UNIVERSITE DE LILLE

FACULTE DE CHIRURGIE DENTAIRE

Année de soutenance : 2022 N°:

THESE POUR LE

DIPLOME D'ETAT DE DOCTEUR EN CHIRURGIE DENTAIRE

Présentée et soutenue publiquement le 13 DÉCEMBRE 2022

Par Constance POLLET

Née le 01 OCTOBRE 1994 à Dunkerque – France

Protocole de segmentation des tissus dentaires par Microtomographie Rx. Applications sur les populations du passé.

JURY

Président : Monsieur le Professeur Thomas Colard

Assesseurs : Madame le Docteur Mathilde Savignat

Madame le Docteur Sarah Toubla

Monsieur le Docteur Thibault Bécavin

UNIVERSITE DE LILLE

FACULTE DE CHIRURGIE DENTAIRE

Année de soutenance : 2022 N°:

THESE POUR LE

DIPLOME D'ETAT DE DOCTEUR EN CHIRURGIE DENTAIRE

Présentée et soutenue publiquement le 13 DÉCEMBRE 2022

Par Constance POLLET

Née le 01 OCTOBRE 1994 à Dunkerque – France

Protocole de segmentation des tissus dentaires par Microtomographie Rx. Applications sur les populations du passé.

JURY

Président : Monsieur le Professeur Thomas Colard

Assesseurs : Madame le Docteur Mathilde Savignat

Madame le Docteur Sarah Toubla

Monsieur le Docteur Thibault Bécavin

PRESENTATION DE L'UNIVERSITE ET L'U.F.R

Directrice de l'Université	Pr. R Bordet
Directrice Générale des Services de l'Université	M-D. Savina
Doyen UFR3S	Pr. D. Lacroix
Directrice des Services d'Appui UFR3S	G Pierson
Doyen de la faculté d'Odontologie-UFR3S	Pr. C. Delfosse
Responsable des Services	M. Dropsit
Responsable de la Scolarité	G. Dupont

PERSONNEL ENSEIGNANT DE LA FACULTÉ :

PROFESSEURS DES UNIVERSITES :

P. BEHIN	Prothèses
T. COLARD	Fonction-Dysfonction, Imagerie, Biomatériaux
C. DELFOSSE	Responsable du Département d'Odontologie Pédiatrique
E. DEVEAUX	Dentisterie Restauratrice Endodontie
K. AGOSSA	Parodontologie

MAITRES DE CONFERENCES DES UNIVERSITÉS *:*

T. BECAVIN	Dentisterie Restauratrice Endodontie
A. BLAIZOT	Prévention, Epidémiologie, Economie de la Santé, Odontologie Légale
P. BOITELLE	Prothèses
F. BOSCHIN	Responsable du Département de Parodontologie
E. BOCQUET	Responsable du Département d'Orthopédie Dento-Faciale
C. CATTEAU	Responsable du Département de Prévention**,** Epidémiologie, Économie de la Santé, Odontologie Légale.
X. COUTEL	Biologie Orale
A. de BROUCKER	Fonction-Dysfonction, Imagerie, Biomatériaux
M. DEHURTEVENT	Prothèses
T. DELCAMBRE	Prothèses
F. DESCAMP	Prothèses
M. DUBAR	Parodontologie
A. GAMBIEZ	Dentisterie Restauratrice Endodontie
F. GRAUX	Prothèses
C. LEFEVRE	Prothèses
M. LINEZ	Dentisterie Restauratrice Endodontie
T. MARQUILLIER	Odontologie Pédiatrique
G. MAYER	Prothèses
L. NAWROCKI	Responsable du Département de Chirurgie Orale Chef du Service d'Odontologie A. Caumartin - CHRU Lille
C. OLEJNIK	Responsable du Département de Biologie Orale
P. ROCHER	Fonction-Dysfonction, Imagerie, Biomatériaux
L. ROBBERECHT	Dentisterie Restauratrice Endodontie
M. SAVIGNAT	Responsable du Département des Fonction-Dysfonction, Imagerie, biomatériaux
T. TRENTESAUX	Odontologie Pédiatrique
J. VANDOMME	Responsable du Département de Prothèses

Règlementation de présentation du mémoire de Thèse :

Par délibération en date du 29 octobre 1998, le Conseil de la Faculté de Chirurgie Dentaire de l'Université de Lille a décidé´ que les opinions émises dans le contenu et les dédicaces des mémoires soutenus devant jury doivent être considérées comme propres à leurs auteurs, et qu'ainsi aucune approbation, ni improbation ne leur est donnée.

Remerciements

Aux membres du jury,

<u>Monsieur le Professeur Thomas COLARD</u>

Professeur des Universités – Praticien Hospitalier des CSERD

Section Réhabilitation Orale
Département Sciences Anatomiques

Docteur en Chirurgie Dentaire
Docteur au Muséum National d'Histoire Naturelle en Anthropologie Biologique

Chargé de mission Recherche

Merci d'avoir accepté de présider et de diriger ce travail.
Je vous remercie pour votre patience, votre bienveillance ainsi que pour la confiance que vous m'avez accordée durant la rédaction de cette thèse. Ce fut un réel plaisir d'apprendre avec un professeur passionné, doté d'un enthousiasme contagieux et d'une grande ouverture d'esprit. Permettez-moi de vous témoigner ma plus grande admiration et mes remerciements les plus sincères.

Madame le Docteur Mathilde SAVIGNAT

Maître de Conférences des Universités – Praticien Hospitalier des CSERD *Section Réhabilitation Orale*
Département Sciences Anatomiques

Docteur en Chirurgie Dentaire
Docteur en Odontologie de l'Université de Lille2
Master Recherche Biologie Santé - Spécialité Physiopathologie et Neurosciences

Responsable du Département des Sciences Anatomiques

Chargée de mission PASS - LAS

Vous me faites l'honneur de siéger dans ce jury et je vous en remercie. J'ai toujours apprécié vos qualités d'écoute et d'enseignement aussi bien théorique que clinique. Merci de m'avoir accueillie au sein de votre équipe en TP d'anatomie cervico-céphalique. Vous avez toujours été disponible durant mes études, et fait preuve d'une grande bienveillance envers les étudiants. Veuillez trouver dans cette thèse l'expression de mon plus profond respect.

Madame le Docteur Sarah TOUBLA

Chef de Clinique des Universités – Assistant Hospitalier des CSERD

Section Réhabilitation Orale
Département Sciences Anatomiques

Docteur en Chirurgie Dentaire

Je vous remercie d'avoir accepté de faire partie de ce jury. J'espère que ce travail saura retenir votre intérêt. Veuillez trouver ici l'expression de ma profonde gratitude.

Monsieur le Docteur Thibault BÉCAVIN

Maître de Conférences des Universités – Praticien Hospitalier des CSERD

Section Réhabilitation Orale
Département Dentisterie Restauratrice Endodontie

Docteur en Chirurgie Dentaire Docteur de l'Université de Lille

Master II Biologie et Santé – Lille 2

Vous m'avez fait l'honneur d'accepter de prendre place au sein du jury de cette thèse. Je vous remercie pour votre disponibilité et pour l'ensemble de vos précieux conseils durant mon parcours universitaire, aussi bien en TP qu'en clinique, je garde un agréable souvenir des vacations du jeudi après-midi à vos côtés. Veuillez trouver dans ce travail ma sincère reconnaissance.

Table des matières :

Introduction *14*

I. Matériels et méthodes : *17*

A) Les restes dentaires **17**
1) Les restes de *l'Homo sapiens* Qafzeh 4 : 17
a) Le maxillaire : 17
b) La mandibule : 18
2) Les restes du *Néandertalien* Hortus II/III : 19
a) Le maxillaire : 19
b) La mandibule : 19
3) Les analyses par microtomographie à rayon X : 20

B) Méthodes : **20**
1) Création de sub-volumes sous formes de « boîtes » : 21
2) Segmentation automatique avec utilisation du logiciel AVIZO : 23
3) Correction manuelle de la sélection automatique : 27
4) Séparation de la racine et de la couronne : 31
5) Création des arbres : 32
6) Obtention de la surface de la jonction émail-dentine : 35
7) Les cartographies colorimétriques : 36

II. Résultats : *38*

A) Mesures volumiques tissulaires : **38**

B) Cartographie de l'épaisseur de l'émail et jonction émail/dentine : **42**

III. Le potentiel des études microtomographiques dentaires appliquées aux fossiles :.. *44*

A) L'analyse des volumes tissulaires : **44**
1) Le taurodontisme 45
2) L'épaisseur de l'émail : 46

B) L'analyse morphologique de l'émail et de la jonction email dentine : **47**
1) L'analyse de la morphologie non métriques : 48
a) Les canines : 48
b) Les prémolaires : 49
c) Les molaires : 49
2) Les analyse en morphométrie géométrique : 50

C) L'estimation de l'âge au décès : **53**
1) La méthode du stade de minéralisation : 53
2) Evaluation de l'âge au décès de Qafzeh 4 54
3) Évaluation de l'âge au décès de Hortus II/III 55

D) L'approche Bayésienne d'estimation de l'âge au décès des sujets immatures : **56**
1) Le Théorème de Bayes : 56
2) L'analyse Bayésienne appliquée à la recherche dentaire : 57

Conclusion : *59*

Bibliographie : *77*

Tables des illustrations : *81*

4ème de couverture et Dos ..... *Erreur ! Signet non défini.*

Table des abréviations

2D : Deux dimensions

3D : Trois dimensions

H II/III : Hortus II/III

JAD : Jonction amélo-dentinaire

Mm : Millimètre

Q4 : Qafzeh 4

SEE : Surface externe de l'émail

Vc : Volume de la couronne

Vcd : Volume de dentine coronaire

Vcdp : Volume de dentine et de pulpe coronaire

Vd : Volume de dentine

Ve : Volume d'émail

Vp : Volume de pulpe

Vt : Volume total de la dent

µCT : Microtomographie

Introduction

En août 1856, la grotte de Feldhofer, située dans la vallée de Neander à l'ouest de l'Allemagne, livre des ossements et un fragment de crâne présentant un front fuyant, une absence de menton et un bourrelet sus orbitaire ; il est impossible d'attribuer ce crâne à un Homme moderne. Les différences morphologiques sont trop grandes. De nombreux débats scientifiques vont naître sur l'attribution de ces restes humains, ils vont être à l'origine d'une nouvelle discipline : la paléoanthropologie.

D'après la définition du Larousse, la paléoanthropologie est la science qui tente de reconstituer l'histoire de l'évolution de la lignée humaine.

Au cours de ce travail de thèse, nous allons nous focaliser sur l'étude des restes dentaires fossiles. Le terme de « **paléoanthropologie dentaire** » est utilisé pour la première fois au début des années 1900, et c'est dans les années 1940 que Dahlberg prouve l'importance de cette science dans un article adaptant les concepts de morphogénèse dentaire des mammifères à la dentition humaine [1]. En 1963, l'ouvrage « Dental Anthropology » en définit les notions en regroupant une série d'articles [2]. Cette discipline est une subdivision de l'anthropologie physique et consiste en l'analyse morphologique, aussi bien macroscopique que microscopique, des dents des populations du passé. L'émail étant le tissu le plus minéralisé du corps humain, les dents se conservent particulièrement bien dans les sols et sont un outil précieux, aussi bien dans le domaine médico-légal qu'en archéologie. Elles sont, du fait de leur morphologie et leurs microstructure, une véritable carte d'identité de l'individu à qui elles ont appartenu, révélant à la fois des informations taxonomiques, ainsi que des éléments « d'histoire de vie » et des données au sujet du régime alimentaire, des périodes de stress ou de maladie [3] [4] [5]. En effet, elles enregistrent leur croissance sous forme de stries incrémentielles et présentent une variabilité importante liées à critères génétiques et environnementaux [6].

La taille de leur couronne, de leur racine, ainsi que les proportions des tissus dentaires sont *partiellement* sous contrôle génétique [7]. La paléoanthropologie dentaire progresse considérablement grâce aux avancées en matière d'informatique et d'imagerie de précision Rx. Longtemps l'étude des dents en paléoanthropologie consistait à observer les critères morphologiques externes ou radiographiques en 2D. Grâce à l'apparition de la **microtomographie Rx** classique et de la **microtomographie à rayonnement synchrotron**, il est désormais possible d'analyser des fossiles en trois dimensions, analyser leur structure interne et effectuer des comparaisons tout en conservant le fossile dans son intégralité et sans le détériorer [8]. En paléoanthropologie dentaire, c'est un outil de choix permettant de comparer des arcades dentaires complètes [9].

L'analyse des dents d'hominidés immatures ouvre d'autres possibilités comme par exemple la détermination de l'âge au décès [10]. Les organes dentaires sont un élément clé dans la constitution du profil biologique car leur croissance est séquentielle, elle débute *in utero* pour finir après l'adolescence. Certaines espèces d'hominidés n'ont été connues initialement que par la découverte d'une dent comme ce fut le cas pour l'Homme de Denisova [11]. Cette espèce a été d'abord identifiée par analyse génétique en 2010 puis confirmée par une dent, retrouvée dans la grotte de Denisova.

Au cours de cette étude nous allons montrer l'intérêt de l'utilisation de la microtomographie à rayon X dans l'analyse des restes dentaires anciens [12]. Pour ce faire, nous avons analysé deux individus fossiles. L'un est un enfant néanderthalien provenant de la grotte de l'Hortus. Bien qu'aucune datation physique n'ait été réalisée sur ce site, les analyses stratigraphiques comparées avec des sites moustériens du Sud de la France permettent de situer la vie des individus provenant de cette grotte durant le SIM 3 (entre 70 000 et 40 000 ans) [13]. L'autre individu est un jeune enfant *Homo sapiens*. Il provient d'une grotte située en actuelle Israël proche de la ville de Nazareth. Des datations du crâne de Qafzeh 6 (individu provenant des mêmes niveaux stratigraphiques) à l'uranium-thorium et à l'uranium protactinium datent les individus de ce niveau entre 80 000 et 94 000 ans [14].

Cette thèse est consacrée à l'étude par microtomographie de leurs organes dentaires, composés de dents déciduales et de dents définitives en cours de développement. Ce travail a pour but, dans un premier temps, de présenter les deux individus juvéniles appartenant au genre Homo, et de décrire le processus de segmentation virtuelle dans son intégralité. Il sera intéressant dans un second temps de présenter les résultats de cette analyse, puis dans un dernier temps, de montrer le potentiel de l'étude des organes dentaires par microtomographie à rayon X en paléoanthropologie.

I. Matériels et méthodes :

A) *Les restes dentaires*

1) Les restes de *l'Homo sapiens* Qafzeh 4 :

Le squelette de l'Homo 4 de Qafzeh a été découvert en 1934 lors de fouilles effectuées dans la grotte de Qafzeh en Israël. Il s'agit d'un enfant *Homo sapiens*. Ces ossements font partie des niveaux moustériens du site de Qafzeh. L'âge de l'enfant au décès est estimé entre 6 et 8 ans si on admet que la croissance des dents est similaire à celle des populations actuelles [15]. Le nombre de dents de cet individu est de 32.

a) Le maxillaire :

Le maxillaire est assez complet, malgré une détérioration de l'os au niveau des incisives centrales et latérales et en arrière de la première molaire définitive droite.

On observe des dents déciduales, notamment, les canines (53 et 63), et les molaires (54, 55, 64, 65). Elles sont toutes sur l'arcade et bien préservées malgré une usure physiologique des cuspides compte tenu de son stade de développement au moment de son décès.

En ce qui concerne les dents définitives, la 21 était en cours d'éruption. La face occlusale est fracturée mais la couronne reste exploitable. Les molaires (16 et 26) sont également sur l'arcade et leurs racines n'ont pas achevé leur croissance. Les canines et prémolaires définitives sont retrouvées à l'état de germe dans le maxillaire. Leurs couronnes sont totalement minéralisées.

Les incisives déciduales ainsi que l'incisive centrale (11) et les incisives latérales définitives sont absentes en raison de l'état de conservation de l'os maxillaire.

b) ***La mandibule :***

La mandibule, quant à elle est bien préservée dans sa partie droite (secteur 4). Elle est fracturée en arrière de la première molaire définitive gauche (secteur 3).

Au sujet des dents déciduales de la mandibule, on retrouve : les canines, bien que la 83 soit amputée de sa face linguale. Les molaires (74, 75, 84 et 85) sont présentes. Mais les incisives centrales lactéales ont laissé place aux incisives centrales permanentes (31 et 41) en cours d'éruption. Les incisives latérales (32 et 42), les canines (33 et 43) et les prémolaires (34, 44 et 45) sont présentes sous forme de germes dans la mandibule. L'individu semble présenter une agénésie de la 35, du moins son germe n'est pas en cours de formation au sein de la mandibule. Les premières molaires définitives (36 et 46) sont sur l'arcade.

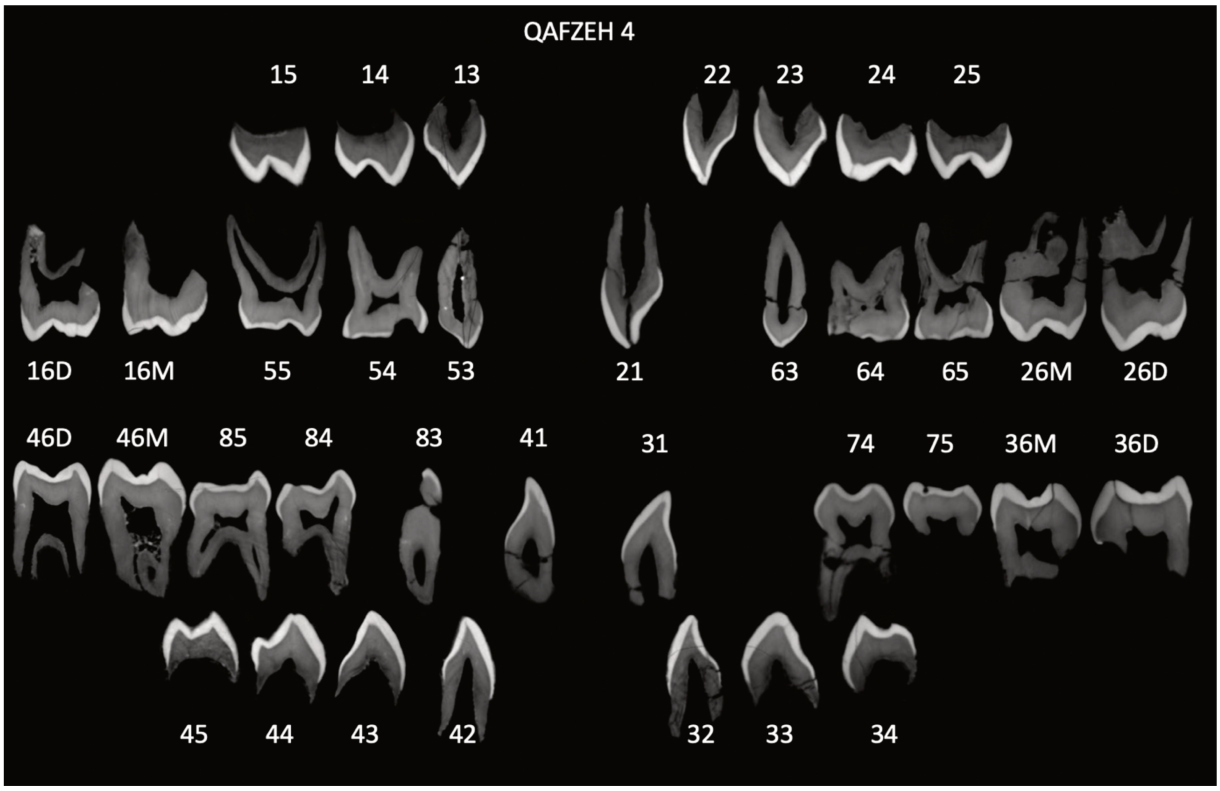


Figure 1 Planche développementale de l'enfant du moustérien QAFZEH 4 (illustration personnelle)

2) Les restes du *Néandertalien* Hortus II/III :

Les restes du Néandertalien juvénile Hortus II/III ont été découverts dans la grotte de l'Hortus située dans la commune de Valflaunès dans l'Hérault en France. Nous nous intéresserons au fragment mandibulaire ainsi qu'aux dents isolées qui lui ont été associées en 1973, portant le nombre d'éléments dentaires à 16 [16].

a) Le maxillaire :

Le maxillaire en lui-même est absent des restes de l'enfant. Néanmoins, des dents isolées, que les avaient initialement déterminées comme appartenant à un individu différent, lui ont été attribuées *a posteriori*. Le secteur maxillaire droit possède encore la canine, les prémolaires ainsi que les molaires définitives. En ce qui concerne le secteur maxillaire gauche, la canine, les prémolaires et la molaire M2. Ce secteur livre également une dent déciduale qui est fortement abimée, la 65. Les racines et la couronne des M1 supérieures sont fracturées, rendant ces dents impossibles à segmenter en 3D.

b) La mandibule :

Elle est composée des canines et des prémolaires en cours de croissance ainsi que des alvéoles des incisives permanentes. Les dents isolées du secteur mandibulaire gauche sont les prémolaires et la M1 et pour le secteur 4 la dent isolée analysée est la M1. Les M1 inférieures montrent des racines complètement formées. Les racines des autres dents permanentes se trouvent à différentes étapes de leur développement.

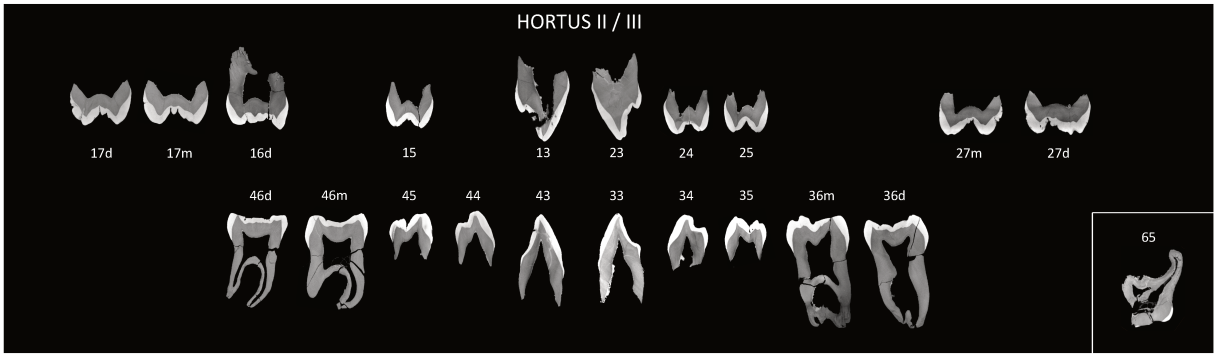


Figure 2 Planche développementale de l'enfant néanderthalien : HORTUS II/III (illustration personnelle)

3) Les analyses par microtomographie à rayon X :

Les arcades dentaires (maxillaires et mandibulaires) et les dents isolées des deux individus ont fait l'objet d'une analyse par microtomographie à rayon X au sein de l'Université de Poitiers pour Qafzeh 4 (Dr. Priscilla Bayle) et de la plateforme AST-RX du Musée de l'Homme à Paris pour Hortus II/III (Dr Gaël Becam).
Pour ces examens, les microCT utilisés étaient un Skyscan 1172 (Bruker, Kontich, Belgium) et «v|tome|x L 240-180» (GE Sensing & InspectionTechnologies Phoenix x|ray). Les résolutions spatiales des examens étaient comprises entre 16 et 66 microns.

B) Méthodes :

L'ensemble des dents permanentes et déciduales a été segmenté de manière semi-automatique avec la méthode « *watershed* », complétée par des corrections manuelles grâce au logiciel Avizo ® (V.9, Thermo Fisher Scientific, Bordeaux, France). Ce logiciel est utilisé pour la visualisation et l'analyse de données scientifiques. Il permet de séparer virtuellement les tissus dentaires (l'émail, la dentine et la pulpe) en utilisant les différents niveaux de gris des pixels de chacune des coupes reconstruites, obtenues suite à l'acquisition microtomographique [17]. Il est intéressant de noter que le risque d'erreur humaine et le risque d'une mauvaise interprétation des données disponibles peuvent accentuer l'imprécision des données récoltées. Ceci est particulièrement vrai pour

les spécimens fossiles. Cependant, selon un travail de recherche effectué par Boyer en 2008[18], l'évaluation semi-automatique et les corrections manuelles effectuées par l'homme, l'analyse et les données s'approchent de la réalité de manière suffisante.

Nous présentons ici l'ensemble des étapes de la méthodologie utilisée pour segmenter la canine maxillaire droite (13) de l'individu Qafzeh 4 :

1) Création de sub-volumes sous formes de « boîtes » :

Les fichiers regroupant les scans de Q4 sont au nombre de trois, la mandibule est divisée en deux piles d'images et le maxillaire occupe une seule pile d'images. Pour faciliter le travail, il est intéressant de segmenter le scan par zones d'intérêt. Afin d'obtenir une reconstitution en 3D d'une dent, il a fallu isoler les dents les unes des autres, aussi bien les dents sur arcade que celles incluses dans l'os en créant des « boîtes » pour chacune d'entre elles.

Cette séparation permet à la fois d'alléger le volume à traiter et également de faciliter la découpe virtuelle de l'objet en limitant les variations de gris à l'objet analysé. Une fois le fichier ouvert, afin d'avoir une analyse correcte de l'objet, il est important de calibrer la taille du voxel (en mm^3). C'est une unité d'information graphique qui définit un point dans l'espace tridimensionnel avec ses coordonnées X, Y et Z.

Taille des voxels pour le scan maxillaire de la mandibule de Q4 : 0,0532 mm

Afin de visualiser les coupes, il convient de lui attribuer des visualisations dans les trois plans de l'espace, x, y et z pour se repérer dans le volume et voir les coupes selon les différents axes appelés « *Ortho slice* » dans le logiciel.

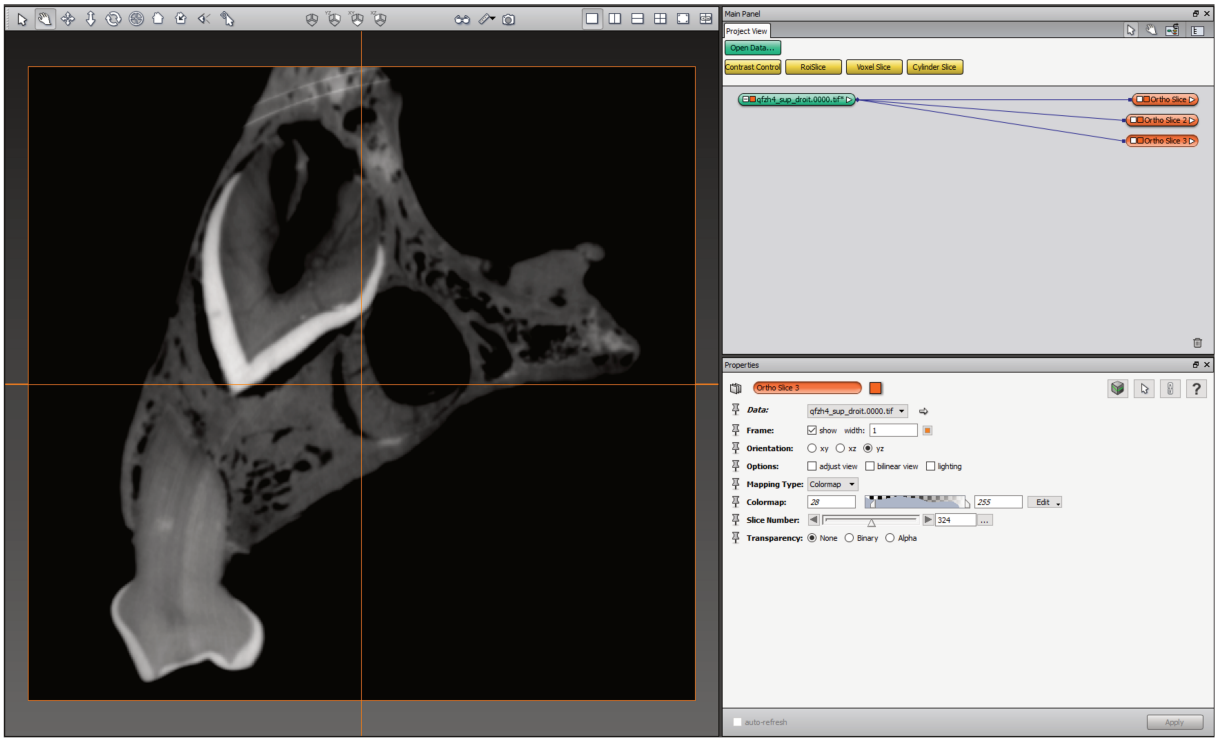


Figure 3 Attachement des ortho slices xy, xz et yz aux coupes effectuées par microCT de la mandibule de Q4 (illustration personnelle)

Une fois les voxels rentrés, les ortho slices définis, nous pouvons manipuler les coupes. Il est nécessaire de se repérer dans l'espace afin d'identifier la 13.

L'outil « *Extract Subvolume* » permet de définir une zone précise de l'espace du scan à segmenter. Il faut adapter la boîte dans deux des trois plans de l'espace puis nous vérifions, sur le 3ème plan, si la boite comprend la 13 dans son intégralité. Il est préférable de prendre un cadre un peu plus large, afin de pouvoir avoir la dent dans son ensemble, plutôt que de rogner trop précisément, ce qui pourrait avoir pour conséquence d'amputer une partie de la dent sur un autre plan. C'est pour cela qu'il est important, avant de valider la boîte, de vérifier que la dent est dans le cadre bleu dans les trois plans de l'espace (Figure 4). Il faut ensuite créer un nouveau fichier (.am) afin de pouvoir travailler au sein de la boite.

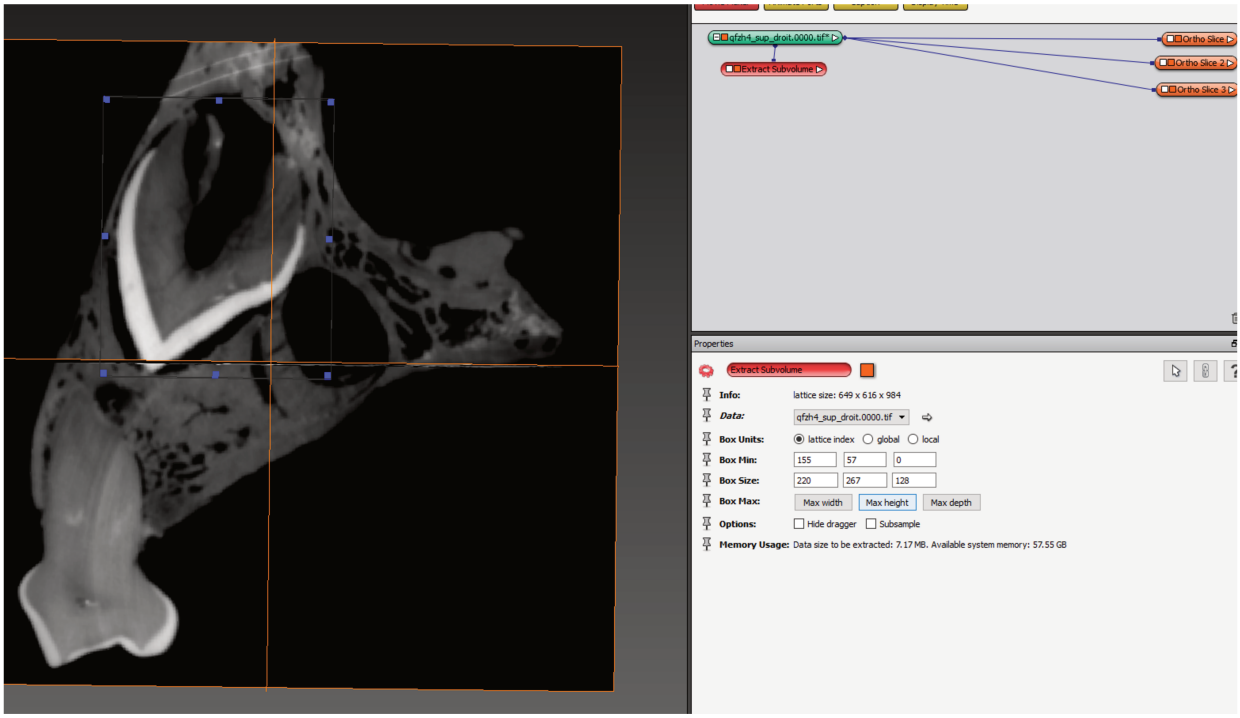


Figure 4 Création de la boite avec l'outil « Extract Subvolume » pour la canine maxillaire droite (13) de l'individu Q4 (illustration personnelle).

2) Segmentation automatique avec utilisation du logiciel AVIZO :

Une fois ce fichier (.am) obtenu, il est possible de commencer le travail de segmentation. Lors de l'ouverture du fichier le logiciel présente la succession de coupes dans les trois plans de l'espace. Il convient d'utiliser l'option « *Edit New Label Field* ».

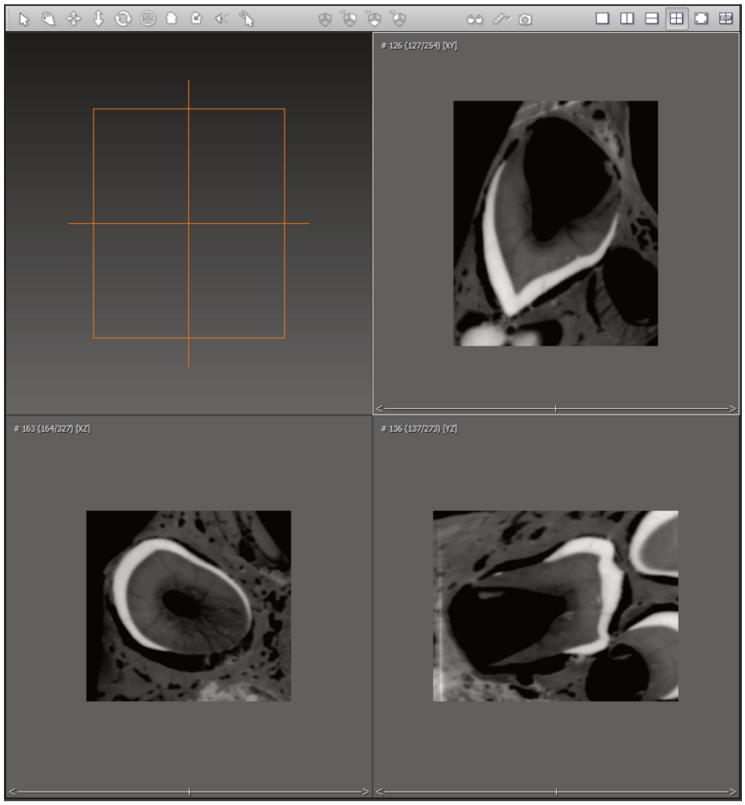


Figure 5 Les coupes microCT dans les trois plans de l'espace (illustration personnelle).

Cette segmentation consiste à différencier virtuellement les tissus. Pour se faire, il faut attribuer un label à chaque pixel. Aux labels, il est nécessaire d'affecter une couleur et un nom, dans le cas présent : émail, dentine et pulpe (**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**).

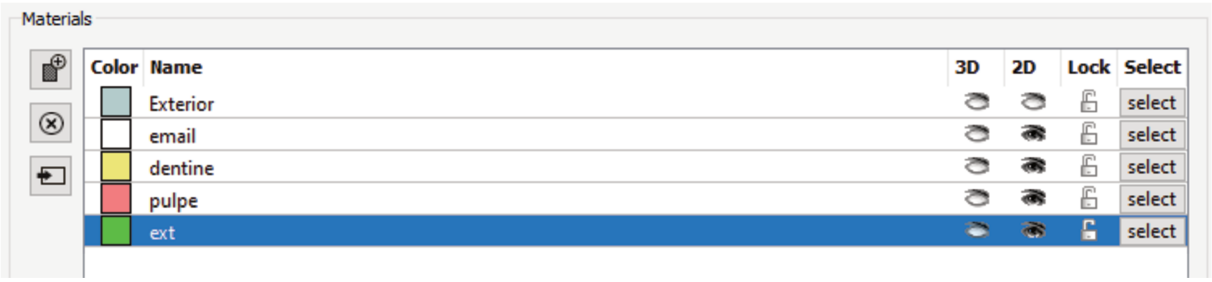


Figure 6 Attribution des labels pour la segmentation automatique (illustration personnelle).

Dans ce type d'analyse, il n'est pas possible de différencier le cément et la dentine pour la racine, car la résolution, de l'ordre d'une dizaine de microns, est

insuffisante [18] [19]. D'autant plus que la préservation du cément sur des spécimens fossiles est très rare [10].

Il est plus simple de rajouter un quatrième label si la dent est encore dans son alvéole ou s'il s'agit d'un germe. En effet, l'os se confond avec le cément de la racine lors de la segmentation semi-automatique, le niveau de gris étant similaire. Afin de limiter les retouches manuelles, il est intéressant de créer un label supplémentaire.

Segmenter l'image avec Avizo® consiste à colorier la zone d'intérêt et l'attribuer à un matériau. La zone de différenciation est sélectionnée par le biais de différents outils proposés dans la section « *Tools* » (Figure 7). Voici les outils principalement utilisés lors de ce travail :

- L'outil *Brush* : dessine la sélection à l'aide d'un cercle dont la taille est modifiable manuellement. C'est l'outil de base de l'édition de segmentation pour les trois tissus à définir.
- L'outil *Lasso* : dessine une sélection en traçant son contour manuellement à partir d'une forme d'ellipse. Cet outil est utilisé uniquement si la zone à sélectionnée est délimitée de manière nette. Il peut aussi être utilisé en 3D.
- L'outil *Magic Wand* : définit une sélection à partir d'un point précis à l'intérieur de la région d'intérêt. Le niveau de gris du point apparaît en rouge dans l'histogramme. Les pixels aux alentours sont pris dans la sélection s'ils sont compris dans le seuil minimum et maximum de gris. Ces bornes sont définies par l'utilisateur. La « *Magic Wand* » a été majoritairement utilisé pour l'émail dans ce travail.
- L'outil *Gomme* : permet d'effacer la sélection ou une partie de la sélection. En maintenant le bouton CTRL l'outil « *Brush* » devient une gomme également.

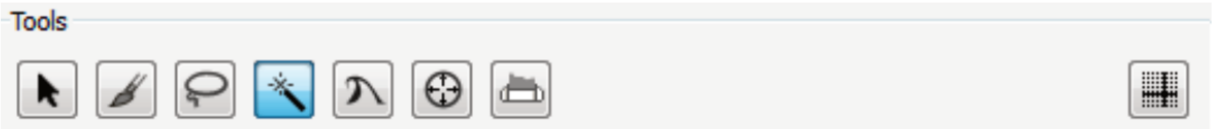


Figure 7 Module Tools composé des différents outils (illustration personnelle)

Peu importe l'outil utilisé, la sélection est affichée en rouge sur l'image (Figure 8) avant d'être validée manuellement et de passer à la couleur du label souhaité. L'ensemble de pixels choisi est appelé sélection. Le signe « + » permet d'ajouter la sélection au matériau choisi. Le signe « - » permet de l'enlever. L'émail étant un tissu bien distinct et délimité, il est aisé de le différencier du reste de la dentine et de l'alvéole.

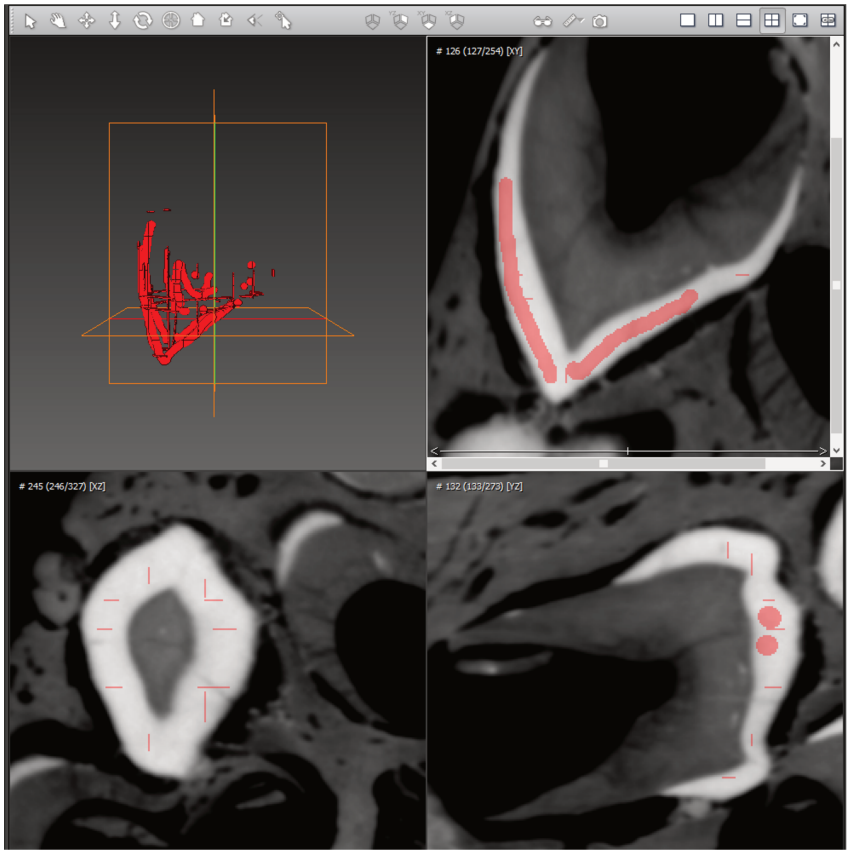


Figure 8 Sélection de l'émail (illustration personnelle).

La dentine est plus compliquée à segmenter de manière automatique en raison de la proximité des pixels gris entre la dentine et l'os alvéolaire qui contient la dent. La cavité pulpaire lorsqu'elle est « fermée », délimitée, par la dentine et le cément, est simple à segmenter de manière automatique. Il s'agit d'un espace vide ou rempli de sédiments, elle est donc hypodense et facilement segmentable. Sur des dents en cours de formation, la racine n'est pas terminée, elle est « ouverte », il est donc plus difficile de la délimiter correctement.

Ces sélections doivent être faites dans les trois plans de l'espace pour que la segmentation automatique soit la plus précise possible afin d'avoir un minimum de corrections manuelles à effectuer par la suite.

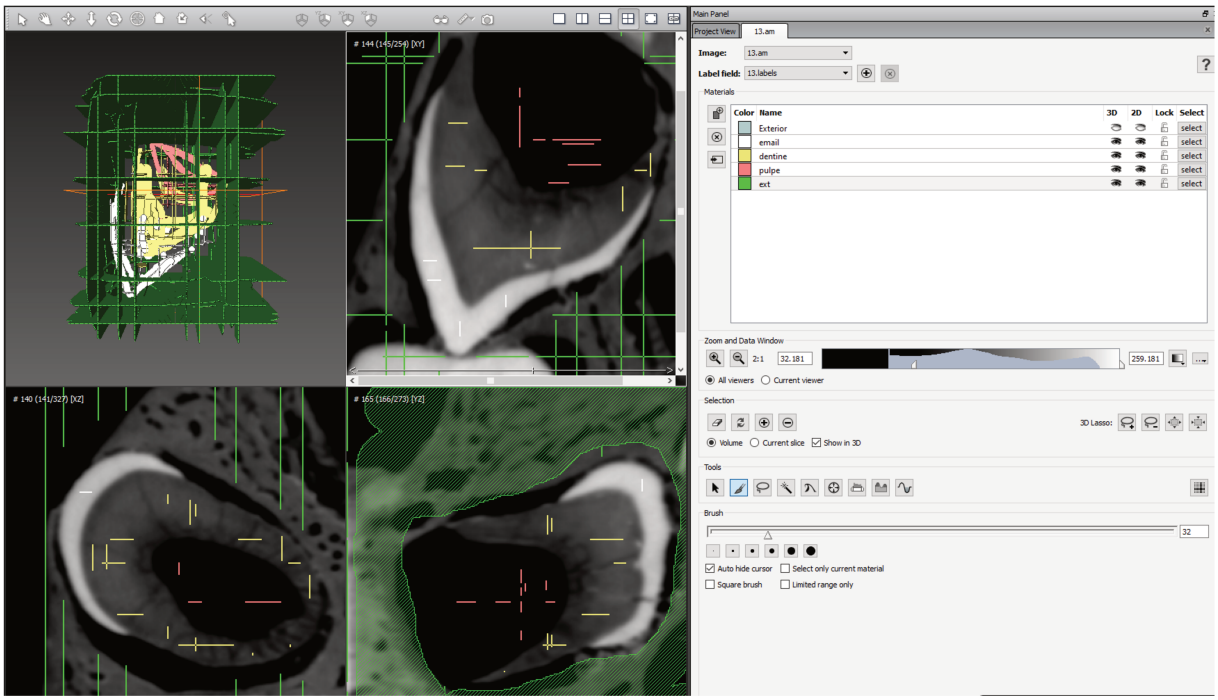


Figure 9 Sélection des trois tissus de la dent avec les différents labels (illustration personnelle)

3) Correction manuelle de la sélection automatique :

Lorsque les labels ont été attribués à plusieurs coupes dans les différents plans, nous appliquons la sélection automatique grâce à l'outil : « *Watershed Tool* ». Le logiciel Avizo® applique alors à l'ensemble des pixels gris, les sélections qui ont été faites pour chaque label. Nous obtenons alors une image en trois dimensions reconstituant l'objet à partir des coupes en deux dimensions (Figure 10).

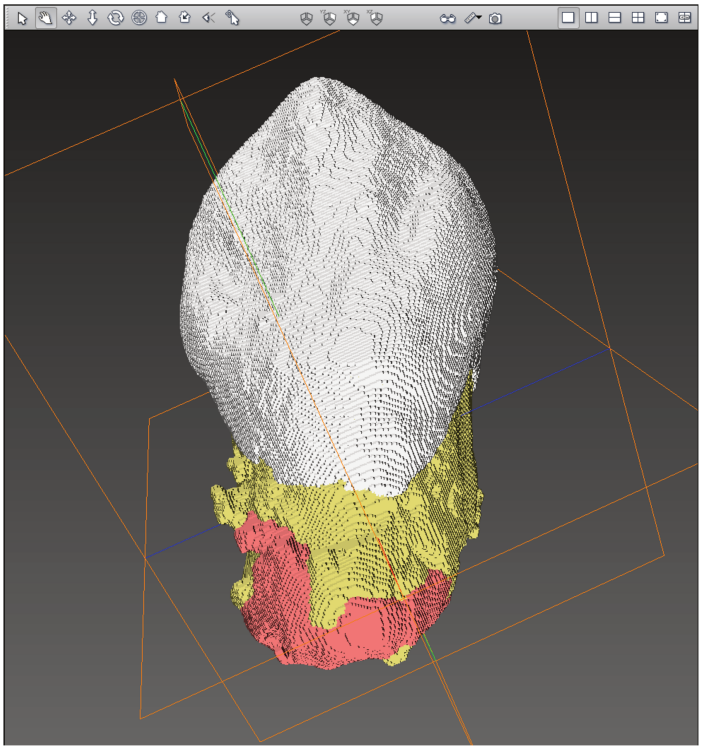


Figure 10 Canine maxillaire droite de Q4 après segmentation automatique (illustration personnelle)

La sélection faite sur les coupes (affichée en rouge) est également visualisable dans la case « *show in 3D* ». Cette vue s'avère pratique pour avoir une idée du rendu surfacique de la sélection et est un très bon outil de repère pour les corrections manuelles plus minutieuses que la sélection automatique du logiciel. En effet, la segmentation automatique a ses limites. La similitude des niveaux de gris entre la dentine et l'os en est la preuve (Figure 11).

La racine contenue dans l'alvéole n'est pas exploitable après la sélection automatique car le logiciel n'arrive pas à différencier de manière nette la dentine de l'os alvéolaire. Il faut lui administrer des retouches manuelles afin de s'approcher de la réalité.

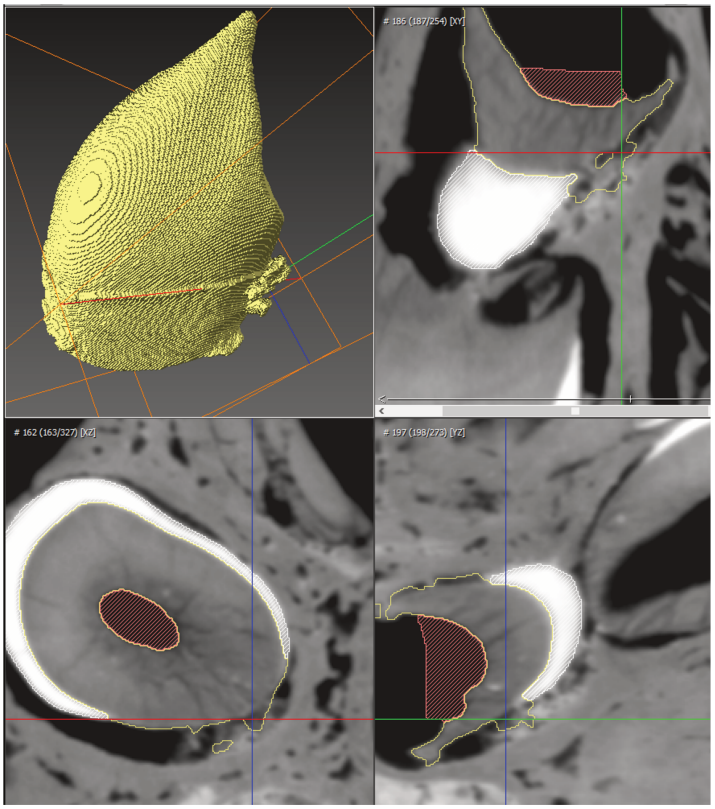


Figure 11 Retouche à effectuer sur la dentine radiculaire (illustration personnelle)

Les outils en adéquation avec ces retouches ont été analysés dans la partie précédente. Ils vont nous permettre d'apporter les corrections sur les différents tissus qui composent la dent.

Lorsque nous souhaitons trouver un endroit précis à corriger (Figure 12), il peut être intéressant d'utiliser le module « *Display a crosshair* » qui affichera, une fois activé, la position du curseur dans chacune des vues en indiquant les coupes avec des lignes de couleurs différentes.

Les modifications sont affectées à chacune des vues ou à celles sélectionnées en choisissant « *All viewers* » ou « *Current Viewer* ». Il est également possible de l'appliquer à l'ensemble des coupes situées entre deux sélections en créant une interpolation des coupes par le biais du raccourci « CTRL+I ».

Le plus gros travail de correction manuelle était de délimiter la dentine de l'os alvéolaire. Cependant, l'émail et la pulpe nécessitent également des retouches, effectuées à la main. En ce qui concerne la pulpe, les fêlures et les fractures au sein de la dent apparaissant hypodenses, il a fallu les différencier de la pulpe qui,

étant un tissu mou, correspond au vide à l'intérieur de la dent car elle ne s'est pas conservée.

L'émail présente parfois quelques imperfections assez simple et rapide à corriger mais son état de surface reste parfois un peu rugueux. Ceci est corrigé automatiquement par le logiciel lorsqu'il effectue un « *smoothing* » ou « lissage » de la surface obtenue.

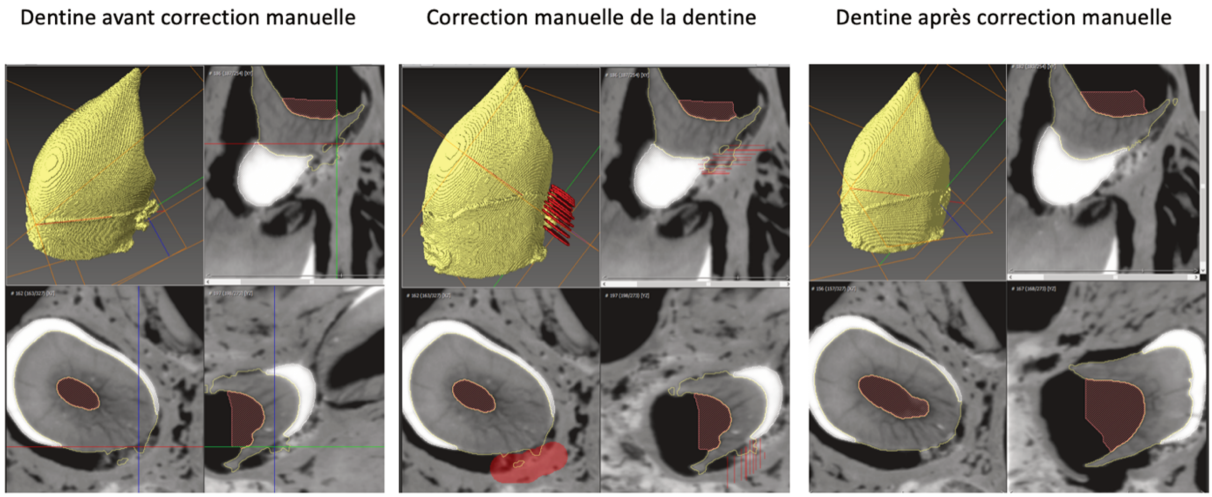


Figure 12 Exemple de correction manuelle durant le traitement de la segmentation automatique de la 13 de l'individu Q4 (illustration personnelle)

La représentation 3D de la dent passée au microCT est contenue dans l'encadré en haut à gauche de l'écran (Figure 13). Il est possible de mobiliser cette représentation dans les trois plans de l'espace et ainsi observer une vérification des corrections effectuées.

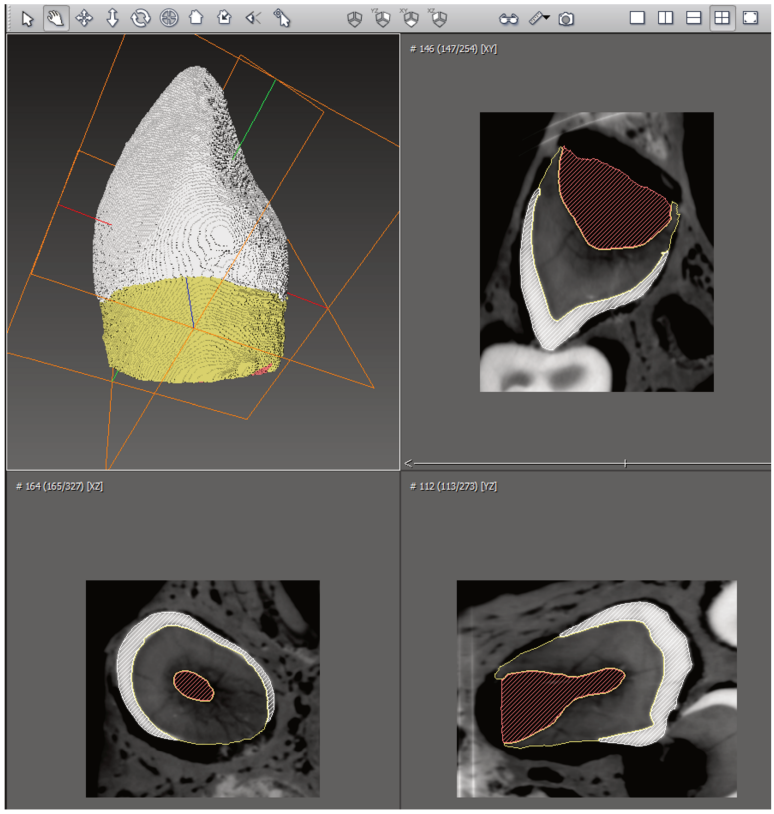


Figure 13 Canine maxillaire droite après correction manuelle de la segmentation automatique du logiciel Avizo® (illustration personnelle)

Le logiciel permet d'isoler les labels afin de contrôler la cohérence de l'état de surface des tissus un à un. Il est alors possible de visualiser l'aspect de l'émail, de la dentine et de la pulpe séparément.

4) Séparation de la racine et de la couronne :

Pour analyser les tissus dentaires individuellement, il est nécessaire d'isoler la couronne de la racine. En effet, les résultats qui nous intéressent sont, en grande majorité, coronaires. Le logiciel Avizo ®, permet cette séparation virtuelle sans léser l'intégrité des dents fossiles. Nous utilisons un protocole décrit par Benazzi en 2014 [20]. Cette technique consiste à sceller la ligne cervicale de la couronne par une surface lisse qui est créée en bas de la dentine coronale.

A partir du label contenant l'émail, la dentine et la pulpe, segmentés de manière semi-automatique puis corrigés manuellement, il faut générer une nouvelle surface de visualisation en 3D. Il convient ensuite de supprimer les matériaux

dentine et pulpe. Il ne reste alors que l'émail sur ce label. Il est alors possible de « fermer » l'émail avec l'option « *fill hole* ». Cette option ne conserve que la surface extérieure de l'émail.

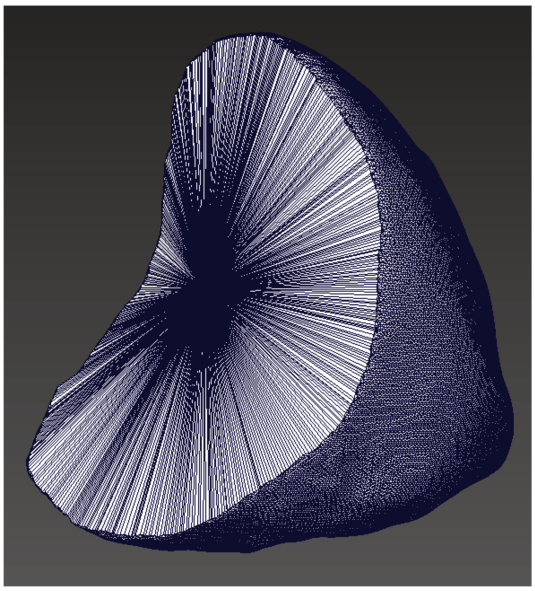


Figure 14 Exemple d'utilisation du module « fill hole » pour fermer la surface amélaire et isoler la couronne de la racine (illustration personnelle)

Le module « *Scan Surface to Volume* » permet de générer une surface fermée et uniforme. La couronne est alors fermée et isolée de la racine rendant possible la réalisation des calculs souhaités.

5) Création des arbres :

Le but de cette analyse est d'obtenir les volumes coronaires de l'émail, de la dentine et de la pulpe. Pour ce faire, dans un premier temps, il faut copier le label de base contenant les trois tissus. Une fois copié en trois exemplaires (Figure 15), il faut ne garder qu'un tissu dans chacun d'entre eux pour que l'émail, la dentine et la pulpe soient isolés dans un label qui leur est propre (Figure 16).

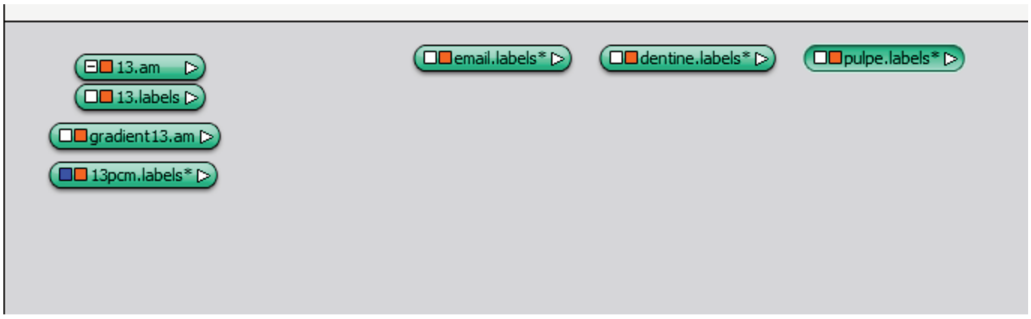


Figure 15 Création des labels pour chaque tissu à analyser (illustration personnelle)

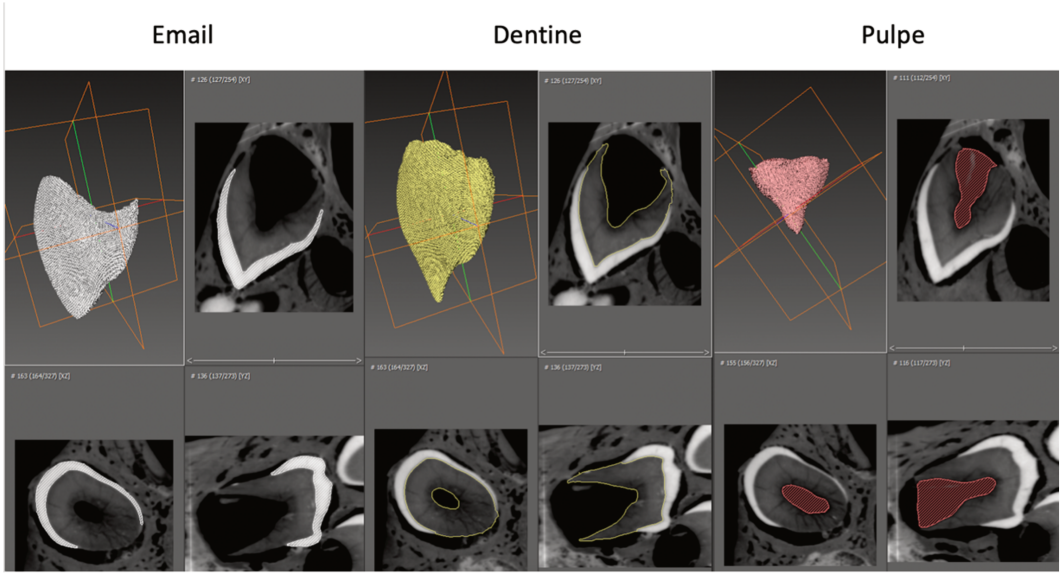


Figure 16 Tissus isolés dans leur label respectif (illustration personnelle)

Une fois la couronne isolée de la racine, il est possible de compléter les arbres pour obtenir les valeurs surfaciques et volumétriques. Les arbres sont l'organisation interne d'Avizo®. Pour obtenir les statistiques de l'émail, de la dentine et de la pulpe dans leur intégralité, il suffit de générer une nouvelle surface, avec le module « *Generate surface* », pour chaque tissu isolé, puis d'utiliser le module « *Surface area volume* » celui-ci consiste à donner les aires de la surface ainsi que le volume contenu dans le label. L'unité de ces données est en mm^2 pour les surfaces ou en mm^3 pour les volumes. Elles sont présentées dans un tableau (Figure 17).

email.statistics

	Material	Triangles	Area	Volume	Closedness
1	Exterior	224648	377.844635	-160.232834	n/a
2	email	224648	377.844635	160.232834	closed
3	TOTAL -	0	0	-160.232834	
4	TOTAL +	449296	755.68927	160.232834	

Figure 17 Tableau de statistique du volume et de l'air calculé grâce à l'outil « *Surface area volume* » (illustration personnelle)

L'émail étant strictement coronaire il n'est pas nécessaire de le séparer du reste de la dent. Le calcul de l'ensemble de la dentine et de la pulpe se fait de la même manière que l'émail. Cependant, pour obtenir la pulpe coronaire et la dentine coronaire, il est nécessaire d'effectuer quelques manipulations supplémentaires. Le travail de séparation de la couronne et de la racine a été fait au préalable à cet effet. Il est nécessaire de convertir les surfaces en volumes afin de pouvoir utiliser le module « *Arithmetic* » (Figure 18). Dans un premier temps, il convient de soustraire l'ensemble de la dentine à la couronne pour ainsi obtenir les statistiques de la dentine radiculaire, appelé dans l'arbre « dentineR ». Une fois que nous avons connaissance de cette donnée, il suffit de soustraire l'ensemble de la dentine à la dentine radiculaire pour obtenir la dentine coronaire.

Calcul de la dentine radiculaire

Properties

Arithmetic

Input A: dentine.labels

Input B: emailclose.scanConverted

Input C: NO SOURCE

Result Channels: like input A

Expr: A-B

Result Type: input A regular

Options: ignore errors

Calcul de la dentine coronaire

Arithmetic 2

Input A: dentine.labels

Input B: dentineR

Input C: NO SOURCE

Result Channels: like input A

Expr: A-B

Result Type: input A regular

Options: ignore errors

Figure 18 Exemple utilisation du module « *arithmetic* » (illustration personnelle)

Il faut appliquer cette technique à la pulpe afin d'obtenir les statistiques de la pulpe coronaire. Ces arbres nous permettent donc d'avoir les données suivantes :

- Le volume total de la dent (couronne + racine)
- Le volume de l'émail
- Le volume de la dentine
- Le volume de la dentine radiculaire
- Le volume de la dentine coronaire
- Le volume de la pulpe
- Le volume de la pulpe radiculaire
- Le volume de la pulpe coronaire

6) Obtention de la surface de la jonction émail-dentine :

La jonction entre l'émail et la dentine coronaire est une surface que le logiciel va traiter en mm^2. Elle possède un double intérêt dans cette étude :

- L'analyse visuelle de la structure
- Normaliser les calculs de l'épaisseur de l'émail en 3D

Il faut générer une nouvelle surface puis y associer une vue dans laquelle nous allons supprimer l'ensemble des tissus puis y ajouter uniquement l'émail et la dentine.

Le module « *Extract surface* » (Figure 20) permet de faire apparaître la surface entre l'émail et la dentine. L'aire de répartition de cette frontière entre ces deux tissus. Le module « *Surface view* » nous permettra d'observer la structure de cette surface grâce à sa visualisation 3D (**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**).

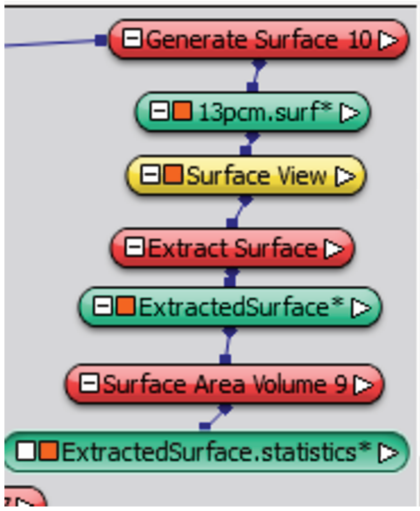


Figure 20 Arbre de l'obtention de l'EDJ (illustration personnelle)

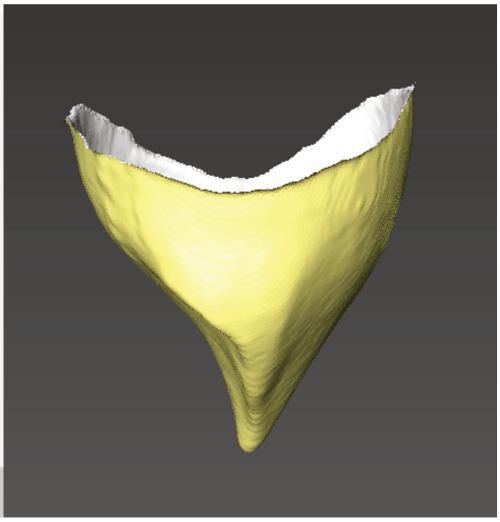


Figure 19 Représentation 3D de la JED la 13

7) Les cartographies colorimétriques :

Ce que nous appelons « *Colormaps* », est une analyse colorimétrique de l'épaisseur de l'émail. Le module « *Surface thickness* » permet, de mesurer l'épaisseur d'une surface en utilisant des triangles et en mesurant la distance au triangle le plus proche dans une direction normale. Une fois associée au module « *Surface View* », nous avons une visualisation en 3D de la couronne avec une plage de couleur servant de repère à l'épaisseur. Il faut également lui apporter une échelle de valeurs minimum et maximum d'épaisseur ici allant de 0 à 2 en mm.

La représentation en 3D nous permet d'analyser l'épaisseur de la couronne sous ses différentes vues :

- Occlusale (O)
- Vestibulaire (V)
- Palatine (P)
- Mésiale (M)
- Distale (D)

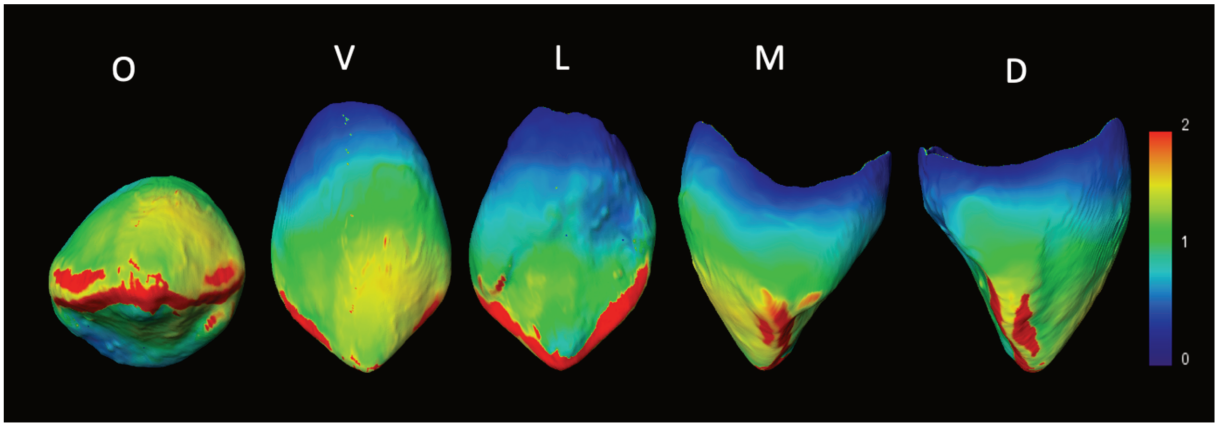


Figure 21 Colormaps de la 13 de Q4 (illustration personnelle)

II. Résultats :

A) Mesures volumiques tissulaires :

Comme nous l'avons vu précédemment dans la partie sur la méthode, pour chaque élément dentaire dont la segmentation a été réalisée, nous avons pu calculer 10 variables :

- le volume total (Vt) en mm^3 ;
- le volume de l'émail (Ve) en mm^3 ;
- le volume de la dentine (Vd) en mm^3 ;
- le volume de la pulpe (Vp) en mm^3 ;
- le volume de la dentine coronaire (Vcd) en mm^3 ;
- le volume de la pulpe coronaire (Vcp) en mm^3 ;
- le volume de la dentine et de la pulpe coronaire (Vcdp) en mm^3 ;
- le volume coronaire (Vc) en mm^3 ;
- la jonction émail dentine (SEDJ) en mm^2 ;
- la proportion de la dentine et de la pulpe dans la couronne.

Ces données sont présentées en trois tableaux. Le premier présente les analyses de l'individu *Homo sapiens* Qafzeh 4. Le second expose les résultats de l'individu *néandertalien* Hortus II/III. Le dernier tableau permet de comparer les données des deux individus. Les possibilités d'exploitation de ces données feront l'objet d'une dernière partie dans le présent travail.

dent	Vt (mm³)	Ve (mm³)	Vd (mm³)	Vp (mm³)	Vcdp (mm³)	Vcd (mm³)	Vcp (mm³)	Vc (mm³)	Vcdp/Vc	Sedj (mm²)
13	538,96	160,39	269,29	109,28	204,81	193,51	11,3	365,2	56%	152,26
14	459,3	169,21	211,73	77,73	182,2	172,23	9,97	351,41	52%	143,46
15	296,62	159,76	136,57	0	127,25	127,25	0	287,01	44%	123,56
16	1221,63	285,98	791,3	143,61	314,93	312,64	2,29	600,91	52%	218,46
53	349,77	34,84	293,58	20,72	79,47	76,21	3,26	114,31	70%	157,3
54	391,25	47,33	322,1	21,21	118,54	110,8	7,74	165,87	71%	100,56
55	695,65	104,03	541,21	49,79	190,8	182,9	7,9	294,83	65%	162,46
22	338,41	126,21	180,91	30,74	135,97	130,08	5,89	262,18	52%	131,75
23	424,89	165,07	254,71	4,74	202,15	197,87	4,28	367,22	55%	152,13
24	410,8	175,76	196,16	38,21	185,76	175,25	10,51	361,52	51%	145,23
25	336,39	166,85	145,91	23,08	152,16	137,8	14,36	319,01	48%	128,93
26	1364,56	290,72	888,35	184,59	328,23	323,27	4,96	618,95	53%	223,28
63	333,19	38,09	268,23	26,38	80,09	75,39	4,7	118,18	68%	155,91
64	395,84	52,75	330,94	11,29	132,05	127,39	4,66	184,8	71%	112,62
65	624,41	103,17	477,76	43,44	187,59	182,41	5,18	290,76	65%	154,62
31	230,84	77,12	137,7	15,63	82,12	78,69	3,43	159,24	52%	99,21
32	377,56	104,97	260,07	12,12	119,25	114,28	4,97	224,22	53%	249,95
33	359,3	141,31	215	2,64	175,15	172,51	2,64	316,46	55%	147,37
34	307,82	138,62	160,53	8,28	136,56	131,45	5,11	275,18	50%	115,99
36	874,79	305,52	510,6	57,96	334,21	323,7	10,51	639,73	52%	229,05
74	420,05	61,35	336,04	22,61	111,68	106,19	5,49	173,03	65%	108,35
75	396,27	105,82	242,73	46,75	185,29	175,49	9,8	291,11	64%	156,37
41	364,96	79,74	234,29	50,5	83	79,07	3,93	162,74	51%	101,21
42	375,74	106,3	238,1	30,75	121	115,01	5,99	227,3	53%	124,91
43	384,65	145,87	233,53	4,75	185,18	180,47	4,71	331,05	56%	151,17
44	339,16	135,59	174,53	28,51	140,85	135,02	5,83	276,44	51%	120,15
45	322,32	158,22	140,08	23,27	135,43	121,12	14,31	293,65	46%	120,04
46	1410,4	290,48	918,75	200,39	344,09	335,77	8,32	634,57	54%	233,99
83	289,12	30,28	237,02	21,6	41,33	39,37	1,96	71,61	58%	55,6
84	421,6	58,3	333,28	29,5	118,53	109,29	9,24	176,83	67%	114,01
85	669,77	99,81	518,27	51,09	181,24	172,82	8,42	281,05	64%	152,69

Figure 22 Mesures linéaires, surfaciques, volumétriques et proportions (%) des tissus des dents de l'enfant Qafzeh 4.

dent	VT (mm³)	Ve (mm³)	Vd (mm³)	Vp (mm³)	Vcdp (mm³)	Vcd (mm³)	Vcp (mm³)	Vc (mm³)	Vcdp/Vc	Sedj (mm²)
13	456,59	142,06	279,1	35,19	181,94	172,29	9,65	324	56%	160,54
15	335,22	138,88	174,47	21,76	132,22	123,93	8,29	271,1	49%	127,05
17	608,95	244,19	277	87,62	255,29	226,98	28,31	499,48	51%	200,63
24	402,48	143,14	219,41	39,79	149,38	142,71	6,67	292,52	51%	140,48
25	332,37	134,29	174,12	23,85	125,53	119,36	6,17	259,82	48%	122,61
27	590,95	239,06	275,79	75,98	238,66	216,42	22,24	477,72	50%	199,42
73	624,09	83,09	509,79	31,07	135,42	130,94	4,48	218,51	62%	126,67
33	452,4	98,44	309	44,78	133,09	125,12	7,97	231,53	57%	130,74
34	285,59	103,77	153,38	28,27	104,81	98,94	5,87	208,58	50%	108,38
35	277,15	113,21	131,84	31,7	97,24	90,22	7,02	210,45	46%	106,96
43	431,73	96,15	273	62,52	127,35	118,85	8,5	223,5	57%	127,23
44	296,53	103,35	161,85	31,16	107,36	101,01	6,35	210,71	51%	108,33
45	286,67	110,1	143,25	32,15	100,19	92,96	7,23	210,29	48%	108,55
46	943,76	182,35	654,68	106,27	252,09	230,69	21,4	434,44	58%	203,05

Figure 23 Mesures linéaires, surfaciques, volumétriques et proportions (%) des tissus des dents de l'enfant Hortus II/III.

Dent		Vt (mm³)	Ve (mm³)	Vd (mm³)	Vp (mm³)	Vcdp (mm³)	Vcd (mm³)	Vcp (mm³)	Vc (mm³)	Vcdp/Vc	Sedj (mm²)
13	HORTUS	456,59	142,064	279,1	35,19	181,94	172,29	9,65	324,004	56%	160,543
	Q4	548,96	160,38	279,1	109,28	204,8145	193,507	11,3075	365,1945	56%	152,25
15	HORTUS	335,224	138,87	174,475	21,76	132,21	123,93	8,28	271,08	49%	127,045
	Q4	296,624	159,76	136,56	0	127,24	127,24	0	287	44%	123,56
24	HORTUS	402,478	143,137	219,412	39,79	149,38	142,71	6,67	292,517	51%	140,475
	Q4	410,79	175,76	196,16	38,21	185,76	175,25	10,51	361,52	51%	145,234
25	HORTUS	332,365	134,293	174,123	23,85	125,519	119,359	6,16	259,812	48%	122,612
	Q4	336,387	166,85	145,9	23	152,15	137,8	14,35	319	48%	128,92
33	HORTUS	452,401	98,44	308,99	44,77	133,077	125,117	7,96	231,517	57%	130,73
	Q4	359,295	141,31	214,99	2,63	175,14	172,51	2,63	316,45	55%	147,37
34	HORTUS	285,591	103,77	153,384	28,27	104,79	98,93	5,86	208,56	50%	108,383
	Q4	307,82	138,62	160,53	8,28	136,56	131,45	5,11	275,18	50%	115,99
43	HORTUS	431,73	96,14	272,99	62,52	127,35	118,85	8,5	223,49	57%	127,234
	Q4	384,65	145,86	233,52	4,75	185,16	180,46	4,7	331,02	56%	151,174
44	HORTUS	296,52	103,352	161,85	31,16	107,354	101,014	6,34	210,706	51%	108,33
	Q4	339,15	135,58	174,534	28,51	140,83	135,01	5,82	276,41	51%	120,15
45	HORTUS	286,66	110,99	143,248	32,14	100,18	92,96	7,22	211,17	47%	108,54
	Q4	322,321	158,219	140,08	23,27	135,434	121,124	14,31	293,653	46%	120,039
46	HORTUS	943,755	182,35	654,67	106,26	252,09	230,69	21,4	434,44	58%	203,04
	Q4	1410,4	290,47	918,74	200,39	344,07	335,76	8,31	634,54	54%	231,76

Figure 24 Comparaison des volumes linéaires, surfaciques, volumétriques et proportions (%) des tissus des dents des enfants Qafzeh 4 et Hortus II/III.

B) *Cartographie de l'épaisseur de l'émail et jonction émail/dentine :*

Le logiciel Avizo® nous a permis, lorsque la dent fossile était dans un état correct, de la reconstituer en 3D. Cette reconstitution nous a livré les données volumétriques mais également des images de la couronne mobilisable dans les trois plans de l'espace (x,y,z).

Il est intéressant de ressortir de cette dent virtuelle, les vues dans les cinq plans différents de la couronne :

- O : occlusale ;
- V : vestibulaire ;
- P : palatine ;
- L : linguale ;
- M : mésiale ;
- D : distale.

Pour chaque dent, une figure représente, sur la première ligne, la couronne où la surface amélaire est représentée par une plage de couleur retraçant la répartition de l'épaisseur de l'émail en mm^2. La variation de l'épaisseur est figurée par une échelle de couleur allant du bleu (pour les zones les moins épaisses, comme le collet) au rouge pour les endroits possédant la plus grosse couche d'émail au niveau de la couronne (comme les pointes cuspidiennes lorsque les dents ne sont pas encore abrasées).

Sur la deuxième ligne, nous pouvons voir la jonction amélo-dentinaire (JAD). Il s'agit-là exclusivement d'une surface.

Nous pouvons constater sur les deux figures présentées ici en exemple que la JAD est représentative de la forme de la surface amélaire, cependant son relief semble plus marqué au niveau de la surface JAD.

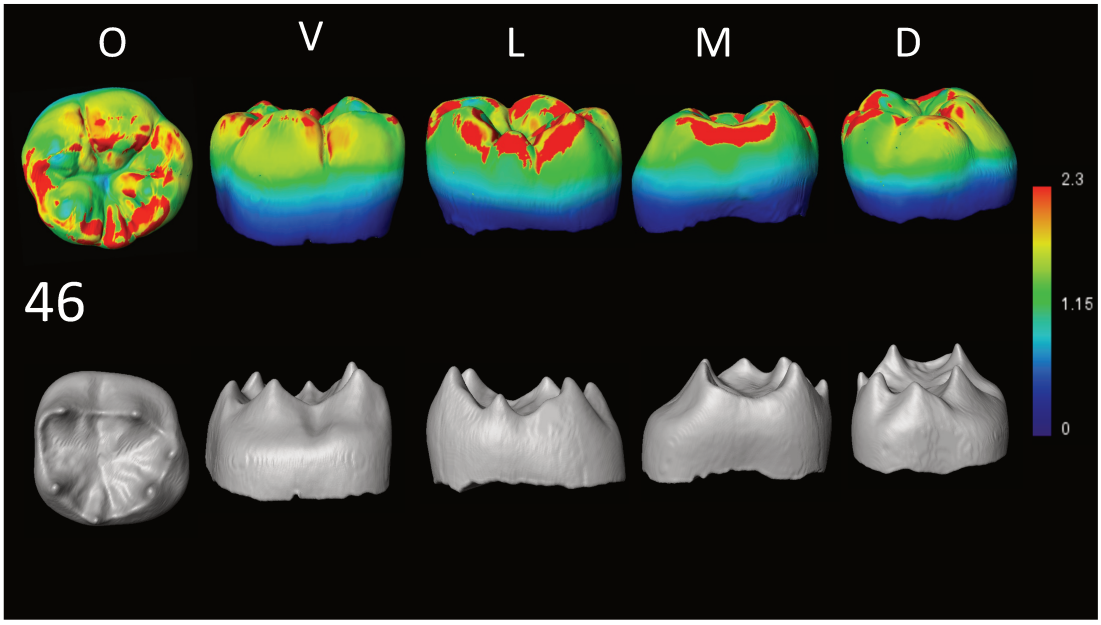


Figure 25 Première molaire mandibulaire droite (46) du sujet Qafzeh 4 (illustration personnelle)

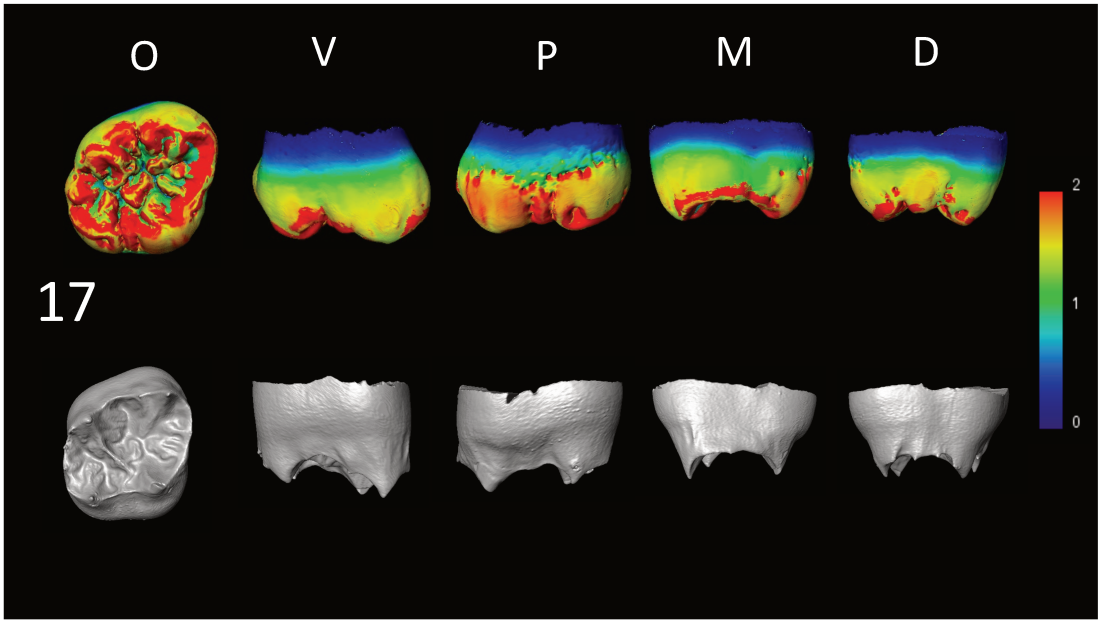


Figure 26 Deuxième molaire maxillaire droite (17) du sujet Hortus II/III (illustration personnelle)

Le reste des *colormaps* pour les deux individus est présenté en annexe.

III. Le potentiel des études microtomographiques dentaires appliquées aux fossiles :

A) L'analyse des volumes tissulaires :

Le traitement de l'objet d'étude en trois dimensions permet de calculer des volumes segmentés au sein de l'objet. Le logiciel Avizo® par le biais de l'outil « *Material Statistics* », calcule les mesures volumiques ou surfaciques sans les détériorer. Ce système permet de corriger les biais rencontrés par Martin [21], ou il définit que le plan de section idéal passe par les cornes de dentine des cuspides mésiales et est perpendiculaire à la ligne cervicale de la dent. Cependant, il est impossible de localiser précisément le plan de section histologique idéal. Ces plans de coupes incertains provoquent une mauvaise analyse par exagération de l'épaisseur de l'émail et une réduction de l'aire de la dentine. L'apparition de la modélisation 3D de la dent permet de pallier ce biais en définissant le plan de section virtuellement ainsi que de préserver la dent fossile analysée.

L'étude des volumes tissulaires est primordiale en paléoanthropologie. En effet, elle permet pour la première fois de comparer des valeurs tridimensionnelles, jusqu'alors inaccessibles entre espèces de manière reproductible. Les dents possèdent trois tissus distincts qui nous permettent de faire des analyses précises : il est intéressant d'obtenir le volume d'émail (Ve), le volume de dentine (Vd) et le volume de la pulpe (Vp).

La séparation virtuelle de la racine et de la couronne permet d'obtenir les volumes de dentine coronaire (Vdc) et le volume de pulpe coronaire (Vpc). Grâce aux données précédemment citées, il est possible de calculer le pourcentage de dentine et de pulpe coronaire et ainsi comparer ces proportions.

Nous pouvons retrouver ces mesures pour Q4 à la Figure 22 et pour H II/III à la Figure 23. Les données comparatives des dents que les individus possédaient tous les deux sont à la Figure 24.

1) Le taurodontisme

Le taurodontisme est défini par un élargissement de la cavité pulpaire au détriment de la pulpe radiculaire et de la racine. Cette caractéristique anatomique a été signalée pour la première fois sur les molaires des néandertaliens de Krapina et a été utilisée pour différencier la condition néandertalienne par rapport à l'Homo Sapiens au niveau paléobiologique. Les auteurs de ces études ont mis en évidence une hypertrophie de la chambre pulpaire des molaires[22] (Blumberg et al. 1971). Cette caractéristique volumique et morphologique a été considérée comme une autapomorphie néandertalienne.

Mais des études ultérieures ont suggéré que si le taurodontisme est présent à des fréquences relativement élevées chez les néandertaliens, il n'est pas omniprésent [23] [24] (Mena, 1971 ; Grine et Klein, 1985). Une étude de Grine en 2001[25] constate qu'il y a des variations élevées au seins de la population actuelle. Elles dépendent du dimorphisme sexuel, de l'usure occlusale, de la position de la molaire sur l'arcade, et enfin de l'ethnie. Chez l'homme moderne, la prévalence reste relativement faible : 5% [26] (Jafarzadeh 2008). Elle reste une anomalie isolée ou alors associée à des syndromes génétiques comme la trisomie 21 ou encore le syndrome de Klinefelter. A l'inverse, le taurodontisme molaire présente une fréquence élevée chez les néandertaliens européens [18] (Kupczik & Hublin 2010). L'étude de Benazzi en 2014 [27] suggère plusieurs hypothèses pour justifier cette caractéristique. Elle pourrait conférer un avantage biomécanique pour mieux répartir la charge occlusale durant la mastication de nourriture plus ferme. Elle pourrait être d'origine pléiotrope ou liée à une dérive génétique.

2) L'épaisseur de l'émail :

L'épaisseur de l'émail est un critère volumique. Il est particulièrement intéressant car il est très variable au sein du genre Homo [21] [28] [29] [30]. L'émail des molaires du genre homo est en général plus épais que la couche d'émail des molaire des grands singes actuels [31] (Smith 2005). L'épaisseur de l'émail est soumise à la pression sélective au cours de l'évolution car la dent ne subit pas de remodelage une fois qu'elle est formée, avant même d'arriver sur l'arcade [13]. L'épaisseur de ce tissu à l'air d'être corrélée à l'alimentation de l'espèce. L'émail épais a pour but de prévenir des éventuelles fractures ou usures que pourraient créer une alimentation dure composée de fruit à coque ou de viande non cuite nécessitant une longue mastication [32] [33]. Partant de ce postulat, nous pouvons utiliser l'épaisseur de l'émail pour définir les habitudes alimentaires d'une espèce d'homininés [34].

La répartition de l'épaisseur de l'émail à différent endroit de la couronne (cuspides, linguale, vestibulaire) permet de différencier les taxons [30].

En ce qui concerne la surface de répartition de l'émail chez les néandertaliens, des études ont montré que la surface d'émail était sensiblement plus fine que chez l'Homme moderne [35]. Pendant longtemps, ces études étaient effectuées principalement en 2D par le biais de radiographie ou alors par section naturelle, dû à l'usure du fossile, ou manuelle ce qui endommageait considérablement l'intégrité du fossile. Grâce à l'apparition de la microtopographie à RX, il est désormais possible de calculer la proportion des tissus dentaires de manière fiable et sans détériorer la dent fossile. Ces résultats ont confirmé qu'en moyenne, les molaires des Néandertaliens ont un émail plus fin que les molaires des Hommes modernes mais que cela s'explique par une répartition des proportions des tissus dentaires différentes. Les Néandertaliens présentaient des proportions de dentine plus importantes [36] [12] [37] [38] (Macchiarelli *et al.* 2006, 2007, 2008 ; Olejniczak *et al.* 2008). La quantité d'émail est en réalité assez similaire entre les deux espèces, mais

la jonction émail-dentine est plus importante du fait de la plus grande proportion de dentine. Ces analyses ont leurs limites car elles sont encore peu nombreuses et ne concernent que les molaires.

Pour analyser de manière statistique l'épaisseur d'émail, des calculs d'indices ont été mis en place. Nous parlons de l'épaisseur moyenne de l'émail AET, cependant il a été prouvé que l'augmentation de l'épaisseur de l'émail pourrait être liée à l'augmentation de la taille des dents. Pour corriger ce biais, la RET ou épaisseur relative de l'émail a été créée. C'est elle qui standardise l'AET et l'épaisseur relative de l'émail RET. Ce sont des indices qui ont été développés dans un premier temps pour la 2D [21] puis adaptés à la 3D [30].

La RET est un bon outil, à la fois pour comparer les dents d'un individu entre elles mais également la denture de différentes espèces entre elles [39].

B) L'analyse morphologique de l'émail et de la jonction email dentine :

L'émail et la dentine sont deux tissus composant la dent. L'émail est uniquement présent dans la couronne dentaire et est le tissu le plus minéralisé du corps humain. La dentine quant à elle se situe à la fois dans la couronne et la racine et est contenue entre l'émail et la pulpe coronaire. Nous allons nous intéresser à la surface de la couronne (composée exclusivement d'émail) ainsi qu'à la surface entre l'émail et la dentine. Cette jonction est une formidable mine d'information pour la recherche anthropologique. En effet, l'émail et la dentine ont une origine embryonnaire différente mais elles partagent un développement complémentaire dû à leur étroite relation tissulaire [40].

1) L'analyse de la morphologie non métriques :

Aussi bien pour la surface de l'émail que pour la jonction amélo-dentinaire, cette analyse concerne principalement les critères macroscopiques bien qu'ils soient discrets et possèdent une grande variabilité inter individuelle. Ils sont non métriques, qualitatifs et observationnels. Il faut alors relever les critères morphologiques et anatomiques de bases qui sont utilisés depuis longtemps en anthropologie[41]. La jonction émail dentine présente comme la surface amélaire, un certain nombre de caractères surfaciques qui lui sont propres. La terminologie utilisée le plus fréquemment pour définir son relief provient de l'ASUDAS (Arizona State University of Dental Anthropology)[42]. Cette technique regroupe 36 caractéristiques morphologiques pour définir les traits des incisives, des canines, des prémolaires et des molaires. Il est important de noté que ce système est basé sur la denture actuelle, qui présente des différences notables avec les populations du passé. Mais, une étude de 2012[43] permet une description morphologique adaptée au Neandertal qui a été définie grâce aux fossiles du site d'Atapuerca en Espagne. Ce site possède la plus grande collection de reste du genre Homo. L'échantillon dentaire se compose de 525 dents permanentes. Elles ont permis de définir les modèles morphologiques des Néandertaliens.

Les différents critères morphologiques sont classés par type dentaire. Voici un résumé non exhaustif :

a) Les canines :

- tubercule en forme de pelle ;
- tubercule en double forme de pelle ;
- crête accessoire mésiale ;
- crête accessoire distale.

b) <u>Les prémolaires :</u>

- crête accessoire mésiale ;
- renfort vestibulaire ;
- crête essentielle vestibulaire ;
- crête essentielle linguale ;
- nombre de cuspide linguale ;
- asymétrie.
- Crête transversale

c) <u>Les molaires :</u>

- crête transversale ;
- taille du métacône ;
- taille de l'hypocône ;
- crista obliqua ;
- tubercule accessoire marginal ;
- tubercule de Carabelli ;
- taille des cuspides ;
- fovea antérieure ;
- crête du trigonide ;
- modèle des sillons ;
- protostylide.

Ces caractères doivent être associés à des grades qui permettent de définir la précision du critère, s'il est fortement marqué ou quasi inexistant, ou encore fournir des informations supplémentaires sur la taille par exemple.

Il s'agit donc de relever ces critères, à la fois sur la surface externe de l'émail (SEE) et sur la JED, puis de comparer les repères non métriques d'une dent à l'autre afin de cibler les ressemblances et les différences au seins des différents taxons. Mais il est également intéressant de comparer les repères des deux surfaces entre elles sur une seule et même dent.

Des études montrent que le relief amélaire de la couronne dépend du relief de cette jonction [44]. Cependant, la surface extérieure de l'émail présente une légère atténuation des reliefs de la JED. La recherche s'est concentrée principalement sur les molaires définitives pour le moment comme c'est le cas avec une étude de 2012 qui a ciblé les caractéristiques morphologiques que nous retrouvons sur les molaires maxillaires. Elle confirme que la JED guide la morphologie de la couronne. Chez l'Homo Sapiens, la présence du tubercule de Carabelli provient de la JED et chez le chimpanzé, c'est un cingulum palatin qui provient de la JED. Ortiz souligne dans son article que les molaires possédant une grande quantité d'émail sont moins marquées par le relief de la JED [45].
Ces critères sont également utilisés en paléoanthropologie afin de définir l'appartenance d'une dent à un taxon [46] [47] [48].

2) Les analyses en morphométrie géométrique :

Si l'analyse non métrique s'intéresse aux canines, prémolaires et molaire, la morphométrie géométrique, elle, ne s'intéresse qu'aux dents pluricuspidées. Cette science est née au début des années 90, d'abord appliquée en 2D puis cette méthode a été appliquée à la 3D [49] [50].
Cette technique d'analyse est divisée en deux étapes. Dans un premier temps, il faut créer des *landmarks,* qui sont des points anatomiques homologues positionnés sur la surface à analyser. Il y a plusieurs types de *landmarks* :

- placé sur une courbure de structure ;
- placé à l'intersection de différents tissus ;
- placé de manière arbitraire ;
- placé par symétrie.

Pour les dents, ils se placent sur le contour marginal dans une premier temps (une quarantaine de *landmarks*), puis entre les deux cuspides pour les prémolaires, et au centre des quatre cuspides pour les molaires.

Dans un second temps, les *landmarks* sont traités par superposition *Procruste* qui va permettre d'étudier les variations de formes. Le principe de cette transformation est divisé en trois étapes :

- le centrage : il est effectué par translation, organise les conformations selon un centre de gravité, se base sur un centrage ayant une origine commune centroïde ;
- la mise à l'échelle : il s'agit de normaliser par la taille centroïde les coordonnées des *landmarks* ;
- la rotation des configurations : minimise la somme des carrées entre les *landmarks* correspondants.

La superposition permet de quantifier les différences entre les surfaces en termes de distance entre chaque *landmark*. Les superpositions étant visuelles, il est possible d'interpréter de manière directe les différences de conformation [39].

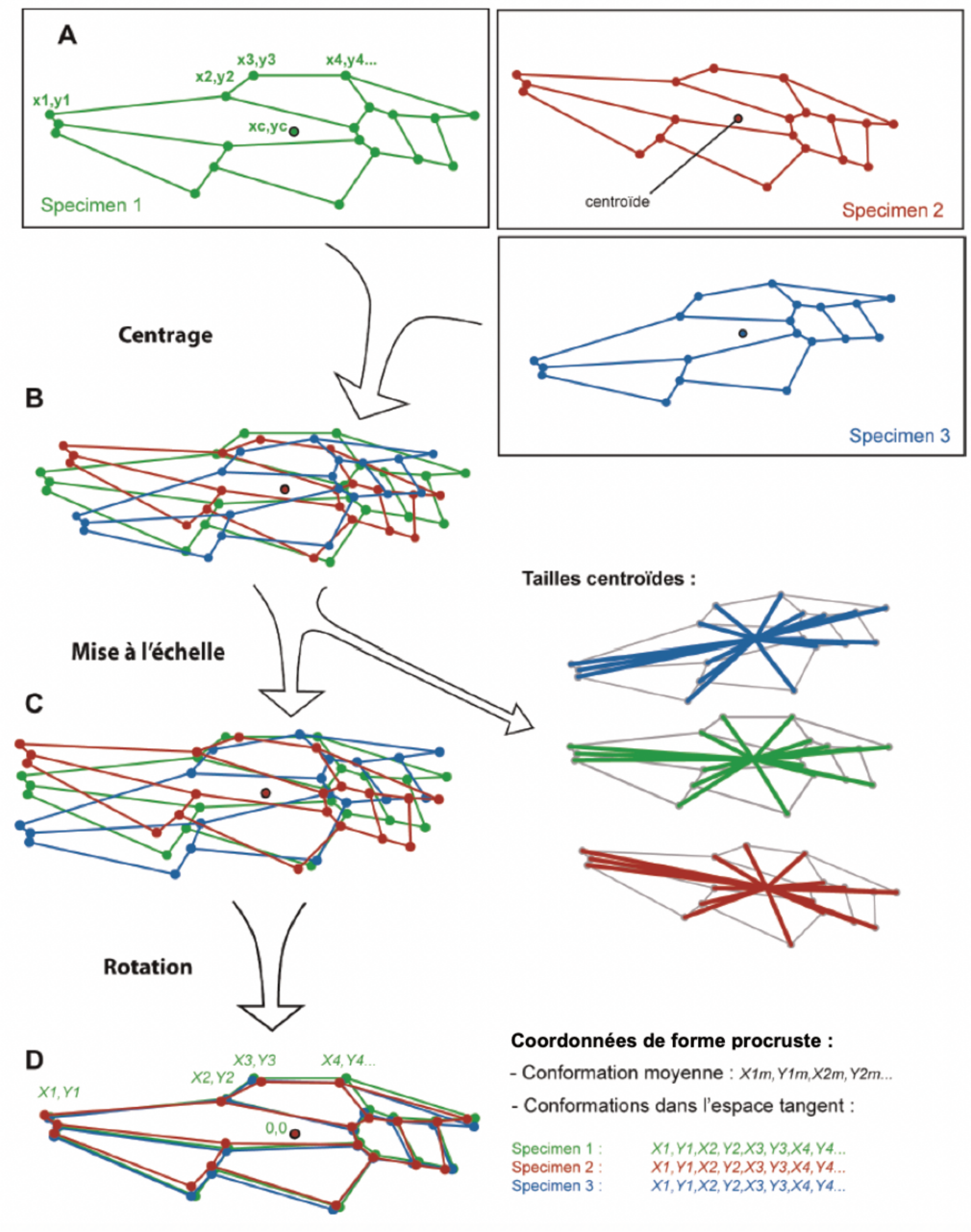


Figure 27 Exemple de superposition Procruste sur des ailes de guêpe [40]

A : centrage

B : mise à l'échelle

C : rotation pour minimiser la somme

D : résultat de la superposition Procruste.

C) *L'estimation de l'âge au décès :*

1) La méthode du stade de minéralisation :

En 1947, Schour et Massler [51] développent une technique qui sera perfectionnée dans le temps, utilisée et modifiée par de nombreux auteurs, et publiée sous forme d'un atlas des stades de minéralisation des dents déciduales et permanentes[52]. Cet atlas permet d'estimer, avec un certain degré de précision, l'âge d'un individu. Cette détermination de l'âge à partir d'estimateurs dentaires est une problématique qui ne s'applique pas uniquement dans un contexte paléoanthropologique mais également en médecine légale. Chez l'enfant, différentes méthodes ont été proposées à partir de la croissance dentaire. Il est nécessaire d'utiliser les différents stades de formation dentaire et d'éruption alvéolaire. Cette estimation est réalisable uniquement chez des sujets en cours de croissance. Chez *Homo sapiens* celle-ci est très étendue, entre 28 semaines in utéro et 23 ans en moyenne pour la croissance dentaire [53].

Pour réaliser cet atlas, AlQathani et al. ont utilisé les stades modifiés de Moorrees [54] [55] pour le développement proprement dentaire et de la méthode des stades modifiés de Bengston pour l'éruption et l'évolution des dents dans l'os alvéolaire [56].

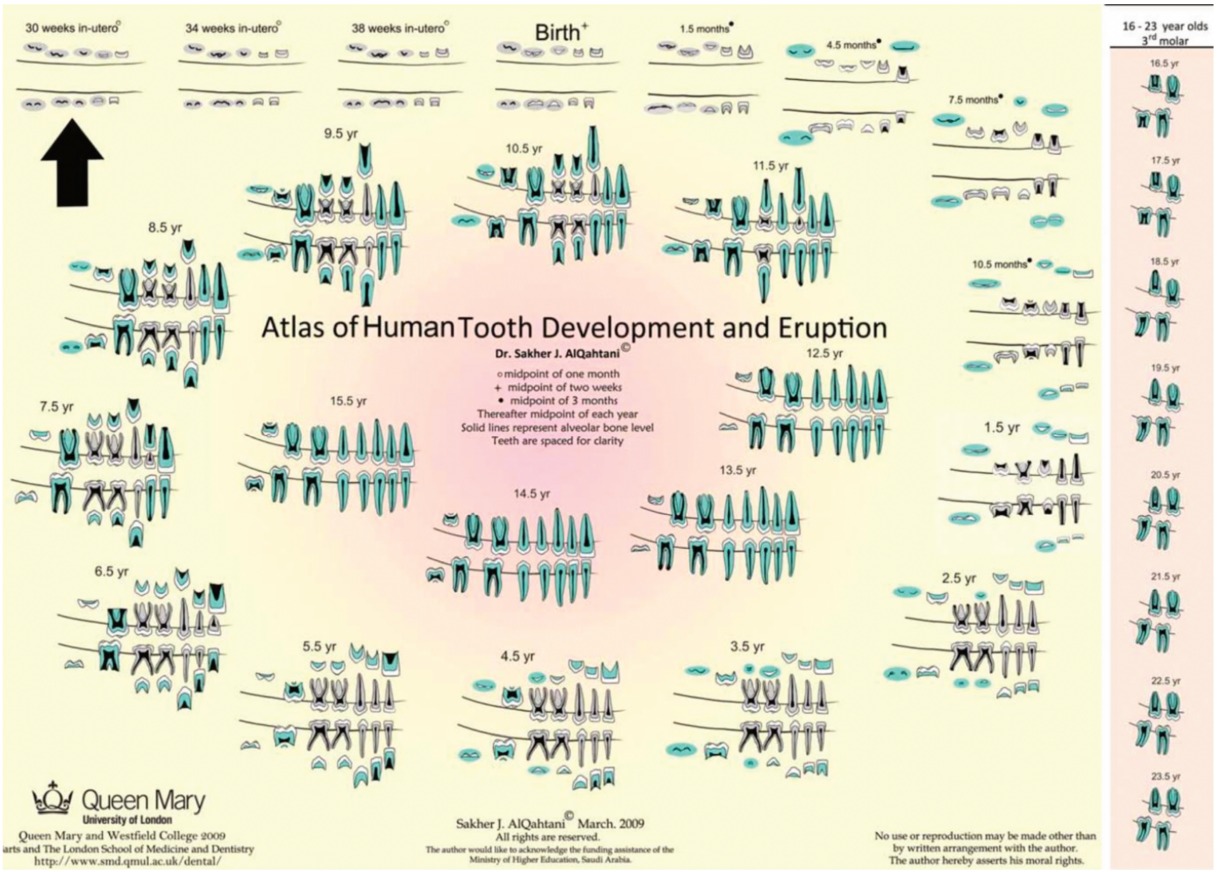


Figure 28 : Atlas de AlQhatani du développement et de l'éruption des dents chez l'Homme [53]

2) Evaluation de l'âge au décès de Qafzeh 4

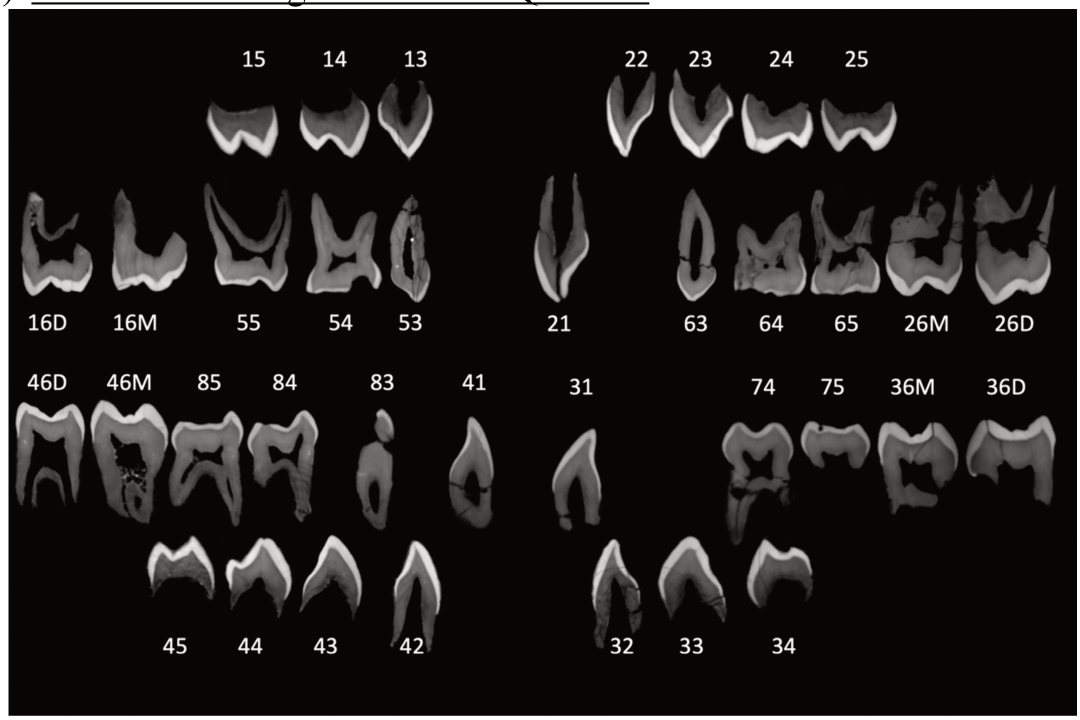


Figure 29 Planche développementale de l'individu Qafzeh 4 (illustration personnelle)

En analysant cette planche, nous pouvons constater que la 21,31, 41, 32 et la 42 pour les dents monoradiculées ainsi que les premières molaires, mandibulaires et maxillaires, sont en cours d'éruption. Nous pouvons constater que ces dents en sont à un stade où la longueur de la racine est égale, voire légèrement supérieure à la longueur de la couronne. Les germes des canines et prémolaires sont à un stade de développement où la couronne est achevée. La pulpe est en cours de formation et la racine est au stade initial avec des bords divergents. Il reste également des dents déciduales sur l'arcade : les canines et les molaires. En se basant sur les données de AlQhatani et al., Qafzeh 4 avait environ **6,5 ans** à son décès.

3) Évaluation de l'âge au décès de Hortus II/III

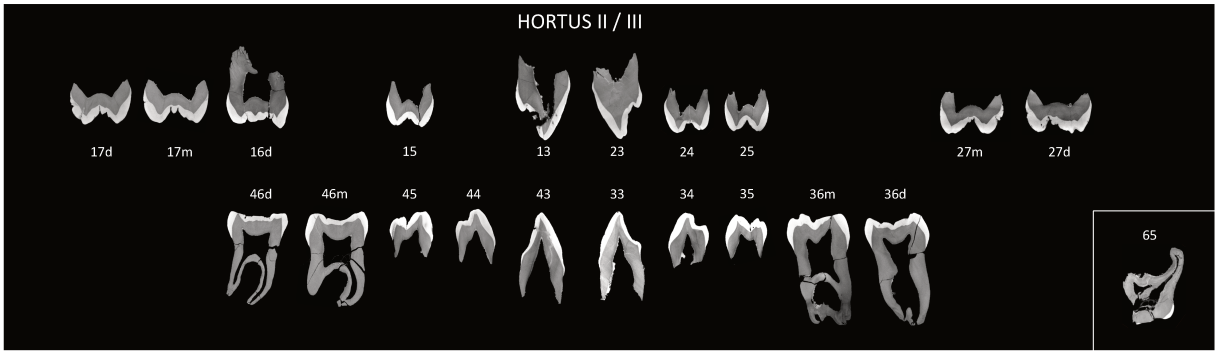


Figure 30 Planche développementale de l'individu Hortus II/III (illustration personnelle)

Le sujet Hortus II/III nous livre principalement des dents définitives. L'état du fossile n'a pas permis d'analyser les incisives. On peut constater que les germes des canines et des prémolaires sont au stade où couronne et racine ont sensiblement la même longueur. Le développement des premières molaires mandibulaires est quasiment terminé bien que les extrémités radiculaires soient encore légèrement divergentes. Les germes des deuxièmes molaires maxillaires viennent d'achever leur couronne avec le début de la formation de la cavité pulpaire. En se basant sur les données de AlQhatani et al., l'enfant Hortus II/III avait approximativement **7,5 ans** au moment du décès.

D) *L'approche Bayésienne d'estimation de l'âge au décès des sujets immatures :*

Nous avons vu précédemment une méthode permettant de déterminer l'âge d'un individu en cours de croissance par l'utilisation de planches qui schématisent et résument les séquences types d'éruption à différents âges de maturation chez l'Homme. Ce procédé reste tout de même une estimation assez large de l'âge. Les données collectées dans le présent travail peuvent également servir de base à une analyse bayésienne, c'est une approche probabiliste, mais qui se trouve être plus précise et qui limite le biais de l'observateur [57].

1) Le Théorème de Bayes :

Le théorème de Bayes est un théorème de probabilité inventé par Thomas Bayes en 1763.
Il se présente comme ceci :

$$P(A \mid B) = \frac{P(B \mid A)P(A)}{P(B)}$$

Figure 31 : Formule de Bayes

Il exprime la probabilité de A sachant B en fonction des probabilités de B sachant A et de la probabilité de A [58].
Il est utilisé en statistique car il permet de déterminer la probabilité qu'un événement arrive à partir d'un autre événement qui s'est réalisé, notamment quand ces deux évènements sont interdépendants. Il est donc possible de calculer précisément la probabilité d'un événement en tenant compte des informations déjà connues et des données provenant de nouvelles observations. Cependant ce théorème nécessite un grand nombre de calculs complexes. Les estimations Bayésiennes n'ont pu être appliquées dans les sciences de la recherche que

récemment grâce aux progrès de l'informatique. Il est désormais largement utilisé dans les domaines comme les sciences juridiques[59], la géographie[60], en médecine légale [61] ou encore ici en anthropologie dentaire[62].

2) L'analyse Bayésienne appliquée à la recherche dentaire :

Dans ce genre d'analyse, il convient de comparer les séquences dentaires obtenues selon une méthode de cotation sur un échantillon conséquent de radiographies panoramiques d'enfants actuels [9]. Il est intéressant de sélectionner des enfants multi ethniques, d'âges différents jusqu'à 21 ans environ et de tous genres pour que l'échantillon soit le plus représentatif possible.

Le développement dentaire est un phénomène d'une grande variabilité interindividuelle, il comprend plusieurs étapes comme, la formation de la crypte dans l'os alvéolaire, la minéralisation de la couronne puis la formation des racines et enfin l'éruption dentaire dans la cavité buccale, tout cela entraine des séquences de données de développement dentaire. Par le biais d'un logiciel capable d'automatiser les relevés des variables pour chaque individu de l'échantillon, il sera alors possible d'obtenir les probabilités d'appartenance aux classes d'âges pour les individus dont l'âge n'a pas encore pu être estimé.

En utilisant l'approche Bayésienne, les dents sont considérées, non pas comme des entités indépendantes les unes des autres, mais comme une unité de croissance dépendante. Chaque séquence dentaire, aussi bien pour les enfants du passé étudiés que les échantillons d'enfants actuels, a été détaillée en un nombre fini de combinaisons qui correspondent à des probabilités conditionnelles d'observer un sous ensemble à des stades de développement atteint. Ce modèle fait donc un comparatif de la fréquence de maturation de chaque individu de la base de donnée [63]. Chaque étape de croissance est supposée avoir la même probabilité d'être observée. Le calcul d'une probabilité pour chaque combinaison dépend donc uniquement de la présence du sous ensemble conditionnel de dents dans l'échantillon comparatif. Cette méthode a été utilisée pour l'enfant du Roc de Marsal [64]. Il a été comparé à un échantillon de radio panoramique de 343

individus juvéniles actuels dans une tranche d'âge allant de 2 à 6 ans. Avec cette technique il a été calculé qu'il était possible d'estimer l'appartenance à une classe d'âge avec un bon classement à 85% [65].

Cette méthode peut être utilisée non seulement en anthropologie pour étudier les populations du passé, mais est également un outil précieux pour répondre aux interrogations de la police scientifique en cas d'enquête sur une jeune victime ou pour répondre à un besoin social comme définir l'âge d'un individu en cas d'absence d'état civil [66].

Conclusion :

Ce travail de thèse a permis d'obtenir une base de données concernant deux individus fossiles juvéniles. L'évolution des techniques scientifiques en matière d'imagerie médicale et d'odontologie médico- légale rend le travail de recherche accessible à un large public. L'utilisation du logiciel Avizo® a rendu ce travail possible.

L'analyse des restes dentaires a permis de donner un âge au décès évalués à 6,5 ans pour l'individu Qafzeh 4 et de 7,5 ans pour le sujet Hortus II/III. Il est important de souligner que cette méthode d'estimation de l'âge fait appel à l'analyse de la macrostructure, le référentiel utilisé étant la population actuelle. L'âge biologique n'est donc pas forcément le même que celui des populations du paléolithique moyen et supérieur. Les rythmes de croissance des Homo Sapiens du Paléolithique sont probablement proches de ceux des populations actuelles, mais il existe probablement des variations dues aux modifications écologiques. Pour plus de précision sur cette estimation il serait intéressant d'utiliser la microstructure dentaire qui permet d'obtenir l'âge exact de l'individu au décès [69]. La difficulté étant d'accéder à cette microstructure de façon non destructrice, ce qui est permis actuellement par l'utilisation de la microtomographie Rx par propagation de contraste de phase en lumière Synchrotron.

Chez les deux spécimens étudiés ici, la denture est mixte et présente de nombreuses fractures, fêlures, une partie des dents est d''ailleurs absentes, ce qui a rendu délicat le travail de segmentation. Cependant pour chaque dent étant dans un état de conservation correct, la couronne a été segmentée ce qui a permis d'obtenir des tableaux comportant les données volumétriques. De plus, ce travail de segmentation a livré une représentation en 3D de la couronne avec ses variations d'épaisseur ainsi que la surface amélo-dentinaire.

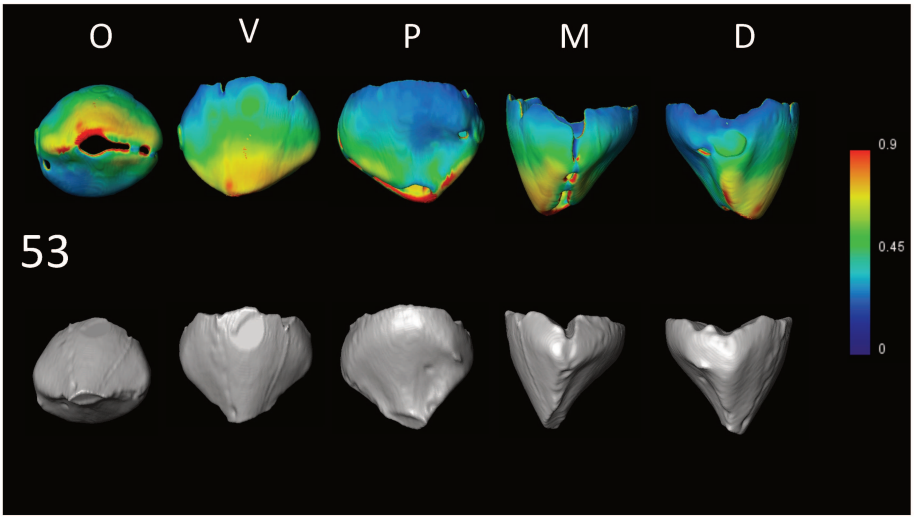
Les recherches sur ces individus sont loin d'être achevées, ces résultats ouvrent la voie à leur analyse, morphologique non métrique, morphométrique, aux analyses bayésiennes… Le but étant d'étoffer la base de données sur les enfants des populations du passé. En effet, les études concernant la structure interne des

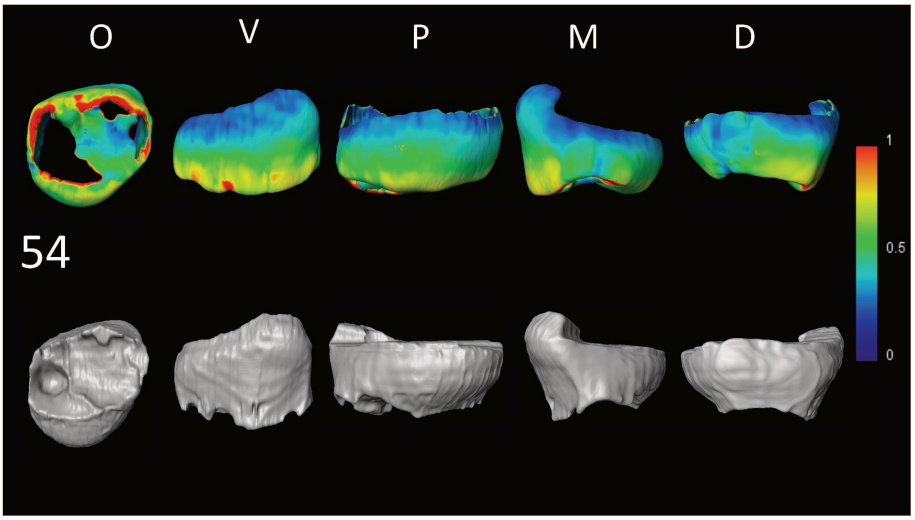
dents fossiles sont encore peu nombreuses. Il est nécessaire d'étendre les recherches pour créer un registre paléoanthropologique afin de préciser les conditions de vie, l'alimentation, et la croissance de ces individus du genre *Homo*.

Annexe 1 : Qafzeh 4

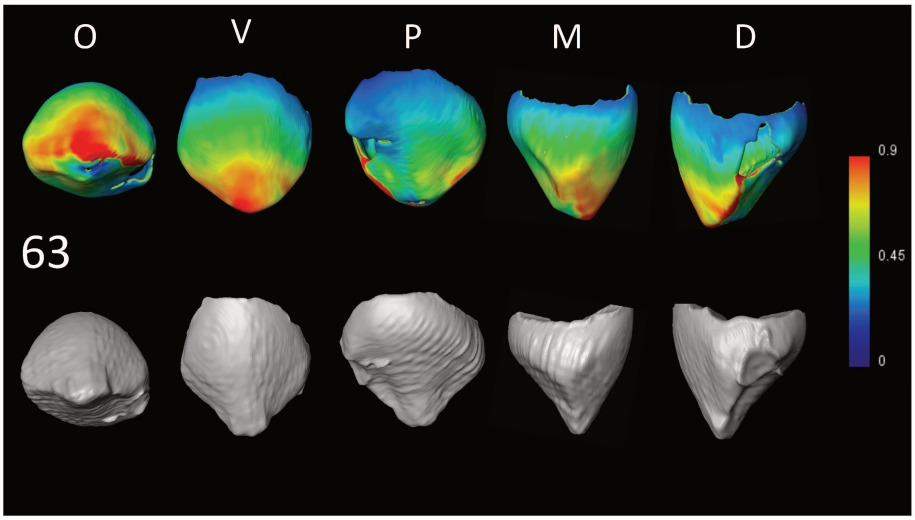
Dents déciduales :

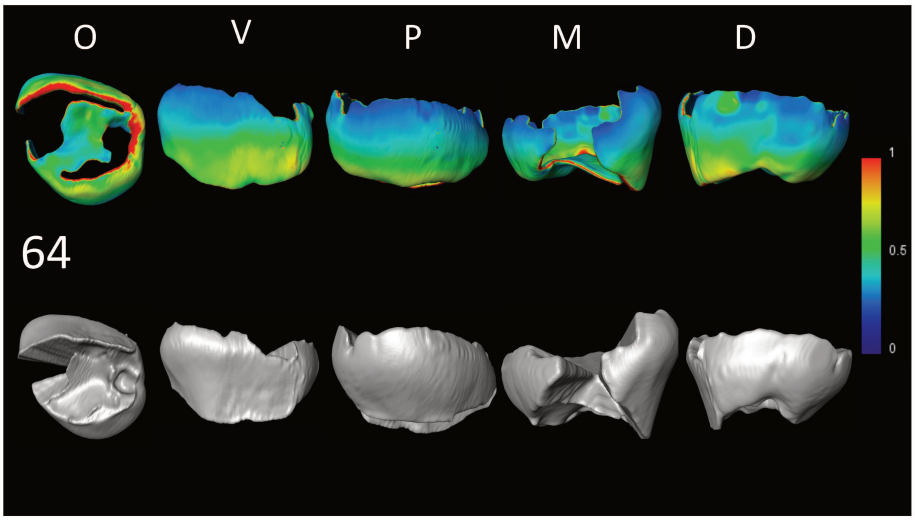
Secteur 5 :

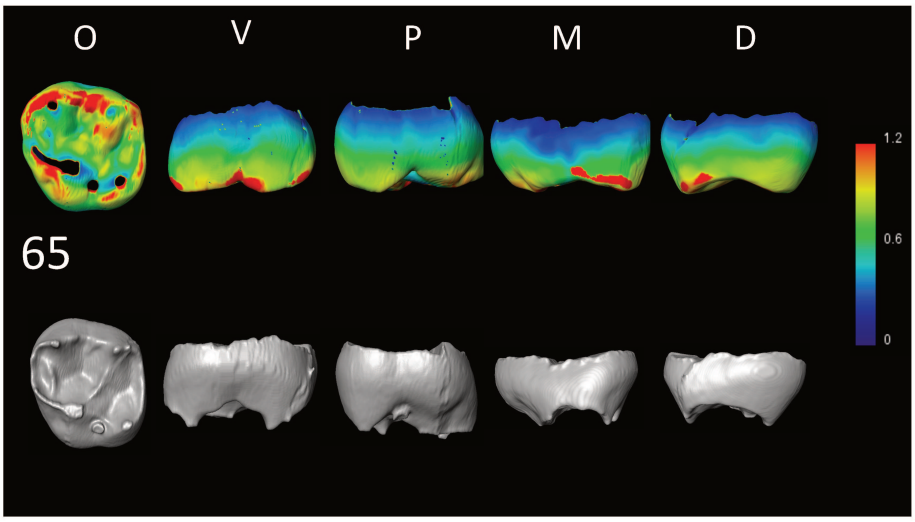




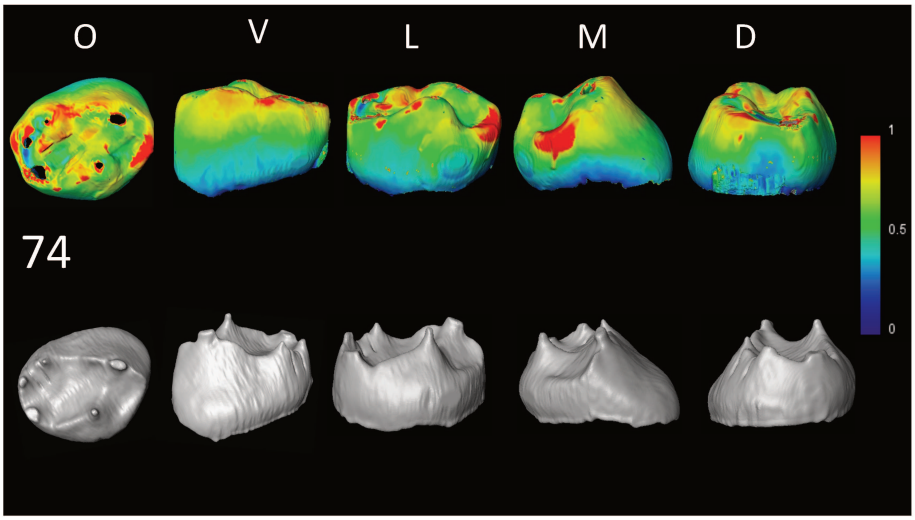
Secteur 6

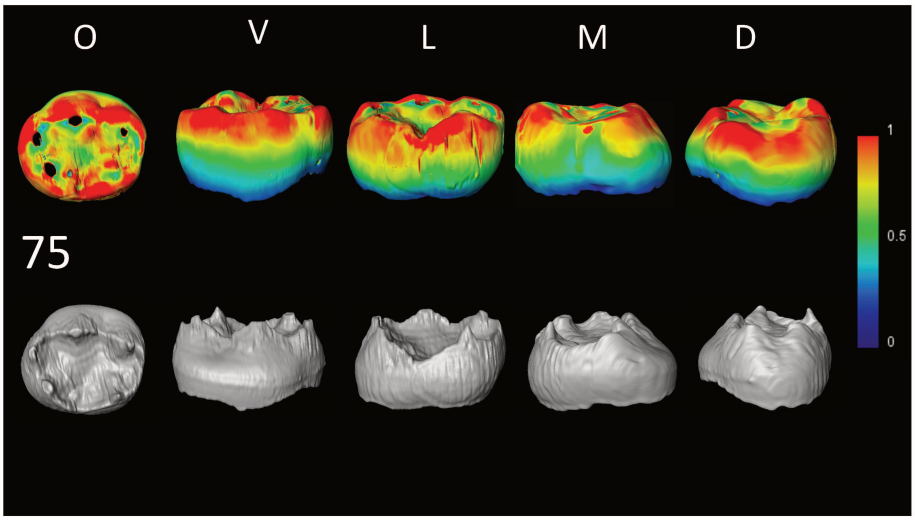




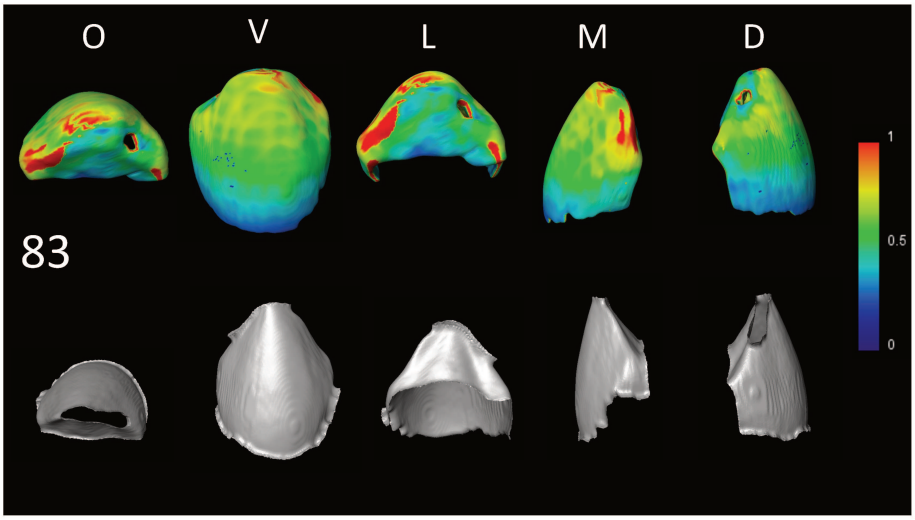


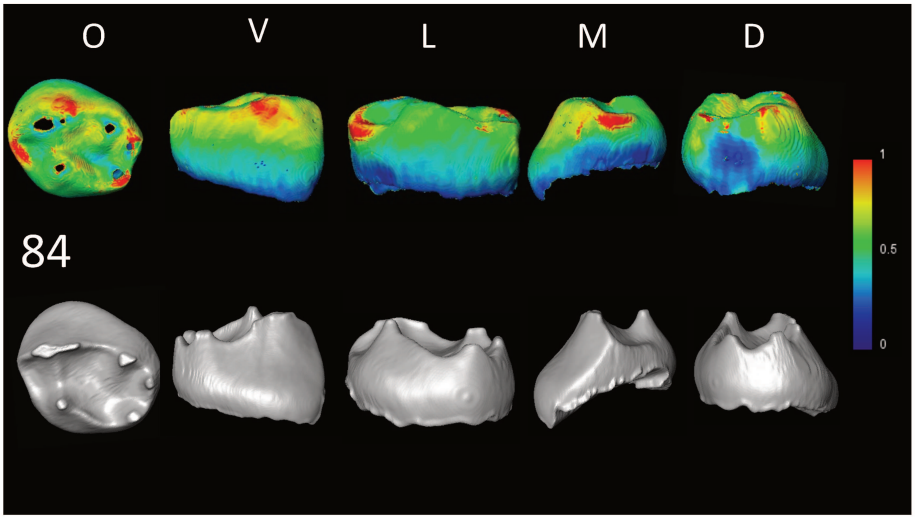
Secteur 7 :

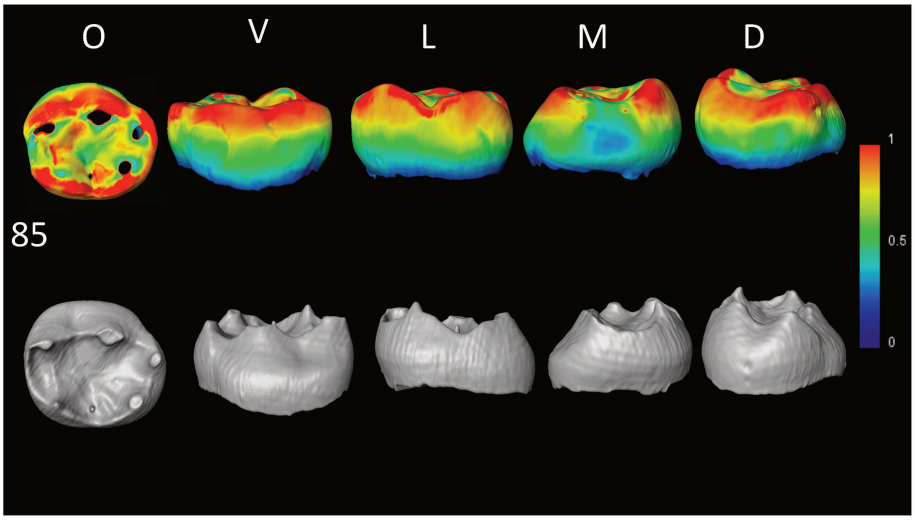




Secteur 8 :

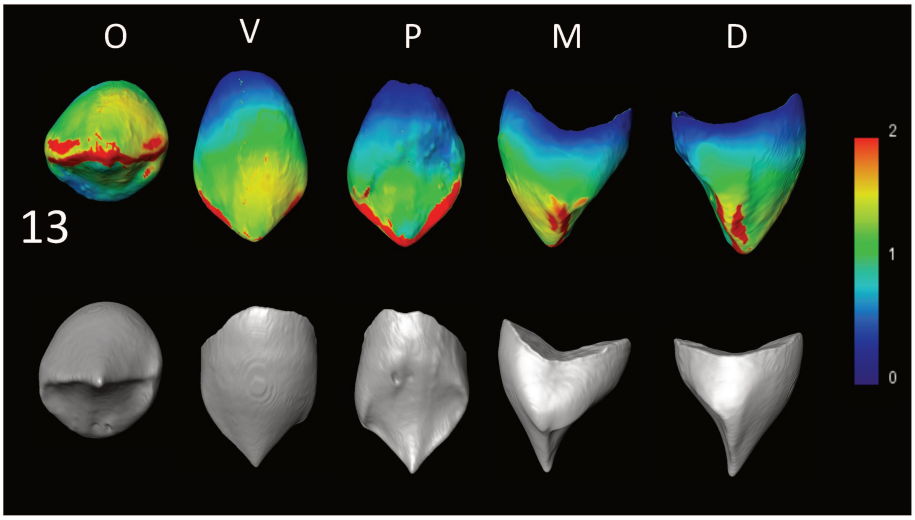


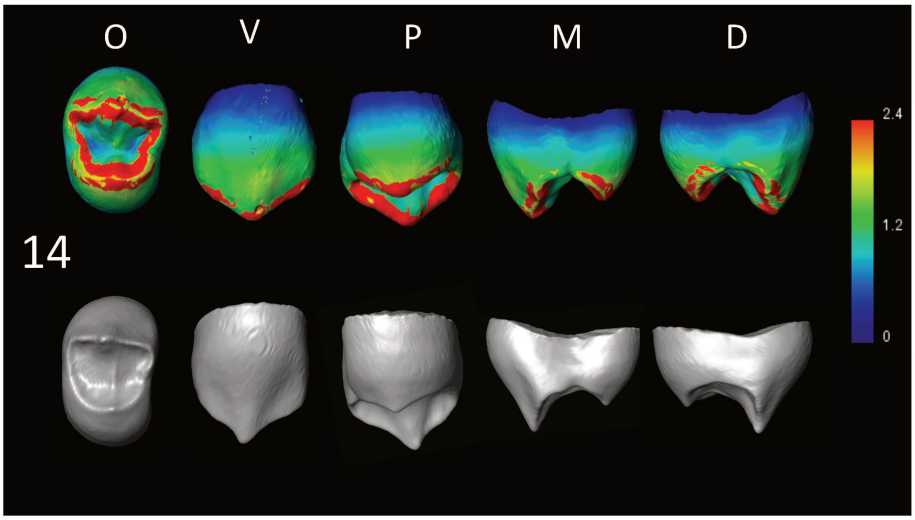

O
V
L
M
D
84
1
0.5
0

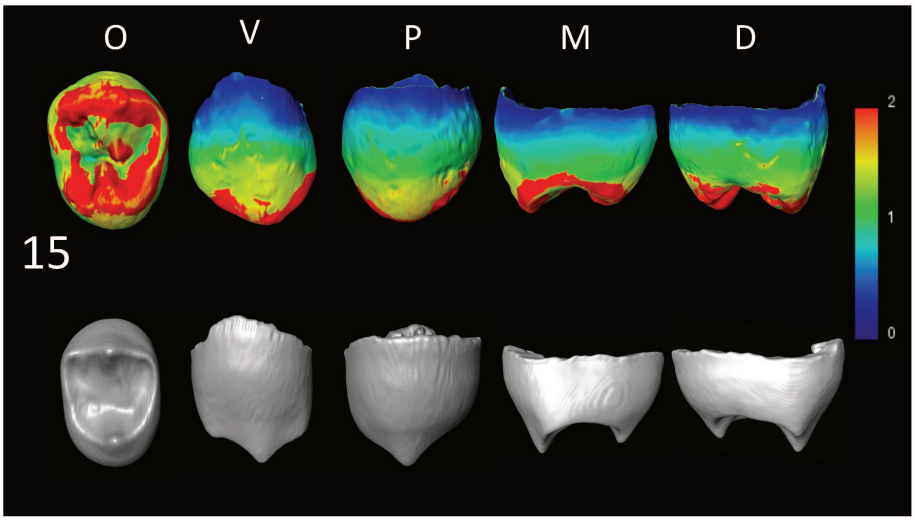

O
V
L
M
D
85
1
0.5
0

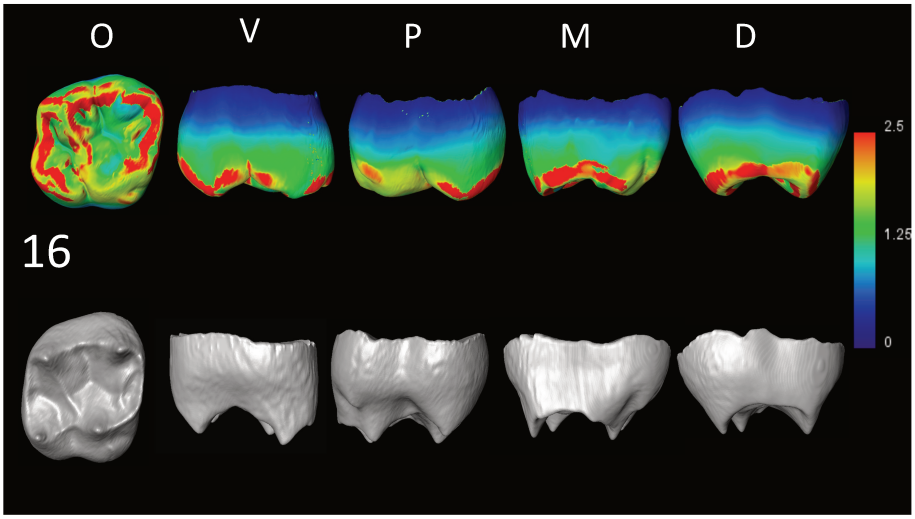
Dents définitives :

Secteur 1 :

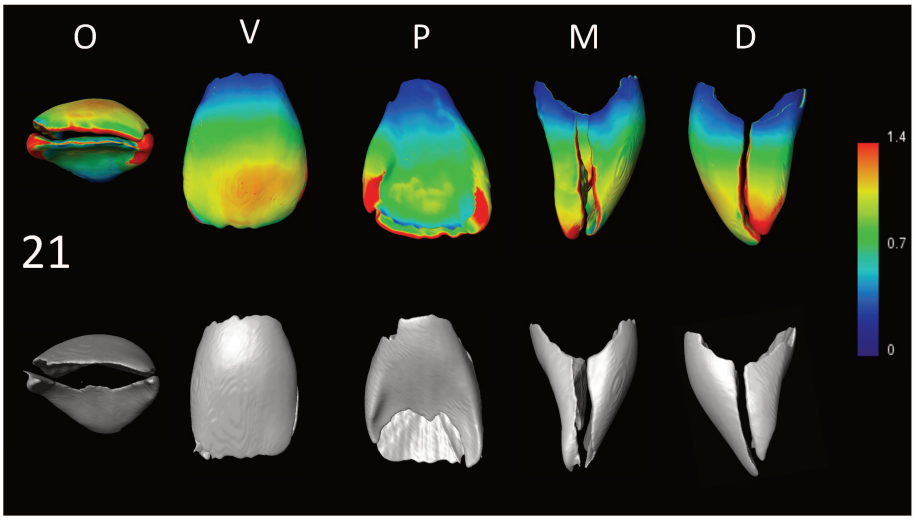


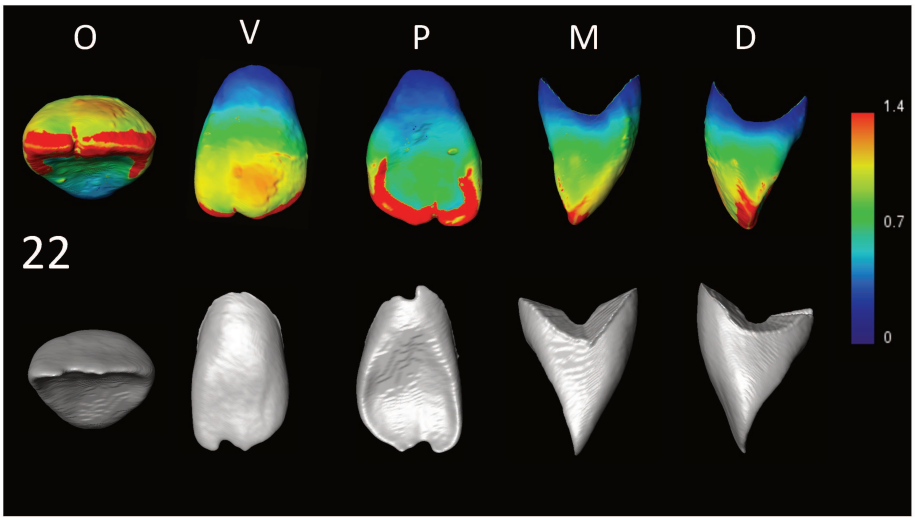


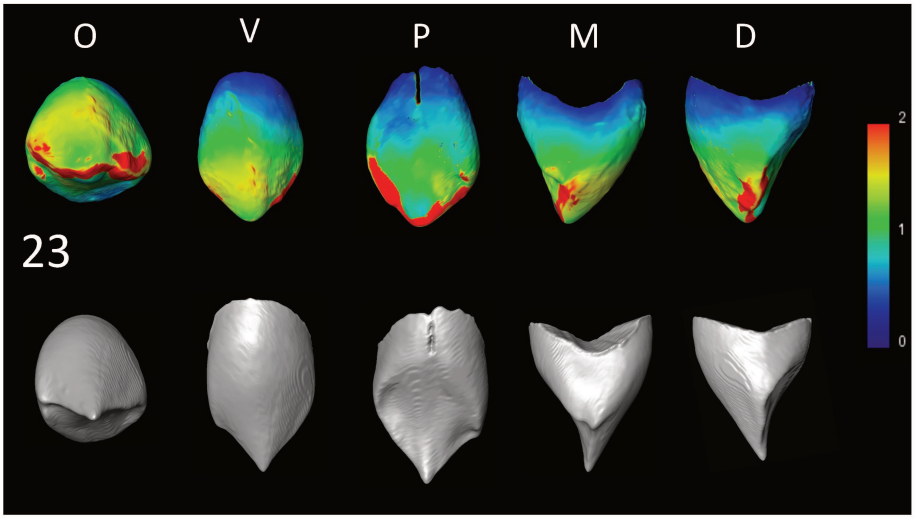


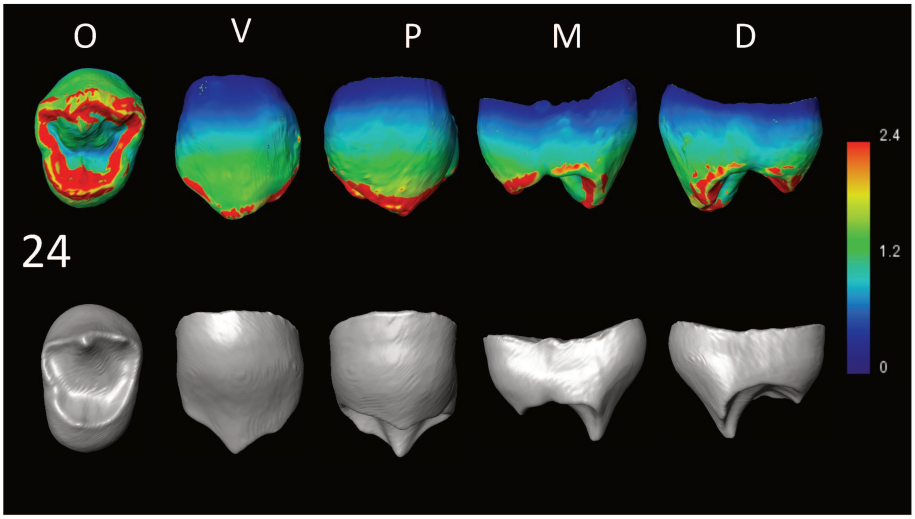

O
V
P
M
D
16
2.5
1.25
0

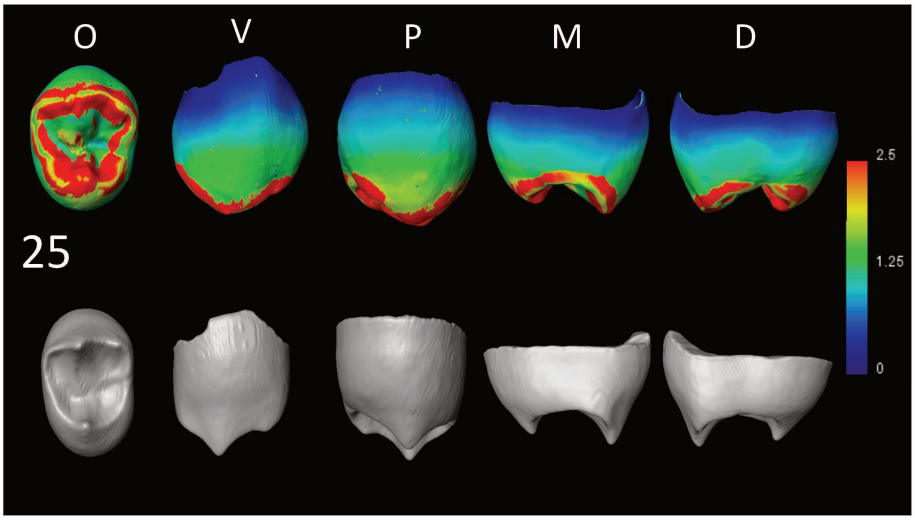
Secteur 2 :

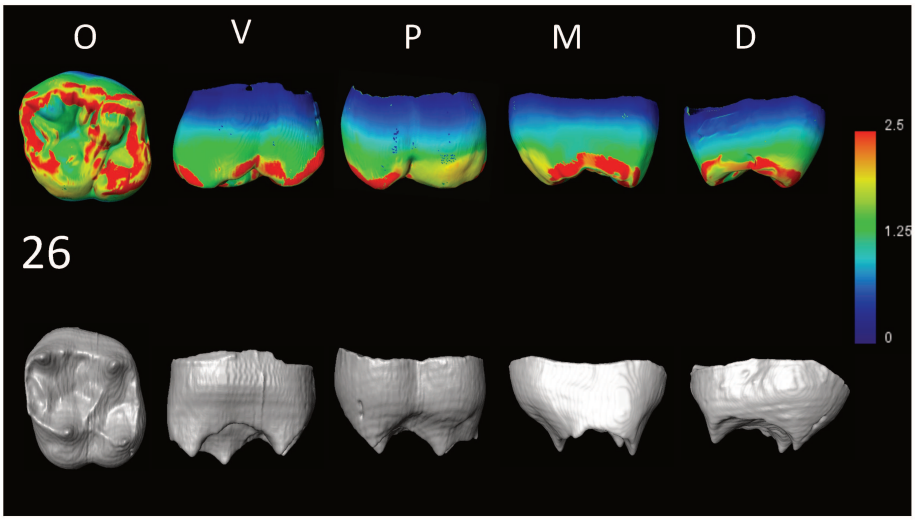




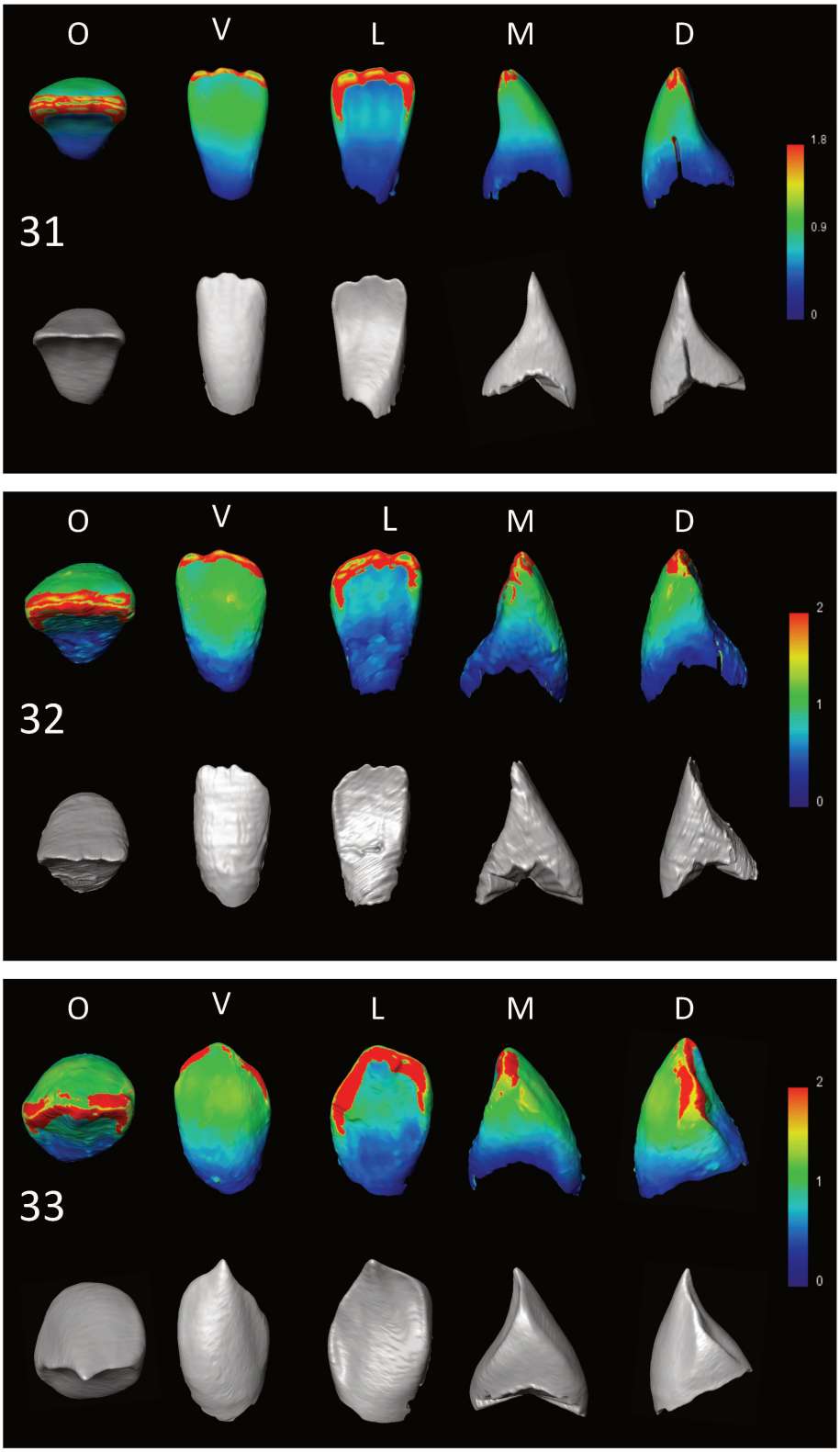


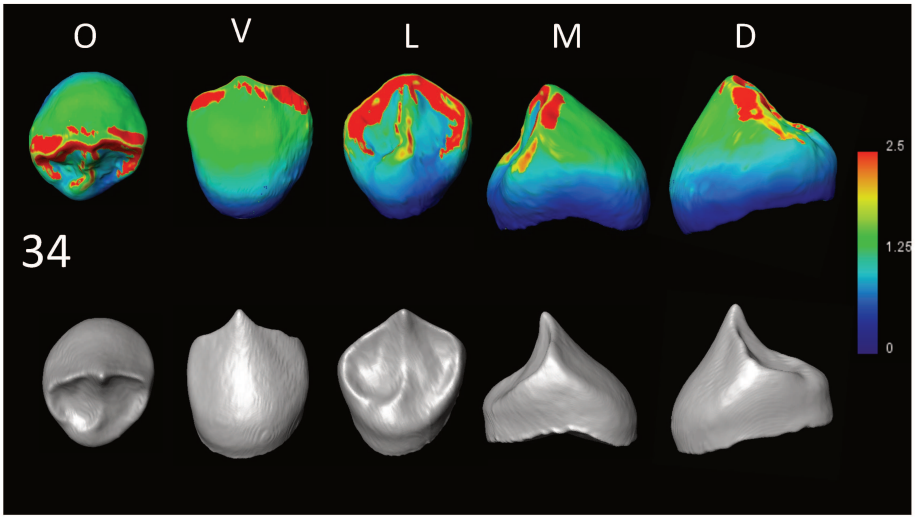

O
V
P
M
D
24
2.4
1.2
0

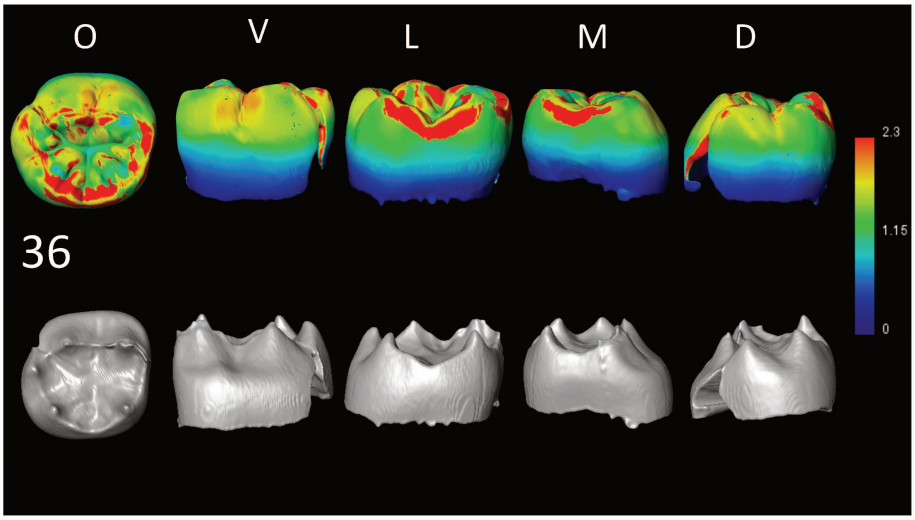

O
V
P
M
D
25
2.5
1.25
0


O
V
P
M
D
26
2.5
1.25
0

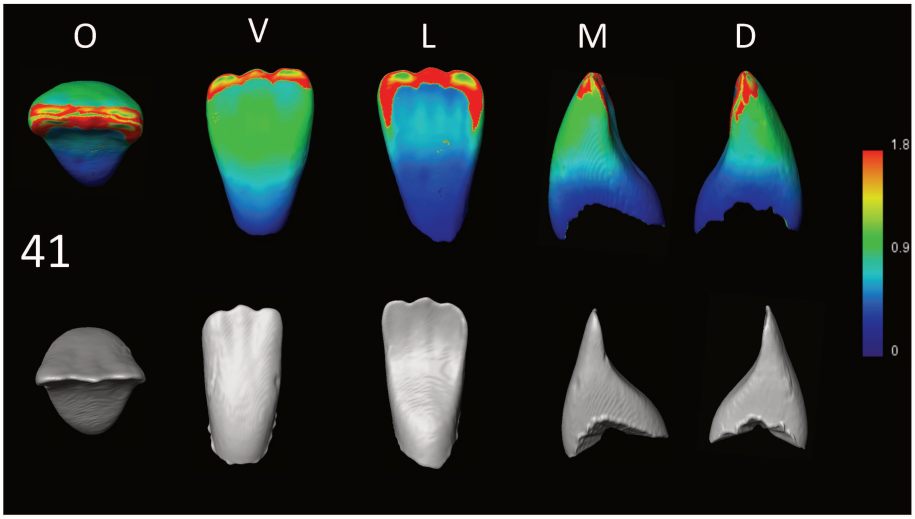
Secteur 3 :

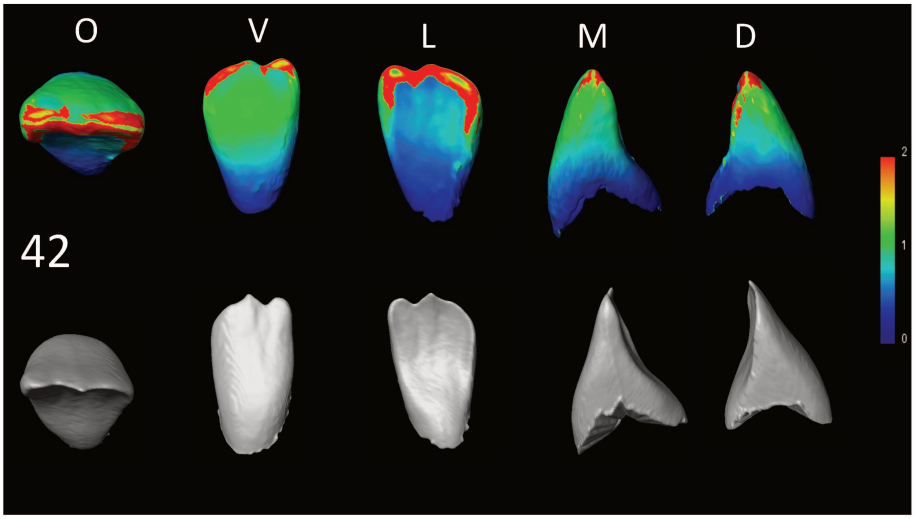


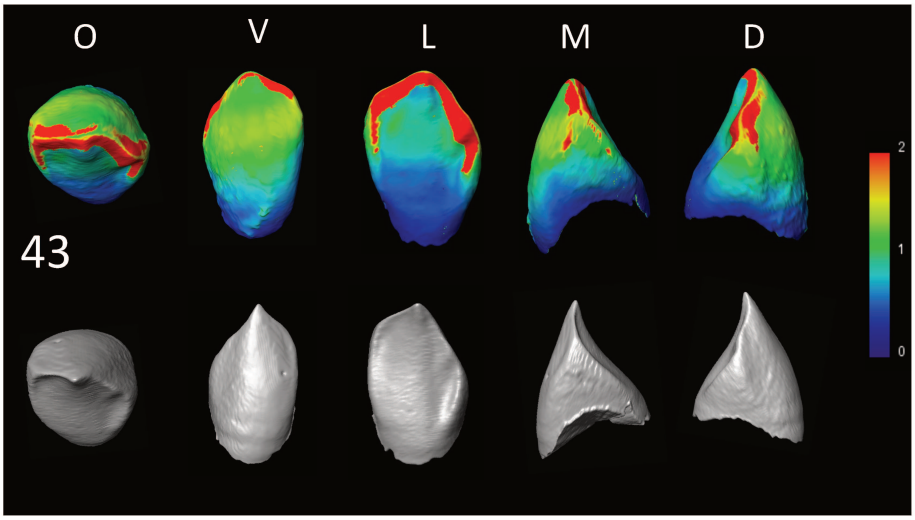


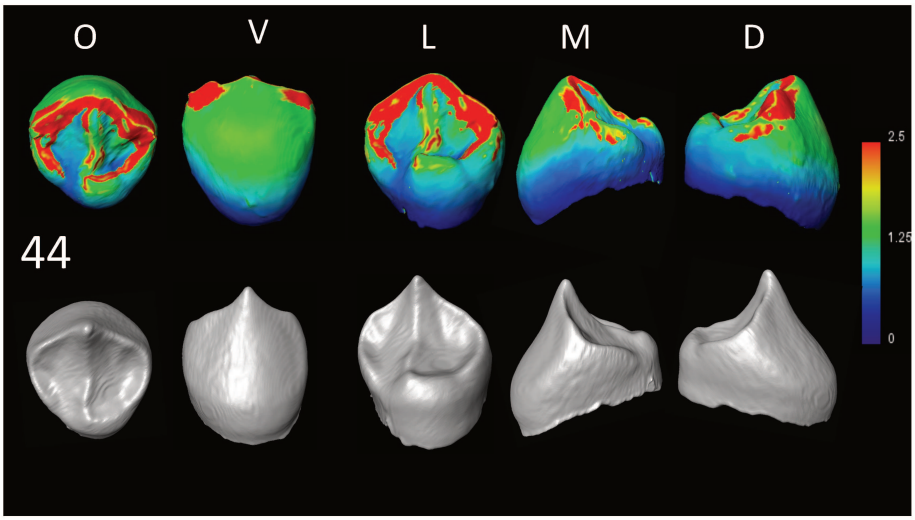


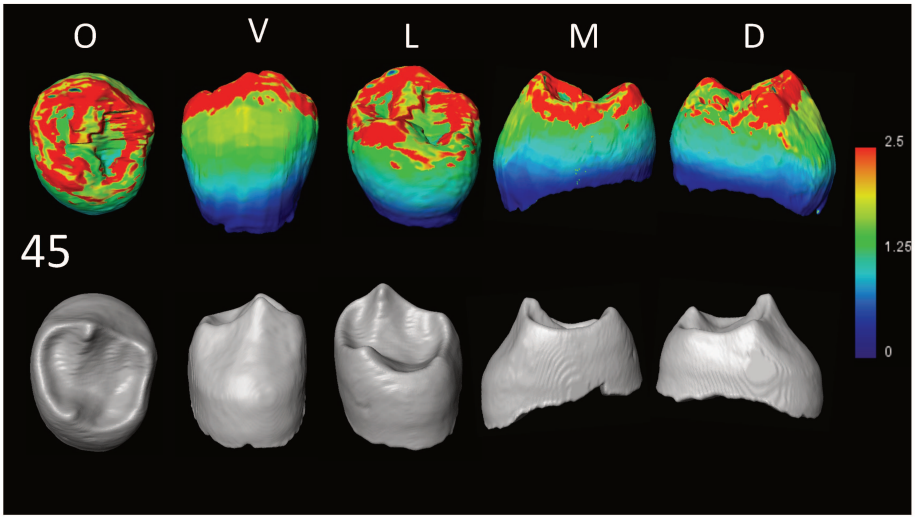
Secteur 4 :

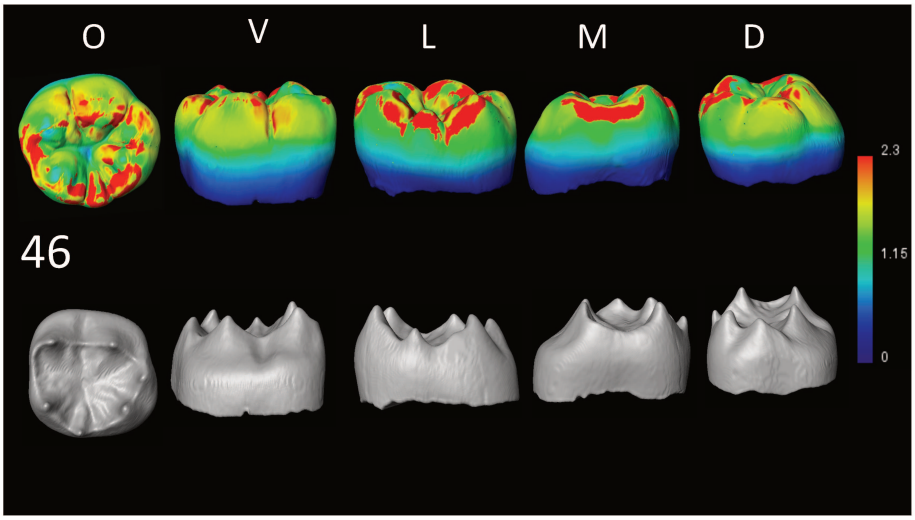



O
V
L
M
D
42
2
1
0


O
V
L
M
D
43
2
1
0


O
V
L
M
D
44
2.5
1.25
0

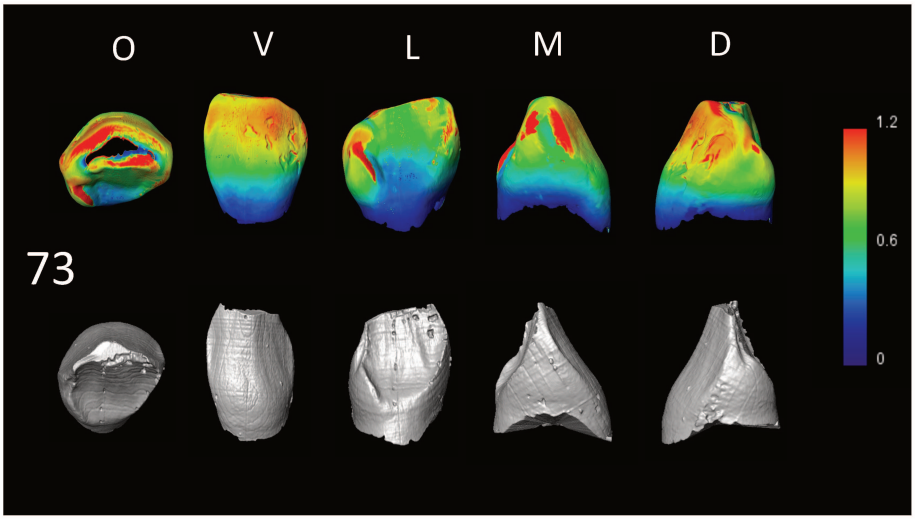

O
V
L
M
D
45
2.5
1.25
0


O
V
L
M
D
46
2.3
1.15
0

Hortus II/III :

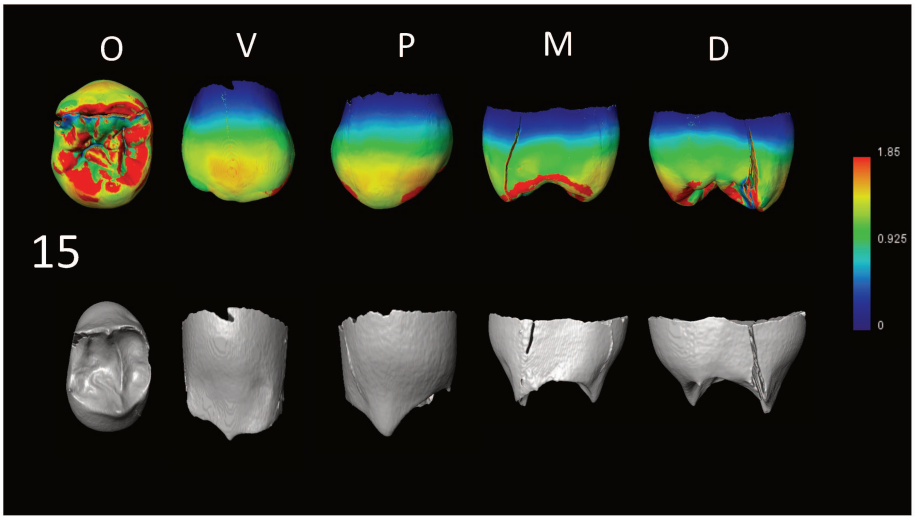
Dent déciduale :

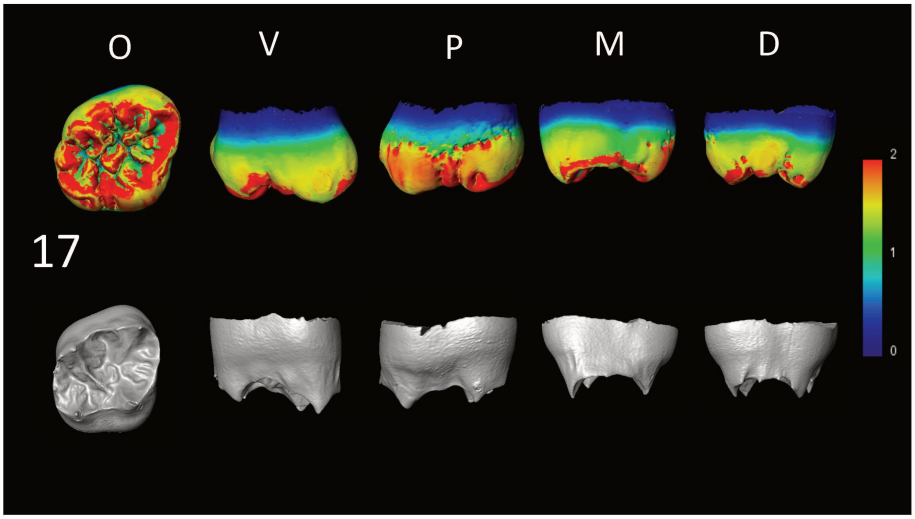
Secteur 7 :



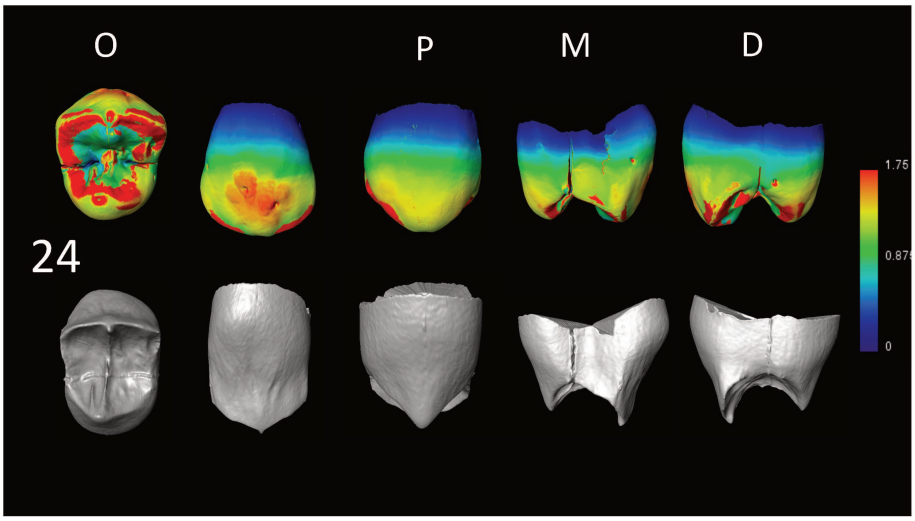
Dents définitives :

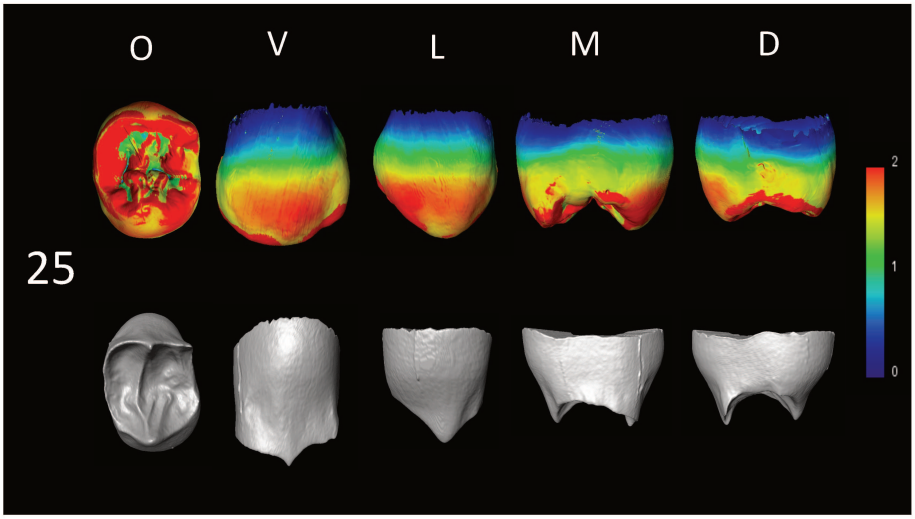
Secteur 1 :



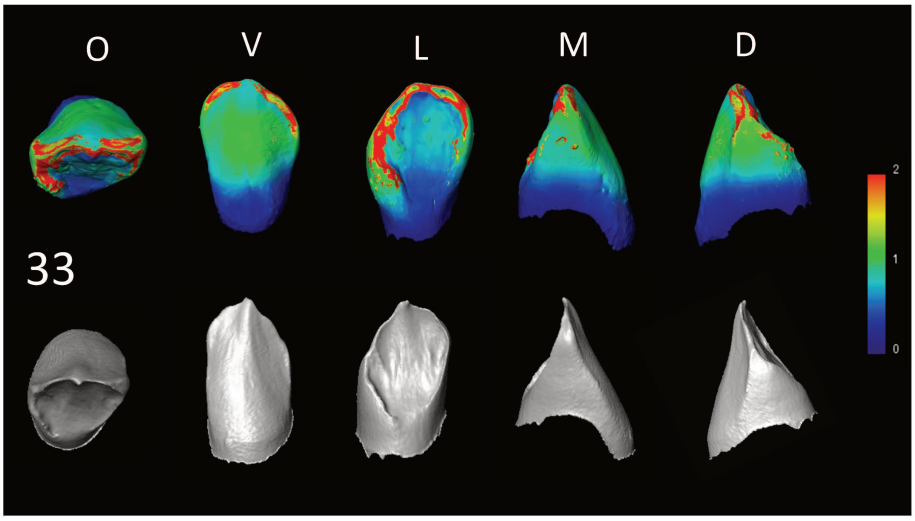


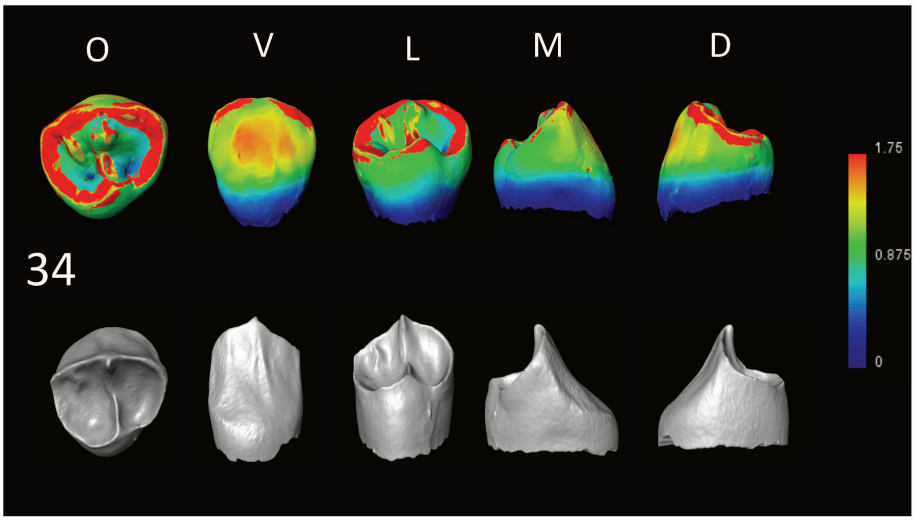
Secteur 2 :

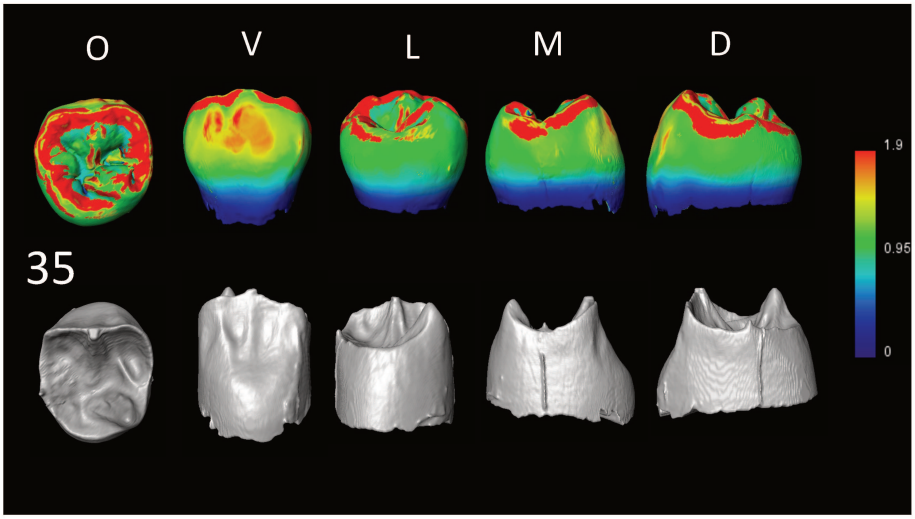




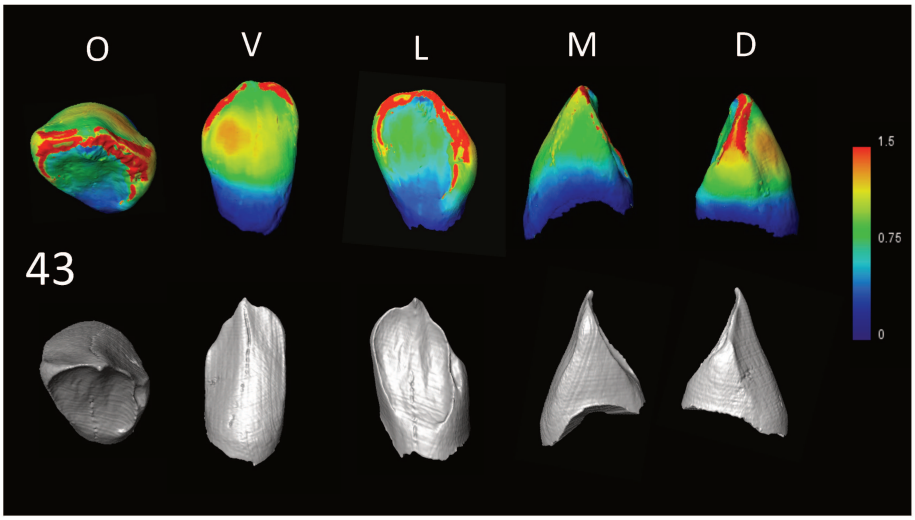
Secteur 3 :

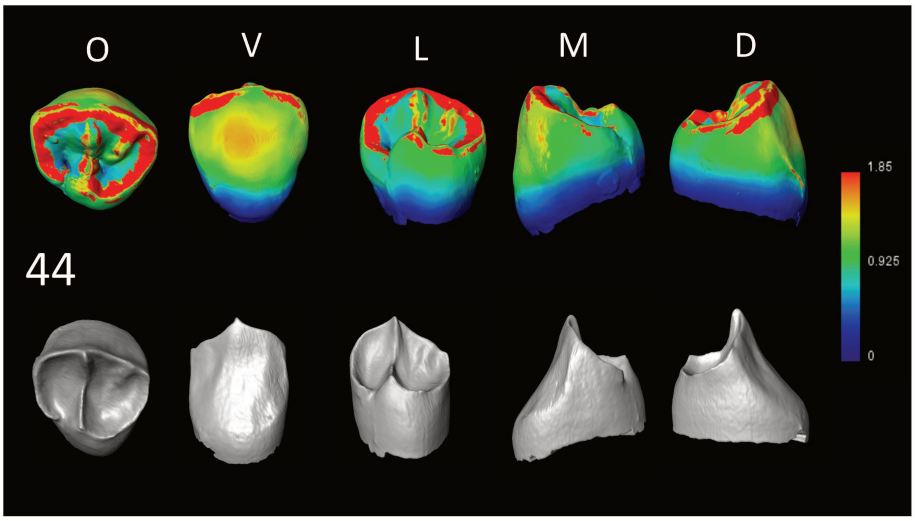


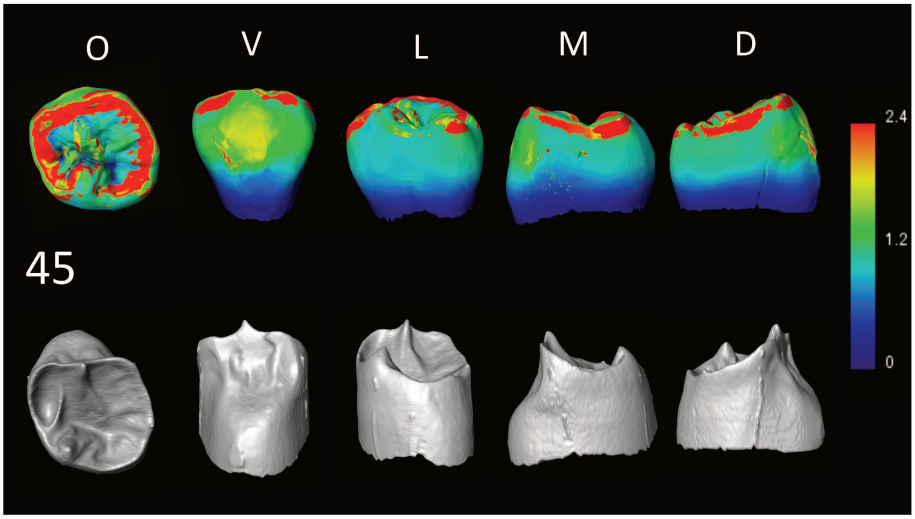




Secteur 4 :







Bibliographie :

1. Scott GR, Turner CG. Dental Anthropology. Annu Rev Anthropol 1988;17:99-126.
2. Dental Anthropology. by Brothwell, D.R. (ed.): (1963) | Hermann L. Strack [Internet]. [cité 2022 nov 8];Available from: https://www.abebooks.com/Dental-Anthropology-Brothwell-D.R-ed/30020537401/bd
3. Greenberg JH, Turner CG, Zegura SL, Campbell L, Fox JA, Laughlin WS, et al. The Settlement of the Americas: A Comparison of the Linguistic, Dental, and Genetic Evidence [and Comments and Reply]. Curr Anthropol 1986;27(5):477-97.
4. Macchiarelli R. Prehistoric "fish-eaters" along the eastern Arabian coasts: Dental variation, morphology, and oral health in the Ra's al-Hamra community (Qurum, Sultanate of Oman, 5th–4th millennia BC). Am J Phys Anthropol 1989;78(4):575-94.
5. Kerr NW. The prevalence and natural history of periodontal disease in Britain from prehistoric to modern times. Br Dent J 1998;185(10):527-35.
6. Pietrusewsky M. The anthropology of modern human teeth: Dental morphology and its variation in recent human populations. Am J Phys Anthropol 1998;106(1):101-3.
7. Scott GR. Dental Anthropology [Internet]. In: Smith C, éditeur. Encyclopedia of Global Archaeology. Cham: Springer International Publishing; 2017 [cité 2022 nov 8]. page 1-8.Available from: https://doi.org/10.1007/978-3-319-51726-1_138-2
8. Mazurier A, Macchiarelli R. Anterior Deciduous dentition in Neanderthals: topographic variation in enamel thickness and inner structural morphology. Bull Mem Soc Anthr Paris 2005;17(3-4):280.
9. Bayle P, Braga J, Mazurier A, Macchiarelli R. Brief communication: High-resolution assessment of the dental developmental pattern and characterization of tooth tissue proportions in the late Upper Paleolithic child from La Madeleine, France. Am J Phys Anthropol 2009;138(4):493-8.
10. Hillson S. Dental Anthropology [Internet]. Cambridge: Cambridge University Press; 1996 [cité 2022 oct 31]. Available from: https://www.cambridge.org/core/books/dental-anthropology/5AE1FF83354B4C33BEDCE0327558B97F
11. Slon V, Hopfe C, Weiß CL, Mafessoni F, de la Rasilla M, Lalueza-Fox C, et al. Neandertal and Denisovan DNA from Pleistocene sediments. Science 2017;356(6338):605-8.
12. Macchiarelli R, Mazurier A, Volpato V. L'apport des nouvelles technologies à l'étude des Néandertaliens. Néandertaliens Biol Cult 2015;169-79.
13. Becam G. Variation exo- et endostructurale des dents permanentes humaines du maxillaire et de la mandibule: singularité des premiers et des derniers Néandertaliens et Hommes modernes. :427.
14. Yokoyama Y, Falguères C, Lumley MA. Direct dating of a Qafzeh Proto-Cro-Magnon skull by non destructive gamma-ray spectrometry. Comptes Rendus - Acad Sci Ser II Sci Terre Planetes 1997;324:773-9.
15. Restes crâniens de l'enfant moustérien homo 4 de Qafzeh (Israël), la mandibule et les maxillaires - Persée [Internet]. [cité 2022 sept 25];Available from: https://www.persee.fr/doc/paleo_0153-9345_1979_num_5_1_4240
16. Ramirez Rozzi F. Âge au décès de l'enfant néandertalien de l'Hortus. Bull Mém Société D'Anthropologie Paris BMSAP 2005;17(1-2):47-55.
17. Spradley JP, Pampush JD, Morse PE, Kay RF. Smooth operator: The effects of different 3D mesh retriangulation protocols on the computation of Dirichlet normal energy. Am J Phys Anthropol 2017;163(1):94-109.
18. Boyer DM. Relief index of second mandibular molars is a correlate of diet among

prosimian primates and other euarchontan mammals. J Hum Evol 2008;55(6):1118-37.
19. Kupczik K, Hublin JJ. Mandibular molar root morphology in Neanderthals and Late Pleistocene and recent Homo sapiens. J Hum Evol 2010;59(5):525.
20. Le Cabec A. Anterior dental loading and root morphology in Neanderthals [Internet]. 2013 [cité 2022 oct 31];Available from: http://thesesups.ups-tlse.fr/1936/
21. Benazzi S, Panetta D, Fornai C, Toussaint M, Gruppioni G, Hublin JJ. Technical Note: Guidelines for the digital computation of 2D and 3D enamel thickness in hominoid teeth. Am J Phys Anthropol 2014;153(2):305-13.
22. Martin L. Significance of enamel thickness in hominoid evolution. Nature 1985;314(6008):260-3.
23. Blumberg JE, Hylander WL, Goepp RA. Taurodontism: a biometric study. Am J Phys Anthropol 1971;34(2):243-55.
24. Mena CA. Taurodontism. Oral Surg Oral Med Oral Pathol 1971;32(5):812-23.
25. Grine F, Klein R. Pleistocene and Holocene human remains from Equus Cave, South Africa. Anthropology 1985;8:55-98.
26. Constant DA, Grine FE. A review of taurodontism with new data on indigenous southern African populations. Arch Oral Biol 2001;46(11):1021-9.
27. Jafarzadeh H, Azarpazhooh A, Mayhall JT. Taurodontism: a review of the condition and endodontic treatment challenges. Int Endod J 2008;41(5):375-88.
28. Benazzi S, Nguyen HN, Kullmer O, Hublin JJ. Exploring the biomechanics of taurodontism. J Anat 2015;226(2):180-8.
29. Olejniczak AJ, Smith TM, Skinner MM, Grine FE, Feeney RNM, Thackeray JF, et al. Three-dimensional molar enamel distribution and thickness in Australopithecus and Paranthropus. Biol Lett 2008;4(4):406-10.
30. Macho GA, Thackeray JF. Computed tomography and enamel thickness of maxillary molars of Plio-Pleistocene hominids from Sterkfontein, Swartkrans, and Kromdraai (South Africa): An exploratory study. Am J Phys Anthropol 1992;89(2):133-43.
31. Kono RT. Molar enamel thickness and distribution patterns in extant great apes and humans: New insights based on a 3-dimensional whole crown perspective. Anthropol Sci 2004;112(2):121-46.
32. Smith TM, Olejniczak AJ, Martin LB, Reid DJ. Variation in hominoid molar enamel thickness. J Hum Evol 2005;48(6):575-92.
33. Pampush JD, Duque AC, Burrows BR, Daegling DJ, Kenney WF, McGraw WS. Homoplasy and thick enamel in primates. J Hum Evol 2013;64(3):216-24.
34. Puech PF, Pinilla B. Dental Microwear and Diet As Indicators of Geographic and Cultural Contexts in Human Evolution. Hum Evol 2014;29(1-3):103-23.
35. Constantino PJ, Lucas PW, Lee JJW, Lawn BR. The influence of fallback foods on great ape tooth enamel. Am J Phys Anthropol 2009;140(4):653-60.
36. Zilberman U, Smith P. A comparison of tooth structure in Neanderthals and early Homo sapiens sapiens: a radiographic study. J Anat 1992;180(Pt 3):387-93.
37. Macchiarelli R, Bondioli L, Debénath A, Mazurier A, Tournepiche JF, Birch W, et al. How Neanderthal molar teeth grew. Nature 2006;444(7120):748-51.
38. MacChiarelli R, Bondioli L, Mazurier A. Virtual dentitions: touching the hidden evidence [Internet]. In: Nelson GC, Irish JD, éditeurs. Technique and Application in Dental Anthropology. Cambridge: Cambridge University Press; 2008 [cité 2022 nov 3]. page 426-48.Available from: https://www.cambridge.org/core/books/technique-and-application-in-dental-anthropology/virtual-dentitions-touching-the-hidden-evidence/AC57D066F3E14CB2B8986118FADF5810
39. Olejniczak AJ, Smith TM, Feeney RNM, Macchiarelli R, Mazurier A, Bondioli L, et al. Dental tissue proportions and enamel thickness in Neandertal and modern human molars. J

Hum Evol 2008;55(1):12-23.
40. Le Luyer M. La réduction des dents humaines à la transition Pléistocène-Holocène dans le sud-ouest de la France : réévaluation et apports de l'analyse de la structure interne par imagerie 3D. 2018;numéro spécial:77-86.
41. Hotton D. Analyse phénotypique comparative des cellules dentaires et osseuses. :174.
42. Hellman M. Racial Characters in Human Dentition Part I. A Racial Distribution of the Dryopithecus Pattern and Its Modifications in the Lower Molar Teeth of Man. Proc Am Philos Soc 1928;67(2):157-74.
43. (PDF) Scoring procedures for key morphological traits of the permanent dentition: the Arizona State University Dental Anthropology System [Internet]. [cité 2022 nov 17];Available from: https://www.researchgate.net/publication/263046755_Scoring_procedures_for_key_morphological_traits_of_the_permanent_dentition_the_Arizona_State_University_Dental_Anthropology_System
44. Martinón-Torres M, Bermúdez de Castro JM, Gómez-Robles A, Prado-Simón L, Arsuaga JL. Morphological description and comparison of the dental remains from Atapuerca-Sima de los Huesos site (Spain). J Hum Evol 2012;62(1):7-58.
45. Martínez de Pinillos M, Martinón-Torres M, Skinner MM, Arsuaga JL, Gracia-Téllez A, Martínez I, et al. Trigonid crests expression in Atapuerca-Sima de los Huesos lower molars: Internal and external morphological expression and evolutionary inferences. Comptes Rendus Palevol 2014;13(3):205-21.
46. Ortiz A, Skinner MM, Bailey SE, Hublin JJ. Carabelli's trait revisited: An examination of mesiolingual features at the enamel–dentine junction and enamel surface of Pan and Homo sapiens upper molars. J Hum Evol 2012;63(4):586-96.
47. Bailey SE, Hublin JJ. Dental remains from the Grotte du Renne at Arcy-sur-Cure (Yonne). J Hum Evol 2006;50(5):485-508.
48. Bailey S, Glantz M, Weaver TD, Viola B. The affinity of the dental remains from Obi-Rakhmat Grotto, Uzbekistan. J Hum Evol 2008;55(2):238-48.
49. Martinón-Torres M, Martínez de Pinillos M, Skinner MM, Martín-Francés L, Gracia-Téllez A, Martínez I, et al. Talonid crests expression at the enamel–dentine junction of hominin lower permanent and deciduous molars. Comptes Rendus Palevol 2014;13(3):223-34.
50. Mitteroecker P, Gunz P. Advances in Geometric Morphometrics. Evol Biol 2009;36(2):235-47.
51. Weber GW, Bookstein FL, Strait DS. Virtual anthropology meets biomechanics. J Biomech 2011;44(8):1429-32.
52. Schour I, Massler M. Studies In Tooth Development: The Growth Pattern Of Human Teeth Part II. J Am Dent Assoc 1940;27(12):1918-31.
53. AlQahtani SJ, Hector MP, Liversidge HM. Brief communication: The London atlas of human tooth development and eruption. Am J Phys Anthropol 2010;142(3):481-90.
54. Demirjian A. Dentition [Internet]. In: Falkner F, Tanner JM, éditeurs. Postnatal Growth Neurobiology. Boston, MA: Springer US; 1986 [cité 2022 nov 3]. page 269-98.Available from: http://link.springer.com/10.1007/978-1-4899-0522-2_12
55. Moorrees CF, Fanning EA, Hunt EE. FORMATION AND RESORPTION OF THREE DECIDUOUS TEETH IN CHILDREN. Am J Phys Anthropol 1963;21(2):205-13.
56. Moorrees CF, Fanning EA, Hunt EE. AGE VARIATION OF FORMATION STAGES FOR TEN PERMANENT TEETH. J Dent Res 1963;42:1490-502.
57. Liversidge H m., Molleson T. Variation in crown and root formation and eruption of human deciduous teeth. Am J Phys Anthropol 2004;123(2):172-80.
58. Reventlid M, Mörnstad H, Teivens AA. Intra- and inter-examiner variations in four

dental methods for age estimation of children. Swed Dent J 1996;20(4):133-9.
59. Cornfield J. Bayes Theorem. Rev Inst Int Stat Rev Int Stat Inst 1967;35(1):34.
60. Quézel-Ambrunaz C. Théorème de Bayes et responsabilité civile [Internet]. 2014 [cité 2022 nov 15]. Available from: https://halshs.archives-ouvertes.fr/halshs-03438853
61. Berdoulay V. Perspectives Bayésiennes En Géographie. Espace Géographique 1973;2(4):303-12.
62. Tremblay M, Schmitt A, Saliba-Serre B, Martrille L. Utilisation du théorème de Bayes pour estimer l'âge au décès d'adultes [Internet]. 2009 [cité 2022 nov 15]. Available from: https://hal.inria.fr/inria-00386644
63. Modesto-Mata M, García-González R, Quintino Y, García-Campos C, de Pinillos MM, Martín-Francés L, et al. Early and Middle Pleistocene hominins from Atapuerca (Spain) show differences in dental developmental patterns. Am J Biol Anthropol 2022;178(2):273-85.
64. Lucy D, Aykroyd RG, Pollard AM, Solheim T. A Bayesian Approach to Adult Human Age Estimation from Dental Observations by Johanson's Age Changes. J Forensic Sci 1996;41(2):15411J.
65. Bayle P, Braga J, Mazurier A, Macchiarelli R. Dental developmental pattern of the Neanderthal child from Roc de Marsal: a high-resolution 3D analysis. J Hum Evol 2009;56(1):66-75.
66. Foti B, Adalian P, Lalys L, Chaillet N, Leonetti G, Dutour O. Approche probabiliste de l'estimation de l'âge chez l'enfant à partir de la maturation dentaire. C R Biol 2003;326(4):441-8.
67. Buchet L, Caussinus H, Courgeau D, Séguy I. Estimation de l'âge en l'absence d'état civil: une nouvelle méthode bayésienne et son application à la paléodémographie. :8.
68. Smith TM, Tafforeau P, Reid DJ, Pouech J, Lazzari V, Zermeno JP, et al. Dental evidence for ontogenetic differences between modern humans and Neanderthals. Proc Natl Acad Sci U S A 2010;107(49):20923-8.
69. Dean MC. Retrieving chronological age from dental remains of early fossil hominins to reconstruct human growth in the past. Philos Trans R Soc B Biol Sci 2010;365(1556):3397-410.

Tables des illustrations :

Figure 1 Planche développementale de l'enfant du moustérien QAFZEH 4 (illustration personnelle) 18
Figure 2 Planche développementale de l'enfant néanderthalien : HORTUS II/III (illustration personnelle) 20
Figure 3 Attachement des ortho slices xy, xz et yz aux coupes effectuées par microCT de la mandibule de Q4 (illustration personnelle) 22
Figure 4 Création de la boite avec l'outil « Extract Subvolume » pour la canine maxillaire droite (13) de l'individu Q4 (illustration personnelle). 23
Figure 5 Les coupes microCT dans les trois plans de l'espace (illustration personnelle). 24
Figure 6 Attribution des labels pour la segmentation automatique (illustration personnelle). 24
Figure 7 Module Tools composé des différents outils (illustration personnelle) 25
Figure 8 Sélection de l'émail (illustration personnelle). 26
Figure 9 Sélection des trois tissus de la dent avec les différents labels (illustration personnelle) 27
Figure 10 Canine maxillaire droite de Q4 après segmentation automatique (illustration personnelle) 28
Figure 11 Retouche à effectuer sur la dentine radiculaire (illustration personnelle) 29
Figure 12 Exemple de correction manuelle durant le traitement de la segmentation automatique de la 13 de l'individu Q4 (illustration personnelle) 30
Figure 13 Canine maxillaire droite après correction manuelle de la segmentation automatique du logiciel Avizo® (illustration personnelle) 31
Figure 14 Exemple d'utilisation du module « fill hole » pour fermer la surface amélaire et isoler la couronne de la racine (illustration personnelle) 32
Figure 15 Création des labels pour chaque tissu à analyser (illustration personnelle) 33
Figure 16 Tissus isolés dans leur label respectif (illustration personnelle) 33
Figure 17 Tableau de statistique du volume et de l'air calculé grâce à l'outil « *Surface area volume* » (illustration personnelle) 34
Figure 18 Exemple utilisation du module « *arithmetic* » (illustration personnelle) 34
Figure 19 Représentation 3D de la JED la 13 36
Figure 20 Arbre de l'obtention de l'EDJ (illustration personnelle) 36
Figure 21 Colormaps de la 13 de Q4 (illustration personnelle) 37
Figure 22 Mesures linéaires, surfaciques, volumétriques et proportions (%) des tissus des dents de l'enfant Qafzeh 4. 39
Figure 23 Mesures linéaires, surfaciques, volumétriques et proportions (%) des tissus des dents de l'enfant Hortus II/III. 40
Figure 24 Comparaison des volumes linéaires, surfaciques, volumétriques et proportions (%) des tissus des dents des enfants Qafzeh 4 et Hortus II/III. 41
Figure 25 Première molaire mandibulaire droite (46) du sujet Qafzeh 4 (illustration personnelle) 43
Figure 26 Deuxième molaire maxillaire droite (17) du sujet Hortus II/III (illustration personnelle) 43
Figure 27 Exemple de superposition Procruste sur des ailes de guêpe [40] 52
Figure 28 : Atlas de AlQhatani du développement et de l'éruption des dents chez l'Homme [53] 54
Figure 29 Planche développementale de l'individu Qafzeh 4 (illustration personnelle) 54
Figure 30 Planche développementale de l'individu Hortus II/III (illustration personnelle) 55
Figure 31 : Formule de Bayes 56

Thèse d'exercice : Chir. Dent. : Lille : Année [2022] –

Protocole de segmentation des tissus dentaires par microtomographie à RX, application sur les populations du passé / **Constance POLLET**. – p. 82 ; ill. 35 ; réf. 69

Domaines : Imagerie et radiologie ; Sciences Fondamentales (anatomie, anthropologie)

Mots clés Libres : Paléoanthropologie dentaire ; Homo sapiens ; Néandertal ; Segmentation des tissus dentaires ; Microtomographie RX

Résumé de la thèse

Ce travail de thèse est une étude paléoanthropologique dentaire consacrée à l'analyse de deux sujets juvéniles du genre *Homo.* L'un étant un *Homo sapiens* : l'individu Qafzeh 4, l'autre est un représentant des *Néandertaliens* : l'individu Hortus II/III.

Les progrès en matière d'imagerie médicale notamment grâce à la microtomographie à Rayon X ont permis une avancée de taille dans la recherche scientifique et notamment en paléoanthropologie dentaire. En effet, il est aujourd'hui possible d'analyser les arcades dentaires virtuellement sans léser les fossiles.

À partir des plans de coupes des fossiles, obtenus par microtomographie à Rayon X, nous avons segmenté et reconstitué virtuellement les couronnes dentaires de ces individus. Ces analyses nous ont livré des données macroscopiques et microscopiques venant enrichir la base de données des enfants des populations du passé.

JURY :
Président : M. Le Professeur Thomas Colard

Assesseurs : Mme le Docteur Mathilde Savignat
Mme le Docteur Sarah Toubla
M. le Docteur Thibault Bécavin