



HAL
open science

Apport de la morphométrie géométrique et de l'imagerie 3D intra-orale dans l'étude du shoveling des incisives centrales maxillaires

Delphine Carayon

► To cite this version:

Delphine Carayon. Apport de la morphométrie géométrique et de l'imagerie 3D intra-orale dans l'étude du shoveling des incisives centrales maxillaires. Médecine humaine et pathologie. Université Paul Sabatier - Toulouse III, 2018. Français. NNT : 2018TOU30221 . tel-02316121

HAL Id: tel-02316121

<https://theses.hal.science/tel-02316121>

Submitted on 15 Oct 2019

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

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



THÈSE

En vue de l'obtention du DOCTORAT DE L'UNIVERSITÉ DE TOULOUSE

Délivré par l'Université Toulouse 3 - Paul Sabatier

Présentée et soutenue par
Delphine CARAYON

Le 19 décembre 2018

**Apport de la morphométrie géométrique et de l'imagerie
3D intra-orale dans l'étude du shoveling des incisives
centrales maxillaires.**

Ecole doctorale : **BSB - Biologie, Santé, Biotechnologies**

Spécialité : **ANTHROPOBIOLOGIE**

Unité de recherche :

AMIS - Laboratoire d'Anthropologie Moléculaire et Imagerie de Synthèse

Thèse dirigée par
Frédéric VAYSSE et Rémi ESCLASSAN

Jury

M. Roberto MACCHIARELLI, Rapporteur
Mme Sylvie MONTAL, Rapporteur
M. Michel RUQUET, Examineur
M. José BRAGA, Examineur
M. Clément ZANOLLI, Examineur
M. Jean-Cédric DURAND, Examineur
M. Frédéric VAYSSE, Directeur de thèse
M. Rémi ESCLASSAN, Co-directeur de thèse

REMERCIEMENTS

Nous remercions

Mme le Professeur Sylvie Montal, Professeur des Universités-Praticien Hospitalier, Chef de Service du Centre de Soins d'Enseignement et de Recherche Dentaire du CHU de Montpellier. Nous vous remercions d'avoir accepté de juger ce travail en qualité de rapporteur. Nous vous exprimons le plus profond respect et une vive admiration pour votre parcours hospitalo-universitaire. Vos compétences cliniques et humaines, votre passion, votre engagement et votre fervent dévouement pour votre équipe et pour les étudiants au sein de notre faculté sont un exemple. Vos valeurs de l'Humain et du Travail sont les nôtres. Nous vous remercions pour la confiance que vous nous accordez. Que ce travail soit le témoignage de notre sincère reconnaissance et de notre profond respect.

Mr le Professeur Roberto Macchiarelli, Professeur de Paléanthropologie à l'Université de Poitiers et au Museum National d'Histoire Naturelle de Paris, responsable du département de Géosciences de l'Université de Poitiers, qui avez accepté de juger ce travail en qualité de rapporteur. C'est un très grand honneur de bénéficier de votre expertise scientifique. Nous vous témoignons notre sincère gratitude et notre profond respect.

Mr le Professeur Michel Ruquet, Professeur des Universités-Praticien Hospitalier, responsable de l'UAM Prothèses de l'Université Aix-Marseille, qui nous faites l'honneur de siéger à ce jury de thèse. Vos qualités scientifiques et de clinicien sont un privilège pour examiner et juger ce travail. Veuillez trouver ici le témoignage de notre profond respect.

Mr le Professeur José Braga, Professeur de Paléanthropologie à l'Université Paul Sabatier de Toulouse, chercheur associé à l'Université du Witwatersrand (Afrique du Sud) et responsable du pôle Imagerie de Synthèse du laboratoire AMIS -UMR 5288 CNRS-. Vos conseils et votre soutien constant au cours de ces années de recherche, tant pour le Master 2 que pour cette thèse, ont été des aides précieuses. Veuillez trouver dans ce travail l'expression de nos sentiments les plus respectueux.

Mr le Docteur Jean-Cédric Durand, Maître de Conférences des Universités-Praticien Hospitalier, vice-doyen de la l'UFR Odontologie de Montpellier. Nous vous remercions d'avoir accepté de siéger à ce jury. Nous vous remercions pour toutes ces années d'exercice libéral où nous avons travaillé ensemble et durant lesquelles nous avons pu apprécier vos qualités humaines et professionnelles. Lorsque 12 ans auparavant, vous avez été assesseur de notre jury de thèse d'exercice, nous souhaitions des années « *pétillantes de travail et de bonheur* » ... ces années l'ont été. Nous souhaitons à ce jour la même émulation et le même dynamisme pour nos années de travail à venir au sein de l'université. Veuillez trouver ici le témoignage de notre profond respect.

Mr le Docteur Clément Zanolli, Docteur en Paléanthropologie et chercheur CNRS. Même si nous n'avons que deux directeurs officiels, cette thèse n'aurait pu être possible sans votre aide précieuse. Vos compétences, votre travail, vos idées brillantes et votre rigueur ont permis l'aboutissement de ces travaux. Nous vous sommes très reconnaissante de nous avoir consacré tant d'heures de travail et vous exprimons notre profonde gratitude.

Mr le Professeur Frédéric Vaysse, directeur de thèse, Professeur des Universités - Praticien Hospitalier, Chef de Service du Centre de Soins d'Enseignement et de Recherche Dentaire du CHU de Toulouse. Nous vous sommes très reconnaissante d'avoir été l'initiateur de ce sujet passionnant. Votre analyse et votre regard critique nous ont permis de nous dépasser. Soyez assuré de ma sincère reconnaissance.

Mr le Docteur Rémi Esclassan, co-directeur de thèse, Maître de Conférences des Universités-Praticien Hospitalier au sein de l'UAM Prothèses du CHU de Toulouse. Nos plus vifs remerciements vont à vous, qui nous avez soutenue et encouragée depuis notre première rencontre au CNEPO de Toulouse en 2012. Votre patience, votre disponibilité nous ont permis de mener ces travaux de recherche dans les meilleures conditions possibles. Vos qualités humaines et vos compétences cliniques et anthropologiques nous ont permis d'avancer. Nous n'oublierons jamais les encouragements tant personnels que professionnels. Votre altruisme, votre confiance et votre foi nous ont guidée. Veuillez trouver dans ce travail l'expression de nos sentiments les plus respectueux.

Nous remercions

Toute l'équipe du laboratoire AMIS –UMR5288 CNRS- et son directeur le Pr Eric Crubezy pour nous avoir accueillie durant ces années de recherche. Une mention spéciale au Dr Jean Dumoncel et à la gentillesse et la disponibilité de Mme Marie-Hélène Escalier.

Monsieur le Professeur François Duret et son épouse Elisabeth qui nous ont permis de travailler dans des conditions idylliques en mettant à disposition leur scanner intra-oral *Condor*®. Peu de mots pour exprimer toute notre gratitude et notre respect.

Le laboratoire AaBam dirigé par le Professeur François Duret qui nous a chaleureusement accueillie en son sein.

Messieurs les Docteurs Christophe Tenailleau et Benjamin Duployer du Centre Inter-universitaire de Recherche et d'Ingénierie des Matériaux -UMR 5085 CNRS- de l'Université de Toulouse, et Messieurs les Docteurs Frikkie de Beer et Jakobus W. Hoffman du Département de Science Nucléaire de la *South African Nuclear Energy Corporation* de Pelindaba (Afrique du Sud) pour l'acquisition des données par micro-tomographie à rayons X.

Le laboratoire de Prothèses JPC à Narbonne, et tout particulièrement Frédéric, pour la mise à disposition du scanner extra-oral.

Mr Richard Donat de l'Institut National de Recherches Archéologiques Préventives de St Estève, Mme le Docteur Lei Pan de l'Institut de Paléontologie des Vertébrés et de Paléoanthropologie de Pékin (Chine), Mr Guillaume Fleury du Museum d'Histoire Naturelle de Toulouse, Mme Anna C. Oettle du département d'Anatomie de l'Université de Pretoria (Afrique du Sud) pour la mise à disposition des échantillons analysés.

Messieurs les Docteurs Kaustubh Adhikari du Département de Génétique, Evolution et Environnement de l'Université de Londres (Royaume-Uni), et Paul Monsarrat, du laboratoire STROMALab -CNRS ERL 5311, EFS, INP-ENVT, Inserm- de l'Université de Toulouse, pour leurs brillantes analyses statistiques.

Mr le Professeur Philippe Pomar, sans qui toute cette épopée de recherche fondamentale n'aurait pu s'initier et qui nous a fait l'honneur de siéger à nos comités de thèse.

Mr le Professeur Jean Champion, d'avoir siégé avec bienveillance à nos comités de thèse et de toujours nous apporter des conseils fructueux.

Mr le Professeur Jacques Margerit, qui a toujours été présent dans les moments les plus critiques de ces années. Nous vous témoignons notre profond respect et une reconnaissance toute particulière.

Mr le Professeur Philippe Valet, directeur de l'école doctorale BSB, et Mesdames Sylvia Pradère et Claire Caillaud pour leur patience et leur disponibilité.

Nous remercions les co-auteurs de la publication issue de ces travaux de recherche.

Nous remercions toutes les personnes rencontrées au cours de nos travaux de recherche pour l'accueil, le temps accordé et l'intérêt porté à notre sujet.

Nous remercions également

Toute l'équipe dirigeante et enseignante de l'UFR d'Odontologie de Montpellier et notamment le département Prothèses pour son soutien sans faille durant notre parcours.

L'équipe du cabinet dans lequel nous avons officié pendant 13 belles années. A mes deux anciens associés Laurent et Jean-Cédric et une dédicace spéciale à Maryline, Magali, Christine et Anne-Marie.

Nous remercions toutes les personnes qui ont été là pour m'accompagner et me soutenir durant ces années.

A mia Nonna,

A mes Parents,

A ma famille de France et d'Italie,

A mes filleuls, Louis et Marcus,

A ma marraine, Muriel,

A Marlo,

A mes Amis,

A Jean-Sébastien.

« Seul l'arbre qui a subi les assauts du vent est vraiment vigoureux, car c'est dans cette lutte que ses racines, mises à l'épreuve, se fortifient. » Sénèque.

TABLE DES MATIERES

I.3.2. Arizona State University Dental Anthropology System: ASUDAS.....	P 50
I.3.3. Technique <i>gold- standard</i> du scoring du <i>shoveling</i> en 2018.....	P 52
I.3.4. Variabilité géographique et temporelle d'expression et de fréquence du <i>shoveling</i> selon les populations.....	P 54
I.3.4.1. Variabilité temporelle.....	P 54
I.3.4.2. Variabilité géographique.....	P 55
I.4. Limites du système ASU.....	P 55
I.4.1. La problématique des expressions seuils.....	P 56
I.4.2. La problématique de l'erreur intra et inter observateur.....	P 56
I.4.3. La problématique de l'impact de l'usure et de la pathologie.....	P 58
I.4.4. La problématique des supports d'observation : plâtres et squelettes.....	P 58
I.4.4.1. Etude des spécimens sur moulages en plâtre.....	P 59
I.4.4.2. Etude des spécimens sur « crânes » réels.....	P 59
I.4.5. Hypothèses de départ de nos travaux.....	P 59
II. Apport de la morphométrie géométrique dans l'étude du <i>shoveling</i> : élaboration d'une nouvelle méthodologie.....	P 62
II.1. Définition et intérêts de la Morphométrie Géométrique (MG).....	P 63
II.2. Matériels et méthode.....	P 64
II.2.1. Echantillon.....	P 64
II.2.1.1 Les incisives centrales permanentes humaines.....	P 64
II.2.1.2. La plaque ASU-UI1.	P 66
II.2.2. Nouvelle méthode morphométrique d'étude du <i>shoveling</i>	P 67
II.2.2.1. Acquisition des données 3D par micro-CT.....	P 67
II.2.2.2. Transformation des données.....	P 69
II.2.2.3. Traitement des données.....	P 69
II.2.2.3.1. Importation et visualisation des données.....	P 69
II.2.2.3.2. Segmentation des données.....	P 70
II.2.2.3.3. Génération de la surface.....	P 71
II.2.2.3.4. Application du maximum de courbure.....	P 71
II.2.2.3.5. Détermination des plans de section.....	P 72
II.2.2.3.5.1. Délimitation de la ligne de plus contour bordant la fosse palatine.....	P 72
II.2.2.3.5.2. Définition des points de repères cervicaux.....	P 73
II.2.2.3.5.3. Détermination du plan cervical.....	P 74

II.2.2.3.5.4. Détermination du plan médian.....	P 74
II.2.2.3.6. Objectivation morphométrique du <i>shoveling</i> : positionnement des <i>semi-landmarks</i>	P 75
II.2.2.3.7. Illustration de la synthèse de notre nouvelle méthodologie morphométrique.....	P 76
II.2.2.3.8. Application de la méthode sur l'ensemble de l'échantillon.....	P 77
II.2.2.3.9. Gestion de l'asymétrie droite / gauche.....	P 77
II.2.3. Méthode conventionnelle ASUDAS.....	P 78
II.3. Outils statistiques.....	P 82
II.3.1. Tests de reproductibilité.....	P 82
II.3.2. Analyse Procruste.....	P 83
II.3.3 L'Analyse en Composantes Principales (ACP).....	P 84
II.3.4. Analyse non-Procruste.....	P 84
II.3.5. Interpolation <i>spline</i>	P 86
II.4. Résultats.	P 88
II.4.1. Test de reproductibilité de la méthodologie morphométrique.....	P 88
II.4.2. Test de reproductibilité de la méthode ASUDAS.....	P 88
II.4.3. Analyse de la distribution des échantillons étudiés par rapport aux grades ASUDAS.....	P 89
II.4.3.1. Analyse par superposition Procruste.....	P 89
II.4.3.1.1 Analyse en Composantes Principales (ACP).....	P 89
a. PC1 et PC2.....	P 89
b. PC3 et PC4.....	P 90
II.4.3.1.2. Histogramme de la répartition des PC1 selon la distribution des grades ASUDAS.....	P 90
II.4.3.1.3. Reproductibilité de la méthode Procruste.....	P 91
II.4.3.2. Analyse non-Procruste.....	P 93
II.4.3.2.1. Analyse en Composantes Principales (ACP).....	P 93
II.4.3.2.2. Histogramme de la répartition des paramètres métriques selon la distribution des grades ASUDAS.....	P 94
II.4.3.2.3. Reproductibilité de la méthode non-Procruste : comparaison PC Procruste et non-Procruste.....	P 95

III.2.4.2. Application de la méthode sur l'ensemble de l'échantillon.	P 125
III.2.4.3. Gestion de l'asymétrie droite / gauche.....	P 125
III.3. Outils statistiques.....	P 126
III.3.1. Tests de reproductibilité.....	P 126
III.3.2. Analyse Procruste.....	P 126
III.3.3. Analyse de la variance.....	P 126
III.4. Résultats.....	P 127
III.4.1. Test de reproductibilité de la méthodologie morphométrique.....	P 127
III.4.2. Analyse Procrustéenne.....	P 127
III.4.2.1. Illustration d'une superposition Procruste en 3D pour un spécimen (FM22 : 5193-21).....	P 127
III.4.2.2. Illustration de la superposition Procruste moyenne du <i>shoveling</i> des 31UI1 projeté dans un espace 2D.....	P 128
III.4.2.3. Analyse en Composantes Principales.....	P 128
III.4.2.4. Différences de distances procrustéennes entre les 3 techniques d'imagerie.....	P 129
III.5. Discussion, Synthèse et Perspectives.....	P 130
Conclusion générale.....	P 134
Références bibliographiques.....	P 138
Annexes.....	P165
Annexe 1. Fréquence des caractères discrets dentaires par groupe populationnel.....	P 166
Annexe 2. Rappels des principes de la morphométrie géométrique (MG).....	P 169
Annexe 3. Liste des 87 UI1 humaines modernes.....	P 170
Annexe 4. Liste des 30 UI1 humaines modernes sud-africaines.....	P 172
Annexe 5. Rappels de définitions générales en imagerie.	P 173
Annexe 6. Fiche technique sur l'imagerie non invasive active avec des rayonnements ionisants.....	P 174
Annexe 7. Fiche technique sur le principe de fonctionnement des scanners optiques.....	P 175
Annexe 8. Test de 2 scanners extra-oraux en amont de notre étude.....	P 180
Annexe 9. Tests de 2 scanners intra-oraux en amont de notre étude.....	P 181
Publications.....	P 182
Résumé/Abstract.....	P 199

Liste des Figures.

Figure 1. Vue de face d'un crâne datant de l'époque médiévale (XIème siècle). Site médiéval de Béragne (Trèbes, Aude-FR-). (Source INRAP 2014, Donat R., Carayon D.).....	P22
Figure 2. Exemple d'un caractère discret non-métrique dentaire : le <i>shoveling</i> des incisives maxillaires appelé également incisive en « forme de pelle » (Scott et Irish, 2017).....	P24
Figure 3. Arcade dentaire humaine et âge d'éruption.....	P25
Figure 4. Schéma illustrant les vues palatine, distale, vestibulaire et mésiale d'une incisive centrale maxillaire permanente (Source : Fehrenbach, 2008 dans Romeroswski and Boccara, 2017).....	P26
Figure 5. Exemple de <i>shoveling</i> marqué sur 11 et 21 dans une population amérindienne (Lima et Cunha, 2017).....	P27
Figure 6. Schéma simplifié de l'odontogénèse. LD : lame dentaire, CCN : cellules des crêtes neurales, EOD : papille primitive, OE : organe de l'émail, ZR : zone de réflexion. (Ohshima, 2008).....	P30
Figure 7. a. Dans « <i>vie et la culture de l'homme diluvien de Krapina en Croatie</i> », Dragutin Gorjanović-Kramberger décrit les résultats des fouilles et recherches et les découvertes de restes fossiles humains néandertaliens à Krapina (Croatie). Le livre a été publié en 1913 dans la <i>publication de l'Académie yougoslave des sciences et des arts</i> . b. Autre publication de D. Gorjanovic en 1918 sur <i>l'homme de Krapina</i>	P34
Figure 8. Portrait d'Aleš Hrdlička considéré comme le père de l'anthropologie physique aux Etats-Unis.....	P35
Figure 9. Exemplaire du livre « <i>Dental Anthropology. Volume V.</i> » (Brothwell DR, 1963)..	P40
Figure 10. Exemple de plaque ASUDAS : plaque ASU-UI1, objectivant le <i>shoveling</i> de l'incisive centrale maxillaire (Source Laboratoire AMIS, 2015, Braga J.).....	P43
Figure 11. Exemplaire du livre « <i>The anthropology of modern human teeth</i> » (Scott et Turner, 1997).....	P45
Figure 12. Photographie de la plaque ASU-UI1, objectivant le <i>shoveling</i> de l'incisive centrale maxillaire (Source Laboratoire AMIS, 2015, Braga J., Zanolli C.).....	P53
Figure 13. Exemples de 3 UI1 chinoises (Source IPVPP 2017, Lei P.).....	P65
Figure 14. Exemples de 8 UI1 françaises médiévales (Source INRAP 2016, Donat R., Carayon D.).....	P65
Figure 15. Sélection des 13 UI1 françaises contemporaines (Source MHNT 2017, Fleury G., Esclassan R., Zanolli C.).....	P66

Figure 16. Photographie de la plaque ASU-UI1 (Source Laboratoire AMIS 2015, Braga J.).	P66
Figure 17. Image 3D (source : Micro-CT) d'un spécimen sud-africain.....	P67
Figure 18. Image 3D (source : Micro-CT) des spécimens asiatiques.....	P68
Figure 19. Micro-CT Phoenix/GE Nanotom 180 (CIRIMAT Toulouse UMR 5085).....	P68
Figure 20. Image 3D (source : Micro CT) de la plaque ASU-UI1.....	P68
Figure 21. Logiciel Image J®.....	P69
Figure 22. Image orthoslice du maxillaire antérieur du spécimen 5885 (opérateur : Carayon D., 2016).....	P69
Figure 23. Isosurfaces du bloc incisif maxillaire du spécimen 5885. a. Vue vestibulaire. b. Vue palatine (opérateur : Carayon D., 2016).....	P70
Figure 24. Segmentation des UI1. Sélection de la dent à isoler 5885-11 (opérateur : Carayon D., 2016).....	P70
Figure 25. Génération de la surface de SA4:5885-11(opérateur : Carayon D., 2016).....	P71
Figure 26. Génération de la surface de SA4:5885-11 avec application du maximum de courbure (opérateur : Carayon D., 2016).....	P72
Figure 27. Mise en place des <i>semi-landmarks</i> afin d'objectiver la ligne de plus grand contour palatine de SA4 :5885-11(opérateur : Carayon D., 2016).....	P73
Figure 28. Mise en place des points de repères cervicaux SA4 :5885-11. a. Vue palatine. b. Vue vestibulaire (opérateur : Carayon D., 2016).....	P74
Figure 29. Détermination du plan médian, zone d'analyse du <i>shoveling</i> de SA4:5885-11 (opérateur : Carayon D., 2016).....	P75
Figure 30. Objectivation morphométrique du <i>shoveling</i> de SA4 :5885-11 (opérateur : Carayon D., 2016).....	P76
Figure 31. Position du plan de référence médian (a), qui sert à placer les <i>semi-landmarks</i> le long de la courbe de la face palatine du côté mésial vers le côté distal (b). Nous utilisons les maxima de la ligne de courbure extrême comme points de départ et d'arrivée de notre analyse de MG (opérateur : Carayon D., 2016).....	P76
Figure 32. a. Courbe initiale du <i>shoveling</i> de SA4 : 5885-11. b. Courbe du <i>shoveling</i> de SA4 : 5885-11, après application de l'« Effet Miroir » (opérateur : Carayon D., 2016).....	P77
Figure 33. Etapes de la technique de superposition Procruste (Evin et al, 2008).....	P83

Figure 34. Illustration de la profondeur maximale et de la surface de creux (a) utilisées dans les analyses non-Procruste (courbes <i>semi-landmark</i> alignées selon leurs premier et dernier points). (b) Les courbes des UI1 de la plaque de référence ASUDAS sont superposées suivant cette approche non-Procruste.....	P85
Figure 35. Analyse en composantes principales (ACP) des courbes de 100 <i>semi-landmarks</i> objectivant le <i>shoveling</i> selon la méthode Procruste. a : PC1 vs. PC2 ; b : PC3 vs. PC4.....	P89
Figure 36. Histogramme illustrant la fréquence des composantes principales Procruste PC1 pour les 87 spécimens humains modernes et la distribution des grades de référence ASUDAS (lignes verticales noires).....	P90
Figure 37. Visualisation Bland-Altman pour l'accord des observations visuelles ASUDAS et des coordonnées Procruste des courbes <i>semilandmark</i> . Les différents accords entre les deux évaluateurs ont été tracés pour les coordonnées X, Y et Z des points de repère. Parmi les 100 points de repère, seuls les premier, médian et dernier points de repère ont été dessinés.....	P92
Figure 38. Analyse en composantes principales (ACP) des courbes de 100 <i>semi-landmarks</i> objectivant le <i>shoveling</i> selon la méthode non-Procruste.....	P93
Figure 39. Histogramme illustrant les valeurs de profondeur maximale (b) et de surface de creux (c) pour les 87 spécimens humains modernes et la distribution des grades de référence ASUDAS (lignes verticales noires).....	P94
Figure 40. Histogrammes illustrant la fréquence des valeurs Procruste PC1 (a), de la profondeur maximale (b) et de la surface de creux (c) pour les 87 UI1 humaines modernes et la distribution des grades de référence ASUDAS (lignes verticales noires).....	P97
Figure 41. Tracés de la profondeur maximale par rapport à la notation visuelle ASUDAS des tests du premier observateur (VS1 T1 : a ; VS1 T2 : b) et du second observateur (VS2 : c)..	P102
Figure 42. Application de la méthode morphométrique sur une dent d'origine néandertalienne -D126 Krapina- (Source : laboratoire AMIS Zanolli C., 2017) (opérateur : Carayon D., 2017).....	P113
Figure 43. Superposition de 2 UI1 permettant de délimiter la ligne de plus grand contour palatine sur une dent usée (au-delà du stade 2 de Smith) (en gris : UI1 D126 Krapina avec une usure inférieure au stade 2 de Smith (Source : laboratoire AMIS Zanolli C., 2017), en rouge UI1 D123 Krapina avec une usure supérieure au stade 2 de Smith (Source laboratoire AMIS Zanolli C., 2017) (opérateur : Carayon D., 2017).....	P113
Figure 44. Vue palatine d'exemple d'UI1 d'origine française médiévale (FM 22 : 5193-21) (Source INRAP 2016, Donat R., Carayon D.).....	P119
Figure 45. Micro-CT Phoenix/GE Nanotom 180 (CIRIMAT Toulouse UMR 5085).....	P120

Figure 46. Plateau <i>multi-dies</i> du <i>7series</i> ® contenant 30 UI1	P121
Figure 47. 30 UI1 prêtes à la numérisation par le <i>7series</i> ®.....	P121
Figure 48. Fichier <i>.Ply</i> du specimen FM4 : 3384-11 scannée par la caméra <i>Condor</i> ® (opérateur : Carayon D., 2017).....	P122
Figure 49. Plaque ASU-UI1 scannée avec la caméra <i>Condor</i> ® (opérateur : Carayon D., 2017).....	P122
Figure 50. Connexion de la caméra <i>Condor</i> ® via un port USB (Duret E., Carayon D., 2017).....	P123
Figure 51. Phase de numérisation par la caméra <i>Condor</i> ® (opérateur : Carayon D., 2017).	P123
Figure 52. Objectivation morphométrique du <i>shoveling</i> de FM4 :3384-11 après application de l'« Effet Miroir » (opérateur : Carayon D., 2017).....	P125
Figure 53. Un exemple d'illustration de superposition Procruste 3D des coordonnées d'un spécimen (FM22 : 5193-21). En noir : micro-CT (MCT) ; en rouge : scanner intra-oral <i>Condor</i> ® (CO), en vert : scanner extra-oral <i>7 Series</i> ® (ST).....	P127
Figure 54. Illustration de la superposition des coordonnées Procruste (x-y) pour le <i>shoveling</i> moyen des 31 UI1 pour chacune des méthodes de numérisation. En noir : micro-CT (MCT); en rouge : scanner intra-oral <i>Condor</i> ® (CO), en vert : scanner extra-oral <i>7 Series</i> ® (ST).....	P128
Figure 55. Résidus en x et y pour chacune des méthodes de numérisation. En noir : micro-CT (MCT) ; en rouge : scanner intra-oral <i>Condor</i> ® (CO), en vert : scanner extra-oral <i>7 Series</i> ® (ST).....	P128
Figure 56. Facilité de transport du matériel de numérisation <i>Condor</i> ® (Duret E., Carayon D., 2017).....	P132
Figure 57. Ergonomie facilitée par la « prise stylo » de la caméra <i>Condor</i> ® (Duret E., Carayon D., 2017).....	P132

Liste des Tableaux.

Table 1. Abréviations des codes utilisés dans ASUDAS.....	P51
Table 2. Définition ASUDAS des degrés d'expression du <i>shoveling</i> des UI1 (Turner et al. 1991 ; Scott et Irish, 2017 ; Scott et al., 2018).....	P53
Table 3. Indices de l'usure dentaire des incisives et canines selon Smith (1984).....	P64
Table 4. Résultats du <i>scoring</i> visuel réalisé par 2 observateurs indépendants (tests intra and inter-observateur).....	P78
Table 5. Test de reproductibilité inter et intra-observateur de la méthode visuelle ASUDAS.....	P88
Table 6. Test de reproductibilité de la méthode non-Procruste. Corrélations intra-classe entre les différentes mesures obtenues à partir des coordonnées de tous les échantillons (87 échantillons humains et les 7 modèles de référence ASUDAS).....	P95
Table 7. Détermination du paramètre métrique le plus représentatif du <i>shoveling</i> Corrélations intra-classe entre les différentes mesures obtenues à partir des coordonnées des 7 modèles de référence ASUDAS.....	P99
Table 8. Corrélation <i>scoring</i> morphométrique prédictif / <i>scoring</i> visuel. Les valeurs de corrélation intra-classe (ICC) pour les mesures de cohérence et de précision intra-observateurs (VS1 T1 vs. T2) et inter-observateurs (VS1 vs. VS2) (comparaison des 3 scores visuels avec leurs valeurs prédictives à partir des dents de la plaque de référence ASUDAS).....	P100
Table 9. Corrélation des catégories ASUDAS attribuées par les observateurs avec la valeur ASUDAS prédictive, les quatre premiers PC de l'analyse Procruste, la profondeur maximale palatine maximale et la surface de creux.....	P104
Table 10. Variation du protocole ASUDAS : valeurs ICC pour les mesures de cohérence et de précision intra-observateurs (VS1 T1 vs. T2) et inter-observateurs (VS1 vs. VS2) (comparaison des 3 scores visuels avec leurs valeurs prédictives à partir des dents de la plaque de référence ASUDAS) lorsque les grades 0-1 et 2-6 sont fusionnés en deux groupes (division en deux catégories).....	P104
Table 11. Variation de l'échantillon : corrélations intra-classe entre les différentes mesures obtenues à partir des coordonnées des seuls échantillons français (contemporains et médiévaux). La profondeur maximale et la surface de creux sont les mesures directement mesurées selon la méthode d'alignement non-Procruste. Les composantes principales ont été obtenues à partir des méthodes Procruste et non-Procruste. Seule PC1 est présentée ici par souci de simplicité.	P106

Table 12. Corrélations des <i>scoring</i> visuels attribuées par les observateurs avec diverses mesures obtenues à partir des coordonnées de tous les échantillons français.....	P106
Table 13. Protocole d'objectivation morphométrique du <i>shoveling</i> appliqué sur le spécimen FM4 : 3384-11, numérisé selon 3 modes d'investigation : le micro-CT (MCT), le scanner extra-oral ou scanner de table <i>7Series</i> ® (ST) et le scanner intra-oral <i>Condor</i> ® (CO) (opérateur : Carayon D., 2017).....	P124
Table 14. Valeurs de z (<i>p-value</i>) obtenues à partir du modèle ANOVA pour comparer les 3 méthodes de numérisation.....	P129

Liste des Abréviations.

ACP : Analyse en Composante Principales.

AMIS : Laboratoire d'Anthropologie Moléculaire et d'Imagerie de Synthèse UMR 5288 CNRS (Toulouse).

ASUDAS: Arizona State University – Dental Anthropology System.

CIRIMAT : Centre Inter-Universitaire de Recherche et d'Ingénierie des Matériaux de l'Université de Toulouse.

CO: Scanner intra-oral *Condor*®.

GPA : Generalized Procruste Analysis (technique de superposition Procruste).

ICC : Corrélation Intra-Classe.

INRAP : Institut National de Recherches Archéologiques Préventives de St-Estève (France).

IPVPP : Institut de Paléontologie des Vertébrés et de Paléoanthropologie de Pékin (Chine).

PBC : Pretoria Bone Collection du Département d'Anatomie de l'Université de Pretoria (Afrique du Sud).

PC : Composante Principale.

MG : Morphométrie géométrique.

MHNT : Museum d'Histoire Naturelle de Toulouse (France).

MCT : Micro-CT (Microtomographie à Rayons X).

MMD : Mesure moyenne de la divergence (*Mean Measure of Divergence*)

ST: Scanner extra-oral *7Series*®.

Abréviations utilisées pour la nomenclature des dents :

U= *Upper* (Supérieur / Maxillaire)

L= *Lower* (Inférieur/ Mandibulaire) si première lettre d'une abréviation

L=*Left* (Gauche)

R= *Right* (Droite)

I= Incisive (I1= Incisive centrale ; I2= Incisive latérale)

C= Canine

P= Prémolaire (P1= première prémolaire ; P2= deuxième prémolaire)

M= Molaire (M1= première molaire ; M2= deuxième molaire ; M3= troisième molaire)

MD= Mésio-Distal

VL=Vestibulo-Lingual

AVANT-PROPOS

L'anthropologie physique étudie les variations de la biologie humaine à travers le temps et l'espace (Scott et Turner, 1997).

Les variations biologiques ont un intérêt scientifique à l'échelle de l'Histoire des populations, via des comparaisons inter et intra spécifiques, mais également un intérêt juridique et médico-légal à l'échelle des individus ou des familles, via l'estimation de l'âge au décès ou des connaissances de rites (Scott et al., 2016).

Durant l'ère pré-darwinienne, dans les premières classifications de Blumenbach ou Cuvier, les dents ne jouaient aucun rôle en anthropologie. Après Darwin et son principe de sélection naturelle, la communauté scientifique a accepté que les humains fussent des primates et leurs relations proches des singes (Irish et Scott, 2016). Les dents commencèrent à être étudiées, et au XIX^{ème} siècle, certains anthropologues ont exploré l'utilité des dents et leur rôle dans la compréhension de la santé et des mœurs (Broca, 1879 ; Scott, 2016).

Dans ce contexte, l'anthropologie dentaire est devenue un domaine à part entière de l'anthropologie physique qui regroupe de nombreux domaines d'investigation, tels que l'anthropologie, l'odontologie, la génétique, l'anatomie ou encore la paléontologie (Scott et Turner, 1997). L'objectif premier de cette discipline est d'utiliser les dents pour répondre aux questions de l'évolution humaine.

A partir du modèle de base, ou schéma dentaire principal qui caractérise toutes les dents humaines, les dents présentent des traits morphologiques non métriques et métriques qui varient au sein et entre les populations. La morphologie des dents fait partie de l'héritage biologique que les humains portent avec eux lorsqu'ils migrent, tout comme leurs gènes du groupe sanguin, leurs empreintes digitales et d'autres caractéristiques biologiques (Scott et Turner, 1997).

D'un point de vue évolutif, leur observabilité dans les populations existantes et leur disponibilité dans les archives archéologiques et fossiles leur confèrent une position presque unique parmi les caractères biologiques dans l'étude de l'évolution à court et à long terme des hominidés. En raison des rythmes inhérents à leur formation par apposition de couches successives, les tissus dentaires minéralisés contiennent des renseignements précieux sur la croissance et le développement de la couronne. Contrairement aux os qui ont la faculté de se remodeler en permanence au cours de la vie, l'émail ne se régénère pas et permet à l'organe dentaire d'être un excellent indicateur du stade de développement, un bon témoin de l'environnement écologique, des modes alimentaires et culturelles.

Pour les populations humaines récentes, la morphologie des dents et la taille de la couronne témoignent des variations géographiques. Quand des groupes humains sont isolés

les uns des autres pendant une longue période, la fréquence des traits couronne/racine varie à des degrés divers, selon la taille de la population et la durée de l'isolement. Nous parlons alors de divergence ou de convergence des traits. « *Lorsque des populations divergentes entrent en contact et se reproduisent, les populations résultantes possèdent des caractères morphologiques convergents* » (Scott et Turner, 1997 : 12). En d'autres termes, les caractéristiques polymorphes de la denture se comportent comme d'autres variables biologiques qui sont utilisées pour évaluer l'histoire de la population et les processus évolutifs.

Le développement dentaire est régulé dans une large mesure par l'action des gènes, non seulement pour la couronne et la racine dentaire, mais aussi pour une multitude de variantes structurelles morphologiques positives et négatives (Scott et Turner, 1997 ; Jernvall et al., 2000 ; Salazar-Ciudad et Jernvall, 2002, 2010 ; Park et al., 2012). Dahlberg (1951 :140) disait : « *Toutes les dentures humaines sont fondamentalement les mêmes. Les différences entre les individus sont dans le nombre et l'étendue des caractères primaires et secondaires des groupes de dents, qui sont à leur tour les reflets de la constitution génétique de l'individu.* »

Ainsi, les dents et os dérivés de sources archéologiques sont les principales preuves directes et diachroniques de l'évolution humaine. Même si les données de la morphologie dentaire sont moins précises que les données génétiques, leur analyse est un outil puissant pour déterminer l'affinité de la population et peut jouer un rôle fondamental dans l'estimation de l'ascendance médico-légale et de l'identification individuelle. De nouveaux paradigmes se développent en anthropologie dentaire et le défi, lancé à cette discipline ces dernières années, est de répondre à des questions plus spécifiques comme affiner les méthodes de notation des traits morphologiques dentaires (Townsend et al., 2012 ; Scott, 2016). C'est dans ce contexte que va s'inscrire notre travail de thèse.

INTRODUCTION

Le *shoveling* de l'UI1 (ou l'incisive en « forme de pelle ») représente un marqueur valable pour discriminer les groupes humains et évaluer l'ascendance. Cette caractéristique dentaire non-métrique a retenu l'attention des anthropologues comme indicateur des relations entre les populations et est fréquemment utilisée pour sa pertinence taxonomique et phylogénétique depuis de nombreuses décennies (Scott et Turner, 1997 ; Irish et al., 2014). Ce trait dentaire, génétiquement le plus connu, implique un polymorphisme nucléotidique (SNP) du gène récepteur A de l'ectodysplasine A (EDAR), très probablement la cible d'une sélection positive dans les populations asiatiques, ce qui se traduit par des dents « en forme de pelle » marquées (Kimura et al., 2009).

Le *shoveling* a été défini, initialement, comme le degré d'élévation des crêtes mésiale et distale marginales sur la surface linguale des incisives maxillaires, des canines et des incisives mandibulaires, avec des formes plus prononcées renfermant une fosse (Hrdlička, 1920 ; Dahlberg, 1956; Turner et al., 1991 ; Scott et Turner, 1997). Il est généralement plus marqué et variable sur les incisives maxillaires centrales et latérales (UI1 et UI2), UI1 étant la dent référence (Irish et Scott, 2016). Somme toute, la définition anatomique du *shoveling* fait l'objet de nombreuses polémiques (Mizoguchi, 1985 ; Crummett, 1994,1995), ne facilitant pas l'analyse de ce trait.

Depuis le XIX^{ème} siècle jusqu' à aujourd'hui, plusieurs tentatives ont été faites pour classer et évaluer les différences de *shoveling* entre les populations humaines fossiles et existantes, en utilisant d'abord des approches descriptives détaillées et en élaborant par la suite des systèmes de notation des traits (Irish et Scott, 2016).

Après les premiers travaux influents de Hrdlička (1920) et de Dahlberg (1956), qui ont normalisé une plaque de classification à quatre grades pour le *shoveling* de l'incisive maxillaire, certains chercheurs ont tenté de réduire la subjectivité visuelle en mesurant la profondeur du *shoveling* lingual, mais avec peu de succès dans leurs résultats en raison des problèmes de précision de la méthode (Dahlberg et Mikkelsen, 1956 ; Carbonell, 1963 ; Goaz et Miller, 1966 ; Hanihara, 1969). Plus tard, Scott (1973) a mis au point une échelle ordinale de sept grades qui a ensuite été adaptée et intégrée par Turner et ses collaborateurs (1991) à un système formel de notation des traits non métriques de la morphologie dentaire : le *Arizona State University Dental Anthropology System* (ASUDAS) (Scott, 1973 ; Turner et al., 1991 ; Scott et Turner, 1997). Ce protocole standard largement utilisé est basé sur des plaques de plâtre de référence représentant les moulages de dents sélectionnées montrant un gradient d'expression d'un trait particulier (Scott et Turner, 1997).

Depuis leur élaboration, le nombre de caractères et de plaques a augmenté et certains d'entre eux ont été adaptés à la gamme de variation morphologique exprimée par les hominins fossiles (Bailey, 2006 ; Bailey et Hublin, 2013 ; Irish et al., 2013 ; Irish et Scott, 2016).

De nos jours, la notation et l'analyse des caractères non métriques dentaires représentent une procédure diagnostique courante pour mettre en évidence les affinités ancestrales et génétiques et étudier les variations humaines dans les études anthropologiques, paléoanthropologiques et médico-légales (Turner et al., 1991; Scott et Turner, 1997; Irish, 1998; Coppa et al., 2001 ; Irish, 2014; Irish et Guatelli-Steinberg, 2003; Vargiu et al., 2009 ; Bailey et Hublin, 2013; Zanolli, 2013; Zanolli et al. 2014 ; Irish, 2016b ; Irish et Scott, 2016). Après un apprentissage de la méthode avec un expert, l'approche ASUDAS des caractères morphologiques est facile, rapide et fiable et reste aujourd'hui la technique de référence (Scott et Irish, 2017 ; Scott et al., 2018).

Cependant, la notation visuelle, même si elle est contrôlée par des définitions strictes des caractéristiques et de l'expérience de l'observateur, comporte une part inévitable de subjectivité. La méthode ASUDAS comporte trois éléments de limitations majeures inhérentes à sa définition. Tout d'abord, les spécimens sélectionnés pour représenter les grades de référence sur les plaques ont été choisis par appréciation qualitative. Or, les grades ne représentent pas nécessairement les variations morphologiques de manière linéaire. La deuxième limite réside dans la différence visuelle minimale entre certains niveaux d'expression et donc, dans la difficulté pour les utilisateurs de classer les échantillons analysés par rapport à l'ASUDAS (surtout pour les débutants). Le choix des dents de référence lors de la création de la méthode ASUDAS et la comparaison des échantillons dentaires avec les plaques ASUDAS dépendent des observations/palpations et de l'expérience de l'observateur (c'est-à-dire de la subjectivité de l'opérateur). Enfin, les supports d'observation de la méthode ASUDAS peuvent entraîner des pertes d'informations, de par l'usure des plaques de plâtre dans le temps.

Hillson a écrit : *"human eyes and brain are unsurpassed in discerning tiny differences between objects compared side by side, but it is much more difficult to define a scheme for recording size and shape in such a way that comparisons can be made between hundreds of such objects"* (Hillson, 1996:68), qui se traduirait par *"même si l'oeil humain est un formidable outil pour visualiser des détails même infimes, notre cerveau n'arrive pas forcément à garder en mémoire ces détails de manière objective et à les comparer sur des centaines ou milliers de dents observées"*.

Dans ce contexte, l'objectif principal de nos travaux de recherche est de proposer une nouvelle approche méthodologique quantitative basée sur l'imagerie 3D dans l'étude comparative du *shoveling* des incisives centrales maxillaires, représentant une alternative ou un complément de la méthode ASUDAS.

Le second objectif de cette thèse est de proposer une nouvelle méthode d'investigation des échantillons à analyser en réalisant une empreinte optique via un scanner intra-oral ergonomique, afin de s'affranchir des supports conventionnels d'observation.

Cette thèse comporte 3 chapitres principaux :

-dans le premier chapitre, nous décrirons le contexte actuel des connaissances sur l'étude du *shoveling*. A la fin de cette partie, nous exposerons les problématiques et les hypothèses de départ de nos travaux.

-dans le deuxième chapitre, nous présenterons la nouvelle méthodologie morphométrique que nous proposons pour étudier le *shoveling* de l'incisive centrale maxillaire. Après un bref rappel sur la morphométrie géométrique, nous aborderons la partie « Matériel et Méthodes », présentant l'échantillon initial, l'acquisition des données et leur traitement. Nous présenterons ensuite les « Outils statistiques » utilisés puis nous exposerons les « Résultats ». Enfin, la « Discussion » exposera l'interprétation des résultats et situera ce travail dans le contexte actuel des thématiques de recherche en anthropologie dentaire.

-dans le troisième chapitre, nous présenterons l'intérêt de l'empreinte optique des spécimens à étudier dans le cadre de l'application de la nouvelle approche morphométrique du *shoveling*. Après un bref rappel sur l'imagerie 3D non invasive sans rayonnements ionisants, le chapitre s'articulera autour des parties « Matériel et Méthodes », « Outils statistiques », « Résultats » et « Discussion ».

I. LE *SHOVELING* : ETAT DE LA QUESTION.

I.1. Généralités sur l'organe dentaire.

I.1.1. Intérêts qualitatif et quantitatif des dents.

La couronne dentaire est le tissu le plus minéralisé de tous les tissus du corps humain (70% de minéralisation pour la dentine, 96% pour l'émail principalement composé d'hydroxyapatite $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$) (Eisenmann, 1994). Ce contenu hautement minéral confère à l'organe dentaire une dureté supérieure aux os humains, ce qui lui assure une résistance très importante dans la plupart des milieux. L'émail peut supporter des forces mécaniques et chimiques telles que la mastication, l'acidité des aliments (Nanci, 2013) et une multitude de forces post mortem (pression du sol, mouvement aquatique, ...) (Lease, 2016). Ainsi, dans les niveaux archéologiques et paléontologiques, il est fréquent de retrouver une dent isolée alors que le squelette est absent.

Une fois formée, hormis dans les cas de pathologies dentaires et d'usure, la dent permanente conserve sa forme tout au long de la vie de l'individu (Scott et Turner, 1997). La non régénérescence de l'émail permet à l'organe dentaire d'être un excellent indicateur du stade de développement, un bon témoin de l'environnement écologique, des modes alimentaires et culturelles (Figure 1).

La dent est un excellent marqueur évolutif (Ungar, 2017). C'est un organe hautement spécialisé, dont les caractéristiques ont subi une évolution constante au cours de l'évolution humaine. L'association de différents critères tels que la forme de l'arcade dentaire, la présence de diastèmes, la taille des dents, l'épaisseur d'émail et la morphologie dentaire (nombre de cuspides, anatomie dentaire, facettes d'usure, ...) constitue un profil dentaire spécifique d'une espèce donnée (Métairie, 2014).



Figure 1. Vue de face d'un crâne datant de l'époque médiévale (XIème siècle). Site médiéval de Béragne (Trèbes, Aude-FR-). (Source INRAP 2014, Donat R., Carayon D.).

I.1.2. La dent et son haut degré d'individualité morphologique.

La dent présente un haut degré d'individualité morphologique via deux types de variations :

-des *variations majeures* à partir du schéma standard de la dentition (agénésie, dent surnuméraire, hypodontie, fusion entre les dents adjacentes). Bien que moins de 5 % des membres d'une population présentent des dents supplémentaires (hyperodontie), il n'est pas rare que des individus manquent d'une ou de plusieurs dents (anodontie ou hypodontie) (Scott et Turner, 1997).

-des *variations mineures* (qui concernent la configuration des cuspides, sillons, racines). Les variations mineures (caractères discrets dentaires) sont les variations les plus fréquentes au sein et entre les populations (Scott et Turner, 1997 ; Hardy, 2015).

Les études anthropologiques visent plus les variations mineures qui ont une grande signification évolutive que les déviations majeures au schéma de base, plus probablement dues aux défauts de développement qu'à la génétique (Butler, 1982).

Les traits morphologiques dentaires non métriques prennent diverses formes. Carlsen a défini quatre unités macromorphologiques que sont : le complexe de crêtes marginales (unité du *shoveling*) ; les dérivés du cingulum ; le complexe surnuméraire ; la ligne d'email cervical (Carlsen, 1987). Cette classification ne tient pas compte de deux autres variantes principales que sont le nombre des cuspides principales et les cuspides surnuméraires.

Ces six catégories sont utilisées pour décrire les principaux traits non métriques des couronnes dentaires. Ces traits variables, caractéristiques de la morphologie dentaire, sont des caractères discrets.

I.1.3. Les caractères discrets non-métriques dentaires.

Ce terme est employé suivant le sens du mot latin « discretus » - séparé-, en opposition aux caractères à variation continue, tels que les caractères ostéométriques (Crubézy et Sellier, 1990).

Les caractères discrets sont des expressions observées sur les dents et les os, caractérisées par des variations de taille ou de forme des cuspides, des particularités anatomiques des couronnes dentaires, des racines, des tubérosités, des crêtes, des foramina, des facettes articulaires et autres structures.

Ces variations polyfactorielles, déterminées par des facteurs génétiques et mésologiques, sont non pathologiques et sont difficilement mesurables ou quantifiables (Berry, 1978 ; Saunders et Popovitch, 1978 ; Sjøvold, 1984 ; Crubézy et Sellier, 1990 ; Crubézy, 1991 ; White, Black et Folkens, 2016).

Certains de ces traits sont basés sur la dichotomie absence/présence (par exemple, un torus palatin). D'autres caractères non-métriques, comme le *shoveling*, ne sont pas littéralement absents ou présents (Figure 2). On note des différences majeures dans l'expression et la fréquence selon les populations (Scott et Turner, 1997).

Les fréquences relatives des caractères discrets dentaires permettent l'étude des relations entre les populations. Les populations qui partagent un grand nombre de traits en commun sont considérées comme apparentées (Larsen, 1997).

Largement utilisés dans l'approche de la délimitation des populations humaines du passé et du présent, ils ont aussi été utilisés pour l'étude de l'organisation des espaces funéraires (Crubézy et al., 2008).

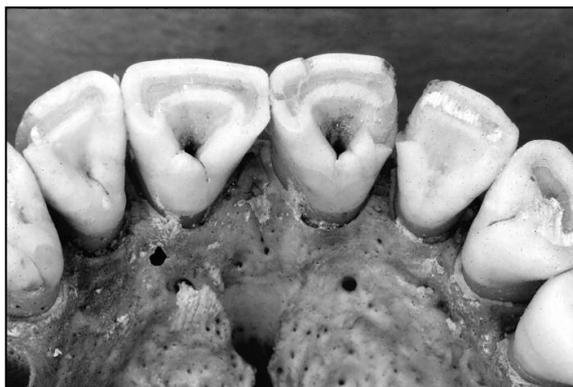


Figure 2. Exemple d'un caractère discret non-métrique dentaire : le *shoveling* des incisives maxillaires appelé également incisive en « forme de pelle » (Scott et Irish, 2017).

I.2. Le *shoveling* de l'incisive permanente centrale maxillaire (UI1).

I.2.1. Anatomie dentaire de l'UI1.

I.2.1.1. La denture permanente.

Lorsque les anatomistes dentaires écrivent sur la morphologie dentaire, ils s'intéressent principalement à la forme normative des dents (Wheeler, 1968 ; Carlsen, 1987).

Par exemple, la formule dentaire humaine du 2-1-2-3, que partagent tous les primates catarrhiniens (singe ancien, grands singes et humains) se réfère au nombre de différents types de dents dans chaque quadrant des mâchoires supérieures et inférieures.

La denture humaine permanente (aussi appelée secondaire ou succédanée), composée de 32 dents, débute à l'éruption des dents permanentes à l'âge de 6 ans environ et finit vers 18 à 21 ans (Lease, 2016) (Figure 3). Dans chaque quadrant, les humains ont 2 incisives (I1 et I2), 1 canine (C), 2 prémolaires (P1 et P2) et 3 molaires (M1, M2 et M3) en miroir par rapport au plan sagittal médian (Irish, 2016a). L'utilisation de lettres majuscules permet de différencier ces désignations de celles des dents de lait (Scott et Turner, 1997).

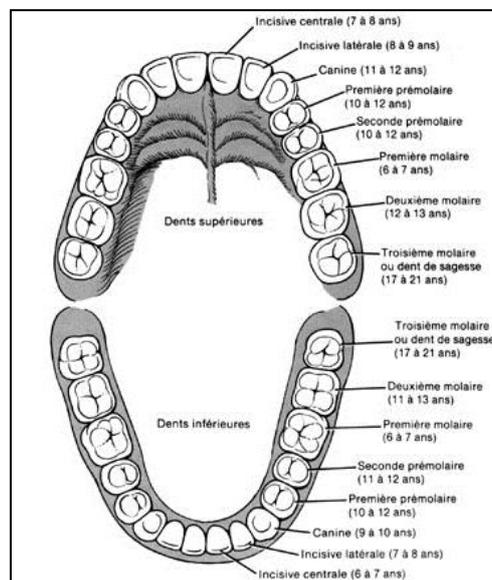


Figure 3. Arcade dentaire humaine et âge d'éruption.

I.2.1.2. L'incisive centrale maxillaire (UI1).

L'incisive centrale maxillaire (UI1) remplace l'incisive centrale déciduale vers 7/8 ans (Hillson, 2014 ; Liversidge, 2016). La calcification des UI1 débute à 3 ou 4 mois. Elles peuvent être caractérisées comme étant spatulées et à racine unique. La racine est conique et large. L'apex peut avoir une inclinaison mésiale ou distale et la fermeture physiologique de l'apex a lieu vers 10 ans (Lasserre, 2008) (Figure 4).

Leur rôle fonctionnel est de couper ou trancher pendant la mastication (Lease, 2016). L'UI1 ressemble à son homologue de lait, mais elle est significativement plus large.

Pour les UI1, il peut y avoir deux rainures de développement sur la surface vestibulaire qui se projettent sur l'arête incisale, objectivant des structures nommées « mamelons » (Hillson, 1996). Ces mamelons sont évidents sur les dents fraîchement éruptives et ont tendance à s'user chez les individus de plus de 7 ou 8 ans, selon l'âge et le régime alimentaire.

La face palatine peut comporter des crêtes marginales, caractéristiques du *shoveling*.

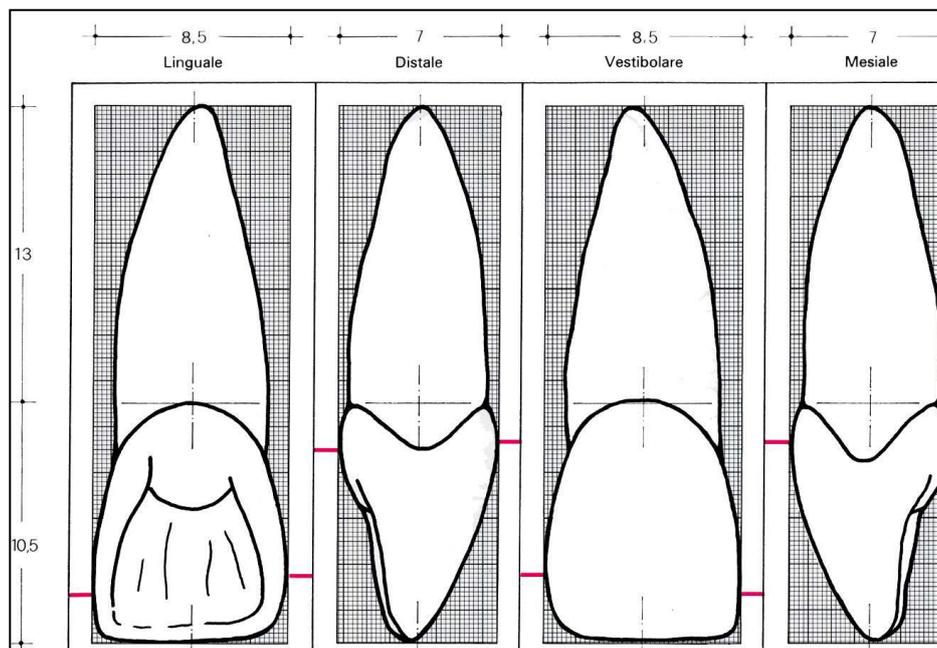


Figure 4. Schéma illustrant les vues palatine, distale, vestibulaire et mésiale d'une incisive centrale maxillaire permanente (Source : Fehrenbach, 2008 dans Romeroswski and Boccara, 2017).

I.2.2. Définition du *shoveling*= « dents en pelle » = *shovel shaped incisors*.

Le *shoveling* correspond à la concavité palatine ou linguale des dents monoradiculées maxillaires et mandibulaires (Incisive centrale et latérale maxillaire -UI1 et UI2-, Incisive centrale et latérale mandibulaire -LI1 et LI2-, Canine maxillaire -UC-, Canine mandibulaire -LC-).

La particularité de ce trait est la présence de crêtes marginales distale et mésiale sur la surface palatine des incisives maxillaires et mandibulaires (Turner et al., 1991 ; Scott et Turner, 1997 ; Scott et al., 2018) (Figure 5).



Figure 5. Exemple de *shoveling* marqué sur 11 et 21 dans une population amérindienne (Lima and Cunha, 2017) (photographie Cunha 2016).

Dans l'article initial décrivant le *shoveling*, Hrdlička soulignait la présence d'une « fosse linguale » entourée par un rebord d'émail en insistant sur le fait que la fosse serait la conséquence du développement des crêtes marginales (Hrdlička, 1920).

Pour une dent « en forme de pelle », les crêtes marginales s'étendent du bord incisal jusqu'à l'éminence basale, et parfois, dans des cas très prononcés, les crêtes peuvent converger vers cette éminence. En 1951, parmi les incisives latérales maxillaires des Indiens Pima, Dahlberg a décrit des formes "anormales" avec un *tuberculum dentale* si prononcé, que l'incisive ressemblait à une prémolaire (Mizoguchi, 1985).

Beaucoup de chercheurs ont évalué l'expression des crêtes marginales distale et mésiale pour scorer un seul trait : le *shoveling*.

Les crêtes marginales peuvent cependant exprimer différents degrés d'expression (Mizoguchi, 1985). Ainsi, ne scorer qu'un seul trait peut être critiquable. Ceci est particulièrement vrai pour les dents où le *shoveling* est faible (une crête présente et l'autre absente).

Il est cependant communément admis qu'en raison d'une corrélation étroite de l'expression des deux crêtes, peu d'informations sont perdues si on ne considère qu'un seul trait (Scott et Turner, 1997 ; Scott et Irish, 2017).

La difficulté à définir le *shoveling* entraîne des polémiques quant à son analyse stricte. Pour exemple, Turner et al. ne se concentrent que sur le développement des crêtes marginales alors que Mizoguchi et Crummett ont essayé de définir le *shoveling* en terme de « dent entière » (Mizoguchi, 1985 ; Turner et al., 1991 ; Crummett, 1995 ; Bayley, 2006).

Mizoguchi inclut la présence du tubercule lingual dans la définition du *shoveling* (Mizoguchi, 1985). Crummet propose que le *shoveling* soit exprimé selon 3 dimensions : le développement des crêtes marginales, la présence d'un tubercule lingual - allant d'un simple renflement à une véritable cuspide indépendante- et la convexité vestibulaire coronaire (Crummett, 1994, 1995).

Plus récemment, à l'aide de l'imagerie par microtomographie à rayons X, Denton a étudié la relation des 3 dimensions du *shoveling*, telles que décrites par Crummett, avec la surface externe coronaire de l'incisive et la jonction amélo-dentinaire dans un échantillon limité de 10 incisives centrales et latérales permanentes maxillaires humaines (Denton, 2011).

I.2.3. Etiologie du *shoveling*.

I.2.3.1. Origine génétique du *shoveling*.

L'hérédité mendélienne classique ou monogénique est basée sur la transmission d'un seul gène sous un mode dominant, récessif ou lié à un chromosome sexuel X ou Y.

Le développement dentaire est régulé dans une large mesure par l'action des gènes, non seulement pour la couronne et la racine dentaire, mais aussi pour une multitude de variantes structurelles morphologiques positives et négatives (Scott et Turner, 1997 ; Jernvall et al., 2000 ; Salazar-Ciudad et Jernvall, 2002,2010 ; Park et al., 2012). Mac Kusick, en 1990, a résumé l'ensemble des travaux réalisés sur le mode de transmission du *shoveling* (Turner, 1967 ; DeVoto et al., 1968 ; DeVoto et Perrotto, 1971 ; Portin et Alvesalo, 1974 ; Mac Kusick, 1990) et a conclu que la transmission était basée sur un mode autosomique dominant.

Le *shoveling* implique un seul polymorphisme nucléotidique (SNP) du gène récepteur A de l'ectodysplasine A (EDAR), très probablement la cible d'une sélection positive dans les populations asiatiques, ce qui se traduit par des dents « en forme de pelle » marquées (Kimura et al., 2009 ; Park et al., 2012). Cependant, EDAR a des effets pléiotropiques. Une étude récente a montré que sa sélection dans des groupes asiatiques était liée à son effet d'augmentation de la ramification des canaux dans la glande mammaire, amplifiant ainsi le transfert de nutriments aux nourrissons par le lait maternel (Hlusko et al., 2018). Dans ce cas, l'expression phénotypique dentaire associée à ce gène pourrait simplement représenter un effet secondaire lié à une sélection pour l'alimentation des nourrissons.

Dans tous les cas, l'expression du *shoveling* varie en fonction des groupes humains et représente un marqueur valable pour discriminer les groupes humains et évaluer l'ascendance.

I.2.3.2. Ontogénèse dentaire.

La denture est le produit d'un système de développement hautement intégré et canalisé (Saunders et Mayhall, 1982). À l'exception d'importantes agressions environnementales et d'anomalies chromosomiques, le mécanisme de contrôle génétique, guidant l'ontogénèse dentaire depuis la formation de la lamelle jusqu'à l'éruption de la dent et la formation des racines, fonctionne de manière précise et ordonnée pour produire des dents, des classes de dents et des détails structurels des couronnes et des racines.

Le bourgeon dentaire, appelé également organe de l'émail, est d'origine ectodermique. Il entoure à sa face interne le mésenchyme d'origine neuroectodermique (crête neurale) qui forme la papille dentaire. Les bords de l'organe de l'émail se développent plus rapidement que son centre, constituant ainsi la cloche dentaire. Le mésenchyme entourant le bourgeon dentaire se condense pour former le sac dentaire, à l'origine du ligament alvéolo-dentaire, du ciment et de la racine dentaire (Harris, 2016).

Dans l'organe de l'émail, nous distinguons les épithéliums adamantins externe et interne. Entre les deux, se trouve la pulpe de l'émail (réticulum adamantin). L'épithélium adamantin est nourri depuis l'extérieur par un réseau capillaire, la pulpe restant elle-même avasculaire. La couche d'améloblastes (ou adamantoblastes), qui se forme à partir de l'épithélium adamantin interne, produit l'émail en direction de la papille dentaire sous la forme de prismes d'émail (Figure 6).

ODONTOGÉNÈSE

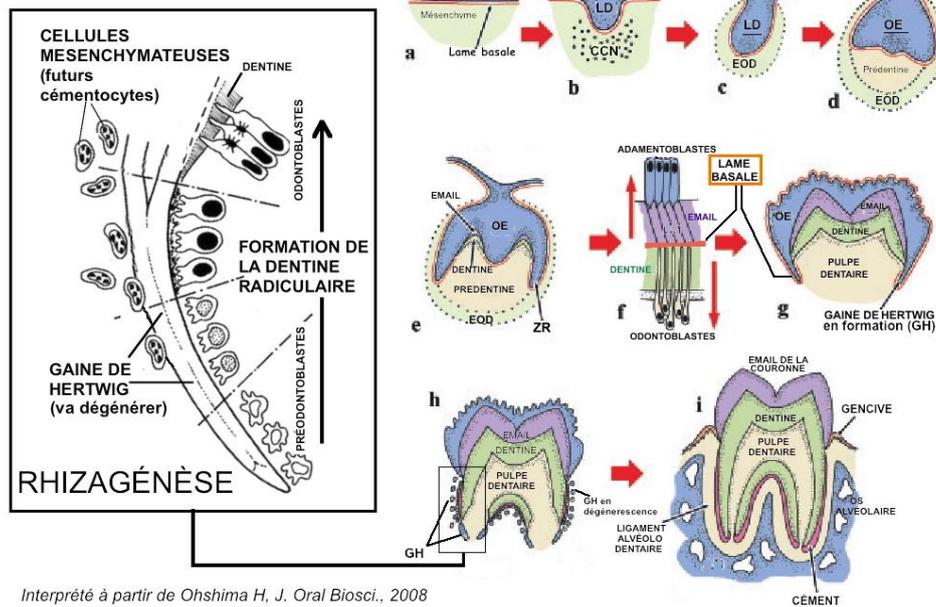


Figure 6. Schéma simplifié de l'odontogénèse. LD : lame dentaire, CCN : cellules des crêtes neurales, EOD : papille primitive, OE : organe de l'émail, ZR : zone de réflexion. (Ohshima, 2008).

D'un point de vue phylogénétique, certains composants des dents ont résisté à l'épreuve du temps et de l'évolution. En tant que « composante structurelle conservatrice » des dents, l'amélogénine est un mauvais candidat pour l'étude de la variation humaine. La forme générale des couronnes de dents hominoïdes est demeurée relativement stable pendant plus de 30 millions d'années.

En revanche, les mécanismes de contrôle génétique qui guident l'odontogénèse ont une certaine latitude pour produire des différences dans la morphologie superficielle de la couronne, le nombre et la forme des racines, ainsi que des variations dans la taille de la couronne et le nombre de dents.

Pour les incisives en « forme de pelle », l'émail et la dentine sont impliqués dans l'expression de ce trait. Les fœtus des Amérindiens, des blanc Américains et des Japonais ont des incisives qui présentent l'expression marquée des crêtes linguales marginales dans la matrice d'émail mou (Scott et Turner, 1997). Sur cette base, Kraus et Jordan (1965) ont conclu à la présence du *shoveling* sous sa forme complète dans la dent pré-calcifiée, ce qui implique un contrôle génétique de l'activité mitotique dans les cellules de l'épithélium interne de l'émail (Kraus et Jordan, 1965).

Les résultats de Denton confortent l'origine développementale de la morphologie du *shoveling* car ils ont permis de constater que les caractéristiques du *shoveling* observées à la jonction amélo-dentinaire sont liées à la taille et à la forme générale de l'incisive, mais surtout principalement à la forme du *shoveling* (Denton, 2011).

I.2.3.3. Asymétrie fluctuante et *shoveling*.

Les antimères de gauche et de droite présentent des images miroir de forme, de taille, présence, et de détail morphologique. Il y a cependant des exceptions, car les caractères de la couronne et de la racine présentent un degré variable d'asymétrie (certains d'entre eux affichent plus d'asymétrie que d'autres). L'asymétrie fluctuante d'un organisme est une petite déviation aléatoire à partir d'une symétrie bilatérale parfaite (Groeneveld et Kieser, 1991 ; Graham et al., 1993 ; Markow, 1995 ; Palmer, 1996 ; Klingenberg et Nijhout, 1999 ; Gawlikowska et al. 2007 ; Bollini et al. 2009 ; Jeong et al. 2013).

Bien qu'il n'y ait pas de données probantes à l'appui du contrôle génétique direct de l'asymétrie, il existe de nombreuses preuves expérimentales démontrant qu'une asymétrie accrue peut être induite par divers facteurs de stress environnementaux (par exemple le bruit, le froid, la chaleur, ...) invoqués pendant la période de développement dentaire (Siegel et Doyle, 1975a, b ; Siegel et al., 1977 ; Siegel et Mooney, 1987 ; Scott et Turner, 1997 ; Rizk et al., 2008).

Les traits dentaires ne présentent pas de biais latéral (avec l'expression plus prononcées à gauche ou à droite). Les caractères morphologiques dentaires présentent donc une certaine asymétrie fluctuante, mais le niveau d'asymétrie pour ces caractères, et la denture dans son ensemble, est relativement faible (Scott et Turner, 1997).

En raison de cette question secondaire, les traits dentaires peuvent être notés sur le côté gauche seulement, sur le côté droit seulement, sur toutes les dents droites et gauches observables, sur l'antimère ayant le plus d'antécédents cliniques.

I.2.3.4. Dimorphisme sexuel et *shoveling*.

En 1980, Harris, en analysant des données descriptives du *shoveling* classé selon une échelle ordinale (cf. § I.3.1.3.3.), prétend que le *shoveling* de l'incisive centrale maxillaire est plus fréquent chez les femmes que chez les hommes.

A partir de 6 échantillons géographiques mixtes composés de 38 sous-échantillons et de plus de 19 000 individus, les femmes montrent des fréquences plus élevées de *shoveling* dans la population regroupant les îles du Pacifique. Pour les autres populations étudiées, la différence de *shoveling* entre mâles et femelles est mineure et statistiquement non significative (Harris, 1980 ; Scott et Turner, 1997). D'autres chercheurs, qui ont mesuré la profondeur du *shoveling*, ont conclu soit à une différence significative entre les sexes en faveur des femmes (Rothhammer et al., 1968) soit à aucune différence entre les sexes (Aas et Risnes, 1979a ; Mizoguchi, 1985).

En résumé, le bien-fondé d'un dimorphisme sexuel panhumain pour le *shoveling* de l'UI1 n'est pas clairement établi. Même lorsque des différences ont été constatées, elles sont généralement si légères qu'il serait difficile de démêler un mécanisme de développement sous-jacent (effet lié au chromosome X) (Scott et Turner, 1997).

I.2.3.5. Corrélation entre la taille des dents et le *shoveling*.

Des chercheurs ont montré une corrélation significative entre le degré d'expression du *shoveling* et les dimensions de l'incisive centrale maxillaire. Suzuki et Sakai (1966) notent que le diamètre mésiodistal (MD) de la couronne de l'incisive centrale dans les populations japonaises est nettement plus grand pour les dents présentant un *shoveling* prononcé. Mizoguchi (1978, 1985) a également fait le même constat sur plusieurs échantillons de populations japonaises. Pour des populations finlandaises et lapones, Kirskevari et Alvesalo (1979) ont rapporté de fortes corrélations entre la profondeur du *shoveling* et les diamètres MD des deux UI1 et UI2. Dans un échantillon mélanésien, Lombardi (1975) a découvert que les incisives avec un *shoveling* marqué avaient des dimensions MD significativement plus grandes que les incisives sans *shoveling*. Ce constat a également été établi dans une population féminine mongole par Hasegawa en 2009 (Suzuki et Sakai, 1966 ; Lombardi, 1975 ; Mizoguchi, 1978 ; Kirskevari et Alvesalo, 1979 ; Mizoguchi, 1985 ; Scott et Turner, 1997 ; Hasegawa, 2009).

À quelques exceptions près, les auteurs qui rapportent une relation entre la taille des dents et l'expression du *shoveling* se concentrent uniquement sur les dimensions des incisives. Mizoguchi (1985) a calculé les corrélations entre le *shoveling* et le diamètre MD de 12 dents permanentes et a déterminé que le *shoveling* est corrélé positivement avec les diamètres MD de toutes les dents, et non pas seulement avec ceux de UI1 et UI2 (Mizoguchi, 1985).

Dans la denture indienne Pima, le modèle des corrélations est similaire à celui de l'analyse de Mizoguchi (1985) (Scott et Turner, 1997). Chez les indiens Pima, cependant, le *shoveling* a été analysé en corrélation avec les diamètres MD et vestibulolingual (VL).

Les résultats sont très distincts. Le *shoveling* est toujours très corrélé avec les diamètres MD de toutes les dents antérieures, mais il y a très peu de corrélation avec les dimensions VL des dents antérieures. Le *shoveling* montre également des corrélations modérées avec la taille des dents postérieures, mais la distinction entre les diamètres MD et VL, bien que toujours évidente, n'est pas aussi prononcée (Scott et Turner, 1997).

Il semble que le *shoveling* et la composante des dimensions MD des dents antérieures partagent certains facteurs de développement en commun, bien que ceux-ci demeurent encore inconnus. Il est difficile de discerner dans de nombreux cas si la présence d'un trait morphologique particulier contribue directement à jouer sur les diamètres des couronnes ou si c'est la taille des couronnes qui influence l'expression plus ou moins marquée des traits.

En résumé, les crêtes linguales marginales qui caractérisent le *shoveling* contribuent-elles à un diamètre MD plus large des dents antérieures ou les dents plus larges sont-elles à l'origine des crêtes linguales marginales marquées ? Bien que cette question soit intéressante d'un point de vue développemental et phylogénétique (par exemple, les Néandertaliens avaient de grandes dents antérieures et des *shoveling* prononcés), il convient de souligner qu'elle n'a que peu d'incidence sur le modèle de variation géographique. Les coefficients de détermination montrent que la taille des dents, tout au plus, ne contribue qu'à environ 10 % de la variance globale de l'expression du *shoveling* (Scott et Turner, 1997).

I.2.4. Chronologie historique de l'étude du *shoveling*.

Dès la seconde moitié du XIX^{ème} siècle, Carabelli, Tomes, Mühlreiter, Zuckerkandl, Black, Wortman et d'autres chercheurs décrivent, sans la définir, une aire de creux sur la surface palatine de l'incisive (Mizoguchi, 1985).

En **1904**, Gorjanovic-Kramberger découvre l'« Homme de Krapina » en Croatie et décrit la morphologie inhabituelle des incisives maxillaires. Il note la présence de crêtes marginales marquées. Gorjanovic-Kramberger est le premier à documenter la présence des incisives en « forme de pelle » dans le registre fossile (Figure 7a et b) (Gorjanovic-Kramberger, 1904, 1906).

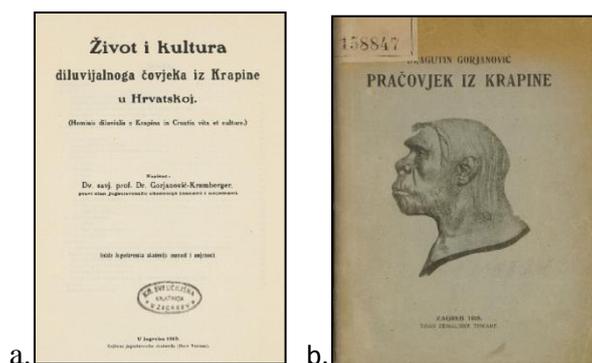


Figure 7. a. Dans « *vie et la culture de l'homme diluvien de Krapina en Croatie* », Dragutin Gorjanović-Kramberger décrit les résultats des fouilles et recherches et les découvertes de restes fossiles humains néandertaliens à Krapina (Croatie). Le livre a été publié en 1913 dans la *publication de l'Académie yougoslave des sciences et des arts*. b. Autre publication de D. Gorjanovic en 1918 sur *l'homme de Krapina*.

En **1907**, Hrdlička utilise pour la première fois le terme "*shoveling*" pour décrire les surfaces palatines des incisives maxillaires des Amérindiens (Hrdlička, 1920).

En **1920**, Hrdlička est le pionnier de l'analyse du *shoveling* (Figure 8). Son travail sur les incisives en « forme de pelle » est le précurseur de toutes les études sur le *shoveling*. Ayant eu accès à diverses collections archéologiques dont des milliers de restes humains au Museum National d'Histoire naturelle des Etats-Unis, Hrdlička est parmi les premiers à avoir apprécié l'étendue des variations dentaires à travers le monde. Dans l'article initial décrivant le *shoveling*, Hrdlička souligne la présence d'une « fosse linguale » entourée par un rebord d'émail en insistant sur le fait que la fosse serait la conséquence du développement des crêtes marginales (Hrdlička, 1920 ; Mizoguchi, 1985 ; Scott, 2016). Hrdlička émet plusieurs constats :

- il décrit un *shoveling* fréquent chez les Mongoloïdes modernes - Indiens d'Amérique, Malaisiens, Mongols, Chinois, Japonais- mais rare pour les autres populations modernes.
- les incisives de Krapina décrites par Gorjanovic-Kramberger (1906) présentent un *shoveling* marqué avec des tubercules linguaux bien développés.
- le *shoveling* est observable non seulement sur les incisives permanentes maxillaires mais aussi sur les incisives permanentes mandibulaires et les canines ainsi que les incisives lactéales.
- la combinaison de crêtes marginales et d'un creux central est facilement reconnaissable sur les surfaces palatines des incisives non seulement chez l'homme mais aussi chez d'autres primates et animaux. En outre, Hrdlička a fait valoir que ce caractère ancien doit être présent chez un ancêtre commun à tous les mammifères terrestres vivants.

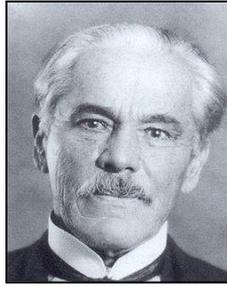


Figure 8. Portrait d'Aleš Hrdlička considéré comme le père de l'anthropologie physique aux Etats-Unis.

Le registre des papiers d'Aleš Hrdlička (Montgomery, 1996 ; Chien, 2006) répertorie ses distinctions honorifiques, ses notes autobiographiques, sa correspondance avec les plus grands noms des anthropologues de l'époque, des mesures anthropométriques et ostéométriques, des observations, des photographies détaillées de ses recherches, des manuscrits, des documents de recherche et un journal intime "*Mes voyages*", sur lequel Hrdlička notifiât son travail sur le terrain.

Le souci dans l'observation d'une caractéristique morphologique dentaire telle que le *shoveling* est que l'étude nécessite de dépasser la simple dichotomie présence/absence. En effet, qui dit étude du *shoveling*, dit étude de son expression minimale à maximale. Hrdlička est le premier à classer les degrés d'expression d'une variante morphologique dentaire et à mettre en place une technique standardisée d'observation ordinaire.

Il évalue l'expression des crêtes marginales distale et mésiale pour scorer un seul trait-le *shoveling*- et publie la première standardisation de ce caractère avec la description de 4 grades d'expression :

- 1-l'absence,
- 2-la trace,
- 3-la dent en « semi-pelle »,
- 4-la dent en « pelle ».

Il évalue les variations du *shoveling* entre plusieurs populations humaines et décrit sa présence chez des espèces non-humaines.

Parmi ses découvertes, on retiendra les similarités entre les Indiens d'Amérique et les Nord-Asiatiques pour lesquels la fréquence et le degré d'expression du *shoveling* sont très marqués et le contraste avec les populations européennes et africaines pour lesquels la fréquence et le degré d'expression du *shoveling* sont absents ou faiblement marqués (Hrdlička, 1920).

Au début des **années 20**, après la découverte des premiers hominidés africains, Gregory W.K s'intéresse à l'apport de la denture humaine dans l'évolution et publie « *L'évolution de la denture humaine* » (Gregory, 1922 ; Scott, 2016). Sa contribution est majeure dans l'approche globale de certains caractères discrets dentaires dont le *shoveling*.

Il distingue les faibles (*low*) caractères archaïques (*shoveling*, tubercule de Carabelli, pattern Dryopithecus Y5) des caractères dérivés, associés à une denture moderne (absence ou diminution du *shoveling*, rareté du tubercule de Carabelli, ...). Ceci étant, en raison de la faible quantité d'échantillons, il minimise l'importance des variations géographiques.

Dans les **années 1920-1930**, beaucoup de publications paraissent sur la présence de caractères discrets dentaires dans des groupes spécifiques (Hawaïens, Finlandais, Bushmen, Japonais, Indiens d'Amérique).

En **1925**, Campbell étudie les caractéristiques de la denture des aborigènes. Il publie « *Dentition and Palate of the Australian Aboriginal* ». Il mentionne les incisives en « forme de pelle » mais ne fournit aucune donnée, ajoutant seulement que ce caractère n'est pas caractéristique de la denture aborigène australienne. A ce stade, il note que la morphologie dentaire est une vaste source de documentation et dira : "*une étude minutieuse et détaillée de la denture et de ses structures associées ne semble pas avoir atteint la position d'importance qu'elle gagnera sans doute avec le temps*" Campbell (Campbell, 1925 : vii ; Scott, 2016).

En **1927**, selon Adloff, les crêtes marginales mésiale et distale ainsi que le *tuberculum dentale* sont générés à partir du cingulum. Ils sont considérés comme un caractère archaïque (Adloff, 1927 ; Mizoguchi, 1985).

En **1931**, JC Middleton Shaw, inspiré par les travaux de Campbell, étudie les Bantu d'Afrique du Sud. Son traité « *the Teeth, the Bony Palate and the Mandible in Bantu Races of South Africa* » a fourni des observations morphologiques sur différents traits dentaires, dont l'incisive « en forme de pelle » (Middleton Shaw, 1931 ; Scott, 2016).

Grâce à son étude sur les dents de l'*Homo Erectus pekinensis*, Weidenreich (**1937**) a suggéré que « l'homme de Pékin » était plus étroitement lié aux Mongols modernes qu'à toute autre population vivante, principalement parce qu'un *shoveling* bien développé est facilement reconnaissable sur ses incisives. Dans le même temps, il note que le *shoveling* présent sur les incisives des Néandertaliens européens a disparu dans le processus évolutif, et n'a donc pas été transmis aux Européens modernes. De plus, Weidenreich remarque, en se basant sur l'observation des dents usées, que non seulement l'émail mais aussi la dentine sont concernés par le *shoveling* (Weidenreich 1937 ; Mizoguchi, 1985).

McCown et Keith (**1939**) décrivent que les dents découvertes sur le site de Tabun (Israël) possèdent de nombreux traits néandertaliens, tandis que les dents du site de Skuhl (Israël) manifestent des traits modernes.

Entre autres, ils notent une différence en regard du *tuberculum dentale*. Lorsqu'il est bien développé et observable sur les incisives maxillaires et les canines, il est considéré comme une caractéristique des dents néandertaliennes (" pré-molarisme ") (Mac Cown et Keith, 1939 ; Mizoguchi, 1985).

En **1940**, on assiste à l'émergence d'un intérêt plus intense pour la comparaison des variations morphologiques dentaires. Deux grands chercheurs, références de l'époque, sont Dahlberg de l'Université de Chicago et Pedersen de l'Université de Copenhague.

Lasker (**1945**) étudie la morphologie dentaire et la pathologie carieuse dans les populations chinoises modernes.

Par ses observations, Lasker confirme un des résultats des travaux de Morse de 1937, montrant que la fréquence du *shoveling* est plus élevée dans le nord de la Chine que dans le sud de la Chine (Lasker, 1945 ; Mizoguchi, 1985).

En **1947**, Dahlberg et Mikkelsen essaient de quantifier le degré de développement du *shoveling*. Ils ont utilisé une échelle Vernier (pied à coulisses) avec une jauge de Boley modifiée pour mesurer la profondeur du creux lingual incisif en millimètres. Dans leur échantillon Indien Pima, la profondeur de la fosse linguale incisive par rapport aux crêtes marginales linguales varie de 0,3 à 2,6 mm pour UI1 et de 0,1 à 1,5 mm pour UI2 (Dahlberg et Mikkelsen, 1956 ; Mizoguchi, 1985 ; Scott et Turner, 1997 ; Scott, 2016).

Goldstein (**1948**) étudie les dents des Indiens du Texas à partir de l'âge pré- et proto-historique, et constate que l'incidence du *shoveling* sur les incisives permanentes est complètement différente de celle des incisives lactéales, ces dernières ayant un *shoveling* beaucoup moins marqué (Goldstein, 1948 ; Mizoguchi, 1985 ; Scott, 2016).

En **1949**, Pedersen termine des recherches sur le terrain et en laboratoire sur les Esquimaux groenlandais vivants et sub-fossiles (Pedersen, 1949). La denture des Esquimaux de l'est du Groenland est une des premières références pour les données comparatives.

En **1951**, Dahlberg montre que le *shoveling* n'est pas le résultat d'une croissance excessive de l'émail seul mais un caractère primaire composé à la fois d'émail et de dentine. En outre, Dahlberg (1951) a trouvé, parmi les incisives latérales maxillaires des Indiens Pima, des morphologies "en forme de tonneau" (gros *tuberculum dentale*) qui ressemblent à des prémolaires. Il pensait que le développement de ce *tuberculum dentale* en forme de cuspide était associé au *shoveling*. En ce qui concerne la théorie de l'évolution du *shoveling* des incisives, Dahlberg (1951) émet le constat suivant : « à l'époque d'*Homo Erectus* et *Homo sapiens neanderthalensis*, les incisives étaient grandes et les crêtes marginales étaient très développées. Dans les populations blanches modernes, la fréquence des incisives simplifiées

et non « en forme de pelle » a augmenté, tandis que chez les Amérindiens, les crêtes marginales sont devenues plus spécialisées et plus développées que chez les premiers hominidés » (Dahlberg, 1951 ; Mizoguchi, 1985 ; Scott et Turner, 1997 ; Scott, 2016).

En parallèle de ces découvertes, a lieu un programme actif de recherche en anthropologie dentaire au Japon pendant la première moitié du XX^{ème} siècle. La diffusion de cette recherche auprès des chercheurs occidentaux a été en partie entravée par les barrières linguistiques jusqu'aux années 1950.

En **1954**, Kikuchi étudie la corrélation entre le *shoveling* et l'occlusion chez les Japonais modernes. Il a conclu que le *shoveling* pourrait être associé à l'overjet des dents maxillaires supérieures (Kikuchi, 1954 ; Mizoguchi, 1985).

En **1954**, Sakai remarque que le *shoveling* est extrêmement développé dans tous les cas d'occlusion bord à bord pour lequel le degré d'articulation de l'incisive est nul (le degré d'articulation de l'incisive est défini comme la plus courte distance entre le centre du bord incisal de l'incisive centrale maxillaire gauche et le centre du bord incisal de l'incisive centrale mandibulaire correspondante) (Sakai, 1954 ; Mizoguchi, 1985).

La réelle avancée dans la standardisation des données dentaires s'est amorcée en **1956**. A cette date, Dahlberg estime que le manque de standardisation dans l'étude des variations morphologiques dentaires est un réel frein à la recherche. Ayant adopté la classification de Hrdlička, il a développé une série de plaques de plâtre qui montre les différences d'expression de certains traits morphologiques dentaires dont : le *shoveling*, le *double shoveling*, l'hypocone, le tubercule de Carabelli, le *protostylid*. Pour le *shoveling*, il a donc développé une plaque de référence tridimensionnelle relatant les 4 grades décrits par Hrdlička. La plaque a été développée par ZOLLAR® Dental Laboratory.

Pendant 35 ans, Dahlberg a étendu ces recherches de Chicago (denture de la population blanche) aux indiens d'Amérique - avec un accent particulier sur les groupes tribaux du sud-ouest américain (Indiens Pima dans le centre de l'Arizona) - et a obtenu plus de 1000 modèles en plâtre accompagnés de données généalogiques (Dahlberg, 1956 ; Scott et Turner, 1997 ; Scott, 2016).

Dahlberg et al. (1956) se sont aussi intéressés à l'origine génétique du *shoveling* et montrent que le *shoveling* est probablement contrôlé par de multiples allèles.

Suite aux essais de quantification du *shoveling*, Dahlberg et al. estiment que le *shoveling* ne peut pas être représenté seulement par une mesure de la profondeur de la fosse linguale, qui est une fonction partielle de la taille de la dent (en particulier la dimension mésiodistale) et directement influencée par le cingulum. Ils notent que la variation du cingulum est plus grande pour les incisives en « forme de pelle » (Dahlberg et al., 1956).

En **1956**, Robinson étudie la denture des Australopithèques en Afrique du Sud. Il rapporte que la morphologie de leurs incisives maxillaires est similaire à celle des incisives de l'homme moderne, à l'exception de leurs racines qui sont plus « robustes » (Robinson, 1956 ; Mizoguchi, 1985).

En **1957**, dans sa publication *The Aleut dentition*, Moorrees remarque que les Aleut (populations de l'Arctique) ont un *shoveling* et des tori mandibulaires extrêmement développés. En moins d'une décennie, les tribus des Aleut et des Esquimaux ont eu une place essentielle dans les études dentaires anthropologiques et morphologiques (Moore, 1957 ; Mizoguchi, 1985).

Au milieu du XX^{ème} siècle, la morphologie dentaire des Néandertaliens a été décrite avec un *shoveling* très marqué présent sur toutes les incisives (Patte, 1959 ; Genet-Varcin, 1966).

A cette époque, on note beaucoup de descriptions très précises de la morphologie dentaire, de la taille, de la forme, des usures, des pathologies, ..., mais très peu de comparaisons.

En **1960**, Hanihara étudie la standardisation des traits de la dentition lactéale (Hanihara, 1961).

En **1960**, a lieu 1^{er} symposium de morphologie dentaire. Sur le *shoveling*, on note quelques rares conclusions telles que :

- le *shoveling* des indiens d'Amérique est supérieur à celui des asiatiques.
- sa fréquence est moindre chez les européens.
- ce trait est fréquemment utilisé pour caractériser les populations.

1963 est un repère majeur dans l'étude de la morphologie dentaire avec la parution du livre de Brothwell « *Dental Anthropology* » (Figure 9).

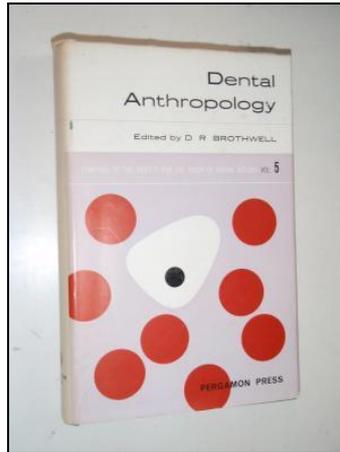


Figure 9. Exemplaire du livre « *Dental Anthropology. Volume V.* » (Brothwell DR, 1963).

De nombreuses facettes de l'anthropologie dentaire sont couvertes dans ce volume, de l'odontométrie à l'usure de la couronne en passant par la morphogenèse (Brothwell, 1963 ; Scott, 2016). Sont également inclus d'importants documents dentaires morphologiques sur la variante *shoveling* (Carbonell), la denture amérindienne (Dahlberg), ... La reconnaissance de la morphologie dentaire comme un domaine de l'anthropologie physique coïncide essentiellement avec la publication de cet ouvrage.

Durant cette période, beaucoup de chercheurs étudient les liens entre morphologie dentaire et génétique : citant le travail de Kraus et Ooe en 1962, qui ont montré que le *shoveling* marqué est déjà observable avant le début de la calcification des incisives dans les fœtus d'Amérindiens, Kraus et Jordan (1965) concluent à la présence du *shoveling* sous sa forme complète dans la dent pré-calcifiée, ce qui implique un contrôle génétique de l'activité mitotique des cellules de l'épithélium interne de l'émail (Kraus et Jordan, 1965 ; Mizoguchi, 1985).

De nombreux textes font une brève mention des différences morphologiques entre les humains modernes, mais celles-ci se limitent à une ou quelques phrases sur le contraste asiatique - européen pour les incisives « en forme de pelle » (Kelso, 1974 ; Brace et Montagu, 1977 ; Weiss et Mann, 1978).

En 1965, Coon dans "*The living races of man*" fait référence au *shoveling* des incisives dans trois contextes. Tout d'abord, il caractérise les incisives des Mongoloïdes comme étant « souvent, si ce n'est tout le temps, « en forme de pelle » » (Coon, 1965 :11). Deuxièmement, il note que le *shoveling* est beaucoup moins marqué chez les Aïnou que chez les Mongoloïdes, un point qu'il a utilisé pour appuyer l'idée que ce groupe était de descendance caucasioïde (Coon et al., 1950).

Enfin, il s'oppose à Hill qui propose que le Nouveau Monde soit peuplé d'Européens du Paléolithique supérieur (Hill, 1963 ; Coon, 1965). Coon (1965 :151) estime qu'une telle position est « *impensable* », remarquant que « *l'une des objections à son hypothèse est que les Amérindiens ont une plus grande incidence d'incisives au shoveling marqué que n'importe quel peuple asiatique, et sous des formes plus extrêmes. Les Européens, en revanche, montrent une fréquence de shoveling beaucoup plus faible et même si ce trait de caractère est présent, il est beaucoup plus muet dans son expression* ».

En 1966, Suzuki et Sakai classent diverses populations humaines en quatre groupes en fonction de la fréquence du *shoveling*. Le groupe dont l'incidence est la plus élevée se compose de Mongoloïdes tels que les Indiens d'Amérique, les Esquimaux, les Mongols, une partie des Japonais et une partie des Chinois ; le deuxième groupe dont l'incidence est relativement élevée se compose d'Hawaïens, d'Aborigènes, de la plupart des Japonais et de la plupart des Chinois ; le troisième groupe se compose d'Indonésiens, de Polynésiens, de Micronésiens et des Sakhaline Aïnu ; le quatrième groupe avec l'incidence la plus faible est composé de Noirs américains, des Bantous, des Fidjiens, des Blancs américains et des Finlandais (Suzuki et Sakai, 1966 ; Mizoguchi, 1985). Selon Suzuki et Sakai, le *shoveling* n'est rien d'autre qu'un phénotype final causé par les différences ou les variations de développement absolu et/ou relatif de nombreuses caractéristiques morphologiques sur les surfaces palatines, et non un caractère indépendant. Suzuki et Sakai (1966) ont en outre rapporté que le diamètre mésiodistal des couronnes des incisives en « forme de pelle » bien développées est significativement plus grand que le diamètre MD des incisives non marquées par le *shoveling* (Suzuki et Sakai, 1966 ; Mizoguchi, 1985).

En 1967, Turner émet l'hypothèse génétique que le *shoveling* est contrôlé par une paire d'allèles (Turner, 1967).

En 1968, Ooë observe le *tuberculum dentale* et les crêtes marginales de l'incisive au stade de la pré-calcification de l'épithélium amélaire (Mizoguchi, 1985).

En 1971, Garn évoque les variations de la denture dans le livre « *Human Races* ». En ce qui concerne la morphologie, il note que les incisives « en forme de pelle » sont fréquentes chez les Amérindiens et sont présentes, quoique moins fréquentes, chez les Polynésiens, les Finlandais et les hominidés fossiles (Garn, 1971).

En 1971, Brabant note, à partir de l'étude de dents extraites de divers sites datant d'environ 2500-1000 av. J.-C. en France, que la fréquence du *shoveling* a diminué depuis le néolithique jusqu'à nos jours en Europe occidentale (Brabant, 1971 ; Mizoguchi, 1985).

En **1972**, Lee et Goose observent les dents de familles chinoises vivant à Liverpool dans le but d'examiner les modes de transmission du *shoveling* et d'autres caractères dentaires.

Ils concluent qu'il est difficile d'accepter un modèle simple de transmission mendélien pour des caractères tels que le *shoveling* ou le tubercule de Carabelli, et qu'une transmission multifactorielle semble être privilégiée du fait de leur variation continue (Lee et Goose, 1972 ; Mizoguchi, 1985).

En **1974**, Portin et Alvesalo ont examiné plusieurs modèles du mode d'hérédité pour le *shoveling* de l'incisive centrale maxillaire. Ils n'ont pas rejeté 3 trois hypothèses : celle d'un seul gène autosomique intermédiaire, celle d'un locus avec plus de deux allèles et celle de polygènes. En revanche, ils ont écarté le modèle simple d'héritage mendélien tel que proposé par Turner (1967) et concluent que le *shoveling* semble être essentiellement contrôlé par des polygènes (Portin et Avesalo, 1974 ; Mizoguchi, 1985).

En **1975**, dans « *Races, Types et Ethnic groups* », Molnar fait référence aux variations morphologiques dentaires et fournit un tableau sur les variations de *shoveling*. Après avoir montré comment le *shoveling* divise le monde en "pourvus" ou "dépourvus", Molnar (1975 : 61) déclare que « *plusieurs autres caractéristiques de la denture montrent une grande variabilité et, dans certains cas, ont été regroupées selon la « race » ; plus souvent, cependant, il y a seulement une variabilité dans la fréquence de l'apparition d'un trait particulier* » (Molnar, 1975).

Hanihara et al (**1975**) rapportent, en se basant sur les coefficients de corrélation entre parents, entre frères et sœurs ainsi qu'entre jumeaux, que la profondeur de creux de la fosse linguale de l'incisive centrale maxillaire présente une hérédité extrêmement élevée chez les Japonais (Hanihara, 1975a ; Mizoguchi, 1985).

En **1975**, Scott étudie les associations entre quinze caractères non métriques de la couronne dentaire, et reconnaît des associations fortes entre le *shoveling* des incisives maxillaires et mandibulaires, entre les tubercules linguaux des incisives maxillaires et canines, entre l'hypocone et le tubercule de Carabelli, etc... (Scott, 1975 ; Scott, 1979 ; Mizoguchi, 1985).

Dans les années **70**, Christy Turner II, après avoir acquis son expérience avec les plaques de Dahlberg, a commencé un projet pour développer d'autres plaques de référence de traits de caractères dentaires non métriques, avec l'aide de ses étudiants dont Richard Scott, qui a étendu la classification des caractères discrets dentaires (Scott, 1973).

A cette période, et ce durant deux décennies, a commencé le travail de standardisation du laboratoire d'anthropologie dentaire de l'université d'Arizona qui a élaboré **ASUDAS** = Arizona State University Dental Anthropology System (cf. § I.3.1.3.3. et § I.3.2). La théorie sur le développement de ces standards est de concevoir une plaque de plâtre qui donne une représentation graphique de l'expression minimale et maximale du trait et de l'expression des différents grades intermédiaires entre ces deux points (Turner et al., 1991 ; Scott and Turner, 1997 ; Scott et al., 2018) (Figure 10). Avec un nombre de traits non-métriques croissants sur la morphologie coronaire et radiculaire, Turner a initié des études de populations dans le monde entier. Certains de ces traits ont été adaptés à la gamme de variation exprimée par les fossiles des hominins (Bailey, 2006 ; Bailey and Hublin, 2013 ; Irish et al., 2013 ; Irish and Scott, 2016).

Turner, pionnier du système ASUDA, est devenu le principal chercheur dans le domaine de la morphologie dentaire grâce à son travail et à celui de ses étudiants (Rose et Burke, 2006 ; Scott et Irish, 2013 ; Turner, 2013 ; Marado, 2014).



Figure 10. Exemple de plaque ASUDAS : plaque ASU-UI1, objectivant le *shoveling* de l'incisive centrale maxillaire (Source Laboratoire AMIS, 2015, Braga J.). Cette plaque comprend 7 UI1 avec des grades d'expression du *shoveling* allant de la plus faible expression (grade 0) à la plus prononcée (grade 6).

En **1976**, Turner note que les populations préhistoriques de l'Archipel du Japon sont les ancêtres des Ainu d'Hokkaido et Sokkhalin et non des populations modernes japonaises (constat appuyé par les études de Brace et Nagai en 1982). Turner a mis en évidence deux schémas distincts en Asie (Sinodontes (Asie du nord, population du nouveau monde) vs Sundadontes (Asie du sud, Polynésie, Micronésie)). Les aborigènes d'Australie se rapprochent du schéma des Sundadontes (Turner, 1976 ; Brace et Nagai, 1982 ; Scott, 2016).

Les travaux de Dahlberg et Mikkelsen de 1947 sur la quantification du *shoveling*, ont incité K. Hanihara et al. (1975), et Blanco et Chakaborty (1977), à mesurer la profondeur des fosses linguales des incisives maxillaires respectivement chez les familles japonaises et chiliennes afin de pouvoir utiliser des données métriques pour calculer les corrélations intrafamiliales.

Cette méthode est particulièrement utile lorsqu'elle est appliquée à des groupes dérivés asiatiques avec des fréquences élevées et une expression prononcée du *shoveling* (Scott et Turner, 1997). Pour autant, en 1979, Aas et Risnes l'ont mesuré dans un échantillon norvégien où la profondeur moyenne de la fosse n'était que de 0,5 mm pour UI1 et de 0,3 mm pour UI2 (Hanihara, 1975b ; Blanco et Chakaborty, 1977 ; Aas et Risnes, 1979a, 1979b ; Scott et Turner, 1997).

Wolpoff (1971), Frayer (1978), Brace (1980) étudient les traits métriques dentaires dans l'évolution des hominins, via l'étude du diamètre mésio-distal et vestibulo-lingual (Wolpoff, 1971 ; Frayer, 1978 ; Brace, 1980 ; Scott, 2016).

Kirveskari et Alvesalo (1979) ont comparé la profondeur de la fosse linguale des incisives maxillaires de patients finlandais avec celle de leurs parents au premier degré pour analyser le *shoveling* (Kirveskari et Alvesalo, 1979 ; Mizoguchi, 1985 ; Scott et Turner, 1997).

De 1986 à 1988, Bermudez de Castro étudie les traits dentaires de la période du *Pléistocène* moyen en Espagne (Bermudez de Castro, 1988).

En 1987, Oxnard s'intéresse à l'analyse morphométrique (Oxnard, 1987 ; Scott, 2016).

Des **années 70 aux années 90**, on assiste à un développement de la standardisation de la couronne dentaire et de la morphologie radiculaire via le développement du système ASUDA (Turner, 1970 ; Turner et al., 1991).

En 1991, Turner et al. ont publié les lignes directrices pour une utilisation correcte de l'ASUDAS (Turner et al., 1991 ; Scott et Turner, 1997 ; Hillson, 2005 ; Scott et Turner, 2008). De **1991 à nos jours**, d'énormes progrès sur le sujet émergent grâce à l'aide d'odontologues et de biologistes. Les deux dernières décennies ont vu un nombre croissant d'articles et de livres publiés sur la morphologie dentaire pouvant être utilisés comme références scientifiques en anthropologie. Nous pouvons citer « *The anthropology of modern human teeth* » de Scott et Turner, en 1997 (Figure 11).

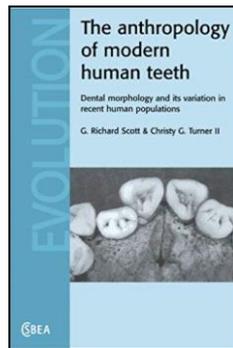


Figure 11. Exemple du livre « *The anthropology of modern human teeth* » (Scott R. et Turner CG., 1997).

En **2006**, Bayley s'intéresse à l'étude de la morphologie dentaire chez Néandertaliens et entre autres traits dentaires, au *shoveling*. Grâce à ASUDAS, elle a noté que les Néandertaliens montraient un schéma dentaire unique par rapport aux groupes humains vivants. En plus de ce schéma dentaire unique rare, des traits morphologiques ont été identifiés- dont un *shoveling* très marqué- (Bayley, 2006).

En **2009**, Kimura a décrit l'origine génétique du *shoveling*. Ce trait implique un seul polymorphisme nucléotidique (SNP) du gène récepteur A de l'ectodysplasine A(EDAR), très probablement la cible d'une sélection positive dans les populations asiatiques, ce qui se traduit par des dents en « forme de pelle » très marquées (Kimura, 2009).

Même si le *shoveling* est déterminé principalement par des facteurs génétiques, Mizoguchi rappelle en **2013**, que l'expression des caractères non métriques dentaires est sensible à des facteurs environnementaux ou épigénétiques (Mizoguchi, 2013).

En **2014**, Irish et al. notent que le *shoveling* de l'incisive centrale maxillaire est l'une des caractéristiques non métriques qui a reçu le plus d'attention de la part des anthropologues comme indicateur des relations entre les populations et est fréquemment utilisée pour sa pertinence taxonomique et phylogénétique (Scott et Turner, 1997 ; Bailey and Hublin, 2013 ; Irish et al., 2013 ; Martinon-Torres et al., 2013 ; Carter et al., 2014 ; Irish et al., 2014).

En **2017**, dans une révision récente de la méthode ASUDAS, Scott et Irish ont décrit un 8^{ème} degré d'expression (grade 7) pour le *shoveling* des UI1. Ils définissent ce grade comme toute expression plus prononcée que le grade 6, impliquant des crêtes marginales qui se replient sur elles-mêmes (Scott et Irish, 2017 ; Scott et al., 2018).

Dans ce contexte, notre travail de thèse s'inclut dans les perspectives d'amélioration des techniques d'évaluation de la morphologie dentaire, via l'utilisation de la Morphométrie Géométrique dans l'approche du *shoveling* des incisives centrales maxillaires.

I.3. Diagnostic du *shoveling* et analyse.

I.3.1. Méthodes d'observation des caractères discrets dentaires.

I.3.1.1. Odontoglyphes (technique analogue à la technique des empreintes digitales) (Zubov, 1977, Scott et Turner, 1997).

Comme alternative à l'étude des structures positives de la couronne dentaire, l'anthropologue dentaire russe Zubov et ses collaborateurs ont adopté une approche de la variation morphologique dentaire humaine qui met l'accent sur les reliefs négatifs (rainures, fissures, sulcus, fosses qui séparent les cuspidés). Zubov note que « *le motif d'un sillon, stable dans le temps mais en même temps variable sur quelques détails, est un objet précieux et intéressant d'étude morphologique et peut former une base pour toute une branche de l'odontologie qui, par analogie avec les dermatoglyphes, peut être appelé de façon analogue, odontoglyphes* ».

Les dermatoglyphes (du grec *derma*, « peau », et *gluphê*, « gravure ») sont les figures de la face palmaire des mains, de la plante des pieds, des doigts (empreintes digitales) et des orteils humains, dessinées par les plis et les crêtes épidermiques. Par analogie, les odontoglyphes constituent une empreinte dentaire. Zubov a défini un large panel de motifs pour les molaires maxillaire et mandibulaire sur des répliques négatives en cire.

La technique s'est peu développée, car elle présente de nombreuses limites :

- les motifs sont le plus facilement visibles sur des empreintes en cire, or, la cire est un matériau peu utilisé,
- la classification des caractères qui comportent de nombreux types et sous-types est complexe,
- la complexité de la classification des traits limite les analyses statistiques possibles,
- pour les chercheurs non entraînés à la technique, il est difficile de discerner l'importance des variables,
- la plupart des recherches ont été publiées en Russie et les occidentaux ont été très peu informés de ces études,
- les investigations sont limitées à l'étude sur des enfants avec une denture peu usée.

Malgré ses limites, cette technique a été utilisée par Zubov et d'autres anthropologues russes pour étudier certains traits morphologiques dentaires dont le *shoveling* (Minkov, 1983).

I.3.1.2. Effet Moiré (Scott et Turner, 1997).

Les anthropologues dentaires japonais ont adapté la contourographie de Moiré à l'étude de la variation des traits de la couronne (observation d'un objet 3D en 2D), méthode qui contourne ingénieusement les limites originales de la photographie. La première étape de la contourographie de Moiré consiste à obtenir une image avec un contraste élevé dans des conditions spécifiques pour l'éclairage, la distance et la position de l'objet grâce à une grille de Moiré positionnée horizontalement et perpendiculairement à l'axe de la lentille. Le produit final, un contourogramme de Moiré, ressemble à une carte topographique, avec une alternance de noir et blanc objectivant les micro-reliefs de la surface occlusale d'une couronne dentaire de ses plus hauts points jusqu'aux plus bas points (Korenhof, 1960).

Taverne et ses collaborateurs ont essayé de mesurer diverses parties de la surface de couronnes dentaires par une méthode de mesure tridimensionnelle indirecte (méthode photogrammétrique analogue à la méthode Moiré) (Taverne et al., 1979 ; Mizoguchi, 1985). Cette méthode précise et reproductible est une bonne méthode pour quantifier les subtilités des reliefs coronaires, mais en regard du rapport bénéfice/coût, cette méthode est loin de supplanter la méthode visuelle. Cette méthode a surtout été utilisée pour l'analyse des cuspidées (Sekikawa et al., 1987 a, 1987b ; Kanazawa et al., 1989).

I.3.1.3. Méthodes visuelles d'observation.

La couronne dentaire peut être objectivée de trois façons différentes correspondant aux trois échelles de mesure définies par les statisticiens (Scott et Turner, 1997) :

- Intervalle (données métriques),
- Nominal (données par catégorie),
- Ordinal (données classées).

I.3.1.3.1. Intervalle (absence = 0, présence=.10, .20, .30,...n mm)
(Scott et Turner, 1997).

La majorité des caractères dentaires non métriques ne se prêtent pas à la mesure directe métrique parce que :

1. ils présentent des variations de forme et de taille ,
2. en tant qu'objets tridimensionnels, ils manquent souvent de types de repères nécessaires pour normaliser les mesures,
3. ils peuvent présenter des niveaux d'expression si faibles qu'il est impossible de les mesurer en millimètres.

Le caractère *shoveling* est une exception aux limites susmentionnées de la mesure de l'expression des caractères.

En 1947, Dahlberg et Mikkelsen ont utilisé une échelle Vernier (pied à coulisses) avec une jauge de Boley modifiée pour mesurer la profondeur du creux lingual incisif en millimètres (Dahlberg et Mikkelsen, 1956).

Dans les années 70, K. Hanihara et al. (1975) et Blanco et Chakaborty (1977) ont mesuré la profondeur des fosses linguales des incisives de familles japonaises et chiliennes afin de pouvoir utiliser des données métriques pour calculer les corrélations intrafamiliales (Hanihara et al., 1975b ; Blanco et Chakaborty, 1977).

Dans toutes ces études, la profondeur est mesurée au centre de la face palatine.

I.3.1.3.2. Nominal (absence = 0, présence= 1) (Scott et Turner, 1997).

Comme la plupart des caractères morphologiques de la couronne sont des caractères « tout ou rien », une méthode de base de notation est la présence ou l'absence. Il s'agit de la première approche adoptée dans le cadre d'études morphologiques caractérisant la plupart des données recueillies à la fin du XIXème siècle et au début du XXème siècle. Aujourd'hui, certains chercheurs continuent de dichotomiser les variables morphologiques, citant souvent leurs difficultés à noter avec cohérence des degrés variables de présence de traits (Sofaer et al., 1972a, 1972b).

I.3.1.3.3. Ordinal (absence = 0, présence=1, 2, 3..., n) (Scott et Turner, 1997).

Hrdlička a été l'un des premiers chercheurs à noter les limites de l'observation de la simple dichotomie présence - absence pour les traits morphologiques dentaires. La première classification ordinale est celle de Hrdlička (1920) qui score 4 niveaux d'expression pour les incisives en « forme de pelle » (Hrdlička, 1920) :

- l'absence - actuellement ASU 0 - ,
- la trace - actuellement ASU 1-2 - ,
- la dent en « semi- pelle » - actuellement ASU 3-4 - ,
- la dent en « pelle » - actuellement ASU 5-6 - .

L'approche de Campbell (1925) a consisté à utiliser des catégories graduées -et pas seulement la présence/absence- pour étudier la plupart des caractères de la couronne et de la racine dentaire (Campbell, 1925).

La norme de classement tient compte de l'expressivité variable que présentent la plupart des traits de couronne et de racine dentaires. Ces normes comprennent l'absence des caractères. La présence des caractères est subdivisée en deux ou plusieurs grades allant de faiblement à fortement prononcée. Pour établir une échelle, les chercheurs étudient la variation de l'expression des caractères dans un réseau de populations, déterminent l'expression minimale et maximale qui sert de grade 1 et de grade "n", et insèrent des expressions intermédiaires de grade 2 à "n-1". Idéalement, les étapes entre les différents grades devraient être à peu près égales. À la suite d'une procédure de classement, Dahlberg (1956) établit des plaques de référence pour la classification du *shoveling*. Les plaques de référence tridimensionnelles ont été distribuées à l'échelle internationale et développées par ZOLLAR® Dental Laboratory (Dahlberg, 1956).

Influencé par la méthode de classification des caractères de Dahlberg, K. Hanihara (1961) a développé des plaques comparables pour les caractères morphologiques exprimés sur les dents de lait (Hanihara, 1961, Scott et Turner, 2008).

En 1970, Turner a mis au point des grades d'expression classés pour les 6e et 7e cuspides inférieures des molaires, qui marquaient le début du système de notation ASUDAS (Arizona State University Dental Anthropology System) (Turner et al., 1991). La classification a été étendue par Scott (1973). Au cours de deux décennies, Turner et ses étudiants ont établi des échelles de classement pour une vaste gamme de caractères de couronnes et de racines dentaires qui, dans la tradition des plaques du Dahlberg, sont distribuées à l'échelle internationale -le laboratoire ASUDAS distribue également les plaques étalons originales du Dahlberg-.

Dans ce contexte, notre travail de thèse consiste à élaborer une approche morphométrique d'un paramètre dentaire considéré jusqu'à aujourd'hui comme non-métrique : le *shoveling* de l'incisive centrale maxillaire.

I.3.2. Arizona State University Dental Anthropology System: ASUDAS.

Le système ASUDA est le fruit du travail initial du laboratoire d'anthropologie dentaire de l'université d'Arizona (cf. § I.3.1.3.3.).

Il désigne une procédure de « *scoring* » ordinal par observation visuelle et comparaison avec des plaques de référence en plâtre. L'objectif est de permettre l'observation des caractères au-delà de la simple dichotomie absence/présence du trait et de promouvoir la reproductibilité des résultats entre observateurs afin de standardiser les caractères discrets dentaires.

La théorie sur le développement de ces standards est de concevoir une plaque qui donne une représentation graphique de l'expression minimale et maximale du trait et de l'expression des différents grades intermédiaires entre ces deux points, avec une distinction la plus fine possible et reproductible. Le nombre d'intervalles entre les standards doit être environ égal et on considère qu'un nombre de grades supérieur à 5 mais inférieur à 10 est l'idéal pour décrire la plupart des caractères (Turner et al., 1991).

Il existe plus d'une centaine de traits identifiés sur la denture permanente humaine. Seulement une quarantaine ont été définis, standardisés et soumis à une analyse anthropologique détaillée (Turner et al., 1991 ; Scott et Turner, 1997). En 1991, on comptait 35 caractères dentaires non métriques utilisés dans ASUDAS (Turner et al., 1991). Les traits sélectionnés sont des traits facilement identifiables et observables, ne présentant aucun dimorphisme sexuel, et pouvant résister durant des années dans des modes de vie rigoureux. Le registre fossile montre que, quelles que soient leurs valeurs adaptatives, ces caractères discrets dentaires évoluent très lentement et représentent des populations caractéristiques, permettant la distinction biologique de populations.

Les descriptions sont organisées par classe de dents, les molaires supérieures et inférieures étant traitées séparément en raison de leur plus grande complexité morphologique (Table 1). Pour chaque classe de dent, on note une subdivision racine/couronne sans distinction entre les antimères de droite et de gauche et sans distinction de sexe, au vu de l'absence ou du faible dimorphisme sexuel (Scott et Turner, 1997) (cf. § 1.2.3.3 et § 1.2.3.4).

Codes	U	L	I	C	P	M	1	2
	Maxillaire	Mandibule	Incisive	Canine	Prémolaire	Molaire	Centrale ou Première	Latérale ou Seconde

Table 1. Abréviations des codes utilisés dans ASUDAS.

Pour chaque caractère, doivent être identifiés :

- Le nom du caractère,
- La dent sur laquelle il a été observé,
- Une définition ou un commentaire sur sa localisation,
- Le nom de la personne qui a développé ce trait,
- La référence de la procédure,
- Le nom de la plaque standard de référence (s'il y en a),
- La catégorie de score,
- Les commentaires additionnels pour aider dans l'utilisation du caractère.

Le système ASUDAS courant est basé sur une procédure de score et la méthode de notation est exclusivement basée sur l'observation et la palpation.

Un jeu complet de plaques peut être obtenu par l'auteur senior et peut être distribué sur le terrain (Dahlberg, 1956). Les plaques et non les photographies doivent être utilisées pour faire les observations (appréciation 3D).

Les plaques de référence normalisent les observations parmi les chercheurs du monde entier et permettent de réduire les erreurs inter et intra-observateurs (Turner et al., 1991 ; Nichol et Turner, 1986 ; Scott et Turner, 1997 ; Hillson, 2005 ; Scott et Turner, 2008).

Cette batterie de caractères octroie aux chercheurs un maximum de temps d'observation à un faible coût.

Ces raisons ont, entre autres, incité à étendre la discussion sur ce système (Scott et Turner, 1988). Depuis leur apparition, on assiste ainsi à une augmentation du nombre de traits étudiés et par conséquent, une augmentation du nombre de plaques.

Cette technique est facile, rapide mais un training avec un senior est indispensable (Turner et al., 1991 ; Scott et Turner, 1997 ; Harris, 2008 ; Scott et Irish, 2017 ; Scott et al., 2018).

Une bonne étude morphologique dentaire avec le système ASU implique :

- de bien définir les traits étudiés,
- d'utiliser les plaques de référence 3D,
- d'avoir été formé par un senior,
- d'avoir de l'expérience,

-de faire un double test intra-observateur et un test inter-observateur.

I.3.3. Technique *gold-standard* du scoring du *shoveling* en 2018.

Pour la caractérisation d'une population, les dents utilisées comme références pour étudier le *shoveling* sont les incisives centrales permanentes maxillaires UI1 (Scott et al., 2016).

Comme tous les caractères discrets dentaires, le *shoveling* aurait pu être classé comme présent ou absent, mais il y a une variation intermédiaire dans le degré auquel une dent exprime la présence de ce trait (d'un *shoveling* léger à prononcé).

Même si le *shoveling* est le seul caractère discret dentaire à avoir été quantifié, la technique gold-standard d'étude du *shoveling* en 2018 est la technique de *scoring* ordinal par observation et palpation en comparaison à une plaque de référence en plâtre exprimant les différents degrés d'expression (ASUDAS).

Il existe 6 plaques de référence pour le *shoveling* :

- ASU-UI1 pour le *shoveling* de l'incisive centrale maxillaire,
- ASU-UI2 pour le *shoveling* de l'incisive latérale maxillaire,
- ASU-UC pour le *shoveling* de la canine maxillaire,
- ASU-LI1 pour le *shoveling* de l'incisive centrale mandibulaire,
- ASU-LI2 pour le *shoveling* de l'incisive latérale mandibulaire,
- ASU-LC pour le *shoveling* de la canine mandibulaire.

La plaque concernant le *shoveling* de l'incisive centrale maxillaire (ASU- UI1) comporte 8 niveaux d'expression (présence 2-7) (Turner et al., 1991 ; Scott and Irish, 2017 ; Scott et al., 2018) (Figure 12). La description des grades est répertoriée dans le tableau 2.



Figure 12. Photographie de la plaque ASU-UI1, objectivant le *shoveling* de l'incisive centrale maxillaire (Source Laboratoire AMIS, 2015, Braga J., Zanolli C.).

Grade	Degré du <i>shoveling</i>	Définition
0	Absence	La surface linguale est essentiellement plate, même si elle peut présenter une très légère expression de la crête marginale.
1	Trace	Les crêtes marginales sont discernables. Leur expression est faible. La crête marginale mésiale ne s'étend pas jusqu'à l'éminence basale.
2	Faible – modéré	Les crêtes sont plus prononcées. La crête marginale mésiale s'étend plus bas vers l'éminence basale.
3	Modéré-Élevé	Les crêtes sont plus prononcées, presque coalescentes à l'éminence basale.
4	Faiblement prononcé	Les crêtes sont bien développées et convergent vers l'éminence basale.
5	Moyennement prononcé	Les crêtes marginales sont plus prononcées qu'au stade 4 et se rencontrent au niveau de l'éminence basale.
6	Fortement prononcé	Les crêtes sont très prononcées et se rencontrent à la base de l'éminence, se repliant presque sur elles-mêmes.
7	Extrêmement prononcé	C'est une expression rare, à tel point qu'un bon exemple pour la plaque n'a jamais été trouvé.

Table 2. Définition ASUDAS des degrés d'expression du *shoveling* des UI1 (Turner et al. 1991 ; Scott and Irish, 2017 ; Scott et al., 2018).

I.3.4. Variabilité géographique et temporelle d'expression et de fréquence du *shoveling* selon les populations.

A partir d'informations géographiques, linguistiques et bioarchéologiques, Scott et Turner ont divisé la population mondiale en cinq groupes morpho-dentaires (Eurasie occidentale, Afrique sub-saharienne, complexe sino-américain, Sunda-Pacifique, Sahul-Pacifique) qui partagent des fréquences de caractères discrets semblables. Chaque groupe est caractérisé par une série de traits (dont les fréquences sont élevées ou basses) (Annexe 1) (Scott et Turner, 1997 ; Hardy, 2015).

I.3.4.1. Variabilité temporelle.

Guatelli-Steinberg et Irish (2005) ont apporté des contributions relatives à la taxonomie et à la variation de la fréquence des caractères tout au long de l'évolution humaine (Guatelli-Steinberg et Irish, 2005).

Le *shoveling* est souvent considéré comme une caractéristique des hominidés primitifs. Il est observé chez *Australopithecus*, *early Homo*, les Néandertaliens et *Homo Sapiens* (Bailey, 2006).

Bailey et ses collaborateurs (Bailey, 2000, 2002 ; Bailey et Hublin, 2005 ; Bailey, 2006 ; Bailey et al., 2008, 2011) ont largement contribué au débat sur le concept « *Out-of-Africa* » et à l'affinité entre *Homo sapiens* et *Homo neanderthalensis*.

Chez les Néandertaliens, le développement des crêtes marginales est omniprésent sur UI1 et assez marqué dans son expression. Utilisant comme seuil de présence (point de rupture grade 2 et au-delà) (Scott et Irish, 2017 ; Scott et al., 2018), le *shoveling* est présent dans 100% des spécimens. De plus, plus de la moitié (54%) des UI1 exprime un développement des crêtes très marqué (grade 4 et au-delà). Les tubercules linguaux sont omniprésents et prennent la forme de crêtes simples ou multiples bien développées sur UI1. Nous notons également une convexité vestibulaire sur UI1 (grade 2 et au-delà) présente dans 96% des échantillons de Néandertaliens (Bailey, 2006).

Bailey et Hublin (2013) ont défini les principaux traits diagnostiques d'*Homo sapiens*, une contribution importante à la clarification des questions phylogénétiques et à l'identification des restes fossiles.

Martinón-Torres et ses collaborateurs (2013) ont essayé de comprendre via les caractères non métriques dentaires le degré de variabilité des populations du Pléistocène moyen de Sima de los Huesos et d'autres taxons du Pléistocène moyen (*Homo heidelbergensis*), d'*Homo neanderthalensis* et d'*Homo sapiens* fossile et récent (Bayley et Hublin, 2013 ; Martinon-Torres et al., 2013 ; Marado, 2014 ; Guatelli-Steinberg, 2016).

I.3.4.2. Variabilité géographique.

Le *shoveling* des incisives diffère considérablement d'un groupe de populations à l'autre, mais il est relativement stable à l'intérieur de chaque groupe. La présence ou l'absence de *shoveling* aide à l'identification de populations et à l'exploration de l'ascendance.

Les incisives en « forme de pelle » sont particulièrement fréquentes dans un seul groupe : le complexe sino-américain (populations asiatiques et amérindiennes).

Le *shoveling* est plus fréquent et plus prononcé dans les populations asiatiques qu'européennes (Carbonell, 1963, Mizoguchi, 1985 ; Turner, 1990 ; Scott et Turner, 1997 ; Kimura et al., 2009). Une étude de Kharat, en 1990, a montré l'incidence du *shoveling* des incisives en fonction de la nationalité. Les résultats indiquent que l'incidence du *shoveling* chez les Syriens, les Jordaniens, les Palestiniens et les Philippins est de 5 à 6 %. En Arabie saoudite, au Pakistan et en Inde, l'incidence du *shoveling* est de 10 à 12 %. Chez les Yéménites, les Soudanais et les Égyptiens, l'incidence du *shoveling* est de 20 à 25 % (Kharat et al., 1990). Une étude de Murat Canger et al. en 2014, a publié l'incidence des incisives « en forme de pelle » dans la population turque. L'incidence des incisives en « forme de pelle » est de 10,1 % dans leur groupe d'étude et la majorité des spécimens présente un niveau d'expression de type II (« semi-pelle ») (Murat Canger et al., 2014).

Notre travail de thèse s'appuie sur le constat de départ que le *shoveling* est plus fréquent et plus prononcé dans les populations asiatiques qu'européennes et africaines.

I.4. Limites du système ASU.

Selon Hillson, la subjectivité dans l'utilisation d'ASUDAS est inhérente à la méthode, précisément parce que les grades sont des variables quasi-continues (Hillson, 2005).

I.4.1. La problématique des expressions seuils.

Comme nous l'avons mentionné précédemment, les traits de la couronne ont plusieurs niveaux d'expression allant de l'absence à une expression légère à prononcée.

Les formes prononcées sont visuellement faciles à distinguer par rapport au faible degré d'expression. Il est en revanche beaucoup plus compliqué de distinguer les différences pour des faibles degrés d'expression (exemple entre le grade 0 et 1).

La limite entre l'absence et la présence d'un trait est variable selon les chercheurs. Une pratique courante consiste à calculer les fréquences au-delà d'un certain seuil.

Le terme " point de rupture " est utilisé pour désigner le grade référence au-delà duquel un pourcentage certain de personnes dans un échantillon exprime un trait de caractère (Scott et Irish, 2017). La présence du *shoveling* est décrite des grades 2 à 7 de la plaque ASU-UII (Turner et al., 1991 ; Scott and Irish, 2017 ; Scott et al., 2018).

Cependant, le « point de rupture » peut varier en fonction de la population étudiée. Dans une étude sur des échantillons africains, Irish (1993) a utilisé un point de rupture de 2+ pour enregistrer les fréquences des incisives « en forme de pelle », alors que dans des échantillons où le *shoveling* est plus fréquent et plus prononcé, comme c'est le cas en Asie, un point de rupture de 3+ peut être utilisé (Irish, 1993 ; Scott et Turner 1997).

La difficulté de la notation est une réalité au point de rupture entre l'absence et la présence du trait de caractère ainsi que pour distinguer des degrés d'expression très proches du *shoveling*.

I.4.2. La problématique de l'erreur intra et inter observateur.

Les premières études de la morphologie dentaire chez l'homme ont été soumises aux erreurs « observateur ». Les points de vue divergeaient quant à la définition de ce qui constituait la présence ou l'absence des traits de caractère.

Pour certains chercheurs, toute manifestation d'un trait sur une dent est notée comme « présent ». D'autres chercheurs n'ont noté un trait de caractère comme étant présent que lorsqu'il avait un caractère prononcé.

Compte tenu des différentes philosophies sur l'expression des traits de caractère, deux chercheurs pouvaient noter des fréquences très différentes pour un même caractère à partir d'un même échantillon.

"La notation des caractères morphologiques est connue pour être une évaluation subjective et donc sujette à des différences d'interprétation non seulement entre observateurs mais aussi pour un même observateur d'une session de notation à l'autre. » (Soafer et al., 1972b : 359)

Bien qu'il y ait toujours des problèmes d'erreur intra- et inter-observateur dans la notation des caractéristiques non-métriques dentaires, le niveau d'erreur a été considérablement réduit par l'adoption généralisée du Système d'Anthropologie Dentaire de l'Université d'Etat d'Arizona (ASUDAS), qui comprend un système d'évaluation de l'expression des caractères. L'évaluation de la morphologie exige de la formation, de l'expérience et de la patience. Le grand nombre de plaques normalisées guide les chercheurs dans la notation des caractères. Nichol et Turner ont montré que l'erreur intra-observateur lors de l'évaluation de l'expression du *shoveling* des incisives maxillaires par ASUDAS est faible : 4,1 % pour plus d'une différence de grade et seulement 2 % pour les différences de présence/absence (Nichol et Turner, 1986).

Avec une fiche technique en main et face à un plâtre ou un crâne, tous les chercheurs ont pris des centaines de décisions dans l'expression des traits. Si les dents ne sont pas usées, il y a des décisions à prendre sur les expressions seuils. Pour les dents usées ou présentant une pathologie, un chercheur doit décider de la quantité de modifications qu'il peut tolérer pour arriver à un résultat raisonnable et reproductible. Comme le souligne Scott et ses collaborateurs, *« tout chercheur qui entreprend un projet de recherche sur la couronne dentaire et la morphologie des racines devrait faire une étude pilote dès le départ. Faire des observations sur un nombre donné de personnes (par exemple, 30) et répéter ces observations après un ou plusieurs mois. Les questions de notation doivent être prises en compte avant le début d'un projet, et non après son lancement. L'entraînement est indispensable » (Scott et al., 2016 : 260).*

Ceci étant, comme le mentionnent Scott et Turner (1997), *« il ne sera probablement jamais possible d'atteindre une concordance de 100 % dans les observations répétées de la couronne dentaire et des traits de racine, que ce soit par un seul observateur ou entre observateurs. Les plaques de référence mises au point par Dahlberg, Hanihara, Turner et d'autres ont amélioré la précision de l'observation, mais elles ne sont pas une panacée pour des raisons telles que la problématique des expressions seuils, les modifications post-éruptives, le bruit de surface, les différents niveaux d'expérience, etc... » (Scott et Turner, 1997 :72).*

Même si les observateurs sont formés et suivent la définition ASU du caractère du *shoveling* des UI1, la question des possibles tendances à créer une image mentale inconsciente des catégories ASUDAS et à porter un jugement subjectif dans leur analyse, peut se poser, surtout en présence de nombreux spécimens.

I.4.3. La problématique de l'impact de l'usure et de la pathologie.

L'usure dentaire par attrition, abrasion, érosion ou corrosion a une incidence importante sur les caractères de la couronne (Fiorenza et Kullmer, 2013 ; Fornai et al, 2014). Burnett, Irish et Fong ont démontré que l'usure peut obscurcir les détails morphologiques et le degré d'expression des traits (Burnett et al., 2013). Par exemple, lorsque les dents antérieures supérieures sont usées, le *shoveling* peut ne pas être évident.

La lecture de l'expression du trait sur une dent usée ou cariée est difficile, voire impossible. Le degré d'usure toléré varie selon les observateurs. Cela est particulièrement vrai lorsque la taille de l'échantillon est petite et qu'un observateur veut noter autant d'individus pour un trait spécifique que possible. Cette approche peut avoir une incidence défavorable sur la fréquence des traits caractéristiques de l'échantillon et doit être évitée. Il est plus important d'obtenir une bonne estimation de la fréquence de six individus avec très peu d'usure dentaire, comparativement à dix (Scott et Turner, 1997).

Un trop grand nombre de variation d'expression associé à la problématique de l'usure dentaire ou des pathologies carieuses peuvent erroner la notation ordinale en ajoutant une part de subjectivité dans l'analyse.

I.4.4. La problématique des supports d'observations : plâtres et squelettes.

Un avantage majeur des dents est leur accessibilité dans les populations disparues et en voie de disparition (Scott et Turner, 1997). Chez l'être humain, les dents peuvent être observées soit directement par voie intra-orale, soit grâce à une réplique en négatif en alginate permettant d'obtenir des modèles d'étude en plâtre (approche la plus courante), soit sur une dent extraite.

I.4.4.1. Etude des spécimens sur moulages en plâtre.

Si l'analyse des arcades complètes est facilitée, les moulages en plâtre ne permettent pas l'observation des caractères radiculaires. Si les moulages peuvent enregistrer les détails complexes de la couronne, ils n'ocultent pas le problème de déformation due à l'erreur de coulée, qui rend les observations de caractères difficiles ou impossibles. Parmi les inconvénients des moulages en plâtre, on notera essentiellement l'usure du plâtre dans le temps et le fait que l'empreinte conventionnelle génère un « contact » avec le spécimen.

I.4.4.2. Etude des spécimens sur « crânes » réels.

De nombreux musées dans le monde entier ont des milliers de crânes et de mandibules, qui rendent possible l'observation des dents des temps récents jusqu'aux profondeurs de l'histoire des fossiles. L'observation des dents en position sur les « crânes » réels présente des avantages et des inconvénients. Ces supports fournissent une perspective temporelle (diachronique) à la morphologie dentaire. Ils permettent aux chercheurs de noter les composants de la couronne et des racines. Ils évitent les complications liées à la reproduction (erreur de l'empreinte). Ceci étant, les dents antérieures à racine simple sont souvent perdues sur le terrain et en laboratoire. Les dents réelles, si elles ne sont pas correctement conservées, peuvent se déshydrater. Bien que les racines puissent être analysées, les conservateurs peuvent coller les dents dans les alvéoles à tel point qu'elles ne peuvent plus être observées.

Les supports d'observation conventionnels peuvent entraîner des pertes d'informations ou des problèmes de non-ergonomie sur les sites de fouille.

I.4.5. Hypothèses de départ de nos travaux.

Quel que soit le matériau utilisé, qu'il s'agisse de dents réelles ou de modèles de dents, la plupart des observations sur les couronnes et les racines dentaires sont analysées par inspection visuelle.

L'évaluation des caractères morphologiques est connue comme une évaluation avec une composante subjective et ouvre à de nombreuses erreurs d'interprétation (pas seulement entre plusieurs observateurs mais aussi pour un même observateur).

Certains traits morphologiques sont plus difficiles à observer que d'autres :

- Est-ce que le trait est présent ou pas ?
- Est-ce que la manifestation sur le site représente réellement sa présence ou est-ce autre chose ?
- Le trait est clairement présent mais sur quelle échelle est-il assigné ?
- Le site sur lequel le trait est exprimé est modifié par l'usure, une carie, ..., ou par un problème de réplique en plâtre : peut-on réellement le *scorer* ?

Dans ce contexte, notre étude se base sur 4 hypothèses de départ :

- 1- Il est difficile de *scorer* le *shoveling* au point de rupture entre l'absence et la présence du trait de caractère et pour des degrés d'expression très proches.

Nous émettons l'hypothèse qu'une technique d'approche morphométrique basée sur une échelle continue (et non ordinale) permettrait d'avoir une analyse plus précise et plus reproductible du shoveling que la méthode ASUDAS.

- 2- Même si les observateurs sont formés et suivent la définition ASU du caractère du *shoveling* des UI1, la question des possibles tendances à créer une image mentale inconsciente des catégories ASUDAS et à porter un jugement subjectif à l'analyse, peut se poser, surtout en présence de nombreux spécimens,

Nous émettons l'hypothèse que les stades ASUDAS et les stades observés sur les échantillons ne sont pas forcément comparables et que la profondeur maximale ou la surface de creux de la face palatine serait un aspect inconscient majeur lors de l'enregistrement du shoveling selon la méthode classique ASUDAS.

- 3- Certaines plaques ont un grand nombre de variation d'expression d'un trait alors même que certaines variations sont peu lisibles.

Nous émettons l'hypothèse qu'une échelle ouverte (non limitée aux 7 grades) et continue basé sur un paramètre métrique tel que la profondeur ou la surface de creux serait un meilleur indicateur, plus en adéquation avec les variations morphologiques, que l'échelle fermée ASUDAS.

- 4- Les supports d'observation conventionnels peuvent entraîner des pertes d'informations de par la réplique en plâtre ou des problèmes de non-ergonomie sur les sites de fouille.
- Nous émettons l'hypothèse que l'utilisation d'un scanner intra-oral permettrait d'obtenir des informations plus exploitables dans le temps.*

II.
APPORT DE LA MORPHOMETRIE GEOMETRIQUE DANS
L'ETUDE DU *SHOVELING* :
ELABORATION D'UNE NOUVELLE METHODOLOGIE.

II.1. Définition et intérêts de la Morphométrie Géométrique (MG).

L'analyse morphologique a une place importante en biologie mais les descriptions morphologiques qualitatives permettent uniquement de déterminer des variations morphologiques approximatives.

Le terme de « morphométrie » vient du grec ancien « *morphê* », qui signifie la forme et « *metron* », la mesure. La morphométrie géométrique (MG) comprend l'étude et l'analyse de la géométrie d'une structure, qu'elle soit d'origine biologique ou non. Elle est dérivée de la morphométrie traditionnelle et repose sur une approche statistique. L'intérêt de la MG est de préserver la géométrie des objets d'étude grâce aux coordonnées des points repères choisis et de permettre une analyse quantitative plus fine (Adams et al., 2004 ; Baab, 2012) (Annexe 2).

La morphométrie géométrique assistée par ordinateur, est basée sur l'acquisition, le traitement et l'analyse de points repères décrits selon les axes « x, y, z » et observés à la surface d'objets dont on souhaite étudier les configurations spatiales. La MG requiert l'utilisation de matériel d'acquisition des données et de modélisation 3D, associés à des logiciels informatiques performants. Lorsque les points de repère sont acquis de manière homologues sur chaque spécimen, ils sont alors superposés de manière Procruste par translation, rotation et mise à l'échelle (cf. partie II.3.2).

Dans le cadre de notre étude, la concavité de la surface palatine de l'UI1, utilisée ici comme approximation de la variation du degré d'expression du *shoveling* est assimilée à une série de points repères glissants le long d'une courbe (Annexe 2).

Les objectifs de la MG dans notre étude sont :

- l'élaboration d'une nouvelle méthodologie quantitative dans l'étude comparative du *shoveling* des incisives centrales permanentes maxillaires, en prenant en compte la profondeur et la forme de la face palatine des UI1 (c'est-à-dire deux des trois aspects du *shoveling* : l'expression des crêtes marginales et la courbure de la face palatine) pour évaluer le degré de *shoveling* des UI1 sur une échelle continue.
- la caractérisation et la quantification des variations du *shoveling* au sein d'une même population,
- la comparaison des variations du *shoveling* entre plusieurs populations.

Via la comparaison des données morphométriques et des données visuelles (méthode ASUDAS) du *shoveling*, nous essaierons de répondre aux 3 premières hypothèses de départ (§ I.4.5.).

II.2. Matériels et méthode.

II.2.1. Echantillon.

Notre échantillon comprend 87 incisives centrales maxillaires permanentes humaines modernes (UI1) (Annexe 3) et 7 UI1 de la plaque ASUDAS référence du *shoveling* des UI1 (ASU-UI1).

Les dents sélectionnées dans notre échantillon ne présentent aucune lésion ou pathologie particulière sur les faces vestibulaire et palatine.

Seules les couronnes dentaires non usées à modérément usées (maximum stade 2 défini par l'indice de Smith (1984)) sont incluses dans les analyses (Table 3) (Smith, 1984).

Incisives et canines	
Index d'usure	Descriptions des stades d'usure de la surface occlusale
0	Usure absente ou ne pouvant pas être codée.
1	Bord incisal non usé à poli ou présence de petites facettes d'usure (pas d'exposition à la dentine).
2	Point ou frange de dentine exposée.

Table 3. Indices de l'usure dentaire des incisives et canines selon Smith (1984).

II.2.1.1 Les incisives centrales permanentes humaines.

L'échantillon comprend :

- 30 UI1 d'origine **sud-africaine** (Afrique) datant de l'époque **contemporaine** (XXème siècle). Ces 30 UI1 comprennent 12 UI1 droite (UI1-11) et 18 UI1 gauche (UI1-21). Ces dents appartiennent à la collection ostéologique du Département d'Anatomie de l'Université de Pretoria -PBC- (Afrique du Sud) (Annexe 3 et 4). L'origine des spécimens provient de deux sources : les dons de corps à la science et les corps non réclamés (L'Abbé et al., 2005).

- 13 UI1 d'origine **chinoise** (Asie) datant de l'époque **néolithique**. Ces 13 UI1 comprennent 7 UI1-11 et 6 UI1-21. Elles proviennent d'un site néolithique de la province du Henan en Chine Centrale. Ces UI1 sont des dents isolées dont l'âge et le sexe ne sont pas connus. Ces dents sont conservées à l'Institut de Paléontologie des Vertébrés et de Paléoanthropologie de Pékin-IPVPP-(Chine) (Annexe3) (Figure 13).



Figure 13. Exemples de 3 U11 chinoises (Source IPVPP 2017, Lei P)

- 31 U11 d'origine **française** (Europe) datant de l'époque **médiévale** (X-XIIIème siècle) (Figure 14) (Annexe 3). Ces 31 U11 comprennent 15 U11-11 et 16 U11-21. Ces dents ont été découvertes sur le Site de « La Béragne ». Situé en Minervois, entre la Montagne Noire au nord et le massif des Corbières au sud, le site médiéval de Béragne se trouve sur la commune de Trèbes (Aude, France). Le lieu-dit Béragne correspond à un domaine agricole, dont la première mention remonte au bas Moyen Âge (an 1147) ; il occupe le versant nord d'un promontoire dominant le cours de l'Aude. Le site a fait l'objet d'une opération d'archéologie préventive, menée en 2011/2012 (durée de 7 mois), par l'Institut National de Recherches Archéologiques Préventives (INRAP ; Responsables de l'opération : Guillaume M. et Hernandez J.), préalablement au projet d'aménagement du Parc Régional d'Activités Économiques (PRAE) Paul Sabatier, développé par la Région Languedoc-Rousillon. Occupé du début du X^e siècle à la fin du XIII^e siècle, le site correspond à un vaste habitat, avec des unités d'habitation (architecture en pierre), une aire d'ensilage (plus de 300 fosses de stockage) et une zone d'activité artisanale. S'y ajoutent les vestiges d'une église et un cimetière dont la fouille exhaustive a livré 300 tombes à inhumations. Le cimetière s'apparente à un lieu d'inhumation communautaire regroupant hommes, femmes et enfants, avec une proportion d'enfants en accord avec la mortalité préindustrielle (forte mortalité infantile et faible espérance de vie à la naissance). Les restes humains (étude anthropobiologique : Donat R.) sont remarquablement bien conservés.



Figure 14. Exemples de 8 U11 françaises médiévales (Source INRAP 2016, Donat R., Carayon D.).

- 13 UI1 d'origine **française** (Europe) datant de l'époque **contemporaine** (XIX-XXème siècle). Ces 13 UI1 comprennent 6 UI1-11 et 7 UI1-21. Ces dents ont été découvertes sur plusieurs sites de la région Occitanie et sont conservées au Museum d'Histoire Naturelle de Toulouse-MHNT- (Haute-Garonne-FR-). Ce sont des dents isolées dont l'âge et le sexe sont inconnus (Figure 15) (Annexe 3).



Figure 15. Sélection des 13 UI1 françaises contemporaines (Source MHNT 2017, Fleury G., Esclassan R., Zanolli C.).

II.2.1.2. La plaque ASU-UI1.

La plaque de référence de notre étude, obtenue grâce au Pr J. Braga (laboratoire AMIS), est la plaque ASUDAS originale du *shoveling* UI1 (ASU-UI1) développée par Turner et ses collaborateurs (1991) (Figure 16).

Cette plaque comprend 7 UI1 avec des grades d'expression du *shoveling* allant de la plus faible expression (grade 0) à la plus prononcée (grade 6). Dans une révision récente de la méthode ASUDAS, Scott et Irish (2017) ont décrit un 8e degré d'expression (grade 7) pour le *shoveling* des UI1 (ce grade 7 est défini comme toute expression qui dépasse le grade 6, impliquant des crêtes marginales qui se replient sur elles-mêmes, similaire au grade 6 sur la plaque du *shoveling* des UI2) (Table 2). Pour l'heure, aucune dent référence de ce dernier grade n'a pu être répertoriée. Dans ce contexte, nous n'intégrons pas ce 8e grade dans cette étude.



Figure 16. Photographie de la plaque ASU-UI1 (Source Laboratoire AMIS 2015, Braga J.).

II.2.2. Nouvelle méthode morphométrique d'étude du *shoveling*.

Cette méthode est, dans un premier temps, appliquée sur les 87 UI1 et les 7 UI1 par un opérateur (DC).

II.2.2.1. Acquisition des données 3D par micro-CT.

La micro-tomodensitométrie à rayons X (micro-TDM) ou micro-scanographie, encore appelée *microcomputerized tomography* (CT) par les Anglo-saxons, est une technique d'imagerie, initialement conçue pour l'ingénierie et les matériaux, qui permet de reconstituer le volume et l'image 3D d'un objet à partir d'une série de radiographies 2D réalisées selon de nombreux axes de vue (Annexes 5 et 6). Le micro-CT est un outil d'investigation très précis et reconnu scientifiquement. L'ensemble des images microtomographiques de chaque dent est aligné de sorte que le plan cervical soit parallèle à l'axe x-y d'un système de coordonnées cartésiennes. La forme 3D est créée numériquement de façon semi-automatique, par segmentation, extraction de contour et reconstruction de surface (Kalender, 2006 ; Goldman, 2007 ; Jankowski et Ferreti, 2010 ; Macchiarelli et al., 2013 ; Braga, 2016). Le micro-CT est largement utilisé dans les études sur les tissus dentaires en anthropobiologie.

Nous avons choisi cette technique d'imagerie de référence pour valider notre méthodologie.

Les **30 dents sud-africaines** ont été scannées par microtomographie aux rayons X (micro-CT) à l'installation MIXRAD de la South Africa Nuclear Energy Corporation SOC Limited (Necsa), avec un instrument Nikon XT H225-L en utilisant les paramètres suivants : 100 kV, 100 μ A, pas angulaire de 0,36°. Les images virtuelles ont été reconstruites à une taille de voxel allant de **42 à 50 μ m** (Hoffman et de Beer, 2012) (Figure 17).

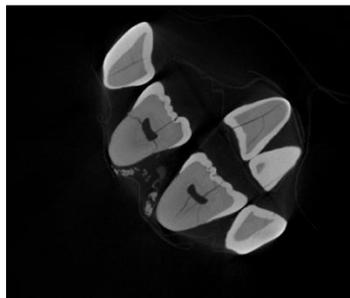


Figure 17. Image 3D (source : Micro-CT) d'un spécimen sud-africain.

Les **13 dents asiatiques** ont été scannées par microtomographie aux rayons X (micro-CT) à l'Institut de Paléontologie des Vertébrés et de Paléoanthropologie de Pékin, en Chine, en utilisant des paramètres similaires et reconstruites à une taille de voxel de **31,4 µm** (Figure 18).



Figure 18. Image 3D (source : Micro-CT) des spécimens asiatiques.

Les **44 dents européennes** et les **7 dents référence** de la **plaque ASU-UI1** ont été scannées par microtomographie aux rayons X (micro-CT) au Centre Inter-Universitaire de Recherche et d'Ingénierie des Matériaux (CIRIMAT) de l'Université de Toulouse avec un instrument Phoenix/GE Nanotom 180, de la fédération FERMAT, en utilisant des paramètres similaires et reconstruites à une taille de voxel de **22 à 25 µm** (Figure 19 et 20).



Figure 19. Micro-CT Phoenix/GE Nanotom 180 (CIRIMAT Toulouse UMR 5085).



Figure 20. Image 3D (source : Micro CT) de la plaque ASU-UI1.

II.2.2.2. Transformation des données.

Nous utilisons le logiciel Image J® pour convertir les données 16 Bits du micro-CT en données 8 Bits (Figure 21).

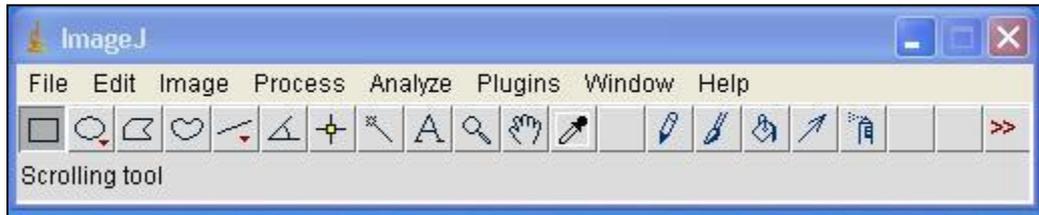


Figure 21. Logiciel Image J®.

II.2.2.3. Traitement des données.

Le processus de traitement des images consiste à générer et isoler les surfaces 3D correspondant aux UII puis à appliquer la nouvelle méthodologie morphométrique.

II.2.2.3.1. Importation et visualisation des données.

Les données sont importées dans le logiciel d'analyse 3D Avizo® v.7.0. (FEI Visualization Sciences Group) pour la visualisation et le traitement des rendus 3D de la surface externe de la dent (Figure 22). Le logiciel Avizo® réalise la modélisation de surfaces 3D à partir de l'image 3D issue du micro-CT.

Procédure Avizo®:

- Open Data
- Read Complete Volume
- Image read parameters
- Voxel Size (fonction de la résolution du micro-CT)
- Objet : ex Spécimen 5885.
- Orthoslice.

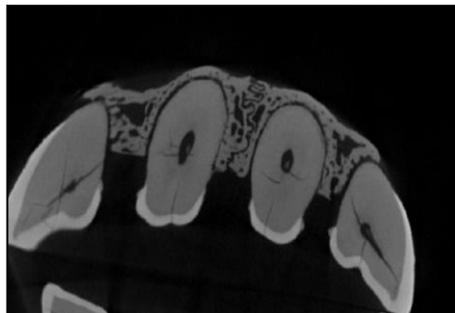


Figure 22. Image orthoslice du maxillaire antérieur du spécimen 5885 (opérateur : Carayon D., 2016).

En sectionnant les plans micro-CT, nous pouvons sélectionner nos coupes et ne visualiser en 3D que l'isosurface du bloc incisif maxillaire (Figure 23 a et b).



Figure 23. Isosurfaces du bloc incisif maxillaire du spécimen 5885. a. Vue vestibulaire. b. Vue palatine (opérateur : Carayon D., 2016).

II.2.2.3.2. Segmentation des données.

Nous segmentons les dents semi-automatiquement en utilisant une approche de seuil (Spoor et al., 1993 ; Fajardo et al., 2002 ; Coleman et Colbert, 2007), afin d'« extraire » l'UI1 de la surface globale (ex. spécimen SA4 : 5885-11)(Figure 24).

Procédure Avizo® :

- Objet : ex Spécimen 5885
- Image segmentation
- Edit New Label Field
- Choix des Matériaux à isoler (UI1 5885-11/ Background)
- Sélectionner la dent à « extraire » de la surface.

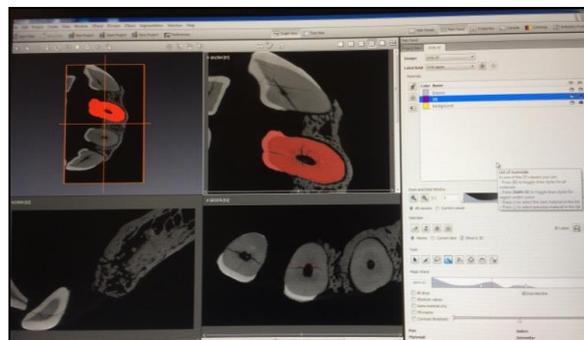


Figure 24. Segmentation des UI1. Sélection de la dent à isoler 5885-11(opérateur : Carayon D., 2016).

Procédure Avizo®:

-Watershed
-Create a new gradient Image
-Apply and create a new label field
-Obtention d'une image 5885-11. tifwatershed

II.2.2.3.3. Génération de la surface.

A partir de l'objet segmenté, une surface est générée (Figure 25).

Procédure Avizo®:

-Objet: 5885-11. tifwatershed
-Generate Surface
-Apply
-Création d'un objet : 5885-11. surf
-Surface View.

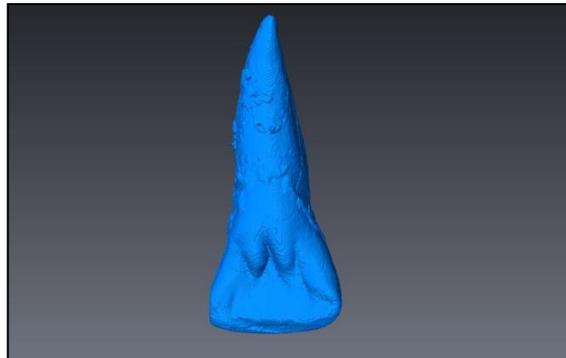


Figure 25. Génération de la surface de SA4 :5885-11(opérateur : Carayon D., 2016).

II.2.2.3.4. Application du maximum de courbure.

Le maximum de courbure est mesuré sur chaque surface palatine des UI1 en utilisant le module "MaxCurvature" d'Avizo® (Figure 26).

Procédure Avizo® :

-Objet: 5885-11. surf
-Measure
-Curvature
-Apply
-Max curvature
-Surface view (edit physics.col)

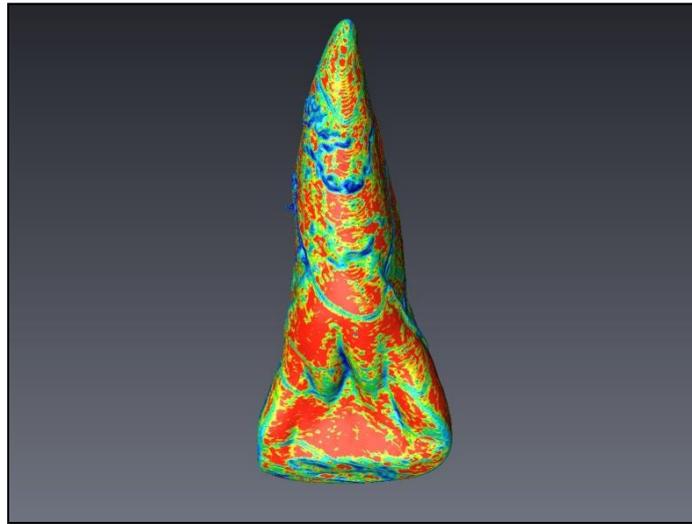


Figure 26. Génération de la surface de SA4:5885-11 avec application du maximum de courbure (opérateur : Carayon D., 2016).

II.2.2.3.5. Détermination des plans de section.

II.2.2.3.5.1. Délimitation de la ligne de plus grand contour bordant la « fosse palatine ».

Nous déterminons la ligne de plus grand contour passant par les crêtes marginales mésiale et distale, délimitant la « fosse palatine » (Figure 27).

Nous utilisons ces maxima comme points de départ et d'arrivée de nos analyses de morphométrie géométrique.

Procédure Avizo®:

-Create
 -Data
 -Bspline (100 Semi-Landmarks)
 -Modifier les coordonnées du dernier point de repère afin que le premier et le dernier point aient les mêmes coordonnées.

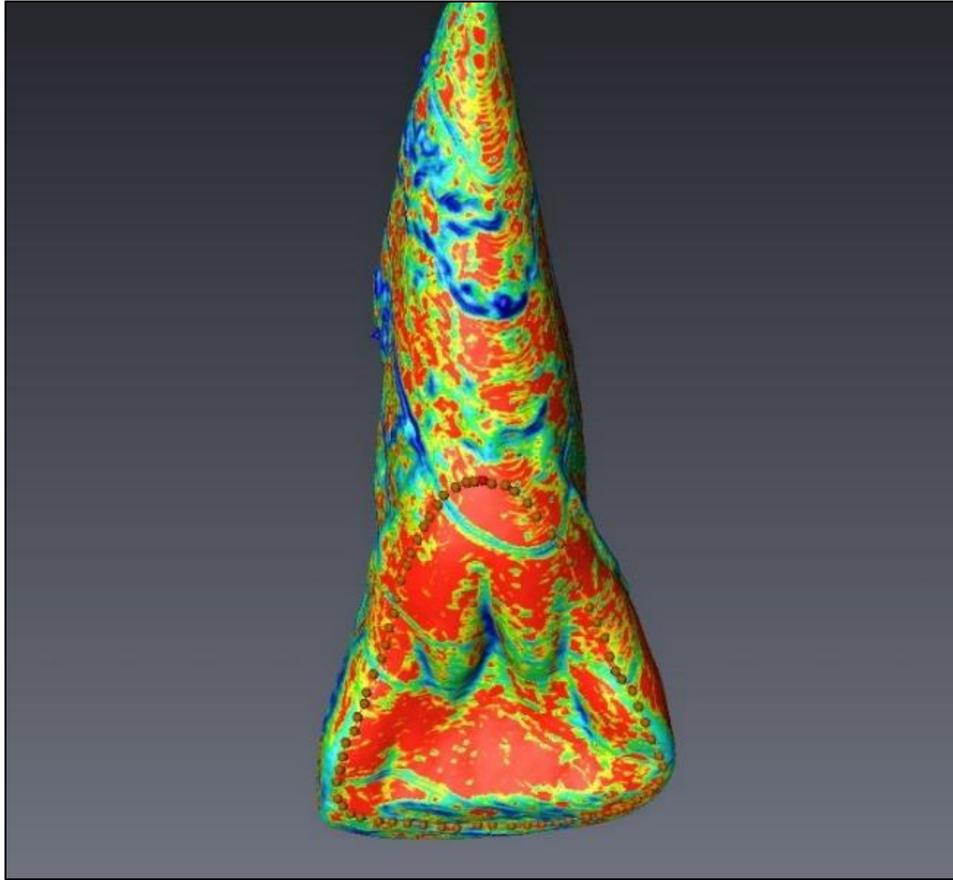


Figure 27. Mise en place des *semi-landmarks* afin d’objectiver la ligne de plus grand contour palatine de SA4:5885-11(opérateur : Carayon D., 2016).

II.2.2.3.5.2. Définition des points de repères cervicaux.

Nous définissons le plan cervical le mieux adapté en fixant au moins trois points de repère aux points les plus apicaux de la jonction amélo-cémentaire sur les faces vestibulaire et palatine (points de courbure maximale sur les faces vestibulaire et palatine de la jonction amélo-cémentaire) (Le Cabec et al., 2013) (Figure 28).

Procédure Avizo®:

-Create
 -Data
 -Landmarks (*Landmarks Editor – Landmarks View*)

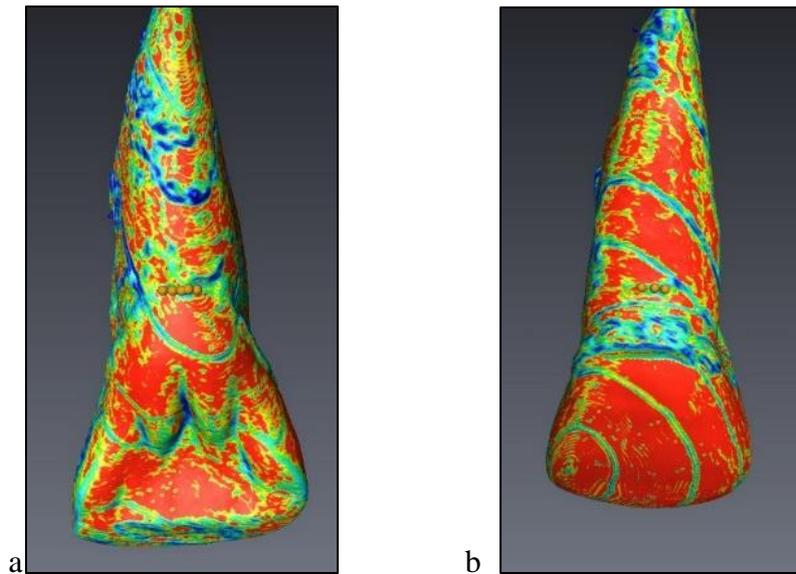


Figure 28. Mise en place des points de repères cervicaux SA4:5885-11. a. Vue palatine. b. Vue vestibulaire
(opérateur : Carayon D., 2016).

II.2.2.3.5.3. Détermination du plan cervical.

Procédure Avizo®:

-Objet 5885-11.surf
 -Display
 - Surface Cross Section SCS
 -Points to fit: Landmarks

Nous répliquons ce plan de référence (*Ctrl C / Ctrl V sur l'objet « SCS »*) afin d'obtenir 3 plans de coupe :

- plan le plus incisal,
- plan le plus cervical,
- plan médian.

II.2.2.3.5.4. Détermination du plan médian.

Nous positionnons le plan médian à équidistance des plans incisal et cervical (Figure 29).

Le plan médian objective la zone d'analyse du *shoveling*.

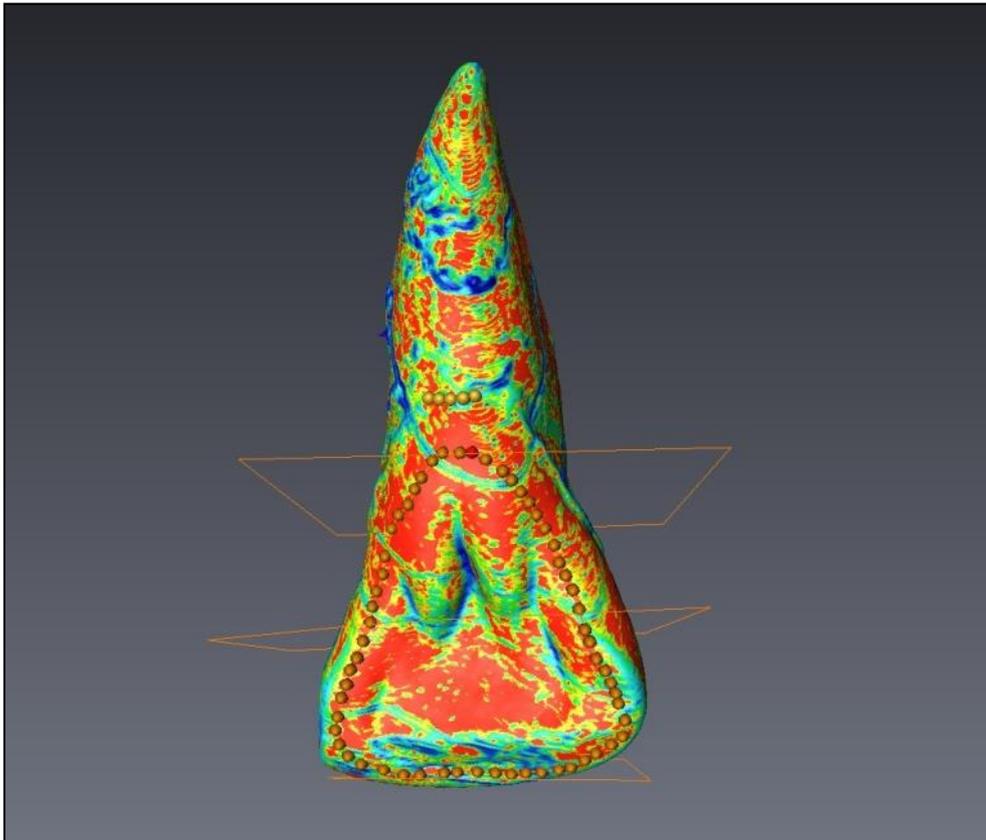


Figure 29. Détermination du plan médian, zone d'analyse du *shoveling* de SA4 :5885-11(opérateur : Carayon D., 2016).

II.2.2.3.6. Objectivation morphométrique du *shoveling* :
positionnement des *semi-landmarks*.

Nous plaçons des *semi-landmarks* le long du plan médian en suivant la concavité de la face palatine de la couronne (après section de la dent en regard du plan médian et orientation frontale par rapport au champ de vision).

Les points de repère sont toujours positionnés du côté mésial vers le côté distal (Figure 30).

Procédure Avizo®:

- Create
- Data
- Bspline (100 Semi-Landmarks)

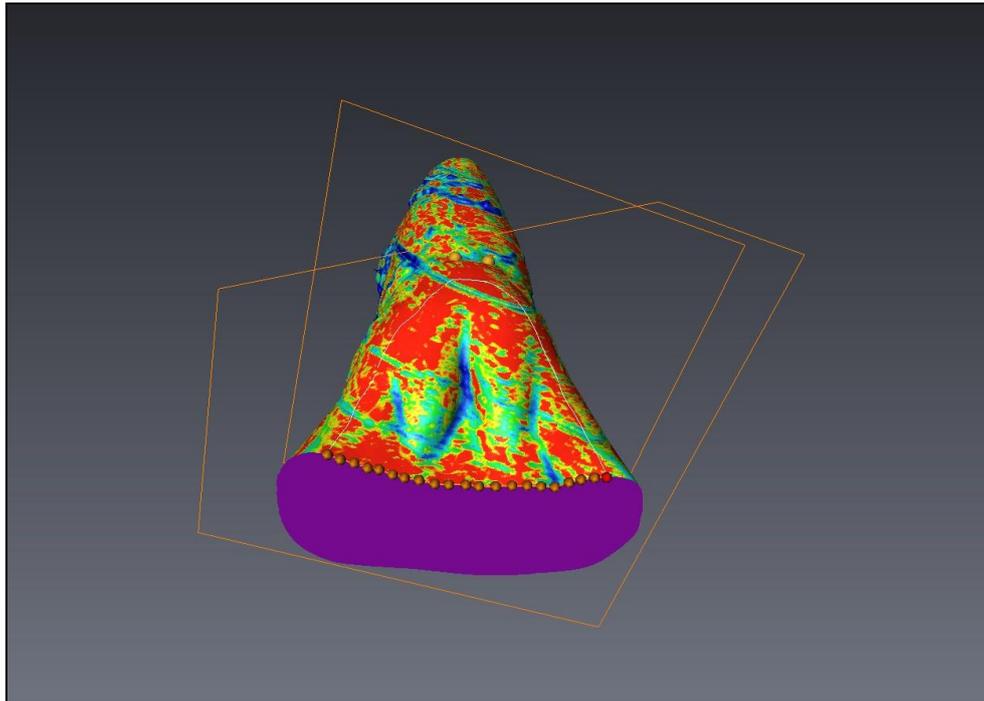


Figure 30. Objectivation morphométrique du *shoveling* de SA4:5885-11(opérateur : Carayon D., 2016).

Cette courbe prévisualisant la zone de *shoveling* est enregistrée dans un fichier *ascii*.

II.2.2.3.7. Illustration de la synthèse de notre nouvelle méthodologie morphométrique pour le spécimen SA4 : 5885-11.

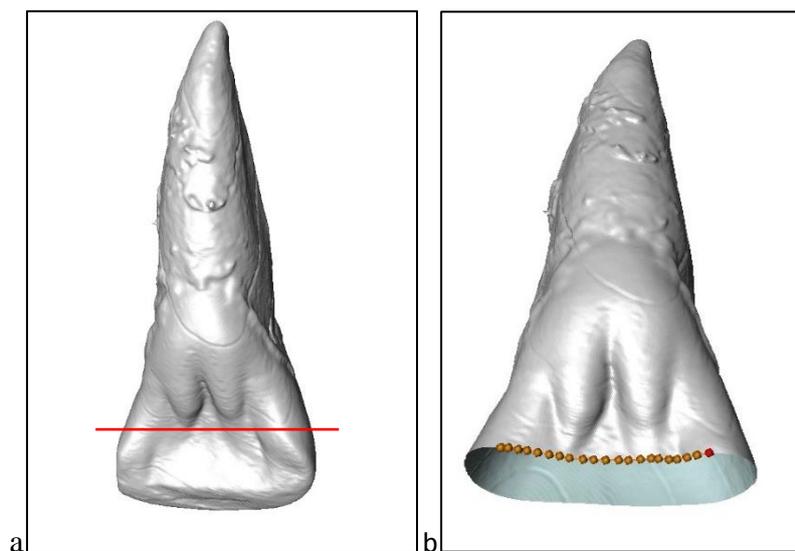


Figure 31. Position du plan de référence médian (a), qui sert à placer les *semi-landmarks* le long de la courbe de la face palatine du côté mésial vers le côté distal (b). Nous utilisons les maxima de la ligne de courbure extrême comme points de départ et d'arrivée de notre analyse de MG (opérateur : Carayon D., 2016).

II.2.2.3.8. Application de la méthode sur l'ensemble de l'échantillon.

Nous appliquons la méthodologie précédemment décrite sur les 87 UI1 et les 7 UI1 référence de ASU-UI1.

Nous enregistrons 94 courbes *Bspline* objectivant le *shoveling* dans un fichier *.ascii*.

II.2.2.3.9. Gestion de l'asymétrie droite / gauche.

Nous procédons à la transformation par « Effet Miroir » des *Bspline* des UI1 droites (11) en UI1 gauches (21) de telle sorte à pouvoir les comparer indépendamment de leur asymétrie (Figure 32 a et b).

Procédure Avizo®:

-Objet 5885-11 *Bspline. ascii*
-Line set View
-Transform Editor
-Dialog (scale factor : modifier les coordonnées initiales du y (+1) en y(-1))
- Close /Apply Transform
-Proceed

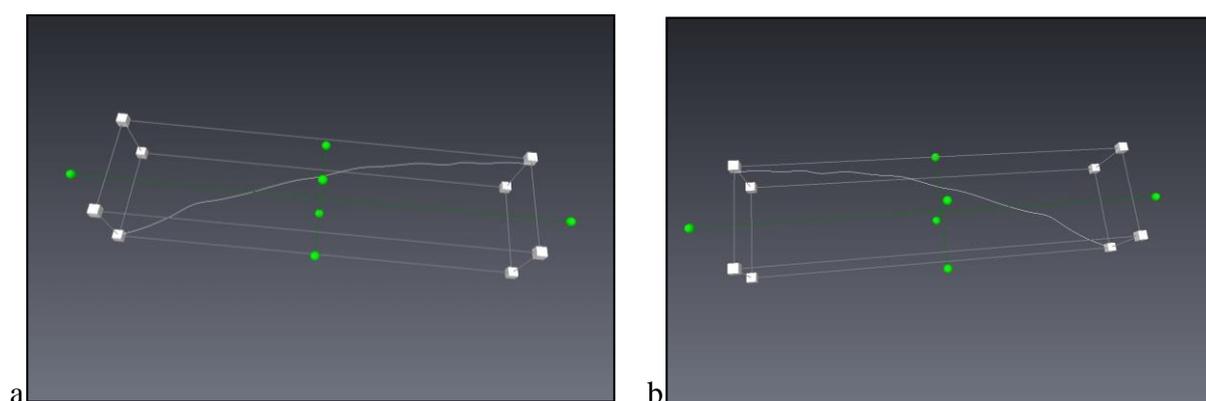


Figure 32. a. Courbe initiale du *shoveling* de SA4 : 5885-11. b. Courbe du *shoveling* de SA4 : 5885-11, après application de l'« Effet Miroir » (opérateur : Carayon D., 2016).

II.2.3. Méthode conventionnelle ASUDAS.

Nous appliquons la méthode ASUDAS sur notre échantillon (Turner et al., 1991).

L'appréciation visuelle (*scoring* visuel) du *shoveling* des 87 spécimens est effectuée par deux observateurs spécialistes en odontologie anthropologique (DC/CZ) (Table 4), selon la méthode ASUDAS publiée (cf. § I.3.3).

Le premier observateur (DC) a réalisé le *scoring* visuel du *shoveling* des 87 spécimens à 2 reprises à 48 heures d'intervalle (VS1 T1 et VS1T2).

Le second observateur (CZ) a réalisé le *scoring* visuel (VS2) des 87 spécimens, indépendamment du premier observateur.

Spécimen	Origine	VS1T1	VS1T2	VS2
SA1	Afrique du Sud	1	1	1
SA2	Afrique du Sud	1	1	1
SA3	Afrique du Sud	0_1	0_1	0_1
SA4	Afrique du Sud	2	2	2
SA5	Afrique du Sud	1	1	1
SA6	Afrique du Sud	1	1	1
SA7	Afrique du Sud	0	0	0
SA8	Afrique du Sud	0	0	0
SA9	Afrique du Sud	1	1	1
SA10	Afrique du Sud	1	1	1
SA11	Afrique du Sud	1	1	1
SA12	Afrique du Sud	1	1	1
SA13	Afrique du Sud	1	1	1
SA14	Afrique du Sud	1_2	2	1_2
SA15	Afrique du Sud	0	1	0
SA16	Afrique du Sud	2	2	2
SA17	Afrique du Sud	2	2	2
SA18	Afrique du Sud	0	0	0
SA19	Afrique du Sud	0	0	0

SA20	Afrique du Sud	1	1	1
SA21	Afrique du Sud	1	1	1
SA22	Afrique du Sud	1	1	1
SA23	Afrique du Sud	1	1	1
SA24	Afrique du Sud	1	1	1
SA25	Afrique du Sud	1	1	1
SA26	Afrique du Sud	1	1	1
SA27	Afrique du Sud	0	0	0
SA28	Afrique du Sud	0	0	0
SA29	Afrique du Sud	1	1	1
SA30	Afrique du Sud	2	2	2
CH1	Chine	3	3	3_4
CH2	Chine	3	3	3
CH3	Chine	4	4	4
CH4	Chine	5	5_6	5
CH5	Chine	5_6	6	5_6
CH6	Chine	4	4	4
CH7	Chine	3	3	3
CH8	Chine	4_5	4_5	4_5
CH9	Chine	2	2	2_3
CH10	Chine	3	3	3
CH11	Chine	3	3	3
CH12	Chine	3	3	3
CH13	Chine	4_5	5	5
FM1	France Médiévale	1	1	1
FM2	France Médiévale	1	1	1
FM3	France Médiévale	1	1	1
FM4	France Médiévale	1_2	2	2
FM5	France Médiévale	2	2	2
FM6	France Médiévale	0	0	0
FM7	France Médiévale	0	0	0
FM8	France Médiévale	0_1	0_1	0_1

FM9	France Médiévale	0	0	0
FM10	France Médiévale	2	2	2
FM11	France Médiévale	1	1	1
FM12	France Médiévale	2	2	2
FM13	France Médiévale	1	1	1
FM14	France Médiévale	1	1	1
FM15	France Médiévale	1	1	1
FM16	France Médiévale	0	0	0
FM17	France Médiévale	0	0	0
FM18	France Médiévale	0	0	0
FM19	France Médiévale	0_1	0_1	0_1
FM20	France Médiévale	0	0_1	0
FM21	France Médiévale	0_1	0_1	0_1
FM22	France Médiévale	1	1	1
FM23	France Médiévale	1	1	1
FM24	France Médiévale	1	1	1
FM25	France Médiévale	0_1	0_1	0_1
FM26	France Médiévale	1	1	1
FM27	France Médiévale	0_1	0_1	0_1
FM28	France Médiévale	0	0	0
FM29	France Médiévale	1	1_2	1
FM30	France Médiévale	0	0	0
FM31	France Médiévale	0	0	0
FC1	France Contemporaine	1_2	1	1_2
FC2	France Contemporaine	1	1	1
FC3	France Contemporaine	1	1	1
FC4	France Contemporaine	2	1	1_2
FC5	France Contemporaine	1	1	1
FC6	France Contemporaine	2	2	2
FC7	France Contemporaine	1	1	1
FC8	France Contemporaine	2	2	1
FC9	France Contemporaine	1	1	1

FC10	France Contemporaine	2	2	2
FC11	France Contemporaine	3	3	2
FC12	France Contemporaine	0_1	0_1	1
FC13	France Contemporaine	1	1	1

Table 4. Résultats du *scoring* visuel réalisé par 2 observateurs indépendants (tests intra and inter-observateur).
 VS1T1 : *Scoring* Visuel Observateur 1 Test 1; VS1T2: *Scoring* Visuel Observateur 1 Test 2; VS2: *Scoring*
 Visuel Observateur 2.

Dans certains cas, les observateurs attribuent un score “intermédiaire” (0_1 correspondant à un score se situant entre les grades 0 et 1 ASUDAS). Dans ces cas de figure, la note 0_1, par exemple, a reçu la valeur moyenne de 0,5.

II.3. Outils statistiques.

Toutes les analyses statistiques et la visualisation graphique des données sont effectuées dans MATLAB (MATLAB et Statistics Toolbox Release, R2017b) et R 3.4.3 (R Core Team, 2018). Les packages R suivants ont été utilisés : scatterplot3d (Ligges et Mächler, 2003), shapes (Dryden, 2017), ade4 (Dray et Dufour, 2007), irr (Gamer et al., 2012) et Bland Altman Leh (Lehnert, 2015).

Les statistiques ont été réalisées par Adhikari K. (Department of Genetics, Evolution and Environment, University College London (UCL) Genetics Institute, London, United Kingdom).

II.3.1. Tests de reproductibilité.

La fiabilité des mesures doit refléter le degré de corrélation des mesures pour un même observateur (test intra-observateur), entre plusieurs observateurs (test inter-observateur) et l'«accord» entre les mesures.

Nous utiliserons pour les tests de reproductibilité le coefficient de corrélation intra-classe (ICC) ainsi que l'indice de Bland-Altman (ce type d'outil, qui évalue le degré d'accord entre deux observateurs, est similaire à un tracé de différence moyenne de Tukey). Deux modèles statistiques sont utilisés :

- Modèle à effets aléatoires bidirectionnels, accord absolu, évaluateurs multiples par rapport aux mesures (Koo et Li, 2017),
- Modèle à effets mixtes bidirectionnels, accord absolu, évaluateurs multiples par rapport aux mesures (Koo et Li, 2017).

Ces outils statistiques permettent de vérifier à la fois la précision en termes de :

-*cohérence* : dans notre étude, si une dent est effectivement de catégorie ASUDAS 2, mais que deux observateurs l'attribuent indépendamment l'un de l'autre à un stade 5, ils sont très cohérents entre eux, mais ils ont une marge d'erreur de 3 grades par rapport à la réalité (Schrouf et Fleiss, 1979 ; Joint Committee for Guides in Metrology, 2008 ; Hughes et Hase, 2010).

-*précision* en termes de marge d'erreur entre le *scoring* visuel ordinal et le *scoring* morphométrique basé sur notre méthode avec les points de repère (c'est-à-dire rechercher, par exemple, si la catégorie 3 correspond réellement au grade 3 de la plaque ASUDAS).

II.3.2. Analyse Procruste.

Les points de repères dépendent de la position de l'objet et ne sont donc pas invariants. Pour pouvoir comparer les variations de *shoveling* entre plusieurs échantillons, il est nécessaire d'avoir recours à une étape d'alignement des conformations géométriques (Evin et al., 2008).

Pour comparer objectivement le *shoveling* de chaque UI1 avec le *shoveling* de chaque ASU-UI1, les conformations du *shoveling* sont alignées en utilisant la méthode d'alignement de conformation géométrique la plus utilisée en MG : la technique de superposition Procruste ou GPA (*Generalized Procrustes Analysis*) (Rohlf et Marcus, 1993 ; Cucchi et al., 2015). Cette technique a été nommée ainsi en 1962 par Hurley et Catell à partir du personnage de Procuste, un aubergiste de la mythologie grecque qui forçait ses victimes à s'allonger sur un lit et modifiait violemment leur taille pour que celle-ci corresponde à la taille du lit (Gower et Dijksterhuis, 2004).

Les courbes de *shoveling* sont placées dans un même référentiel en supprimant les effets de position, taille et orientation, ce qui permet d'obtenir des coordonnées de points comparables (Vuillien et al., 2017).

La GPA se décompose en 3 étapes que sont la superposition, la normalisation et la rotation (Figure 33) :

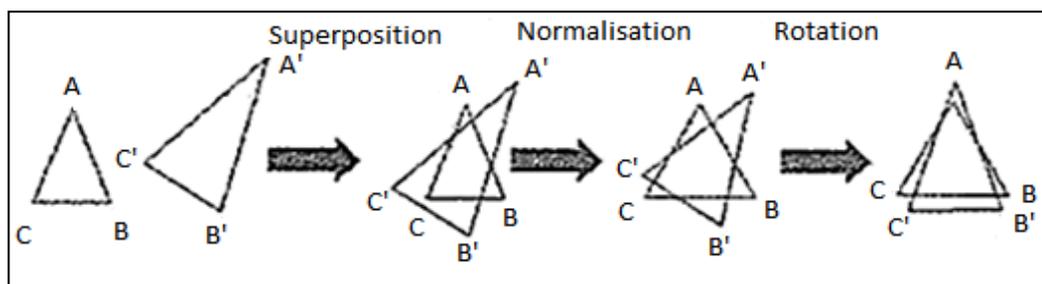


Figure 33. Etapes de la technique de superposition Procruste (Evin et al., 2008).

La première étape de translation ou « superposition » est une translation qui va aboutir au centrage de toutes les conformations sur leur centre de gravité ou « centroïde ». La « position centroïde » correspond à la moyenne des coordonnées des différents points-repères constituant une conformation. Il peut être assimilé au centre de gravité de la conformation.

La deuxième étape est la « normalisation », qui vise à une mise à l'échelle de toutes les conformations, en utilisant la « taille centroïde » comme unité de taille (isométrie).

La taille centroïde (CS) est la mesure de taille la plus utilisée en morphométrie géométrique. Elle correspond mathématiquement à : $\sqrt{\sum \text{distances [point repère-centroïde]}}$.

La troisième étape est un « ajustement généralisé » qui vise à l'alignement de toutes les conformations, par rotation.

II.3.3 L'Analyse en Composantes Principales (ACP).

L'ACP est un outil statistique qui permet de passer d'un grand nombre de variables à quelques variables nommées composantes principales (PCs). Le but est de transformer des variables liées entre elles (dites corrélées en statistique) en nouvelles variables décorrélées les unes des autres : l'analyse est conçue de manière à ce que chaque composante ne soit pas reliée à toutes les autres composantes. Les PCs sont des constructions statistiques qui ne correspondent à aucun caractère biologique (Metairie, 2014).

Le graphique d'une ACP possède 2 axes (abscisses et ordonnées), qui correspondent à 2 composantes principales. Ce sont les 2 premières PCs qui expriment les plus hauts pourcentages de variance, c'est-à-dire la variabilité la plus importante, qui sont choisies comme axes du graphique, car ce sont les plus discriminantes.

Les coordonnées de ces points ne dépendent que de la forme et sont donc indépendantes de l'échelle, de l'orientation et de la position. Plus deux formes diffèrent, plus les représentants sont éloignés dans l'espace.

La « distance » Procruste permet de quantifier les différences de forme entre deux conformations. Il s'agit de la « distance » mesurée entre deux points. Une grande « distance » signifie que les deux formes sont très différentes. A l'inverse, une « distance » nulle indique que les deux formes sont identiques.

II.3.4. Analyse non-Procruste.

L'inconvénient de l'analyse en composantes principales des résultats Procruste réside dans le fait que les valeurs des PC changent en fonction de la composition de l'échantillon. Les scores morphométriques en PC doivent donc être calculés dans l'ensemble de l'échantillon, ce qui complique le rajout d'un ou plusieurs spécimens dans l'étude.

L'objectif de l'analyse non-Procruste est de scorer le *shoveling* par des analyses différentes qui soient indépendantes de la composition de l'échantillon.

Une procédure d'alignement des données permet de mettre à l'échelle les courbes objectivant le *shoveling* selon une plage fixe d'axe Y de 1 pour standardiser et faciliter les comparaisons.

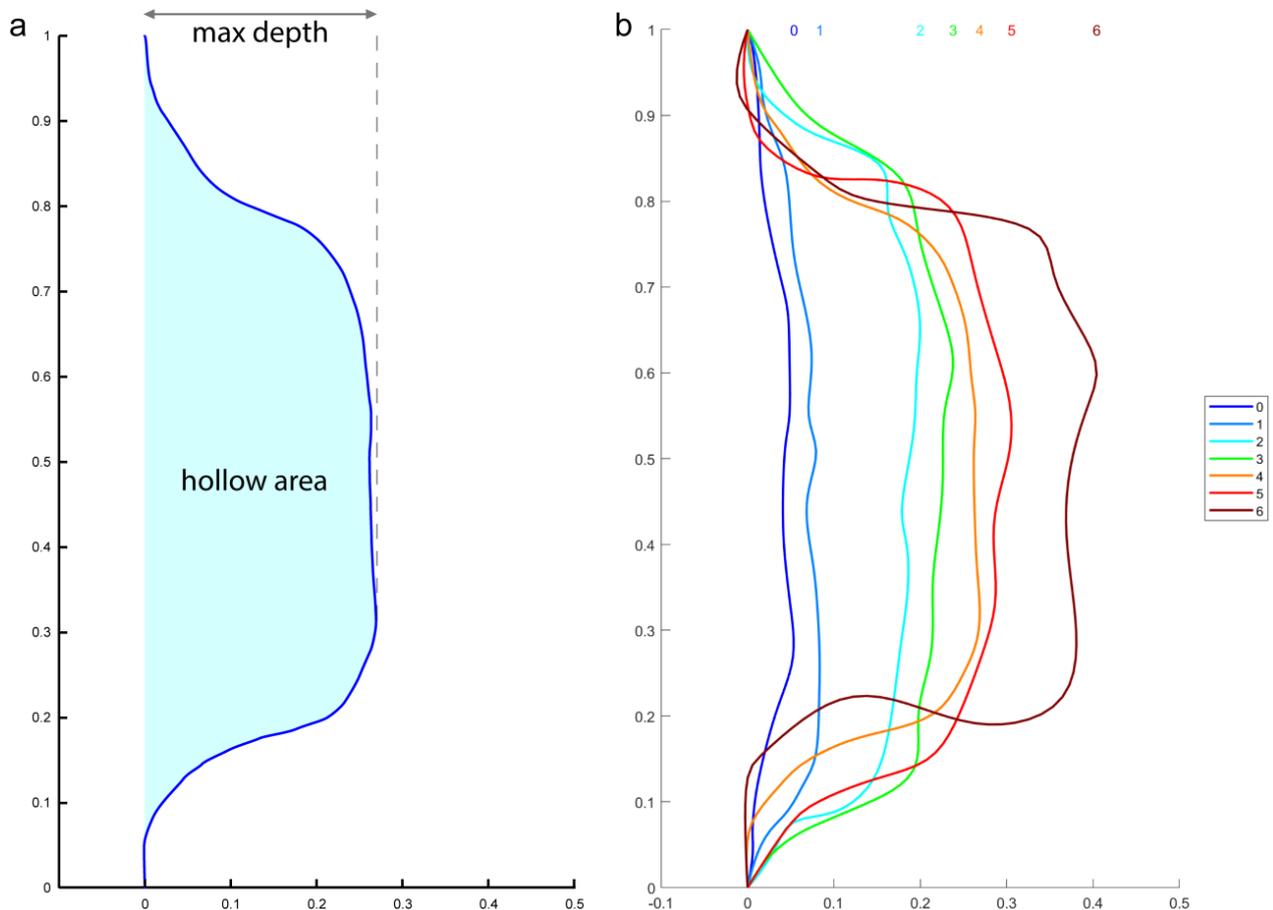


Figure 34. Illustration de la profondeur maximale et de la surface de creux (a) utilisées dans les analyses non Procruste (courbes *semi-landmark* alignées selon leurs premier et dernier points). (b) Les courbes des UII de la plaque de référence ASUDAS sont superposées suivant cette approche non-Procruste.

Cette procédure d'alignement nécessite une première étape de rotation 3D similaire à la méthode Procruste.

Chaque courbe se trouve sur un plan 3D approximatif (les *semi-landmarks* sont placées le long d'un plan, voir Figure 31b).

La courbe est orientée de telle sorte à s'aligner approximativement sur le plan X-Y (l'équation du plan 3D ($aX + bY + cZ + d = 0$) est obtenue en ajustant une régression linéaire sur les coordonnées X, Y et Z).

Après cet alignement, la coordonnée Z est écartée.

Les données 2D sont ensuite orientées de sorte que le premier et le dernier point se trouvent sur l'axe Y (c'est-à-dire que la coordonnée X = 0).

Enfin, ils sont mis à l'échelle par un facteur constant sur les deux axes pour obtenir une plage fixe de l'axe Y de 1, c'est-à-dire que le premier et le dernier point de chaque courbe ont maintenant des coordonnées (0,0) et (0,1) respectivement. Les courbes sont donc alignées selon leur diamètre maximal orienté perpendiculairement à l'axe X (Figure 34a).

Nous utilisons ensuite ces coordonnées alignées pour mesurer deux paramètres métriques :

- la profondeur maximale de la face palatine par rapport au premier et au dernier point des courbes,
- la surface de creux des courbes (Figure 34b).

Les composantes principales non-Procruste sont calculées à partir des coordonnées non-Procruste alignées (X et Y).

L'avantage de cette analyse non-Procruste réside dans le fait que le référentiel est un repère linéaire classique permettant de rajouter autant de spécimens souhaités sans changer l'espace des données.

II.3.5. Interpolation *spline*.

Afin de comparer le *scoring* morphométrique au *scoring* visuel du *shoveling*, nous devons attribuer à chaque UI1 un score prédictif analogue à un stade ordinal ASUDAS.

Nous élaborons une fonction « prédictive » utilisant les valeurs du paramètre métrique le plus représentatif et les grades d'expression du *shoveling* des 7 dents ASUDAS.

L'hypothèse de départ étant que la distribution des grades ASUDAS n'est ni linéaire, ni homogène (cf. Figure 34b), une fonction *spline* est utilisée pour ajuster les valeurs de telle sorte à préserver la non-linéarité. Une fonction *spline* constitue un ensemble d'outils d'approximation, de lissage et d'interpolation, qui présente des propriétés optimales de régularité. La constante de lissage détermine le compromis entre la fidélité aux données et la régularité de la solution (Besse –Thomas Agnan, 1989).

Nous obtenons des valeurs prédictives de catégories ASUDAS pour les 87 échantillons humains modernes.

Sur les valeurs prédictives, nous maintenons les décimales pour conserver plus de précision, au lieu de les arrondir à la catégorie entière la plus proche (par exemple, 1.67 au lieu de 2).

De même, certains des *scoring visuel* attribués par les observateurs ont un *scoring* intermédiaire (0_1, c'est-à-dire un stade situé entre les références ASUDAS 0 et 1). Dans ces cas de figure, par exemple, la note 0_1 a reçu la valeur moyenne de 0,5.

Ces valeurs prédictives sont comparées avec les valeurs du *scoring* visuel attribuées par l'observateur via ICC pour obtenir des mesures de précision (c'est-à-dire, sans biais).

II.4. Résultats.

II.4.1. Test de reproductibilité de la méthodologie morphométrique.

Trois opérateurs différents (DC, CZ, PM) ont appliqué indépendamment la nouvelle méthodologie morphométrique sur 30 spécimens sélectionnés au hasard, afin de tester la reproductibilité de la méthode.

Le positionnement des points de repère entre les 3 opérateurs est testé par une corrélation intra-classe (ICC) sur un modèle aléatoire bidirectionnel avec « accord absolu » avec des évaluateurs multiples (Koo et Li, 2017).

La reproductibilité de la méthodologie est validée avec un **ICC>99%**.

II.4.2. Test de reproductibilité de la méthode ASUDAS.

La fiabilité intra et inter-observateurs de l'appréciation visuelle du *shoveling* de nos 87 UII par rapport à la plaque de référence ASU-UII a été évaluée par corrélation intra-classe (ICC) à l'aide d'un modèle à effets mixtes bidirectionnels avec « accord absolu » entre observateurs multiples (Koo et Li, 2017).

Les tests de corrélation intra-classe intra et inter-observateurs révèlent une forte cohérence de l'appréciation du *shoveling* avec la méthode ASUDAS pour un même observateur et entre les observateurs (Table 5).

	Cohérence (précision)	
	VS1 T1 vs T2	VS1 vs VS2
87 UII (Echantillon global)	0.985	0.987
31 SAUII (Afrique du Sud)	0.946	0.986
13 FCUII (France / Contemporaines)	0.900	0.721
31 FMUII (France / Médiévales)	0.971	0.993
13 CHUII (Chine)	0.976	0.975

Table 5. Test de reproductibilité inter et intra observateur de la méthode visuelle ASUDAS.

La cohérence est élevée pour l'ensemble de l'échantillon (**98.5%** pour le test intra-observateur et **98.7%** pour le test inter-observateur), mais aussi pour chaque sous-échantillon à variation chrono-géographique considéré dans cette étude.

II.4.3. Analyse de la distribution des échantillons étudiés par rapport aux grades ASUDAS.

II.4.3.1. Analyse par superposition Procruste.

II.4.3.1.1 Analyse en Composantes Principales (ACP).

Les composantes principales (PC) ont été calculées en utilisant les coordonnées Procruste de tous les points de repère, pour tous les échantillons, y compris les modèles de référence ASUDAS. Le tracé des PC nous a permis de visualiser comment les échantillons étaient distribués par rapport aux grades ASUDAS (Figure 35).

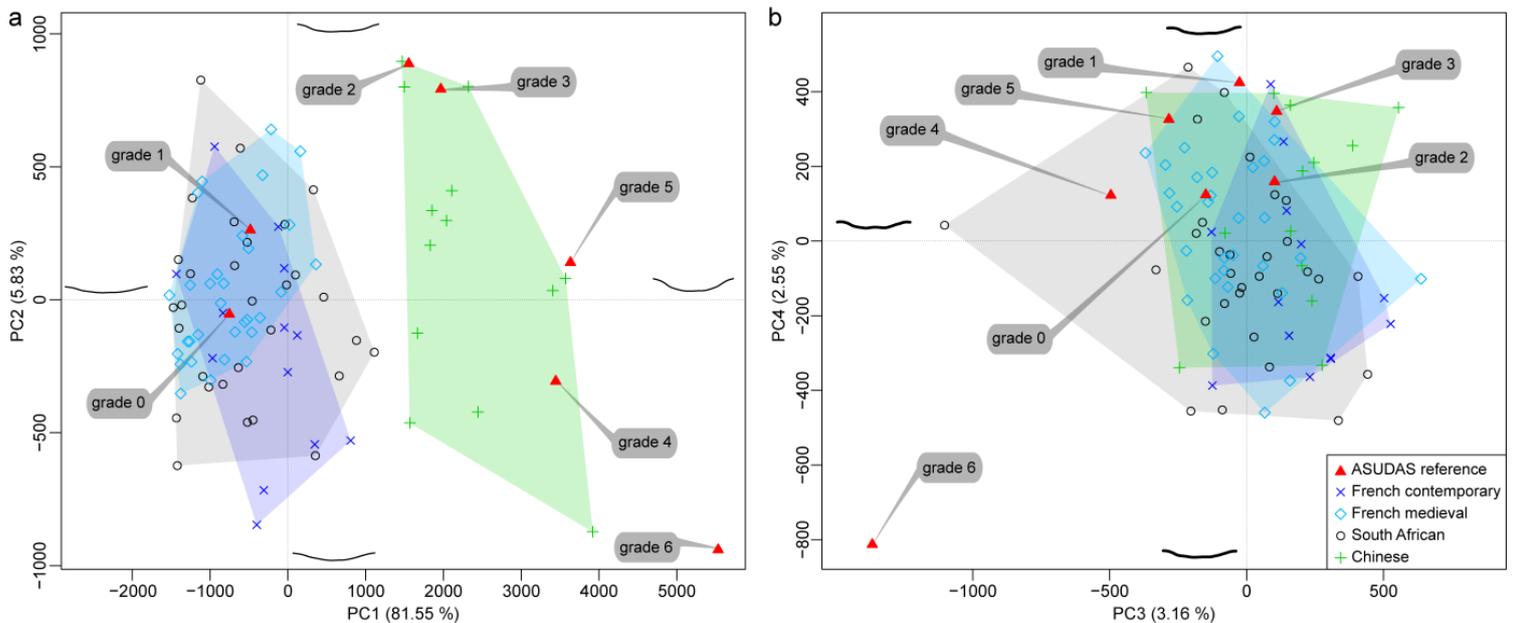


Figure 35. Analyse en composantes principales (ACP) des courbes de 100 *semi-landmarks* objectivant le *shoveling* selon la méthode Procruste. a : PC1 vs. PC2 ; b : PC3 vs. PC4.

a. PC1 et PC2.

Les deux premières composantes (PC1 et PC2) de l'ACP représentent 87,4 % de la variance totale (81,5 % et 5,9 % respectivement). Le long de PC1, les UI1 d'origine **française** (contemporaines et médiévales) et **sud-africaine** montrent une expression de *shoveling* similairement faible, se rapprochant des grades **ASUDAS 0 et 1** tandis que les UI1 d'origine **chinoise** se rapprochent des **grades 2 à 5**, caractérisant un *shoveling* prononcé.

Même si les grades ASUDAS ont tendance à suivre une tendance croissante le long de PC1 (de l'absence de *shoveling* 0 vers le *shoveling* très marqué 6), leur **distribution n'est pas linéaire et homogène** (Figure 35a). En effet, les grades 0-1, 2-3, 4-5 et 6 ont tendance à former quatre « groupes » et chaque grade d'expression n'est pas équidistant l'un de l'autre.

c. PC3 et PC4.

Il n'y a pas de discrimination visible entre les échantillons chrono-géographiques humains et les grades ASUDAS le long de PC3 et PC4 (Figure 35b).

II.4.3.1.2. Histogramme de la répartition des PC1 selon la distribution des grades ASUDAS.

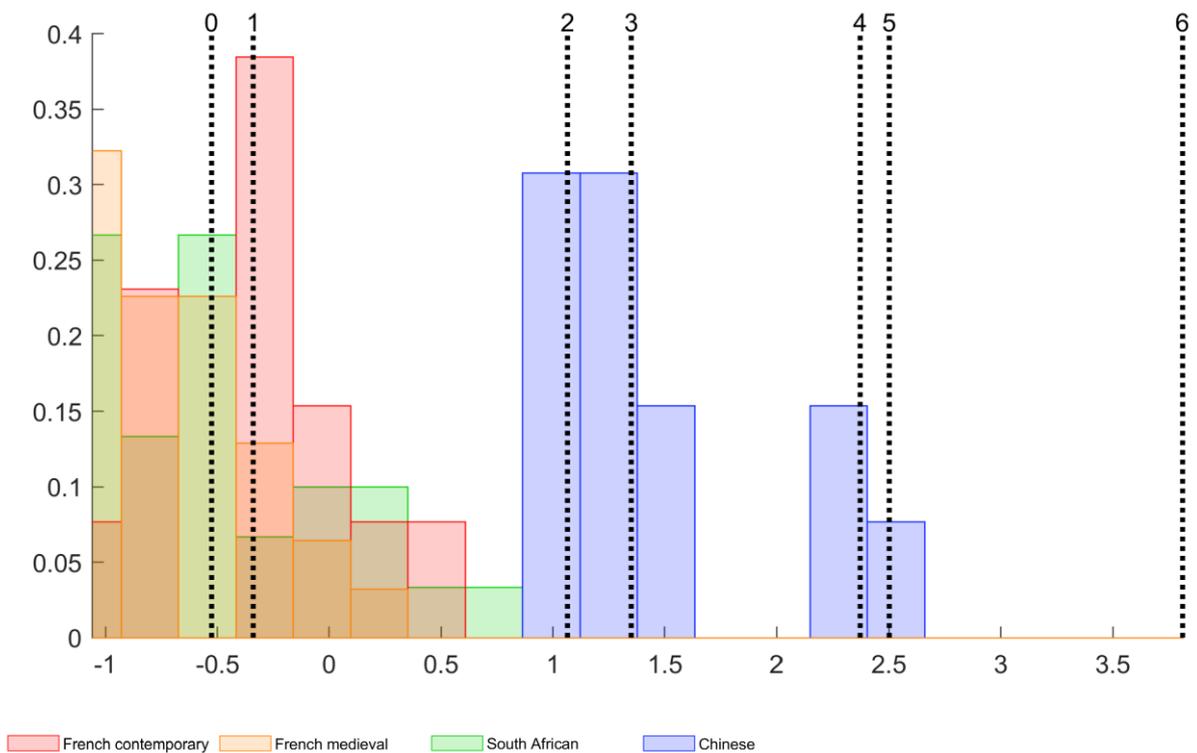


Figure 36. Histogramme illustrant la fréquence des composantes principales Procruste PC1 pour les 87 spécimens humains modernes et la distribution des grades de référence ASUDAS (lignes verticales noires).

La figure 36 montre la répartition des composantes principales Procruste (PC1) des 87 UI1 par rapport à la distribution des 7UI1 (0 à 6) des grades ASUDAS.

L'histogramme révèle :

- une **distinction** entre les **groupes humains européen et africain** d'une part, avec un *shoveling* faiblement exprimé (0 et 1 ASUDAS), et le **groupe asiatique** avec des degrés d'expression correspondants à un *shoveling* plus marqué (2 à 5 ASUDAS).
- une **distribution non linéaire** et **non homogène** des **grades ASUDAS**. Les quatre groupes distincts formés par les grades 0-1, 2-3, 4-5 et 6 sont nettement objectivés sur l'histogramme, qui montre également que **chaque grade d'expression ASUDAS n'est pas équidistant l'un de l'autre**.

II.4.3.1.3. Reproductibilité de la méthode Procruste.

Nous avons testé la reproductibilité de cette méthode Procruste. Les résultats montrent que le positionnement des points de repère entre les 3 opérateurs est très reproductible avec un **ICC >99%**. La méthode graphique Bland-Altman, objectivant l'« accord » des observations visuelles ASUDAS et des coordonnées Procruste des courbes *semi-landmark*, a confirmé un tel niveau de corrélation (Figure 37).

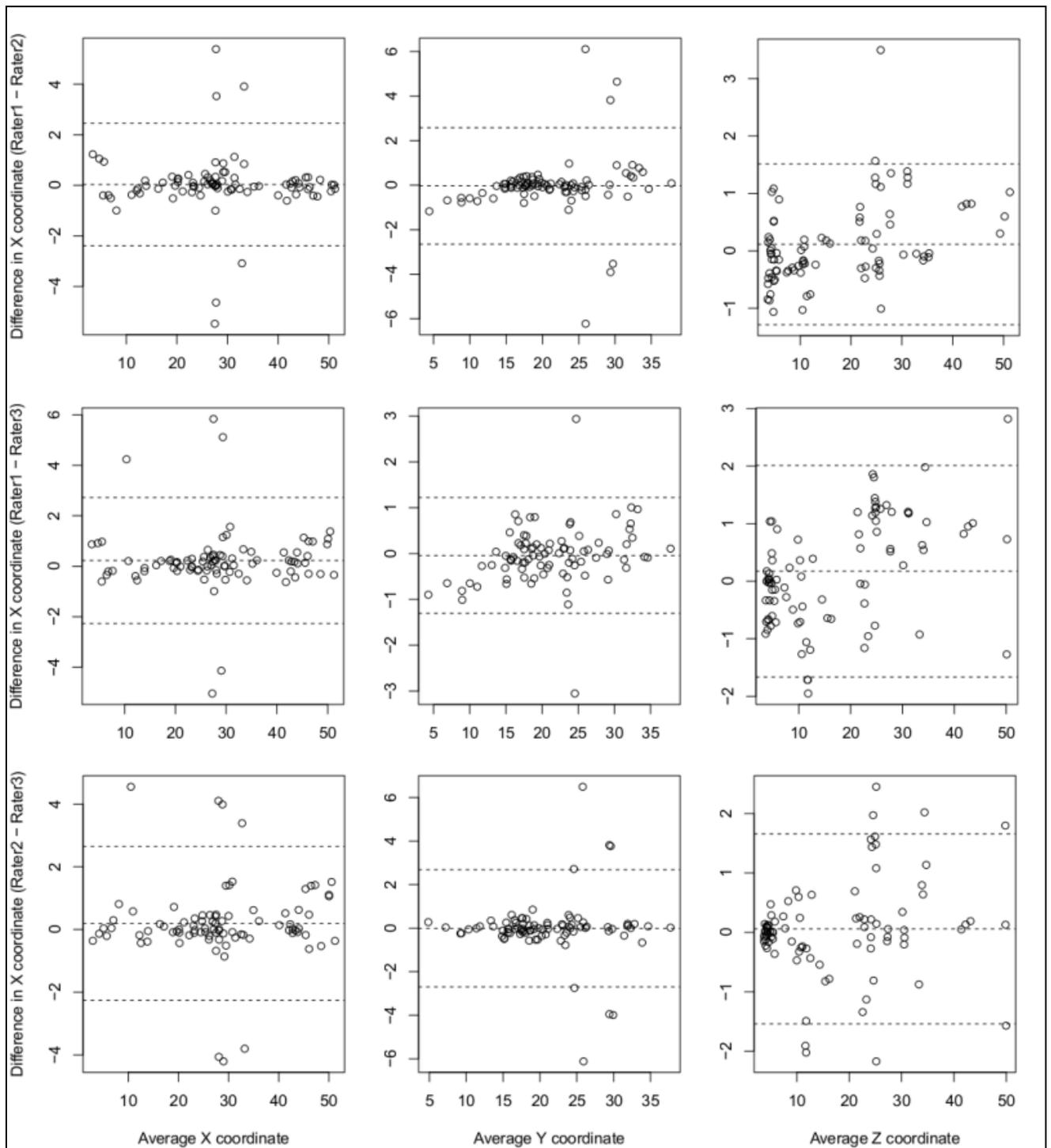


Figure 37. Visualisation Bland-Altman pour l'accord des observations visuelles ASUDAS et des coordonnées Procruste des courbes *semilandmark*. Les différents accords entre les deux évaluateurs ont été tracés pour les coordonnées X, Y et Z des points de repère. Parmi les 100 points de repère, seuls les premier, médian et dernier points de repère ont été dessinés.

II.4.3.2. Analyse non-Procruste.

Les courbes *semi-landmarks* alignées selon leurs premier et dernier points (analyse non-Procruste) illustrent deux paramètres métriques :

- la profondeur maximale de la face palatine par rapport au premier et au dernier point des courbes,
- la surface de creux caractérisant la forme de la face palatine (Figure 34b).

Les courbes des UI1 de la plaque de référence ASUDAS sont superposées suivant cette approche non-Procruste, montrant la **variation non linéaire de la forme du grade 0 au grade 6** (Figure 34b).

En considérant l'analyse non-Procruste, nous obtenons des résultats similaires à l'analyse Procruste.

II.4.3.2.1. Analyse en Composantes Principales (ACP).

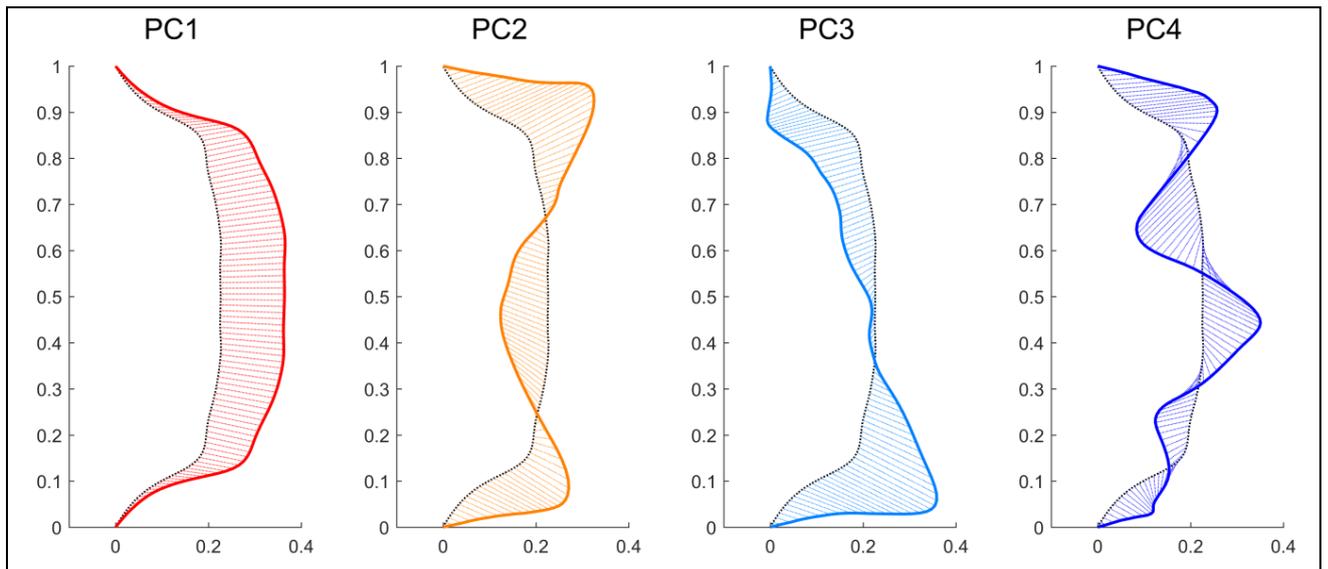


Figure 38. Analyse en composantes principales (ACP) des courbes de 100 *semi-landmarks* objectivant le *shoveling* selon la méthode non-Procruste.

Les composantes principales calculées à partir des coordonnées alignées non-Procruste ont montré des tendances similaires à celles des PCs Procruste. La PC1 explique à elle seule 92 % de la variation, tandis que la PC2 en explique 2,7 %. Les charges de PC sont représentées sous forme de changements de forme (Figure 38).

II.4.3.2.2. Histogramme de la répartition des paramètres métriques

selon la distribution des grades ASUDAS.

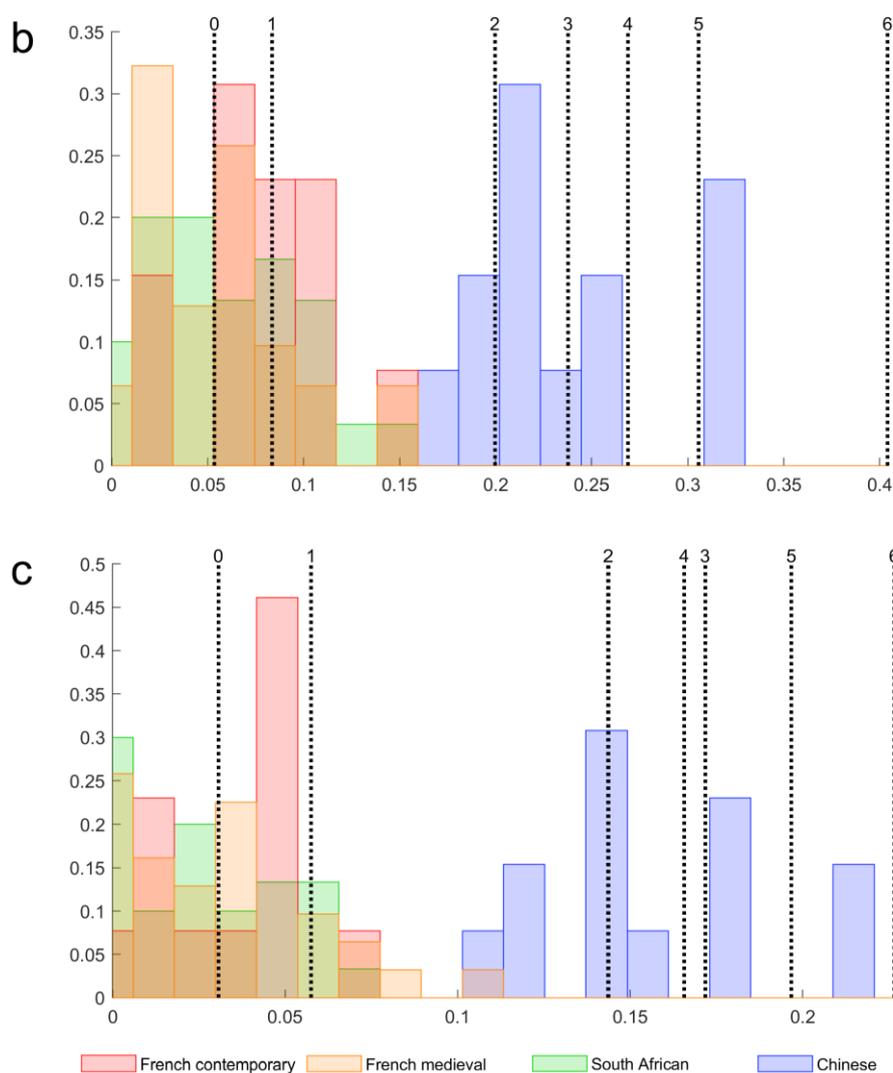


Figure 39. Histogramme illustrant les valeurs de profondeur maximale (b) et de surface de creux (c) pour les 87 spécimens humains modernes et la distribution des grades de référence ASUDAS (lignes verticales noires).

Sur la figure 39, les histogrammes montrent la distribution de la profondeur maximale (Figure 39b) et de l'aire de creux (Figure 39c) des 87 UI1 et des 7 UI1 (0 à 6) des grades ASUDAS. Cet histogramme met en évidence la **répartition non linéaire** et **non homogène** des grades de référence. Les grades 0 et 1 sont proches l'un de l'autre, tandis que les grades 2 à 5 sont regroupés et que le grade 6 est seul (répartition particulièrement marquée pour l'histogramme reflétant la profondeur maximale).

Conformément au fait que les populations de l'Asie de l'Est présentent un degré de *shoveling* plus élevé que les autres, l'histogramme des échantillons chinois pour la profondeur maximale (Figure 39b) est bien distinct des histogrammes des échantillons français et sud-africains.

L'histogramme des mesures morphométriques de la profondeur maximale permet de bien identifier les groupes humains **européen et africain avec un *shoveling* faible** du groupe humain **asiatique qui montrent des degrés de *shoveling* plus marqués**. La mesure de l'aire de creux permet également d'obtenir une séparation presque complète et présente un schéma similaire.

Il est également intéressant de noter que plusieurs échantillons de chaque population ont une valeur de profondeur maximale qui est intermédiaire entre les grades 1 et 2 ASUDAS (qui ont un grand écart entre elles, cf. Figure 39b). Cette observation suggère que :

- les observateurs pourraient avoir des difficultés à attribuer visuellement un score ASUDAS au *shoveling* de ces spécimens via la méthode classique ASUDAS,
- les scores visuels ASUDAS réduiraient la distinction entre les populations.

II.4.3.2.3. Reproductibilité de la méthode non-Procruste : comparaison PC Procruste et non-Procruste.

		Paramètres métriques directs		PC Procruste		PC non-Procruste	
		Profondeur max	Aire de creux	PC1	PC2	PC1	PC2
Paramètres métriques directs	Profondeur max	-	0.98	0.98	0.08	0.99	-0.08
	Aire de creux	0.98	-	0.96	0.20	1.00	0.06
PC Procruste	PC1	0.98	0.96	-	0.00	0.97	-0.21
	PC2	0.08	0.20	0.00	-	0.16	0.86
PC non-Procruste	PC1	0.99	1.00	0.97	0.16	-	0.00
	PC2	-0.08	0.06	-0.21	0.86	0.00	-

Table 6. Test de reproductibilité de la méthode non-Procruste. Corrélations intra-classe entre les différentes mesures obtenues à partir des coordonnées de tous les échantillons (87 échantillons humains et les 7 modèles de référence ASUDAS). La profondeur maximale et la surface de creux sont les valeurs directement mesurées selon la méthode d'alignement non-Procruste. Les composantes principales ont été obtenues à partir des méthodes Procruste et non-Procruste. Les nuances de couleur représentent le degré de corrélation, le vert foncé correspondant aux degrés les plus élevés et le blanc au degré le plus bas, le rose signifiant une corrélation négative.

Le tableau 6 présente la corrélation entre les deux paramètres métriques (profondeur maximale et aire de creux) avec les composantes principales Procruste et non-Procruste, obtenues à partir des 87 échantillons humains et des 7 dents référence ASUDAS. Il montre que les mesures de profondeur maximale et d'aire de creux ont une corrélation très élevée avec les valeurs des PCs obtenues à partir des deux analyses (**98%** et **96%** selon analyses Procruste et **99%** et **100%** pour les analyses non-Procruste).

Les composantes principales calculées à partir des coordonnées alignées non-Procruste peuvent donc être utilisées à la place des valeurs des PCs Procruste. En effet, elles présentent l'avantage d'être mesurables et interprétables directement car elles ne dépendent pas de l'ensemble des données.

II.4.3.3. Synthèse des résultats de la méthode Procruste et non-Procruste.

Les résultats montrent que :

- la répartition du *shoveling* des UI1 africaines, européennes et asiatiques obtenue avec la nouvelle méthodologie morphométrique, selon la distribution des grades ASUDAS, est confortée par la littérature (Carbonell, 1963, Mizoguchi, 1985 ; Turner, 1990 ; Scott et Turner, 1997 ; Kimura et al., 2009). Les UI1 asiatiques ont un *shoveling* plus marqué que les UI1 africaines et européennes qui ont un faible degré d'expression du *shoveling*.

- la distribution des grades ASUDAS du *shoveling* des UI1 n'est pas linéaire et n'est pas homogène. Dans la méthode ASUDAS publiée, les grades devraient être équidistants entre eux (Turner et al., 1991). Or les analyses Procruste et non-Procruste montrent une autre réalité.

- les analyses montrent une difficulté à scorer les grades intermédiaires d'un *shoveling* faiblement exprimé, via la méthode conventionnelle ASUDAS.

- l'analyse du *shoveling* via la méthode conventionnelle ASUDAS réduirait la distinction entre les populations.

L'histogramme ci-dessous illustre cette synthèse (Figure 40).

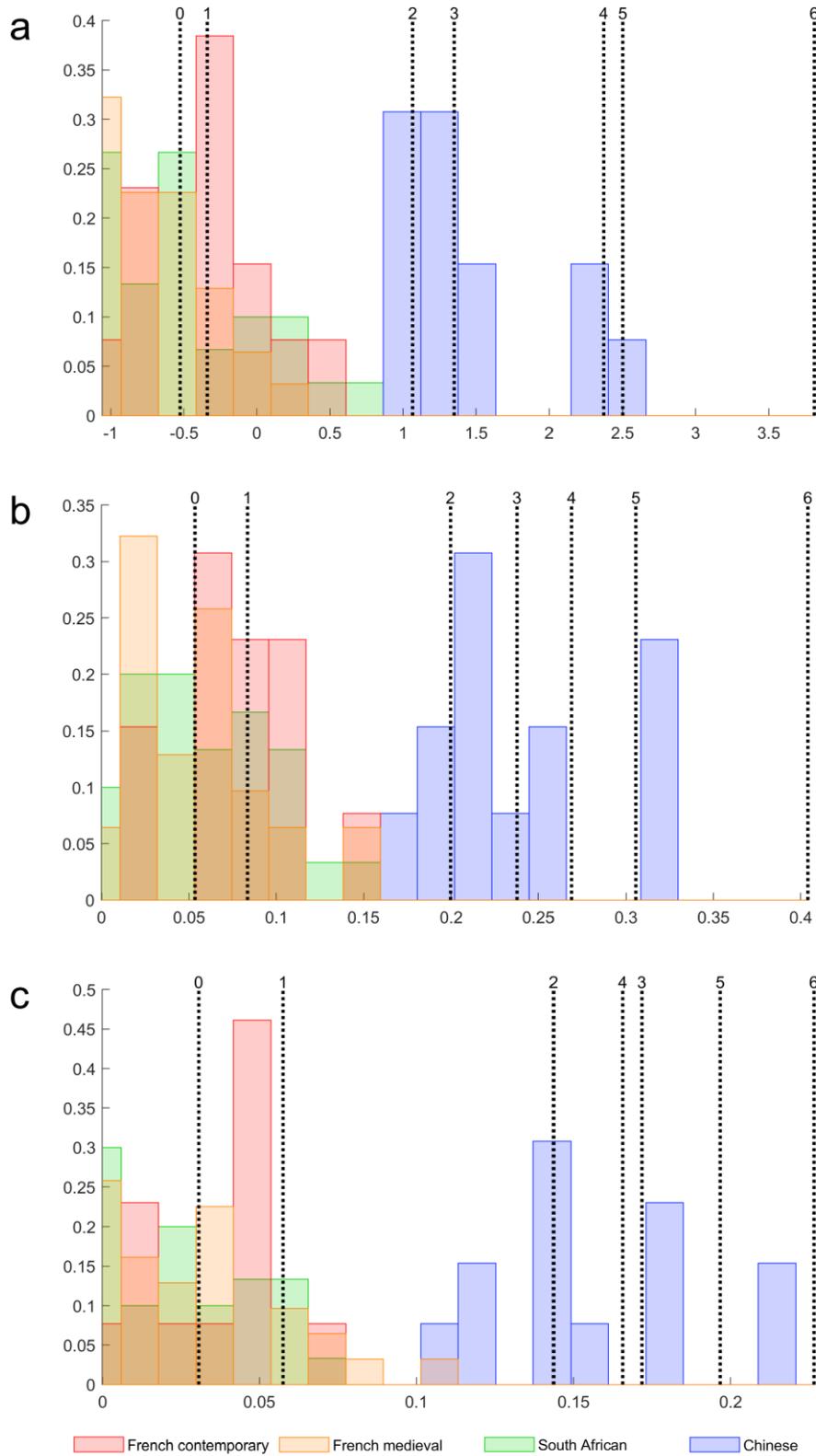


Figure 40. Histogrammes illustrant la fréquence des valeurs Procruste PC1 (a), de la profondeur maximale (b) et de la surface de creux (c) pour les 87 UII humaines modernes et la distribution des grades de référence ASUDAS (lignes verticales noires).

II.4.4. Comparaison *scoring* morphométrique / *scoring* visuel.

La plupart des variations morphologiques de la denture humaine varient sur une échelle continue. Cependant, par souci de simplicité de représentation, les systèmes d'évaluation anthropologique dentaire utilisent souvent deux catégories ou plus dans lesquelles la gamme de variation est hiérarchisée. Par exemple, la quantité de pigmentation de mélanine dans l'œil est une quantité continue, mais dans les analyses traditionnelles, elle a été divisée en bleu et brun pour représenter l'absence/présence de mélanine. Historiquement, elle a été considérée comme un trait mendélien jusqu'à ce que l'analyse quantitative moderne montre sa nature polygénique complexe. Scott et Turner (1997) ont noté, en particulier dans le cas du *shoveling* des incisives, que les caractères dentaires non métriques sont des caractères " quasi continus " (ordinaux ou dichotomiques), dérivés d'un caractère continu sous-jacent. Par exemple, alors que la profondeur de la face palatine est une quantité continue, elle peut être dichotomisée en absence/présence selon le point de rupture défini. Dans de tels cas, la variable continue sous-jacente est appelée " variable latente ", correspondant dans notre étude au paramètre métrique le plus représentatif du *shoveling*.

L'objectif est donc d'attribuer un score prédictif ASUDAS au paramètre métrique représentatif du *shoveling*.

II.4.4.1 Détermination du paramètre métrique le plus représentatif du *shoveling*.

Le tableau 7 présente les corrélations entre les valeurs qualitatives des grades ASUDAS et les paramètres métriques (profondeur maximale et aire de creux), ainsi qu'avec les composantes principales Procruste et non-Procruste, calculées à partir de la plaque référence ASU-UI1.

		ASUDAS	Paramètres métriques directs		PC Procruste		PC non-Procruste	
		Valeur grade	Profondeur max	Aire de Creux	PC1	PC 2	PC 1	PC2
ASUDAS	Valeur grade	-	0.98	0.95	0.98	0.50	0.97	-0.69
Paramètres métriques directs	Profondeur max	0.98	-	0.98	0.99	0.44	0.99	-0.65
	Aire de Creux	0.95	0.98	-	0.95	0.25	0.99	-0.49
PC Procruste	PC1	0.98	0.99	0.95	-	0.53	0.98	-0.73
	PC2	-0.50	-0.44	-0.25	0.53	-	0.35	0.96
PC non-Procruste	PC1	0.97	0.99	0.99	0.98	0.35	-	-0.57
	PC2	-0.69	-0.65	-0.49	0.73	0.96	0.57	-

Table 7. Détermination du paramètre métrique le plus représentatif du *shoveling*. Corrélations intra-classe entre les différentes mesures obtenues à partir des coordonnées des 7 modèles de référence ASUDAS. Les valeurs de la catégorie ASUDAS ont également été comparées aux paramètres métriques.

L'ICC est calculée à partir du modèle à effets aléatoires bidirectionnels avec « accord absolu » avec des évaluateurs multiples.

Les **deux paramètres métriques** (profondeur maximale et aire de creux) ainsi que les **PC1** des deux analyses sont **fortement corrélés** avec les **valeurs qualitatives ASUDAS** (98% pour la profondeur maximale et 95% pour l'aire de creux).

La **profondeur maximale** a la **corrélation la plus élevée**.

Les tableaux 6 et 7 indiquent également que les PC Procruste et non-Procruste sont très similaires l'un de l'autre (comme vu dans le paragraphe II.4.3.2.3.).

En combinant les modèles de corrélation avec l'observation selon laquelle la mesure de la profondeur maximale fournit une distinction franche entre les échantillons chinois et les autres (Figure 40b), nous considérons la **profondeur maximale** du *shoveling* comme le paramètre métrique le plus représentatif.

De plus, considérant que la profondeur maximale a une corrélation de 99% avec la PC1 non-Procruste, qui explique 92% de la variation des coordonnées du point de repère, nous pouvons dire que la mesure de la profondeur maximale capture une grande partie de la variation morphologique dans cette section de l'UI1.

La fonction qui lie les grades d'expression du *shoveling* à la profondeur maximale de la surface palatine est une fonction monotone (fonction numérique croissante de 0 à 6) mais non-linéaire.

Nous considérons donc que la **mesure de la profondeur maximale** est la variable mathématique « latente » la plus fiable pour les études comparatives du *shoveling*.

II.4.4.2. Corrélation *scoring* morphométrique prédictif / *scoring* visuel.

Les valeurs objectives prédictives (*scoring* morphométrique) sont comparées avec les valeurs attribuées visuellement par l'observateur (*scoring* visuel) via une corrélation intra-classe (ICC) pour obtenir des mesures de précision.

	Cohérence (precision)		Précision (erreur de biais)		
	VS1 T1 vs T2	VS1 vs VS2	VS1 T1 vs prédictif	VS1 T2 vs prédictif	VS2 vs prédictif
Echantillon global	0.985	0.987	0.759	0.749	0.772
Afrique du Sud	0.946	0.986	0.602	0.565	0.602
Fr contemporaines	0.900	0.721	0.496	0.570	0.494
Fr médiévales	0.971	0.993	0.550	0.592	0.559
Chine	0.976	0.975	0.000	0.000	0.000

Table 8. Corrélation *scoring* morphométrique prédictif / *scoring* visuel. Les valeurs de corrélation intra-classe (ICC) pour les mesures de cohérence et de précision intra-observateurs (VS1 T1 vs. T2) et inter-observateurs (VS1 vs. VS2) (comparaison des 3 scores visuels avec leurs valeurs prédictives à partir des dents de la plaque de référence ASUDAS). Les nuances de couleur représentent le degré de cohérence et de précision, le vert foncé correspondant aux degrés les plus élevés et le blanc au degré le plus bas.

La corrélation entre les valeurs du *scoring* visuel basée sur la méthode ASUDAS et les valeurs prédictives du *scoring* morphométrique du *shoveling* est faible (76 % en moyenne) (Table 8).

Ce constat est particulièrement vrai pour l'échantillon chinois, qui présente un *shoveling* marqué.

Cette analyse révèle que l'évaluation visuelle du *shoveling* tend à être plus sujette aux biais intra- et inter-observateurs pour les scores les plus élevés (à partir du grade 2).

II.4.4.3. Corrélation *scoring* morphométrique prédictif / *scoring* visuel par une fonction d'interpolation *spline* construite à partir de la plaque de référence ASUDAS.

Nous avons évalué la corrélation entre les valeurs des évaluations visuelles effectuées par deux observateurs (VS1 et VS2) et les valeurs prédictives du *scoring* morphométrique des UII humaines modernes, en utilisant la fonction d'interpolation *spline* construite à partir de la plaque de référence ASUDAS (Figure 41). Cette fonction est donc exempte de subjectivité provenant d'autres évaluateurs humains. Le modèle *spline* compare les mesures de profondeur maximale des échantillons par rapport aux catégories ASUDAS. L'utilisation de cette fonction de prédiction fournit une estimation objective du grade ASUDAS pour le nouvel échantillon. Ce *scoring* morphométrique estimé peut ensuite être comparé au *scoring* visuel ASUDAS obtenu par un observateur humain.

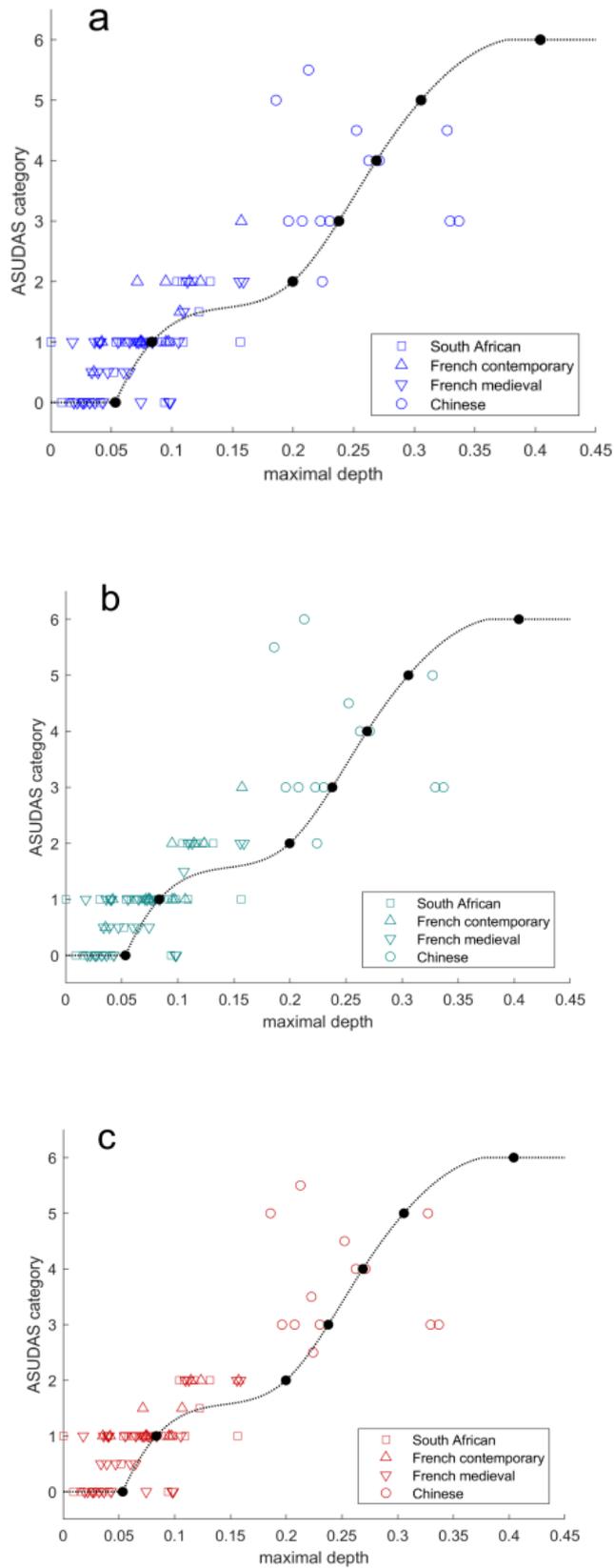


Figure 41. Tracés de la profondeur maximale par rapport à la notation visuelle ASUDAS des tests du premier observateur (VS1 T1 : a ; VS1 T2 : b) et du second observateur (VS2 : c). Les points noirs correspondent aux valeurs de la plaque de référence ASUDAS et sont reliés entre eux par interpolation *spline*. Les symboles représentent l'origine chrono-géographique comme indiquée dans la légende des graphiques.

De manière analogue aux résultats des tests intra- et inter-observateurs par ICC (Tableau 8), les **spécimens évalués par les observateurs comme exprimant de faibles degrés de shoveling (grades 0-1) se dispersent moins autour des valeurs des grades de référence que ceux enregistrés comme ayant un *shoveling* marqué** (Figure 41). Ceci corrobore notre observation, selon laquelle les populations ayant une expression plus marquée du *shoveling* sont plus difficiles à séparer sur l'échelle ordinale ASUDAS qu'au moyen de la mesure quantitative de la profondeur maximale.

Néanmoins, aucun spécimen chinois n'a été classé visuellement en dessous du grade 2, et très peu de spécimens européens et africains ont été enregistrés comme étant de grade 2 ou plus, ce qui indique que, malgré la variabilité subjective, les échantillons peuvent généralement être dichotomisés par l'oeil humain en *shoveling* présent/absent avec une précision acceptable.

II.4.4.4. Synthèse des résultats de la comparaison *scoring* morphométrique / *scoring* visuel.

Les résultats montrent que :

- l'évaluation visuelle du *shoveling* tend à être plus sujette aux biais intra- et inter-observateurs pour les scores les plus élevés (à partir du grade 2).

- les populations sont plus difficiles à distinguer sur l'échelle ordinale ASUDAS que via la mesure quantitative de la profondeur maximale. Notre protocole intègre en effet l'analyse de deux aspects différents mais complémentaires : la profondeur de la surface palatine par rapport aux crêtes marginales et la forme de la face palatine.

II.4.5. La profondeur maximale : biais inconscient de la méthode ASUDAS ?

II.4.5.1 Comparaison du *scoring* visuel et des mesures morphométriques.

En comparant la corrélation entre les évaluations visuelles et certaines mesures obtenues objectivement (par exemple, les valeurs ASUDAS prédictives, la profondeur maximale, la surface de creux), nous avons constaté que la profondeur maximale et les mesures d'aires de creux sont fortement corrélées avec le *scoring* visuel.

	VS1 T1	VS1 T2	VS2
Valeurs prédictives			
ASUDAS	0.776	0.769	0.788
PC1	0.836	0.831	0.850
PC2	0.153	0.169	0.177
PC3	-0.106	-0.097	-0.082
PC4	0.055	0.028	0.056
Profondeur maximale	0.840	0.833	0.852
Surface de creux	0.832	0.828	0.848

Table 9. Corrélation des catégories ASUDAS attribuées par les observateurs avec la valeur ASUDAS prédictive, les quatre premières PCs de l'analyse Procruste, la profondeur palatine maximale et la surface de creux. Les nuances de couleur représentent le degré de corrélation, le vert foncé correspondant aux degrés les plus élevés et le blanc au degré le plus bas, le rouge signifiant une corrélation négative.

On note une corrélation de 84.2% en moyenne pour la profondeur maximale et de 83.6 % en moyenne pour la surface de creux. Ces corrélations sont plus élevées qu'avec la mesure du *scoring* prédictif morphométrique (77.7% en moyenne) (Tableau 9).

Cela suggère que la profondeur maximale pourrait être un aspect inconscient majeur lors de l'enregistrement du *shoveling* selon la méthode classique ASUDAS.

II.4.5.2. Fiabilité de cette hypothèse.

II.4.5.2.1. Variation du protocole ASUDAS.

Afin de vérifier si les observateurs sont plus influencés visuellement par la profondeur de la face palatine que par la morphologie des crêtes marginales telle que décrite dans la méthode ASUDAS, nous avons dichotomisé les 7 grades de l'échelle standard ASUDAS du *shoveling* en deux grands groupes (grades ≤ 1 vs. grades ≥ 2) (Irish, 1993 ; Scott et Irish, 2017 ; Scott et al., 2018). Une corrélation par ICC est effectuée (Tableau 10).

	Cohérence (précision)		Précision (sans biais)		
	VS1 T1 vs T2	VS1 vs VS2	VS1 T1 vs prédictive	VS1 T2 vs prédictive	VS2 vs prédictive
Echantillon global	0.945	0.964	0.812	0.827	0.842

Table 10. Variation du protocole ASUDAS : valeurs ICC pour les mesures de cohérence et de précision intra-observateur (VS1 T1 vs. T2) et inter-observateurs (VS1 vs. VS2) (comparaison des 3 scores visuels avec leurs valeurs prédictives à partir des dents de la plaque de référence ASUDAS) lorsque les grades 0-1 et 2-6 sont fusionnés en deux groupes (division en deux catégories). Les nuances de couleur représentent le degré de consistance et de précision, le vert foncé correspondant aux degrés les plus élevés et le blanc au degré le plus bas.

Le regroupement en 2 catégories (0-1) et (2-6) permet la distinction entre la population chinoise et le reste des populations (française et sud-africaine) en séparant les degrés de *shoveling* absent/faible et de *shoveling* marqué.

Les nouvelles valeurs ICC montrent un degré élevé de cohérence entre les observateurs (95.4% en moyenne) et de précision entre le *scoring* visuel et prédictif morphométrique (82.7% en moyenne) (Tableau 10). Ce résultat suggère que **le *scoring* visuel effectué par les observateurs réussit largement à distinguer les faibles degrés de *shoveling* par rapport au *shoveling* marqué.**

En revanche, cela conforte le fait que le *scoring* visuel ne réussit pas à détecter une différence plus fine au sein d'un même grade ASUDAS. Il est à noter que la dichotomie en 2 catégories présence/absence aide à réduire le pourcentage d'erreur du *scoring* visuel.

II.4.5.2.2. Variation de l'échantillon.

La nature dépendante des données des Composantes Principales signifie que les PCs dépendent de la composition de l'échantillon entier. Nous avons examiné comment les PCs se comporteraient si l'ensemble de données n'était constitué que d'échantillons européens (qui ne couvrent qu'une gamme étroite de la variabilité des caractères -*shoveling* absent à faible-).

Pour évaluer cela, nous avons effectué les étapes d'alignement et de calcul des PCs pour les méthodes Procruste et non-Procruste tout en limitant l'ensemble de données aux seuls échantillons français (contemporains et médiévaux), et nous avons obtenu leur corrélation avec les paramètres métriques mesurés.

	Profondeur maximale	Aire de creux	PC1 Procruste (Fr uniquement)	PC1 non-Procruste (Fr uniquement)
Profondeur maximale	-	0.96	0.93	0.97
Aire de creux	0.96	-	0.85	1.00
PC1 Procruste (Fr uniquement)	0.93	0.85	-	0.89
PC1 non-Procruste (Fr uniquement)	0.97	1.00	0.89	-

Table 11. Variation de l'échantillon : corrélations intra-classe entre les différentes mesures obtenues à partir des coordonnées des seuls échantillons français (contemporains et médiévaux). La profondeur maximale et la surface de creux sont les mesures directement réalisées selon la méthode d'alignement non-Procruste. Les composantes principales ont été obtenues à partir des méthodes Procruste et non-Procruste. Seule PC1 est présentée ici par souci de simplicité. Les nuances de couleur représentent le degré de corrélation, le vert foncé correspondant aux degrés les plus élevés et le blanc au degré le plus bas.

Le tableau 11 présente les valeurs de corrélation. La **corrélation de PC1 des deux analyses avec la profondeur maximale diminue un peu par rapport à la corrélation initiale dans l'échantillon global** (93% contre 98% pour PC1 Procruste et 97% contre 99% pour PC1 non Procruste (cf. Tableau 6)).

Ce résultat indique que les PCs calculées dans cet ensemble de données réduites avec une plage de variabilité plus étroite pourraient avoir un « bruit accru » et être légèrement moins en mesure de représenter le paramètre métrique sous-jacent. Ceci est particulièrement vrai pour la PC Procruste. Pour vérifier ce résultat, nous comparons la corrélation entre les *scoring* visuels attribués par les observateurs et certaines mesures obtenues objectivement (par exemple, la profondeur maximale, la surface de creux, les PC1 Procruste et non-Procruste) des échantillons français (Table 12).

	VS1 T1	VS1 T2	VS2
Profondeur maximale	0.73	0.76	0.71
Aire de creux	0.62	0.69	0.63
PC1 Procruste (Fr uniquement)	0.71	0.72	0.65
PC1 non-Procruste (Fr uniquement)	0.65	0.71	0.65

Table 12. Corrélations des *scoring* visuels attribués par les observateurs avec diverses mesures obtenues à partir des coordonnées de tous les échantillons français.

Nous constatons que la **profondeur maximale et les mesures d'aires de creux sont largement moins corrélées avec le *scoring* visuel, que dans le cadre de l'échantillon global** (Tableau 12).

Par rapport aux résultats du tableau 9, on note une corrélation de 73.3 % en moyenne pour la profondeur maximale (contre 84.2% en moyenne pour l'échantillon global) et de 64.6% en moyenne pour la surface de creux (contre 83.6 % en moyenne pour l'échantillon global).

II.4.5.3. Synthèse des résultats sur le rôle « inconscient » de la profondeur maximale dans la notation visuelle du *shoveling*.

Les résultats montrent que :

-la profondeur maximale est un aspect majeur inconscient lors de l'enregistrement du *shoveling* par la méthode conventionnelle ASUDAS. Or, dans la description de la méthode, l'observateur doit être attentif aux variations morphologiques des crêtes marginales (Turner et al, 1991).

-le *scoring* visuel réussit à distinguer aisément les faibles degrés de *shoveling* des grades plus marqués.

-la dichotomie en 2 catégories présence/absence aide à réduire le pourcentage d'erreur du *scoring* visuel.

-notre protocole permet de distinguer de faibles différences morphologiques du *shoveling*, contrairement au *scoring* visuel. Notre protocole intègre en effet, l'analyse de deux aspects différents mais complémentaires : la profondeur maximale de la surface palatine par rapport aux crêtes marginales et la forme de la face palatine.

II.4.6. Synthèse des résultats.

-Les résultats de la répartition du *shoveling* en fonction des populations selon notre nouvelle méthode morphométrique sont en étroite corrélation avec la répartition du *shoveling* largement décrite dans la littérature.

-Les résultats montrent que le *scoring* visuel via la méthode ASUDAS réussit à distinguer aisément les faibles degrés de *shoveling* des grades plus marqués, conformément à la littérature.

-Les résultats de la distribution des grades ASUDAS sur la plaque de référence ASU-UII montrent une non-linéarité et une non-homogénéité de distribution des grades pour le *shoveling*, contrairement à ce qui est décrit dans la méthode publiée.

-Les résultats montrent que l'évaluation visuelle du *shoveling* tend à être plus sujette aux biais intra- et inter-observateurs pour les scores les plus élevés (à partir du grade 2)

-Les résultats montrent que les populations sont plus difficiles à distinguer sur l'échelle ordinale ASUDAS que via notre protocole morphométrique. Notre protocole intègre en effet, l'analyse de deux aspects différents mais complémentaires : la profondeur maximale de la surface palatine par rapport aux crêtes marginales et la forme de la face palatine, ce qui permet d'affiner les distinctions entre 2 grades très proches.

-Les résultats montrent que la profondeur maximale est un aspect majeur inconscient lors de l'enregistrement du *shoveling* par la méthode conventionnelle ASUDAS, contrairement au protocole d'observation décrit dans la méthode publiée.

II.5. Discussion, Synthèse et Perspectives.

Le *shoveling* est considéré comme un caractère clef de la morphologie dentaire. Il représente un des rares traits dentaires non-métriques pouvant être mesuré à la fois avec une échelle ordinale (méthode ASUDAS) et avec une échelle métrique (mesure de la profondeur maximale). La difficulté à définir le *shoveling* entraîne cependant des polémiques quant à son analyse.

Depuis les années 1970, la technique *gold standard* d'étude du *shoveling* est la méthode ordinale ASUDAS. Dans la littérature, les erreurs dues au rôle de l'observateur dans la notation visuelle des caractères non métriques dentaires à l'aide de la méthode ASUDAS sont généralement considérées comme étant faibles et/ou négligeables (Scott et Turner, 1997 ; Hillson, 2005 ; Bailey et Hublin, 2013). Basé sur des décennies de résultats - en partie parce qu'une fois que les scores sont attribués, ils sont dichotomisés en présence/absence pour aider à réduire l'erreur de l'observateur et en raison des statistiques de distance biologique dichotomique actuellement disponibles (p. ex, MMD) -, la méthode ASUDAS classique s'est avérée plutôt efficace pour évaluer les relations biologiques entre les humains modernes (Scott et Turner, 1997 ; Scott et al., 2018), les primates non humains vivants (Pilbrow, 2003) et les hominins fossiles (Mizoguchi, 1985 ; Bailey et Wood, 2007 ; Martinon-Torres et al., 2007 ; Bailey et Hublin, 2013 ; Irish et al. 2013).

La plupart des méthodes métriques ont essayé de quantifier le *shoveling* en se référant à la profondeur maximale de la fosse linguale par rapport aux grades ASUDAS (Hanihara, 2008). Cependant, ces méthodes ne tiennent compte que de la profondeur maximale au centre de la fosse palatine sans tenir compte de la forme de cette fosse. Or, le *shoveling* peut avoir des expressions plus fines, au-delà de la portée de l'échelle millimétrique, car il varie autant en forme qu'en taille (Scott et Turner, 1997). Dans ce contexte, nous avons tenté d'améliorer l'analyse du *shoveling* en développant une méthode innovante et complémentaire de la méthode ordinale ASUDAS.

Le développement récent de méthodes rapides et efficaces pour acquérir des modèles 3D d'un objet (pour exemples, photogrammétrie, scanner laser), ainsi que l'avènement de puissantes techniques quantitatives pour évaluer la variation de forme (morphométrie géométrique), ont ouvert de nouvelles voies pour tester la fiabilité de la méthode ASUDAS (Hemphill, 2016). Toutes ces avancées permettent de fournir des protocoles objectifs pour étudier les variations des caractéristiques dentaires non-métriques.

Dans cette étude, nous avons comparé l'évaluation visuelle classique (ASUDAS) du *shoveling* avec une nouvelle approche morphométrique géométrique 3D. Nous proposons une méthode quantitative, simple et rapide pour caractériser le *shoveling* d'UI1 humaine moderne en utilisant une échelle numérique continue et ouverte de sa variation morphologique.

Nos résultats ont montré que l'erreur intra et inter-observateur liée à la notation visuelle est très faible dans notre étude, conformément à la littérature (Nichol et Turner, 1986 ; Scott et Turner, 1997 ; Scott, 2008 ; Scott et Irish, 2017). Nos résultats concordent également avec le point de rupture ASUDAS actuellement reconnu entre l'absence (grades 0-1) et la présence (grades 2-7) de *shoveling* (Scott et Irish, 2017 ; Scott et al., 2018).

Ceci étant, nos résultats ont mis en évidence une certaine limitation de l'utilisation de la plaque ASU-UI1, indiquant qu'il ne s'agissait pas nécessairement d'un gradient objectif d'expression du *shoveling* (Figures 35, 40 et 41). Si la méthode ASUDAS s'avère efficace pour distinguer les *scoring* inférieurs et supérieurs au point de rupture +2, elle est susceptible d'être discutée lorsqu'il s'agit du *scoring* de traits au degré d'expression proche. Il est vrai que les variables dichotomisées semblent plus attrayantes puisqu'elles simplifient les données tout en conservant la dichotomie principale qui est considérée comme le point crucial de la variable (ici le grade +2 marquant la présence du *shoveling*) (Altman, 2006). Pourtant, un tel rejet délibéré de données pose plusieurs problèmes : perte de puissance des protocoles, risque accru de faux positifs, sous-estimation de la variation au sein des groupes ou entre eux, perte d'informations sur la relation entre le caractère et d'autres variables, et confusion accrue avec d'autres variables dans l'analyse de régression, comme pour les analyses d'association génétique.

Une question importante sur les caractères dentaires discrets concerne les facteurs génétiques responsables de leur expression. Scott et Turner ont utilisé l'exemple du *shoveling* pour objectiver que les caractères dentaires non-métriques peuvent provenir d'un caractère continu sous-jacent qui est probablement polygénique (Scott et Turner, 1997). La dichotomie des caractères entraîne la perte d'une grande partie des informations concernant leur variation. A titre d'exemple, tous les Amérindiens peuvent être considérés comme pourvus du *shoveling*. Or, le fait que le *shoveling* soit présent chez tous les individus lui fait perdre son statut de variante continue non-métrique. Une telle perte de données, soit lors de l'élaboration d'un trait " quasi continu " (échelle ordinale) à partir d'un trait sous-jacent continu, soit lors de la dichotomisation d'un trait dentaire, limite les possibilités d'analyses plus avancées.

Cette perte de données sur la variation d'un caractère conduit à une perte de puissance dans les analyses d'association génétique, où l'utilisation d'un caractère continu peut

entraîner une "*puissance significativement plus élevée*", surtout avec des échantillons de petite taille (Bhandari et al., 2002).

Dans leur revue de littérature, Scott et al. confirment que de telles simplifications peuvent créer plusieurs problèmes pour les analyses génétiques (Scott et al., 2018). Par exemple, les caractères simplifiés peuvent "*parfois imiter les schémas de ségrégation de l'héritage mendélien simple alors qu'en réalité, l'héritage est complexe* « (Scott et al., 2018 :133). Même dans le contexte de l'évaluation de la fiabilité, la précision plus élevée offerte par les données continues fournit de bien meilleures estimations (Donner et Eliasziw, 1994).

MacCallum et ses collaborateurs font état de critiques similaires et soulignent les problèmes survenant lors des analyses statistiques (Mac Callum et al., 2002). L'utilisation d'une variable dichotomique signifie que de nombreuses procédures statistiques ne sont pas applicables. Par exemple, dans une étude d'association génétique, le modèle de régression linéaire standard, qui permet d'estimer l'ampleur de l'effet en unités absolues, ne peut pas être utilisé. Les variables dichotomiques ne peuvent être utilisées qu'avec la régression logistique, ce qui rend beaucoup plus difficile l'interprétation de l'effet d'un marqueur génétique ou la combinaison de données probantes provenant d'études multiples.

Dans ce contexte, notre nouvelle méthode permet d'établir un nouveau référentiel ASUDA pour le *shoveling*, plus objectif, en considérant une échelle continue et ouverte (ne se limitant pas aux 7 grades) qui intègre l'analyse de deux aspects différents mais complémentaires : la profondeur de la surface palatine par rapport aux crêtes marginales et la forme de la face palatine. Il s'agit là, d'un point important, car nos analyses ont révélé que l'évaluation visuelle du *shoveling* tend à être plus sujette aux biais intra- et inter-observateurs pour les scores les plus élevés (à partir du grade +2). Or, la principale caractéristique de l'échelle ASUDAS pour le *shoveling* est l'expression progressivement croissante des crêtes marginales (Scott et Turner, 1997 ; Scott et Irish 2017). Nos résultats ont montré que, même s'ils sont formés et s'ils suivent la définition ASU du caractère du *shoveling* des UII (cf. Tableau 2), les observateurs ont tendance à créer, lorsqu'il s'agit d'étudier de nombreux spécimens, une image mentale des catégories ASUDAS et à porter leurs jugements. Cette échelle mentale dépendrait de la profondeur maximale de la face palatine, alors que les grades ASUDAS ne sont pas distribués linéairement pour ce paramètre.

En résumé, selon nos résultats, les scores attribués visuellement finissent par être corrélés plutôt avec la profondeur maximale qu'avec l'expression des crêtes marginales, telle que décrite dans les catégories ASUDAS.

Le paramètre de la profondeur maximale donne une mesure du développement des crêtes mésiale et distale et constitue une métrique appropriée pour évaluer quantitativement l'expression du *shoveling*.

Dans ce contexte, même si la méthode ordinaire ASUDAS et notre méthode morphométrique sont notoirement différentes, nous considérons, au vu des résultats de nos travaux, que l'approche morphométrique peut compléter et améliorer le système ASU lorsque la distinction visuelle entre les grades est difficile à objectiver par un œil humain, dans le cadre de l'étude du *shoveling*.

Les résultats de l'application de notre méthode morphométrique a montré que notre méthode est reproductible et qu'elle permet de distinguer les groupes français et sud-africains (exprimant un faible degré de *shoveling*) et l'échantillon chinois (plus variable mais montrant des incisives en « forme de pelle » bien marquées). Ces résultats sont en accord avec la nombreuse littérature sur le sujet (Scott et Turner, 1997 ; Irish et Scott, 2016 ; Scott et Irish, 2017 ; Scott et al., 2018) et démontrent que notre méthode, tout en confirmant les résultats de l'ASUDAS, s'ouvre vers une évaluation quantitative du *shoveling* pour la distinction entre les populations fossiles et les populations humaines existantes.

En effet, ce modeste échantillon n'est utilisé ici que pour tester la méthode, mais en l'augmentant, en incorporant de plus grands groupes chrono-géographiques, y compris les hominés fossiles, il y a un fort potentiel pour mieux comprendre l'évolution des incisives en « forme de pelle ».

Pour exemple, les incisives en « forme de pelle » sont une caractéristique des Néandertaliens. Compte tenu de la disponibilité croissante de données virtuelles 3D pour leurs dents, de la paléogénétique et des données moléculaires sur la morphologie dentaire (Zanolli et al., 2017), cette nouvelle méthode quantitative est parfaitement adaptée à l'étude de l'évolution du *shoveling* des UI1 (Figure 42).

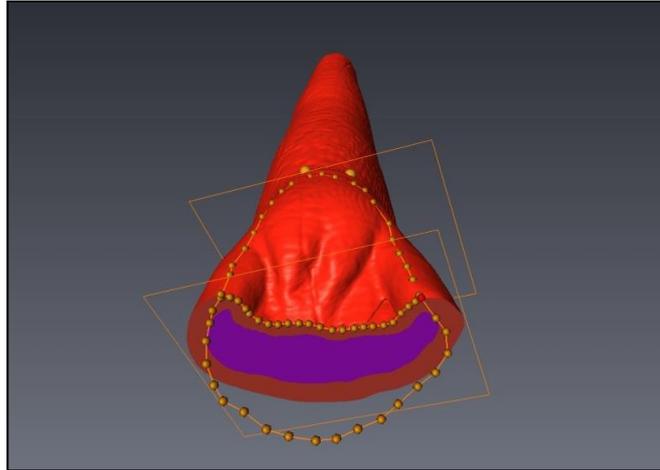


Figure 42. Application de la méthode morphométrique sur une dent d'origine néandertalienne -D126 Krapina- (Source : laboratoire AMIS Zanolli C., 2017) (opérateur : Carayon D., 2017).

On note un tubercule lingual et un *shoveling* marqué, conformément à la littérature (Bayley, 2006).

Si notre méthode peut s'avérer compléter la méthode ASUDAS voire être une alternative, elle ne répond pas au problème de l'usure dentaire. Une des limites du système ASU concerne la lecture de l'expression du *shoveling* sur une dent usée ou délabrée. Or, cette limite concerne aussi notre nouvelle méthode, car il est impossible d'évaluer le plan médian de la couronne sur une surface coronaire usée. Somme toute, grâce aux techniques de morphométrie géométrique, nous pouvons imaginer, par superposition d'une image d'UI1 usée sur une image d'UI1 non délabrée, pouvoir objectiver la zone manquante via des points de repères virtuels (Figure 43).



Figure 43. Superposition de 2 UI1 permettant de délimiter la ligne de plus grand contour palatine sur une dent usée (au-delà du stade 2 de Smith) (en gris : UI1 D126 Krapina avec une usure inférieure au stade 2 de Smith (Source : laboratoire AMIS Zanolli C., 2017), en rouge UI1 D123 Krapina avec une usure supérieure au stade 2 de Smith (Source laboratoire AMIS Zanolli C.,2017) (opérateur : Carayon D., 2017).

Par ailleurs, il existe d'autres perspectives d'analyse quantitative de la variation de forme du *shoveling*, avec ou sans repères. Par exemple, une technique basée sur les déformations de surface, considérant une partie 3D de la surface de la couronne (comme la surface palatine dans le cas du *shoveling* des UI1), pourrait être utilisée pour évaluer le degré de déformation d'une dent à l'autre et quantifier les variations de forme de l'ensemble des traits dentaires (Durrleman et al., 2012 ; Durrleman et al., 2014).

Ainsi, même si l'ASUDAS est un outil fiable et efficace, il est encore possible de l'améliorer et de le compléter par d'autres méthodes.

III.
APPORT DU SCANNER INTRA-ORAL *CONDOR*®
(LABORATOIRE AABAM®) DANS L'ANALYSE
MORPHOMETRIQUE DU *SHOVELING*.

Notre nouvelle approche morphométrique du *shoveling* a été validée sur des surfaces numérisées par microtomographie aux rayons X (micro-CT). Le micro-CT est l'outil de référence dans les études anthropologiques, en raison de sa capacité à analyser les structures internes et externes (Macchiarelli et al., 2013 ; Braga, 2016) (cf. § II.2.2.1 et Annexe 6).

Même si la littérature décrit l'utilisation du micro-CT dans l'étude des caractères discrets dentaires (Skinner et al., 2008), une analyse de surface, telle que l'analyse morphométrique du *shoveling*, ne requiert pas forcément la précision d'une telle technique d'imagerie difficilement accessible et très coûteuse.

De plus en plus utilisée en dentisterie pour générer des modèles dentaires virtuels pouvant être manipulés pour simuler la mise en place de dents prothétiques et ensuite produire un élément prothétique final, l'imagerie 3D non invasive sans rayonnements ionisants présente de nombreux avantages dans l'étude des caractères discrets dentaires.

Facile à utiliser (après apprentissage), rapide et relativement peu coûteuse par rapport aux techniques d'imagerie ionisantes, elle offre un grand potentiel pour capturer, mesurer et comparer des surfaces dans de grands échantillons pour l'étude anthropologique dentaire (Braga, 2016).

Suite au constat de départ que les supports d'observation conventionnels peuvent entraîner des pertes d'informations dans le temps et des problèmes de non-ergonomie, nous essaierons de répondre à la 4^{ème} hypothèse de départ (cf. § I.4.5.) en montrant que l'utilisation d'un scanner intra-oral permettrait d'obtenir des informations numériques précises et pérennes dans le temps.

III.1. Rappels généraux d'imagerie 3D non invasive sans rayonnements ionisants.

Le concept d'empreinte optique, déjà utilisé dans l'industrie aérospatiale, a été introduit en dentisterie par François Duret, qui a, ingénieusement, posé les bases de la CFAO dentaire dans sa thèse "*L'empreinte optique*" (Duret, 1973).

La Conception et Fabrication Assistée par Ordinateur (CFAO) désigne l'ensemble des équipements utilisés dans la chaîne prothétique, de la modélisation à la fabrication des prothèses dentaires, comprenant les équipements de numérisation 3D (scanners) et les équipements de fabrication à commande numérique (Davidowitz et al., 2011).

La Conception Assistée par Ordinateur (CAO) correspond au recueil des données de l’empreinte, à leur numérisation, puis à la modélisation de l’empreinte grâce à un logiciel informatique. La Fabrication Assistée par Ordinateur (FAO) correspond à la transmission des données de la CAO à un logiciel qui commande une « machine-outil » (flux numérique), afin d’usiner un élément prothétique (Duret, 1973 ; Duret et Pelissier, 2010 ; Duret et al., 2010 ; Descamps, 2012).

On distingue 2 types de scanners optiques (Bajard, 2012 ; Logozzo, 2014) :

-*les scanners passifs* : aucune source de lumière ne participe directement à l’extraction d’informations tridimensionnelles. Une mesure passive est réalisée par un ou plusieurs capteurs. Ils utilisent uniquement la lumière ambiante pour éclairer les structures dentaires et sont dépendants de leurs textures (Chambon, 2005 ; Seitz et al., 2006).

- *les scanners actifs* sont composés d’un ou plusieurs capteurs et d’une source de lumière. La forme de la projection peut être un point, une ligne ou bien un motif 2D (Chen et al., 2000 ; Blais, 2004).

Les principes de fonctionnement des scanners optiques extra et intra-oraux sont rappelés dans l’annexe 7. En amont de notre étude, nous avons testé deux scanners extra-oraux (cf. Annexe 8) et deux scanners intra-oraux (cf. Annexe 9).

Les scanners intra-oraux (IOS) sont des outils médicaux, utilisés en CAO/FAO, avec une caméra portative et un logiciel associé, pour enregistrer la géométrie 3D d’une structure. La dernière décennie a vu croître le nombre d’IOS optiques, basés sur différentes technologies (Duret, 1973, 2003 ; Duret et Pelissier, 2010 ; Zimmermann et al., 2015 ; Richert et al., 2017).

On note deux types d’acquisition des images : à la volée (image continue à la manière d’un film) et en mode capture (image unique à la manière d’une photo).

Il existe différents principes de fonctionnement qui vont permettre à la caméra d’évaluer le relief : principe de la triangulation, principe de la focalisation/défocalisation, principe de la lumière structurée, principe de la stéréophotogrammétrie (cf. Annexe 7).

Quel que soit le système d’acquisition, lors de la numérisation avec un scanner optique portatif, plusieurs images sont prises toutes les secondes. Chaque image est indexée sur les images précédentes. L’image 3D est la résultante de nombreuses images assemblées. Le problème est qu’à chaque assemblage, un risque de perte de précision persiste (problème de distorsion). Le logiciel peut utiliser des algorithmes mathématiques complexes pour déterminer les données manquantes et améliorer l’image finale.

Ce processus est appelé interpolation. Le logiciel améliore la résolution scannée, rendant l'image beaucoup plus définie. La plupart des fabricants de scanners pour la dentisterie intègre un logiciel de traitement des nuages de points et de conversion pour les logiciels de CAO basés sur la modélisation polygonale (Aubreton et al., 2013 ; Hong-Seok et Chintal, 2015).

Il existe 2 formats de fichiers dits universels qui pourront être lus par l'ensemble des logiciels de conception de laboratoire ou autre logiciel de segmentation. Le premier est le fichier *.STL* (*Standard Tessellation Language* – développé par 3D Systems® en 1986-). Il définit un maillage de triangles qui vont créer un objet 3D. La couleur et la texture de l'objet ne sont pas transférées dans le fichier (fichier en noir et blanc). Le second est le fichier *.PLY* (*Polygonal File Format*). Il est constitué d'un assemblage de polygones auxquelles on peut adjoindre des informations telles que la transparence ou la couleur. Tous les logiciels ne sont pas capables de gérer le format *.PLY*.

La précision d'une caméra est définie par 2 paramètres :

- la cohérence : c'est-à-dire l'accord entre les résultats de tests (Schrouf et Fleiss, 1979 ; Joint Committee for Guides in Metrology, 2008 ; Hughes et Hase, 2010),
- la précision en terme de marge d'erreur : c'est à dire l'accord entre la moyenne arithmétique d'un grand nombre de résultats de tests et la valeur de référence réelle ou acceptée.

La revue de la littérature révèle la difficulté à mesurer la précision d'un scanner optique et à fortiori, la difficulté à comparer la précision des scanners optiques entre eux étant donné que leurs techniques d'acquisition d'images sont différentes. Les méthodes de mesure de précision pour les scanners intra-oraux sont limitées car elles dépendent d'aspects tels que l'opérateur, l'équipement utilisé, l'étalonnage, le temps écoulé entre les mesures et l'environnement (Ender et Mehl, 2013 ; Jeong et al., 2016 ; Richert et al., 2017). Malgré ces difficultés de mise en œuvre, de nombreux articles ont fait état de la précision et de la justesse des scanners intra-oraux actuels, tant *in vitro* qu'*in vivo* (Jacob et al., 2015 ; Ting-Shu et al., 2015 ; Ender et al., 2016 ; Gjølvd, et al., 2016 ; Vecsei et al., 2016 ; Richert et al., 2017 ; Alholm et al., 2018).

L'objectif de notre étude n'est pas de comparer la précision de différents systèmes d'imagerie mais de répondre à la question suivante : est-ce que le scanner intra-oral utilisé dans notre approche nous donne des informations suffisamment fiables et exploitables pour appliquer notre protocole d'analyse morphométrique du *shoveling*, sans avoir nécessairement recours au micro-CT ?

L'objectif est de comparer les tracés de *shoveling* validés à partir de l'acquisition par micro-CT avec les tracés de *shoveling* obtenus :

-à partir de l'acquisition par le scanner extra-oral « 7Series® » de Dental Wings présent dans les laboratoires de prothèse dentaire,

-à partir de l'acquisition par le scanner intra-oral « Condor® » du laboratoire Aabam®.

III.2. Matériels et méthode.

III.2.1. Echantillon.

Notre échantillon-test se compose de 31 UI1 d'origine **française** (Europe) datant de l'époque **médiévale** (X-XIIIème siècle) et compte 16 incisives centrales maxillaires gauches et 15 incisives centrales maxillaires droites qui ont été mises en miroir pour les analyses de Morphométrie Géométrique (MG). Ces dents ont été découvertes sur le Site de « La Béragne » à Trèbes (Aude –FR-) (cf. § II.2.1.1) (Figure 44).

Les dents sélectionnées dans notre échantillon-test ne présentent aucune lésion ou pathologie particulière sur les faces vestibulaire et palatine. Seules les couronnes dentaires non usées à modérément usées (maximum stade 2 défini par l'indice de Smith (1984)) sont incluses dans les analyses (Smith, 1984) (Table 3).



Figure 44. Vue palatine d'exemple d'UI1 d'origine française médiévale (FM 22 : 5193-21) (Source INRAP 2016, Donat R., Carayon D.).

III.2.2. Acquisition des données.

Les 31 UII sont scannées par trois méthodes d'investigation 3D différentes : micro-CT, scanner surfacique extra-oral *7Series*® de Dental Wings et scanner intra-oral *Condor*® du laboratoire Aabam.

III.2.2.1. Micro-tomographie à rayons X (micro-CT).

Le micro-CT a été utilisé dans ce projet pour valider la méthodologie (cf. § II.2.2.1. et Annexe 6).

Les 31 UII sont scannées par microtomographie aux rayons X (micro-CT) au Centre Inter-Universitaire de Recherche et d'Ingénierie des Matériaux (CIRIMAT) de l'Université de Toulouse avec un instrument Phoenix/GE Nanotom 180, de la fédération FERMAT, en utilisant les paramètres suivants : 100 kV, 100 μ A, pas angulaire de 0.36°. Les images virtuelles ont été reconstruites à une taille de voxel de 22 à 25 μ m (Figure 45).

Les 31 UII sont scannées en 2 acquisitions.



Figure 45. Micro-CT Phoenix/GE Nanotom 180 (CIRIMAT Toulouse UMR 5085).

III.2.2.2. Scanner extra-oral (EOS): *7series*® Dental Wings.

Les 31 UII sont scannées par le scanner extra-oral *7series*® au laboratoire de Prothèse Dentaire JPC à Narbonne (Aude-FR-).

Ce scanner de surface extra-oral (EOS) - développé et commercialisé par *Dental Wings*® - est basé sur la technologie de triangulation à laser bleu.

Son principe de fonctionnement basé sur la triangulation, est composé de 2 caméras monochromes et d'une caméra couleur pour l'aperçu des surfaces.

Le système est tripodique, avec un plateau tournant et un bras articulé. Le plateau a 3 axes de rotation et 2 de translation.

Selon la fiche technique du fabricant, la précision maximale est de 15 μ m (selon les normes d'essai de *Dental Wings* non précisées par le fabricant).

Son volume de mesure est de 140*140*140mm.

Cet EOS permet l'exportation de fichiers ouverts *.STL (Standard Tessellation Language)* et est compatible avec tous les logiciels ouverts de planification et de segmentation.

Ce système sans fil permet la connectivité *USB, Wi-Fi, Bluetooth*, carte *SD* ou *Ethernet* et l'impression 3D.

Il possède un plateau *multi-dies* pouvant contenir 30 éléments unitaires (Figures 46 et 47) pouvant être numérisés en 13 minutes sans intervention de l'opérateur. Le poudrage des spécimens est nécessaire.

Les 31 dents sont scannées en 2 acquisitions.



Figure 46. Plateau *multi-dies* du *7series*® contenant 30UI1.



Figure 47. 30 UI1 prêtes à la numérisation par le *7series*®.

III.2.2.3. Scanner intra-oral (IOS) : caméra Condor® Laboratoire Aabam.

Les 31 UII sont scannées par le scanner intra-oral Condor® au siège du laboratoire Aabam du Pr François Duret à Fleury d'Aude (Aude-FR-).

La caméra optique 3D Condor® est développée et conçue à partir des travaux de François Duret.

Ce scanner intra-oral est basé sur la technologie de capture vidéo et a pour principe de fonctionnement, la stéréophotogrammétrie.

La stéréophotogrammétrie consiste à faire des acquisitions d'un point selon plusieurs points de vue et à estimer toutes les coordonnées (x,y,z) par une analyse algorithmique des images (Pradies et al., 2014). Ce scanner intra-oral permet d'exporter des fichiers ouverts .STL et .PLY (Figures 48 et 49). Cet IOS est compatible avec tous les concepteurs de logiciels ouverts.



Figure 48. Fichier .Ply du spécimen FM 4 : 3384-11 scannée par la caméra Condor® (opérateur : Carayon D., 2017).



Figure 49. Plaque ASU-UII scannée avec la caméra Condor® (opérateur : Carayon D., 2017).

La précision de cette caméra pour numériser une dent unitaire varie de 30 à 50 μ m.

Ce scanner filaire se connecte directement à l'ordinateur via un port *USB 3.0* sans avoir besoin d'une station d'accueil ou d'un câble d'alimentation supplémentaire (Figure 50).

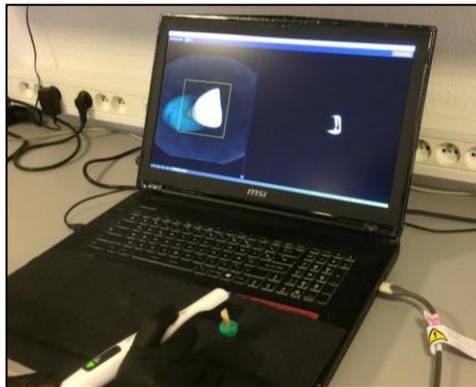


Figure 50. Connexion de la caméra *Condor*® via un port *USB* (Duret E., Carayon D., 2017).

Pour un transfert de données à grande vitesse, le traitement de l'image est géré par le logiciel intégré avec enregistrement fluide et traitement immédiat (Figure 51).

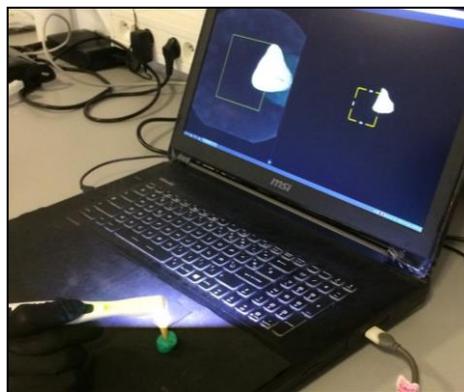


Figure 51. Phase de numérisation par la caméra *Condor*® (opérateur : Carayon D., 2017).

III.2.3. Transformation des données.

Nous avons utilisé le logiciel Image J pour convertir les données 16 Bits du micro-CT en données 8 Bits. Les données issues du scanner extra-oral *7Series*® et du scanner intra-oral *Condor*® sont directement utilisables sur le logiciel de visualisation et segmentation.

III.2.4. Traitement des données : application de la nouvelle méthodologie morphométrique.

Les données sont importées dans le logiciel d'analyse 3D *Avizo® v.7.0.* (*FEI Visualization Sciences Group*) pour la visualisation et le traitement des rendus 3D de la surface externe de la dent.

III.2.4.1. Application du protocole d'analyse morphométrique (cf. description § II.2.2.3) (Table 13).

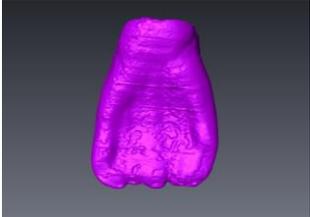
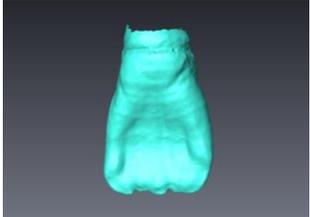
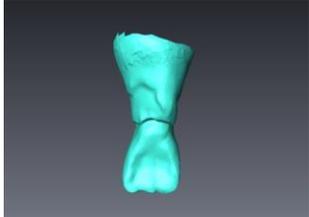
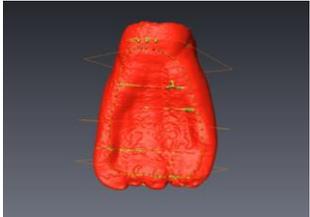
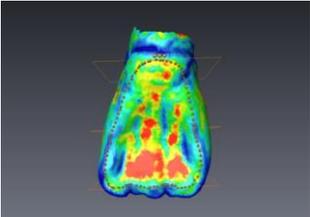
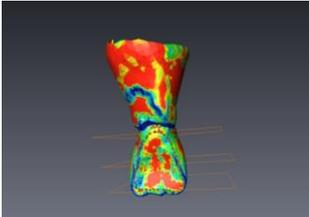
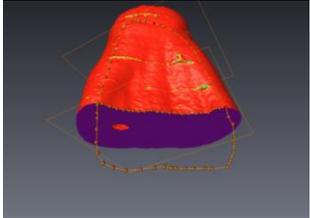
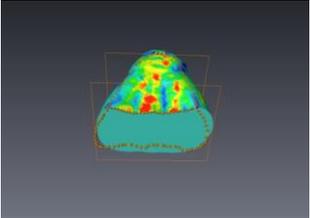
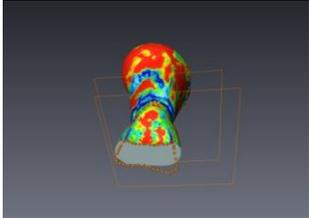
	Micro-CT (MCT)	7Series® (ST)	Condor® (CO)
Génération de la surface FM 4 :3384-11			
Détermination du plan médian référence FM4 :3384-11			
Objectivation morphométrique du <i>shoveling</i> de FM4 :3384-11			

Table 13. Protocole d'objectivation morphométrique du *shoveling* appliqué sur le spécimen FM4 :3384-11, numérisé selon 3 modes d'investigation : le micro-CT (MCT), le scanner extra-oral ou scanner de table 7Series® (ST) et le scanner intra-oral Condor® (CO) (opérateur : Carayon D., 2017).

Cette courbe prévisualisant la zone de *shoveling* est enregistrée dans un fichier *.ascii*.

III.2.4.2. Application de la méthode sur l'ensemble de l'échantillon.

Nous appliquons la méthodologie précédemment décrite sur les 93 UI1 (31UI1 numérisées par 3 techniques différentes).

Nous enregistrons 93 courbes *Bspline* objectivant le *shoveling* dans un fichier *.ascii*.

III.2.4.3. Gestion de l'asymétrie droite / gauche.

Nous procédons à la transformation par « Effet Miroir » des *Bspline* des 45 UI1 droites (11) en UI1 gauches (21) de telle sorte à pouvoir les comparer indépendamment de leur asymétrie (Figure 52).

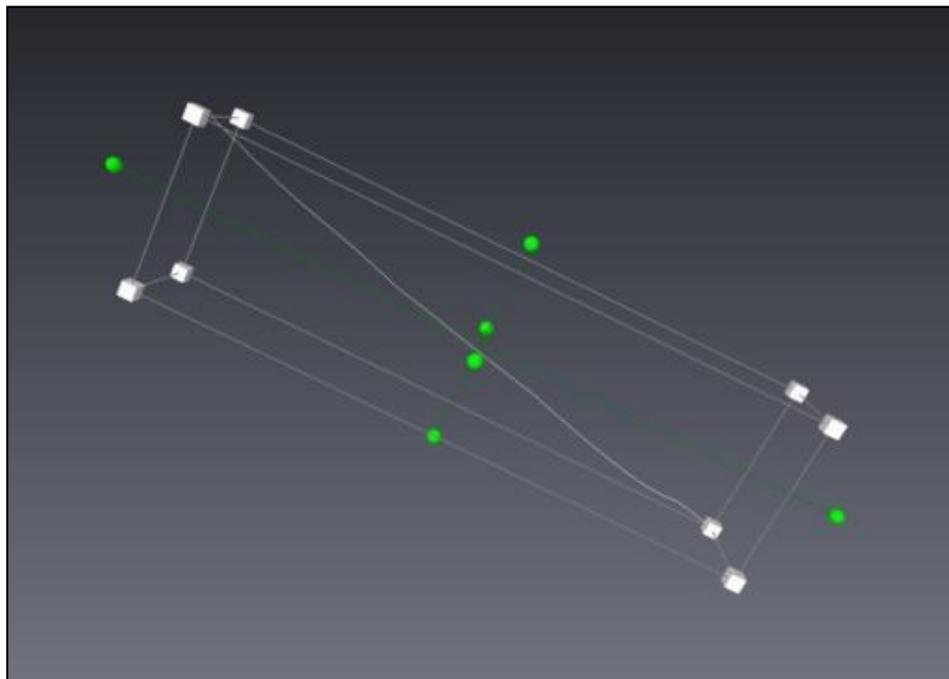


Figure 52. Objectivation morphométrique du *shoveling* de FM4 :3384-11 après application de l'« Effet Miroir » (opérateur : Carayon D., 2017).

III.3. Outils statistiques.

Les statistiques ont été réalisées par Monsarrat P. (Faculté d'Odontologie Toulouse III- Paul Sabatier, France- ; STROMALab, CNRS ERL 5311, EFS, INP-ENVT, INSERM, Université Toulouse III- Paul Sabatier, France-).

III.3.1. Tests de reproductibilité.

Nous utilisons pour les tests de reproductibilité le coefficient de corrélation intra-classe (ICC) (cf. § II.3.1).

III.3.2. Analyse Procruste.

Une analyse généralisée en Procruste (GPA) est effectuée sur les coordonnées tridimensionnelles des points de repère afin d'obtenir pour chaque spécimen une superposition des courbes objectivant le *shoveling* pour chaque méthode d'investigation 3D (cf. § II.3.2).

La GPA a été exécutée en utilisant la méthode "*gpagen*" du package "*geomorph 3.05*" (Rohlf et Marcus, 1993 ; Rohlf, 1999 ; Cucchi et al., 2015).

III.3.3. Analyse de la variance.

L'objectif est de rechercher les différences significatives de distance procrustéenne entre les trois différentes méthodes de numérisation. Pour cela, nous utilisons ANOVA et l'analyse par paires, en utilisant la méthode "*advanced.procD.lm*" du package "*geomorph 3.05*". Les paramètres intégrés pour ANOVA sont l'échantillon et la méthode d'imagerie.

III.4. Résultats.

III.4.1. Test de reproductibilité de la méthodologie morphométrique.

Trois opérateurs différents (DC, CZ, PM) ont appliqué indépendamment la nouvelle méthodologie morphométrique sur 10 spécimens sélectionnés au hasard, afin de tester la reproductibilité de la méthode.

Le positionnement des points de repère entre les 3 opérateurs est testé par une corrélation intra-classe (ICC) sur un modèle aléatoire bidirectionnel avec « accord absolu » avec des évaluateurs multiples (Koo et Li, 2017).

La reproductibilité de la méthodologie est validée avec un **ICC>99%**.

III.4.2. Analyse Procrustéenne.

III.4.2.1. Illustration d'une superposition Procruste en 3D pour un spécimen (FM22 : 5193-21).

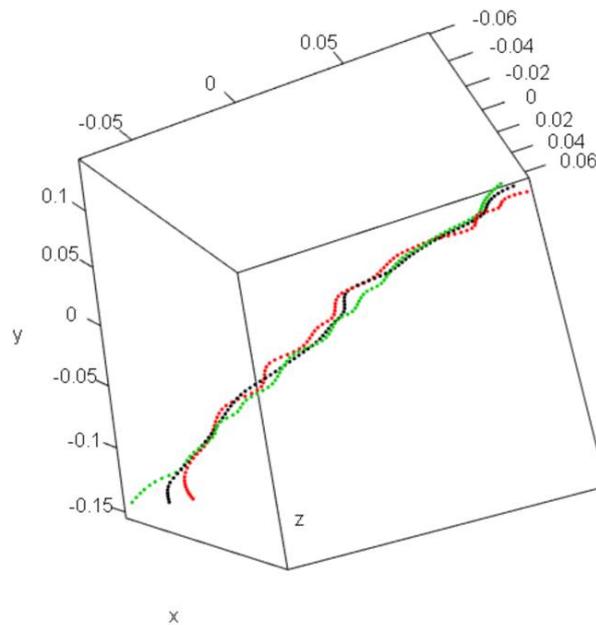


Figure 53. Un exemple d'illustration de superposition Procruste 3D des coordonnées d'un spécimen (FM22 :5193-21). En noir : micro-CT (MCT) ; en rouge : Scanner Intra-Oral *Condor*® (CO), en vert : Scanner Extra-Oral *7Series*® (ST).

L'illustration 3D du *shoveling* du spécimen FM22 :5193-21 objective des différences entre les 3 méthodes (Figure 53).

III.4.2.2. Illustration de la superposition Procruste moyenne du *shoveling* des 31 UI1 projeté dans un espace 2D.

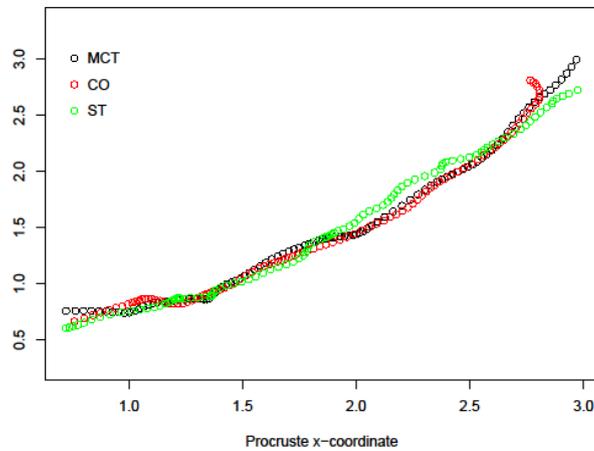


Figure 54. Illustration de la superposition des coordonnées Procruste (x-y) pour le *shoveling* moyen des 31 UI1 pour chacune des méthodes de numérisation. En noir : micro-CT (MCT) ; en rouge : IOS *Condor*® (CO), en vert : EOS *7Series*® (ST).

L'illustration des *shoveling* moyens projetés dans un plan 2D objective une corrélation entre les courbes du *shoveling* des UI1 numérisées par le micro-CT (en noir) et par la caméra *Condor*® (en rouge).

Le schéma n'illustre pas de corrélation de la courbe du *shoveling* des UI1 numérisées par le scanner extra-oral *7Series*® (en vert) avec les 2 autres courbes (Figure 54).

III.4.2.3. Analyse en Composante Principales (ACP).

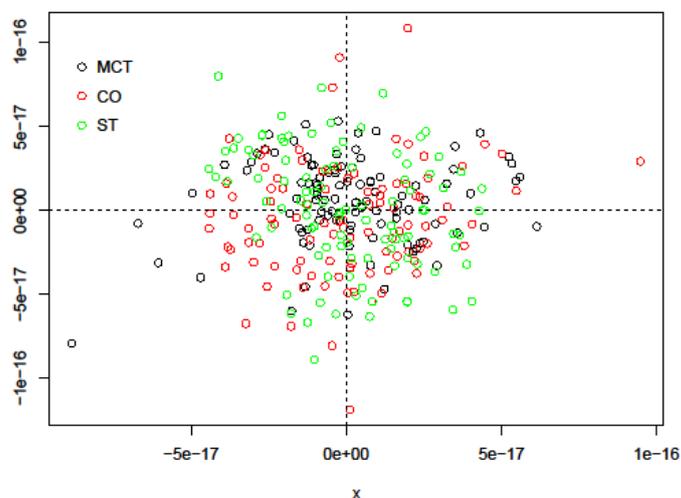


Figure 55. Résidus en x et y pour chacune des méthodes de numérisation. En noir : micro-CT (MCT) ; en rouge : IOS *Condor*® (CO), en vert : EOS *7Series*® (ST).

La lecture de l'ACP ne permet pas de visualiser des différences entre les 3 méthodes de numérisation (Figure 55).

III.4.2.4. Différences de distances procrustéennes entre les 3 techniques d'imagerie.

Méthode	CO	MCT	ST
CO	-	1.13 (0.14)	2.04 (0.04)
MCT	-	-	2.02 (0.04)

Table 14. Valeurs de z (*p-value*) obtenues à partir du modèle ANOVA pour comparer les 3 méthodes de numérisation.

Le tableau 14 montre une différence significative dans les distances procrustéennes entre IOS *Condor*® (CO) et EOS *7Series*® (ST) ainsi qu'entre micro-CT (MCT) et EOS *7Series*® (ST).

Le tableau 14 ne montre aucune différence significative entre IOS *Condor*® (CO) et micro-CT (MCT).

III.5. Discussion, Synthèse et Perspectives.

Le développement récent de techniques quantitatives basées sur l'imagerie 3D a ouvert de nouvelles voies pour tester la fiabilité de la méthode elle-même et fournir de nouveaux protocoles objectifs pour évaluer la variation des caractéristiques dentaires non métriques, tels que le *shoveling*. Nous avons ainsi élaboré une méthode de morphométrie géométrique (MG) pour évaluer sur une échelle ouverte et continue le degré de *shoveling* des incisives centrales permanentes maxillaires (cf. § II.2.2).

Cette méthode alternative à la méthode ASUDAS repose sur la nécessité d'une banque de données numériques.

Suite au constat de départ selon lequel les supports d'observation conventionnels peuvent entraîner des pertes d'informations dans le temps ou des problèmes de non-ergonomie, nous avons émis l'hypothèse que l'utilisation de l'imagerie 3D permettrait d'obtenir des informations plus précises et plus durables dans le temps.

Pour surmonter les difficultés liées à l'ergonomie et au coût des outils conventionnels d'investigation 3D (micro-tomographie à rayons X, scanner extra-oral), un scanner intra-oral est utilisé. La caméra *Condor*® du laboratoire Aabam est un outil médical avec une caméra portable et un logiciel associé utilisé en CAO/FAO (Conception et Fabrication Assistée par Ordinateur), avec lequel nous avons enregistré la géométrie 3D des incisives centrales maxillaires.

D'une manière générale, toute procédure de balayage est plus précise si les surfaces scannées sont lisses et régulières (Gonzalez De Villaumbrosia et al., 2016). Or, nous sommes en présence de dents naturelles d'époque médiévale analysées en l'état. La problématique est de savoir si ce scanner intra-oral nous donne des informations suffisamment fiables et exploitables pour appliquer notre protocole d'analyse morphométrique du *shoveling*, sans devoir nécessairement avoir recours au micro-CT.

Après une étude utilisant 3 modes d'investigation différents, les résultats montrent que les courbes de *shoveling* obtenues à partir du scanner intra-oral *Condor*® du laboratoire Aabam ne présentent pas de différence significative (en terme de distance procrustéenne) avec les courbes obtenues par le micro-CT.

En revanche, une différence significative est objectivée entre les distances procrustéennes des courbes obtenues par le scanner extra-oral *7Series*® de Dental Wings avec les courbes obtenues respectivement par le micro-CT et le scanner intra-oral *Condor*®.

Pour le scanner extra-oral *7Series® Dental Wings*, les résultats traduisent le « ressenti » exprimé par les opérateurs lors de l'analyse morphométrique. En effet, les images des dents naturelles unitaires étudiées sont fortement pixellisées entraînant une difficulté à positionner, dans un premier temps, les *landmarks* à la jonction amélo-cémentaire permettant de déterminer les plans de référence, puis les *semi-landmarks* objectivant la ligne de plus grand contour de la face palatine permettant de délimiter la courbe finale du *shoveling*, et enfin, les *semi-landmarks* objectivant le *shoveling*.

Le scanner extra-Oral *7Series®* est initialement destiné à la numérisation de modèles en plâtre. En présence de dents naturelles, et malgré le poudrage, il est probable que le faisceau ait pénétré la matière, entraînant une perte de précision, ce qui expliquerait le décalage par rapport aux deux autres techniques.

La précision et la reproductibilité de notre approche morphométrique est directement corrélée à la précision des surfaces de balayage. Un manque de précision des surfaces entraîne un problème de reproductibilité de la méthode et une augmentation du temps de l'analyse.

Une précision analogue au micro-CT n'est certes pas nécessaire, comme en atteste l'absence de différence significative en terme de distance procrustéenne entre micro-CT et scanner intra-oral *Condor®*. Ceci étant, les surfaces numérisées avec le scanner extra-oral *7Series® Dental Wings* ne fournissent pas des données suffisamment précises pour notre analyse.

Dans le contexte de cette étude, le scanner intra-oral *Condor®* pourrait être utilisé pour l'étude morphométrique du *shoveling*. Cette caméra présente en outre, d'autres avantages pour son utilisation dans l'étude du *shoveling*.

Même si le temps d'acquisition varie en fonction du nombre de dents et l'expérience de l'utilisateur, le mode de capture des images par balayage vidéo est rapide, permettant de diminuer la durée d'acquisition des données.

La caméra *Condor®* a la faculté d'acquérir les données dans le respect des couleurs naturelles des tissus dentaires. La banque de données numériques obtenues est analogue aux échantillons originaux.

Après une phase indispensable d'apprentissage et de formation, son utilisation est aisée. L'absence de poudrage permet d'éviter la manipulation des spécimens.

La numérisation des données par le scanner intra-oral facilite l'archivage des informations et une meilleure accessibilité des données, par rapport aux supports conventionnels (modèles en plâtre, crânes). Un simple port USB permet de connecter la caméra, nous laissant imaginer pouvoir stocker les informations directement sur les sites de fouille (Figure 56). De même, le transfert des données est rapide, dans le respect de l'environnement.

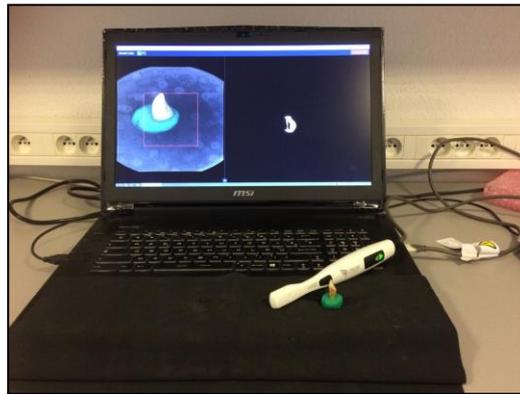


Figure 56. Facilité de transport du matériel de numérisation *Condor*® (Duret E., Carayon D., 2017).

La possibilité de fichiers ouverts *.STL* et *.PLY* permet une utilisation des données sur des logiciels de morphométrie géométrique tels que *Avizo*®.

Le logiciel associé à la caméra met à disposition des outils tels que la capture d'écran des échantillons à étudier.

Comme le principe de fonctionnement de la *Condor*® repose sur la projection passive de lumière, la caméra est relativement petite avec une « prise stylo » plus facile à manipuler (Figure 57), et moins chère à produire.

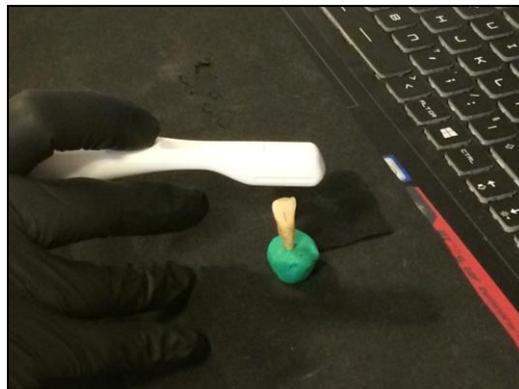


Figure 57. Ergonomie facilitée par la « prise stylo » de la caméra *Condor*® (Duret E., Carayon D., 2017).

Le logiciel de photogrammétrie Condor® (*hardware*) est la partie la plus importante du dispositif d'analyse des images. Au cours de ces dernières années, nous avons pu assister à l'évolution du logiciel intégré pour une meilleure optimisation des images.

Nous proposons une méthode simple, rapide, accessible et peu coûteuse d'investigation 3D non invasive de spécimens pour appliquer facilement notre nouvelle approche morphométrique géométrique pour caractériser le *shoveling* des UII humaines modernes. Nous pourrions, par ailleurs, imaginer utiliser la nouvelle méthode morphométrique d'analyse du *shoveling* comme référentiel dans la comparaison de la précision des caméras intra-orales présentes sur le marché, afin de pouvoir les utiliser à des fins anthropobiologiques.

Les avantages d'un scanner intra-oral dans un contexte anthropobiologique d'analyse morphométrique de caractères discrets dentaires tels que le *shoveling* sont :

- la possibilité de créer une base de données 3D des surfaces des UII (échelle ouverte d'analyse),

- une meilleure capacité de stockage et d'archivage des données,
- une meilleure accessibilité des données,
- une répertoriation numérique des échantillons sur les sites de fouille,
- l'affranchissement des modèles en plâtre (ASUDAS),
- l'affranchissement de manipulation fréquente des échantillons,
- un gain en rapidité d'analyse,
- un gain en précision d'analyse par rapport à l'analyse ASUDA.

CONCLUSION GENERALE

Affiner les méthodes de notation des traits morphologiques dentaires est le défi lancé à l'anthropologie dentaire ces dernières décennies. Le développement récent de méthodes rapides et efficaces pour acquérir des modèles 3D d'un objet, ainsi que l'avènement de puissantes techniques quantitatives pour évaluer la variation de forme (morphométrie géométrique), ont ouvert de nouvelles voies pour établir des protocoles objectifs dans l'étude des variations des caractéristiques dentaires non-métriques.

Dans ce contexte, nous avons tenté d'améliorer l'analyse du *shoveling* des incisives centrales permanentes maxillaires en développant une méthode innovante et complémentaire de la méthode ordinale ASUDAS.

A l'issue de nos travaux de recherche, nous avons répondu aux 4 hypothèses émises en préambule de notre étude.

1. *Nous avons émis l'hypothèse qu'une technique d'approche morphométrique basée sur une échelle continue (et non ordinale) permettrait d'avoir une analyse plus précise et plus reproductible du shoveling que la méthode ASUDAS.*

Après avoir comparé l'évaluation visuelle classique (ASUDAS) du *shoveling* avec notre nouvelle approche morphométrique géométrique 3D, nous proposons une méthode quantitative, simple et rapide, pour caractériser le *shoveling* des incisives centrales permanentes maxillaires humaines modernes en utilisant une échelle numérique continue et ouverte de sa variation morphologique.

Les résultats de l'application de notre méthode morphométrique montrent que notre méthode est reproductible et qu'elle permet de distinguer les groupes français et sud-africains (exprimant un faible degré de *shoveling*) de l'échantillon chinois (plus variable mais montrant un *shoveling* prononcé), en accord avec la nombreuse littérature sur le sujet (Scott et Turner, 1997 ; Irish et Scott, 2016 ; Scott et Irish, 2017 ; Scott et al., 2018) et montrent que notre méthode, tout en confirmant les résultats de l'ASUDAS, s'ouvre vers une évaluation quantitative du *shoveling* pour la distinction entre les populations fossiles et les populations humaines existantes.

2. *Nous avons émis l'hypothèse que les stades ASUDAS et les stades observés sur les échantillons ne sont pas forcément comparables et que la profondeur maximale ou la surface de creux de la face palatine serait un aspect inconscient majeur lors de l'enregistrement du shoveling selon la méthode classique ASUDAS.*

Nos résultats ont montré que les observateurs, même s'ils sont formés et s'ils suivent la définition ASU du caractère du *shoveling* des UII, ont tendance à créer, lorsqu'il s'agit d'étudier de nombreux spécimens, une image mentale des catégories ASUDAS et à porter leurs jugements. Cette échelle mentale dépendrait de la profondeur maximale de la face palatine, alors que les grades ASUDAS ne sont pas distribués linéairement pour ce paramètre. Selon nos résultats, les scores attribués visuellement finissent par être corrélés plutôt avec la profondeur maximale qu'avec l'expression des crêtes marginales, telle que décrite dans le protocole ASUDAS.

3. *Nous avons émis l'hypothèse qu'une échelle ouverte (non limitée aux 7 grades) et continue basé sur un paramètre métrique tel que la profondeur ou la surface de creux serait un meilleur indicateur, plus en adéquation avec les variations morphologiques, que l'échelle fermée ASUDAS.*

Nos résultats ont montré que le paramètre de la profondeur maximale donne une mesure du développement des crêtes mésiale et distale et constitue une métrique appropriée pour évaluer quantitativement l'expression du *shoveling*. Notre nouvelle méthode permet d'établir un nouveau référentiel pour le *shoveling*, plus objectif, en considérant une échelle continue et ouverte (ne se limitant pas aux 7 grades) qui intègre l'analyse de deux aspects différents mais complémentaires : la profondeur de la surface palatine par rapport aux crêtes marginales et la forme de la face palatine. Il s'agit là, d'un point important, car le *shoveling* peut avoir des expressions plus fines, au-delà de la portée de l'échelle millimétrique, de par ses variations autant en forme qu'en taille (Scott et Turner, 1997). De plus, nos analyses ont révélé que l'évaluation visuelle du *shoveling* tend à être plus sujette aux biais intra- et inter-observateurs pour les scores les plus élevés (à partir du grade +2). Or, la principale caractéristique de l'échelle ASUDAS pour le *shoveling* est l'expression progressivement croissante des crêtes marginales (Scott et Turner, 1997 ; Scott et Irish 2017).

4. *Nous avons émis l'hypothèse que l'utilisation d'un scanner intra-oral permettrait d'obtenir des informations plus exploitables dans le temps.*

Nos résultats ont montré que la précision et la reproductibilité de notre approche morphométrique est directement corrélée à la précision des surfaces de balayage et qu'une nouvelle méthode d'investigation des échantillons à analyser en réalisant une empreinte optique via un scanner intra-oral ergonomique pourrait être utilisée pour l'étude morphométrique du *shoveling*.

En effet, les avantages d'un scanner intra-oral dans un contexte anthropobiologique d'analyse morphométrique de caractères discrets dentaires, tels que le *shoveling*, sont nombreuses : possibilité de créer une base de données 3D des surfaces des UI1 -échelle ouverte d'analyse-, meilleure capacité de stockage et d'archivage des données, meilleure accessibilité des données, répertoriation numérique des échantillons sur les sites de fouille, affranchissement des supports conventionnels d'observation- modèles en plâtre ASUDAS-, affranchissement de manipulation fréquente des échantillons, gain en rapidité et précision d'analyse par rapport à l'analyse ASUDA.

En conclusion, dans le cadre de l'étude du *shoveling*, même si la méthode ordinale ASUDAS et notre méthode morphométrique sont notoirement différentes, nous considérons, au vu des résultats de nos travaux, que cette approche morphométrique peut compléter et améliorer le système ASU lorsque la distinction visuelle entre les grades est difficile à objectiver par un œil humain. Ainsi, même si l'ASUDAS est un outil fiable et efficace, il est encore possible de l'améliorer et de le compléter par d'autres méthodes.

Ce modeste échantillon n'est utilisé ici que pour tester la méthode, mais en l'augmentant, en incorporant de plus grands groupes chrono-géographiques, y compris les hominins fossiles, il y a un réel potentiel pour mieux comprendre l'évolution du *shoveling* des incisives centrales permanentes maxillaires. Compte tenu de la disponibilité croissante de données virtuelles 3D dentaires, de la paléogénétique et des données moléculaires sur la morphologie dentaire (Zanoli et al., 2017), cette nouvelle méthode quantitative est parfaitement adaptée à l'étude de l'évolution du *shoveling* des UI1.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Aas IHM, Risnes S. The depth of the lingual fossa in permanent incisors of Norwegians. I. Method of measurement, statistical distribution and sex dimorphism. *Am J Phys Anthropol.* 1979a; 50: 335-340.

Aas IHM, Risnes S. The depth of the lingual fossa in permanent incisors of Norwegians. II. Differences between central and lateral incisors, correlations, size asymmetry and variability. *Am J Phys Anthropol.* 1979b; 50: 341-348.

Adams DC, Rohlf FJ, Slice DE. Geometric morphometrics: ten years of progress following the “revolution”. *Ital J Zool.* 2004; 71: 5-16.

Adloff P. Das gebiss des menschen und der anthropoiden und das abstammungsproblem. *Z Morph Anthropol.* 1927; 26: 431-449.

Alholm P, Sipila K, Vallittu P, Jakonen M, Kotiranta U. Digital versus conventional impressions in fixed prosthodontics: a review. *J Prosthodont.* 2018 Jan; 27(1): pp.35-41.

Altman DG. The cost of dichotomising continuous variables. *Br Med J.* 2006 ; 332 : 1080.

Andrieux P, Hadjouis D, Dambricourt-Malassé A. L'identité humaine en question. Nouvelles problématiques et nouvelles technologies en paléontologie humaine et en paléoanthropologie biologique. Collection Paléoanthropologie et Paléopathologie osseuse. Paris : Editions Artcom ; 2000.

Aubretton O, Bajard A, Verney B, Truchetet F. Infrared system for 3D scanning of metallic surfaces. *Mach Vis Appl.* 2013; 24(7):1513-1524.

Baab KL, McNutly KP, Rohlf FJ. The shape of human evolution: a geometric morphometrics perspective. *Evolutionary Anthropology: Issues, News, and Reviews.* 2012; 21(4): 151-165.

Bailey SE. Dental morphological affinities among late Pleistocene and recent humans. *Dent Anthropol.* 2000; 14: 1–8.

Bailey SE. Neandertal dental morphology: implications for modern human origins. Doctorate dissertation presented to the Arizona State University; 2002.

Bailey SE. Beyond shovel-shaped incisors: Neandertal dental morphology in a comparative context. *Period Biol.* 2006; 108(3): 253-267.

Bailey SE, Glantz M, Weaver TD, Viola B. The affinity of the dental remains from Obi-Rakhmat Grotto, Uzbekistan. *J Hum Evol.* 2008; 55 (2): 238-248.

Bailey SE, Hublin JJ. Who made the early Aurignacian? A reconsideration of the Brassempouy dental remains. *Bulletin et Mémoires de la Société d'Anthropologie de Paris.* 2005; 17 (1-2) : 115-121.

Bailey SE, Hublin JJ. What does it mean to be dentally “modern”? In: Scott GR, Irish JD (Eds.). *Anthropological perspectives on tooth morphology, genetics, evolution, variation.* Cambridge: Cambridge University Press; 2013. pp. 222-249.

Bailey SE, Skinner MM, Hublin JJ. What lies beneath? An evaluation of lower molar trigonid crest patterns based on both dentine and enamel expression. *Am J Phys Anthropol.* 2011; 145: 505-518.

Bailey SE, Wood BA. Trends in postcanine occlusal morphology within the hominin clade: the case of *Paranthropus*. In: Bailey SE, Hublin JJ (Eds.). *Dental perspectives on human evolution: state of the art research in dental anthropology.* Dordrecht : Springer; 2007. pp. 33-52.

Bajard A. Numérisation 3D de surfaces métalliques spéculaires par imagerie infrarouge. Université de Bourgogne, 2012. Français. <NNT : 2012DIJOS055>.

Bermudez de Castro JM. Dental remains from Atapuerca/Ibeas (Spain). II. Morphology. *J Hum Evol.* 1988; 17: 279-304.

Berry AC. Anthropological and family studies on minor variants of the dental crown. In: Butler PM and Joysey KA. *Development, function and evolution of teeth.* Proceedings of the 4th International Symposium on dental morphology: Academic Press; 1978. pp. 81-98.

Besse P, Thomas-Agnan C. Le lissage par fonctions *splines* en statistique, revue bibliographique. *Statistique et analyse des données*. 1989; 14(1): 55-84.

Bhandari M, Lochner H, Tornetta P. Effect of continuous versus dichotomous outcome variables on study power when sample sizes of orthopaedic randomized trials are small. *Archives of Orthopaedic and Trauma Surgery*. 2002 ; 122 : 96-98.

Bie C. L’empreinte optique au cabinet dentaire. Thèse de doctorat en chirurgie dentaire. Université Paul Sabatier, Toulouse III; 2015 Nov.

Blais F. Review of 20 years of range sensor development. *Journal of Electronic Imaging*. 2004 Jan; 13: 231-240.

Blanco R, Chakraborty R. The genetics of shovel shape in maxillary central incisors in man. *Am J Phys Anthropol*. 1977; 44: 233-6.

Bollini GA, Rodríguez-Flórez CD, Colantonio SE. Bilateral asymmetry in permanent dentition of 13 pre-conquest samples from Argentina (South America). *Homo*. 2009; 60: 127-137.

Bookstein FL. Morphometric tools for landmark data: geometry and biology. 2e éd. Cambridge : Cambridge University Press; 1991.

Boucharlat gilles. Dispositifs à transfert de charges (CCD). <https://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/electronique-photonique-th13/electronique-analogique-42279210/dispositifs-a-transfert-de-charges-ccd-e2530/>. 2006 Feb 10.

Brabant HE. The human dentition during the Megalithic era. In: Dahlberg AA (Ed.). Dental morphology and evolution. Chicago: The University of Chicago Press; 1971. pp. 283-297.

Brace CL. Australian tooth-size clines and the death of a stereotype. *Current Anthropology*. 1980; 21: 141-53.

Brace CL, Montagu MFA. Human evolution: an introduction to biological anthropology. 2nd Edition. New-York: Macmillan; 1977.

Brace CL, Nagai M. Japanese tooth size, past and present. *Am J Phys Anthropol.* 1982; 59: 399-411.

Braga J. Non invasive imaging techniques. In: Irish J, Scott GR. A companion to dental anthropology. UK: Wiley-Blackwell; 2016. Chapter 31: 514-527.

Broca P. Instructions relatives à l'étude anthropologique du système dentaire. *Bull Soc Anthropol Paris.* 1879; 2(3): 128-163.

Brothwell DR. Dental anthropology 1st Edition. Volume V. Society for the study of human biology. London: Pergamon Press; 1963.

Burnett SE, Irish JD, Fong MR. Wear's the problem? Examining the effect of dental wear on studies of crown morphology. In: Scott GR, Irish JD (Eds). Anthropological perspectives on tooth morphology: genetics, evolution, variation. Cambridge: Cambridge University Press; 2013.

Butler PM. Some problems of the ontogeny of tooth patterns. In: Kurten B. (Ed.). Teeth: form, function and evolution. New-York: Columbia University Press; 1982. pp.44-51.

Campbell TD. The dentition and palate of the Australian Aboriginal. Adelaide: Hassel Press; 1925.

Carbonell VM. Variations in the frequency of shovel-shaped incisors in different populations. In: Brothwell DR (Ed.). Dental Anthropology: Volume V. Society for the study of human biology. London: Pergamon Press; 1963. pp 221-234.

Carlsen O. Dental morphology. Copenhagen: Munksgaard edit; 1987.

Carter K, Worthington S, Smith TM. News and views: non- metric dental traits and hominin phylogeny. *J Hum Evol.* 2014 Apr ; 69 : 123-128.

Chambon S. Mise en correspondance stéréoscopique d'images couleur en présence d'occultations. Thèse de Doctorat en Sciences Informatiques. Université Paul Sabatier, Toulouse III ; 2005.

Chen F, Brown GM, Song M. Overview of three-dimensional shape measurement using optical methods. *SPIE Optical Engineering*. 2000 Jan; 39(1): 10-22.

Chien J. Revision of the register to the papers of Ales Hrdlicka. National anthropological Archives: Smithsonian Institution; 2006.

Coleman MN, Colbert MW. CT thresholding protocols for taking measurements on three-dimensional models. *Am J Phys Anthropol*. 2007; 133:723-725.

Coon CS. The living races of man. New-York: Alfred A.Knopf; 1965.

Coon CS, Garn SM, Birdsell JB. Races: a study of the problems of race formation in man. Springfield: CC Thomas; 1950.

Coppa A, Dicintip F, Vargiu R, Lucci M, Cucina A. Morphological dental traits to reconstruct phenetic relationships between Late Pleistocene-Ancient Holocene human groups from Eurasia and North Africa. *Am J Phys Anthropol*. 2001 ; 32 : 54.

Crubézy E. Caractères discrets et évolution. Exemple d'une population nubienne : Missiminia (Soudan). Thèse de Sciences. Bordeaux ; 1991. 684 p.

Crubézy E, Braga J, Larrouy G. Anthropobiologie. Evolution humaine. Elsevier Masson; 2008.

Crubézy E, Sellier P. Caractères discrets et « recrutement » des ensembles sépulcraux. In : *Bulletins et Mémoires de la société d'anthropologie de Paris*, Nouvelle Série. Tome 2 fascicules 3-4, 1990. pp.171-177.

Crummett T. The evolution of shovel shaping: regional and temporal variation in human incisor of anthropology. Ph.D. Dissertation. University of Michigan: Ann Arbor; 1994.

Crummett T. The three dimensions of shovel-shaping. In: Moggi-Cecchi J (Ed.). Aspects of dental biology: palaeontology, anthropology and evolution. International Institute for the Study of Man. Florence; 1995. pp 305–313.

Cucchi T, Baylac M, Evin A, Bignon-Lau O, Vigne JD. Morphométrie géométrique et archéozoologie : concepts, méthodes et applications. In: Balasse M, Brugal JP, Geigl EM, Oberlin C, Reich I (Eds). Messages d'os. Archéométrie du squelette animal et humain. Paris : Edition des Archives contemporaines, Sciences Archéologiques ; 2015. pp 197–216.

Dahlberg AA. The dentition of the American Indian. In: Laughlin W S(Ed.). Papers on the physical anthropology of the American Indians. New York: Viking Fund; 1951. pp. 138-176.

Dahlberg AA. Materials for the establishment of standards for classification of tooth characteristics, attributes, and techniques in morphological studies of the dentition. Chicago: Zoller Laboratory of Dental Anthropology, University of Chicago; 1956.

Dahlberg AA, Epiing PJ, Brown JA. Analysis of the shovel-shaped incisor trait. *Am J Phys Anthropol.* 1956; 14: 386.

Dahlberg AA, Mikkelsen O. The shovel-shaped character in the teeth of the Pima Indians. *Am J Phys Anthropol.* 1956; 5: 234-235.

Davidowitz G, Kotick PG. The use of cad/cam in dentistry. *Dental Clinics.* 2011: p.559-570.

Denton LC. Shovel-shaped incisors and the morphology of the enamel-dentin junction: an analysis of human upper incisors in three dimensions. Master dissertation. Colorado State University : Fort Collins ; 2011.

Descamp F. Pratique de l'empreinte en prothèse fixée : du pilier naturel à l'implant, des techniques classiques à la CFAO. Paris : Ed CdP ; 2012. 137 p. 4. Dictionnaire de prothèses odontologiques.

DeVoto FCH, Arias NH, Ringuet S, Palma NH. Shovel-shaped incisors in a northwestern Argentine population. *J Dent Res.* 1968; 47 :820-3.

DeVoto FCH, Perrotto BM. Phenotypes and genotypes of Carabelli's complex in isolated populations of Argentina highlands. *J Dent Res*. 1971; 50: 1152-3.

Donner A, Eliasziw M. Statistical implications of the choice between dichotomous or continuous trait in studies of interobserver agreement. *Biometrics*. 1994; 50: 550-555.

Dray S, Dufour AB. The ade4 package: implementing the duality diagram for ecologists. *Journal of Statistical Software*. 2007; 22: 1-20.

Dryden IL. Shapes package. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. Contributed package. Version 1.2.3. URL <http://www.R-project.org>. 2017.

Duret F. Empreinte optique. Thèse de doctorat en chirurgie dentaire. Lyon : Faculté d'Odontologie-Université Claude Bernard ; 1973. p.400.

Duret F. Les différentes méthodes de prise d'empreinte pour la CFAO. *Strat Proth*. 2003 ; 3(5) : 343-349.

Duret F, Pélissier B. Différentes méthodes d'empreinte en CFAO dentaire. Elsevier Masson SAS [Internet]. Disponible sur : https://www-em--premium-com.docadis.univ-lyon1.fr/showarticlefile/250936/28-38844_plus.pdf. 2010.

Duret F, Pelissier B, Fages M. Empreintes optiques et perspectives d'avenir. *Strat Proth*. 2010; 4: 239-247.

Durrleman S, Prastawa M, Korenberg JR, Joshi S, Trouvé A, Gerig G. Topology preserving atlas construction from shape data without correspondence using sparse parameters. In: Ayache N, Delingette H, Golland P, Mori K (Eds.). Proceedings of medical image computing and computer aided intervention. Nice: Springer; 2012. pp. 223-230.

Durrleman S, Prastawa M, Charon N, Korenberg JR, Joshi S, Gerig G, Trouvé A. Morphometry of anatomical shape complexes with dense deformations and sparse parameters. *NeuroImage*. 2014; 101: 35-49.

Ender A, Mehl A. Accuracy of complete-arch dental impressions: a new method of measuring trueness and precision. *J Prosth Dent*. 2013; 109(2): 121-128.

Ender A, Attin T, Mehl A. In vivo precision of conventional and digital methods of obtaining complete-arch dental impressions. *J Prosth Dent*. 2016; 115(3): 313-320.

Eisenmann DR. Enamel Structure. In: Ten Cate AR (Ed.). Oral histology: development, structure, and function. 4th edition. St. Louis, MO: Mosby; 1994. pp. 239–256.

Evin A, Baylac M, Pons JM, Cornette R. Apports de la morphométrie géométrique à l'étude du crâne de chauves-souris : l'exemple d'un complexe d'espèces du genre *Myotis*. *Symbiose*. 2008; 21: 7-9.

Fajardo RJ, Ryan TM, Kappelman J. Assessing the accuracy of high-resolution X-ray computed tomography of primate trabecular bone by comparisons with histological sections. *Am J Phys Anthropol*. 2002; 118: 1-10.

Fehrenbach MJ. Dental anatomy coloringbook. Philadelphia : WB Saunders Co edit; 2008.

Fiorenza L, Kullmer O. Dental wear and cultural behavior in Middle Paleolithic humans from the Near East. *Am J Phys Anthropol*. 2013 Sep; 152(1):107-117.

Fornai C, Benazzi S, Svoboda J, Pap I, Harvati K, Weber GW. Enamel thickness variation of deciduous first and second upper molars in modern humans and Neanderthals. *J Hum Evol*. 2014 Oct; 76: 83-91.

Frayser DW. Evolution of the dentition in Upper Paleolithic and Mesolithic Europe. Lawrence, Kansas: University of Kansas Publications in Anthropology; 1978.

Frigerio F. 3-dimensional surface imaging using Active Wavefront Sampling [Internet] [Thesis]. Massachusetts Institute of Technology ; 2006. Disponible sur : <http://dspace.mit.edu/handle/1721.1/38258>

Gamal AE, Eltoukhy H. CMOS image sensors. *Circuits Devices Mag IEEE*. 2005; 21(3):6-20.

Gamer M, Lemon J, Puspendra Singh I. irr: Various coefficients of interrater Reliability and Agreement. R package version 0.84. <https://CRAN.R-project.org/package=irr>. 2012.

Garn SM. Human races. 3rd Edition. Springfield: CC Thomas; 1971.

Gawlikowska A, Szczurowski J, Czerwinski F, Miklaszewska D, Adamiec E, Dzieciolowska E. The fluctuating asymmetry of medieval and modern human skulls. *Homo*. 2007 ; 58 : 159-172.

Genet-Varcin E. Etude des dents permanentes provenant du gisement moustérien de la crose de Dua. *Annales de Paléontologie (vert)*. 1966 ; 52 : 89–114.

Gjelvold B, Chrcanovic BR, Korduner EK, Collin-Bagewitz I, Kisch J. Intraoral digital impression technique compared to conventional impression technique. A randomized clinical trial. *J Prosthodont*. 2016; 25(4): 282-287.

Goaz PW, Miller MC. A preliminary description of the dental morphology of the Peruvian Indians. *J Dent Res*. 1966; 45: 106-119.

Goldman LW. Principles of CT and CT Technology. *J Nucl Med Technol*. 2007; 35: 115-128.

Goldstein MS. Dentition of the Indian crania from Texas. *Am J Phys Anthropol*. 1948; 6: 63-84.

Gómez-Robles A, Martín-Torres M, Bermúdez de Castro JM, Prado L, Sarmiento S, Arsuaga JL. Geometric morphometric analysis of the crown morphology of the lower first premolar of hominins, with special attention to Pleistocene Homo. *J Hum Evol*. 2008; 55 (4): 627–638.

González de Villambrosia P, Martínez-Rus F, García-Orejas A, Salido MP, Pradíes G. In vitro comparison of the accuracy (trueness and precision) of six extraoral dental scanners with different scanning technologies. *J Prosthet Dent*. 2016 Oct;116(4): 543-550.

Gorjanovic-Kramberger D. Der paleolithische mensch und seine zeitgenossen aus dem deliuvium von Krapina in Kroatien (zweiter nachtrag, als dritter teil). *Mitt Anthropol Wien*. 1904; 34: 187–199.

Gorjanovic-Kramberger D. Der diluviale mensch von Krapina in Kroatien. Wiesbaden: Kreidel; 1906.

Gower JC, Dijksterhuis GB. Procrustes problems. Oxford statistical Sciences Series. Oxford University Press; 2004. Vol 30.

Graham JH, Freeman DC, Emlen JM. Antisymmetry, directional asymmetry, and dynamic morphogenesis. *Genetica*. 1993; 89: 121-137.

Gregory WK. The origin and evolution of the human dentition. Baltimore: Williams and Wilkins; 1922.

Groeneveld HT, Kieser JA. A new perspective on fluctuating odontometric asymmetry in South African Negroes. *Am J Hum Biol*. 1991; 3: 655-661.

Guatelli-Steinberg D. What teeth reveal about evolution. New-York: Cambridge University Press; 2016.

Guatelli-Steinberg D, Irish JD. Early hominin variability in first molar dental trait frequencies. *Am J Phys Anthropol*. 2005 ; 128 : 477-484.

Guipert G. Reconstitution et position phylétique des restes crâniens de l'Homme de Tautavel (Arago 21-47) et de Biache-Saint-Vaast 2 : apports de l'imagerie et de l'analyse tridimensionnelles. Thèse de doctorat : Paléontologie Humaine : Faculté des Sciences et Techniques de l'Université Paul Cézanne Aix-Marseille III ; 2005.

Hanihara K. Criteria for classification of crown characters of the human deciduous dentition. *J Anthropol Soc Nippon*. 1961; 69: 27-45.

Hanihara K. Mongoloid dental complex in the permanent dentition. *Proceedings of the VIIIth International Congress of Anthropological and Ethnological Sciences*. 1969; 1: 298-300.

Hanihara K. Morphological variation of major human populations based on nonmetric dental traits. *Am J Phys Anthropol*. 2008; 136: 169-182.

Hanihara, K., Masuda, T. and Tanaka, T. Family studies of the shovel trait in the maxillary central incisor. *J Anthropol Soc Nippon*. 1975a; 83: 107-112.

Hanihara K, Masuda T, Tanaka T, Tarouda M. Comparative studies of dentition. In: Watanabe S, Kondo S, Matsunaga E. (Eds.). *JIBP Synthesis, Vol. 2: Anthropological and genetic studies of the Ainu*. Tokyo: University of Tokyo Press; 1975b. pp. 256-264.

Hardy M-H. Etude de la diversité des populations historiques de Montréal et du Québec par l'analyse de la morphométrie dentaire: le cimetière catholique de la première église Notre-Dame (1691-1796) et le cimetière protestant Saint Matthew de Québec (1771-1860). Mémoire du grade de maîtrise en anthropologie. Université de Montréal, Faculté des Arts et Sciences ; 2015 Déc.

Harris EF. Sex differences in lingual marginal ridging on the human maxillary central incisor. *Am J Phys Anthropol*. 1980; 52: 541-8.

Harris EF. Statistical applications in dental anthropology. In: Irish JD; Nelson GC (Eds.). *Technique and application in dental anthropology*. New York, Cambridge University Press; 2008. pp. 35-67.

Harris EF. Odontogenesis. In: Irish J, Scott GR. *A companion to dental anthropology*. UK: Wiley-Blackwell; 2016. Chapter 11: 142-158.

Hartley R, Zisserman A. *Multiple view geometry in computer vision*. New York, USA: Cambridge University Press; 2003.

Hasegawa Y, Terada K, Kageyama I, Tsukada SI, Uzuka S, Nakahara R, Nakahara S. Influence of shovel-shaped incisors on the dental arch crowding in Mongolian females. *Okajimas Folia Anat Jpn.* 2009 Aug; 86(2):67-72.

Hemphill BE. Measurement of tooth size (Odontometrics). In: Irish J, Scott GR. A companion to dental anthropology. UK: Wiley-Blackwell; 2016. Chapter 19: 287-310.

Hill O. The soft anatomy of a north American Indian. *Am J Phys Anthropol.* 1963; 21:245-70.

Hillson SW. Dental anthropology. Cambridge: Cambridge University Press; 1996.

Hillson SW. Teeth. Cambridge: Cambridge University Press; 2005.

Hillson SW. Tooth development in human evolution and bioarcheology. Cambridge New-York: Cambridge University Press; 2014.

Hlusko LJ, Carlson JP, Chaplin G, Elias SA, Hoffecker JF, Huffman M, Jablonski NG, Monson TA, O'Rourke DH, Pilloud MA, Scott GR. Environmental selection during the last ice age on the mother-to-infant transmission of vitamin D and fatty acids through breast milk. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* (in press, doi.org/10.1073/pnas.1711788115). 2018.

Hoffman JW, de Beer FC. Characteristics of the micro-focus X-ray tomography facility (MIXRAD) at Necsa in South Africa. In: *Proceedings of the 18th World Conference on Nondestructive Testing* (pp. 1-12). Durban: South African Institute for Non-Destructive Testing; 2012.

Hong-Seok P, Chintal S. Development of high speed and high accuracy 3D dental intra-oral scanner. *Procedia Eng.* 2015; 100: 1174-1181.

Hounsfield GN. Computerized transverse axial scanning (tomography): I. Description of system. *Br J Radiol.* 1973; 46: 1016-1022.

Hrdlička A. Shovel-shaped teeth. *Am J Phys Anthropol.* 1920; 3: 429-465.

Hughes I, Hase T. Measurements and their uncertainties: a practical guide to modern error analysis. Oxford: Oxford University Press; 2010.

Irish JD. Biological affinities of late Pleistocene through modern African Aboriginal populations: the dental evidence. PhD dissertation. Tempe: Department of Anthropology, Arizona State University; 1993.

Irish JD. Ancestral dental traits in recent Sub-Saharan Africans and the origins of modern humans. *J Hum Evol.* 1998; 34: 81-98.

Irish JD. Dental nonmetric variation around the world: Using key traits in populations to estimate ancestry in individuals. In: Berg GE, Ta'ala SC (Eds.), Biological affinity in forensic identification of human skeletal remains: beyond Black and White. Boca Raton: CRC Press-Taylor and Francis Group; 2014. pp.165-190.

Irish JD. Terms and terminology used in dental anthropology. In: Irish J, Scott GR. A companion to dental anthropology. UK: Wiley-Blackwell; 2016a. Chapter 7: 87-93.

Irish JD. Assessing dental nonmetric variations among populations. In: Irish J, Scott GR. A companion to dental anthropology. UK: Wiley-Blackwell; 2016b. Chapter 18: 265 -286.

Irish JD, Guatelli-Steinberg D. Ancient teeth and modern human origins: An expanded comparison of African Plio-Pleistocene and recent world dental samples. *J Hum Evol.* 2003; 45: 113-144.

Irish JD, Guatelli-Steinberg D, Legge SS, Ruitter DJ, Berger LR. Dental morphology and the phylogenetic “place” of *Australopithecus sediba*. *Science.* 2013; 340: 1233062.

Irish JD, Guatelli-Steinberg D, Legge SS, Ruitter DJ, Berger LR. Response to “Non-metric dental traits and hominin phylogeny” by Carter et al., with additional information on the Arizona State University Dental Anthropology System and phylogenetic “place” of *Australopithecus sediba*. *J Hum Evol.* 2014 Apr; 69: 129-134.

Irish JD, Scott GR. A companion to dental anthropology. Chichester UK: Wiley Blackwell; 2016.

Jacob HB, Wyatt GD, Buschang PH. Reliability and validity of intraoral and extraoral scanners. *Prog Orthod*. 2015 ; 16 :38.

Jankowski, Ferreti. Tomodensitométrie volumique : principes, paramètres. *Revue des maladies respiratoires*. 2010; 27 (8): 964-969.

Jeong ID, Lee JJ, Jeon JH, Kim JH, Kim HY, Kim WC. Accuracy of complete-arch model using an intraoral video scanner. An in vitro study. *J Prosth Dent*. 2016; 115(6): 755-759.

Jeong Y, Woo EJ, Pak S. No significant difference in the levels of dental fluctuating asymmetry between hypoplastic and non-hypoplastic skeletal groups from the Joseon Dynasty (mid 15th–early 20th century), South Korea. *Archives of Oral Biology*. 2013; 58: 1047-1056.

Jernvall J, Keränen SVE, Thesleff I. Evolutionary modification of development in mammalian teeth: quantifying gene expression patterns and topography. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*. 2000; 97: 14444–14448.

Joint Committee for Guides in Metrology. The international vocabulary of metrology, basic and general concepts and associated terms; 2008.

Kalender WA. X-ray computed tomography. *Phys Med Biol*. 2006; 51: 29-43.

Kanasawa E, Sekikawa M, Kamiakito Y, Ozaki T. A quantitative investigation of irregular cusps in lower permanent molars. Nihon University. *Journal of Oral Science*. 1989; 15: 450-6.

Kelso AJ. Physical anthropology. 2nd Edition. Philadelphia: JB Lippincott; 1974.

Kendall DG, Barden D, Carne TK, Le H. Shape and shape theory. New-York: Wiley; Wiley Series in Probability and Statistics; 1999.

Kharat DU, Saini TS, Mokeem S. Shovel-shaped incisors and associated invagination in some Asian and African populations. *J Dent.* 1990; 18(4):216-220.

Kikuchi S. Two studies on the tooth morphology of Japanese from an orthodontic standpoint. Part 1. On shovel-shaped incisors. *Shigahu.* 1954; 42: 51-54. (English summary)

Kimura R, Yamaguchi T, Takeda M, Kondo O, Toma T, Haneji K, Hanihara T, Matsukusa H, Kawamura S, Maki K, Osawa M, Ishida H, Oota H. A common variation in EDAR is a genetic determinant of shovel-shaped incisors. *Am J Hum Genet.* 2009 Oct; 85(4): 528-535.

Kirveskari P, Alvesalo L. Quantification of the shovel shape of incisor teeth. *OSSA.* 1979; 6: 151-6.

Klingenberg CP, Nijhout HF. Genetics of fluctuating asymmetry: a developmental model of developmental instability. *Evolution.* 1999; 53 (2): 358-375.

Korehnof CAW. Morphogenetical aspects of the human upper molar. Utrecht: Uitgeversmaatschappij Neerlandia ; 1960.

Koo TK, Li MY. A guideline of selecting and reporting intraclass correlation coefficients for reliability research. *Journal of Chiropractic Medicine.* 2017; 15: 155-163.

Kraus BS, Jordan RE. The human dentition before birth. Philadelphia: Lea and Febiger; 1965.

L'Abbé EN, Loots M, Meiring JH. The Pretoria Bone Collection: a modern south african skeletal sample. *Homo.* 2005; 56(2):197-205.

Larsen CS. Bioarchaeology, interpreting behaviour from the skeleton. Cambridge: Cambridge University Press; 1997.

Lasker G. Observations on the teeth of Chinese born and reared in China and America. *Am J Phys Anthropol.* 1945 ; 3 : 129-150.

Lasserre JF. Forme et harmonie de l'incisive centrale. *Inf Dent.* 2008; 41: 2469-74.

Lease LR. Anatomy of individual teeth and tooth classes. In: Irish J, Scott GR. A companion to dental anthropology. UK: Wiley-Blackwell; 2016. Chapter 8: 94-107.

Le Cabec A, Kupczik K, Gunz P, Braga J, Hublin JJ. Anterior tooth root morphology and size in Neanderthals: taxonomic and functional implications. *J Hum Evol.* 2013; 64: 169-193.

Lee GTR, Goose DH. The inheritance of dental traits in a Chinese population in the United Kingdom. *J Med Genet.* 1972; 9: 336-339.

Lehnert B. BlandAltmanLeh package. R Foundation for statistical computing, Vienna, Austria. Contributed package. Version 0.3.1. Available from: <http://www.R-project.org>. 2015.

Ligges U, Mächler M. Scatterplot3d - an R Package for visualizing multivariate data. *Journal of Statistical Software.* 2003; 8: 1-20.

Lima HP, Cunha CM. Reassessing museum archaeological collections: unprecedented osteological and ceramic data for the Sucuriçu site at the Urubu River, Central Amazon, Brazil. *Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi. Ciências Humanas.* 2017; 12 (2): 649-665. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/1981.81222017000200021>.

Liversidge HM. Tooth eruption and timing. In: Irish J, Scott GR. A companion to dental anthropology. UK: Wiley-Blackwell; 2016. Chapter 12: 159-171.

Logozzo S, Zanetti EM, Franceschini G, Kilpela A, Mäkinen A. Recent advances in dental optics-Part I: 3D intraoral scanners for restorative dentistry. *Opt Lasers Eng.* 2014; 54:203-221.

Lombardi AV. Tooth size associations of three morphologic dental traits in a Melanesian population. *J Dent Res.* 1975; 54: 239-43.

MacCallum RC, Zhang S, Preacher KJ, Rucker DD. On the practice of dichotomization of quantitative variables. *Psychological Methods.* 2002; 7: 19-40.

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 (Eds.) *Anthropological perspectives on dental morphology: genetics, evolution, variation*. Cambridge University Press, New York; 2013. pp. 250-277.

Macchiarelli R, Bondioli L, Mazurier A. Virtual dentition: touching the hidden evidence. In: Irish JD, Nelson GC (Eds). *Technique and application in dental anthropology*. Cambridge: Cambridge University Press; 2008. pp. 426-448.

Marado LM. Characterization of the dental morphology of a Portuguese sample from the 19th and 20th centuries. Tese de doutoramento in antropologia biologica. Faculdade de Ciencias e Tecnologia da Universidade de Coimbra ; 2014.

Markow TA. Evolutionary ecology and developmental instability. *Annual Review of Entomology*. 1995; 40: 105-120.

Martinón-Torres M, Bermúdez de Castro JM, Gómez-Robles A, Arsuaga JL, Carbonell E, Lordkipanidze D, Manzi G, Margvelashvili A. Dental evidence on the hominin dispersals during the Pleistocene. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*. 2007 ; 104 : 13279-13282.

Martinón-Torres M, Bermúdez de Castro JM, Martín-Francés L, Gracia-Telléz A, Martínez I, Arsuaga JL. Dental morphology of European Middle Pleistocene populations. In: Scott GR; Irish JD (Eds.). *Anthropological perspectives on dental morphology: genetics, evolution, variation*. Cambridge University Press, New York; 2013. pp. 201-221.

MATLAB and Statistics Toolbox Release. The MathWorks, Inc, Natick, Massachusetts, United States. R 2017 b.

Mayer R. *Scientific Canadian: invention and innovation from Canada's national research council*. Vancouver: Raincoast Books; 1999.

McCown TD, Keith A. The stone age of Mount Camel, Vol. II: The fossil human remains from the Levalloiso-Mousterian. Oxford: Clarendon Press; 1939.

McKusick VA. Mendelian inheritance in man. 9th Edition. Baltimore: The Johns Hopkins University Press; 1990.

Metairie L. Apports de la morphométrie géométrique à la paléanthropologie dentaire. Thèse pour le diplôme d'état de Docteur en Chirurgie Dentaire. UFR d'Odontologie de Lyon ; 2014 Déc.

Middleton Shaw JC. The teeth, the bony palate, and the mandible in the Bantu races of South Africa. London: Bale and Danielsson ; 1931.

Minkov T. Antropologo-odontological types of the contemporary people of Bulgaria. *Garcia de Orta, Série de Antropobiologia*. 1983; 2 (1-2): 109-110.

Mizoguchi Y. Tooth crown characters on the lingual surfaces of the maxillary anterior teeth: analysis of the correlations by the method of path coefficients. *Bulletin of the national science museum, series D (anthropology)*. 1978; 4: 25-27.

Mizoguchi Y. Shoveling: a statistical analysis of its morphology. Bulletin n°26. Tokyo: University of Tokyo Press; 1985.

Mizogushi Y. Significant among-population associations found between dental characters and environmental factors. In: Scott GR, Irish JD (Eds.). Anthropological perspectives on tooth morphology, genetics, evolution, variation. Cambridge: Cambridge University Press; 2013. pp. 108-125.

Molnar S. Races, types and ethnic groups. Englewood Cliffs: Prentice-Hall; 1975.

Montgomery RL. Register to the papers of Ales Hrdlicka. National anthropological Archives: Smithsonian Institution; 1996.

Moorrees CFA. The Aleut dentition. Cambridge: Harvard University Press; 1957.

Moussally C, Coudray L, Attal JP. L’empreinte optique. *Alternatives*. 2007; 33 : 23-32.

Murat Canger E, Celenk P, Cankaya S. Shovel shaped incisors in the Black Sea region population of Turkey. *Journal of Dental Sciences*. 2014; 9(3): 253-257.

Nanci A. Ten cate’s oral histology. 8th edition. St. Louis, MO: Elsevier Mosby; 2013.

Nichol CR, Turner CG II. Intra- and interobserver concordance in classifying dental morphology. *Am J Phys Anthropol*. 1986. 69: 299-315.

Nilsson F. Intelligent network video: understanding modern video surveillance systems. Boca Raton: CRC Press; 2009. 389 p.

Niven L, Steele TE, Finke H, Gernat T, Hublin JJ. Virtual skeletons: using a structured light scanner to create a 3D faunal comparative collection. *Journal of Archaeological Science*. 2009; 36: 2018–2023.

Ohshima H. Overview: developmental biology of Hertwig's epithelial root sheath (HERS) and tooth root formation. *Journal of Oral Biosciences*. 2008; 50: 147-153.

Ouadour M. Principe de tomographie et spectro-tomographie optique de cohérence par intercorrélacion sans balayage basée sur un réseau de diffraction. Sciences de l’ingénieur : Université de Franche-Comté ; 2009. <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00544927>.

Oxnard CE. Fossils, teeth and sex: new perspectives on human evolution. Seattle, WA: University of Washington Press; 1987.

Park JH, Yamaguchi T, Watanabe C, Kawaguchi A, Haneji K, Takeda M, Kim YI, Tomoyasu Y, Watanabe M, Oota H, Hanihara T, Ishida H, Maki K, Park AB, Kimura R. Effects of an asian-specific nonsynonymous EDAR variant on multiple dental traits. *J Hum Gen*. 2012; 57: 508-514.

Palmer AR. Waltzing with asymmetry. *BioScience*. 1996; 46 (7): 518-532.

Patte E. La dentition des Néanderthaliens. *Ann Paléontol*. 1959; 45: 1–162.

Pedersen PO. The east Greenland Eskimo dentition. *Meddelelser om Gronland*. 1949 ; 142 :1-244.

Perrard A. Systématique et morphométrie géométrique : l'évolution de la nervation alaire au sein du genre *Vespa* (Hyménoptères : Vespidae). Thèse de doctorat : Histoire Naturelle. Paris : Museum National d'Histoire Naturelle, Ecole doctorale « sciences de la nature et de l'homme »; 2012.

Pilbrow V. Dental variation in African apes with implications for understanding patterns of variation in species of fossil apes. PhD Dissertation. New York: University of New York; 2003.

Pollefeys M, Vergauwen M, Cornelis K, Verbiest F, Schouteden J, Tops J, Gool, LV. 3D acquisition of archaeological heritage from images. In: CIPA International Symposium, Potsdam; 2001.

Portin P, Alvesalo L. The inheritance of shovel-shape in maxillary central incisors. *Am J Phys Anthropol*. 1974; 41: 59-62.

Pradies G, Ferreira A, Ozcan M, Gimenez B, Martinez-Rus F. Using stereophotogrammetric technology for obtaining intraoral digital impressions of implants. *J Am Dent Assoc*. 2014; 145(4): 338-344.

R Core Team. R Foundation for statistical computing. Vienna, Austria. Version 3.4.3. Available from: <http://www.R-project.org>. 2018.

Richert R, Goujat A, Venet L, Viguie G, Viennot S, Robinson P, Farges JC, Fages M, Ducret M. Intraoral scanner technologies: a review to make a successful impression. *J Health Eng*. 2017; 8427595, 9 pages. <https://doi.org/10.1155/2017/8427595>.

Rizk OT, Amugongo SK, Mahaney MC, Hlusko LJ. The quantitative genetic analysis of primate dental variation: history of the approach and prospects for the future. In: Irish JD; Nelson GC (Eds.) *Technique and application in dental anthropology*. New York, Cambridge University Press; 2008. pp. 317-346.

Robinson JT. The dentition of Australopithecinae. Transvaal Museum Memoir, No. 9. Transvaal Museum, Pretoria; 1956.

Rohlf FJ. Shape statistics: Procrustes superimpositions and tangent spaces. *Journal of Classification*. 1999; 16:197-223.

Rohlf FJ, Marcus LF. A revolution morphometrics. *Trends in Ecology & Evolution*. 1993; 8(4), 129–132.

Romeroswski J, Boccara E. Comprendre l'anatomie dentaire. *AOS*. 2017; 282: 1-14. <https://doi.org/10.1051/aos/2017022>.

Rose JC, Burke DL. The dentist and the archeologist: The role of dental anthropology in north american bioarcheology. In: Buikstra JE, Beck LA. (Eds.) *Bioarchaeology: the contextual analysis of human remains*. San Diego, Academic Press; 2006. pp. 323-346.

Rothhammer F, Lasserre E, Blanco R, Covarubbias E, Dixon M. Microevolution in Chilean populations. IV. Shovel-shape, mesial-palatal version and other dental traits in Pewenche Indians. *Zeitschrift fur Morphologie und Anthropologie*. 1968; 60:162-9.

Sakai T. Shovel-shaped incisors in the Japanese. *Shinshu Med J*. 1954; 3: 316-320. (English summary.)

Salazar-Ciudad I, Jernvall J. A gene network model accounting for development and evolution of mammalian teeth. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*. 2002; 99: 8116-8120.

Salazar-Ciudad I, Jernvall J. A computational model of teeth and the developmental origins of morphological variation. *Nature*. 2010; 464: 583-586.

Saunders SR, Mayhall JT. Developmental patterns of human dental morphological traits. *Arch Oral Biol*. 1982; 27(1):45-9.

Saunders SR, Popovich F. A family study of two skeletal variants: atlas bridging and clinoid bridging. *Am J Phys Anthropol.* 1978; 49: 193-204.

Schout PE, Fleiss JL. Intraclass correlations: uses in assessing rater reliability. *Psychological Bulletin.* 1979; 86: 420-428.

Scott GR. Dental morphology: a genetic study of american white families and variation in living southwest Indians. PhD dissertation. Tempe: Department of Anthropology, Arizona State University; 1973.

Scott GR. Association between non-metrical tooth crown characteristics. *Am J Phys Anthropol.* 1975; 42:328.

Scott GR. Association between the hypocone and Carabelli's trait of the maxillary molars. *J Dent Res.* 1979; 58: 1403-4.

Scott GR. Dental morphology. In: Biological anthropology of the human skeleton. 2nd Edition. Katzenberg MA., Saunders SR. New-York: Wiley-Liss; 2008.

Scott GR. A brief history of dental anthropology. In: Irish J, Scott GR. A companion to dental anthropology. UK: Wiley-Blackwell; 2016. Chapter 2: 8-17.

Scott GR, Irish JD. Anthropological perspectives on tooth morphology. UK: Cambridge University Press; 2013.

Scott GR, Irish JD. Human tooth crown and root morphology. The Arizona State University dental anthropology system. Cambridge UK: Cambridge University Press; 2017.

Scott GR, Maier C, Heim K. Identifying and recording key morphological (nonmetric) crown and root traits. In: Irish J, Scott GR. A companion to dental anthropology. UK: Wiley-Blackwell; 2016. Chapter 17: 247-264.

Scott GR, Turner CG II. Dental anthropology. *Annual review of Anthropology.* 1988; 17: 99-126.

Scott GR, Turner CG. The anthropology of modern human teeth. Dental morphology and its variation in recent human populations. 2nd Ed. Cambridge UK: Cambridge University Press; 1997.

Scott GR, Turner CG II. History of dental anthropology. In: Irish JD, Nelson GC (Eds.) Technique and application in dental anthropology. New York, Cambridge University Press; 2008. pp. 10-34.

Scott GR, Turner CG, Townsend GC, Martínón-Torres M. The anthropology of modern human teeth. Dental morphology and its variation in recent and fossil *Homo sapiens*. Cambridge: Cambridge University Press; 2018.

Seitz SM, Curless B, Diebel J, Scharstein D, Szeliski R. A comparison and evaluation of multi-view stereo reconstruction algorithms. In: *Proceedings of the 2006 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, Washington DC; 2006. pp. 519-528.

Sekikawa M, Kanasawa E, Ozaki T. Study of the cuspal ridges of the upper first molars in a modern Japanese population. *Acta anatomica*. 1987a; 129:159-64.

Sekikawa M, Kanasawa E, Ito T, Ozaki T. Cuspal ridges of the lower first molars in a modern Japanese population. *Japanese Journal of Oral Biology*. 1987b; 29: 763-9.

Siegel MI, Doyle WJ. The differential effects of prenatal and postnatal audiogenic stress on fluctuating dental asymmetry. *Journal of Experimental Zoology*. 1975a; 191: 211-14.

Siegel MI, Doyle WJ. The effect of cold stress on fluctuating asymmetry in the dentition of the mouse. *Journal of Experimental Zoology*. 1975b; 193:385-9.

Siegel MI, Doyle WJ, Kelley C. Heat stress, fluctuating asymmetry and prenatal selection in the laboratory rat. *Am J Phys Anthropol*. 1977; 46: 121-6.

Siegel MI, Mooney MP. Perinatal stress and increased fluctuating asymmetry of dental calcium in the laboratory rat. *Am J Phys Anthropol*. 1987; 73:267-70.

Sjovold T. A report of the heritability of some cranial measurements and non-metric traits. In: Van Vark GN, Howells WW (Eds.). *Multivariate statistics in physical anthropology*. D. Reidel, Dordrecht; 1984. pp 223-246.

Skinner MM, Wood BA, Boesch C, Olejniczak AJ., Rosas A, Smith TM, Hublin JJ. Dental trait expression at the enamel-dentine junction of lower molars in extant and fossil hominoids. *J Hum Evol*. 2008; (54): 173-186.

Smith HB. Patterns of molar wear in hunter-gatherers and agriculturalists. *Am J Phys Anthropol*. 1984; 63: 39-56.

Sofaer JA, MacLean CJ, Bailit HL. Heredity and morphological variation in early and late developing human teeth of the same morphological class. *Archs Oral Biol*. 1972a; 17: 811-816.

Sofaer JA, Niswander JD, MacLean CJ, Workman PL. Population studies on southwestern Indian tribes. V. Tooth morphology as an indicator of biological distance. *Am J Phys Anthropol*. 1972b; 37: 357-366.

Spoor CF, Zonneveld FW, Macho GA. Linear measurements of cortical bone and dental enamel by computed tomography: applications and problems. *Am J Phys Anthropol*. 1993; 91: 469-484.

Suzuki M, Sakai T. Morphological analysis of the shovel-shaped teeth. *J Anthropol Soc. Nippon*. 1966; 74: 202-218. (English summary.)

Taverne PP, Amesz-Voorhoeve WHM, Leertouwer HL. A photogrammetric method which provides geometric data in dental morphology. *Zeitschrift fur Morphologie und Anthropologie*. 1979; 70: 163-173.

Ting-Shu S, Jian S. Intra-oral digital impression technique: a review. *J Prosthodont*. 2015; 7(6): 460-467.

Townsend G, Kanazawa E, Takayama H. *News directions in dental anthropology: paradigms, methodologies and outcomes*. Australia: University of Adelaide Press; 2012.

Turner CG II. Dental genetics and microevolution in prehistoric and living Koniag Eskimo. *J Dent Res.* 1967; 46 (suppl. to no.5): 911-17.

Turner CG II. New classifications of non-metrical dental variations: cups 6 and 7. Paper presented at 39th annual meeting of the American Association of Physical Anthropologists, Washington DC; 1970.

Turner CG II. Dental evidence on the origins of the Ainu and Japanese. *Science.* 1976; 193: 911-13.

Turner CG II. Major features of sundadonty and sinodonty, including suggestions about East Asian microevolution, population history, and Late Pleistocene relationships with Australian aboriginals. *Am J Phys Anthropol.* 1990; 82: 295-317.

Turner CG II. Bite marks in tule quids: the life and times of a dental anthropologist. In: Scott G R, Irish JD (Eds.). *Anthropological perspectives on dental morphology: genetics, evolution, variation.* Cambridge University Press, New York; 2013. pp.16-30.

Turner CG II, Nichol CR, Scott GR. Scoring procedures for key morphological traits of the permanent dentition: the Arizona State University Dental Anthropology System. In: Kelley MA, Larsen CS (Eds). *Advances in dental anthropology.* Wiley Liss; 1991. pp 13-31.

Ungar PS. *Evolution's bite.* United Kingdom: Princeton University Press; 2017.

Vargiu R, Cucina A, Coppa A. Italian populations during the Copper Age: assessment of biological affinities through morphological dental traits. *Hum Biol.* 2009 Aug; 81(4):479-93.

Vecsei B, Joos-Kovacs G, Borbely J, Hermann P. Comparison of the accuracy of direct and indirect three-dimensional digitizing processes for CAD-CAM systems. An in vitro study. *J Prosthodont Res.* 2016 ; S1883-1958 (16) : 30062-30067.

Vuillien M, Sorin S, Gourichon L. Morphométrie géométrique et 3D : premières analyses des morphotypes ovins et caprins. *ArchéOrient - Le Blog.* 2017 Jan 6, [En ligne] <https://archeorient.hypotheses.org/6985>.

Weidenreich F. The dentition of *Sinanthropus pekinensis*: a comparative odontography of the hominids. *Palaeontologia Sinica. NSD.* 1937; No. 1 (Whole Series No. 101): 1-180 (atlas in separate volume, 1-121).

Weiss ML, Mann AE. Human biology and behavior. 2nd Edition. Boston: Little, Brown; 1978.

Wheeler RC. A textbook of dental anatomy and physiology. WB Saunders Co édit, Philadelphia; 1968.

White T, Black M, Folkens P. *Traité d'ostéologie humaine (Anatomie / Anthropologie /Paléontologie)*. Ed. de Broeck supérieur. Elsevier; 2016.

Wolpoff MH. Metric trends in hominid dental evolution. Cleveland: Case Western Reserve University Press; 1971.

Zanolli C. Additional evidence for morpho-dimensional tooth crown variation in a new Indonesian *H. erectus* sample from the Sangiran Dome (Central Java). *PLoS One.* 2013; 8: e67233.

Zanolli C, Bondioli L, Coppa A, Dean CM, Bayle P, Candilio F, Capuani S, Dreossi D, Fiore I, Frayer DW, Libsekal Y, Mancini L, Rook L, Medin Tekle T, Tuniz C, Macchiarelli R. The late Early Pleistocene human dental remains from Uadi Aalad and Mulhuli-Amo (Buia), Eritrean Danakil: macromorphology and microstructure. *J Hum Evol.* 2014 Sep; 74:96-113.

Zanolli C, Hourse M, Esclassan R, Mollereau C. Neanderthal and Denisova tooth protein variants in present-day humans. *PLoS One.* 2017; 12: e01838.

Zimmermann M, Mehl A, Mormann WH, Reich S. Intra-oral scanning systems - a current overview -. *Int. J Comput Dent.* 2015; 18(2):101-129.

Zubov AA. Odontoglyphics: the laws of variation of the human molar crown relief. In Dahlberg AA and Graber TM (Eds.). *Oralfacial growth and development*, The Hague: Mouton Publishers; 1977. pp.269-8.

ANNEXES

Annexe I. Fréquence des caractères discrets dentaires par groupe populationnel.

1. Fréquence des caractères discrets dentaires en Eurasie Occidentale (Europe de l'Ouest, Europe du Nord, Afrique du Nord).

Fréquence	Caractères discrets dentaires
Élevée	LM1 et LM2 à 4 cuspides LC à 2 racines Tubercule de Carabelli UM2 à 3 cuspides
Intermédiaire	UI2 avec sillon d'interruption LM2 avec configuration en Y UP1 avec 2 racines UM2 avec 3 racines LM2 avec 1 racine
Faible	Tous les autres traits dont le <i>Shoveling</i>

(Scott and Turner, 1997; Hardy, 2015)

2. Fréquence des caractères discrets dentaires en Afrique Sub-Saharienne (Afrique de l'Ouest, Afrique du Sud, San)

Fréquence	Caractères discrets dentaires
Élevée	Cuspide 7 sur LM1 Crête mésiale de la canine Configuration en Y de LM2 UP1 à 2 racines UM2 à 3 racines LM2 à 2 racines Présence de UM3 Racine de Tomes sur LP1
Intermédiaire	Tubercule de Carabelli sur UM1 Cuspide 5 Cuspide 6 Crête mésiale incurvée du métaconide Convexité labiale Diastème entre les UI1
Faible	LM2 à 1 racine LC à 2 racines LM1 à 3 racines UM2 avec 3 cuspides LM1 et LM2 avec 4 cuspides Double <i>shoveling</i> Extension de l'émail sur UM1 La plupart des autres traits dont le <i>Shoveling</i>

(Scott and Turner, 1997; Hardy, 2015)

3. Fréquence des caractères discrets dentaires dans le complexe sino-américain (Chine-Mongolie, Japon (moderne), Japon (Jomon) , Nord-Est de la Sibérie, Sibérie du Sud, arctique américain, nord-Ouest de l'Amérique du Nord, Amérique du nord et du sud).

Fréquence	Caractères discrets dentaires
Élevée	<u><i>Shoveling</i></u> Rotation des incisives centrales supérieures Double <i>shoveling</i> Sillon d'interruption Odontomes Extension de l'émail sur UM1 Cuspide 6 Crête mésiale incurvée du métaconide LM2 à 1 racine LM1 à 3 racines Taille réduite de UM3 UP1 à 1 racine
Intermédiaire	Tubercule de Carabelli (mais très rare chez les Amérindiens) UM2 avec 3 cuspides (mais très commun chez les Amérindiens de l'Arctique) UM2 avec 4 cuspides LC à 2 racines Racine de Tomes sur LP1
Faible	UP1 à 2 racines (surtout pour les Amérindiens) UM2 à 3 racines Crête mésiale de la canine Cuspide 5 Cuspide 7 LM1-2-3 avec 4 cuspides LM2 avec configuration en Y

(Scott and Turner, 1997; Hardy, 2015)

4. Fréquence des caractères discrets dentaires dans le complexe Sunda-Pacifique (Asie du Sud-Est – préhistorique-, Asie du Sud-Est-moderne-, Polynésie, Micronésie).

Fréquence	Caractères discrets dentaires
Élevée	Tubercule de Carabelli Cuspide 6
Intermédiaire	Les groupes du Sunda-Pacifique ont une fréquence intermédiaire pour la plupart des traits et peu de traits les différencient des autres régions par une fréquence élevée. Ils se distinguent donc par leur positionnement intermédiaire pour la plupart des traits dont le <u><i>Shoveling</i></u> .
Faible	Crête mésiale de la canine Cuspide 7 LM1 à 4 cuspides

(Scott and Turner, 1997; Hardy, 2015)

5. Fréquence des caractères discrets dentaires dans le complexe Sahul-Pacifique (Australie, Nouvelle-Guinée, Mélanésie).

Fréquence	Caractères discrets dentaires
Élevée	Cuspide 5 (Seulement la forte fréquence de la cuspide 5 les différencie des autres régions) Tubercule de Carabelli Cuspide 6
Intermédiaire	Odontome LM1 et LM2 avec 4 cuspides (mais très variable) Configuration des sillons en Y pour LM2 Crête médiale incurvée du métaconide UP1 à 2 racines Racine de Tomes sur LP1 UM2 à 3 racines
Faible	Rotation des incisives centrales supérieures <i>Shoveling</i> Double <i>shoveling</i> Sillon d'interruption Crête mésiale de la canine UM2 avec 3 cuspides Extension de l'émail Cuspide 7 LC à 2 racines LM2 à 1 racine LM1 à 3 racines

(Scott and Turner, 1997; Hardy, 2015)

Annexe 2. Rappels des principes de la morphométrie géométrique (MG).

Notions de conformation géométrique. L'équation de Needham donne une définition synthétique de la conformation géométrique d'un objet : « forme = taille + conformation » (Bookstein, 1991). La conformation géométrique d'un objet correspond à la forme de cet objet indépendamment de sa taille. La MG vise à quantifier la conformation géométrique qui peut être décrite par différents moyens : surface, courbe de contour ou points repères. La technique des points repères est la plus utilisée. La conformation géométrique est alors décrite par les coordonnées des points repères et reste indépendante de la taille, de la rotation et de la localisation de l'objet (Bookstein, 1991, Kendall et al., 1999, Gomez-Robles et al., 2008, Perrard, 2012).

Notions de points repères. Afin de décrire la conformation géométrique d'un objet, il est nécessaire d'avoir des points de repères précis et homologues c'est-à-dire repérables de façon certaine sur l'ensemble des individus comparés dans l'échantillon. Le point-repère désigne un point précis (*landmark*) et est comparé individuellement à un autre point-repère homologue. Sa position en 3D est décrite par un ensemble de coordonnées x,y,z (Andrieux et al., 2000 ; Guipert, 2005 ; Métairie, 2014). Bookstein distingue 3 types de points repères :

-**Type I** : point mathématique dont l'homologie est assurée par une homologie biologique unique et certaine (point situé à l'intersection de différents tissus ou éléments architecturaux).

-**Type II** : point mathématique dont l'homologie ne repose que sur des données géométriques et non sur des critères biologiques ou histologiques (point situé à l'extrémité d'un même tissu ou point de courbure maximale, par exemple).

-**Type III** : point mathématique ayant au moins une coordonnée qui est "déficiente" dans le sens où son emplacement dépend logiquement de l'emplacement d'autres points de repère et/ou de l'orientation de l'échantillon. L'homologie de ce point est incertaine car il est construit par l'expérimentateur et situé à distance d'un élément anatomique repérable.

Les points repères de type I sont les plus fiables de par leur précision et leur reproductibilité.

Notion de points glissants.

Dans certaines situations, par exemple pour l'étude d'une région anatomique dépourvue de points-repères identifiables et précis, l'utilisation des points-repères peut s'avérer trop imprécise.

Dans notre étude, la face palatine de l'incisive centrale maxillaire est dépourvue de points de repères identifiables et précis. Nous avons alors recours aux points glissants (ou « *sliding semi-landmarks* »).

Les points glissants sont une série de points ordonnés, désignant une zone, un contour ou une surface. Ils permettent d'enregistrer des informations concernant des zones situées entre les points repères. Il est donc nécessaire de limiter le nombre de points glissants (chaque point glissant induisant un grand nombre de variables).

Dans le cadre de notre étude, le *shovel* est assimilée à une série de points glissants. La représentation mathématique du *shovel* est une *Bspline* (généralisation de *Spline*). Pour rappel, les *splines* sont des fonctions mathématiques définies par des polynômes, utilisées pour représenter numériquement des contours complexes. Dans le cas du *shovel*, la courbe elliptique le préfigurant n'est pas nécessairement une fonction car il peut y avoir plus d'une valeur pour une abscisse donnée, ce qui explique l'utilisation des *B-Spline*.

Annexe 3. Liste des 87 UI1 humaines modernes.

Code	Spécimens	Origine géographique	Antimères	Origine chronologique	Lieu de Conservation
SA1	5816	Afrique du Sud	11	Contemporain	PBC
SA2	5816	Afrique du Sud	21	Contemporain	PBC
SA3	5958	Afrique du Sud	21	Contemporain	PBC
SA4	5885	Afrique du Sud	11	Contemporain	PBC
SA5	5885	Afrique du Sud	21	Contemporain	PBC
SA6	5912	Afrique du Sud	21	Contemporain	PBC
SA7	5953	Afrique du Sud	11	Contemporain	PBC
SA8	5953	Afrique du Sud	21	Contemporain	PBC
SA9	5981	Afrique du Sud	11	Contemporain	PBC
SA10	6002	Afrique du Sud	21	Contemporain	PBC
SA11	6035	Afrique du Sud	11	Contemporain	PBC
SA12	6035	Afrique du Sud	21	Contemporain	PBC
SA13	6058	Afrique du Sud	11	Contemporain	PBC
SA14	6058	Afrique du Sud	21	Contemporain	PBC
SA15	6093	Afrique du Sud	11	Contemporain	PBC
SA16	6119	Afrique du Sud	11	Contemporain	PBC
SA17	6119	Afrique du Sud	21	Contemporain	PBC
SA18	6141	Afrique du Sud	11	Contemporain	PBC
SA19	6141	Afrique du Sud	21	Contemporain	PBC
SA20	6145	Afrique du Sud	21	Contemporain	PBC
SA21	6177	Afrique du Sud	21	Contemporain	PBC
SA22	6217	Afrique du Sud	21	Contemporain	PBC
SA23	6220	Afrique du Sud	11	Contemporain	PBC
SA24	6220	Afrique du Sud	21	Contemporain	PBC
SA25	6247	Afrique du Sud	21	Contemporain	PBC
SA26	6251	Afrique du Sud	11	Contemporain	PBC
SA27	6251	Afrique du Sud	21	Contemporain	PBC
SA28	6252	Afrique du Sud	21	Contemporain	PBC
SA29	6287	Afrique du Sud	11	Contemporain	PBC
SA30	6287	Afrique du Sud	21	Contemporain	PBC
CH1	01	Chine	11	Néolithique	IPVPP
CH2	02	Chine	21	Néolithique	IPVPP
CH3	03	Chine	11	Néolithique	IPVPP
CH4	04	Chine	21	Néolithique	IPVPP
CH5	05	Chine	21	Néolithique	IPVPP
CH6	06	Chine	11	Néolithique	IPVPP
CH7	07	Chine	11	Néolithique	IPVPP
CH8	08	Chine	21	Néolithique	IPVPP
CH9	09	Chine	11	Néolithique	IPVPP
CH10	10	Chine	11	Néolithique	IPVPP
CH11	11	Chine	21	Néolithique	IPVPP
CH12	12	Chine	11	Néolithique	IPVPP
CH13	13	Chine	21	Néolithique	IPVPP
FM1	2	« La Sabatière » France	21	Médiéval	INRAP
FM2	2	« La Sabatière » France	11	Médiéval	INRAP
FM3	3328	« La Sabatière » France	21	Médiéval	INRAP
FM4	3384	« La Sabatière » France	11	Médiéval	INRAP
FM5	3384	« La Sabatière » France	21	Médiéval	INRAP
FM6	3053	« La Sabatière » France	21	Médiéval	INRAP
FM7	3295	« La Sabatière » France	11	Médiéval	INRAP
FM8	5125	« La Sabatière » France	11	Médiéval	INRAP
FM9	5009	« La Sabatière » France	11	Médiéval	INRAP
FM10	1368	« La Sabatière » France	21	Médiéval	INRAP
FM11	3382	« La Sabatière » France	21	Médiéval	INRAP
FM12	3062	« La Sabatière » France	11	Médiéval	INRAP

FM13	5092	« La Sabatière » France	21	Médiéval	INRAP
FM14	5092	« La Sabatière » France	11	Médiéval	INRAP
FM15	3386	« La Sabatière » France	11	Médiéval	INRAP
FM16	3441	« La Sabatière » France	21	Médiéval	INRAP
FM17	5099	« La Sabatière » France	21	Médiéval	INRAP
FM18	5099	« La Sabatière » France	11	Médiéval	INRAP
FM19	5156	« La Sabatière » France	21	Médiéval	INRAP
FM20	5156	« La Sabatière » France	11	Médiéval	INRAP
FM21	1179	« La Sabatière » France	11	Médiéval	INRAP
FM22	5193	« La Sabatière » France	21	Médiéval	INRAP
FM23	3530	« La Sabatière » France	21	Médiéval	INRAP
FM24	5009	« La Sabatière » France	21	Médiéval	INRAP
FM25	5193	« La Sabatière » France	11	Médiéval	INRAP
FM26	5063	« La Sabatière » France	11	Médiéval	INRAP
FM27	5125	« La Sabatière » France	21	Médiéval	INRAP
FM28	3053	« La Sabatière » France	11	Médiéval	INRAP
FM29	1368	« La Sabatière » France	11	Médiéval	INRAP
FM30	3295	« La Sabatière » France	21	Médiéval	INRAP
FM31	3063	« La Sabatière » France	21	Médiéval	INRAP
FC1	32	France	21	Contemporain	MHNT
FC2	33	France	11	Contemporain	MHNT
FC3	34	France	21	Contemporain	MHNT
FC4	35	France	21	Contemporain	MHNT
FC5	36	France	21	Contemporain	MHNT
FC6	37	France	11	Contemporain	MHNT
FC7	38	France	21	Contemporain	MHNT
FC8	39	France	11	Contemporain	MHNT
FC9	40	France	11	Contemporain	MHNT
FC10	41	France	21	Contemporain	MHNT
FC11	42	France	11	Contemporain	MHNT
FC12	43	France	11	Contemporain	MHNT
FC13	44	France	21	Contemporain	MHNT

¹MHNT : Museum d'Histoire Naturelle de Toulouse (France);

²INRAP : Institut National de Recherches Archéologiques Préventives de St-Estève (France);

³IPVPP : Institut de Paléontologie des Vertébrés et de Paléoanthropologie de Pékin(Chine);

⁴PBC : Pretoria Bone Collection du Département d'Anatomie de l'Université de Pretoria (Afrique du Sud).

Annexe 4. Liste des 30 UI1 humaines modernes Sud-Africaines.

Code	Spécimens	Date du décès	Sexe	Ascendance	Ethnie	Age	Crâne
SA1	5816-11	12-11-1993	M	Black	Ndebele	29	1
SA2	5816-21	12-11-1993	M	Black	Ndebele	29	1
SA3	5958-21	22-06-1995	M	Black	Nsotho	34	1
SA4	5885-11	25-06-1994	M	Black	Black	32	1
SA5	5885-21	25-06-1994	M	Black	Black	32	1
SA6	5912-21	02-10-1994	M	Black	Black	37	1
SA7	5953-11	15-05-1995	M	Black	Swazi	27	1
SA8	5953-21	15-05-1995	M	Black	Swazi	27	1
SA9	5981-11	10-09-1995	M	Black	Black	45	1
SA10	6002-21	19-12-1995	M	Black	Black	36	1
SA11	6035-11	21-05-1996	M	Black	Zulu	39	1
SA12	6035-21	21-05-1996	M	Black	Zulu	39	1
SA13	6058-11	28-08-1996	M	Black	N Sotho	30	1
SA14	6058-21	28-08-1996	M	Black	N Sotho	30	1
SA15	6093-11	21-02-1997	M	Black	Black	52	1
SA16	6119-11	20-06-1997	M	Black	Black	26	1
SA17	6119-21	20-06-1997	M	Black	Black	26	1
SA18	6141-11	09-11-1997	M	Black	Black	40	1
SA19	6141-21	09-11-1997	M	Black	Black	40	1
SA20	6145-21	15-12-1997	F	Black	Black	46	1
SA21	6177-21	06-05-1998	F	Black	Black	23	1
SA22	6217-21	03-01-1999	M	Black	Black	35	1
SA23	6220-11	30-01-1999	M	Black	Black	27	1
SA24	6220-21	30-01-1999	M	Black	Black	27	1
SA25	6247-21	12-07-1999	M	Black	Black	54	1
SA26	6251-11	-	-	-	-	-	-
SA27	6251-21	-	-	-	-	-	-
SA28	6252-21	07-08-1999	M	Black	Black	46	1
SA29	6287-11	-	-	-	-	-	-
SA30	6287-21	-	-	-	-	-	-

Annexe 5. Rappels de définitions générales en imagerie.

La résolution spatiale. La résolution spatiale permet de déterminer la dimension du plus petit détail observable sur une image. Elle correspond à la distance au-dessous de laquelle un système d'acquisition ne peut plus séparer 2 points. La résolution est définie par la taille du voxel (unité de volume formé par un pixel- carré élémentaire à l'origine de la formation de l'image- et la profondeur-épaisseur- de la coupe). La résolution spatiale est principalement fonction de la taille du point focal de la source, de la taille de l'élément détecteur (c'est-à-dire la taille de la matrice et la taille des pixels) et de la configuration géométrique du système d'imagerie qui combine les distances entre le détecteur, la source et l'échantillon. Dans le cas des microsystèmes de tomodensitométrie, la source de rayons X a généralement une taille de point focal qui peut être inférieure à 1 μm si nécessaire (Braga, 2016). Plus la résolution spatiale est élevée, plus la lecture de détails précis est possible.

La précision. Elle est définie comme la quantité de certitude dans une mesure par rapport à une mesure absolue ou le degré auquel une mesure est conforme à une norme. La précision inclut la marge d'erreur inhérente à la mesure.

Le coefficient d'atténuation. Dans les systèmes d'imagerie à RX, à chaque voxel de la matrice de reconstruction correspond un coefficient d'atténuation, appelé aussi densité d'un voxel, mesuré en unités Hounsfield (UH) sur une échelle allant de -1000 pour l'air à +1000, le 0 correspondant à la densité de l'eau, +1000 étant la densité de l'os compact. La densité d'une structure tissulaire varie entre 20 et 80 UH et une structure grasseuse entre - 40 et - 120 UH. L'œil humain ne distinguant que 16 niveaux de gris, l'éventail des 2000 densités du corps humain (de -1000 à +1000 UH) ne peuvent être vues simultanément à l'écran. Parmi ce large éventail de densités, on définit alors une fenêtre de densités qui seront effectivement traduites en niveaux de gris à l'écran. La taille de la fenêtre utilisée dépend de la densité du tissu étudié (Hounsfield, 1973 ; Kalender, 2006 ; Jankowski et Ferretti, 2010).

La résolution du contraste. La résolution du contraste est la capacité à distinguer deux structures anatomiques dont la densité est proche (faible contraste naturel). La résolution du contraste est principalement déterminée par le flux de rayons X et la taille de l'élément détecteur (pixel).

Le rapport signal/bruit (SNR =Signal Noise Ratio). La résolution du contraste est altérée par le bruit image, qui se traduit visuellement par un granité sur l'image. Ce bruit gêne beaucoup plus la visualisation des structures à faible contraste naturel. Le bruit peut être mesuré sur une image par la déviation standard des densités mesurées au sein d'une structure homogène. Ce bruit augmente avec :

- la diminution de la dose de Rayons X,
- la diminution de l'épaisseur de coupe reconstruite,
- le filtre de reconstruction de l'image (Jankowski et Ferretti, 2010).

Le rapport signal/bruit est une mesure physique de la sensibilité du système d'imagerie. Il compare le niveau de l'information utile - c'est-à-dire du signal désiré - au niveau du bruit de fond, c'est-à-dire le signal non désiré.

Annexe 6. Fiche technique sur l'imagerie non invasive active avec des rayonnements ionisants.

Le micro-CT utilise des rayons X traditionnels et présente comme différences par rapport aux dispositifs médicaux plus courants (TDM) :

- une plus petite taille du point focal de la source (cathode) impliquant une meilleure résolution spatiale.
- la position de l'objet d'étude qui, pour la plupart des micro-scanners à rayons X, tourne entre la paire source/détecteur (Figure S1).

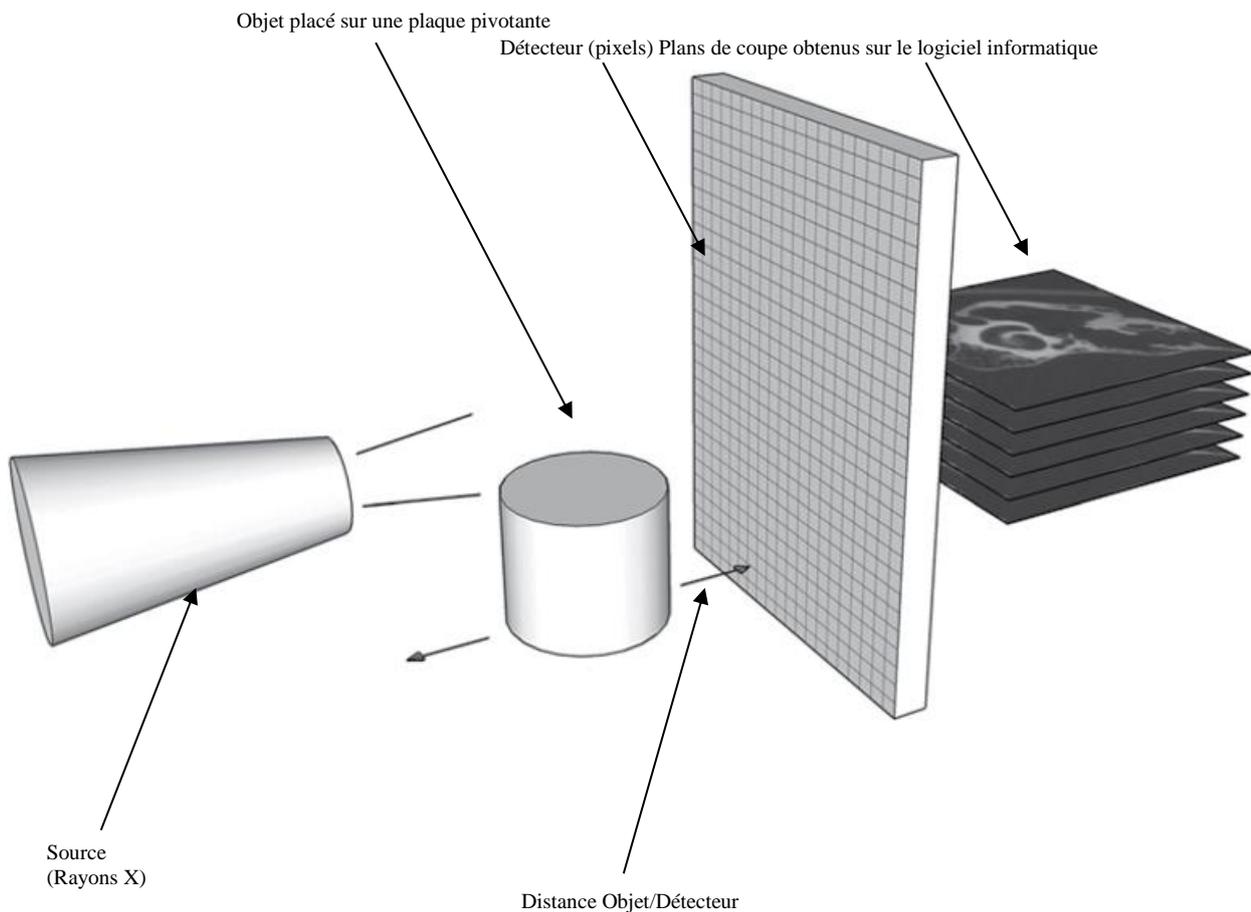


Figure S1. La configuration géométrique d'un système tomographique industriel. Les distances source/objet et objet/détecteur sont des paramètres géométriques importants affectant la qualité de l'image (Braga, 2016).

La micro-tomodensitométrie mesure l'absorption des rayons X au sein d'un volume exploré, à l'aide de multiples incidences d'un faisceau de rayons X. Les informations numériques issues des différentes incidences angulaires au cours de la rotation sont traitées informatiquement pour définir la valeur du coefficient d'atténuation des rayons X de chaque pixel de l'image axiale obtenue.

La meilleure résolution spatiale du micro-CT est intéressante car le micro-scanner est capable de distinguer les différents tissus et structures de la dent non fossilisée (émail, dentine, chambre pulpaire) (Macchiarelli, Bondioli et Mazurier 2008).

Outre l'étude des structures internes, le micro-scanner est utilisé dans l'étude des caractères discrets (Skinner et al., 2008).

Annexe 7. Fiche technique sur le principe de fonctionnement des scanners optiques.

On distingue 2 types de scanners optiques (Bajard, 2012) :

1. Les systèmes passifs.

Un système passif ne nécessite pas l'utilisation d'éclairage mais exploite une autre caractéristique pour extraire l'information 3D : mouvement, cibles de dimension connues, vues multiples, netteté de l'objet, etc.

a. La stéréovision.

La vision stéréoscopique est la méthode passive la plus largement étudiée. Le principe tend à se rapprocher du fonctionnement de la vision humaine : deux caméras font l'acquisition d'une même scène à partir de deux points de vue différents afin d'extraire une information de profondeur (Bajard, 2012). Afin de déterminer l'échelle de l'objet d'étude, il est nécessaire d'étalonner les caméras dans un repère unique et de connaître leurs paramètres intrinsèques (focale, taille des pixels, ...) et extrinsèques (position et orientation). Après avoir enregistré deux prises de vue de deux points de vue différents de l'objet d'étude, les coordonnées images (couple stéréoscopique) des points à mesurer sur chacune des prises de vue sont déterminées sur chacune des images. Après acquisition de la paire d'images, l'étape primordiale pour la reconstruction tridimensionnelle est l'appariement ou mise en correspondance. Lorsque les points de correspondance sont identifiés et que les caméras sont calibrées, la géométrie épipolaire permet de calculer les points 3D (Hartley et Zisserman, 2003). L'extraction de ces points caractéristiques dépend beaucoup de la texture de l'objet (et donc de l'éclairage ambiant).

b. La photogrammétrie.

La photogrammétrie est dérivée de la technique de stéréovision et par conséquent dispose des mêmes contraintes et limitations. Elle consiste à faire des acquisitions d'un objet d'étude par une seule caméra selon plusieurs points de vue. Généralement, des mires calibrées sont disposées dans le champ de vue afin de favoriser la reconstruction de la surface. La densité de points obtenue restant relativement faible, la photogrammétrie trouve majoritairement des applications dans l'archéologie (Pollefeys et al, 2001), la mesure topographique ou les grands volumes (au-delà du m3).

c. Principe de la Focalisation / Défocalisation.

Cette méthode s'appuie sur un principe bien connu en photographie : la focalisation/ défocalisation. Le principe de base est la mesure du flou sur une image. L'utilisation d'une lentille permet de converger les rayons lumineux vers le capteur et engendre l'apparition d'un plan focal. La distance focale représente la distance qui sépare le point de convergence de la lumière du centre optique de l'objectif. En utilisant des systèmes optiques à profondeur de champ très faible, il est alors possible de déduire la profondeur des points qui apparaissent nets à l'image en connaissant la distance focale. La reconstruction 3D d'une pièce se fait ensuite par sectionnement optique, c'est-à-dire en faisant l'acquisition de plusieurs images à différentes distances (déplacement de l'objet ou variation de la focale) (Frigerio, 2006, Bajard 2012).

2. Les systèmes actifs.

Pour limiter l'influence de l'éclairage ambiant, des systèmes actifs sont utilisés : l'éclairage est maîtrisé et participe directement à la mesure tridimensionnelle.

a. La triangulation laser.

Le principe de la triangulation suppose de recréer un triangle dont les trois sommets sont constitués par :

- Un *émetteur* : qui émet un rayonnement lumineux connu et orienté (laser par exemple).
- L'*objet* à mesurer sur lequel le rayonnement se réfléchit.
- Un *capteur linéaire ou matriciel* qui enregistre la déformation de la lumière engendrée par sa réflexion sur l'objet. Le convertisseur, les filtres et les algorithmes interprètent ce rayonnement afin de reconstituer en 3D la surface de l'objet mesuré. Il s'agit pour cela, de comparer le rayonnement réfléchi avec celui émis sur un plan de référence (Duret et Pelissier, 2010, Descamp, 2012).

Avant toute tentative d'acquisition avec ce système de triangulation laser, le scanner doit être étalonné avec un objet de référence à scanner. Les paramètres d'étalonnage sont ensuite stockés et utilisés pour référencer les données capturées.

Le scanner balaye la surface du sujet avec un rayon laser et utilise une caméra numérique pour analyser les distorsions du rayon au fur et à mesure de sa progression. Ce procédé produit des lignes dans les trois sens de l'espace qui, assemblées en centaines de triangles, forment l'image tridimensionnelle (Mayer, 1999).

b. La lumière structurée.

Pour éviter une action mécanique de balayage du faisceau de lumière, des motifs bidimensionnels couvrant le champ de vision de la caméra, ont été proposés (faisceau de lignes, grille ou matrice de points) (Niven et al. 2009 ; Bajard, 2012 ; Braga, 2016). Le calcul des coordonnées 3D à partir de la projection de lumière structurée est également basé sur le principe de triangulation dans la mesure où le motif projeté est considéré comme une multitude de points ou de lignes avec des orientations différentes. Le capteur se compose d'une caméra 2D qui acquiert des informations sur la géométrie et la couleur d'un échantillon. Un nuage de points est alors extrait à partir d'une seule prise de vue (Bajard, 2012). La principale difficulté de reconstruction réside dans le fait que chaque élément du motif doit être distinctement indexé de telle sorte qu'il corresponde à un unique homologue dans l'image capturée par la caméra. Plusieurs techniques de codage ont ainsi été proposées pour résoudre ce problème de mise en correspondance : la lumière structurée peut être modulée dans l'espace, le temps, l'intensité ou la couleur. L'acquisition est dense et rapide avec ce type de système. Au lieu de scanner une bande à la fois, ils peuvent scanner tout le champ de vision à la fois. Cependant, comme la plupart des scanners actifs, une numérisation complète de la surface (sans données manquantes) nécessite plusieurs vues.

Les résultats de l'image dépendent de l'objectif de la caméra 2D, du motif, c'est-à-dire de la largeur des bandes utilisées et de leur qualité optique, de la longueur d'onde de la lumière, de la distance par rapport à l'échantillon et de sa taille, et des limites de résolution du scanner. Cette technique d'imagerie permet d'obtenir

des résolutions de détails pouvant aller jusqu'à la longueur d'onde de la lumière, en dessous de 1 μm dans la pratique (Braga, 2016).

c. L'interférométrie.

L'utilisation des lasers favorise la création d'interférences lumineuses. En effet, si une lumière cohérente est séparée en deux faisceaux qui suivent des chemins optiques légèrement différents, alors la recombinaison de ces deux faisceaux laissera apparaître une figure d'interférences. Grâce à cette propriété, il est possible de mesurer des déplacements très faibles (de l'ordre de la longueur d'onde). Des systèmes plus évolués ont été étudiés et permettent d'étendre les capacités de mesure : approche multi spectrale, interférométrie de Speckle, holographie (Bajard, 2012).

d. L'holographie conoscopique.

L'holographie conoscopique est une nouvelle technique utilisée pour enregistrer des hologrammes en lumière incohérente au moyen d'un cristal monodirectionnel.

Un faisceau laser est projeté sur une surface, puis la réflexion au travers du même faisceau passe à travers un cristal biréfringent et est envoyé sur un capteur Charge-Coupled Device (CCD). La fréquence des motifs de diffraction peut être analysée et permet de déterminer la distance par rapport à cette surface.

Un filtre spatial est utilisé pour bloquer les fréquences indésirables.

Cela produit un hologramme dont la période des franges de diffraction donne très exactement la distance du point mesuré. Les modules de mesure conoscopique sont robustes et peu sensibles, notamment aux différences de température. Par rapport aux techniques de capture 3D par triangulation, en holographie conoscopique les faisceaux projetés et réfléchis empruntent respectivement la même trajectoire linéaire en direction et à partir de l'objet scanné (co-linéarité). Cette technique permet la mesure d'angles prononcés (jusqu'à 85°) et de cavités profondes, caractéristiques des empreintes dentaires.

e. Le Moiré d'ombre.

Cette technique date des années 1920. Le principe repose sur deux grilles fines : l'une sur le chemin de projection de la lumière et l'autre après réflexion sur la scène à observer. Plusieurs images de moiré sont calculées (par décalage de phase) afin d'extraire une information de profondeur. Cette technique utilise aussi le principe de triangulation.

f. La tomographie optique de cohérence.

Le principe de la tomographie optique de cohérence est de séparer en deux un faisceau lumineux (laser monochromatique) afin que celui-ci se dirige vers un miroir de référence et sur l'objet à mesurer. C'est l'interférence de la réflexion de ces deux faisceaux qui va donner les informations quant à la distance des différents points de l'objet. Afin de couvrir tous les points de la surface, il faut déplacer le miroir de référence.

Dans le cas d'une empreinte optique, afin d'obtenir les coordonnées dans les 3 dimensions de l'espace, les miroirs de référence sont multipliés. De plus, la prise d'empreinte intra-buccale nécessitant une acquisition des informations rapide, des micro-miroirs vibrant à 20000 cycles/sec sont utilisés.

Cela va permettre l'acquisition rapide de nombreuses images qui, assemblées par le logiciel, vont engendrer la reconstitution 3D des volumes bucco-dentaires (Ouadour, 2009 ; Bie, 2015).

g. La parallèle confocale.

Elle est basée sur le principe du microscope confocal.

L'intensité lumineuse perçue par le capteur sera maximale au niveau du plan focal. En faisant varier la distance entre l'objet et l'objectif, différentes images, dans les différents plans focaux, sont obtenues, permettant de reconstituer de proche en proche le volume mesuré. Dans le cas d'une caméra optique, l'enjeu est de capturer un nombre suffisant d'images en un temps acceptable. Pour cela, une grille de microlentilles possédant toutes le même plan focal, est ajoutée. La grille est inclinée afin de couvrir plusieurs plans. Cela permet de multiplier le nombre d'images et le nombre de plans focaux en une seule prise. Ce principe de fonctionnement nécessite une utilisation par prises de vues et non par balayage comme une majorité de caméras optiques (Moussaly, 2007).

3. Constituant des systèmes optiques.

L'enjeu d'une numérisation 3D est de récupérer et de convertir des données analogiques en données numériques.

Un système optique comprend :

-des **capteurs** spécifiques du rayonnement émis qui analysent la déformation de la lumière ou son intensité. Ils fournissent le plus généralement une information analogique.

A l'instar de la photographie, 2 types de capteurs sont couramment utilisés pour la capture des images :

- CCD (*Charge-Coupled Device*) (Boucharlat, 2006),

- C-MOS (*Complementary Metal Oxyde Semiconductor*) (Gamal et Eltoukhy, 2005).

Ces 2 types de matrices sont des circuits intégrés gravés sur une surface de silicium, composés d'un réseau de pixels sensibles à la lumière. Les photodiodes des pixels réagissent à lumière et fournissent un signal électrique.

Pour le capteur CCD, le signal de chaque colonne de pixel est récupéré et un signal électrique analogique est fourni au convertisseur A/D en sortie de capteur (Nillson, 2009).

Pour le capteur CMOS, la différence majeure avec la matrice CCD vient du fait que chaque pixel contient une photodiode (qui sert à la conversion photon-charge et au stockage des charges) et un amplificateur qui va permettre de convertir les charges en tension dans le pixel lui-même. De ce fait, il est plus rapide que le CCD mais moins performant dans le cas de luminosité faible.

-un ou plusieurs **émetteurs** qui projettent le rayon lumineux sur l'objet à mesurer.

Dans le cadre d'une numérisation 3D, il va être nécessaire de capturer une 3ème dimension : la profondeur ou hauteur. Grâce aux émetteurs, cette technologie vise à exploiter les propriétés optiques de la lumière en projetant sur les surfaces à reconstituer un rayonnement choisi et connu. Il existe différentes techniques qui vont permettre à la caméra d'évaluer le relief, selon le type de scanners.

-un **convertisseur** de l'information analogique en numérique (convertisseur A/D) afin qu'elle puisse être traitée par ordinateur.

-des **filtres** et des **algorithmes** pour traiter l'image obtenue et la transmettre le plus généralement dans un format exploitable et universel *.STL* (Duret et Pelissier, 2010).

L'opération de numériser une section de la surface de l'objet est répétée à partir de points d'observation différents et cela, autant de fois qu'il est nécessaire pour en couvrir toute la surface, en prenant soin d'avoir une zone commune pour chaque image 3D. Ces images 3D individuelles, ainsi captées, sont par la suite fusionnées à l'aide d'un logiciel qui utilise les zones communes de chacune d'elles, pour assembler de façon très précise le modèle numérique 3D. Le logiciel permet aussi d'éliminer les points redondants dans les zones communes de façon à obtenir une couche de points 3D de densité homogène sur toute la surface de l'objet.

Annexe 8. Essais de 2 scanners extra-oraux en amont de notre étude.

Echantillon testé : plaque ASUDAS Protostylid (Source : laboratoire AMIS, Braga J-2014-)

	SIMEDA® Scan Anthogyr	7Series® Dental Wings
	 <p>Laboratoire DTs Montpellier (2014)</p>	 <p>Laboratoire JPC Narbonne (2014)</p>
Source de lumière	Lumière bleue à LED	Laser bleu
Technique optique	-Triangulation - 2 caméras monochromes 1.3Mpixel -1 caméra couleur 5Mpixel	-Triangulation laser -2 caméras monochromes de mesure haute vitesse -1 caméra couleur pour aperçu
Volume de mesure	80mm*60mm*60mm	140mm*140mm*140mm
Nombre d'axes	3 axes synchrones	5 axes (3 pour la rotation+2 pour la translation)
Précision selon fiche fabricant	Jusqu'à 7µm	15µm
Support multi-dies	8 dies unitaires maximum (temps d'acquisition : 41sec)	30 éléments unitaires numérisés en 13 min sans intervention de l'opérateur.
Fichier	Ouvert - <i>stl</i>	Ouvert - <i>stl</i>

Annexe 9. Essais de 2 scanners intra-oraux en amont de notre étude.

Echantillon testé : plaque ASUDAS Protostylid (Source : laboratoire AMIS, Braga J-2014-)

Caméra	Plan scan®Planmeca	Condor ®Biotech Dental
	 <p><i>UFR Odontologie de Toulouse (2014)</i></p>	 <p><i>Laboratoire Aabam Pr Duret (2014)</i></p>
Couleur	Oui	Oui– prise de vue aux couleurs naturelles-
Technique optique	Tomographie optique de cohérence	Stéréophotogrammétrie
Poudrage	Non	Non
Prise de vue/mode capture	Balayage vidéo	Balayage vidéo
Fichier	Passerelle Romexis /.STL	.STL /.PLY

PUBLICATIONS

Publications

-1 Article International.

CARAYON D., ADHIKARI K., MONSARRAT P., DUMONCEL J., BRAGA J., DUPLOYER B., DELGADO M., FUENTES-GUAJARDO M., DE BEER F., HOFFMAN J.W., OETTL A.C., DONAT R., PAN L., RUIZ-LINARES A., TENAILLEAU C., VAYSSE F., ESCLASSAN R., ZANOLLI C.
“A geometric morphometric approach to the study of variation of shovel-shaped incisors”. *American Journal of Physical Anthropology*. 2018;1-13.
<https://doi.org/10.1002/ajpa.23709>
Impact Factor: 2.552.

-2 Communications Affichées.

CARAYON D., DUMONCEL J., ZANOLLI C., DONAT R., DURET F., VAYSSE F., ESCLASSAN R.
« Intérêts de l'imagerie 3D dans l'approche morphologique et morphométrique des caractères discrets dentaires. »
Congrès du GALF. Toulouse (07-08-09 Juin **2016**).

CARAYON D., DUMONCEL J., ZANOLLI C., DONAT R., DURET F., VAYSSE F., ESCLASSAN R.
“Morphological and morphometric dental characterisation in population study: interests of 3D imaging.”
PhD Students' Days. Toulouse (13-14-15 Avril **2016**).

TECHNICAL NOTE

A geometric morphometric approach to the study of variation of shovel-shaped incisors

Delphine Carayon^{1,2}  | Kaustubh Adhikari³ | Paul Monsarrat^{4,5} | Jean Dumoncel¹ | José Braga^{1,6} | Benjamin Duployer⁷ | Miguel Delgado^{8,9} | Macarena Fuentes-Guajardo³ | Frikkie de Beer¹⁰ | Jakobus W. Hoffman¹⁰ | Anna C. Oettlé^{11,12} | Richard Donat^{1,13} | Lei Pan^{14,15}  | Andres Ruiz-Linares^{3,16,17} | Christophe Tenailleau⁷ | Frédéric Vaysse^{1,4} | Rémi Esclassan^{1,4} | Clément Zanolli¹

¹UMR 5288 CNRS, Université Toulouse III—Paul Sabatier, Toulouse, France

²Faculté d'Odontologie, Université Montpellier I, France

³Department of Genetics, Evolution and Environment, and UCL Genetics Institute, University College London, London, UK

⁴Faculté d'Odontologie, Université Toulouse III—Paul Sabatier, Toulouse, France

⁵STROMALab, CNRS ERL 5311, EFS, INP-ENVT, Inserm, Université Toulouse III—Paul Sabatier, Toulouse, France

⁶Evolutionary Studies Institute and School of Geosciences, University of the Witwatersrand, Johannesburg, South Africa

⁷Centre Inter-universitaire de Recherche et d'Ingénierie des Matériaux, UMR 5085 CNRS, Université de Toulouse III—Paul Sabatier, Toulouse, France

⁸Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas, CONICET, Buenos Aires, República Argentina

⁹División Antropología, Facultad de Ciencias Naturales y Museo, Universidad Nacional de La Plata, La Plata, República Argentina

¹⁰Radiation Science Department, South African Nuclear Energy Corporation (Necsa), Pelindaba, South Africa

¹¹Department of Anatomy, University of Pretoria, South Africa

¹²Department of Anatomy, Sefako Makgatho Health Sciences University, South Africa

¹³Institut National de Recherches Archéologiques Préventives—St. Estève, Saint Estève, France

¹⁴Key Laboratory of Vertebrate Evolution and Human Origins, Institute of Vertebrate Paleontology and Paleoanthropology, Beijing, China

¹⁵State Key Laboratory of Palaeobiology and Stratigraphy, Nanjing Institute of Geology and Palaeontology, Nanjing, China

¹⁶Ministry of Education Key Laboratory of Contemporary Anthropology and Collaborative Innovation Center of Genetics and Development, Fudan University, Shanghai, China

¹⁷Laboratory of Biocultural Anthropology, Law, Ethics, and Health (Centre National de la Recherche Scientifique and Etablissement Français du Sang, UMR-7268), Aix-Marseille University, Marseille, France

Correspondence

Delphine Carayon, 118 route de Narbonne, bat. 4R3B2, Toulouse 31062, France.
Email: delphinedom.carayon@orange.fr

Funding information

Toulouse Dental Faculty (PLTRO); Midi-Pyrénées Region; Université Toulouse III—Paul Sabatier; CHU de Toulouse; Université de Toulouse; French CNRS; Arizona State University

Abstract

Objectives: The scoring and analysis of dental nonmetric traits are predominantly accomplished by using the Arizona State University Dental Anthropology System (ASUDAS), a standard protocol based on strict definitions and three-dimensional dental plaques. However, visual scoring, even when controlled by strict definitions of features, visual reference, and the experience of the observer, includes an unavoidable part of subjectivity. In this methodological contribution, we propose a new quantitative geometric morphometric approach to quickly and efficiently assess the variation of shovelling in modern human maxillary central incisors (UI1).

Materials and methods: We analyzed 87 modern human UI1s by means of virtual imaging and the ASU-UI1 dental plaque grades using geometric morphometrics by placing semilandmarks on the labial crown aspect. The modern human sample was composed of individuals from Europe, Africa, and Asia and included representatives of all seven grades defined by the ASUDAS method.

Results: Our results highlighted some limitations in the use of the current UI1 ASUDAS plaque, indicating that it did not necessarily represent an objective gradient of expression of a nonmetric

tooth feature. Rating of shoveling tended to be more prone to intra- and interobserver bias for the highest grades. In addition, our analyses suggest that the observers were strongly influenced by the depth of the lingual crown aspect when assessing the shoveling.

Discussion: In this context, our results provide a reliable and reproducible framework reinforced by statistical results supporting the fact that open scale numerical measurements can complement the ASUDAS method.

KEYWORDS

ASUDAS, Procrustes and non-Procrustes superimpositions, shovel-shape incisors, virtual anthropology

1 | INTRODUCTION

Teeth display morphological variations of the crown and roots that differ substantially among modern human and fossil groups, some dental characteristics being predominant in certain groups or populations (Turner, Nichol, & Scott, 1991). As stated by Hillson, "human eyes and brain are unsurpassed in discerning tiny differences between objects compared side by side, but it is much more difficult to define a scheme for recording size and shape in such a way that comparisons can be made between hundreds of such objects" (Hillson, 1996, pp. 68). For this reason, since the 19th century, several attempts have been made to classify and assess differences between fossil and extant human populations, at first using detailed descriptive approaches and later elaborating scoring systems (reviewed in Irish & Scott, 2016).

Following the influential early works of Hrdlička (1920) and Dahlberg (1956), who standardized a four-grade classification plaque for upper incisor shoveling, some researchers tried to reduce the visual subjectivity by measuring the depth of the lingual fossa. However, they had little success because of issues with the precision of the method (Carbonell, 1963; Dahlberg & Mikkelsen, 1947; Goaz & Miller, 1966; Hanihara, 1969). Later Scott (1973) developed an eight degree scale that was then adapted and integrated by Turner et al. (1991) into a formal system for scoring nonmetric aspects of dental morphology: the Arizona State University Dental Anthropology System (ASUDAS) (Scott, 1973; Scott & Turner, 1997; Turner et al., 1991). This widely-used standard protocol is based on reference plaster plaques representing the casts of selected teeth showing a gradient of expression of a particular trait (Scott & Turner, 1997; Scott, Turner, Townsend, & Martínón-Torres, 2018; Turner et al., 1991). Since their initial publication, the number of traits and plaques have increased and some of them have been adapted to the range of variation expressed by fossil hominins (Bailey & Hublin, 2013; Bailey & Wood, 2007; Irish, Guatelli-Steinberg, Legge, Ruiters, & Berger, 2013; Irish & Scott, 2016). The scoring and analysis of dental nonmetric traits currently represents a common diagnostic procedure to highlight ancestry/genetic affinities and investigate human variation in anthropological, paleoanthropological and forensic studies (Bailey & Hublin, 2013; Irish, 1998, 2014; Irish & Guatelli-Steinberg, 2003; Irish & Scott, 2016; Scott & Turner, 1997; Turner et al., 1991; Zanolli, 2013; Zanolli et al., 2014). If the

observer has been trained by an expert, the ASUDAS approach to morphological characters is easy, fast and reliable, and remains the gold standard technique today (Scott et al., 2018; Scott & Irish, 2017). However, visual scoring, even when controlled by strict definitions of features and the experience of the observer, includes an unavoidable part of subjectivity. In fact, the assessment of shoveling defined by the ASUDAS method has some major limitations inherent to its definition. The specimens selected to develop the reference grades on the plaque were chosen by qualitative appreciation, which does not necessarily represent the morphological variation in a linear way. This can lead to minimal visual difference between some grades of expression and so to the difficulty experienced by users in classifying the analyzed specimens with regard to the ASUDAS (especially for beginners). In brief, both the selection of the reference teeth when creating the ASUDAS method and the comparison of the dental specimens with the ASUDAS plaques are dependent on observations/palpatations and the experience of the observer (i.e., dependent on operator subjectivity). Nichol and Turner II (1986) have shown that the intraobserver error when assessing the expression of incisor shoveling is small: 4.1% for more than one grade difference and only 2% for presence/absence differences. However, as mentioned by Scott and Turner (1997), "it will probably never be possible to attain 100% concordance in replicated observations of tooth crown and root traits, either by single observers or between observers. The reference plaques developed by Dahlberg, K. Hanihara, Turner, and others have enhanced observational precision but they have not been a panacea for the reasons noted above (i.e., threshold expressions, post-eruptive modifications, surficial noise, varying levels of experience, etc.)" (Scott & Turner, 1997, pp. 72).

Incisor shoveling is one of the nonmetric features that has received the most attention from anthropologists as an indicator of relationships among populations and it is frequently used for its taxonomic and phylogenetic relevance (e.g., Bailey & Hublin, 2013; Carter, Worthington, & Smith, 2014; Irish et al., 2013; Irish, Guatelli-Steinberg, Legge, Ruiters, & Berger, 2014; Scott & Turner, 1997). This feature can be defined as the degree of elevation of the mesial and distal lingual marginal ridges on the lingual surface of the maxillary incisors, canines and mandibular incisors, with more pronounced forms enclosing a fossa (Dahlberg, 1956; Hrdlička, 1920; Scott & Turner, 1997; Turner et al., 1991). Shoveling is more marked and variable in the

upper central and lateral incisors, the former being the polar tooth (Irish & Scott, 2016). Ales Hrdlička (1920) was the first to classify the degree of expression of shovel-shaped incisors, assess this variation among several human populations and describe its occurrence in non-human species (Scott & Turner, 1997). Among his findings, he indicated that the prevalence and expression of incisor shoveling showed marked geographic variation in modern human populations, being frequent and strongly expressed in Asia, with a South to North increasing cline, but less frequent and weaker in Africa and Europe (Kimura et al., 2009; Mizogushi, 1985; Turner, 1990). Some workers have attempted to quantify the degree of development of the shoveling with an interval scale. Dahlberg and Mikkelsen (1947) used a Vernier scale with a modified Boley Gauge to measure the depth of the incisor lingual fossa in millimeters. Hanihara, Masuda, and Tanaka (1975) measured lingual fossa depth in a Japanese population in order to obtain metrical data to calculate intrafamilial correlations. Taverne, Amesz-Voorhoeve, and Leertouwer (1979) tried to measure various parts of a tooth crown surface by an indirect three-dimensional measurement method using photogrammetry and a Moiré pattern (Mizogushi, 1985). Also, in a shovel-shaped tooth, the marginal ridges may extend from the incisal edge to the basal eminence and sometimes, in very pronounced cases, the ridges can converge on the eminence. In addition, the two marginal ridges may exhibit different degrees of expression (Mizogushi, 1985). However, according to Scott and Turner (1997), the mesial and distal marginal ridges are so strongly correlated that they can be considered together as a single trait (Scott & Irish, 2017). Crummett also tried to summarize the main characteristics of incisor shoveling by considering three aspects: the expression of the marginal ridges, the development of a lingual tubercle at the lingual base of the crown, from a small swelling to an independent cusp, and the crown convexity or curvature (Crummett, 1994, 1995). More recently, using X-ray microtomographic imaging, Denton investigated the relationship of these three aspects between the external surface of the incisor crown and the enamel-dentin junction in a limited sample of 10 extant humans (Denton, 2011). However, the current ASUDAS U11 shoveling plaque does not fully illustrate the three aspects and can only take into account ridge expression, not the center of the lingual fossa which can be sometimes obscured by a large tuberculum dentale. This is notably the case in some fossil groups like in Neanderthals.

Although the expression of dental nonmetric features may be sensitive to environmental or epigenetic factors (Mizogushi, 2013), it is predominantly determined by genetic factors (Jernvall, Keränen, & Thesleff, 2000; Park et al., 2012; Salazar-Ciudad & Jernvall, 2002, 2010; Scott & Turner, 1997). To date, the best known genetically-correlated dental trait is incisor shoveling, which involves a single nucleotide polymorphism (SNP) of the ectodysplasin A receptor gene (EDAR), the most likely target of positive selection in Asian populations resulting in marked shovel-shaped teeth (Kimura et al., 2009; Park et al., 2012). However, EDAR has pleiotropic effects and a recent study suggested that it was selected in Asian groups for its effect of increasing ductal branching in the mammary gland, thereby amplifying the transfer of critical nutrients to infants via the mother's milk (Hlusko et al., 2018). In this case, the dental phenotypic expression associated with this gene could simply represent a side effect. In any

case, shoveling constitutes a critical marker to discriminate between human groups and assess ancestry.

The objective of this contribution is to propose a new and complementary quantitative methodological approach to study the concavity of the palatal surface of U11, used here as a proxy for the variation of the degree of expression of shoveling. We elaborate a geometric morphometric (GM) method taking the depth and shape of the labial incisor crown aspect (i.e., two of the three aspects of shoveling: the expression of the marginal ridges and the curvature of the lingual aspect) into account to assess the degree of U11 shoveling on a continuous scale. After comparison with the classical ASUDAS method, we discuss the implications of implementing such geometric morphometric analyses for the study of the modern human variability of dental traits and to better track evolutionary trends in hominins.

2 | MATERIAL AND METHODS

2.1 | Sample and scanning procedures

Our sample consisted of 87 modern human permanent maxillary central incisors (U11). It included specimens of European ($n = 44$), South African ($n = 30$), and Chinese ($n = 13$) ancestry, as listed in Table 1. Only unworn to moderately worn tooth crowns (reaching maximum stage 2 as defined by Smith, 1984, and corresponding to a thin line of dentine exposure) having no particular damage or pathology on the labial aspect were included in the analyses. Visual scoring of the 87 specimens was achieved by two observers (D.C. and C.Z.) following the ASUDAS method (Supporting Information Table 1).

We also analyzed the original ASUDAS U11 shoveling (ASU-U11) plaque based on Dahlberg's work (Dahlberg, 1956) and developed by Turner et al. (1991). This plaque includes seven grades of shoveling expression, from the weakest (grade 0) to the most marked (grade 6) (Supporting Information Table 2). In a recent revision of the ASUDAS method, Scott and Irish (2017) described an eighth stage for U11 shoveling (grade 7, defined as any expression that exceeds grade 6, involving marginal ridges that fold around on themselves, similar to grade 6 on the U12 shoveling plaque) but they did not find any suitable example to put on the plaque. For this reason, we did not consider this last grade here.

The 44 European specimens were scanned by X-ray microtomography (micro-CT) at the CIRIMAT facility of the University of

TABLE 1 List of 87 modern human U11 elements considered in this study

Time period	Geographic origin	Depository
Contemporary ($n = 13$)	France	MHNT
Medieval ($n = 31$)	France	INRAP
Contemporary ($n = 13$)	China	IVPP
Contemporary ($n = 30$)	South Africa	PBC

MHNT = Natural History Museum of Toulouse; INRAP = French National Institute for Preventive Archeological Research; IVPP = Institute of Vertebrate Paleontology and Paleoanthropology of Beijing; PBC = Pretoria Bone Collection of the Department of Anatomy of the University of Pretoria, representing individuals of various ancestries including Nbele, N Sotho, Swazi, and Zulu.

Toulouse with a Phoenix/GE Nanotom 180 instrument, using the following parameters: 100 kV, 100 μ A, 0.36° angular step. The virtual records were reconstructed to a voxel size of 22 to 25 μ m. The 30 South African teeth and the reference plaque ASU-U11 were scanned by X-ray micro-CT at the MIXRAD facility of the South African Nuclear Energy Corporation SOC Limited (Necsa), with a Nikon XT H225-L instrument by using similar parameters, and reconstructed to a voxel size ranging from 42 to 50 μ m (Hoffman & de Beer, 2012). The 13 modern human Asian teeth were scanned by X-ray micro-CT using similar parameters at the Institute of Vertebrate Paleontology and Paleoanthropology of Beijing, China, and reconstructed to a voxel size of 31.4 μ m.

Data were imported into the three-dimensional (3D) analytical software Avizo v.8.0. (FEI Visualization Sciences Group) so that 3D renderings of the tooth external surface could be visualized and processed. Teeth were first segmented semiautomatically by using a thresholding approach (Coleman & Colbert, 2007; Fajardo, Ryan, & Kappelman, 2002; Spoor, Zonneveld, & Macho, 1993) and a surface was generated from the segmented object. The maximum of curvature was measured on each U11 crown surface using the "MaxCurvature" module of Avizo. This allowed us to determine the extreme curvature line of the mesial and distal lingual crests and use these maxima as starting and ending points of our GM analyses (Figure 1a). The cervical best fit plane was defined by placing at least three landmarks at the most apical points of the cervix on the labial and palatal aspects (points of maximum curvature on the labial and lingual sides of the

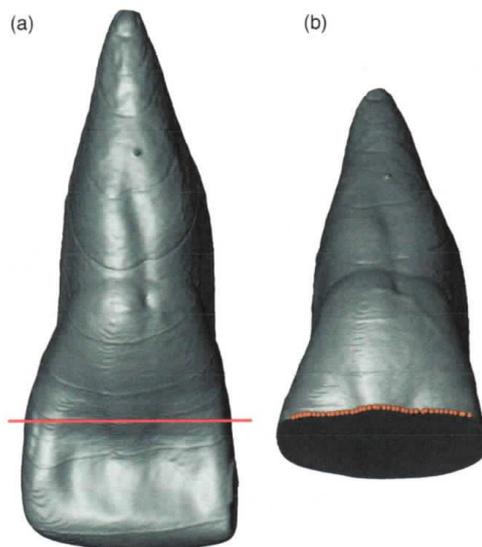


FIGURE 1 Position of the reference plane located at the midpoint of the crown, which was used to place the semilandmarks along the curve of the lingual aspect of the crown from the mesial to the distal side (b). The maxima of the extreme curvature line were used as starting and ending points of our GM analysis [Color figure can be viewed at wileyonlinelibrary.com]

enamel junction; Le Cabec, Gunz, Kupczik, Braga, & Hubin, 2013). We translated this reference plane to the midpoint between the most incisal and the most cervical points of the crown (Figure 1a) and then placed 100 semilandmarks along this middle plane following the curve of the lingual aspect of the crown (Figure 1b). Compared with the ASUDAS method, this procedure may seem far more time-consuming, but once a user has spent a couple of days using 3D imaging softwares, placing the reference plane and the semilandmarks takes less than 1 min per tooth.

2.2 | Statistical analysis

Intraobserver error (reliability) of the ASUDAS visual scoring was assessed with respect to the U11 reference plaque by intraclass correlation (ICC) using a two-way mixed effects "absolute agreement" model (Koo & Li, 2017). ICC is generally used to assess the correlation of various units organized in groups and describes how strongly units in the same group resemble each other. This analysis was done in order to check for both consistency (also referred to as precision in the literature; e.g., if a tooth is actually ASUDAS category 2, but two raters independently assign it to category 5, they are highly consistent with each other but they have a large bias of 3 units; Shrout & Fleiss, 1979; Joint Committee for Guides in Metrology, 2008; Hughes & Hase, 2010) and accuracy (i.e., looking for the degree of bias/error between observers and our objective landmark-based method, e.g., example, if grade 3 actually corresponds to grade 3 plaque).

To objectively compare the degree of concavity of the labial surface of each incisor from our sample with the grades of the reference plaque, we performed Procrustes analyses of the semilandmarks. In the Procrustes method, the original landmarks from all samples are first superimposed and aligned with one another to produce the Procrustes coordinates. Subsequently, a principal component analysis (PCA) of the Procrustes coordinates is performed.

The reliability of this computer-based technique was assessed by intraclass correlation (ICC) of the 100 landmark coordinates among the three operators and 30 samples. Reliability was higher when the distance between the landmarks assigned by two raters on the same sample was small. We considered the distance between the landmark and the origin of the 3D orthonormal reference as outcome, together with the individual X, Y, and Z float coordinates. ICC was obtained after a two-way random effects "absolute agreement" model (Koo & Li, 2017). Levels of agreement between raters were also visually appreciated using Bland-Altman plots. (This kind of plot, assessing the degree of agreement between two observers, is similar to a Tukey mean-difference plot).

We also superimposed the curves in a non-Procrustes way, aligning the first and last point (0 and 100, respectively) of each curve (Figure 2a). This alignment procedure requires an initial 3D rotation step, which is similar to Procrustes methods, but the subsequent steps are different from Procrustes. Since each curve lies in an approximate 3D plane (the semilandmarks are placed along a plane, see Figure 1b), the curve is rotated to approximately align with the X-Y plane (equation of the 3D plane is obtained by fitting a linear regression on the X, Y, and Z coordinates, as the equation of a 3D plane is $aX + bY + cZ + d = 0$). After this alignment, the Z coordinate is discarded. The 2D data is then rotated again so that the first and last points lie on the Y axis

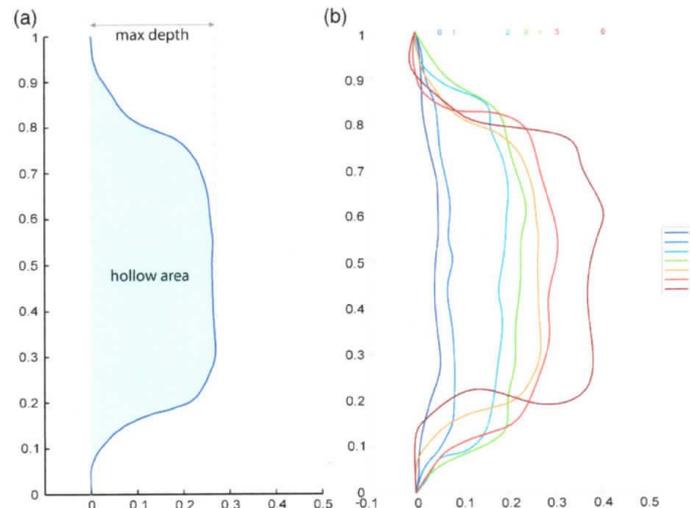


FIGURE 2 Illustration of the maximum depth and hollow area (a) used in the non-Procrustes analyses (semilandmark curves aligned with their first and last points). The ASUDAS reference plaque teeth curves are superimposed following this non-Procrustes approach, showing the nonlinear variation in shape from grade 0 to grade 6 (b) [Color figure can be viewed at wileyonlinelibrary.com]

(i.e., X coordinate = 0). Finally, they are scaled by a constant factor on both axes to achieve a fixed Y -axis range of 1, that is, the first and last points of each curve now have coordinates (0,0) and (0,1), respectively. This scaling step is a major difference from the Procrustes method, as the classical Procrustes method scales to have a centroid size of 1, but here the curves are scaled to have a Y -axis range of 1 to facilitate comparisons. We then used these aligned coordinates to measure two metrics, the maximum depth of the lingual aspect with respect to the first and last points of the curves and the hollow area of the curves (Figure 2b). These metrics are not data-dependent like the previous one (PC scores have to be calculated in the whole sample, and values change according to the sample composition) as both the depth and hollow area can be measured directly on the aligned landmarks. Principal components were also calculated from the non-Procrustes aligned coordinates (X and Y).

All statistical analyses and graphic data visualization were performed in MATLAB R2017b (MATLAB and Statistics Toolbox Release, 2017) and R 3.4.3 (R Core Team, 2017). The following R packages were used: *scatterplot3d* (Ligges & Mächler, 2003), *shapes* (Dryden, 2017), *ade4* (Dray & Dufour, 2007), *irr* (Gamer, Lemon, & Puspendra Singh, 2012) and *Bland Altman* (Lehnert, 2015).

Most morphological variations in the human dentition vary on a continuous scale. However, for simplicity of representation, dental anthropological assessment schemes often use two or more categories into which the range of variation is "binned" or "categorized." For instance, the amount of melanin pigmentation in the eye is a continuous quantity, but in traditional analyses it has been categorized into blue versus brown to represent absence/presence of melanin, and historically considered to be a Mendelian trait until modern quantitative analysis showed its complex polygenic nature. Scott and Turner

(1997) noted, specifically with the example of incisor shoveling, that such nonmetric dental traits are possibly "quasi continuous" (ordinal or dichotomous) traits, derived from an underlying continuous trait. For example, while the depth of the incisor crown is a continuous quantity, it can be dichotomized into absence/presence indicating whether the amount of curvature is below a certain threshold. In such cases, the underlying continuous variable is called a "latent variable" corresponding to the assessed categorical variable. Our analyses suggested that the maximum depth metric was the most likely candidate for any underlying "latent" quantitative variable that might be the basis of the ASUDAS categories for shoveling (see Results below). The results also suggested that the relationship between the maximum depth variable and the ASUDAS categories was monotonic but nonlinear, that is, when the latent variable increases the categories also increase, but the spacing between categories is unequal. Therefore, to "predict" an objective ASUDAS category for the 87 modern human specimens, we constructed a prediction function using the maximum depth values and numerical categories of the ASUDAS specimen teeth. To preserve nonlinearity, a spline function was fitted on these values, which was then used as the interpolant to obtain predicted ASUDAS categories from the 3D measured maximum depth values on the 87 modern human specimen casts. The predicted ASUDAS categories were allowed to contain decimals to retain more precision, instead of rounding them off to the nearest integer category (e.g., 1.67 instead of 2). Similarly, some of the observer-assigned categories that had an intermediate rating (0_1 meaning a category between ASUDAS references 0 and 1) were allowed to retain them (the rating 0_1 was assigned the middle value of 0.5, for example). These objective predicted values were compared with subjective

TABLE 2 Intraclass correlation (ICC) values for intraobserver (VS1 T1 vs. T2) and interobserver (VS1 vs. VS2) consistency measures and accuracy (comparing the three ratings with their predicted values from the ASUDAS reference plate teeth)

	Consistency (precision)		Accuracy (unbiasedness)		
	VS1 T1 vs. T2	VS1 vs. VS2	VS1 T1 vs. predicted	VS1 T2 vs. predicted	VS2 vs. predicted
All samples	0.985	0.987	0.759	0.749	0.772
South African	0.946	0.986	0.602	0.565	0.602
French contemporary	0.900	0.721	0.496	0.570	0.494
French medieval	0.971	0.993	0.550	0.592	0.559
Chinese	0.976	0.975	0.000	0.000	0.000

Shades of color represent the degree of consistency and accuracy, with darker green corresponding to the highest degrees and white to the lowest degree.

observer-assigned rating values via ICC to obtain accuracy (i.e., unbiasedness) measurements.

3 | RESULTS

Our ICC intra- and interobserver tests on the visual scoring showed highly consistent assessment of shoveling within and between raters (Table 2). Consistency was high for the whole sample, but also for each chronogeographic subsample considered in this study. In contrast, the accuracy of the visual assessment performed by the raters, measured using the ICC between the rater-assigned category and the predicted category was moderate for the Europeans and Africans. For the Chinese sample, the accuracy of the visual assessment was very low (further discussion below).

We then looked at the results of the landmark-based analyses. Following the standard procedure in geometric morphometrics, principal component analysis (PCA) was used to explore the morphospace. Principal components (PCs) were calculated using the Procrustes coordinates of all landmarks, for all samples including the ASUDAS reference casts. Plotting the top PCs enabled us to visualize the morphospace, to see how the samples were distributed with respect to the ASUDAS grades (Figure 3). The first two components (PC1 and

PC2) of the PCA accounted for 87.4% of the total variance (81.5% for PC1 and 5.9% for PC2).

PC shape changes could be visualized by plotting the PC loadings. PC loadings for the Procrustes and non-Procrustes methods were very similar; non-Procrustes PC shape changes are shown in Supporting Information Figure 1. While PCs are more difficult to interpret than direct measurements, the PC shape changes give us some idea of the morphological aspects they capture. The shape of PC1 is roughly proportional to the curve of the lingual aspect, that is, the lingual fossa has the highest weight. Therefore the deeper the lingual fossa is from the baseline, the higher the PC value is. This explains why the PC has such high correlations with the maximum depth metric (Table 3). And since the deeper the lingual fossa is, the more the marginal ridges protrude with respect to the fossa, PC1 is also proportional to the ASUDAS shoveling grade (Table 4).

The shape of PC2 gives greatest weight to the corners of marginal ridges, thereby being proportional to the angle between the labial palate and the marginal ridges. This angle is called "labial convexity" in Denton (2011), where it is shown that its relationship with the ASUDAS shoveling grade is not monotonic (largest angles for grades 2–3), which explains why PC2 is not strongly correlated with it (Table 4).

The shape of PC3 seems to reflect the left–right asymmetry present in the shape of the curve, in particular the asymmetry in the two

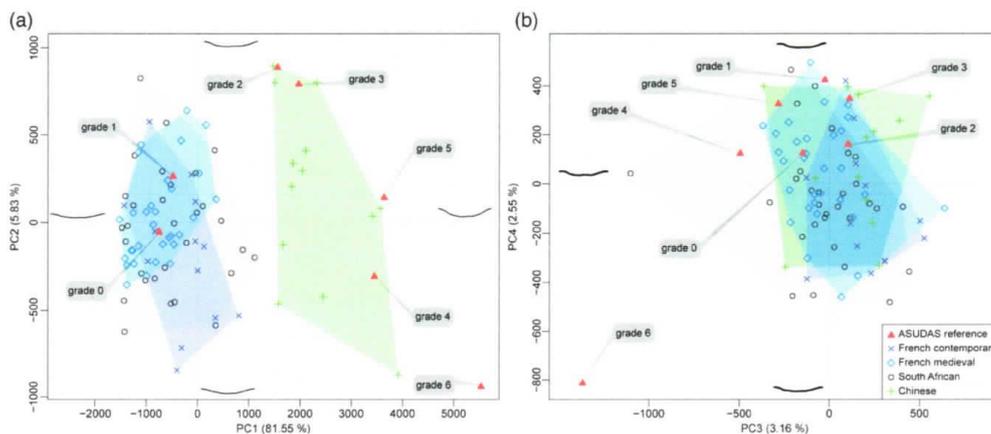
**FIGURE 3** Principal component analysis (PCA) of the Procrustes-registered shape coordinates of the 100 semilandmarks used as proxy to assess U11 shoveling. (a) PC1 vs. PC2; (b) PC3 vs. PC4 [Color figure can be viewed at wileyonlinelibrary.com]

TABLE 3 Correlations between various measurements obtained from the coordinates of all samples (87 human specimens plus the 7 ASUDAS reference casts)

		Direct metrics		Procrustes PC		Non-Procrustes PC	
		Maximum depth	Hollow area	PC1	PC2	PC1	PC2
Direct metrics	Maximum depth	–	0.98	0.98	0.08	0.99	–0.08
	Hollow area	0.98	–	0.96	0.20	1.00	0.06
Procrustes PC	PC1	0.98	0.96	–	0.00	0.97	–0.21
	PC2	0.08	0.20	0.00	–	0.16	0.86
Non-Procrustes PC	PC1	0.99	1.00	0.97	0.16	–	0.00
	PC2	–0.08	0.06	–0.21	0.86	0.00	–

Maximum depth and hollow area are the directly measured metrics based on the non-Procrustes alignment method. Principal components were obtained from both Procrustes and non-Procrustes methods. Shades of color represent the degree of correlation, with darker green corresponding to the highest degrees and white to the lowest degree. Red indicates negative correlation.

angles. As asymmetry of the ridges is not relevant in the definition of the ASUDAS grades, this explains why PC3 is not correlated with the grades either (Table 4).

The shapes of later PCs, such as PC4, are much harder to interpret and, given that they capture a very small fraction of the variability, they might simply reflect random statistical variation.

Along PC1, the European (French contemporary and medieval) and South African specimens showed a similarly reduced expression of shoveling (expressed here by reduced lingual depth and a more linear morphology), overlapping with the ASUDAS grades 0 and 1, while the Chinese material encompassed the grades 2 to 5. Even though the ASUDAS grades tend to follow a trend along PC1, their distribution is not linearly organized and is heterogeneous (Figures 3a and 4a). Grades 0–1, 2–3, 4–5, and 6 tended to form four clusters and grades were not equidistant from one another. There was no visible discrimination between the chronogeographic human samples and the ASUDAS grades along PC3 and PC4, which represented 3.16% and 2.55%, respectively, of the total variance (Figure 3b). We tested the reproducibility of this Procrustes method. Our results show that the positioning of the landmarks was highly reproducible, with an ICC >0.990. The graphical Bland–Altman method confirmed this high level of agreement (Figure 5).

When considering the non-Procrustes analysis, similar results were obtained. In Figure 4, the histograms showing the distribution of maximum depth (Figure 4b) and hollow area (Figure 4c) of the specimens and the ASUDAS grades also highlight the nonlinear scattering

TABLE 4 Correlation of observer-assigned ASUDAS categories with the predicted ASUDAS value, the first four PCs of the Procrustes analysis, the maximum palatal depth and the hollow area

	VS1 T1	VS1 T2	VS2
Predicted ASUDAS	0.776	0.769	0.788
PC1	0.836	0.831	0.850
PC2	0.153	0.169	0.177
PC3	–0.106	–0.097	–0.082
PC4	0.055	0.028	0.056
Maximum depth	0.840	0.833	0.852
Hollow area	0.832	0.828	0.848

Shades of color represent the degree of correlation, with darker green corresponding to the highest degrees and white to the lowest degree. Red indicates negative correlation.

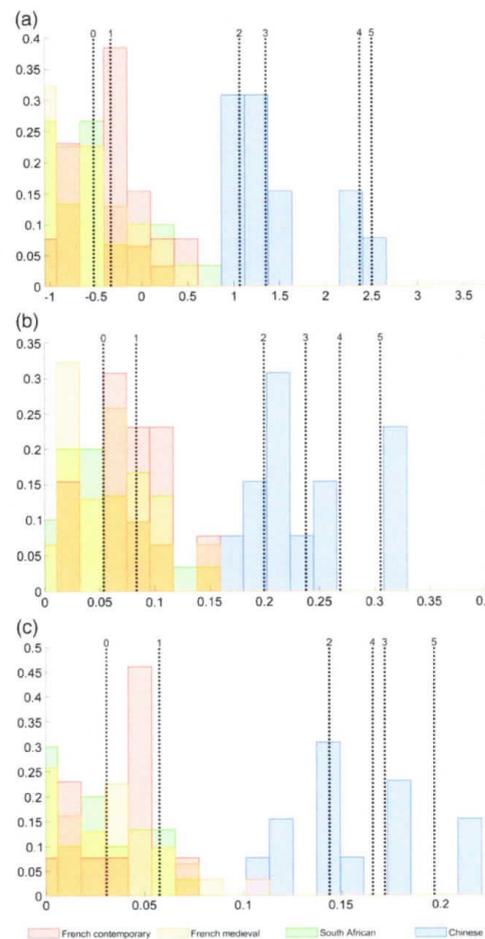


FIGURE 4 Histograms showing the frequency of Procrustes PC1 (a), maximum depth (b), and hollow area (c) values for the 87 modern human specimens and the distribution of the ASUDAS reference grades (black vertical lines) [Color figure can be viewed at wileyonlinelibrary.com]

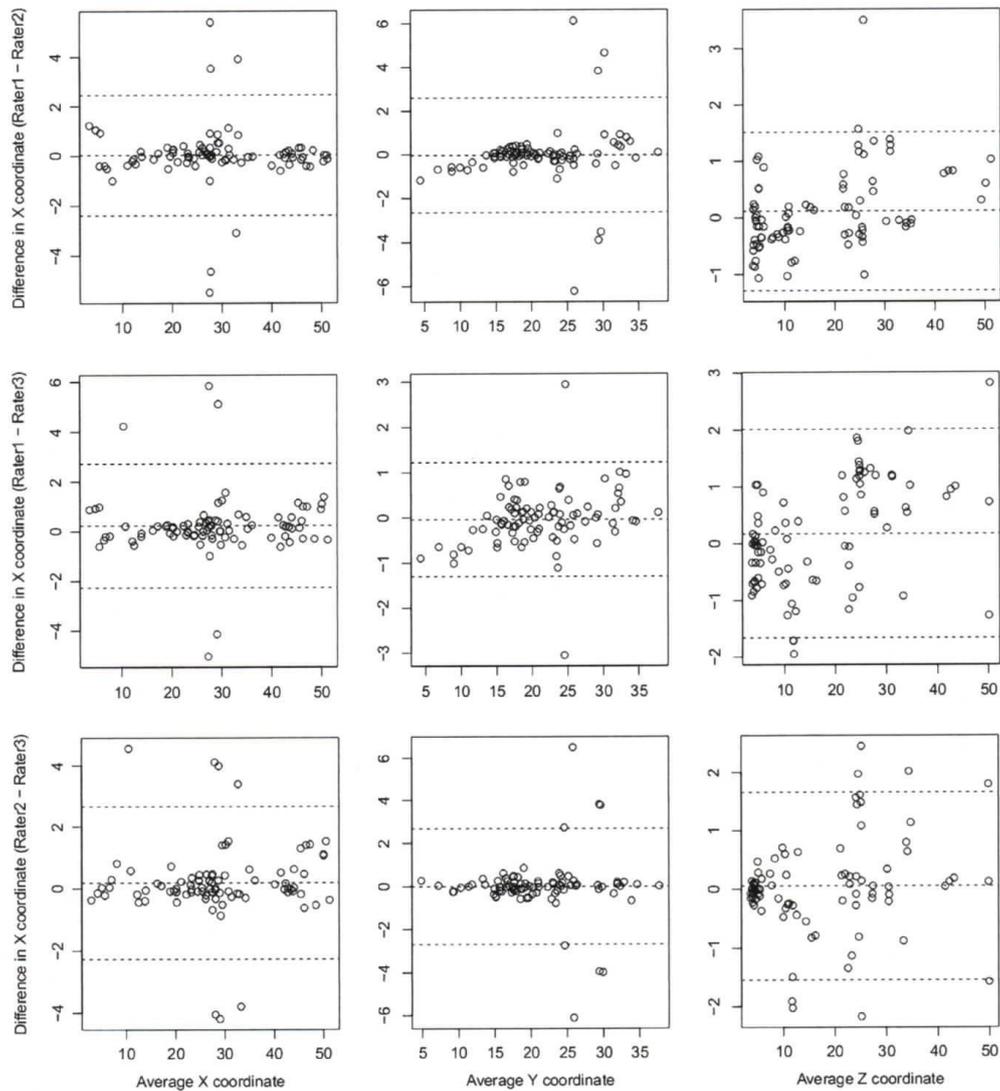


FIGURE 5 Bland-Altman visualization for agreement of the ASUDAS visual observations and Procrustes coordinates of the semilandmark curves. The different agreements between the two raters were plotted for X, Y, and Z float coordinates. Among the 100 landmarks, only the first, mid, and last landmarks are drawn

of the reference grades. Again, grades 0 and 1 are close to each other, while grades 2 to 5 are grouped together and 6 is alone. In accordance with the knowledge that East Asian populations show a higher degree of shoveling than the rest, the histogram of Chinese samples for maximum depth (Figure 4b) shows no overlap with the French and South African samples. It is also interesting to note that several samples from each population have a maximum depth value that is intermediate between the

ASUDAS categories 1 and 2 (which have a large gap between them). This might create some difficulties for the observers to assign ASUDAS ratings to them, and also reduce the distinction between populations when compared via ASUDAS category frequencies. However, the quantitative maximum depth measurements provide a complete separation of the Chinese samples from the rest. The hollow area metric also achieves near-complete separation and shows a similar pattern.

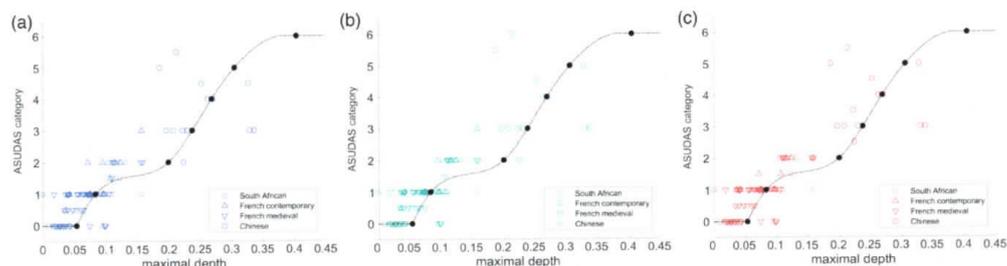


FIGURE 6 Plots of the maximum depth against the visual ASUDAS scoring of the first observer's tests (VS1 T1: a; VS1 T2: b) and the second rater (VS2: c). The black dots correspond to the values of the ASUDAS reference plaque and they were joined up via spline interpolation. The symbols represent the chronogeographic origin as indicated in the legend of the graphs [Color figure can be viewed at wileyonlinelibrary.com]

Principal components calculated from the non-Procrustes aligned coordinates showed trends similar to those of the Procrustes PCs. PC1 alone explained 92% of the variation, while PC2 explained a further 2.7%. The PC loadings are represented as PC shape changes in Supporting Information Figure 1.

Table 3 presents the correlation between these various metrics calculated on the 87 human specimens plus the 7 ASUDAS reference casts. In addition to the two direct measurements, maximum depth and hollow area, PC1 and PC2 are used from both Procrustes and non-Procrustes aligned methods. This indicates that the two direct metrics are very similar to each other, so it is sufficient to use either one. It also shows that both direct metric measurements, maximum depth and hollow area, have very high correlation with PC values obtained from the two analyses, as expected from the observations above, and therefore can be used in lieu of Procrustes PC values. The advantage of using direct measurement metrics over Procrustes PCs is that they are more directly interpretable, and not dependent on the whole dataset.

The correlation of ASUDAS category values with these metrics calculated on the ASUDAS reference casts was also assessed (Supporting Information Table 3). It shows that both metrics, as well as PC1 from both analyses, are highly correlated with the category values, while maximum depth has the highest correlation (98%). It also indicates that the Procrustes and non-Procrustes PCs are very similar to each other. The major feature of the ASUDAS scale for shoveling is the progressively increasing expression of the marginal ridges (Scott & Irish, 2017; Scott & Turner, 1997). Conversely, more protruding ridges imply a deeper lingual fossa, and hence the maximal depth metric gives a measure of the development of the mesial and distal ridges and constitutes an appropriate metric to quantitatively evaluate the expression of shoveling.

When combining the correlation patterns with the observation above that the maximum depth metric provides a complete separation of the Chinese samples from the rest, we considered the maximum depth to be the most likely candidate for any underlying "latent" quantitative variable that might be the basis of the ASUDAS categories. Considering that maximum depth has a 99% correlation with non-Procrustes PC1, which explains 92% variation of the landmark coordinates, it can be said that the maximum depth metric captures a large

part of the morphological variation of the labial aspect of the UI1 crown.

To assess the accuracy of the visual ASUDAS assessments made by two observers, we needed to compare them with objective "true" assessments of the modern human specimens. To make such objective estimates of ASUDAS categories on the specimens, we started with the objectively measured maximum depth metric, and employed the previously described prediction function. The prediction procedure uses the spline interpolation function constructed entirely based on the ASUDAS reference plaque (Figure 6), and is therefore free of subjectivity arising from other human raters. The spline model compares the maximum depth measurements against ASUDAS categories for the ASUDAS reference plaque elements. Using this objective prediction function on the objectively measured maximum depth metric for a new specimen provides an objective estimate of the ASUDAS grade for the new specimen. This estimated grade can then be compared to the subjective ASUDAS ratings provided by a human observer in order to assess the accuracy of the observer.

As found in our ICC intra- and interobserver tests (Table 2), the specimens the observers assessed as expressing low degrees of shoveling (grades 0–1), namely most of the South African and French samples, were closer to the predicted "true" values (using the ASUDAS reference grades), being less scattered around the spline interpolation curve used for the prediction (Figure 6). In contrast, observer ratings for those recorded as having marked shoveling (grade 2 and above)—primarily the Chinese samples—were much more scattered around the spline curve, indicating that they differed more from the predicted "true" ASUDAS grades (Figure 6). This corroborates our observation above that the populations are harder to separate on the categorical ASUDAS scale than by means of the quantitative maximum depth metric. Still, no Chinese specimen was visually rated below grade 2, and very few European and African specimens were recorded as grade 2 or above, which indicates that, despite the subjective variability, the samples can usually be dichotomized by human raters into high or low shoveling with reasonable accuracy.

When comparing the correlation between the visual assessments (based on the ASUDAS definition and plaque) and some objectively obtained measurements (e.g., predicted ASUDAS values, maximum depth, hollow area), we found that the maximum depth and hollow area metrics correlated highly with visual scoring, even to a higher

level than with the predicted ASUDAS values (Table 4). This could suggest that there is a major unconscious reaction to the maximum depth aspect when recording shoveling by following the classical ASUDAS method. In order to test whether the observers were more influenced visually by the depth of the palatal aspect than by the global morphology, we dichotomized the observer ratings following the standard protocol for ASUDAS traits (Scott et al., 2018; Scott & Irish, 2017), which splits the categories of this trait into two broad groups (grades ≤ 1 vs. grades ≥ 2), and re-ran ICC consistency and accuracy measures (Table 5). This grouping mimicked the distinction between East Asians and the rest by separating absent/low degrees of shoveling and marked shoveling. The new ICC values showed high degrees of precision and accuracy, suggesting that the visual scoring performed by observers was largely successful at separating low degrees of shoveling from marked shoveling, but not so successful in detecting finer differences between the ASUDAS casts. This result is relevant as it shows that, while the ASUDAS method is efficient to distinguish below and above the breakpoint grade 2, it is more prone to bias when dealing with close grades and limits the possibilities for more advanced analyses. For example, an important question regarding dental traits is to find which genetic factors are responsible for a trait's expression. Scott and Turner (1997) used the example of incisor shoveling to conclude that such nonmetric dental traits possibly arise from an underlying continuous trait which is likely polygenic. They also note that dichotomizing such traits leads to the loss of a large amount of variation in the trait. As an extreme example, all Native Americans may have the constant value of "present" for the shoveling trait, which causes it to "lose its status as a nonmetric variant as it is present in all individuals." Such loss of variation, either when constructing a "quasi continuous" (ordinal) trait from a continuous underlying trait, or when dichotomizing an ordinal trait, reduces the resolution of the data. This loss of variation leads to a loss of power in genetic association analysis, where the use of a continuous trait can entail "significantly higher power," especially with small sample sizes (Bhandari, Lochner, & Tornetta, 2002). In their literature review, Scott et al. (2018) also note that such simplifications can create several problems for genetic analyses, for example, the simplified traits can "sometimes mimic the segregation patterns of simple Mendelian inheritance where, in reality, inheritance is complex." (Scott et al., 2018, pp. 133). Even in the context of assessing rater reliability, the higher resolution offered by continuous data provides much better reliability estimates (Donner & Eliasziw, 1994).

In the context of clinical studies, Altman (2006) comments that dichotomized variables often appear to be more alluring as they simplify the data while retaining the main dichotomy that is thought to be the crux of the variable, thereby leading to simpler interpretations as

well as higher rater agreement. Yet such deliberate discarding of data causes several problems: loss of power, increased risk of false positives, underestimation of variation within or between groups, loss of information about the relationship between the trait and other variables, and increased confounding with other variables in regression analysis, such as genetic association analysis. MacCallum, Zhang, Preacher, and Rucker (2002) report similar criticisms, and emphasize the problems in statistical analysis. Using a dichotomous variable means that many statistical procedures are not applicable, for example, in a genetic association study, the standard linear regression model, which allows estimation of effect sizes in absolute units, cannot be used. Dichotomous variables can only be used with logistic regression, which only estimates effect sizes on an odds ratio scale, making it much more difficult to interpret the effect of a genetic marker or combine evidence from multiple studies.

The sample-dependent nature of principal components means that the PCs depend on the whole sample composition. We investigated how the PCs could change when the dataset was limited to European samples, which span only a narrow range of the trait variability (without any marked shoveling). To assess this, we performed the alignment and PC calculation steps for both Procrustes and non-Procrustes methods while restricting the dataset to French samples (contemporary and medieval), and obtained their correlation with the directly measured metrics. For these correlation values, the correlation of PC1 from both analyses with maximum depth decreased a little (compared to Table 3), especially for the Procrustes PC (Supporting Information Table 4). This indicates that PCs calculated in this reduced dataset with a narrower range of variability might have some increased noise or may be slightly less able to capture the actual underlying metric of lower grades. To verify this, we looked at the correlation of rater-assigned ASUDAS categories of the French samples with these PCs and directly measured metrics (Supporting Information Table 5). In contrast to Table 4, correlations of the rater-assigned ASUDAS categories with maximum depth are higher than their correlations with PC1 by a larger margin.

4 | DISCUSSION

In the literature, the significance of errors due to the role of the observer in the visual scoring of dental nonmetric traits using the ASUDAS method is usually considered as being low and/or negligible (Bailey & Hublin, 2013; Hillson, 2005; Scott & Turner, 1997). Applied to decades of research, the classical ASUDAS method has proved to be quite efficient for inferring biological relationships among modern humans (Scott et al., 2018; Scott & Turner, 1997), living non-human

TABLE 5 ICC values for intraobserver (VS1 T1 vs. T2) and interobserver (VS1 vs. VS2) consistency measures and accuracy (comparing the three ratings with their predicted values from the ASUDAS reference plate teeth) when grades 0–1 and 2–6 are fused into two groups (two-category split)

	Consistency (precision)		Accuracy (unbiasedness)	
	VS1 T1 vs. T2	VS1 vs. VS2	VS1 T1 vs. predicted	VS2 vs. predicted
All samples	0.945	0.964	0.812	0.827

Shades of color represent the degree of consistency and accuracy, with darker green corresponding to the highest degrees and white to the lowest degree.

primates (Pillbrow, 2003) and fossil hominins (Bailey & Hublin, 2013; Bailey & Wood, 2007; Crummett, 1994; Irish et al., 2013; Martínón-Torres et al., 2007; Mizogushi, 1985)—in part because, once the grades are scored, they are dichotomized into presence/absence to help reduce observer error and because of the current dichotomous biological distance statistics available (e.g., MMD). There has been a previous attempt to link morphology and measurements for the UI1 shoveling trait, notably by considering the depth of the lingual fossa with respect to ASUDAS grades (Hanihara, 2008). However, this method only considers the maximum depth at the center of the lingual fossa and does not quantify the shape of this fossa. Thus, it is still possible to develop innovative, complementary methods. The recent development of quick and efficient methods for acquiring 3D models of an object (e.g., photogrammetry, laser scanner), together with the advent of powerful quantitative techniques to assess shape variation (geometric morphometrics), has opened up new ways to test the reliability (precision and accuracy) of the ASUDAS method. These methods represent an opportunity to provide objective protocols to investigate nonmetric dental variation. In this preliminary study, we have compared the classical plaque-based visual scoring assessment with a new 3D geometric morphometric approach. We propose here a simple, fast method based on geometric morphometrics to characterize a sample of modern human UI1s using a continuous scale of morphological variation of shoveling. The intraobserver error related to the visual scoring is very low, as previously demonstrated for ASUDAS plaques (Nichol & Turner II, 1986; Scott, 2008; Scott & Irish, 2017; Scott & Turner, 1997). As anticipated, our results highlight some limitations of the use of the current ASUDAS plaque, indicating that it did not necessarily represent an objective gradient of expression of a nonmetric tooth feature (Figures 3, 4, and 6). Our results also agree with the currently recognized ASUDAS breakpoint between the recorded absence (grades 0–1) and presence (grades 2–7) of shoveling (Scott et al., 2018; Scott & Irish, 2017). This method can also distinguish between the French and South African groups (expressing low degrees of shoveling) and the Chinese sample (being more variable but mostly showing well-defined shovel-shaped incisors). This is in agreement with the vast literature on the topic (e.g., Irish & Scott, 2016; Scott et al., 2018; Scott & Irish, 2017; Scott & Turner, 1997) and demonstrates that our method, while confirming the ASUDAS results, opens a path toward more advanced quantitatively-based assessment for the distinction of fossil and extant human populations. This modest sample was only used here to test the method, but by increasing it and incorporating larger chronogeographic groups, including fossil hominins, there is a high potential to better understand the evolution of shovel-shaped incisors. For example, Neanderthals are well-known for their markedly shovel-shaped incisors and, given the increasing availability of 3D virtual data on their teeth, paleogenetics techniques, and molecular data on tooth morphology (Zanolli, Hourset, Esclassan, & Mollereau, 2017), this new quantitative method is perfectly suited to the investigation of the evolution of UI1 shoveling.

Our protocol integrates the analysis of two different but complementary aspects: the depth of the lingual surface with respect to the marginal ridges and the shape of the lingual aspect. This is an important point as our analyses have revealed that visual rating of shoveling

tends to be more prone to intra- and inter-observer bias for the highest grades (even starting at grade 2). In addition, even when the observers are well trained and follow the definition of the UI1 shoveling trait (Supporting Information Table 2), when dealing with numerous specimens, they tend to create a mental image of the ASUDAS categories and then make their judgments, resulting in a mental scale that is linearly dependent on the maximum depth of the palatal aspect, while the ASUDAS grades are not distributed linearly for this parameter. This results in the visually assigned ratings being correlated with the maximum depth rather than with predicted ASUDAS categories. In this context, our results provide a reliable, reproducible framework reinforced by statistical results supporting the fact that open scale numerical measurements can complement the ASUDAS method and provide new information. Of course, similar methods complementing the classic ASUDAS method still need to be developed for other nonmetric dental traits. There are also other possibilities for the quantitative study of shape variation, with or without landmarks. For example, a surface deformation-based approach considering a 3D portion of the crown surface (such as the lingual aspect in the case of UI1 shoveling) could be used to assess the degree of deformation from one tooth to another and quantify shape variations of the complete set of dental traits (Durrleman et al., 2012; Durrleman et al., 2014). Thus, although the ASUDAS is a reliable and efficient tool, it is still possible to complement it with alternative methods.

ACKNOWLEDGMENTS

This study is based on the PhD research program of the first author. It is supported by the French CNRS. The work of P. Monsarrat is supported by Université de Toulouse Hospital (CHU de Toulouse), Université Toulouse III—Paul Sabatier, the Midi-Pyrénées Region, and the research platform of the Toulouse Dental Faculty (PLTRO). J. Braga provided access to the ASUDAS plaque. We thank G. Krüger for granting access to the Pretoria Bone Collection (PBC) used in this study. For scientific discussion, we are also grateful to F. Duret. The authors are grateful to the editors and the three anonymous reviewers for their valuable comments that greatly helped to improve this article.

ORCID

Delphine Carayon  <http://orcid.org/0000-0002-0274-3065>

Lei Pan  <http://orcid.org/0000-0003-1164-0364>

REFERENCES

- Altman, D. G. (2006). The cost of dichotomising continuous variables. *The British Medical Journal*, 332, 1080.
- Bailey, S. E., & Hublin, J. -J. (2013). What does it mean to be dentally "modern"? In G. R. Scott & J. D. Irish (Eds.), *Anthropological perspectives on tooth morphology, genetics, evolution, variation* (pp. 222–249). Cambridge, UK: Cambridge University Press.
- Bailey, S. E., & Wood, B. A. (2007). Trends in postcanine occlusal morphology within the hominin clade: The case of *Paranthropus*. In S. E. Bayley & J. -J. Hublin (Eds.), *Dental perspectives on human evolution: State of the art research in dental anthropology* (pp. 33–52). Dordrecht, The Netherlands: Springer.
- Bhandari, M., Lochner, H., & Tornetta, P. (2002). Effect of continuous versus dichotomous outcome variables on study power when sample sizes

- of orthopaedic randomized trials are small. *Archives of Orthopaedic and Trauma Surgery*, 122, 96–98.
- Carbonell, V. M. (1963). Variations in the frequency of shovel-shaped incisors in different populations. In D. R. Brothwell (Ed.), *Dental anthropology* (pp. 211–234). New York, NY: Pergamon Press.
- Carter, K., Worthington, S., & Smith, T. (2014). Nonmetric dental traits and hominin phylogeny. *Journal of Human Evolution*, 69, 123–128.
- Coleman, M. N., & Colbert, M. W. (2007). CT thresholding protocols for taking measurements on three-dimensional models. *American Journal of Physical Anthropology*, 133, 723–725.
- Crummett, T. (1994). The evolution of shovel shaping: Regional and temporal variation in human incisor morphology (PhD dissertation). University of Michigan, Ann Arbor.
- Crummett, T. (1995). The three dimensions of shovel-shaping. In J. Moggi-Cecchi (Ed.), *Aspects of dental biology: Palaeontology, anthropology and evolution* (pp. 305–313). Florence, Italy: International Institute for the Study of Man.
- Dahlberg, A. A. (1956). *Materials for the establishment of standards for classification of tooth characteristics, attributes, and techniques in morphological studies of the dentition*. Chicago, IL: Zoller Laboratory of Dental Anthropology, University of Chicago.
- Dahlberg, A. A., & Mikkelsen, O. (1947). The shovel-shaped character in the teeth of the Pima Indians. *American Journal of Physical Anthropology*, 5, 234–235.
- Denton, L. C. (2011). Shovel-shaped incisors and the morphology of the enamel-dentin junction: An analysis of human upper incisors in three dimensions (Master dissertation). Colorado State University, Fort Collins.
- Donner, A., & Eliasziw, M. (1994). Statistical implications of the choice between a dichotomous or continuous trait in studies of interobserver agreement. *Biometrics*, 50, 550–555.
- Dray, S., & Dufour, A. B. (2007). The ade4 package: Implementing the duality diagram for ecologists. *Journal of Statistical Software*, 22, 1–20.
- Dryden, I. L. (2017). *Shapes package. Contributed package. Version 1.2.3*. Vienna, Austria: R foundation for Statistical Computing. <http://www.R-project.org>
- Durrleman, S., Prastawa, M., Charon, N., Korenberg, J. R., Joshi, S., Gerig, G., & Trounev, A. (2014). Morphometry of anatomical shape complexes with dense deformations and sparse parameters. *NeuroImage*, 101, 35–49.
- Durrleman, S., Prastawa, M., Korenberg, J. R., Joshi, S., Trounev, A., & Gerig, G. (2012). Topology preserving atlas construction from shape data without correspondence using sparse parameters. In N. Ayache, H. Delingette, P. Golland, & K. Mori (Eds.), *Proceedings of medical image computing and computer aided intervention* (pp. 223–230). Nice, France: Springer.
- Fajardo, R. J., Ryan, T. M., & Kappelman, J. (2002). Assessing the accuracy of high-resolution X-ray computed tomography of primate trabecular bone by comparisons with histological sections. *American Journal of Physical Anthropology*, 118, 1–10.
- Gamer, M., Lemon, J., & Puspendra Singh, I. (2012). *Irr: Various coefficients of interrater reliability and agreement. R package version 0* (Vol. 84). Vienna, Austria: R foundation for Statistical Computing. <https://CRAN.R-project.org/package=irr>
- Goaz, P. W., & Miller, M. C. (1966). A preliminary description of the dental morphology of the Peruvian Indians. *Journal of Dental Research*, 45, 106–119.
- Hanihara, K. (1969). Mongoloid dental complex in the permanent dentition. In *Proceedings of the VIIIth International Congress of Anthropological and Ethnological Sciences* (Vol. 1, pp. 298–300). Tokyo and Kyoto, Japan.
- Hanihara, K. (2008). Morphological variation of major human populations based on nonmetric dental traits. *American Journal of Physical Anthropology*, 136, 169–182.
- Hanihara, K., Masuda, T., & Tanaka, T. (1975). Family studies of the shovel trait in the maxillary central incisor. *Journal of the Anthropological Society of Nippon*, 83, 107–112.
- Hillson, S. W. (1996). *Dental anthropology*. Cambridge, UK: Cambridge University Press.
- Hillson, S. W. (2005). *Teeth*. Cambridge, UK: Cambridge University Press.
- Hlusko, L. J., Carlson, J. P., Chaplin, G., Elias, S. A., Hoffercker, J. F., Huffman, M., Scott, G. R. (2018). Environmental selection during the last ice age on the mother-to-infant transmission of vitamin D and fatty acids through breast milk. *Proceedings of the National Academy of Sciences of The United States of America*, 115, E4426–E4432.
- Hoffman, J. W., & de Beer, F. C. (2012). Characteristics of the micro-focus X-ray tomography facility (MIXRAD) at Necsa in South Africa. In *Proceedings of the 18th World Conference on Nondestructive Testing* (pp. 1–12). Durban, South Africa: South African Institute for Non-Destructive Testing.
- Hrdlička, A. (1920). Shovel-shaped teeth. *American Journal of Physical Anthropology*, 3, 429–465.
- Hughes, I., & Hase, T. (2010). *Measurements and their uncertainties: A practical guide to modern error analysis*. Oxford, UK: Oxford University Press.
- Irish, J. D. (1998). Ancestral dental traits in recent sub-Saharan Africans and the origins of modern humans. *Journal of Human Evolution*, 34, 81–98.
- Irish, J. D. (2014). Dental nonmetric variation around the world: Using key traits in populations to estimate ancestry in individuals. In G. E. Berg & S. C. Ta'ala (Eds.), *Biological affinity in forensic identification of human skeletal remains: Beyond black and white* (pp. 165–190). Boca Raton, FL: CRC Press-Taylor and Francis Group.
- Irish, J. D., & Guatelli-Steinberg, D. (2003). Ancient teeth and modern human origins: An expanded comparison of African Plio-Pleistocene and recent world dental samples. *Journal of Human Evolution*, 45, 113–144.
- Irish, J. D., Guatelli-Steinberg, D., Legge, S. S., Ruiters, D. J., & Berger, L. R. (2013). Dental morphology and the phylogenetic "place" of *Australopithecus sediba*. *Science*, 340, 1233062.
- Irish, J. D., Guatelli-Steinberg, D., Legge, S. S., Ruiters, D. J., & Berger, L. R. (2014). Response to "non-metric dental traits and hominin phylogeny" by Carter et al., with additional information on the Arizona State University dental anthropology system and phylogenetic "place" of *Australopithecus sediba*. *Journal of Human Evolution*, 69, 129–134.
- Irish, J. D., & Scott, G. R. (2016). *A companion to dental anthropology*. Chichester, England: Wiley Blackwell.
- Jernvall, J., Keränen, S. V. E., & Thesleff, I. (2000). Evolutionary modification of development in mammalian teeth: Quantifying gene expression patterns and topography. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 97, 14444–14448.
- Joint Committee for Guides in Metrology (2008). The international vocabulary of metrology. In *Basic and general concepts and associated terms*. Geneva, Switzerland: Joint Committee for Guides in Metrology.
- Kimura, R., Yamaguchi, T., Takeda, M., Kondo, O., Toma, T., Haneji, K., ... Oota, H. (2009). A common variation in EDAR is a genetic determinant of shovel shaped incisors. *The American Journal of Human Genetics*, 85, 528–535.
- Koo, T. K., & Li, M. Y. (2017). A guideline of selecting and reporting intraclass correlation coefficients for reliability research. *Journal of Chiropractic Medicine*, 15, 155–163.
- Le Cabec, A., Gunz, P., Kupczik, K., Braga, J., & Hubin, J. J. (2013). Anterior tooth root morphology and size in Neanderthals: Taxonomic and functional implications. *Journal of Human Evolution*, 64, 169–193.
- Lehnert, B. (2015). *BlandAltmanLeh package. Contributed package. Version 0.3.1*. Vienna, Austria: R foundation for Statistical Computing. <http://www.R-project.org>
- Ligges, U., & Mächler, M. (2003). Scatterplot3d—An R package for visualizing multivariate data. *Journal of Statistical Software*, 8, 1–20.
- MacCallum, R. C., Zhang, S., Preacher, K. J., & Rucker, D. D. (2002). On the practice of dichotomization of quantitative variables. *Psychological Methods*, 7, 19–40.
- Martínón-Torres, M., Bermúdez de Castro, J. M., Gómez-Robles, A., Arsuaga, J. L., Carbonell, E., Lordkipanidze, D., ... Margvelashvili, A. (2007). Dental evidence on the hominin dispersals during the Pleistocene. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 104, 13279–13282.
- MATLAB and Statistics Toolbox Release. (2017). *MATLAB and statistics toolbox release*. Natick, MA: The MathWorks, Inc..

- Mizogushi, Y. (1985). *Shoveling: A statistical analysis of its morphology*. Tokyo, Japan: The University Museum, the University of Tokyo Bulletin.
- Mizogushi, Y. (2013). Significant among-population associations found between dental characters and environmental factors. In G. R. Scott, & J. D. Irish (Eds.), *Anthropological perspectives on tooth morphology, genetics, evolution, variation* (pp. 108–125). Cambridge, UK: Cambridge University Press.
- Nichol, C. R., & Turner, C. G., II (1986). Intra- and interobserver concordance in classifying dental morphology. *American Journal of Physical Anthropology*, *69*, 299–315.
- Park, J. H., Yamaguchi, T., Watanabe, C., Kawaguchi, A., Haneji, K., Takeda, M., Kimura, R. (2012). Effects of an Asian-specific nonsynonymous EDAR variant on multiple dental traits. *Journal of Human Genetics*, *57*, 508–514.
- Pilbrow, V. (2003). Dental variation in African apes with implications for understanding patterns of variation in species of fossil apes (PhD dissertation). New York, University of New York.
- R Core Team. (2017). *R foundation for statistical computing. Version 3.4.3*. Vienna, Austria, R Core Team Available from: <http://www.R-project.org>.
- Salazar-Ciudad, I., & Jernvall, J. (2002). A gene network model accounting for development and evolution of mammalian teeth. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, *99*, 8116–8120.
- Salazar-Ciudad, I., & Jernvall, J. (2010). A computational model of teeth and the developmental origins of morphological variation. *Nature*, *464*, 583–586.
- Scott, G. R. (1973). Dental morphology: A genetic study of American white families and variation in living southwest Indians (PhD dissertation). Department of Anthropology, Arizona State University, Tempe, AZ.
- Scott, G. R. (2008). Dental morphology. In A. Katzenburg & S. Saunders (Eds.), *Biological anthropology of the human skeleton* (2nd ed., pp. 265–298). New York, NY: Wiley-Liss.
- Scott, G. R., & Irish, J. D. (2017). *Human tooth crown and root morphology. The Arizona State University dental anthropology system*. Cambridge, UK: Cambridge University Press.
- Scott, G. R., & Turner, C. G. (1997). *The anthropology of modern human teeth: Dental morphology and its variation in recent human populations* (2nd ed.). Cambridge, UK: Cambridge University Press.
- Scott, G. R., Turner, C. G., Townsend, G. C., & Martínón-Torres, M. (2018). *The anthropology of modern human teeth. Dental morphology and its variation in recent and fossil Homo sapiens*. Cambridge, UK: Cambridge University Press.
- Shrout, P. E., & Fleiss, J. L. (1979). Intraclass correlations: Uses in assessing rater reliability. *Psychological Bulletin*, *86*, 420–428.
- Smith, H. B. (1984). Patterns of molar wear in hunter-gatherers and agriculturalists. *American Journal of Physical Anthropology*, *63*, 39–56.
- Spoor, C. F., Zonneveld, F. W., & Macho, G. A. (1993). Linear measurements of cortical bone and dental enamel by computed tomography: Applications and problems. *American Journal of Physical Anthropology*, *91*, 469–484.
- Taverne, P. P., Amesz-Voorhoeve, W. H. M., & Leertouwer, H. L. (1979). A photogrammetric method which provides geometric data in dental morphology. *Zeitschrift für Morphologie und Anthropologie*, *70*, 163–173.
- Turner, C. G. II. (1990). Major features of sundadonty and sinodonty, including suggestions about East Asian microevolution, population history, and late Pleistocene relationships with Australian aboriginals. *American Journal of Physical Anthropology*, *82*, 295–317.
- Turner, C. G. II., Nichol, C. R., & Scott, G. R. (1991). Scoring procedures for key morphological traits of the permanent dentition: The Arizona State University dental anthropology system. In M. A. Kelley & C. S. Larsen (Eds.), *Advances in dental anthropology* (pp. 13–31). New York, NY: Wiley-Liss.
- Zanolli, C. (2013). Additional evidence for morpho-dimensional tooth crown variation in a new Indonesian *H. erectus* sample from the Sangiran dome (Central Java). *PLoS One*, *8*, e67233.
- Zanolli, C., Bondioli, L., Coppa, A., Dean, M. C., Bayle, P., Candilio, F., ... Macchiarelli, R. (2014). The late early Pleistocene human dental remains from Uadi Aalad and Mulhuli-Amo (Buia), Eritrean Danakil: Macromorphology and microstructure. *Journal of Human Evolution*, *74*, 96–113.
- Zanolli, C., Hourset, M., Esclassan, R., & Mollereau, C. (2017). Neanderthal and Denisova tooth protein variants in present-day humans. *PLoS One*, *12*, e0183802.

SUPPORTING INFORMATION

Additional supporting information may be found online in the Supporting Information section at the end of the article.

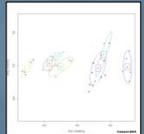
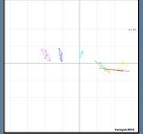
How to cite this article: Carayon D, Adhikari K, Monsarrat P, et al. A geometric morphometric approach to the study of variation of shovel-shaped incisors. *Am J Phys Anthropol*. 2018; 1–13. <https://doi.org/10.1002/ajpa.23709>

Intérêts de l'imagerie 3D dans l'approche morphologique et morphométrique des caractères discrets dentaires.



ANAMNESE :
Intérêts anthropologiques de l'organe dentaire: excellente résistance temporelle/ excellent « marqueur clef » de l'évolution/ indicateur du stade de développement / témoin de l'environnement écologique et des rites culturels et alimentaires.
Gold standard dans l'étude de la morphologie dentaire : Arizona State University Dental Anthropology System (Turner 1970).
Controverse des plaques : souvent trop de degrés d'expression pour un même caractère avec un manque de lisibilité/ problème en cas d'usure dentaire majeure /gold standard en 2016 = répliques de plâtre/ par définition, les caractères discrets sont inquantifiables.
Problématique: comment améliorer la précision et la reproductibilité dans l'étude des caractères discrets?
Buts de l'étude: 1) créer une banque de données numériques 2) Créer un modèle morphométrique pour chaque caractère discret 3) analyser et stocker les données directement sur les sites de fouille.

MATERIELS ET METHODES:

Echantillons	Technique d'imagerie	Logiciel de modélisation surfacique	Logiciel de morphométrie géométrique	Premier outil statistique R Studio®	Deuxième outil statistique R Studio®
27 plaques ASUDAS  collection Médiévale Trèbes « La Sabatière » Ville/ IXe (Donat R., 2011) 	Caméra intra-orale: camera 3D CONDOR® (Duret 2014) 	Code C++ and Java 3D view® (Lignes de crêtes)  	Logiciel Amira®  Choix de landmarks reproductibles	Analyse en composantes principales 	Analyse en composante principale intergroupes 

RESULTATS : Exemple du « Shoveling » ou dent en forme de pelle

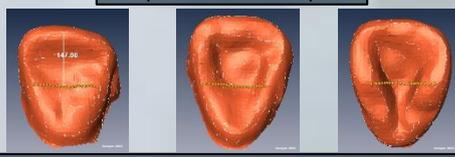
Etude du Shoveling



1^{ère} étape: numérisation de la plaque entière

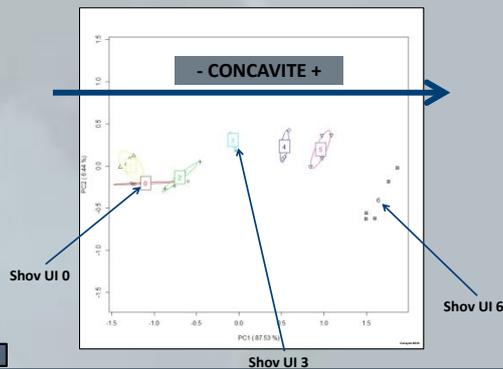


2^{ème} étape: numérisation de chaque dent



3^{ème} étape: choix de landmarks reproductibles pour évaluer les caractères discrets

Incisives en forme de pelle: UI 1, UI2, UC, LI1, LI2, LC.
 Présence de crêtes marginales mésiale et distale sur la surface linguale des dents antérieures maxillaires et mandibulaires.
 Etude de la variabilité de l'expression de la concavité de la surface linguale.
 Hrdlicka (1920) a mis en place une échelle incluant 4 catégories : absence, trace de shovel, semi-shovel et shovel. Plus récemment, des chercheurs ont déterminé une échelle de sept grades pour le shoveling, incluant de plus fines subdivisions que Hrdlicka. (Turner et al. 1991)



DISCUSSION :

Pourquoi se centrer sur la morphologie dentaire? Les caractères discrets dentaires caractérisent un haut degré d'individualité morphologique et sont codés comme présent (P) ou absent (A). L'utilisation des caractères morphologiques est moins précise que les données génétiques mais complète tous les éléments à notre crédit dans l'approche de la détermination des populations humaines et l'étude de l'organisation des espaces funéraires. La morphologie dentaire est génétiquement déterminée mais est largement influencée par l'environnement (altérations intentionnelles ou non de la morphologie).

Comment scorer un caractère discret dentaire? Est-ce que ce trait est présent ou non? / Est-ce que l'élément morphologique présent signe de la présence du caractère discret ou est-ce autre chose? / Si ce trait est clairement présent, sur quelle échelle est-il assigné? / Si le site du caractère discret est modifié par de l'usure, des caries ou un problème de réplique en plâtre: pouvons-nous le scorer?

PERSPECTIVES :

S'affranchir des plaques ASUDAS / Meilleur stockage et portabilité des données/ Gain de précision et de rapidité dans la caractérisation / Absence d'intervention directe sur les échantillons.

BIBLIOGRAPHIE : « The anthropology of modern human teeth » Scott and Turner. CSREA. 1997. « Anthropological perspectives on tooth morphology » Scott and Irish. CSREA. 2013. « News and views : non metric dental traits and hominin phylogeny » Carter et al. JHE 69 (2014)123-128. « News and views : response to 'non-metric traits and hominin phylogeny' by Carter et al., with additional information on the ASUDAS and phylogenetic place of Australopithecus sediba. » Irish et al. JHE 69 (2014) 129-134.

Morphological and morphometric dental characterisation in population study : interests of 3D imaging.



 CARAYON D.^{1,2}, DUMONCEL J.¹, ZANOLLI C.¹, DONAT R.^{1,4}, DURET F., VAYSSE F.³, ESCLASSAN R.^{1,3}



BACKGROUND :

Anthropological interests of dental organ: excellent resistance in time / excellent evolutionary « key marker » / indicator of the stage of development / witness of the ecological environment and of cultural rituals and food.

Gold standard in morphology study : Arizona State University Dental Anthropology System (Turner 1970).

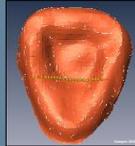
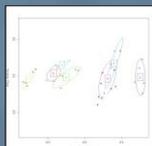
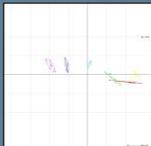
Controversy over the plaques : often too many degrees of expression with a lack of readability / problem if dental major wear / gold standard in 2016 = plaster replicas / by definition, the discrete character are unquantifiable.

Problematic : how to improve accuracy and reproductibility in studying the discrete character?

Aims of th study : 1) Create a digital data bank 2) Create morphometric model for each discrete character 3) Analyse and store data directly on search sites.



MATERIALS AND METHODS :

Samples	Imaging technic	Surface Modeling Software	Geometric morphometric software	First Statistic tool R Studio®	Second Statistic tool R Studio®
27 ASUDAS plaques  Medieval collection Trèbes « La Sabatière » Ville/ IXe (Donat R., 2011) 	Intra-oral scanner : 3D Optical camera CONDOR® (Duret 2014) 	Code C++ and Java 3D view® (crests lines)  	Amira software®  Choice of reproducible landmarks	Principal Component Analysis 	Between group principal components analysis 

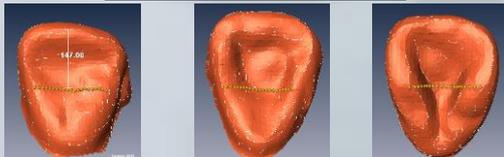
RESULTS : Shoveling's example



1st stage : numerisation of whole plaque



2nd stage : numerisation of each tooth

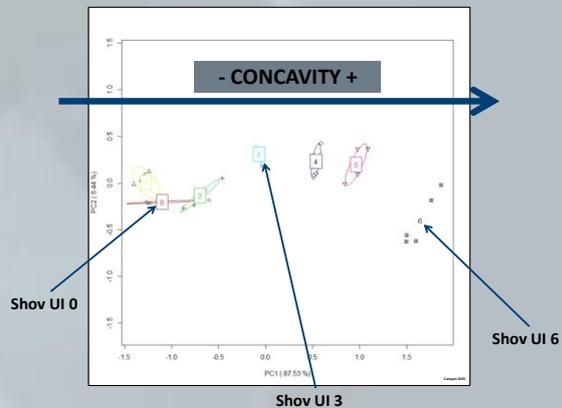


3rd stage : choice of reproducible landmarks to evaluate the discret character

Shovel Shaped Incisor : UI 1, UI2, UC, LI1, LI2, LC.

Presence of mesial and distal marginal ridges on the lingual surface of the upper and lower anterior teeth.

Study of the variability of concavity's expression of the lingual face. Hrdlicka (1920) graded scale that includes the categories of absence, trace-shovel, semi-shovel and full shovel. More recently, some workers have employed a seven grade scale for shoveling that provides finer subdivisions of Hrdlicka's semi and full shovel categories. (Turner et al. 1991)



DISCUSSION :

Why focus on dental morphology? Dental discrete characters characterize a high degree of morphological individuality and are coded as **present (P)** or **absent (A)**. Using morphological characters are less precise than genetic data but complete all elements to our credit in order to approach determination of human populations and study the organization of funeral space. Dental morphology is genetically determined but is largely influenced by the environment (intentional or nonintentional alterations of morphology).

How scoring a dental discrete character? Is the trait present or not? / Is the event on the site the presence of the character or something else? / The trait is clearly present but on what scale is it assigned? / If the character's site is changed by wear, caries or a problem of plaster replica : can we score it?

PERSPECTIVES :

Overcome ASUDAS plaques / Better storage and data portability/ Gain of accuracy in characterization and gain rapidly / Absence of direct intervention on samples.

BIBLIOGRAPHY : «The anthropology of modern human teeth » Scott and Turner. CSBEA. 1997. «Anthropological perspectives on tooth morphology » Scott and Irish. CSBEA. 2013. « News and views : non metric dental traits and hominin phylogeny » Carter et al. JHE 69 (2014)123-128. « News and views : response to 'non-metric traits and hominin phylogeny ' by Carter et al. , with additional information on the ASUDAS and phylogenetic place of Australopithecus sediba. » Irish et al. JHE 69 (2014) 129-134.

RESUME / ABSTRACT

Résumé.

Le *shoveling* de l'incisive centrale maxillaire est une caractéristique dentaire non-métrique utilisée en anthropologie comme indicateur des relations entre les populations. Ce trait morphologique dentaire est défini comme le degré d'élévation des crêtes mésiales et distales marginales sur la surface linguale des incisives maxillaires avec des formes plus prononcées renfermant une fosse. Plusieurs tentatives ont été faites pour classer et évaluer les différences de *shoveling* entre les populations humaines modernes et fossiles, en utilisant d'abord des approches descriptives détaillées et en élaborant par la suite des systèmes de notation ordinaire des traits. A ce jour, la technique gold standard pour l'analyse du *shoveling* est basée sur une échelle ordinaire de sept grades qui a été adaptée et intégrée à un système formel de notation des traits non métriques de la morphologie dentaire: le Arizona State University Dental Anthropology System (ASUDAS). Ce protocole standard est basé sur des plaques de plâtre de référence représentant les moulages de dents sélectionnées montrant un gradient d'expression d'un trait particulier. La notation ordinaire, même si elle est contrôlée par des définitions strictes des caractéristiques, des références visuelles et l'expérience de l'observateur, comprend une part inévitable de subjectivité. De plus, les supports d'information conventionnels utilisés par ASUDAS peuvent entraîner des pertes d'information dans le temps. Dans un premier temps, nous avons élaboré une nouvelle approche morphométrique quantitative pour évaluer la variation du *shoveling* des incisives centrales maxillaires humaines modernes (UI1). Nous avons analysé par imagerie virtuelle 87 UI1 humaines modernes (Europe, Afrique, Asie) et les 7 UI1 de la plaque de référence ASU-UI1 en utilisant la morphométrie géométrique et le positionnement de points de repères glissants. Les résultats de la répartition du *shoveling* en fonction des populations selon notre nouvelle méthode morphométrique sont en étroite corrélation avec la répartition du *shoveling* largement décrite dans la littérature. En outre, nos résultats ont mis en évidence certaines limites dans l'utilisation des plaques ASUDAS, laissant supposer qu'elles ne représentent pas nécessairement un gradient objectif d'expression de cette caractéristique dentaire non métrique. De plus, nos analyses suggèrent que les observateurs sont fortement influencés par la profondeur de la face palatine lors de l'évaluation visuelle du *shoveling*. La fiabilité et la reproductibilité statistique de nos résultats renforcent notre hypothèse de départ selon laquelle des mesures numériques à échelle ouverte et continue peuvent améliorer et compléter la méthode ASUDAS. Dans un second temps, nous proposons une nouvelle méthode d'investigation des échantillons à analyser en réalisant une empreinte optique via un scanner intra-oral ergonomique. Nous avons scanné 31 UI1 humaines modernes (Europe) par 3 méthodes d'imagerie différentes : microtomographie à Rayons X, scanner extra-oral de laboratoire Dental Wings®, Scanner intra-Oral Condor®. Nos résultats montrent que la précision et la reproductibilité de notre approche morphométrique du *shoveling* sont directement corrélées à la précision des surfaces de balayage. Le scanner intra-oral Condor® ayant montré des résultats statistiques favorables à l'analyse du *shoveling*, nous proposons une méthode simple, rapide, accessible et peu coûteuse d'investigation 3D non invasive de spécimens. Nos résultats renforcent notre hypothèse de départ selon laquelle la numérisation des données par le scanner intra-oral faciliterait l'archivage des informations et une meilleure accessibilité des données, par rapport aux supports conventionnels.

Abstract.

The shoveling of the maxillary central incisor is a non-metric dental characteristic frequently used in anthropology as an indicator of population relations for its taxonomic and phylogenetic relevance for many decades. This dental morphological feature is defined as the degree of elevation of the mesial and distal marginal ridges on the lingual surface of the maxillary incisors, canines and mandibular incisors, with more pronounced pit-like forms. From the 19th century until today, several attempts have been made to classify and assess the shoveling differences between fossil and modern human populations, first using detailed descriptive approaches and later developing ordinal feature notation systems. The standard gold technique for shoveling analysis is based on a seven-grade ordinal scale that has been adapted and integrated into a formal system for scoring non-metric features of dental morphology: the Arizona State University Dental Anthropology System (ASUDAS). This widely-used standard protocol is based on reference plaster plaques representing the casts of selected teeth showing a gradient of expression of a particular trait. Ordinal notation, even if controlled by strict definitions of characteristics, visual references, and observer experience, includes an inevitable element of subjectivity. Moreover, the conventional information support used by ASUDAS can lead to loss of information over time. Some researchers have attempted to reduce visual subjectivity by measuring the depth of lingual shoveling, but with little success in their results due to method accuracy problems.

First, we developed a new quantitative morphometric approach to assess the shoveling variation of modern human maxillary central incisors (UI1). We analyzed by virtual imaging 87 modern human UI1 (Europe, Africa, Asia) and the 7 UI1 of the ASU-UI1 reference plaque using geometric morphometry and the positioning of sliding reference points. The results of the distribution of shoveling according to populations according to our new morphometric method are in close correlation with the distribution of shoveling widely described in the literature. In addition, our results showed some limitations in the use of ASUDAS plaques, suggesting that they do not necessarily represent an objective gradient of expression of this non-metric dental characteristic. Moreover, our analyses suggest that observers are strongly influenced by the depth of the palatal surface during the visual evaluation of shoveling. The reliability and statistical reproducibility of our results reinforce our starting hypothesis that open and continuous numerical measurements can improve and complement the ASUDAS method.

In a second step, we propose a new method for investigating the samples by making an optical impression via an ergonomic intraoral scanner. We scanned 31 modern human UI1 (Europe) by 3 different imaging methods: X-ray microtomography, Dental Wings® extra-oral laboratory scanner, intra-Oral Condor® scanner. Our results show that the accuracy and reproducibility of our shoveling morphometric approach are directly correlated to the accuracy of the scanning surfaces. The Condor® intraoral scanner having shown statistical results favourable to shoveling analysis, we propose a simple, fast, accessible and inexpensive method of non-invasive 3D investigation of specimens. Our results reinforce our initial hypothesis that the digitization of data by the intraoral scanner would facilitate the archiving of information and a better accessibility of data, compared to conventional support.

AUTEUR : CARAYON Delphine

TITRE : Apport de la morphométrie géométrique et de l'imagerie 3D intra-orale dans l'étude du *shoveling* des incisives centrales maxillaires.

DIRECTEURS DE THESE : Pr Frédéric VAYSSE, Dr Rémi ESCLASSAN.

LIEU ET DATE DE SOUTENANCE : Toulouse, 19 Décembre 2018.

RESUME :

Le *shoveling* de l'incisive centrale maxillaire est une caractéristique dentaire non-métrique utilisée en anthropologie comme indicateur des relations entre les populations. Ce trait morphologique dentaire est défini comme le degré d'élévation des crêtes mésiales et distales marginales sur la surface linguale des incisives maxillaires avec des formes plus prononcées renfermant une fosse. Plusieurs tentatives ont été faites pour classer et évaluer les différences de *shoveling* entre les populations humaines modernes et fossiles, en utilisant d'abord des approches descriptives détaillées et en élaborant par la suite des systèmes de notation ordinaire des traits. A ce jour, la technique gold standard pour l'analyse du *shoveling* est basée sur une échelle ordinaire de sept grades qui a été adaptée et intégrée à un système formel de notation des traits non métriques de la morphologie dentaire : le Arizona State University Dental Anthropology System (ASUDAS). Ce protocole standard est basé sur des plaques de plâtre de référence représentant les moulages de dents sélectionnées montrant un gradient d'expression d'un trait particulier. La notation ordinaire, même si elle est contrôlée par des définitions strictes des caractéristiques, des références visuelles et l'expérience de l'observateur, comprend une part inévitable de subjectivité. De plus, les supports d'information conventionnels utilisés par ASUDAS peuvent entraîner des pertes d'information dans le temps. Dans un premier temps, nous avons élaboré une nouvelle approche morphométrique quantitative pour évaluer la variation du *shoveling* des incisives centrales maxillaires humaines modernes (UI1). Nous avons analysé par imagerie virtuelle 87 UI1 humaines modernes (Europe, Afrique, Asie) et les 7 UI1 de la plaque de référence ASU-UI1 en utilisant la morphométrie géométrique et le positionnement de points de repères glissants. Les résultats de la répartition du *shoveling* en fonction des populations selon notre nouvelle méthode morphométrique sont en étroite corrélation avec la répartition du *shoveling* largement décrite dans la littérature. En outre, nos résultats ont mis en évidence certaines limites dans l'utilisation des plaques ASUDAS, laissant supposer qu'elles ne représentent pas nécessairement un gradient objectif d'expression de cette caractéristique dentaire non métrique. De plus, nos analyses suggèrent que les observateurs sont fortement influencés par la profondeur de la face palatine lors de l'évaluation visuelle du *shoveling*. La fiabilité et la reproductibilité statistique de nos résultats renforcent notre hypothèse de départ selon laquelle des mesures numériques à échelle ouverte et continue peuvent améliorer et compléter la méthode ASUDAS. Dans un second temps, nous proposons une nouvelle méthode d'investigation des échantillons à analyser en réalisant une empreinte optique via un scanner intra-oral ergonomique. Nous avons scanné 31 UI1 humaines modernes (Europe) par 3 méthodes d'imagerie différentes : microtomographie à Rayons X, scanner extra-oral de laboratoire Dental Wings®, Scanner intra-Oral Condor®. Nos résultats montrent que la précision et la reproductibilité de notre approche morphométrique du *shoveling* sont directement corrélées à la précision des surfaces de balayage. Le scanner intra-oral Condor® ayant montré des résultats statistiques favorables à l'analyse du *shoveling*, nous proposons une méthode simple, rapide, accessible et peu coûteuse d'investigation 3D non invasive de spécimens. Nos résultats renforcent notre hypothèse de départ selon laquelle la numérisation des données par le scanner intra-oral faciliterait l'archivage des informations et une meilleure accessibilité des données, par rapport aux supports conventionnels

MOTS-CLEFS :

Anthropobiologie

Shoveling ou « incisives en forme de pelle »

ASUDAS

Morphométrie géométrique

Imagerie intra-orale

INTITULE ET ADRESSE DU LABORATOIRE :

Laboratoire d'Anthropologie Moléculaire et Imagerie de Synthèse (AMIS) UMR 5288 CNRS

Faculté de Médecine 37 Allées Jules Guesdes 31073 TOULOUSE Cedex 3