de la variable âge, en fonction du sexe des individus (ÉTUDE N°1) 82
- Tableau 7 : Statistiques descriptives de la densité osseuse moyenne de la zone pré-sinusienne et des densités osseuses moyennes au niveau des trois sites (incisive, canine, prémolaire) et à trois niveaux des implants (col, corps, apex) en fonction du sexe, et résultats des tests de Student (ÉTUDE N°1) 84
- Tableau 8 : Résultats des tests de Student comparant les densités osseuses des trois sites du maxillaire édentés (ÉTUDE N°1) 87
- Tableau 9 : Statistiques descriptives de la variable âge, en fonction du sexe des individus (ÉTUDE N°2) 93
- Tableau 10 : Statistiques descriptives de la densité osseuse moyenne de la zone pré-sinusienne, de la densité moyenne au niveau des trois sites (incisive, canine, prémolaire) et à trois niveaux des implants (col, corps, apex), des densités trabéculaires apicales moyennes, et de la longueur moyenne des implants virtuels, en fonction du sexe des individus, et résultats des tests de Student (ÉTUDE N°2) 95
- Tableau 11 : Statistiques descriptives des variables densité osseuse de la zone pré-sinusienne et densité trabéculaire apicale, en fonction du statut des individus vis-à-vis du diabète, et résultats des tests de la somme des rangs de Wilcoxon (ÉTUDE N°2) 100
- Tableau 12 : Statistiques descriptives des variables densité osseuse de la zone pré-sinusienne et densité trabéculaire apicale, en fonction du statut des individus vis-à-vis de l'édentement, et résultats des tests de la somme des rangs de Wilcoxon (ÉTUDE N°2) 102
- Tableau 13 : Statistiques descriptives des variables densité osseuse de la zone pré-sinusienne et densité trabéculaire apicale, en fonction du statut des individus vis-à-vis de la hauteur de la crête osseuse (représentée par la longueur moyenne des implants virtuels), et résultats des tests Student (ÉTUDE N°2) 103
- Tableau 14 : Statistiques descriptives des variables densité osseuse de la zone pré-sinusienne et densité trabéculaire apicale **chez les femmes**, en fonction du statut des

individus vis-à-vis de la hauteur de la crête osseuse, et résultats des tests Student (ÉTUDE N°2) 104
- Tableau 15 : Nombre et proportion des valeurs manquantes pour chaque variable (quantitative ou qualitative) étudiée dans l'ACP (ÉTUDE N°2) 106
- Tableau 16 : Résultats des tests de Student comparant les densités osseuses trabéculaires apicales des trois régions du maxillaire édentés (ÉTUDE N°2) 110
- Tableau 17 : Statistiques descriptives de la densité osseuse moyenne de la zone pré-sinusienne et des densités osseuses moyennes à trois niveaux des implants (col, corps, apex) en fonction de la localisation vestibulaire ou palatine, et résultats des tests de Student (ÉTUDE N°2) 112
- Tableau 18 : Méthodologie et résultats des études précédentes ayant analysé les densités de sites édentés du maxillaire antérieur 118
- Tableau 19 : Méthodologie et résultats des études précédentes ayant analysé l'influence du sexe sur les densités des mâchoires 122
- Tableau 20 : Méthodologie et résultats des études ayant analysé l'influence de l'âge sur les densités des mâchoires 127

ANNEXES

A. Comité d' Éthique de l'Université d'Aix Marseille

Comité d'éthique de l'université d'Aix-Marseille

Objet : Avis du Comité d'éthique.
N/Réf dossier : 2022-09-07-001
Dossier suivi par :DRV-Audrey Janssens

Pièce(s) jointe(s) : 1 document

Marseille, le lundi 12 septembre 2022

Le projet de recherche présenté par l'investigateur principal, RUQUET Michel, PU-PH rattaché au du Laboratoire ADES de l'Université d'Aix-Marseille et les investigateurs secondaires, Mense Chloé MCU-PH et Mansuy Charlotte-AHU et Doctorante, intitulé**, « Variabilités des densités osseuses de la zone pré-sinusienne chez des patients édentés complets au maxillaire»** a été soumis pour avis au Comité d'éthique en sa séance du jeudi 7 septembre 2022.

Après audition des rapporteurs et compléments d'information apportés par l'investigateur, le comité a jugé que le projet ne présentait aucun problème éthique.

Le comité rend donc un avis favorable.

Le Président du Comité d'éthique

Pierre-Jean Weiller

Université d'Aix-Marseille - Jardin du Pharo - 58 boulevard Charles Livon - 13284 Marseille cedex 07 - France
Tél. : +33 (0)4 91 39 65 00 - Fax : +33 (0)4 91 31 31 36 - www.univ-amu.fr

B. Tableaux annexes

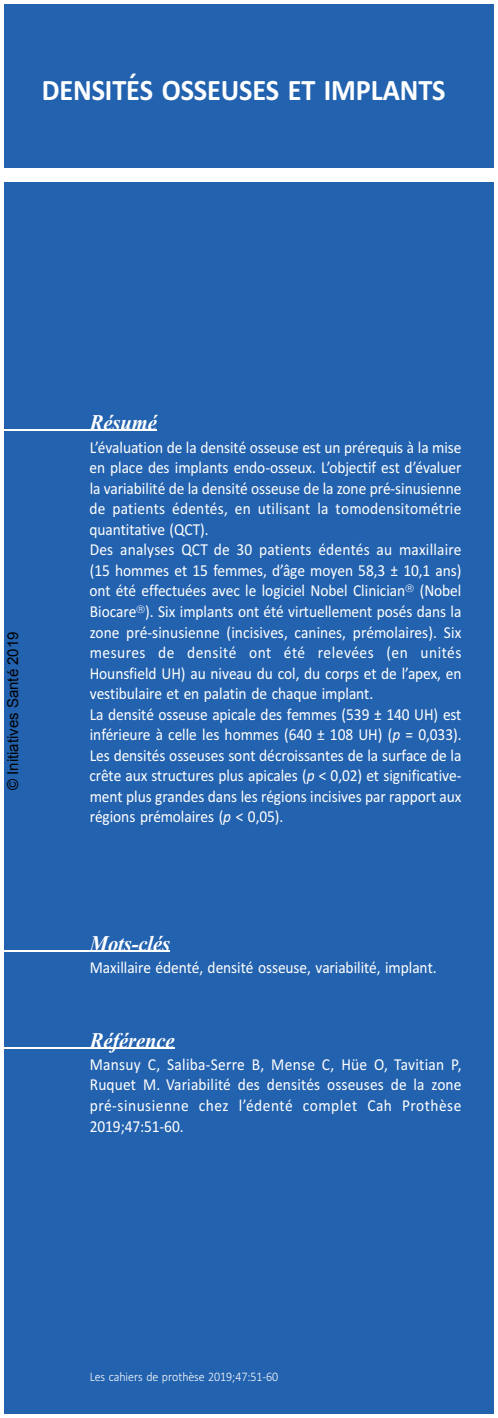
1. Densité osseuse moyenne ± écart-type (SD) en UH, au niveau vestibulaire et palatin de chaque zone de l'implant selon le site (incisive, canine, prémolaire) (**ÉTUDE N°1**)

	Densité osseuse moyenne (UH)			
Zone de l'implant	**Col**	**Corps**	**Apex**	**Global**
Site implantaire	**Moyenne (± SD)**	**Moyenne (± SD)**	**Moyenne (± SD)**	**Moyenne (± SD)**
Prémolaire (P) droite				
Vestibulaire	644 (± 216)	713 (± 241)	640(± 253)	665 (± 182)
Palatin	752 (± 216)	619 (± 236)	609 (± 226)	660 (± 160)
Global	698 (± 178)	666 (± 207)	624 (± 219)	663 (± 155)
Canine (C) droite				
Vestibulaire	736 (± 187)	801 (± 211)	606 (± 212)	714 (± 151)
Palatin	829 (± 187)	627 (± 244)	599 (± 220)	685 (± 164)
Global	783 (± 152)	714 (± 186)	602 (± 189)	700 (± 143)
Incisive (I) droite				
Vestibulaire	751 (±224)	783 (± 222)	640 (± 205)	725 (± 167)
Palatin	851 (± 185)	669 (± 193)	656 (± 218)	725 (± 148)
Global	801 (± 179)	726 (± 181)	648 (± 176)	725 (± 144)
Incisive (I) gauche				
Buccal	767 (± 229)	776 (± 223)	672 (± 214)	738 (± 178)
Lingual	859 (± 214)	676 (± 206)	645 (± 197)	727 (± 171)
Global	813 (± 195)	726 (± 191)	658 (± 186)	732 (± 161)
Canine (C) gauche				
Buccal	740 (± 246)	795 (± 191)	593 (±)202)	709 (± 167)
Lingual	904 (± 207)	625 (± 235)	584 (± 197)	704 (± 175)
Global	822 (± 197)	710 (± 186)	588 (± 173)	707 (± 161)
Prémolaire (P) gauche				
Buccal	655 (± 227)	664 (± 218)	630 (± 245)	650 (± 178)
Lingual	748 (± 200)	631 (± 220)	562 (± 241)	647 (± 162)
Global	701 (± 178)	648 (± 176)	596 (± 218)	648 (± 151)
Moyenne	770 (± 128)	698 (± 147)	619 (± 161)	696 (± 129)

C. Recueil des publications

1. Liste des publications réalisées dans le cadre du projet de thèse

1.1. MANSUY C., SALIBA-SERRE B., MENSE C., HÜE O., TAVITIAN P., RUQUET M. Variabilité des densités osseuses de la zone pré-sinusienne chez l'édenté complet. Cah prothèses 2019;47:51-60



DENSITÉS OSSEUSES ET IMPLANTS

Résumé

L'évaluation de la densité osseuse est un prérequis à la mise en place des implants endo-osseux. L'objectif est d'évaluer la variabilité de la densité osseuse de la zone pré-sinusienne de patients édentés, en utilisant la tomodensitométrie quantitative (QCT).

Des analyses QCT de 30 patients édentés au maxillaire (15 hommes et 15 femmes, d'âge moyen 58,3 ± 10,1 ans) ont été effectuées avec le logiciel Nobel Clinician® (Nobel Biocare®). Six implants ont été virtuellement posés dans la zone pré-sinusienne (incisives, canines, prémolaires). Six mesures de densité ont été relevées (en unités Hounsfield UH) au niveau du col, du corps et de l'apex, en vestibulaire et en palatin de chaque implant.

La densité osseuse apicale des femmes (539 ± 140 UH) est inférieure à celle les hommes (640 ± 108 UH) (p = 0,033). Les densités osseuses sont décroissantes de la surface de la crête aux structures plus apicales (p < 0,02) et significativement plus grandes dans les régions incisives par rapport aux régions prémolaires (p < 0,05).

© Initiatives Santé 2019

Mots-clés

Maxillaire édenté, densité osseuse, variabilité, implant.

Référence

Mansuy C, Saliba-Serre B, Mense C, Hüe O, Tavitian P, Ruquet M. Variabilité des densités osseuses de la zone pré-sinusienne chez l'édenté complet Cah Prothèse 2019;47:51-60.

Variabilité des densités osseuses de la zone pré-sinusienne chez l'édenté complet

C. MANSUY, B. SALIBA-SERRE, C. MENSE, O. HÜE, P. TAVITIAN, M. RUQUET

INTRODUCTION

En Europe, la survenue de la perte totale des dents serait directement liée à l'âge, mais il existe de grandes différences de prévalence de l'édentement selon les pays, selon les zones géographiques d'un même pays et dans des groupes d'origines diverses [1, 2]. De manière générale, l'édentement total avant 50 ans serait considéré comme rare [2].

La perte d'une ou plusieurs dents entraîne une résorption irréversible de l'os alvéolaire, et ainsi une atrophie des procès alvéolaires dans le sens vertical et dans le sens horizontal. Au maxillaire, la résorption de la corticale vestibulaire est plus importante que celle de la corticale palatine, entraînant un mouvement de résorption centripète [3, 4]. Cette résorption s'accompagne d'un remodelage osseux, et donc d'une modification de la densité osseuse minérale, en particulier au maxillaire postérieur.

Les modifications de l'os alvéolaire après avulsion varient considérablement d'un individu à l'autre et dépendent de nombreux facteurs, qu'ils soient généraux (ostéopathies métaboliques, ostéoporose, prise de certains médicaments, âge du patient...) ou locaux (qualité et quantité osseuses avant extraction...) [5]. La densité osseuse du maxillaire édenté devrait donc varier selon les individus.

L'évaluation de la quantité et de la qualité osseuses est un prérequis à la mise en place des implants endo-osseux. Des études ont révélé des taux d'échec plus élevés lorsque la qualité et la quantité osseuses étaient médiocres [6, 7]. Diverses méthodes d'évaluation de la densité osseuse, comme la radiographie conventionnelle ou la sensation tactile lors du forage, ont été proposées dans la littérature [6, 8-13]. Cependant, ces méthodes sont techniquement difficiles et dépen-

1.2. MANSUY C., SALIBA-SERRE B., RUQUET M., RASKIN A., HÜE O., SILVESTRI F., MENSE C. Assessment of bone density in edentulous maxillae using cone beam computed tomography (CBCT). J Stomatol Oral Maxillofac Surg. 2024 Mar;16:101825. ISSN : 2468-7855.

J Stomatol Oral Maxillofac Surg 125 (2024) 101825

Available online at ScienceDirect www.sciencedirect.com

Elsevier Masson France EM|consulte www.em-consulte.com

Original Article

Assessment of bone density in edentulous maxillae using cone beam computed tomography (CBCT)

Charlotte Mansuy[a,b,c,1,*], Bérengère Saliba-Serre[a], Michel Ruquet[a,b,c], Anne Raskin[a,b,c], Olivier Hüe[a,b], Frédéric Silvestri[a,b,c], Chloé Mense[a,b,c]

[a] CNRS, EFS, ADES, Aix-Marseille Université, Marseille, France
[b] Faculté des Sciences Médicales et Paramédicales, Ecole de Médecine Dentaire, Aix-Marseille Université, Marseille, France
[c] Assistance Publique des Hôpitaux de Marseille, Pôle PROMOD Odontologie, Service de Réhabilitations Orales, Marseille, France

ARTICLE INFO

Article History:
Received 22 December 2023
Accepted 7 March 2024
Available online 16 March 2024

Keywords:
Bone density
Cone beam computed tomography
Dental implant
Edentulous jaw
Maxilla

ABSTRACT

Introduction: In edentulous maxillae, the anterior maxilla is the region of interest for implant placement due to posterior bone resorption and sinus pneumatization. This study aimed to assess variations in bone density in different regions of the edentulous maxilla according to sex and age, using cone beam computed tomography (CBCT).

Materials and methods: 69 CBCT from edentulous maxilla were analyzed. Six virtual implants were planned between the maxillary sinuses at incisor, canine, and premolar sites. Bone densities (in Hounsfield units HU) were recorded at six points on the neck, body, and apex of the buccal and lingual areas of each virtual implant. We used the two-sample *t*-test to compare male and female bone densities, and the Spearman correlation coefficient to analyze the correlation between mean bone density and age. One-way analysis of variance with post hoc pairwise *t*-tests was used to analyze the differences in density between three sites of the edentulous maxilla and the differences in density between three parts of the implant. The significance level was set at 5%.

Results: Mean bone density in males was significantly higher than in females. There was a significant correlation between mean bone density and age in females. Incisor sites showed the highest mean bone density, followed by canine and premolar sites. There was a significant decline in bone density from the neck to the apex.

Conclusions: Bone density varied within and among edentulous maxillae. Bone density of the edentulous maxilla seemed to be influenced by age in women and by sex.

© 2024 The Author(s). Published by Elsevier Masson SAS. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license (http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/)

1. Introduction

Fixed prostheses supported by implants have become a predictable option in the rehabilitation of edentulous arches. In maxillary edentulous patients, the anterior maxilla is the region of interest for implant placement due to posterior bone resorption and sinus pneumatization. These sites may have different shapes due to different causes of edentulousness (traumatic, periodontitis, etc.) [1]. Accurate assessment of the dental implant site is essential prior to implant placement, particularly in case of multiple implants or immediate loading. Indeed, the clinical success of dental implants is determined by both the quantity and quality of available bone [2,3]. The term "bone quality" has been introduced to describe the different bone density types [4,5]. Bone density is one of the most important factors influencing the primary stability of the implant and osseointegration [1,4,6–9]. A meta-analysis suggested higher failure rates from implants placed in low-density bone [10]. Analysis of bone density allows the clinician to select the implant sites, the implant thread, surface and shape, the healing period, the loading protocol, and the best surgical protocol to obtain good primary stability and quick osteointegration [2,9,11–14].

Dual-energy X-ray absorptiometry (DXA) is the gold standard for bone mineral density measurement in skeletal sites other than the jaw, but this method can be costly [15,16]. Various methods have been proposed to assess jawbone density [2,6,7,17]. Lekholm and

Abbreviations: ALADA, as low as diagnostically acceptable; ALARA, as low as reasonably achievable; CBCT, cone beam computed tomography; CT, computed tomography; DXA, dual-energy X-ray absorptiometry; DICOM, digital imaging and communications in medicine; FDR, false discovery rate; HU, hounsfield units

* Corresponding author at: Charlotte Mansuy, Ecole de Médecine Dentaire, Faculté des Sciences Médicales et Paramédicales, Aix-Marseille Université, Marseille, France.
E-mail address: charlotte.mansuy@univ-amu.fr (C. Mansuy).
[1] Present address: Ecole de Médecine Dentaire, Faculté des Sciences Médicales et Paramédicales, Aix Marseille Université, 27 boulevard Jean Moulin, 13005 Marseille, France.

https://doi.org/10.1016/j.jormas.2024.101825
2468-7855/© 2024 The Author(s). Published by Elsevier Masson SAS. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license (http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/)

2. Participation aux congrès au cours de la période de thèse

2.1. MANSUY C., SALIBA-SERRE B., HÜE O., TAVITIAN P., RUQUET M. Variabilité des densités osseuses de la zone pré-sinusienne chez l'édenté complet. C.A. présentée aux 42èmes journées du Collège National des Enseignants en Prothèse Odontologique (CNEPO), Bordeaux, 14-15 septembre 2018.

Collège National des Enseignants en Prothèses Odontologiques
Bordeaux, 14-15 Septembre 2018

Présentateur : Etudiant (interne) ☑ Statutaire ☐
Catégorie : Recherche ☑ Clinique ☐ Pédagogique ☐

Variabilité des densités osseuses de la zone pré-sinusienne chez l'édenté complet

Charlotte Mansuy, Bérengère Saliba-Serre, Olivier Hüe, Patrick Tavitian, Michel Ruquet

Faculté d'odontologie de Marseille, 27, Boulevard Jean Moulin – 13005 Marseille
cha.mansuy@gmail.com

Objectif : L'étude des densités osseuses présente un intérêt en anthropologie et en odontologie. L'objectif de cette étude a été d'évaluer la variabilité de la densité osseuse de la zone pré-sinusienne en utilisant la tomodensitométrie quantitative (QCT).

Matériels et Méthodes : Des analyses QCT de 30 patients édentés complets au maxillaire (15 hommes et 15 femmes) ont été effectuées à l'aide du logiciel Nobel Clinician®. Six points de repère de la zone incisive centrale, canine et première prémolaire ont été utilisés, sous la forme de six implants parallèles posés virtuellement dans la zone pré-sinusienne. Six points de mesure de la densité osseuse ont été relevés pour chaque implant (en unités Hounsfield UH) : au niveau du col, de la partie médiane du corps, et de l'apex des parties vestibulaires et palatines de chaque implant.

Résultats – Discussion : La densité osseuse apicale était plus faible chez les femmes (539 ± 140 UH) que chez les hommes (640 ± 108 UH) (p=0,033). Les densités osseuses étaient décroissantes de la surface de la crête osseuse aux structures plus apicales (p<0.02), et significativement plus grande dans les régions incisives par rapport aux régions prémolaires (p<0.05).

Conclusion : Ces résultats devraient permettre d'orienter l'acte chirurgical et la conception de la future prothèse implanto-portée.

Variabilité des densités osseuses de la zone pré-sinusienne chez l'édenté complet

Assistance Publique Hôpitaux de Marseille
ADES UMR 7268
Charlotte Mansuy, Ancienne interne des hôpitaux de Marseille
Michel Ruquet, PU-PH prothèse, UFR Odontologie Marseille
NTPO

INTRODUCTION

Intérêt de l'étude de la variabilité des densités osseuses

- En anthropologie du vivant : modifications de la structure osseuse en fonction du vieillissement
- En odontologie clinique : réhabilitation implantaire et prothétique de l'édenté complet maxillaire

Objectif : Evaluer la **variabilité** de la densité osseuse de la zone pré-sinusienne de patients édentés à partir **d'examens radiographiques tridimensionnels** de patients édentés complets au maxillaire

- Variabilité inter-individuelle : selon l'âge et le sexe
- Variabilité intra-populationnelle : sens vestibulo-palatin, mésio-distal (zone incisive / canine / prémolaire) et vertical (apex, col, corps)

MATÉRIELS ET MÉTHODES

Echantillon : N= 30 (15 ♂+15 ♀)

Critères d'inclusion : Edentés complets au maxillaire > 2 mois, ayant effectué une consultation en implantologie et un CBCT pré-implantaire dans le service d'odontologie de l'Hôpital de la Timone (APHM, Marseille 13005)

Critères d'exclusion :

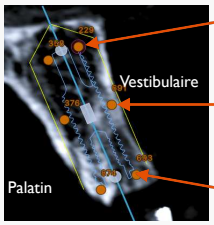
- Pathologies systémiques pouvant influencer le métabolisme osseux
- ATCD de traumatismes, séquelles chirurgicales ou dysmorphoses
- Pathologies contre-indiquant une thérapeutique implantaire
- Résorption extrême du maxillaire

Protocoles d'imagerie et de mesures [1] : logiciel NobelClinician®





Implants virtuels :
Incisive (I3-I4)
Canine (I2-I5)
Prémolaire (I1-I6)



Apex = Zone apicale
Corps = Zone médiane
Col = Zone crestale

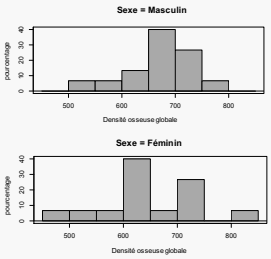
6 points de mesure de la densité osseuse au niveau de chaque implant

RÉSULTATS

Densité osseuse globale moyenne de la zone pré-sinusienne = 660.9 ±76.7 UH

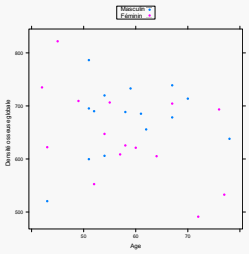
Variabilité inter-individuelle

Selon le sexe



Test de la somme des rangs de Wilcoxon
Densité osseuse globale : p = 0.305
Densité osseuse apicale : p = 0.033

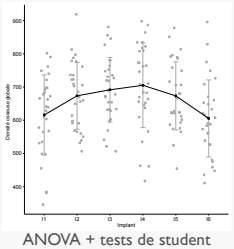
Selon l'âge



Test de corrélation de Spearman
p = 0.414

Variabilité intra-populationnelle

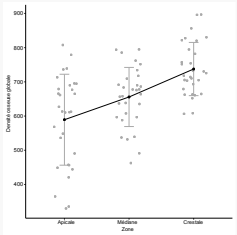
Sens mésio-distal



ANOVA + tests de student

	I1	I2	I3	I4	I5
I2	0.082	–	–	–	–
I3	**0.018**	1.000	–	–	–
I4	**0.018**	1.000	1.000	–	–
I5	0.112	1.000	1.000	0.420	–
I6	1.000	1.000	**0.041**	**0.021**	0.070

Sens vertical



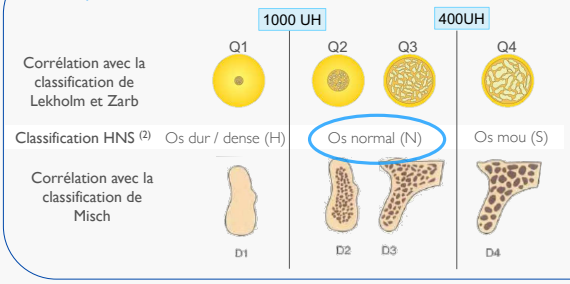
ANOVA + tests de student

Zone	Apicale	Médiane
Médiane	**0.014**	–
Crestale	**0.0000073**	**0.0000216**

Sens vestibulo-palatin
Test de student : p = 0.900

DISCUSSION ET CONCLUSION

Moyenne de la densité osseuse de la zone médiane : 555-794 UH



- CBCT = Densités osseuses relatives
- Résultats comparables avec les études précédentes [3-6]
- Selon le sexe : Pas de différence statistiquement significative de densité osseuse globale mais différences significatives de densités apicales : H > F
- Pas de corrélation densité osseuse / âge
- Densité osseuse significativement plus grande dans les régions incisives par rapport aux régions prémolaires
- Densité de la zone prémolaire statistiquement inférieure à celle de la zone incisive
- Densité osseuse décroissante de la surface de la crête osseuse aux structures plus apicales (statistiquement significatif)

BIBLIOGRAPHIE

1. Tavitian P, Ruquet M, Mense C, Nicolas E, Hue O. A Numeric Analysis of Bone Density in the Edentulous Interforaminal Region. Int J Prosthodont. nov 2017;30(6):526-9.
2. Rebaudi A, Trisi P, Cella R, Cecchini G. Preoperative evaluation of bone quality and bone density using a novel CT/microCT-based hard-normal-soft classification system. Int J Oral Maxillofac Implants. févr 2010;25(1):75-85.
3. Norton MR, Gamble C. Bone classification: an objective scale of bone density using the computerized tomography scan. Clin Oral Implants Res. févr 2001;12(1):79-84.
4. Turkyilmaz I, Ozan O, Yilmaz B, Ersoy AE. Determination of bone quality of 372 implant recipient sites using Hounsfield unit from computerized tomography: a clinical study. Clin Implant Dent Relat Res. déc 2008;10(4):238-44.
5. Fuh L-J, Huang H-L, Chen C-S, Fu K-L, Shen Y-W, Tu M-G, et al. Variations in bone density at dental implant sites in different regions of the jawbone. J Oral Rehabil. 1 mai 2010;37(5):346-51.
6. Hiasa K, Abe Y, Okazaki Y, Nogami K, Mizumachi W, Akagawa Y. Preoperative computed tomography-derived bone densities in hounsfield units at implant sites acquired primary stability. ISRN Dent. 2011;2011:678729.

2.2. MANSUY C., SILVESTRI F., STEPHAN G. Extensions des prothèses complètes ostéo-ancrées mandibulaires : état des connaissances. Communication orale présentée au Symposium International sur le Traitement de l'Édentement Total (SITET), Annecy, 21 juin 2019.

Société Internationale du Traitement de l'Édentation Totale

16ème SITET — Saint-Jorioz - 21 juin 2019

PROGRAMME DU 16EME SITET

3ème Session – Présidence : Pr Olivier HÜE

14h00 ***Extensions des prothèses complètes ostéo-ancrées mandibulaires : état des connaissances.***
C. Mansuy (Université Aix-Marseille)

14h20 ***Mise en charge immédiate et implantologie chez l'édenté complet.***
C. Mense, P. Tavitian (Université Aix-Marseille)

14h40 ***Réhabilitations implanto-portées complètes sur implants Tissue Level : avantages, difficulté, limites.***
P. Fabregat, V Martiano, S Mascarell (Université de Paris, Hôpital PSL)

15h00 ***Empreinte numérique pour les restaurations prothétiques sur implants chez l'édenté complet : Revue de la littérature.***
R Moukkok, C Wulfman, L Tapie, A Naveau ; C Rignon-Bret (Laboratoire URB2i, Université de Paris)

15h20 PAUSE

3ème Session – Présidence : Pr Jean-Luc VEYRUNE

15h40 ***Flux numérique et prothèses immédiates chez un adolescent atteint du syndrome de Papillon -Lefèvre.***
G Lienhart, C Khoury, M Ducret, C Millet (Université de Lyon)

16h00 ***Dernières évolutions technologiques du système Ivoclar Digital Denture et applications cliniques.*** *N Drancourt, C Philippon, M Bessadet, JL Veyrune, G Bonnet, C Batisse (Université Clermont Auvergne)*

16h20 ***Evaluation du système Ivoclar Digital Denture sur la physiologie de la mastication et la qualité de vie orale.*** *MS Bogner, F Celle, E Nicolas, JL Veyrune, C Batisse, G Bonnet (Université Clermont Auvergne)*

16h45 .....
J-Y. Ciers (Ivoclar-Vivadent)

17h30 Fin de la Journée et RETOUR sur ANNECY

Soirée
15, Boulevard de la Corniche - 74 000 Annecy -

LES TRÉSOMS
LAKE AND SPA RESORT
ANNECY

Ivoclar Vivadent, 249 Chapelle du Puits, 74410 Saint-Jorioz

2.3. MANSUY C., MENSE C., TAVITIAN P. Choix et limites des conceptions prothétiques fixes ostéo-ancrées au maxillaire : à propos d'un cas. Communication affichée présentée aux 43èmes journées du CNEPO, Paris, 13-14 septembre 2019.

Clinique :

Choix et limites des conceptions prothétiques fixes ostéo-ancrées au maxillaire : à propos d'un cas

Charlotte Mansuy, Chloë Mense, Patrick Tavitian

Faculté de Marseille

Faculté d'odontologie de Marseille
27, Boulevard Jean Moulin – 13005 Marseille
cha.mansuy@gmail.com



Résumé :

Situation clinique et problématique :
Un patient de 68 ans, en bon état de santé, consulte pour une réhabilitation prothétique fixe de son maxillaire édenté complet. Le montage des modèles de travail sur articulateur met en évidence une résorption osseuse moyenne du maxillaire et un espace vertical disponible moyen, soit une classe 2 selon la classification de Lamy (1) : le choix thérapeutique s'oriente donc vers une prothèse complète fixe ostéo-ancrée maxillaire avec fausse gencive.

Phases pré-implantaire et implantaire :
Après des chirurgies pré-implantaires de comblement des sinus maxillaires droit et gauche à l'aide d'une xénogreffe de type *Bio-Oss®* (Geistlich), le CBCT révèle une résorption osseuse de classe III en antérieur et de classe V en postérieur selon la classification de Cawood (3). La planification chirurgicale permet la simulation de la pose de six implants dans les trois zones du maxillaire selon la classification de Bedrossian (2) : en effet, le tissu osseux néoformé au niveau des comblements sinusiens présente une densité satisfaisante, supérieure à 1200 UH.
A six mois post-greffe, la première phase chirurgicale a consisté en la pose de ces six implants, en adéquation avec le projet prothétique, grâce à l'utilisation d'un guide chirurgical.
Trois mois plus tard, lors de la deuxième phase chirurgicale, la prothèse amovible du patient est transformée en prothèse fixe transitoire transvissée, par la technique de la *double empreinte* : on parle de *mise en charge différée* (4).

Phase prothétique :
Dans un premier temps, un bridge ostéo-ancré de type « *Branemark* » est réalisé : il est constitué d'une armature usinée en titane, des dents et d'une fausse gencive en résine. Cette thérapeutique aboutit à un échec, puisque le patient présente des fractures et un délogement des dents cosmétiques, 48 heures après la pose de la prothèse d'usage (5). Ces complications sont liées : à un défaut de conception de l'armature, à des rétentions et préparations insuffisantes au niveau des dents prothétiques en résine et à un mauvais traitement de la résine au niveau de la fausse gencive par le laboratoire.
Une nouvelle thérapeutique est donc envisagée : la réalisation d'un bridge complet ostéo-ancré, constitué d'une armature usinée en Chrome-Cobalt, recouverte d'une céramique cosmétique, comportant une fausse gencive en céramique rose (6). L'armature Chrome-Cobalt est confectionnée en fonction d'un montage dents sur cire fonctionnel et esthétique préalablement validé en situation clinique, puis les céramiques cosmétiques rose et blanche sont montées sur l'armature.

Ce poster a pour objectifs de mettre en évidence l'importance de la planification pré-implantaire, de la conception de la prothèse, et de la connaissance des propriétés mécaniques des matériaux de restauration prothétique, afin d'anticiper la survenue d'éventuelles complications prothétiques.

2.4. MANSUY C., SALIBA-SERRE B., HÜE O., TAVITIAN P., RUQUET M. Variabilité des densités osseuses de la zone pré-sinusienne chez l'édenté complet. Communication affichée (poster) présentée au 28ème congrès des Doctorants en Sciences de l'Environnement (ED 251), Marseille, 14-15 avril 2021.



C. Mansuy[1-2-3], B. Saliba-Serre[1], O. Hüe[2], P. Tavitian[1-2-3], M. Ruquet[1-2-3]

[1] Aix Marseille Univ, CNRS, EFS, UMR 7268 ADES, Faculté médecine Nord, 13344 Marseille, France,
[2] Aix Marseille Univ, Faculté de sciences médicales et paramédicales, Ecole de médecine dentaire, 13005 Marseille, France
[3] APHM, Service de réhabilitation orale, Pôle Odontologie, Hôpital de la Timone, 13005 Marseille, France

14 & 15 avril 2021 — 28ème CONGRÈS des DOCTORANTS

INTRODUCTION / CONTEXTE

L'édentement est lié à l'âge, mais varie aussi selon l'origine géographique[1].
Intérêt de l'étude de la variabilité osseuse du pré-maxillaire :

- En anthropologie du vivant : modifications de la structure et de morphologie osseuse en fonction du vieillissement, du mode de vie
- En odontologie : réhabilitation implantaire de l'édenté complet maxillaire

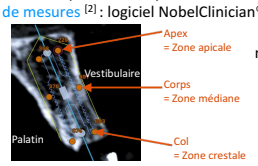
Objectif : Evaluer la **variabilité** de la structure interne (densité osseuse) de l'os pré-maxillaire à partir **d'examens radiographiques tridimensionnels** de patients édentés complets au maxillaire : Variabilité inter-individuelle (âge, sexe) et intra-populationnelle (sens vestibulo-palatin, mésio-distal et vertical)

MÉTHODES

Echantillon : N= 30 (15 ♂+15 ♀)
Protocoles d'imagerie et de mesures [2] : logiciel NobelClinician®



Implants virtuels : Incisive (I3-I4), Canine (I2-I5), Première prémolaire (I1-I6)



6 points de mesure de la densité osseuse au niveau de chaque implant

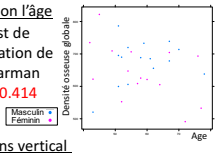
RESULTATS

Densité osseuse globale moyenne de la zone pré-sinusienne = 660.9 ±76.7 UH

VARIABILITE INTER INDIVIDUELLE

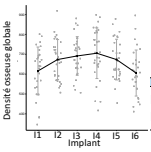
Selon le sexe
Test de la somme des rangs de Wilcoxon
Densité globale : p = 0.305
Densité apicale : p = 0.033

Selon l'âge
Test de corrélation de Spearman
p = 0.414



VARIABILITE INTRA POPULATIONNELLE

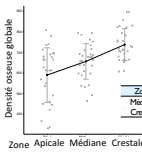
Sens mésio-distal



ANOVA + tests de student

	I1	I2	I3	I4	I5
I2	0.082	–	–	–	–
I3	0.018	1.000	–	–	–
I4	0.018	1.000	1.000	–	–
I5	0.112	1.000	1.000	0.420	–
I6	1.000	1.000	0.041	0.021	0.070

Sens vertical



ANOVA + tests de student

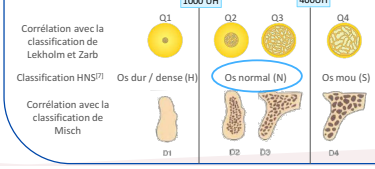
Zone	Apicale	Médiane
Médiane	0.014	–
Crestale	0.0000073	0.0000216

Sens vestibulo-palatin
Test de student : p = 0.900

DISCUSSION ET CONCLUSION

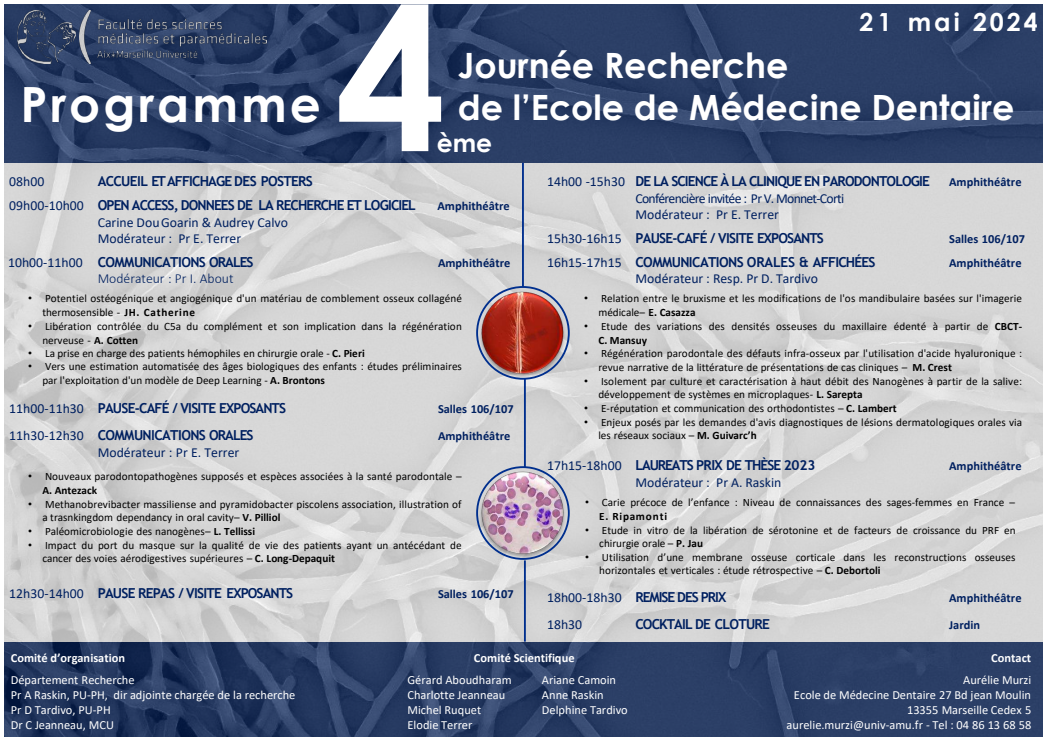
- CBCT = Densités osseuses relatives
- Sexe : Pas de différence significative de densité globale mais différences significatives de densités apicales : F (539UH) < H (640UH) (p=0,033)
- Pas de corrélation densité osseuse / âge
- Densité osseuse décroissante de la surface de la crête osseuse aux structures plus apicales (p<0.02)
- Densité osseuse significativement plus grande dans les régions incisives par rapport aux régions prémolaires (p<0.05)
- Résultats comparables aux les études précédentes [3-6]

Moyenne de la densité osseuse de la zone médiane : 555-794 UH



→ Méthode à exploiter sur un échantillon plus grand pour étudier l'influence d'autres critères anthropologiques ou comparer plusieurs échantillons issus de populations différentes

2.5. MANSUY C., SALIBA-SERRE B., RUQUET M., RASKIN A., HÜE O., SILVESTRI F., MENSE C. Étude des variations des densités osseuses du maxillaire édenté à partir de CBCT. Communication orale présentée à la 4ème Journée Recherche de l'École de Médecine Dentaire, Marseille, 21 Mai 2024.



Titre : Étude des variations des densité osseuses du maxillaire édenté à partir de CBCT

Auteurs (ajouter une * au nom de la personne assurant la présentation) : Charlotte MANSUY*, Bérengère SALIBA-SERRE, Michel RUQUET, Anne RASKIN, Olivier HÜE, Frédéric SILVESTRI, Chloé MENSE

Mots clés : bone density, cone beam computed tomography, dental implant, edentulous jaw, maxilla. ……

Objectif(s) : Étudier les variations de densité osseuse dans différentes régions du maxillaire édenté en fonction du sexe et de l'âge, à partir de CBCT.

Matériel et méthodes : Six implants virtuels ont été positionnés au niveau des sites incisifs, canins et prémolaires. Les densités osseuses ont été mesurées en six points au niveau du col, du corps et de l'apex en vestibulaire et en palatin de chaque implant. Le test de student à deux échantillons a comparé les densités osseuses selon le sexe. Le coefficient de corrélation de Spearman a analysé la corrélation entre densité osseuse et âge. Une ANOVA suivie de tests de student appariés ont étudié les différences de densité entre trois sites du maxillaire édenté et les différences de densité entre trois parties de l'implant.

Résultats / Discussion : La densité osseuse moyenne était significativement plus élevée chez les hommes que chez les femmes. Il existait une corrélation significative entre la densité osseuse et l'âge chez les femmes. Les sites incisifs présentaient la densité osseuse la plus élevée, suivis par les sites canins et prémolaires. La densité osseuse diminuait de façon significative du col à l'apex.

Conclusion : La densité osseuse varie au sein des maxillaires édentés. La densité osseuse du maxillaire édenté semble être influencée par l'âge chez les femmes, et par le sexe.

2.6. MANSUY C., SALIBA-SERRE B., SILVESTRI F., HÜE O., RUQUET M., MENSE C. Étude des variations des densités osseuses du maxillaire édenté à partir de CBCT. Communication affichée présentée aux 46èmes Journées du CNEPROF, Nice, 27-28 septembre 2024.

Nice 2024

CNEPROF

Soumission de résumé en vue d'une communication affichée

Catégorie Recherche

	Clinique
	Pédagogie
x	**Recherche**

Charlotte MANSUY, Bérengère SALIBA-SERRE, Fréderic SILVESTRI, Olivier HÜE, Michel RUQUET, Chloé MENSE

Ecole de Médecine Dentaire, Faculté des Sciences Médicales et Paramédicales, Université d'Aix-Marseille

Service de Réhabilitations Orales, Pôle PROMOD, Odontologie, CHU de la Timone, APHM

Étude des variations des densités osseuses du maxillaire édenté à partir de CBCT

L'objectif de cette étude est d'étudier les variations de densité osseuse dans différentes régions du maxillaire édenté en fonction du sexe et de l'âge, à partir de CBCT (*Cone Beam Computed Tomography*).
Matériel et méthodes : Six implants virtuels ont été positionnés au niveau des sites incisifs, canins et prémolaires. Les densités osseuses ont été mesurées en six points au niveau du col, du corps et de l'apex en vestibulaire et en palatin de chaque implant. Le test de student à deux échantillons a comparé les densités osseuses selon le sexe. Le coefficient de corrélation de Spearman a analysé la corrélation entre densité osseuse et âge. Une ANOVA suivie de tests de student appariés ont étudié les différences de densité entre trois sites du maxillaire édenté et les différences de densité entre trois parties de l'implant.
Résultats / Discussion : Il n'y avait pas de différence significatives entre les densités osseuses moyenne des hommes et celles des des femmes. Il existait une faible corrélation significative entre la densité osseuse et l'âge chez les femmes. Les sites incisifs présentaient la densité osseuse la plus élevée, suivis des sites canins et des sites prémolaires. Les densités moyennes vestibulaires étaient significativement supérieures aux densités moyennes palatines.
Conclusion : La densité osseuse varie au sein des maxillaires édentés. La densité osseuse du maxillaire édenté est influencée par l'âge chez les femmes. Ces résultats devraient permettre d'optimiser le choix de la taille (longueur, largeur) et de la forme de l'implant, du protocole de forage et de mise en charge, dans la réhabilitation implantaire des patients édentés complets au maxillaire

Mots Clés : bone density, cone beam computed tomography, dental implant, edentulous jaw, maxilla.

Étude des variations des densités osseuses du maxillaire édenté à partir de CBCT

Charlotte Mansuy[1-2-3], Bérengère Saliba-Serre[1], Fréderic Silvestri[1-2-3], Olivier Hüe[2], Michel Ruquet[1-2-3], Chloé Mense[1-2-3]

(1) Aix Marseille Univ, CNRS, EFS, UMR 7268 ADES, Faculté médecine Nord, 13344 Marseille, France, (2) Aix Marseille Univ, Faculté de sciences médicales et paramédicales, Ecole de médecine dentaire, 13005 Marseille, France, (3) APHM, Service de réhabilitations orales, Pôle PROMOD Odontologie, CHU de la Timone, 13005 Marseille, France

INTRODUCTION : Pourquoi étudier la densité osseuse du maxillaire édenté?

Intérêt

- **En anthropologie** : adaptation de l'os aux contraintes biomécaniques, à l'âge et aux traitements → étude des adaptations de l'os maxillaire au vieillissement et à l'édentement.
- **En implantologie** : la densité osseuse influence le taux de succès, le choix de l'implant, du protocole de forage, de la durée de cicatrisation.

Objectifs : Étudier les variations de densité osseuse dans différentes régions du maxillaire édenté à partir de CBCT (*Cone Beam Computed Tomography*) afin de mieux comprendre les caractéristiques de l'os alvéolaire maxillaire :

- **Variabilité inter-individuelle :** selon l'âge et le sexe,
- **Variabilité intra-individuelle** : sens transversal (zone incisive / canine / prémolaire) et vertical (apex, col, corps) et vestibulo-palatin.

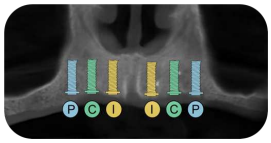
MATÉRIELS ET MÉTHODES

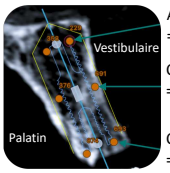
Echantillon : N=100 (58 ♀ + 42 ♂)

- Patients édentés complets au maxillaire depuis > 3 mois
- CBCT pré-implantaire au sein du pôle Odontologie de l'Hôpital de la Timone (APHM, Marseille) : entre janvier 2016 et décembre 2021
- Critères d'exclusion :
  - Pathologie systémique ou médicament influençant le métabolisme osseux,
  - Traumatisme, séquelle chirurgicale, dysmorphose,
  - Résorption extrême du maxillaire.

Acquisition des images, mesure de la densité [1,2] : Logiciel DTX® Studio

- 6 implants virtuels positionnés en avant de la paroi antérieure du sinus : sites **incisif (I)**, **canin (C)**, **prémolaire (P)**.
- Pour chaque implant : 6 points de mesure de la densité osseuse en unités Hounsfield (UH).





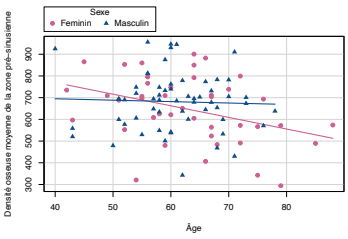
Apex = Zone apicale

Corps = Zone médiane

Col = Zone apicale

RÉSULTATS

Variabilité inter-individuelle : influence de **l'âge** et du **sexe**



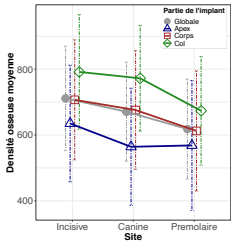
Test de student à deux échantillons
$p = 0.229$

Test de corrélation de spearman

- Hommes et femmes confondus : rho = -0.184, $p = 0.067$
- Femmes seules : rho = -0.368, $p = 0.017$*

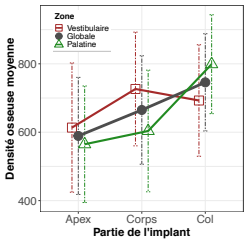
Variabilité intra-individuelle

Sens Transversal
ANOVA + tests de student
(avec correction BY du FDR**)
$p < 0.001$*



Zone	Densité osseuse moyenne ± SD
Incisive	711.15 ± 158.50 UH
Canine	670.71 ± 150.51 UH
Prémolaire	618.07 ± 151.78 UH

Sens Vertical
ANOVA + tests de student
(avec correction BY du FDR**)
$p < 0.001$*



Zone	Densité osseuse moyenne ± SD
Apex	589.14 ± 171.12 UH
Corps	664.99 ± 158.63 UH
Col	666.64 ± 143.22 UH

Sens Vestibulo-Palatin :
Test de student : $p = 0.012$*

Zone	Densité osseuse moyenne ± SD
Vestibulaire	677.54 ± 153.84 UH
Palatine	655.75 ± 144.99 UH

*Résultat statistiquement significatif ($p < 0.05$)
**FDR = False Discovery Rate*

DISCUSSION - CONCLUSION

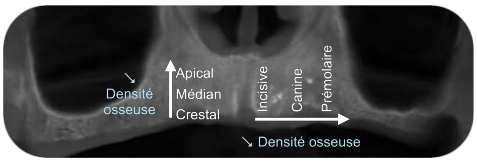
CBCT = Densités osseuses relatives

Variabilité inter-individuelle

Absence de différence significative selon le sexe : en accord avec les études précédentes [3,4].

Absence de corrélation entre densité et âge, tous sexes confondus : en accord avec les études précédentes [4,5].
Faible corrélation significative entre la densité et l'âge chez les femmes : en accord avec l'équipe de Wakimoto [5]. La densité osseuse du maxillaire édenté pourrait refléter les changements relatifs à l'ostépororose chez les femmes

Variabilité intra-individuelle



Ces résultats sont en accord avec Wakimoto et al.[5] (différence entre les densités des zones incisives et celles des zones canines).
Les différences dans le sens vestibulo-palatin pourraient être liées aux différences d'épaisseur de l'os cortical en vestibulaire et en palatin [6].

Conclusion: Ces résultats devraient permettre d'optimiser le choix de la taille (longueur, largeur) et de la forme de l'implant, et du protocole de forage et de mise en charge, dans la réhabilitation implantaire des patients édentés complets au maxillaire.

BIBLIOGRAPHIE

1. ***Tavitian et al.*** *A Numeric Analysis of Bone Density in the Edentulous Interforaminal Region. Int J Prosthodont. 2017;30(6):526-9.*
2. ***Mansuy C et al.*** *Assessment of bone density in edentulous maxillae using cone beam computed tomography (CBCT). J Stomatol Oral Maxillofac Surg. 2024;16:101825*
3. ***Almasoud et al.*** *Alveolar bone density and its clinical implication in the placement of dental implants and orthodontic mini-implants. Saudi Med J. 2016;37(6):684–9.*
4. ***Fuster-Torres et al.*** *Relationships between bone density values from cone beam computed tomography, maximum insertion torque, and resonance frequency analysis at implant placement: a pilot study. Int J Oral Maxillofac Implants 2011;26:1051–6.*
5. ***Wakimoto et al.*** *Bone quality and quantity of the anterior maxillary trabecular bone in dental implant sites. Clin Oral Implants Res 2012;23:1314–9.*
6. ***Shemtov Yona K.*** *Quantitative assessment of the jawbone quality classification: A meta-analysis study. PloS One. 2021;16(6):e0253283.*

RÉSUMÉ

L'étude des modifications du squelette facial humain fournit des informations sur la relation entre structure osseuse et fonction. Le vieillissement et l'édentement complet maxillaire impliquent des conséquences anatomiques, fonctionnelles, esthétiques, sociales et psychologiques. La perte totale des dents engendre une diminution des forces masticatoires, une résorption tridimensionnelle irréversible de l'os alvéolaire et un remodelage de la structure osseuse.

Cette thèse a pour objectif d'étudier la variabilité de la densité de l'os maxillaire édenté chez l'être humain vivant, afin de mieux comprendre les adaptations de l'os maxillaire au vieillissement et à l'édentement.

L'étude de la zone pré-sinusienne de l'os maxillaire représente un défi majeur pour plusieurs raisons : son anatomie et ses relations avec les structures anatomiques nobles, son origine embryologique et le débat sur la persistance d'un os prémaxillaire chez l'Homme adulte, son architecture interne qui s'adapte aux contraintes biomécaniques, son rôle dans les fonctions orales (mastication, déglutition, phonation) et enfin son implication dans l'équilibre psychologique et social de l'individu.

De nombreuses classifications ont été proposées dans la littérature afin de quantifier les changements morphologiques et structurels du maxillaire après édentement. A ce jour, aucune classification ne tient compte à la fois de la variabilité morphologique et de la variabilité structurelle des os des mâchoires.

Les études menées dans le cadre de cette thèse nous permettent de conclure que :

- La variabilité inter-individuelle de la densité osseuse du maxillaire édenté peut être expliquée par des facteurs généraux (âge, sexe) et locaux (hauteur de l'os crestal).
- Concernant la variabilité intra-individuelle, la densité osseuse varie au sein même du maxillaire édenté : dans le sens vertical (diminution de la crête aux structures apicales), dans le sens transversal (diminution des sites incisifs aux sites prémolaires) et dans le sens vestibulo-palatin.

Mots-clés : vieillissement, densité osseuse, résorption osseuse, tomographie volumique à faisceau conique, implant dentaire, mâchoire édentée, maxillaire.

ABSTRACT

The study of changes in the human facial skeleton provides information about the relationship between bone structure and function. Aging and maxillary complete edentulism lead to anatomical, functional, aesthetic, social and psychological consequences. Total tooth loss causes a reduction in masticatory forces, irreversible three-dimensional resorption of alveolar bone, and remodeling of the bone structure.

This thesis aims to study the variability of the density in the edentulous maxilla in living humans, in order to better understand the adaptations of the maxilla to aging and edentulism.

Studying the area between the maxillary sinuses is challenging for many reasons: its anatomy and relationships with important anatomical structures, its embryological origin and the debate about the persistence of premaxilla in adult humans, its architecture adapted to mechanical loads, its contribution to oral functions (chewing, swallowing, phonation) and its implication in social and psychological balance.

Many classifications have been proposed in the scientific literature to determine the morphological and structural changes of the maxilla after tooth loss. There is currently no classification that considers both the morphological and structural variability of the jawbone.

The studies conducted as part of this thesis lead to the following conclusions:

- The inter-individual variability of bone density in the edentulous maxilla can be explained by general (age, sex) and local (crestal bone height) factors.
- As regards the inter-individual variability, there is a variation of bone density in vertical direction (reduction from crest to apical structures), in transverse direction (reduction from incisor sites to premolar sites), and in buccolingual direction.

Keywords : aging, bone density, bone resorption, cone beam computed tomography, dental implant, edentulous jaw, maxilla.