



Université  
de Toulouse

## MÉMOIRE DE STAGE MASTER IMAGE & MULTIMÉDIA

---

### Conception et Développement d'un Outil de Quantification de la Distribution de l'Épaisseur de l'Email Dentaire chez les Primates

---

*Stagiaire :*  
Margot CANTALOUBE

*Encadrants :*  
Clément ZANOLLI  
Jean-Pierre JESSEL

10 Septembre 2016





# Remerciements

Je tiens à exprimer ma reconnaissance à toutes les personnes qui ont contribué à l'enrichissement de mes connaissances et qui m'ont permis d'effectuer mon stage dans de si bonnes conditions :

- Clément Zanolli, chercheur au CNRS et co-tuteur, pour la confiance qu'il m'a accordée, ses encouragements, son investissement, et pour m'avoir fait découvrir avec passion l'anthropologie.
- Jean Dumoncel, ingénieur au CNRS, pour sa patience, la qualité de son écoute, et pour le temps passé à me former en l'informatique et à m'expliquer le fruit de son travail.
- Jean-Pierre Jessel, enseignant-chercheur à l'Université Paul Sabatier et directeur de l'Institut de Recherche en Informatique de Toulouse, co-tuteur, pour m'avoir permis de trouver ce stage, pour son suivi et sa disponibilité.
- David Vanderhaeghe, enseignant-chercheur à l'Université Paul Sabatier, encadrant universitaire, pour son suivi, ses conseils, et son aide pour la rédaction de ce mémoire.



# Table des matières

<b>Introduction</b>	<b>7</b>
<b>1 Contexte et objectifs</b>	<b>9</b>
1.1 Présentation du laboratoire . . . . .	9
1.1.1 Présentation générale . . . . .	9
1.1.2 Équipe de travail . . . . .	9
1.1.3 Équipe de recherche . . . . .	10
1.2 Sujet . . . . .	11
<b>2 Méthodologie</b>	<b>13</b>
2.1 Données . . . . .	13
2.1.1 Composition des dents . . . . .	13
2.1.2 Type de données . . . . .	14
2.2 Concept et outils . . . . .	15
2.2.1 Déformation . . . . .	15
2.2.2 Recalage de surfaces . . . . .	15
2.2.3 Deformetrica . . . . .	16
2.3 Protocole de comparaison des cartes d'épaisseurs . . . . .	18
2.3.1 Pré-traitement . . . . .	18
2.3.2 Traitement . . . . .	19
2.3.3 Post-traitement . . . . .	19
2.3.4 Sortie . . . . .	19
2.4 Chaîne de traitement . . . . .	19
<b>3 Développement méthodologique</b>	<b>21</b>
3.1 Génération des données d'entrée . . . . .	21
3.2 Pré-traitement . . . . .	21
3.2.1 Pose automatique des points d'intérêt de la demi-sphère .	21
3.2.2 Calcul des distances . . . . .	23
3.2.3 Projection des points d'intérêts sur l'œil . . . . .	24
3.2.4 Recalage rigide . . . . .	27
3.3 Traitement et optimisation avec EOS . . . . .	28
3.4 Post-traitement . . . . .	29
3.4.1 Projection des distances sur les surfaces déformée . . . . .	30
3.4.2 Aplanissement demi-sphère → disque . . . . .	31
3.4.3 Construction de l'image du disque . . . . .	33
3.4.4 [module] Soustraction des données . . . . .	37
3.4.5 [module] Analyse en composantes principales . . . . .	39

<b>4 Perspectives</b>	<b>40</b>
4.1 Pré-traitement . . . . .	40
4.2 Traitement . . . . .	40
4.3 Post-traitement . . . . .	41
4.4 Interface . . . . .	42
<b>5 Bilan Personnel</b>	<b>43</b>
Conclusion	44
Bibliographie	45

# Table des figures

1.1	Organigramme du laboratoire AMIS . . . . .	10
1.2	Exemple cartographies avec échelle de couleur . . . . .	12
2.1	Schéma en coupe des parties et tissus dentaires d'une molaire. . . . .	14
2.2	Schéma en coupe d'une molaire usée. . . . .	14
2.3	Schéma des parties et couches importantes d'une molaire. . . . .	15
2.4	Ordre de pose des points d'intérêt. . . . .	16
2.5	Schéma 2D du résultat du calcul de distances. . . . .	18
2.6	Chaîne de traitement. . . . .	20
3.1	Demi-sphère avec 4 points d'intérêt (ratio 0.5). . . . .	22
3.2	Demi-sphère avec 5 points d'intérêt (ratio 0.2 et 0.8). . . . .	22
3.3	Demi-sphère avec 4 et 5 points d'intérêt (ratio 0.5 et 0.6). . . . .	23
3.4	Schéma 2D de l'algorithme de calcul de distance émail → dentine.	23
3.5	Distance émail → dentine en fausse coloration. . . . .	24
3.6	Schéma 2D de l'algorithme de calcul de distance dentine → cervix.	25
3.7	Dentine avec distance dentine → cervix en fausse coloration. . . . .	25
3.8	Schéma projection des points d'intérêts vers l'émail (v1). . . . .	26
3.9	Schéma projection des points d'intérêts vers l'émail (v2). . . . .	26
3.10	Illustration du recalage rigide. . . . .	27
3.11	illustration du recalage non rigide. . . . .	29
3.12	Coloration de la demi-sphère déformée. . . . .	30
3.13	illustration de la transformation inverse. . . . .	31
3.14	Schéma de la projection orthographique. . . . .	32
3.15	Schéma de la projection stéréographique. . . . .	32
3.16	Schéma de la projection équiaréale. . . . .	33
3.17	Disques après paramétrisation de la demi-sphère. . . . .	34
3.18	Schéma de l'algorithme de l'exportation en image matricielle. . . . .	35
3.19	Image finale. . . . .	36
3.20	Image finale. . . . .	36
3.21	Soustraction des données. . . . .	37
3.22	Soustraction projetée. . . . .	38
4.1	Consensus . . . . .	41
4.2	Analyse en composante principale inter-groupe . . . . .	42

# Introduction

Très intéressée depuis mon enfance par les sciences et, plus particulièrement, les sciences de la Terre (géologie, paléontologie, pétrologie...), il m'a été très difficile d'abandonner au cours de ma scolarité certaines disciplines scientifiques au profit d'autres. Mon choix d'orientation s'est finalement porté vers l'informatique graphique, par intérêt certes, mais aussi par stratégie. En effet, l'informatique graphique et le traitement d'images sont aujourd'hui largement utilisés dans beaucoup de domaines scientifiques nécessitant analyses et visualisations tel que l'imagerie médicale, l'astronomie, l'ingénierie (simulation), l'aéronautique, la biologie, etc... Ainsi j'espérai par cette décision, m'ouvrir les portes d'autant de domaines scientifiques pour mes futurs travaux.

Dans le cadre de mon Master en informatique, Image et Multimédia, à l'Université Toulouse III Paul Sabatier, j'ai souhaité effectuer mon stage dans un laboratoire de recherche afin d'appliquer mes connaissances en informatique au service d'autres sciences. Toujours dans la même optique, il était important pour moi que mon travail fasse parti d'un ensemble pluridisciplinaire où chacun apporte un savoir, et qui m'oblige à m'ouvrir et à m'adapter à d'autres sciences que l'informatique.

Consciente de la faible probabilité de trouver un offre de stage répondant à mes attentes, le sujet proposé par Clément Zanolli, et Jean Dumoncel, au laboratoire AMIS (Anthropologie moléculaire et imagerie de synthèse), s'est présenté comme une occasion inattendue d'expérimenter enfin cette circonstance de travail.

Ce stage se déroule au sein d'un laboratoire de recherche en paléoanthropologie qui utilise l'imagerie 3D et la synthèse d'image pour la visualisation et l'analyse de fossiles d'Homininés<sup>1</sup>. Il a pour but de trouver une méthode de déformations et de recalages de surfaces de dents d'Homininés pour ensuite intégrer un système de classification automatique qui permettra de déterminer l'espèce des dents étudiées.

Nous verrons ainsi au travers de ce mémoire les différentes étapes de la méthode que nous proposons en tenant compte des contraintes biologiques inévitables.

Dans un premier temps je décrirai le laboratoire ainsi que l'équipe qui m'a accueillie et le caractère inédit du sujet qui se présente comme une méthode nouvelle et prometteuse pour la recherche en anthropologie. Je présenterai ensuite le protocole méthodologique dans son ensemble pour permettre un aperçu panoramique du traitement, puis j'étudierai de manière plus détaillée son déve-

---

1. Sous-famille des Hominidés qui regroupe les primates bipèdes non arboricoles, éteints ou non.

loppement, étape par étape. Ensuite je discuterai des perspectives de la méthode et des variantes éventuelles. Pour finir je dresserai un bilan du stage avant de conclure.

# Chapitre 1

## Contexte et objectifs

### 1.1 Présentation du laboratoire

#### 1.1.1 Présentation générale

La thématique principale du Laboratoire d'Anthropologie Moléculaire et de l'Imagerie de Synthèse (AMIS) concerne la diversité humaine, des premiers Hominidés<sup>1</sup> à l'humanité actuelle, en fonction de l'environnement et du milieu occupé à travers le monde. Au sein du laboratoire AMIS, des analyses paléogénomiques<sup>2</sup> et paleoprotéomiques<sup>3</sup> faites sur les vestiges biologiques de l'époque Holocène<sup>4</sup> permettent d'extraire les informations sur le génome de nos ancêtres et de retracer l'histoire de notre espèce. En plus des techniques conventionnelles propres à la paléoanthropologie, des méthodes d'imagerie 3D de pointe sont utilisées par les chercheurs du laboratoire pour accéder à la structure interne des fossiles sans les endommager et avoir accès à des informations biologiques uniques.

#### 1.1.2 Équipe de travail

Mon encadrement était assuré par deux membres de l'équipe de recherche en Phylogénie<sup>5</sup>, sélection et macro-évolution du genre *Homo*, Clément Zanolli (mon tuteur), chercheur au CNRS en paléoanthropologie et Jean Dumoncel, ingénieur en informatique au CNRS (cf organigramme, figure 1.1). Jean Pierre Jessel, Enseignant-chercheur et vice directeur de l'IRIT (Institut de Recherche en Informatique de Toulouse) assure la co-tutelle avec Clément Zanolli.

Clément Zanolli est mon encadrant, l'initiateur et le responsable du projet alors que Jean Dumoncel m'a encadrée pour le développement informatique. Dans suite, j'inclurai implicitement Jean Dumoncel dans le terme "tuteur" bien qu'il n'en fasse pas officiellement partie, ceci dans un soucis de lisibilité.

- 
1. Famille de primates regroupant les bonobos, chimpanzés, gorilles, humains, orangoutans, et leurs ancêtres éteints.
  2. Science qui applique les recherches sur l'ADN ancien à l'étude de évolution humaine.
  3. Étude des protéines d'une cellule, d'un organite, d'un tissu, d'un organe ou d'un organisme fossile.
  4. Époque géologique s'étendant sur les 11 700 dernières années.
  5. Étude des relations de parenté entre êtres vivant.

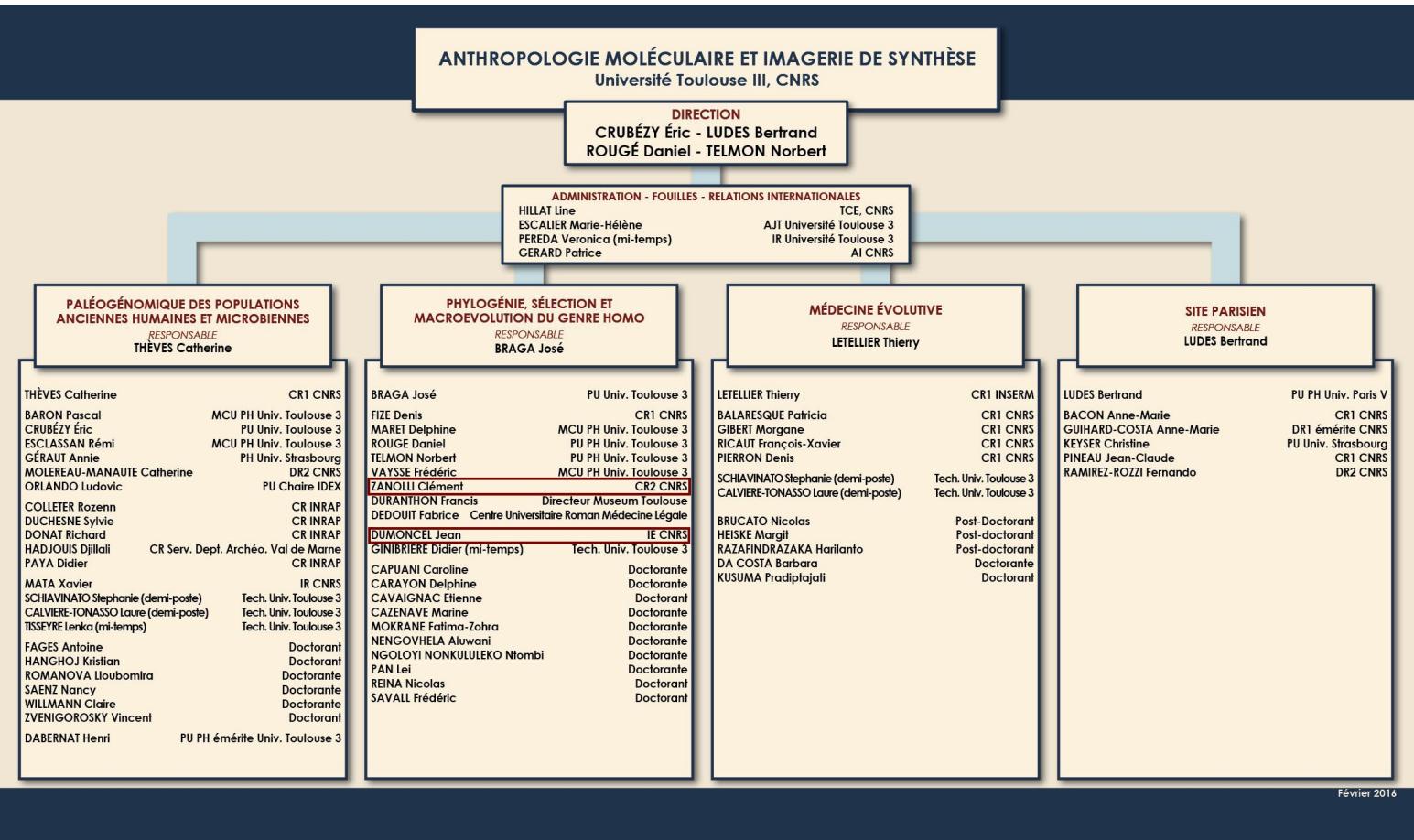


FIGURE 1.1 – Organigramme du laboratoire AMIS

### 1.1.3 Équipe de recherche

L'équipe de recherche en Phylogénie, sélection et macro-évolution du genre *Homo* cherche à préciser et densifier le modèle actuel de l'évolution humaine en intégrant à l'étude un maximum de facteurs. En effet, le simple modèle linéaire de l'évolution humaine où les *australopithèques* auraient donné lieu à *Homo habilis*, puis *Homo erectus* et *Homo sapiens*, n'est plus largement accepté du fait des évolutions subséquentes et de la diversification de notre genre, *Homo*, au Pleistocène<sup>6</sup> en Afrique et en Asie. Le développement de nouvelles méthodes d'imagerie permet aujourd'hui d'accéder à des informations "cachées" dans la structure des dents et du squelette de nos ancêtres. Cependant, le matériel fossile disponible est rare et il est nécessaire d'en découvrir davantage pour mieux cerner l'histoire évolutive de l'Homme. Ainsi, l'équipe combine des recherches de terrain de spécimens fossiles d'*homininés* en Afrique du Sud et en Erythrée, et des échantillons déjà connus (espèces fossiles et vivantes) pour les analyser

6. Époque géologique s'étendant de 2,58 millions d'années à 11 700 ans avant le présent. La fin du Pléistocène voit l'apparition de l'*Homo sapiens*.

par microtomographie<sup>7</sup> aux rayons X, neutrons<sup>8</sup>, imagerie synchotron<sup>9</sup> et géochimie. L'objectif de ces recherches est de discuter les hypothèses relatives aux rôles de la sélection et les autres facteurs évolutifs qui pourraient avoir joués un rôle primordial dans l'émergence et la diffusion de l'Homme en Afrique et dans les différentes régions du Monde. Ces connaissances et savoir-faire sont aussi appliqués en anthropologie médico-légale pour développer une base de données visant à faciliter l'identification des os et des fragments corporels avec des pathologistes et autres spécialistes.

## 1.2 Sujet

Un des axes de recherche du laboratoire AMIS concerne l'étude de la signature interne des dents des hominidés fossiles et actuels. En effet, en raison de leur grande abondance et de la multitude d'informations biologiques qu'elles préservent au sein même de leur structure interne (notamment sur le régime alimentaire, la croissance et le développement, ou l'identité de l'espèce à laquelle elles appartiennent), les dents représentent un témoin unique de la vie de nos lointains ancêtres. La morphologie des tissus dentaires minéralisés, i.e. l'émail et la dentine, peut être analysée au moyen de nouvelles méthodes d'investigation par rayons X comme la microtomographie.

Dans le cadre de l'étude des grands singes actuels et fossiles (Hominidés), les anthropologues souhaitent analyser les changements de régimes alimentaires, les relations phylogénétiques et les tendances évolutives des hominidés. Un marqueur valable pour observer ces évolutions est l'épaisseur de l'émail dentaire. En effet, l'épaisseur de l'émail des mammifères dépend de contraintes fonctionnelles et de mécanismes de contrôle morphogénétique. Aussi, c'est un des paramètres dentaires les plus étudiés en paléoanthropologie. Dans cette optique de nombreuses études ([[1]], [[2]], [[3]], [[4]], [[5]], [[6]]) ont traité l'épaisseur de l'émail grâce à des représentations avec une échelle de couleur de cette donnée sur la surface de l'émail (cf figure 1.2). Cependant les études faites à ce jour sont basées sur une approche descriptive visuelle de la répartition de l'épaisseur de l'émail et aucune méthode objective et quantitative n'existe. Afin de pouvoir comparer objectivement des dents de dimensions et de morphologies différentes, il est souhaitable de mettre au point une représentation commune pour s'émanciper des observations qualitatives peu fiables et obsolètes. Cette nouvelle représentation devrait permettre à terme une classification standardisée efficace.

Mon travail consiste à répondre à plusieurs problèmes :

- trouver une correspondance entre les morphologies dentaires, en utilisant une programme de recalage fournis.
- projeter les distributions recalées sur une carte en deux dimensions.
- préparer les résultats pour une comparaison statistique des distributions.

Pour cela, il m'est demandé de conceptualiser, avec l'aide de mes tuteurs, une

---

7. Technique d'imagerie qui consiste en une série de mesures par tranche pour reconstituer ensuite l'objet en 3D

8. Là où les rayons X révèlent la densité, les neutrons sont sensibles à des différences dans la concentration de certains matériaux légers tels l'hydrogène.

9. Image construite à partir de mesures de rayonnements électromagnétiques émis par une particule chargée qui se déplace dans un champ magnétique.

méthode adaptée à la problématique, sur la base d'outils disponibles au laboratoire AMIS, mais aussi de mettre en place un cahier des charges et d'établir un protocole analytique détaillé répondant aux attentes des chercheurs.

La nouveauté apportée au travail déjà effectué dans ce domaine réside dans l'application du difféomorphisme pour recaler les différentes dents et l'apport d'une possibilité de classification automatique.

Cet outil est en libre diffusion et sous licence libre et devrait permettre d'apporter des éléments de réponse quant aux modalités de l'évolution de l'épaisseur de l'émail chez les Hominidés, et notamment chez l'humain.

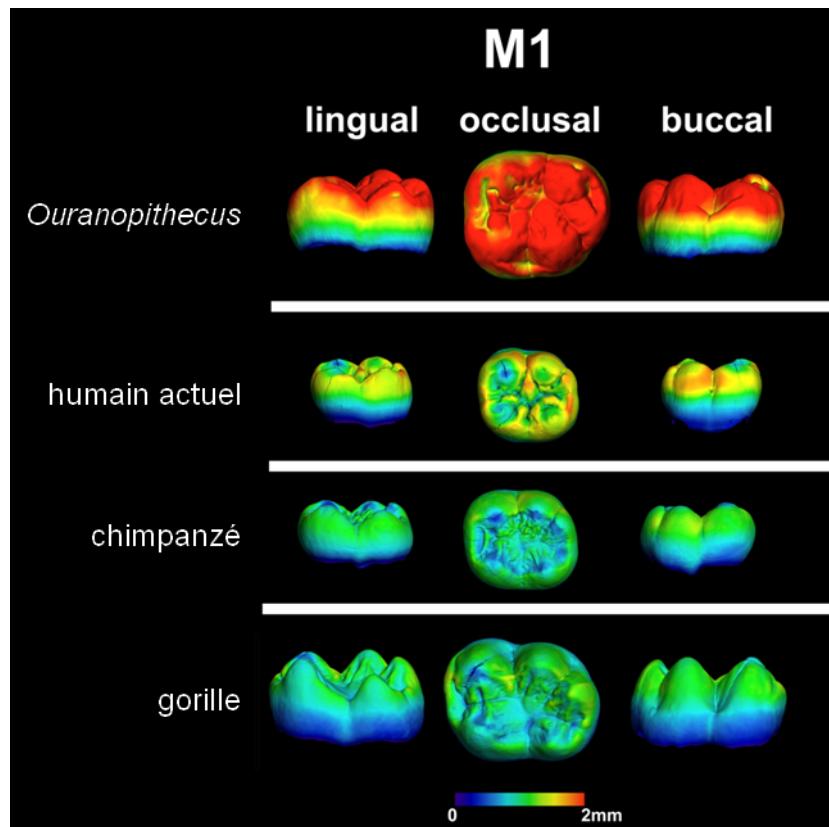


FIGURE 1.2 – Cartographies avec échelle de couleur de la distribution de l'épaisseur de l'émail de premières molaires inférieures chez l'hominidé fossile *Ouranopithecus*, l'humain actuel, le chimpanzé et le gorille. L'épaisseur de l'émail varie entre les valeurs minimales en bleu vers celles maximales en rouge

[17]

# Chapitre 2

## Méthodologie

### 2.1 Données

#### 2.1.1 Composition des dents

Les dents sont composées de deux principaux tissus minéralisés : (cf figure 2.1) :

- la dentine,
- et l'émail.

La surface de l'émail des molaires est constituée de protubérances appelées cuspides, généralement au nombre de 4 ou 5, qui permettent le broyage de la nourriture. Leur origine se révèle au niveau de la surface de dentine qui forme de véritables pics, les cornes de dentine, tandis que les cuspides d'émail sont beaucoup moins visibles compte tenu de la morphologie générale de l'émail. Les positions des cuspides sont des marqueurs importants de la morphologie de la dent et donc des critères de choix pour la classification d'une espèce.

En raison de l'usure liée à la mastication et aux possibles dommages superficiels ayant eu lieu au cours du processus de fossilisation, la surface externe de l'émail peut être altérée. Même une dégradation faible de la dent rend difficile l'estimation de la morphologie originale du sommet des cuspides( cf figure 2.2). Le cervix, la zone de la dent qui sépare la couronne de la racine est abîmé.

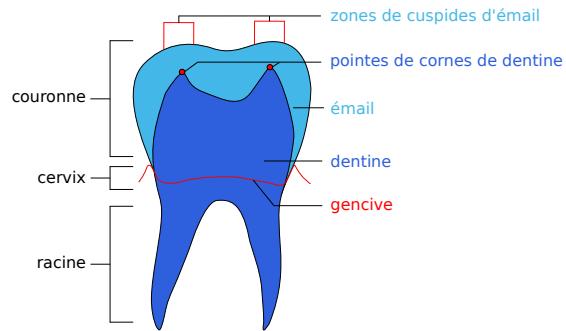


FIGURE 2.1 – Schéma en coupe des parties et tissus dentaires d'une molaire. On observe que les pointes de cornes de dentine sont facilement distinguables alors qu'il est beaucoup plus difficile de localiser les cuspides sur l'émail.

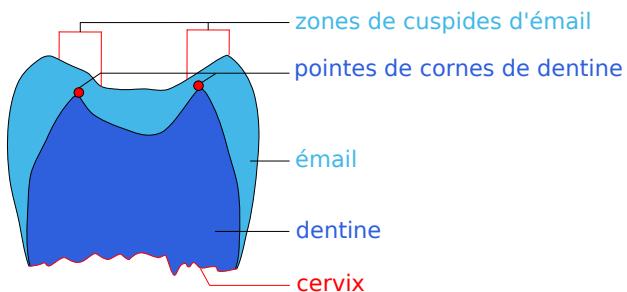


FIGURE 2.2 – Schéma en coupe d'une molaire usée, telle qu'elles sont découvertes. Les zones de cuspides d'émail sont usées et le cervix est craquelé.

### 2.1.2 Type de données

Afin de comparer les différences de distances dentine/émail de différents taxons, je dispose pour mes calculs et tests, d'un jeu de données d'entrée conséquent. Ces données d'entrée du programme sont, pour chaque individu (cf figure 2.3) :

- de surfaces 3D de dentines (environ 50 000 faces),
- de surfaces 3D d'émails (environ 50 000 faces),
- de points d'intérêt (4 ou 5 points). Compte tenu de l'importance des cuspide pour une classification des espèces nous avons fait le choix de poser les points d'intérêt aux pointes des cornes de dentine sur la surface de dentine. Ces points doivent être posés par l'utilisateur expert dans l'ordre illustré sur la figure 2.4.

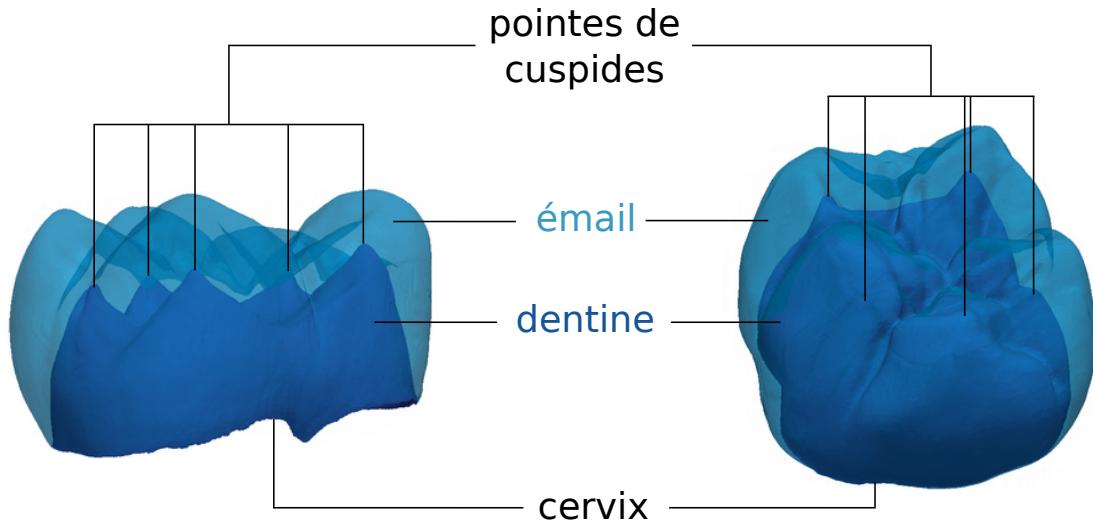


FIGURE 2.3 – Schéma des parties et couches importantes d'une molaire (ici humain moderne).

## 2.2 Concept et outils

### 2.2.1 Déformation

Afin de faire correspondre toutes les surfaces de dents entre elles, nous souhaitons les déformer vers une primitive cible commune. Pour cela, nous avons dans un premier temps, discuté du choix de cette primitive. Nous avons opté pour une demi-sphère pour deux raisons : tout d'abord car c'est une forme relativement proche de la forme d'une surface d'émail, ainsi on s'assure un temps de calcul plus court (moins d'itérations). De plus une demi-sphère permet de passer facilement à un disque dans l'étape suivante, ce qui nous permettra de comparer les disques et d'exporter les résultats obtenus dans un format d'image pour les visualiser.

Il est important de noter que même si les surfaces de dents sont finalement déformées vers la demi-sphère, en pratique le calcul est lancé de manière à trouver une déformation de la demi-sphère vers chaque surface. Ceci dans le but d'une part, de conserver la même topologie pour tous les résultats, et d'autre part, de s'assurer de garder à la fin du calcul, une demi-sphère parfaite. En effet calculer une déformation de la surface de dent → demi-sphère ne garantirait pas une forme finale régulière, ce qui compliquerait l'étape suivante (la déformation demi-sphère → disque). Ainsi les déformations sont calculées avec Deformetrica pour une correspondance demi-sphère → dent et c'est la déformation inverse qui sera utilisée dans la suite.

### 2.2.2 Recalage de surfaces

La déformation de la demi-sphère est un "recalage" car elle consiste en une mise en correspondance d'un objet à un autre. On distingue trois principaux types de recalages :

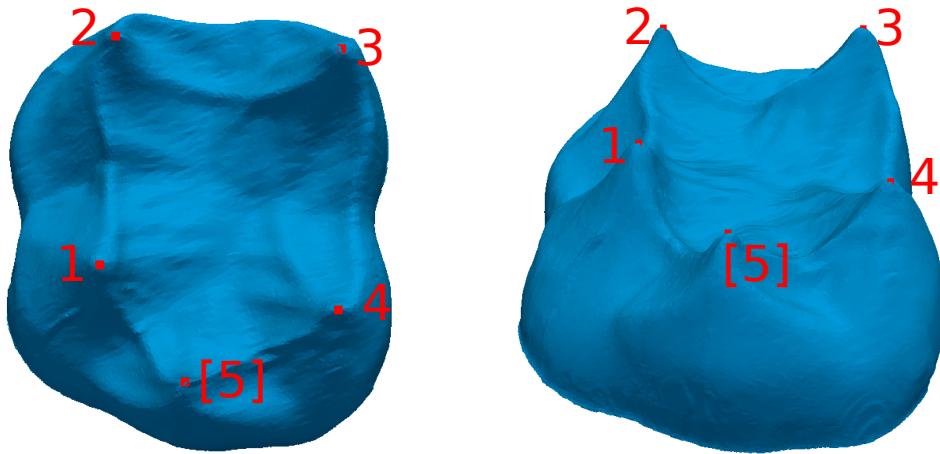


FIGURE 2.4 – Ordre de pose des points d'intérêt. Le 5<sup>e</sup> est optionnel.

- Le recalage rigide. C'est une composition de rotations, de translations et de mises à l'échelle qui permet de juxtaposer deux objets de morphologies identiques. L'objet n'est pas déformé. Par exemple deux cubes de positions, dimensions et orientations différentes, seront confondus après un recalage rigide.
- Le recalage élastique (ou non linéaire). Il a les mêmes propriétés que le précédents mais ajoute aussi une composante affine. L'objet peut être déformé globalement. Par exemple un cube peut être déformé en parallélépipède rectangle. C'est le seul recalage qui n'est pas utilisé dans cette méthode.
- Le recalage non rigide. L'objet peut être totalement déformé pour changer complètement de nature. On effectue une déformation globale ou un ensemble de déformations locales. Par exemple un cylindre peut être déformé en une sphère.

### 2.2.3 Deformetrica

Pour répondre au problème posé, nous utilisons le programme Deformetrica de Stanley Durleman qui se charge de faire un recalage non rigide par difféomorphisme<sup>1</sup> [[8]]. La plupart des méthodes de déformations utilisent un algorithme ICP (Iterative Closest Point) qui à chaque itération déplace chaque point de l'objet à déformer vers le point le plus proche de l'objet cible. Deformetrica en revanche, ne fait pas un recalage points à points mais un recalage par métrique, c'est à dire par distance entre des ensembles de points, des surfaces. Ainsi c'est toute la surface qui est prise en compte pour garantir une déformation globale optimale. Le programme crée un espace discrétilisé qui englobe l'objet cible et déforme cet espace par itérations successives. Chaque point de l'espace discrétilisé est un point de contrôle. La déformation de l'espace est représentée par un

---

1. Déformation bijective d'un objet

champ de vecteurs, un ensemble de "vecteurs moments" qui ont pour origine un point de contrôle.

De plus, Deformetrica intègre dans son algorithme une prise en compte de points d'intérêt. Dans ce cas, les points d'intérêt jouent le rôle de contraintes, qui seront déplacées à un endroit précis pendant la déformation. Ceci permet d'utiliser la méthode que nous présentons de deux manières, avec ou sans la prise en compte des contraintes.

Pour un calcul demi-sphère → émail, les données d'entrée sont :

- La surface à déformer, à savoir la demi-sphère.
- La surface cible, celle qu'on veut approcher. Dans cet exemple une surface d'émail.
- Un fichier(xml) de paramètres concernant la déformation.
- Un fichier(xml) de paramètres concernant les objets à déformer (des surfaces, des polylinéaires ou des nuages de points).

Si on souhaite faire un calcul avec des contraintes il faut ajouter :

- Les points d'intérêt sur la surface d'origine.
- Les points d'intérêt sur la surface cible.
- Un fichier(xml) de paramètres concernant les points d'intérêt.

On obtient en sortie :

- N surfaces (N est choisi par l'utilisateur) qui représentent la déformation de la source vers la cible. Ainsi la Nième surface est la surface d'origine après totale déformation, soit la demi-sphère déformée pour ressembler au mieux à la surface d'émail. Les autres surfaces ne sont pas utiles pour ce projet mais m'ont permis d'agrémenter ce présent mémoire d'illustrations de morphing (changement de formes par étapes successives). Cela permet aussi de comprendre la déformation effectuée et de résoudre et corriger un éventuel problème.
- Un fichier texte qui contient les vecteurs moments, c'est à dire le champ de vecteur de l'ensemble des déformations locales.

Avec en plus si le calcul a été fait avec contraintes :

- N jeux de points d'intérêts, les points d'intérêt sur les N surfaces.

Deux paramètres en particulier, présents dans les fichiers xml nécessitent d'être explicités. Il s'agit de "kernel-width" et "data-sigma", deux nombres entiers. Le premier décrit la taille du noyau de déformation. Plus le kernel-width est grand, plus la déformation sera stricte, rigide. Au contraire plus il est petit et plus il y aura de variations locales autorisées. Le paramètre data-sigma quant à lui, détermine à quel point la forme globale de l'objet va influencer une déformation localement. Plus data-sigma est grand et plus la zone qui influence la déformation est étendue, et inversement.

Le résultat de la déformation est une surface qui coïncide au mieux avec la surface cible. Le niveau de détail de la correspondance dépend des paramètres de Deformetrica, du nombre de points de contrôles (la finesse de la discréétisation de l'espace) et du nombre de sommets de la surface à déformer (la demi-sphère). La surface déformée ressemble à une approximation de la surface cible.

## 2.3 Protocole de comparaison des cartes d'épaisseurs

Cette partie vise à représenter la chaîne de traitement dans son ensemble. Un rapide aperçu des étapes est présenté, mais les détails de chaque module et les choix de développement sont exposés plus loin dans le mémoire.

### 2.3.1 Pré-traitement

- **Calcul des distances**

Calcul des distances des points de la surface d'émail vers la surface de dentine et des distances des points de la surface de dentine vers le plan du cervix (cf figure 2.5).

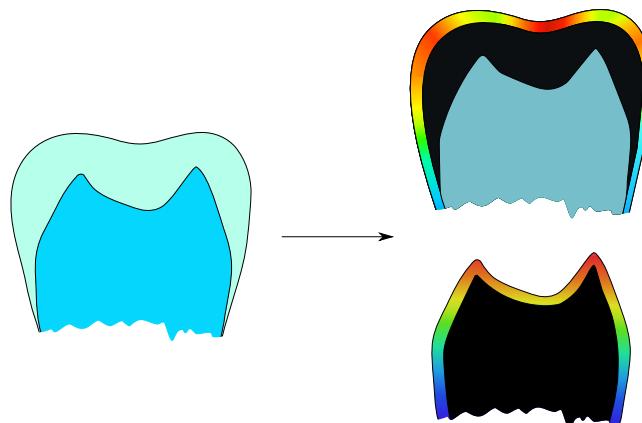


FIGURE 2.5 – Schéma 2D du résultat du calcul de distances, en haut sur l'émail, en bas sur la dentine. Après fausse coloration, les données de grandes distances sont en rouge et de faible distance en bleu.

- **Projection des points d'intérêt**

Projection des points d'intérêt de la dentine sur la surface d'émail en garantissant un résultat aussi cohérent que possible biologiquement.

- **Placement des points d'intérêts sur la demi-sphère**

Pose automatique des points d'intérêts sur la demi-sphère.

- **Recalage rigide**

C'est la dernière étape qui permet de placer, d'orienter et de mettre à l'échelle l'ensemble des surfaces de dents pour qu'elles correspondent au mieux à la demi-sphère. Après cette phase le calcul de la déformation peut être lancé.

### 2.3.2 Traitement

Il s'agit du calcul de déformation par Deformetrica.

### 2.3.3 Post-traitement

• **Projection des distances sur la surface déformée** Cette phase consiste la donnée de distance à surface déformée.

• **Déformation demi-sphère → disque** la surface déformée subit la transformation inverse pour ré-obtenir la demi-sphère, avec le bon jeu de données de distances. la demi-sphère ainsi obtenue est "aplatie" afin d'obtenir un disque.

• **Exportation en format image** Le disque est exporté en une image qui pourra servir d'illustration du résultat dans les futures papiers de recherche de l'utilisateur.

**[Module] Analyse en Composante Principale** Ce module complémentaire peut servir d'étape à une classification automatique ou pour l'apprentissage des résultats.

**[Module] Soustraction des données** Module indépendant qui permet de mettre en lumière les différences entre deux individus.

### 2.3.4 Sortie

La sortie du programme est un fichier csv (Comma-separated values) qui contient les valeurs des distances émail → dentine ou dentine → cervix pour toutes les déformations de la demi-sphère. Ce format supporté par Excel ou par des logiciels de statistiques tel que R, permettra d'effectuer la classification automatique.

## 2.4 Chaîne de traitement

Cf figure 2.6

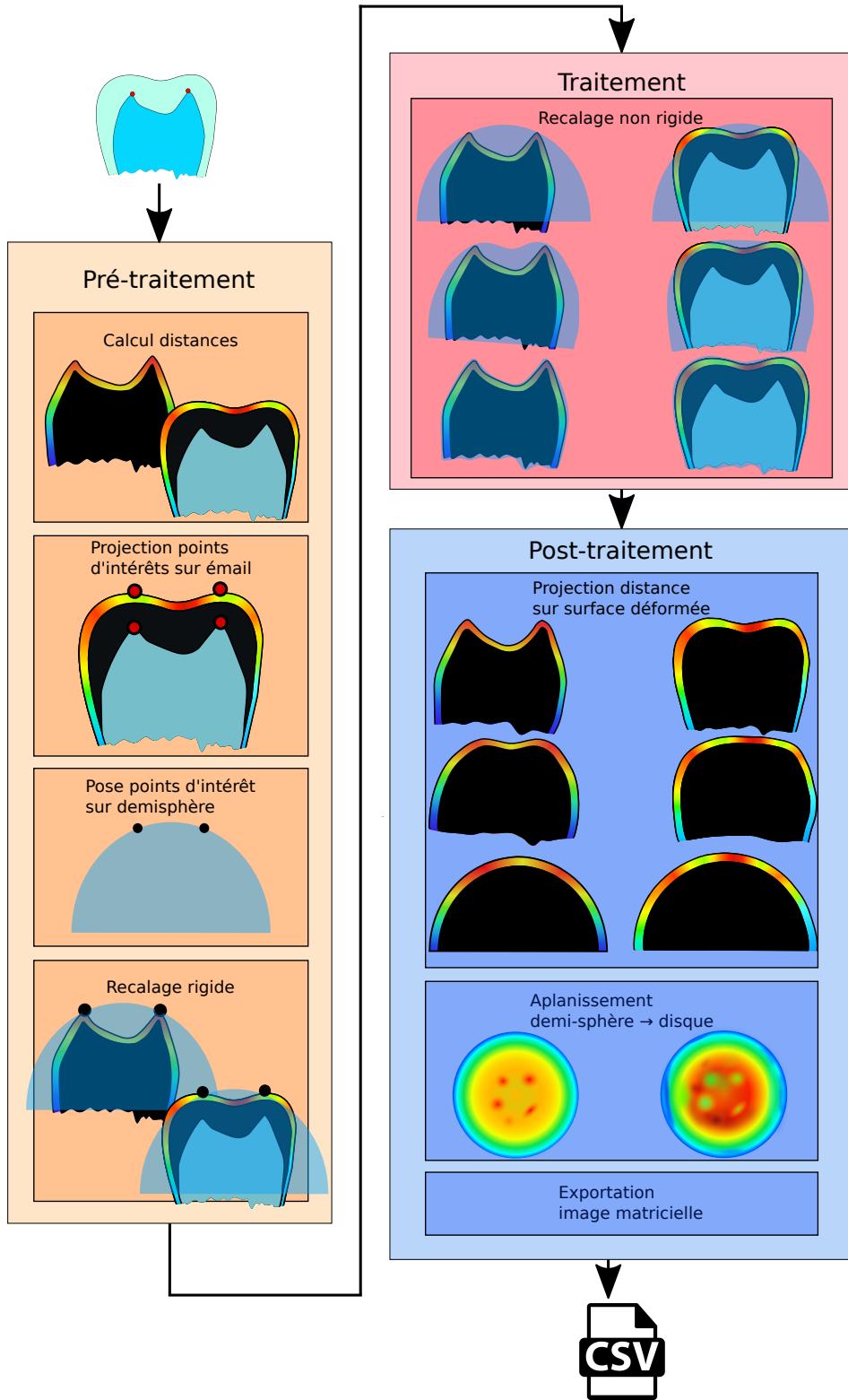


FIGURE 2.6 – Chaîne de traitement.

# Chapitre 3

## Développement méthodologique

### 3.1 Génération des données d'entrée

Comme expliqué précédemment, le programme nécessite comme données d'entrée des surfaces de dentines, d'émaux, et les points d'intérêts sur les dentines. Les surfaces de dentines et d'émaux doivent être extraites de manière à avoir deux surfaces distinctes et indépendantes mais cohérentes entre elles. Ceci est nécessaire pour le calcul de distance de l'email à la dentine. De plus les surfaces sont réduites à environs 50 000 faces, un choix de mes encadrants pour garantir un compromis cohérent entre détails et temps de calcul. Pour finir les points d'intérêts doivent avoir été posés manuellement par l'utilisateur en suivant l'ordre présenté plus haut (cf figure 2.4).

### 3.2 Pré-traitement

Ce pré-traitement a pour but de préparer au mieux les données pour les envoyer au programme Deformetrica. L'objectif est de réduire dans la mesure du possible, les temps de calculs de Deformetrica, mais aussi d'assurer un résultat cohérent malgré les contraintes biologiques.

#### 3.2.1 Pose automatique des points d'intérêt de la demi-sphère

La demi-sphère qui sera ensuite déformée est une surface préalablement générée et disponible pour ce programme. Cependant les points d'intérêt qui serviront de points de repère et de contraintes à la déformation, ne sont pas fournis. En effet l'utilisateur doit avoir le choix de la pose de ces points. Cette première étape consiste à la pose symétrique de 4 ou 5 points autour du pôle de la demi-sphère. Pour cela l'utilisateur choisit une valeur ratio de 0 à 1 qui détermine où placer les points. La pose se fait suivant le rayon de la demi-sphère, aussi le choix d'un ratio de 1 entraîne la pose de quatre points sur l'équateur de la demi-sphère. Un ratio de 0 engendre quatre points confondus au pôle. Les 4 points sont

coplanaires et forment un carré (cf figure 3.1).

Le 5<sup>e</sup> point si il existe (avec des dents à 5 cuspides, souvent le cas des grands singes et des hominidés fossiles), est posé entre les points 1 et 4, à une même distance du pôle. (cf figure 3.2). Après un certain nombre de tests, on constate qu'un ratio optimal pour garder un maximum d'informations se situe entre 0.5 et 0.6 (cf figure 3.3), à adapter en fonction des taxons (0.5 plutôt pour l'Humain moderne qui a des pointes de cuspides plus "serrées" et 0.6 pour l'orang-outan).

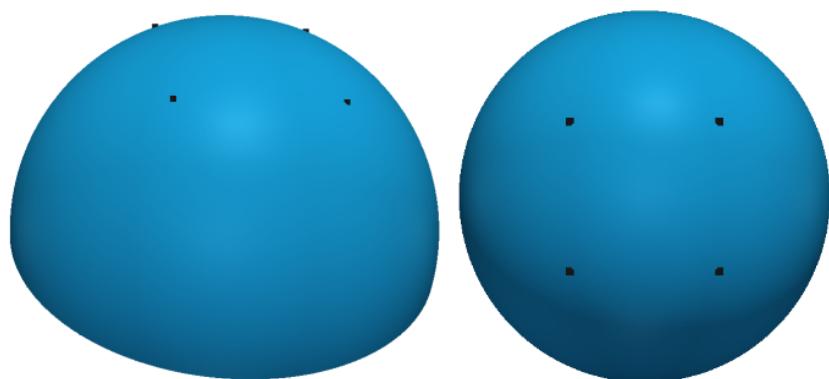


FIGURE 3.1 – Demi-sphère avec 4 points d'intérêt (ratio 0.5).

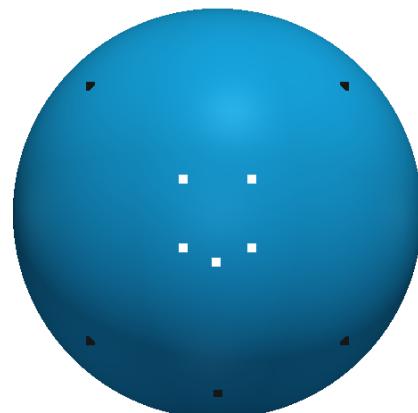


FIGURE 3.2 – Demi-sphère avec 5 points d'intérêt (ratio 0.2 et 0.8).

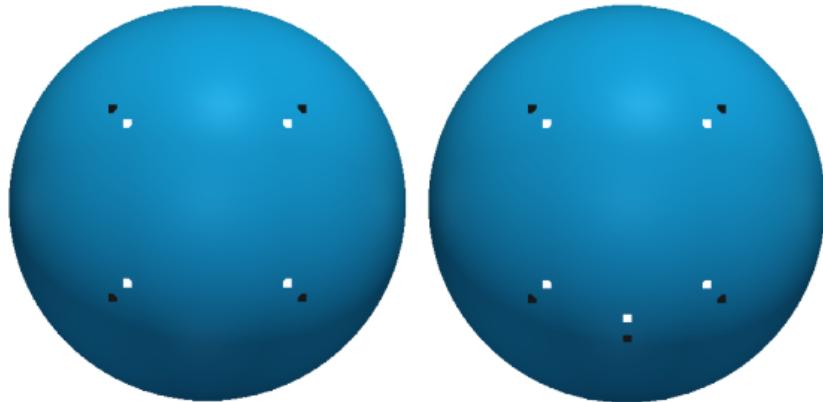


FIGURE 3.3 – Demi-sphère avec 4 et 5 points d'intérêt (ratio 0.5 et 0.6).

### 3.2.2 Calcul des distances

- **Distance Émail/Dentine**

Avant de lancer les calculs de Deformetrica, le programme calcule pour chaque sommet de la surface de l'émail, sa distance au sommet correspondant sur la surface de dentine. Il utilise pour cela un petit programme matlab fourni par Jean Dumoncel et qui pour chaque point de l'émail, enregistre la distance du point de dentine le plus proche. Toutes ces distances sont stockées dans une nouvelle surface (cf figure 3.4). Après rendu avec une échelle de couleur on obtient un résultat comme sur l'image 3.5).

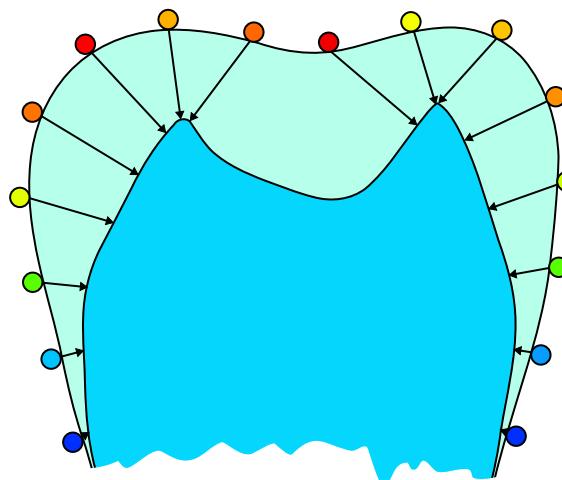


FIGURE 3.4 – Schéma 2D de l'algorithme de calcul de distance émail → dentine. Les points représentent la coloration attribuée à la surface de l'émail en fonction de sa distance au point le plus proche de la dentine.

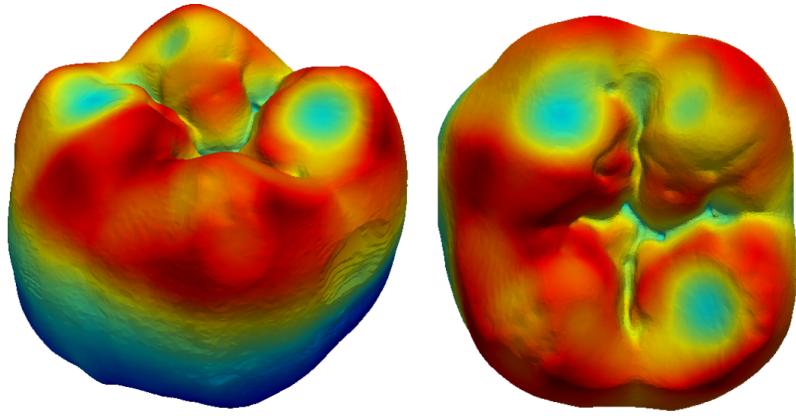


FIGURE 3.5 – Émail d’humain moderne avec la distance émail → dentine en fausse coloration. Les zones de cuspides sont bleues car très usées, donc proches de la dentine.

#### • Distance Dentine/Cervix

Pour ce calcul il s’agit dans un premier temps de trouver un plan du cervix. Pour cela il faut tout d’abord récupérer l’ensemble des points concernés. Ce sont ceux du bord du maillage de la dentine. Sur cette zone, les arêtes n’appartiennent qu’à un seul triangle du maillage (alors que partout ailleurs, une arêtes séparent deux triangles). C’est cette caractéristique qui est exploitée pour extraire les sommets sur le cervix : pour cela, un programme parcourt les arêtes du maillage pour trouver les sommets liés aux arêtes qui correspondent à ce critère.

Après l’extraction des sommets qui forment le cervix, un plan moyen est calculé une utilisant les moindres carrés.

Le calcul de distance enfin, est fait pour chaque point du maillage de la surface de dentine vers sont projeté orthogonal sur le plan du cervix, selon la normal au plan (cf figure 3.6). Après rendu avec une échelle de couleur on obtient un résultat comme sur le schéma 3.7.

### 3.2.3 Projection des points d’intérêts sur l’émail

À ce stade, les points d’intérêt sur les surfaces de dents ne sont présents que sur les pointes de cornes de dentines. Nous proposons deux façons de les projeter sur les surfaces d’émail. La deuxième version est celle présente actuellement dans le programme mais la première donne des résultats légèrement différents qui pourraient dans un cas que nous expliquerons plus loin, s’avérer plus pertinent, aussi cette version reste disponible.

#### • Première Version

Elle consiste en une projection des points vers l’émail selon la normale d’un plan calculé préalablement. Ce plan est celui formé par les points d’intérêt 1,

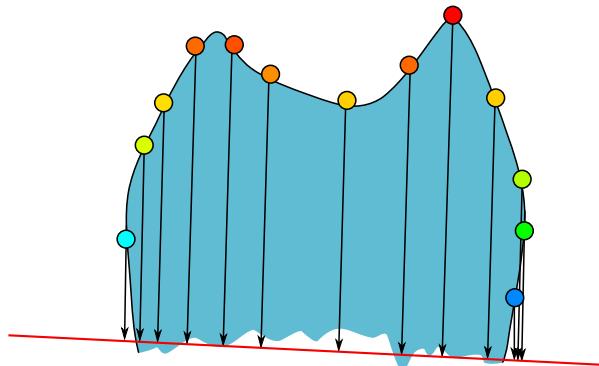


FIGURE 3.6 – Schéma 2D de l'algorithme de calcul de distance dentine → cervix. Les points représentent la fausse coloration attribuée à la surface de la dentine. Le segment rouge représente le plan moyen du cervix.

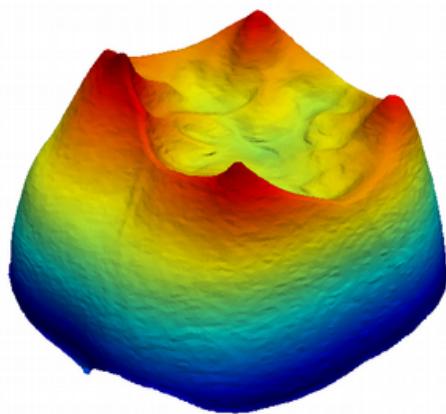


FIGURE 3.7 – Dentine d'humain moderne avec la distance dentine → cervix en fausse coloration.

2 et 3 (cf 2.4). Les autres pointes de cornes de dentine sont souvent beaucoup plus "basses" que les 3 premières. L'avantage principal est que bien que les émails soient souvent endommagées, les cornes de dentine sont dans la grande majorité des cas intactes. Ainsi la dégradation temporel n'a pas d'incidence sur l'orientation du plan. Les points sont ensuite projetés en direction de la normale au plan. Pour cela, on cherche le point qui intersecte la demi-droite qui a pour vecteur directeur la normale au plan (dans la direction de l'émail, vers le "haut"), et la surface d'émail. Cf 3.8 .

#### • Deuxième Version

Cette version a été implémentée pour répondre à un nouveau besoin du programme. Nous avons souhaité apporter un résultat supplémentaire au calcul. L'idée est de faire une déformation demi-sphère → émail et une déformation

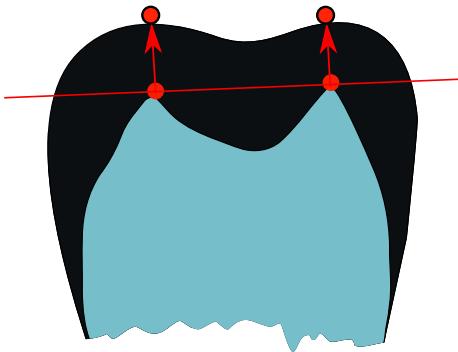


FIGURE 3.8 – Schéma en coupe de la projection des points d'intérêts de dentine vers l'émail, selon le plan formé par les pointes de cornes de dentine. Le segment rouge représente le plan. Les flèches représentent des vecteurs normaux au plan.

demi-sphère → dentine. C'est ici que j'ai ajouté un calcul de distance de la surface de dentine au plan du cervix. Ce nouveau calcul en gardant l'ancienne version de la projection des points d'intérêts aurait provoqué une incohérence. C'est pourquoi suite à cet ajout la projection des points d'intérêts sur l'émail a subit une modification. Désormais, le vecteur directeur de la droite avec laquelle on calcule l'intersection à la surface d'émail, n'est plus une normale au plan formé par 3 pointes de cornes mais la normale au plan du cervix (cf figure 3.9). Cette version sur nos tests apporte peu de différences, le plan formé par les trois premières pointes de cornes de dentine et le plan du cervix ont des inclinaisons très proches. Cependant la première version permet d'effectuer la projection même en cas de cervix très endommagé. Elle est donc à utiliser pour ce cas précis, cas où les calculs ne se feraient donc que sur l'émail, et pas sur la dentine.

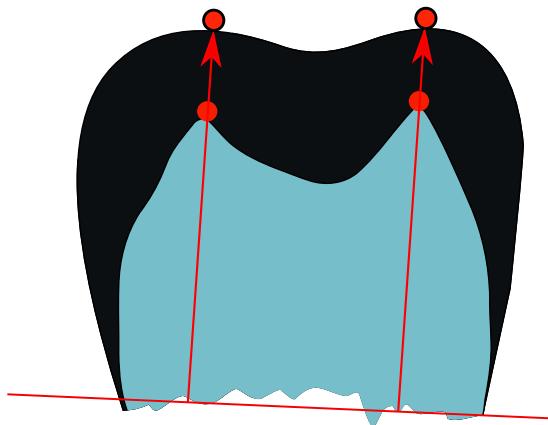


FIGURE 3.9 – Schéma en coupe de la projection des points d'intérêts de dentine vers l'émail, selon le plan moyen du cervix. Le segment rouge représente le plan. Les flèches représentent des vecteurs normaux au plan.

### 3.2.4 Recalage rigide

La dernière étape consiste au recalage rigide de toutes les surfaces de dents sur la demi-sphère. Pour cela, les points d'intérêt de chaque surface sont recalés sur ceux de la demi-sphère. ce recalage est fait en trois étapes.

La translation est effectuée en premier lieu, elle est calculée pour amener le centroïde (point moyen, centre d'inertie du nuage) des points d'intérêt posés sur chaque surfaces de dents (les dentines et les émaux) sur le centroïde des points d'intérêt de la demi-sphère. La translation ainsi obtenue est ensuite appliquées au nuage de points d'intérêt.

L'étape suivante consiste en une rotation pour faire coïncider au mieux les jeux de points d'intérêt suivant l'ordre précis définis précédemment.

La mise à l'échelle est effectuée en dernier lieu.

Il est important de noter que pour ces 3 calculs, seules les 4 premiers points d'intérêts (obligatoires) sont pris en compte. Le 5<sup>e</sup> point si il existe est transformé mais ne va intervenir ni dans le calcul du centroïde, ni dans la recherche de rotation, ni dans le calcul idéal du ratio de mise à l'échelle. Ce choix est fait pour deux principales raisons, la première étant que la 5<sup>e</sup> cuspide est souvent un vestige moins révélateur de l'espèce que les 4 autres cuspides ; la seconde est pour raison pratique, car la 5<sup>e</sup> cuspide est positionnée beaucoup plus aléatoirement que les 4 autres. Le résultat de cette composition de transformations est stocké puis appliqué à toute la surface concernée.(cf figure 3.10).

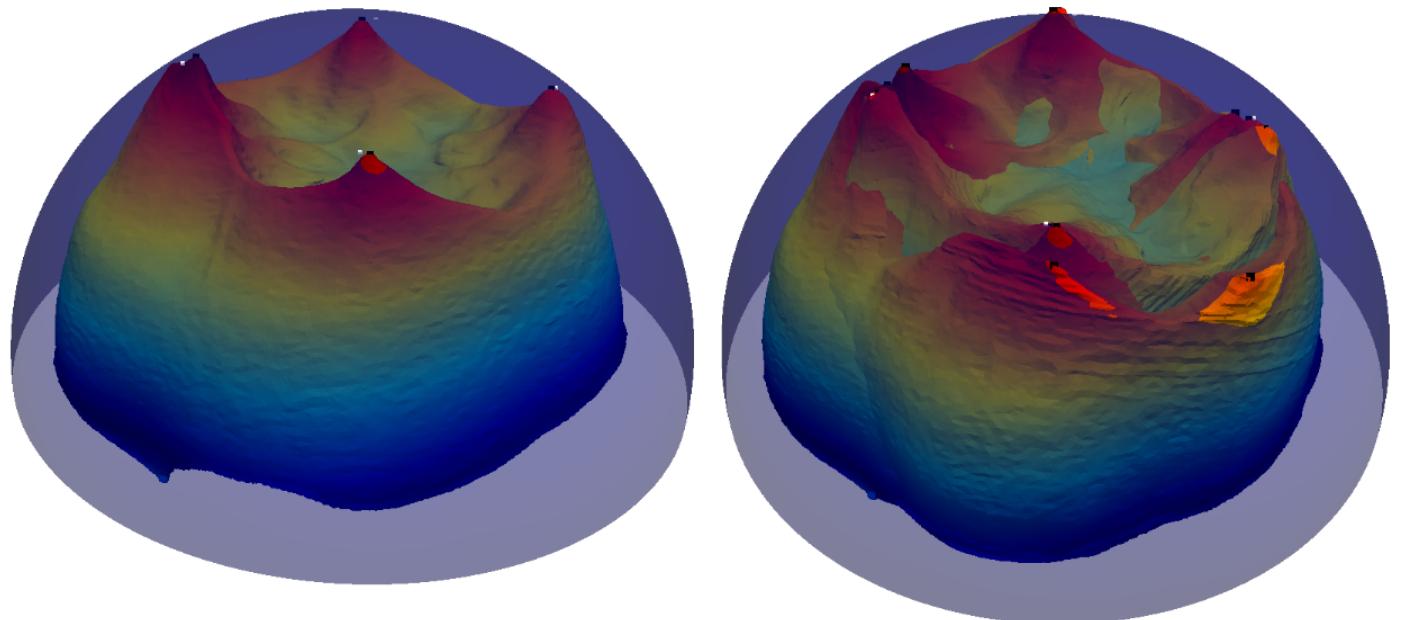


FIGURE 3.10 – • À gauche : image d'une dentine d'humain moderne après recalage rigide dans la demi-sphère par les points d'intérêt. • À droite : 3 dentines d'humains modernes recalées dans la demi-sphère par les points d'intérêt. • À gauche et à droite : les points blancs sont les points d'intérêt de la demi-sphère et les points noir sont ceux des dentines.

### 3.3 Traitement et optimisation avec EOS

Durant mon stage ils ont été effectués avec le supercalculateur EOS du mésocentre de calcul CALMIP (Calcul en Midi-Pyrénées). Les calculs y sont effectués en parallèle. Un recalage non rigide prend environ 5 jours de calcul. Pour faciliter la mise en place de ces calculs quelques scripts ont été implémentés pour placer et nommer correctement l'ensemble des fichiers et pour générer le script d'exécution de Deformetrica.

Un problème rencontré est que les dimensions de l'espace des points de contrôle sont calculées par défaut automatiquement autour des surfaces cibles (dans notre cas, les dents) et parfois la demi-sphère dépasse cet espace. Ceci fausse complètement les calculs puisqu'à certains endroits la demi-sphère n'est quasiment pas déformée. Pour régler cela, un programme a été ajouté à la chaîne de traitement. Il crée les points de contrôle autour des boîtes englobantes de l'ensemble des surfaces concernées pour le calcul (les cibles, et la surface d'origine). Ainsi on s'assure que toutes les surfaces sont à l'intérieur de l'espace discréte. Il faut alors passer cet espace à Deformetrica et modifier un paramètre du programme afin qu'il soit pris en compte.

La figure 3.11 illustre la déformation avec Deformetrica.

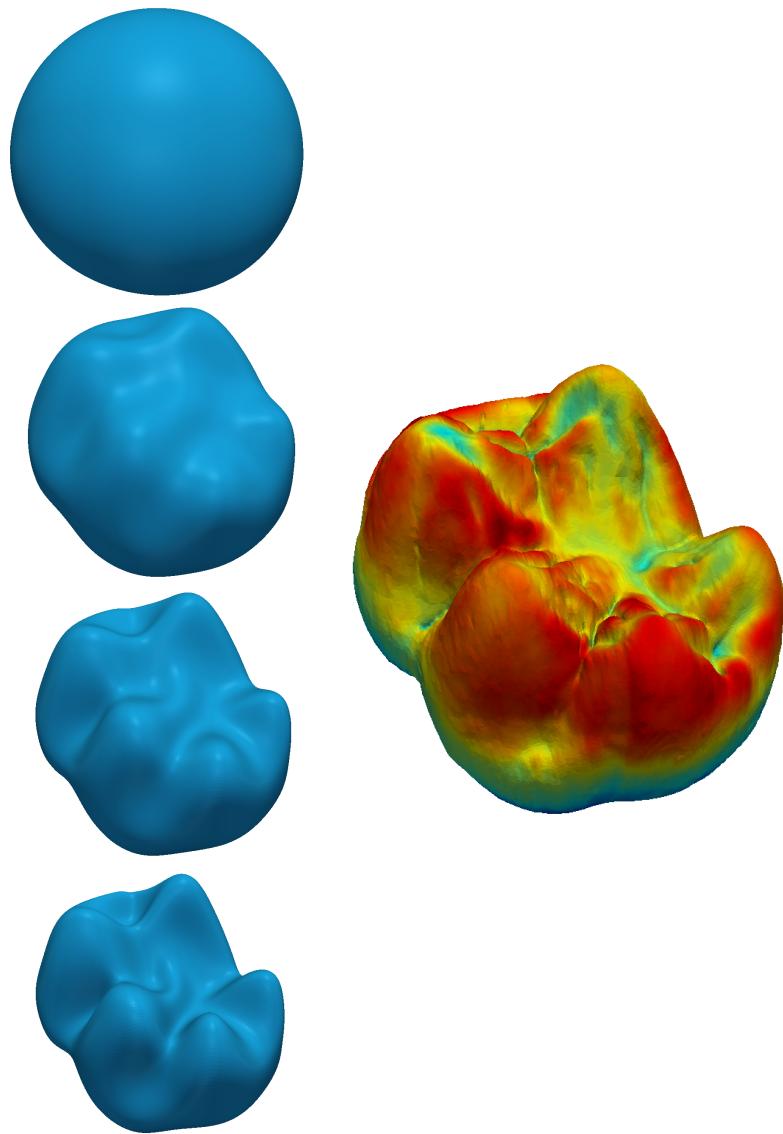


FIGURE 3.11 – • À droite : cartographie de la distribution de l'épaisseur de l'émail illustrée sur la surface externe de l'émail (gorille). • À gauche, de haut en bas : Les déformations de la demi-sphère vers la surface d'émail.

### 3.4 Post-traitement

Cette phase a pour but d'ajuster les résultats des calculs, de les exporter et de permettre leur analyse. Elle est divisée en trois étapes et deux modules optionnels.

### 3.4.1 Projection des distances sur la surfaces déformée

La surface de la demi-sphère déformée ne contient pas, à ce stade, les données de distance à la dentine. Pour les lui associer, l'algorithme de calcul des distance émail → dentine présenté plus haut est réutilisé. Pour chaque sommet de la demi-sphère déformée est attribué la donnée de distance de la surface de dent au sommet qui lui est le plus proche. Aucun recalage rigide n'est nécessaire ici puisque la demi-sphère a été déformée directement autour de la surface de dent. La figure 3.12 illustre cette opération.

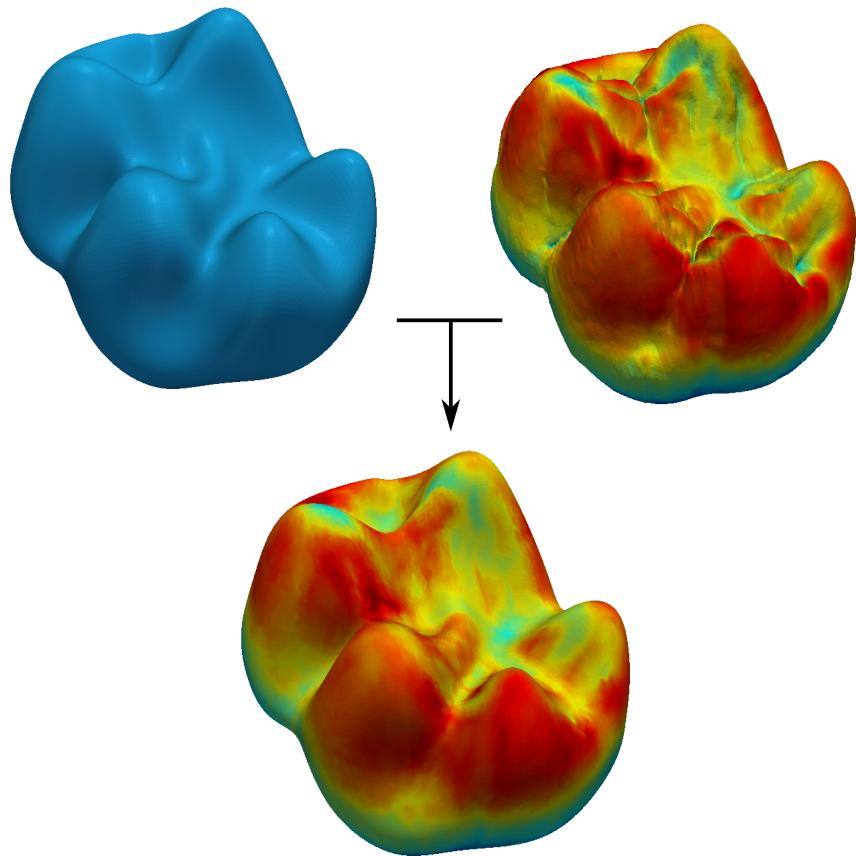


FIGURE 3.12 – • À gauche : demi-sphère déformée. • À droite : Émail de gorille avec fausse coloration des distances à la dentine. • En bas : demi-sphère déformée après association des distances émail → dentine correspondantes.

Pour l'étape suivante, nous souhaitons retrouver la forme de la demi-sphère, aussi elle subit la transformation inverse de celle calculée avec Deformetrica mais cette fois avec les distance associée (cf figure 3.13).

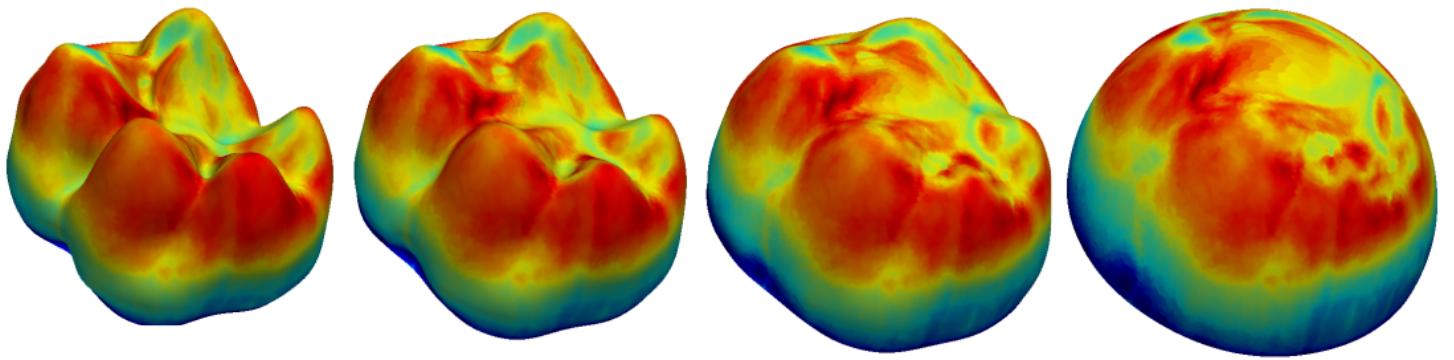


FIGURE 3.13 – De gauche à droite : déformation inverse de la demi-sphère déformée vers la demi-sphère, après attribution des distances.

### 3.4.2 Aplanissement demi-sphère → disque

Afin de créer une image matricielle de chacune des déformations, on effectue une étape intermédiaire d'aplanissement de la demi-sphère. Il s'agit de trouver une paramétrisation de la demi-sphère vers un disque 2D. La paramétrisation consiste en une projection sphérique, le programme en propose trois au choix de l'utilisateur : projection orthographique, stéréographique ou équiaréale. La projection orthographique correspond à la vu de l'utilisateur depuis le pôle sans distorsion (cf schéma figure 3.14). Elle offre une grande visibilité des points proches du pôle au détriment de ceux de l'extrémité de la demi-sphère. La projection stéréographique au contraire provoque une distorsion importante en espaçant davantage les sommets présents sur l'extrémité que ceux du pôle (cf schéma figure 3.15). Pour finir la projection équiaréale est un compromis qui conserve les aires, les distances relatives des sommets (cf schéma figure 3.16).

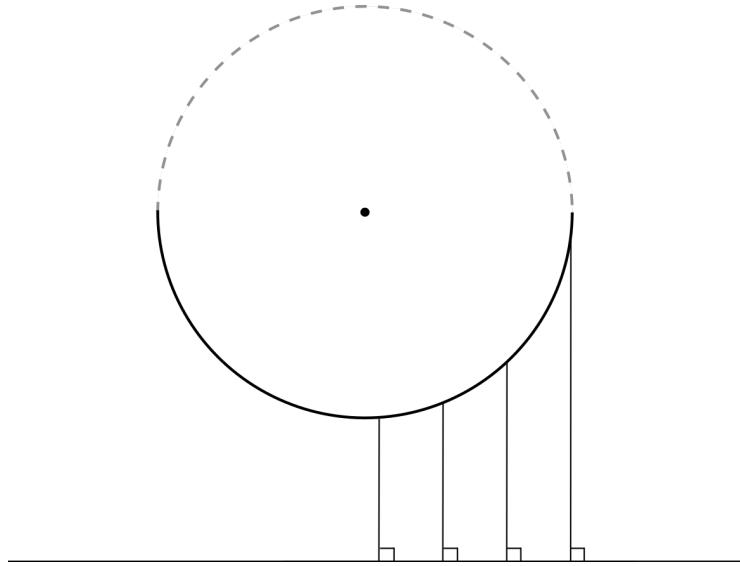


FIGURE 3.14 – Schéma de la projection orthographique.

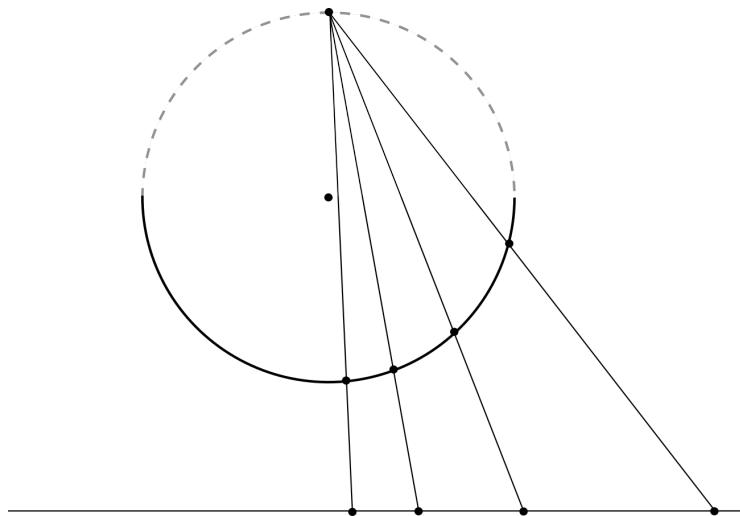


FIGURE 3.15 – Schéma de la projection stéréographique.

Les informations les plus importantes pour la classification se situent en théorie vers le pôle, au plus proche de là où sont projetés les points d'intérêts (cuspides), aussi il est conseillé d'utiliser en priorité les projection équiaréales et orthographiques, la projection stéréographique pourra servir à mettre en évidence la morphologie générale de la dent. Dans les figures qui suivent les images seront créées en projection équiaréale. Il est toutefois important de

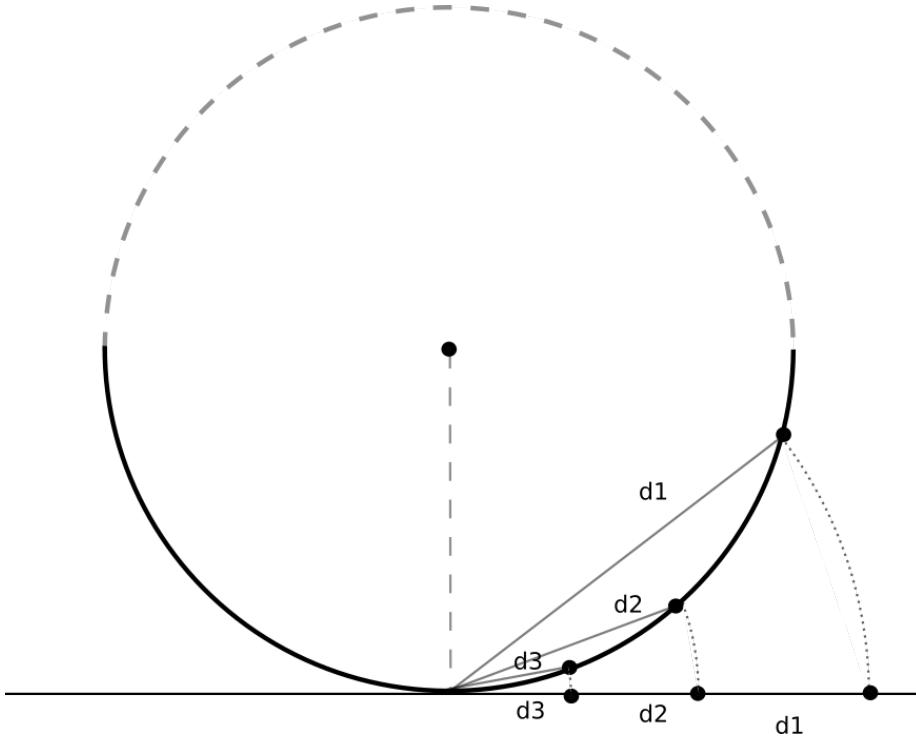


FIGURE 3.16 – Schéma de la projection équiaréale.

préciser que ces projections servent à la visualisation, qu'on souhaite la mieux adaptée à l'interprétation des résultats, mais elle n'entre pas en compte dans la classification. Seules les données de distances points à points sont utilisées pour classifier les surfaces. Aussi le choix d'une projection n'influencera pas les groupes d'apprentissage. Des images des 3 différentes projections sont visibles figure 3.17.

### 3.4.3 Construction de l'image du disque

Cette dernière phase obligatoire consiste à projeter le maillage du disque obtenu précédemment sur une grille afin d'extraire une image matricielle (rasterisation).

L'opération est divisée en 6 étapes :

- **Discréétisation de l'espace** C'est à dire la création de la grille, le nombre de colonnes et de lignes déterminera la résolution finale, il est au choix de l'utilisateur.

- **Carte de couleur** Une carte de couleur est une table qui associe à un nombre flottant compris entre 0 et 1, une couleur. Pour l'instant les distances sont exprimées en micromètres et sont sur un intervalle  $[0; \inf]$ . Les données de distances subissent donc un changement d'intervalle. La carte de couleur est au

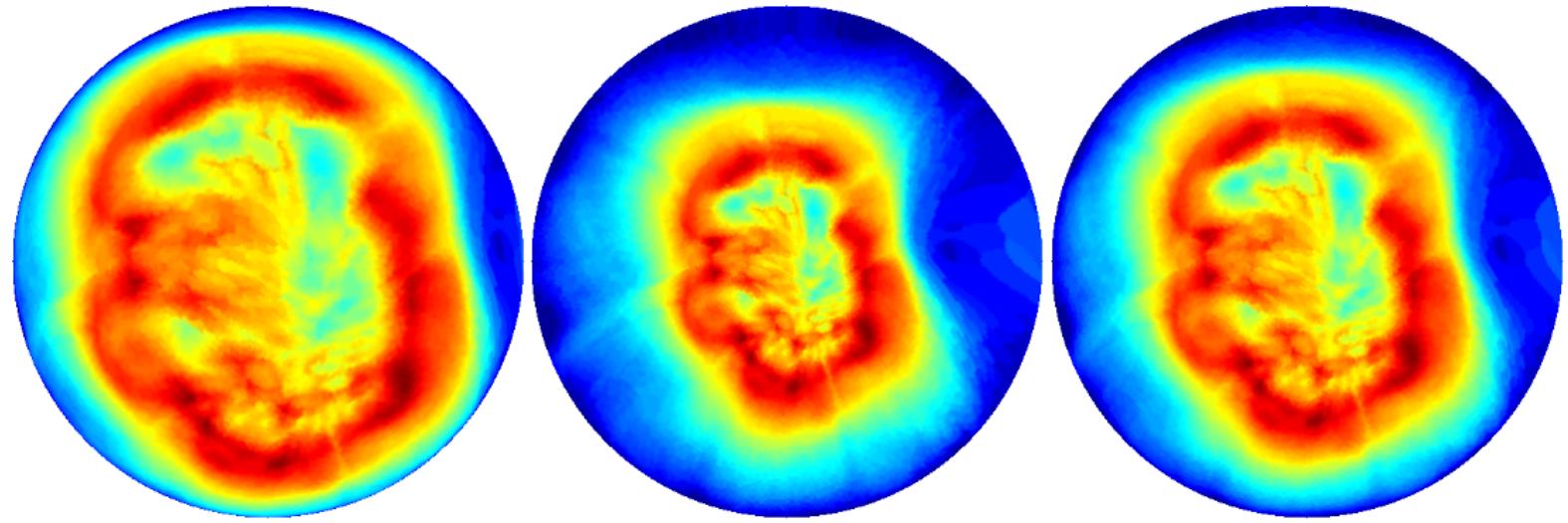


FIGURE 3.17 – Résultats des disques obtenus après paramétrisation de la demi-sphère préalablement déformée sur une émail d'orangoutan. • À gauche : projection orthographique. • Au milieu : projection stéréographique. • À droite : Projection équiaréale.

choix de l'utilisateur parmi toutes celle disponible par défaut dans matlab (une dizaine), celle utilisée tout au long de ce mémoire est la carte "jet".

- **Projection sur la grille** Il s'agit d'effectuer un changement de repère à l'ensemble des sommets du maillage du disque vers la grille.

- **Interpolation** Il s'agit d'attribuer une couleur aux cases encore vides en les localisant par des boîtes englobantes sur les triangles puis en interpolant les couleurs des sommets du triangle.

L'algorithme est illustré figure 3.18.

Deux images sont créées, une sans points d'intérêts, et l'autre où les points sont représentés (en noir). Le fond est noir. Aperçu du résultat figure 3.19 et 3.20.

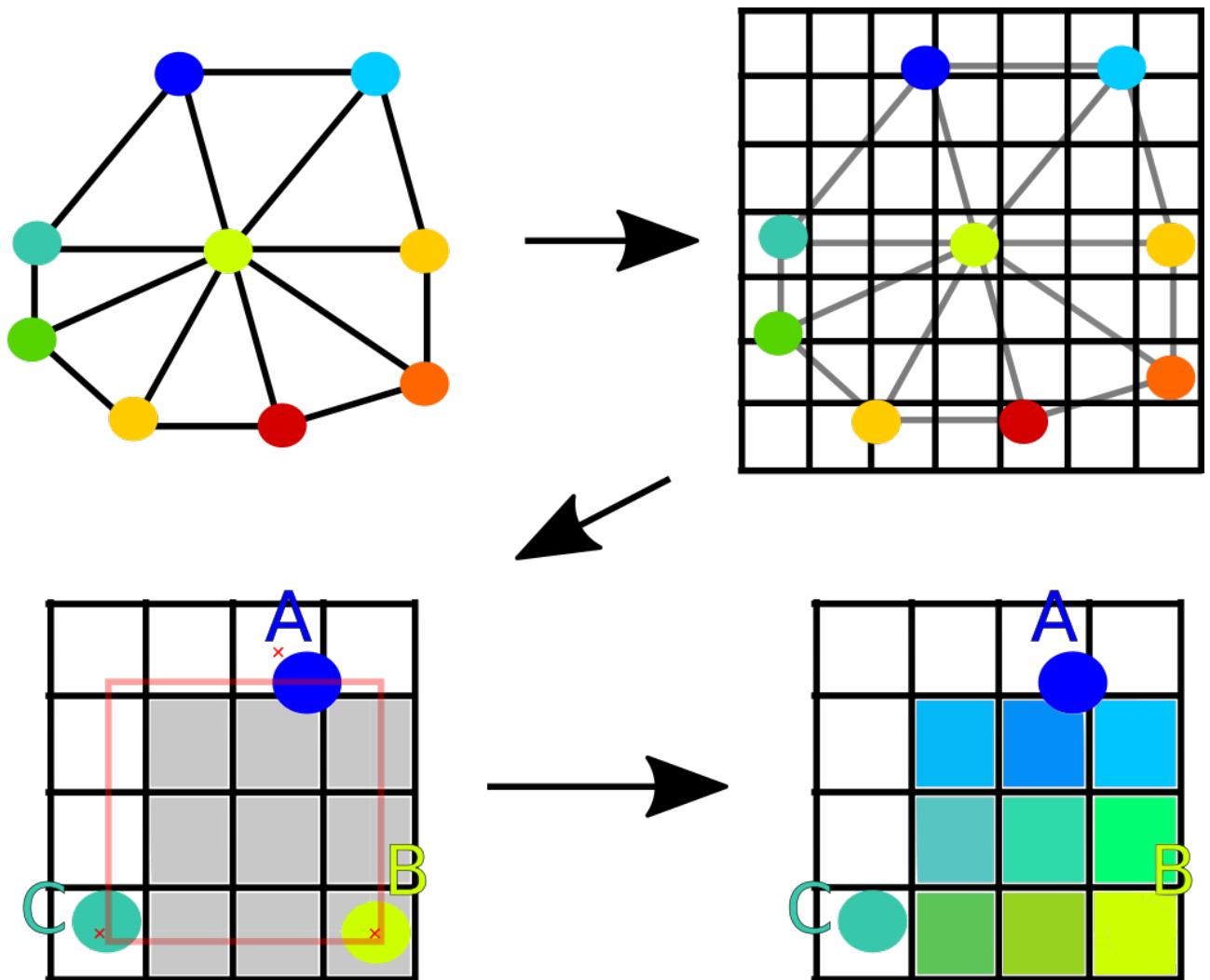


FIGURE 3.18 – Schéma de l'algorithme de l'exportation en image matricielle.

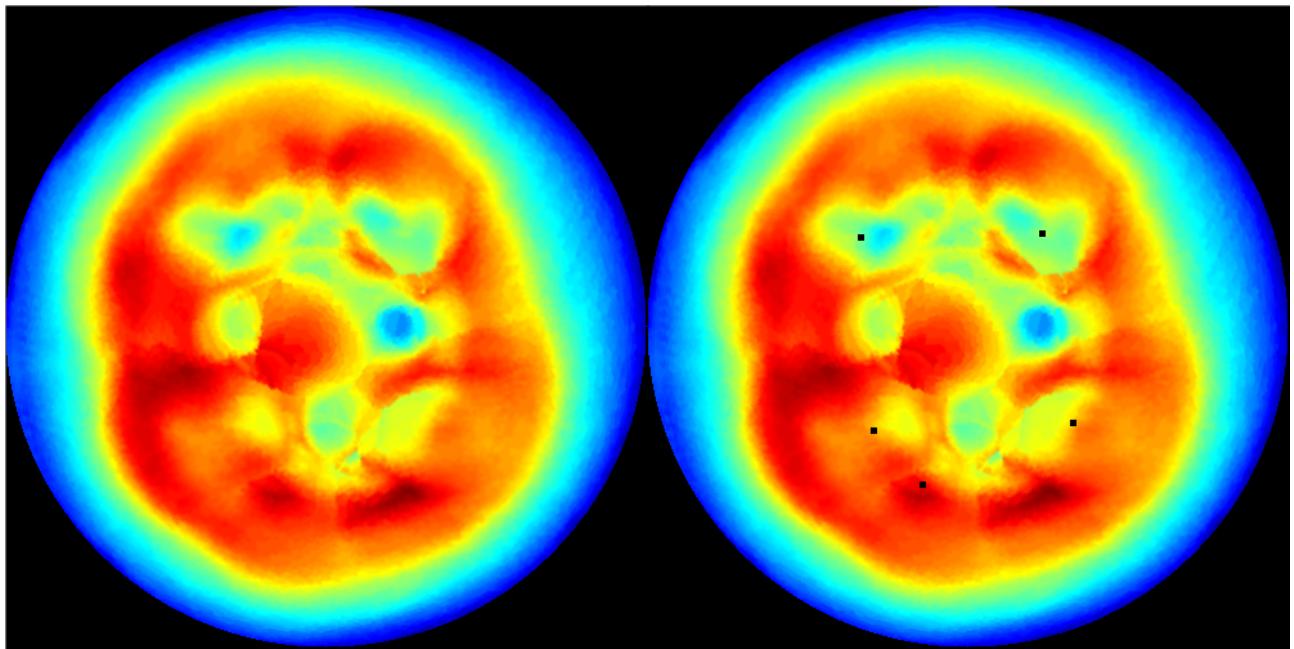


FIGURE 3.19 – • À gauche : image finale d'une émail d'humain moderne. • À droite : même image avec les points d'intérêts sur les cuspides en noir.

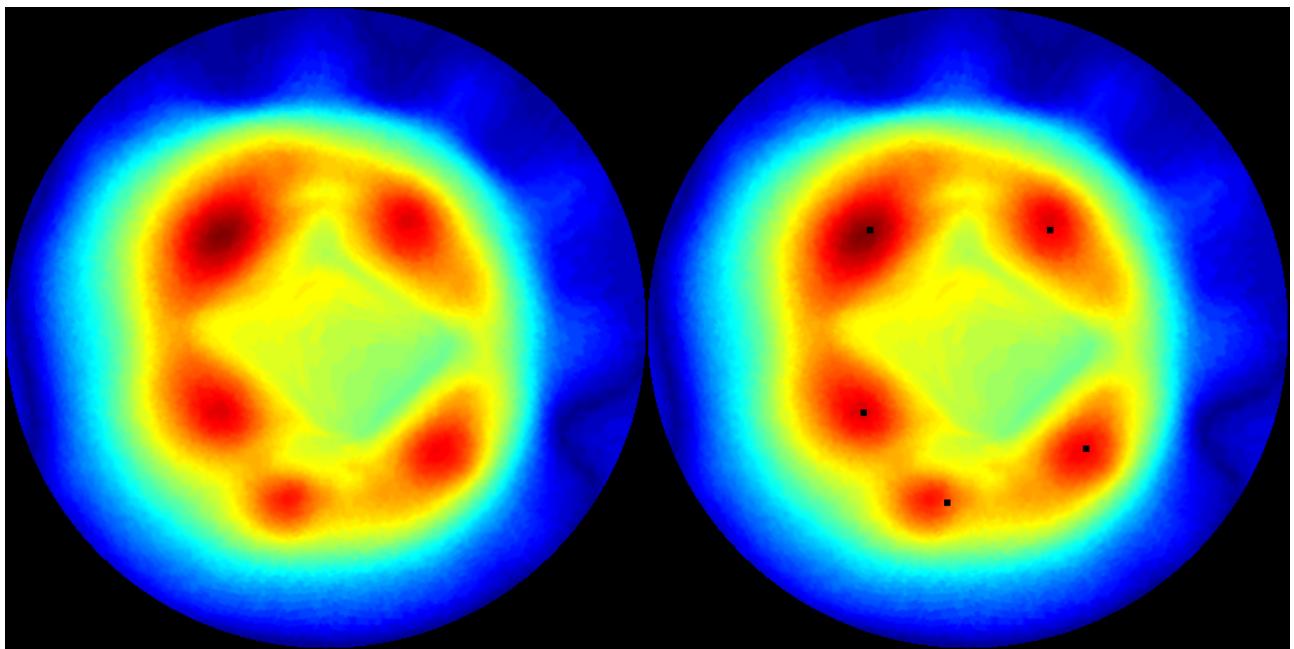


FIGURE 3.20 – • À gauche : image finale d'une dentine d'humain moderne. • À droite : même image avec les points d'intérêts sur les pointes de cornes de dentine en noir.

### 3.4.4 [module] Soustraction des données

Ce module consiste à effectuer une soustraction absolue des disques 3D deux à deux et à exporter l'image ainsi obtenue. Cette image permet de mettre en évidence visuellement les différences entre distances émail → dentine ou dentine → cervix (cf figure 3.21). Les données soustraites peuvent servir pour des analyses supplémentaires. Elles peuvent aussi être reprojetés sur les surfaces d'origine et ainsi faire apparaître directement sur la dent les zones de fortes ou de faibles différences (cf figure 3.22).

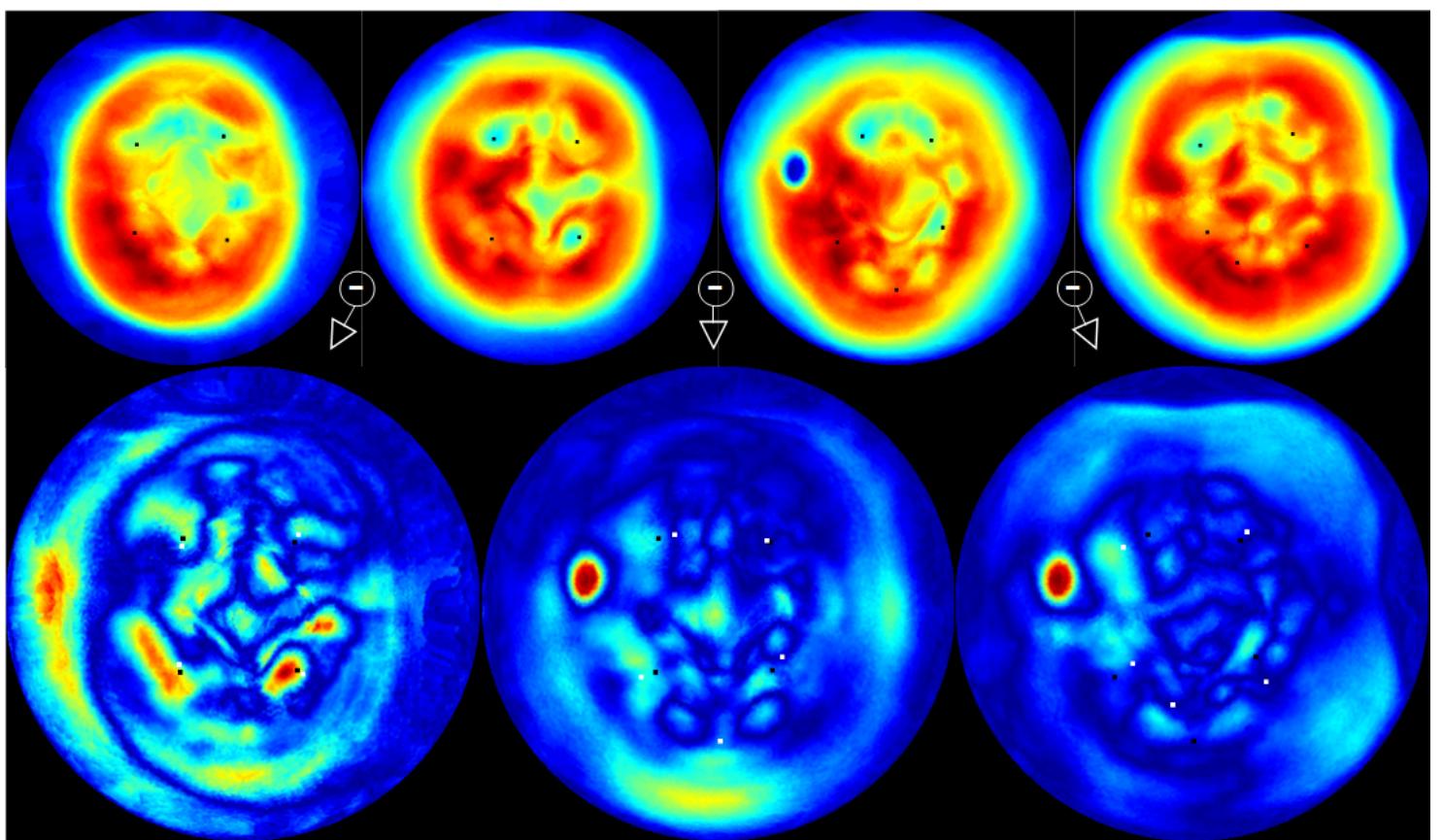


FIGURE 3.21 – • En haut : émaux de différents humains modernes avec des points noirs sur les points d'intérêt. • En bas : images des soustractions des données de chaque individu deux à deux avec des points noirs et blancs représentants les deux jeux de points d'intérêt.

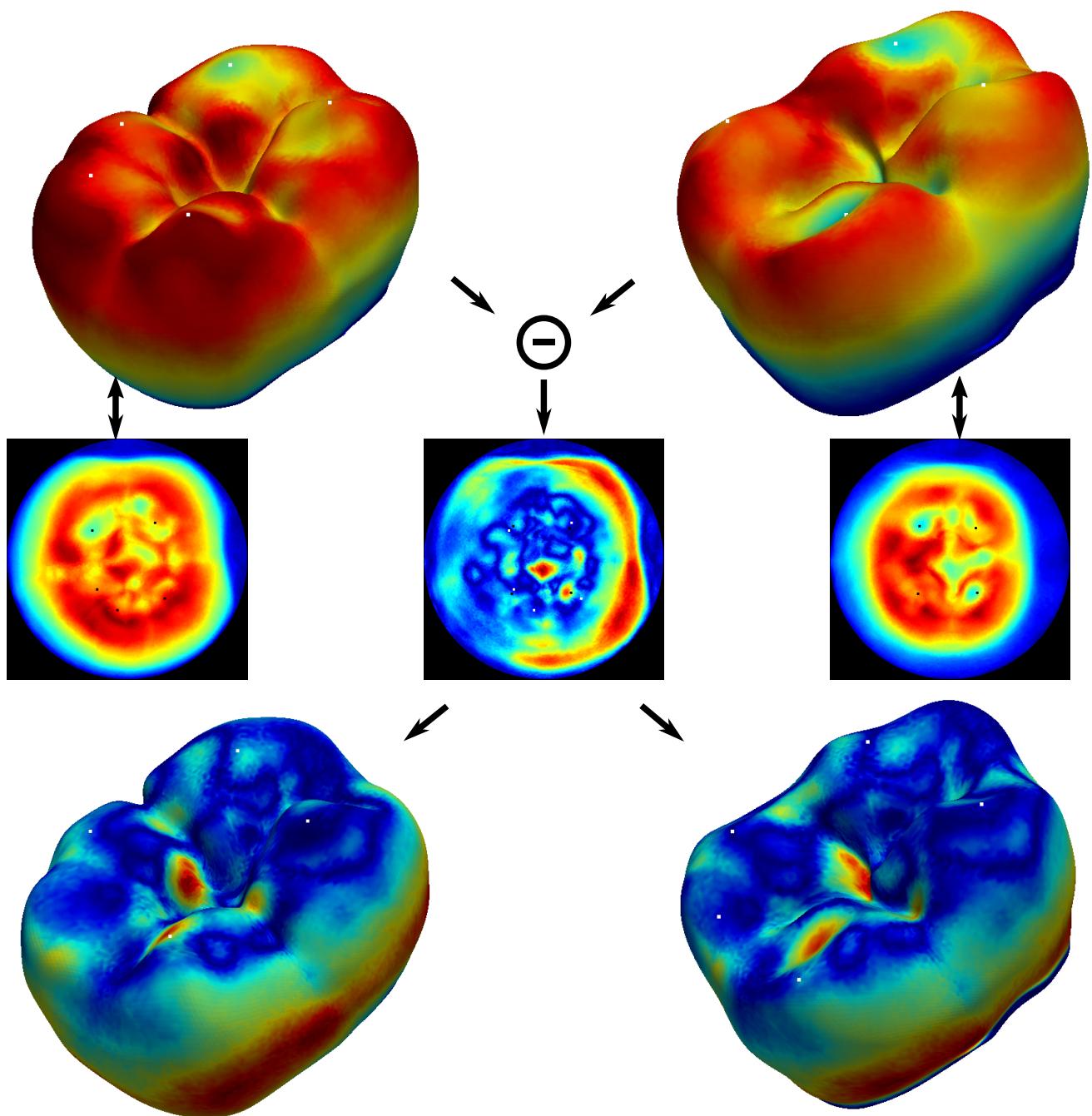


FIGURE 3.22 – • En haut : émails d’humains modernes avec les images des distances émail → dentine correspondantes. • Au centre : image de la soustraction des données. • En bas : soustractions reprojetée sur les deux surfaces avec en blancs les points d’intérêt de l’autre surface. Les zones rouges sont celles présentant de fortes différences d’une surface à l’autre.

### **3.4.5 [module] Analyse en composantes principales**

Ce dernier module effectue à ce jour l'analyse en composantes principales des épaisseurs d'email. Il devrait permettre à terme de réaliser une classification automatique.

# Chapitre 4

## Perspectives

### 4.1 Pré-traitement

Un des premiers axes qui pourrait être enrichi concerne la pose des points d'intérêt sur les surfaces de dentines. Ces points doivent actuellement être posés par l'utilisateur suivant un ordre défini.

Une première amélioration serait de placer automatiquement les points d'intérêts sur la dentine. Pour cela on pourrait avoir recours par exemple à un algorithme de descente de gradient pour déterminer les maxima locaux et ainsi localiser les pointes de cornes de dentine. L'utilisateur aurait alors à ordonner les points. Pour libérer complètement l'utilisateur il faudrait que la pose des points soit aussi automatiquement ordonnée, un problème qui me semble complexe et auquel je n'ai pas de solution théorique pour le moment.

### 4.2 Traitement

Dans le but d'accélérer les calculs sur EOS nous souhaiterions effectuer les recalages non rigides avec des consensus (surface de dents moyenne d'un ensemble de surfaces). Deformetrica cherchant automatiquement à faire correspondre des zones de reliefs similaires, cette méthode pourrait aussi donner des résultats plus précis qu'avec la demi-sphère. Cependant cette démarche reste potentiellement contraignante avec des jeux de données très différentes car il ne faut pas que Deformetrica fasse correspondre automatiquement des zones d'apparences semblables mais qui n'ont aucune correspondance biologique.

Néanmoins, compte tenu des besoins récents de Clément Zanolli (un colloque à Madrid le 15 Septembre 2016 où il présentera les résultats de cette méthode), nous avons été contraints d'utiliser un consensus. En effet les chercheurs d'AMIS ont un forfait limité de calculs sur EOS. Les 33 dents dont il a besoin pour son étude auraient consommé d'après notre estimation plus de 55% de son forfait EOS, on a donc dû trouver rapidement une solution qui diminuerait considérablement le coût.

Les consensus utilisés (visibles figure 4.1) ont été préalablement lissé (approximation) pour éviter de faire apparaître des reliefs trop marqués et ainsi prévenir le problème expliqué plus haut.

Les calculs de déformations des consensus vers les surfaces de dents ont été

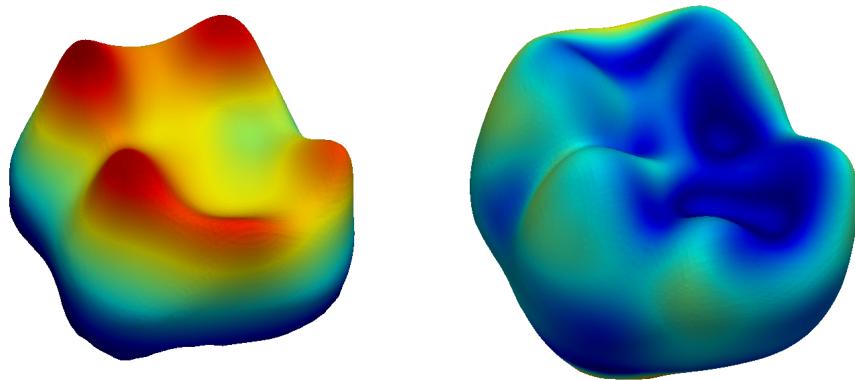


FIGURE 4.1 – Consensus, surfaces moyennes de 33 surfaces de dents d'*Homininés*. • À gauche : dentine. • À droite : émail.

effectué en environs 2 jours et les résultats sont dans l'ensemble très concluants. L'analyse en composante principale inter-groupe (*between group PCA*) suggère des distinctions entre certains taxons et s'avère donc être prometteuse pour discriminer des espèces entre elle (cf 4.2). L'implémentation de cette variante sera donc la première étape de maintenance évolutive du programme.

La difficulté principale à l'utilisation de Deformetrica est le choix des paramètres. Il faut trouver le bon compromis de dimension du kernel\_width et du data\_sigma (voir plus haut les paramètres de Deformetrica) afin que les calculs soient rapides et que les résultats soient cohérents et précis. Pour cela, une solution pourrait être un script qu'on lancerait entre la phase de pré-traitement et le calcul de Deformetrica. Ce script estimerait les paramètres optimaux à mettre dans les fichiers xml de Deformetrica, en fonction de la morphologie des dents. Par exemple plus l'intensité des variations sur la surfaces est grande (fortes cuspides qui "montent" très haut), plus il faut un kernel\_width grand et plus la fréquence des variations est grande (plein de crêtes "abruptes", des formes sinusoises), plus il faut un data\_sigma grand.

### 4.3 Post-traitement

Suite aux conseils de mon encadrant universitaire, David Vanderhaeghe, la phase de rastérisation, afin d'être optimisée considérablement, aurait intérêt à être effectuée en OpenGL. Cependant, l'objectif final serait d'exporter les plans dans des formats d'images vectorielles (formats svg, pdf...). Ainsi elles pourraient être utilisées dans des posters sans avoir à se soucier de la résolution. À ce stade le programme renvoie un fichier csv des distances pour permettre à l'utilisateur d'effectuer ensuite une classification automatique avec un programme indépendant. Nous souhaiterions, pour parfaire le programme, qu'il

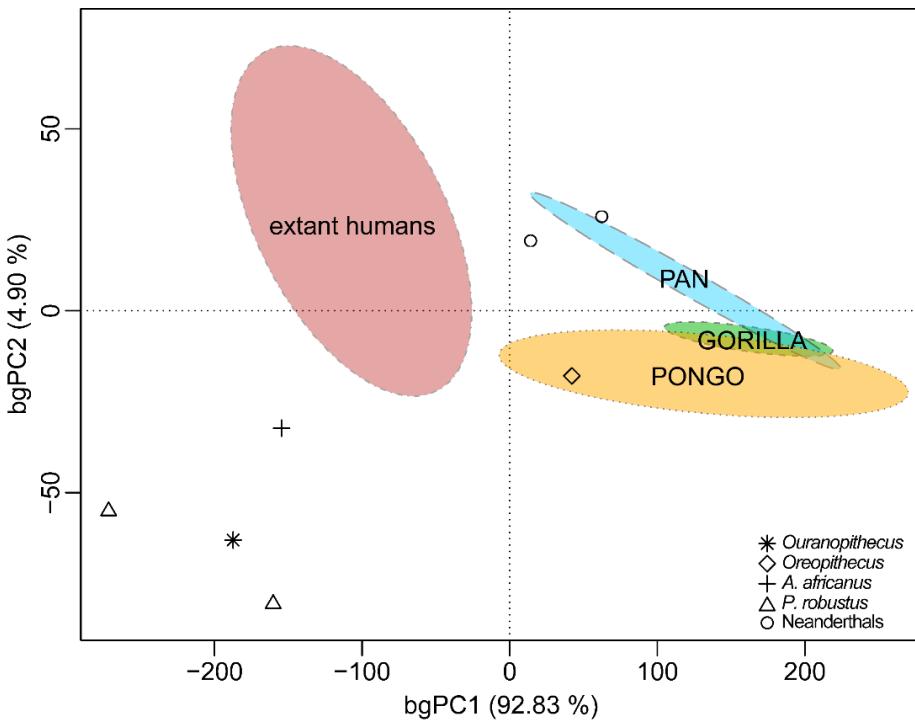


FIGURE 4.2 – Affichage de l’analyse en composante principale inter-groupe basée sur les épaisseurs de l’émail d’un échantillon de 33 individus.

[[9]]

effectue aussi l’analyse statistique et la classification avec ou sans apprentissage. Pour cela, l’analyse en composante principale est déjà implémentée.

## 4.4 Interface

Pour finir, le programme semble difficile à prendre en main pour un non informaticien puisqu’il s’agit d’une chaîne de scripts et de programmes à lancer avec les bons paramètres. Bien que, dans un premier temps l’objectif et de densifier et clarifier autant que possible les documentations et les notices utilisateurs, nous souhaiterions à terme créer une interface graphique minimalist et intuitive pour faciliter au mieux l’utilisation du programme, pour les phases de pré-traitement et post-traitement.

## Chapitre 5

### Bilan Personnel

Le bilan de ce stage est très positif pour moi, il se clôture en me laissant le sentiment d'avoir appris sur de nombreux plans.

J'ai tout d'abord élaboré une méthodologie dans sa quasi-totalité, ce qui m'a permis d'avoir un aperçu panoramique du projet. Le protocole est maintenant complet et abouti. De plus, j'ai beaucoup gagné en autonomie et je suis maintenant à même de prendre part activement à un projet conséquent.

Outre une évidente évolution de mes compétences techniques en Matlab, je constate aussi ma progression en mathématiques et en géométrie, ceci grâce aux recherches que j'ai dû effectuer, notamment pour la projection des points d'intérêts et la paramétrisation de la demi-sphère.

D'une manière plus général, j'ai dû m'adapter aux contraintes liées au domaine de l'anthropologie ce qui m'a donné l'occasion d'apprendre davantage sur l'évolution humaine et les démarches de recherches en paléontologie, et ce auprès de professionnels du domaine. J'ai pu aussi profiter d'un aperçu approfondi du quotidien d'un chercheur en travaillant au sein du laboratoire, et même en assistant à un colloque d'anthropologie tenu par le GALF (Groupement des Anthropologues de Langue Française). Tout ceci a considérablement enrichi mon expérience et me permet aujourd'hui de préciser mon projet professionnel. Je suis maintenant convaincu que le monde de la recherche me conviendrait, mais je pense aussi avoir besoin de travailler préalablement en entreprise, d'une part pour consolider mes compétences techniques mais aussi pour vivre une expérience différente et donc instructive.

Pour finir ce stage m'offre une certaine visibilité puisque le programme sera diffusé sous licence libre. De plus, les publications à venir de Clément Zanolli porteront sur ses analyses des résultats obtenus avec ce programme. Il présentera aussi les premiers résultats le 15 Septembre lors d'un colloque d'anthropologie à Madrid et enfin, nous allons écrire un court article pour décrire la méthode.

# Conclusion

Le stage terminé, le programme est abouti et utilisable, la méthode a du potentiel. Elle donne des résultats satisfaisants, en accord avec morphologie et la structure de la dent (la disposition des cuspides et crêtes reflète bien celle de l'objet de départ). Il reste néanmoins des points à parfaire tels que l'optimisation ou l'interface utilisateur, pour l'instant inexisteante. Je vais pour cela, revenir au laboratoire pendant quelque semaines pour parachever le programme et gérer la maintenance corrective en cas d'éventuels problèmes qui pourraient survenir dans les prochaines semaines ou les prochains mois.

L'expérience a été pour moi très enrichissante et me permet de clarifier mon projet professionnel. Ainsi je vais maintenant chercher à travailler en entreprise pour certainement retourner vers le travail en laboratoire quand j'aurai acquis l'expérience, les compétences et les connaissances qui me semblent nécessaires. De plus grâce à Jean Dumoncel, j'en sais aujourd'hui un peu plus sur le métier d'ingénieur en laboratoire. Je pourrai sans doute déterminer après une expérience en entreprise, si je souhaite rejoindre un laboratoire en tant que chercheur ou en temps qu'ingénieur.

# Bibliographie

- [1] C. Zanolli, L. Bondioli, A. Coppa, C. M. Dean, P. Bayle, F. Candilio, S. Capuani, D. Dreossi, I. Fiore, D. W. Frayer, *et al.*, “The late early pleistocene human dental remains from uadi aalad and mulhuli-amo (buia), eritrean danakil : macromorphology and microstructure,” *Journal of human evolution*, vol. 74, pp. 96–113, 2014.
- [2] “Molar crown inner structural organization in javanese *Homo erectus*, author=Zanolli, Clément, journal=American journal of physical anthropology, volume=156, number=1, pages=148–157, year=2015, publisher=Wiley Online Library,”
- [3] R. T. Kono, G. Suwa, and T. Tanijiri, “A three-dimensional analysis of enamel distribution patterns in human permanent first molars,” *Archives of Oral Biology*, vol. 47, no. 12, pp. 867–875, 2002.
- [4] R. T. Kono and G. Suwa, “Enamel distribution patterns of extant human and hominoid molars : occlusal versus lateral enamel thickness,” *Bull Natl Mus Natl Sci Ser D*, vol. 34, pp. 1–9, 2008.
- [5] A. J. Olejniczak, T. M. Smith, M. M. Skinner, F. E. Grine, R. N. Feeney, J. F. Thackeray, and J.-J. Hublin, “Three-dimensional molar enamel distribution and thickness in *Australopithecus* and *Paranthropus*,” *Biology Letters*, vol. 4, no. 4, pp. 406–410, 2008.
- [6] “Molar enamel thickness and dentine horn height in *Gigantopithecus blacki*, author=Olejniczak, Anthony J and Smith, Tanya M and Wang, W and Potts, Richard and Ciochon, R and Kullmer, Ottmar and Schrenk, F and Hublin, J-J, journal=American journal of physical anthropology, volume=135, number=1, pages=85–91, year=2008, publisher=Wiley Online Library,”
- [7] R. MacChiarelli, A. Mazurier, B. Illerhaus, and C. Zanolli, “*Ouranopithecus macedoniensis* (mammalia, primates, hominoidea) : virtual reconstruction and 3d analysis of a juvenile mandibular dentition (rpl-82 and rpl-83),” *Geodiversitas*, vol. 31, no. 4, pp. 851–863, 2009.
- [8] S. Durrleman, M. Prastawa, J. R. Korenberg, S. Joshi, A. Trouvé, and G. Gerig, “Topology preserving atlas construction from shape data without correspondence using sparse parameters,” in *International Conference on Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention*, pp. 223–230, Springer, 2012.
- [9] C. Zanolli, M. Cantaloube, P. Bayle, L. Bondioli, J. Dumoncel, S. Durrleman, J.-P. Jessel, G. Subsol, and R. Macchiarelli, “Innovative approaches to quantify and statistically compare tooth enamel thickness distribution,” *Proceedings of the European Society for Human Evolution (sous presse)*, 2016.