

UNIVERSITÉ DE LILLE
DEPARTEMENT FACULTAIRE UFR3S-ODONTOLOGIE

Année de soutenance : 2025

N°:

THÈSE POUR LE
DIPLÔME D'ÉTAT DE DOCTEUR EN CHIRURGIE DENTAIRE

Présentée et soutenue publiquement le 03 juin 2025

Par Anouk FORTIER

Étude microtomographique des restes dento-maxillaires retrouvés
dans la grotte d'Embullla (Corneilla-de-Conflent, Pyrénées Orientales,
France)

JURY

Président : Monsieur le Professeur Thomas COLARD

Assesseurs : Madame le Docteur Mathilde SAVIGNAT

Madame le Docteur Amélie DE BROUCKER

Monsieur le Docteur Jérôme VANDOMME



UNIVERSITÉ DE LILLE
DEPARTEMENT FACULTAIRE UFR3S-ODONTOLOGIE

Année de soutenance : 2025

N°:

THÈSE POUR LE
DIPLÔME D'ÉTAT DE DOCTEUR EN CHIRURGIE DENTAIRE

Présentée et soutenue publiquement le 03 juin 2025

Par Anouk FORTIER

Étude microtomographique des restes dento-maxillaires retrouvés
dans la grotte d'Embulla (Corneilla-de-Conflent, Pyrénées Orientales,
France)

JURY

Président : Monsieur le Professeur Thomas COLARD

Assesseurs : Madame le Docteur Mathilde SAVIGNAT

Madame le Docteur Amélie DE BROUCKER

Monsieur le Docteur Jérôme VANDOMME

Président de l'Université :	Pr. R. BORDET
Directrice Générale des Services de l'Université :	A.V. CHIRIS FABRE
Doyen UFR3S :	Pr. D. LACROIX
Directrice des Services d'Appui UFR3S :	A. PACAUD
Vice doyen département facultaire UFR3S-Odontologie :	Pr. C. DELFOSSE
Responsable des Services :	L. KORAÏCHI
Responsable de la Scolarité :	V. MAURIAUCOURT

PERSONNEL ENSEIGNANT DE LA FACULTE

PROFESSEUR DES UNIVERSITES EMERITE

E DEVEAUX	Département de Dentisterie Restauratrice Endodontie
-----------	---

PROFESSEURS DES UNIVERSITES

K. AGOSSA	Parodontologie
P. BOITELLE	Responsable du département de Prothèse
T. COLARD	Fonction-Dysfonction, Imagerie, Biomatériaux
C. DELFOSSE	Vice doyen du département facultaire UFR3S- Odontologie Odontologie Pédiatrique Responsable du département d'Orthopédie dento-faciale
L. ROBBERECHT	Responsable du Département de Dentisterie Restauratrice Endodontie

MAITRES DE CONFERENCES DES UNIVERSITES

T. BECAVIN	Fonction-Dysfonction, Imagerie, Biomatériaux
A. BLAIZOT	Prévention, Epidémiologie, Economie de la Santé, Odontologie Légale
F. BOSCHIN	Parodontologie
C. CATTEAU	Responsable du Département de Prévention, Epidémiologie, Economie de la Santé, Odontologie Légale.
X. COUTEL	Biologie Orale
A. de BROUCKER	Fonction-Dysfonction, Imagerie, Biomatériaux
M. DEHURTEVENT	Prothèses
C. DENIS	Prothèses
F. DESCAMP	Prothèses
M. DUBAR	Responsable du Département de Parodontologie
A. GAMBIEZ	Dentisterie Restauratrice Endodontie
F. GRAUX	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 - CHU Lille
C. OLEJNIK	Responsable du Département de Biologie Orale
H. PERSOON	Dentisterie Restauratrice Endodontie (maître de conférences des Universités associé)
P. ROCHER	Fonction-Dysfonction, Imagerie, Biomatériaux
M. SAVIGNAT	Responsable du Département de Fonction-Dysfonction, Imagerie, Biomatériaux
T. TRENTESAUX	Responsable du Département d'Odontologie Pédiatrique
J. VANDOMME	Prothèses
R. WAKAM KOUAM	Prothèses

PRATICIEN HOSPITALIER et UNIVERSITAIRE

M. BEDEZ	Biologie Orale
----------	----------------

Réglementation 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,

Monsieur le Professeur Thomas COLARD

Professeur des Universités – Praticien Hospitalier

Section Réhabilitation Orale

*Département Fonction/Dysfonction, **Imagerie** et Biomatériaux*

Docteur en Chirurgie Dentaire (Université de Lille)

Docteur du Muséum National d'Histoire Naturelle en Anthropologie Biologique (MNHN, Paris)

Habilitation à Diriger des Recherches (Université de Lille)

Master 1 - Biologie-Santé (Université de Lille)

Master 2 - Evolution Humaine (MNHN, Paris)

DIU Orthopédie Dento-Cranio-Maxillo-Faciale (Sorbonne Université, Paris)

Chargé de mission Recherche

Madame le Docteur Mathilde SAVIGNAT

Maître de Conférences des Universités – Praticien Hospitalier

Section de 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

Madame le Docteur Amélie de BROUCKER

Maître de Conférences des Universités – Praticien Hospitalier

Section de Réhabilitation Orale

Département Sciences Anatomiques

Docteur en Chirurgie Dentaire

Docteur de l'Université de Lille2

Chargé de mission Vie de campus et relations étudiants

Monsieur le Docteur Jérôme VANDOMME

Maître de Conférences des Universités – Praticien Hospitalier

Section de Réhabilitation Orale

Département Prothèses

Docteur en Chirurgie Dentaire

Docteur en Biologie de l'Université de Lille2

Master II Biologie Santé

Master I des Sciences Biologiques et Médicales

Chargé de Mission Nouvelles Technologies

À mes proches,

Table des matières

1. Introduction	13
1.1. La grotte d'Embulla : localisation et contexte archéologique.....	13
1.2. Les restes humains	16
2. Matériels et méthodes	17
2.1. Description du maxillaire Embulla 2	17
2.2. Méthodes	18
2.2.1. Acquisition des données	19
2.2.2. Création des sub-volumes	19
2.2.3. Segmentations automatique, manuelle et semi-automatique	21
3. Résultats.....	27
3.1. Description des restes dentaires d'Embulla 2	27
3.1.1. Le germe de l'incisive latérale définitive maxillaire droite	28
3.1.2. Le germe de la canine définitive maxillaire droite.....	29
3.1.3. La première molaire temporaire maxillaire droite	29
3.1.4. Le germe de la première prémolaire définitive maxillaire droite	30
3.1.5. La deuxième molaire déciduale maxillaire droite	31
3.1.6. Le germe de la deuxième prémolaire définitive maxillaire droite	32
3.1.7. La première molaire définitive maxillaire droite	33
3.2. Estimation de l'âge au décès	34
3.3. Analyse morphométrique traditionnelle	36
3.4. Résultats des analyses en morphométrie géométrique de la 16	41
4. Discussion et conclusion	43
Table des illustrations.....	49

1. Introduction

1.1. La grotte d'Embulla : localisation et contexte archéologique



Figure 1 : Photographie montrant les deux entrées de la grotte d'Embulla (*Sacchi, 1986*)

La grotte d'Embulla (Figure 1) est localisée à Corneilla-du-Conflent, à 1 km sud-sud-est de Villefranche-du-Conflent, dans les Pyrénées Orientales (France). Cette grotte, qui s'ouvre à 470 m d'altitude, se trouve sur le flanc droit de la rivière Cady (*Sacchi, 1986*). Elle possède deux entrées (Figure 2) : une qui donne sur une grande salle (ancienne bergerie) et la seconde, plus étroite, qui débouche sur un couloir qui se sépare en deux galeries, dont l'une qui rejoint la grande salle. C'est cette seconde entrée qui a été découverte par Jean Abénalet en 1951 (*Sacchi, 1986*).

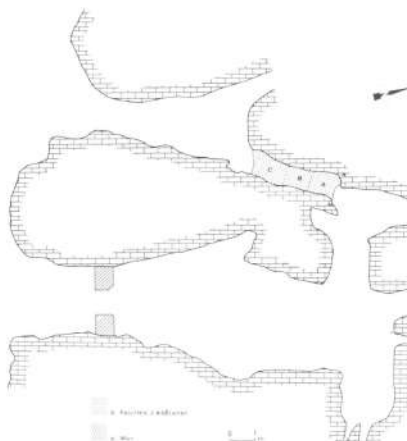


Figure 2 : Plan partiel de la grotte d'Embulla avec localisation de la fouille de J. Abénalet (*Sacchi, 1986*)

J. Abénalet a analysé les dépôts géologiques sur une surface de 3m². La stratigraphie montre un plancher stalagmitique suspendu recouvert par des cailloutis pris dans la stalagmite. Le tout est enrobé par du limon, témoignant d'une ancienne présence d'eau dans la grotte, ainsi que de l'argile fine (Figure 3) (Sacchi, 1986).

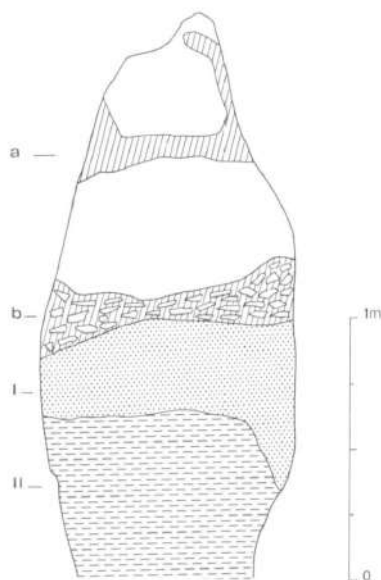


Figure 3 : Coupe stratigraphique de la galerie fouillée par J. Abénalet (Sacchi, 1986)

Les fouilles ont commencé pendant l'été 1954, puis ont malheureusement été interrompues suite à des intrusions clandestines ayant abîmé la grotte (Sacchi, 1986 ; Gambier et Houet, 1993). De nombreux outils préhistoriques ont été découverts durant ces fouilles. Ce sont principalement des burins dièdres, c'est-à-dire avec deux pointes, et des lamelles à dos, caractéristiques de l'industrie lithique (c'est-à-dire les outils) utilisée par les hommes et femmes du Solutrén (Sacchi, 1986).

Cette grotte est datée du Pléistocène Supérieur (période débutée il y a 126 000 ans et se terminant il y a 11 700 ans B.P.), elle appartiendrait plus précisément à la culture du Solutrén Supérieur (-23 000 à -18 000 ans B.P.), qui est encore relativement méconnue aujourd'hui.

L'occupation solutréenne, succédant à l'occupation gravettienne, est particulièrement attestée dans les Pyrénées centrales françaises et espagnoles, sur des sites en plein air (comme Roquecoubère et Coustaret) mais aussi dans quelques grottes comme la Grotte d'Embulla ou la grotte de Coustaret (Figure 4).

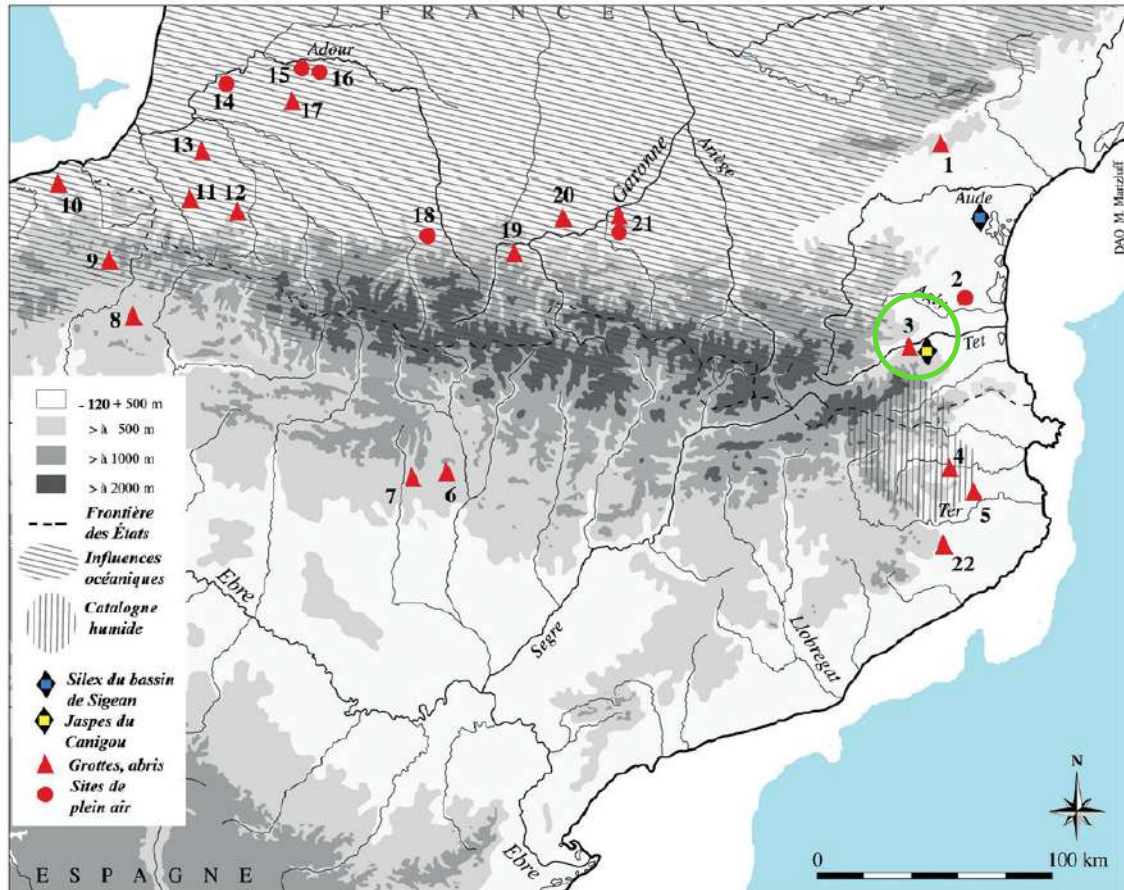


Figure 4 : Répartition du peuplement solutréen connu autour des Pyrénées (Martzluff et al., 2012)

En bleu est représenté le niveau approximatif de la mer pendant le Dernier Maximum Glaciaire.

n° 1 : Bize

n° 2 : Les Espassoles

n° 3 : Grotte d'Embulla

n° 4 : Serinya

n° 5 : Cau de les Goges

n° 6 : Fuente del Trucho

n° 7 : Chaves

n° 8 : Etxauri

n° 9 : Abauntz

n° 10 : Aitzbitarte III et IV

n° 11 : Azkonzilo

n° 12 : Hareguy

n° 13 : Isturitz

n° 14 : Tercis (Saussaye)

n° 15 : Montaut

n° 16 : Marseillon

n° 17 : Brassempouy (Grotte du Pape)

n° 18 : Coustaret

n° 19 : Gourdan

n° 20 : Lespugue

n° 21 : grotte et station de Coustaret

n° 22 : Balma de la Xemeneia

Le Solutréen est une culture appartenant à la deuxième moitié du Paléolithique Supérieur, pendant le Dernier Maximum Glaciaire. Le climat y était froid et aride. Son nom vient du site de fouille éponyme appelé Solutré (Bourgogne-Franche-Comté), en France, qui décrit des structures d'habitat circulaires (Quertelet, 2009).

Cette culture se caractérise par l'apogée de l'industrie lithique, marquée par des techniques de taille de pierres très exigeantes, telles que le silex ou le cristal de roche, et par des pointes rasantes, dont les plus célèbres sont les feuilles de laurier et les feuilles de saule. L'aiguille à chas en os est également inventée à cette époque (Kozlowski et Otte, 2013).

1.2. Les restes humains

Des restes humains ont été retrouvés lors des deux séries de fouilles archéologiques datant de 1955 (Sacchi, 1986). La première réalisée par J. Abélanet dans laquelle un fragment de mandibule, appelé **Embulla 1**, appartenant à un enfant de 3 à 5 ans (estimation de l'âge par H. Duday, in Sacchi, 1986) et une incisive de cheval sont découverts. Ce fragment de mandibule comprend :

- Une deuxième molaire mandibulaire temporaire droite,
- L'alvéole vide de la première molaire mandibulaire temporaire droite,
- Les germes de la première molaire mandibulaire temporaire droite, de la canine mandibulaire définitive droite et la première mandibulaire maxillaire définitive droite dans leurs cryptes.

Ces fossiles sont conservés au laboratoire de préhistoire de Carcassonne, France.

La deuxième série de fouilles, réalisée par René Ribes non loin des fouilles de J. Abélanet, a livré plusieurs fragments maxillo-mandibulaires attribués à *Homo sapiens*, dont le maxillaire **Embulla 2**, objet de notre étude. De nombreux restes fauniques tels que du cerf, du cheval, de la hyène et du loup étaient associés aux restes humains et sont exposés au Musée des Trois-Rivières, Québec, Canada. Le reste **Embulla 2** était pour sa part conservé dans les collections du centre européen de recherches préhistoriques de Tautavel (France).

L'étude de ces fossiles n'a jamais été réalisée depuis leur découverte. C'est pourquoi Tony Chevalier, paléoanthropologue au laboratoire HNHP (MNHN, Université de Perpignan, Site de Tautavel), a pris la décision de les micro-scanner en 2022 pour étude et conservation numérique patrimoniale.

L'objectif de cette thèse est donc de réaliser l'étude de ce reste fossile solutréen, en utilisant les dernières techniques d'imagerie de précision et de morphométrie. Nous commencerons ainsi par décrire le reste dento-maxillaire fossile d'**Embulla 2** puis nous le comparerons à d'autres restes humains anciens et récents en nous concentrant sur leurs différences morphométriques afin de confirmer l'attribution du spécimen à l'espèce *Homo sapiens*, et de préciser ses caractéristiques morphologiques.

2. Matériels et méthodes

2.1. Description du maxillaire Embulla 2



Figure 5 : Photographies en vue sagittale et en vue transversale du maxillaire d'Embulla 2, réalisées par Denis Dainat (EPCC-CERP de Tautavel)

Il s'agit d'un fragment de maxillaire comportant sept dents :

- Deux dents temporaires : 54 (première molaire temporaire maxillaire droite) et 55 (deuxième molaire temporaire maxillaire droite),

- Une dent définitive « sur arcade » : 16 (première molaire maxillaire droite),
- Quatre germes de dents définitives : 12 (incisive latérale maxillaire droite), 13 (canine maxillaire droite), 14 (première prémolaire maxillaire droite) et 15 (deuxième prémolaire maxillaire droite).

Le fragment de maxillaire mesure 3 cm de hauteur, 3 cm de largeur, sur 4 cm de profondeur (Figure 5). Ce fragment provient de l'os maxillaire droit. La première molaire maxillaire définitive (16) et les deux molaires maxillaires temporaires droites (54 et 55) sont visibles et sont présentes sur l'arcade. Les fractures sont assez nettes. On peut observer une partie du palais, qui est fracturé au niveau de la suture inter-maxillaire en médial et de la suture incisivo-canine en avant. En arrière, le palais est délimité par l'apophyse palatine, qui présente le foramen du nerf grand palatin et le foramen du nerf petit palatin.

Une partie de l'os maxillaire et le processus zygomatique sont absents au niveau de la première molaire maxillaire définitive droite, ce qui nous permet d'observer ses racines en cours de formation. En avant des molaires temporaires (54 et 55), il y a une alvéole dentaire vide qui témoigne de la perte *post-mortem* de la canine temporaire droite (53). On peut également observer une partie de la couronne de l'incisive latérale définitive droite (12) en cours d'éruption.

La première molaire définitive est quasiment intacte, on peut observer une petite perte amélaire sur sa crête marginale distale. Des fêlures amélaire sont également présentes sur les trois dents. Les surfaces occlusales des molaires déciduales sont abrasées, ce qui témoigne d'une usure physiologique qui peut être expliquée par la mastication.

2.2. Méthodes

L'ensemble des dents permanentes et temporaires ont été segmentées de manière semi-automatisée, puis complétées avec des corrections manuelles grâce au logiciel 3D Slicer (Fedorov et al., 2012). Ce logiciel permet la visualisation, la segmentation et l'analyse de données d'imagerie tomographique bio-médicales et de recherche fondamentale.

La segmentation des dents issues du maxillaire Embulla 2 a pu être réalisée par séparation virtuelle des tissus dentaires (émail et dentine) et de l'os en utilisant la répartition des différents niveaux de gris sur chaque coupe.

Nous présentons ici les différentes étapes de la méthodologie utilisée pour segmenter la deuxième prémolaire définitive droite (15) de l'individu d'Embulla 2. Cette même méthodologie a été appliquée à tous les restes dentaires.

2.2.1. Acquisition des données

Les acquisitions microscanner (μ CT) du fragment dento-maxillaire Embulla 2 ont été réalisées sur la plateforme d'imagerie de l'ISEM (Institut des Sciences de l'évolution), Université de Montpellier par Tony Chevalier (Paléanthropologue à l'UMR 7194 HPNP).

Le jeu de données comprend 1840 coupes et la taille des voxels isotropes est de $X=23\mu\text{m}$ $Y=23\mu\text{m}$ $Z=23\mu\text{m}$.

2.2.2. Création des sub-volumes

Premièrement, les coupes reconstruites en format .tiff sont chargées dans le logiciel 3D Slicer. Les données scannographiques sont ainsi visibles dans les trois plans de l'espace X, Y et Z (vues orthogonales) et peuvent être manipulées dans chaque plan grâce aux différents curseurs de couleur (Figure 6).

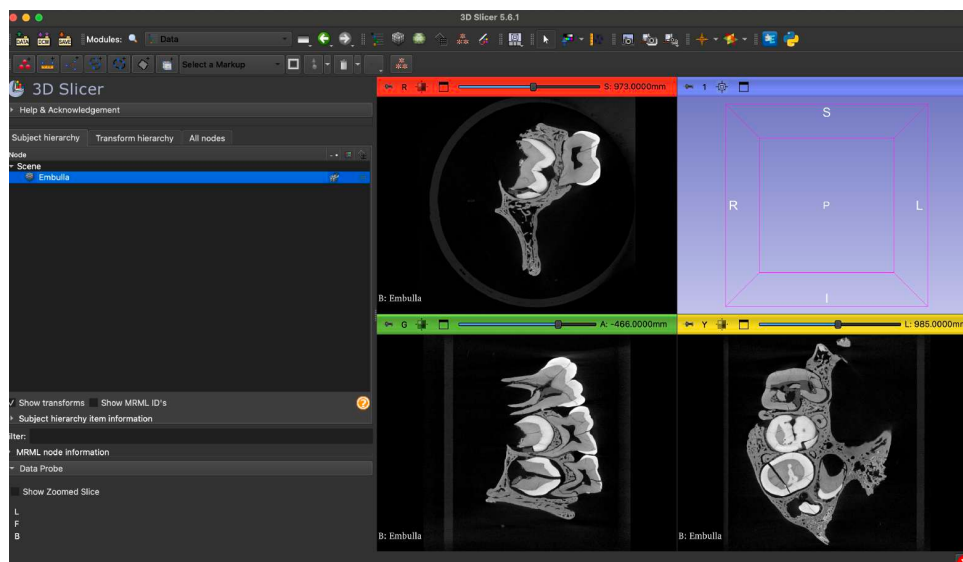


Figure 6 : Coupes orthogonales de la 15 dans les trois plans de l'espace, obtenues grâce au logiciel 3D Slicer (illustration personnelle)

Les fichiers étant volumineux et lourds à traiter, chaque dent a été traitée séparément, dans un sub-volume dédié pour optimiser les ressources de l'ordinateur (Figures 7 et 8). Cette première étape a permis de faciliter le travail de segmentation et d'obtenir la reconstitution 3D de chacune des dents étudiées tout en ayant un fichier plus léger. Il convient en amont de vérifier pour chaque sub-volume la taille du voxel pour pouvoir analyser de manière correcte chacune des dents étudiées. Ainsi, chaque dent est isolée dans une « boîte » en utilisant l'outil « Crop Volume ». La ROI (Region Of Interest) est alors optimisée dans au moins deux des trois plans de l'espace (Figure 7).

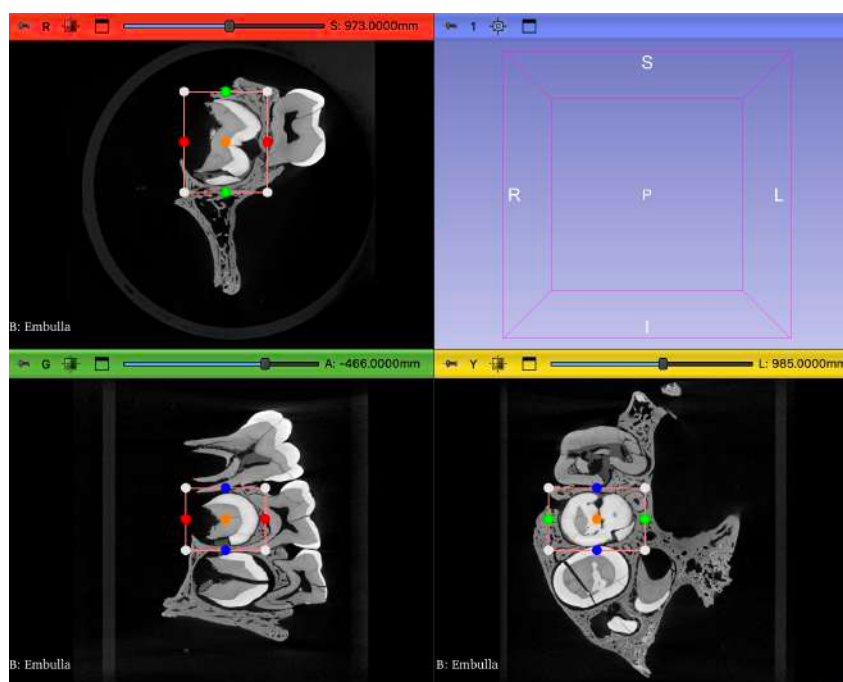


Figure 7 : Sélection de la ROI qui permet d'isoler la 15 avant sa segmentation, dans les trois plans de l'espace (illustration personnelle)

L'outil « Volume Rendering » permet ensuite d'obtenir la modélisation tridimensionnelle, en sélectionnant le filtre « μ CT-Bone-16bit » qui donne une visualisation optimisée du rendu volumique (Figure 8).

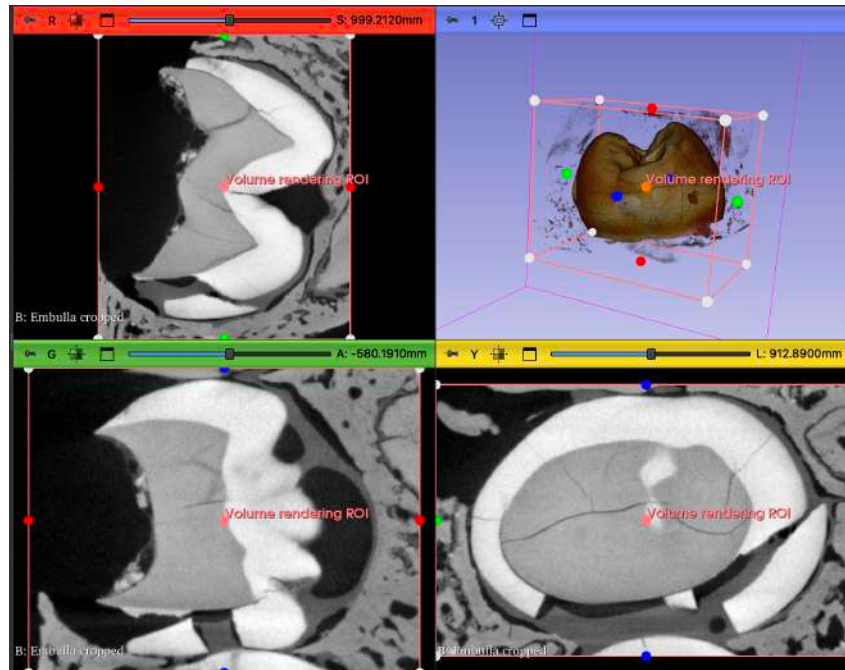


Figure 8 : Sub-volume de coupes centrées sur la 15 et rendu volumique 3D (illustration personnelle)

2.2.3. Segmentations automatique, manuelle et semi-automatique

Par la suite, afin de segmenter la dent (c'est-à-dire de séparer l'émail de la dentine virtuellement) le mode « Thresholding » est utilisé. C'est un mode de segmentation automatique qui fonctionne très bien pour l'émail car les niveaux de gris sont très différents de la dentine et de l'os. La dentine est, quant à elle, plus difficile à séparer de l'os car les niveaux de gris sont très similaires (Figure 9).

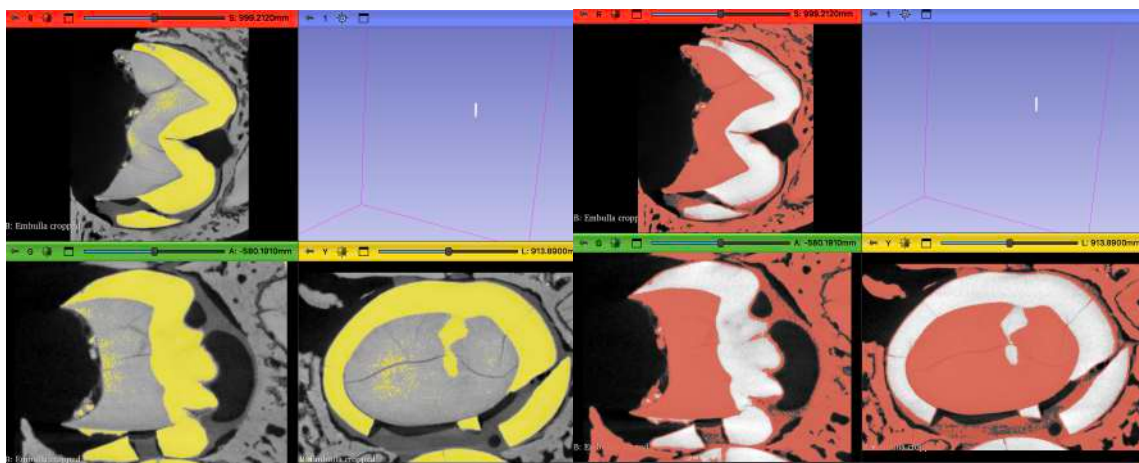


Figure 9 : Sélection de l'émail en jaune et de la dentine en rouge, on voit bien ici que les niveaux de gris entre la dentine et l'os sont similaires (illustration personnelle)

Des corrections manuelles étaient donc nécessaires pour la dentine, et dans une moindre mesure pour l'émail (Henrion et al., 2023). Ces corrections manuelles ont été réalisées grâce aux outils suivants :

- L'outil Brush : qui permet de dessiner la sélection à l'aide d'un cercle dont le diamètre est modifiable manuellement (Figure 10).

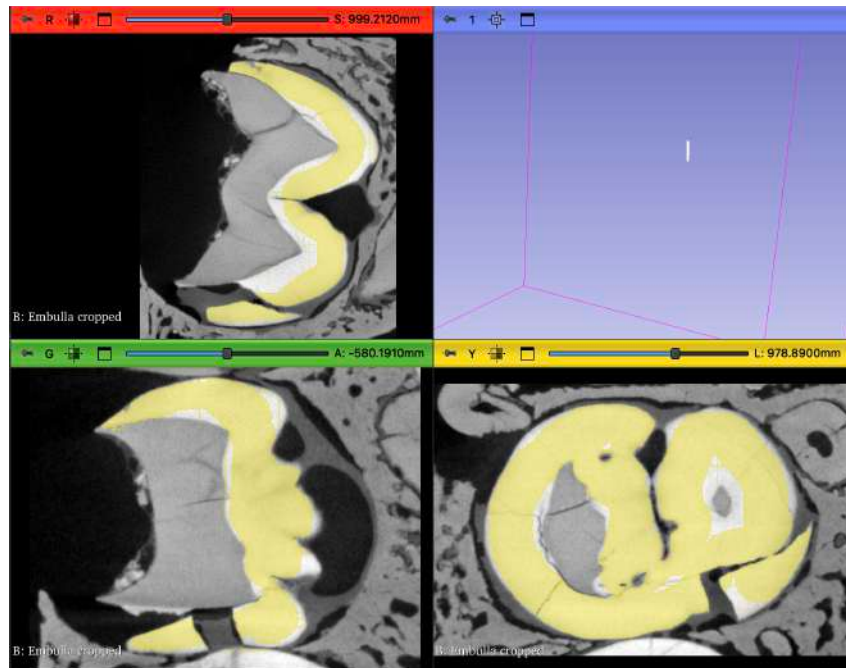


Figure 10 : Sélection de l'émail grâce à l'outil « Brush » (illustration personnelle)

- L'outil Erase : qui permet d'effacer la sélection ou une partie de la sélection.

Les sélections ont été faites dans tous les plans de l'espace afin d'être le plus précis possible en mode semi-automatisé grâce aux outils « Fill between slices » ou « Grow from seeds ». Ces deux modes permettent d'interpoler les sélections et d'insérer des niveaux de gris entre les sélections déjà existantes afin de créer le volume en respectant au mieux les limites anatomiques (Figures 11 et 12).

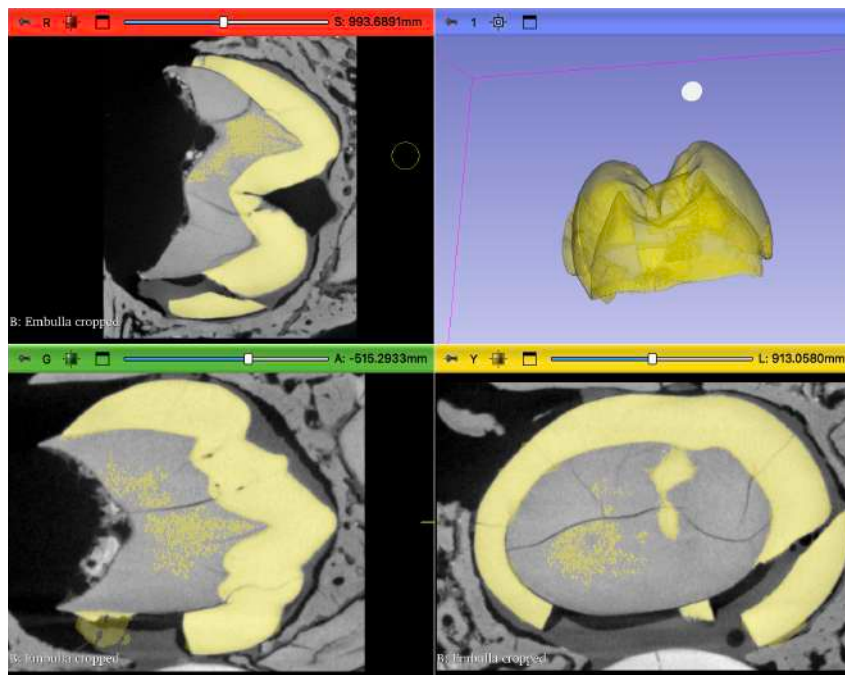


Figure 11 : Rendu 3D de la sélection de l'émail avec quelques défauts (illustration personnelle)

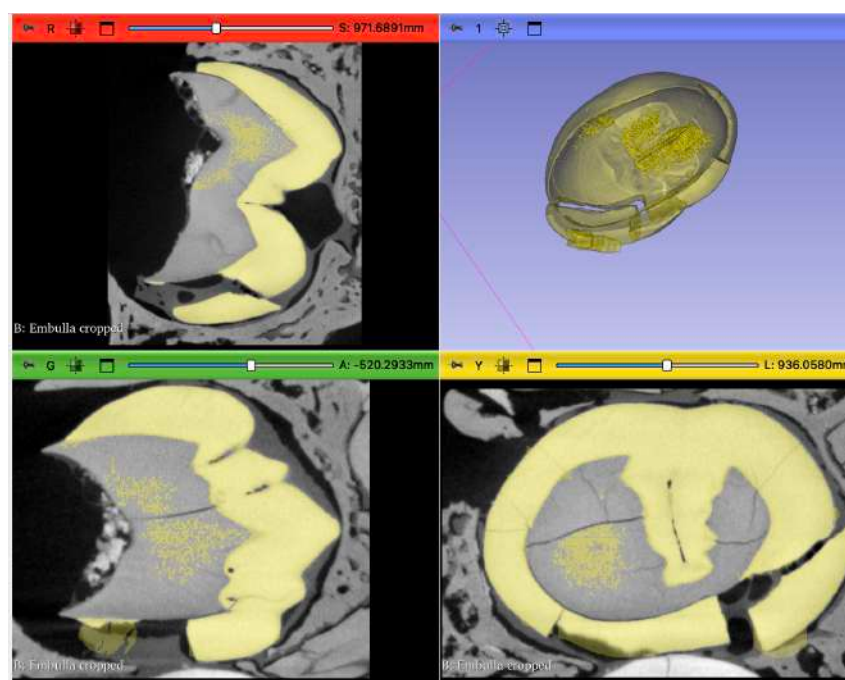


Figure 12 : Rendu 3D de la sélection de l'émail avec quelques défauts centrés sur l'intérieur de la dent (illustration personnelle)

Il était finalement parfois nécessaire de finir la correction manuelle avec les outils « Cut » qui permet de couper les pixels mal attribués avec un ciseau et l'outil « Islands », qui permet de supprimer les petites « îles 3D de voxels » et de ne garder uniquement que la plus grosse île, qui correspondait à notre segmentation (Figure 13).

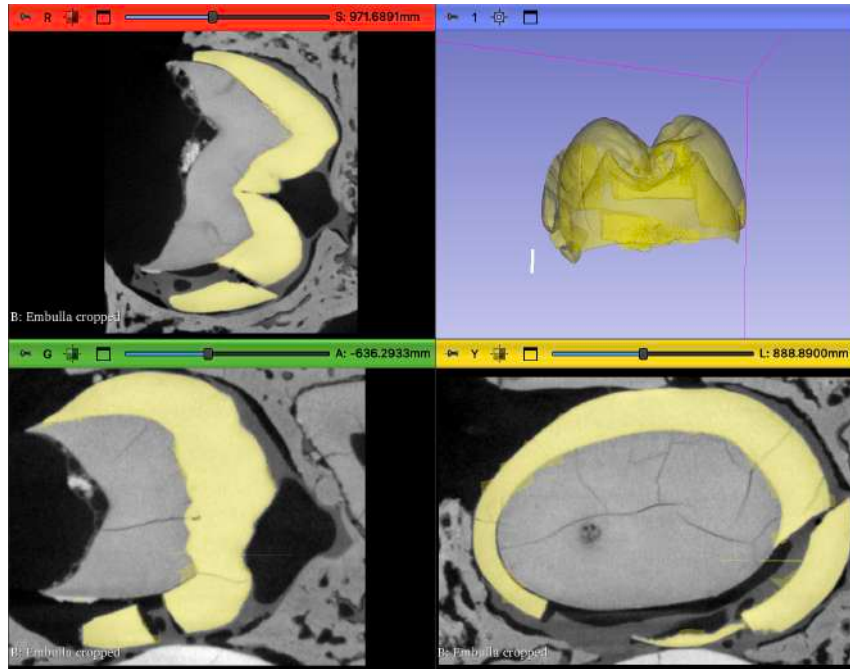


Figure 13 : Sélection de l'émail sans défaut après les fonctions « Cut » et « Islands » (illustration personnelle)

Toutes ces étapes contribuent à avoir un volume 3D des dents en représentant l'émail et la dentine lorsque leurs sélections respectives sont terminées. Cela a permis de réaliser une description anatomique globale des dents, distinguant ainsi la couronne et les racines (Figure 14). La surface de la jonction émail-dentine a également pu être visualisée grâce à cette opération de segmentation.

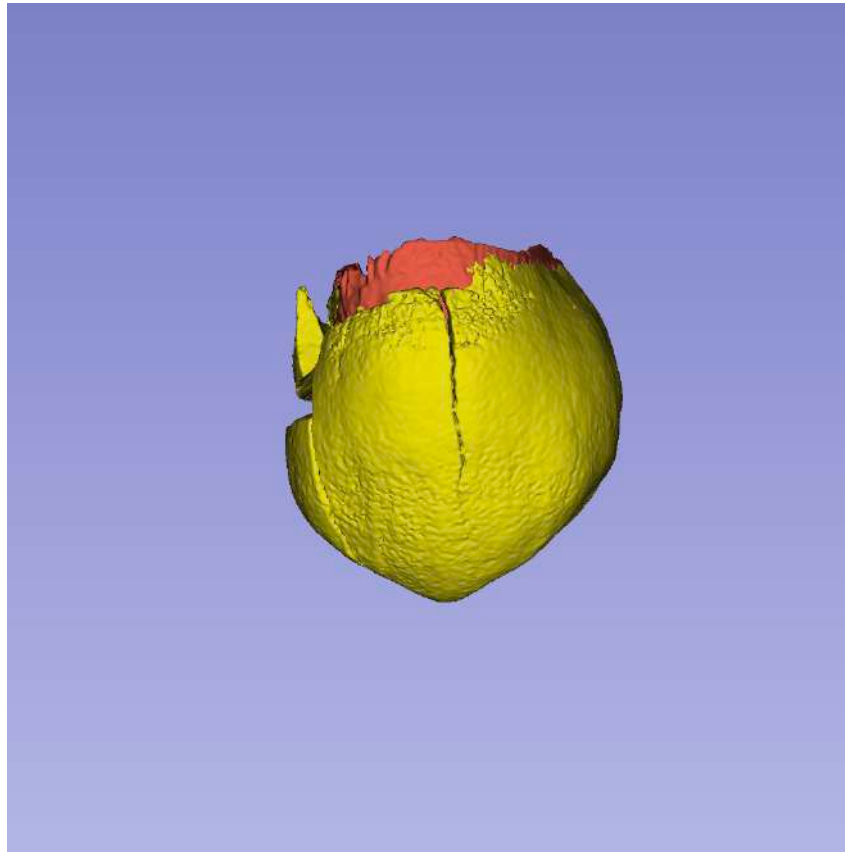


Figure 14 : Rendu volumique 3D de la 15, avec l'émail en jaune et la dentine en rouge (illustration personnelle)

2.2.4. Analyses morphométriques

En plus des descriptions anatomiques de tous les restes dentaires (Bailey, 2006), une analyse morphométrique a été réalisée sur la première molaire maxillaire définitive 16 et la deuxième prémolaire maxillaire définitive (15), qui sont les seuls types dentaires pour lesquels nous avons un échantillon de comparaison significatif.

Morphométrie traditionnelle

La morphométrie traditionnelle (Bailey, 2006 ; Le Luyer et al., 2022 ; Martín-Francés et al., 2022) représente la première étape de l'analyse des dents 15 et 16, issues du maxillaire Embulla 2. Les mesures réalisées étaient :

- La mesure du diamètre maximum mésio-distal et vestibulo-buccal,
- La visualisation de la surface de la jonction émail-dentine.

Une fois les données obtenues, le spécimen étudié a été comparé à des *Homo sapiens* récents (sub-actuels et actuels) et à *Homo neanderthalensis* (Henrion et al., 2023). Le logiciel 3D Slicer, nous a permis d'obtenir ces données, notamment grâce à la fonction « Markups », qui comprend les outils « Line » et « Closed Curve » (Figure 15).

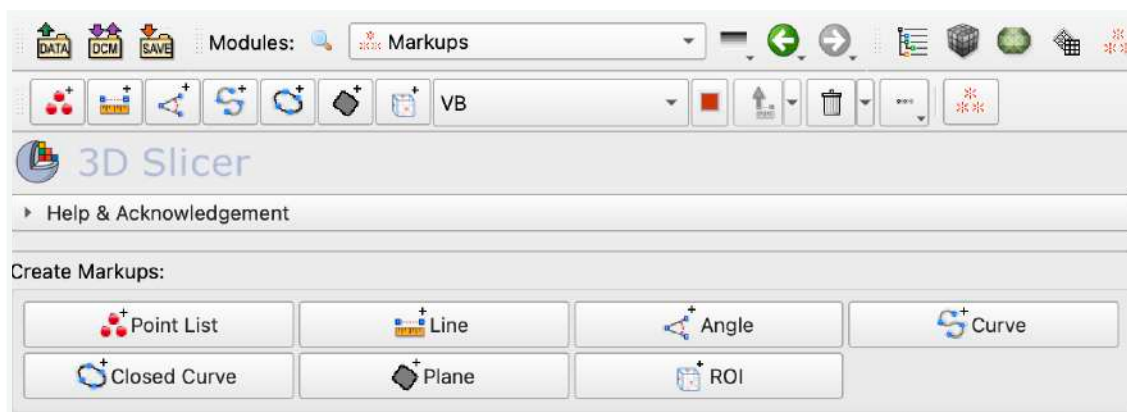


Figure 15 : Ensemble des outils de la fonction « Markups » du logiciel 3D Slicer (illustration personnelle)

L'outil « Line » permet de positionner des points sur le volume 3D étudié et de mesurer la distance les séparant. Il est utilisé en analyse morphométrique pour déterminer les diamètres vestibulo-buccaux et mésio-distaux de 15 et 16. Les points sont placés au niveau des lignes de plus grand contour des dents étudiées et les diamètres obtenus seront comparés aux diamètres de ces mêmes dents des autres espèces.

Morphométrie géométrique

La morphométrie géométrique regroupe un ensemble de méthodes d'acquisition de données morphologiques et de traitements mathématiques qui permettent la caractérisation de la forme des organismes en distinguant les informations géométriques (shape) des informations dimensionnelles (size) (e.g. Bookstein, 1991 ; Mitteroecker et Gunz, 2009 ; Klingenberg, 2016). Cette méthode, qui se développe depuis une vingtaine d'années en anthropologie biologique et en paléanthropologie, nous a permis d'étudier le signal taxinomique des deux dents (15 et 16) de Embulla 2, afin de confirmer leur appartenance à l'espèce *Homo sapiens*. La 15 porte parfois dans le texte sa nomenclature anglo-saxonne : UP4 pour Upper Premolar 4, et la 16 est parfois appelée UM1 pour Upper Molar 1.

La morphométrie géométrique consiste à poser des points (landmarks) sur un objet 2D ou 3D, puis à réaliser une transformation Procrustes pour séparer les informations de taille (size) et de forme (shape), afin de se focaliser sur les propriétés géométriques de l'objet d'étude (Martín-Francés et al., 2022). L'outil « Closed Curve » nous a permis de positionner les points « landmarks » ou « semi-landmarks » caractéristiques utilisés pour les analyses de la jonction émail-dentine en anthropologie. Ils suivent les contours morphologiques de la jonction émail-dentine (JED) en formant plusieurs courbes reliant les cornes de dentine de la dent étudiée.

Ces courbes permettent d'analyser la forme de cette jonction émail-dentine puis de la comparer avec les jonctions émail-dentine des autres espèces grâce à une analyse en composante principale (ACP). La JED étant la toute première partie de la dent à se former, elle porte un signal génétique fort qui sert les études taxinomiques (c'est-à-dire de classification des objets à une espèce ou une autre) (Bailey, 2006).

3. Résultats

3.1. Description des restes dentaires d'*Emulla* 2

N.B. : les restes dentaires apparaissent sur les images comme la dent contro-latérale, en raison d'une transformation liée à l'acquisition micro-tomographique. Nous avons fait le choix de laisser les images « inversées » brutes, issues de l'acquisition.

3.1.1. Le germe de l'incisive latérale définitive maxillaire droite

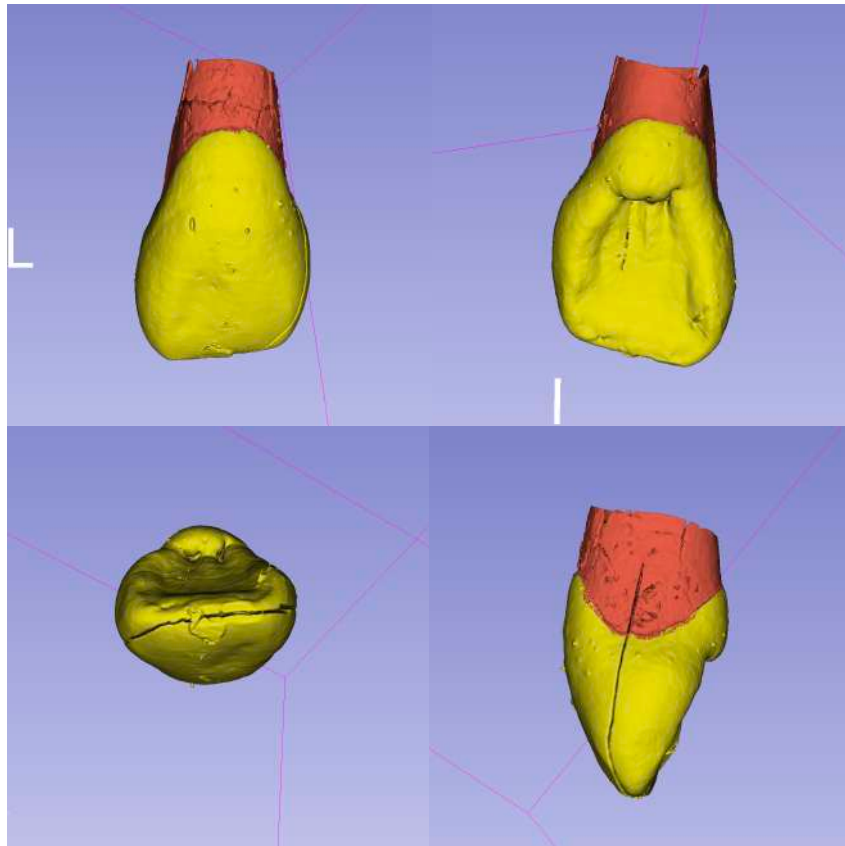


Figure 16 : Vues vestibulaire, palatine, occlusale et mésiale du germe de l'incisive latérale définitive maxillaire droite (illustrations personnelles)

La couronne de ce germe présente un bord libre rectiligne et oblique. L'angle mésial est plus aigu que l'angle distal. Les collets vestibulaire et palatin sont convexes et arrondis, tandis que le collet de la face mésiale est concave et arrondi. Le cingulum est marqué. L'édification radiculaire a commencé et atteint environ 1/3 de la longueur de la racine. La dent présente une large fracture qui parcourt le bord libre de mésial en distal (Figure 16).

3.1.2. Le germe de la canine définitive maxillaire droite

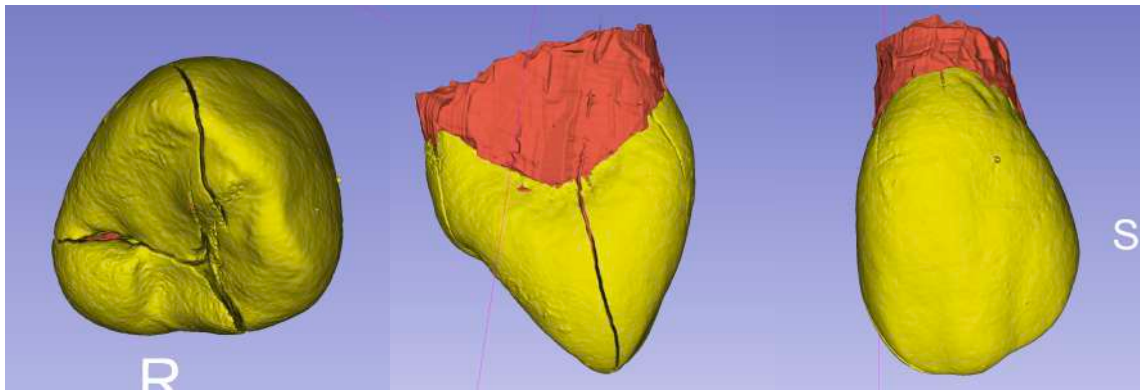


Figure 17 : Vues occlusale, mésiale et vestibulaire du germe de la canine définitive maxillaire droite (illustrations personnelles)

Le bord libre forme un angle obtus dont le sommet est mésialé. Son versant mésial est plus court et moins oblique que son versant distal. Le collet vestibulaire est convexe et arrondi, tandis que le collet de la face mésiale est concave et arrondi. Le cingulum est peu marqué. L'édification radiculaire a également commencé mais elle est débutante. La dent présente deux fractures principales : la première part du collet mésial jusqu'au sommet du bord libre et la seconde entoure le cingulum (Figure 17).

3.1.3. La première molaire temporaire maxillaire droite

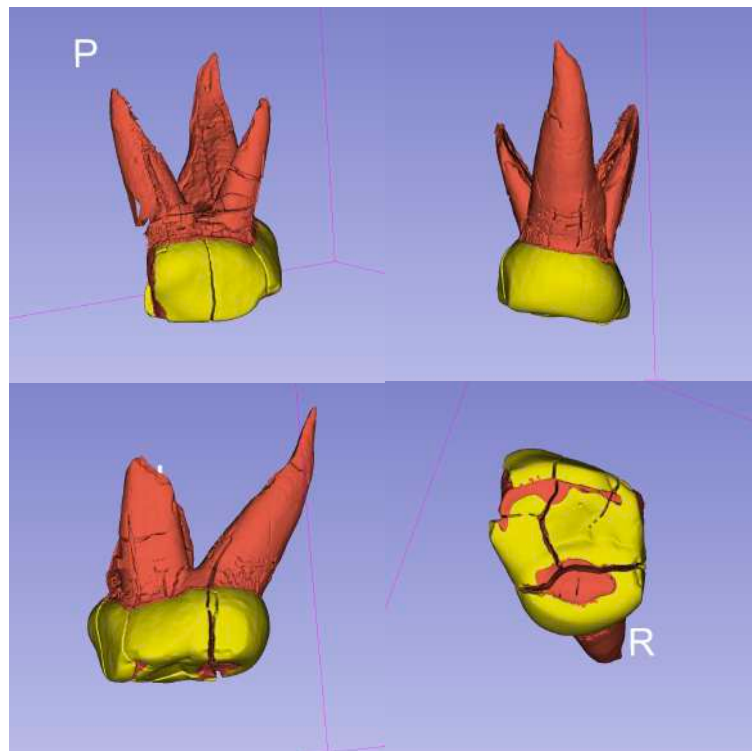


Figure 18 : Vues vestibulaire, palatine, mésiale et occlusale de la première molaire déciduale maxillaire droite (illustrations personnelles)

Cette molaire présente une surface occlusale complètement plate, montrant une abrasion probablement physiologique. Les trois racines n'ont pas encore commencé leur rhizalyse. On voit bien ici la divergence des racines, pouvant ainsi accueillir le germe de la première prémolaire définitive droite. Le collet est globalement plat. La dent est marquée par une large et profonde fracture qui se situe sur la face occlusale de mésial à distal et qui descend sur la racine. Cette fracture rejoint une autre fracture orientée en vestibulo-buccal moins profonde allant jusqu'au collet vestibulaire. Les racines de cette dent présentent également plusieurs fractures horizontales (Figure 18).

3.1.4. Le germe de la première prémolaire définitive maxillaire droite

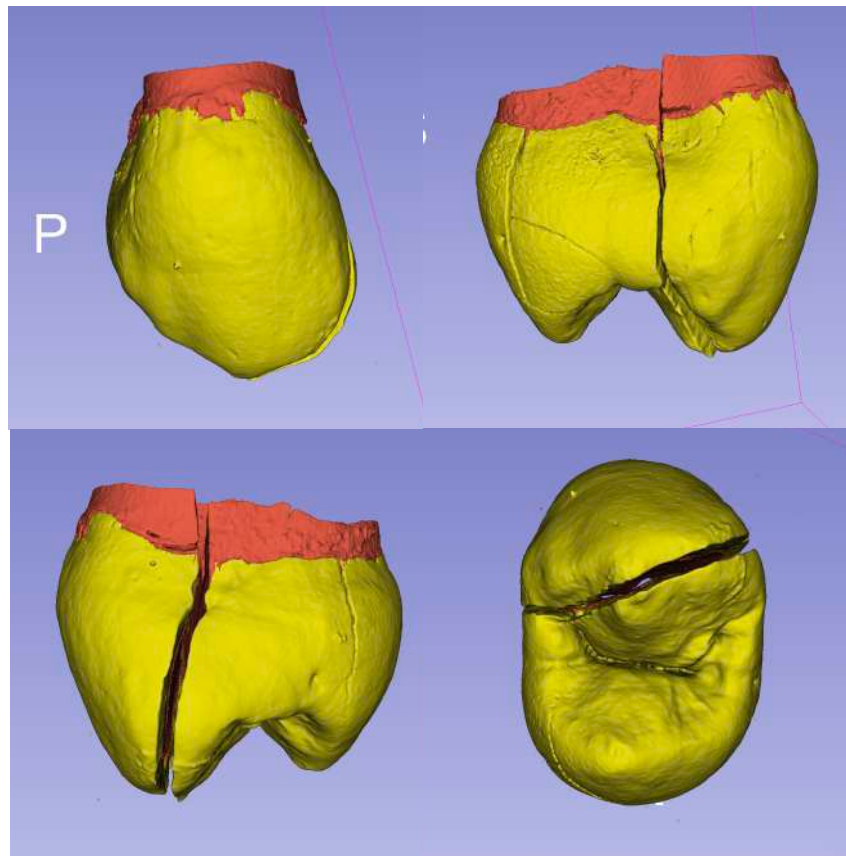


Figure 19 : Vues vestibulaire, distale, mésiale et occlusale de la première prémolaire maxillaire droite (illustrations personnelles)

Son bord libre forme un angle obtus avec une pointe mésialée. La face occlusale est composée de deux cuspides : une cuspe vestibulaire, plus large et plus haute, et une cuspe palatine, plus petite. Les crêtes marginales mésiale et distale sont marquées et sont reliées par le sillon occlusal. Le collet est plutôt plat. Son édification radiculaire vient de commencer. Cette dent montre une large et profonde fracture légèrement

oblique allant de la crête marginale distale à la face mésiale. Elle passe sur le sommet de la cuspside vestibulaire (Figure 19).

3.1.5. La deuxième molaire déciduale maxillaire droite

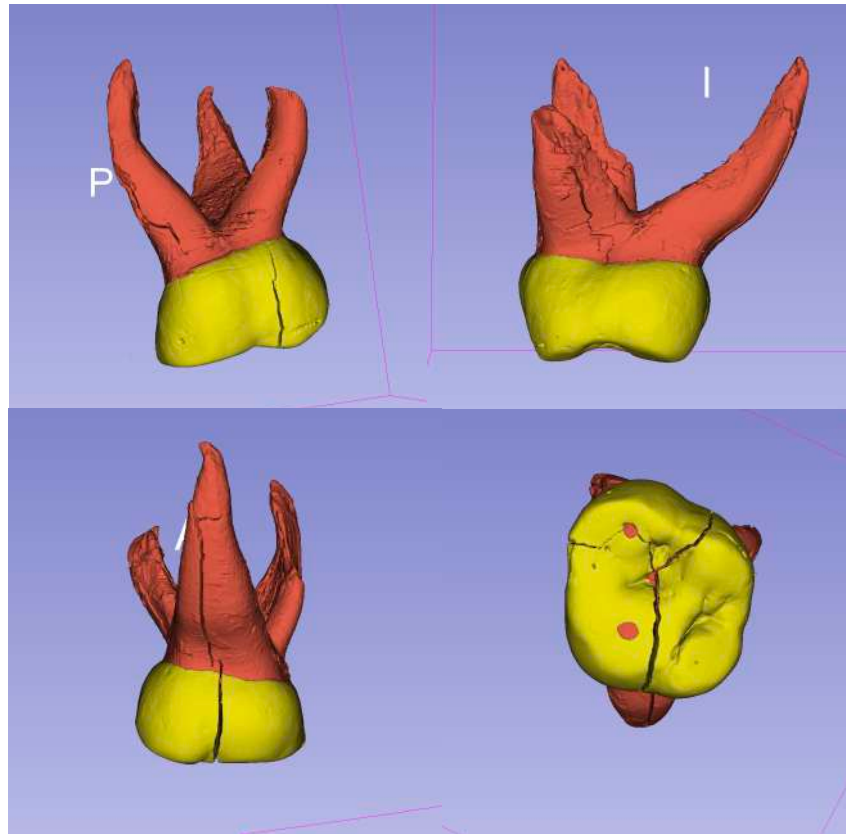


Figure 20 : Vues vestibulaire, distale, palatine et occlusale de la première molaire déciduale maxillaire droite (illustrations personnelles)

Cette molaire présente une surface occlusale globalement plate, même si on peut deviner les cuspides disto-vestibulaire et disto-palatine. Le sillon vestibulaire indique la présence d'une ancienne cuspside mésio-vestibulaire. La racine distale a commencé sa rhizolyse. On voit bien ici la divergence des racines, pouvant ainsi accueillir le germe de la deuxième prémolaire définitive droite. Cette dent est marquée par une fracture verticale partant du dernier tiers de la racine palatine, qui remonte jusqu'à sa surface occlusale en ayant une trajectoire bucco-vestibulaire et qui se termine au niveau du collet distal sur la face vestibulaire. Les racines mésiale et distale présentent également de légères fractures dans leur longueur (Figure 20).

3.1.6. Le germe de la deuxième prémolaire définitive maxillaire droite

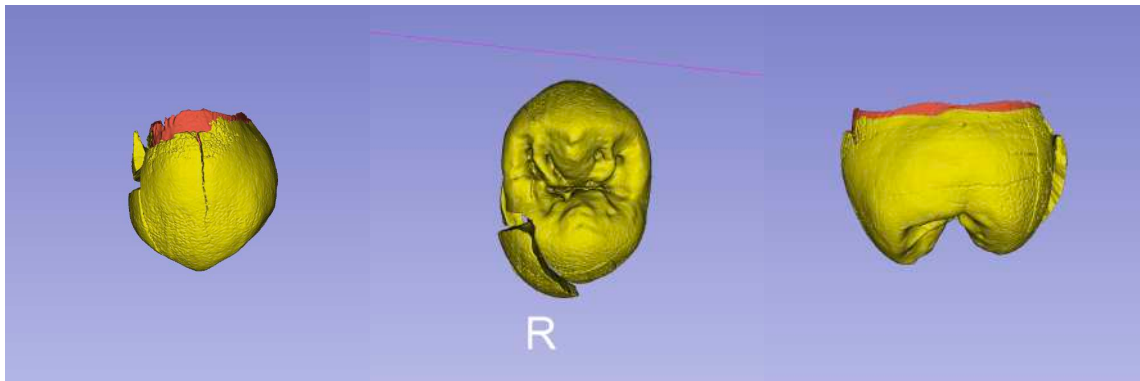


Figure 21 : Vues vestibulaire, occlusale et distale de la deuxième prémolaire maxillaire droite (illustrations personnelles)

Son bord libre forme un angle obtus et une pointe mésialée. Comme la première prémolaire maxillaire gauche, la face occlusale est composée de deux cuspides, une vestibulaire et une palatine, celle-ci étant plus petite et moins haute que la cuspide vestibulaire. Les crêtes marginales sont marquées et sont reliées par le sillon principal. Quelques sillons occlusaux secondaires sont présents notamment sur la cuspide vestibulaire. Le collet est plutôt plat. Son édification radiculaire vient de commencer également. La dent est fracturée en trois morceaux. La plus grosse fracture concerne la majeure partie de la dent. Les deux autres fractures séparent une partie du collet mésial et un morceau de la cuspide palatine. La face vestibulaire montre aussi une légère fracture verticale (Figure 21).

3.1.7. La première molaire définitive maxillaire droite

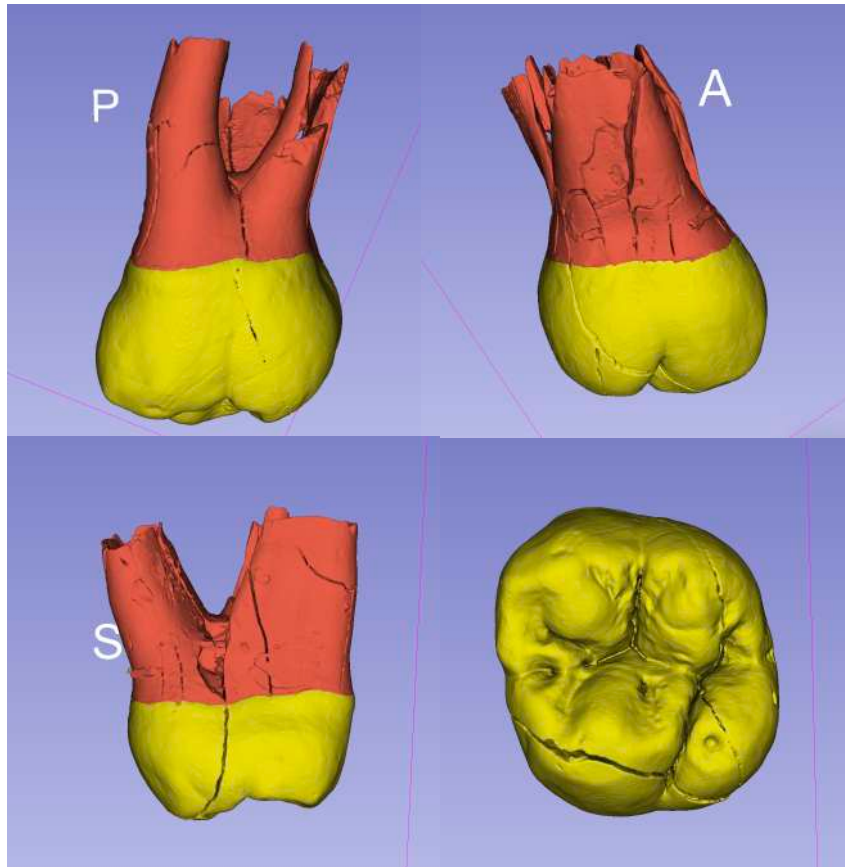


Figure 22 : Vues vestibulaire, palatine mésiale et occlusale de la première molaire maxillaire définitive droite (illustrations personnelles)

Cette première molaire maxillaire gauche montre une face occlusale avec cinq cuspides dont la cuspide disto-vestibulaire est la plus grosse. Le tubercule de Carabelli n'est pas présent. On voit également le pont d'émail qui relie cette cuspide avec la cuspide mésio-palatine. Le collet est plat. Les trois racines sont à la moitié de leur édification. Plusieurs traits de fracture sont visibles sur les faces occlusale, mésiale et distale de la couronne. Les racines en présentent également, notamment une fracture verticale plus épaisse sur la racine palatine et une autre sur la racine distale, montrant une déhiscence dans l'édification radiculaire (Figure 22).

3.2. Estimation de l'âge au décès

En 2010, AlQahtani et al. ont réalisé un atlas des stades de développement des dents déciduales et permanentes, qui permet d'estimer avec une certaine précision l'âge d'un individu au décès. Cet atlas se base sur les stades modifiés de Moorees (Moorees et al., 1963) de développement et de résorption apicaux décrivant la croissance des dents permanentes et déciduales monoradiculaires et pluriradiculaires, ainsi que la méthode des stades modifiés de Bengston (1935) pour l'éruption et l'évolution des dents dans l'os alvéolaire. Chez l'enfant, il est nécessaire d'utiliser les différents stades de formation dentaire et d'éruption alvéolaire pour déterminer son âge, pouvant aller de 28 semaines in utero jusque 23 ans, avec plus de précision que l'analyse squelettique (Garn et al., 1960) (Figure 23).

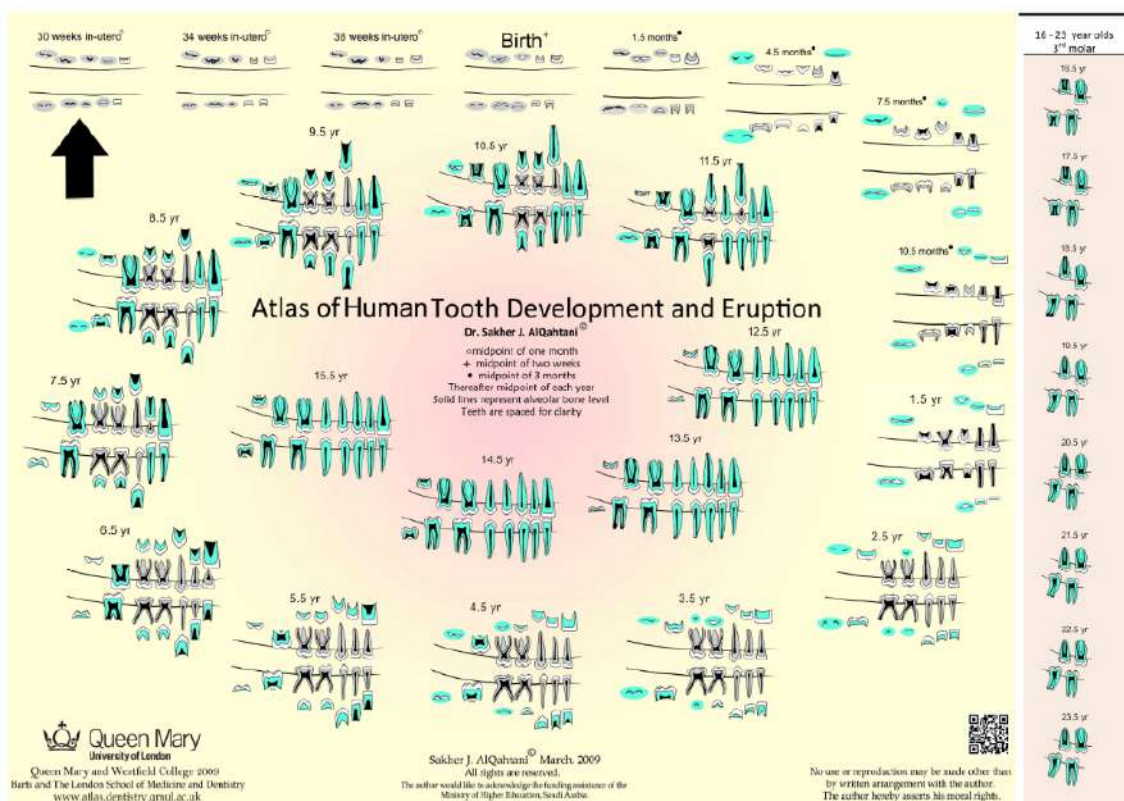


Figure 23 : Atlas du développement et de l'éruption des dents humaines (AlQahtani et al., 2010)

Concernant l'âge de cet individu, il peut être estimé entre 6,5 ans et 7,5 ans. En effet, on peut observer sur l'ossement en vue sagittale et sur le μ CT que :

- la molaire définitive 16 a des racines de longueur équivalente à la taille de sa couronne (Figure 24),



Figure 24 : Flèches montrant la longueur équivalente entre les racines et la couronne de la 16 sur le μ CT, la photographie de l'ossement et sur les stades modifiés de Moorees (Moorees et al., in AlQahtani et al., 2010) (illustration personnelle)

- les molaires déciduales 54 et 55 ont des racines avec des apex fermés (Figure 25),

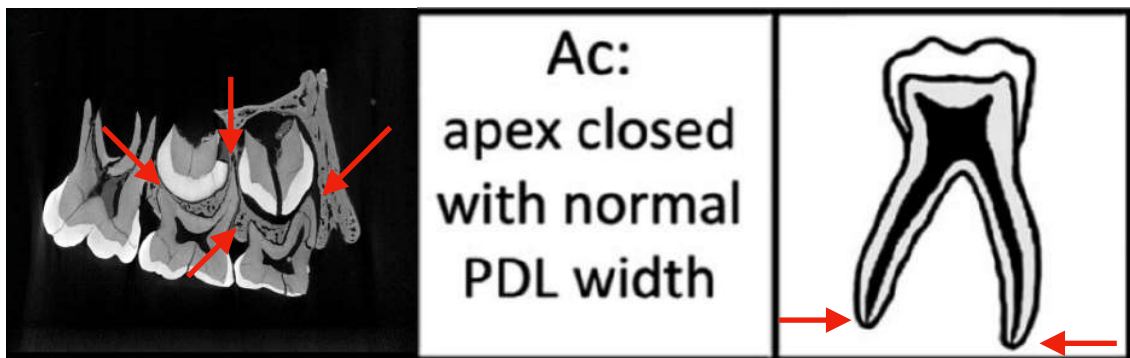


Figure 25 : Flèches montrant les apex fermés des molaires temporaires sur le μ CT et sur les stades modifiés de Moorees (Moorees et al., in AlQahtani et al., 2010) (illustration personnelle)

- la première prémolaire définitive 14 a fini l'élaboration de sa couronne et débute l'édification de ses racines (Figure 26),

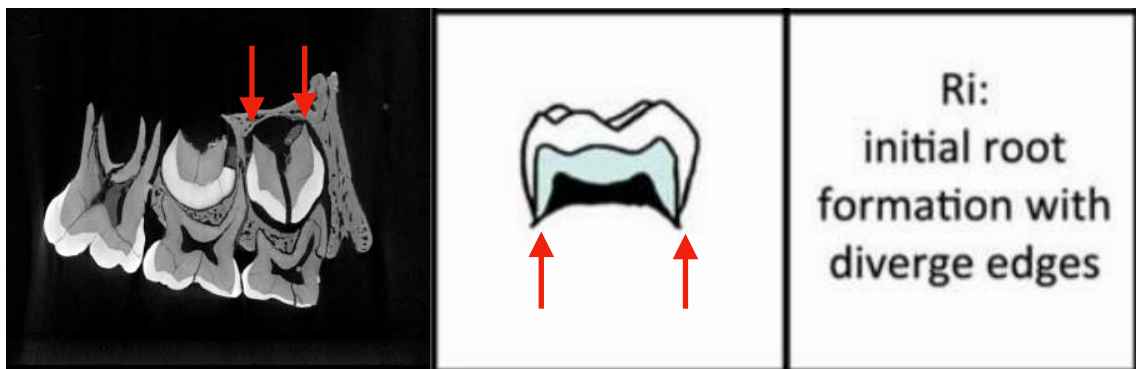


Figure 26 : Flèches montrant l'édification radiculaire de la 14 sur le μ CT et sur les stades modifiés de Moorees (Moorees et al., in AlQahtani et al., 2010) (illustration personnelle)

- la deuxième prémolaire définitive 15 a terminé l'édification de sa couronne (Figure 27).

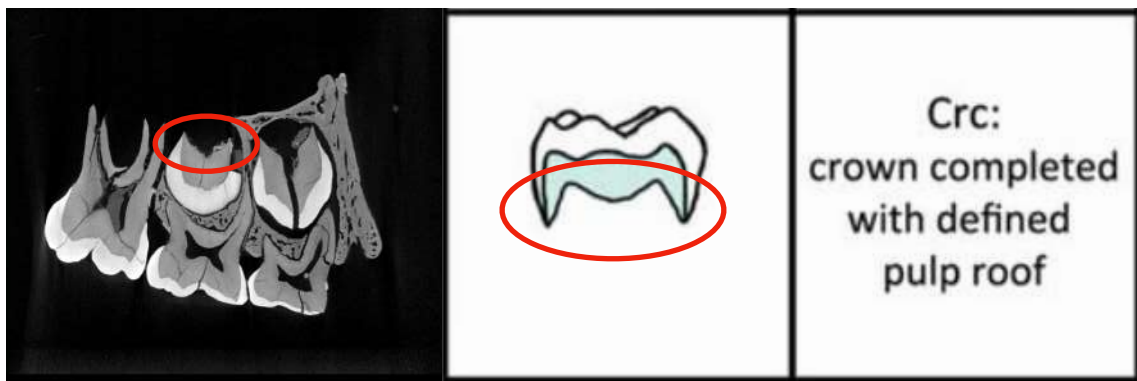


Figure 27 : Cercles montrant l'édification coronaire de la 15 sur le μ CT et sur les stades modifiés de Moorees (Moorees et al., in AlQahtani et al., 2010) (illustration personnelle)

3.3. Analyse morphométrique traditionnelle

D'après les points placés sur les volumes 3D de 15 et 16, les diamètres mésio-distal (MD) et vestibulo-buccal (VB) pour 15 (UP4) sont respectivement de 7,45 mm et 10,35 mm. Pour 16 (UM1), le diamètre mésio-distal est de 10,34 mm et le diamètre vestibulo-buccal est de 11,26 mm (Figure 28).

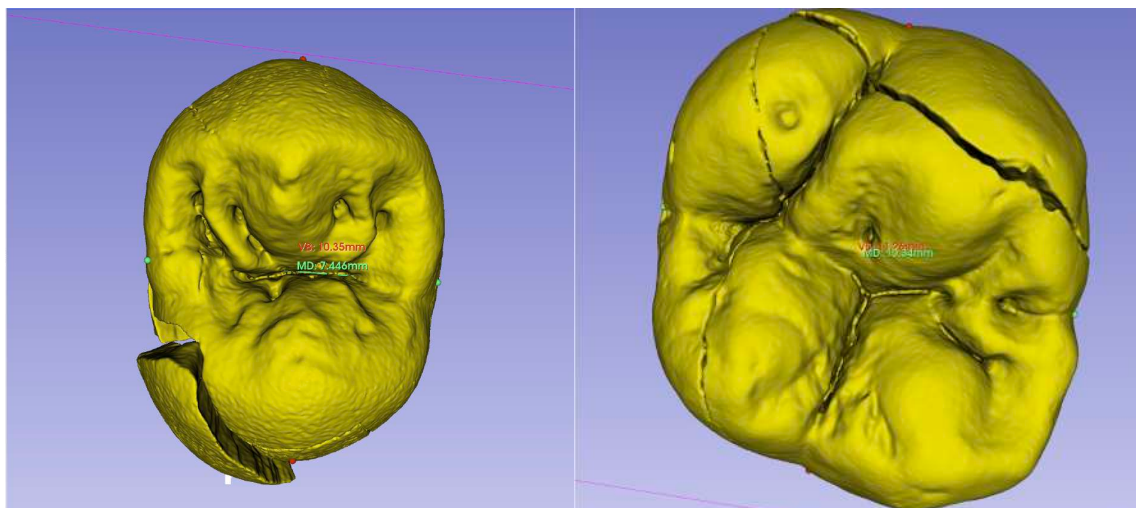


Figure 28 : Mesures des diamètres mésio-distaux et bucco-vestibulaires de 14 (UP3) et 16 (UM1)

Ces diamètres obtenus permettent d'obtenir les dimensions des surfaces occlusales et celles-ci sont comparées aux surfaces occlusales de UP4 et UM1 de *Homo sapiens* anciens (PALEO_SUP), de spécimens néandertaliens (NEAN) et de *Homo sapiens* récents (EXTENT).

Dans ce paragraphe, tous les graphiques suivants sont constitués de la même manière : l'axe des abscisses représente le diamètre mésio-distal des dents étudiées et l'axe des ordonnées indique leur diamètre vestibulo-buccal.

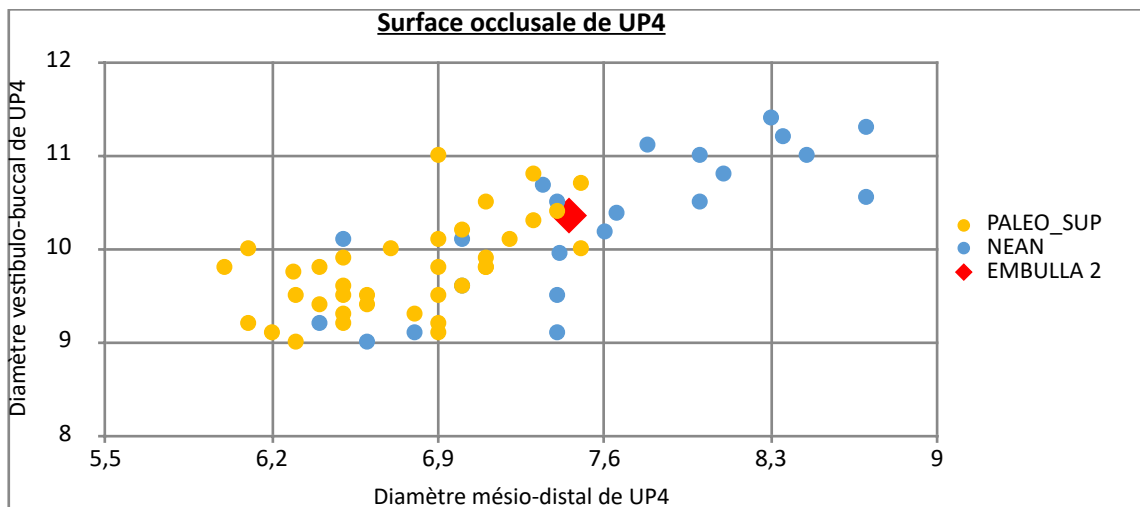


Figure 29 : Nuage de points représentant les dimensions occlusales de la deuxième prémolaire maxillaire droite (UP4) chez des spécimens néandertaliens (NEAN), *Homo sapiens* du Paléolithique Supérieur (PALEO_SUP) et le spécimen étudié (EMBULLA 2)

Sur ce graphique (Figure 29), il apparaît que les spécimens néandertaliens (points bleus) présentent des surfaces occlusales plus grandes, avec des dents plus larges et plus longues, en comparaison avec les *Homo sapiens* du Paléolithique Supérieur (points jaunes), dont les dimensions occlusales sont plus réduites et moins variables autour de diamètres mésio-distaux entre 6,2 et 7,6 mm, et vestibulo-buccaux entre 9 et 11 mm. Le spécimen EMBULLA 2 (losange rouge) se situe dans une position intermédiaire, bien que légèrement décalé vers le nuage de *Homo sapiens*. EMBULLA 2 se place dans la moyenne des surfaces occlusales de PALEO_SUP et dans les valeurs basses de NEAN.

Cependant, son diamètre vestibulo-buccal se rapproche de celui des individus du groupe NEAN ce qui suggère que la dent d'Embulla 2 partage des affinités dimensionnelles avec les Néandertaliens.

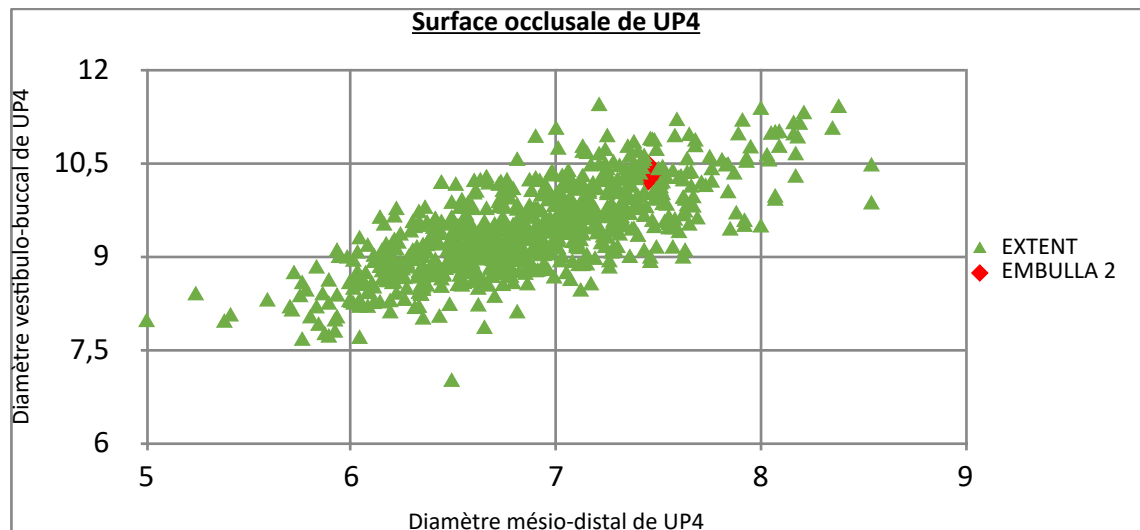


Figure 30 : Nuage de points représentant les dimensions occlusales de la deuxième prémolaire maxillaire droite (UP4) d'Embulla 2 (losange rouge) comparées à un large échantillon de références actuelles (EXTENT - points verts)

L'individu d'Embulla 2 s'inscrit clairement dans la variabilité du groupe EXTENT, bien qu'il se situe dans la partie supérieure du nuage de points (Figure 30).

Dans l'ensemble, les individus du groupe EXTENT montrent que plus la dent (UP4) est longue, plus elle est large. Concernant l'individu EMBULLA 2, il possède un diamètre mésio-distal de 7,45 mm, mais un diamètre vestibulo-buccal relativement élevé (10,35 mm).

Cette configuration occlusale suggère malgré tout une morphologie compatible avec celle d'*Homo sapiens* moderne, tout en se distinguant par une largeur occlusale supérieure à la moyenne, pouvant refléter une robustesse relative ou une variabilité intra-spécifique.

Pour conclure sur cette dent 15 (UP4), la deuxième prémolaire maxillaire droite d'Embulla 2 présente une proximité morphologique claire avec *Homo sapiens*, anciens comme modernes, avec un rapprochement des diamètres vestibulo-buccaux néandertaliens.

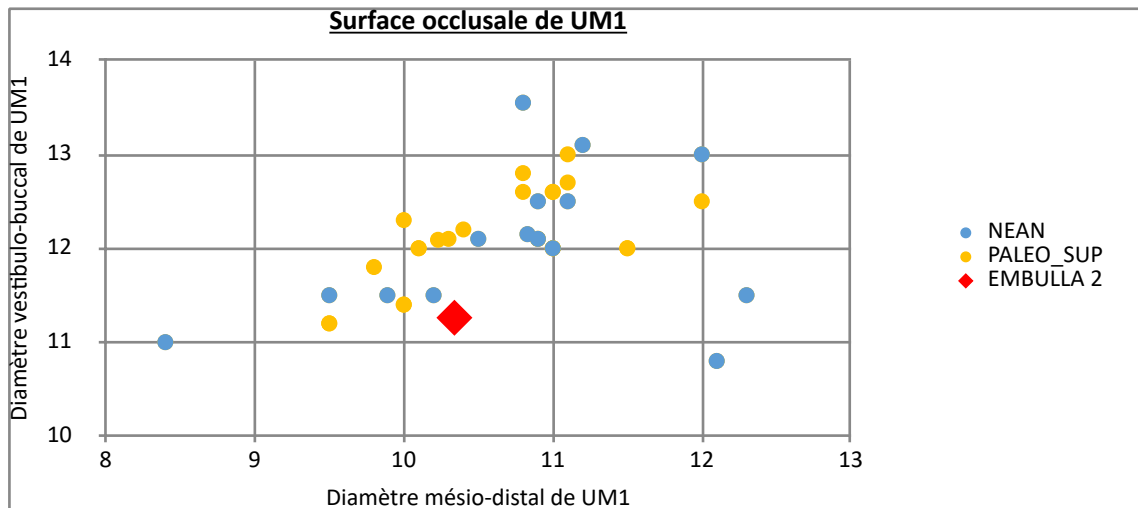


Figure 31 : Nuage de points représentant les dimensions occlusales de la première molaire maxillaire droite (UM1) chez des spécimens néandertaliens (NEAN), *Homo sapiens* du Paléolithique Supérieur et le spécimen étudié (EMBULLA 2)

Sur ce graphique (Figure 31), les Néandertaliens montrent une plus grande variabilité, avec des dents plus grandes et des valeurs parfois extrêmes pour ses diamètres vestibulo-buccal et mésio-distal pouvant aller respectivement jusqu'à 13,45 mm et 13,35 mm. Les *Homo sapiens* du Paléolithique Supérieur sont plus regroupés autour de valeurs intermédiaires.

Le spécimen EMBULLA 2 (losange rouge) se positionne dans la zone de chevauchement des deux groupes, mais bien en-dessous de la moyenne pour les deux diamètres par rapport aux deux autres espèces. Cette position intermédiaire indique que la molaire de l'individu étudié ne présente pas de caractéristiques clairement néandertaliennes (Weber et al., 2016) mais se rapproche en revanche davantage du groupe PALEO_SUP car les diamètres du spécimen étudié sont dans les valeurs basses des *sapiens* du Paléolithique Supérieur.

Cette configuration morphométrique pourrait suggérer une variabilité intra-spécifique chez *Homo sapiens*. Toutefois, il convient d'élargir l'analyse à d'autres critères morphométriques pour affiner cette hypothèse.

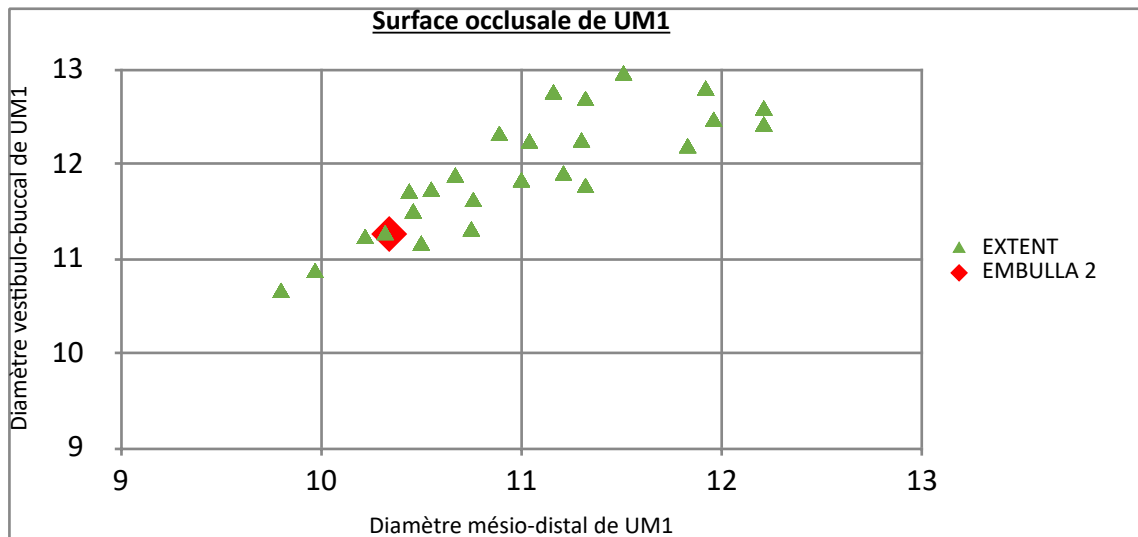


Figure 32 : Graphique représentant les dimensions occlusales de la première molaire maxillaire droite (UM1) d'Embulla 2 (losange rouge) comparées à un large échantillon de références actuelles (EXTENT - points verts)

Sur ce graphique (Figure 32), le spécimen d'Embulla 2 se positionne dans la partie inférieure du nuage de points, en particulier en ce qui concerne le diamètre mésio-distal. En revanche, son diamètre bucco-lingual est bien représenté au sein de la variabilité moderne.

Cela suggère une morphologie occlusale conforme à celle d'*Homo sapiens* moderne, bien que la dent de l'individu étudié se distingue par une forme relativement plus étroite en longueur, ce qui pourrait refléter une variation individuelle ou des influences morphologiques spécifiques.

Sur les deux graphiques (Figures 31 et 32), la 16 (UM1) d'Embulla 2 montre une proximité morphologique avec *Homo sapiens*, anciens et modernes et se détache des Néandertaliens par ses dimensions plus petites. Cette dent ne présente pas de traits archaïques évidents, renforçant son attribution au genre *Homo sapiens*.

3.4. Résultats des analyses en morphométrie géométrique de la 16

Cinq courbes de semi-landmarks ont été obtenues pour l'analyse de la première molaire définitive de Embulla 2 (Figure 33) :

- OC_1 (courbe verte) suit la jonction émail-dentine (JED) de la crête marginale mésiale,
- OC_2 (courbe rouge) suit la JED buccale,
- OC_3 (courbe jaune) suit la JED de la crête marginale distale,
- OC_5 (courbe violette) suit la JED vestibulaire,
- OC_6 (courbe bleu clair) descend entre la cuspidé disto-vestibulaire et la cuspidé mésio-palatine pour former le pont d'émail.

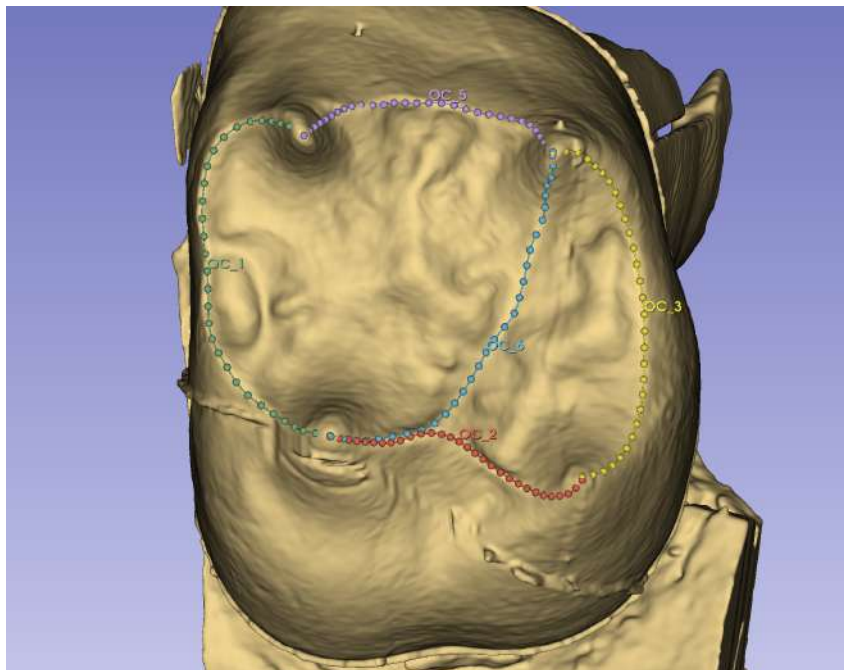


Figure 33 : Landmarks positionnés sur la jonction émail-dentine de 16 (UM1) (illustration réalisée par Pr Thomas Colard)

Ces courbes ont permis d'obtenir une « cartographie morphologique » précise, indispensable pour des comparaisons et des analyses évolutives. L'Analyse en Composantes Principales (ACP) a ensuite été réalisée en incorporant des individus *sapiens* récents et des fossiles néandertaliens avec pour objectif d'étudier les proximités biologiques de Embulla 2 avec l'un ou l'autre des groupes. Les données recueillies ont été visualisées sous forme d'un graphique PC1/PC2, représentant près de 40% de la variabilité de la JED (Figure 34).

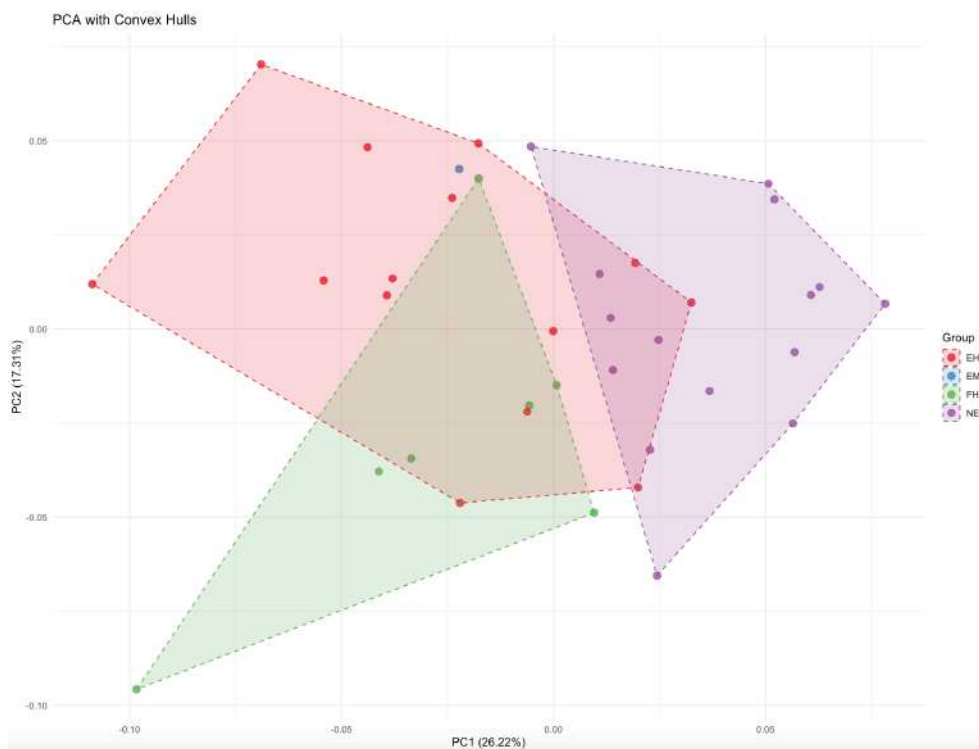


Figure 34 : Analyse en Composantes Principales (PCA) de la jonction émail-dentine de 16 (UM1) de l'individu étudié (EMB), des humains actuels (EH), des *Homo sapiens* anciens (FHM) et des spécimens néandertaliens (NEA)

Chaque groupe est entouré par un polygone qui englobe tous ses points au sein du morphospace (l'espace géométrique délimité par PC1 et PC2). Cela nous a permis de visualiser la dispersion et la séparation entre les groupes EMB, EH, FHM et NEA.

Les spécimens néandertaliens (NEA) sont assez bien séparés des autres groupes sur PC1 et PC2 : le nuage de points (violet) est distinct, bien que certains points se rapprochent de ceux des humains actuels (EH).

Les humains actuels (nuage de points rouge) chevauchent partiellement FHM (points verts), NEA (violet) et EMB (bleu), suggérant des similarités partielles entre ces groupes sur ces deux composantes.

Les *Homo sapiens* anciens sont partiellement recouverts par les humains actuels.

L'individu d'Embull 2 est positionné dans le polygone formé par le nuage de points rouge (EH), ce qui suggère une proximité morphologique entre les deux groupes. L'individu étudié d'Embull est également proche d'un point de FHM. En revanche, il n'y a pas de chevauchement avec le polygone néandertalien, ce qui montre une distinction morphologique entre notre individu et les Néandertaliens.

Ce PCA montre que NEA est assez différent des autres, tandis que EH, FHM, et EMB sont partiellement superposés, indiquant des affinités morphologiques.

4. Discussion et conclusion

L'objectif principal de cette thèse était de confirmer que le fossile solutréen Embulla 2 appartenait bien à l'espèce *sapiens*. La datation très relative du site et son attribution à la période solutréenne pouvant être discutée, nous avons souhaité comparer ses données morphométriques avec celles de fossiles néandertaliens, dernière espèce connue à avoir côtoyé *Homo sapiens* en Europe jusqu'à l'aurignacien (40 000 and B.P.).

Il y a 70 000 ans, *Homo sapiens* a quitté l'Afrique lors d'une deuxième vague de migration, et a croisé *Homo neanderthalensis* en Eurasie. De ces contacts ont résulté des échanges génétiques, appelés introgressions, si bien qu'aujourd'hui encore, le génome des humains non africains contient 2 % du génome néandertalien (E. Heyer, 2022). Ainsi, les traits dentaires archaïques hérités aux *sapiens* modernes sont potentiellement une taille plus grosse pour les dents postérieures (taurodontisme), présence d'un cingulum marqué pour les dents antérieures ou des caractères coronaires morphologiques comme la présence du tubercule de Carabelli sur la première molaire définitive maxillaire (Bailey, 2006 ; Compton et al., 2021).

La largeur vestibulo-buccale relativement importante de la deuxième prémolaire supérieure droite (UP4) observée sur le reste dento-maxillaire d'Embulla 2 (Figure 27) pourrait refléter un trait archaïque. Cet élément morphologique, bien qu'inscrit dans la variabilité des *sapiens* actuels (Figure 28), pourrait être interprété comme la manifestation phénotypique résiduelle d'une influence génétique néandertalienne, transmise dans les populations européennes du Paléolithique Supérieur (Weber et al., 2016 ; Henrion et al., 2023).

Cependant, cette caractéristique morphologique peut aussi montrer une variation intra-espèce à *Homo sapiens* ancien, c'est-à-dire une diversité morphologique entre des individus d'une même espèce liée à des facteurs environnementaux ou fonctionnels par exemple (Le Luyer, et al. 2022 ; Martín-Francés et al., 2020). L'attribution à *Homo neanderthalensis* doit donc être précautionneuse sans une analyse génétique complète.

D'autre part, les dents du Néandertal sont bien différentes (Bailey, 2006) : hormis leur robustesse générale, les incisives et canines ont une forme de pelle, c'est-à-dire que leurs faces palatines sont creusées en raison de la présence de crêtes marginales linguales ou de la courbure de la couronne et leurs dents postérieures possèdent des cuspides supplémentaires (Ortiz et al., 2019).

Nous pouvons donc écarter l'hypothèse que l'ossement d'Embullla 2 est du genre *Homo neanderthalensis*. Le spécimen solutréen étudié est donc un *Homo sapiens*.

Effectivement, les analyses morphométriques de UP4 et UM1 montrent des dimensions occlusales finalement globalement plus proches des *sapiens* anciens que des *néandertaliens* (Figures 27 et 29) mais également une similarité avec les surfaces occlusales des *sapiens* actuels (Figures 28 et 30), ce qui est confirmé par l'analyse dimensionnelle de la première molaire définitive droite (Figure 32). De manière surprenante, la morphologie dentaire d'Embullla 2 présente une plus grande proximité avec celle des *Homo sapiens* actuels qu'avec celle des *sapiens* du Paléolithique Supérieur.

Les recherches sur les solutréens sont peu nombreuses, et ce constat interroge de fait sur l'existence d'une diversité morphologique précoce au sein des populations *Homo sapiens* anciens, se rapprochant des *Homo sapiens* d'aujourd'hui.

Remerciements

Ce travail n'aurait pas pu être réalisé sans l'aide de Tony Chevalier qui a initié cette étude en réalisant les acquisitions micro-tomographiques à l'ISEM de Montpellier, et qui a accepté de partager ces données dans le cadre d'une thèse d'exercice en chirurgie-dentaire. Merci également à Denis Dainat pour les clichés photographiques du spécimen Embulla 2. Merci au Centre européen de recherches préhistoriques de Tautavel (Clément Ménard).

Bibliographie

AlQahtani SJ, Hector MP, Liversidge HM. Brief communication: The London atlas of human tooth development and eruption. *American J Phys Anthropol.* juill 2010;142(3):481-90.

Bailey SE. Beyond shovel-shaped incisors : Neandertal dental morphology in a comparative context. *Periodicum Biologorum.* 2006;108(03):253-67.

Bengston RG. 1935. A study of the time of eruption and root development of the permanent teeth between six and thirteen years. *Northwest Univ Bull* 35:3–9

Bookstein FL (1991) *Morphometric tools for landmark data : Geometry and biology.* Cambridge University Press, Cambridge, England, 455 p

Compton T, Skinner MM, Humphrey L, Pope M, Bates M, Davies TW, et al. The morphology of the Late Pleistocene hominin remains from the site of La Cotte de St Brelade, Jersey (Channel Islands). *Journal of Human Evolution.* mars 2021;152:102939.

Fedorov A, Beichel R, Kalpathy-cramer J, Finet J. 3D Slicer as an image computing platform for the Quantitative Imaging Network. *Magn Reson Imaging* 30(9) : 1323-1341 [<https://doi.org/10.1016/j.mri.2012.05.001>].

Gambier, Houet. France Upper Palaeolithic. Hominid remains : an update; 1993.

Garn SM, Lewis AB, Polacheck DL. 1960. Interrelations in dental development. I. Interrelationships within the dentition. *J Dent Res* 39:1049–1055

Gómez-Robles A, Martínón-Torres M, Bermúdez De Castro JM, Margvelashvili A, Bastir M, Arsuaga JL, et al. A geometric morphometric analysis of hominin upper first molar shape. *Journal of Human Evolution.* sept 2007;53(3):272-85.

Henrion J, Hublin JJ, Maureille B. New Neanderthal remains from the Châtelperronian-attributed layer X of the Grotte du Renne (Arcy-sur-Cure, France). *Journal of Human Evolution*. août 2023;181:103402.

Heyer E. *La vie secrète des gènes*. Flammarion; 242 p.

Klingenberg CP (2016) Size, shape, and form : concepts of allometry in geometric morphometrics. *Development genes and evolution* 226(3) : 113-137. <https://doi.org/10.1007/s00427-016-0539-2>

Kozłowski JK, Otte M. *L'Origine du Solutrén, 40 ans après l'ouvrage de Ph. Smith*. 2013;

Le Luyer M, Villotte S, Bayle P, Natahi S, Thibeault A, Dutailly B, et al. Mandible and teeth characterization of the Gravettian child from Gargas, France. *bmsap* [Internet]. 21 févr 2022 [cité 4 mai 2025];34(1). Disponible sur: <http://journals.openedition.org/bmsap/9810>

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.

Martín-Francés L, Martín-Torres M, Martínez De Pinillos M, García-Campos C, Zanolli C, Bayle P, et al. Crown tissue proportions and enamel thickness distribution in the Middle Pleistocene hominin molars from Sima de los Huesos (SH) population (Atapuerca, Spain). *Charles C, éditeur. PLoS ONE*. 8 juin 2020;15(6):e0233281.

Martín-Francés L, De Castro JMB, De Pinillos MM, Martín-Torres M, Arsuaga JL, Bertrand B, et al. Middle Pleistocene hominin teeth from Biache-Saint-Vaast, France. *Archaeol Anthropol Sci*. nov 2022;14(11):215.

Martzluff M, Grégoire S, Giresse P. *Le Solutrén des Espassoles (Vingrau, Pyrénées-Orientales)*. janv 2012;

Mitteroecker P, Gunz P (2009) Advances in geometric morphometrics. *Evolutionary biology* 36 : 235-247 [<https://doi.org/10.1007/s11692-009-9055-x>]

Moorrees CF, Fanning EA, Hunt EE Jr. 1963a. Age variation of formation stages for ten permanent teeth. *J Dent Res* 42:490–502.

Moorrees CF, Fanning EA, Hunt EE Jr. 1963b. Formation and resorption of three deciduous teeth in children. *Am J Phys Anthropol* 21:205–213.

Ortiz A, Bailey SE, Delgado M, Zanolli C, Demeter F, Bacon A, et al. A distinguishing feature of *Pongo* upper molars and its implications for the taxonomic identification of isolated hominid teeth from the Pleistocene of Asia. *American J Phys Anthropol.* déc 2019;170(4):595-612.

Quertelet S. Solutré : un musée au cœur d'un grand site. *nda.* 30 oct 2009;(117):47-51.

Sacchi D. *Le Paléolithique supérieur du Languedoc occidental et du Roussillon*, 1986

Weber GW, Fornai C, Gopher A, Barkai R, Sarig R, Hershkovitz I. The Qesem Cave hominin material (part 1): A morphometric analysis of the mandibular premolars and molar. *Quaternary International.* avr 2016;398:159-74.

Table des illustrations

Figure 1 : Photographie montrant les deux entrées de la grotte d'Embulla (<i>Sacchi, 1986</i>)	13
Figure 2 : Plan partiel de la grotte d'Embulla avec localisation de la fouille de J. Abénalet (<i>Sacchi, 1986</i>)	13
Figure 3 : Coupe stratigraphique de la galerie fouillée par J. Abénalet (<i>Sacchi, 1986</i>)	14
Figure 4 : Répartition du peuplement solutréen connu autour des Pyrénées (<i>Martzluff et al., 2012</i>)	15
Figure 5 : Photographies en vue sagittale et en vue transversale du maxillaire d'Embulla 2, réalisées par Denis Dainat (E P C C - C E R P de Tautavel)	17
Figure 6 : Coupes orthogonales de la 15 dans les trois plans de l'espace, obtenues grâce au logiciel 3D Slicer (illustration personnelle)	19
Figure 7 : Sélection de la ROI qui permet d'isoler la 15 avant sa segmentation, dans les trois plans de l'espace (illustration personnelle)	20
Figure 8 : Sub-volume de coupes centrées sur la 15 et rendu volumique 3D (illustration personnelle)	21
Figure 9 : Sélection de l'émail en jaune et de la dentine en rouge, on voit bien ici que les niveaux de gris entre la dentine et l'os sont similaires (illustration personnelle)	21
Figure 10 : Sélection de l'émail grâce à l'outil « Brush » (illustration personnelle)	22
Figure 11 : Rendu 3D de la sélection de l'émail avec quelques défauts (illustration personnelle)	23
Figure 12 : Rendu 3D de la sélection de l'émail avec quelques défauts centrés sur l'intérieur de la dent (illustration personnelle)	23
Figure 13 : Sélection de l'émail sans défaut après les fonctions « Cut » et « Islands » (illustration personnelle)	24
Figure 14 : Rendu volumique 3D de la 15, avec l'émail en jaune et la dentine en rouge (illustration personnelle)	25
Figure 15 : Ensemble des outils de la fonction « Markups » du logiciel 3D Slicer (illustration personnelle)	26
Figure 16 : Vues vestibulaire, palatine, occlusale et mésiale du germe de l'incisive latérale définitive maxillaire droite (illustrations personnelles)	28
Figure 17 : Vues occlusale, mésiale et vestibulaire du germe de la canine définitive maxillaire droite (illustrations personnelles)	29
Figure 18 : Vues vestibulaire, palatine, mésiale et occlusale de la première molaire déciduale maxillaire droite (illustrations personnelles)	29
Figure 19 : Vues vestibulaire, distale, mésiale et occlusale de la première prémolaire maxillaire droite (illustrations personnelles)	30
Figure 20 : Vues vestibulaire, distale, palatine et occlusale de la première molaire déciduale maxillaire droite (illustrations personnelles)	31
Figure 21 : Vues vestibulaire, occlusale et distale de la deuxième prémolaire maxillaire droite (illustrations personnelles)	32
Figure 22 : Vues vestibulaire, palatine mésiale et occlusale de la première molaire maxillaire définitive droite (illustrations personnelles)	33

Figure 23 : Atlas du développement et de l'éruption des dents humaines (AlQahtani et al., 2010)	34
Figure 24 : Flèches montrant la longueur équivalente entre les racines et la couronne de la 16 sur le μ CT, la photographie de l'ossement et sur les stades modifiés de Moores (Moores et al., in AlQahtani et al., 2010) (illustration personnelle).	35
Figure 25 : Flèches montrant les apex fermés des molaires temporaires sur le μ CT et sur les stades modifiés de Moores (Moores et al., in AlQahtani et al., 2010) (illustration personnelle)	35
Figure 26 : Flèches montrant l'édification radiculaire de la 14 sur le μ CT et sur les stades modifiés de Moores (Moores et al., in AlQahtani et al., 2010) (illustration personnelle)	35
Figure 27 : Cercles montrant l'édification coronaire de la 15 sur le μ CT et sur les stades modifiés de Moores (Moores et al., in AlQahtani et al., 2010) (illustration personnelle)	36
Figure 28 : Mesures des diamètres mésio-distaux et bucco-vestibulaires de 14 (UP4) et 16 (UM1)	36
Figure 29 : Graphique représentant les dimensions occlusales de la deuxième prémolaire maxillaire droite (UP4) chez des spécimens néandertaliens (NEAN), <i>Homo sapiens</i> du Paléolithique Supérieur (PALEO_SUP) et le spécimen étudié (EMBULLA 2)	37
Figure 30 : Graphique représentant les dimensions occlusales de la deuxième prémolaire maxillaire droite (UP4) d'Embulla 2 (losange rouge) comparées à un large échantillon de références actuelles (EXTENT - points verts)	38
Figure 31 : Graphique représentant les dimensions occlusales de la première molaire maxillaire droite (UM1) chez des spécimens néandertaliens (NEAN), <i>Homo sapiens</i> du Paléolithique Supérieur et le spécimen étudié (EMBULLA 2)	39
Figure 32 : Graphique représentant les dimensions occlusales de la première molaire maxillaire droite (UM1) d'Embulla 2 (losange rouge) comparées à un large échantillon de références actuelles (EXTENT - points verts)	40
Figure 33 : Landmarks positionnés sur la jonction émail-dentine de 16 (UM1) (illustration réalisée par Pr Thomas Colard)	41
Figure 34 : Analyse en Composantes Principales (PCA) de la jonction émail-dentine de 16 (UM1) de l'individu étudié (EMB), des humains actuels (EH), des <i>Homo sapiens</i> anciens (FHM) et des spécimens néandertaliens (NEA)	42

Thèse d'exercice : Chir. Dent. : Lille : Année 2025 – 3 juin

Etude microtomographique des restes dento-maxillaires retrouvés dans la grotte d'Embulla (Corneilla-de-Conflent, Pyrénées Orientales, France) / **Anouk FORTIER**. - p. (nombre de pages) : ill. 34 ; réf. 25.

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

Mots clés Libres : Paléanthropologie dentaire ; Homo sapiens ; Néandertal ; Solutréen ;
Segmentation des tissus dentaires ; MicroCT

Résumé de la thèse en français

L'étude des dents fossiles permet de comprendre l'évolution de l'Homme et d'identifier son appartenance taxonomique.

L'ossement étudié dans cette thèse a été découvert dans la grotte d'Embulla, dont les caractéristiques identitaires de la culture solutréenne, encore méconnue, sont retrouvées.

Grâce aux nouvelles technologies, comme la microtomographie, l'ossement est analysé puis comparé à deux espèces du genre *Homo* afin de déterminer à laquelle il appartient.

JURY :

Président : Professeur Thomas COLARD

Assesseurs : Docteur Mathilde SAVIGNAT

Docteur Amélie DE BROUCKER

Docteur Jérôme VANDOMME