

UNIVERSITE DE LILLE

FACULTE DE CHIRURGIE DENTAIRE

Année de soutenance : 2023

N°:

THÈSE POUR LE

DIPLOME D'ÉTAT DE DOCTEUR EN CHIRURGIE DENTAIRE

Présentée et soutenue publiquement le 24 Novembre 2023

Par Octave NADEAU

Né le 18 mai 1998 à Harfleur, France

Étude de l'organe dentaire en paléanthropologie : apport des
techniques actuelles d'imagerie et de traitement informatique

JURY

Président :

Monsieur le Professeur Thomas COLARD

Assesseurs :

Monsieur le Docteur Thibault BÉCAVIN

Monsieur le Docteur Corentin DENIS

Madame le Docteur Marine HÉNAUT

Président 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	:	N. RICHARD
Responsable de la Scolarité	:	G. DUPONT

PERSONNEL ENSEIGNANT DE LA FACULTE.

PROFESSEURS DES UNIVERSITES :

K. AGOSSA	Parodontologie
P. BOITELLE	Prothèses
T. COLARD	Fonction-Dysfonction, Imagerie, Biomatériaux
C. DELFOSSE	Doyen de la faculté d'Odontologie – UFR3S Odontologie Pédiatrique
E. DEVEAUX	Responsable du Département de Dentisterie Restauratrice Endodontie

MAITRES DE CONFERENCES DES UNIVERSITES

T. BECAVIN	Fonction-Dysfonction, Imagerie, Biomatériaux
M. BEDEZ	Chirurgie Orale, Parodontologie, Biologie Orale
A. BLAIZOT	Prévention, Epidémiologie, Economie de la Santé, Odontologie Légale.
F. BOSCHIN	Responsable du Département de 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
T. DELCAMBRE	Prothèses
C. DENIS	Prothèses
F. DESCAMP	Prothèses
M. DUBAR	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 - 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	Responsable du Département d' Odontologie Pédiatrique
J. VANDOMME	Prothèses

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.

TABLE DES MATIÈRES

TABLE DES MATIÈRES.....	10
TABLE DES ABRÉVIATIONS ET DES ACRONYMES.....	13
INTRODUCTION	14
1 ÉTUDE DE L'ORGANE DENTAIRE	15
1.1 Définitions et terminologie	15
1.2 Nomenclature.....	18
1.2.1 Formule dentaire	18
1.2.2 Différentes nomenclatures utilisées	19
1.2.2.1 Nomenclature anatomique	19
1.2.2.2 Nomenclature universelle	19
1.2.2.3 Nomenclature de Zsigmondy et Palmer	20
1.2.2.4 Nomenclature de la Fédération Dentaire Internationale (FDI) acceptée par l'OMS.....	21
1.2.2.5 Nomenclature dentaire utilisée en anthropologie biologique	22
1.3 Origine	23
1.4 Développement.....	23
1.5 Anatomie et composition	23
1.5.1 Anatomie	23
1.5.2 Composition.....	25
1.5.2.1 La dentine.....	25
1.5.2.2 L'émail	25
1.5.2.3 Le ciment.....	26
1.5.2.4 La pulpe	26
2 INTERET DES DENTS EN PALEOANTHROPOLOGIE	28
2.1 Définitions.....	28
2.2 Intérêt quantitatif.....	30

2.3	Intérêt qualitatif	33
2.4	Techniques utilisées.....	34
2.4.1	Étude de la morphologie.....	34
2.4.1.1	L'ASUDAS.....	34
2.4.1.2	La morphométrie.....	35
2.4.1.2.1	Morphométrie traditionnelle	35
2.4.1.2.2	Morphométrie géométrique	36
2.4.2	Étude de la taille des dents.....	38
2.4.3	Étude de l'épaisseur et des proportions des tissus dentaires.....	38
2.4.4	Étude de l'usure dentaire	39
2.4.4.1	Type d'alimentation	40
2.4.4.2	Activité non masticatrice.....	40
2.4.4.3	Régime alimentaire	41
2.4.4.4	État de santé	41
2.4.4.5	Estimation de l'âge.....	42
2.4.5	Étude du tartre	42
2.4.6	Étude de la ligne néonatale	45
2.4.7	La cémentochronologie	45
2.4.8	Étude des isotopes.....	48
2.4.8.1	Étude des isotopes radioactifs	48
2.4.8.1.1	Datation au carbone 14.....	48
2.4.8.2	Étude des isotopes stables.....	50
2.4.8.2.1	Origine géographique	50
2.4.8.2.2	Régime alimentaire.....	50
2.4.8.3	Intérêt des os et des dents.....	53
2.4.9	Autres techniques de datation	53
2.4.9.1	La datation ESR (Electron Spin Resonance).....	53
2.4.9.2	Datation stratigraphique	54
2.4.10	Zooarchéologie par spectrométrie de masse (ZooMS)	55
2.4.11	Analyse génétique, paléogénétique.....	55
3	APPORT DES TECHNIQUES ACTUELLES DE PHOTOGRAPHIE, D'IMAGERIE, D'INGENIERIE ET DE TRAITEMENT INFORMATIQUE.	57
3.1	La microscopie.....	57
3.1.1	Le microscope optique.....	57
3.1.2	Le microscope électronique à balayage (MEB).....	58

3.2	La Photographie	58
3.3	La 3D	60
3.3.1	Création de modèles 3D	60
3.3.1.1	La numérisation surfacique	60
3.3.1.2	La photogrammétrie	61
3.3.1.3	La microscopie numérique	61
3.3.1.4	L'imagerie	62
3.3.1.4.1	Microtomographie par rayonnement X (μ CT)	62
3.3.1.4.1.1	Présentation	62
3.3.1.4.1.2	Principe de fonctionnement	62
3.3.1.4.1.3	Protocole :	62
3.3.1.4.1.4	Intérêts	63
3.3.1.4.2	Les accélérateurs de particules de type synchrotron : microtomographie par rayonnement synchrotron (SR- μ CT)	64
3.3.1.5	Traitement informatique	68
3.3.1.6	Segmentation	69
3.3.2	Apport des analyses 3D	71
3.3.2.1	Conservation	72
3.3.2.2	Diffusion et enseignement	72
3.3.2.3	Recherche	72
3.3.2.3.1	Accès aux structures internes	72
3.3.2.3.2	Histologie virtuelle	73
3.3.2.3.3	Simplification de la notion d'échelle	74
3.3.2.3.4	Gestion des parties manquantes	74
CONCLUSION		75
RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES		76
TABLE DES ILLUSTRATIONS		88
TABLE DES TABLEAUX		91

TABLE DES ABRÉVIATIONS ET DES ACRONYMES

3D	Trois Dimensions
ADN	Acide Désoxyribonucléique
ASUDAS	Arizona State University Dental Anthropology System
CNRS	Centre National de la Recherche Scientifique
ENS	École Normale Supérieure
ESR	Electron Spin Resonance
FDI	Fédération Dentaire Internationale
JAD	Jonction Amélo Dentinaire
MA	Millions d'Années
MEB	Microscopie électronique à balayage
OMS	Organisation Mondiale de la Santé
SR-μCT	Microtomographie par rayonnement synchrotron
TCA	Tooth Cementum Annulation
UV	Ultra-Violet
ZooMS	Zooarchéologie par Spectrométrie de Masse
μCT	Microtomographie par rayonnement X

Introduction

Les dents humaines sont un matériel d'étude de choix pour de nombreux spécialistes (archéologues, paléontologues, dentistes, zoologues, médecins et odontologues légaux, généticiens).(1) Dans plusieurs disciplines, les dents sont d'une grande utilité et possèdent des avantages. De l'odontologie légale à la paléoanthropologie dentaire, les chercheurs analysent ces organes très finement afin d'obtenir des indices sur un sujet. En effet les dents sont très résistantes et traversent à la fois le temps et les agressions extérieures. Ainsi ces spécialistes peuvent avoir accès à des vestiges datant de plusieurs millions d'années ou ayant subi de nombreuses contraintes, comme un incendie par exemple.

En plus d'être très résistantes et fréquemment retrouvées, les dents renferment dans leur structure de nombreuses informations exploitables dans toutes ces disciplines. Des techniques variées sont pratiquées afin d'obtenir un maximum d'informations de ces échantillons retrouvés. Mais la manipulation répétée de ces échantillons peut progressivement détériorer ces spécimens rares et précieux. (2)

Au cours des dernières décennies, l'essor de techniques d'imagerie et de traitement informatique toujours plus performantes a permis de répondre à ces problématiques tout en ouvrant de nombreuses possibilités d'analyses nouvelles. Des techniques s'ajoutent à celles déjà existantes pour fournir un nombre d'informations croissant et permettant une meilleure compréhension de l'évolution de notre espèce.

Après avoir précisé les termes utilisés en paléoanthropologie dentaire et les bases de l'anatomie dentaire humaine, nous nous intéresserons à plusieurs techniques utilisées, leur utilité et l'apport des techniques actuelles d'imagerie et de traitement informatique dans cette discipline. Ensuite nous verrons les nombreuses applications permises par ces techniques comme la segmentation, l'histologie virtuelle, la création de modèles 3D.

1 Étude de l'organe dentaire

La paléoanthropologie dentaire fait appel à l'anatomie dentaire afin de reconnaître les vestiges squelettiques et dentaires, qui constituent la majorité des restes humains retrouvés. (3)

La connaissance de l'anatomie dentaire est très importante dans cette discipline. Dans cette première partie, nous préciserons les termes utilisés en paléoanthropologie dentaire. Après quelques généralités, définitions et rappels sur la terminologie et la nomenclature utilisées dans cette discipline, nous nous intéresserons au développement des dents, à leur anatomie, à leur structure.

1.1 Définitions et terminologie

Les **dents** (du grec *odous*, *odontos*) sont des organes de l'appareil digestif, durs, blanchâtres, implantés sur le bord des mâchoires de la plupart des vertébrés, qui servent à la prise de nourriture, à la mastication et, parfois, à la défense. (4)

Elles ont plusieurs fonctions. La principale est la mastication des aliments mais elles jouent également un rôle dans la phonation et la déglutition.

Chez l'Homme, elles ont également une fonction esthétique très importante. (3)

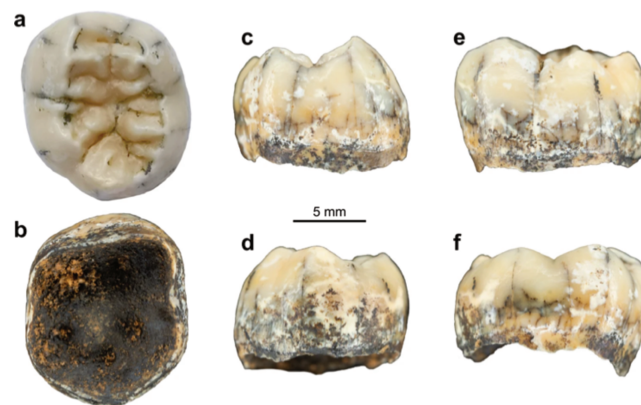


Figure 1 : Dent d'un enfant Denisovien découverte dans une grotte au Laos. Ici une molaire déciduale.

Spécimen : TNH2-1 (Demeter et al. 2022) (5)

La dentition désigne l'ensemble des phénomènes qui aboutissent à la mise en place des dents sur les deux arcades (organogenèse, croissance, vieillissement, et disparition dans le cas de la dentition déciduale).

Chez l'Homme, deux dentitions se succèdent, on parle de diphyodontie. Chez les mammifères, la diphyodontie est majoritaire mais certains comme l'éléphant ne possèdent qu'une dentition : on parle alors de monophyodontie.

Le nombre de dentition chez d'autres espèces peut être très variable, allant de quatre ou cinq chez certains reptiles (oligophyodontie) à plusieurs dizaines chez le crocodile ou le requin (polyphyodontie).

Le phénomène de dentition dure une vingtaine d'années chez l'Homme. (6)

L'ensemble des dents présentes dans la cavité buccale à un moment donné est appelé denture. Chez l'Homme, trois dentures se succèdent :

- La denture déciduale (ou lactéale, ou temporaire) qui comprend 20 dents déciduales ou lactéales : quatre incisives centrales, quatre incisives latérales, quatre canines, quatre premières molaires et quatre deuxièmes molaires. Ces dents sont issues de la première dentition. (6)
- La denture mixte, qui correspond à la présence de dents lactéales et permanentes en même temps sur l'arcade. Cette denture existe de l'éruption de la première molaire définitive à six ans, jusqu'à la disparition de la dernière dent déciduale vers douze ans.
- La denture permanente (ou définitive) qui comprend 32 dents permanentes ou définitives : quatre incisives centrales, quatre incisives latérales, quatre canines, quatre premières prémolaires, quatre deuxièmes prémolaires, quatre premières molaires, quatre deuxièmes molaires, quatre troisièmes molaires. (3)

Les dents sont réparties sur deux arcades. Les dents implantées dans le maxillaire forment l'arcade supérieure. Celles implantées sur la mandibule forment l'arcade inférieure.

La moitié d'une arcade forme un quadrant ou héli arcade.

Tableau 1 : Représentation schématique des quatre quadrants.

1 Quadrant supérieur droit	2 Quadrant supérieur gauche
4 Quadrant inférieur droit	3 Quadrant inférieur gauche

Le mode de fixation de la dent peut également être très variable entre les espèces : Les dents peuvent être soudées par leur base à la surface des mâchoires, attachées par ankylose, on parle d'attache de type acrodonte.

Lorsque l'attache est latérale, on parle d'attache pleurodonte.

Enfin, les dents peuvent être enchâssées dans une alvéole, fixées par l'intermédiaire d'un ligament, on parle d'attache thécodonte. L'Homme est thécodonte. (7)

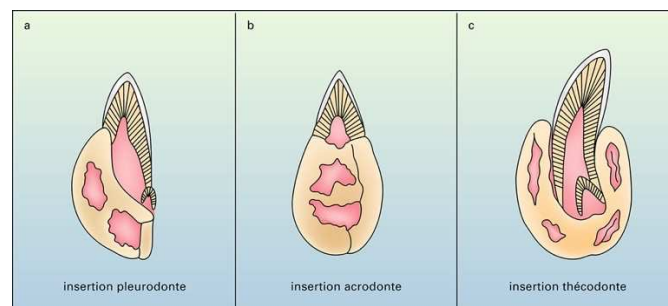


Figure 2 : Les différents modes de fixation des dents (d'après Miles et Poole) (7)

L'Homme adulte possède 32 dents, on parle d'oligodontie car il possède un nombre réduit de dents en comparaison avec les poissons ou les reptiles qui présentent beaucoup plus de dents sur leurs arcades, on parle alors de polyodontie.

Les dents humaines ne sont pas toutes identiques entre elles, cette caractéristique est appelée hétérodonie en opposition avec les espèces ne possédant que des dents similaires : homodontie.

Le dauphin par exemple est homodonte. Notons également que c'est un mammifère monophyodonte, comme l'éléphant. Il possède plusieurs dizaines de dents, il est donc polyodonte. (8)

En effet, l'Homme possède quatre classes de dents :

- 2 classes sont dites haplodontes, c'est-à-dire que leur morphologie est simple, conique, ou unicuspidée. (9) Il s'agit des incisives et canines. Ce sont les dents antérieures chez l'Homme.
- 2 classes sont dites plexodontes, leur morphologie est plus complexe, avec l'ajout de tubercules, cuspides ou racines supplémentaires.(10) Il s'agit des prémolaires et des molaires. Ce sont les dents postérieures chez l'Homme.

Les dents ont des fonctions différentes selon leur classe :

- Fonction de préhension et de section pour les incisives.
- Fonction de dilacération pour les canines.
- Fonction de broyage et de trituration pour les prémolaires et molaires.

1.2 Nomenclature

1.2.1 Formule dentaire

La denture s'exprime schématiquement par la formule dentaire. Cette formule représente les dents présentes en denture temporaire et en denture permanente par héli arcade. Les lettres i, c, p et m correspondent aux différentes classes de dents. Les minuscules sont utilisées pour la denture temporaire et les majuscules pour la denture définitive. (6)

En denture temporaire la formule dentaire de l'Homme est :

$$\frac{2}{2} i \frac{1}{1} c \frac{2}{2} m$$

En denture permanente la formule dentaire de l'Homme est :

$$\frac{2}{2} I \frac{1}{1} C \frac{2}{2} P \frac{3}{3} M$$

1.2.2 Différentes nomenclatures utilisées

Pour identifier clairement une dent, l'utilisation d'une nomenclature est obligatoire. Plusieurs nomenclatures existent et classent les dents selon les quatre quadrants présentés précédemment.

1.2.2.1 Nomenclature anatomique

Il s'agit de la dénomination anatomique complète de chaque dent. Cette nomenclature est précise mais n'est pas facilement utilisable car longue à écrire ou à dire à l'oral.

Chaque dent est décrite par sa classe, son espèce, son arcade, sa latéralité et sa denture.

Exemples : Première prémolaire maxillaire droite. Incisive latérale mandibulaire gauche lactéale.

1.2.2.2 Nomenclature universelle

La nomenclature universelle attribue un numéro de 1 à 32 à chaque dent en partant de la troisième molaire supérieure droite. Pour les dents déciduales, une lettre de A à T est attribuée en partant de la deuxième molaire supérieure droite. Cette nomenclature est principalement utilisée aux Etats-Unis.

A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
T	S	R	Q	P	O	N	M	L	K

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
32	31	30	29	28	27	26	25	24	23	22	21	20	19	18	17

Tableau 2 : Nomenclature universelle pour la denture déciduale et permanente. (13)

1.2.2.3 Nomenclature de Zsigmondy et Palmer

La nomenclature de Palmer associe un numéro de 1 à 8 pour les dents permanentes de chaque quadrant et de I à V pour les dents lactéales. Ces chiffres romains ont ensuite été remplacés par A, B, C, D, E pour moins de confusions. Ce numéro est associé à un symbole en forme de « L » orienté différemment selon le quadrant dans lequel se trouve la dent. Cette nomenclature est encore beaucoup utilisée au Royaume-Uni (11)

Elle présente deux limites :

- Son utilisation est impossible à l'oral.
- Son écriture peut être complexe sur ordinateur car elle nécessite l'utilisation de caractères spéciaux.

E┘ D┘ C┘ B┘ A┘	┘A┘┘B┘┘C┘┘D┘┘E
E└ D└ C└ B└ A└	└A└└B└└C└└D└└E

8┘ 7┘ 6┘ 5┘ 4┘ 3┘ 2┘ 1┘	┘1┘┘2┘┘3┘┘4┘┘5┘┘6┘┘7┘┘8
8└ 7└ 6└ 5└ 4└ 3└ 2└ 1└	└1└└2└└3└└4└└5└└6└└7└└8

Tableau 3 : Nomenclature de Zsigmondy et Palmer pour la denture déciduale et permanente. (13)

1.2.2.4 Nomenclature de la Fédération Dentaire Internationale (FDI) acceptée par l'OMS

Ce système est le plus utilisé, dans la plupart des pays d'Europe, au Canada et au Québec.

Les dents sont identifiées par deux chiffres, le premier désigne le cadran allant de 1 à 4 pour la denture permanente et de 5 à 8 pour la denture déciduale. Le second désigne la position de la dent dans ce cadran par rapport au plan sagittal médian, de 1 pour l'incisive centrale à 8 pour la troisième molaire en denture permanente et de 1 pour l'incisive centrale déciduale à 5 pour la deuxième molaire déciduale en denture lactéale.

								55	54	53	52	51						61	62	63	64	65					
								85	84	83	82	81						71	72	73	74	75					
18	17	16	15	14	13	12	11						21	22	23	24	25	26	27	28							
48	47	46	45	44	43	42	41						31	32	33	34	35	36	37	38							

Tableau 4 : Nomenclature de la Fédération Dentaire Internationale (FDI) pour la denture déciduale et permanente. (13)

Cette nomenclature est issue de la norme ISO3950 qui fournit également une nomenclature pour les arcades, quadrants, sextants :

La cavité buccale : 00

L'arcade maxillaire : 01

L'arcade mandibulaire : 02

Le quadrant 1 : 10

Le quadrant 2 : 20

Le quadrant 3 : 30

Le quadrant 4 : 40

Six sextants de 03 à 08.

(3,6,13)

1.2.2.5 Nomenclature dentaire utilisée en anthropologie biologique

Les dents sont désignées par la première lettre de différents critères :

- L'arcade : U (Upper) pour les dents de l'arcade maxillaire et L (Lower) pour les dents de l'arcade mandibulaire
- La latéralité : L (Left) pour les dents situées à gauche et R (Right) pour les dents situées à droite
- La classe dentaire et la denture : les lettres I, C, P, M en majuscule pour respectivement les incisives, canines, prémolaires et molaires définitives et di, dc, dm pour respectivement les incisives déciduales, canines déciduales et molaires déciduales (deciduous incisor, deciduous canine et deciduous molar).
- Un chiffre lorsqu'il existe plusieurs dents par classe. *Exemples* : M2 : deuxième molaire permanente, di2 : incisive latérale déciduale, dm1 : première molaire déciduale.

En anthropologie biologique la première et deuxième prémolaire sont parfois désignées par P3 et P4 au lieu de P1 et P2 du fait de l'évolution humaine.

Quatre prémolaires étaient présentes chez les ancêtres de l'Homme : P1, P2, P3 et P4. Deux d'entre elles ont disparu (P1 et P2), P3 et P4 sont conservées jusqu'à aujourd'hui.

Deux exemples de cette nomenclature issus du tableau 1 présentant les spécimens retrouvés dans la grotte de Mandrin, dans l'étude de Slimack et al. en 2022 :

- « LRM3 : permanent lower right third molar » : troisième molaire permanente mandibulaire droite.
- « URdm2 : deciduous upper right second molar » : deuxième molaire déciduale maxillaire droite.

(12,13)

1.3 Origine

Chez les vertébrés, des transformations cutanées ont abouti à l'apparition d'organes destinés à défendre le corps des agressions extérieures. Ces organes, les phanères, dont font partie les ongles et les poils, comprennent également les écailles ou les dents. Les dents seraient des phanères exo-squelettiques qui ont vu leur rôle de protection se différencier afin de permettre d'autres fonctions telles que la mastication, la phonation, la préhension, la déglutition. (6)

1.4 Développement

De nombreuses analyses sont basées sur le développement des dents et la croissance des différents tissus, c'est pourquoi il est important de connaître ce processus physiologique et les différentes étapes et caractéristiques de ce phénomène.

Les dents ont une double origine embryologique, elles dérivent à la fois de l'ectoderme et du mésoderme. (3) Le germe dentaire est donc composé à la fois de tissus d'origine épithélial et mésenchymateuse. (6)

Leur apparition est un phénomène continue qui s'étale dans le temps, de la période embryonnaire jusqu'au début de l'âge adulte. (3,13,14)

1.5 Anatomie et composition

1.5.1 Anatomie

Les dents sont anatomiquement séparées en deux parties : la couronne, recouverte d'émail et la racine, recouverte de ciment. La ligne séparant la couronne de la racine est le collet.

Deux collets peuvent être décrits en fonction de la limite choisie. Le collet anatomique désigne la limite entre la couronne anatomique (partie de la dent recouverte d'émail) et la racine anatomique (partie recouverte de ciment).

Le collet physiologique ou clinique sépare la partie visible de la dent dans la cavité buccale de la partie enfouie dans l'os et la gencive. Cette limite évolue au cours de la vie de l'individu.

En paléontologie, les études étant menées sur des dents isolées ou des ossements dénués de tissus mous, le collet anatomique est utilisé.

La couronne des dents présente cinq faces : trois faces libres et deux faces de contact.

La face occlusale ou bord libre pour les dents antérieures est la face masticatrice, opposée à l'arcade antagoniste.

La face vestibulaire se situe du côté des joues et des lèvres.

La face linguale à la mandibule et la face palatine au maxillaire sont situées respectivement du côté de la langue et du palais.

Enfin les deux faces de contact, aussi appelées faces proximales : la face mésiale est la face la plus proche du plan sagittal médian et la face distale la plus éloignée.

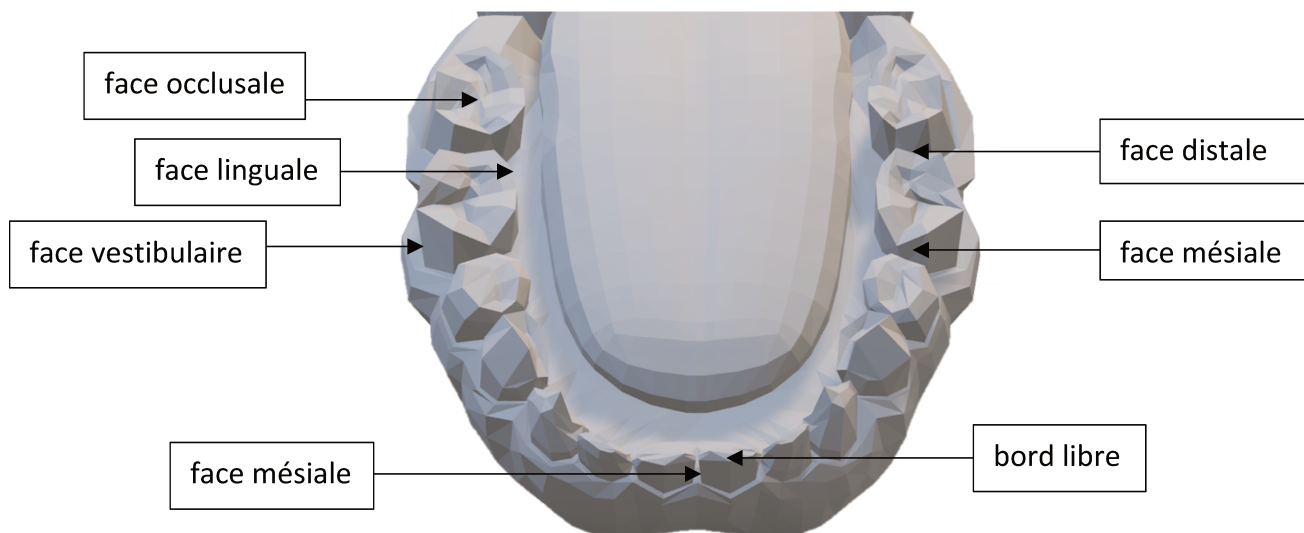


Figure 3 : Représentation schématique des différentes faces des dents.

1.5.2 Composition

Les dents sont composées de quatre tissus différents : la dentine, l'émail, le cément et la pulpe.

1.5.2.1 La dentine

La dent est majoritairement constituée d'un tissu conjonctif minéralisé, translucide et jaunâtre : la dentine. Ce tissu, constituant la masse principale de la dent, est composé d'une phase minérale (constituée de cristaux d'hydroxyapatite riche en magnésium et en carbonates) représentant 70% de son poids (pourcentage proche du tissu osseux). Elle est également composée de 20% de matrice organique et de 10% d'eau (en poids).

A noter que la dentine et l'os sont des tissus parfois difficiles à différencier sur une radiographie du fait de leur densité et composition proches. (3,15)

1.5.2.2 L'émail

La dent est recouverte d'émail au niveau de sa couronne. Ce tissu blanc et extrêmement minéralisé est le plus dur de l'organisme. En effet, sa phase minérale représente 96% de son poids ce qui en fait un tissu très résistant. Il est également composé d'une phase organique (0,4%) et d'une phase aqueuse (3,6%). « *Sa phase minérale est composée d'un empilement de monocristaux de phosphate de calcium ou hydroxyapatite de formule $Ca_{10}(PO_4)_6(OH)_2$.* » - Lasfargues et Colon (15)

L'épaisseur de l'émail est plus élevée au niveau des cuspides et des bords incisifs, sa composition très minéralisée et sa structure prismatique en font un tissu particulièrement adapté à la fonction occlusale.(3,15)

La jonction amélo-dentinaire (JAD) désigne la surface entre ces deux tissus. Notons que cette surface longtemps inaccessible car interne est désormais étudiée grâce aux technologies de reconstruction en trois dimensions (3D) (cf segmentation).

1.5.2.3 Le ciment

Au niveau de la racine, c'est le ciment qui recouvre la dentine. Il s'agit d'un tissu conjonctif avasculaire ayant une phase minérale égale à l'os : 65%. Il se compose de collagène de type I, de protéines non collagéniques (principalement la sialoprotéine osseuse et l'ostéopontine) et d'hydroxyapatite. (16–18)

Il est lui-même divisé en deux parties : le ciment acellulaire situé près de la jonction émail/dentine (proche du collet) et le ciment cellulaire ou secondaire au niveau des deux tiers apicaux de la racine, il est plus épais. (3) Tout au long de la vie d'un individu, le ciment se dépose en continu, formant des couches sur la racine dentaire.

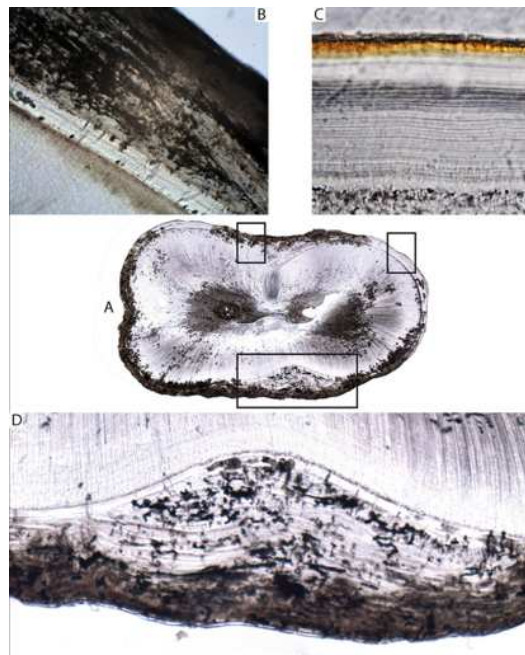


Figure 4 : Coupe d'une première molaire mandibulaire, présentant les trois types de ciments : (B) mixte, (C) acellulaire et (D) cellulaire. Photographie d'E. d'Incau. (19)

1.5.2.4 La pulpe

Enfin, le dernier tissu composant la dent est la pulpe dentaire, tissu conjonctif spécialisé enfermé dans une cavité au sein de la dentine : la cavité pulpaire (la chambre pulpaire au niveau de la couronne et le canal pulpaire au niveau de la racine). Ce tissu, composé de vaisseaux sanguins et de nerfs, n'est pas conservé et n'est visible qu'indirectement par le vide qu'il laisse à l'intérieur des dents

retrouvées. Le canal pulpaire peut présenter des canaux secondaires ou accessoires et se termine au niveau de l'apex de la dent par le foramen apical.

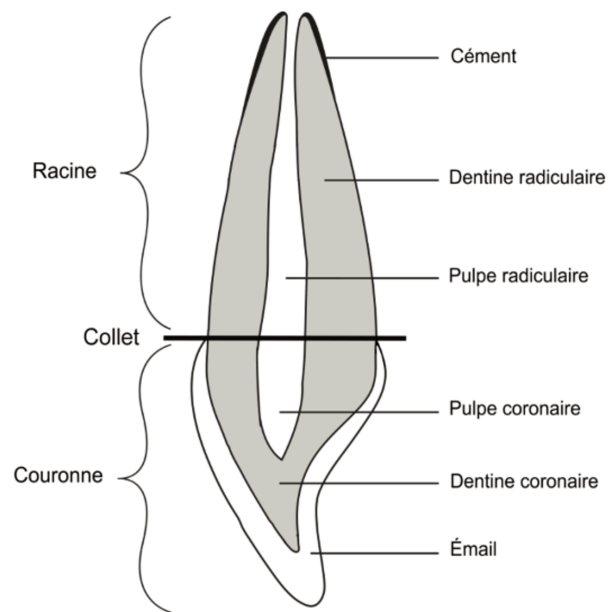


Figure 5 : Illustration des différents tissus constituant une dent par M. Le Luyet. (13)

2 Intérêt des dents en paléanthropologie

2.1 Définitions

La paléontologie est une science naturelle située au croisement entre biologie et géologie. L'étude des êtres vivants (biologie) est possible à travers les fossiles. Plusieurs techniques de géologie sont utilisées pour permettre la découverte et l'analyse de ces fossiles comme la stratigraphie ou l'analyse des sédiments. Ces procédés permettent de reconstituer les environnements ou de participer à la datation des restes fossiles.

En 2022 a eu lieu le bicentenaire de la première mention du mot paléontologie, utilisé en 1822 par Henri Ducrotay de Blainville. (20)

Après les étapes de prospection et de fouille (étape de terrain), les fossiles trouvés sont analysés en laboratoire. La description et les informations révélées par ces fossiles font l'objet d'une publication scientifique, puis elles sont diffusées au grand public dans des magazines, livres, documentaires, expositions en musée.

Cette discipline a plusieurs objectifs :

- Réaliser des reconstitutions paléontologiques : à partir d'un ou plusieurs fossiles, une reconstitution morphologique de l'individu peut parfois être réalisée. Ces reconstitutions sont souvent, au moins en partie, conjecturelles.
- Reconstituer l'histoire de l'évolution, identifier les espèces, les classer, les situer chronologiquement.
- Reconstituer les environnements, climats, dans lesquels ces espèces ont vécu.

(20)

La paléoanthropologie ou paléontologie humaine est une discipline scientifique, branche de l'anthropologie physique ou de la paléontologie, qui s'intéresse à l'évolution de la lignée humaine. Elle étudie les différentes étapes évolutives qui ont mené à l'Homme moderne *Homo Sapiens*. (21)

Même si depuis l'Antiquité l'humanité s'était déjà penchée sur ses origines, ce n'est qu'au XIXème siècle que naît véritablement cette discipline avec la découverte des premiers fossiles humains dans les années 1820. (22)

La paléoanthropologie s'appuie principalement sur l'étude de vestiges et restes fossiles humains, c'est-à-dire de débris ou d'empreintes, ensevelis dans les couches rocheuses antérieures à la période géologique actuelle, et qui s'y sont conservés. (23,24) Elle ne se limite pas seulement à l'étude du genre *Homo*, mais à l'ensemble des Hominines. (21)

La paléoanthropologie dentaire vise à étudier l'évolution de l'Homme à partir des dents fossiles, qui constituent la majorité des restes humains. (3)

De nombreux spécialistes s'intéressent à ces restes dentaires : paléontologues, paléoanthropologues, archéologues, zoologues, dentistes, généticiens. (1)

Les dents et leurs structures osseuses de soutien (maxillaire et mandibule) représentent un support d'étude de choix pour plusieurs raisons que nous allons détailler dans cette partie. Des indices indirects sont révélés par des techniques de plus en plus sophistiquées, permettant de retracer l'histoire de la vie et l'évolution de notre lignée.

2.2 Intérêt quantitatif

« De par leur composition et leur dureté, les dents sont particulièrement résistantes aux différentes agressions taphonomiques et constituent ainsi les éléments les mieux représentés dans le registre fossile » P. Bayle. (14,25–27)

En effet, comme présenté dans la première partie, la structure des tissus dentaires, notamment de l'émail (tissu le plus dur et minéralisé de l'organisme : phase minérale représentant 96% en poids) mais aussi de la dentine (70% de phase minérale), favorise la conservation de ces vestiges parfois pendant plusieurs millions d'années. « Les dents, par leur composition et leur dureté, sont extrêmement résistantes aux agressions. » (3) Ce sont les restes les plus fréquemment retrouvés dans les gisements archéologiques.

Par exemple, lors de la découverte de l'espèce *Homo naledi* en 2013 dans les grottes de Rising Star en Afrique du Sud, les dents fixées sur les maxillaires ou non constituaient près d'un quart des vestiges représentant cette nouvelle espèce.

C'est en partie l'analyse des dents qui a permis d'attribuer ces vestiges au genre *Homo* et de conclure à la découverte d'une nouvelle espèce. « Bien que primitive, la dentition est généralement petite et simple en morphologie occlusale » (1,28)

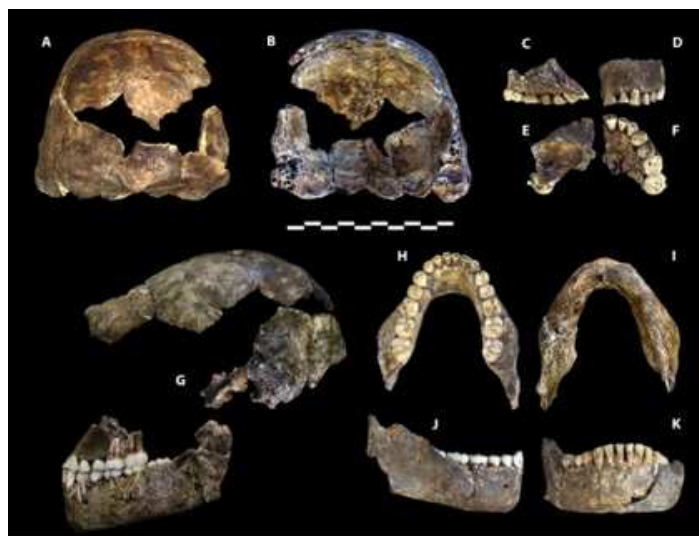


Figure 6 : Restes fossiles d'*Homo naledi*. (29)

C'est le cas également des vestiges de l'espèce *Homo luzonensis*, découverte en 2019, par une équipe pluridisciplinaire internationale, dans la grotte de Callao sur l'île de Luzon aux Philippines. Cette nouvelle espèce est décrite par un assemblage de 13 éléments fossiles dont 7 sont des dents isolées.

L'étude, publiée en 2019 dans la revue *Nature*, comporte une analyse morphologique précise des dents ayant en partie permis de différencier *Homo luzonensis* des autres espèces du genre *Homo*. (1,29)

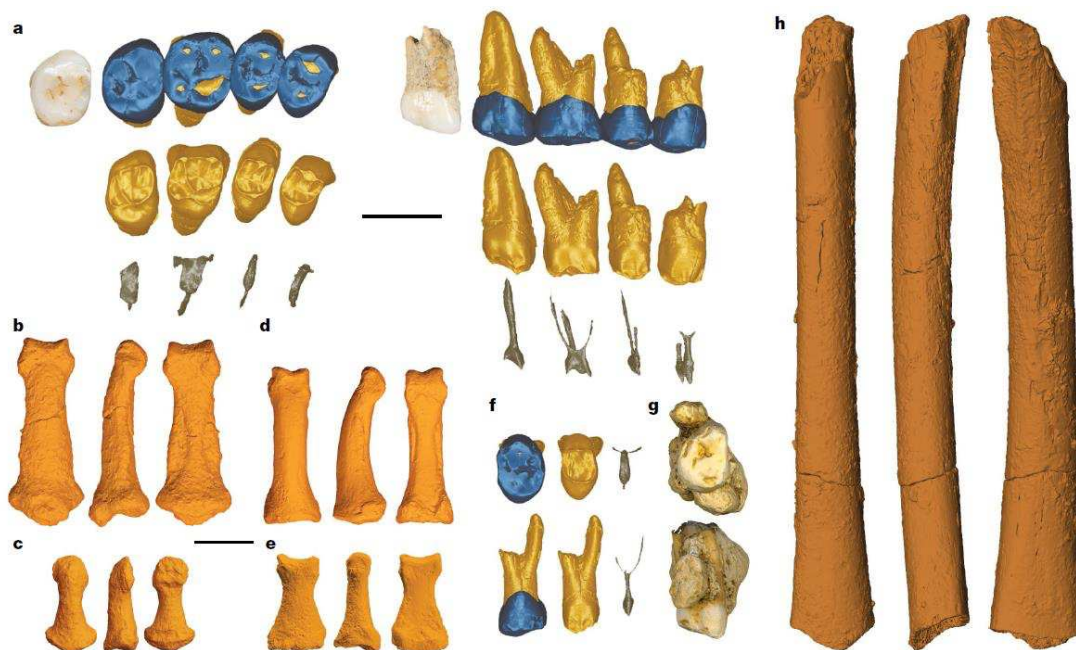


Figure 7 : Restes fossiles dentaires et osseux d'*Homo luzonensis*. (29)

En 2020, dans deux articles, l'un publié dans la revue *Nature* et l'autre dans *Nature, Ecology & Evolution*, une équipe de chercheurs a montré la présence d'*Homo sapiens* en Europe il y a environ 45 000 ans. En 2015, des os et une dent sont retrouvés dans les grottes de Bacho Kiro en Bulgarie. Les os retrouvés, trop fragmentés, n'ont pas permis d'attribuer le squelette à une espèce animale en particulier. C'est l'analyse morphologique de la dent associée à l'analyse de la séquence protéique des fragments d'os qui a permis d'attribuer ces restes fossiles à l'espèce *Homo sapiens*.

La datation de la dent au carbone 14 donne à ces vestiges un âge d'environ 45 000 ans ce qui en faisait, au moment de sa découverte, le plus vieil *Homo sapiens* connu d'Europe.

Cet individu appartient à une migration européenne qui n'était pas encore connue. Ces nouvelles données ont renforcé nos connaissances sur l'arrivée d'Homo sapiens en Europe, sur sa cohabitation et sur les mélanges qu'il a pu avoir avec l'Homme de Neandertal, a priori plus courant qu'on ne le pensait. (30,31)



Figure 8 : Deuxième molaire mandibulaire attribuée à Homo sapiens retrouvé dans la grotte de Bacho Kiro.
(31)

En 2022, une étude publiée dans *Science Advances* repousse encore à environ 54 000 ans l'arrivée d'Homo sapiens en Europe. Retrouvée à Mandrin en France, une molaire lactéale a été attribuée à Homo sapiens grâce à plusieurs analyses poussées faisant appel aux nouvelles technologies. (cf 3) (12)

En plus d'être résistantes grâce à leur constitution et ainsi fréquemment retrouvées, les dents contiennent des informations cruciales en anthropologie que ce soit dans leur structure interne ou externe. (1)

2.3 Intérêt qualitatif

La morphologie interne et externe des dents ainsi que leur développement sont des paramètres qui permettent :

- D'attribuer un squelette à une espèce connue ou non (valeur taxinomique)
Chez les animaux, la morphologie des dents est souvent adaptée à leur fonction (préhension, mastication). Il existe une correspondance entre régime alimentaire, forme des dents et espèce. (1)
- De comparer et classer les différentes espèces.
On sait par exemple que l'épaisseur de l'émail est plus fine chez L'Homme de Néandertal que chez l'Homme moderne.
Les changements survenant au-dessus du niveau de l'espèce, c'est-à-dire les changements entre différentes espèces ou liés à la spéciation sont caractérisés par le terme de macroévolution.
- D'identifier des différences entre les individus d'une même espèce, d'étudier l'évolution d'une espèce, de reconstruire les dynamiques évolutives. Les changements survenant au sein d'une même espèce sont caractérisés par le terme de microévolution.
- De contribuer à obtenir des informations sur les individus : leur âge (datation du fossile), leur sexe, leur croissance, leur mode de vie, leur alimentation, leurs interactions avec l'environnement, leur origine géographique, leur état de santé, leurs processus d'adaptation, leur âge au moment du décès... (1,20,32)

2.4 Techniques utilisées

De nombreuses techniques sont réalisées sur les dents humaines pour obtenir des informations. Ainsi sont étudiées leur morphologie, leur forme, leur taille mais aussi leur structure interne (émail, dentine, cavité pulpaire). Des études portent également sur leur formation et leur remplacement.

D'autres procédés permettent la datation des dents.

Enfin, leur usure et les constituants associés comme le tartre peuvent fournir de précieuses données.

Les fossiles font aujourd'hui l'objet d'études rationnelles, avec l'emploi de méthodes spécifiques. (20)

2.4.1 Étude de la morphologie

L'étude d'un fossile commence par la description de sa morphologie. Une description qualitative est d'abord réalisée (description avec des mots) accompagnée éventuellement d'études quantitatives (description chiffrée, statistiques). (20)

2.4.1.1 L'ASUDAS

L'ASUDAS (Arizona State University Dental Anthropology System) est un protocole utilisé pour la collecte de données sur la morphologie des dents humaines et leurs variations. Mis au point par Turner et al. en 1991, ce système permet d'assurer une procédure standardisée et d'obtenir des résultats comparables entre les différents chercheurs. (33,34)

L'ASUDAS donne, sous forme de plaques de référence, une description détaillée de 42 variations possibles de la morphologie coronaire et radiculaire des dents humaines. Les plaques illustrent les différentes formes et leur degré d'expression. Elles permettent d'aider les chercheurs à faire des observations cohérentes et à réduire les erreurs. (35)

Les données obtenues peuvent être utilisées pour identifier un individu en odontologie légale, étudier les migrations humaines, ou reconstruire l'histoire évolutive de l'Homme en recherche paléanthropologique.



Figure 9 : Plaques de référence illustrant les différentes variations anatomiques possibles d'incisives centrales, molaires et canines maxillaires (33)

Cette technique possède quelques limites, la comparaison avec les plaques dépend de l'observation et de l'expérience de l'observateur et est donc subjective. Les plaques peuvent s'user avec le temps pouvant entraîner une perte d'information. (36)

2.4.1.2 La morphométrie

La morphométrie du grec «mophê» : la forme et «metron» : la mesure (37) , consiste à étudier la morphologie d'un objet en réalisant des mesures (de distances, d'angles, de surfaces) entre différents points d'un objet. Elle est utilisée en paléontologie pour étudier les variations morphologiques des individus. C'est une étude quantitative. (20)

2.4.1.2.1 Morphométrie traditionnelle

La morphométrie traditionnelle utilise des mesures de longueurs, d'angles, de surfaces réalisées directement sur les objets étudiés ou sur des images virtuelles.

Plusieurs biais existent avec cette méthode :

- Les distances mesurées sont liées à la taille des individus
- Des objets de forme différente peuvent présenter des mesures entre deux points identiques.

Pour pallier ces limites, la morphométrie géométrique a été développée. (20,38)

2.4.1.2.2 Morphométrie géométrique

La morphométrie géométrique, qui dérive de la morphométrie traditionnelle, étudie les variations de la conformation géométrique d'un objet. La conformation géométrique correspond à la forme de l'objet indépendamment de sa taille.

Un ensemble de points repères (appelés landmarks), surfaces ou contours sont définis sur l'objet à étudier. Ces données sont collectées en deux ou trois dimensions et permettent d'obtenir la conformation géométrique de l'objet étudié. Les conformations sont alignées grâce à la technique de la superposition Procruste permettant alors leur comparaison indépendamment de leur taille, de leur localisation ou de leur orientation.

Cette évolution apporte une solution aux limites de la morphométrie traditionnelle. (36,37,39–42)

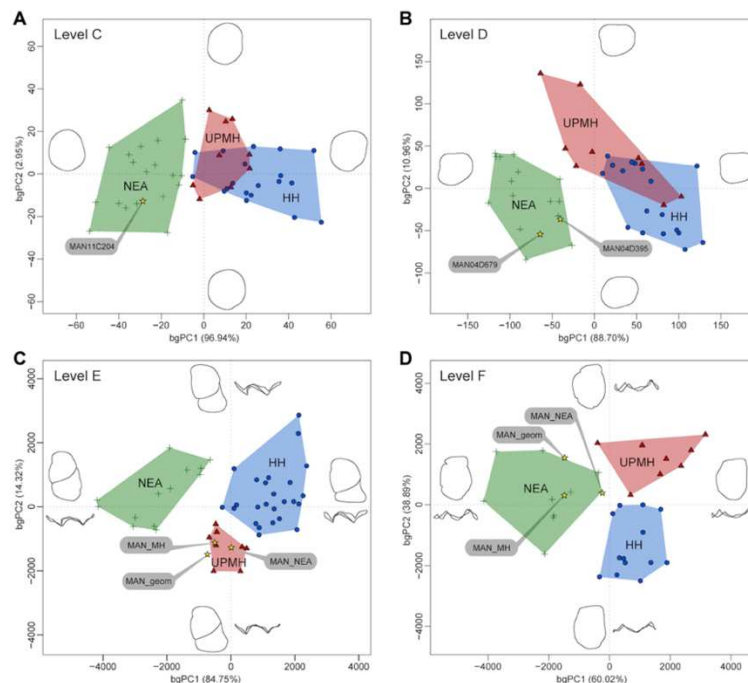


Figure 10 : Exemple d'application de la morphométrie géométrique dans l'analyse du contour d'une couronne et de la forme de la jonction amélo dentinaire d'une dent humaine. (12)

La morphométrie possède des applications à l'étude :

- De la différenciation d'espèces proches,
- Du mode de vie des individus actuels et fossiles,
- Du dimorphisme sexuel (différence entre mâle et femelle au sein d'une même espèce),
- Du développement des individus. (39)

C'est en partie l'analyse morphologique des dents d'*Homo luzonensis* qui a permis d'attribuer ce squelette à une nouvelle espèce. « *Finalement, cette combinaison de traits qui semblent archaïques sur les os et un peu plus modernes sur les dents nous a permis de définir qu'on avait affaire à une nouvelle espèce.* » - Clément Zanolli (43)

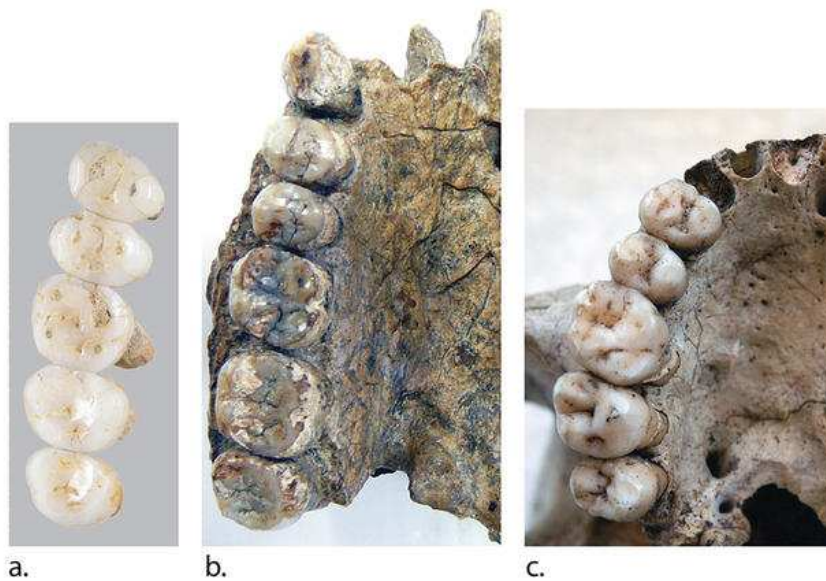


Figure 11 : Comparaison de la morphologie des dents maxillaires d'*Homo luzonensis* (A) avec *Homo erectus* (B) et *Homo sapiens* (C) (43,44)

Grâce à l'essor des techniques d'imagerie et de modélisation en trois dimensions (3D), les mesures peuvent être réalisées précisément sur des modèles virtuels. La moindre manipulation des spécimens et l'accès à des structures internes sont les principaux avantages. (cf 3)

"Aujourd'hui, avec les scanners on peut entièrement visualiser un crâne en trois dimensions à partir de ses fragments, reconstruire les parties manquantes et surtout analyser bien plus finement et de façon quantitative les variations de forme"
J.J.Hublin dans (42)

2.4.2 Étude de la taille des dents

Des études sur l'évolution de la taille des dents semblent indiquer qu'une réduction dentaire aurait eu lieu au cours du temps en partie avec l'avènement de la cuisson des aliments il y a 1,9 million d'année (MA).

Depuis Homo erectus, une réduction de la taille des dents indépendante de la taille des individus a été remarquée, sur Homo neanderthalensis et Homo sapiens ensuite. Cette réduction de la taille des molaires serait liée à l'apparition d'adaptations comportementales de l'Homme entraînant la transformation de ses aliments. La sélection naturelle aurait orienté la baisse de la taille des molaires devenues moins indispensables. (45–47)

2.4.3 Étude de l'épaisseur et des proportions des tissus dentaires

Un autre critère comparable entre les différentes espèces ou entre les individus au sein d'une même espèce concerne l'épaisseur des différents tissus ainsi que les proportions entre ces tissus.

C'est notamment ce critère qui est étudié dans une étude de Zanolli et al. (48)

Des mesures sur des clichés radiographiques en deux dimensions ont révélé une épaisseur d'émail plus fine chez les Néanderthalien en comparaison aux Hommes modernes. Plus récemment, c'est l'analyse des volumes, des épaisseurs et des surfaces en 3D qui ont permis d'expliquer ce phénomène. Les Néanderthaliens auraient un volume d'émail similaire mais réparti sur une surface de dentine plus grande (étude de la surface de la jonction amélo-dentinaire), l'émail est donc plus fin. (25,49)

L'épaisseur de l'émail est un caractère utilisé pour la classification des espèces (systématique phylogénétique). (50)

Elle peut également renseigner sur les habitudes alimentaires d'un individu.

L'apport des nouvelles technologies dans ce domaine est considérable. Initialement, les mesures pouvaient être réalisées sur des coupes entraînant l'altération du spécimen étudié.

Les techniques d'imagerie et de traitement informatique actuelles permettent de réaliser ces mêmes études sur des coupes virtuelles et donnent accès à un grand nombre de nouvelles explorations. (cf 3.3.2.3)

Ces analyses d'épaisseur de tissus sont liées à un autre type d'étude, celle de l'usure de ces tissus.

2.4.4 Étude de l'usure dentaire

Les dents sont à l'interface directe entre un individu et son environnement. L'étude de l'usure des dents permet de connaître plusieurs informations sur le mode de vie et la santé des individus étudiés.

Les dents s'usent à partir du moment où elles font leur apparition sur l'arcade en fonction de plusieurs facteurs (classe, morphologie, consistance des aliments et donc régime alimentaire). (51)



Figure 12 : Usure de la surface occlusale des dents d'un aborigène australien pré-contemporain liée à un régime alimentaire abrasif. (51)

Plusieurs classifications existent pour décrire et évaluer l'usure des dents définitives ou déciduales (Murphy 1959 ; Molnar 1971 ; Scott 1979 ; Smith 1984 ; Lovejoy 1985 ; Dawson et Brown 2013). (13)

2.4.4.1 Type d'alimentation

Certains aliments, lorsqu'ils sont machés, provoquent la formation de stries sur l'émail dentaire. Une alimentation à base de viande marque les dents par des stries verticales alors que les végétaux laissent plutôt des stries horizontales. Un régime omnivore favorisera la formation de stries obliques.

La consommation de feuilles aurait tendance à marquer les incisives de surfaces polies. (52)

2.4.4.2 Activité non masticatrice

Dans certains cas, une activité non masticatrice a pu être mise en évidence par l'étude de l'usure dentaire. En effet, la présence de sillons proximaux et d'éclats d'émail peut témoigner d'une utilisation dentaire pour d'autres tâches. Il n'y a parfois pas de conséquences étiologiques clairement reconnues mais chez certaines populations humaines comme les aborigènes d'Australie, les populations Inuits du Canada ou autres, les éclats d'émail sont causés par l'utilisation des dents telle une troisième main dans certaines tâches de la vie quotidienne. (53)



Figure 13 : Éclat de l'émail sur le bord occlusal d'une incisive latérale supérieure. Photographie au Microscopie Électronique à Balayage (MEB). (53)

Notons l'apport de la microscopie électronique à balayage pour ce type d'étude. (cf 3.1.2)

2.4.4.3 Régime alimentaire

Pour reconstruire le régime alimentaire de Néanderthaliens de divers sites et d'époques différentes, des chercheurs ont analysé les micro-usures dentaires. Les résultats de l'étude révèlent des différences dans les régimes alimentaires liées à l'environnement dans lequel ces individus ont évolué.

En comparaison avec les populations récentes, les micro-usures occlusale sur les molaires révèlent une alimentation presque exclusivement carnée pour ces groupes de Néanderthaliens, mais certains résultats suggèrent que d'autres groupes, vivant surtout dans des milieux boisés, s'alimentaient au moins en partie d'aliments végétaux. (54)

2.4.4.4 État de santé

L'hypoplasie de l'émail est un indicateur d'un stress non spécifique survenu pendant la formation des dents. Cet indicateur permet d'évaluer la morbidité des populations humaines passées et peut témoigner de périodes de pénuries alimentaires.

Une étude réalisée sur 669 couronnes dentaires de Néanderthaliens a montré qu'une hypoplasie de l'émail était présente pour environ 75% des individus indiquant un niveau de stress élevé au cours de leur développement.

Les hypoplasies sont rares sur les dents de lait et les premières molaires maxillaires, elles sont de plus en plus nombreuses sur les dents se formant plus tard. Cette information suggère que le stress était nutritionnel, commençait au sevrage et se poursuivait jusqu'à l'adolescence. (55)

Chez l'Homme de La Chapelle-aux-Saints, une absence complète de dents a été remarquée ainsi que des alvéoles refermées ce qui témoigne d'un édentement au cours de la vie de l'individu. (56)

Ces deux dernières analyses appartiennent à la sous discipline de la paléopathologie.

2.4.4.5 Estimation de l'âge

L'absence de micro-usure occlusale peut être un indice indiquant que la dent n'a pas fait son éruption au moment de la mort de l'individu et donc participer à l'estimation de l'âge de ce dernier. (53)

2.4.5 Étude du tartre

Le tartre se formait sur les dents de nos ancêtres de la même manière que sur les dents des Hommes actuels. L'analyse de ce tartre permet de nous renseigner sur les aliments ingérés par l'individu et sur sa flore bactérienne. Ce type d'étude est liée à la paléogénétique, car ce sont surtout des analyses génétiques qui sont réalisées.

La première étude génétique de la plaque dentaire a été réalisée sur le tartre présent sur quatre fossiles de dents et de mâchoires de Néanderthaliens provenant de la grotte de Spy en Belgique et de la grotte d'El Sidròn en Espagne.

Le tartre retrouvé sur les fossiles de la grotte de Spy comprenait un ADN proche de celui du mouflon, du rhinocéros laineux et de champignons. Les chercheurs en ont déduit que les Néanderthaliens de cette grotte se nourrissaient de ces deux animaux.

Ces études permettent de confirmer des études archéologiques dans lesquelles la présence de squelettes de rhinocéros était mise en évidence dans la grotte de Spy.

Dans le tartre des individus de la grotte d'El Sidròn, seul de l'ADN végétal a été découvert, notamment de champignon, de pignon de pin, d'écorce d'arbre et de mousse, concordant avec le milieu forestier de la région à l'époque.

Le régime alimentaire variait selon la région.

Chez un des individus, un analgésique (acide acétylsalicylique présent dans les feuilles de sauge ou peuplier) et un antibiotique (champignon pénicillium) semblent avoir été utilisés pour soulager un abcès dentaire dont les traces sont encore visibles

sur la mâchoire. La présence d'un parasite intestinal a également pu être mise en évidence, piégé dans la plaque dentaire calcifiée. (53,57–61)



Figure 14 : Tartre visible sur la face vestibulaire des molaires de ce Néanderthalien de la grotte d'El Sidrón. L'analyse ADN des aliments piégés dans le tartre donne un aperçu de son régime alimentaire. (61)

Dans une étude publiée en 2010 dans PNAS, l'étude de phytolithes – un microfossile végétal qui résulte de la décomposition d'une plante (62) – piégés dans le tartre de sept dents fossiles provenant de la grotte de Shanidar en Irak et de la grotte de Spy en Belgique a permis de montrer que l'Homme de Néandertal se nourrissait de plantes, de fruits et de légumes. Certaines de ces plantes sont encore consommées par les hommes modernes (palmiers dattiers, légumineuses, graines de graminées) tandis que d'autres sont simplement comestibles mais ne sont plus consommées. Des grains d'amidon récupérés également dans le tartre présent sur les dents montrent des dommages marqueurs de la cuisson.

De nombreux chercheurs suggèrent que la disparition des Néanderthaliens serait liée à un manque de diversification alimentaire avec une composante carnée importante (63). Cette étude apporte la preuve de la consommation de végétaux et une certaine sophistication de leur régime alimentaire par des techniques de cuisson afin de rendre de nouveaux aliments plus digestibles. (58)

Dans une étude publiée en 2016 dans PNAS, une équipe de chercheurs a pu apporter la preuve de la consommation de céréales domestiquées (blé : *Triticum monococcum*, *Triticum dicoccum*, orge : *Hordeum distichon*) par les populations des

Balkans 400 ans avant l'ancienne estimation et « *indépendamment du reste des avancées néolithiques telles que l'élevage* », grâce à l'enregistrement d'amidon piégé dans le tartre dentaire de dents humaines mésolithiques du site de Vlasac. Les chercheurs ont ici utilisé la microscopie polarisée pour étudier les microfossiles piégés dans le tartre (cf 3.1). Ils ont également pu en apprendre plus sur le régime alimentaire de cette population du Mésolithique, qui aurait été riche en protéines, viande, poisson mais aussi d'espèces sauvages de céréales : avoine, pois... Ces découvertes permettent d'en apprendre plus sur les relations inter communautaires entre les chasseurs-cueilleurs du mésolithique et les premières communautés néolithiques. (57,64,65)

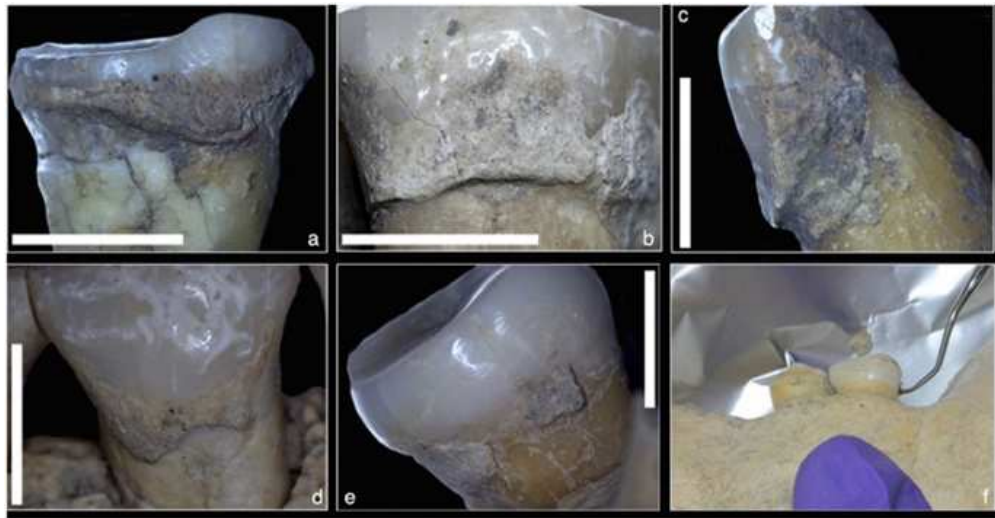


Figure 15 : Présence de tartre sur des dents d'individus des sites de Vlasac et Lepenski. (64)

D'autres analyses chimiques de la plaque dentaire de cinq Néanderthaliens avaient mis en évidence la présence de plantes sans valeur nutritionnelle mais présentant des vertus médicinales. (66)

Ces études possèdent tout de même leurs limites car les aliments ne sont pas tous conservés dans le tartre et nous ne savons pas pour quelle durée. (67)

2.4.6 Étude de la ligne néonatale

« La transition d'un environnement intra-utérin à un environnement extra-utérin laisse sa marque dans les dents de lait et les premières molaires permanentes sous la forme d'un anneau incrémental d'émail accentué appelé ligne néonatale. Cette ligne sépare l'émail formé avant et après la naissance. » (68)

Dans une étude franco-italienne publiée en 2011 dans la revue *Human Biology*, des chercheurs étudient le lien entre les conditions de gestation et d'accouchement et l'épaisseur de la ligne néonatale. L'hypothèse de départ suggère que les enfants nés par césarienne auraient une ligne néonatale plus fine que les enfants nés par voie basse. Le résultat de l'étude ne soutient pas cette hypothèse. Cependant, il existerait un lien entre la durée et les conditions de gestation et l'expression de la ligne néonatale. (68)

Le caractère invasif de ces analyses histologiques, qui nécessitent un prélèvement sur l'échantillon, fait que ce type d'étude est peu réalisé sur des populations anciennes (où les fossiles sont rares). Mais l'essor des techniques d'imagerie et d'histologie virtuelles, permettant un accès non destructif en trois dimensions à la microstructure interne des dents fossiles, ouvre de nouvelles perspectives pour ce type d'analyse comme pour la cémentochronologie (cf 2.4.7).

Ce type d'étude est encore rare mais permettrait d'en apprendre plus sur les conditions et les durées de gestation de nos ancêtres ainsi que sur les évolutions de ces paramètres au cours du temps. (69)

2.4.7 La cémentochronologie

La cémentochronologie est une technique destructrice permettant d'estimer l'âge au décès d'un individu. C'est une technique relativement simple, qui peut être mise en œuvre rapidement et pour un coût raisonnable. (19)

Le cément est le tissu recouvrant la racine des dents (cf 1.5.2.3). Son apposition annuelle est continue au cours de la vie d'un individu, formant des couches.

L'apposition commence à l'édification de la racine et se termine au décès de l'individu. (70)

Les anneaux formés peuvent différer en apparence en fonction des saisons ou d'évènements engendrant un stress important au cours de la vie du sujet étudié. Ce motif en anneau appelé annuli est visible au microscope (cf 3.1).

La technique de cémentochronologie consiste à additionner le nombre d'anneaux visibles (alternance de bandes claires et sombres) à l'âge d'édification radiculaire de la dent considérée. (70)

Cette technique est appelée Tooth Cementum Annulation (TCA) method en anglais. Il existe différents types de ciment (cf 1.5.2.3). Les ciments cellulaires ne sont pas étudiés notamment à cause de leur rôle adaptatif et de leur hétérogénéité. Le ciment acellulaire est retenu, car sa croissance serait constante durant toute la durée de son apposition. (70)

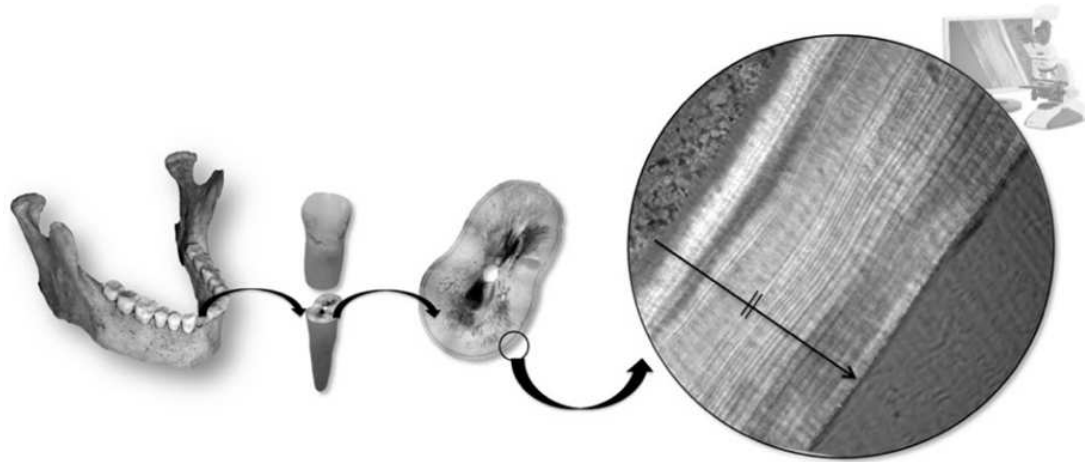


Figure 16 : Représentation schématique de la technique de cémentochronologie. (71)

La technique est différente en fonction du type de dent à étudier : actuelle ou fossile. Pour les dents actuelles, une technique de décalcification est utilisée. Les dents sont nettoyées, décalcifiées puis placées dans de la paraffine. De très fines coupes sont ensuite réalisées au microtome avant d'être colorées afin de rendre plus visibles les anneaux de ciment. Ces anneaux sont ensuite analysés et comptés sous microscope. (72)

Cette méthode est tout de même critiquée. Un des principaux inconvénients, notamment pour son utilisation en paléontologie, est la destruction de l'élément anatomique. De plus, le phénomène physiologique à l'origine du dépôt périodique

du ciment n'est pas encore complètement élucidé. (73) Une meilleure connaissance des dépôts de ciment acellulaire permettrait de mieux estimer les variations possibles et la précision de cette technique.

Il faut également un opérateur expérimenté pour espérer avoir une estimation précise. (19)

Un autre inconvénient de cette technique concerne son utilisation pour des dents anciennes. Le ciment est le tissu le moins minéralisé de la dent et s'altère donc plus vite que l'émail ou la dentine. Les altérations taphonomiques peuvent parfois rendre cette technique inutilisable dans cette discipline. (70)

Le ciment est très rarement préservé sur les dents fossiles. (27)

L'essor de nouvelles techniques d'imagerie telles que la microtomographie par rayonnement synchrotron permettrait de pallier certaines limites en rendant possible l'exploration non destructrice du ciment.(cf 3.3.1.4.2) (74)

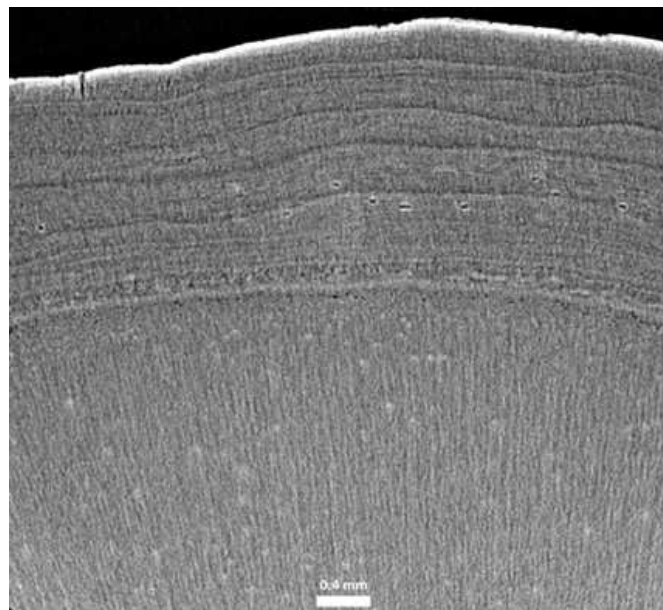


Figure 17 : Coupe histologique virtuelle obtenue grâce à la microtomographie par rayonnement synchrotron permettant ensuite l'utilisation de la méthode TCA de manière non invasive. (74)

2.4.8 *Étude des isotopes*

Des isotopes sont des atomes possédant le même nombre de protons et d'électrons mais ayant un nombre de neutrons différent. (75)

Ils peuvent être radioactifs, dans ce cas ils servent à dater les matériaux organiques et sont appelés radionucléides. Ils peuvent également être stables et renseigner sur l'alimentation d'un individu, son écosystème, la saison à laquelle a eu lieu un événement de sa vie ou encore son origine géographique.

Ainsi certains éléments comme le carbone, l'oxygène, l'azote, le calcium existent sous plusieurs formes. Ils sont retrouvés dans l'eau, les végétaux, les tissus animaux.

2.4.8.1 *Étude des isotopes radioactifs*

L'étude d'isotopes radioactifs permet de dater de manière fiable les restes humains. Cette datation est essentielle pour connaître le « *contexte chronologique* » de l'individu auquel appartient les restes retrouvés (76). La datation au carbone 14 (^{14}C) permet de dater les éléments qui en contiennent. Elle est généralement réalisée sur des tissus organiques directement retrouvés comme les ossements (sur le collagène des os) ou les tissus dentaires (émail, dentine). (76,77) Elle peut également être réalisée sur les matériaux à proximité des restes fossiles retrouvés (bois, terre, végétaux, roches, outils).

2.4.8.1.1 *Datation au carbone 14*

Le carbone est présent dans la nature sous la forme de trois isotopes abondants : le carbone 12 (^{12}C), le carbone 13 (^{13}C) et le carbone 14 (^{14}C). Deux sont stables (^{12}C et ^{13}C), le ^{12}C étant très majoritaire (99%), c'est cet isotope qui est habituellement désigné lorsque l'on parle de carbone stable.

Le ^{14}C est le seul isotope radioactif.

Le ^{14}C est formé chaque jour à partir de l'azote (^{14}N) dans la haute atmosphère, par les rayonnements cosmiques et les vents solaires (78). Du ^{14}C présent dans l'air, l'eau et les organismes vivants tend à redevenir du ^{14}N au cours du temps. Il existe

dans l'environnement une proportion équilibrée entre ^{12}C et ^{14}C . Sur Terre elle est d'environ un atome de ^{14}C pour 1000 milliards de ^{12}C .

Un être vivant, par la respiration, l'alimentation, l'hydratation ou toute autre interaction avec l'environnement absorbe du ^{12}C et du ^{14}C chaque jour aboutissant à un équilibre entre les deux isotopes (similaire à celui existant dans l'atmosphère à l'époque où il a vécu) au sein de ses tissus. (79)

À sa mort, l'individu cesse d'absorber du ^{14}C , la quantité de ^{12}C reste la même tandis que le ^{14}C redevient progressivement du ^{14}N .

La vitesse à laquelle le ^{14}C redevient du ^{14}N est connue. Il s'agit de la demi-vie de l'isotope. Le ^{14}C diminue de moitié après environ 5730 ans, sa demi-vie. C'est l'étude de la proportion entre ^{14}C et ^{12}C au sein des tissus qui permet de dater un spécimen. S'il ne reste que la moitié du ^{14}C présent initialement dans ses tissus, alors l'individu est mort il y a 5730 ans.

La mesure de la quantité de ^{14}C est réalisée grâce à un spectromètre de masse, en comptant directement le nombre d'atomes de ^{14}C , ou en mesurant la radioactivité de l'échantillon avec un détecteur à scintillation. Le rapport $^{14}\text{C} / ^{12}\text{C}$ permet ainsi de déterminer « l'âge carbone » de l'échantillon.

Pour obtenir « l'âge calendaire » de l'échantillon, il faut se référer à une courbe de calibration. La quantité de ^{14}C dans l'atmosphère n'est pas constante au cours du temps, ainsi les organismes n'absorbent pas la même quantité de ^{14}C en fonction de l'époque durant laquelle ils ont vécu. Cette courbe permet d'obtenir une estimation de l'âge en corrigeant ce biais. Elle a été réalisée grâce à des échantillons de référence dont on connaît la quantité de ^{14}C à un l'âge réel et est régulièrement mise à jour.

Une limite existe concernant l'ancienneté du spécimen retrouvé. S'il est trop ancien, il se peut que la concentration résiduelle en ^{14}C soit trop faible pour être mesurée. Cette limite se situe environ à 50 000 ans. (80)

2.4.8.2 *Étude des isotopes stables*

Plusieurs autres isotopes, stables, permettent d'obtenir des informations sur un individu.

L'oxygène (O) présent dans l'eau existe sous différentes formes. Principalement deux isotopes (^{16}O et ^{18}O) sont retrouvés dans des proportions différentes selon la température, et peuvent donc renseigner sur la saison ou le climat. (77,81)

L'étude des isotopes de carbone et d'azote peut renseigner sur le régime alimentaire d'un individu et sur son origine géographique.

2.4.8.2.1 *Origine géographique*

Les différents isotopes stables du carbone (C) et de l'azote (N) sont absorbés par les végétaux. Ces plantes peuvent à leur tour être consommées par les animaux. Les plantes n'absorbent pas le carbone de la même manière en fonction de leur origine géographique. Les plantes des climats tempérés et tropicaux par exemple, n'ont pas le même ratio isotopique.

2.4.8.2.2 *Régime alimentaire*

Une forte proportion d'azote 15 (^{15}N) montre la consommation d'aliments lactés. (52)

Le suivi des isotopes stables du ^{13}C et ^{15}N du collagène osseux a permis à des chercheurs de reconstruire le régime alimentaire d'une population de Néanderthaliens qui aurait une alimentation carnée composée principalement de grands mammifères. (82)

La proportion en ^{13}C dans les fossiles de deux sites Sclayn et Marillac suggère une alimentation presque exclusivement carnée de ces individus. (83)

L'azote et le calcium (Ca) peuvent aussi renseigner sur le niveau trophique de l'individu, sa place dans la chaîne alimentaire. (77,83,84)

Les isotopes du strontium peuvent renseigner sur l'origine géographique d'un individu et aider à comprendre les migrations humaines. En effet, le strontium est absorbé par les êtres vivants et la proportion entre ses isotopes diffère selon la région géographique. (77,81,85)

Le rapport strontium Sr/Ca calcium est élevé chez les plantes, diminue progressivement chez les herbivores et encore plus fortement chez les carnivores. (52)

Les différents isotopes du calcium (Ca) permettent de connaître la place d'un animal dans la chaîne alimentaire. Jusqu'ici, les chercheurs essayaient de déduire, en fonction de la forme des dents, la place d'une espèce éteinte dans la chaîne alimentaire. Grâce à une nouvelle méthode de mesure des proportions d'isotopes stables du calcium, des chercheurs de l'ENS et du CNRS de Lyon, ont pu connaître la place d'une espèce éteinte de mosasaure. Les proportions d'isotopes stables du calcium au sein des dents et des os varient en fonction de la place d'un animal dans la chaîne alimentaire.

En comparant ces proportions au sein de dents fossilisées de différentes espèces, les chercheurs ont pu découvrir que les petits animaux marins (poissons, tortues) avaient les mêmes proportions qu'aujourd'hui. Les proportions au sein des dents de mosasaure sont similaires à celles des grands prédateurs marins actuels (grand requin blanc), ils étaient donc au sommet de la chaîne alimentaire. (84,86–88)

Cette méthode a également été expérimentée sur des dents de lait humaines. Les isotopes stables du calcium des dents gardent une signature spécifique de certains aliments. C'est le cas du lait maternel. Plus l'alimentation est riche en lait et plus le calcium des dents est riche en isotopes légers. En analysant les proportions d'isotopes dans l'émail d'une dent de lait, les chercheurs pourraient estimer l'âge au sevrage de l'individu. (87,88)

« Cette méthode inédite pourrait permettre aux anthropologues de mieux comprendre les structures communautaires des hominidés. » (88)



Figure 18 : "Canine de lait humaine dont l'émail a été prélevé pour réaliser des mesures des proportions des isotopes du calcium." (87,88)

Dans un article publié dans *Science Advances* en 2018, une équipe de chercheurs australiens a utilisé ces différentes applications d'étude d'isotopes pour mieux connaître le mode de vie d'un enfant Néanderthalien. A partir d'une molaire, les études des ratios de différents isotopes ont permis d'obtenir des informations sur la saison de sa naissance, son origine géographique et son alimentation. Une contamination au plomb a également été mise en évidence. (89)

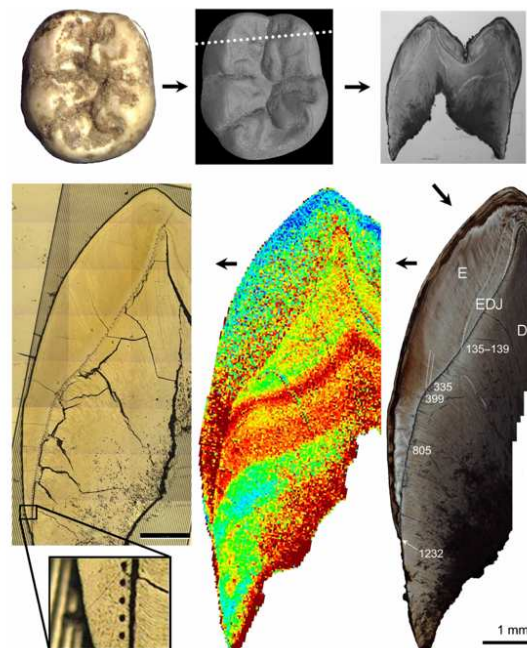


Figure 19 : Différentes analyses réalisées sur une molaire : photographie, scan micro CT, coupe histologique virtuelle, analyse des isotopes de l'oxygène... Illustration tirée de l'article publié dans *Science Advances*. (89)

2.4.8.3 Intérêt des os et des dents

- L'os est un tissu qui se renouvelle, ainsi les études portant sur les isotopes de ce tissu renseignent sur les 10 à 15 dernières années de vie d'un individu.
- Au contraire l'émail se forme lors des premières années de vie et ne se renouvelle pas. Les études portées sur les isotopes de l'émail renseignent donc sur les premières années de vie d'un individu. (77)

L'émail dentaire est très riche en calcium (environ 40%), ce qui en fait un matériel de choix pour l'étude de la proportion d'isotopes de cet élément. (86)

La multitude d'applications à l'étude de ces isotopes les rend particulièrement utile et offre de nouvelles perspectives pour la recherche en paléontologie et en anthropologie (77,90,91)

Les différentes signatures isotopiques du strontium permettent de renseigner sur l'origine géographique et les déplacements des individus. L'émail dentaire incinéré et donc exposé à de fortes chaleurs, notamment lors de rites funéraires par crémation, pourrait fournir des isotopes de strontium exploitables. Les restes humains incinérés, résultants de pratiques funéraires mondialement répandues, resteraient donc analysables par cette méthode. (85)

2.4.9 Autres techniques de datation

2.4.9.1 La datation ESR (Electron Spin Resonance)

La méthode de datation ESR est une méthode paléodosimétrique. Les échantillons sont utilisés comme des dosimètres naturels ayant enregistré les radiations depuis leur formation. Cette méthode est basée sur l'accumulation, dépendante du temps, d'électrons dans le réseau cristallin de certains minéraux.

Les âges ESR sont calculés à partir de l'équation d'âge :

$$D_e = \int_0^t D(t) dt$$

Figure 20 : équation d'âge, avec D_e la dose équivalente (Gy),
 $D(t)$ la dose annuelle (Gy/an), t l'âge de l'échantillon (ans)

D_e correspond à la dose équivalente ou dose totale de radiation appelée paléodose. Elle est fonction de la dose de radiation reçue par l'échantillon annuellement et du temps. Pour réaliser une datation ESR, il faut déterminer ces deux paramètres. (92,93)

L'analyse de l'émail des dents est l'application de datation ESR la plus courante en archéologie. Cette méthode de datation fournit des informations précieuses pour notre compréhension de l'évolution humaine. La plage de datation couvre environ les 500 000 dernières années ce qui est bien supérieur à la datation au carbone 14 (environ 50 000 ans). (94)

2.4.9.2 Datation stratigraphique

La stratigraphie (du latin *stratum*, couverture, et *graphie*, écriture) est une discipline scientifique qui étudie la succession des différentes couches géologiques. (95)

Une méthode de datation dérive de cette discipline. L'étude de la répartition de fossiles stratigraphiques (fossile caractéristique d'une époque géologique) au sein d'une couche permet la datation relative de celle-ci et donc des fossiles qui s'y trouvent.

Les fossiles de conodontes sont particulièrement utiles en biostratigraphie car très nombreux et évoluant rapidement. (96)

Du grec *konos*, cône et *odous*, dent soit dent en forme de cône, ces fossiles appartiendraient à une classe d'animal préhistorique. Il ne s'agirait pas de dent à proprement parlé mais d'un élément de leur squelette situé dans la cavité buccale et l'œsophage. Ces fossiles sont tout de même constitués d'émail et de dentine.

Leur taille est variable mais souvent très petite nécessitant l'observation au microscope (cf 3.1)

2.4.10 Zooarchéologie par spectrométrie de masse (ZooMS)

La zooarchéologie par spectrophotométrie de masse ou ZooMS est une technique rapide et peu coûteuse qui permet d'attribuer un reste fossile osseux à une famille. Cette technique repose sur l'analyse des peptides du collagène. Le nombre et la nature de ces peptides sont caractéristiques d'une famille.

Ainsi lorsque les ossements retrouvés sont trop altérés pour être attribués à une famille grâce à leur morphologie, cette technique permet de s'assurer qu'il s'agit d'os d'hominidés. (97,98)

Cette technique peut par exemple être utilisée pour attribuer à une espèce un fragment de mandibule ou de maxillaire trop altéré ne permettant pas l'attribution par sa morphologie.

2.4.11 Analyse génétique, paléogénétique

Pour réaliser une analyse génétique, l'ADN doit préalablement être extrait des fragments osseux ou des restes dentaires, parfois de la plaque dentaire minéralisée (cf 2.4.5).

Cette technique récente n'a pas toujours été envisagée. C'est pourquoi de nombreux vestiges, dont la découverte remonte à plusieurs dizaines d'années, ont été manipulés plusieurs fois sans que les chercheurs ne pensent à préserver l'ADN de surface pour une future analyse génétique. Les vestiges anciens sont souvent contaminés par l'ADN des chercheurs les ayant manipulés. Il faut donc purifier cet ADN avant de l'analyser.

La cavité pulpaire, enfermée au cœur de la dent, est particulièrement intéressante car est moins soumise aux contaminations externes. L'ADN contenu dans les débris organiques de cette cavité peut être séquencé afin d'attribuer la dent à une espèce et de dater le spécimen. L'extrême minéralisation des tissus dentaires serait aussi un avantage majeur dans la protection à la contamination de l'ADN. (99)

L'ADN serait encore exploitable sur les dents ayant subi une incinération. (100,101)

L'étude de l'ADN fossile a d'abord été réalisée sur les tissus mous, mais sa conservation serait meilleure au niveau des tissus durs. C'est pourquoi les études se sont orientées vers les os (102,103) et les dents. (104,105) (101)

La génétique offre de nouvelles perspectives aux anthropologues, elle permet d'étudier les relations entre les différentes espèces humaines, les rencontres, les séparations et les métissages. Elle permet d'obtenir des informations sur le mode de vie et l'alimentation des individus.

« Aujourd'hui, la dent est le meilleur outil pour la recherche d'ADN ancien » - L. Calvo et al. (101,104)

La paléogénétique permet également de découvrir de nouvelles espèces comme par exemple l'Homme de Denisova, identifié en 2010 par analyse génétique d'une phalange. Aucune autre analyse n'aurait permis de savoir que ce fragment osseux appartenait à une nouvelle espèce.

Le séquençage a même permis d'obtenir des informations sur le sexe de l'individu, sur son âge. Il a mis en évidence que son père était un dénisovien et sa mère une néandertalienne, et que ces deux lignées s'étaient séparées il y a 500 000 à 600 000 ans. (106)

3 Apport des techniques actuelles de photographie, d'imagerie, d'ingénierie et de traitement informatique.

Le fait de découvrir un fossile est une chose extraordinaire, plusieurs conditions sont nécessaires : l'organisme mort ne doit pas être détruit ou cassé pendant des millions d'années, la couche sédimentaire qui le contient doit être ramenée en surface et enfin le spécimen doit être trouvé par les paléontologues. (20)

Les dents sont des éléments nombreux à l'échelle du registre fossile actuel mais elles restent des vestiges rares et donc précieux. Bien que résistantes par leur composition, leur manipulation à des fins d'observation directe, d'analyse, de reproduction, de moulage et d'exposition est néanmoins risquée.

À cette problématique s'ajoute la demande croissante d'accès aux spécimens originaux et aux collections pour des enquêtes de plus en plus détaillées.

Au cours des dernières années les progrès des techniques d'imagerie et de traitement informatique ont permis de répondre à cette problématique et ont rendu possible de nouvelles analyses. (26,32)

3.1 La microscopie

L'utilisation d'un microscope peut être utile pour deux raisons :

- Observer et décrire précisément un fossile de petite taille.
- Observer plus précisément la surface d'un fossile.

3.1.1 Le microscope optique

Pour observer des microfossiles dentaires (ex : conodontes) au microscope optique, une préparation est nécessaire. De fines tranches de roche contenant les fossiles sont réalisées grâce à une succession d'étapes de découpe et de polissage.

La lame mince obtenue peut être observée au microscope optique.

Cette technique détruit l'échantillon observé (technique destructrice).

3.1.2 Le microscope électronique à balayage (MEB)

Le microscope électronique à balayage (MEB), utilisé en paléontologie depuis les années 60, permet l'étude des microfossiles comme les dents de petits mammifères. (107)

Il permet d'étudier des fossiles de l'ordre du millimètre jusqu'à quelques micromètres, permettant l'analyse de spécimens trop petits pour être finement décrits au microscope optique ou à l'œil nu. (20)

Il permet également d'étudier la surface des tissus dentaires ou la structure des tissus de manière extrêmement précise.

Cette technique permet de conserver l'échantillon observé dans le cas où il s'agit d'une dent isolée (technique non destructrice). Notons tout de même que la taille des échantillons pouvant être placés dans la cuve du MEB est de 150 millimètres. Ainsi, pour être analysée au MEB, une dent devra être séparée de son support osseux. Cette technique devient donc destructrice pour l'échantillon. Une mandibule complète ne peut pas être analysée par cette technique. (20,108)

Depuis quelques années, un nouveau type de microscope est de plus en plus utilisé en paléontologie. Le microscope numérique ouvre de nouvelles portes en matière d'analyse et de diffusion des connaissances. (cf 3.3.1.3) (20,109)

3.2 La Photographie

La photographie occupe une place importante en paléontologie. Le photographe scientifique produit des images qui mettent en valeur le spécimen tout en respectant la vérité de l'objet. Ces images serviront à l'illustration des travaux de recherche en étant les plus riches et précises possibles.

Plusieurs techniques de préparation ou de photographie peuvent être utilisées pour magnifier un fossile : utilisation d'oxyde de magnésium, application de graphite, éclairage avec de la lumière UV. (20)



Figure 21: Crâne du plus vieil Australopithèque jamais mis au jour photographié par Dale Omori. (110) (Haile-Selassie et al. 2019) (Éthiopie : découverte du plus vieux crâne d'Australopithèque jamais mis au jour)



Figure 22 : Autre type de photographie, plus fantaisiste et moins fidèle à l'objet, réalisée par le même photographe. Photographie de Dale Omori.

3.3 La 3D

Le terme 3D, abréviation de l'expression « trois dimensions » caractérise la façon dont nous percevons l'espace qui nous entoure en termes de longueur, largeur et profondeur.

Le terme 3D est également employé pour désigner la représentation en image de synthèse ou les images numériques. (111,112)

3.3.1 Création de modèles 3D

3.3.1.1 La numérisation surfacique

La numérisation surfacique est une technique qui permet d'obtenir, à l'aide d'un scanner surfacique, un modèle en 3D d'un fossile.

Le scanner surfacique émet un rayonnement qui se réfléchit sur la surface de l'objet. Les coordonnées de milliers de points sont enregistrées et un modèle virtuel en 3D est généré.

La numérisation est relativement rapide. Les modèles 3D sont archivés et constituent une collection virtuelle de spécimens.

Ces fossiles sont scannés dans un but de recherche, de conservation et de diffusion/sensibilisation du public. (20,113)

Seules les structures anatomiques externes sont enregistrées, d'autres techniques permettront d'accéder aux structures internes, mais elles sont plus coûteuses et plus difficiles à mettre en place.

3.3.1.2 La photogrammétrie

La photogrammétrie consiste à traiter informatiquement un ensemble de photographies prises autour d'un spécimen. Une reconstruction de l'objet en 3D est possible en exploitant la redondance de points entre les photos. (20)

C'est une technique simple d'acquisition de modèle 3D surfaciques. Elle est également applicable à des données de terrain en plus du matériel fossile, c'est-à-dire qu'il est possible d'enregistrer le fossile dans son environnement au cas où il serait abimé lors de son extraction. (114)



Figure 23: Crâne du spécimen Qafzeh6 modélisé par photogrammétrie. (115)

3.3.1.3 La microscopie numérique

Un microscope numérique est un instrument qui permet de produire des images numériques nettes et d'une grande précision à partir d'un système optique.

Ces microscopes permettent une observation directe et précise des structures anatomiques et de l'organisation cellulaire d'un objet.

Les applications sont nombreuses dans le domaine des sciences naturelles. En paléontologie, cette technologie permet :

- La production d'images de qualité pour des publications, en deux ou trois dimensions.
- La réalisation d'études et comparaisons anatomiques rapides sur des fossiles de petite taille.
- La production d'images fortement agrandies (objet $<5\mu\text{m}$) avec une réduction de la résolution.
- La diffusion à distance avec le grand public et la communauté scientifique.

(20,109,116)

3.3.1.4 *L'imagerie*

3.3.1.4.1 *Microtomographie par rayonnement X (μCT)*

3.3.1.4.1.1 *Présentation*

La microtomographie par rayonnement X ou micro scanner est une technique d'imagerie radiographique non destructive permettant de produire des modèles informatisés en 3D d'un objet. Elle permet un accès non destructif et à haute résolution aux structures internes et externes des vestiges scannés grâce à un CTscan. (117)

3.3.1.4.1.2 *Principe de fonctionnement*

Son fonctionnement repose sur l'absorption différentielle des rayons X par les matériaux qui composent l'échantillon en fonction de leur densité. Un faisceau de rayon X traverse l'objet en tournant autour à 360 degrés et permet d'obtenir des radiographies sous forme de coupes ou tranches virtuelles.

3.3.1.4.1.3 *Protocole :*

- 1) L'objet est récupéré dans son lieu de stockage (réserve, musée...). Il est conditionné, afin de ne pas être abimé pendant le transport.

- 2) Une fois arrivé au laboratoire, l'échantillon est positionné dans une mousse rigide, peut absorbante au rayon X, sa stabilité est vérifiée.
- 3) L'échantillon est mis en place dans le micro scanner.
- 4) L'objet est placé dans le champ de vue et les paramètres sont réglés.
- 5) Le scan est lancé et dure environ 1h30 mais varie selon la taille de l'objet.
- 6) Une fois le scan terminé, l'objet est soigneusement rangé et conditionné puis il est ramené à son lieu de stockage.
- 7) On obtient de nombreuses radiographies, sous forme de coupes avec différents niveaux de gris permettant de distinguer les différents tissus.
- 8) Les données sont envoyées au laboratoire afin de procéder à leur traitement informatique.

(117)

Le traitement informatique est obligatoire pour exploiter les données obtenues. (cf 3.3.1.5)

Les coupes sont intégrées dans des logiciels de segmentation comme par exemple Avizo, afin de séparer les différents tissus visibles en fonction des niveaux de gris et de créer un modèle 3D. (cf 3.3.1.6)

3.3.1.4.1.4 Intérêts

- L'intégrité des objets est respectée et la création d'un modèle virtuel permet à la fois de créer une immortalisation virtuelle du spécimen mais également de limiter les manipulations excessives de cet objet lors des études futures.
- Cette technique peut être appliquée à des spécimens ou à des parties de spécimens incrustés dans la matrice rocheuse qui étaient jusqu'à présent impossibles à visualiser autrement. (118) En paléontologie dentaire, cela permet d'accéder aux racines des dents encore présentes dans leur alvéole et de les étudier.
- La précision de cette technique rend possible la réalisation d'une analyse très fine, la reconstruction de l'objet étant fidèle et complète.

- Grâce aux avancées de la tomodensitométrie au cours de la dernière décennie, il est possible de numériser de plus en plus rapidement des objets plus gros et plus denses.
- La technique peut aider à réaliser des études comparatives à grande échelle et non destructives de fossiles. (118)
- Cette technique permet la conservation des modèles 3D, la diffusion plus large de ces modèles et leur moindre manipulation.
- Elle permet de réaliser des bases de données, de partager avec la communauté scientifique, les étudiants ou le grand public.

« La micro-CT et d'autres techniques d'imagerie 3D sont de plus en plus utilisées pour faciliter le partage de données entre scientifiques et pour des projets d'éducation et de sensibilisation. Il est donc possible d'inaugurer une nouvelle ère de collaboration scientifique mondiale et de communication publique en utilisant des spécimens dans les collections de musées. » - Abel et al. (118)

3.3.1.4.2 Les accélérateurs de particules de type synchrotron : microtomographie par rayonnement synchrotron (SR- μ CT)

Un synchrotron est un instrument électromagnétique destiné à l'accélération de particules élémentaires. Des électrons sont entraînés à très haute vitesse à l'intérieur d'un anneau afin de produire un rayonnement synchrotron.

La lumière synchrotron, dont le spectre d'émission s'étend de l'infrarouge aux rayons X, permet l'accès à de nombreuses expériences.

Les applications sont multiples dans plusieurs domaines : physique, biologie, chimie, géologie, industrie, médecine, paléontologie.



Figure 24 : l'ESRF situé à Grenoble en France. (www.esrf.eu)

L'European Synchrotron Radiation Facility (ESRF), inauguré en 1994 à Grenoble en France est l'un des plus importants synchrotrons au monde. C'est un bâtiment de plus de 300 mètres de diamètre et d'une circonférence de 844 mètres accueillant plus de 7000 scientifiques (dont des paléontologues) et partagé entre 19 pays.

Les rayons produits à l'ESRF sont beaucoup plus intenses que ceux produits par les appareils d'imagerie médicale ou de laboratoire. Il s'agit des rayons X les plus intenses produits au monde, 100 milliards de fois plus brillants que ceux utilisés pour des radiographies conventionnelles. (119) Cette puissance présente plusieurs avantages :

- Tomographie à rayon X d'une précision extrême (supérieure aux CT scan conventionnels) : microtomographie par rayonnement synchrotron (SR- μ CT).

Cette précision permet une analyse très fine des structures internes et externes des vestiges radiographiés.

- Accès avec précision aux structures internes des fossiles permettant la paléohistologie virtuelle. (cémentochronologie virtuelle par exemple)
- Analyse des fossiles non destructrice
- Constitution d'une importante base de données d'images tridimensionnelles virtuelles.

La constitution d'une telle base de données permet un partage des vestiges entre scientifiques mais également avec le grand public. En plus de constituer une sauvegarde virtuelle du spécimen, elle permet une moindre manipulation du fossile fragile lors des différentes études.

Cette base de données est directement consultable en ligne : <http://paleo.esrf.eu/>

Quelques exemples de l'application de l'imagerie par rayonnement synchrotron en paléoanthropologie dentaire :

- Smith et al. 2006 : Étude de l'épaisseur, du volume et du développement de l'émail de la couronne des molaires des hominines fossiles. Étude visant à déterminer si des différences sont décelables dans ces caractéristiques entre l'Homme anatomiquement moderne (AMH) et les populations actuelles vivantes. (120)

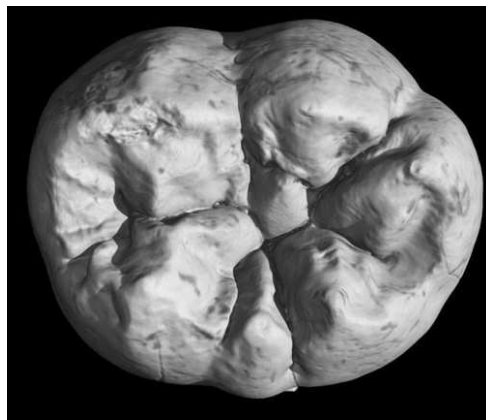


Figure 25 : Image virtuelle de la première molaire inférieure droite (RLM1) (EQ H5) issue de l'étude de Smith et al. 2006 (120)

- Le Cabec et al. 2015 : Étude des périkyrmies en surface d'une URI2 (Incisive latérale supérieure droite) et URC (canine supérieure droite). (121)



Figure 26 : URI2 et URC de l'individu *Australopithecus africanus* MLD11-30 issues de l'étude de Le Cabec et al. 2015 (121)

Découvert en 2001 au Tchad par une équipe de l'université de Poitiers dirigée par le professeur Michel Brunet, *Sahelanthropus tchadensis*, plus connu sous le nom de Toumaï, est considéré comme le premier hominidé de la famille humaine. Ce crâne vieux de 7 millions d'années a été étudié sous tous ses aspects grâce aux techniques d'imagerie de l'ESRF. C'est en partie l'analyse dentaire qui a permis d'obtenir des informations sur son mode de vie ou ses habitudes alimentaires. *"Although the size of its braincase is chimp-like, it has a short and straight face and small canine teeth used in its apical extreme, more like humans", "the structure of the jaws or the enamel in the teeth can certainly explain the feeding habits of Toumaï."* (122)



Figure 27 : Crâne de Toumaï. (esrf.fr) (122)

Une autre application du rayonnement synchrotron en paléontologie concerne la caractérisation physico chimique des fossiles. Il est possible d'observer la distribution en éléments chimiques, minéraux, moléculaires de certains fossiles. L'imagerie de ces signaux physico chimique permet ensuite d'obtenir des informations sur l'anatomie d'un fossile, sa biologie ou son écologie. (20)

Un deuxième synchrotron est hébergé par la France, le synchrotron SOLEIL en région parisienne. Plus petit que l'ESRF, avec 354 mètres de circonférence, le synchrotron SOLEIL produit un rayonnement moins intense mais il permet tout de même l'acquisition de données d'imagerie très variées.

En comparaison aux autres techniques de modélisation 3D, l'imagerie a pour avantage de permettre l'accès aux structures internes des vestiges de manière non destructrice.

Cependant le coût et la mise en place de telles explorations sont bien plus contraignants.

3.3.1.5 *Traitement informatique*

Le traitement informatique des images acquises est une étape obligatoire pour étudier ces données.

À la suite des différentes techniques d'acquisition précédemment décrites, on obtient un grand nombre d'images, de points ou de coupes avec différents niveaux de gris.

Plusieurs étapes sont nécessaires pour passer de ces données de base à des reconstructions analysables.

Toutes les technologies aboutissant à des reconstructions en 3D nécessitent une étape de traitement informatique. Ce traitement est réalisé automatiquement par des logiciels ou par des opérateurs.

Limites :

Les progrès en imagerie permettent la réalisation d'analyses très fines et précises. La limite est maintenant reportée au niveau du traitement de ces images, représentant des fichiers très compliqués à traiter, que ce soit en termes de matériel (besoin d'ordinateurs très puissants) ou de temps (téléchargement des données, copies...).

« Le principal facteur limitant des analyses basées sur la tomodensitométrie n'est plus la numérisation, mais les obstacles liés au traitement des données » - Abel et al. (118)

3.3.1.6 Segmentation

La segmentation d'une image consiste à identifier les structures d'intérêt au sein de cette image grâce à un logiciel de segmentation.

Il faut d'abord isoler les contours de l'objet puis réaliser le partitionnement de l'image en groupes de pixels homogènes.(123)

Dans le cas d'une radiographie en trois dimensions, le pixel est également en trois dimensions et est appelé voxel.

L'objectif est de partitionner l'image en voxels homogènes afin d'obtenir la séparation des différents tissus visibles sur cette radiographie.

À la suite de la segmentation, de nombreuses études sont possibles :

- Réalisation de mesures en 2D et en 3D. Mesures des diamètres mésiodistal et buccolingual.
- Étude des volumes, des proportions, de l'épaisseur des tissus.
- Étude de la répartition des tissus.
- Suppression virtuelle de tissus pour étudier une structure interne.

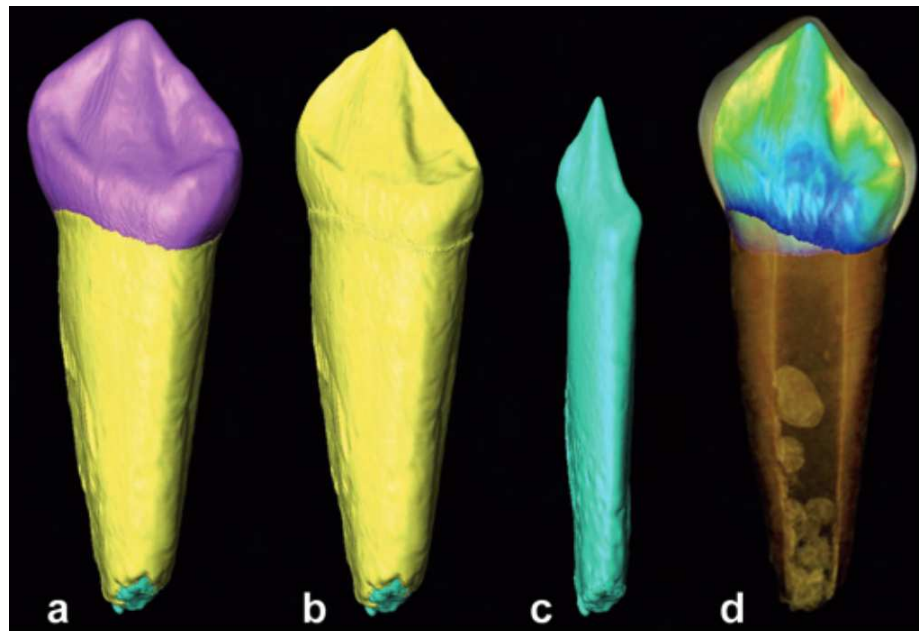


Figure 28 : Exemple possible d'application à l'étude de la répartition des tissus (a,b), de la suppression virtuelle de tissus (c) et de cartographie de la variation de l'épaisseur d'un tissu (d) Macchiarelli et al 2015 (32)

- Étude des surfaces entre les tissus, JAD.
- Étude des longueurs, volumes et proportions des racines.
- Analyses morphométriques géométriques (cf 2.4.1.2.2).
- Réalisation de cartographies de l'épaisseur de différents tissus.

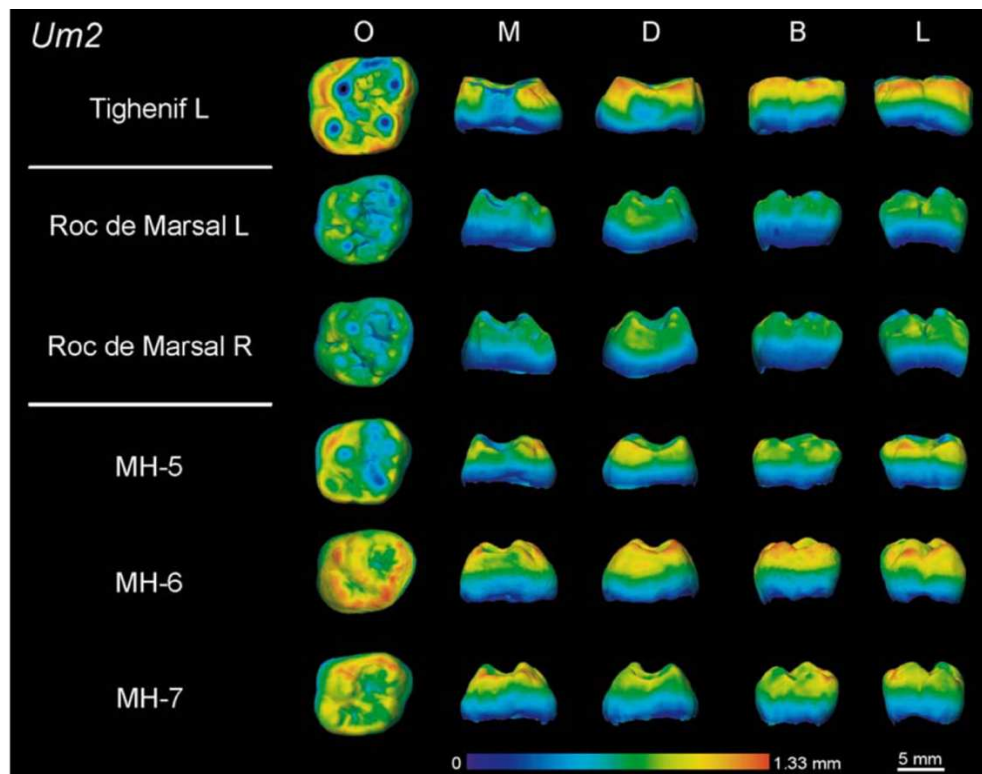


Figure 29 : Cartographies comparatives virtuelles des variations d'épaisseur de l'émail de molaires déciduales dans une étude de Zanolli et al. 2010. (48)

- Extractions virtuelles des dents afin de les étudier individuellement.

(26)

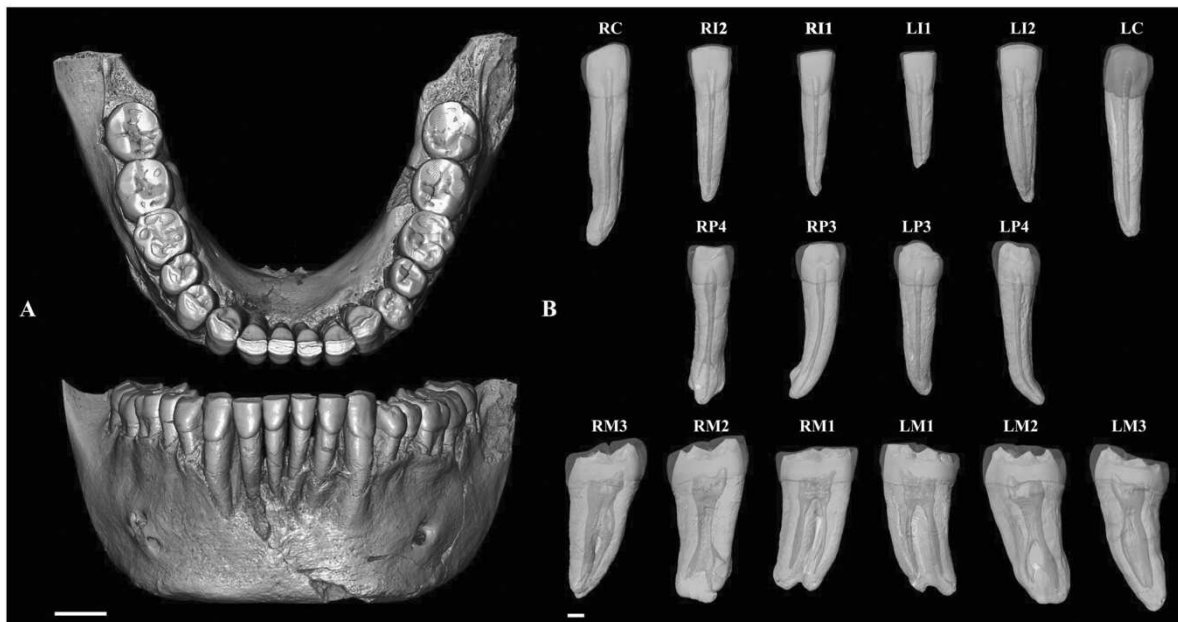


Figure 30 : Exemple d'applications possibles après segmentation. L'image A montre la reconstruction 3D microtomographique de la mandibule en vues occlusale (en haut) et frontale (en bas). L'image B montre toute la série de dents virtuellement extraites. (26)

La multiplication de ces études permet de constituer des bases de données concernant les volumes, les épaisseurs, les surfaces des différents tissus de différentes espèces actuelles ou anciennes.

En réalisant une combinaison d'analyses statistiques, les restes fossiles peuvent ainsi être attribués à un taxon. (12)

3.3.2 Apport des analyses 3D

La paléoanthropologie dentaire virtuelle est un domaine d'investigation extrêmement fertile. L'accès aux structures internes associé aux multiples applications des logiciels permet un nombre d'études très important apportant des preuves supplémentaires aux méthodes traditionnelles.

3.3.2.1 Conservation

La création d'une bibliothèque de modèles 3D permet une moindre manipulation des fossiles ainsi qu'une sauvegarde virtuelle des spécimens, la 3D améliore la conservation de ces vestiges rares et précieux. (42)

"Toucher les fossiles les abîme. Les muséums n'aiment pas qu'on manipule leurs collections, et on les comprend : à force d'avoir été mesuré au compas métallique, l'os frontal du crâne de l'homme de la Chapelle-aux-Saints a fini par être creusé !"
J.J.Hublin dans (42)

3.3.2.2 Diffusion et enseignement

En lien avec la conservation des spécimens, une manipulation excessive à des fins d'enseignement ou d'exposition au public détériorerait ces fossiles. La diffusion des modèles 3D permet un accès quasiment immédiat et à distance à ces vestiges sans les déplacer.

Ces modèles permettent un accès à plus de ressources en limitant la pression sur les objets.

3.3.2.3 Recherche

3.3.2.3.1 Accès aux structures internes

De nombreuses informations sont enregistrées au sein des tissus osseux et dentaires, mais les fossiles qui renferment ces informations ne peuvent pas toujours être soumis à des analyses destructrices. Le développement de « *nouvelles méthodologies analytiques non invasives* » - R. Maschiarelli et al. (32) permet aujourd'hui d'élargir et de préciser nos connaissances de la micromorphologie dentaire.

De plus en plus d'études ont recours à des techniques d'imagerie très précise, associées à une reconstruction et visualisation numérique grâce à des logiciels.

Lors de la découverte de l'espèce *Homo luzonensis*, les analyses 3D ont permis un accès aux structures internes des dents. Même lorsque celles-ci sont endommagées dans leur structure externe, de nombreuses informations fiables restent accessibles dans la structure interne.

En retirant virtuellement la couche d'émail pour avoir accès à la dentine sous-jacente, les chercheurs ont pu étudier les positions des cornes dentinaires et leur hauteur, fournissant ainsi des informations supplémentaires aboutissant à la définition de cette nouvelle espèce. (43)



Figure 31 : rendu virtuel des molaires et prémolaires maxillaires attribuées à Homo luzonensis. Déroit et al.(29)

3.3.2.3.2 Histologie virtuelle

L'histologie virtuelle consiste à réaliser des techniques d'histologie traditionnelle sur des modèles numériques.

Dans une étude d'avril 2020, sous la direction de Philipp Gunz de l'institut Max-Planck d'anthropologie évolutionniste, l'âge au décès d'un australopithèque a pu être connu. En comptant les lignes de croissance d'une molaire et d'une canine, les chercheurs ont pu attribuer un âge de 2,4 ans à l'individu. (124)

A

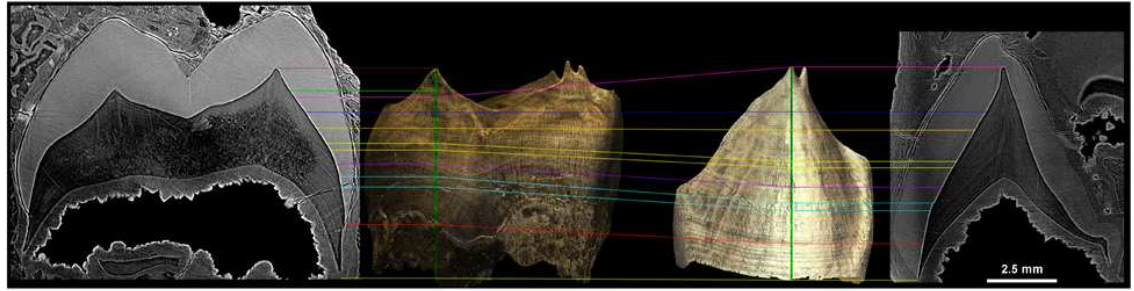


Figure 32 : Étude des lignes de croissance de deux dents pour estimer l'âge au décès à l'aide de l'histologie dentaire virtuelle synchrotron (cf synchrotron) Gunz et al 2020 (124)

3.3.2.3.3 Simplification de la notion d'échelle

L'étude d'un modèle en 3D permet de s'affranchir des problèmes d'échelle liés au microfossiles ou fossiles de grande taille. (20)

Les fonctionnalités de zoom des logiciels permettent de travailler sur des microfossiles en augmentant virtuellement leur taille. À l'inverse, des fossiles de spécimens de taille importante pouvant aller jusqu'à plusieurs mètres peuvent être étudiés sans difficulté sur un écran d'ordinateur.

3.3.2.3.4 Gestion des parties manquantes

Il est possible de réassembler différentes parties d'un fossile fracturé et d'en créer un modèle 3D entier. Les parties manquantes peuvent être reconstruites par symétrie. (42)

Conclusion

La paléanthropologie, depuis son apparition au XIX^{ème} siècle, n'a cessé d'évoluer. Au cours des trente dernières années, les nouvelles découvertes particulièrement nombreuses et parfois inattendues ont profondément modifié nos connaissances sur l'évolution de notre espèce. (2)

Ces nouvelles découvertes sont liées à l'essor de nouvelles technologies permettant des analyses plus rapides, plus précises, plus nombreuses.

L'organe dentaire est au cœur de ce phénomène. Pour plusieurs raisons c'est un support d'étude de choix. Fréquemment retrouvées à l'échelle du registre fossile grâce à leur résistance (liée à leur composition), les dents sont étudiées depuis plusieurs décennies. Les techniques d'analyse se sont multipliées sur ces fossiles afin d'obtenir des indices, des informations sur les individus à qui appartiennent ces dents.

L'association de plusieurs disciplines et des techniques actuelles d'imagerie, de traitement informatique et d'ingénierie ont permis d'élargir considérablement le champ de possibilités analytiques et méthodologiques. De nombreuses données, jusqu'à aujourd'hui inaccessibles sont exploitables afin d'en apprendre plus sur les spécimens retrouvés.

L'apport de la 3D est intéressant en terme de conservation des fossiles, rares et irremplaçables. L'accessibilité à ces spécimens est améliorée que ce soit dans un objectif d'enseignement, d'exposition ou de recherche.

La collaboration de chercheurs sur des études basées sur un nombre de données et d'échantillons de collections du monde entier permettra, dans un futur proche, d'obtenir des résultats encore plus fiables et précis. (125)

De plus, de nombreux fossiles restent à découvrir et avec eux des bouleversements de notre compréhension de l'évolution de l'Homme.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

1. Conférence « Évolution des dents du Paléolithique à nos jours » par Mona Le Luyer [Internet]. 2020 [cité 21 nov 2022]. Disponible sur: https://www.youtube.com/watch?v=67WiZds_xO8
2. Balzeau A. Nouvelles questions et approches en paléanthropologie [Internet]. CNRS Éditions; 2012 [cité 8 sept 2023]. Disponible sur: <https://books.openedition.org/editions-cnrs/%E2%80%8Bhttps://books-openedition-org.ressources-electroniques.univ-lille.fr/editions-cnrs/11239>
3. Kamina P. Anatomie clinique. 4e éd., 2e tirage. Paris: Maloine; 2015.
4. Larousse É. Définitions : dent - Dictionnaire de français Larousse [Internet]. [cité 8 sept 2023]. Disponible sur: <https://www.larousse.fr/dictionnaires/francais/dent/23622>
5. Demeter F, Zanolli C, Westaway KE, Joannes-Boyau R, Düringer P, Morley MW, et al. A Middle Pleistocene Denisovan molar from the Annamite Chain of northern Laos. Nat Commun. 17 mai 2022;13(1):2557.
6. Tilotta F, Lévy G, Lautrou A. Anatomie dentaire. Elsevier Health Sciences; 2018. 319 p.
7. DENTS, Anatomie comparée - Encyclopædia Universalis [Internet]. [cité 17 févr 2023]. Disponible sur: <https://www.universalis.fr/encyclopedie/dents/2-anatomie-comparee/>
8. Larousse É. dauphin - LAROUSSE [Internet]. [cité 12 déc 2022]. Disponible sur: <https://www.larousse.fr/encyclopedie/vie-sauvage/dauphin/178157>
9. HAPLODONTÉ : Définition de HAPLODONTÉ [Internet]. [cité 8 sept 2023]. Disponible sur: <https://www.cnrtl.fr/definition/haplodonte>
10. PLEXODONTÉ : Définition de PLEXODONTÉ [Internet]. [cité 8 sept 2023]. Disponible sur: <https://www.cnrtl.fr/definition/plexodonte>
11. Blinkhorn AS, Choi CLK, Paget HE. An investigation into the use of the FDI tooth notation system by dental schools in the UK. Eur J Dent Educ. 1998;2(1):39-41.
12. Slimak L, Zanolli C, Higham T, Frouin M, Schwenninger JL, Arnold LJ, et al. Modern human incursion into Neanderthal territories 54,000 years ago at Mandrin, France. Sci Adv. 9 févr 2022;8(6):eabj9496.
13. Luyer ML. Évolution dentaire dans les populations humaines de la fin du

Pléistocène et du début de l'Holocène (19000 – 5500 cal. BP): une approche intégrée des structures externe et interne des couronnes pour le Bassin aquitain et ses marges.

14. Scheuer L. et Black S. Developmental juvenile osteology. In: Academic press. London; 2000. p. 587.
15. Lasfargues JJ, Colon P. Odontologie conservatrice et restauratrice. Rueil-Malmaison: Éd. CdP; 2009. (Collection JPIO).
16. Bertrand B. Age-at-death estimation by cementochronology — Somewhere between indifference and overconfidence. *Forensic Sci Int.* sept 2019;302:109886.
17. Bosshardt DD, Selvig KA. Dental cementum: the dynamic tissue covering of the root. *Periodontol* 2000. févr 1997;13:41-75.
18. Marks SC, Schroeder HE. Tooth eruption: theories and facts. *Anat Rec.* juin 1996;245(2):374-93.
19. Naji S, Colard T, Blondiaux J, Bertrand B, d'Incau E, Bocquet-Appel JP. Cementochronology, to cut or not to cut? *Int J Paleopathol.* 1 déc 2016;15:113-9.
20. Charbonnier S, Wever P de. Paléontologie d'aujourd'hui. Les Ulis: EDP sciences; 2022.
21. Futura la rédaction de. Futura. [cité 28 nov 2022]. Définition | Paléanthropologie | Futura Planète. Disponible sur: <https://www.futura-sciences.com/planete/definitions/paleontologie-paleoanthropologie-14080/>
22. Universalis E. Encyclopædia Universalis. [cité 28 nov 2022]. paléanthropologie ou paléontologie humaine. Disponible sur: <https://www.universalis.fr/encyclopedie/paleoanthropologie-paleontologie-humaine/>
23. Fossile. In: Wikipédia [Internet]. 2023 [cité 10 sept 2023]. Disponible sur: <https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fossile&oldid=207700302>
24. Larousse É. Définitions : fossile - Dictionnaire de français Larousse [Internet]. [cité 10 sept 2023]. Disponible sur: <https://www.larousse.fr/dictionnaires/francais/fossile/34717>
25. Bayle P. Analyses quantitatives par imagerie à haute résolution des séquences de maturation dentaire et des proportions des tissus des dents déciduales chez les néanderthaliens et les hommes modernes [Internet] [These de doctorat]. Toulouse 3; 2008 [cité 10 sept 2023]. Disponible sur: <https://www.theses.fr/2008TOU30318>

26. Macchiarelli R, Bayle P, Bondioli L, Mazurier A, Zanolli C. From outer to inner structural morphology in dental anthropology: integration of the third dimension in the visualization and quantitative analysis of fossil remains. In: Scott GR, Irish JD, éditeurs. *Anthropological Perspectives on Tooth Morphology* [Internet]. 1^{re} éd. Cambridge University Press; 2013 [cité 21 nov 2022]. p. 250-77. Disponible sur: https://www.cambridge.org/core/product/identifier/9780511984464%23c01145-11-1/type/book_part
27. Hillson S. *Dental Anthropology*. Cambridge University Press; 1996. 762 p.
28. Berger LR, Hawks J, de Ruiter DJ, Churchill SE, Schmid P, Deleuzene LK, et al. *Homo naledi*, a new species of the genus *Homo* from the Dinaledi Chamber, South Africa. *eLife*. 4:e09560.
29. Detroit F, Mijares AS, Corny J, Daver G, Zanolli C, Dizon E, et al. A new species of *Homo* from the Late Pleistocene of the Philippines. *Nature*. avr 2019;568(7751):181-6.
30. Fewlass H, Talamo S, Wacker L, Kromer B, Tuna T, Fagault Y, et al. A 14C chronology for the Middle to Upper Palaeolithic transition at Bacho Kiro Cave, Bulgaria. *Nat Ecol Evol*. juin 2020;4(6):794-801.
31. Hublin JJ, Sirakov N, Aldeias V, Bailey S, Bard E, Delvigne V, et al. Initial Upper Palaeolithic *Homo sapiens* from Bacho Kiro Cave, Bulgaria. *Nature*. mai 2020;581(7808):299-302.
32. Macchiarelli R, Mazurier A, Volpato V. L'apport des nouvelles technologies à l'étude des Néandertaliens. *Néandertaliens Biol Cult*. 23 oct 2015;169-79.
33. ASUDAS. In: Wikipedia [Internet]. 2023 [cité 13 mars 2023]. Disponible sur: https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=ASUDAS&oldid=1137103731#cite_note-1
34. Turner CI, Nicol CR, Scott G. Scoring procedures for key morphological traits of the permanent dentition. *Adv Dent Anthropol*. 1 janv 1991;13-31.
35. Scott GR, Irish JD. *Human Tooth Crown and Root Morphology*. Cambridge University Press; 2017. 345 p.
36. Carayon D. Apport de la morphométrie géométrique et de l'imagerie 3D intra-orale dans l'étude du shoveling des incisives centrales maxillaires.
37. Laure METAIRIE. Apports de la morphométrie géométrique à la paléanthropologie dentaire. Université Claude Bernard / Lyon1/ UFR d'Odontologie;

2014.

38. Morphométrie. In: Wikipédia [Internet]. 2021 [cité 10 sept 2023]. Disponible sur:

<https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Morphom%C3%A9trie&oldid=184249131>

39. Laville T, Costa LBD. La morphométrie : les mathématiques au service de la paléontologie. Hors Collect. 19 déc 2022;124-5.

40. Manon Vuillien SS et LG. Morphométrie géométrique et 3D: Premières analyses des morphotypes ovins et caprins [Internet]. ArchéOrient - Le Blog. 2017 [cité 6 août 2023]. Disponible sur: <https://archeorient.hypotheses.org/6985>

41. Futura QM. Futura. [cité 10 sept 2023]. Définition | Morphométrie géométrique | Futura Planète. Disponible sur: <https://www.futura-sciences.com/planete/definitions/zoologie-morphometrie-geometrique-13589/>

42. Delbecq D. Sciences et Avenir. 2021 [cité 8 sept 2023]. Morphométrie 3D : la paléontologie en mode virtuel. Disponible sur: https://www.sciencesetavenir.fr/archeo-paleo/anthropologie/morphometrie-3d-la-paleontologie-en-mode-virtuel_150235

43. Une nouvelle espèce humaine découverte aux Philippines | CNRS Le journal [Internet]. [cité 12 févr 2023]. Disponible sur: <https://lejournel.cnrs.fr/articles/une-nouvelle-espece-humaine-decouverte-aux-philippines>

44. Quadra-Balibay A. Good News Pilipinas. 2019 [cité 10 sept 2023]. University of the Philippines-led international archaeology team discovers new human species *Homo luzonensis* in Callao Cave. Disponible sur: <https://www.goodnewspilipinas.com/university-of-the-philippines-led-international-archaeology-team-discovers-new-human-species-homo-luzonensis-in-callao-cave/>

45. Organ C, Nunn CL, Machanda Z, Wrangham RW. Phylogenetic rate shifts in feeding time during the evolution of *Homo*. Proc Natl Acad Sci. 30 août 2011;108(35):14555-9.

46. Sample I, Sample I, scientifique correspondant. Cooking may be 1.9m years old, say scientists. The Guardian [Internet]. 22 août 2011 [cité 17 févr 2023]; Disponible sur: <https://www.theguardian.com/science/2011/aug/22/cooking-origins-homo-erectus>

47. Harvard PAPÉ de. The efficient caveman cook [Internet]. Harvard Gazette. 2011 [cité 17 févr 2023]. Disponible sur:

<https://news.harvard.edu/gazette/story/2011/08/the-efficient-caveman-cook/>

48. Zanolli C, Bayle P, Macchiarelli R. Tissue proportions and enamel thickness distribution in the early Middle Pleistocene human deciduous molars from Tighenif, Algeria. *Comptes Rendus Palevol.* sept 2010;9(6-7):341-8.
49. Bayle P. Proportions des tissus des dents déciduales chez deux individus de Dordogne (France) : l'enfant néanderthalien du Roc de Marsal et le spécimen du Paléolithique supérieur final de La Madeleine. *Bull Mém Société Anthropol Paris* [Internet]. 31 déc 2008 [cité 21 nov 2022];20(3-4). Disponible sur: <http://journals.openedition.org/bmsap/6143>
50. Macho G. The significance of hominid enamel thickness for phylogenetic and life-history reconstruction. In 1995. p. 51-68.
51. Kaidonis JA. Tooth wear: the view of the anthropologist. *Clin Oral Investig.* 1 mars 2008;12(1):21-6.
52. Alimentation dans la préhistoire [Internet]. Hominides. [cité 14 févr 2023]. Disponible sur: <https://www.hominides.com/dossiers/alimentation-prehistoire-nutrition-prehistorique/>
53. Rosas A, Estalrich A, García-Tabernero A, Bastir M, García-Vargas S, Sánchez-Meseguer A, et al. Les Néandertaliens d'El Sidrón (Asturies, Espagne). Actualisation d'un nouvel échantillon. *L'Anthropologie.* 1 janv 2012;116(1):57-76.
54. El Zaatari S, Grine FE, Ungar PS, Hublin JJ. Ecogeographic variation in Neandertal dietary habits: evidence from occlusal molar microwear texture analysis. *J Hum Evol.* oct 2011;61(4):411-24.
55. Ogilvie MD, Curran BK, Trinkaus E. Incidence and patterning of dental enamel hypoplasia among the Neandertals. *Am J Phys Anthropol.* mai 1989;79(1):25-41.
56. Hurel A. Purlascience.fr. Pour la Science; 2007 [cité 10 sept 2023]. Le Néandertalien de la Chapelle-aux-Saints. Disponible sur: <https://www.purlascience.fr/sd/paleontologie-humaine/><https://www.purlascience.fr/sd/paleontologie-humaine/le-neandertalien-de-la-chapelle-aux-saints-1816.php>
57. Insider B. ScienceAlert. 2016 [cité 14 févr 2023]. Prehistoric Human Teeth Have Revealed What The « Paleo Diet » Actually Entailed. Disponible sur: <https://www.sciencealert.com/prehistoric-human-teeth-reveal-what-the-paleo-diet-actually-entailed>

58. Henry AG, Brooks AS, Piperno DR. Microfossils in calculus demonstrate consumption of plants and cooked foods in Neanderthal diets (Shanidar III, Iraq; Spy I and II, Belgium). *Proc Natl Acad Sci*. 11 janv 2011;108(2):486-91.
59. ScienceDaily [Internet]. [cité 16 févr 2023]. Dental plaque DNA shows Neanderthals used « aspirin ». Disponible sur: <https://www.sciencedaily.com/releases/2017/03/170308131218.htm>
60. New Scientist. [cité 16 févr 2023]. Neanderthals may have medicated with penicillin and painkillers. Disponible sur: <https://www.newscientist.com/article/2123669-neanderthals-may-have-medicated-with-penicillin-and-painkillers/>
61. Weyrich LS, Duchene S, Soubrier J, Arriola L, Llamas B, Breen J, et al. Neanderthal behaviour, diet, and disease inferred from ancient DNA in dental calculus. *Nature*. 1 avr 2017;544(7650):357-61.
62. Définition | Phytolithe [Internet]. [cité 10 sept 2023]. Disponible sur: <https://www.futura-sciences.com/planete/definitions/gemmologie-phytolithe-13624/>
63. Ungar PS, éditeur. *Evolution of the human diet: the known, the unknown, and the unknowable*. Oxford ; New York: Oxford University Press; 2007. 413 p. (Human evolution series).
64. Cristiani E, Radini A, Edinborough M, Borić D. Dental calculus reveals Mesolithic foragers in the Balkans consumed domesticated plant foods. *Proc Natl Acad Sci*. 13 sept 2016;113(37):10298-303.
65. The REAL Paleo diet included bread | Daily Mail Online [Internet]. [cité 14 févr 2023]. Disponible sur: <https://www.dailymail.co.uk/sciencetech/article-3768875/The-REAL-Paleo-diet-included-bread-Ancient-dental-plaque-reveals-crops-menu-Balkans-8-600-years-ago.html>
66. Barceloux DG. *Medical Toxicology of Natural Substances* [Internet]. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, Inc.; 2008 [cité 16 févr 2023]. Disponible sur: <http://doi.wiley.com/10.1002/9780470330319>
67. Perkins S. Neandertals ate woolly rhinos and mushrooms, may have used painkillers and antibiotics. *Science* [Internet]. 8 mars 2017 [cité 10 sept 2023]; Disponible sur: <http://www.sciencemag.org/news/2017/03/neandertals-ate-woolly-rhinos-and-mushrooms-may-have-used-painkillers-and-antibiotics>
68. Zanolli C, Bondioli L, Manni F, Rossi P, Macchiarelli R. Gestation Length,

- Mode of Delivery, and Neonatal Line-Thickness Variation. *Hum Biol.* 2011;83(6):695-713.
69. Muséum national d'Histoire naturelle [Internet]. [cité 28 janv 2023]. Une étude franco-italienne démontre le lien entre la durée de gestation, le mode d'accouchement et la variation de l'épaisseur de la ligne dentaire néonatale. Disponible sur: <https://www.mnhn.fr/fr/communique-de-presse/une-etude-franco-italienne-demonstre-le-lien-entre-la-duree-de-gestation-le>
 70. Bertrand B. Cémento-chronologie, précision et exactitude de l'estimation de l'âge au décès chez l'adulte. *Bull Mém Société Anthropol Paris*. 4 oct 2019;
 71. Colard T, Bertrand B, Naji S, Delannoy Y, Becart A. Toward the adoption of cementochronology in forensic context. *Int J Legal Med*. 15 mars 2015;132:1-8.
 72. Matson's Laboratory [Internet]. [cité 25 janv 2023]. Cementum Annuli Deer Aging. Disponible sur: <https://matsonslab.com/the-science/cementum-aging/>
 73. Renz H, Radlanski RJ. Incremental lines in root cementum of human teeth--a reliable age marker? *Homo Int Z Vgl Forsch Am Menschen*. 2006;57(1):29-50.
 74. Le Cabec A, Tang NK, Ruano Rubio V, Hillson S. Nondestructive adult age at death estimation: Visualizing cementum annulations in a known age historical human assemblage using synchrotron X-ray microtomography. *Am J Phys Anthropol*. janv 2019;168(1):25-44.
 75. Et un isotope, c'est quoi ? [Internet]. [cité 1 févr 2023]. Disponible sur: https://www.irsn.fr/FR/connaissances/Nucleaire_et_societe/education-radioprotection/bases_radioactivite/Pages/3-isotope.aspx#.Y9o7J-zMLPZ
 76. Richardin P, Coudert M. Datation par le carbone 14 et restes humains. *Technè Sci Au Serv L'histoire L'art Préservation Biens Cult*. 1 nov 2016;(44):74-8.
 77. Demeter F. L'utilisation des isotopes en archéologie et en anthropologie. *Technè Sci Au Serv L'histoire L'art Préservation Biens Cult*. 1 nov 2016;(44):71-3.
 78. Res.artes. Notice-C14-Archéologie.pdf [Internet]. [cité 3 févr 2023]. Disponible sur: <https://www.res-artes.com/wp-content/uploads/2014/03/Notice-C14-Arch%C3%A9ologie.pdf>
 79. Datation par carbone 14, bois, ivoire, os, tissus, dents [Internet]. Re.S.Artes. [cité 10 sept 2023]. Disponible sur: <https://www.res-artes.com/techniques/datation/carbone-14/>
 80. CEA. CEA/Découvrir & Comprendre. CEA; 2015 [cité 3 févr 2023]. La datation

- par le carbone 14. Disponible sur: <https://www.cea.fr/comprendre/Pages/radioactivite/essentiel-sur-la-datation-au-carbone-14.aspx>
81. Archéologie: la riche histoire d'une dent - Québec Science [Internet]. 2019 [cité 3 févr 2023]. Disponible sur: <https://www.quebecscience.qc.ca/sciences/archeologie-histoire-dent/>
 82. Wißing C, Rougier H, Crevecoeur I, Germonpré M, Naito YI, Semal P, et al. Isotopic evidence for dietary ecology of late Neandertals in North-Western Europe. *Quat Int.* 8 août 2016;411:327-45.
 83. Bocherens H, Billiou D, Mariotti A, Patou-Mathis M, Otte M, Bonjean D, et al. Palaeoenvironmental and Palaeodietary Implications of Isotopic Biogeochemistry of Last Interglacial Neanderthal and Mammal Bones in Scladina Cave (Belgium). *J Archaeol Sci.* 1 juin 1999;26(6):599-607.
 84. Martin JE, Vincent P, Tacail T, Khaldoune F, Jourani E, Bardet N, et al. Calcium Isotopic Evidence for Vulnerable Marine Ecosystem Structure Prior to the K/Pg Extinction. *Curr Biol.* juin 2017;27(11):1641-1644.e2.
 85. Taylor N, Frei KM, Frei R. A strontium isotope pilot study using cremated teeth from the Vollmarshausen cemetery, Hesse, Germany. *J Archaeol Sci Rep.* 1 juin 2020;31:102356.
 86. CNRS Le journal [Internet]. [cité 9 févr 2023]. Les grands reptiles marins montrent les dents. Disponible sur: <https://lejournel.cnrs.fr/articles/les-grands-reptiles-marins-montrent-les-dents>
 87. Théo Tacail. Assessing human weaning practices with calcium isotopes in tooth enamel [Internet]. [cité 25 janv 2023]. Disponible sur: <https://www.pnas.org/doi/10.1073/pnas.1704412114>
 88. Le calcium des dents révèle ses secrets | CNRS [Internet]. 2017 [cité 10 sept 2023]. Disponible sur: <https://www.cnrs.fr/fr/le-calcium-des-dents-revele-ses-secrets>
 89. Smith TM, Austin C, Green DR, Joannes-Boyau R, Bailey S, Dumitriu D, et al. Wintertime stress, nursing, and lead exposure in Neanderthal children. *Sci Adv.* 31 oct 2018;4(10):eaau9483.
 90. Schoeninger MJ, Moore K. Bone stable isotope studies in archaeology. *J World Prehistory.* 1 juin 1992;6(2):247-96.

91. Paléontologie/anthropologie/géochimie : le calcium des dents révèle ses secrets [Internet]. [cité 25 janv 2023]. Disponible sur: <http://www.ens-lyon.fr/actualite/recherche/paleontologieanthropologiegeochimie-le-calcium-des-dents-revele-ses-secrets>
92. Michel V, Boschian G, Valensi P. Datation ESR de dents d'aurochs du site Paléolithique inférieur de Castel di Guido (Italie). *ArcheoSciences Rev Archéom*. 31 déc 2008;(32):51-8.
93. Bahain JJ. La méthode de datation par Résonance de Spin Électronique (ESR) au Muséum National d'histoire Naturelle. Vingt ans de recherches méthodologiques et d'applications géochronologiques. 21 déc 2007;
94. Grün R. ELECTRON SPIN RESONANCE DATING. In: Pearsall DM, éditeur. *Encyclopedia of Archaeology* [Internet]. New York: Academic Press; 2008 [cité 12 févr 2023]. p. 1120-8. Disponible sur: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780123739629000996>
95. Stratigraphie [Internet]. [cité 8 août 2023]. Disponible sur: <https://www.geowiki.fr/index.php?title=Stratigraphie>
96. RS Bassler. Classification and stratigraphic use of the conodonts [Internet]. Vol. 36. 1925 [cité 8 août 2023]. 218 p. Disponible sur: <https://lillocat.univ-lille.fr>
97. Buckley M, Whitcher Kansa S, Howard S, Campbell S, Thomas-Oates J, Collins M. Distinguishing between archaeological sheep and goat bones using a single collagen peptide. *J Archaeol Sci*. 1 janv 2010;37(1):13-20.
98. Buckley M, Collins M, Thomas-Oates J, Wilson JC. Species identification by analysis of bone collagen using matrix-assisted laser desorption/ionisation time-of-flight mass spectrometry. *Rapid Commun Mass Spectrom RCM*. déc 2009;23(23):3843-54.
99. Woodward SR, King MJ, Chiu NM, Kuchar MJ, Griggs CW. Amplification of ancient nuclear DNA from teeth and soft tissues. *PCR Methods Appl*. févr 1994;3(4):244-7.
100. Baker LE, McCormick WF, Matteson KJ. A silica-based mitochondrial DNA extraction method applied to forensic hair shafts and teeth. *J Forensic Sci*. janv 2001;46(1):126-30.
101. Calvo L, Ricaut F, Keyser C, Grimoud AM, Ludes B, Crubezy E, et al. Etude d'ADN ancien au niveau de la pulpe dentaire de la série ostéologique de Saint Côme

et Damien.

102. Cooper A. DNA from Museum Specimens. In: Herrmann B, Hummel S, éditeurs. *Ancient DNA: Recovery and Analysis of Genetic Material from Paleontological, Archaeological, Museum, Medical, and Forensic Specimens* [Internet]. New York, NY: Springer; 1994 [cité 17 févr 2023]. p. 149-65. Disponible sur: https://doi.org/10.1007/978-1-4612-4318-2_10
103. Lee HC, Pagliaro EM, Berka KM, Folk NL, Anderson DT, Ruano G, et al. Genetic markers in human bone: I. Deoxyribonucleic acid (DNA) analysis. *J Forensic Sci.* mars 1991;36(2):320-30.
104. Ginther C, Issel-Tarver L, King MC. Identifying individuals by sequencing mitochondrial DNA from teeth. *Nat Genet.* oct 1992;2(2):135-8.
105. Schwartz TR, Schwartz EA, Mieszerski L, McNally L, Kobilinsky L. Characterization of deoxyribonucleic acid (DNA) obtained from teeth subjected to various environmental conditions. *J Forensic Sci.* juill 1991;36(4):979-90.
106. @NatGeoFrance. National Geographic. 2017 [cité 10 sept 2023]. Une analyse ADN dévoile un mystérieux cousin à grandes dents de l'être humain. Disponible sur: <https://www.nationalgeographic.fr/sciences/une-analyse-adn-devoile-un-mysterieux-cousin-a-grandes-dents-de-letre-humain>
107. Chaline J. Utilisation du microscope électronique à balayage dans l'étude des dents de micromammifères. 1 janv 1968;32(2):211-8.
108. Gunepin M, Derache F, Riviere D, Schuliar Y, Holy X. Interest of the use of scanning electron microscope in forensic dentistry. *J Med Leg Droit Med.* 1 juin 2013;56:15-21.
109. DIM PAMIR [Internet]. [cité 23 août 2023]. MIRCoV. Disponible sur: <https://www.pamir.fr/projets-soutenus/mircov>
110. Haile-Selassie Y, Melillo SM, Vazzana A, Benazzi S, Ryan TM. A 3.8-million-year-old hominin cranium from Woranso-Mille, Ethiopia. *Nature.* sept 2019;573(7773):214-9.
111. Graphiste 3D L. Tout savoir sur la 3D ! [Internet]. Le Graphiste 3D. 2019 [cité 22 août 2023]. Disponible sur: <https://www.legraphiste3d.com/tout-savoir-sur-la-3d/>
112. Trois dimensions. In: Wikipédia [Internet]. 2023 [cité 22 août 2023]. Disponible sur: https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Trois_dimensions&oldid=204303694

113. Le scan 3D à La Brea Tar Pits avec Artec Space Spider | Artec3D Applications [Internet]. 2023 [cité 23 août 2023]. Disponible sur: <https://www.artec3d.com/fr/cases/la-brea-tar-pits>
114. Photogrammétrie [Internet]. PALEVOPRIM. [cité 23 août 2023]. Disponible sur: <http://palevoprim.labo.univ-poitiers.fr/2018/06/09/photogrammetrie/>
115. Nogueira DC. Paléoimagerie appliquée aux Homo sapiens de Qafzeh (Paléolithique moyen, Levant sud). Variabilité normale et pathologique [Internet] [phdthesis]. Université Paris sciences et lettres; 2019 [cité 23 août 2023]. Disponible sur: <https://theses.hal.science/tel-02637178>
116. Franceschi DD, Boura A. Utilisations du microscope numérique en paléobotanique. In: Congrès Agora Paleobotanica [Internet]. Lille, France; 2019 [cité 23 août 2023]. Disponible sur: <https://hal.science/hal-03159299>
117. Priscilla Bayle. Univ Bordeaux. (2020, 3 mars). Analyses 3D par microscanner pour l'anthropologie biologique et l'archéologie. [Vidéo]. Canal-U. <https://www.canal-u.tv/104831>. (Consultée le 10 septembre 2023).
118. Abel R, Laurini C, Richter M. A palaeobiologist's guide to « virtual » micro-CT preparation. Palaeontol Electron [Internet]. 2012 [cité 21 nov 2022]; Disponible sur: <https://palaeo-electronica.org/content/issue-2-2012-technical-articles/233-micro-ct-workflow>
119. Deluzarche C. Futura. [cité 10 mai 2023]. Une nouvelle technique de rayons X pour une cartographie inédite et spectaculaire du corps humain. Disponible sur: <https://www.futura-sciences.com/sciences/actualites/physique-nouvelle-technique-rayons-x-cartographie-inedite-spectaculaire-corps-humain-94725/>
120. Smith T, Olejniczak A, Tafforeau P, Reid D, Grine F, Hublin JJ. Molar crown thickness, volume, and development in South African Middle Stone Age Humans. South Afr J Sci. 1 nov 2006;102:513.
121. Cabec AL, Tang N, Tafforeau P. Accessing Developmental Information of Fossil Hominin Teeth Using New Synchrotron Microtomography-Based Visualization Techniques of Dental Surfaces and Interfaces. PLOS ONE. 22 avr 2015;10(4):e0123019.
122. Toumaï, our earliest relative, at the ESRF [Internet]. [cité 4 mai 2023]. Disponible sur: https://www.esrf.fr/news/general-old/general-2004/toumai/index_html

123. Site Web PLASTIC - La segmentation des images [Internet]. [cité 24 août 2023]. Disponible sur: <https://www6.inrae.fr/pfl-cepia/Axe-images/Tutoriel/La-segmentation-des-images>
124. Gunz P, Neubauer S, Falk D, Tafforeau P, Le Cabec A, Smith TM, et al. Australopithecus afarensis endocasts suggest ape-like brain organization and prolonged brain growth. *Sci Adv.* avr 2020;6(14):eaaz4729.
125. Balzeau A, Crevecoeur I, Rougier H, Froment A, Gilissen E, Grimaud-Hervé D, et al. Applications of imaging methodologies to paleoanthropology: Beneficial results relating to the preservation, management and development of collections. *Comptes Rendus Palevol.* 1 sept 2010;9(6):265-75.

TABLE DES ILLUSTRATIONS

Figure 1 : Dent d'un enfant Dénisovien découverte dans une grotte au Laos. Ici une molaire déciduale. Spécimen : TNH2-1 (Demeter et al. 2022) (5)	15
Figure 2 : Les différents modes de fixation des dents (d'après Miles et Poole) (7)	17
Figure 3 : Représentation schématique des différentes faces des dents.....	24
Figure 4 : Coupe d'une première molaire mandibulaire, présentant les trois types de céments : (B) mixte, (C) acellulaire et (D) cellulaire. Photographie d'E. d'Incau. (19)	26
Figure 5 : Illustration des différents tissus constituant une dent par M. Le Luyer. (13)	27
Figure 6 : Restes fossiles d'Homo naledi. (29).....	30
Figure 7 : Restes fossiles dentaires et osseux d'Homo luzonensis. (29)	31
Figure 8 : Deuxième molaire mandibulaire attribuée à Homo sapiens retrouvé dans la grotte de Bacho Kiro. (31).....	32
Figure 9 : Plaques de référence illustrant les différentes variations anatomiques possibles d'incisives centrales, molaires et canines maxillaires (33)	35
Figure 10 : Exemple d'application de la morphométrie géométrique dans l'analyse du contour d'une couronne et de la forme de la jonction amélo dentinaire d'une dent humaine. (12)	36
Figure 11 : Comparaison de la morphologie des dents maxillaires d'Homo luzonensis (A) avec Homo erectus (B) et Homo sapiens (C) (43,44).....	37
Figure 12 : Usure de la surface occlusale des dents d'un aborigène australien pré-contemporain liée à un régime alimentaire abrasif. (51)	39
Figure 13 : Éclat de l'émail sur le bord occlusal d'une incisive latérale supérieure. Photographie au Microscopie Électronique à Balayage (MEB). (53)	40
Figure 14 : Tartre visible sur la face vestibulaire des molaires de ce Néanderthalien de la grotte d'El Sidrón. L'analyse ADN des aliments piégés dans le tartre donne un aperçu de son régime alimentaire. (61).....	43
Figure 15 : Présence de tartre sur des dents d'individus des sites de Vlasac et Lepenski. (64).....	44
Figure 16 : Représentation schématique de la technique de cémento-chronologie. (71)	46

Figure 17 : Coupe histologique virtuelle obtenue grâce à la microtomographie par rayonnement synchrotron permettant ensuite l'utilisation de la méthode TCA de manière non invasive. (74)	47
Figure 18 : "Canine de lait humaine dont l'émail a été prélevé pour réaliser des mesures des proportions des isotopes du calcium." (87,88)	52
Figure 19 : Différentes analyses réalisées sur une molaire : photographie, scan micro CT, coupe histologique virtuelle, analyse des isotopes de l'oxygène... Illustration tirée de l'article publié dans Science Advances. (89)	52
Figure 20 : équation d'âge, avec D_e la dose équivalente (Gy), $D(t)$ la dose annuelle (Gy/an), t l'âge de l'échantillon (ans)	54
Figure 21: Crâne du plus vieil Australopithèque jamais mis au jour photographié par Dale Omeri. (110) (Haile-Selassie et al. 2019) (Éthiopie : découverte du plus vieux crâne d'Australopithèque jamais mis au jour)	59
Figure 22 : Autre type de photographie, plus fantaisiste et moins fidèle à l'objet, réalisée par le même photographe. Photographie de Dale Omeri.	59
Figure 23: Crâne du spécimen Qafzeh6 modélisé par photogrammétrie. (115)	61
Figure 24 : l'ESRF situé à Grenoble en France. (www.esrf.eu)	65
Figure 25 : Image virtuelle de la première molaire inférieure droite (RLM1) (EQ H5) issue de l'étude de Smith et al. 2006 (120)	66
Figure 26 : URI2 et URC de l'individu <i>Australopithecus africanus</i> MLD11-30 issues de l'étude de Le Cabec et al. 2015 (121)	66
Figure 27 : Crâne de Toumaï. (esrf.fr) (122)	67
Figure 28 : Exemple possible d'application à l'étude de la répartition des tissus (a,b), de la suppression virtuelle de tissus (c) et de cartographie de la variation de l'épaisseur d'un tissu (d) Macchiarelli et al 2015 (32)	69
Figure 29 : Cartographies comparatives virtuelles des variations d'épaisseur de l'émail de molaires déciduales dans une étude de Zanolli et al. 2010. (48)	70
Figure 30 : Exemple d'applications possibles après segmentation. L'image A montre la reconstruction 3D microtomographique de la mandibule en vues occlusale (en haut) et frontale (en bas). L'image B montre toute la série de dents virtuellement extraites. (26)	71
Figure 31 : rendu virtuel des molaires et prémolaires maxillaires attribuées à <i>Homo luzonensis</i> . Déroît et al.(29)	73

Figure 32 : Étude des lignes de croissance de deux dents pour estimer l'âge au décès à l'aide de l'histologie dentaire virtuelle synchrotron (cf synchrotron) Gunz et al 2020 (124)	74
---	----

TABLE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Représentation schématique des quatre quadrants.....	17
Tableau 2 : Nomenclature universelle pour la denture déciduale et permanente. .	20
Tableau 3 : Nomenclature de Zsigmondy et Palmer pour la denture déciduale et permanente.	20
Tableau 4 : Nomenclature de la Fédération Dentaire Internationale (FDI) pour la denture déciduale et permanente.....	21

Étude de l'organe dentaire en paléanthropologie : apport des techniques actuelles d'imagerie et de traitement informatique / **Octave NADEAU**. - p. (90) : ill. (28) ; réf. (125).

Domaines : Anthropologie, Informatique, Anatomie

Mots clés Libres : Paléontologie, Paléanthropologie, Anatomie, Fossile, Imagerie, Traitement informatique, Technologies, Segmentation, 3D.

Résumé de la thèse en français

Dans l'étude de l'évolution de notre espèce, les dents occupent une place majeure. Dans ce travail, après une présentation des prérequis à l'étude de cet organe, nous tentons de répondre à la problématique suivante : En quoi les dents sont-elles utiles en recherche paléanthropologique ? Après une présentation des intérêts quantitatifs et qualitatifs des dents dans ce domaine, une présentation de différentes techniques utilisées dans cette discipline est proposée. La dernière partie est consacrée à l'apport des techniques actuelles d'imagerie, de traitement informatique grâce à l'essor des nouvelles technologies.

JURY :

Président : Monsieur le Professeur Thomas COLARD

Assesseeurs : Monsieur le Docteur Thibault BÉCAVIN

Monsieur le Docteur Corentin DENIS

Madame le Docteur Marine HÉNAUT