



Rapport d'Alternance - C4W

Conception Automatique d'un Crochet de Stellite

Effectué par Thomas SCHOLL

Du 01/09 au 25/08/2023

*Sous la direction de Roseline BENIERE
et William PUECH*

Master 2 IMAGINE

Année 2022 - 2023

HAI002I

Remerciements

Avant de débuter ce rapport, je souhaiterais apporter mes remerciements les plus sincères à toute l'équipe de C4W pour m'avoir accueilli dans leur équipe et m'avoir permis d'avoir ma première véritable expérience du métier d'informaticien dans un environnement d'entreprise. Je souhaiterais aussi remercier tout particulièrement *Roseline BENIERE* pour m'avoir encadré durant toute cette période d'alternance et d'avoir été à mon écoute pour toutes mes questions, mais aussi *Marine BONNET* pour m'avoir introduit avec aisance au domaine dentaire. Enfin, je tiens à remercier *William PUECH* pour m'avoir fait confiance en me permettant d'effectuer mon année de Master 2 Imagine en alternance et *Gildas POUES-SEL* pour m'avoir fait confiance également en m'ayant confier ce projet.

Thomas SCHOLL.

Table des matières

1	Introduction	6
1.1	Présentation de l'Entreprise	6
1.2	Présentation du Sujet	7
2	Etat de l'Art	10
2.1	Processus de Réalisation dans le Domaine Dentaire	10
2.2	Informatisation du Processus de Réalisation de Crochets	12
3	Organisation	17
4	Rapport Technique	19
4.1	Création d'un Démonstrateur	19
4.2	Calcul du Crochet	21
4.3	Implémentation dans Digistell	29
5	Résultats	35
6	Conclusion	38
6.1	Conclusion Générale	38
6.2	Perspectives d'Amélioration	38

Table des figures

1	Capture d'écran issue du logiciel Orth'Up	6
2	Organigramme de l'entreprise	7
3	Exemple de stellite et de ses composants	8
4	Présentation de différents types de crochets	8
5	Schéma représentant les lignes de plus grand contour selon l'axe d'insertion et les zones de dépouilles et contre-dépouilles (Source : Article [1])	10
6	Schéma représentant la prise de valeur de rétention (Source : Article [2]) . .	11
7	Schéma représentant les différentes parties d'un crochet (Source : Article [1])	11
8	Présentation des différents Types de CFAO (Source Article [3])	12
9	Aperçu de la numérisation par triangulation laser (Source : Article [3]) . . .	13
10	Aperçu d'un scan intra-oral (Source : Article [4])	13
11	Aperçu de la modélisation manuelle de crochet dans Digistell	14
12	Aperçu de la méthode de suivi de tracé en a) et crochet résultant en b) . .	15
13	Résultats de la méthode de shadowmaping	15
14	Diagramme de Gantt décrivant les grandes étapes de l'alternance	17
15	Aperçu d'une dent non complétée, en a), et la même complétée, en b) . . .	19
16	Aperçu des maillages de gencives et de dents dans un cas de base, en a), lorsqu'une dent est survolée, en b), et lorsqu'elle est sélectionnée, en c)	20
17	Aperçu d'un crochet calculé dans le démonstrateur, en a) une vue avec l'axe d'insertion et les contre-dépouilles et en b) la dent vue selon l'axe d'insertion	20
18	Schéma représentant les différentes données permettant de calculer un crochet Ackers	21
19	Représentation des axes d'une dent, ici une prémolaire. En a) l'axe sillon, en b) l'axe racine et en c) l'axe linguale-vestibulaire	22
20	Aperçu des Slicings dans le démonstrateur seules, en a), et sur le maillage d'une dent, en b)	23
21	Schéma de la méthode de calcul de valeur de rétention d'une Slicing	23
22	Exemple de plusieurs zones de dépouille sur la Slicing bleue	24
23	Schéma représentant la méthode de placement des points du crochet sur une Slicing	25
24	Exemple du fonctionnement d'un morceau de la courbe B-Spline	26

TABLE DES FIGURES

25	Exemple de l'interface du B-Spline Editor	26
26	Résultat du volume créé à partir de la courbe B-Spline	27
27	Exemple d'un crochet Ackers avec une pointe non conforme	27
28	Résultat de la règle du premier point	28
29	Exemple de l'Interface de Digistell	29
30	Exemple d'un maillage de dent extrait avec les frontières libres indiquées en rouges	30
31	Exemple d'application de la règle du collet, en a) avant application et en b) après application : le crochet ne touche plus la gencive	31
32	Exemple de mauvaise extraction de dents	31
33	Exemple d'extraction manuelle	32
34	Exemple d'application de la règle de repositionnement, en a) avant utilisation et en b) après	32
35	Aperçu d'une prémolaire présentant deux préparations	33
36	Schéma de la méthode de détection de la face occlusale sur une Slicing . . .	33
37	Aperçu du calcul du crochet sans détection de la face occlusale, en a), et avec, en b)	34
38	Résultat de plusieurs crochets Ackers sur un cas dans Digistell	35
39	Exemple de la méthode utilisée sur une incisive, en a) et une canine, en b) .	36
40	Exemple d'une canine préparée, en a), où le crochet n'est pas correct, en b) .	36
41	Exemple d'un crochet non esthétique	37

1 Introduction

1.1 Présentation de l'Entreprise

Le projet de calcul automatique de crochet a été réalisé au sein de l'entreprise *C4W* se situant à Montpellier et ayant été fondée en 1998. C4W se spécialise dans le développement de logiciels de conception assistée par ordinateur conçus pour différent domaines tels que des domaines médicaux comme l'orthopédie mais particulièrement le domaine dentaire avec des logiciels comme *Orth'Up* ou *Digistell*, ce dernier sera présenté dans la suite de ce rapport. Une capture d'écran issue du logiciel Orth'Up est illustrée figure 1.

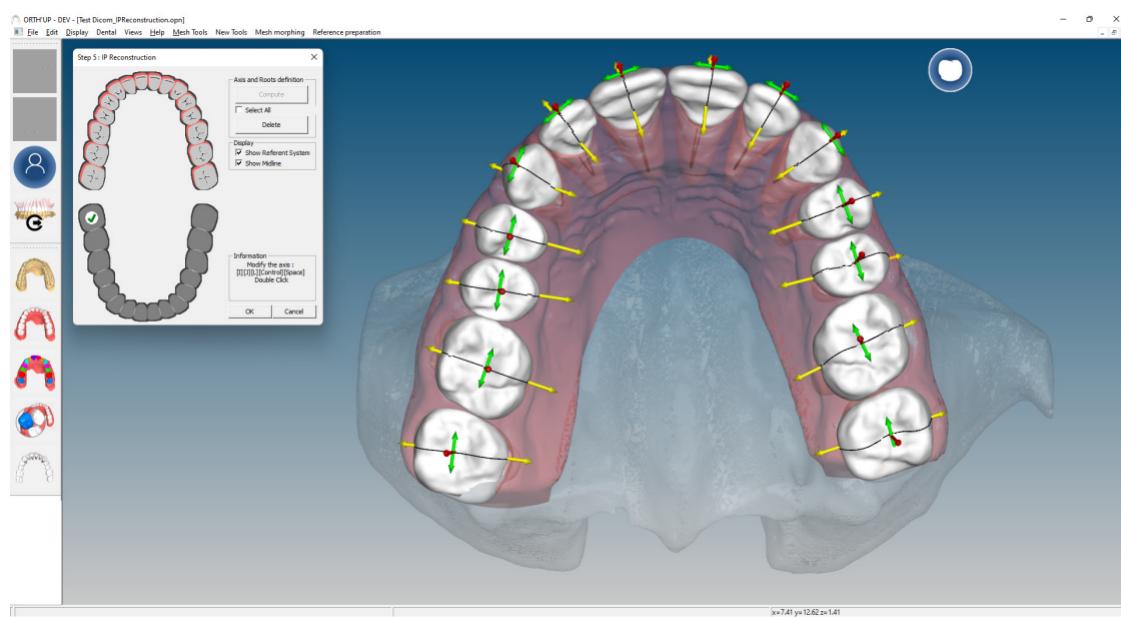


FIGURE 1 – Capture d'écran issue du logiciel Orth'Up

Ces logiciels sont développés en alliant les compétences de l'équipe de développement 3D à l'expertise de praticiens prothésistes et orthodontistes ce qui permet d'assurer que les logiciels soient conformes aux règles médicales sans devoir consulter d'autres laboratoires extérieurs par exemple. Un organigramme présentant les différents postes de l'entreprise est illustré figure 2



FIGURE 2 – Organigramme de l'entreprise

En addition aux logiciels "*sur étagère*" évoqués plus haut, l'entreprise propose également un *noyau* de code comprenant des fonctions de base sur des maillages mais aussi des outils utiles lors de la conception de logiciels. C4W est le premier client de ce noyau, il est donc régulièrement mis à jour. Ce projet utilise plusieurs outils adaptés de ce noyau commun que nous allons étudier dans la suite de ce rapport.

1.2 Présentation du Sujet

Ce projet va se baser sur le *stellite*, une prothèse dentaire amovible visant à combler un *édentement* : une absence d'une ou plusieurs dents pas de la totalité. Cette prothèse se pose sur les dents toujours présentes à l'aide de *crochets*. Elle est équipée d'une grille sur laquelle reposera les fausses dents venant remplacer celles qui ne sont plus là. Un exemple de stellite est illustré figure 3.

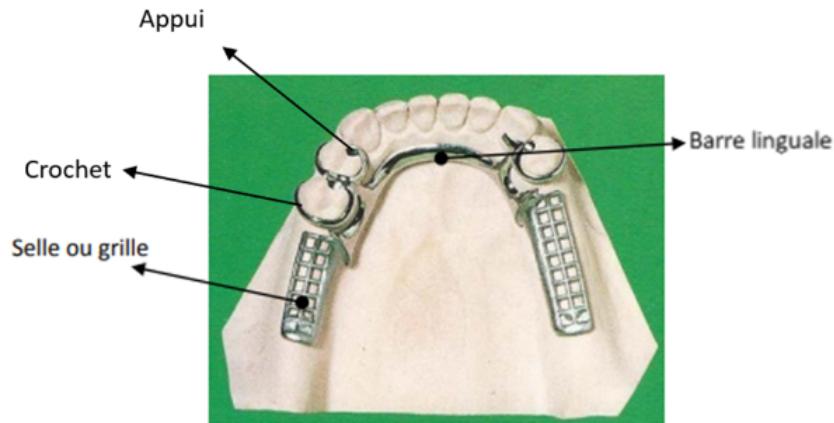


FIGURE 3 – Exemple de stellite et de ses composants

Il existe plusieurs types de crochets ayant chacun leur utilisation et pouvant être combinés sur une même prothèse en fonction du type de dent ou type d'édentement. La figure 4 présente plusieurs de ces types de crochets.

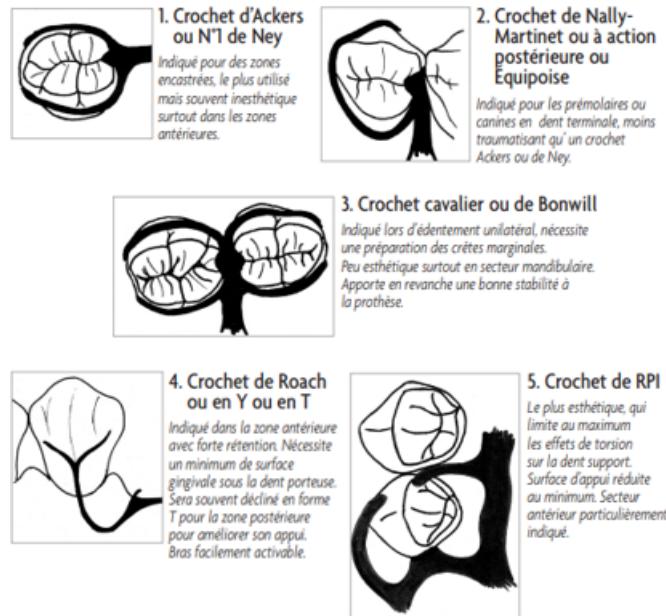


FIGURE 4 – Présentation de différents types de crochets

La problématique de ce rapport est donc de déterminer s'il est possible de modéliser un crochet de stellite de manière automatique, et si c'est le cas, ce crochet respecte-t-il les normes médicales ? Pour répondre à cette problématique, ce rapport suit le plan suivant. Un *état de l'art* dans lequel la fabrication de stellite par les praticiens dentaires sera détaillée et comment les logiciels de CAO actuels modélisent les crochets. Une partie détaillant comment le projet a été organisé. Un rapport technique sur les différentes méthodes utilisées tout au long de ce projet. Une partie constatant les résultats de la proposition de modélisation de crochets automatique et enfin ce rapport se terminera par une conclusion en étudiant les perspectives futures.

2 Etat de l'Art

2.1 Processus de Réalisation dans le Domaine Dentaire

Cette partie aborde le processus de réalisation des crochets par les praticiens du domaine dentaire.

D'après l'article [1], la réalisation de crochets utilise la *rétention*, une notion de biomécanique représentant la force d'insertion. Pour déduire la rétention sur une dent, il est d'abord nécessaire de définir l'*axe d'insertion* de la prothèse dans la bouche du patient. A partir de cet axe, il est possible de déterminer la *ligne de plus grand contour*, ou équateur, étant la silhouette de la dent vue selon l'axe d'insertion. La ligne de plus grand contour permet de définir deux zones : la zone de dépouille étant la partie visible de la dent selon l'axe d'insertion et qui n'est pas rétentive, mais surtout la zone de *contre-dépouille* qui est l'exact inverse, donc ce qui est invisible selon l'axe d'insertion et cette zone est quand à elle rétentive. Un schéma présentant ces concepts est illustré figure 5.

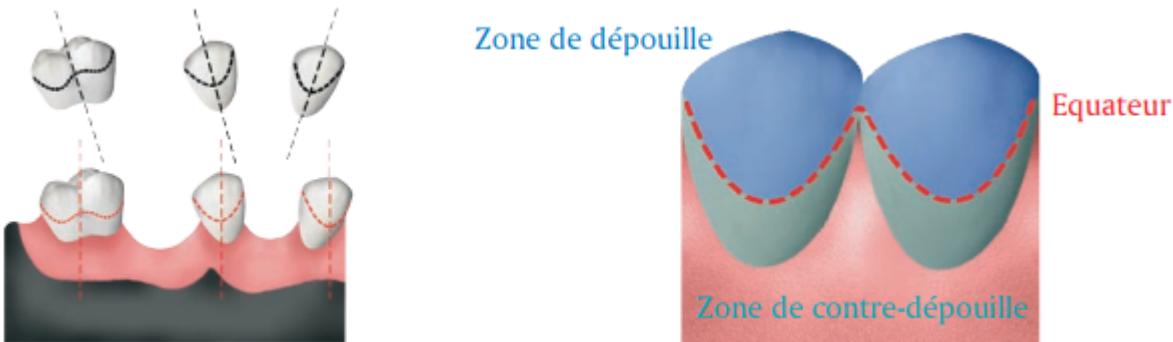


FIGURE 5 – Schéma représentant les lignes de plus grand contour selon l'axe d'insertion et les zones de dépouilles et contre-dépouilles (Source : Article [1])

La valeur de rétention en un point de la dent se mesure via la *distance horizontale* entre celui-ci et l'axe d'insertion, comme illustré figure 6. Un crochet doit être assez rétentif pour que la prothèse ne soit pas désinsérée, par une mastication par exemple, mais le crochet ne doit pas être trop rétentif pour autant pour ne pas abîmer la dent sur laquelle il est posé et permettre d'enlever la prothèse. Après plusieurs tests, les praticiens ont défini par convention que la valeur maximale de rétention que devait avoir un crochet doit être aux environs de

0.25mm.

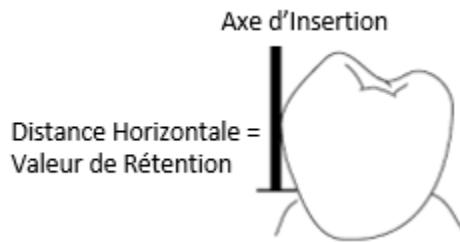


FIGURE 6 – Schéma représentant la prise de valeur de rétention (Source : Article [2])

La prise de valeur de rétention est nécessaire pour définir les différentes parties du crochet présentées dans la figure 7. La première est la *pointe active* et remplit la fonction de rétention, étant placée dans la zone de contre-dépouille. Le corps et le contre-crochet quand à eux remplissent la fonction de *stabilité* et viennent équilibrer la force de rétention de la pointe. Pour cela ils ne sont *pas rétentifs* et sont donc placés dans une zone de dépouille.

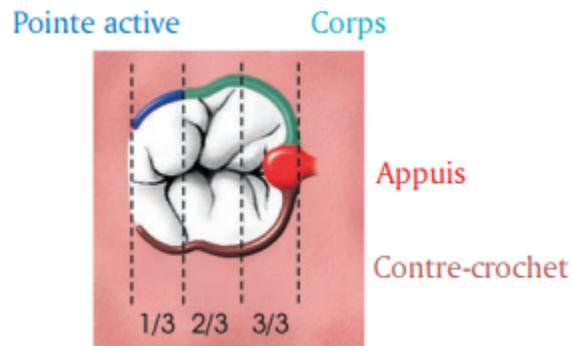


FIGURE 7 – Schéma représentant les différentes parties d'un crochet (Source : Article [1])

La prothèse et ses crochets sont réalisé en utilisant les notions abordées jusqu'ici puis est testée dans un premier temps sur une *empreinte* de l'arcade du patient avant d'être testée en condition réelle dans un second temps. Cette empreinte est issue d'un mordu du patient dans lequel le praticien fait couler du plâtre.

La prochaine partie va aborder comment la réalisation de stellite, et donc de crochet, a été informatisé.

2.2 Informatisation du Processus de Réalisation de Crochets

Cette partie va aborder les différentes techniques informatiques existantes de modélisation de stellites et de crochets. Ces techniques sont dans le domaine de *CFAO*. La combinaison de la conception assistée par ordinateur, *la CAO*, et la fabrication assistée par ordinateur, *la FAO*. D'après l'article [3], la CAO permet de concevoir virtuellement la prothèse en la modélisant sur un logiciel adapté et la FAO permet de la fabriquer à partir de la conception précédente. La figure 8 présente les trois types de CFAO, dépendants des techniques d'acquisition de l'arcade et du lieu de CAO et de FAO.

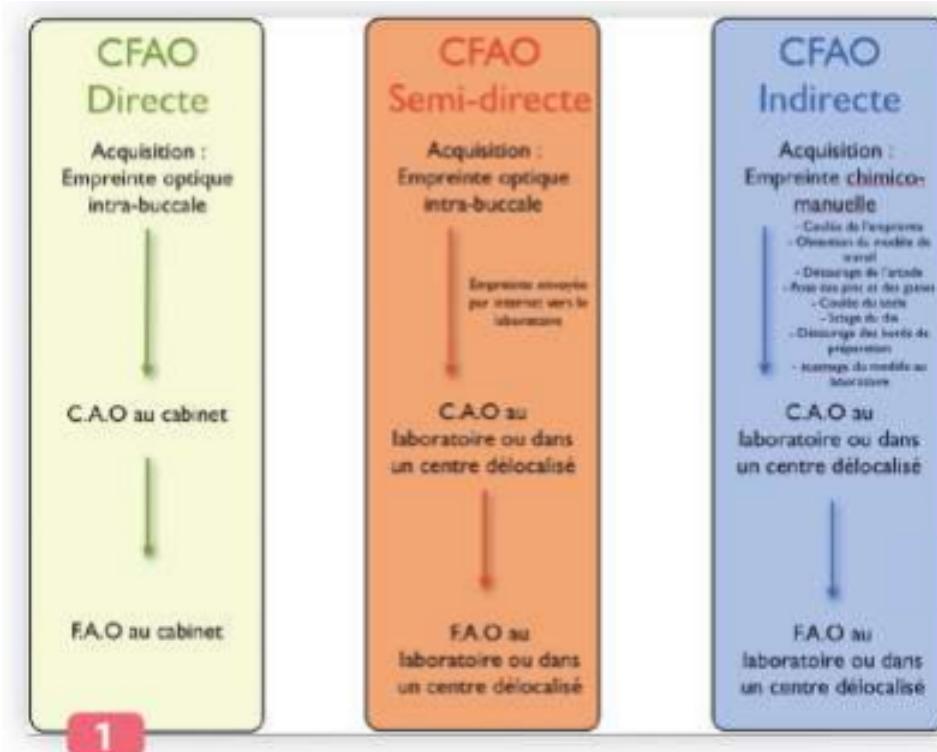


FIGURE 8 – Présentation des différents Types de CFAO (Source Article [3])

La première étape de l'informatisation du processus de modélisation de crochets est donc *l'acquisition* d'un maillage de l'arcade du patient. Elle se fait principalement par deux méthodes, la première est la *triangulation laser* illustrée par la figure 9. Celle-ci se base sur un plâtre préalablement fait en le balayant avec une lumière laser afin de relever les différences de formes et de hauteur pour modéliser le maillage.



FIGURE 9 – Aperçu de la numérisation par triangulation laser (Source : Article [3])

La seconde méthode consiste à utiliser un *scanner intra-oral*. D'après l'article [4], cet outil manuel est utilisé directement dans la bouche du patient, n'ayant pas besoin de plâtre au préalable contrairement à la méthode précédente. Le scanner utilise une méthode de *projection de motifs* lumineux, utilisant la triangulation pour déterminer la position de chaque point du futur maillage. Cette méthode demande cependant une plus haute attention de la part du praticien puisqu'elle est exposée à l'erreur humaine. Un exemple d'utilisation est illustré figure 10.



FIGURE 10 – Aperçu d'un scan intra-oral (Source : Article [4])

Une fois qu'un maillage a été acquis via une des méthodes présentées précédemment et exporté sous le format STL (Standard Tessellation Language), le praticien pourra travailler sur un logiciel de CAO afin de modéliser le crochet informatiquement. Ces logiciels proposent chacun leur méthode, les deux les plus utilisées seront présentées dans ce rapport.

La première méthode est le *placement manuel* de points sur le maillages à partir desquels une courbe sera calculée afin d'obtenir la forme du crochet. Cette méthode est notamment utilisée dans les versions actuelles d'un logiciel de C4W, Digistell, qui sera présenté plus en détail dans la suite de ce rapport. Ce logiciel affiche également les *contre-dépouilles* en colorant le maillage suivant une colorimétrie précise : *noir* pour la valeur de rétention repère abordée plus tôt de 0.25mm, *vert* pour les valeurs de rétention supérieure et *bleu* pour les valeurs de rétentions inférieures. Un résultat est illustré figure 11.

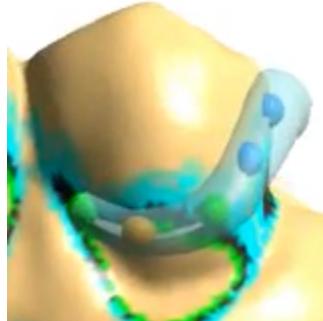


FIGURE 11 – Aperçu de la modélisation manuelle de crochet dans Digistell

Cette méthode est simple d'utilisation pour les praticien et leur laisse la main libre au cas où celui-ci souhaiterait revenir en arrière. Les valeurs de rétentions sont également affichées pour aider le praticien à se repérer comme il le fera en laboratoire. Cependant cette méthode est répétitive, longue et n'est pas automatique laissant alors plus de place à l'erreur humaine.

La seconde méthode est quand à elle illustrée par la figure 12 et est implémentée dans le logiciel Silapart de l'entreprise Dentoo. Elle se base sur une reconnaissance de tracé d'une certaine couleur, ici couleur "brique". Le crochet sera ensuite calculé automatiquement en suivant ce tracé.

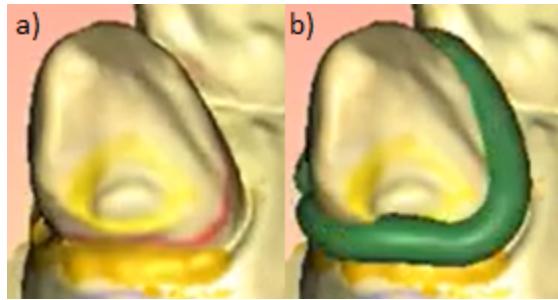


FIGURE 12 – Aperçu de la méthode de suivi de tracé en a) et crochet résultant en b)

Cette méthode est annoncée comme automatique mais elle demande une certaine préparation en amont à cause du tracé nécessaire au calcul qui doit être fait sur le plâtre avant acquisition, cette préparation fait que la méthode n'est pas réellement automatique. Le maillage de l'arcade doit donc être un fichier STL couleur. Cette méthode ne se repose pas sur des valeurs de rétentions ce qui peut produire des crochets incorrects.

Les logiciels de CAO implémentent aussi en majorité des calculs de contre-dépouille, comme Digistell. Ce calcul peut être approché par un calcul de *points invisibles*. La méthode présentée dans l'article [5] se base sur une combinaison de *shadowmapping* selon un ou plusieurs axes. Des exemples de résultats sont illustrés figure 13. Les points en gris sont ceux reconnus comme étant des points invisibles et les points de différentes couleurs sont ceux visibles selon différentes directions.

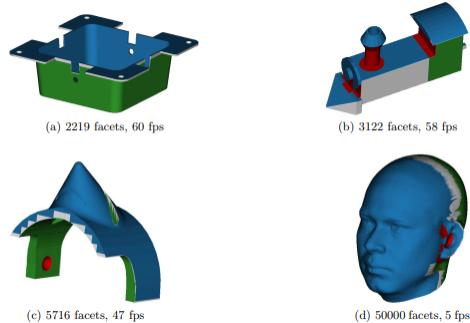


FIGURE 13 – Résultats de la méthode de shadowmapping

Une méthode similaire est utilisée dans les logiciels de C4W. Cependant, elle n'a pas été utilisée dans ce projet de par sa complexité. Aussi, les maillages d'arcades ou de dents utilisés pour calculer les valeurs de rétention sont parfois *imprécis*, à cause d'une mauvaise acquisition ou d'une simplification du maillage au préalable. Ainsi, une autre méthode plus précise a été utilisée, elle sera détaillée dans la section dédiée au *rappor technique*.

3 Organisation

Cette section détaillera l'organisation du travail réalisé sur ce projet au sein de l'entreprise C4W en se basant sur le diagramme de Gantt de la figure 14.

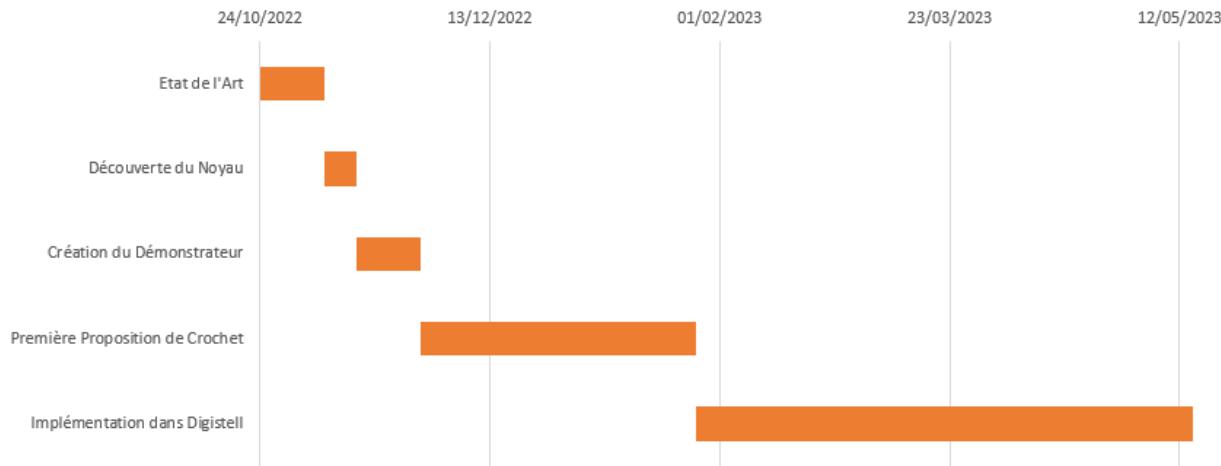


FIGURE 14 – Diagramme de Gantt décrivant les grandes étapes de l'alternance

Les premiers temps de l'alternance étaient principalement une *période d'adaptation* correspondant aux deux premières étapes du diagramme. La première était l'état de l'art dans laquelle j'ai pris connaissance et me suis approprié le sujet du projet avec l'aide de la prothésiste de l'entreprise. La seconde était la découverte du noyau de l'entreprise évoqué plus tôt et des méthodes de programmation de C4W avec l'aide d'autres développeurs.

Après cette période d'apprentissage, le projet a pu réellement démarrer. La première étape a alors été la création de l'outil dans lequel les tests de la méthode de calcul de crochet automatique sera testé : le démonstrateur. C'est aussi à partir de cette étape que le format de la *méthode agile* a été adopté via des sprints de durée variable à l'issue desquels un point était organisé avec mon encadrante en entreprise afin de discuter de l'avancement technique et répondre à d'éventuelles questions.

La méthode de calcul des crochets a ensuite été commencée, cette fois la prothésiste de l'entreprise et le CEO se sont joint aux points de fin de sprint afin de discuter des points de vue médicaux et prise en main par des utilisateurs non informaticiens. Avant chaque point, une version la méthode était donnée en test à la prothésiste de l'entreprise afin qu'elle puisse tester les nouvelles fonctionnalités et préparer des retours à faire lors du point de fin de sprint. Ce fonctionnement fut le même lors de l'implémentation dans Digistell.

L'entièreté du projet a été réalisé en C++ via l'IDE *Visual Studio 2022*. Pour le versionning, C4W utilise *TeamFoundationServer*(TFS) qui a un fonctionnement similaire à un *dépôt Git* et est directement inclus dans l'interface de Visual Studio. Avant chaque remontée sur le serveur TFS, une relecture est organisée avec un autre développeur extérieur au projet afin de vérifier si le code est cohérent et correspond à la charte de programmation de l'entreprise.

4 Rapport Technique

Cette section détaillera les différentes étapes du projets. La première étant la réalisation d'un démonstrateur se concentrant sur l'essentiel afin de tester la méthode de calcul automatique des crochets. Cette méthode sera abordée dans la second partie et l'implémentation de celle-ci dans le logiciel Digistell dans la troisième.

4.1 Création d'un Démonstrateur

L'outil est à destination de la prothésiste de l'entreprise en priorité, afin qu'elle puisse tester la méthode de calcul automatique des crochets et la valider ou non, tout en faisant des retours d'un point de vue pratique et médical. Le démonstrateur affiche d'abord un *cas de base* de mâchoire, ne présentant pas de cas particuliers comme des dents manquantes ou endommagées par exemple. Les maillages de gencives et de dents ont préalablement été *segmentés*. Ces dernières sont également *virtuellement complétées* afin d'être des maillages fermés. La différence entre les maillages de dents ouverts et fermés est illustrée figure 15.

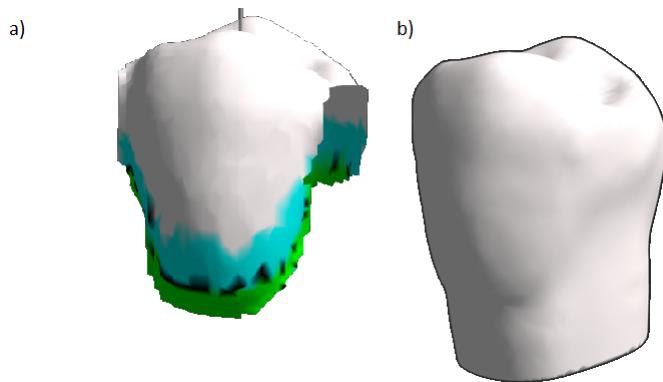


FIGURE 15 – Aperçu d'une dent non complétée, en a), et la même complétée, en b)

La première étape dans l'utilisation du démonstrateur est de sélectionner une dent, pour cela l'utilisateur a simplement besoin de survoler une dent et de cliquer dessus. Un affichage de ce processus est illustré figure 16.

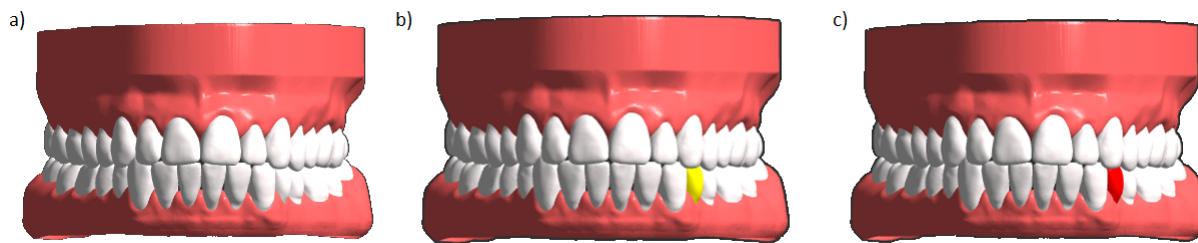


FIGURE 16 – Aperçu des maillages de gencives et de dents dans un cas de base, en a), lorsqu'une dent est survolée, en b), et lorsqu'elle est sélectionnée, en c)

Une fois qu'une dent a été sélectionnée, l'axe d'insertion peut être défini via l'interface de la figure 17. Dans celle-ci, en 17.a) une vue avec l'axe d'insertion et les contre-dépouilles résultantes. L'axe est modifiable en interagissant avec lui via la molette de la souris, mettant à jour les contres-dépouilles en temps réel. En 17.b), la même dent vu selon l'axe d'insertion. Cette vue est également interactive via la souris et les modifications faites sur celle-ci, comme des rotations, mettront à jour l'axe d'insertion de la vue 17.a), modifiant alors les contre-dépouilles. L'axe d'insertion validé par l'utilisateur, le crochet peut être calculé. Ce dernier étant mis à jour en *temps réel* à chaque changement d'axe d'insertion.

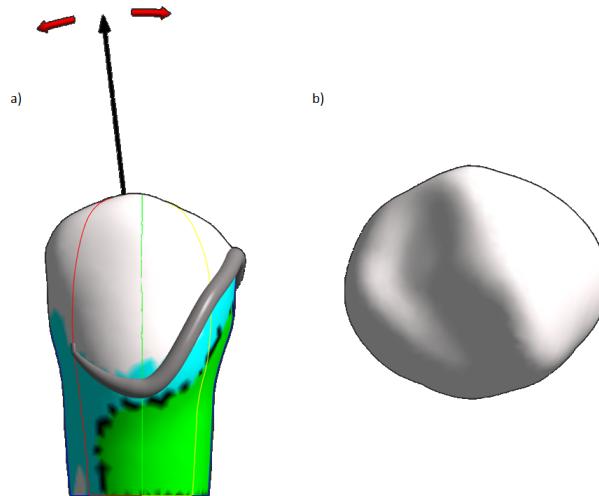


FIGURE 17 – Aperçu d'un crochet calculé dans le démonstrateur, en a) une vue avec l'axe d'insertion et les contre-dépouilles et en b) la dent vue selon l'axe d'insertion

4.2 Calcul du Crochet

Cette partie va détailler la méthode de calcul automatique des crochets. Elle est paramétrable via des *fichiers INI* qui sont des fichiers de configurations qui seront parsés lors de la formation du crochet. Ces fichiers sont facilement éditables et ont été conçus pour rendre la méthode simple d'utilisation et rendre les crochets simplement définissables puisque les utilisateurs cibles ne *sont pas issus* du milieu de l'informatique.

Les fichiers INI servent donc à définir les paramètres de différents types de crochets. Ce rapport étudiera par la suite le crochet *Ackers* représenté par le schéma de la figure 18. Ce type de crochet étant le type le plus commun.

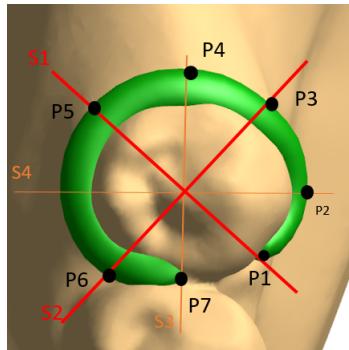


FIGURE 18 – Schéma représentant les différentes données permettant de calculer un crochet Ackers

Pour étudier les différentes techniques utilisées pour la méthode de calcul de crochets automatiques, il est nécessaire d'introduire les *axes d'une dent* qui seront utilisés à différentes étapes de la méthode. Chaque dent possède son propre *repère* défini par les axes présentés en figure 19. En 19.b) se trouve l'axe *racine*, allant de la racine à la face occlusale de la dent et en 19.c) est l'axe *vestibulaire-linguale* allant de l'arrière vers l'avant de la dent, cet axe est bien sûr orthogonal à l'axe racine. Enfin, le dernier axe en 19.a) est l'axe étant le *produit vectoriel* des deux autres axes correspondant au *sillon* de la dent, ou de la *crête* dans le cas d'une incisive.

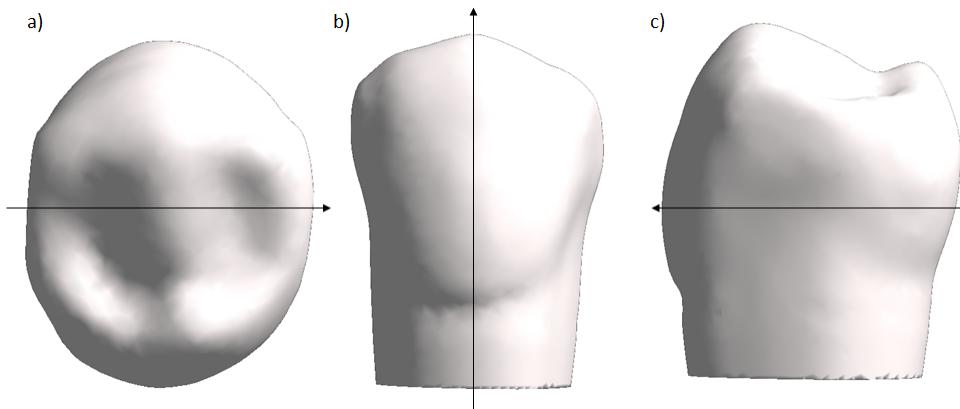


FIGURE 19 – Représentation des axes d'une dent, ici une prémolaire. En a) l'axe sillón, en b) l'axe racine et en c) l'axe linguale-vestibulaire

Ces axes sont notamment utilisés dans la première étape du calcul des crochets : la définition des *Slicings*. Comme illustré par la figure 18, la méthode de calcul de crochet automatique consiste en un positionnement de points autour de la dent. Ces points doivent être placés avec précision, la méthode utilise donc les *Slicings*, des *polylinnes* issues de l'intersection d'un plan avec le maillage de la dent, c'est sur celles-ci que sont placés les points du crochet. Chaque Slicing possède son propre plan, ils partagent tous un point commun étant le barycentre de la dent et leur normale est l'axe *sillon* ayant subit une rotation d'un certain angle selon l'axe *racine*. L'angle de rotation que doit subir la normale de chaque Slicing est paramétrable dans le fichier INI décrivant le crochet.

L'exemple du crochet Ackers de la figure 18 montre que ce crochet nécessite quatres Slicings étant S1, S2, S3 et S4 qui ont respectivement subit des rotation de 45°, 315°, 90° et 0°. Ces Slicings sont illustrées figure 20 avec les couleurs rouge pour S1, jaune pour S2, bleu pour S3 et vert pour S4.

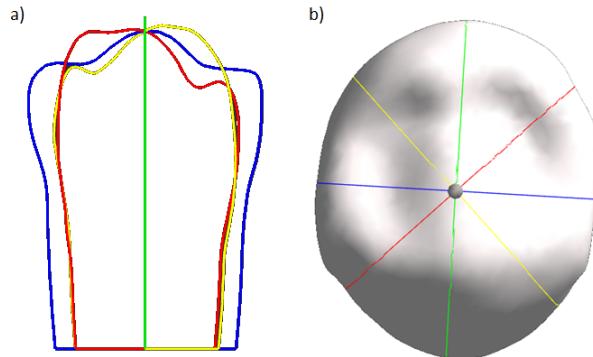


FIGURE 20 – Aperçu des Slicings dans le démonstrateur seules, en a), et sur le maillage d'une dent, en b)

Comme évoqué précédemment, les points du crochets sont placés sur les Slicings qui viennent d'être définies. Ces points, comme dit dans l'état de l'art, sont placés en fonction de *valeurs de rétention*. Une méthode de calcul de valeur de rétention a donc été développée pour ce projet. Cette méthode est schématisée par la figure 21 qui sera détaillée à chaque étape.

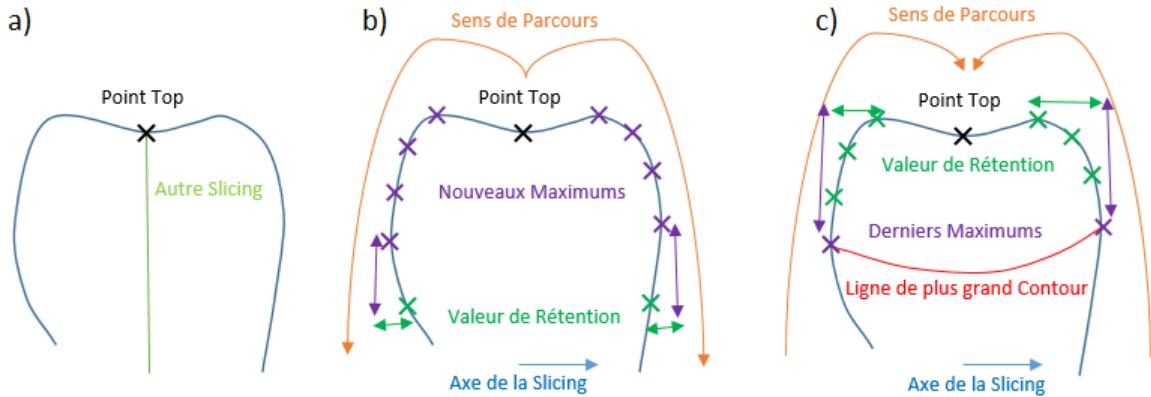


FIGURE 21 – Schéma de la méthode de calcul de valeur de rétention d'une Slicing

La première étape, en 21.a), consiste à trouver le point *Top*. Ce point représente le haut de la dent selon l'axe *racine*, il s'agit du point d'intersection avec la Slicing courante et n'importe quelle autre Slicing. *Top* sert de point de départ pour les parcours des étapes suivantes.

L'étape représentée par 21.b) consiste à parcourir la Slicing une première fois en deux parcours partant de Top descendant le long de la Slicing. A chaque pas du parcours, le *produit scalaire* entre le point courant et l'axe de la Slicing est étudié, l'axe de la Slicing étant déduit du *produit vectoriel* entre l'axe *racine* et la normale du plan de la Slicing. La valeur *maximale* du produit scalaire est gardée en mémoire et mise à jour si nécessaire. Cette valeur maximale sert à calculer la valeur de rétention. Celle-ci est déduite de la différence entre la valeur de produit scalaire du point courant et de la valeur maximum actuelle, cependant la valeur de rétention sera notée à 0 si le point courant est le nouveau maximum. Cette façon de faire a été mise en place pour prendre en compte les cas particuliers où *plusieurs zones de dépouilles et contre-dépouilles* sont présentes sur la Slicing. Un exemple d'un tel cas est illustré figure 22 où la Slicing bleue présente plusieurs zones de dépouilles.

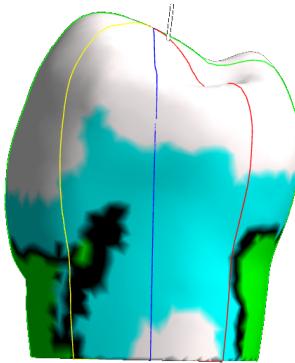


FIGURE 22 – Exemple de plusieurs zones de dépouille sur la Slicing bleue

L'étape représentée par 21.c) consiste à parcourir la Slicing mais dans le sens inverse, en *remontant*. Lors de ce parcours, des valeurs de rétentions seront calculées de la même manière que dans 21.b) pour les points ayant été notés à 0 de rétention précédemment. Ces nouvelles valeurs de rétention seront notées *négativement* puisque ce ne sont pas des points de la dent rétentifs. Ces valeurs sont utiles car certains points d'un crochet peuvent être placé au dessus de la ligne de plus grand contour, notamment au niveau du *contre-crochet* par exemple. Les deux derniers maximums relevés lors du parcours de 21.b) sont donc sur la ligne de plus grand contour.

Avec les valeurs de rétentions calculées, les points du crochet peuvent être placés sur les Slicings. Les paramètres étant liés aux points tels que la valeur de rétention à laquelle ils doivent être placés ou s'ils doivent être à *l'avant ou l'arrière* de la Slicing. La Slicing étant une polyligne, elle n'a pas réellement de *sens*, l'avant et l'arrière sont alors déduits de l'étape 23.a) du schéma représentant la méthode de placement des points du crochet illustré figure 23.

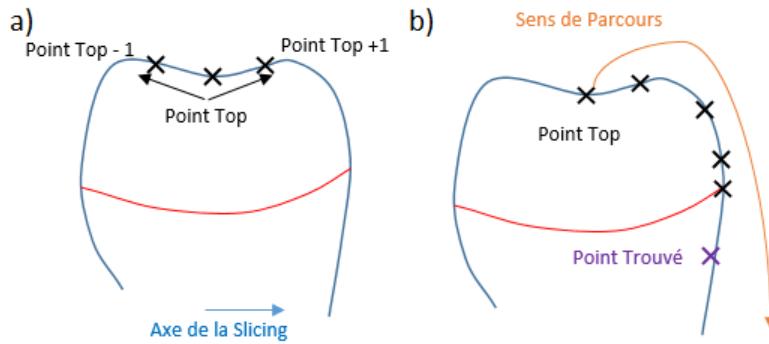


FIGURE 23 – Schéma représentant la méthode de placement des points du crochet sur une Slicing

Cette première étape consiste à étudier le *signe* du produit scalaire entre l'axe de la Slicing et les vecteurs entre *Top* et *Top + 1* et entre *Top* et *Top - 1*. En fonction de ce qui a été indiqué dans les paramètres du crochet, la *moitié* avant ou arrière de la Slicing sera parcouru selon ce qui est illustré en 23.b). Ce parcours consiste à tester à chaque pas si la valeur de rétention du point courant est *inférieure ou égale* à la valeur de rétention sur laquelle placer le point du crochet et si la valeur de rétention du point suivant est *supérieure* à la valeur de rétention recherchée, si le test est validé alors le point courant est noté comme étant point du crochet. Cette méthode a été choisie pour, encore une fois, gérer les cas particuliers où il y a plusieurs zones de contre-dépouille. Cette méthode assure que le point placé est bien le *premier* en partant de *Top* qui vérifie la condition de placement.

Après avoir placé correctement les points du crochet, il peut être tracé. Cela se fait en deux étapes, la première est de tracer une courbe décrivant le crochet puis lui donner du volume. Pour la première étape, une courbe *B-Spline par morceaux* a été choisie, où chaque morceaux est une courbe B-Spline entre deux points du crochets, avec des tangentes guidant la forme de la courbe. Les tangentes de chaque point sont paramétrables dans le fichier INI.

Un exemple de fonctionnement d'un morceau est illustré figure 24.

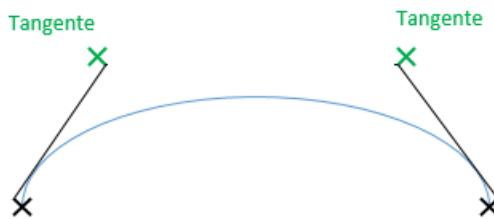


FIGURE 24 – Exemple du fonctionnement d'un morceau de la courbe B-Spline

La courbe B-Spline par morceaux a été implémentée dans le projet en adaptant un outil déjà présent dans le noyau de l'entreprise : le *B-Spline Editor*. Son intérêt est de permettre à l'utilisateur d'*éditer*, comme son nom l'indique, la courbe en changeant la position des points de contrôles et les tangentes. La composante d'édition est un critère important pour ce projet, pour permettre à l'utilisateur de reprendre la proposition initiale du calcul automatique du crochet si elle ne lui correspond pas. Enfin, la courbe tracée est projetée sur le maillage de la dent car la courbe ne passe pas forcément par le maillage. Un aperçu de l'interface du B-Spline Editor est illustré figure 25.

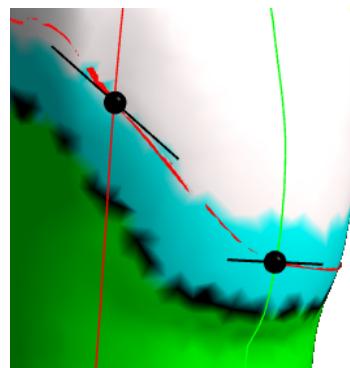


FIGURE 25 – Exemple de l'interface du B-Spline Editor

La deuxième étape du tracé du crochet est de faire une *extrusion* d'un profile d'un cercle le long de la courbe B-Spline calculée par l'étape précédente. Un exemple du crochet tracé est illustré figure 26.

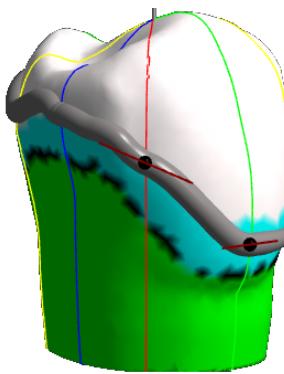


FIGURE 26 – Résultat du volume créé à partir de la courbe B-Spline

Les différentes méthodes évoquées jusqu’ici ont permis de tracer un crochet dentaire de manière automatique en étant basé sur les valeurs de *rétentions*, dans un démonstrateur permettant de tester plusieurs configurations et plusieurs cas rapidement, ainsi que tester plusieurs types de crochets grâce aux changements d’axe d’insertion en temps réels et à l’édition des fichiers INI et de la courbe B-Spline. Ainsi beaucoup de tests ont été réalisés, et il a été vu que la valeur de rétention n’est pas l’*unique critère* de positionnement du crochet. En effet, la dimension esthétique est également très importante, une règle de positionnement a donc été implémentée.

Cette règle a été développée principalement pour le crochet Ackers. Par convention esthétique, la pointe du crochet doit avoir une forme arrondie. Cependant en se basant uniquement sur les valeurs de rétentions pour placer la pointe du crochet, celle-ci peut se retrouver en dessus du reste du crochet, ce qui n’est pas correcte, comme illustré figure 27.

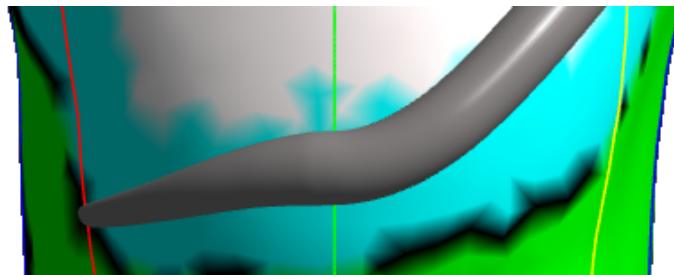


FIGURE 27 – Exemple d’un crochet Ackers avec une pointe non conforme

La règle doit donc mettre le premier point du crochet légèrement *au dessus* du deuxième point si le premier point est sous le deuxième. Le maillage de la dent pouvant être orienté de n'importe quelle façon, la hauteur des points sont alors déduites d'un produit scalaire entre les coordonnées du point étudié et l'axe *racine*. Un résultat de l'application de cette règle de positionnement est illustré figure 28 sur la même dent que la figure 27.

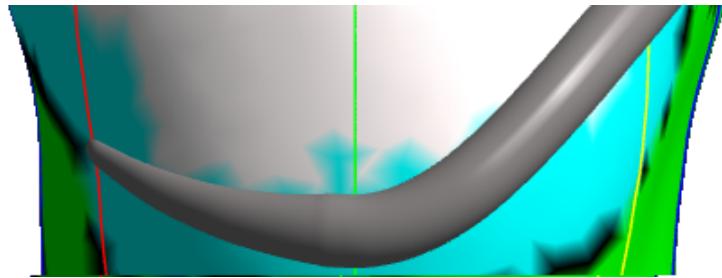


FIGURE 28 – Résultat de la règle du premier point

La méthode de calcul des crochets automatique a pu être validée après plusieurs tests et retours avec la prothésiste de l'entreprise. Le démonstrateur a permis de tester la méthode sur tous les types de dents avec énormément de possibilités d'axe d'insertion. La prochaine étape est donc d'exporter cette méthode dans une situation réelle : le logiciel Digistell de l'entreprise.

4.3 Implémentation dans Digistell

Cette partie aborde l'implémentation de la méthode de calcul de crochet automatique dans le logiciel Digistell, étant un des logiciels de C4W destiné à la modélisation de prothèse adjointe, dont les crochets sont un élément essentiel. Un exemple de l'interface du logiciel est illustré figure 29.

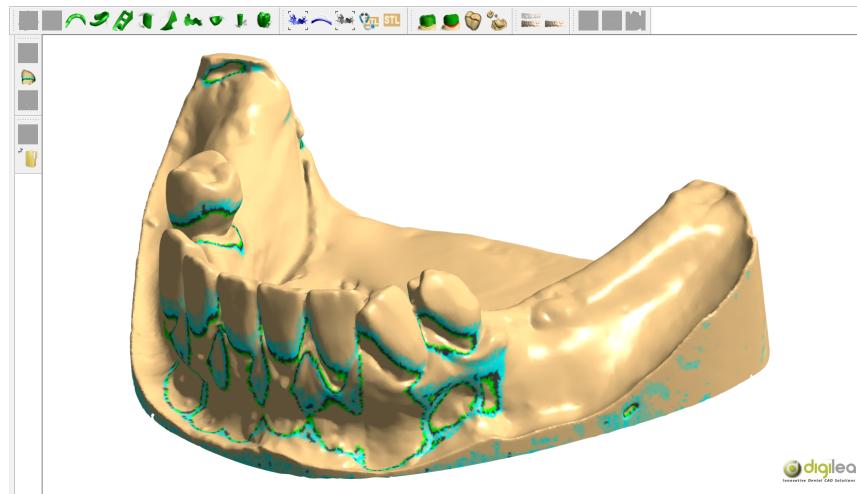


FIGURE 29 – Exemple de l'Interface de Digistell

L'implémentation dans Digistell pose cependant certaines problématiques qui avaient été mises de côté lors du développement du démonstrateur. La principale de ces problématiques est le fait de travailler uniquement sur le maillage de l'*arcade* entière. Le maillage n'est surtout *pas segmenté* entre gencive et dent. Il est donc nécessaire d'*extraire* le maillage d'une dent pour pouvoir appliquer notre méthode de calcul de crochet automatique. Une méthode déjà présente dans le noyau de l'entreprise a donc été adaptée pour répondre à ce besoin. Cette méthode demande à l'utilisateur de cliquer sur la *face occlusale* de la dent qu'il souhaite extraire, un maillage sera alors calculé. Cependant ce maillage sera *ouvert* contrairement à ce qui se fait dans le démonstrateur. Un exemple d'extraction est illustré figure 30.

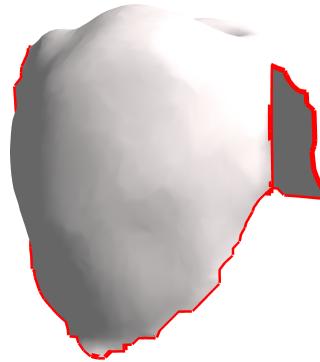


FIGURE 30 – Exemple d'un maillage de dent extrait avec les frontières libres indiquées en rouges

Le maillage de dent extrait selon cette méthode est alors un maillage *ouvert*. Cette condition implique que lors du parcours pour placer le points du crochet sur une Slicing en fonction d'une valeur de rétention, il est possible qu'*aucun point* de la Slicing ne valide la condition pour placer les point du crochet. Une sécurité a donc été mise en place dans ce cas de figure, plaçant le point du crochet sur la frontière libre.

Cette sécurité permet d'avoir toujours un point de placé, ce qui permet à la méthode de fonctionner correctement, seulement elle n'est pas appropriée car la majorité du temps la frontière libre correspond à la zone de *collet*. Le collet étant la frontière entre la dent et la gencive. Cependant placer le crochet ici causera des douleurs au patient, ce qui n'est pas acceptable, une autre règle de positionnement a donc été implantée. Cette règle va *remonter* les points du crochet placés sur la frontière libre d'une certaine hauteur paramétrable dans le fichier INI. La méthode utilisée est la même que pour la règle de placement du premier point évoquée dans la partie 4.2. Une application de cette règle est illustrée figure 31 avec en 31.a) le crochet touchant la gencive et en 31.b) le crochet est correct.

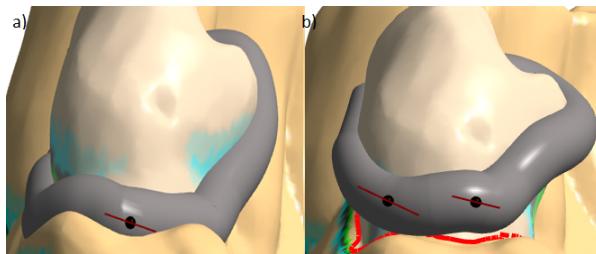


FIGURE 31 – Exemple d’application de la règle du collet, en a) avant application et en b) après application : le crochet ne touche plus la gencive

La méthode de calcul de crochet automatique est maintenant capable de gérer les maillages de dents ouvertes, mais la méthode repose sur une bonne extraction de dent. En effet, l’outil d’extraction ne fonctionne parfois pas correctement, notamment dans le cas des canines ou des incisives. Les extractions manquent parfois tout une partie de la dent ou à l’inverse parfois déborder sur la gencive ou extraire deux dents au lieu d’une. Ce dernier exemple est illustré figure 32.

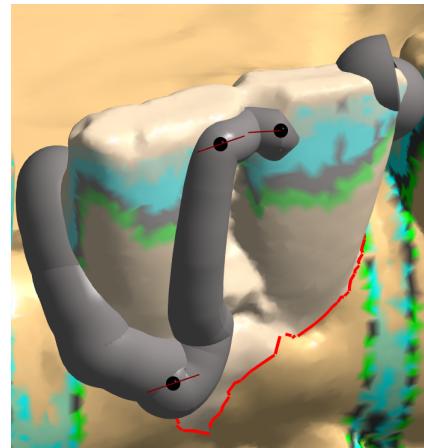


FIGURE 32 – Exemple de mauvaise extraction de dents

Pour répondre à cette problématique, une option a été laissé à l’utilisateur d’extraire la dent manuellement si la première extraction s’est mal passée, cela à l’aide d’un outil existant dans le noyau de l’entreprise qui a été adapté au projet. Cette méthode demande à l’utilisateur de placer quatres points de contrôle à partir desquels sera extrait un maillage. Un exemple d’application est illustré figure 33.

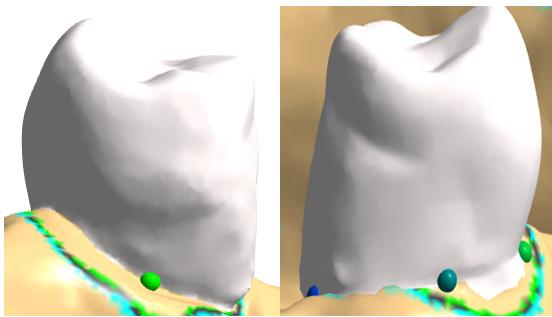


FIGURE 33 – Exemple d'extraction manuelle

La méthode de calcul de crochet automatique est maintenant assurée de fonctionner correctement car un maillage de dent correct est garantie par extraction automatique ou manuelle. Mais après des retours avec la prothésiste de l'entreprise, certains crochets ne sont toujours pas corrects d'un point de vue esthétique encore une fois. En effet, en plaçant simplement les points avec la valeur de rétention, certains peuvent donner une forme déplaisante, certains points devaient être à la même hauteur que d'autres. Ainsi une règle de repositionnement a été mise en place, une méthode amenant un point à la même hauteur qu'un autre selon s'il est au dessus ou en dessous de ce dernier. Cette règle est donc générique et les paramètres tels que quel point doit être à la même hauteur duquel et dans quel cas sont indiqués dans le fichier INI. La méthode de calcul de hauteur est la même qui a été utilisée jusqu'ici. Un exemple d'utilisation est illustré figure 34 où en 34.a) les points du crochet sont placés uniquement avec les valeurs de rétention et en 34.b) après utilisation de la règle de repositionnement.

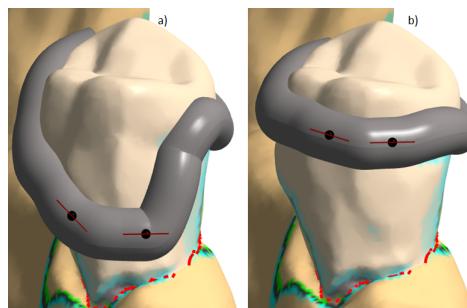


FIGURE 34 – Exemple d'application de la règle de repositionnement, en a) avant utilisation et en b) après

Enfin, le dernier cas particulier couvert dans ce rapport est celui des dents présentant des *préparations*. Ces préparations sont des petites cavités creusées par le praticien sur une dent qui va accueillir un crochet ou les appuis. Cela a pour conséquence de faire apparaître des zones de contre-dépouilles dans ces cavités, comme illustré figure 35.

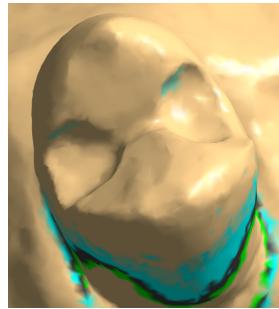


FIGURE 35 – Aperçu d'une prémolaire présentant deux préparations

Cela pose problème car, comme vu précédemment, la méthode de placement des points du crochet en fonction d'une valeur de rétention part du haut de la dent et descend en plaçant le point du crochet sur le *premier* point de la Slicing ayant une valeur de rétention correcte. Les zones de contre-dépouilles issues des préparations peuvent alors présenter des valeurs de rétention correctes, plaçant le point du crochet sur celles-ci. Hors, le crochet ne peut pas être sur la face occlusale d'une dent, il faut donc *ignorer* la face occlusale lors du placement des points du crochet. Pour cela il est nécessaire de *détecter* la face occlusale, une méthode a donc été concue, illustrée par le schéma de la figure 36.

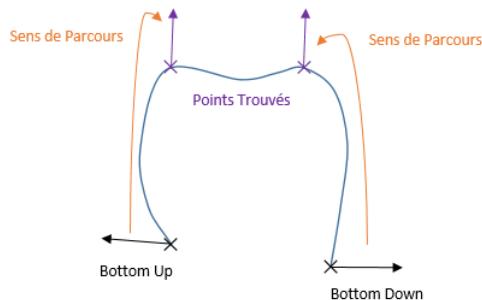


FIGURE 36 – Schéma de la méthode de détection de la face occlusale sur une Slicing

La méthode définit d'abord les points *Bottom Up* et *Bottom Down* qui sont les frontières libres des deux côtés de la Slicing. La Slicing sera ensuite parcouru deux fois en partant de chacun de ces points. A chaque étape du parcours, la normale du point courant sera comparée à la normale du point de départ du parcours, si l'angle entre ces normales est supérieur ou égal à 90° , alors le point courant sera noté comme frontière de la face occlusale sur cette Slicing. La méthode de placement des points du crochet sera alors reprise en ignorant les point à l'intérieur des frontières de la face occlusale. Un résultat de la méthode de détection est illustré figure 37 dans lequel en 37.a) des points du crochet ont été placés dans la préparation et en 37.b) les préparations ont été ignorées.

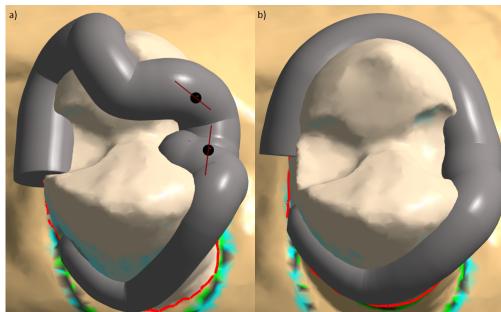


FIGURE 37 – Aperçu du calcul du crochet sans détection de la face occlusale, en a), et avec, en b)

5 Résultats

Cette section présentera différents résultats des méthodes vues dans la section précédente. La méthode de calcul de crochet automatique fonctionne comme voulu tout en gérant plusieurs cas particuliers. Cette méthode produit des crochets conformes aux normes médicales et elle est rapide, ne s'exécutant qu'avec un simple clic, rendant le processus de modélisation de crochet en CAO bien moins fastidieux et plus rapide tout en laissant la main au praticien s'il souhaite reprendre la proposition initiale. La méthode a été intégrée dans un logiciel de CAO reconnu et a été montré et fait testé à des clients de C4W, notamment lors du salon IDS, qui ont été impressionnés par les performances de la méthode. Un résultat est illustré figure 38 dans lequel plusieurs types de crochets ont été placés sans être modifiés.

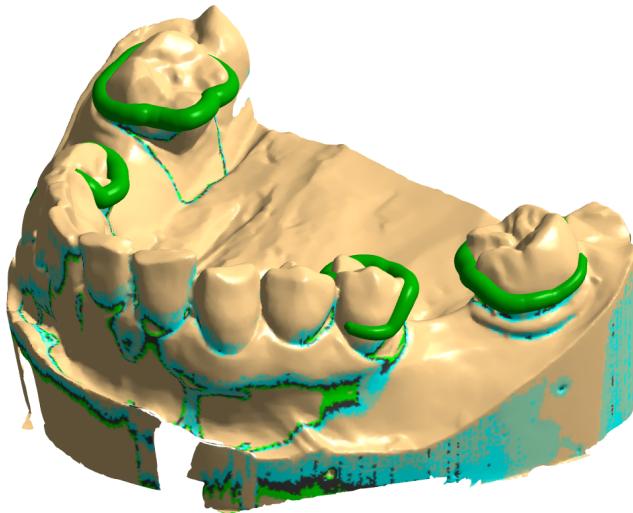


FIGURE 38 – Résultat de plusieurs crochets Ackers sur un cas dans Digistell

La méthode fonctionne également sur tout type de dents, pas seulement les molaires ou prémolaires. La figure 39 illustre un crochet Ackers placé respectivement en 39.a) sur une incisive et en 39.b) sur une canine qui sont eux aussi corrects et n'ont pas été modifié.

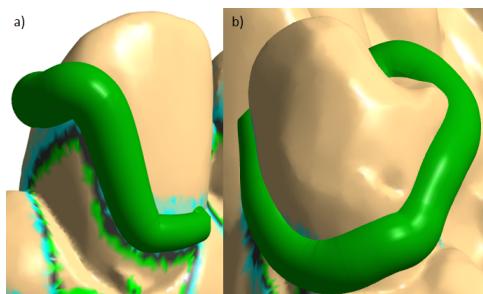


FIGURE 39 – Exemple de la méthode utilisée sur une incisive, en a) et une canine, en b)

Cependant quelques problèmes restent à corriger. Notamment, les deux types de dents précédemment évoqués posent un réel problème dans le cas de la détection de la face occlusale. Par exemple, dans la figure 40, la face occlusale à été détectée comme étant à la bordure d'une préparation subit par la canine, plaçant donc le crochet dessous, hors dans ce cas là le crochet aurait dû être placé plus en hauteur.

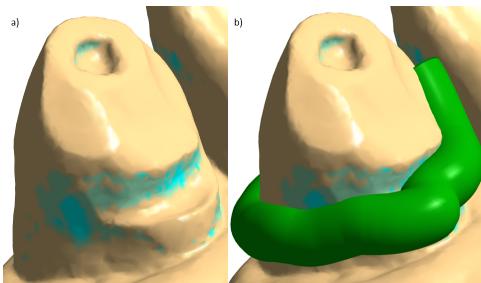


FIGURE 40 – Exemple d'une canine préparée, en a), où le crochet n'est pas correct, en b)

D'autres problèmes, cette fois-ci d'un point de vue esthétique, persistent comme celui illustré figure 41 dans laquelle la courbe B-Spline générée par le B-Spline Editor forme une bosse de part la projection de la courbe sur le maillage.

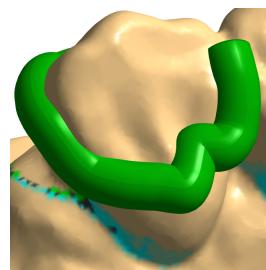


FIGURE 41 – Exemple d'un crochet non esthétique

Malgré la présence des problèmes relevés jusqu'ici, ces derniers ne représentent qu'un infime nombre de cas particuliers qui devront bien sûr être gérés par la méthode de calcul de crochet automatique dans le futur mais qui n'efface pas le fait que la méthode est très satisfaisante.

6 Conclusion

6.1 Conclusion Générale

La problématique de ce rapport était de déterminer si une proposition de méthode de calcul automatique de crochet était réalisable et si celle-ci était satisfaisante d'un point de vue informatique et médicale.

La problématique a bien été résolue, en proposant une méthode de calcul de crochet automatique performante, modélisant des crochets corrects d'un point de vue médical et étant simple d'utilisation puisque destinée à des utilisateurs qui ne sont pas issus du domaine de l'informatique. La méthode est également robuste, permettant de couvrir plusieurs cas particuliers pouvant être rencontrés par les praticiens et permet un grand gain de temps pour la modélisation de crochets en CAO.

La méthode a également été intégrée à un logiciel de C4W utilisé par de nombreux praticiens : Digistell. Cette intégration a demander un effort d'adaptation de la méthode et d'abstraction afin de l'intégrer dans de futurs logiciels également. La méthode a aussi été testée par une prothésiste de C4W afin de la valider mais a aussi été montrée à des clients de l'entreprise, notamment lors du salon IDS, lesquels ont été très satisfaits par la méthode.

Certains points faibles de la méthode restent cependant à régler comme la détection de la face occlusale qui peut mal se dérouler en fonction des types de dent, mais aussi certains problèmes d'un point de vue esthétique qui est une composante importante.

6.2 Perspectives d'Amélioration

Les premières améliorations à effectuer sont évidemment des *corrections* aux problèmes évoqués plus tôt. Donc mettre au point une méthode de détection de la face occlusale *plus robuste et précise*, en l'adaptant en fonction du type de dent sur laquelle la méthode est appliquée par exemple. Aussi, utiliser un outil de modélisation de courbes B-Splines *moins rigide* peut être une option.

Le crochet n'est qu'un élément d'un stellite, rendre la modélisation des autres parties de

la prothèse automatique, notamment les grilles de rétentions et les barres linguales, se profile comme une suite évidente mais représenterait d'autres projets à part entière.

Enfin, cette alternance m'a permis de découvrir la milieu de l'informatique en entreprise, en m'adaptant aux bases de codes déjà présentes et au fonctionnement déjà établit de C4W. Ce projet m'a également permis de m'exercer sur la difficulté que représente la communication avec des personnes n'étant pas issues du milieu de l'informatique pour mener à bien un projet, comme la prothésiste de l'entreprise.

Références

- [1] Frank Kaiser, Prothèse Partielle Amovible.
- [2] Robert W. Loney, 2011, Removable Partial Denture Manual, *DalHouse University*.
- [3] Théo George, 2018, Prothèse Amovible Partielle à Infrastructure Métallique : CFAO ou Techniques Conventionnelles.
- [4] Raphaël Richert, 2018, Intraoral Scanner Technologies : A Review to Make a Successful Impression, *Université de Lyon*.
- [5] Alok K. Priyadarshi et Satyandra K. Gupta, Finding Mold-Piece Regions Using Computer Graphics Hardware.