Université de Franche-Comté
École Doctorale SPIM

UNIVERSITÉ DE FRANCHE-COMTÉ

Thèse de Doctorat

Spécialité Sciences Pour l'Ingénieur

présentée par

Imen ELHECHMI

INSTRUMENTATION OPTIQUE POUR LA MESURE DES PÉRIKYMATIES DE LA COURONNE DENTAIRE

Soutenue le 8 Janvier 2010 devant la commission d'Examen:

Rapporteurs:

Roberto MACCHIARELLI	Professeur, Université de Poitiers.
Dominique BARCHIESI	Professeur, Université de Technologie de Troyes.

Examinateurs:

José BRAGA	Professeur, Université Paul Sabatier de Toulouse.
Tijani GHARBI	Professeur, Université de Franche-Comté.
Christophe GORECKI	Directeur de Recherche CNRS, Université de Franche-Comté.
Hervé MAILLOTTE	Directeur de Recherche CNRS, Université de Franche-Comté.

Je dédie ce travail:

A mes très chers parents
A mon frère et à ma sœur
A mes amis

Remerciements

Le travail qui est résumé dans le présent manuscrit a été effectué au sein du Département d'Optique P.M. Duffieux de l'Institut FEMTO-ST (U.M.R. 6174) à l'Université de Franche-Comté.

Tout d'abord, je tiens à remercier vivement monsieur le professeur Tijani Gharbi, directeur de thèse, de m'avoir guidé, suivi et soutenue scientifiquement ainsi que moralement, tout au long de ce travail. Je souhaite lui exprimer ma profonde gratitude pour m'avoir accueilli dans son équipe. Ses conseils, ses encouragements, pour sa présence constante et sa qualité humaine ont permis de réaliser ce travail dans un climat très favorable. Je le remercie pour la confiance et l'autonomie qu'il ma donnée.

Je tiens à remercier vivement monsieur le professeur José Braga, directeur de thèse, de m'avoir conseillé et apporté de précieux conseils, tout long de ce travail.

J'adresse mes remerciements à monsieur Hervé Maillotte directeur de recherche CNRS et directeur de notre laboratoire d'avoir accepté de présider le jury de ma thèse.

J'exprime ma profonde gratitude à monsieur Roberto Macchiarelli, professeur à Université de Poitiers, monsieur Dominique BARCHIESI, professeur à Université de Technologie de Troyes, pour m'avoir fait l'honneur de rapporter ce travail.

Je tiens à adresser mes remerciements à monsieur, Christophe GORECKI directeur de recherche CNRS, Université de Franche-Comté, pour avoir accepté de juger ce travail.

Je remercie Patrice Andrieu et Michael Gharbi qui m'ont aidé au cour de cette thèse.

Enfin, je n'oublierai jamais la sympathie de tous les membres de l'équipe et du Laboratoire qui m'ont accompagné pendant cette thèse : je cites Miguel Saurez, Guillaume Herlem, Jaime Menenses, Luc Froehly, Patrick Sandoz,...

Que tous les autres trouvent ici l'expression de ma reconnaissance.

Je ne pourrais pas finir sans inclure dans ces remerciements les personnes les plus chères: mes parents, mon frère, ma sœur, mes amis et tous mes proches.

Merci à tous !

Introduction

L'étude du développement physiologique humain et de sa variabilité a toujours été au centre des préoccupations non seulement des anthropobiologistes, mais également des médecins légistes, des dentistes, orthodontistes et des pédiatres. Les attentes de la société dans ce domaine de l'identification biométrique ont évolué. Désormais, la qualité des identifications ne se présume plus. Elle doit être définie, évaluée, prouvée et, au delà, constamment améliorée. Ce constat émane de nos instances dirigeantes : au plan national, dans le domaine de l'évaluation médicale et de la qualité des soins et au plan européen, dans le domaine de la biométrie et de ses enjeux (Rapport EUR21585 remis en 2005 [1, 2], commandé par la Commission des libertés civiles, de la justice et des affaires intérieures du Parlement européen). Il en ressort que: d'une part, ces systèmes d'identification vont considérablement se développer pour passer d'une utilisation initiale par les pouvoirs publics à des applications civiles et commerciales. Cette large diffusion aura des répercussions profondes sur la société. D'autre part, la mise en place de tels systèmes nécessite, en parallèle, la mise en place de nouvelles démarches de qualité et d'évaluation des pratiques professionnelles.

Les technologies biométriques (reconnaissance faciale , d'empreintes digitales , de l'iris de l'œil et ADN) sont encore en développement et insuffisamment matures pour être largement diffusées dans la société. Sept critères sont utilisés pour évaluer ces technologies : universalité, singularité (précision), permanence, facilité d'acquisition, performance, acceptabilité et résistance à la fraude. Les principaux aspects à traiter sont:

- l'interopérabilité technique,
- l'absence de normes,
- la performance des systèmes,
- l'intégrité des données biométriques,
- les systèmes biométriques multimodaux,
- les plateformes mobiles,
- les essais à grande échelle.

Les contraintes liées à ces aspects sont: l'efficacité de la technique d'échantillon nage et l'efficacité du processus de comparaison utilisé pour déclarer deux

échantillons concordants.

L'utilisation de la biométrie dans le secteur de la santé est jugée comme un champ d'application très probable de la biométrie compte tenu de la nature sensible des données médicales. Deux besoins d'identifications hautement sécurisés du patient sont clairement envisagés: le traitement et le transfert des dossiers médicaux et la protection de la vie privée. Ces besoins impliquent une meilleure analyse de la variabilité biologique des populations humaines, préalable indispensable aux développements futurs de nouvelles applications (biométrie, médecine légale, orthopédie maxillo-faciale, par exemple).

Des structures incrémentielles microscopiques liées à la croissance de l'émail dentaire, peuvent être visualisées à la surface de la dent. L'émail varie en épaisseur sur la surface de la dent. Il est plus épais au niveau des cuspides de la couronne dentaire (plus de $2,5\ mm$) et plus mince à proximité du collet. Les améloblastes, dont l'activité sécrétrice de l'émail varie selon un rythme circadien, forment en moyenne tous les sept jours (avec une variation entre les individus allant de six à douze jours) [3] [4] [5] des microstructures - les « stries de Retzius » visibles en sectionnant la couronne dentaire. Les stries de Retzius peuvent être visibles à la surface des couronnes où elles forment les périkymaties , structures microscopiques linéaires et parallèles entre elles. Ces structures incrémentielles, de profondeur (stries de Retzius) ou de surface (périkymaties), sont en rapport avec l'activité sécrétrice des améloblastes, responsables de la formation de l'émail. Leurs caractéristiques (nombre, espacement, ...) permettent aussi d'estimer certains éléments (durée, vitesse, ...) de la formation des couronnes dentaires. Nous pouvons déterminer ainsi, sous certaines conditions (en fonction de l'âge de début de formation de la dent, de son usure ...) l'âge des individus avant la fin de leur croissance dentaire. D'une manière générale, ces études peuvent constituer une méthode efficace pour identifier les représentants d'espèces d'hominidés fossiles qui se distingueraient par leur mode de croissance dentaire. L'analyse de ces microstructures est particulièrement intéressante dans la mesure où elle permet d'accéder à des informations beaucoup plus précises sur le mode de formation de l'émail. Le dénombrement des incréments de croissance de l'émail dentaire n'est pas automatisé et donc, particulièrement long et fastidieux. Par exemple, lorsque des observations sont réalisées sur un échantillon humain, faute de temps, elles sont limitées à une classe dentaire (les incisives, le plus souvent). Il en résulte une absence totale de corpus de données sur la variabilité au sein les populations humaines à l'échelle mondiale. Malgré les difficultés d'observation (méthodes manuelles trop coûteuses en temps), l'analyse des périkymaties présente donc un intérêt majeur, encore totalement inexploité, dans le domaine de l'identification et des techniques biométiques. En effet, les périkymaties forment à la surface de l'émail, par leur nombre, leur espacement, leur plus ou moins grande proéminence, une empreinte dentaire tout à fait unique, au même titre que les empreintes digitales par exemple. Cette empreinte dentaire est conservée après le décès de l'individu, l'émail étant minéralisé à 95%. La présence des lignes de croissance dans l'émail dentaire a permis d'aborder l'étude du développement dentaire à partir d'une perspective nouvelle. En effet, ces lignes de croissance, les unes avec une périodicité circadienne et les autres avec une fréquence qui varie entre 6 et 12 jours [3] [4] [5], permettent d'établir la chronologie du développement dentaire chez les fossiles de façon directe.

L'objectif de cette thèse est de concevoir et de réaliser des outils qui permettent la mesure des périkymaties. Le premier domaine visé est l'anthropologie, le deuxième est la médecine légale (identification des personnes) et enfin la biométrie. Il s'agit de réaliser une instrumentation permettant des mesures non invasives pour réaliser des études sur un grand nombre d'échantillons d'une part, de faire des mesures *in vivo* d'autre part. L'autre contrainte liée à cette instrumentation est son caractère portable pour pouvoir réaliser des mesures sur le terrain quand il s'agit d'anthropologie. L'objectif ultime étant une intégration de la solution trouvée pour en faire un outil de mesure à main.

Dans le premier chapitre de cette thèse nous allons développer l'état de l'art relatif aux méthodes de mesure des caractéristiques des dents, nous rappellerons alors les principes des méthodes optiques qui ont été mises en œuvre pour ces études. Dans le second chapitre nous donnerons les caractéristiques morphologiques des périkymaties et nous exposerons la théorie de la réflectance optique qui nous a permis de concevoir et de réaliser un nouvel outil pour la mesure des périkymaties. Nous décrirons alors les voies qui ont été explorées. Nous donnerons une suite la caractérisation du système réalisé pour donner ses performances et ses limites. Le troisième chapitre contiendra une description exhaustive des résultats obtenus. Comme nous l'avons évoqué, la mesure des périkymaties peut permettre de déterminer l'âge pour les individus jeunes.

Sommaire

I État de l'art **1**

1 Les études entreprises **3**
1.1 Champs d'application 3
1.2 Les méthodes utilisées 4
1.3 Conclusion 14

II Mesure des stries des dents par méthode Optique **15**

2 Conception d'un système optique ... **17**
2.1 Position du problème 18
2.2 Réflectance et texture des surfaces 19
2.3 Les choix retenus 28
2.4 Stratégie pour l'observation des périkymaties 30
2.5 Première méthode 30
2.6 Deuxième méthode 39
2.7 Conclusion 41

III Réalisations et résultats expérimentaux **43**

3 Système d'analyse et résultats expérimentaux **45**
3.1 Limites des méthodes précédentes 45
3.2 Nouvelle approche de mesure 46
3.3 Système de mesure de la texture des dents 58
3.4 Méthode d'analyse temps fréquence 62
3.5 Résultats obtenus 66
3.6 Mesure des périkymaties 72
3.7 Conclusion 79

IV Conclusion générale **81**

V Index **99**

Index **101**
Index général 101

Index **103**
Index des auteurs 103

I

État de l’art

Sommaire

1.1 Champs d'application
1.2 Les méthodes utilisées
1.3 Conclusion

Chapitre

1

Les études entreprises

Les stries de croissance de l'émail dentaire permettent depuis quelques années, d'accéder, aussi bien pour l'Homme actuel que pour des fossiles représentant ses ancêtres, à des informations de durée ou de rythme de formation de l'émail de la couronne dentaire (uniquement pour la partie formée après la naissance); dans certains cas précis, ces informations peuvent conduire à estimer l'âge du décès de l'individu observé. Des chercheurs ont donc tenté de mettre au point des méthodes d'évaluation de l'âge au décès se rapportant directement à la croissance histologique individuelle. Celle-ci se manifeste par diverses formes d'incrémentation dans les tissus dentaires. La couronne montre en particulier des structures de surface dénommées périkymaties. Bromage (1985) et Dean [6] ont présenté récemment le principe de cette méthode: le décompte des périkymaties, de périodicité connue, permet de connaître la durée de formation de la couronne à laquelle il faut ajouter les stries non visibles en surface, la durée de formation de la racine et le temps écoulé entre la naissance et l'initiation de la calcification dentaire [7].

1.1 Champs d'application

Le principal objectif de cette étude est:
d'utiliser, tester et évaluer la qualité d'une méthode de comptage des périkymaties. Le décompte de ces périkymaties à la surface de l'émail dentaire permet de connaître la durée et le rythme de formation de la zone des couronnes dite imbricationnelle (celle où les périkymaties apparaissent en surface). Pour un jeune individu dont le développement de la couronne n'est pas encore achevé, cette durée peut être utilisée pour déterminer l'âge au décès. Cette méthode d'estimation de l'âge est relativement simple à mettre en œuvre pour un individu dont la couronne de la première incisive ou de la première molaire permanentes (dents dont la couronne débute, en général, son édification à la naissance) n'a pas encore, ou vient juste de finir sa formation.

1.2 Les méthodes utilisées

1.2.1 Microscope électronique à balayage

1

La technique de l'empreinte/ contre-empreinte a été utilisée par Barnes [8, 9] afin d'observer les périkymaties sur l'émail des dents humaines au microscope électronique à balayage (MEB ou SEM) (e.g., Rozzi) [10] [11] [12]. La première empreinte est réalisée à l'aide d'un polymère à froid de type rhodorsil RTV 585. Des grossissements compris entre 36 et 55 facilitent le décompte des périkymaties à la surface de la couronne sur un MEB de type Jeol JSM S1. L'étude micromorphologique des surfaces de la dent humaine sectionnée a été conduite au stéréomicroscope et au microscope électronique à balayage (MEB). Les études sur l'émail sont un élément important et une source d'accès aux mécanismes de développement de dents fossiles (Dean et al:2001) [6, 7, 13, 14]. Le principe du MEB consiste en un faisceau d'électrons balayant la surface de l'échantillon à analyser qui, en réponse, réémet certaines particules. Ces particules sont analysées par différents détecteurs qui permettent de reconstruire une image en trois dimensions de la surface. Cette méthode à été utilisé pour la comparaison de l'âge au décès attribué à Hortus II-III et l'âge au décès d'un individu moderne [11]. L'individualisation de chaque périkymatie pour son décompte peut être difficile, mais, bien que les erreurs de décompte ne puissent pas être écartées, l'absence d'usure des dents a permis le suivi des périkymaties tout au long de la face dentaire (fig. 1.1). Chez l'Homme actuel , Rozzi [11] a utilisé les variables suivantes: la période située entre la naissance et le début de la formation coronaire, ainsi que le taux de formation de la racine. Il est probable que ces valeurs influent sur la variation observée chez l'individu Hortus II-III; par exemple, pour les prémolaires, les valeurs les plus élevées pour l'Homme actuel correspondent à celles qui ont un nombre de périkymaties supérieur. De plus, on ne peut pas écarter la possibilité que la racine de certaines dents soit cassée, ou résorbée, ce qui est difficile à déterminer car les racines ne sont pas complètement formées. Bien que ces erreurs d'analyse aient pu exister, il est aussi fort probable que la variation rencontrée chez l'individu Hortus II-III résulte en fait des variations propres à chaque type dentaire par rapport à un standard généralisé. Il est important de souligner que le décompte des périkymaties a été effectué à partir de l'observation directe des moulages des dents au microscope stéréoscopique. Les décomptes à partir des photos prises au MEB ne sont pas précis car l'observation des périkymaties dépend de l'incidence de la lumière et, étant donné la surface irrégulière de l'émail, les photos au MEB ne permettent de voir que quelques périkymaties à la fois. À la différence du MEB, l'utilisation du microscope stéréoscopique permet d'orienter librement la dent et de suivre les périkymaties sur toutes les faces dentaires. L'échelle correspond à $1\ mm$ dans le sens horizontal.

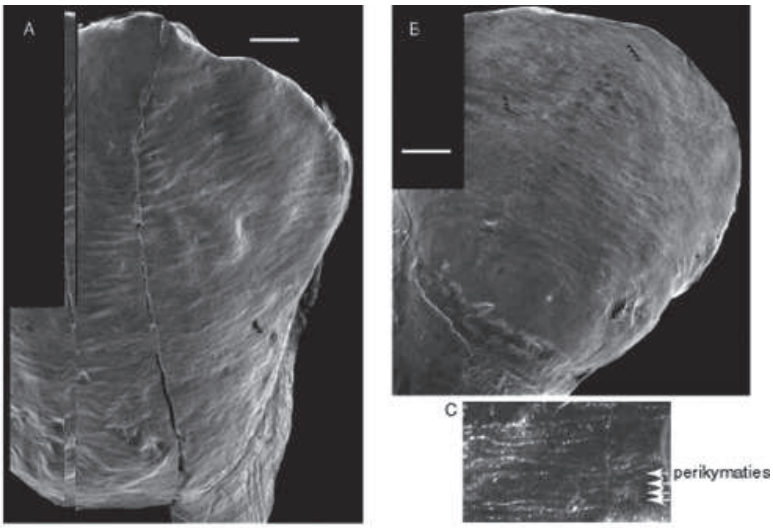


FIGURE 1.1 – A : face vestibulaire de la canine supérieure droite, MEB. B : face vestibulaire de la dent inférieures droite, MEB. C : détail de la face vestibulaire de la canine supérieure droite à côté du collet, microscope stéréoscopique. Les flèches signalent quelques périkymaties observables sur les photos [11].

1.2.2 Les Techniques radiographiques

L'histoire de la technique radiographique débute en 1895 avec Roentgen qui en étudiant les propriétés de ce que l'on appellera par la suite les rayons X, réalise accidentellement une radiographie de la main de sa femme. C'est le premier cliché radiographique de l'histoire. Différentes expériences vont être menées par la suite notamment pour obtenir des images radiographiques des dents. H Numata [15] [16] est le premier à mettre en œuvre la radiographie panoramique rotationnelle. Même si le matériel a évolué jusqu'à nos jours, le principe reste le même. La réalisation d'une radiographie panoramique dentaire, également nommée orthopantomographie ou orthopantomogramme, permet le diagnostic des anomalies dentaires congénitales : anomalie de nombre (agénésie , dent surnuméraire: odontome ou odontoïde), anomalie de taille (macrodontie, microdontie), anomalie de forme (taurodontisme , duplication , fusion dentaire , invagination amélo-dentinaire , rhizalyse et résorption dentaire), anomalie de structure, anomalie de situation (transposition, inclusion, ectopie). Elle permet ainsi, précocement, d'établir ou de confirmer un diagnostic et de définir un traitement. La majorité des études sur le développement dentaire de l'Homme actuel sont basées sur l'analyse radiographique.
Dans l'exemple suivant des fossiles de l'Hortus, l'âge au décès de l'individu II-III avait été estimé à 9 ans de Lumley [17]. Cet âge avait été déterminé en comparant le stade de développement dentaire atteint par cet individu avec les stades établis dans la chronologie du développement chez l'Homme actuel. La caractérisation de chaque étape du développement dentaire chez l'homme actuel reposait à l'époque principalement sur les études de radiographies. Ce type d'étude comporte certains inconvénients, en particulier celles qui ont été effectuées avant la fin du XX^e s. Hess et al. 1932. En effet, les rayons X ont besoin d'une certaine épaisseur de tissu dentaire pour que celui-ci soit observé sur la plaque radio-

graphique. De ce fait, les radiographies n'enregistrent pas les toutes premières périodes de formation de la dent car la quantité de dentine et d'émail n'est pas suffisante pour que les rayons X soient absorbés Beynon et al. [18]. Le même phénomène a été constaté pour la fin de formation de la couronne, car l'émail devient de moins en moins épais vers le collet, les dernières périodes de formation de l'émail ne sont ainsi pas captées par les radiographies. De plus, étant donné l'orientation des sujets au moment de l'examen, les radiographies enregistrent la formation de l'émail sur les faces mésiale et distale de la couronne, or les dernières périodes de formation de la couronne ont lieu sur les faces linguale et vestibulaire et elles ne sont donc pas prises en compte dans l'analyse radiographique Beynon et al. [18]. La méthode radiologique a l'avantage de pouvoir être appliquée à un large échantillon, mais elle présente aussi l'inconvénient de ne pas pouvoir déterminer de façon précise les étapes de formation de la couronne dentaire (fig. 1.2). Par contre, la méthode basée sur l'analyse des lignes de croissance dans l'émail dentaire permet de suivre la formation dentaire et de lui attribuer une chronologie précise. L'inconvénient de cette méthode réside dans le fait que, pour bien connaître toutes les étapes de formation, il faut sectionner la dent, ce qui limite alors son application à très peu d'individus ou restreint l'analyse à la partie imbricationnelle de la couronne.

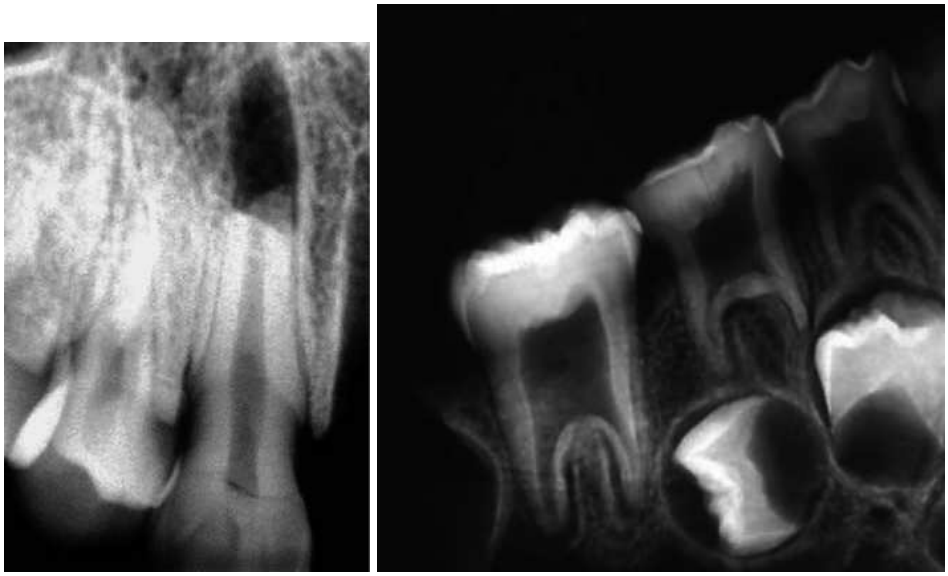


FIGURE 1.2 – Image de gauche Radiographie de la canine en place, maxillaire fossile du Coupe-Gorge. Image de droite Mandibule de Combe-Grenal I. Radiographie de la région prémolaire et molaire droite [19].

Différents types de radiographie dentaire

- **La radiographie rétroalvéolaire** : utilise un film de haute définition protégé par une enveloppe que le sujet maintient dans la bouche derrière la dent à examiner. Elle peut être réalisée suivant la technique dite « bissectrice » (rayons divergents ou convergents) ou suivant la technique dite « parallèle » ou « long cône » (rayons parallèles). Cette radiographie permet d'obtenir une image détaillée de la dent, de la gencive et de l'os. Dans certaines installations, le film est aujourd'hui remplacé par un capteur qui numé-

rise l'image, ce qui rend possibles sa visualisation directe sur écran et son enregistrement par ordinateur.

- **La radiographie panoramique dentaire** : fournit une image de l'ensemble des arcades dentaires et des maxillaires, mais sa définition est moins bonne que celle du cliché rétroalvéolaire localisé.
- **La tomodensitométrie (scanner à rayons X)** : appliquée aux dents mesure l'os disponible pour des implants éventuels.

1.2.3 Microscope Stéréoscopique

Les microscopes stéréoscopiques, ou stéréo microscopes, sont parfois appelés aussi loupes binoculaires, microscopes binoculaires, ou encore binoculaires tout court, mais improprement.

En effet, la plupart des microscopes binoculaires ne sont pas stéréoscopiques... Par définition, un microscope stéréoscopique est un instrument qui permet de percevoir le relief d'un objet par examen de deux images prises avec un écartement comparable à celui des yeux. Il faut donc qu'il comprenne non seulement deux oculaires, mais également deux objectifs. Donc, le microscope stéréoscopique est un instrument destiné essentiellement à l'observation de la structure extérieure, du relief des objets. Par convention, c'est un éclairage incident qui est utilisé, car celui-ci favorise grandement la vision stéréoscopique en produisant des jeux d'ombre à la surface de l'objet. Les microscopes stéréoscopiques sont pourvus d'objectifs dont les qualités principales sont une grande distance frontale et un vaste champ d'observation. Ces qualités ne peuvent malheureusement êtres obtenues qu'au détriment du grossissement, qui n'excède jamais dix fois. C'est la raison pour laquelle le grossissement total des stéréo microscopes dépasse rarement deux cents fois (couplage d'un objectif dix fois avec un oculaire vingt fois). La surface de la dent est orienté perpendiculairement à l'axe optique du microscope stéréoscopique afin d'obtenir des informations sur la microstructure de émail. Les observateurs illuminent obliquement par une source de lumière halogène $6V/20W$ Rozzi [20] [21] [22] et en rotation dans un manière à assurer une visibilité optimale de l'émail (fig. 1.3).

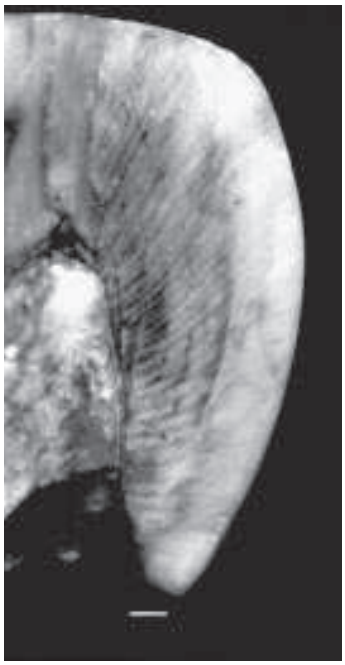


FIGURE 1.3 – Image réalisée à l'aide d'un Microscope Stéréoscopique [12].

1.2.4 Microscope Confocal Optique

Les microscopes confocaux optiques ont été utilisés pour décrire les détails de microstructure de l'émail et de déterminer les angles formés entre les stries de Retzius et la jonction émail dentine (JED) [23] [24].

Principe du microscope confocal optique

Dans un microscope confocal, il existe 3 points conjugués (fig.1.5) [25]:

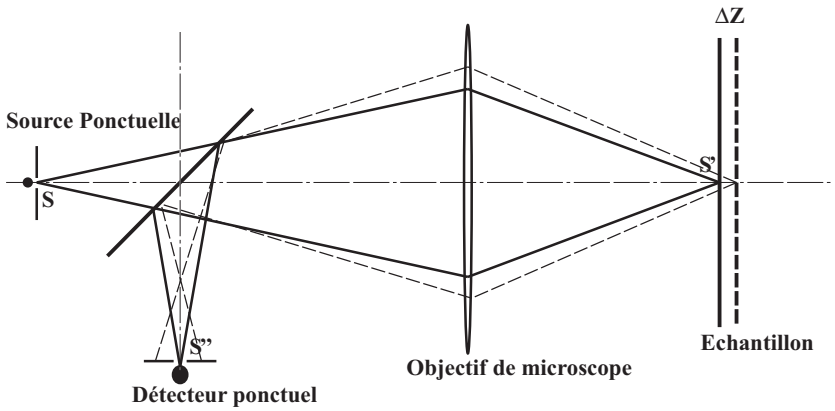


FIGURE 1.4 – Schéma de principe du microscope confocal optique.

1. la source de lumière monochromatique S;
2. son image S' à travers l'objetif de microscope;
3. le détecteur ponctuel S''.

Si le profil à mesurer est placé de telle sorte qu'un point de sa surface soit confondu avec S', alors la lumière réfléchie est exactement focalisée sur le détecteur S'': l'intensité détectée est maximale. Par contre, si l'échantillon est déplacé selon l'axe optique, la lumière réfléchie ne se focalise plus sur le détecteur, l'intensité recueillie diminue.

Avantage: Le microscope confocal possède une très grande sensibilité à un déplacement axial de l'échantillon. Il représente donc un bon dispositif pour des mesures de profilométrie: le déplacement axial nécessaire pour conserver un maximum d'intensité détectée correspond à la variation de hauteur entre deux points.

Inconvénient: Un déplacement axial de l'échantillon est à prévoir, ce qui oblige à un asservissement permanent en z pour assurer la confocalité.

La microscopie confocale permet d'effectuer des mesures avec une résolution axiale de quelques nanomètres et une résolution latérale inférieure au micron (de l'ordre de $150nm$) [24].

Application à l'analyse des périkymaties

Plusieurs auteurs ont utilisé un microscope confocal pour l'analyse des périkymaties [23]. Ainsi Lacruz et Bromage en 2006 [26] et Lacruz en 2007 [27] ont conduit une étude qui leur a permis de compter le nombre de périkymaties sur une incisive permanente centrale mandibulaire fossile provenant du site sud-africain de Kromdraai B - KB 5223 (fig. 1.3). Ils ont également observé le nombre et l'agencement des stries de Retzius de l'une des deux premières molaires permanentes mandibulaires du même spécimen. Ainsi, ces auteurs ont pu estimer la durée de la formation de la couronne. Ils remarquent que le nombre de périkymaties sur l'incisive est plus faible que les valeurs signalées jusqu'à présent pour les

premiers représentants du genre *Homo*. Ce nombre est comparable à ceux obtenus pour *Paranthropus*.

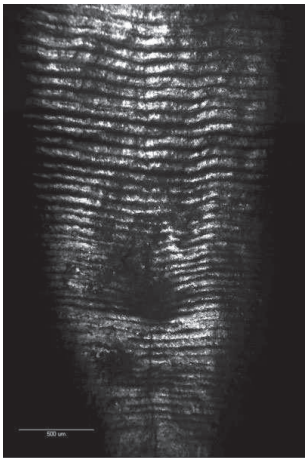


FIGURE 1.5 – Image des périkymaties de la dent obtenu à l'aide d'un microscope confocal Lacruz en 2007 [27]. Le nombre des périkymaties sur une incisive inférieure KB 5223 prises de quelques micromètres à partir du collet. Le nombre total des périkymaties est 86.

Cette étude a été la plus complète pour le comptage des périkymaties sur ce fossile. Une analyse plus ancienne de ce spécimen a suggéré que KB 5223 devrait être classé comme l'un des premiers représentants du genre *Homo*. En effet, l'étude de Braga et Thackeray en 2003 [28] sur KB 5223 fourni des bases morphologiques pour l'inclusion de ce spécimen dans le genre *Homo*. Cependant, Lacruz en 2007 a montré que la structure complexe de développement de l'émail de KB 5223 ne fournit aucun indice clair sur la présence *d'Homo* à Kromdraai B, tout du moins en utilisant des paramètres de croissance de l'émail. En outre, un point particulièrement important à propos de l'observation des périkymaties concerne leur périodicité, les anglophones parlant souvent de « *perikymata packing pattern* ». En effet, il semblerait que, pour les premiers représentants des deux genres que sont *Paranthropus* et *Homo*, les périkymaties ne montrent pas la même périodicité, en particulier, à proximité du collet. Pour les individus du genre *Homo*, la périodicité serait plus courte. Une meilleure mesure du potentiel de la valeur taxonomique des périkymaties aidera donc l'attribution des spécimens dentaires isolés. Un point important concerne la caractérisation de la variabilité de la périodicité des périkymaties chez l'Homme actuel parce qu'elle est totalement inconnue.
L'inconvénient majeur de cette méthode est tout d'abord son coût (l'achat d'un confocale), le poids du microscope confocal constitue un inconvénient pour en faire un appareil de mesure portable.

1.2.5 Le Profilomètre optique

La profilométrie optique a été développée pour la mesure du relief d'une surface à l'aide d'un interférogramme obtenu en faisant interférer deux faisceaux cohérents, l'un réfléchi par l'échantillon à analyser et l'autre par le miroir de référence d'un interféromètre type Michelson.

Si la source utilisée pour réaliser l'interférogramme, est une source monochromatique, nous pouvons décrire la répartition d'intensité $I(x,y)$ dans le plan image de l'interféromètre par l'équation suivante :

$$I(x,y) = I_0(x,y)(1+\gamma(x,y)cos(\phi(x,y)) \tag{1.1}$$

où γ (x,y) est la visibilité du franges obtenues, elle dépend du pouvoir réflecteur du miroir et de l'échantillon et $\phi(x,y) = \frac{2\pi}{\lambda}2z(x,y)$ est la phase qui est proportionnelle à l'altitude (z) du point (x,y) appartenant à l'échantillon. Ainsi les variations de phase sont proportionnelles aux variations de hauteur: la mesure de la phase conduit donc directement à la détermination du relief.

Nous cherchons à déterminer z(x,y) mais $I_0(x,y)$ et $\gamma(x,y)$ sont des inconnues. Pour les éliminer, il suffit d'enregistrer 4 interférogrammes décalés de $\pi/2$ en phase. En effet, en notant:

$$I_1(x,y) = I_0(x,y)(1+\gamma(x,y)cos(\phi(x,y)) \tag{1.2}$$

$$I_2(x,y) = I_0(x,y)(1+\gamma(x,y)cos(\phi(x,y)) + \frac{\pi}{2}) \tag{1.3}$$

$$I_3(x,y) = I_0(x,y)(1+\gamma(x,y)cos(\phi(x,y) + \pi) \tag{1.4}$$

$$I_4(x,y) = I_0(x,y)(1+\gamma(x,y)cos(\phi(x,y)) + \frac{3\pi}{2}) \tag{1.5}$$

Il vient alors:

$$\phi(x,y) = arctan\frac{I_4(x,y) - I_2(x,y)}{I_1(x,y) - I_3(x,y)} \tag{1.6}$$

Ainsi à l'aide de l'enregistrement des quatre interférogrammes nous pouvons déterminer la variation de la phase due à la variation du profil. La phase est liée directement à la hauteur z du relief de l'échantillon.

Schéma de principe du profilomètre

Le dispositif, représenté figure 1.6, comprend un microscope, un objectif interférométrique de type Mirau, un transducteur piézo-électrique, une caméra CCD et un système d'acquisition.

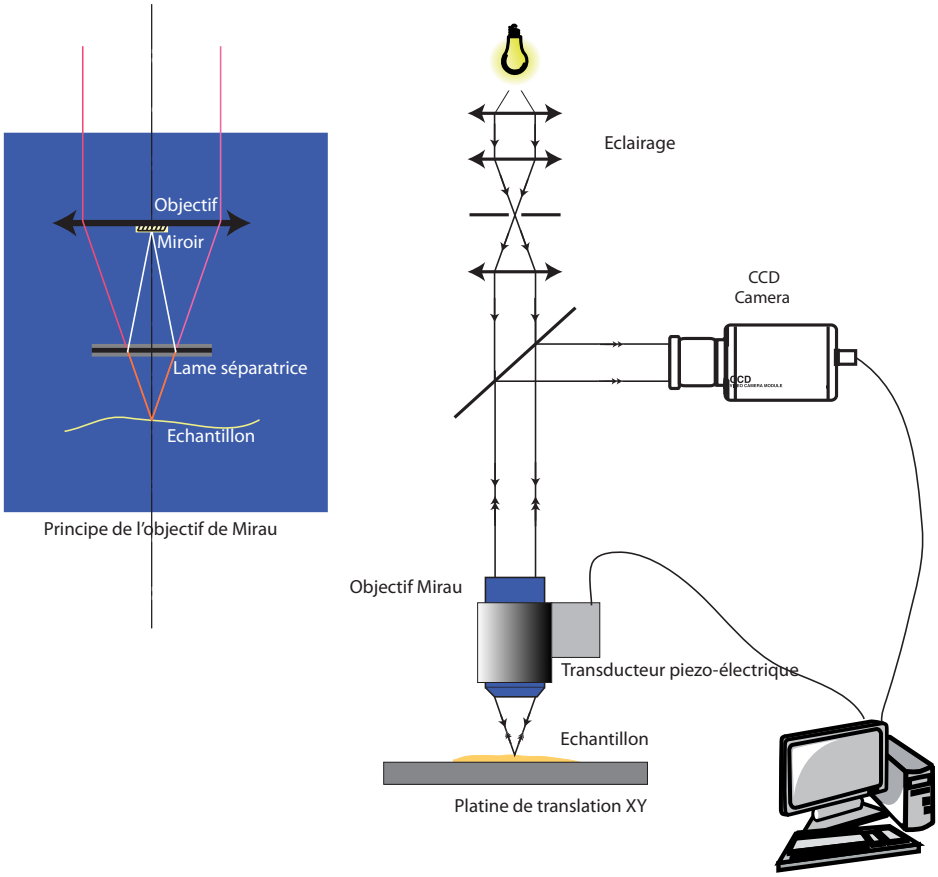


FIGURE 1.6 – Schéma de principe du profilomètre optique.

- L'objectif de Mirau est représenté sur la figure 1.6, il contient une lame à faces parallèles qui permet de séparer le faisceau issu de la source en deux parties. Un des faisceaux est réfléchi sur le miroir de référence, tandis que l'autre est transmis sur l'objet. Les positions respectives de la lame séparatrice et du miroir sont les figures d'interférences de ces deux faisceaux soient observables dans le plan de mise au point de l'objectif.
- L'image de l'interférogramme obtenu est enregistrée à l'aide d'une caméra CCD. La caméra est reliée à un micro-ordinateur via une carte d'acquisition.
- Le transducteur piézo-électrique est utilisé pour déplacer le miroir de référence, le pas élémentaire de translation correspond à un déphasage de $\pi/2$.
- Un logiciel traite les fichiers images correspondant aux différents interférogrammes et calcule la hauteur de chaque point dans l'image. Nous pouvons ainsi afficher un profil de la surface étudiée.

La résolution des profilomètres optiques peut atteindre $2\ nm$ en Z. Le relief de l'objet se traduit par un contraste interférentiel dû aux différences de trajet optique entre l'objet et le miroir. En lumière monochromatique, le contraste interférentiel est périodique avec la différence de marche. Un profil topographique de pente uniforme donne ainsi un contraste sinusoidal.
La correspondance profil/contraste n'est donc pas immédiate. Pour linéariser cette dépendance, on enregistre l'évolution du contraste au cours d'une translation de $\lambda/2$ du miroir de référence effectuée à l'aide d'un actionneur piézoélec-

trique. L'expression 1.6, pour quatre déplacements, nous donne alors la hauteur relative de chaque point, à un multiple de $\lambda/2$ prés du à la périodicité des franges d'interférences. On obtient ainsi la topographie de la surface, par tranches d'épaisseur $\lambda/2$, puis un traitement logiciel permet de recoller les tranches. Dans le cas d'une surface complexe avec de fortes variations de hauteur, il est préférable d'utiliser de la lumière polychromatique, pour laquelle le contraste interférentiel présente un maximum à différence de marche nulle. Il est ainsi possible de repérer la valeur absolue de la hauteur en détectant la position de ce maximum au cours d'une translation du miroir de référence sur une grande distance. Cette technique en lumière polychromatique est plus longue en terme d'acquisition de données et de temps de traitement. La profilométrie optique ne s'applique pas à tous les types d'échantillons tant par la gamme de rugosité à mesurer que par leur nature. Souvent, on fait appel à plusieurs techniques afin de caractériser la morphologie d'une surface. Les techniques d'analyse les plus utilisées dans le monde de l'industrie et de la recherche sont le palpeur mécanique, le Microscope Electronique à Balayage (MEB), le Microscope à Force Atomique (AFM), la Microscopie Confocale, la Microscopie Interférentielle.

M. Chikh-Bled et al. [29] ont intégré sur le même système trois techniques de microscopie interférentielle : les deux premières utilisent une lumière monochromatique, tandis que la troisième utilise une source de lumière blanche. Chacune de ces techniques liée à des algorithmes de traitement, d'analyse, et de correction des erreurs. Les algorithmes utilisés pour le calcul de la phase en lumière monochromatique ne sont plus valables en lumière blanche car la visibilité des franges est modulée par l'enveloppe de la fonction d'autocorrélation et qui varie avec la position du miroir de référence. Des algorithmes spécifiques dédiés à la profilométrie ont été développés au laboratoire. Le premier est basé sur la détection du maximum de la fonction d'autocorrélation [30]. Le deuxième fait appel au codage chromatique par transformée de Fourier [31] [32], une résolution de l'ordre du nanomètre a été obtenue. Cette méthode présente l'avantage d'être appliquée à des surfaces en cours de déformation ou situées dans un environnement vibratoire. Enfin, le dernier est basée sur un algorithme à sept points (sept points dans l'interférogramme) [33] [34] dont la validité suppose que la variation de l'enveloppe de cohérence puisse être considérée comme linéaire sur un intervalle de $1,5$ frange. Les techniques d'acquisition et de traitement sont similaires à celles utilisées en interférométrie en lumière monochromatique, et la résolution verticale est de $1\ nm$.

Application à l'analyse des périkymaties

L'analyse des périkymaties à l'aide de la profilométrie optique nous permet d'obte-nir la micro–rugosité sur la couronne de la dent, l'image des périkymaties, le profil $3D$ de relief de ces périkymaties. Cette méthode, permet d'estimer le nombre de périkymaties, de déterminer la profondeur et la périodicité de ces périkymaties. L'inconvénient majeur de cette méthode est, tout d'abord, les difficultés de la mesure des profils $3D$ à cause de la diffusion de la lumière par la dent, de la rétro-diffusion et du temps de mesure très grand (3 à 4 heures pour l'ensemble de la dent), son coût très élevé.

1.2.6 Instruments de mesure des profils de la surface

Hillson et Jones [35] ont développé deux instruments pour mesurer les caractéristiques microscopiques des surfaces. L'une est basée sur le principe du palpeur, elle donne le profil de la surface de la couronne dentaire, tandis que l'autre est basé sur un microscope de mesure dit « Toolmaker's Microscopes ». Les mesures d'un profil sont enregistrées directement par les programmes de contrôle, à une résolution spatiale d'environ $4,2\mu m$ et de $0,4\mu m$ sur l'axe vertical. A l'aide de ces deux techniques les auteurs ont obtenus de très bons profils de ces surfaces, que leur ont permis, et ce pour la première fois dans la littérature, le comptage des périkymaties. Leurs méthodes n'ont pas connues cependant un grand développement.

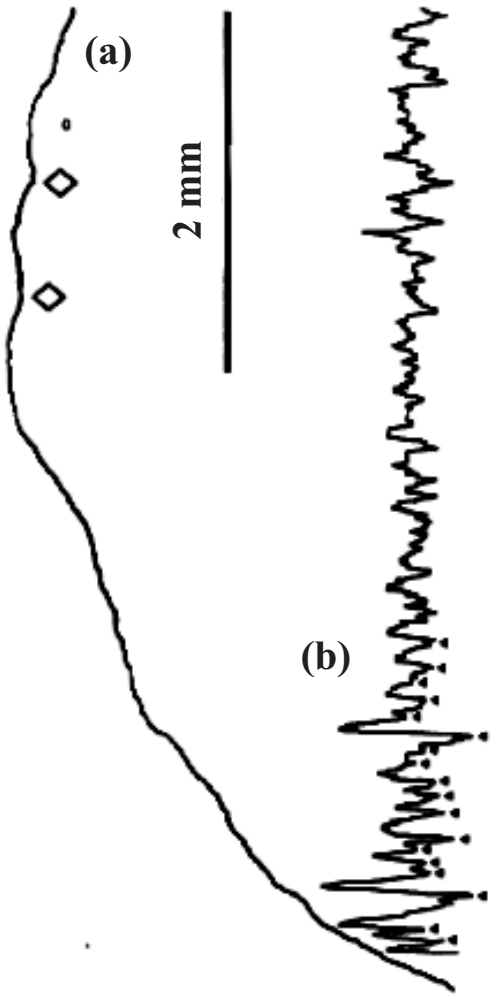


FIGURE 1.7 – Profil de la dent obtenue par Hillson et Jones [35].(a) Le profil initial, (b) le profil filtré à l'aide d'un filtre pas-haut.

1.3 Conclusion

La mesure des périkymaties à l'aide de la microscopie électronique, de la microscopie confocale ou de la profilométrie optique nécessite un équipement très lourd et très coûteux. Ces techniques sont très longues en terme d'acquisition de données et de temps de traitement. La microscopie confocale donne des mesures très pertinentes. Par exemple, lors de son travail de thèse, M. Yuan en 2000, a traité approximativement 300 dents en 3 ans [36] [37]. L'analyse des périkymaties à l'aide de la profilométrie optique présente plusieurs inconvénients: difficultés de la mesure des profils $3D$ à cause de la diffusion de la lumière par la dent, temps de mesure très grand 3 à 4 heures pour l'ensemble de la dent, son coût reste très élevé. Pour pallier ces inconvénients, nous avons entreprit l'étude et la réalisation d'une instrumentation optique associée à des algorithmes de traitement d'image afin de réduire le coût de revient d'une mesure ainsi que le temps d'analyse. Nous décrirons dans les chapitres suivant comment nous avons conçu et réalisé un outil permettant la mesure des périkymaties dans des conditions acceptables pour les utilisateurs: système portable, simple d'utilisation, temps de mesure pour une dent ne dépassant pas les dix minutes.

II

Mesure des stries des dents par méthode Optique

Sommaire

2.1 Position du problème
2.2 Réflectance et texture des surfaces
2.3 Les choix retenus . . .
2.4 Stratégie pour l'observation des périkymaties
2.5 Première méthode
2.6 Deuxième méthode
2.7 Conclusion

Chapitre

2

Conception d'un système optique pour la mesure des périkymaties

Les périkymaties présentent une profondeur de 2 à $5\mu m$ (fig.2.1) et une périodicité de 50 à $100\mu m$ Hillson et Bond en 1997 [38,39]. La périodicité des périkymaties change dans les différentes parties de la couronne: pour les périkymaties du bord libre de la couronne la périodicité est de l'ordre de $100\mu m$ [39], au milieu de la couronne l'espacement des périkymaties est de l'ordre de $70\mu m$ [39], par contre au niveau de collet les périkymaties sont moins espacés de l'ordre de $50\mu m$ [39]. Pour mettre en évidence ces périkymaties, les scientifiques ont eu recours à la microscopie électronique, à la microscopie confocale ou à la profilométrie optique. Toutes ces approches nécessitent un équipement très lourd et très coûteux. Il est donc exclu d'utiliser les stries des dents comme un élément biométrique en utilisant ces outils. Comme nous l'avons vu dans le chapitre précédent, l'analyse des périkymaties présente un intérêt majeur, encore totalement inexploité, dans le domaine de l'identification et des techniques biométriques.

Dans ce chapitre nous allons exposer notre démarche pour concevoir une méthode optique, non invasive, pour la mise en évidence des périkymaties. Nous démontrerons ensuite que l'association de cette méthode à une instrumentation optique nous permettra de concevoir un outil dédié à la métrologie des périkymaties. Ce travail a été entrepris dans l'objectif de créer une instrumentation susceptible d'être miniaturisée pour en faire un outil à main applicable dans le domaine de la biométrie.

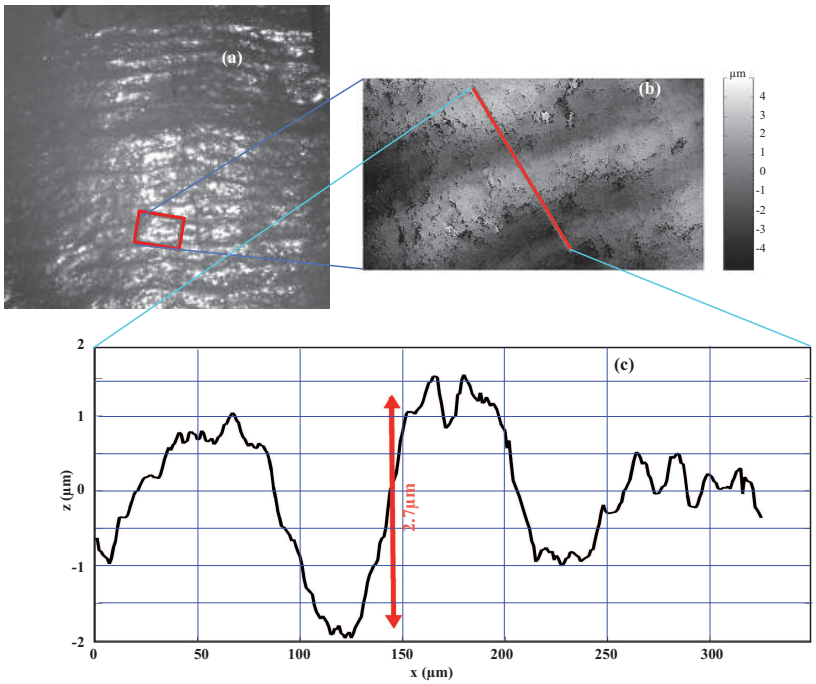


FIGURE 2.1 – Micro-rugosité sur la couronne. (a) Image des périkymaties, (b) profil 3D de la zone sélectionnée dans (a), (c) profil du segment sur la figure(b).

Le travail que nous allons décrire dans ce qui suit découle d'un constat simple. Pour observer les périkymaties, les anthropologues orientent les dents sous un angle d'incidence de la lumière favorable à leur observation. Il nous reste donc à imaginer une méthode pour la mise en évidence d'une texture de quelques microns sur une dent. Rappelons que l'émail de la dent est une surface spéculaire présentant une grande diffusion dans le spectre du visible.

2.1 Position du problème

Comme nous le voyons sur la figure (2.1), la profilométrie optique permet la mesure du relief $3D$ des périkymaties. Elle ne peut cependant constituer une méthode de mesure adaptée. En effet elle présente les inconvénients suivants :

1. difficultés de la mesure des profils $3D$ à cause de la diffusion de la lumière par la dent.
2. temps de mesure très grand (3 à 4 heures pour l'ensemble de la dent).
3. coût très élevé.

Notre démarche est de concevoir un outil permettant la mesure des périkymaties dans des conditions acceptables pour les utilisateurs :

- système portable,
- simple d'utilisation,
- temps de mesure pour une dent ne dépassant pas les dix minutes.
- bas coût.

Avant d'aborder l'architecture que nous avons retenu pour un système répondant à ces critères, nous allons rappeler les aspects optiques du comportement des surfaces et de leur apparence en fonction de la lumière, nous aborderons en-

suite les éléments que nous avons retenus pour concevoir un tel système. Nous justifierons alors nos choix et nous aborderons enfin les résultats obtenus.

2.2 Réflectance et texture des surfaces

2.2.1 Réflexion de lumière

La lumière se propage selon une droite dans l'espace et interagit avec son environnement. Elle est modifiée par les éléments qu'elle rencontre selon les propriétés physiques des matériaux. Elle interagit directement avec la nature de leur surface et de leur état (de surface). Deux grandeurs permettent alors d'exprimer la manière dont la lumière est réfléchie par une surface: la réflectance bidirectionnelle et la fonction bidirectionnelle de la texture (*Bidirectional Texture Function*) BTF. Rappelons que l'apparence d'un objet dépend de l'angle d'observation, de l'angle d'illumination et de l'échelle à laquelle la surface est observée.

Pour la réflectance bidirectionnelle, l'énergie réfléchie dépend à la fois de l'angle d'incidence, de l'énergie émise et de l'angle de réflexion considéré. Elle est décrite par la Fonction de réflectance bidirectionnelle (ou BRDF en anglais, *Bidirectionnal Réflexion Distribution Function*). Cette fonction représente l'énergie reçue en fonction de l'angle d'incidence et dépend des caractéristiques physiques et géométriques du matériau considéré. Elle représente le rapport entre la luminance réfléchie et l'éclairement incident :

$$f_r(x, \overrightarrow{w_i}, \overrightarrow{w_r}) = \frac{L_r(x, \overrightarrow{w_r})}{L_i(x, \overrightarrow{w_i}) \cos(\theta_i)} \tag{2.1}$$

avec $L_i(x, \overrightarrow{w_i})$ la luminance incidente dans la direction $\overrightarrow{w_i}$ au point x, $L_r(x, \overrightarrow{w_r})$ la luminance réfléchie dans la direction $\overrightarrow{w_r}$ et θ_i (fig.2.2)

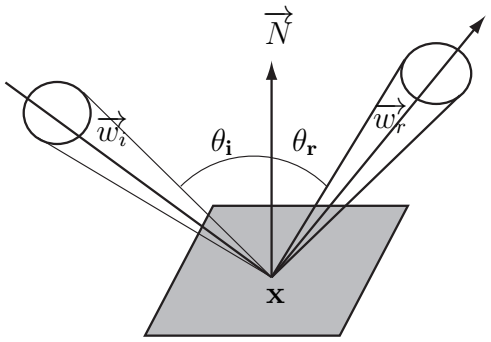


FIGURE 2.2 – Géométrie de la fonction de réflectance bidirectionnelle.

Plus généralement cette fonction varie aussi avec la longueur d'onde λ de la lumière Incidente. La réflectance d'un matériau est quant à elle définie comme le rapport entre sa radiosité et son éclairement.

$$\rho(\lambda) = \frac{\text{radiosité}}{\text{éclairement}}, \text{ avec } \rho(\lambda) \in [0, 1] \tag{2.2}$$

Elle permet de caractériser globalement le comportement photométrique du matériau. Trois modélisations principales de la réflexion de la lumière ont été développées. Ce sont des modèles locaux qui traitent simplement l'illumination directe:

Réflexion diffuse ou Lambertienne

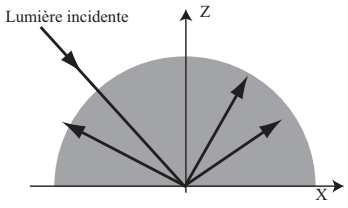


FIGURE 2.3 – Réflexion diffuse.

Cette réflexion est uniforme dans toutes les directions. Elle est due aux rugosités microscopiques présentes à la surface du matériau. Un observateur voit une surface diffuse ou Lambertienne de la même façon quelle que soit sa position dans l'espa-ce [40]. La fonction de réflectance bidirectionnelle est donc indépendante de la direction de réflection et se résume à un simple coefficient de diffusion k_d (fig.2.3). La luminance s'écrit alors:

$$I = f_{att} k_d I_d \cos(\theta_i) \tag{2.3}$$

avec I_d l'intensité de la source ponctuelle, θ_i l'angle d'incidence de la lumière et k_d le coefficient de réflexivité diffuse du matériau. f_{att} est un facteur d'atténuation qui dépend de la distance de la source à la scène. Il est souvent modélisé par $\frac{1}{d^2}$, d est la distance de la source à la scène. Plus les rayons incidents seront proches de la normale à la surface et plus importante est la réflexion. Une surface Lambertienne est donc une surface qui réfléchit d'une manière égale l'intensité dans toutes les directions [41].

Réflexion spéculaire

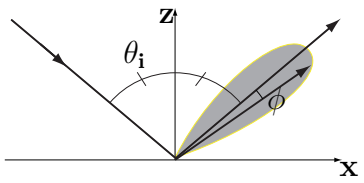


FIGURE 2.4 – Réflexion spéculaire.

Elle correspond à la réflexion des matériaux très brillants et des miroirs. La réflexion est centrée autour de la direction de réflexion spéculaire pure (fig.2.4). La luminance s'écrit:

$$I = f_{att} k_s I_s \cos(\theta_i) \cos(\phi^n) \tag{2.4}$$

Où I_s est l'intensité de la source ponctuelle, θ_i l'angle d'incidence, k_s le coefficient de réflectivité diffuse du matériau et ϕ^n l'angle entre la direction d'observation et celle du rayon réfléchi idéal. Le coefficient n sert à caractériser la surface: plus n est grand plus la surface est brillante. Comme pour la réflexion diffuse, f_{att} est un facteur d'atténuation qui dépend de la distance de la source à la scène.
Le cas particulier de la réflexion spéculaire pure apparaît dans le cas des miroirs parfaits. L'énergie incidente n'est réfléchie que dans une seule direction symétrique par rapport à la normale à la surface au point d'incidence. La proportion d'énergie réfléchie est alors donnée par un coefficient de réflexion spéculaire.

Réflexion mixte

C'est un mélange des deux réflexions diffuses et spéculaires (fig.2.5). Cette réflexion est proche de la réalité. Avec les mêmes notations que les réflexions spéculaire et Lambertienne. Cette réflexion s'écrit :

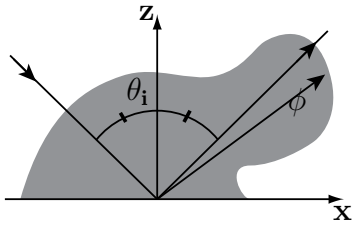


FIGURE 2.5 – Réflexion mixte.

$$I = f_{att}(k_d I_d \cos(\theta_i) + k_s I_s \cos(\theta_i) \cos(\phi^n)) \qquad (2.5)$$

Trois coefficients k_d, k_s et n sont alors nécessaires pour modéliser le matériau. D'autres modélisations existent aussi devant l'étendue des différents matériaux naturels ou artificiels existants. Les matériaux transparents ou semi-transparents possèdent par exemple des caractéristiques telles que la lumière se transmet en partie à l'intérieur du matériau. Le rayon lumineux subit alors, en plus des réflexions diffuses et spéculaires, une réfraction diffuse difficile à modéliser et une réfraction spéculaire modélisée grâce au calcul de l'angle de réfraction en utilisant les indices de réfraction des deux milieux. En résume, la BRDF peut être approximée par deux composantes: la première relative à la quantité de lumière diffuse, la seconde correspond à la valeur spéculaire qui dépendent de l'angle d'incidence (fig.2.6).

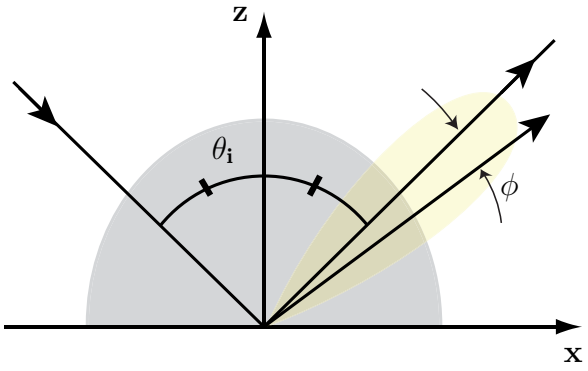


FIGURE 2.6 – BRDF à deux composantes, une diffuse et une spéculaire.

Cette décomposition a été très utilisée jusqu'à l'heure actuelle car elle permet de modéliser un grand nombre de matériaux à peu de frais. La classe de matériaux simulables est par contre très synthétique, et il faut recourir à des artifices pour éliminer ce phénomène.

BRDF quelconque

La BRDF peut être très complexe quand la micro géométrie au niveau de la surface est compliquée. Un tissu de velours composé d'une multitude de petites fibres sera diffus en le regardant de face, alors que pour certains angles de vue, il aura une composante spéculaire non négligeable. Dans ce cas, l'approximation en 2 composantes est insuffisante, il faut utiliser d'autres méthodes plus précises. Certaines auteurs ont calculé systématiquement les tables de la fonction

bidirectionnelle par simulation [42,43] tandis que certains autres ont procédé expérimentalement [44–46]. Une nouvelle approche utilise une modélisation à six dimensions de la fonction de réflectance. Elle peut être, d'une certaine manière, considérée comme une généralisation directe du placage de la texture et de la perturbation des normales. Cette modélisation est une sorte de texture de BRDF, les auteurs l'ont nommée *Bidirectional Texture Function* (BTF) [47]. Le coût mémoire est d'autant plus exorbitant, et il reste de nombreux problèmes notamment dus au lissage des textures, mais les résultats sont très proches de la réalité et encourageants. Les BTF permettent d'intégrer l'introduction de défauts divers, tels que la porosité, les rayures et la corrosion, ces défauts ayant des conséquences importantes sur l'aspect visuel d'une surface.

Comme nous l'avons souligné plus haut l'étude de la réflectance d'une surface est intiment liée à l'illumination, nous allons dans ce qui suit rappeler les modèles les plus importants relatifs à l'illumination.

2.2.2 Les modèles d'illumination

Pour décrire une solution approchée de l'illumination d'une scène, le modèle d'illumination doit comprendre tout le processus de transport de la lumière: son émission, sa réflexion, sa réfraction, et sa diffusion ou son absorption. Deux types de modèles existent: les modèles d'illumination locale qui ne considèrent que la contribution directe des sources de lumière et les modèles d'illumination globale qui comprennent en plus la lumière inter-réfléchie entre les différentes surfaces de la scène. Dans ce processus, un modèle de réflexion se concentre sur la lumière qui atteint une surface et sur la lumière qui est réfléchie. Plusieurs modèles d'illumination locale et d'illumination globale ont été proposés ces dernières années et cette panoplie permet de choisir un modèle adapté aux besoins, que ce soit en synthèse ou en analyse d'image. Ces modèles restent pour la plupart empiriques mais approchent raisonnablement les comportement photométriques des matériaux.

- **Le modèle ambiant**: Le modèle local le plus simple considère que la scène est plongée dans une lumière constante. La luminance d'un élément de la scène vaut alors:

$$I = k_a I_a, \tag{2.6}$$

  avec $k_a \in [0,1]$ le paramètre de rémission de la lumière ambiante et I_a l'intensité ambiante.
  Ce modèle local, comme tous les autres que nous verrons, ne considère pas explicitement la couleur: Un système de trois équations est alors nécessaire pour obtenir un modèle prenant en compte la couleur, toutes les variables et tous les paramètres deviennent donc des triplets dans ce cas. Cette loi simule donc de manière très approximative les inter-réflexions multiples entre tous les éléments d'une scène. La lumière est la même dans toutes les directions et les éclairages sont considérés comme uniformes.
- **Le modèle Lambertien** : Cette loi empirique pour la diffusion, basée sur l'observation, a été découverte par Lambert en 1760 [48]. Elle ne considère que des fonctions de réflexions bidirectionnelles purement diffuses. C'est

un modèle local et la luminance d'un élément de la scène s'écrit:

$$I = k_d \sum_{i=1}^{m} I_i < \overrightarrow{N}, \overrightarrow{L_i} >, \tag{2.7}$$

avec $k_d \in [0, 1]$ le coefficient de diffusion du matériau, $\overrightarrow{N}$ la normale à la surface et $\overrightarrow{L_i}$ la direction d'illumination de la source i d'intensité I_i. La réflexion est égale dans toutes les directions et plus la direction d'illumination est proche de la normale à la surface, plus la surface est éclairée.

☞ **Le modèle de Phong**: Le modèle de Phong considère en plus du modèle précédent la réflexion spéculaire [49]. C'est aussi un modèle local qui permet notamment de modéliser les reflets à la surface des objets.

$$I = k_d \sum_{i=1}^{m} I_i < \overrightarrow{N}, \overrightarrow{L_i} > + k_s \sum_{i=1}^{m} I_i < \overrightarrow{V}, \overrightarrow{L_i'} >^n \tag{2.8}$$

avec les mêmes notations que pour le modèle de Lambertien et k_s la spécularité intrinsèque du matériau, $L_i^{'}$ la direction symétrique de L_i par rapport à la normale à la surface $\overrightarrow{N}$ et $\overrightarrow{V}$ la direction d'observation, n est un facteur servant à caractériser la spécularité de la surface. Plus n est grand et plus la surface sera brillante.

2.2.3 Estimation de la direction d'illumination

Une source lumineuse est modélisée par des paramètres géométriques (localisation, forme et taille de la source, direction des rayons) et des paramètres lumineux (intensité de la source et distribution spectrale). L'estimation du paramètre géométrique principal, la localisation de la source, s'avère être un paramètre fondamental dans l'étude des conditions d'illumination d'une scène [50].

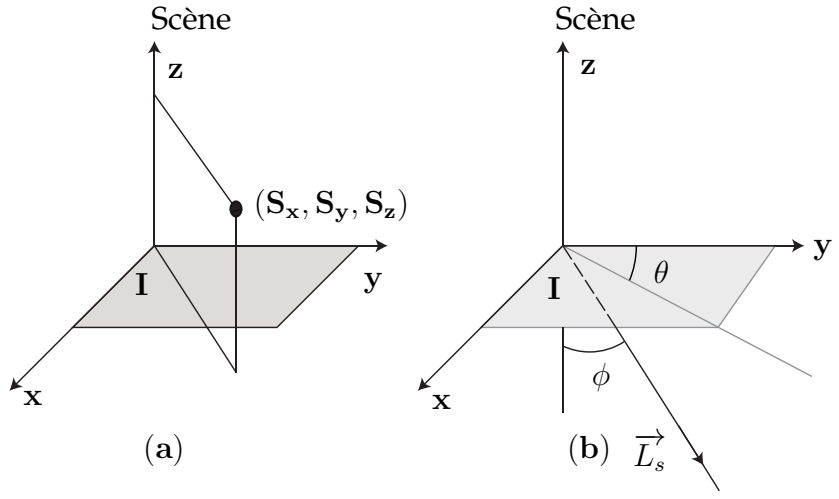


FIGURE 2.7 – Paramètres geométriques d'une source de lumière. (a) source ponctuelle suffisamment près de la scène, (b) source placée à l'infini.

Dans le cas d'une source ponctuelle suffisamment proche de la scène, la géométrie de la source est modélisée par trois paramètres S_x, S_y et S_z (fig.2.7(a)) qui

sont ses coordonnées dans le repère orthonormé. Les axes x et y sont portés par le plan image, l'axe z indique la direction de la scène. L'intensité d'un rayon décroît avec le carré de la distance entre la scène et la source. Tous les rayons sont émis dans toutes les directions à partir de la source. Si la source est placée à l'infini (fig.2.7(b)) ou suffisamment loin, la direction d'illumination $\overrightarrow{L_s}$ est supposée constante dans toute la scène. Elle est modélisée dans ce cas, dans le même repère, par deux angles θ et ϕ et elle s'écrit:

$$\overrightarrow{L_s} = (\cos\theta \sin\phi, \sin\theta \sin\phi, \cos\phi)^T \tag{2.9}$$

L'intensité est supposée constante pour toute la scène et tous les rayons sont parallèles. θ représente l'angle de cette direction dans le plan image, alors que ϕ représente l'angle par rapport à ce même plan.
Afin de simplifier autant que possible ce problème très complexe pour l'estimation des paramètres géométriques de la source lumineuse dans une ou plusieurs images, est de considérer une source de lumière unique, fixe et suffisamment loin de la scène pour qu'elle puisse être considérée comme à l'infini en présence d'objets Lambertiens [51–53]. L'éclairage est donc directionnel et l'estimation se résume alors à trouver les deux angles θ et ϕ.

En considérant l'hypothèse supplémentaire d'une projection orthographique [51–53] , avec l'axe z parallèle à l'axe optique de la caméra, l'équation d'éclairement de l'image donne la luminance d'un point $(x, y)^T$ de l'image:

$$I(x, y) = R(p, q), \tag{2.10}$$

avec R la fonction de réflectance qui donne la luminance de la scène en fonction du gradient de la surface (p, q), en notant $p = \frac{\partial z}{\partial x}$ et $q = \frac{\partial z}{\partial y}$.

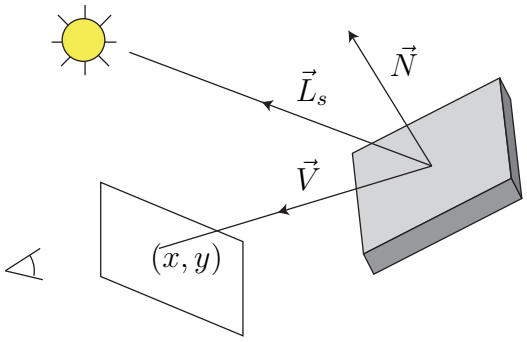


FIGURE 2.8 – Variables utilisées dans l'illumination d'une surface.

En utilisant le modèle Lambertien l'équation s'écrit alors:

$$I(x, y) = K_a I_a + K_d I_d < \vec{N}, \overrightarrow{L_s} > \text{ avec } \vec{N} = \frac{1}{\sqrt{1 + p^2 + q^2}}(-p, -q, 1)^T \tag{2.11}$$

$\vec{N}$ est le vecteur unitaire normal à la surface au point $(x, y, z)^T$ et $\overrightarrow{L_s}$ le vecteur unitaire de la direction d'illumination (fig.2.8). $I(x, y)$ conformément au modèle Lambertien ne dépend pas des coordonnées du point, mais uniquement de la

normale $\overrightarrow{N}$ à la surface de ce point, de la direction d'illumination $\overrightarrow{L_s}$, des caractéristiques photométriques de la surface de l'objet considéré et aussi des caractéristiques de l'observateur. Il vient alors:

$$I(x,y) = K_a I_a + K_d I_d \frac{\cos\phi - p\cos\theta\sin\phi - q\sin\theta\sin\phi}{\sqrt{1+p^2+q^2}} \tag{2.12}$$

L'estimation de la direction d'illumination consiste à déterminer les paramètres θ et ϕ souvent appelés dans la littérature *tilt* et *slant*, à partir des valeurs de I en tout point de l'image. La difficulté du problème provient du fait que le relief de la surface visible est souvent inconnu. Donc pour chaque valeur mesurée $I(x,y)$ de l'image, deux inconnues p et q s'ajoutent. En notant nbl et nbc le nombre de lignes et de colonnes, nous avons donc $nbl * nbc$ équations pour $2 * nbl * nbc + 4$ inconnues. Ce problème est donc mal posé [54] et d'autres hypothèses simplificatrices doivent donc être introduites afin de résoudre ce système sous dimensionné. Pentland en 1982 [55] a été un des premiers à s'intéresser à ce problème. Il a travaillé sur des images en niveaux de gris et il a retenu pour ses travaux un objet unique de forme lisse, dont la surface parfaitement diffuse et dont les normales à la surface sont uniformément distribuées. La source étant supposée à l'infini, ces deux angles sont alors estimés par la méthode du maximum de vraisemblance et comparés par rapport aux résultats obtenus par des observateurs. Son hypothèse est très réductrice, et même dans le cas d'une sphère parfaite, la distribution de la normale n'est pas uniforme. Il néglige aussi la lumière ambiante et suppose des objets uniformément colorés. De plus Chojnacki et all. [56] ont montré récemment que son calcul de la direction est systématiquement éronnée et dépend de la résolution de l'image. Ils proposent alors une méthode de calcul correcte, basée sur les mêmes hypothèses. Plusieurs méthodes directement issues de la formalisation de Pentland ont alors été proposées durant les années suivantes.

2.2.4 Les ombres

Une ombre est une conséquence particulière de l'illumination dans une scène. Ils font partie intégrante de notre environnement et sont présentes dans beaucoup de scènes naturelles, dés qu'une source de lumière est prédominante par rapport à la lumière ambiante. Elles sont le résultat d'une interaction entre une composante géométrique et une composante photométrique.
Les ombres sont naturellement présentes dans la très grande majorité des scènes, mais comme elles sont mal maîtrisées, tant au point de vue de leur rendu dans la scène qu'au niveau de leur traitement ultérieur, elles sont souvent considérées comme des éléments perturbateurs lors des prises de vues. Elles possèdent en effet un caractère imprévisible pouvant altérer l'esthétique d'une scène. Les différents éclairages sont alors souvent organisés de manière à minimiser le plus possible les ombres dans les images. Ils constituent une difficulté à contourner dans un très grand nombre d'applications de traitement et d'analyse automatiques d'images. Mais elles contiennent aussi en réalité un grand nombre d'informations sur la scène. **Elles permettent notamment à l'œil une meilleure compréhension des scènes, par l'évaluation des profondeurs relatives**. En peinture par exemple, les ombres sont assimilées à des couleurs obscures employées dans un

tableau pour représenter les parties des objets les moins éclairées et qui servent à donner du relief aux autres. Nous verrons que cette aspect va contribuer à l'observation **des périkymaties des dents**.

2.2.5 Distribution de la fonction de la réflectance bidirectionnel

La reflectance est la fonction qui permet de caractériser l'apparence visuelle d'une surface [57] [58]. Trois phénomènes peuvent perturber le résultat d'image : la lumière ambiante, les ombres et de la réflexion spéculaires. L'apparence visuelle d'une surface dépend de:

- l'éclairage,
- l'échelle à laquelle la texture est observée.

A l'échelle macroscopique, où l'intensité des variations de surface locales sont subpixel et l'intensité locales est uniforme, l'apparence est caractérisée par la BRDF (fonction de réflectance bidirectionnelle de distribution). À l'échelle microscopique, où les variations de la surface donnent lieu à des variations d'intensité locale, l'apparence peut être caractérisée par le BTF (fonction de texture bidirectionnelle). Comme une analogie directe avec le BRDF, la BTF a été introduite pour décrire l'apparence de la texture en fonction de l'éclairage et de la direction de la caméra. Plus précisément, le BTF est une image de texture paramétrée par l'éclairage et les angles d'observation. Cette idée est illustrée à la (fig.2.9) :

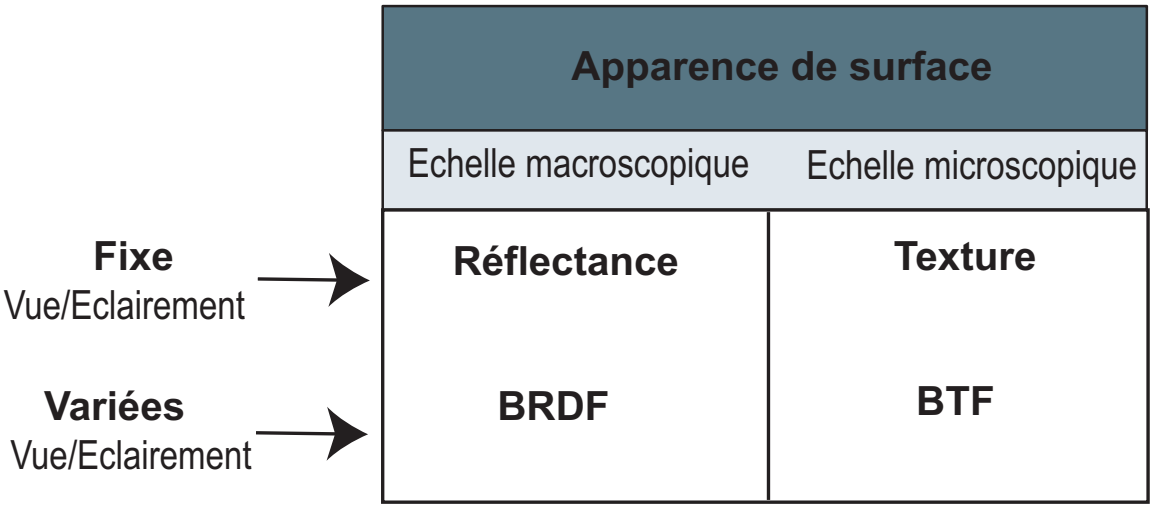


FIGURE 2.9 – L'apparence visuelle d'une surface d'après [47].

L'étude de l'influence de la texture sur la visualisation et les orientations de l'éclairement est relativement nouveau dans la recherche de texture il a fait l'objet de plusieurs études [59–64]. D'autres auteurs [63–65] ont pris en compte l'influence de la géométrie de la surface sur la texture. La dispersion optique est considérée comme une source de bruit qui limite la résolution du système et le

débit [66]. Cette aspect est relativement important à considérer dans l'objet de notre étude. En effet, la surface présente une texture très fine (quelques microns : les stries ou les périkymaties et l'usure), elle présente une composante spéculaire très importante accompagnée d'une grande diffusion.

2.2.6 Mesures de la texture

La fonction de texture bidirectionnelle BTF

La texture de l'image, nécessite deux paramètres: les directions d'illumination et les position de la caméra. La BRDF décrit l'apparence à l'échelle macroscopique d'une surface rugueuse tandis que la BTF (bidirectionnel fonction de la texture) est utile pour décrire l'apparence à l'échelle microscopique d'une surface rugueuse. Le principe d'une fonction bidirectionnelle de texture (BTF) est d'associer une image de l'objet à chaque couple : direction d'observation et direction de l'illumina-tion, tout comme la BRDF associe une couleur à un couple de directions de vue et de lumière. Si nous considérons n directions d'observation, et pour chacune de ces directions nous associons m directions de la source(fig.2.10). À chacun de ces couples (directions de vue, directions de lumière), nous associons une image de l'objet.

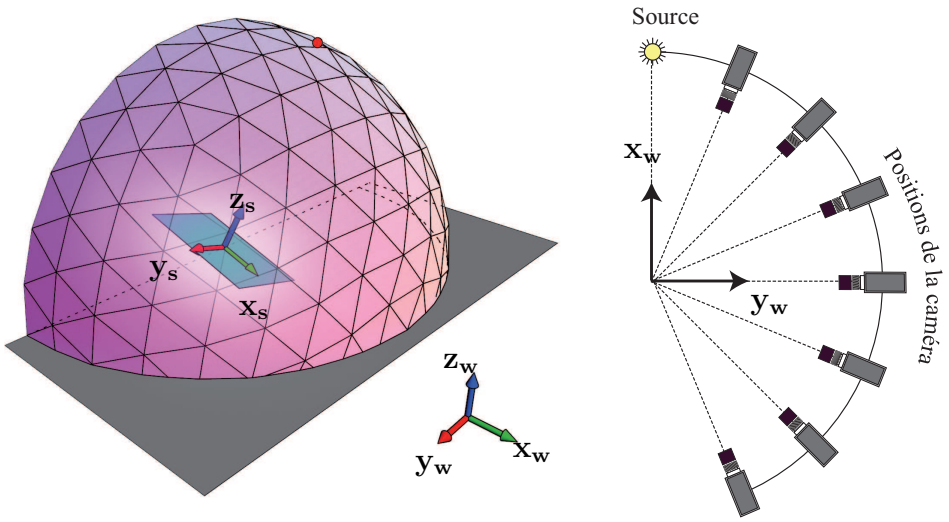


FIGURE 2.10 – Mesure de la texture : Orientation de l'échantillon et positions de la caméra, d'après [47].

Nous choisissons les directions de vue et de la lumière autour de l'hémisphère de manière régulière. Pour cela nous utilisons un schéma de discrétisation récursif basé sur une subdivision des triangles équilatéraux. Nous partons d'une sphère discrétisée régulièrement par six points formant huit triangles équilatéraux. Ensuite, nous divisons chacun de ces triangles en quatre nouveaux triangles en prenant le milieu de chaque segment, que nous re-projetons sur la sphère. Nous obtenons la discrétisation suivante en nombre de sommets et donc en nombre de directions de vue ou de lumière : 6, 18, 66, 257, etc (fig.2.10). Ce schéma à l'avantage d'être simple et régulier. Pour la construction des directions de vue et de lumière de la BTF il est possible d'utiliser n'importe quels autres

schémas de discrétisation. En particulier nous pourrions regrouper l'échantillonnage des directions de vue et des directions de lumière et ainsi effectuer l'échantillonnage dans un espace 4D (en représentant les directions par leurs coordonnées polaires, nous aurions 2D pour les directions de vue et 2D pour les directions de lumière). Cette technique est classiquement utilisée pour la construction de la BRDF.

La nécessité de faire varier la position de la caméra et l'orientation de la source sur tout l'hémisphère pour obtenir la texture de l'objet n'est toujours pas possible en pratique. K.J. Dana [47] a démontré que cette difficulté peut être contournée en fixant la direction de la source et en faisant varier l'angle d'observation (7 positions de la caméra suffisent). Comme l'illustre la figure (fig.2.10), la source de la lumière reste fixe pendant toute les mesures. Les rayons lumineux incidents sur l'échantillon sont sensiblement parallèles et éclairent uniformément l'échantillon (la source est supposée à l'infini par rapport à l'échantillon). La caméra CCD mobile pouvant se déplacer selon l'axe Z sous un angle donnée. Pour chaque position de la caméra, l'échantillon est orientée de façon que sa normale est dirigée vers l'axe optique de la caméra (l'angle de la caméra, la source de la lumière et la normale de l'échantillon se situent alors dans le même plan). Pour chaque position de la caméra, un point spéculaire (au moins) est inclus dans notre champ d'observation où la normale de l'échantillon qui est alignée avec la bissectrice de l'angle que fait la caméra par rapport à la direction de la source de la lumière. **L'orientations de l'échantillon avec des angles de la caméra ou l'angle de la lumière est supérieure à 85° sont exclus de ces mesures pour éviter l'occlusion et l'ombrage**. Les sommets de l'hémisphère correspondent aux directions de la normale de la surface de l'échantillon (Z_s). (Z_s) est alignée avec la normale de l'échantillon, (x_s) et (y_s) sont alignées avec les bords horizontaux et verticaux de l'échantillon. Les coordonnés (x_w, y_w, z_w) sont fixés (repère du monde).

2.3 Les choix retenus pour la mesure des périkymaties

Le principe de la mesure est basé sur la détection de la composante spéculaire de la lumière. Cette contrainte implique que la source de la lumière doit être placée à l'angle opposé de la caméra par rapport à la normale de la surface mesurée, comme nous venons de l'évoquer dans le paragraphe précédent. Nous avons utilisé le principe de la BRDF: basé sur la distribution de Dirac ou le principe de La fonction de texture bidirectionnelle (BTF) (fig.2.11).
Distribution de Dirac normalisée δ

$$\rho_{bd}(\theta_0, \varphi_0, \theta, \varphi) = \rho_s 2\delta(\sin^2\theta_0 - \sin^2\theta)\delta(\varphi_0 - \varphi \pm \Pi) \tag{2.13}$$

ρ_s s'appelle la réflectance spéculaire.

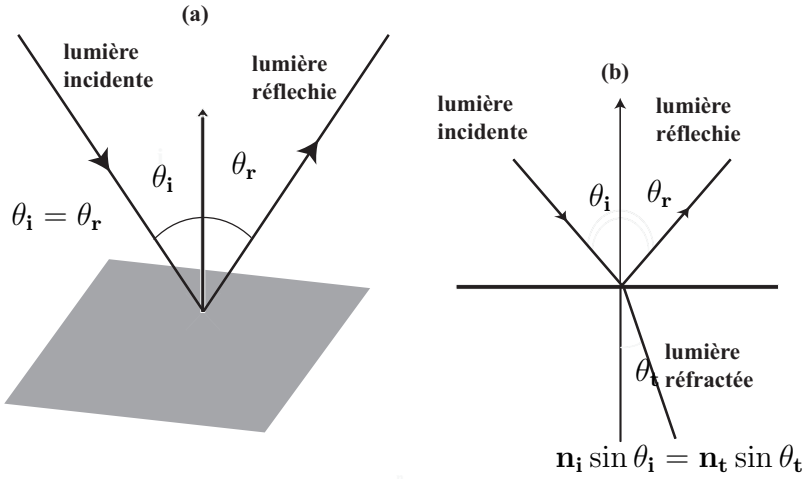


FIGURE 2.11 – (a) Réflexion spéculaire et (b) Loi de Snell-Descartes.

En théorie, cette configuration nous permettra donc d'enregistrer les images de la texture de la dent. En réalité, le comportement optique de nos échantillons ne correspond pas au cas idéal. En effet, les dents présentent une grande diffusion dont une grande composante est due à la rétro-diffusion. Nous devons donc choisir une stratégie pour obtenir la texture des dents dans les meilleures conditions. Soulignons que l'image de la texture de la dent en elle même n'est pas notre préoccupation. C'est l'image des périkymaties (qui ne sont qu'une partie de cette texture) qui constitue l'information que nous recherchons. L'aspect très brillant de certaines dents rend nos mesures très complexes.

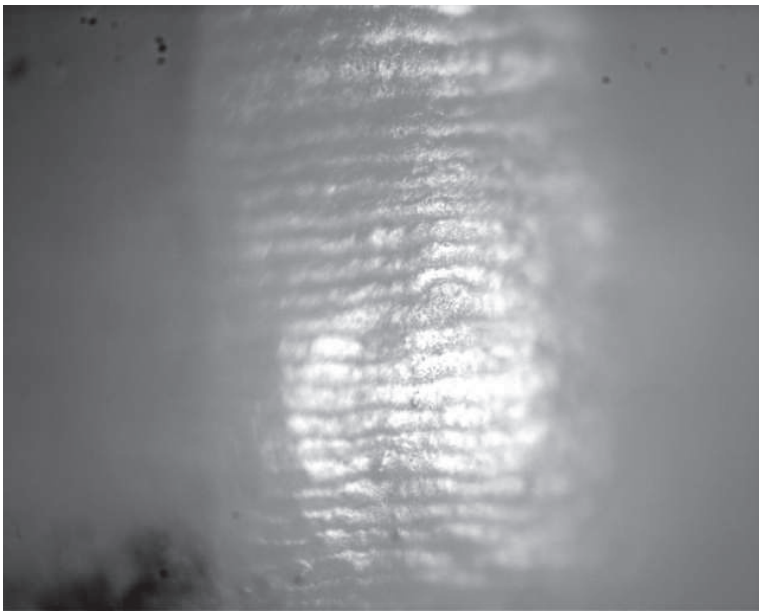


FIGURE 2.12 – Image des périkymaties d'une dent présentant l'aspect spéculaire.

2.4 Stratégie pour l'observation des périkymaties

Nous avons vu que trois phénomènes importants peuvent perturber les résultats déterminés à partir du modèle Lambertian de manière significative:

- la lumière ambiante,
- les ombres,
- les spéculaires.

Il existe deux types d'ombres comme le montre la figure (fig.2.13). L'ombre attaché (« *attached shadow* ») se produit lorsque la surface est loin de la source lumineuse (C'est le cas de nos mesures). L'ombre (« *cast shadow* ») se produit lorsque certains reliefs empêchent la lumière d'atteindre des zones de l'objet. Si nous éclairons de la surface de la dent à l'aide d'une source de lumière placée perpendiculairement à la surface de la dent explorée, un phénomène de réflection et de diffusion se produit. Nous assisterons alors à la diminution du contraste. Sous un angle d'éclairement différent pour faire apparaître des ombres, nous améliorerons alors le contraste de la zone observée.

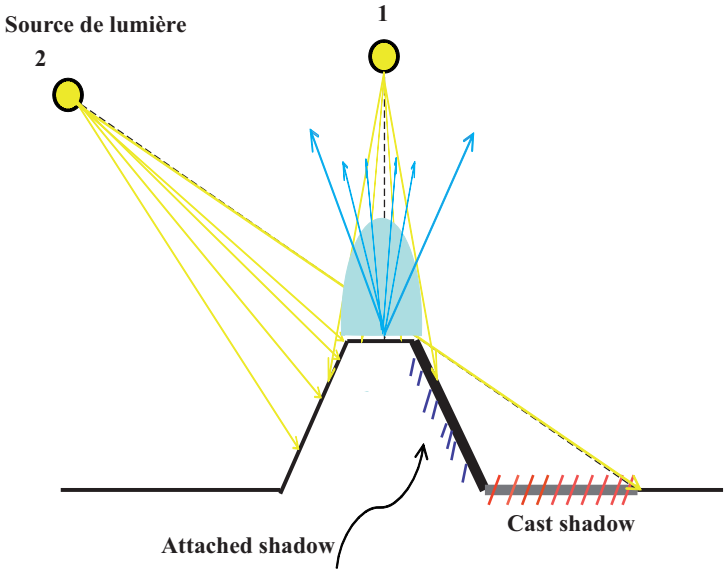


FIGURE 2.13 – Les phénomènes d'ombre.

En pratique, le principe de nos mesures est basé sur la détection de la composante spéculaire de la lumière. Cette contrainte implique que la source de la lumière doit être placée à l'angle opposé de la caméra par rapport à la normale de la surface mesurée (loi de Snell-Descarte) (fig.2.14). L'angle retenu étant celui qui engendre de l'ombre au niveau des périkymaties pour être dans les meilleures conditions d'observation du point de vue du contraste de l'image. **C'est la condition *sine qua non* pour mettre en évidence les stries ou périkymaties des dents**.

2.5 Première méthode

Pour la mesure des périkymaties de la dent, nous avons opté pour une méthode très simple pour la mesure de la texture. Elle consiste à fixer la caméra à

la perpendiculaire de l'axe longitudinale de la dent, et nous faisons parcourir la source de la lumière tous les angles se situant à la gauche de la caméra (fig.2.14). Le choix de l'angle de l'illumination est laissé à l'utilisateur, qui recherche manuellement l'angle pour lequel il voit apparaître les périkymaties. La caméra est solidaire d'un système de rotation commandée par l'utilisateur à travers une interface logicielle. Du point de vue texture et apparence, nous sommes dans le cas d'une BRDF à n angles d'illumination et m angles d'observation.

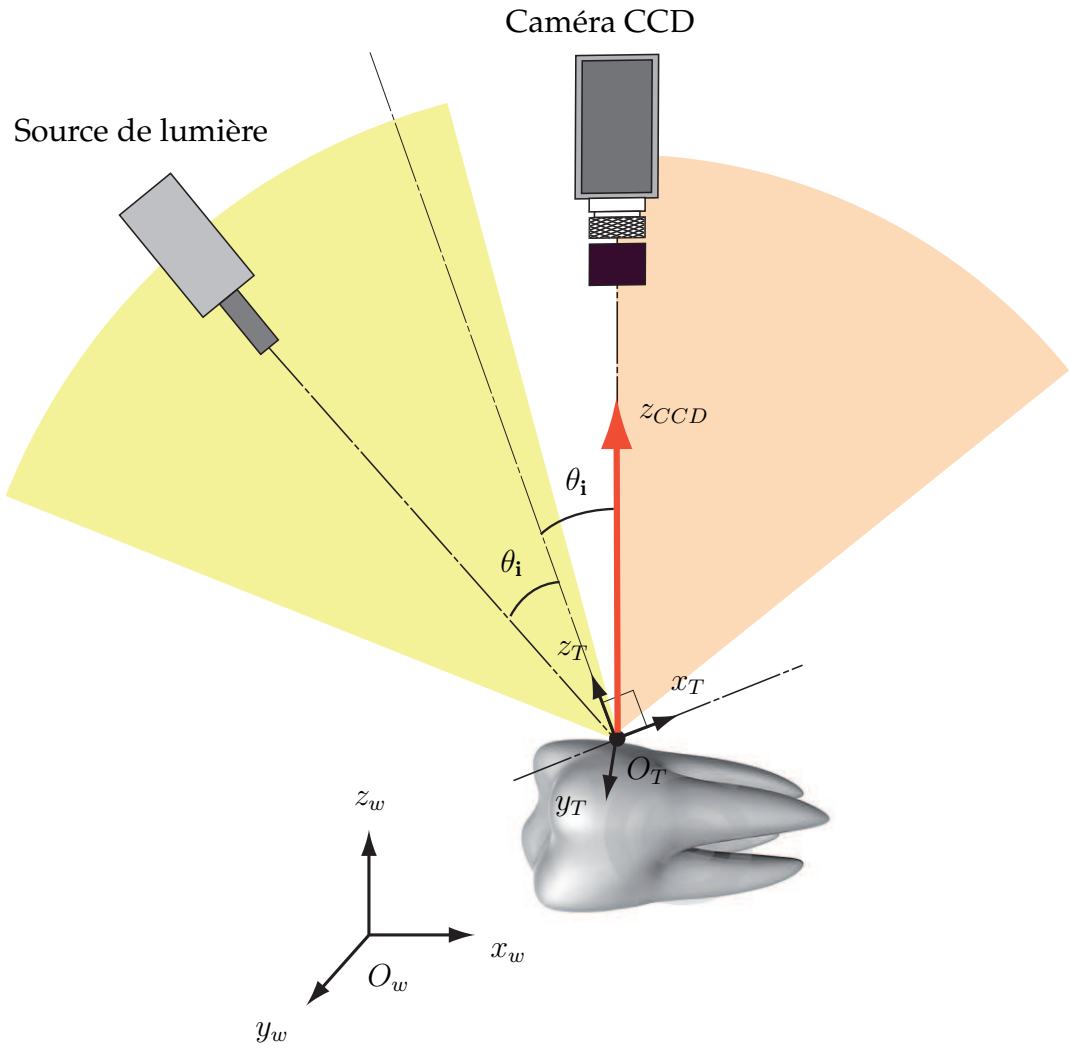


FIGURE 2.14 – Positionnement de la source de la lumière.

Ces deux degrés de liberté - la rotation de la caméra et de la source - confèrent au système une grande efficacité pour faire apparaître les stries ou des périkymaties. Rappelons que l'observation des stries nécessite un fort grossissement, c'est pourquoi nous avons conçu ce système en fixant le grossissement à $\times 10$ à l'aide d'un objectif de microscope présentant une longue distance de travail ($2.8cm$). Ce choix implique une :

- ✓ une faible profondeur de champ: $45\mu m$,
- ✓ un champ d'observation de l'ordre du $10^{\text{ème}}$ de la surface de la dent, soit $2.5 * 2mm^2$,
- ✓ une zone de netteté très faible $2 * 0.3mm^2$ (voir figure (2.15)).

Il se justifie par un champ d'observation acceptable. En effet, 10 mesures suffisent pour prendre les stries sur toute la surface de la dent. Un grossissement plus grand nous aurait obligé de prendre plus de mesures pour scanner toute la dent dans le plan (x_w, y_w).

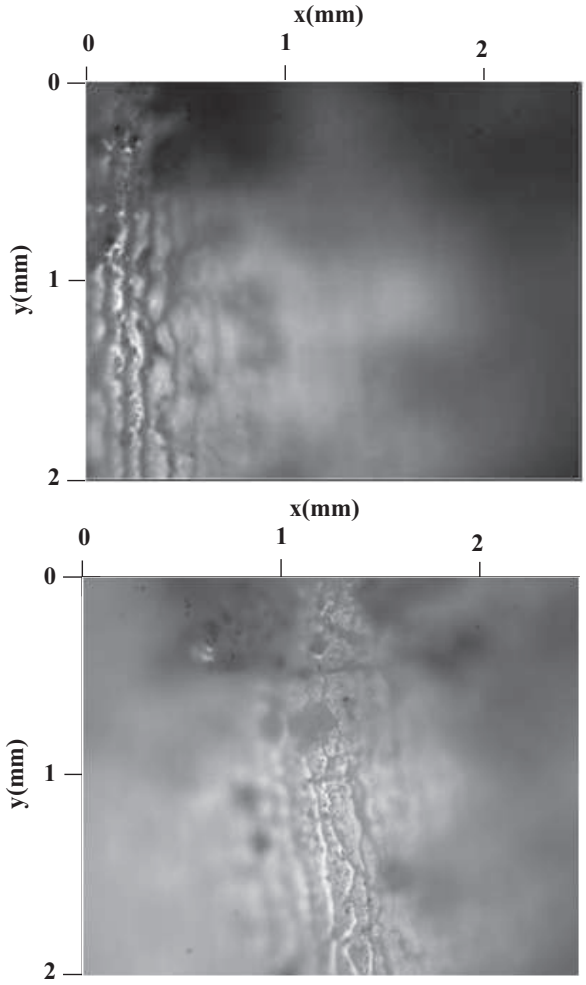


FIGURE 2.15 – Zone de netteté pour un angle d'illumination et pour deux positions différente (selon x_w) de la dent.

Pour un angle d'observation donné, la limitation en profondeur de champ nous impose un déplacement de la caméra dans la direction de Z_{CCD} (l'angle reste constant) lors de notre positionnement selon x_w pour scanner la surface de la dent. Ce déplacement est nécessaire à cause du relief local de la zone explorée d'une part, de la non planéité de la surface observée d'autre part.

2.5.1 Mise en œuvre de la première méthode

Pour effectuer une mesure nous devons donc inclure dans l'architecture de notre dispositif des systèmes de déplacement en x_w et y_w, nous avons opté pour des platines micrométriques motorisées. Une platine de rotation motorisée permet la rotation de la caméra de $-40°$ à $+40°$ par rapport à la normale de la surface de la région explorée de la dent.

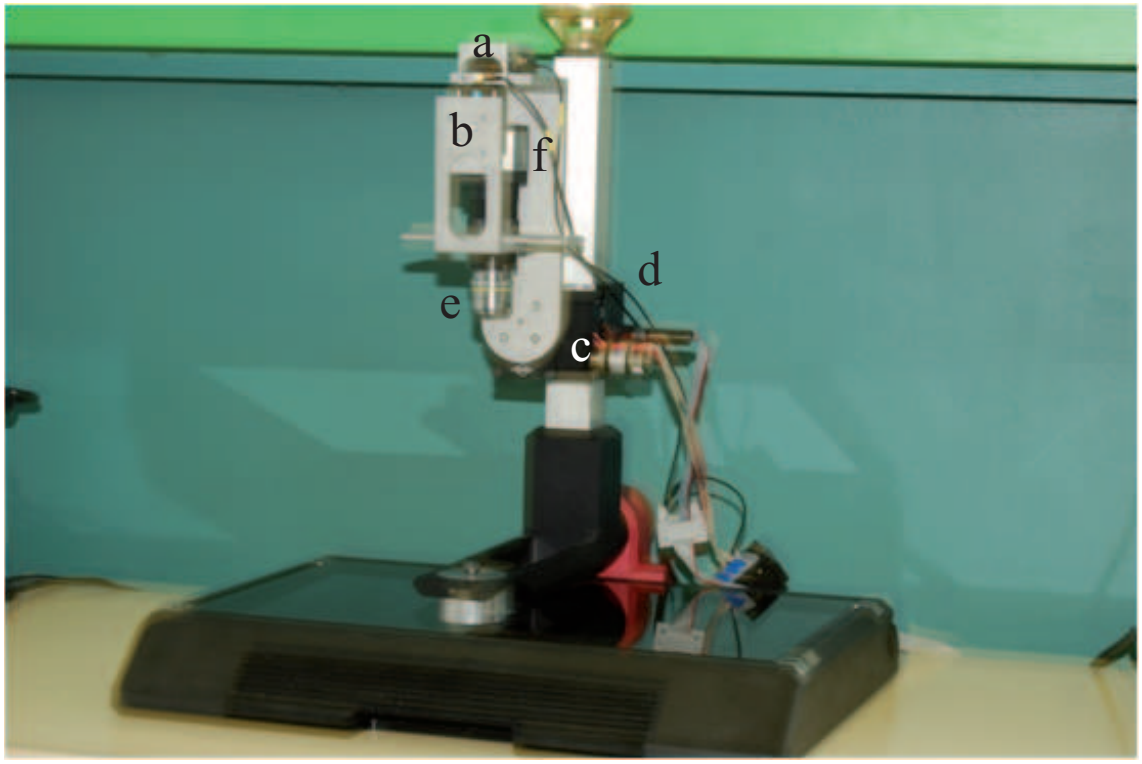
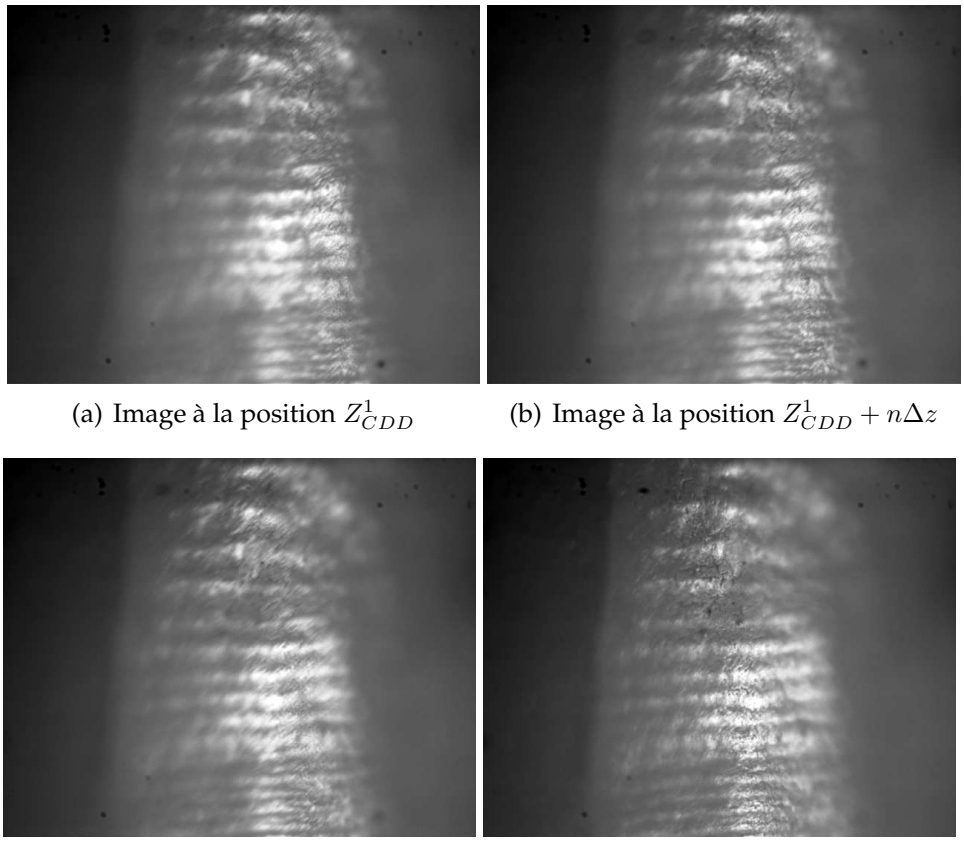


FIGURE 2.16 – Montage expérimental pour la mesure des stries ou des périkymaties de la dent: (a) moteurs de déplacement (x_w,y_w), (b) moteurs de déplacement (z_w), (c) moteur de rotation de la caméra CCD, (d) moteurs de déplacement (z_{CCD}), (e) un objectif de microscope $\times 10$, (f) une caméra CCD.

2.5.2 Principe de la méthode

Pour chaque zone de la région observée nous enregistrons N images à partir desquelles nous reconstituons l'image de la texture de la dent. Le nombre N dépend de la profondeur selon z_{CCD} de la zone considérée. Ce nombre peut être la centaine. Le déplacement de l'ensemble objectif-caméra est réalisé à l'aide d'un moteur micro-métrique, pour les N images, nous connaissons alors les $N-1$ déplacements réalisés. Pour chaque lot d'images relatif à une zone (voir figure 2.17, nous recherchons à l'aide d'un algorithme basé sur la méthode des « shaplets », que nous détaillerons dans la section 3.2.6, les partie nettes de l'image qui nous permettent de reconstituer l'image nette sur tout le champ d'observation (voir figure 2.5.2).



(a) Image à la position Z^1_{CDD} (b) Image à la position $Z^1_{CDD} + n\Delta z$

(c) Image à la position $Z^1_{CDD}+(n+k)\Delta z$ (d) Image à la position $Z^1_{CDD}+(n+j)\Delta z$

FIGURE 2.17 – Illustration de la méthode : enregistrement de N Images pour un angle d'observation donné.

Comme le montre la figure 2.5.2, lorsque nous nous contentons de reconstruire l'image composée à l'aide d'un petit nombre d'images, ici nous avons pris 11 images, l'image obtenue n'offre pas une image nette sur tout le champ d'observation. Ce résultat correspond à un déplacement de $220\mu m$ dans l'axe Z_{CDD}. En pratique une telle zone nécessite 120 images pour un meilleur résultat.

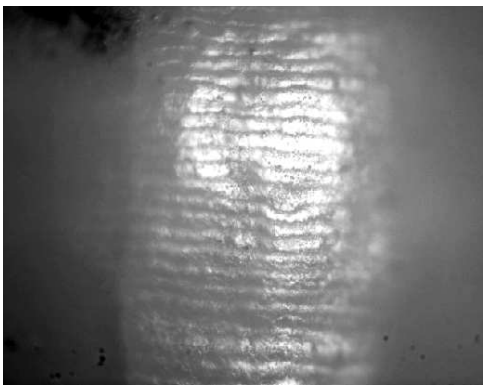


FIGURE 2.18 – Résultats de l'application de l'algorithme de « shaplet » sur 11 images.

Pour obtenir l'image des périkymaties sur toute la surface de la couronne de

la dent, nous effectuons l'enregistrement de N images en suivant la procédure indiquée sur la figure 2.19. Il faut noter que nous avons fixé le nombre d'images à 120 arbitrairement, ainsi la profondeur du relief exploré est de $120 * \Delta Z_{CCD}$.

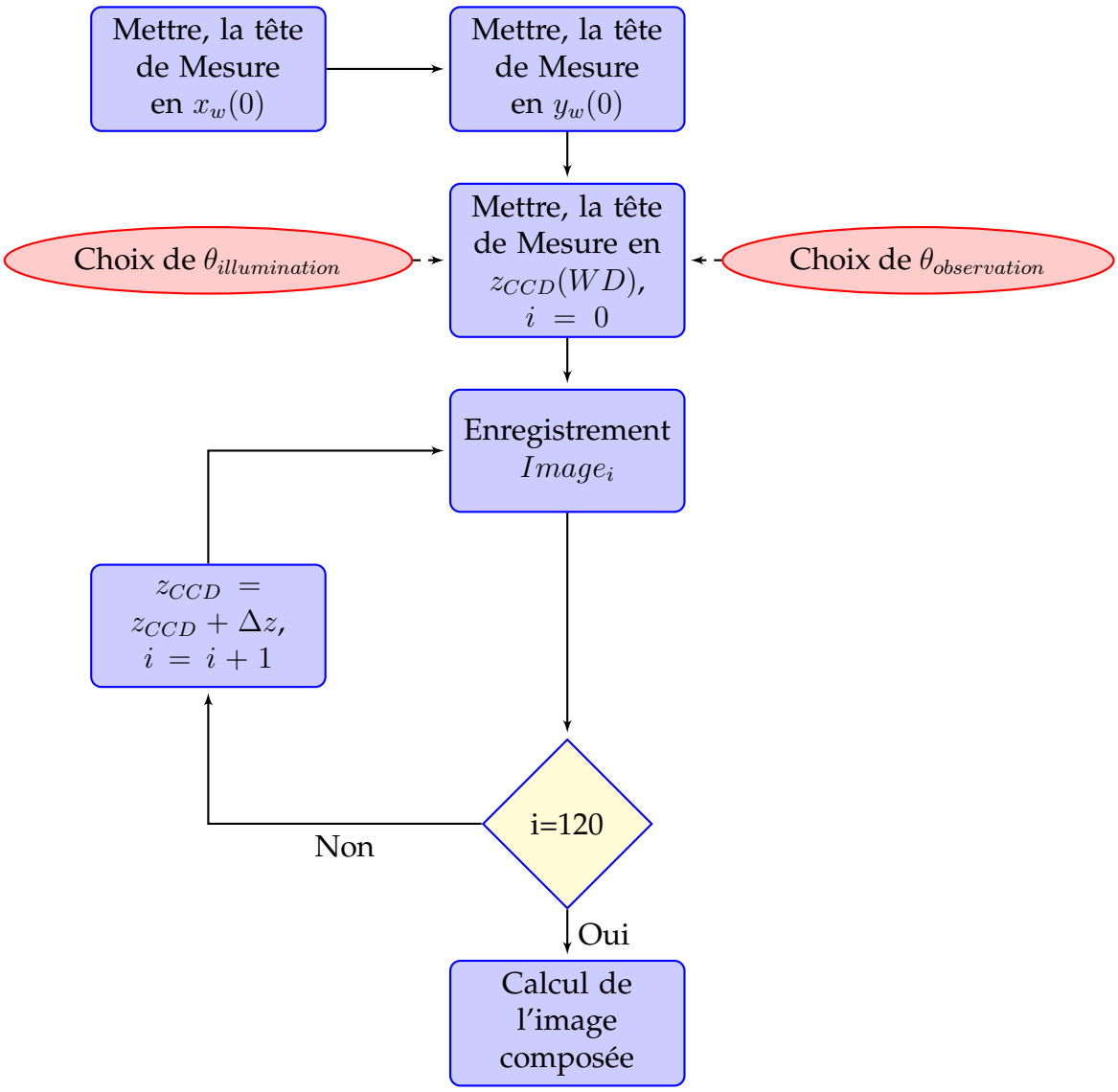
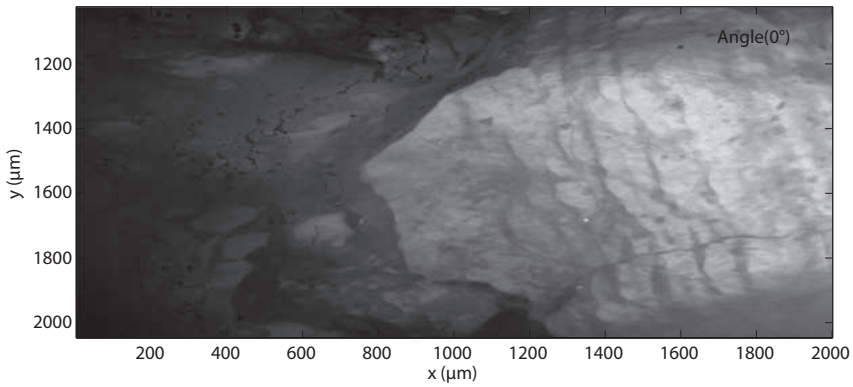
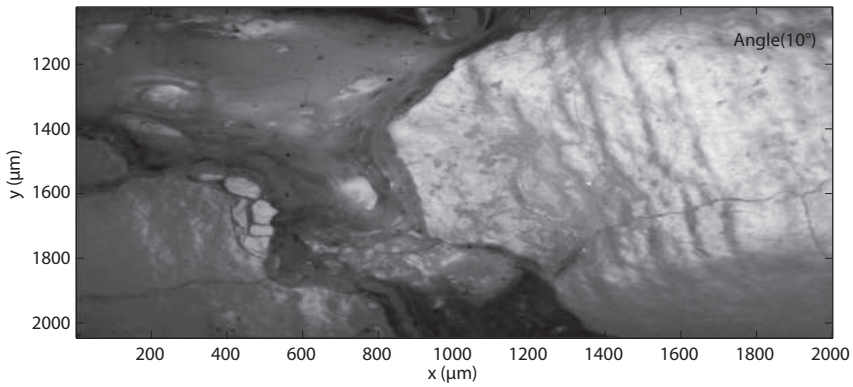


FIGURE 2.19 – Procédure de la mesure de la texture d'une zone de la couronne de la dent.

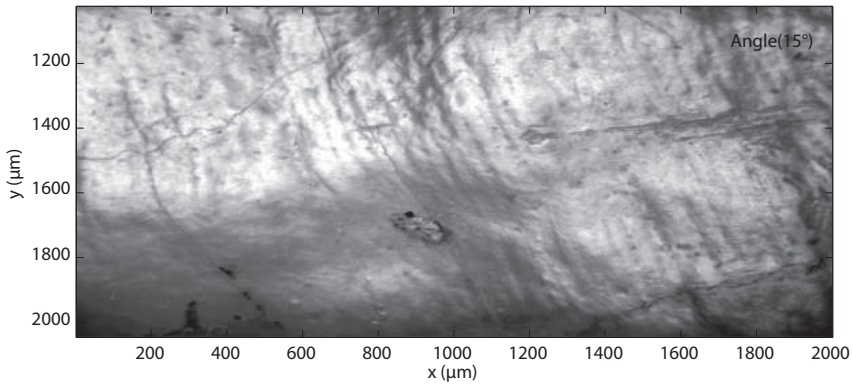
La figure 2.20 illustre les résultats obtenus, de la même zone d'une dent, sous plusieurs angles d'observation. Nous remarquons que les périkymaties ne sont pas présentes sous tout le champ d'observation. Pour chaque angle nous obtenons une image reconstituée où une ou plusieurs parties du champ d'observation favorisent l'apparition des périkymaties. C'est ce qui constitue l'inconvenient majeur de cette approche. L'enregistrement de la valeur du déplacement du moteur nous permet alors de reconstituer le profil $3D$ de chaque zone comme l'illustre la figure 2.21. Le profil $3D$ n'est pas l'objectif de la mesure c'est juste l'information qui va nous permettre de projeter l'image des périkymaties sur le plan horizontal.



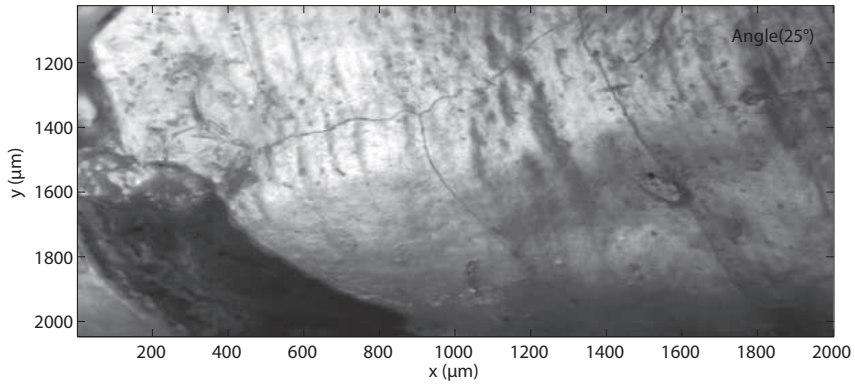
(a) Image de la zone d'intérêt vue sous un angle de $0°$



(b) Image de la zone d'intérêt vue sous un angle de $10°$

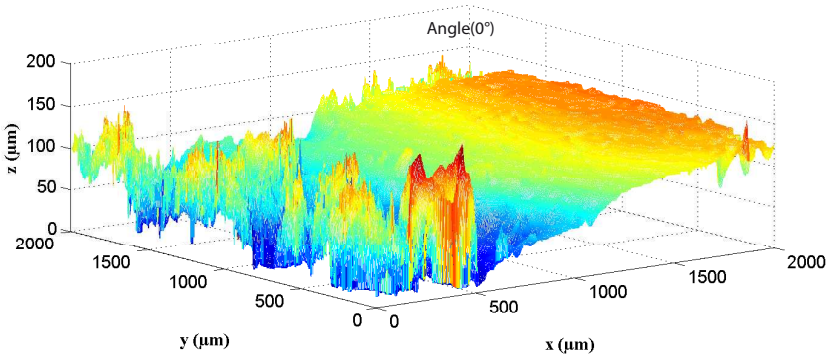


(c) Image de la zone d'intérêt vue sous un angle de $15°$

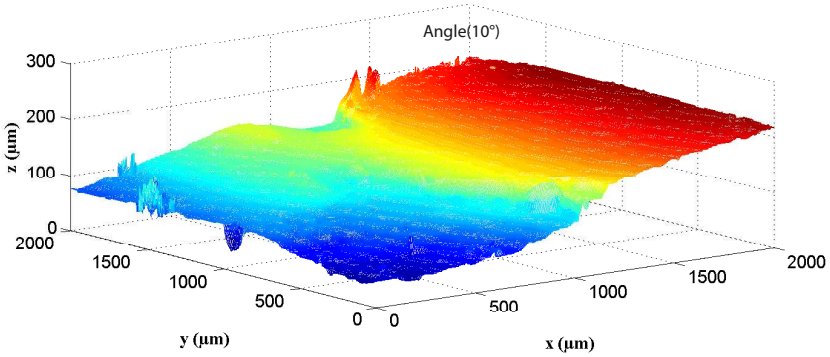


(d) Image de la zone d'intérêt vue sous un angle de $25°$

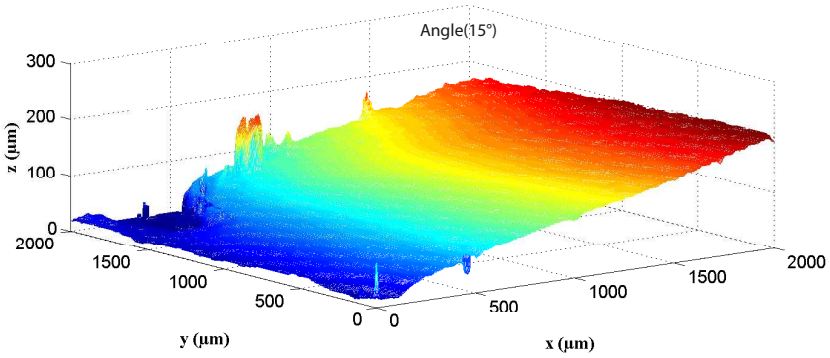
FIGURE 2.20 – Observation d'une zone de la surface de l'émail d'une dent fossile de l'espèce *Australopithecus africanus* (Sts 52, Sterkfontein, South Africa) sous différents angles d'observation.



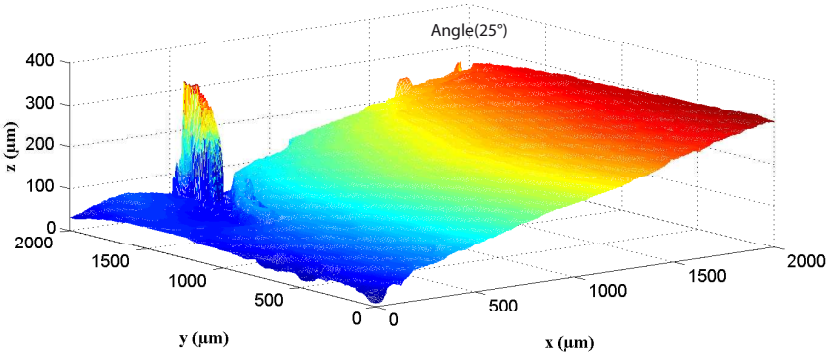
(a) Profil $3D$ de la zone d'intérêt sous un angle de $0°$



(b) Profil $3D$ de la zone d'intérêt sous un angle de $10°$



(c) Profil $3D$ de la zone d'intérêt sous un angle de $15°$



(d) Profil $3D$ de la zone d'intérêt sous un angle de $25°$

FIGURE 2.21 – Profil $3D$ *Australopithecus africanus* (Sts 52, Sterkfontein, South Africa) sous différents angles d'observation.

2.5.3 Résultats obtenus

A l'aide de ce système nous avons procédé à l'analyse des périkymaties des dents d'un sujet de l'espèce *Australopithecus africanus* (Sts 52, Sterkfontein, South Africa) comme le montre la figure (2.22).

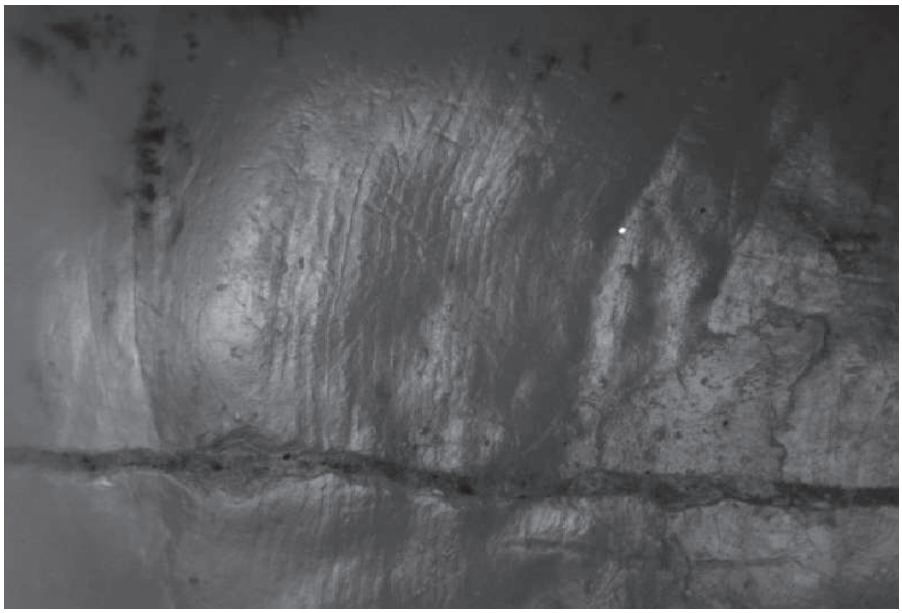


FIGURE 2.22 – Image des périkymaties de la dent d'un sujet de l'espèce *Australopithecus africanus* (Sts 52, Sterkfontein, South Africa).

Nous aborderons le traitement d'image que nous avons mis en œuvre pour la reconstruction de l'image des périkymaties d'une région de la dent à partir des images acquises dans le chapitre suivant.

2.5.4 Conclusion sur la première méthode

Cette première approche nous a permis de comprendre les problèmes que pose la mesure des périkymaties des dents. Cette configuration est sans doute la plus performante du point de vue adaptation de la lumière et de l'angle d'observation puisque ces deux paramètres sont définis par l'expérimentateur. Elle exige cependant une connaissance approfondie de la mesure de la texture. C'est donc un système qui peut être une solution pour la mise au point d'une méthode de mesure de la texture de la dent. Sa pertinence nous a permis de mesurer l'état de surface de la dent d'un sujet de l'espèce *Australopithecus africanus* (Sts 52, Sterkfontein, South Africa).(fig.2.23).

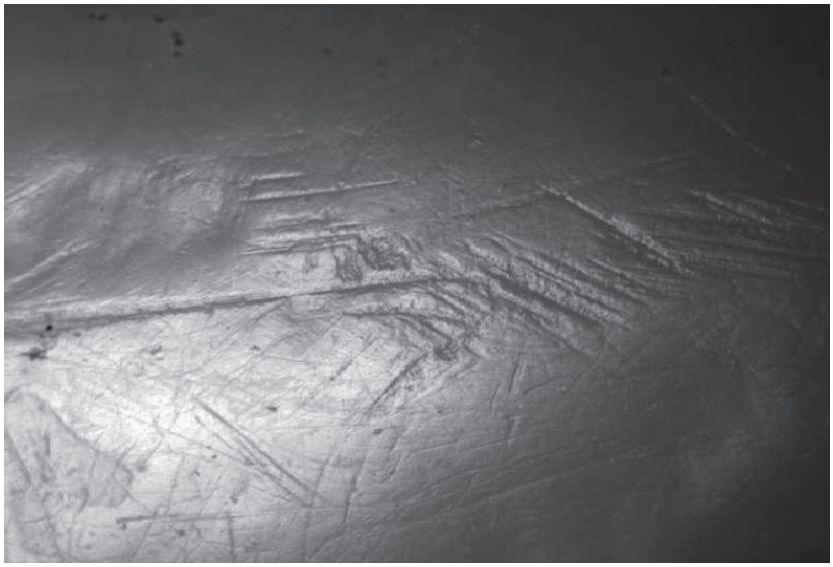


FIGURE 2.23 – Image de l'état de surface de la dent d'un Australopitheque Africain (Sts 52, Sterkfontein, South Africa).

L'inconvénient majeur de cette configuration est son coût en temps. En effet l'exploration du relief de la dent selon Z_{CDD} nécessite parfois l'enregistrement de 100 images pour obtenir une image complète des périkymaties. L'obtention des figures 2.22 et 2.23 a nécessité 210 images.

2.6 Deuxième méthode

Le fait d'avoir associé le système de déplacement de la dent selon (x_w,y_w et z_w), dans la configuration précédente, à la caméra ne nous a pas permis de nous adapter au relief de la dent. En d'autres termes, la recherche de la normale à la surface était fastidieuse et souvent impossible à atteindre. C'est pourquoi, nous avons dissocié ce système de déplacement de la caméra (fig.2.24). Cette modification nous a permit d'obtenir plus rapidement la prise d'images des périkymaties. L'inconvénient majeur souligné par nos collègues anthropologues était le positionnement manuel de l'illumination. Les résultats que nous avons obtenus à l'aide de ce montage sont illustrés sur la figure (2.25).

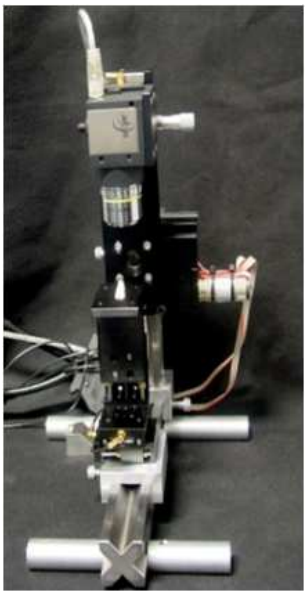


FIGURE 2.24 – Montage associée à la $2^{\text{ème}}$ méthode.

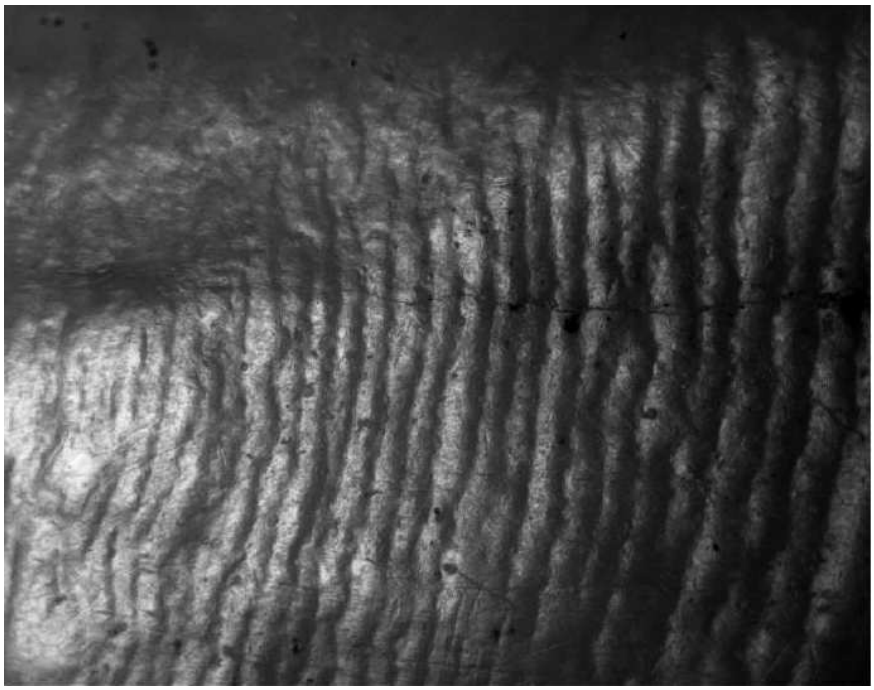


FIGURE 2.25 – Mesure des périkymaties d'un sujet de l'espèce *Australopithecus africanus* (Sts 52, Sterkfontein, South Africa) obtenu selon la $2^{\text{ème}}$ méthode.

Les résultats obtenus sont très pertinents comme le montre la figure ci-dessus. L'utilisation de ce système reste cependant très compliqué pour les anthropologues. Dans ce qui suis nous allons montrer comment nous avons optimisé l'architecture de ce système pour en faire un outil convivial.

2.7 Conclusion

Nous avons abordé dans ce chapitre le problème très complexe de la mesure de la BRDF et de la BTF. Les approches théoriques dans ce domaine sont abondantes, leur mise en œuvre, dans notre cas pour la mesure des périkymaties s'est avérée très complexe. En effet, nous cherchons à mettre en évidence une structure pseudo-périodique constituée par les stries ou les périkymaties noyée dans un profil de l'ordre de la morphologie de ces derniers, le tout sur une surface courbe. La profondeur de ces stries n'excède pas quelques microns (2 à 5 μm) et leur périodicité est de 60 à 100 μm. Sur une surface parfaitement plane cette morphologie aurait pu être mesurée d'une façon très précise à l'aide d'un profilomètre optique. L'autre difficulté liée à nos échantillons c'est leur comportement optique: la surface de l'émail est très spéculaire, sa porosité induite par des microcanaux lui confère un très grand pouvoir de diffusion et de rétro-diffusion, c'est ce qui a rendu notre tâche très difficile. Cependant la BRDF et la BTF nous permettent de mettre en évidence la texture de la couronne de la dent d'une façon très pertinente, or les micro-reliefs ne faisant pas parties des stries ou des périkymaties apparaissent comme un bruit dans notre contexte alors qu'il constitue toute l'information recherchée par la BRDF et/ou la BTF. Nous avons été amené à faire apparaître les ombres des textures pour mettre en évidence les périkymaties. Rappelons que l'ombre est à un inconvénient majeur dans les méthodes BRDF et BTF. Maintenant, quelle ombre choisir pour extraire l'information la plus importante dans notre cas: les périkymaties? Nous avons déterminé expérimentalement l'angle qui nous assure le meilleur contraste pour ces périkymaties. Bien sûr la mesure du relief de la dent pour étudier l'usure de l'émail due aux aliments reste possible avec des choix particuliers de l'angle de l'illumination.

Les deux méthodes que nous avons développées dans ce chapitre sont difficiles à mettre en œuvre pour les utilisateurs non experts. Elles nécessitent un temps relativement long pour la mesure, le temps de mesure d'une seule dent est de l'ordre d'une journée. Elles nous ont, cependant permis de comprendre et de maîtriser la démarche à suivre pour l'observation des périkymaties. En aucun cas leur pertinence sur l'aspect purement mesure ne peut être mise en cause. Rappelons que notre objectif est la réalisation d'un outil efficace pour la mesure et l'analyse de la surface de la couronne de la dent. Nous entendons par efficacité la possibilité de mesurer un grand nombre d'échantillons pour dégager des règles de classification dans le domaine de l'anthropologie. Dans le chapitre qui suit nous allons montrer comment nous avons réussi à optimiser ces configurations.

III

Réalisations et résultats expérimentaux

Sommaire

3.1 Limites des méthodes précédentes
3.2 Nouvelle approche de mesure
3.3 Système de mesure de la texture des dents
3.4 Méthode d'analyse temps fréquence
3.5 Résultats obtenus
3.6 Mesure des périkymaties . . .
3.7 Conclusion

Chapitre

3

Système d'analyse et résultats expérimentaux

Nous avons décrit dans le chapitre précédent les deux méthodes qui nous ont permis d'obtenir des images des périkymaties. Nous avons alors souligné leur pertinence et leurs limites. Nous allons dans ce chapitre aborder les solutions que nous avons retenues pour optimiser l'architecture d'un outil de mesure et d'analyse des périkymaties. Les contraintes principales liées à sa conception sont :

- ☞ le temps de mesure des périkymaties d'une dent que nous nous sommes fixes à une dizaine de minutes,
- ☞ l'absence de réglage manuel des angles d'illumination et d'observation par l'utilisateur,
- ☞ la construction d'un outil de métrologie: assurer une reproductibilité des mesures et donc des résultats.

3.1 Limites des méthodes précédentes

Afin de mieux justifier nos choix pour optimiser l'architecture du système, nous allons revenir dans ce paragraphe sur les limites des méthodes précédente pour mieux expliquer les raisons de ces limites:

- ✓ grand nombre d'images pour déterminer les périkymaties sur une petite région $300\ \mu m \times 400\ \mu m$de la dent pour un seul angle d'observation,
- ✓ certains plans de la surface de la dent ne sont pas accessibles à la mesure,
- ✓ traitement différé des résultats.

3.1.1 Durée de la mesure

C'est la quantité des images à acquérir pour identifier les périkymaties dans une région de la dent qui explique la durée des mesures. La raison pour laquelle nous avons été amenés à prendre des dizaines d'images est la faible profondeur de champ de l'objectif de microscope utilisé. Ce paramètre dépend de l'ouverture numérique de l'objectif, de la distance de travail (distance objectif-échantillon), de

la focale utilisée et de la résolution spatiale. Tout cela nous amène à conclure que la solution idéale à ce problème est d'augmenter la profondeur de champ en optant pour un autre objectif. Cette option n'est pas envisageable puisque prendre un objectif présentant une plus grande ouverture numérique avec le même grossissement ne réduit pas drastiquement le nombre d'images à acquérir. L'autre solution est de prendre un objectif de microscope de grossissement plus faible: un grossissement de $\times 2$ nous donnera, dans les mêmes conditions de mesure une profondeur de champ de $200\ \mu m$. Cette dernière valeur réduirait d'une façon considérable le nombre d'image mais dégrade notre résolution des périkymaties de la dent.

3.1.2 Plans inaccessibles

Dans les configurations précédentes, notre handicap majeur est la durée de la mesure. Certains plans de la structure de la dent n'étaient pas accessibles à la mesure car notre échantillonnage angulaire $(10°)$ est très grand par rapport à la finesse d'angle que ces plans nécessitent. La réduction de ce pas d'échantillonnage était exclue pour ne pas augmenter d'avantage le nombre d'images.

3.1.3 Traitement différé des résultats

Au vue du nombre d'images à acquérir pour une seule région (ce nombre peut atteindre 200 images de 1024×768), il était exclu d'augmenter le pas de l'angle. Tout cela nous à trouver d'autres solutions pour optimiser l'architecture du système.

3.2 Nouvelle approche de mesure

Pour simplifier ces méthodes de mesure nous avons fixé l'angle entre la caméra et la lumière. Ainsi l'utilisateur n'a pas à se préoccuper du positionnement de la lumière. le problème que nous devions résoudre est: **comment choisir cet angle?**
La théorie que nous avons exposée dans le chapitre précédent nous a fixé l'angle limite supérieur était de $(85°)$ pour éviter l'occlusion et l'ombrage. La nécessité d'enregistrer la composante spéculaire nous impose l'alignement de la bissectrice de l'angle entre la direction de l'illumination et celle de l'observation avec la normale à la surface. N'oublions pas que tous les angles répondants à ce critères ne sont pas acceptables, en effet nous avons besoin d'un angle qui fait apparaître l'ombre des périkymaties. Les expériences que nous avons menées à l'aide des méthodes précédentes nous ont appris que le choix de cet angle n'est pas trivial. Nous avons donc mené une série de mesure pour déterminer l'angle optimal: nous le définirons comme l'angle qui nous donne l'ombre des périkymaties et qui nous permet d'observer les périkymaties présentant une grande période comme celle présentant des périodes plus faibles.

3.2.1 Réduction du nombre d'images

La manière la plus simple pour réduire le nombre d'image à acquérir est de travailler toujours à une distance constante de la surface de la dent. Cette distance n'est rien d'autre que la distance de travail de notre objectif. Il s'agit donc d'asservir la position de l'objectif au profil de la surface de la dent (voir fig.3.1). Nous allons donc mesurer le profil de la surface de la dent. Pour cela nous disposons de plusieurs techniques à notre disposition. Les plus simples à mettre en œuvre sont :

- ✗ le principe de confocalilté,
- ✗ la triangulation laser.

Cette option va réduire drastiquement le nombre d'images qui s'écrit alors comme:

$$N_{images} = \frac{\Delta(Z)}{\delta} \tag{3.1}$$

Où ΔZ est définit sur la figure (3.1) et δ la profondeur de champ. Nous constatons

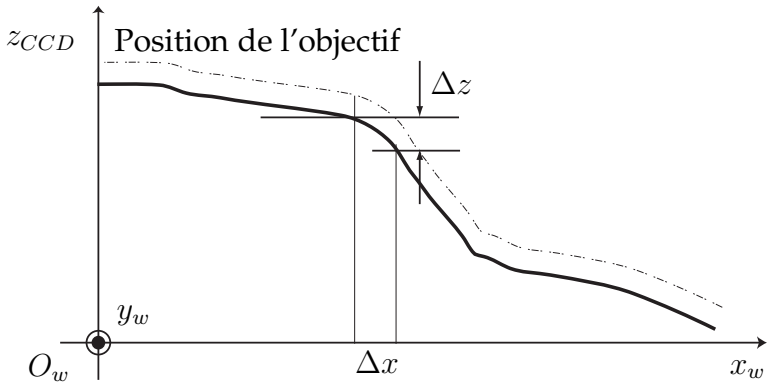


FIGURE 3.1 – Principe de détermination du nombre d'images pour un angle d'observation nul.

que le nombre d'images dépend, en tout point du profil, du pas Δx choisi en fonction de la pente du profil entre les deux point définis par ce pas.

3.2.2 Elimination des plans inaccessibles

L'asservissement de la position de l'objet nous a conduit à rendre paramétrable le nombre d'images. Ceci à pour conséquence la résolution de problème des plans inaccessibles. En effet la caméra va toujours se trouver sous un angle par rapport à la normale de la pente moyenne du profil de la région explorée.

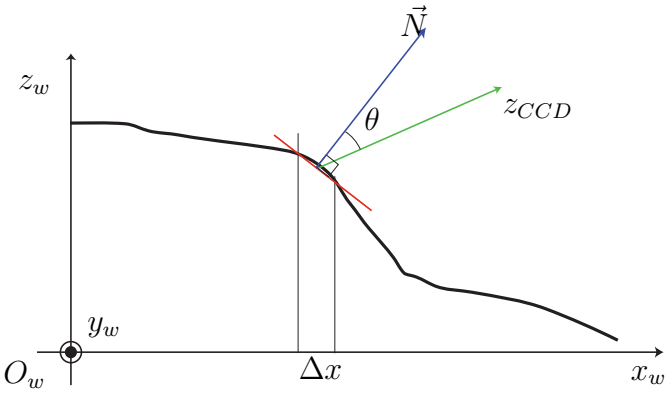


FIGURE 3.2 – Principe de détermination du nombre de la normale pour un angle d'observation θ.

3.2.3 Asservissement de la position de l'objectif par rapport à la dent

Comme nous venons de le souligner c'est du profil de la dent que va dépendre la définition de la normale à la surface de la région observée. Nous devons donc mettre beaucoup de soin à mesurer ce profil. Pour cela nous avons retenu la méthode de la triangulation laser. Nous allons rappeler le principe de cette technique dans le paragraphe qui suit.

Triangulation laser

La technique de la triangulation laser (TL) est une technique non invasive basée sur la réflexion d'un faisceau lumineux (laser) sur une surface dont la topologie est à mesurer. Elle se retrouve dans de nombreuses applications, mesure de distance [67–69] , de vitesse [67], de profil [67–69],...etc. Il s'agit d'utiliser les lois de l'optique, en termes de grandissement et de restitutions d'images.

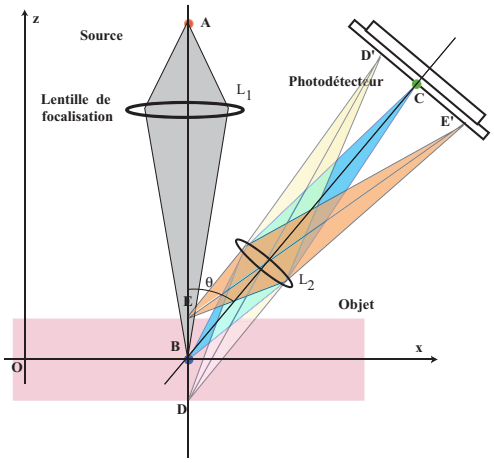


FIGURE 3.3 – Principe de la triangulation laser.

Le principe de la triangulation laser: un rayon lumineux issu d'un laser est focalisé à une distance AB à l'aide d'un système de focalisation. Le rayon réfléchi

par une surface passant (voir la figure (3.3)) par le point B arrive au point C sur le capteur. En pratique, le point C est le centre du capteur. Si nous translatons ce plan parallèlement à l'axe Ox dans le sens des z positifs, la réflexion du rayon AE s'effectuera alors au point E'. la déviation CE' sur le capteur est proportionnelle à la distance BE. Le plan passant par B et parallèle à Ox est appelé plan de référence. Comme nous le constatons cette mesure est une mesure ponctuelle. Pour déterminer le profil de l'échantillon dan la direction Ox ou dans celle de Oy perpendiculaire à Ox, nous devons déplacer l'échantillon selon la direction considérée.
Nous pouvons démontrer qu'en première approximation, la relation liant l'écart d sur le capteur associé à une profondeur z s'écrit:

$$d = f\frac{z}{D\sin\theta} \text{ soit } z = d\frac{D\sin\theta}{f} \tag{3.2}$$

Où $D = AB$, $d = CE'$ et f la focale de la lentille L_1 . Dans les meilleures conditions, nous pouvons atteindre à l'aide de cette méthode une résolution de quelques dizaines de micron (en z). Nous avons intégré un système de mesure par triangulation dans notre architecture pour relever le profil de la dent. Dans notre cas nous n'avons pas cherché à obtenir une grande résolution en z puisque notre profondeur de champ, qui est au mieux de $32\ \mu m$, va limiter cette résolution d'une part; nous n'utilisons la triangulation que pour asservir la position pour que l'objectif d'observation soit toujours à la bonne distance de travail d'autre part.

Taille du spot laser incident dans la TL

La résolution dans notre cas, dépend aussi de l'image du spot obtenue à l'aide de la caméra qui joue le rôle du capteur ponctuel. Plus précisément du calcul du centre de gravité de la tache obtenue sur le capteur de la caméra CCD. Nous devons donc affiner le spot laser pour obtenir une image du spot de la plus petite taille possible sans distorsions. Nous avons obtenu une bonne focalisation du faisceau de la diode laser que nous avons utilisée à l'aide d'un doublet de focale de $25\ mm$, la taille du spot obtenu était alors de $\sim 3\ \mu m$.

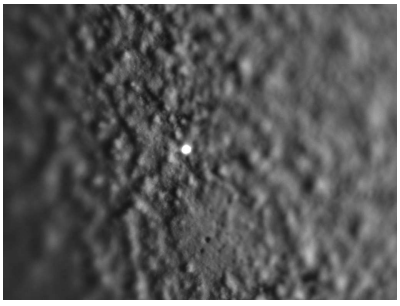


FIGURE 3.4 – Image du spot obtenu($\times 10$).

Asservissement de la position du spot

L'image du spot formée à l'aide de l'objectif de microscope $X10$ sur le capteur de la caméra CCD. Un algorithme de traitement d'image recherche le cercle qui

circonscrit la tache et calcule son centre de gravité. A l'initialisation, l'objectif de microscope est telle que la mise au point est parfaite et la tache est centre du capteur. Lorsque le profil de la dent, lors du scan selon x_w ou y_w, la tache va changer de position dans la direction de l'axe de déplacement. Notre algorithme agit alors sur un moteur de déplacement micrométrique pour faire varier alors la position de la caméra selon l'axe Z_{CDD} dans le bon sens pour rapprocher au mieux le centre de gravité de la tache du centre du capteur CCD.

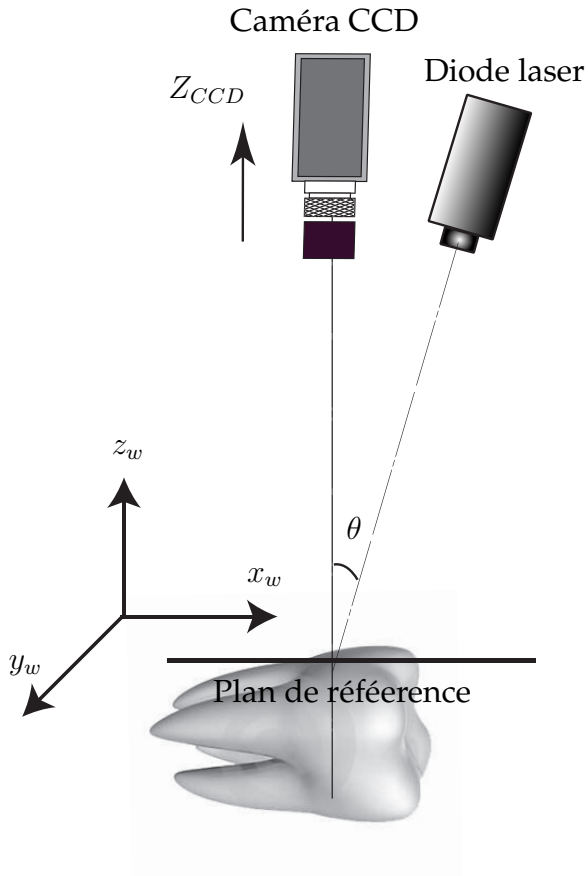


FIGURE 3.5 – Utilisation de la triangulation laser.

3.2.4 Enregistrement du profil de la dent

Pour enregistrer le profil $2D$ soit $z_{CCD}(x_w)$ d'une dent, nous nous appuyons sur l'asservissement de la position de l'objectif à une distance de la dent égale à sa distance de travail « *working distance* » tout en déplaçant la dent selon l'axe x_w. Le pas du déplacement de la dent est de $50\mu m$ et à une vitesse adaptée au temps de l'acquisition d'une image et du calcul du déplacement du spot qui est proportionnel à Z soit ($100\ ms$). La figure 3.7 illustre le profil $2D$ de l'incisive latérale droite permanente mandibulaire de KB 5223, un vestige fossile provenant du site de Kromdraai B (Afrique du Sud).

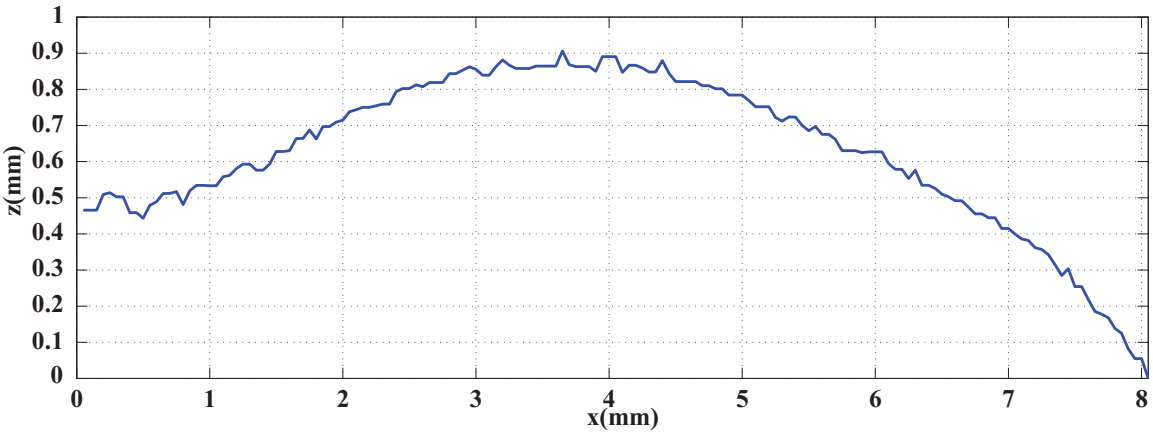


FIGURE 3.7 – Profil $2D$ de l'incisive centrale droite permanente mandibulaire de KB 5223, un vestige fossile provenant du site de Kromdraai B (Afrique du Sud).

FIGURE 3.6 – Principe du relevé du profil 2D de la dent.

Le pas du déplacement de la dent est paramétrable, nous appellerons ce pas le pas de l'échantillonnage selon x_w et nous le noterons $x_{w_{step}}$. La limite inférieure du pas de déplacement de la caméra est égale à la profondeur de champ de l'objectif utilisé. Nous allons dans ce qui suit développer les raisons pour lesquelles nous enregistrons ce profil.

3.2.5 Mesure de la texture d'une zone de la dent

Pour la mesure de la texture nous allons nous intéresser au profil de la dent sur un seul du profil précédent(voir figure(3.8)).

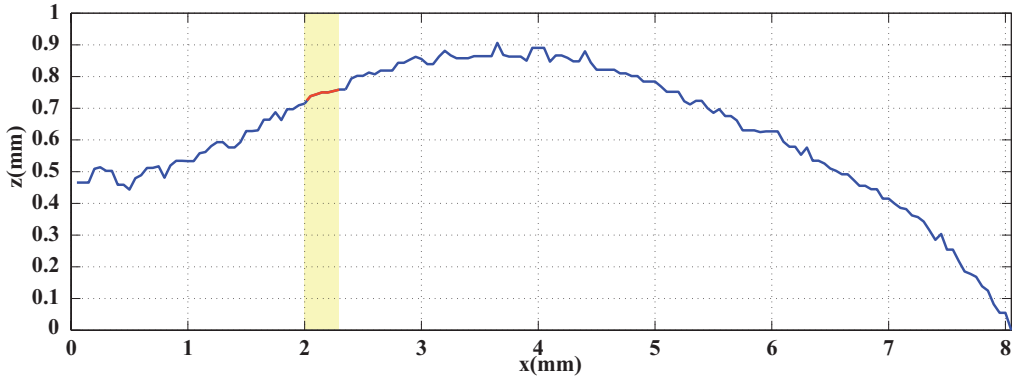


FIGURE 3.8 – Profil $2D$ de la dent et pas choisi pour le calcul du plan moyen, de l'incisive centrale droite permanente mandibulaire de KB 5223, un vestige fossile provenant du site de Kromdraai B (Afrique du Sud).

Nous calculons alors le plan de ce profil que nous donnons dans la figure (3.9).

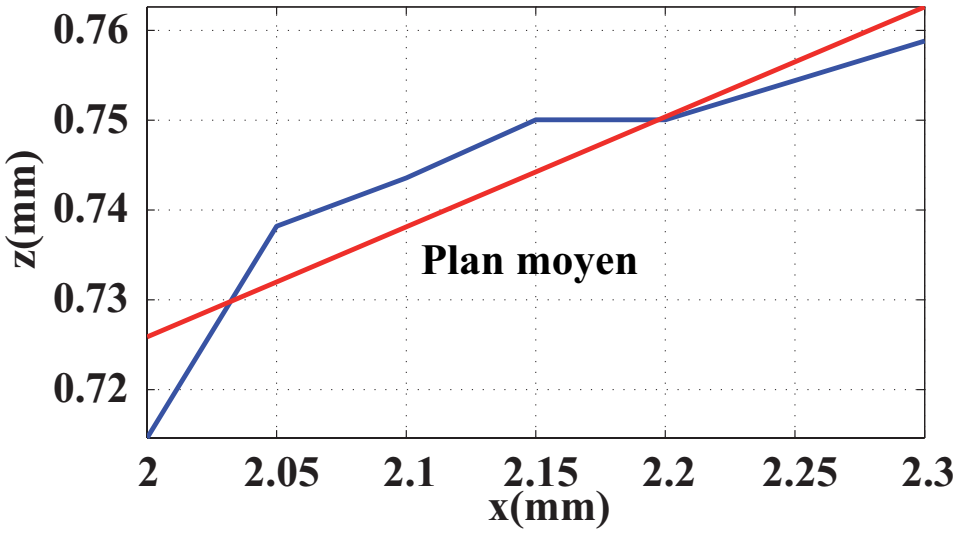


FIGURE 3.9 – Plan moyen du profil d'un pas du profil total de la dent.

Nous avons mesuré le profil $3D$ (voir figure(3.10)) correspondant au profil $1D$ de la figure 3.8 en réalisant un déplacement dans la direction x_w et y_w. La résolution spatiale de cette image est de $50\ \mu m$, elle nous permet d'évaluer l'erreur que nous commettons sur l'approximation du plan moyen de la dent.

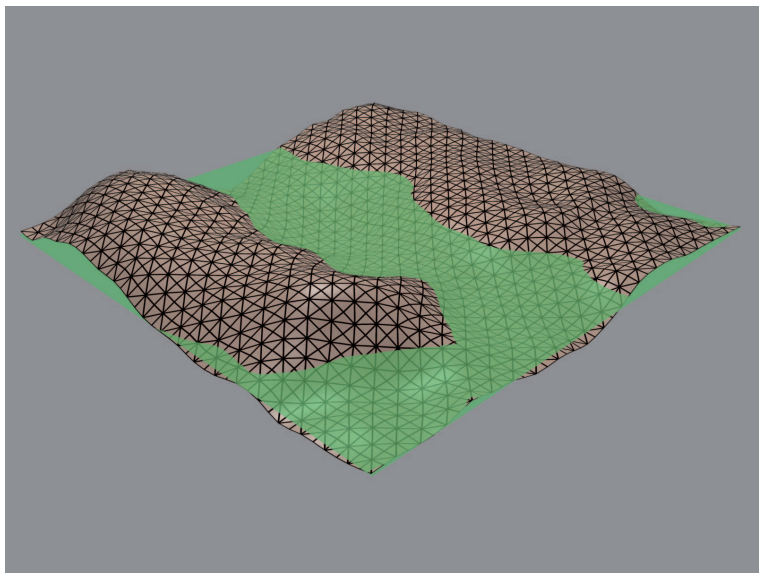


FIGURE 3.10 – Représentation du plan moyen $3D$ du relief d'une région, de la couronne de la dent.

Nous déterminons alors la normale à ce plan moyen au point telle que $x_w = \frac{x_{w_{step}}}{2}$ et nous orientant notre tête de mesure (ensemble : caméra CCD et source de lumière) de façon à ce que la bissectrice de l'angle entre la caméra et la source soit alignée avec cette normale comme nous l'avons exposé dans le chapitre précèdent à la section 2.2.6.

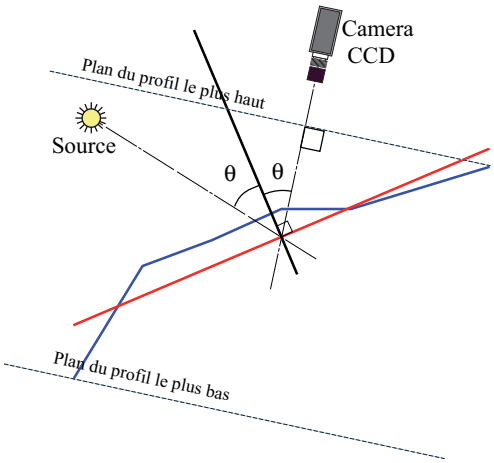


FIGURE 3.11 – Alignement de la normale au plan moyen, avec la bissectrice de l'angle entre la caméra et la source.

Nous mesurons alors la texture de la dent sur ce pas d'échantillonnage en enregistrant les images de la surface de la dent sur tous les plans perpendiculaires à la caméra entre le plan du profil le plus haut (voir figure (3.11)) et le plan du profil le plus bas. L'enregistrement de ces images se fait à un pas d'échantillonnage dont le minimum est la valeur de la profondeur de champ exprimée en μm. Nous obtenons alors une image de la texture pour chaque plan. Cette série d'images constitue une série tomographique de la texture de la zone explorée. Pour obtenir l'image de la texture sur cette zone, de chaque image nous gardons que les zones nettes. Pour cela nous avons développé un algorithme basée sur les *shapelet* que nous décrirons plus loin.

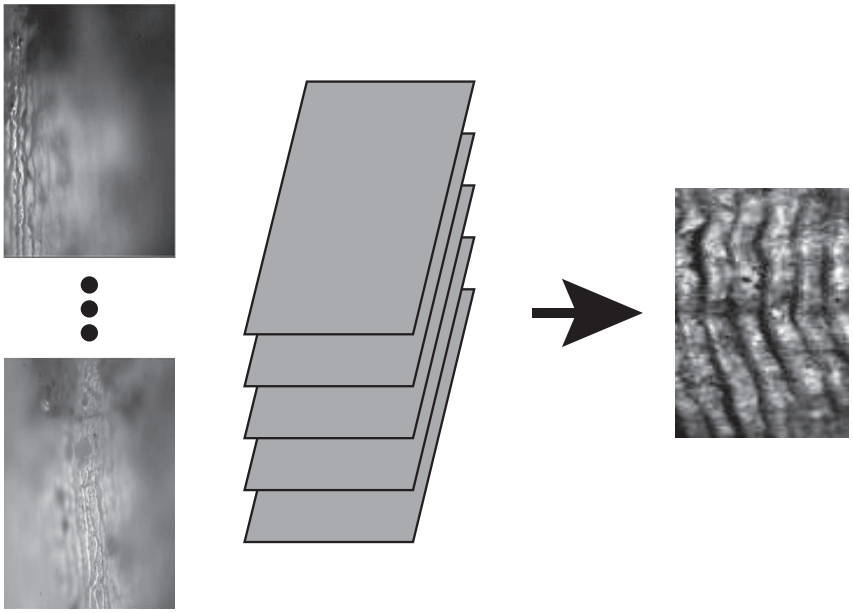


FIGURE 3.12 – Principe de la reconstitution de l'image de la texture d'une zone.

Nous donnons la texture que nous avons obtenu pour cette portion dans la figure (3.13).

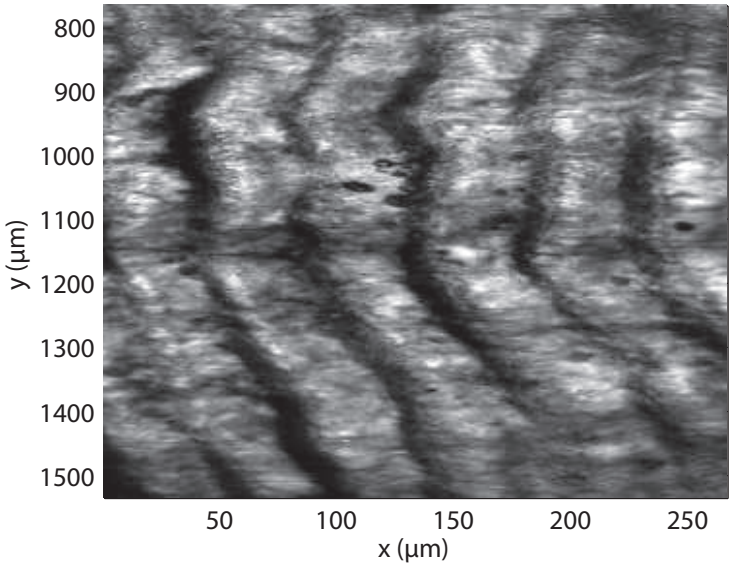


FIGURE 3.13 – Texture de la surface de l'incisive centrale droite permanente mandibulaire de KB 5223, un vestige fossile provenant du site de Kromdraai B (Afrique du Sud)(3.8).

3.2.6 Détermination des zones de netteté dans les images d'une zone

Pour obtenir l'image de la texture de la zone explorée, nous cherchons les zones nettes dans chaque image pour constituer une image nette relative à la zone explorée. Pour cela nous nous appuyons sur un algorithme de « shaplet » qui a été décrit par plusieurs auteurs [70] [71] [72] [73] [74] [75] [76] [77] . Nous en rappellerons les bases.
La méthode des « shaplets » est une nouvelle approche (qui a été développée récemment par Refregier en 2001 [72]) pour l'analyse des images. Elle consiste à développer une image sur une base orthogonale qui va constituer une base de fonctions afin d'écrire un polynôme de type Gauss-Hermite. L'analyse par la méthode des « *shaplets* » va consister à mesurer l'écart par rapport à une Gaussienne circulaire à l'aide des coefficients de ce polynôme; l'analyse fine du contour est assurée par la forme asymptotique de ce polynôme [74]. L'algorithme de « shaplet » nous permet de déterminer les gradients des images. Une corrélation effectuée entre les gradients d'un signal et les gradients d'une fonction de base peut alors fournir des informations équivalentes à une corrélation directe entre le signal et la fonction de base. Ainsi, la corrélation du gradient d'un filtre *shapelet* avec le gradient du signal va correspondre à l'extraction d'une bande de fréquences du gradient de ce signal. La nécessité de reconstruire une surface à partir des corrélations entre normales de la surface et les gradients *shapelet* impose certaines contraintes à la fonction *shapelet*. Ce sont:

- ✓ La fonction doit présenter un minimum d'ambiguïté par rapport à son gradient,
- ✓ La préservation de l'information de la phase dans le signal,
- ✓ Une couverture uniforme du spectre du signal pour qu'il soit fidèlement

reconstituées.
Pour les signaux $1D$ la fonction *shapelet* peut être construite par une série de fonctions Gaussiennes en respectant la mise à l'échelle entre les filtres successifs. Les amplitudes des fonctions Gaussiennes sont proportionnelles à cette échelle voir figure (3.14).

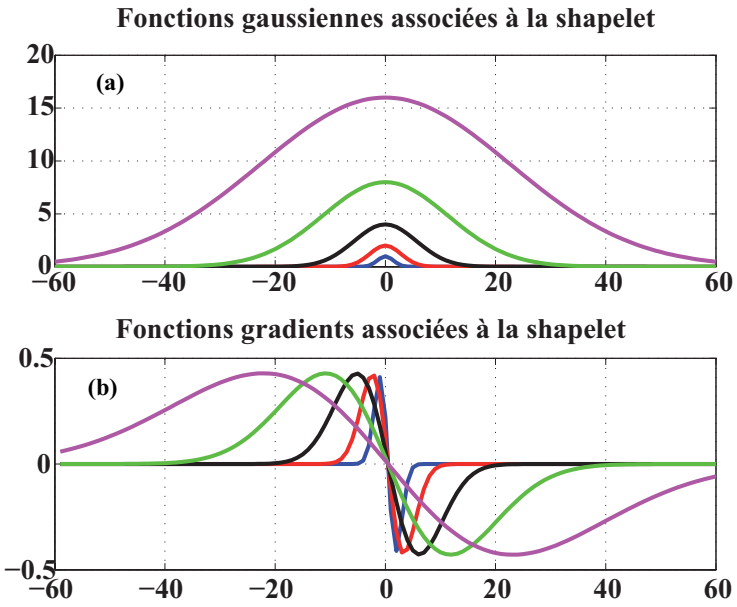


FIGURE 3.14 – (a) Une banque *shapelet* formée par cinq fonctions Gaussiennes, (b) les fonctions de transfert correspondant à leur gradient.

La corrélation d'un signal avec le signal de la fonction Gaussienne ou la fonction Gradient, permet la détermination des bases fréquences voir la figure (3.15).

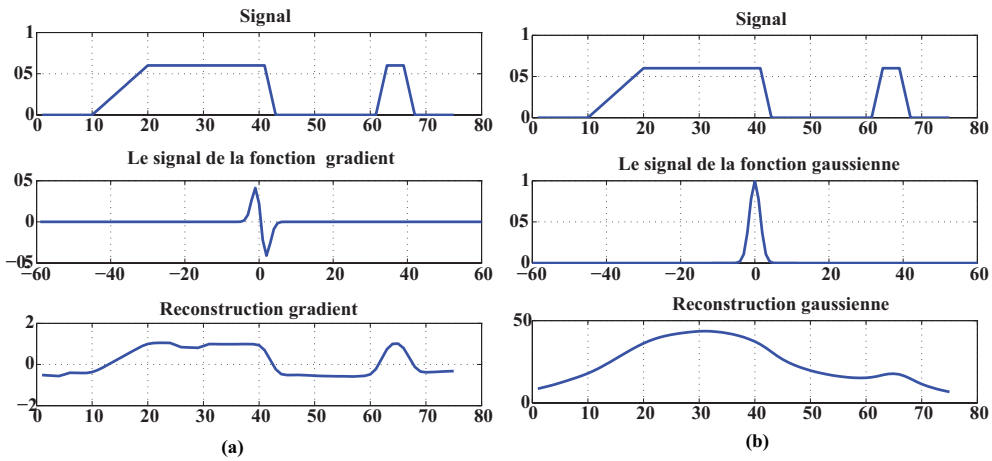


FIGURE 3.15 – (a)Reconstruction d'un signal 1D par la corrélation d'une fonction gradient. (b) Reconstruction d'un signal 1D par la corrélation d'une fonction gaussienne.

Par contre la corrélation du signal avec le gradient du signal, permet d'obtenir toutes les hautes fréquences voir la figure (3.16).

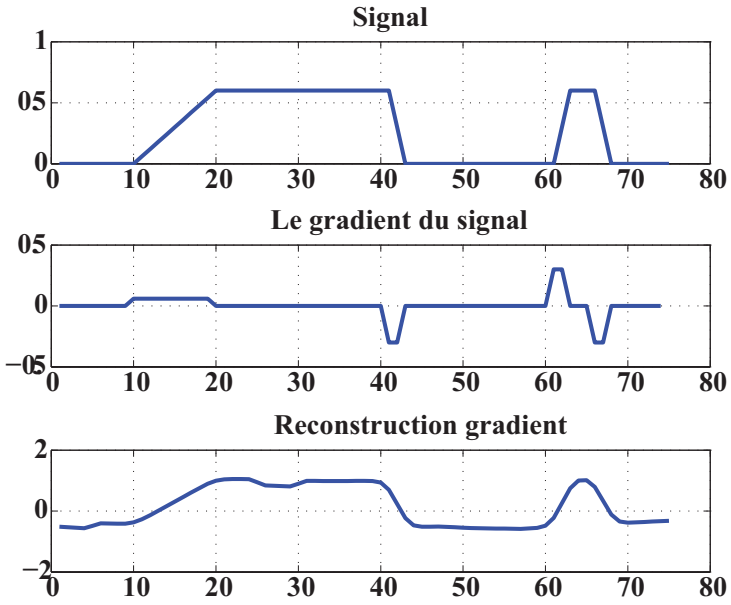


FIGURE 3.16 – Reconstruction d'un signal 1D par la corrélation du signal avec le gradient du signal.

Pour obtenir l'image de la texture de la zone explorée, nous gardons de chaque image ($Image_i$ prise à une position z_i dans la direction de l'axe Oz_{CDD} les zones nettes). La distribution de ces zones nettes nous permet alors de constituer une image nette de toute la région d'intérêt.

Nous avons développé un logiciel pour le traitement des images des dents. Il permet :

- de choisir les images à traiter,
- d'appliquer les « *shapelet* » sur une série d'images (détection de la zone de netteté pour obtenir l'image des périkymaties sur toute la couronne de la dent).

Nous avons appliqué les « *shapelet* » sur les trois images suivantes voir figure(3.17):

FIGURE 3.17 – Trois images des périkymaties prise à une position z_i dans la direction de l'axe Oz_{CDD}.

Nous avons obtenu l'image résultat voir figure(3.18):

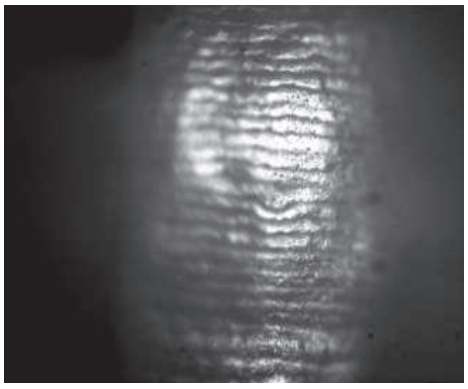


FIGURE 3.18 – Image finale des périkymaties de la dent(le filtre *shapelet* nous permet de retrouver les zones nettes sur les trois images).

3.2.7 Reconstitution de la texture de la dent le long du profil mesuré

En juxtaposant les images de toutes les zones couvrant la dent le long du profil $2D$ nous obtenons l'image de la texture de la dent comme le montre la figure (3.19).

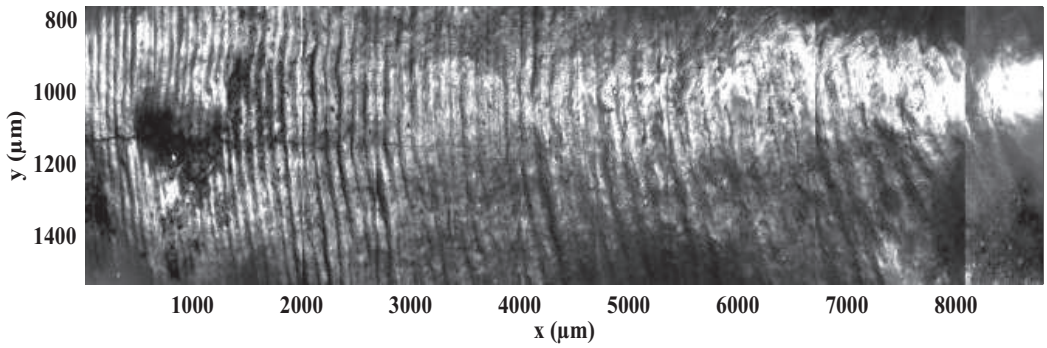


FIGURE 3.19 – Texture de la surface de l'incisive centrale droite permanente mandibulaire de KB 5223, un vestige fossile provenant du site de Kromdraai B (Afrique du Sud).

Une fois cette reconstitution achevée, nous pouvons compter et mesure la variation de la période des périkymaties sur cette image.

3.3 Système de mesure de la texture des dents

Comme nous l'avons exposé plus haut, pour réaliser la mesure du profil et de la texture des dents nous devons effectuer les déplacements :

- ✓ de la dent selon x_w, y_w et z_w,
- ✓ de la caméra CCD selon z_{CCD},
- ✓ et la rotation de l'ensemble : source d'illumination, de la caméra et de la diode laser pour la triangulation.

La rotation de la tête de mesure a été la fonction la plus difficile à réaliser. En effet, lors d'une rotation, le rayon issu de la diode laser, l'axe optique de l'objectif de microscope et l'axe optique de la source de lumière pour l'illumination, doivent toujours se croiser au même point et ce quelque soit l'angle de rotation. Malgré le grand soin que nous avons apporté à la réalisation des pièces mécaniques, nous avons été amené à intégrer dans le système des micro-déplacements manuels pour un réglage très fin du système. Pour la caméra, nous avons retenu la technologie CCD, pour sa sensibilité. Le capteur est de $1/3$" et d'une résolution de 1024×768, la taille de ses pixels est de $4.65 \times 4.65 \mu m^2$. Les moteurs de déplacement présentent une course de $20mm$, une résolution de $100nm$ et une vitesse de déplacement de 0.050 à $3\ mm/s$. La platine de rotation présente une résolution de $.07°$ et une vitesse de $3°/s$. Les figures (3.20, 3.21) illustrent notre réalisation :

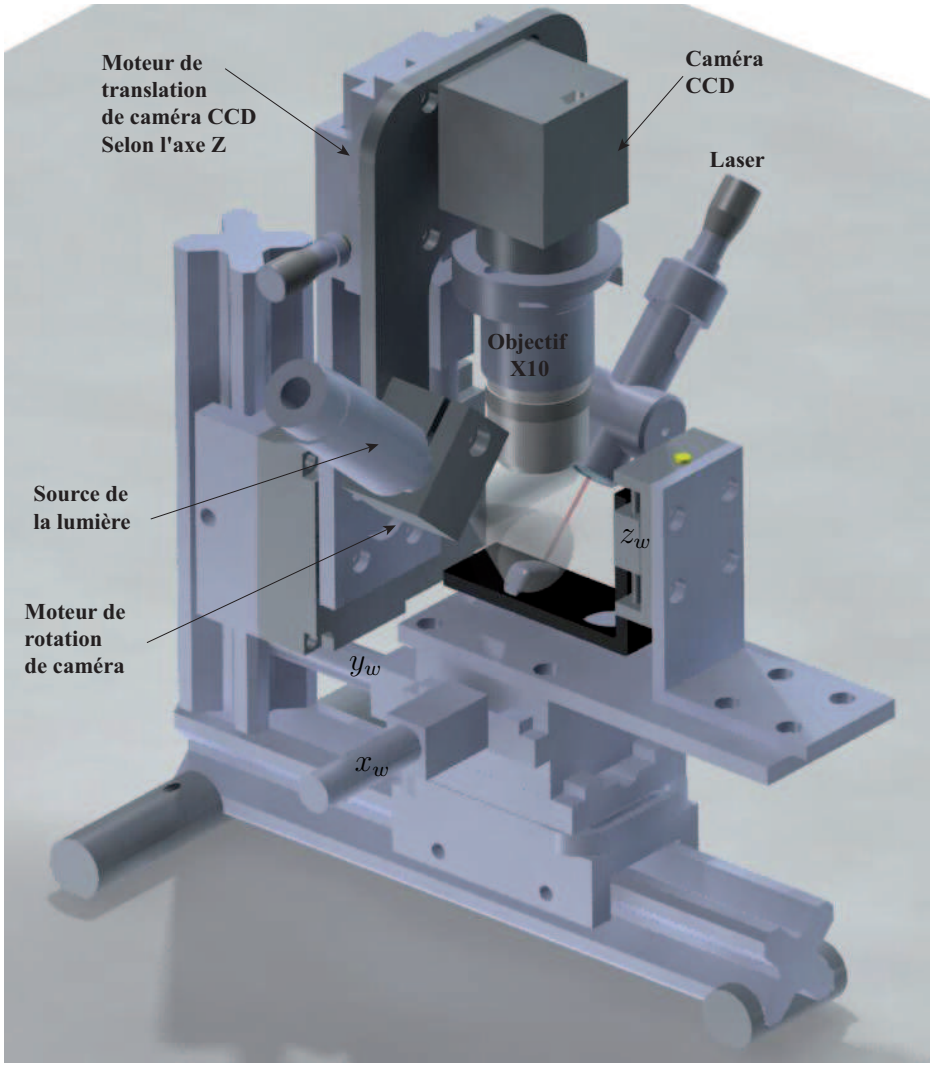


FIGURE 3.20 – Schéma du montage expérimental pour la mesure des périkymaties.

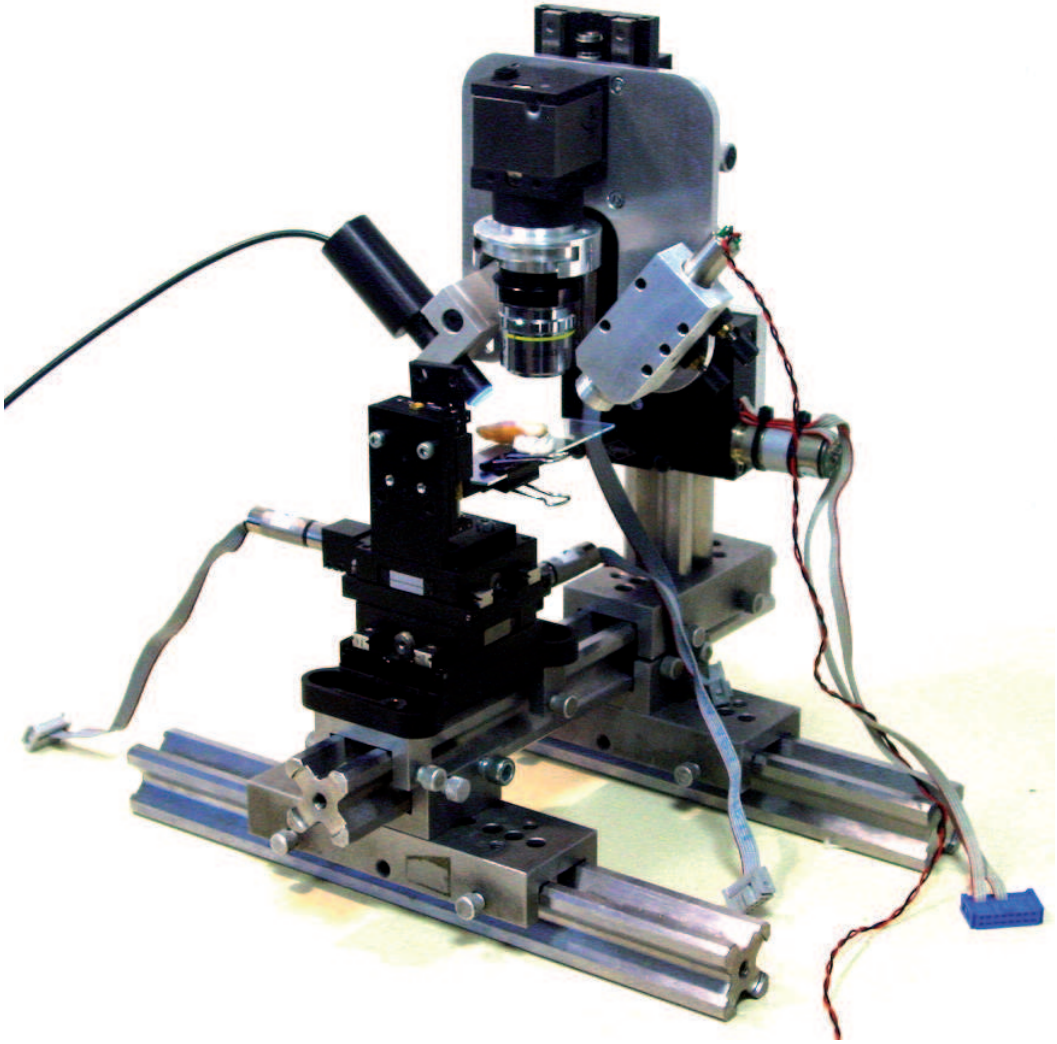


FIGURE 3.21 – Système optique pour la mesure des périkymaties.

3.3.1 Comptage des périkymaties

Pour le comptage des périkymaties nous avons développé des algorithmes basés sur les méthodes classiques du traitement d'image : binarisation, filtrage, segmentation et enfin la squeletisation. Nous avons obtenu de bons résultats sur certaines dents, les résultats nécessitent cependant l'intervention de l'utilisateur pour corriger les écarts des résultats obtenus par rapport à la réalité. C'est la raison pour laquelle nous avons opté pour une solution simple :

- calcul du profil de chaque ligne,
- calcul des minimums de chaque profil,
- calcul de la moyenne des périodes sur une vingtaine de profil,
- affichage du résultats pour effectuer les corrections.

En effet comme le montre la figure 3.22, les minimums du profil correspondent bien au périkymaties. Après une correction manuelle de ce résultat, nous obtenons le pointage des périkymaties:

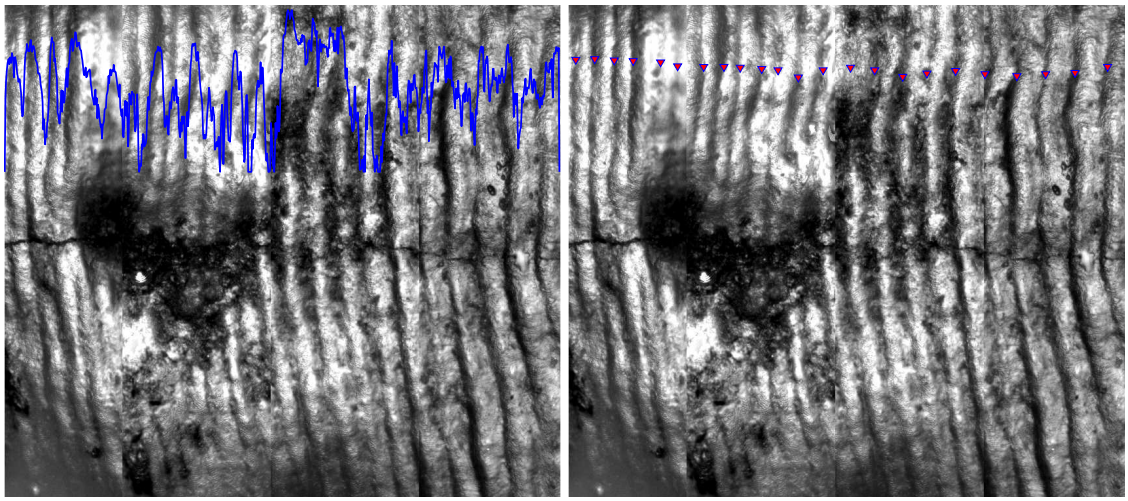


FIGURE 3.22 – (a) Images des périkymaties et profil d'une ligne, (b) pointage des périkymaties de la dent.

Nous calculons alors le nombre de périkymaties de la dent, puis nous déterminons la variation de la périodicité de ces périkymaties comme le montre la figure (3.23):

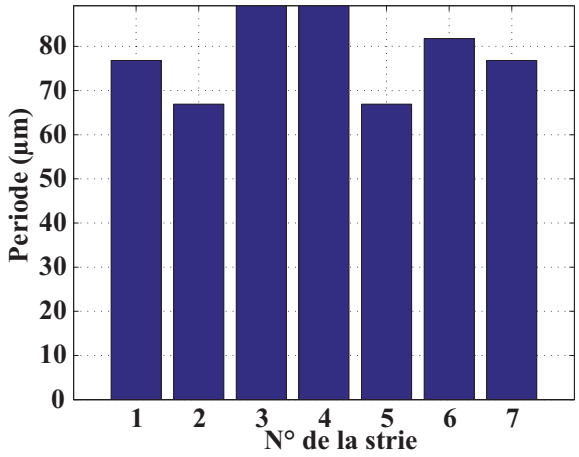


FIGURE 3.23 – Période des périkymaties de la zone explorée.

3.4 Méthode d'analyse temps fréquence

Rappel

L'analyse temps-fréquence a connu ces dernières décinies un regain d'intérêt. Elle est spécifiquement adaptée aux signaux non-stationnaires dont la fréquence et l'amplitude varient au cours du temps. L'analyse temps-fréquence a été découverte dans les années 40 avec les travaux de Gabor, Ville et Page concernant l'étude des spectres variables dans le temps, [78], [79]. A cette époque, leur motivation principale était l'analyse fondamentale et une clarification des idées mathématiques et physiques utiles à la compréhension de ce que représentait un spectre variable dans le temps. L'idée de base était de concevoir une fonction conjointe du temps et de la fréquence appelée distribution temps-fréquence qui pourrait décrire simultanément la densité d'énergie ou l'intensité du signal dans le plan temps-fréquence [78]. Le but principal de l'analyse temps-fréquence est donc de transformer un signal monodimensionnel en une distribution bidimensionnelle du temps et de la fréquence donnant ainsi une répartition de l'énergie contenue dans le signal dans le plan temps-fréquence. D'un point de vue historique, c'est Gabor et Ville qui furent les premiers à développer de telles distributions guidés par un même intérêt en mécanique quantique [78]. Gabor fut le premier à définir une méthode mathématique intimement liée à la théorie des états cohérents en mécanique quantique. Il introduisit le concept du signal analytique. Ville utilisa ce concept pour définir une distribution que Wigner présentera en 1932 afin d'étudier les statistiques en mécanique quantique. Bien plus tard, Cohen généralisera ce concept et présentera une forme globale des distributions temps-fréquence connues sous le nom de classe de Cohen. Le but poursuivi par Cohen [78] était de définir une classe de distributions qui satisferait à des conditions, à des propriétés désirées et qui pourrait représenter au mieux l'énergie du signal analysé à travers les deux variables temps et fréquence. Le point de départ

de cette généralisation est le fait que l'énergie d'un signal $x(t)$ peut être déduite du carré du module du signal ou de sa transformée de Fourier, ce qui signifie que la distribution doit être définie de manière à satisfaire au critère ci-dessous, [79]:

$$E_x = \int_{-\infty}^{+\infty} \mid x(t) \mid^2 dt = \int_{-\infty}^{+\infty} \mid X(\beta) \mid^2 d\beta \tag{3.3}$$

Où $\mid x(t) \mid^2$ et $\mid X(\beta) \mid^2$ sont les densités d'énergie en temps et en fréquence respectivement.

Les représentations temps-fréquence ou temps échelle sont de plus en plus utilisées dans le domaine du traitement des signaux non-stationnaires par l'analyse temps–fréquence (TFA). Dans tout ce qui suit et d'une manière générale une représentation temps–fréquence se note TFR (*Time–Frequency Representation*) et une représentation temps–échelle TSR (*Time-Scale Representation*). Dans les deux cas, elles réalisent la transformation d'un signal monodimensionnel $x(t)$ en une fonction du temps et de la fréquence (notée $TFR(x;t,\nu)$) ou en une fonction du temps et de l'échelle (notée $TSR(x;t,a)$, a étant ici un facteur d'échelle défini par un rapport de fréquences). Le spectrogramme qui est l'une des méthodes de l'analyse temps-fréquence reste la plus commune et la plus utilisée aujourd'hui, [79]. Néanmoins, le spectrogramme présente un inconvénient majeur sur le plan pratique puisque l'inégalité de Gabor-Heisenberg fait qu'un compromis entre la résolution temporelle et spectrale est inévitable. Pour palier a cet inconvénient d'autres représentations ont été proposées pour les signaux non-stationnaires dont la classe de Cohen et la classe affine [79, 80]. Cependant, le point critique de ces différentes méthodes d'analyse temps-fréquence est leur lisibilité qui implique une bonne concentration sur les composantes recherchées du signal (ou auto-termes) et pas ou très peu de termes d'interférence [81] [82] [83]. Pour une bonne lisibilité dans le plan temps-fréquence, on doit choisir une représentation dont la géométrie est adaptée a la structure du signal et ensuite ses paramètres. Pour cela, certains auteurs proposent de décomposer le signal en ses constituants élémentaires et utiliser la somme des représentations de ses constituants comme représentation temps-fréquence du signal [84] [85] [86]. D'autres auteurs suggèrent une modification de la représentation du signal en utilisant des techniques de traitement d'images. C'était aussi le but de la méthode dite de la fenêtre mobile modifiée et proposée par Kodera, Gendrin, et de Villedary dans les années 80 et concernant le spectrogramme [79]. Cette méthode fut ensuite avantageusement appliquée a la plupart des représentations temps-fréquence ou temps-échelle.

Dans notre cas la variation de la périodicité des périkymaties peut être considérée comme une modulation de fréquence. Il se trouve que l'analyse temps fréquence est bien adaptée à ce type de signaux. En effet, contrairement à l'analyse de Fourier qui nous donne que le contenu spectrale, elle nous donne la même répartition tout en nous indiquant la position de chaque fréquence dans l'axe des temps. Considérons l'exemple du signal de la figure (3.24), ce signal présente bien une variation de sa périodicité. Le spectre, de cette figure, est obtenu à l'aide de la transformée de Fourier, il nous donne bien le contenu spectral mais en aucun la date à laquelle ces fréquences apparaissent dans le temps. L'analyse temps fréquence de cette même figure donne bien la répartition fréquentielle en fonction du temps.

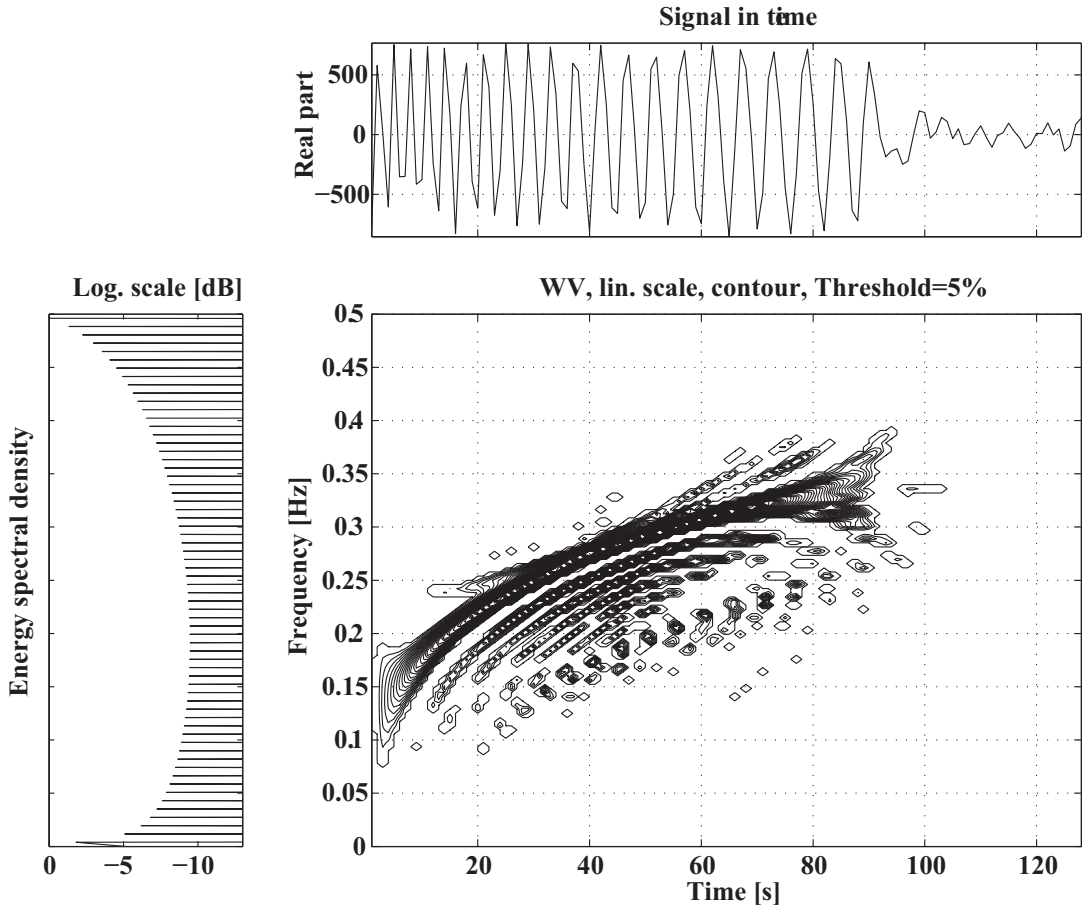


FIGURE 3.24 – Analyse temps fréquence des périkymaties.

Nous allons appliquer ce type d'analyse à la variation de la périodicité des périkymaties des dents (voir figure (3.25)). Rappelons que ce paramètre est d'un grand intérêt pour les anthropologues. Pour cela nous calculons toutes les périodes présentent sur une ligne de l'image des périkymaties et nous analysons à l'aide de la toolbox [80] le contenu temps fréquence de ce signal évidemment ici l'axe des temps est un axe spatial.

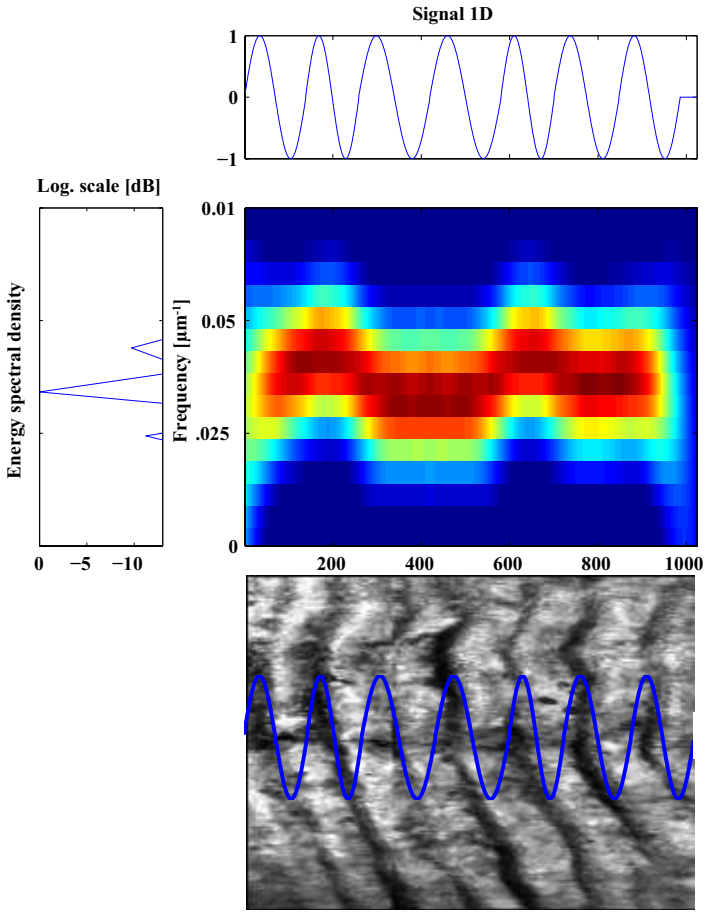


FIGURE 3.25 – Analyse temps fréquence des périkymaties.

3.5 Résultats obtenus

Les figures illustrent les images des dents fossiles, sur lesquelles nous avons fait cette étude.

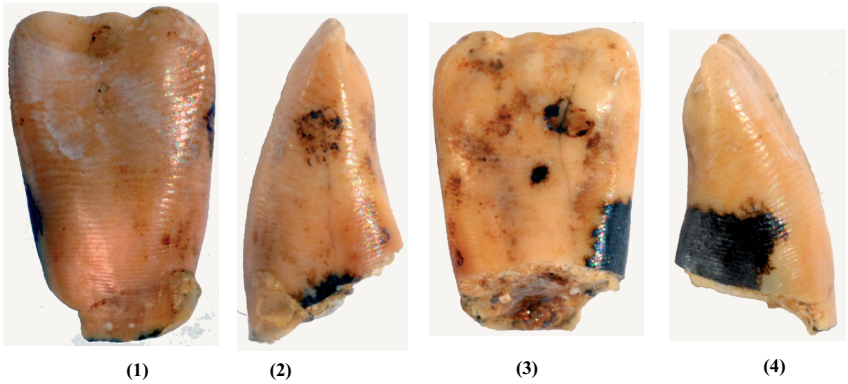


FIGURE 3.26 – L'incisive centrale gauche permanente mandibulaire de KB 5223 (vues 1 à 4), (1) vestibulaire, (2) distale, (3) linguale, (4)mésiale.

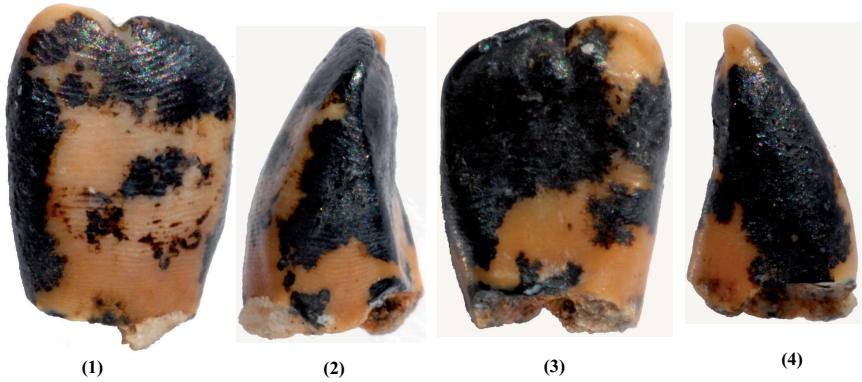


FIGURE 3.27 – L'incisive latérale gauche permanente mandibulaire de KB 5223(vues 1 à 4), (1) vestibulaire, (2) distale, (3) linguale, (4)mésiale.

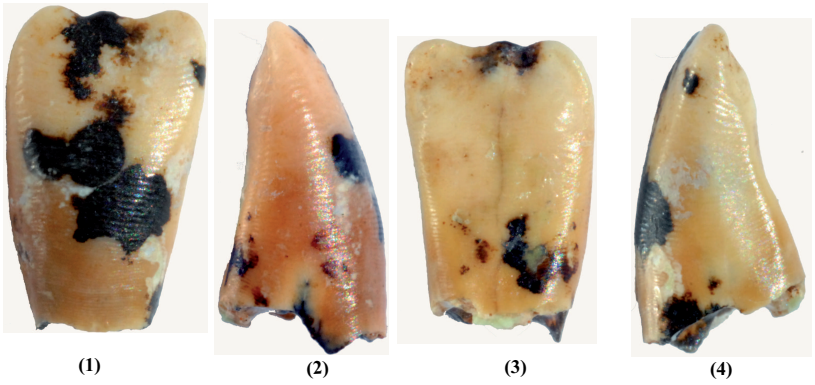


FIGURE 3.28 – L'incisive centrale droite permanente mandibulaire de KB 5223(vues 1 à 4), (1) vestibulaire, (2) distale, (3) linguale, (4)mésiale.

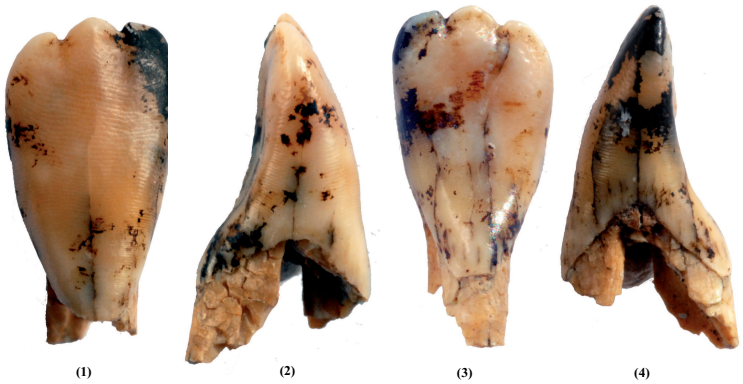


FIGURE 3.29 – L'incisive latérale droite permanente mandibulaire de KB 5223(vues 1 à 4), (1) vestibulaire, (2) distale, (3) linguale, (4)mésiale.

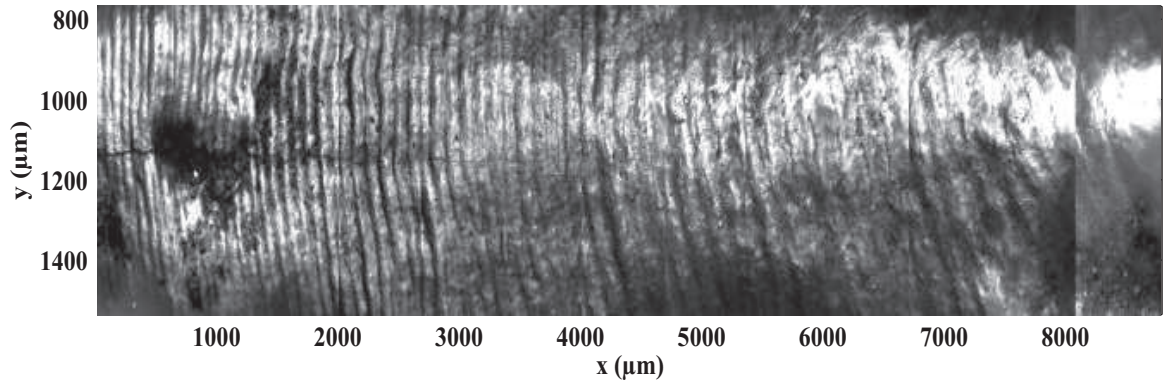


FIGURE 3.30 – Texture de la surface de l'incisive centrale droite permanente mandibulaire de KB 5223, un vestige fossile provenant du site de Kromdraai B (Afrique du Sud). Le nombre total des périkymaties est 88.

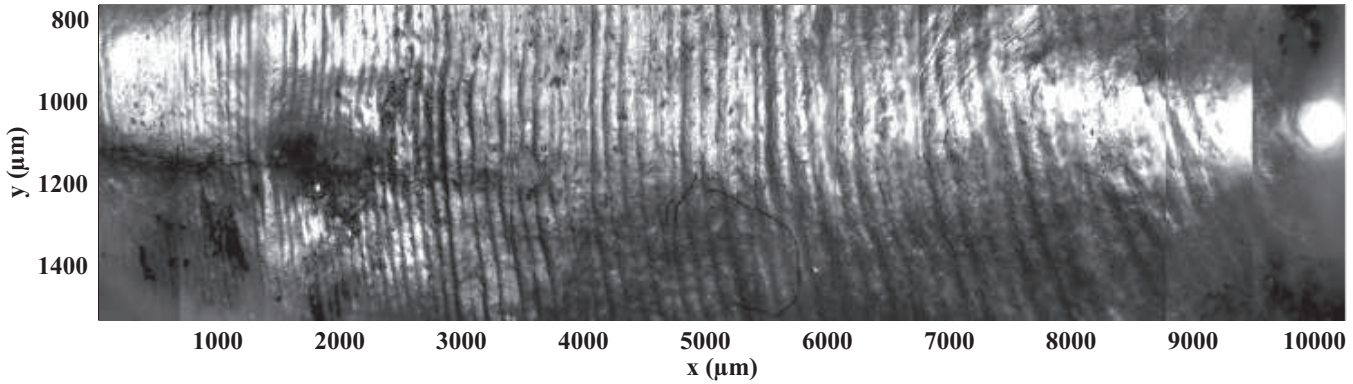


FIGURE 3.31 – Texture de la surface de l'incisive latérale droite permanente mandibulaire de KB 5223, un vestige fossile provenant du site de Kromdraai B (Afrique du Sud). Le nombre total des périkymaties est 97.

3.5.1 La périodicité des périkymaties: un exemple d'application au registre fossile

Depuis les travaux de Bromage et Dean (1985), plusieurs études ont souligné que la périodicité des périkymaties (les auteurs parlent de *perikymata packing pattern*) peut permettre de distinguer les différents groupes (au moins les genres) d'hominidés fossiles. La méthode aujourd'hui utilisée pour mesurer cette périodicité consiste à diviser arbitrairement la hauteur de la couronne en dix segments de même longueur, ou déciles. Pour chaque segment, le nombre de périkymaties est alors dénombré et visualisé sur un graphique. Cette méthode pose différents problèmes au nombre desquels se trouve la reproductibilité intra- et inter-observateurs, la précision du dénombrement des périkymaties, en particulier aux limites des déciles. Le point le plus intéressant à propos de l'identification de vestiges et de leur attribution ou non au genre *Homo*, est lié à la périodicité des périkymaties au collet. En effet, les premiers représentants du genre Homo pourraient se caractériser, par opposition aux représentants, contemporains, du genre *Paranthropus*, ou par rapport à *Australopithecus*, par une périodicité resserrée au collet. Il est aujourd'hui admis que les hominidés Plio-Pléistocène, par comparaison à l'Homme actuel, se caractérisent par un nombre plus faible de périkymaties, pour un même type de dent. Ce nombre plus réduit de périkymaties signifie une durée de croissance de la couronne plus courte. Mais la comparaison ne s'arrête pas là. Encore une fois, le caractère le plus intéressant à observer concerne la périodicité des périkymaties. Cette périodicité nous renseigne sur la variation du rythme de formation de la couronne.
Les résultats publiés à ce jour à propos de l'évolution du nombre de périkymaties par décile, depuis le bord libre de la couronne (au niveau du premier décile), jusqu'au collet (10° décile), soulignent que, chez l'Homme actuel, la périodicité est de plus en plus faible, ce qui indique un ralentissement significatif de la formation de la couronne. Pour des fossiles attribués à *Paranthropus*, le nombre de périkymaties demeure sensiblement constant sur la hauteur de la couronne (et indique ainsi un rythme de formation constant) [6] [7] [14]. Bien entendu, la question de la variabilité, inconnue à ce jour, se pose pour les genres fossiles que nous venons d'évoquer ici. La même question se pose également pour l'espèce humaine actuelle dans la mesure où, quelle que soit la taille des échantillons disponibles à ce jour, la variabilité est immanquablement sous-estimée. Nous allons maintenant aborder un exemple précis d'étude de la périodicité des périkymaties sur un vestige fossile - KB 5223 - récemment examiné en microscopie confocale par Lacruz [27]. Nous avons pu, au cours de notre travail de thèse, utiliser notre système optique sur les vestiges originaux de ce même fossile étudié par Lacruz [27]. Nous sommes donc en mesure, d'une part, de comparer les résultats des deux études, d'autre part, de proposer une discussion et une interprétation de nos observations dans le cadre des données de comparaison disponibles dans la littérature. Notre analyse se limitera aux quatre incisives permanentes décrites pour KB 5223 (Grine 1982; Braga et Thackeray 2003 [28]), ces 4 dents étant considérées jusqu'à présent comme mandibulaires. Seule une incisive de KB 5223 (la latérale, à droite) montre clairement des fragments de la racine formée au niveau du collet voir les figures (3.26, 3.27, 3.28, 3.29). Par contre, la dent pour laquelle Lacruz [27] a compté le nombre de périkymaties (et obtenu le chiffre de 86) présente une couronne incomplète. Il s'agit de l'incisive centrale à droite (pour le côté gauche, l'incisive

centrale comme la latérale montrent également une couronne incomplète). Pour l'incisive centrale droite étudiée par Lacruz, aucune mention précise de la périodicité n'est faite. Cet auteur se contente de préciser, à propos de la périodicité: « *...a pattern of nearly evenly spaced perikymata near the cervix, which appears to be a feature associated with Paranthropus and not with Homo* » (op.cit., p. 180; Figure 5). Cette affirmation est d'emblée surprenante dans la mesure où, nous venons de le souligner comme Grine (1982) l'a également fait, la zone de la couronne la plus proche du collet n'est pas préservée sur cette dent. Quoiqu'il en soit, nous avons obtenu, pour cette couronne, le chiffre de 88 périkymaties, chiffre très voisin de la valeur obtenue par Lacruz [27]ou de celle obtenue par Dean en 2001 [14]. A notre comptage des périkymaties, nous pouvons ajouter une information précise à propos de la périodicité voir figure (3.32).

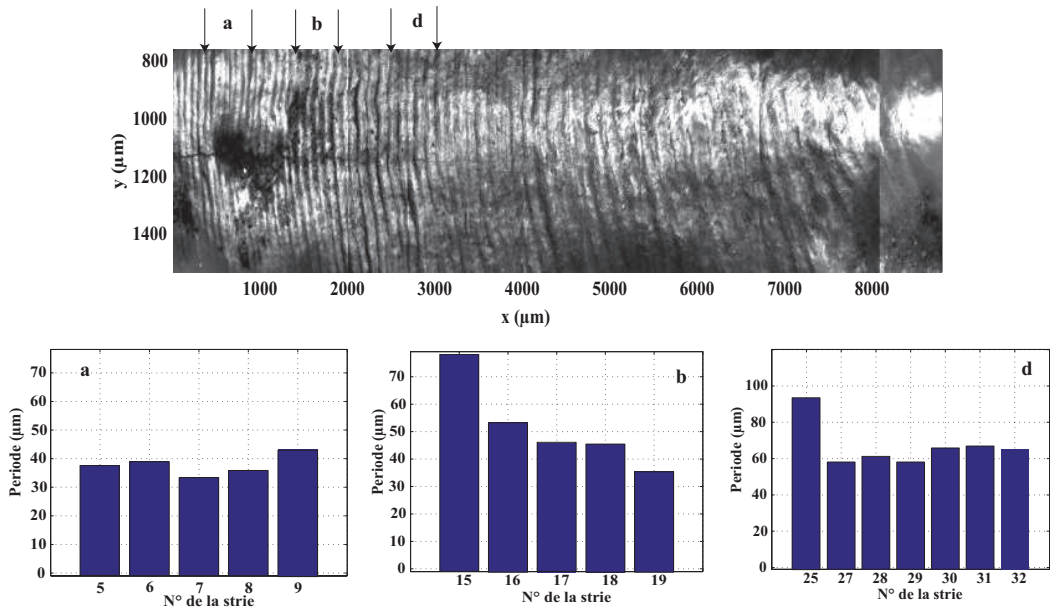


FIGURE 3.32 – Périodicité des périkymaties de l'incisive centrale droite permanente mandibulaire de KB 5223, un vestige fossile provenant du site de Kromdraai B (Afrique du Sud).

Sur cette figure, les périkymaties les plus proches du bord libre (à mi-hauteur de la couronne, stries 25 à 32). Pour cette zone de la couronne, la périodicité oscille entre 59 et 94 microns environ (notons ici la forte variation). Si nous observons maintenant la périodicité pour la zone de la couronne préservée et la plus proche du collet (stries 5 à 9), les valeurs diminuent significativement et oscillent entre 32 et 42 microns environ. Une simple comparaison visuelle des deux histogrammes montre clairement que, depuis la partie moyenne de la couronne en allant en direction du collet, la périodicité est passée d'environ 60 microns à environ 40 microns. Rappelons ici que la zone précise du collet n'est pas préservée. Nous pensons que la précision avec laquelle nous pouvons mesurer la périodicité sur cette dent souligne combien les conclusions de Lacruz méritent d'être discutées. En effet, contrairement à ses affirmations, notre méthode montrent clairement un resserrement de la périodicité sur cette dent en direction du collet. D'une manière générale, il semble donc indispensable d'appliquer cette méthode non seulement

aux autres dents de KB 5223 mais aussi à toute autre dent fossile mesurable. Une incisive de KB 5223 mérite un peu plus d'attention. Il s'agit de celle pour laquelle la région du collet est bien visible et donc bien mesurable. Pour cette dent, l'incisive latérale droite, nous avons décompté 97 périkymaties, soit 11 de plus que la centrale du même côté. A ce comptage des périkymaties, ajoutons quelques éléments à propos de la périodicité voir figure(3.33).

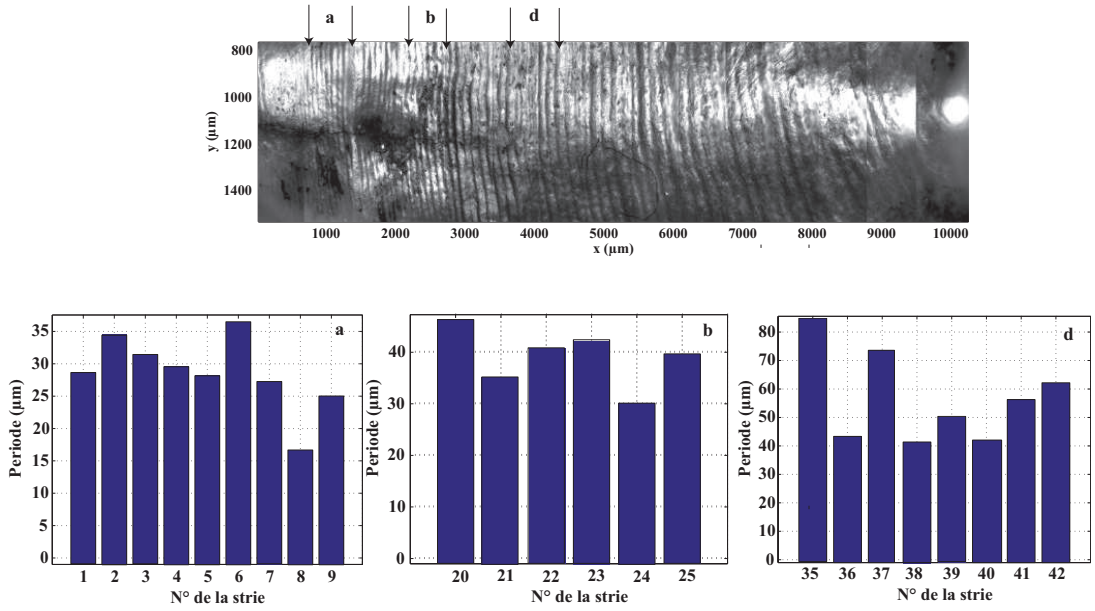


FIGURE 3.33 – Périodicité des périkymaties de l'incisive latérale droite permanente mandibulaire de KB 5223, un vestige fossile provenant du site de Kromdraai B (Afrique du Sud).

Sur cette figure, les périkymaties les plus proches du bord libre (à mi-hauteur de la couronne, stries 35 à 42). Pour cette zone de la couronne, la périodicité oscille entre 42 et 84 microns environ (notons encore ici la forte variation). Si nous observons maintenant la périodicité pour la zone du collet (stries 1 à 9), les valeurs diminuent significativement et oscillent entre 17 et 37 microns environ. Encore une fois, une simple comparaison visuelle des deux histogrammes montre clairement que, depuis la partie moyenne de la couronne en allant en direction du collet, la périodicité est passée d'environ 50 microns à environ 30 microns. Comme pour l'incisive centrale, la périodicité a donc nettement diminué entre la partie moyenne de la dent et la zone du collet.
Pour conclure cette application à une denture incomplète de fossile - KB 5223 - nous pouvons souligner ici différents points. Tout d'abord, notre méthode permet d'obtenir des résultats fiables dans la mesure où ils sont très proches de ceux obtenus par d'autres auteurs sur le même fossile. Bien entendu, la validation de notre système devra se faire par d'autres observations sur des fossiles déjà mesurés. Ajoutons ici que notre décompte des périkymaties est totalement automatique et particulièrement rapide. Ensuite, nous l'observons à la lecture de l'article de Lacruz [27], la périodicité pour des dents fossiles, est aujourd'hui discutée de manière très peu précise. En effet, les travaux de Hillson et Bond en 1997 [39] [87] ont parfaitement défini les variations de cette périodicité chez l'Homme actuel.

Elle s'exprime en microns et varie d'une zone à l'autre de la couronne. Notre système permet de donner des valeurs exprimées en microns et donc comparables à celles disponibles dans la littérature. Nos valeurs obtenues pour KB 5223 dans la zone cervicale de la couronne sont très proches de celles connue pour l'Homme actuel et pour cette même zone. En ce qui concerne le genre *Paranthropus*, les données sont le plus souvent exprimées en déciles et il est donc difficile de comparer nos résultats à ces données. Néanmoins, si nous observons, par exemple, la figure 1 donnée par Dean et Reid en 2001 [14], il semble clair que la périodicité des périkymaties de la zone cervicale et pour le genre *Paranthropus*, ne soit guère inférieure à environ (notre lecture de cette figure est graphique) 10 périkymaties par mm, soit 100 microns. Cette périodicité chez *Paranthropus* est, nous venons de le voir, très supérieure à celle que nous mesurons, à la fois pour l'incisive centrale et latérale, dans la zone cervicale de la couronne : environ 50 microns. Notre dernière remarque concerne la variabilité de la périodicité. Cette périodicité n'est que, très partiellement connue chez l'Homme actuel et pourrait chevaucher celle observée chez les Hominidés fossiles. Il serait néanmoins nécessaire de le vérifier par des mesures sur un très large échantillon de sujets actuels. Nous pensons que, compte tenu de sa facilité d'utilisation, de son caractère automatique et de sa capacité à restituer rapidement le nombre et la périodicité des périkymaties, notre système optique peut permettre de caractériser, pour la première fois, la variabilité chez l'Homme actuel. Il s'agit ici d'un préalable indispensable avant toute analyse complémentaire des vestiges fossiles.

3.6 Mesure des périkymaties de la dent par d'autres méthodes

Afin de valider les résultats obtenus nous avons effectué des mesures sur la même dent et par plusieurs techniques :

- Microscopie à force atomique,
- Profilomètre optique,
- Microscope à balayage électronique.

Pour les deux dernières techniques, nous avons métallisé la surface de la dent analysée.

3.6.1 La microscopie à force atomique AFM

L'analyse des microstructures de la dent à l'aide de la microscopie à force atomique nous permet d'obtenir la micro-rugosité sur la couronne de la dent, l'image des périkymaties, le profil $3D$ du relief des périkymaties de la dent, nous pouvons ainsi déterminer leur profondeur et leur périodicité.
Comme le microscope à effet tunnel, le microscope à force atomique (*atomic force microscope*: AFM, ou scanning force microscope: SFM) a pour élément de base une pointe dont l'extrémité est de dimension nanométrique. Cette pointe balaye la surface à examiner à une distance suffisamment proche pour que la force entre la pointe et l'échantillon, ou son gradient, puisse servir de moyen d'asservissement. Dans le mode d'opération de contact, par exemple, on impose une force constante pendant le balayage en faisant varier la distance entre la pointe et l'échantillon.

La tension à fournir au piézo-céramique pour faire varier cette distance est alors enregistrée et fournit ainsi une image qui peut être associée à la topographie. Dans le mode tapping [88] [89], la pointe oscille à la fréquence de résonance du micro-levier mais, contrairement au mode résonnant, elle entre en contact de façon discontinue avec la surface en la « tapottant ». La majeure partie du temps la pointe ne touche pas la surface et dans ces conditions le passage d'un point à un autre s'effectue sans qu'il y ait d'effet de torsion du micro-levier. L'effet de friction disparaît complètement et il est alors possible d'examiner les échantillons mous en évitant leur détérioration causée par le frottement de la pointe. D'excellentes images de polymères ou d'échantillons biologiques ont pu être obtenues grâce à ce mode de fonctionnement [90] [91] [88] .

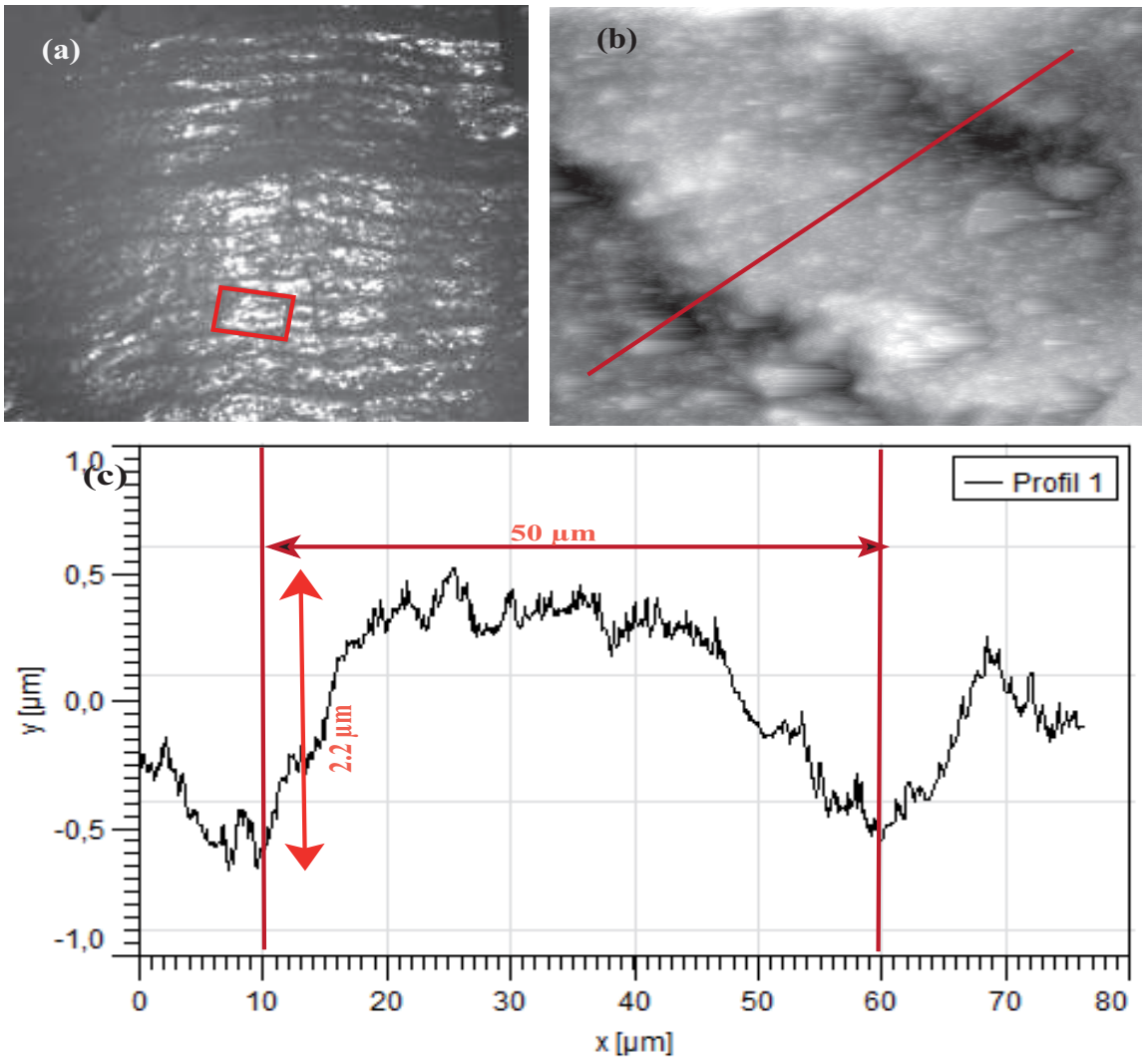


FIGURE 3.34 – Micro-rugosité sur la couronne.(a) Image des périkymaties, (b) profil $3D$ de la zone sélectionnée dans (a), (c) profil du segment sur la figure(b).

Nous avons mesuré à l'aide du microscope à force atomique sous le mode « tapping », la micro-rugosité sur la couronne de la dent, le profil $3D$ de relief des périkymaties de la dent, de déterminer la profondeur et la périodicité des périkymaties voir les figures (3.34, 3.35).

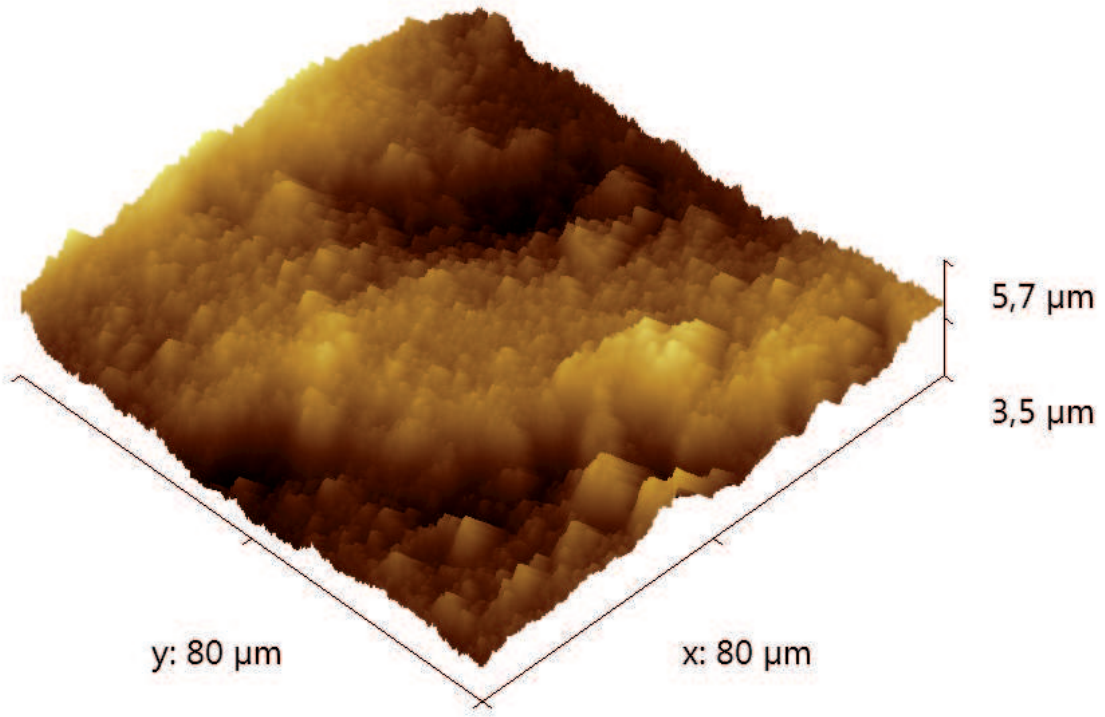


FIGURE 3.35 – Image 3D des périkymaties de la dent obtenu par AFM.

Comme nous le constatons le microscope à force atomique, nous donne sans doute la meilleure résolution pour la mesure des périkymaties, il ne nous permet pas cependant une vue globale de ces périkymaties et ce n'est certainement pas un outil adapté pour une étude sur toute la couronne. Néanmoins, cette mesure nous a permis de vérifier nos résultats. Elle nous confirme que le système optique que nous avons développé présente une très bonne résolution.

3.6.2 Profilomètre optique

Pour obtenir une image du profil de la dent à l'aide d'un profilomètre optique nous avons métallisé notre échantillon. La mesure des périkymaties à l'aide de la profilomètre optique nous permet d'obtenir:

- la micro-rugosité sur la couronne de la dent voir la figure (3.36),
- l'image des périkymaties voir les figures(3.36, 3.37),
- le profil $3D$ de relief de ces périkymaties voir la figure (3.37).

Cette méthode, permet d'estimer le nombre de périkymaties, de déterminer la profondeur et la périodicité de ces périkymaties sur un champ d'observation de $600 \times 600\ \mu m^2$.

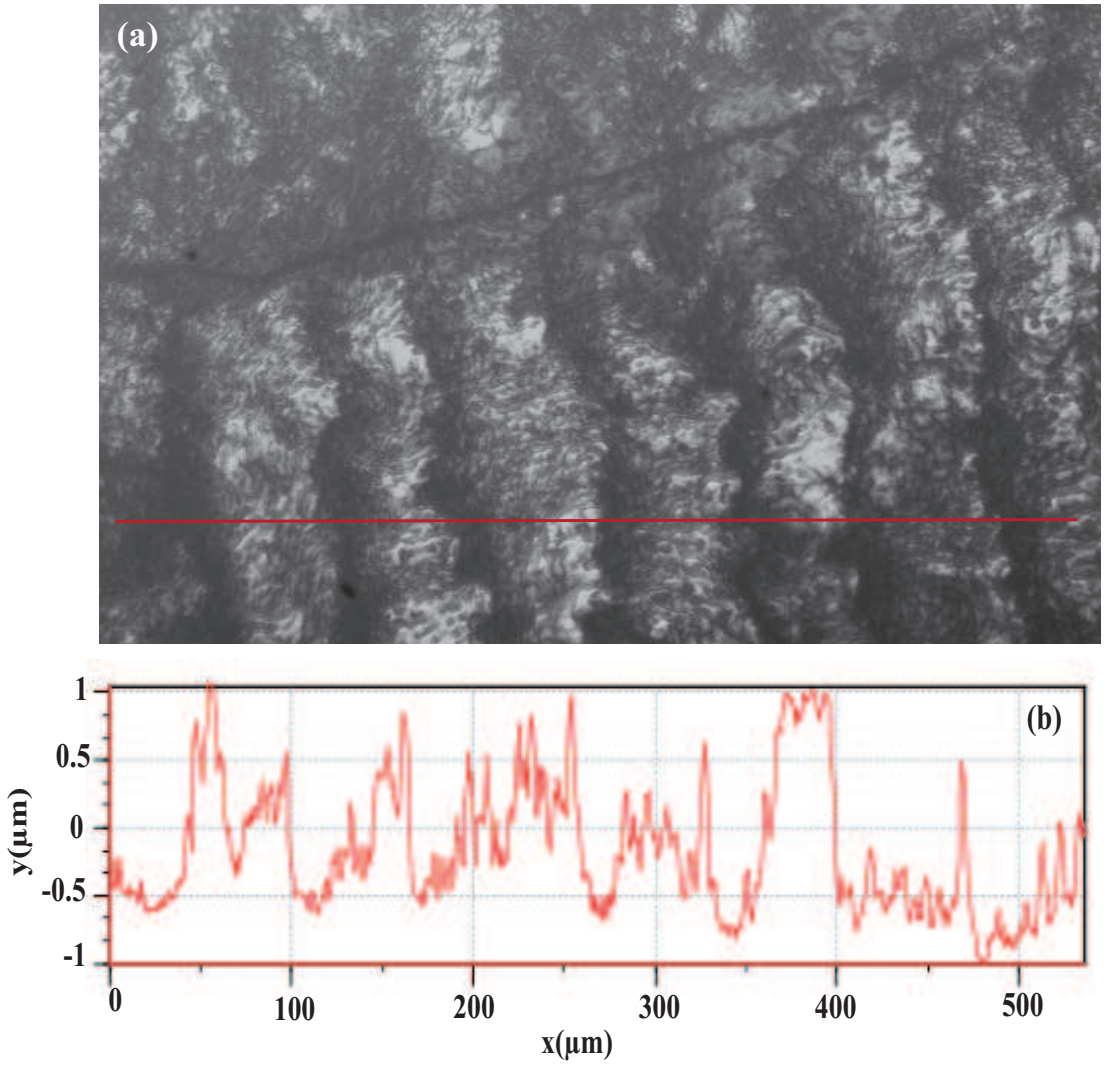


FIGURE 3.36 – Micro-rugosité sur la couronne.(a) Image des périkymaties, (c) profil du segment sur la figure(a).

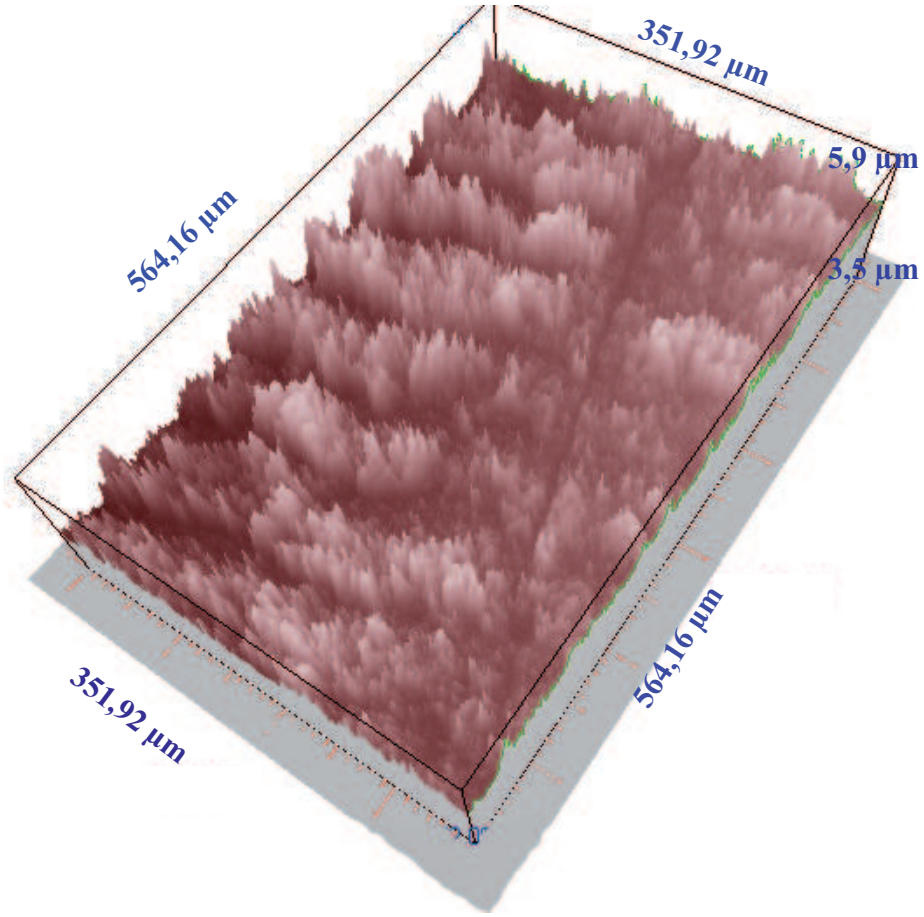


FIGURE 3.37 – Image 3D des périkymaties de la dent obtenu par un profilomètre optique.

L'inconvénient de cette méthode est, tout d'abord, les difficultés de la mesure des profils $3D$ à cause de la diffusion et de la rétro-diffusion de la lumière par la dent lorsqu'elle n'est pas métallisée. Le temps de mesure est très long (3 à 4 heures pour l'ensemble de la dent). Cette méthode n'offre pas une solution à la mesure des périkymaties, mais nous a permis de vérifier nos résultats. Elle nous confirme la pertinence de notre système optique pour la mesure des périkymaties. Ce système optique peut permettre de caractériser, pour la première fois, la variabilité chez l'Homme actuel.

3.6.3 Microscope électronique à balayage (MEB)

L'analyse des périkymaties à l'aide de la microscope électronique à balayage nous fourni des informations sur l'émail, sur la durée de formation de la couronne. Les décomptes des périkymaties à partir des photos prises au MEB ne sont pas précis car l'observation des périkymaties dépend de l'incidence de la lumière et, étant donné la surface irrégulière de l'émail, les photos au MEB ne permettent de voir que quelques périkymaties à la fois [11] [8,9]. Pour obtenir une image des périkymaties de la couronne de la dent à l'aide de la microscope électronique à balayage MEB nous avons métallisé notre échantillon voir les figures(3.38, 3.39).

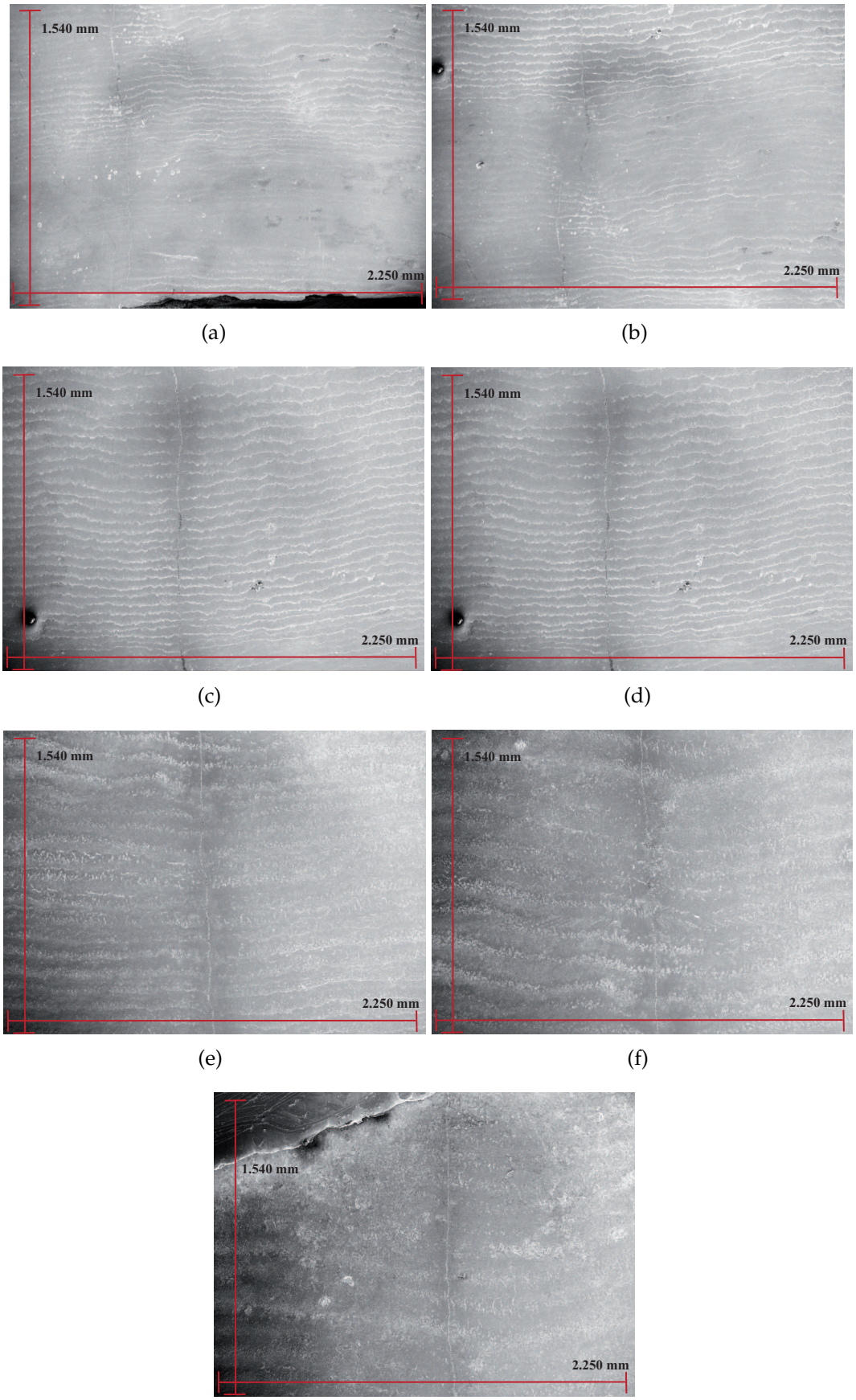


FIGURE 3.38 – Images des périkymaties de la couronne dentaire obtenues à l'aide d'un microscope électronique à balayage ($50X$ grossissement).

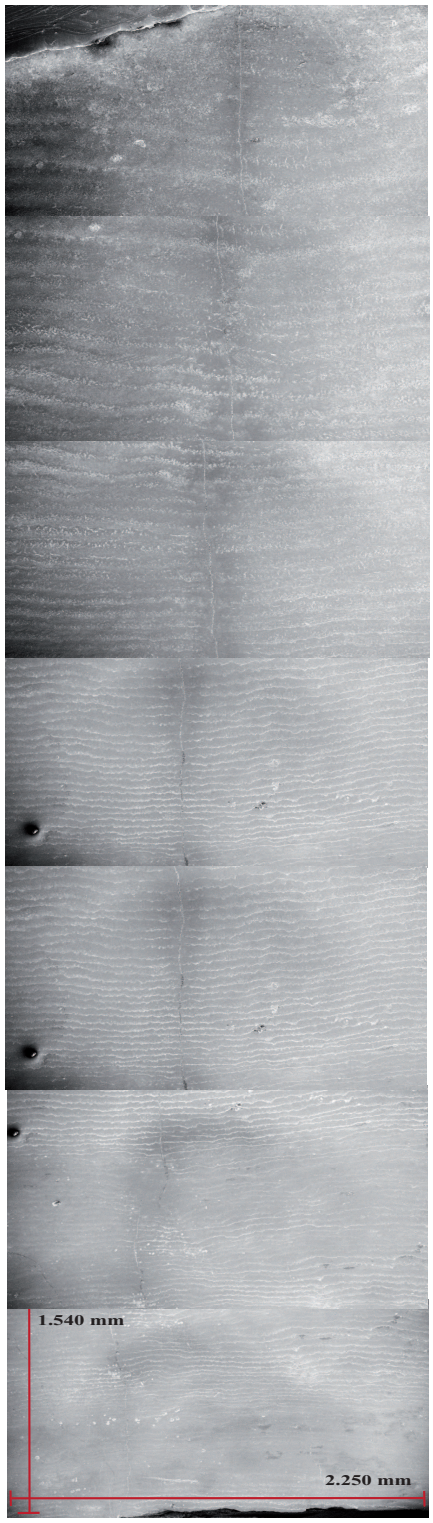


FIGURE 3.39 – Assemblage des images des périkymaties de la couronne dentaire de la figure (3.38), les périkymaties peuvent être observées sur la totalité de la couronne.

3.7 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons démontré la faisabilité et la pertinence du système optique que nous avons réalisé pour la mesure des périkymaties de la dent. Pour mesurer la texture de la dent nous avons été amené à mesurer son profil $2D$ selon une ligne qui va du collet de la couronne vers le bord libre de la couronne. Ce profil $2D$ nous permet de déterminer le plan moyen d'une région de la dent pour réaliser l'asservissement de la position (par rapport à la surface de la dent) de l'objectif de microscope qui réalise l'observation de la texture. C'est par rapport à la normale de ce plan moyen, que nous allons définir la position de l'illumination et de l'observation. Bien sur les choix des angles ne sont pas quelconques, ils ont été discutés dans le chapitre précédent. La résolution de la mesure de la texture dépend de l'échantillonnage du profil $2D$. L'échantillonnage correspond à la distance sur le profil $2D$ sur lequel nous avons défini le plan moyen. Pour une mesure optimale de la texture nous avons retenu $300\ \mu m$.

Associé à des algorithmes de traitement d'images et de commande des moteurs de positionnement nous avons pu proposer une réponse au problème posé: comptage des périkymaties et détermination de leur périodicité.

C'est à la lecture des résultats que nous avons obtenus, sur des dents du registre des fossiles, largement étudiés dans la littérature que nous pouvons parler de pertinence. Notre approche permet de mesurer la variabilité de la périodicité des périkymaties, rappelons que cette périodicité n'est que, très partiellement connue chez l'Homme actuel et pourrait chevaucher celle observée chez les Hominidés fossiles. Notre outil offre alors un outil objectif pour un classement des Hominidés.

Sur un plan purement de la métrologie nos résultats (période des périkymaties) ont été confirmés par les mesures AFM et des mesures d'un profilomètre optiques, que nous avons effectuées.

IV

Conclusion générale

Conclusion

L'objectif de cette thèse était de concevoir et de réaliser un système optique pour la mesure et l'analyse des périkymaties de la couronne dentaire. L'intérêt principal est de proposer un système non invasif pour la mise en évidence des périkymaties, utiliser, tester et évaluer la qualité d'une méthode de comptage des périkymaties, le but étant la détermination de la périodicité des périkymaties, pour un classement des Hominidés.

Nous avons tout d'abord caractérisé le plus complètement possible les périkymaties à l'aide de la profilométrie optique. Cette technique nous a permis en effet de déterminer le profil $3D$ des périkymaties. Elles présentent une périodicité de 40 à 100 μm et une hauteur de quelques microns. Cependant la profilométrie optique ne peut pas constituer un outil pour l'étude des périkymaties: la texture, le comportement optique de la dent (diffusion de la lumière) ne permettent pas d'effectuer, dans un délai raisonnable, des mesures sur des zones adjacentes sur toute la longueur de la dent. Comme nous l'avons vu au premier chapitre, la mesure des périkymaties à l'aide de la microscopie électronique, de la microscopie confocale ou de la profilométrie optique nécessite un équipement très lourd et très coûteux. Ces techniques sont très longues en terme d'acquisition de données et de temps de traitement. La microscopie confocale donne des mesures très pertinentes. Pour pallier les inconvénients de ces techniques, nous avons considéré les périkymaties comme la texture de la couronne de la dent. Dans cette hypothèse, deux grandeurs permettent d'exprimer la manière dont la lumière est réfléchie par une surface: la réflectance bidirectionnelle (BRDF) et la fonction bidirectionnelle de la texture (BTF). Il se trouve que notre problème est plus complexe que l'étude d'une texture sur une surface plane car les autres constituants de la texture de la dent (rugosité ...) lorsqu'ils sont mis en évidence à l'aide de ces deux fonctions se comportent comme un bruit qui masque l'information recherchée. Le caractère pseudo-périodique des périkymaties nous a permis de s'appuyer sur l'ombre de cette structure pour les mettre en évidence. Nous avons élaboré deux approches pour l'observation et la mesure de ces stries. La première consiste en l'enregistrement d'une zone de 2×1.5 mm^2 d'une région de la couronne de la dent en faisant varier l'angle d'illumination et l'angle de l'observation. Nous avons conçu un système optique répondant aux critères de cette première ap-

proche. Nous avons obtenu de très bons résultats pour la mise en évidence des périkymaties et pour l'observation de la rugosité liée a la nature de l'alimentation. L'utilisation de l'instrumentation que nous avons mise au point exige une bonne expertise en optique et en mesures de la texture d'une surface. Cet inconvénient majeur nous a conduit à rechercher une solution où la mesure est complètement automatisée. C'est ce qui constitue la deuxième approche. Nous mesurons alors le profil $2D$ de la couronne de la dent: mesure de la hauteur z de la couronne le long d'une ligne qui rejoint le bord libre jusqu'au collet. La résolution sur la mesure de ce profil est au mieux égale à la profondeur de champ de l'objectif de microscope utilisé, dans notre cas $20\ \mu m$. Une fois ce profil enregistré, nous définissons le plan moyen d'une zone, qui correspond à la résolution spatiale souhaitée selon la ligne du profil $2D$. Ce plan moyen nous a permis de placer la source d'illumination et le système d'observation selon la direction spéculaire présentant une ombre qui augmente le contraste pour l'enregistrement des périkymaties. Nos résultats sont excellents. Des algorithmes de traitement d'images associés à cette instrumentation optique nous ont permis d'atteindre nos objectifs: comptage des périkymaties et quantification de la variabilité de leur périodicité. Le temps de mesure d'une dent est de dix minutes, ce qui constitue l'efficacité de notre méthode. Elle pourra sans doute permettre le classement des Hominidés.

Limites

Nous avons fait le choix de concevoir un prototype pour la mesure des périkymaties en s'appuyant sur la deuxième approche. Les limites de notre approche concernent la définition du plan horizontal, comme le plan de référence sur lequel tous les profils des zones mesurées ont été projetés pour donner une image des périkymaties sur toute la dent. Cette stratégie dégrade la répétabilité de notre mesure. En effet, il faut que la dent soit positionnée sous la tête de mesure dans les mêmes conditions d'orientation que la mesure précédente pour obtenir le même résultat. En pratique nous avons conçu un support pour chaque dent mesurée.

Perspectives

Les principales perspectives de recherche qui apparaissent à l'issue de cette thèse concernent tout d'abord la redéfinition de notre plan de référence qui devrait être le plan moyen de la couronne de la dent. Pour cela nous devons définir n lignes de mesure du profil $2D$ afin de mieux déterminer le plan moyen qui fera office de plan de référence.

Ainsi, la répétabilité d'une mesure sera mieux assurée. Nous ne devons pas oublier que ce choix rendra plus complexe l'instrumentation; nous aurons en effet recours à l'utilisation de deux moteurs de rotation pour mesurer les plans moyens de chaque coté du profil $2D$ central. Cela aura pour conséquence aussi d'augmenter sensiblement le temps de la mesure.

En conclusion, et au vu des résultats que nous avons obtenus sur des dents du registre des fossiles, largement étudiés dans la littérature, nous pouvons souligner la pertinence de notre approche. Le système optique que nous avons de-

veloppé permet de mesurer la variabilité de la periodicité des périkymaties, rappelons que cette périodicité n'est que, très partiellement connue chez l'Homme actuel et pourrait chevaucher celle observée chez les Hominidés fossiles. Notre outil offre alors un outil objectif pour un classement des Hominidés.

Résume

L'étude du développement physiologique humain et de sa variabilité a toujours été au centre des préoccupations non seulement des anthropo-biologistes, mais également des médecins légistes, des dentistes, orthodontistes et des pédiatres. Les attentes de la société dans ce domaine de l'identification biométrique ont évolué. Désormais, la qualité des identifications ne se présume plus. Elle doit être définie, évaluée, prouvée et, au-delà, constamment améliorée. L'objectif de cette thèse était de concevoir et de réaliser un système optique pour la mesure et l'analyse des périkymaties de la couronne de la dent. L'intérêt principal est de proposer un système non invasif pour la mise en évidence des périkymaties, utiliser, tester et évaluer la qualité d'une méthode de comptage des périkymaties. Le but étant la détermination de la périodicité des périkymaties, pour un classement des Hominidés. En s'appuyant sur les théories optiques : la réflectance bidirectionnelle (BRDF) et la fonction bidirectionnelle de la texture (BTF), nous avons conçu et réalisé un système optique qui répond à tous ces critères. Au vu des résultats que nous avons obtenus sur des dents du registre des fossiles, largement étudiés dans la littérature, nous pouvons souligner la pertinence de notre approche. En effet, les résultats de nos mesures ont démontré pour la première fois la variabilité chez l'Homme actuel. Le système optique que nous avons développé permet aussi de mesurer la variabilité de la périodicité des périkymaties, rappelons que cette périodicité n'est que, très partiellement connue chez l'Homme actuel et pourrait chevaucher celle observée chez les Hominidés fossiles. Notre outil offre alors un outil objectif pour un classement des Hominidés.

Mots clés: BTF, BRDF, Dent, émail, périkymaties, Kromdraai, Hominidés, Homo.

Abstract

This optical system was developed to measure the microscopic features of tooth surfaces. It has wide potential application in the field of forensics and biological anthropology (human fossils, archaeological skeletons), but it is currently being used to measure perikymata on the surface of ancient human tooth crowns and program was developed to analyses the results. Dental tissues provide important insights into aspects of hominids palæobiology that are otherwise difficult to obtain from studies of the bony skeleton. Tooth enamel is formed by ameloblasts, which demonstrate daily secretory rhythms developing tissue-specific structures known as cross striations, and longer period markings called striae of Retzius. Using newly developed optical instrumentation associated with microsystems, we can now record automatically precisely and accurately the periodicity of perikymata on the cuspal and cervical parts of the dental crown. Our device can be used to characterize the variability in periodicity of perikymata in hominids. One way to extend the depth of field of any optical system is to take several images with different focus positions and combine them into a single composite image, which contains all regions fully focused.

Key Words BTF, BRDF, Teeth, enamel, Perikymata, Kromdraai, Hominid, Homo.

Bibliographie

REFERENCES

[1] http://www.elysee.fr/elysee/elysee.fr/francais/salle_de_presse/communiques_du_conseil_des_ministres/2003/mars/communique_du_conseil_des_ministres_du_05_03_2003.3740.html

[2] http://www.jrc.es/home/pages/detail.cfm?prs=1235

[3] G. T. Schwartz, D. J. Reid, and M. Dean, "Development aspect, of sexual dimorphisme in hominid canines," In J Primatal **22**, 837–860 (2001).

[4] T. M. Smith, P. Tafforeau, and D. J. Reid, "Earliest evidence of modern human life history in North African early Homo sapiens," Parc Natl Acad Sci **104**, 6128–6133 (2007).

[5] T. M. Smith, D. J. Reid, M. Dean, A. J. Olejniczak, and L. B. Martin, "Molar development in common chimpanzees Pantrogeodytes," Human **52**, 201–216 (2007).

[6] M. C. Dean, "Variation in the developing root cone angle of the permanent mandibular teeth of modern man and certain fossil hominids." American Journal of physical Anthropology **68**, 233–238 (1985).

[7] M. C. Dean, "Progress in understanding hominoid dental development." American Journal of physical Anthropology **197**, 77–101 (2000).

[8] I. E. Barnes, "Replication techniques for the scanning electron microscope 1. History, material and techniques," Journal of Dentistry **6**, 327–341 (1978).

[9] I. E. Barnes, "Replication techniques for the scanning electron microscope 2. Clinical and laboratory procedures: interpretation," Journal of Dentistry **7**, 25 – 37 (1979).

[10] F. V. R. Rozzi, "Dental development in Plio-Pleistocene hominids Enamel extenxion rate in fossil hominids," Académie des sciences pp. 293–296 (1997).

[11] F. V. R. Rozzi, "Enamel structure and development and its application in hominid evolution and taxonomy," Journal of Human Evolution **35**, 327–330 (1998).

[12] F. V. R. Rozzi, "Can enamel microstructure be used toestablish the presence of different species of Plio-Pleistocene hominids from Omo, Ethiopia?" Journal of Human Evolution **35**, 543–576 (1998).

[13] M. C. Dean and R. P. Shellis, "Observations on stria morphology in the lateral enamel of Pongo, Hylobates and Proconsul teeth," Journal of Human Evolution **35**, 401–410 (1998).

[14] M. C. Dean and D. Reid, "Perikymata Spacing and Distribution on Hominid Anterior Teeth," American Journal of Physical Anthropology **116**, 209–215 (2001).

[15] F. J. Williams, F. R. Hudson, and A. F. Markus, "Rotational panoramic radiography: a comparison radiation doses in the standard and reverse positions," The British Journal of radiology **59**, 1219–1223 (1986).

[16] R. S. Truhlar, H. F. Morris, and S. Ochi, "A review of panoramic radiography and its potential use in implant dentistry," Implant dentistry **2**, 122–130 (1993).

[17] Lumley, "Anténéandertaliens et Néandertaliens du bassin méditerranéen occidental européen, Études Quaternaires 2," Université de Provence, Marseille (1973).

[18] A. D. Beynon, C. B. Clayton, V. F. R. Rozzi, and J. D. Reid, "Radiographic and histological methodologies in estimating the chronology of crown development in modern humans and great apes: a review, with some applications for studies on juvenile hominids," Journal of Human Evolution **35**, 351–370 (1998).

[19] J. Granat and J. L. Heim, "New method to estimate Neanderthal's dental age," Éditions scientifiques et médicales Elsevier SAS **107**, 171–202 (2003).

[20] F. V. R. Rozzi, "Microstructure et développement de l'érnail dentaire du néandertalien de Zafartaya, Espagne. Temps de forrnation et hypocalcification de l'émail dentaire," Académidee des sciences **316**, 1635–1642 (1993).

[21] F. V. R. Rozzi, "Le deéveloppement debtaire des hominidés pliopléistocénes." bulletins et Mémoires de la société d'Anthropologie de Paris **5**, 131–142 (1993).

[22] F. V. R. Rozzi, "Taxonomic differentiation of plio-pleistocene hominids from enamel microstructure," Am. J. Phys. Anthropol. **18**, 164–165 (1994).

[23] T. F. Watson, "A Confocal Optical Microscope Study of the Morphology of the Tooth/Restoration Interface using Scotchbond 2 Dentin Adhesive," J Dent Res **68**, 1124–1131 (1989).

[24] T. G. Bromage, H. M. Goldman, S. C. Mcfarlin, A. P. Ochoa, and A. Boyde, "Confocal Scanning Optical Microscopy of a 3 Million-Year-Old Australopithecus afarensis Femur," Wiley Periodicals, Inc. **31**, 1–10 (2009).

[25] T. Wilson, Confocal Microscopy (Academic Press, 1990).

[26] R. S. Lacruz and T. G. Bromage, "Blackwell Publishing Ltd Appositional enamel growth in molars of South African fossil hominids," Anatomical Society of Great Britain and Ireland **209**, 13–20 (2006).

[27] R. S. Lacruz, "Enamel Microstructure of the Hominid KB 5223 From Kromdraai, South Africa," American Journal of Physical Anthropology **132**, 175–182 (2007).

[28] J. Braga and J. F. Thackeray, "Early Homo at Kromdraai B: probabilistic and morphological analysis of the lower dentition," Comptes Rendus Palevol **2**, 269–279 (2003).

[29] M. Chikh-Bled, F. Benkhenafou, P. Sandoz, R. Devillers, and G. Tribillon., "Surfométrie appliquée à la la caractérisation des matériaux," Matériaux & Techniques **10**, 15–22 (2004).

[30] P. Sandoz and G. Tribillon, "Profilometry by zero-order interference fringe identification," J. of Modern Optics **42** (1993).

[31] L. Deck and P. Groot, "High-speed noncontact profiler based on scanning white-light interferometry," Applied Optics **31**, 7334–7338 (1994).

[32] H. Perrin, P. Sandoz, and G. Tribillon, "High resolution profilometry by using phase calculation algorithms for spectroscopic analysis of white light interferograms," J. of Modern Optics **43**, 701–708 (1996).

[33] P. Sandoz, "An algorithm for profilometry by white-light phaseshifting interferometry," J. of Modern Optics **43**, 1545–1554 (1996).

[34] K. G. Larkin, "Efficient non linear algorithm for envelope detection in white light interferometry," Optical Society of America **13** (1996).

[35] S. W. Hillson and B. K. Jones, "Instruments for measuring surface profiles: An application in the study of ancient Human tooth crown surfaces," Journal of Anthropological Science **16**, 95–105 (1989).

[36] M. Yuan, "Perikymata counts in two modern human sample populations," Ph.D. Dissertation, Columbia University New York (2000).

[37] J. Braga and Y. Heuze, "Quantifying variation in human dental development sequences: An EVO-DEVO perspective," Dental Perspectives on Human Evolution pp. 247–261 (2007).

[38] A. Boyde, "Scanning electron microscopy studies of the completed enamen surface. In RW Fearnhead and MV Steack (eds): Tooth Enamel II. Its Composition, Properties, and Fundamental Structure," Bristol: johon Wright pp. 39–42 (1971).

[39] S. Hillson and S. Bond, "Relationship of enamel hypoplasia to the pattern of tooth crown growth: A discussion," American Journal of Physical Anthropology **104**, 89–103 (1997).

[40] M. Oren and S. K. Nayar, "Generalization of the Lambertian model and implications for machine vision," Iternational Journal of Computer Vision **14**, 227–251 (1995).

[41] L. B. Wolff, "A Diffuse Reflectance Model for Smooth Dielectrics," Jounrnal of the Optical Society of America A - Special Issue on Physics Based Machine Vision **11**, 2956–2968 (1994).

[42] B. Cabral, N. Max, and R. Springmeyer, "Bidirectional reflection functions from surface bump maps," Computer Graphics (SIGGRAPH 87 Proc.) **21(4)**, 273–281 (1987).

[43] M. Ashikhmin and P. Shirley, "An anisotropic phong brdf mode," Journal of Graphics Tools **5** (2000).

[44] S. K. Nayar, K. I. keuchi, and T. Kanade, "Surface Reflection: Physical and Geometrical Perspectives," IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence **13**, 611–634 (1991).

[45] S. H. Westin, J. R. Arvo, and K. E. Torrance, "Predicting reflectance functions from complex surfaces," Laboratoria Aerometodov **26**, 255–264 (1992).

[46] D. K. McAllister, A. Lastra, and W. Heidrich, "Efficient rendering of spatial bidirectional reflectance distribution functions," Eurographics Association pp. 79–88 (2002).

[47] K. J. Dana, B. V. Ginneken, S. K. Nayar, and J. J. Koenderin, "Reflectance and texture of real-world surfaces," J-TOG **18**, 1–34 (1999).

[48] J. H. Lambert, "Photometria sive de mensura de gratibus luminis, colorum et umbrae," Augsburg, Eberhard Klett (1760).

[49] B. T. Phong, "Illumination for computer generated pictures," CACM **18**, 311–317 (1975).

[50] L. Wang and G. Healey, "Illumination and geometry invariant recognition of texture in color images," IEEE Conference on CVPR pp. 419–424 (1996).

[51] J. Oliensis and P. Dupuis, "A global algorithm for shape from shading," In Proceedings of ICCV **93**, 692–701 (1993).

[52] R. Kimmel and A. M. Bruckstein, "Global shape-fromshading," CVGIP : Image Understanding pp. 360–369 (1995).

[53] T. Okatani and K. Deguchi, "On classification of singular points for global shape from shading. In Proceedings of the 3rd Asian Conference on Computer Vision," Hong Kong **1351**, 48–55 (1998).

[54] J. Hadamard, "Lectures on Cauchy's Problem in Linear Partial Differential Equations," Yale University Press (1923).

[55] A. Pentland, "Finding the illuminant direction," Journal of the Optical Society of America **72**, 448–455 (1982).

[56] W. Chojnacki, M. J. Brooks, and D. Gibbins, "Revisiting pentland's estimator of light source direction," Journal of the Optical Society of America **11**, 118–124 (1994).

[57] F. E. Nicodemus, "Reflectance nomenclature and directional reflectance and emissivity," Applied Optics **9**, 1474–1475 (1970).

[58] S. K. Nayar and M. Oren, "Visual apparence of matte surfaces," Science **267**, 1153–1156 (1995).

[59] A. W. Nolin, K. Steffen, and J. Dozier, "Measurement and modeling of the bidirectional reflectance of snow, Proceedings of IGARSS," IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium **94**, 1919–1921 (1994).

[60] J. Krumm and S. A. Shafer, "Texture segmentation and shape in the same image," IEEE Coference on Computer Vision pp. 121–127 (1995).

[61] B. J. Super and A. C. Bovik, "Shape from texture using local sprctral moments," IEEE Transactions on Pattern Aalysis and Machine Intelligence **17**, 333–343 (1995).

[62] J. J. Koenderink, A. J. V. Doon, and M. Stavridi, "Bidirectinal reflection distribution function expressed in terms of surface scattering modes," European Conference on Computer Vision pp. 28–39 (1996).

[63] M. Stavridi, B. V. Ginneken, and J. J. Koenderink, "Surface bidirectional reflection distribution function and the texture of bricks and tiles," Applied Optics, **36** (1997).

[64] T. Leung and J. Malik, "On perpendicular texture: why do we see more flowers in the distance?" IEEE Conference on CVPR pp. 807–813 (1997).

[65] D. R. Peachy, "Solid texturing of complex Surfaces," Proceedings of SIGGRAPH 1985, Computer Graphics **19**, 279–286 (1985).

[66] J. C. Stover, "Scatter from optical components: an overview," Scatter from Optical Components Proceedings of the SPIE **1165**, 2–9 (1989).

[67] H. A. Kishawy and M. A. Elbestawi, "Effect of process parameters on material side flow during hard turning," International Journal of Machine Tools and Manufacture **39**, 1017–1030 (1999).

[68] C. H. Hidrovo, R. R. Brau, and D. P. Hart, "Excitation non-linearities in emission reabsorption laser-induced fluorescence technique," Applied Optics **43**, 894–913 (2004).

[69] A. Gosset and J. M. Buchlin, "Techniques optiques pour la caractérisation de films liquides instables," pp. 16–19 (2008).

[70] H. Gouraud, "Continous Shading of Curves Surface," IEEE Trans. on Computers pp. 623–629 (1971).

[71] M. Noguchi and S. Nayar, "Microscopic shape from focus using active illumination, in Proceedings of International Conference on Pattern Recognition," IEEE Computer Society pp. 147–152 (1994).

[72] A. Refregier, "Shapelets : I. A Method for Image Analysis," Mon. Not. R. Astron. Soc **13** (2001).

[73] P. Kovesi, "Shapelets correlated with surface normals produce surfaces," in Proceedings of Australia-Japan Advanced Workshop on Computer Vision pp. 101–108 (2003).

[74] A. Refregier, "Shapelets-I. A method for image analysis," Mon. Not. R. Astron **338**, 35–37 (2003).

[75] A. Bradley and P. Bamford, "A one-pass extended depth of field algorithm based on the over-complete discrete wavelet transform, in Proceedings of Image and Vision Computing," IVCNZ pp. 279–284 (2004).

[76] M. G. Audícana, X. Otazu, O. Fors, and A. Seco, "Comparison between Mallat's and the " a trous" discrete wavelet transform based algorithms for the fusion of multispectral and panchromatic images," Int. J. Remote Sens **26**, 595–614 (2005).

[77] J. Meneses, M. A. Suarez, J. Braga, and T. Gharbi, "Extended depth of field using shapelet-based image analysis," APPLIED OPTICS **47**, 169–178 (2008).

[78] L. Cohen, "Time-frequency distributions-a review," Proceedings of the IEEE **77**, 941–981 (1989).

[79] F. Auger and P. Flandrin, "Improving the readability of time-frequency and time-scale representations by the reassignment method," Signal Processing, IEEE Transactions on **43**, 1068–1089 (1995).

[80] F. Auger, P. Flandrin, P. Gonçolvés, and O. Lemoine, "Time-Frequency Toolbox for use with Matlab," CNRS France, Rice University (USA) (1996).

[81] Y. Zhao, L. E. Atlas, and R. J. Marks, "The use of cone-shaped kernels for generalized time-frequency representations of nonstationary signals," Acoustics, Speech and Signal Processing, IEEE Transactions on **38**, 1084–1091 (1990).

[82] J. Jeong and W. J. Williams, "Kernel design for reduced interference distributions," Signal Processing, IEEE Transactions on **40**, 402–412 (1992).

[83] L. Stankovic, "A measure of some time-frequency distributions concentration," Signal Process. **81**, 621–631 (2001).

[84] B. Gramatikov, J. Brinker, S. Yi-chun, and N. V. Thakor, "Wavelet analysis and time-frequency distributions of the body surface ECG before and after angioplasty," Computer Methods and Programs in Biomedicine **62**, 87–98 (2000).

[85] C. Li, C. Zheng, and C. Tai, "Detection of ECG characteristic points using wavelet transforms," IEEE Transactions on Bio-Medical Engineering **42**, 21–28 (1995), PMID: 7851927.

[86] P. S. Addision, J. N. Watson, and T. Feng, "Low-oscillation complex wavelets," Journal of Sound and Vibration **254**, 733–762 (2002).

[87] S. W. Hillson, "Dental Anthropology," Combridge: Combridge University Press (1993).

[88] F. E. Feninat, T. H. Ellis, E. Sacher, and I. Stangel, "A tapping mode AFM study of collapse and denaturation in dentinal collagen Dent," Mater **17**, 284–288 (2001).

[89] H. G. Hansma, "Surface biology of DNA by atomic force microscopy," Annu. Rev. Phys. Chem **52**, 71–92 (2001).

[90] W. J. Landis, J. M. Oldak, and S. Weiner, "Topographic imaging of mineral and collagen in the calcifying turkey tendon Connect," Tissue Res **25**, 181–196 (1991).

[91] A. Gruverman, D. Wu, B. J. Rodriguez, S. V. Kalinin, and S. Habelitz, "High-resolution imaging of proteins in human teeth by scanning probe microscopy," Biochemical and Biophysical Research Communication **352**, 142–146 (2007).

V

Index

Index général

émail, 3, 4, 6, 7, 9, 18, 41, 76

AFM, 12, 72, 79
agénésie, 5
amélo-dentinaire, 5
Australopithecus, 69
Australopithecus africanus, 38

biométrie, 17
biométrique, 17
BRDF, 19, 21, 22, 26–28, 31, 41
BTF, 19, 22, 26–28, 41

chronologie, 5, 6

distale, 6
duplication, 5

ectopie, 5

fusion dentaire, 5

hominidés, 69, 72, 79
Homo, 9, 69, 70
Hortus II-III, 4

JED, 7

l'âge au décès, 3–5
l'Homme actuel, 4, 5, 9, 69, 71, 72, 76, 79
linguale, 6

mésiale, 6
macrodontie, 5
MEB, 4, 12, 76
microdontie, 5
micromorphologique, 4
microstructures, 72

odontoïde, 5
odontome, 5

Paranthropus, 9, 69, 70, 72
Plio-Pléistocène, 69

radiographique, 5, 6
rhizalyse, 5

SFM, 72
stéréomicroscope, 4
stries de Retzius, 7, 8

taurodontisme, 5
TFA, 63
TFR, 63
TL, 48
TSR, 63

vestibulaire, 6

Index des auteurs

ADDISON, 63
Ashikhmin, 22
Audicana, 54
Auger, 62, 63, 65

Barnes, 4, 76
Beynon et al, 6
Bond, 71
Boyde, 17
Bradley, 54
Braga, 9, 14, 69
Bromage, 3, 7, 8

Cabral, 22
Chikh-Bled, 12
Chojnacki, 25
Cohen, 62

Dana, 22, 26
Dean, 3, 4, 69, 70, 72
Deck, 12

Feninat, 73

Gosset, 48
Gouraud, 54
Gramatikov, 63
Grine, 69
Gruverman, 73

H Numata, 5
Hadamard, 25
Hansma, 73
Hess et al, 5
Hidravo, 48
Hillson, 13, 17, 71

Jeong, 63
Jones, 13

Kimmel, 24
Kishawy, 48
Koenderink, 26
Kovesi, 54
Krumm, 26

Lacruz, 8, 9, 69–71
Lambert, 22
Landis, 73
Larkin, 12
Leung, 26
Li, 63
Lumley, 5

McAllister, 22
Meneses, 54

Nayar, 22, 26
Nicodemus, 26
Noguchi, 54
Nolin, 26

Okatani, 24
Oliensis, 24
Oren, 20

Peachy, 26
Pentland, 25
PERRIN, 12
Phong, 23

Refregier, 54
Rozzi, 4, 5, 7, 76

Sandoz, 12
Stankovic, 63
Stavridi, 26
Stover, 27
Super, 26

Thackeray, 9, 69
Truhlar, 5

Wang, 23
Watson, 7, 8
Westin, 22

Williams, 5
Wolff, 20

Yuan, 14

Zhao, 63

Glossaire

améloblastes sécrètes l'émail dentaire qui dépose en une couche, épaisse au niveau des cuspides, s'amincissent vers le collet de la dent. *page ii*

Australopithecus africanus Découvert en Afrique du sud en 1925, un hominide pre-Homo bipède entre 3.5 et 1 million d'années. *page 38*

circadien Rythme biologique dont la période est d'environ 24 heures. Tous les êtres vivants sont soumis à des rythmes biologiques, c'est-à-dire à des phénomènes biologiques qui se répètent à intervalles réguliers dans le temps. Chez l'homme, l'alternance veille-sommeil, entre autres, obéit à un rythme circadien. *page ii*

distale Adj. Surface de côté la plus éloignée de la ligne médiane. *page 6*

L'émail L'émail est une substance dure et blanche qui recouvre la dent. Il protège les parties plus fragiles de la dent, dont la dentine et la pulpe. L'émail dentaire est la substance la plus dure dans le corps humain et est principalement composé d'hydroxyapatite (phosphate de calcium cristallin). La production d'émail est assurée par des cellules appelées améloblastes. *page 3*

hominidés Famille des « hominidae » qui englobe toutes les formes humaines présentes et passées ainsi que de façon générale, les grands singes actuels et leurs ancêtres. *page ii*

Homo Genre de la famille des hominidés. La bipédie, un cerveau développé et un dimorphisme sexuel modéré sont les principales caractèristiques. *page 9*

Hortus La montagne de l'Hortus (512 m) est située sur la commune de Valflaunès (Hérault), à environ 20 km au nord de Montpellier, tout près du Pic Saint-Loup auquel elle fait face. *page 4*

linguale Surface arrière ou interne de la dent. Surface située du côté de la langue. Certains auteurs emploient le terme palatin (palais) pour la surface interne des dents supérieures. *page 6*

mésiale Surface dentaire proximale la plus près de la ligne médiane. Le terme mésial ne s'applique qu'au niveau des arcades. Pour les autres endroits il faut utiliser le terme médial. *page 6*

Paranthropus Genre d'hominidés présent entre 2.5 et 1 millions d'années avant notre ère. Appelé également australopithèque robuste à cause de sa face et de sa mâchoire très massives. *page 9*

Plio-Pléistocène Plio-Pléistocène est un terme archéologique qui est entrée en accroître l'utilisation de décrire une série longue et continue des couches sédimentaires datées à Jakarta, en Afrique de l'Est. Ce pseudo archéologiques datant de la période d'environ 2.5 Ma à 1.5 Ma, à cheval sur la frontière entre le Pliocène et le Pléistocène. Le contenu de ses couches donnent une image claire de l'évolution continue des vertébrés récents, en particulier hominiés. *page 69*

périkymaties Lignes onduleuses à la surface de l'émail, consécutifs aux changements continus des bombés de la dent et des sillons. Elles sont parallèles à la jonction cémento-dentinaire et parallèles l'une à l'autre. *page ii*

vestibulaire Adj. Surface d'une dent qui se situe du côté des lèvres ou des joues, surface avant ou externe de ladent. Pour les antérieures, on emploie le terme labial (lèvres). Pour les postérieures on emploie aussi le terme vestibulaire (vestibule). *page 6*

Liste des Acronymes

ADN	L'acide désoxyribonucléique.
AFM	Microscope à Force Atomique.
BRDF	Fonction de réflectance bidirectionnelle de distribution (angl. Bidirectionnal Réflexion Distribution Function).
BTF	Fonction de texture bidirectionnelle (angl. Bidirectional Texture Function).
CCD	Charge Coupled Device, assure la conversion d'un signal lumineux en un signal électrique.
JED	La jonction émail dentine.
MEB	Microscope Electronique à balayage.
SEM	Scanning Electron Microscope.
SFM	Scanning Force Microscope.
TFA	Analyse Temps-Fréquence.
TFR	Représentation Temps-Fréquence (angl. Time-Frequency Representation).
TL	Triangulation Laser.
TSR	Représentation Temps-Echelle (angl. Time-Scale Representation).

Table des figures

1.1 A : face vestibulaire de la canine supérieure droite, MEB. B : face vestibulaire de la dent inférieures droite, MEB. C : détail de la face vestibulaire de la canine supérieure droite à côté du collet, microscope stéréoscopique. Les flèches signalent quelques périkymaties observables sur les photosRozzi [11]. 5
1.2 Image de gauche Radiographie de la canine en place, maxillaire fossile du Coupe-Gorge. Image de droite Mandibule de Combe-Grenal I. Radiographie de la région prémolaire et molaire droite [19]. 6
1.3 Image réalisée à l'aide d'un Microscope Stéréoscopique [12]. 7
1.4 Schéma de principe du microscope confocal optique. 8
1.5 Image des périkymaties de la dent obtenu à l'aide d'un microscope confocal Lacruz en 2007 Lacruz [27]. Le nombre des périkymaties sur une incisive inférieure KB 5223 prises de quelques micromètres à partir du collet. Le nombre total des périkymaties est 86. 9
1.6 Schéma de principe du profilomètre optique. 11
1.7 Profil de la dent obtenue par Hillson et Jones [35].(a) Le profil initial, (b) le profil filtré à l'aide d'un filtre pas-haut. 13

2.1 Micro-rugosité sur la couronne. (a) Image des périkymaties, (b) profil 3D de la zone sélectionnée dans (a), (c) profil du segment sur la figure(b). 18
2.2 Géométrie de la fonction de réflectance bidirectionnelle. 19
2.3 Réflexion diffuse. 20
2.4 Réflexion spéculaire. 20
2.5 Réflexion mixte. 21
2.6 BRDF à deux composantes, une diffuse et une spéculaire. 21
2.7 Paramètres geométriques d'une source de lumière. (a) source ponctuelle suffisamment près de la scène, (b) source placée à l'infini. . . 23
2.8 Variables utilisées dans l'illumination d'une surface. 24
2.9 L'apparence visuelle d'une surface d'après [47]Dana. 26
2.10 Mesure de la texture : Orientation de l'échantillon et positions de la caméra, d'après [47]. 27

2.11 (a) Réflexion spéculaire et (b) Loi de Snell-Descartes. 29
2.12 Image des périkymaties d'une dent présentant l'aspect spéculaire. . 29
2.13 Les phénomènes d'ombre. 30
2.14 Positionnement de la source de la lumière. 31
2.15 Zone de netteté pour un angle d'illumination et pour deux positions différente (selon x_w) de la dent. 32
2.16 Montage expérimental pour la mesure des stries ou des périkymaties de la dent: (a) moteurs de déplacement (x_w,y_w), (b) moteurs de déplacement (z_w), (c) moteur de rotation de la caméra CCD, (d) moteurs de déplacement (z_{CCD}), (e) un objectif de microscope $\times 10$, (f) une caméra CCD. 33
2.17 Illustration de la méthode : enregistrement de N Images pour un angle d'observation donné. 34
2.18 Résultats de l'application de l'algorithme de « shaplet » sur 11 images. 34
2.19 Procédure de la mesure de la texture d'une zone de la couronne de la dent. 35
2.20 Observation d'une zone de la surface de l'émail d'une dent fossile de l'espèce *Australopithecus africanus* (Sts 52, Sterkfontein, South Africa) sous différents angles d'observation. 36
2.21 Profil $3D$ *Australopithecus africanus* (Sts 52, Sterkfontein, South Africa) sous différents angles d'observation. 37
2.22 Image des périkymaties de la dent d'un sujet de l'espèce *Australopithecus africanus* (Sts 52, Sterkfontein, South Africa). 38
2.23 Image de l'état de surface de la dent d'un Australopitheque Africain (Sts 52, Sterkfontein, South Africa). 39
2.24 Montage associée à la $2^{\text{ème}}$ méthode. 39
2.25 Mesure des périkymaties d'un sujet de l'espèce *Australopithecus africanus* (Sts 52, Sterkfontein, South Africa) obtenu selon la $2^{\text{ème}}$ méthode. 40

3.1 Principe de détermination du nombre d'images pour un angle d'observation nul. 47
3.2 Principe de détermination du nombre de la normale pour un angle d'observation θ. 48
3.3 Principe de la triangulation laser. 48
3.4 Image du spot obtenu($\times 10$). 49
3.5 Utilisation de la triangulation laser. 50
3.7 Profil $2D$ de l'incisive centrale droite permanente mandibulaire de KB 5223, un vestige fossile provenant du site de Kromdraai B (Afrique du Sud). 51
3.6 Principe du relevé du profil 2D de la dent. 51
3.8 Profil $2D$ de la dent et pas choisi pour le calcul du plan moyen, de l'incisive centrale droite permanente mandibulaire de KB 5223, un vestige fossile provenant du site de Kromdraai B (Afrique du Sud). 51
3.9 Plan moyen du profil d'un pas du profil total de la dent. 52
3.10 Représentation du plan moyen $3D$ du relief d'une région, de la couronne de la dent. 52
3.11 Alignement de la normale au plan moyen, avec la bissectrice de l'angle entre la caméra et la source. 53

3.12 Principe de la reconstitution de l'image de la texture d'une zone. . 53
3.13 Texture de la surface de l'incisive centrale droite permanente mandibulaire de KB 5223, un vestige fossile provenant du site de Kromdraai B (Afrique du Sud)(3.8). 54
3.14 (a) Une banque *shapelet* formée par cinq fonctions Gaussiennes, (b) les fonctions de transfert correspondant à leur gradient. 55
3.15 (a)Reconstruction d'un signal 1D par la corrélation d'une fonction gradient. (b) Reconstruction d'un signal 1D par la corrélation d'une fonction gaussienne. 56
3.16 Reconstruction d'un signal 1D par la corrélation du signal avec le gradient du signal. 56
3.17 Trois images des périkymaties prise à une position z_i dans la direction de l'axe Oz_{CDD}. 57
3.18 Image finale des périkymaties de la dent(le filtre *shapelet* nous permet de retrouver les zones nettes sur les trois images). 57
3.19 Texture de la surface de l'incisive centrale droite permanente mandibulaire de KB 5223, un vestige fossile provenant du site de Kromdraai B (Afrique du Sud). 58
3.20 Schéma du montage expérimental pour la mesure des périkymaties. 59
3.21 Système optique pour la mesure des périkymaties. 60
3.22 (a) Images des périkymaties et profil d'une ligne, (b) pointage des périkymaties de la dent. 61
3.23 Période des périkymaties de la zone explorée. 62
3.24 Analyse temps fréquence des périkymaties. 64
3.25 Analyse temps fréquence des périkymaties. 65
3.26 L'incisive centrale gauche permanente mandibulaire de KB 5223 (vues 1 à 4), (1) vestibulaire, (2) distale, (3) linguale, (4)mésiale. . . . 66
3.27 L'incisive latérale gauche permanente mandibulaire de KB 5223(vues 1 à 4), (1) vestibulaire, (2) distale, (3) linguale, (4)mésiale. 66
3.28 L'incisive centrale droite permanente mandibulaire de KB 5223(vues 1 à 4), (1) vestibulaire, (2) distale, (3) linguale, (4)mésiale. 66
3.29 L'incisive latérale droite permanente mandibulaire de KB 5223(vues 1 à 4), (1) vestibulaire, (2) distale, (3) linguale, (4)mésiale. 67
3.30 Texture de la surface de l'incisive centrale droite permanente mandibulaire de KB 5223, un vestige fossile provenant du site de Kromdraai B (Afrique du Sud). Le nombre total des périkymaties est 88. 68
3.31 Texture de la surface de l'incisive latérale droite permanente mandibulaire de KB 5223, un vestige fossile provenant du site de Kromdraai B (Afrique du Sud). Le nombre total des périkymaties est 97. 68
3.32 Périodicité des périkymaties de l'incisive centrale droite permanente mandibulaire de KB 5223, un vestige fossile provenant du site de Kromdraai B (Afrique du Sud). 70
3.33 Périodicité des périkymaties de l'incisive latérale droite permanente mandibulaire de KB 5223, un vestige fossile provenant du site de Kromdraai B (Afrique du Sud). 71
3.34 Micro-rugosité sur la couronne.(a) Image des périkymaties, (b) profil $3D$ de la zone sélectionnée dans (a), (c) profil du segment sur la figure(b). 73
3.35 Image 3D des périkymaties de la dent obtenu par AFM. 74

3.36 Micro-rugosité sur la couronne.(a) Image des périkymaties, (c) profil du segment sur la figure(a). 75
3.37 Image 3D des périkymaties de la dent obtenu par un profilomètre optique. 76
3.38 Images des périkymaties de la couronne dentaire obtenues à l'aide d'un microscope électronique à balayage ($50X$ grossissement). . . . 77
3.39 Assemblage des images des périkymaties de la couronne dentaire de la figure (3.38), les périkymaties peuvent être observées sur la totalité de la couronne. 78