

UNIVERSITE TOULOUSE III – PAUL SABATIER
FACULTE DE CHIRURGIE DENTAIRE

ANNEE 2018

2018-TOU3-3056

THESE

POUR LE DIPLOME D'ETAT DE DOCTEUR EN CHIRURGIE DENTAIRE

Présentée et soutenue publiquement

par

Aude MAILLARD

le 02 Octobre 2018

**ACQUISITION NUMÉRIQUE, CFAO DENTAIRE : ORIGINES,
ÉVOLUTIONS ET PERSPECTIVES**

Directeur de thèse : Docteur Karim NASR

Co-directeur de thèse : Docteur Bertrand ARCAUTE

JURY

Président :	Professeur Philippe POMAR
1 ^{er} assesseur :	Docteur Karim NASR
2 ^{ème} assesseur :	Docteur Jean-Noël VERGNES
3 ^{ème} assesseur :	Docteur Bertrand ARCAUTE



Faculté de Chirurgie Dentaire

➔ **DIRECTION**

DOYEN

Mr Philippe POMAR

ASSESEUR DU DOYEN

Mme Sabine JONNIOT

CHARGÉS DE MISSION

Mr Karim NASR
Mr HAMEL Olivier
Mr Franck DIEMER

PRÉSIDENTE DU COMITÉ SCIENTIFIQUE

Mme Cathy NABET

RESPONSABLE ADMINISTRATIF

Mme Muriel VERDAGUER

➔ **HONORARIAT**

DOYENS HONORAIRES

Mr Jean LAGARRIGUE +
Mr Jean-Philippe LODTER +
Mr Gérard PALOUDIER
Mr Michel SIXOU
Mr Henri SOULET

➔ **ÉMÉRITAT**

Mr Damien DURAN
Mme Geneviève GRÉGOIRE
Mr Gérard PALOUDIER

➔ **PERSONNEL ENSEIGNANT**

Section CNU 56 : Développement, Croissance et Prévention

56.01 ODONTOLOGIE PEDIATRIQUE et ORTHOPEDIE DENTO-FACIALE (Mme BAILLEUL- FORESTIER)

ODONTOLOGIE PEDIATRIQUE

Professeurs d'Université : Mme BAILLEUL-FORESTIER, Mr. VAYSSE
Maîtres de Conférences : Mme NOIRRIIT-ESCLASSAN, Mme VALERA, Mr. MARTY
Assistants : Mme DARIES, Mme BROUTIN
Adjoint d'Enseignement : Mr. DOMINE, Mme BROUTIN, Mme GUY-VERGER

ORTHOPEDIE DENTO-FACIALE

Maîtres de Conférences : Mr BARON, Mme LODTER, Mme MARCHAL, Mr. ROTENBERG,
Assistants : Mme YAN-VERGNES, Mme ARAGON
Adjoint d'Enseignement : Mme DIVOL,

56.02 PRÉVENTION, ÉPIDÉMIOLOGIE, ÉCONOMIE DE LA SANTÉ, ODONTOLOGIE LÉGALE (Mr. HAMEL)

Professeurs d'Université : Mr. SIXOU, Mme NABET, Mr. HAMEL
Maître de Conférences : Mr. VERGNES,
Assistant: Mr. ROSENZWEIG,
Adjoints d'Enseignement : Mr. DURAND, Mlle. BARON, Mr LAGARD

Section CNU 57 : Chirurgie Orale, Parodontologie, Biologie Orale

57.01 CHIRURGIE ORALE, PARODONTOLOGIE, BIOLOGIE ORALE (Mr. COURTOIS)

PARODONTOLOGIE

Maîtres de Conférences : Mr. BARTHET, Mme DALICIEUX-LAURENCIN, Mme VINEL
Assistants : Mr. RIMBERT, Mr. ANDUZE-ACHER
Adjoints d'Enseignement : Mr. CALVO, Mr. LAFFORGUE, Mr. SANCIER, Mr. BARRE, Mme KADDECH

CHIRURGIE ORALE

Maîtres de Conférences : Mr. CAMPAN, Mr. COURTOIS, Mme COUSTY
Assistants : Mme COSTA-MENDES, Mr. BENAT
Adjoints d'Enseignement : Mr. FAUXPOINT, Mr. L'HOMME, Mme LABADIE, Mr. RAYNALDI,

BIOLOGIE ORALE

Professeur d'Université : Mr. KEMOUN
Maîtres de Conférences : Mr. POULET, Mr. BLASCO-BAQUE
Assistants : Mr. LEMAITRE, Mr. TRIGALOU, Mme. TIMOFEEVA, Mr. MINTY
Adjoints d'Enseignement : Mr. PUISSOCHET, Mr. FRANC, Mr. BARRAGUE

Section CNU 58 : Réhabilitation Orale

58.01 DENTISTERIE RESTAURATRICE, ENDODONTIE, PROTHESES, FONCTIONS-DYSFONCTIONS, IMAGERIE, BIOMATERIAUX (Mr ARMAND)

DENTISTERIE RESTAURATRICE, ENDODONTIE

Professeur d'Université : Mr. DIEMER
Maîtres de Conférences : Mr. GUIGNES, Mme GURGEL-GEORGELIN, Mme MARET-COMTESSE
Assistants : Mr. BONIN, Mme. RAPP, Mr. MOURLAN, Mme PECQUEUR, Mr. DUCASSE, Mr FISSE
Adjoints d'Enseignement : Mr. BALGUERIE, Mr. MALLET, Mme FOURNIER

PROTHÈSES

Professeurs d'Université : Mr. ARMAND, Mr. POMAR
Maîtres de Conférences : Mr. CHAMPION, Mr. ESCLASSAN, Mme VIGARIOS, Mr. DESTRUHAUT
Assistants : Mr. EMONET-DENAND, Mme. SELVA, Mr. LEMAGNER, Mr. HENNEQUIN, Mr. CHAMPION,
Mr. BOGHANIM, Mr. FLORENTIN, Mr. FOLCH, Mr. GALIBOURG, Mr. GHRENASSIA, Mme LACOSTE-FERRE, Mr. POGÉANT, Mr. GINESTE, Mr. LE GAC, Mr. GAYRARD,
Mr. COMBADAZOU, Mr. ARCAUTE, Mme DE BATAILLE,

FONCTIONS-DYSFONCTIONS, IMAGERIE, BIOMATERIAUX

Maîtres de Conférences : Mme JONJOT, Mr. NASR, Mr. MONSARRAT
Assistants : Mr. CANCEILL, Mr. OSTROWSKI, Mr. DELRIEU
Adjoints d'Enseignement : Mr. AHMED, Mme MAGNE, Mr. VERGÉ, Mme BOUSQUET

Mise à jour pour le 03 septembre 2018

Remerciements

A mes parents, Maman pour ton soutien et pour ta confiance. C'est parce que tu n'as jamais douté de moi que j'en suis là aujourd'hui. **Papa** pour ton exigence qui m'a toujours stimulée pour atteindre l'excellence, j'espère faire honneur à la famille comme tu nous le dis souvent.

Merci à tous les deux de m'avoir supportée aussi dans les mauvais moments. Vous avez fait du bon travail, et ma réussite en est le résultat.

A mes sœurs, Laurène pour ton soutien, et ta joie de vivre. Merci d'avoir toujours été là, merci d'avoir facilité mon arrivée à Toulouse et pour tout ce que tu as fait pour moi. **Perrine**, pour ta confiance, pour tes blablas sans fin. Merci pour m'avoir donné l'exemple. J'admire ton optimisme. **Alexia**, pour ta présence, pour tous les moments qu'on a partagés et pour tous ceux à venir. Notre lien est plus fort que tout, tu es bien plus que ma petite sœur. Je n'imagine pas ma vie sans toi.

A mes grands-parents, Gisèle et Gérard, pour votre soutien sans faille, votre confiance et votre présence, même si vous habitez loin.

A mes cousines, Anne-Lise, Clémence et Julie-Anne, pour votre folie et votre soutien, vous êtes mes rayons de soleil du lundi soir ! Je suis heureuse que vous ayez choisi de faire vos études à Toulouse, grâce à ça, on a pu mieux se connaître.

A Clément, pour tout ce que tu as fait pour moi, pour tes bons petits plats et pour avoir relu mon travail.

A tous les amis de promo : Samantha pour ton aide, ta présence, ton amitié et pour tout ce qu'on a vécu depuis la P2. **Theophile** pour ton amitié, ton grain de folie et ta présence depuis la PACES. **Marion**, pour ta bonne humeur (ton rire) et pour m'avoir hébergée quand j'en avais besoin ; **Aurélien** pour ton rire légendaire ; **Claire** pour tous les moments passés en clinique depuis trois ans. **Elsa** pour avoir été une super binôme de ronéo et de TP, **Aurélien**, pour les bons moments passés en TP, en TD et lors de ce rattrapage clinique. **Chloé** pour ta compagnie en stage actif.

A Charlotte, pour avoir été la binôme parfaite pendant ces trois ans. Tu as été mon soutien, mon coach, mon amie. Sans toi, rien n'aurait été pareil. Tu m'as permis d'avoir confiance en moi et je t'en remercie ! Nous avons traversé des moments difficiles en clinique mais c'est ta présence qui m'a donné la force de continuer. J'espère que plus tard, nous pourrions travailler ensemble !

Au Dr Patricia Bonnet, pour votre accueil et votre confiance. **Aux Dr Azria, Zago et Gargir** pour ce stage actif qui m'a permis de découvrir le métier sous son meilleur jour. Vous m'avez beaucoup appris et je vous en remercie.

A Philippe Liminana, pour l'aide que vous m'avez apportée pour ce travail.

Au Dr Delphine Maret-Comtesse, pour les informations et l'aide que vous m'avez apportée pour ce travail.

Enfin, A toi Simon, pour tout le bonheur que tu m'apporte chaque jour, pour ton soutien sans faille, ta joie de vivre, ton écoute et ta présence à mes côtés. Pour tous les moments que l'on a vécus et pour tous ceux que l'on vivra ensemble. Tu es essentiel à ma vie, je t'aime.

A notre président du jury

Monsieur le Professeur **Philippe Pomar**

- Doyen de la Faculté de Chirurgie Dentaire de Toulouse,
- Professeur des Universités, Praticien Hospitalier d'Odontologie,
- Lauréat de l'Institut de Stomatologie et Chirurgie Maxillo-Faciale de la Salpêtrière,
- Habilitation à Diriger des Recherches (H.D.R.),
- Officier dans l'Ordre des Palmes Académiques
- Colonel de réserve citoyenne

Nous vous remercions sincèrement d'avoir accepté la présidence de notre jury de thèse.

Nous nous souviendrons de votre écoute et de votre disponibilité durant toutes ces années.

Nous vous remercions pour la qualité de vos enseignements et pour la bienveillance dont vous avez toujours fait preuve.

Veillez trouver dans ce travail le témoignage de toute notre admiration et de notre profond respect.

A notre directeur de thèse

Monsieur le Docteur **Karim Nasr**

- Maître de Conférences des Universités, Praticien Hospitalier d'Odontologie,
- Docteur en Chirurgie Dentaire,
- Lauréat de l'Université Paul Sabatier,
- Master 1 mention Biotechnologie-Biostatistiques,
- Master 2 Recherche en Science des Matériaux
- certificat d'Etudes Supérieures de technologie des matériaux employés en Art Dentaire,
- Certificat d'Etudes Supérieures de prothèse Dentaire (Option prothèse Scellée)
- Responsable du domaine d'enseignement Imagerie et Numérique,
- Responsable de l'Attestation d'Etudes Universitaires d'Imagerie Maxillo-Faciale (CBCT),
- Responsable du Diplôme Universitaire de CFAO en Odontologie,
- Chargé de mission à la Faculté de Chirurgie Dentaire de Toulouse,

Nous sommes très sensibles à l'honneur que vous nous avez fait d'avoir accepté de diriger cette thèse. Nous vous remercions pour vos enseignements. Nous espérons que ce travail sera à la hauteur de vos attentes, veuillez y trouver l'expression de notre profond respect et de notre gratitude.

A notre Jury

Monsieur le Docteur **Jean-Noël Vergnes**

- Maître de Conférences des Universités, Praticien Hospitalier d'Odontologie,
- Docteur en Epidémiologie,
- Docteur en Chirurgie Dentaire,
- Professeur associé, Oral Health and Society Division, Université McGill – Montréal, Québec – Canada,
- Maîtrise de Sciences Biologiques et Médicales,
- Master 2 Recherche – Epidémiologie clinique,
- Diplôme d'Université de Recherche Clinique Odontologique,
- Lauréat de l'Université Paul Sabatier

Nous vous remercions très chaleureusement d'avoir accepté de participer à notre jury de thèse. Nous nous souviendrons de votre bonne humeur et de votre gentillesse. Veuillez trouver ici le témoignage de notre plus grande gratitude.

A notre co-directeur de thèse

Monsieur le Docteur **Bertrand Arcaute**

- Adjoint d'Enseignement à la Faculté de Chirurgie Dentaire de Toulouse
- EX Assistant hospitalo-universitaire d'Odontologie,
- Docteur en Chirurgie Dentaire,
- Master 1 «Biosanté», mention : Anthropologie,
- Master 2 Recherche anthropologie et génétique des populations,
- Lauréat de l'Université Paul Sabatier,

Vous nous avez fait l'honneur de diriger ce travail, et nous vous en sommes sincèrement reconnaissants.

Nous vous remercions pour votre implication, vos conseils, votre disponibilité et votre bienveillance à notre égard.

Nous vous prions de trouver ici l'expression de notre sincère gratitude.

Table des matières

Introduction	12
I. Historique, origines	13
1. Origines de la CFAO dans l'industrie.....	13
1.1. Les années 50 : quelques pionniers de la CFAO.....	13
1.1.1. John Parsons.....	13
1.1.2. Patrick J. Hanratty.....	14
1.1.3. Pierre Bézier et Paul Faget de Casteljau.....	15
1.2. Les années 60.....	16
1.2.1. Ivan Sutherland.....	16
1.2.2. Naissance de plusieurs « systèmes-maison ».....	16
1.3. Les années 70.....	17
1.3.1. CATIA (Conception Assistée Tridimensionnelle Inter Active).....	17
1.3.2. <i>Euclid</i>	17
1.4. Les années 80.....	18
1.5. Des années 90 à nos jours.....	19
2. Origines de l'empreinte optique et de la CFAO dentaire.....	20
2.1. Les années 70.....	20
2.1.1. Naissance de la CFAO dentaire.....	20
2.1.2. La thèse de François Duret.....	20
2.1.3. L'article de Altschuler.....	23
2.2. Les années 80.....	23
2.3. Les années 90.....	25
2.3.1. La multiplication des systèmes.....	25
2.3.2. Les premiers centres d'usinage délocalisés.....	26
2.3.3. La domination des grands groupes.....	27
2.4. Les années 2000.....	29
II. Evolutions	33
1. Fonctionnement de la CFAO dentaire.....	33
1.1. Principes généraux de la CFAO dentaire.....	33
1.2. Empreinte optique intra-orale.....	35
1.2.1. Méthodes d'acquisition.....	35
1.2.1.1. Triangulation.....	35
1.2.1.2. Microscopie confocale parallèle.....	35
1.2.1.3. Tomographie optique de cohérence.....	35
1.2.1.4. Stéréophotogrammétrie.....	36
1.2.1.5. Echantillonnage actif du front d'onde ou défocalisation.....	36
1.2.2. Mode d'enregistrement.....	36
1.2.2.1. Clichés successifs.....	37
1.2.2.2. Balayage rapide (« full motion »).....	37
1.2.3. Autres caractéristiques.....	38

1.2.3.1. Poudrage ou non poudrage ?.....	38
1.2.3.2. Monochrome ou couleur ?.....	39
1.2.3.3. Cart ou branchement sur ordinateur ?.....	40
1.3. Conception Assistée par Ordinateur.....	41
1.4. Fabrication Assistée par Ordinateur.....	43
1.4.1. Méthode soustractive : Usinage.....	43
1.4.2. Méthodes additives.....	45
1.4.2.1. Stéréolithographie.....	46
1.4.2.2. Micro-fusion laser.....	47
1.4.2.3. Impression 3D.....	48
1.5. Les différentes chaînes numériques.....	49
1.5.1. CFAO indirecte.....	50
1.5.2. CFAO semi-directe.....	50
1.5.3. CFAO directe.....	51
2. Les systèmes actuels.....	51
2.1. Systèmes d’empreintes optiques.....	52
2.2. Logiciels de CAO.....	54
2.3. Systèmes de FAO.....	55
III. Perspectives.....	57
1. L’avenir de la CFAO selon François Duret.....	57
1.1. En 1974.....	57
1.1.1. L’empreinte optique.....	57
1.1.2. La CAO.....	58
1.1.3. La FAO.....	59
1.2. Plus de 30 ans plus tard.....	60
2. L’apport de la CFAO sur les autres domaines.....	63
3. Les innovations attendues.....	65
3.1. Détection des tissus durs sous-gingivaux.....	65
3.2. Porte-empreinte optique d’arcade complète.....	66
3.3. Usineuse laser.....	67
3.4. Articulateur virtuel.....	68
3.5. Télédentisterie.....	69
Conclusion.....	71
Bibliographie.....	73

Introduction

La **C**onception et **F**abrication **A**ssistée par **O**rdinateur (CFAO) est une discipline de plus en plus présente dans notre pratique : la plupart des laboratoires de prothèse utilisent cette technologie et de nombreux cabinets dentaires s'équipent chaque jour d'une chaîne de CFAO complète ou d'un système d'acquisition numérique.

Le numérique est dans « l'air du temps ». La société elle-même est de plus en plus « numérisée », et c'est en toute logique que ces nouvelles technologies entrent dans notre pratique courante.

La CFAO, qui nous semble si nouvelle et moderne, date pourtant de plus de 40 ans dans notre domaine, avec la thèse de François Duret en 1974 appelée « l'empreinte optique » [53]. En 1985, il réalisa la première couronne par CFAO au congrès de l'ADF (Association Dentaire Française) [60]. Elle est encore plus ancienne dans l'industrie, puisque ses débuts se situent dans les années 50 [29].

C'est pourquoi nous avons décidé de revenir à la base de cette découverte fondamentale, en explorant l'histoire de la **F**abrication **A**ssistée par **O**rdinateur (FAO) et de la **C**onception **A**ssistée par **O**rdinateur (CAO), depuis ses débuts, dans le domaine de l'industrie jusqu'à sa mise en application dans le domaine dentaire.

Cette démarche implique de se replonger dans l'histoire et de trouver des informations sur des événements d'un domaine bien précis, qui datent des années 50 pour les plus anciens. La difficulté de trouver certaines informations explique le fait que les sources concernant l'histoire ne sont pas toujours fiables. De plus, cette thèse contient une certaine subjectivité car, en règle général, pour raconter l'histoire, l'auteur choisi les événements qui lui semblent les plus importants en fonction de sa vision. Comme l'a dit Ernst Mayr, biologiste et généticien allemand, dans son livre Histoire de la biologie en 1982 : « Il faut garder à l'esprit que l'historien, relatant des faits reste malgré tout subjectif, parce qu'il porte des jugements de valeur lorsqu'il trie ces faits, et qu'il se montre sélectif quand il décide lesquels il conserve, et comment il les reliera les uns aux autres. »

En étudiant les différentes mutations des techniques, les différentes technologies qui se sont développées au fil du temps, l'apparition de l'empreinte optique et les différents systèmes qui ont existés, nous allons mettre en avant les perspectives possibles pour l'avenir.

I. Historique, origines

En premier lieu, nous allons étudier l'histoire de la CFAO dans l'industrie afin de comprendre comment la découverte a été intégrée dans le domaine dentaire et à quelle époque. Puis nous développerons l'histoire de l'empreinte optique et de la CFAO dentaire à proprement parler.

1. Origines de la CFAO dans l'industrie

1.1. Les années 50 : quelques pionniers de la CFAO

Plusieurs personnages importants ont participé à des découvertes fondamentales pour la CFAO :

- John Parsons, avec sa machine-outil à commande numérique, a initié la FAO dans le domaine de l'aviation, financé par l'armée américaine [98,102].
- Patrick J. Hanratty a créé le premier système de FAO commercial (PRONTO) et a développé les premiers logiciels de CAO [102].
- Deux ingénieurs français, Pierre Bézier et Paul Faget de Casteljau, ont travaillé sur la représentation 3D sur des logiciels de DAO (**D**essin **A**ssisté par **O**rdinateur), dans le domaine de l'automobile [83,85].

1.1.1. John Parsons

La **F**abrication **A**ssistée par **O**rdinateur (FAO) a vu le jour dans les années 50, aux Etats-Unis. C'est John Parsons (surnommé le père de la seconde révolution industrielle) qui développe la machine-outil à commande numérique avec l'aide de son ingénieur en chef Franck Stulen, du MIT (Massachusetts Institute of Technology) et d'IBM (International Business Machines corporation), pour l'armée américaine. En effet l'US Air Force souhaite améliorer la productivité des chaînes de fabrication dans l'aviation. Donc en 1949, John Parsons commence à travailler sur un système de cartes perforées qui contrôlent totalement une fraiseuse : c'est la première machine à commande numérique [98,97].

Le 5 Mai 1952, John Parsons et Frank Stulen déposent un brevet (US2820187 A) pour leur machine-outil (Motor Controlled Apparatus for Positioning Machine Tool) [94,101].

John Parsons choisi alors une entreprise pour lancer son invention dans l'industrie. Il choisit Bendix, une entreprise de pièces automobiles, aviation... qui va également produire et vendre sa machine-outil à commande numérique [20]. Mais les débuts sont

difficiles car les industriels ne connaissent pas du tout le contrôle numérique et n'osent pas se lancer dans l'achat des machines de John Parsons. Donc, pour populariser l'invention et accélérer son utilisation, l'US Army achète 120 machines à commande numérique et les loue à différentes entreprises [98].

Les machines-outils à commande numérique seront ensuite utilisées dans le secteur de l'automobile, pour la fabrication des carrosseries [101].

En 1985, Parsons et Stulen reçoivent la médaille nationale de la technologie [98].

1.1.2. Patrick J. Hanratty

Il est appelé le « père de la CFAO » car les différents systèmes de CFAO qu'il a développés se sont vendus à des douzaines d'entreprises, leur permettant une production plus rapide. Il a ainsi réussi à commercialiser ses inventions à une bien plus grande échelle que John Parsons [101].

Tout a commencé en 1957, alors qu'il travaillait pour General Electric, il a développé le premier système de FAO commercial : PRONTO (PROgram for Numerical Tooling Operations). Ce système permettait la commande numérique d'une fraiseuse (qui s'appelait Kearney&Trecker Milwaukee 3) utilisée chez General Electric à Schenectady, dans l'état de New York [101,105].

Il invente ensuite un système de caractères référencés lisibles par une machine pour les vérifications bancaires, qui a été adopté par l' « American Banking Association » dès 1958 et qui est d'ailleurs toujours utilisé [101].

En 1961, il travaille dans les laboratoires de recherche de General Motors, où il participe au développement de l'un des premiers systèmes de CAO, permettant de dessiner sur ordinateur, de sauvegarder et de modifier à la demande : DAC (Design Automated By Computer). Ce logiciel, qui fut très utilisé dans l'industrie automobile, peut ensuite être relié à une machine-outil, pour fabriquer les pièces dessinées [41,101,105].

En 1970, il crée sa propre entreprise : ICS (Integrated Computer Systems). En revanche, ce ne fut pas un succès car son nouveau logiciel de CAO est un système très fermé, qui fonctionne sur un type très précis d'ordinateur. Il est écrit en un langage informatique connu de très peu de personnes [101].

Cette expérience permettra à Hanratty de corriger ses erreurs et en 1971, il crée une autre société : MCS (Manufacturing and Consulting Services). Cette fois-ci, le logiciel, appelé ADAM (Automated Drafting And Machining), est écrit en Fortran et fonctionne sur tous les ordinateurs. Ce logiciel aura un grand succès et Hanratty en développera plusieurs autres (AD-2000, Anvil-4000...) [101,105].

Nous pouvons retenir une déclaration de Hanratty, toujours autant d'actualité : « Never generate anything closely coupled to a specific architecture. And make sure you keep things open to communicate with other systems, even your competitors. » (*Ne créez jamais quelque chose d'étroitement associé à une architecture spécifique. Et assurez-vous de garder les choses ouvertes pour communiquer avec d'autres systèmes, même [ceux de] vos concurrents.*) [101].

1.1.3. Pierre Bézier et Paul Faget de Casteljou

C'est pour l'entreprise automobile Renault que Pierre Bézier a travaillé, en tant que directeur des méthodes mécaniques. Il conçoit, en 1958, l'une des premières fraiseuses à commande numérique [29,85].

Par la suite, il travaille sur la représentation des objets en 3D, afin de faciliter la représentation des pièces qui devront ensuite être usinées par des machines à commande numérique. En effet, avant cela, tous les plans étaient dessinés à la main [85,22].

Suite à ses recherches, Pierre Bézier sort un logiciel de DAO (dessin assisté par ordinateur) : UNISURF, breveté en 1966 et utilisé par Renault à partir des années 70 [29,85].

Paul Faget de Casteljou est un physicien et mathématicien qui travaillait chez Citroën à la même époque que Pierre Bézier chez Renault [83].

Dès 1958, il travaille sur la représentation graphique sur ordinateur et invente les « courbes de Casteljou ». Cependant, l'entreprise Citroën n'autorisant pas Casteljou à publier les résultats de ses recherches, elles ne seront diffusées qu'en 1985. Entre temps, Pierre Bézier a mis au point sa méthode de représentation graphique chez Renault (1962). C'est pour cela que les courbes de Casteljou sont couramment appelées « courbes de Bézier » [22,83].

1.2. Les années 60

Dans les années 60, de nombreux systèmes sont développés au sein de plusieurs entreprises. C'est l'époque des « systèmes maisons », créés en interne, par des ingénieurs et seulement destinés à l'entreprise.

1.2.1. Ivan Sutherland

Ivan Sutherland est un ingénieur informatique américain, c'est un personnage important de l'histoire de la CFAO. En effet, en 1963, il présente sa thèse au MIT (Massachusetts Institute of Technology), appelée « Sketchpad, a man-machine graphical communication system » [97]. Il vient de concevoir le premier logiciel de CAO interactif ! Grâce à ce logiciel, il peut tracer des lignes à l'aide d'un « lightpen » (sorte de pointeur) et de plusieurs boutons, copier ses modélisations, les agrandir, les rétrécir et ajouter toutes sortes de formes géométriques [5,22,101]. On peut même voir une démonstration filmée à l'époque sur youtube [66,67]. En bref, il a inventé la première interface graphique.

Ivan Sutherland a également travaillé sur la modélisation 3D : il a développé le premier algorithme permettant d'effacer les lignes cachées sur les représentations 3D : grâce à cela, les modélisation 3D sont beaucoup plus réalistes et compréhensibles [5,22].

En 1968, il s'associe avec David Evans et ils fondent leur propre entreprise : Evans&Sutherland, qui est l'une des première en matière de conception et de fabrication de logiciels de modélisation [101]. Leur entreprise développe aussi des logiciels de simulation virtuelle pour la formation des pilotes d'avion [101]. Une vidéo du premier simulateur de vol (décollage et atterrissage) en 1972 [58] ainsi qu'une démonstration du simulateur de vol CT-5, en 1981, est disponible sur internet [57].

1.2.2. Naissance de plusieurs « systèmes-maison »

En 1965, General Motors commercialise DAC (Design Augmented by Computer), sur lequel Hanratty a travaillé [101]. Il s'agit d'un logiciel de modélisation des plans utilisés pour l'automobile. En effet, avant cela, tout se faisait sur papier et chaque département de l'entreprise devait ajouter sa contribution sur un plan, qui transitait donc entre les différents services (conception initiale, design de la carrosserie, conception technique, dessins des pièces détaillées). Chaque service devait donc posséder son propre dessinateur. Tout ce circuit prenait beaucoup de temps et pouvait causer des erreurs dans les plans. C'est pour cela que le logiciel DAC a été mis en place. Le plan était informatisé

et chaque service pouvait y travailler, rajouter sa contribution et enregistrer différentes versions [101,103].

De nombreux autres systèmes propriétaires voient le jour :

- CADD (Computer Aided Design and Drafting) en 1966 par McDonnell-Douglas, dans l'aéronautique, pour le design et la fabrication des pièces [106].
- PDGS (Product Design Graphics System) en 1967 par Ford, utilisé pour la conception de voitures [22].
- CADAM (Computer-Augmented Design and Manufacturing) en 1967, chez Lockheed (société aérospatiale américaine), qui est ensuite commercialisé par IBM. Ce système permettait de designer les pièces d'avions et de les usiner grâce à des machines-outils à commande numérique [102,104].

1.3. Les années 70

Les Années 70 voient la naissance de deux importants systèmes de CFAO français : CATIA (Dassault) et Euclid (Matra Datavision).

1.3.1. CATIA (Conception Assistée Tridimensionnelle Inter Active)

En 1975, la société Marcel Dassault Aviation (Française), achète CADAM (Lockheed), qui est un logiciel interactif de dessins en 2D [43].

Puis, à partir de 1977, la société démarre la conception d'un logiciel qui permettrait de passer au dessin interactif en 3D : ce sont les débuts de CATIA (Conception Assistée Tridimensionnelle Inter Active) [22,42,43,68].

En 1981, une société est créée pour développer CATIA : Dassault Systèmes. Cette même année, la société Dassault Systèmes signe un partenariat avec IBM pour la vente de CATIA v1 (Version 1) [23,42,43,68].

1.3.2. Euclid

Michel Théron et Jean-Marc Brun, ingénieurs français au CNRS, travaillent sur un logiciel de modélisation 3D des objets pour étudier l'écoulement des fluides par simulation. C'est en 1970 que leur logiciel voit le jour : il s'appelle Euclid. Il sera ensuite modifié afin de servir dans le domaine de l'automobile (chez Renault notamment) [50,56].

En 1979, Théron et Brun décident de fonder leur propre société pour industrialiser et commercialiser Euclid : c'est la naissance de Datavision. La société Matra (automobile, aérospatiale, armement, aéronautique...) est d'abord cliente puis décide de racheter

Datavision, qui devient donc Matra Datavision. Renault devient également actionnaire [21,50,55,56]. Euclid est donc le principal concurrent de CATIA sur le marché français.

1.4. Les années 80

Durant les années 80, on assiste à une explosion du marché : de plus en plus de sociétés sont créées pour le développement de logiciels de CFAO, les logiciels se multiplient et sont de plus en plus vendus :

- Marcel Dassault Aviation lance sa division Dassault Systèmes en 1981, avec le logiciel CATIA (Conception Assistée Tridimensionnelle Inter Active), utilisé dans des domaines variés : mécanique, systèmes électriques, design... [43].

- IBM (International Business Machines Corporation), multinationale américaine dans le secteur informatique, distribue CATIA à ses partenaires. Cela agrandit encore les domaines d'utilisation du logiciel : secteur naval, biens de consommation, usines de fabrication... [22,43].

- Autodesk, entreprise américaine de conception de logiciels, développe AutoCAD Release 1 en 1982. D'abord utilisé dans le domaine de la mécanique, ce logiciel va rapidement se répandre dans différents domaines : architecture, industrie, topographie, électronique... [16,17,22].

- Dassault Systèmes met au point CATIA v2 (Version 2) en 1985, plus élaborée que la version précédente pour la modélisation 3D [29,43].

- Matra Datavision commercialise Euclid-IS la même année, version améliorée de Euclid [29].

- en 1988 , Boeing décide d'utiliser CATIA pour concevoir son Boeing 777 au lieu d'utiliser son propre logiciel, développé en interne depuis plusieurs années (TIGER 3D) [29,43].

- PTC (Parametric Technology Corporation), entreprise américaine de conception de logiciels, lance la première version de Pro/ENGINEER en 1989. C'est un logiciel de CAO qui se présente sous la forme d'une base à laquelle peuvent être ajoutés différents modules complémentaires, en fonction de l'utilisation que l'on veut en faire (il y a des modules « mécanique », « électronique », « conception de navires »...). Il peut donc être utilisé dans de multiples secteurs d'activités [22,90].

1.5. Des années 90 à nos jours

A partir des années 90, la tendance est au rachat des petites sociétés par les grosses :

- en 1995 : le logiciel SolidWorks, permettant la conception 3D de différentes pièces dans différents secteurs (électronique, mécanique...), est mis sur le marché par la société du même nom [22,99] ;
- Dassault Systèmes achète SolidWorks en 1997 [22] ;
- EDS (Electronic Data Systems Corp), entreprise américaine de logiciels, achète Solid Edge, logiciel de conception 3D, en 1997 [22] ;
- Solid Edge est racheté par Unigraphics, entreprise de développement de logiciels 3D, en 1998 [22] ;
- en 1998, Dassault Systèmes sort CATIA v5, qui fonctionne sur Microsoft Windows et sur Unix [23] ;
- en 2007, Siemens, groupe allemand multinational dans le secteur des hautes technologies, rachète Unigraphics et ses logiciels NX et Solid Edge [22] ;
- à partir des années 2000, PTC (Parametric Technology Corporation) rachète de nombreuses entreprises de conception de logiciels (Nitidus, Ohio Design Automation, Aptavis Technology Corp...) [22,90] ;
- Autocad (de chez Autodesk) reste indépendant et sort régulièrement de nouvelles versions (la dernière sortira en 2018) [16,17].

De nos jours, les logiciels de CFAO sont divers et variés : il existe des systèmes propriétaires mais également des logiciels libres (FreeCAD (créé en 2003), OpenSCAD (créé en 2010)...) [62].

Nous pouvons citer les grands groupes sur le marché :

- Dassault Systèmes, avec le logiciel CATIA, dont la dernière version date de 2016 [23] ;
- PTC, avec le logiciel Creo 4.0 (2017) qui succède au logiciel Pro/ENGINEER [90] ;
- Siemens : avec le logiciel NX, dont la dernière version date de 2016 et avec le logiciel Solid Edge, dont la dernière version date de 2015 [99] ;
- Autodesk : avec le logiciel AutoCAD, dont la dernière version date de 2017 [17].

Nous avons donc pu voir l'évolution de la CFAO dans l'industrie, des années 50 à aujourd'hui, ce qui va nous permettre de comprendre d'où vient la CFAO dentaire, comment elle est née et grâce à quels grands personnages.

2. Origines de l’empreinte optique et de la CFAO dentaire

Après avoir vu l’histoire de la CFAO dans l’industrie, intéressons nous maintenant à l’histoire de la CFAO dentaire et de l’empreinte optique. Nous pouvons dire qu’elle est apparue dans les années 70, en France, grâce à François Duret qui a soutenu sa thèse sur l’empreinte optique en 1974 [53]. Puis, dans les années 80, plusieurs personnes commencent à s’intéresser au sujet, notamment Matts Anderson, en Suède, avec le système Procera, Werner Mörmann, en Suisse, avec le système CEREC et Dianne Rekow, aux Etats-unis. Dans les années 90, on assiste tout d’abord à une multiplication des systèmes, puis à l’apparition des centres d’usinage délocalisés et enfin à une domination du marché par les grands groupes (CEREC, Procera, Dentsply, Kavo...). Nous pouvons noter que ce sont des entreprises européennes qui dominent le marché, alors que les Etats-Unis n’ont toujours pas commercialisé de système de CFAO [59]. Viennent ensuite les années 2000, avec l’apparition des systèmes ouverts et l’utilisation de la zircone. Pendant cette période, les systèmes se sont multipliés et continuent de se multiplier de nos jours.

2.1. Les années 70

2.1.1. Naissance de la CFAO dentaire

Nous ne pouvons pas parler de l’histoire de la CFAO dentaire sans parler de François Duret. En effet, c’est le soir de Noël 1970 que François Duret, qui était alors un étudiant de 22 ans à la faculté de chirurgie dentaire de Lyon et était en licence à la faculté de sciences en même temps, imagine le concept de la CFAO dentaire (l’empreinte optique, la CAO et l’usinage) pour la réalisation de prothèses. Lors du dîner avec ses deux oncles : Bernard Duret (chirurgien-dentiste) et Jacques Sirodot (informaticien), il imagine la possibilité de faire du sonar dans la bouche afin de prendre des empreintes. En effet, François Duret remarquait que les empreintes conventionnelles sont soumises à des variations dimensionnelles, qui génèrent des erreurs [28,61,64].

2.1.2. La thèse de François Duret

François Duret travaille ensuite pendant deux ans et demi pour écrire sa thèse « empreinte optique » (de 300 pages), soutenue publiquement le 27 Février 1974, qui décrit le principe de l’empreinte optique et de la CFAO dentaire en général [53]. Dans sa thèse, François Duret décrit une technique révolutionnaire qui consiste à prendre une

empreinte (optique) à l'aide d'un laser, qui est enregistrée sur une plaque holographique. Cette plaque est lue par un tube analyseur qui envoie les données à un ordinateur. La conception peut donc se faire sur l'ordinateur qui est relié à une machine à commande numérique permettant de sculpter d'abord une empreinte puis de sculpter une couronne, un bridge ou autre. La partie concernant l'empreinte optique en elle-même est une véritable innovation, associée à des connaissances déjà établies dans l'industrie pour la partie CAO et FAO. Nous pouvons voir toute la chaîne de CFAO, imaginée par François Duret, sur l'illustration ci-dessous (figure 1), issue de sa thèse [53].

Nous pouvons relever quelques points essentiels dans la thèse de François Duret :

- Il explique que l'empreinte optique qu'il a inventée repose sur le principe de l'interférométrie : il émet deux rayons laser qui atteignent l'objet (pour nous : la dent) et selon les intensités collectées par le récepteur, il peut en déduire la distance de l'objet [53]. Il semblerait que son empreinte optique soit également basée sur le principe de la triangulation, d'après les schémas qu'il en fait dans sa thèse. Il est donc difficile de classer le principe de fonctionnement de la toute première empreinte optique de François Duret dans une catégorie bien précise.
- Pour la partie CAO, François Duret prend l'exemple du procédé UNISURF (dont nous avons parlé dans la partie histoire de la CFAO dans l'industrie, mis au point par Pierre Bézier pour Renault) pour estimer le temps de réalisation d'une couronne [53].
- il imagine un mode de fonctionnement qui reposerait sur des centres d'usinage, recevant les informations nécessaires à la fabrication des prothèses pour plusieurs chirurgiens-dentistes. Il imagine aussi une « équipe centrale », constituée d'informaticiens, de prothésistes, de dentistes « théoriciens », de mathématiciens et de spécialistes des matériaux ; qui modifieraient le programme en fonction de l'évolution de la science [53].
- Pour finir, il explique toutes les applications possibles de la CFAO en dentaire : réalisation de couronnes, bridges, coiffes, prothèses partielles amovibles coulées (PPAC), inlay cores, attelles de contention... Tout cela en une ou deux heures. Il explique également qu'il est possible d'avoir toute la chaîne au fauteuil ou bien de délocaliser la conception et/ou la fabrication [53].

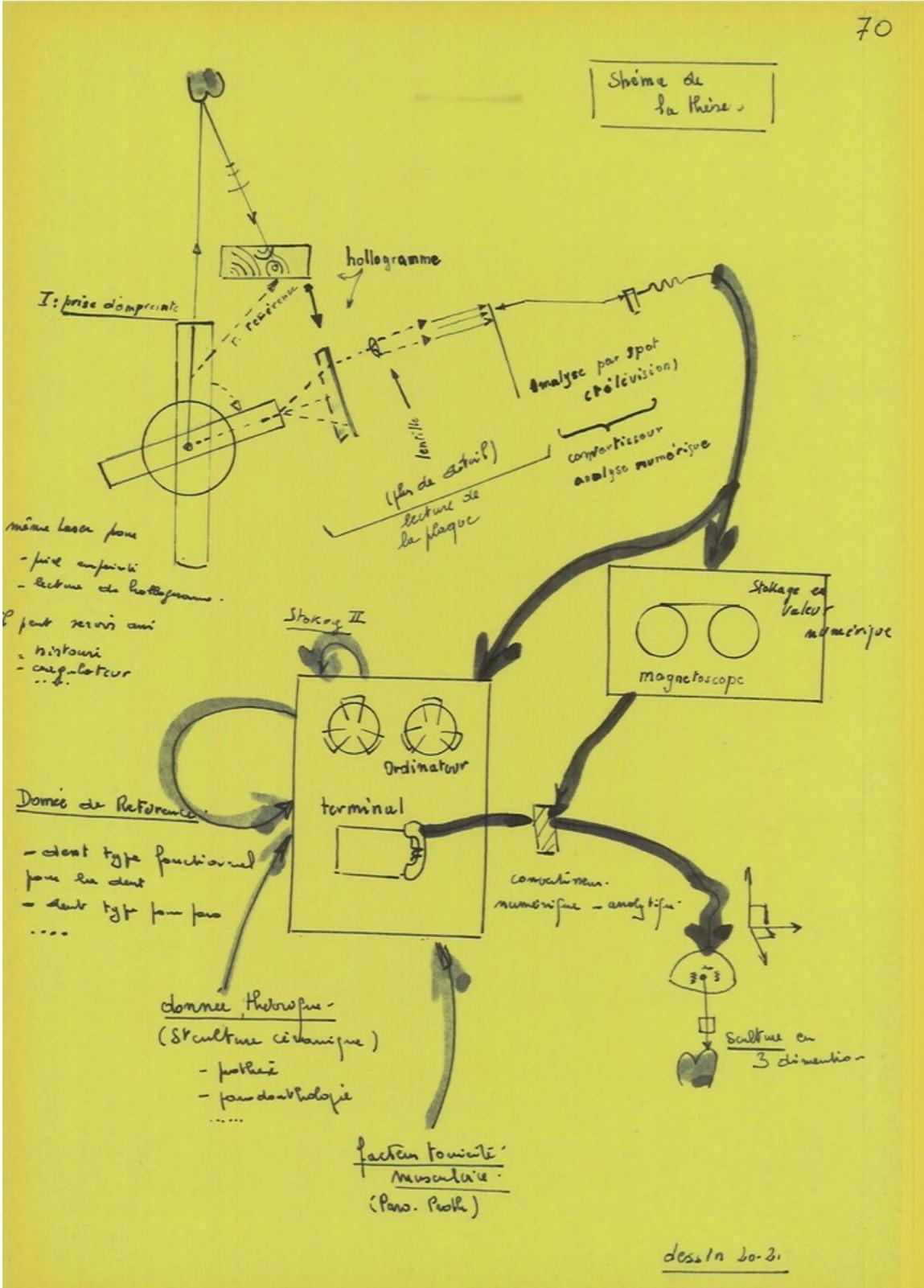


Figure 1 : schéma de la chaîne de CFAO complète par François Duret dans sa thèse "l'empreinte optique" en 1974, page 73 [53]

2.1.3. L'article de Altschuler

En 1973, **Bruce Altschuler** (capitaine au centre de recherche de l'US Marine, Californie) publie un article « méthode de projection de franges à pas variables », décrivant brièvement le concept de l'interférométrie (principe utilisé dans la CFAO dentaire) [61].

2.2. Les années 80

Dans les années 80, d'autres personnes commencent à travailler sur la CFAO dentaire, pendant que François Duret continue ses recherches.

Nous pouvons citer **Dianne Rekow**, américaine (université du Minnesota) qui a travaillé sur un système de CFAO dans les années 80, permettant de faire l'acquisition numérique grâce à des photographies et à un scanner haute résolution et la fabrication de la couronne avec une machine à 5 axes [44,108]. Le but principal de son système était de pouvoir fabriquer une couronne postérieure en métal, de qualité équivalente voire même supérieure à une couronne coulée [6]. En revanche, ses travaux sont restés au stade de recherche car son équipe n'a pas pu trouver d'investisseur prêt à soutenir leur projet [6].

On peut retenir quelques citations de Dianne Rekow :

- « It is also frustrating to remember how many potential investors told us CAD/CAM systems were unnecessary and would never be viable in the marketplace » (*c'est frustrant de se rappeler combien d'investisseurs potentiels nous ont dit que les systèmes de CFAO étaient inutiles et ne seraient jamais viables sur le marché*) [6].
- « Many of the systems now available have realized our performance goals, meeting the objectives we had in design specifications articulated over 20 years ago. So, while it is satisfying to see that our vision was possible, it is disappointing that development on our envisioned system halted and that it is not among those now commercially available. » (*Beaucoup de systèmes [de CFAO] disponibles de nos jours remplissent les objectifs que nous avons spécifiés dans nos recherches il y a plus de 20 ans. Donc c'est à la fois satisfaisant de voir que notre vision était possible mais décevant que le développement de notre système se soit arrêté et qu'il ne se trouve pas parmi ceux disponibles sur le marché.*) [6].

A la même époque, **Werner Mörmann** (Suisse), commence ses travaux sur la CFAO [107].

En 1983, **François Duret, Jacques Dumas et Joseph Touvenot** présentent leurs travaux lors des entretiens de Garancière (avec les sociétés Thomson, Matra Datavision) [28,60,61,115]. Le logiciel de CFAO utilisé est Euclid (de la société Matra Datavision) [37].

Nous pouvons également citer **Matts Andersson** (Suède), qui a développé le système Procera (maintenant connu sous le nom de NobelProcera de chez Nobel Biocare, en Suède), en 1983. Il a été le premier à faire des restaurations facettes composites par CFAO [108].

En 1985, les **Drs Duret, Hennequin et Blouin** réalisent la première couronne postérieure par CFAO, en moins d'une heure (avec la collaboration de la société Hennson) lors du congrès de l'ADF (Association Dentaire Française) [28,60,61,115].

En 1985, Le **Dr Mormann, en association avec le Dr Marco Brandestini** (ingénieur électrique) finalise le développement du premier système de CFAO commercial : le CEREC (Computer-assisted **CER**amic **RE**Constructions), par Siemens [107]. Cette première version du CEREC est aussi appelée the « lemon », en référence à sa couleur jaune.

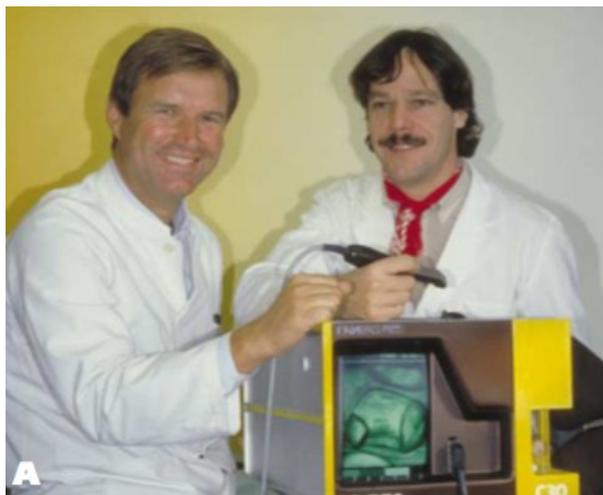


Figure 2 : Le Dr Werner Mörmann (à gauche) et Marco Brandestini (à droite) avec le CEREC 1 (the "lemon"), en 1985 [107]

Le principe est de tout faire au fauteuil (« chairside ») : l’empreinte optique, la CAO et la fabrication, contrairement au système de Duret qui était mixte : une partie au fauteuil (empreinte optique et CAO) et la fabrication au laboratoire de prothèse. Il faut savoir que le CEREC 1 était destiné à la fabrication des inlays uniquement [107]. Tout d’abord,

l'empreinte optique est réalisée par projection de lignes parallèles sur la préparation, un capteur permettant de récolter les distances de chaque ligne grâce au principe de la triangulation. Pour cette empreinte optique, l'opérateur doit placer la caméra selon le futur axe d'insertion. Ensuite, pour le système de CAO, Mörmann et Brandestini ont fait appel à un jeune ingénieur informatique français : Alain Ferru, qui a mis au point le logiciel de design en deux dimensions. A la demande de Mörmann, le logiciel de CAO ne permettait pas de développer l'anatomie occlusale ni les contacts occlusaux. C'était donc au chirurgien-dentiste de les recréer, après fabrication de la pièce prothétique, avec des fraises diamantées fines. La partie FAO de la pièce prothétique se faisait grâce à une machine 3 axes qui usinait un bloc de céramique [7,107].

En 1988, le CEREC 1 étend les types de restaurations fabricables : il peut désormais produire des inlays, des onlays et des facettes [107].

2.3. Les années 90

2.3.1. La multiplication des systèmes

Au début des années 90, on assiste au développement de nombreux systèmes de CFAO en Europe, avec plus ou moins de succès. On peut noter que tous les systèmes développés jusqu'en 2004 sont des systèmes fermés : on ne peut donc pas utiliser un logiciel de CAO d'une marque et une machine-outil d'une autre marque.[72]

Nous pouvons citer les systèmes Ceramatic, Cicero, Circom, DCS (Dental Concept Systems), Digident, Ritter... [28,72]

Le Système CICERO (Computer Integrated Crown Reconstruction) a été développé par Dental System B.V. aux Pays-Bas. Ce système permettait de scanner un modèle puis utilisait des techniques de frittage de la céramique et de fabrication assistée par ordinateur [35].

Les autres systèmes cités précédemment, comme le Ceramatic, le Circom, le DCS titan, le Ritter et le Digident fonctionnaient tous à peu près pareil : tout d'abord on avait le scannage du modèle , puis une phase de CAO et pour finir une fabrication par machine outil intégrée, déportée ou indépendante [28].

En 1991, la société Hennson, au sein de laquelle François Duret développait ses machines de CFAO, est dépassée par les coûts de recherche concernant la CFAO et cherche un repreneur pour éviter le dépôt de bilan. Les crédits ont donc été coupés pour

l'équipe de François Duret, qui s'apprêtait à passer au stade de l'industrialisation. C'est le groupe Sopha (groupe médical) qui a repris l'affaire mais qui n'a pas su mener à bien la suite de l'aventure. Donc un an et demi plus tard, les personnes composant l'équipe de François Duret sont parties travailler ailleurs, certains au Japon, d'autres en Suède, en Allemagne ou au Canada...[64]

Duret se tourne alors vers GC (General Chemistry), société japonaise, et commence sa carrière à l'international. Il développera d'ailleurs le système GN1 (GC), commercialisé seulement en Asie. GN1 est le fruit de la collaboration entre GC, Nikon (société japonaise d'appareils photographiques et d'optique) et Hitachi (société japonaise de matériaux, télécommunication, équipement médical, composants industriels...), avec l'aide financière de l'état. Ce système est composé d'une caméra optique à lecture par point et d'un logiciel de CAO, développés par la société Nikon. Il comprend également une machine-outil pouvant usiner 24 heures sur 24, avec changement automatique d'outil et de bloc de matériau, développée par la société Hitachi [28,64].

En revanche, on peut noter que, durant toute cette période, les Etats-Unis n'ont commercialisé aucun système de CFAO. Comme nous l'avons dit précédemment, Dianne Rekow a travaillé pendant de nombreuses années sur le sujet et a tout tenté pour commercialiser un système de CFAO américain mais malgré tous ses efforts, elle n'y est jamais parvenue... [28].

2.3.2. Les premiers centres d'usinage délocalisés

En 1991, on voit apparaître les premiers centres d'usinage délocalisés. Déjà le système Procera de Andersson délocalise la chaîne de CFAO au laboratoire de prothèse, qui lui-même délocalise la fabrication dans un grand centre d'usinage en Suède [35,72,115].

En pratique, avec le système Procera, le chirurgien-dentiste prend une empreinte conventionnelle, il l'envoie à son prothésiste qui coule le modèle en plâtre et qui fait la préparation sur ce modèle. Le die est ensuite envoyé en Suède (à Göteborg) pour la conception et la fabrication [35,78].

Dans le centre d'usinage, le modèle en plâtre est scanné par micro palpation, puis la conception par ordinateur est effectuée et la coiffe est ensuite fabriquée par électro-érosion. Cette coiffe est renvoyée au prothésiste qui devra alors réaliser la céramisation [35,78]. Il faut savoir que le système Procera permet d'utiliser le titane, matériau très difficile à usiner. Le but était d'associer le système Procera aux implants Branemark. C'est donc les débuts de la CFAO dans l'implantologie [28,35].

2.3.3. La domination des grands groupes

A partir de 1992 et jusqu'en 2000, un phénomène commercial se produit : les grands groupes se renforcent et établissent une domination du marché, alors que de nombreux « petits » systèmes disparaissent [28,72].

On assiste donc à la disparition de plusieurs systèmes, notamment, le Ceramatic, le CICERO et le Ritter [28,72].

Les grands groupes sortent leur propre système de CFAO. Comme le Cercon de Dentsply et l'Everest de Kavo qui sont des systèmes « tout laboratoire » ; le Pro 50 de Cynovad, qui est un système mixte laboratoire/centre de production (tout comme le Procera) [28,115].

En parallèle, les grands systèmes existants se renforcent, notamment le CEREC. Siemens commercialise le CEREC 2 en 1994, permettant de fabriquer des couronnes partielles ou complètes et des chapes, grâce à des évolutions du système. Notamment au niveau de l'empreinte optique, qui devient plus précise et à la machine-outil, qui travaille avec deux fraises en simultané : l'une pour dégrossir, l'autre pour le travail de précision [28,107].

Le Procera (de Nobel Biocare) et le DCS renforcent également leur présence sur le marché. Le Système DCS est un « tout laboratoire » puisque son mode de fonctionnement est le suivant : le modèle en plâtre est scanné puis on fait la CAO et enfin, une fraiseuse va usiner la pièce modélisée [28].

La principale limite des systèmes de CFAO de l'époque concernait les matériaux usinés. En effet, ceux-ci n'étaient pas très esthétiques, étant donné que les plus souvent utilisés étaient le titane ou bien les composites.

C'est pourquoi une innovation a permis d'améliorer considérablement le côté esthétique et les champs d'application de la CFAO. Il s'agit de l'utilisation de la **Zircone** [72].

En 1996, la commercialisation de zircone a permis de faire des restaurations « tout céramique » avec la chape en zircone et le montage de la céramique esthétique par dessus [115]. De plus, de grands progrès dans le domaine des biomatériaux a permis de mettre au point des céramiques usinables et de plus en plus esthétiques.

En effet, les céramiques feldspathiques, très esthétiques, se présentent en général sous forme de poudre / liquide et ne sont pas usinables. Il a donc fallu développer d'autres types de céramiques pour pouvoir les usiner [27,80]. Nous pouvons citer les

vitrocéramiques, qui ont de bonnes propriétés esthétiques car ce sont des céramiques vitreuses, tout comme les céramiques feldspathiques.

De plus, elles peuvent être enrichies et gagner en résistance ou en esthétique grâce à cela. Par exemple, les vitrocéramiques enrichies en disilicate de lithium (exemple : e.max CAD de Ivoclar Vivadent) ont des propriétés mécaniques augmentées, leur permettant d'être utilisées pour des restaurations postérieures ou pour des bridges antérieurs. Les vitrocéramiques enrichies en leucite (exemple : Empress CAD de Ivoclar Vivadent) ou en feldspaths (exemple : Cerec Blocs de Sirona) ont des propriétés esthétiques augmentées et peuvent donc être utilisées en antérieur.

D'autres céramiques possèdent des propriétés mécaniques excellentes, elles sont donc indiquées pour la réalisation des armatures : il s'agit des céramiques infiltrées, des céramiques alumineuses et des zircones. En revanche, ces trois types de céramiques ont des propriétés esthétiques assez faibles, du fait de leur opacité [27,80].

En 1997, Siemens cède son département des systèmes dentaires à Sirona. Le système CEREC est donc maintenant développé par la société Sirona (Bensheim, Allemagne).

Donc, à la fin des années 90, les systèmes de CFAO présents sur le marché étaient répartis en trois catégories :

- le « chair side » avec le CEREC
- le « tout laboratoire » : avec le DCS, le Cercon de Dentsply et l'Everest de Kavo
- le mixte laboratoire / centre de production avec le Procera de Nobel Biocare et le Pro 50 de Cynovad [28].

2.4. Les années 2000

Durant les années 2000, plusieurs évènements conduisent à une multitude de systèmes.

Tout d'abord, le système CEREC continue son évolution et sa domination du marché.

En 2000, le CEREC 3 Redcam et le CEREC inLab sont mis sur le marché par Sirona. Il est désormais possible de faire des bridges de trois éléments. En revanche, l'interface graphique apparaît toujours en 2D [107].

C'est en 2003 que l'interface graphique devient 3D, ce qui permet d'avoir un logiciel beaucoup plus intuitif et facile à utiliser. Avec ce CEREC, il est désormais possible de faire des bridges jusqu'à 4 éléments [107].

En 2005, les fonctionnalités du CEREC évoluent. Il est désormais possible de faire les ajustements occlusaux de manière virtuelle et automatique, sur le logiciel de CAO [107].

Autour de l'année 2005, Nous assistons à un évènement majeur dans l'histoire de la CFAO : l'apparition des systèmes ouverts. En effet, il est désormais possible d'utiliser un système d'empreinte optique d'une marque, avec un logiciel de CAO d'une autre marque et une machine-outil d'une troisième marque, à condition que tous ces systèmes soient ouverts. C'est le format STL (**S**tereo-**L**ithography) des fichiers qui permet la communication entre les différents systèmes ouverts [31,32,72].

A partir de là, de nombreux systèmes, aussi bien ouverts que fermés, se sont développés :

- **le système iTero**, par Straumann en **2005**, apporte une innovation de taille. Ce dispositif d'empreinte optique fonctionne sans poudrage. En effet, avant cela, tous les systèmes fonctionnaient obligatoirement avec poudrage. En revanche, c'est un système fermé [13,69] ;

- **Le système Lava COS de 3M**, en **2008** est le premier fonctionnant sur le principe du balayage rapide (appelé « full motion »). Avant cela, les systèmes d'empreintes optiques fonctionnaient tous par clichés successifs. En revanche, il fonctionne avec poudrage. C'est un système semi-ouvert, c'est à dire qu'il peut fonctionner avec plusieurs logiciels de CAO (Dental-Wings, 3Shape...) si on dispose du logiciel de compatibilité LAVA3M [2,69] ;

- En **2009**, Sirona commercialise la **CEREC Bluecam**. Cette caméra se distingue de la CEREC 3 Redcam en plusieurs points. Tout d'abord, la couleur de la lumière projetée est

différente : pour la CEREC 3 Redcam, la lumière projetée est rouge (car c'est un laser) alors que pour la CEREC Bluecam, la lumière est bleue. Ce changement est dû au fait que la lumière rouge a une tendance à être très absorbée par les tissus dentaires, le nombre de rayons réfléchis vers la caméra est donc diminué et on obtient des images de moins bonne qualité. De plus, la CEREC Bluecam est à déclenchement automatique alors qu'avec la CEREC 3 Redcam, il fallait appuyer sur un bouton pour déclencher les prises de vues. En revanche, ces deux caméras fonctionnent avec poudrage [82,107]

- En **2011** : apparition des premiers systèmes fonctionnant sans poudrage ET en full motion, avec la caméra **TRIOS de 3Shape**, qui est un système ouvert [13,69];

- En **2012**, une innovation supplémentaire arrive sur le marché : certaines caméras intra orales fonctionnent désormais par balayage, sans poudrage ET en couleur, avec la caméra **TRIOS color de 3Shape et l'Omnica de Sirona** [13,69] ;

Plusieurs caméras se développent ensuite en **2014**, réunissant ces trois caractéristiques et se branchant directement à un ordinateur par USB, tout en étant des systèmes ouverts. On peut citer [25,69]:

- la caméra **CondorScan** (mise au point par François Duret en 2014).

- La **CS3500 par Carestream**, qui développe aussi un logiciel de CAO et une usineuse. Mais comme c'est un système ouvert, il n'est pas obligatoire d'utiliser tous les éléments de la chaîne de CFAO de la même marque. En revanche cette caméra fonctionne par clichés successifs.

- **La Planscan de Planmeca**

- **La zfx intrascan de chez zfx dental** (filiale de Zimmer)

En effet, différentes présentations de caméras sont possibles : en cart, avec branchement USB, intégrée au fauteuil... Une même caméra peut même être disponible sous différentes présentations. Par exemple c'est le cas de la CEREC Omnicam que l'on peut choisir en chariot mobile (CEREC AC Omnicam), en unité flexible sur table (CEREC AF Omnicam) ou en version intégrée au fauteuil (CEREC AI Omnicam) [82]. Nous parlerons de ces différentes présentations plus en détail dans la deuxième partie de cette thèse.

- **En 2015, DentalWings**, société de logiciels de CFAO, met au point une caméra optique (DWIO) fonctionnant par balayage et qui est maintenant sans poudrage. En revanche elle ne permet pas encore d'obtenir des images en couleurs réelles. La véritable innovation

est la taille de la caméra, qui est quasiment aussi petite qu'une turbine, ce qui améliore grandement l'ergonomie. Cette caméra est un système ouvert [25,69].

- La même année, GC commercialise sa caméra **Aadvia iOS**, fonctionnant par balayage rapide, sans poudre mais ne permettant pas d'obtenir des images en couleurs réelles. Cette caméra est un système ouvert [25,69].

- En **2016**, Carestream commercialise la **caméra CS3600**, fonctionnant désormais par balayage rapide, sans poudrage et en couleurs réelles [25,69].

- En **2017**, **Planmeca met au point la caméra Emerald**, fonctionnant par balayage rapide, sans poudrage et en couleurs réelles (c'est la principale nouveauté par rapport à la Planscan) [25,69].

Pendant cette période, les usineuses destinées aux laboratoires de prothèse se développent aussi, par exemple les machines Zeno de Imes et Wieland et Mill200 de Bien-Air, qui sont des systèmes ouverts [76] ; Tout comme du côté des logiciels de CAO, avec DentalDesigner de 3shape (système ouvert), DesignSystem de sensable (système ouvert), Cercon Art de Dentsply (système fermé) , DWOS-RPM de Dentalwings (système ouvert), etkon-visual de Straumann (système fermé)... [76].

Pour conclure cette première partie, nous pouvons dire que la CFAO, en général, a vu le jour dans les années 50, grâce à plusieurs pionniers (John Parsons, Patrick J. Hanratty, Pierre Bézier et Paul Faget de Casteljau), puis quelques systèmes maisons sont apparus dans les années 60-70. Enfin nous avons assisté à une explosion du marché à partir des années 80 jusqu'à nos jours, avec des systèmes fermés, ouverts ou semi-ouverts. La CFAO dentaire a un peu suivi le même schéma, puisque dans les années 70, elle est apparue dans notre domaine grâce à un pionnier, François Duret, qui a su allier ses connaissances scientifiques et dentaires. En effet, dans sa thèse, François Duret s'appuie sur des notions décrites dans la CFAO industrielle, pour toute la partie CAO et FAO. Son innovation majeure a été l'empreinte optique. Dans les années 80, plusieurs autres pionniers (Dianne Rekow, Matts Andersons et Werner Mörmann) se sont intéressés au sujet et ont développé leurs propres systèmes (sauf Dianne Rekow). Dans les années 90, plusieurs systèmes fermés dominaient le marché puis une explosion du marché à eu lieu dans les années 2000 avec de nombreux systèmes, aussi bien ouverts que fermés.

Pour terminer avec la partie « origines », nous avons récapitulé les événements principaux qui ont marqué l'histoire de la CFAO, aussi bien dans l'industrie que dans le secteur dentaire, sous forme de frise chronologique.

II. Evolutions

Après avoir exploré les origines de la CFAO, aussi bien dans l'industrie que dans le secteur dentaire, nous allons pouvoir étudier les évolutions des systèmes de CFAO dentaire de nos jours. Nous commencerons par expliquer le fonctionnement de la CFAO dentaire, depuis l'empreinte optique jusqu'à la fabrication, puis nous verrons les différents types de chaîne numérique. Dans une deuxième partie, nous comparerons les différents systèmes de CFAO présents sur le marché, grâce aux notions que nous aurons précédemment développées, afin de mettre en évidence les évolutions de cette technologie.

1. Fonctionnement de la CFAO dentaire

Pour bien comprendre les évolutions de la CFAO dentaire, il faut connaître le mode de fonctionnement de celle-ci. C'est pourquoi nous allons d'abord expliquer les principes généraux de la CFAO puis nous développerons l'empreinte optique, avec les différentes méthodes d'acquisition, le mode d'enregistrement... Ensuite, nous verrons les différents types de Fabrication Assistée par Ordinateur utilisables et nous finirons par expliquer les différentes chaînes numériques (flux de travail ou workflow) possibles.

1.1. Principes généraux de la CFAO dentaire

La CFAO dentaire est constituée de trois étapes [77]:

- **L'empreinte** : Son but est d'enregistrer la préparation réalisée par le chirurgien-dentiste. L'empreinte peut s'effectuer de différentes manières :
 - empreintes conventionnelles : avec un matériau pour prise d'empreinte et un porte-empreinte. Il faut savoir que si on veut avoir recours à la CFAO, on peut faire une empreinte conventionnelle mais il faudra associer cette technique à une empreinte numérique dans un second temps (souvent scanner de table).
 - empreintes numériques :
 - empreintes numériques optiques :
 - intra-orales : nous développerons plus spécifiquement le fonctionnement de ces empreintes dans le chapitre suivant.

- scanner de table : le but est de scanner un modèle en plâtre ou une empreinte conventionnelle à l'aide d'un scanner de table.
 - empreintes numériques mécaniques : palpeurs
 - empreintes numériques par échographie
 - empreintes numériques radiologiques : cone beam
- **La Conception Assistée par Ordinateur** : Le logiciel reçoit l'empreinte de la préparation, soit en format de fichier ouvert (STL), soit en format de fichier fermé, spécifique à la marque utilisée précédemment. Son but est de modéliser la future prothèse (inlay, couronne, bridge...) grâce à un logiciel de CAO et en tenant compte de plusieurs paramètres : occlusion, points de contacts avec les dents adjacentes, hauteur prothétique disponible, choix du matériau... Cette conception peut être effectuée au cabinet, par le chirurgien-dentiste ou bien au laboratoire de prothèse, par le prothésiste.
- **La Fabrication Assistée par Ordinateur** : Le fichier contenant la pièce prothétique modélisée est envoyé à la machine-outil qui va pouvoir la fabriquer de différentes manières : par soustraction ou bien par addition. Nous verrons ces différentes techniques dans un chapitre suivant. La fabrication peut s'effectuer au cabinet ou bien au laboratoire de prothèse, selon la chaîne de CFAO choisie.

1.2. Empreinte optique intra-orale

Nous venons donc de voir que l’empreinte optique fait partie des empreintes numériques. Son principe de fonctionnement général repose sur l’émission de rayons lumineux sur la préparation. La mesure des perturbations de ces rayons lumineux permettra de reconstituer une image [48]. Les différentes caméra intra-orales utilisent diverses technologies que nous allons expliquer, afin de pouvoir les comparer.

1.2.1. Méthodes d’acquisition

Afin d’obtenir une représentation de la préparation sur ordinateur, il y a plusieurs techniques permettant de récolter les informations.

1.2.1.1. Triangulation

Pour comprendre le principe de la triangulation, il faut imaginer un triangle dont les trois sommets sont : la dent, l’émetteur du rayon lumineux et le capteur. Grâce au théorème de Pythagore, on peut déduire la distance récepteur – dent (car on connaît la distance entre le récepteur et l’émetteur et l’angulation) [25,47,48,69,77].

Plusieurs systèmes utilisent cette méthode d’acquisition : ex le CEREC Omnicam de Sirona, la CS3500 de Carestream [25,47,69] .

1.2.1.2. Microscopie confocale parallèle

Avec cette technique, l’objet est observé à travers un objectif contenant une lentille. Cette lentille peut faire varier la distance focale. On peut donc déterminer la distance entre l’objet et la caméra intra-orale en enregistrant seulement les points qui sont les plus nets, c’est à dire qu’ils sont à la bonne distance focale [25,47,69,77].

Plusieurs systèmes utilisent cette méthode d’acquisition : ex TRIOS, TRIOS 3 et TRIOS 3 Color de 3Shape, iTero element d’Align [25,47,69].

1.2.1.3. Tomographie optique de cohérence

Cette technique d’acquisition consiste à envoyer un rayon laser, qui va ensuite être séparé en deux par un miroir. Ces deux rayons vont rencontrer l’objet et, en mesurant l’interférence de la réflexion des deux rayons, on va pouvoir déterminer la distance des points de l’objet. Cette technique est donc basée sur le principe de l’interférométrie. C’est une technique rapide mais complexe à mettre en œuvre [69,77].

François Duret expliquait dans sa thèse en 1974 que son empreinte optique fonctionnait selon ce principe. En réalité, le principe de fonctionnement utilisé ressemblait plutôt à de la triangulation.

Les caméras Planscan et Emerald de chez Planmeca utilisent cette méthode d'acquisition [69].

1.2.1.4. Stéréophotogrammétrie

Cette technique est celle utilisée au cinéma, pour obtenir des films 3D. Elle fonctionne selon le principe suivant. On éclaire un objet et on capte les images réfléchies grâce à deux récepteurs placés à une distance connue l'un de l'autre. On va donc pouvoir obtenir des informations sur la distance de l'objet par rapport à chaque récepteur. En prenant différentes vues autour de l'objet et en recalant toutes les images, on obtient une image en 3D [25,48,69,77].

La caméra CondorScan de Biotech, mise au point par François Duret utilise cette méthode d'acquisition. La caméra Aadva iOS de GC, la caméra DWIO de DentalWings également [25,26,69].

1.2.1.5. Echantillonnage actif du front d'onde ou défocalisation

Cette méthode repose sur un principe similaire à celui de la microscopie confocale parallèle : c'est à dire que l'objet est observé à travers un objectif contenant une lentille, pouvant faire varier la distance focale. Dans le principe de la microscopie confocale parallèle, seuls les points nets (c'est-à-dire situés à la bonne distance focale) sont enregistrés alors que pour la méthode de la défocalisation, on va se servir des points qui apparaissent flous. En effet, le diamètre du flou va être proportionnel à la distance qui sépare le point observé du plan focal [48,69,77].

Cette méthode était utilisée par la caméra LAVA COS et True Definition Scanner de 3M, plus commercialisées en France [69].

1.2.2. Mode d'enregistrement

Il y a deux types d'acquisition.

1.2.2.1. Clichés successifs

Le mode d'enregistrement par clichés successifs consiste à prendre plusieurs clichés qui sont ensuite recalés grâce à leurs parties communes. On appelle aussi cette méthode « image par image » [25,47]. Il est très important que la caméra soit stable pour cette méthode, sinon il y aura du flou cinématique. C'est pourquoi les prises de vues ne se déclenchent que lorsque la caméra est parfaitement stable [25,47].

On peut noter que ce mode d'enregistrement est de moins en moins répandu. En effet, il a été le premier à être mis au point donc toutes les premières caméras utilisaient ce mode d'acquisition : les systèmes CEREC 1, CEREC 2, CEREC 3 Redcam et CEREC Bluecam de Sirona par exemple. De nos jours, Sirona a abandonné ce mode d'acquisition. La caméra CS3500 de Carestream, mise au point en 2014 utilisait encore ce mode d'acquisition mais Carestream aussi a abandonné cette technique avec sa nouvelle caméra CS3600.

1.2.2.2. Balayage rapide (« full motion »)

Ce mode d'enregistrement est aussi appelé « en flux continu » ou « en flux vidéo ». Le principe est de faire une vidéo de la dent plutôt que de faire plusieurs photos mises bout à bout. L'utilisateur doit donc seulement déplacer la caméra en survolant les surfaces à enregistrer et la représentation s'affiche en temps réel sur l'ordinateur, signalant les données non exploitables. L'utilisateur devra alors se replacer sur un endroit bien enregistré et recommencer les enregistrements des parties manquantes [25,47].

C'est vers cette méthode d'enregistrement que tous les nouveaux systèmes se tournent car elle est beaucoup plus facile d'utilisation et beaucoup plus rapide que la méthode par clichés successifs.

En revanche, comme le nombre d'images est très important, les fichiers sont plus lourds et nécessitent une puissance de calcul informatique proportionnelle à l'étendue de l'empreinte [25,47].

Nous pouvons citer quelques systèmes fonctionnant sur ce principe, notamment la caméra LAVA COS de 3M, qui a été la première à proposer cette méthode d'enregistrement, en 2008 [72]. Il y a également la CondorScan de Biotech, la TRIOS 3 et la TRIOS 3 Color de 3Shape, la DWIO de DentalWings et de nombreuses autres caméras...[25,47].

1.2.3. Autres caractéristiques

Pour pouvoir comparer les différents systèmes existants sur le marché, nous devons parler de quelques autres caractéristiques importantes : la nécessité ou non du poudrage, l'enregistrement en couleurs réelles ou bien en monochrome et l'ergonomie de tout le système de prise d'empreinte.

1.2.3.1. Poudrage ou non poudrage ?

Le poudrage consiste à déposer une fine couche homogène de poudre mate sur les surfaces à enregistrer [25,47].

Cette poudre diffère selon le système d'empreinte optique : pour les caméras LAVA COS de 3M et la caméra CEREC Bluecam de Sirona, la poudre utilisée est constituée d'oxyde de titane [71,75]. En revanche pour le système Apollo Di de Sirona, la poudre est constituée d'oxyde de titane et de carbone [71]. La caméra True Definition Scanner de 3M nécessite l'utilisation d'une poudre constituée d'un mélange de dioxyde de titane, de distearate de zinc et de dioxyde de zirconium [3].

Nous pouvons comprendre son utilité car tous les systèmes d'empreinte optique sont basés sur des principes de réflexion de rayons, or les dents ont une certaine translucidité, c'est à dire qu'elles absorbent une partie des rayons émis par la caméra. Les différences de translucidité au sein d'une même bouche ou d'une même dent peuvent donc affecter la qualité de l'empreinte optique [69]. Il faut également que la réflexion des rayons soit diffuse : c'est-à-dire la même en tout point de l'espace, pour que le système d'empreinte optique fonctionne bien, or ce n'est pas le cas pour les surfaces brillantes (métal...). De plus, la présence de salive ou de sang va également perturber le système d'empreinte optique, puisque les rayons seront déviés en traversant ces liquides, provoquant des erreurs [69].

Il faut se rappeler qu'une caméra d'empreinte optique enregistre seulement ce qu'elle voit. L'utilisation de techniques d'accès aux limites est donc indispensable dans le cas de limites intra-sulculaires pour éviter que la gencive ne recouvre la limite de préparation lors de l'enregistrement, causant ensuite des sous-contours.

Il faut donc faire les empreintes optiques dans des conditions bien précises : dents sèches, exempts de sang, et ce pour tous les systèmes d'empreinte optique actuels [69].

Le poudrage permet donc d'unifier la surface à enregistrer pour certains systèmes comme le CEREC bluecam de Sirona, ou de créer des repères s'enregistrement pour d'autres

comme le LAVA COS ou le True Definition Scanner de 3M et l'Apollo Di de Sirona. Ces trois systèmes ne sont actuellement plus commercialisés [69].

Les systèmes d'empreinte optique s'affranchissent désormais de cette étape, qui comporte plusieurs inconvénients : la poudre doit être déposée de la façon la plus homogène possible, pour éviter des déformations de l'image due à des épaisseurs différentes ; cette poudre risque de salir l'embout intra-oral... [69].

Les nouveaux systèmes utilisent de la lumière fluorescente ou phosphorescente permettant d'éviter le poudrage dans la plupart des cas mais, dans quelques situations (métal très brillant...), le poudrage sera tout de même utile et améliorera la qualité de l'empreinte. En effet, toute caméra est plus performante avec de la poudre [25].

1.2.3.2. Monochrome ou couleur ?

Il y a deux types de maître modèle que l'on peut obtenir grâce à une caméra intra-buccale : un maître modèle monochrome (qui rappelle le modèle en plâtre) ou un maître modèle en couleurs réalistes [26].

Nous pouvons citer plusieurs systèmes donnant un maître modèle monochrome : iTero element d'Align, TRIOS 3 de 3Shape, True Definition Scanner de 3M, Aadvia iOS de GC.

Effectuer un poudrage ne veut pas dire obligatoirement que les maîtres modèles seront monochromes (ex : Fona Mycrown).

Nous pouvons citer plusieurs caméras donnant des images en couleurs réalistes : Condorscan de Biotech, CEREC Omnicam de Sirona, TRIOS 3 Color de 3Shape, CS 3500 et CS 3600 de Carestream, Emerald de Planmeca [25,26,69].

L'avantage principal d'avoir un maître modèle en couleur est la meilleure lecture des limites de la préparation, surtout lorsqu'elles sont juxta-gingivales [26].

1.2.3.3. Cart ou branchement sur ordinateur ?

Il y a deux grandes catégories de disposition pour les systèmes de caméra optiques. En effet, ils peuvent être présentés [25,26] :

- en cart (ou chariot à roulettes) : la caméra optique est donc branchée directement sur ce chariot, contenant un écran et une interface de travail (soit un clavier étanche et un track ball (CEREC), soit un écran tactile (TRIOS cart, iTero, DWIO). L'hygiène de ces dispositifs est facilitée mais ils peuvent être encombrants.



Figure 4 : TRIOS Cart de 3Shape, système en chariot avec écran tactile [4]



Figure 5 : CEREC Omnicam de Sirona, système en chariot avec track-ball [82]

- en caméra seule, qui se branche par USB à un PC portable. C'est le cas pour les caméras CondorScan, Emerald et CS 3600 par exemple. L'avantage principale de ces systèmes est le gain de place mais l'hygiène est plus compliquée (car utilisation du clavier et de la souris de l'ordinateur).



Figure 6 : CondorScan : caméra branchée par USB sur un PC portable [38]

1.3. Conception Assistée par Ordinateur

Nous avons vu dans l'histoire de la CFAO industrielle, que le premier logiciel de CAO date de 1961 dans l'industrie automobile (DAC de Patrick J. Hanratty) [101]. Les premiers systèmes de CFAO dentaire utilisaient des logiciels de CAO mis sur le marché par les industriels pour l'aéronautique et l'automobile, comme le logiciel Euclid, utilisé par François Duret en 1983 lors de sa présentation aux entretiens de Garancière [37].

De nos jours, les logiciels utilisés par les systèmes de CFAO dentaire sont spécialement créés pour l'application dentaire, en utilisant des principes de base mis au point par l'industrie.

Après avoir fait l'empreinte optique ou avoir scanné le modèle en plâtre, un fichier contenant toutes les informations est transféré à l'ordinateur, en différents formats [25,69,77] :

- format libre : c'est le format STL, qui veut dire StéréoLithographie ou Surface Tessellation Language. Ce format de fichier pourra être utilisé de manière universelle par différents logiciels de CAO. On parle donc de système ouvert.

- format propriétaire : le fichier n'est alors utilisable que par le logiciel de la même marque que la caméra intra orale. On parle donc de système fermé. Mais il est parfois possible d'acheter un logiciel supplémentaire, permettant de convertir ces fichiers propriétaires en format STL (comme pour le système CEREC avec le logiciel SIRONA Connect permettant d'ouvrir les fichiers). On parlera donc de système « semi-ouvert ».

Une fois que les données de l'empreinte sont transférées sur le logiciel, on voit à l'écran une représentation 3D de la préparation, des dents adjacentes et des dents antagonistes. Cette représentation 3D est issue d'un système de maillage. Plus le maillage est grossier, plus l'objet sera anguleux. Plus le maillage est fin, plus l'objet sera proche de la réalité [77].

Ce mode de représentation 3D était déjà utilisé par le tout premier logiciel utilisé par François Duret, Euclid, comme le montrent les images ci-dessous.

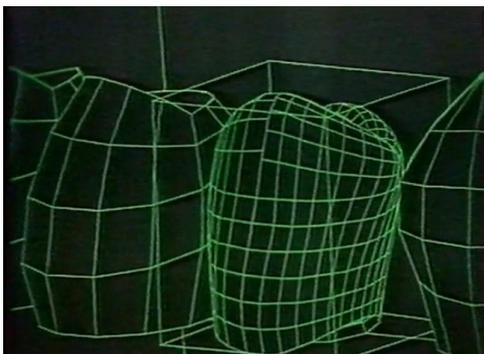


Figure 7 : Représentation 3D par maillage sur le logiciel Euclid, utilisé par François Duret en 1983 [60]

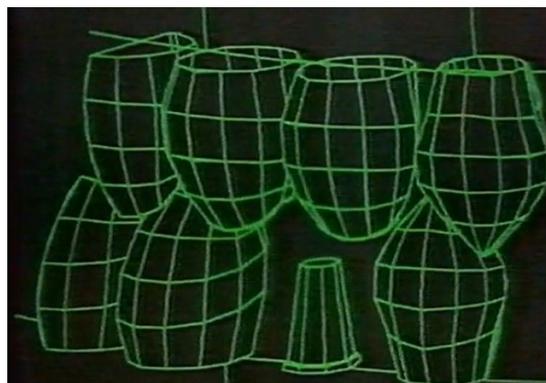


Figure 8 : Représentation 3D par maillage sur le logiciel Euclid, utilisé par François Duret en 1983 [60]

Les logiciels de CAO ont évolués vers une représentation 3D plus proche de la réalité, avec un maillage très fin et une texturation des surfaces, voire même des couleurs réelles pour certains systèmes.

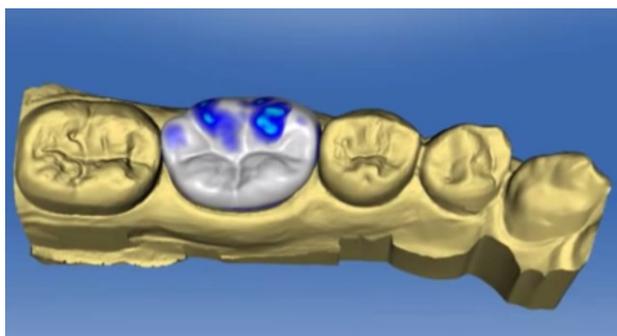


Figure 9 : Représentation 3D sur le logiciel du système CEREC en 2012 [96]



Figure 10 : Représentation 3D sur le logiciel du système Condorscan en 2015 [39]

Les fonctionnalités des logiciels de CAO sont globalement similaires : il est possible de modifier la forme de la future prothèse, d'agrandir et de changer l'orientation du modèle virtuel, de tracer les limites des préparations, de régler les points de contacts occlusaux et avec les dents adjacentes, d'estimer l'épaisseur du matériau prothétique...[72,77].

1.4. Fabrication Assistée par Ordinateur

Après avoir modélisé la future pièce prothétique grâce au logiciel de CAO, il faut maintenant la fabriquer. Pour cela, il y a différentes techniques : soit les méthodes soustractives, soit les méthodes additives. Nous allons présenter le fonctionnement de chacune des techniques et donner leurs avantages et inconvénients, tout en remarquant les progrès effectués depuis la première machine à commande numérique de John Parsons en 1949 [101].

1.4.1. Méthode soustractive : Usinage

Les techniques de fabrication par soustraction fonctionnent selon un principe simple : un bloc de matériau est usiné par une machine-outil. Celle-ci possède plusieurs axes sur lesquels sont fixées des fraises, permettant de modeler la pièce souhaitée. Dans notre domaine, le nombre d'axes varie de 3 à 5 voire 7 [76,77].

Plus la machine-outil possède d'axes, plus elle sera rapide car plusieurs types de fraises pourront usiner le bloc de matériau [69]. C'est pourquoi les machines-outils à 3 axes sont capables d'usiner des couronnes, des barres simples, des bridges et des chapes. Les machines-outils à 4 axes peuvent usiner des piliers implantaires, en plus de tous les autres éléments précédemment cités. Les machines à 5 axes peuvent également usiner des pièces prothétiques complexes et plusieurs piliers implantaires en même temps [76].

Les matériaux usinables par ces machines-outils sont nombreux : alumine, Zircon, vitrocéramique, Cobalt-Chrome, Titane, résines, cire...[69].

Cette technique de FAO était celle utilisée par les toutes premières machines-outils, que ce soit celle de John Parsons en 1949 dans l'industrie ou celle de François Duret en 1974 dans le domaine dentaire [53,101]. En 1987, la machine-outil utilisée par le système de CFAO de François Duret possédait 3 axes et permettait une fabrication de prothèses avec une précision de 80 microns, en 15 à 20 minutes.

De nos jours, l'usineuse CEREC MC X de Dentsply Sirona a une précision de 25 microns et permet une fabrication en 12 minutes. D'autres usineuses sont encore plus précises, comme la MIC5 de Witech, qui a une précision de 5 microns [36].

Cette méthode de fabrication a plusieurs avantages. Comme nous venons de le voir, elle permet une fabrication rapide des pièces prothétiques, avec une précision très satisfaisante. Il est possible d'usiner de nombreux matériaux différents : Zircon, Cobalt-

Chrome, Titane, Céramiques... Elle peut également être utilisée au fauteuil, directement par le praticien (comme avec le système CEREC) [24].

En revanche, nous pouvons noter quelques inconvénients pour cette méthode. Des défauts de surface ou de subsurface peuvent se retrouver dans les pièces prothétiques et diminuer la résistance des restaurations. Ces défauts sont souvent dus à des fraises usées [52]. Il faut donc régulièrement vérifier l'état des fraises utilisées par l'usineuse car une fraise usée va également provoquer d'autres défauts, notamment une sous préparation des pièces prothétiques [69].

De plus, avec cette méthode, il faut que le praticien connaisse le diamètre des fraises utilisées par l'usineuse pour adapter sa préparation à ce paramètre. En effet, si la préparation comporte des angles trop vifs par rapport au diamètre de la fraise, la pièce prothétique aura une mauvaise adaptation. Il est donc compliqué de fabriquer des prothèses avec un relief très complexe avec la technique de l'usinage par soustraction [69,77,113].

1.4.2. Méthodes additives

Les méthodes additives permettent de fabriquer des objets par ajouts successifs de matériau, couche par couche, à partir d'une modélisation 3D [76].

Le principe général est le suivant : l'objet est d'abord modélisé en 3D, puis le fichier obtenu est découpé en tranches représentant les différentes couches nécessaires à la réalisation de la pièce. Ensuite, la fabrication additive peut commencer : chaque millimètre de l'objet est formé de 5 à 20 couches de matériau ajoutées successivement puis fusionnées [113]. On obtient donc la forme désirée.

Il existe plusieurs méthodes de fabrication additive, que nous allons présenter : la stéréolithographie, la micro-fusion laser et l'impression 3D [69].

Ces techniques nous semblent très récentes mais elles sont nées il y a plus de 30 ans déjà. En effet, c'est un américain, Chuck Hull, qui dépose le brevet d'utilisation de la technique de la stéréolithographie en 1984. Il fonde ensuite son entreprise, 3D Systems, en 1986 et commercialise la première machine de fabrication additive par stéréolithographie (appelée SLA-250) en 1988. C'est également cette même année que la première machine fonctionnant par micro-fusion laser est mise au point par Scott et Lisa Crump. Enfin, c'est en 1993 que le procédé de l'impression 3D a été mis au point au MIT [84].

Les indications de ces méthodes de fabrication sont nombreuses : elles peuvent aussi bien être utilisées pour fabriquer des prothèses provisoires (en cire ou en résine) que pour fabriquer des prothèses d'usage (en métal, composite, céramique...). L'avantage majeur de ces techniques est la possibilité de fabriquer une multitude de formes, permettant à la pièce prothétique de s'adapter parfaitement [69].

1.4.2.1. Stéréolithographie

La technique de la stéréolithographie a donc été la première à être mise au point, par Chuck Hull en 1984, comme nous venons de le voir [84].

Son principe de fonctionnement repose sur la photopolymérisation. En effet, la plateforme qui contiendra le futur objet repose dans un bain de résine liquide et un faisceau laser va balayer la surface pour solidifier la résine selon la forme de la première couche de l'objet modélisé. Une fois que cette première couche est solidifiée, la plateforme descend pour qu'une deuxième couche soit fabriquée de la même manière. L'objet est donc fabriqué couche par couche par photopolymérisation de résine liquide. Il y a ensuite une étape de rinçage de l'objet : on le fait tremper dans un bain de solvant pour enlever les excédents de résine non solidifiée. Ensuite, on place l'objet dans un four UV pour finaliser la photopolymérisation et accroître les propriétés mécaniques de la résine [113].

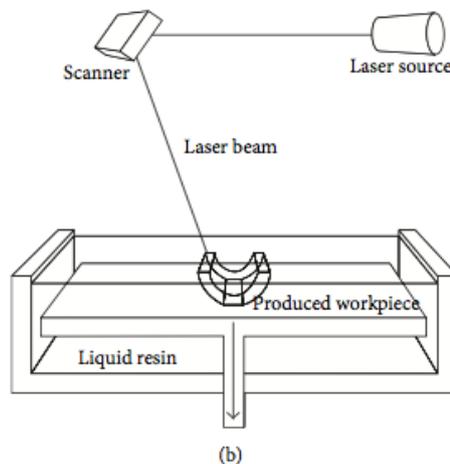


Figure 11 : Schéma du fonctionnement de la technique par stéréolithographie [113]

Cette technique de fabrication additive est utilisée pour réaliser des guides implantaires, des modèles ainsi que des calcinables. Nous pouvons retrouver plusieurs machines de stéréolithographie sur le marché, utilisées par les laboratoires de prothèse, dont la Perfactory DDP HP de Envisiontec ou la Xtreme de Envisiontec [76].

1.4.2.2. Micro-fusion laser

Comme nous l'avons vu précédemment, cette technique a été mise au point en 1988 par Scott et Lisa Crump [84].

Elle fonctionne selon le principe suivant : il y a une couche de métal en poudre sur une plateforme ; un faisceau laser vient ensuite chauffer les grains de poudre à une température proche de leur température de fusion, pour que les grains se collent les uns aux autres selon la forme modélisée sur le fichier de CAO. On parle donc de laser sélectif [113].

Cette technique par addition est la seule permettant de fabriquer des couronnes en métal, des châssis de prothèse amovibles ou des implants [76].

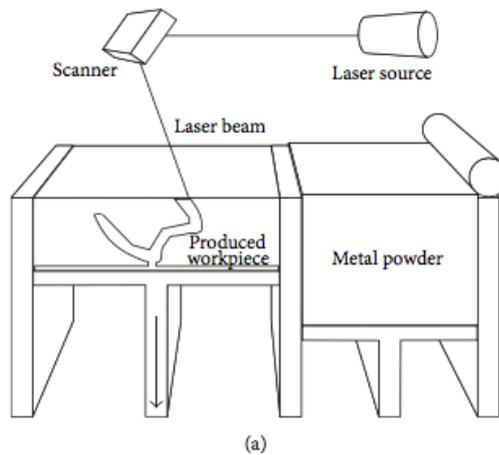


Figure 12 : Schéma du fonctionnement de la technique par micro fusion laser [113]

La micro-fusion permet de réaliser des pièces de manière précise mais on remarque une porosité importante au sein du métal, due au mode de fabrication en lui-même, puisque les grains de poudre ne sont pas entièrement fondus, ils ne s'accrochent les uns aux autres que par des petites surfaces. Cette porosité va donc diminuer les propriétés mécaniques des pièces fabriquées mais elle peut être avantageuse pour la fabrication d'implants, qui ont besoin d'avoir une surface poreuse pour une meilleure ostéointégration [69,113].

Il y a plusieurs machines de micro-fusion laser sur le marché, utilisées par les laboratoires de prothèse, comme la EOSINT M 270 de EOS ou la PM100T Dental de Phenix Systems [76].

1.4.2.3. Impression 3D

Comme nous l'avons vu, cette technique est la dernière à avoir été mise au point, en 1993 [84]. Son principe de fonctionnement est le suivant : une buse injecte du matériau qui solidifie instantanément sur la plateforme. La buse se déplace de manière horizontale pour former une couche puis elle va se déplacer verticalement pour commencer à en former une autre. Grâce à cela, l'objet est formé, couche par couche, sur la plateforme [113]. Cette méthode se différencie des autres par un de ses aspects : elle peut fabriquer un objet à partir de plusieurs matériaux différents. En effet, ces imprimantes 3D peuvent utiliser : de la cire, de la résine, des céramiques liquides...[76].

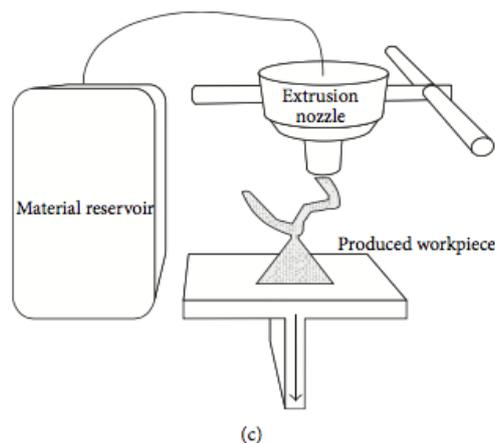


Figure 13 : Schéma du fonctionnement de la technique par impression 3D [113]

Cette technique est utilisée principalement par les laboratoires de prothèse, pour la fabrication de calcinables en cire ou en résine. On peut citer deux imprimantes 3D : la Project DP 3000, fabriquée par 3D Systems (l'entreprise fondée par Chuck Hull) et distribuée par Henry Schein, qui permet l'impression 3D de résine, et la Solidscape T76, fabriquée par Solidscape et qui permet l'impression 3D de cire [76].

A l'heure actuelle, ces imprimantes 3D sont peu utilisées pour la fabrication de prothèses en céramiques car il y a des risques de formation de pores lors de la fabrication, ce qui diminue la résistance à la fracture du matériau [12,113].

Pour conclure, nous pouvons dire que, même si les techniques de fabrication soustractives sont les plus utilisées actuellement, les techniques additives présentent plusieurs avantages. En effet, ces dernières permettent de produire des objets plus

grands, d'éviter le gaspillage de matériau. De plus, ce sont des méthodes de production passives et elles donnent la possibilité de corriger un manque de matière [69].

En revanche, ces méthodes de fabrication additives présentent des inconvénients : on remarque des difficultés pour la mise en forme des faces occlusales des couronnes, qui ont tendance à être en marche d'escalier, de plus l'état de surface des pièces n'est pas idéal et nécessite un polissage. Pour finir, les pièces prothétiques fabriquées par ces méthodes sont moins résistantes aux forces occlusales [113].

Donc actuellement, les techniques de fabrication additives ont quelques indications : la technique de micro fusion laser permet la fabrication de châssis métalliques pour les prothèses amovibles, les techniques de stéréolithographie et d'impression 3D permettent de fabriquer des pièces en résine ou en cire (guide implantaire, calcinables, provisoires, modèles) [76].

Les méthodes de fabrication soustractives sont actuellement les plus indiquées pour la fabrication des chapes en prothèse fixée, et à l'heure actuelle, ce sont les seules qui permettent de travailler la zircone [76].

Mais on assiste à un développement important des techniques additives. Ce sont des méthodes d'avenir et on peut penser que dans plusieurs années, les quelques inconvénients relevés seront corrigés et elles deviendront les techniques de choix pour toute la fabrication.

1.5. Les différentes chaînes numériques

Maintenant que nous avons vu les trois étapes fondamentales de la CFAO (empreinte optique, CAO et FAO), nous allons pouvoir parler des différents types de chaînes numériques possibles. En effet, il y a trois manières possibles de traiter l'information de l'empreinte. On parle de CFAO directe, semi-directe et indirecte, en fonction des lieux où s'effectuent chaque étape de la chaîne de CFAO.

1.5.1. CFAO indirecte

Pour la CFAO indirecte, le chirurgien-dentiste ne change pas ses habitudes par rapport à la chaîne prothétique classique. C'est-à-dire qu'il va prendre une empreinte conventionnelle, avec un matériau d'empreinte adapté. Cette empreinte sera ensuite envoyée au laboratoire de prothèse, qui va couler le modèle en plâtre correspondant. Ce sont les étapes suivantes qui vont faire que l'on se trouve dans une chaîne numérique. En effet, le prothésiste va scanner le modèle en plâtre grâce à un scanner de table, puis il va pouvoir effectuer la conception de la pièce prothétique sur ordinateur et utiliser une technique de FAO pour réaliser la pièce prothétique [69,77].

Ce type de chaîne numérique peut également devenir une chaîne de CFAO externalisée. En effet, pour le système PROCERA, le prothésiste va scanner le modèle en plâtre et envoyer le résultat via internet au centre de conception et de production PROCERA, situé à Stockholm. Le prothésiste aura alors à réaliser la céramique esthétique sur la chape qui lui aura été renvoyée après fabrication [78].

La CFAO indirecte permet au chirurgien-dentiste d'éviter des investissements lourds mais elle n'empêche pas les erreurs dues aux empreintes conventionnelles. C'est une technique assez répandue de nos jours, car les laboratoires de prothèses sont majoritairement équipés pour réaliser le scannage, la CAO et la FAO mais il ne s'agit pas d'une technique d'avenir...

1.5.2. CFAO semi-directe

En ce qui concerne la CFAO semi-directe, une empreinte optique est prise au cabinet par le chirurgien-dentiste puis les données sont envoyées par internet au prothésiste qui va pouvoir effectuer la CAO et la FAO et renvoyer la pièce prothétique terminée au praticien [69,70].

François Duret avait imaginé ce mode de fonctionnement dans sa thèse en 1974 [53].

Cette chaîne numérique permet donc de s'affranchir de l'empreinte conventionnelle et du modèle en plâtre qui en découle. Grâce à cela, on élimine de nombreuses erreurs et on gagne en précision. Il y a également une simplification de la chaîne de réalisation et donc un gain de temps. De plus, ce procédé permet au praticien d'utiliser la CFAO à moindre coût, puisqu'il y a seulement le système d'empreinte optique à acheter [47,69].

1.5.3. CFAO directe

La CFAO directe consiste à effectuer toutes les étapes de la chaîne numérique au fauteuil (chairside). En effet, le praticien prend une empreinte optique et réalise la CAO et la FAO au cabinet [47,86].

François Duret a également imaginé ce concept puisque son but était de réaliser une prothèse en une seule séance. Ce principe du « chairside » a également été développé par Mörmann et Brandestini avec le CEREC dès 1985 [107]. Le succès de ce système est indiscutable puisque c'est le plus vendu au monde [48].

Cette technique permet un gain de temps considérable puisqu'une restauration prothétique peut être effectuée en une seule séance [47]. L'autre avantage est que le praticien maîtrise toute la chaîne de fabrication. En revanche, cette méthode est la plus onéreuse puisque le praticien doit acheter le système d'empreinte optique, le logiciel de CAO et l'unité de fabrication (le plus souvent une usineuse).

Ce type de chaîne numérique, ainsi que la chaîne de CFAO semi-directe, sont des techniques d'avenir. En effet, les nombreux avantages qu'elles apportent en font des techniques de choix, sachant qu'un praticien qui possède un système « chairside » peut tout à fait faire de la CFAO semi-directe pour les cas complexes, en collaboration avec son prothésiste.

2. Les systèmes actuels

Maintenant que nous avons expliqué le mode de fonctionnement de la CFAO dentaire, depuis l'empreinte optique, jusqu'à la FAO, en passant par la CAO, nous allons pouvoir comparer les systèmes actuellement sur le marché, pour mettre en évidence leurs évolutions.

2.1. Systèmes d'empreintes optiques

Afin de mieux apprécier les évolutions de l'empreinte optique de nos jours, nous avons fait un tableau récapitulatif des différents systèmes existants [10,14,25,26,63,69,91,94,110].

Modèle	Marque	Date de lancement	Technique optique	Prise de vue	Poudrage	Ergonomie	Ouverture système	Couleurs réelles	Prix
LAVA COS	3M Espe	2008	défocalisation	balayage rapide	oui	Cart	Contrôlée	non	plus commercialisé en France
CEREC Bluecam	Dentsply Sirona	2009	Triangulation	clichés successifs	oui	Cart	Contrôlée	non	d'occasion : 10 000 €
TRIOS	3Shape	2011	Microscopie confocale parallèle	balayage rapide	non	Cart ou PC portable	Contrôlée	non	20 000 €
CEREC Omnicam	Dentsply Sirona	2012	Triangulation	balayage rapide	non	Cart ou PC fixe	Contrôlée	oui	43 000 €
True Definition Sanner	3M Espe	2012	défocalisation	balayage rapide	oui	Cart ou monobloc portatif	oui	non	plus commercialisé en France
Intrascan	ZFX	2012	Microscopie confocale parallèle	balayage rapide	non	PC portable	oui	non	plus commercialisé
Apollo Di	Dentsply Sirona	2013	Triangulation	balayage rapide	oui	Cart	Contrôlée	non	plus commercialisé
CS3500	Carestream	2014	Triangulation	clichés successifs	non	PC portable	oui	oui	6000 €
Planscan	Planmeca	2014	Tomographie optique de cohérence	balayage rapide	non	PC portable	oui	non	20 000 €
Condorscan	Biotech	2014	Stéréophotogram métrie	balayage rapide	non	PC portable	oui	oui	25 000 €
TRIOS 3	3Shape	2015	Microscopie confocale parallèle	balayage rapide	non	Cart ou PC portable	Contrôlée	non	25 000 €
TRIOS 3 Color	3Shape	2015	Microscopie confocale parallèle	balayage rapide	non	Cart ou PC portable	Contrôlée	oui	45 000 €
DWIO	DentalWings	2015	Stéréophotogram métrie	balayage rapide	non	Cart ou monobloc portatif	oui	non	26 100 €
Aadvia iOS	GC	2015	Stéréophotogram métrie	balayage rapide	non	Cart	oui	non	17 000 €
iTero element	Cadent	2015	Microscopie confocale parallèle	balayage rapide	non	Cart ou monobloc portatif	oui	non	33 600 €
CS3600	Carestream	2016	Stéréophotogram métrie	balayage rapide	non	PC portable	oui	oui	46 000 €
Emerald	Planmeca	2017	Tomographie optique de cohérence	balayage rapide	non	PC portable	oui	oui	39 000 €

Tableau 1: Les systèmes d'empreintes optiques actuellement sur le marché

Grâce à ce récapitulatif, nous pouvons voir que la technologie d'acquisition par clichés successifs n'est plus beaucoup utilisée.

En effet, toutes les nouvelles caméras répertoriées fonctionnent par balayage rapide. Cela s'explique par la rapidité de l'empreinte optique et la simplicité de mise en œuvre avec cette méthode.

En revanche, la technique optique utilisée reste assez variée, même si on remarque que plusieurs caméras se développent sur le principe de la stéréophotogrammétrie. La triangulation est un peu moins utilisée par les nouveaux modèles de caméras optiques mais son principe simple et efficace permet tout de même d'obtenir des empreintes optiques de bonne qualité.

Le poudrage est de moins en moins nécessaire et cela s'explique par la tendance des caméras à faire des empreintes optiques en couleurs réelles. De plus, le poudrage possède plusieurs inconvénients, comme nous l'avons vu précédemment, ce qui ne va pas renforcer son utilisation dans l'avenir.

De plus en plus de systèmes ouverts sont mis sur le marché, ce qui permet au praticien de choisir la chaîne de CFAO qui lui convient et de pouvoir travailler avec son prothésiste sans problème de compatibilité. On peut donc dire que les systèmes ouverts constituent l'avenir de l'empreinte optique.

Pour ce qui est de l'ergonomie, les systèmes présents sur le marché proposent tout types de présentation : en cart, en monobloc portable, en branchement USB sur PC portable. Il y a même certaines caméras qui peuvent être intégrées à l'unit sous forme de pièce à main, comme le CEREC AI Omnicam de Sirona [82].

Nous pouvons supposer que cette présentation est celle qui sera la plus utilisée dans l'avenir car elle permet de tout centraliser au fauteuil et elle est beaucoup moins encombrante.

2.2. Logiciels de CAO

Nous allons maintenant comparer quelques logiciels de Conception Assistée par Ordinateur présents sur le marché [25,51,76,87].

Nom logiciel	Marque	Date de lancement	ouverture système	chaîne numérique
3Shape Dental System	3Shape	2005	Oui	semi-directe
DWOS	DentalWings	2007	Oui	semi-directe
CEREC SW 4	Dentsply Sirona	2011	Contrôlée : export STL seulement	directe
CS Restore	Carestream	2011 ?	Contrôlée : export STL seulement	directe
Romexis	Planmeca	2014	Oui	directe
Exocad	Exocad	2015	Oui	semi-directe
Lyra	Lyra	2015	Oui	directe
CEREC Premium 4.5	Dentsply Sirona	2017	Contrôlée : export STL seulement	directe
DWOS chairside CAD	DentalWings	2017	Oui	directe

Tableau 2: Les logiciels de CAO

Il est important de comprendre qu'il existe plusieurs types de logiciels de CAO : certains sont conçus pour être utilisés au fauteuil, par le praticien et présentent donc une interface simplifiée, ou rendue plus accessible. C'est le cas de la plupart des systèmes de CFAO directe propriétaires.

D'autres sont conçus pour une chaîne numérique semi-directe donc pour être utilisés au laboratoire de prothèse et présentent une interface plus complexe et avec plus d'options [25].

La plus remarquable des évolutions des logiciels de CAO se situe au niveau de l'interface graphique. En effet, comme nous l'avons vu précédemment, la représentation 3D des objets a beaucoup évolué et on obtient dorénavant des images très proches de la réalité, avec un maillage très fin et des couleurs réelles.

2.3. Systèmes de FAO

Pour finir, nous allons présenter les indications des différentes techniques de FAO afin de visualiser les évolutions possibles et les techniques prometteuses pour l'avenir [76].

Techniques de fabrication	Usinage			Fabrication additive		
	3 axes	4 axes	5 axes	Imp. 3D	Stéréo.	Micro-fusion
Exemples de syst. sur le marché	Mill2000 de Bien-Air	PlanMill 40 de Planméca	DWX-51D de Roland	Creo de Planmeca	Xtreme de Envisiontec	PXS Dental de Phenix Systems
Wax up						
Couronnes, chapes, bridges	++	++	++	+++	+++	
Inlays/Onlays	++	++	++	++	++	
Implantologie (moignons, piliers...)		++	++	+	+	
Barres sur implants		+	+	+	+	
Châssis métalliques (amovibles)				+++	+++	
Composants orthopédiques				+++	++	
Zircone						
Couronnes, chapes, bridges	+++	+++	+++			
Inlays/Onlays	+++	+++	+++			
Implantologie (moignons, piliers...)		+	+			
Barres sur implants		+	+++			
Cobalt-Chrome						
Couronnes, chapes, bridges	++	++	++			+++
Implantologie (moignons, piliers...)		++	+++			+
Barres sur implants		+	+++			+
Châssis métalliques (amovibles)						++
Titane						
Couronnes, chapes, bridges	+++	+++	+++			+
Implantologie (moignons, piliers...)		++	+++			+
Barres sur implants		+	+++			+
Châssis métalliques (amovibles)						+

Tableau 3: Indications des systèmes de FAO. + : technique peu adaptée ; ++ : technique bien adaptée ; +++ : technique très bien adaptée

Actuellement, toutes les techniques de FAO existantes sont complémentaires.

En effet, aucune technique ne permet de répondre à toutes les indications : les techniques soustractives sont les seules permettant d'usiner la zircone et elles sont des techniques de choix pour le titane. On remarque aussi que la technique par micro-fusion laser est la seule permettant la fabrication des châssis métalliques par CFAO. L'impression 3D est la seule permettant de fabriquer un même objet avec plusieurs matériaux [76].

En revanche, on peut remarquer que les usineuses par soustraction sont le plus souvent à 4 ou 5 axes, les machines 3 axes ayant moins d'indications, elles sont de moins en moins utilisées. En effet, plus la machine-outil possède d'axes, plus elle sera rapide car plusieurs types de fraises pourront usiner le bloc de matériau.

Une autre catégorie d'usineuse par soustraction a été présentée par Dental Wings à l'IDS (International Dental Show) de 2017 : une usineuse laser (Dental Wings Laser Mill). Au lieu d'une fraise, ce type de machine utilise des faisceaux laser pour usiner la pièce prothétique par soustraction [74]. Cela permet d'éliminer plusieurs inconvénients des techniques soustractives par fraisage comme les vibrations, les éclats de matériaux et le manque de précision. Cette technique laisse espérer qu'elle pourrait être une technique d'avenir. En revanche, ce type d'usineuse n'est toujours pas commercialisé.

Les techniques additives comportent plusieurs avantages : elles permettent de fabriquer des objets de formes complexes et de grandes tailles (contrairement aux techniques soustractives). Elles permettent également de diminuer le gaspillage de matériau [69].

En revanche, comme nous l'avons vu, leurs inconvénients ne leur permettent pas de remplir toutes les indications [76]. Pour le moment, les techniques additives ne permettent pas de fabriquer des pièces prothétiques aux propriétés mécaniques aussi intéressantes que les techniques soustractives.

On assiste actuellement à un développement important des techniques additives. Ce sont des méthodes d'avenir et on peut penser que dans plusieurs années, les quelques inconvénients relevés seront corrigés et elles deviendront les techniques de choix pour toute la fabrication.

III. Perspectives

Maintenant que nous avons vu les origines et l'évolution de la CFAO, nous pouvons aborder les perspectives possibles pour cette technologie, dans un avenir plus ou moins proche. Nous parlerons d'abord de la vision de l'avenir selon François Duret, inventeur mondial de l'empreinte optique. Puis nous parlerons de l'apport de la CFAO sur les autres domaines. En effet, nous ne pouvons pas parler de l'avenir de la CFAO dentaire sans parler des autres domaines car, comme l'a dit François Duret « Le numérique explose littéralement dans toutes les disciplines scientifiques et ce n'est plus, de ce fait, les dentistes ou les prothésistes qui feront évoluer leur discipline mais toutes les sciences confondues. » [28]. Enfin, nous terminerons avec les innovations qui sont attendues dans notre domaine.

1. L'avenir de la CFAO selon François Duret

Il nous semble important de donner la vision de l'avenir de la CFAO par son inventeur, le Pr François Duret. Mais tout d'abord, parlons de l'avenir tel qu'il le concevait il y a plus de 30 ans.

1.1. En 1974

Dans le chapitre IX de sa thèse, François Duret décrit la mise en application de la CFAO et de ses perspectives [53].

1.1.1. L'empreinte optique

Voici sa vision : tout d'abord, l'empreinte optique permettra de vérifier la préparation à tout moment, grâce à un agrandissement de la représentation 3D sur un écran. Cela limitera la fatigue des yeux et permettra de « sortir enfin hors de la bouche » [51]. De plus, l'empreinte optique sera un outil de communication avec plusieurs intervenants : le patient, qui pourra visualiser les projets prothétiques et voir l'évolution esthétique au fur et à mesure des séances ; le prothésiste ou un confrère, afin d'avoir leur avis pendant ou après notre travail. Nous pouvons remarquer que ces applications pour l'empreinte optique ont bel et bien eu lieu.

François Duret parle ensuite de l'application possible de l'empreinte optique dans plusieurs autres domaines.

Tout d'abord dans le domaine de l'enseignement. Selon lui, l'utilisation de l'empreinte optique dans l'enseignement permettrait aux étudiants de voir l'évolution de leur travail et aux enseignants de montrer les techniques de préparation. Il y a effectivement des études sur l'application de l'empreinte optique dans l'enseignement qui ont été faites et dont nous parlerons dans le chapitre suivant.

Pour ce qui est de l'application de l'empreinte optique dans le domaine de la recherche, François Duret dit qu'elle pourrait être un moyen de stockage et de conservation numérique d'idées, de recherches, de modèles... un peu comme Google de nos jours.

François Duret parle également des applications non médicales possibles. En effet, il imagine qu'il sera possible de reproduire des objets, par exemple historiques ou fragiles, grâce à la CFAO. Il appelle cela la photocopie en 3 dimensions. Il parle également des possibilités d'agrandissement que l'empreinte optique pourrait offrir afin de visualiser des objets très petits. Il imagine que l'empreinte optique pourra être une aide aux études systématiques d'objets (c'est-à-dire classer des pièces selon leurs caractéristiques). François Duret parle même de transmettre l'empreinte optique par téléphone, il s'agit là des prémices d'internet ! Pour finir, il parle de la possible utilisation de la CFAO dans l'espace (stations orbitales...), pour l'usinage des pièces défectueuses.

Pour finir sur cette partie, François Duret imagine le principe d'une empreinte optique secondaire, complémentaire à l'empreinte optique de base, et qui permettrait de visualiser l'os, les vaisseaux... Cette empreinte reposerait sur le fait que les tissus « absorbent ou rejettent certaines longueurs d'ondes et transforment ces mêmes longueurs d'ondes durant leur passage. » [53]. En connaissant la fréquence nécessaire pour obtenir une interférence pour chaque tissu, on pourrait donc enregistrer spécifiquement les rayons réfléchis par tel ou tel tissu. Les applications de l'empreinte optique imaginées par François Duret sont multiples.

1.1.2. La CAO

François Duret explique également comment il voit la partie CAO dans l'avenir. L'empreinte optique sera d'abord visualisable par le chirurgien-dentiste, directement au cabinet, afin qu'il en vérifie la validité. Puis elle sera envoyée à un ordinateur situé dans un centre de recherche, par « téléphone » (internet), pour la CAO à proprement parler. A l'époque, François Duret trouve « [qu'] il semble aberrant de posséder chez soi un ordinateur. » [53]. En effet, il imagine que la partie CAO pourrait être délocalisée du cabinet afin d'être effectuée par des « chercheurs spécialisés en chaque domaine » [53],

qui pourraient effectuer des modifications sur les logiciels en fonction des dernières données de la science. Il y aurait plusieurs types de modélisations possibles sur ordinateur : la modélisation de l'empreinte, celle de l'intrados de la prothèse en tenant compte de différents facteurs (épaisseur de ciment, axe d'insertion, contrôle des contre-dépouilles...). Il est important de noter que François Duret parle déjà du dialogue homme-machine car il imagine qu'en cas de contre-dépouille révélée par le logiciel, celui-ci demandera au praticien s'il souhaite conserver son empreinte telle quelle ou bien reprendre sa préparation et son empreinte en cas de contre-dépouille trop importante. Le dernier type de modélisation abordé par François Duret est la modélisation de l'extrados de la prothèse, qui se fera en fonction de dents théoriques stockées dans la mémoire de l'ordinateur et en fonction des dernières données de la science.

1.1.3. La FAO

Pour la partie Fabrication Assistée par Ordinateur, François Duret parle de plusieurs méthodes d'usinage : l'électro érosion (utilisée actuellement par le système Procera), l'électro chimie, les ultra-sons, le fraisage.

Pour l'usinage par fraisage, il distingue deux cas : si l'empreinte a bien été prise perpendiculairement à l'axe de la préparation, et que nous sommes dans l'axe de la prise de vue, un seul axe d'usinage suffit ; par contre si nous ne sommes pas perpendiculaire à l'axe de la préparation, il faudra utiliser plusieurs axes d'usinage.

François Duret parle ensuite d'électroformage : il s'agirait d'un dépôt de métal par couches d'épaisseur constante. Cela éviterait le gaspillage de matériau et permettrait de réaliser des couronnes homothétiques. Il propose également la fabrication des tenons avec cette technique. Il s'agit donc d'une méthode d'usinage par addition.

Il parle également de la disparition de la céramisation de surface et imagine l'apparition de métaux ayant la couleur de la dent, qui auraient une meilleure résistance. Pour finir, François Duret parle de l'utilisation du laser pour effectuer des soudures ou des découpes. Par exemple, pour la fabrication d'un bridge, les éléments seraient usinés séparément puis rassemblés par soudure laser. Pour une armature de Prothèse Amovible Partielle, il propose de découper l'armature et de souder les attachements par laser également.

Il est incroyable de voir que les perspectives que François Duret imaginait pour la CFAO lors de la rédaction de sa thèse, en 1974, sont nombreuses à finalement s'être réalisées.

1.2. Plus de 30 ans plus tard

Maintenant que nous avons donné la vision de François Duret au moment de sa thèse, en 1974, nous allons pouvoir nous intéresser à sa vision de l'avenir, 30 ans plus tard.

Dans une interview en 2003 [64], François Duret parle de l'avenir de la CFAO. Selon lui, toutes les empreintes conventionnelles seront remplacées par l'empreinte optique. Il présente également les deux types de chaîne de CFAO qui existeront selon lui. Chaque cabinet dentaire devra posséder une caméra optique, une liaison internet à haut débit avec le laboratoire de prothèse et une mini fraiseuse. Il y aura ensuite deux cas de figures, que nous allons présenter ci-dessous.

Pour les cas simples (inlay, couronne unitaire...), le chirurgien-dentiste devra préparer la dent puis prendre une empreinte optique. L'image obtenue sera envoyée au laboratoire de prothèse, dans une unité de traitement informatique. Une fois l'image reçue, un opérateur modélisera la pièce prothétique et commandera à distance la mini fraiseuse située au cabinet dentaire pour l'usiner. Le chirurgien-dentiste pourra donc placer la pièce prothétique en bouche très rapidement. Cette chaîne de CFAO est présentée dans le schéma ci-dessous.

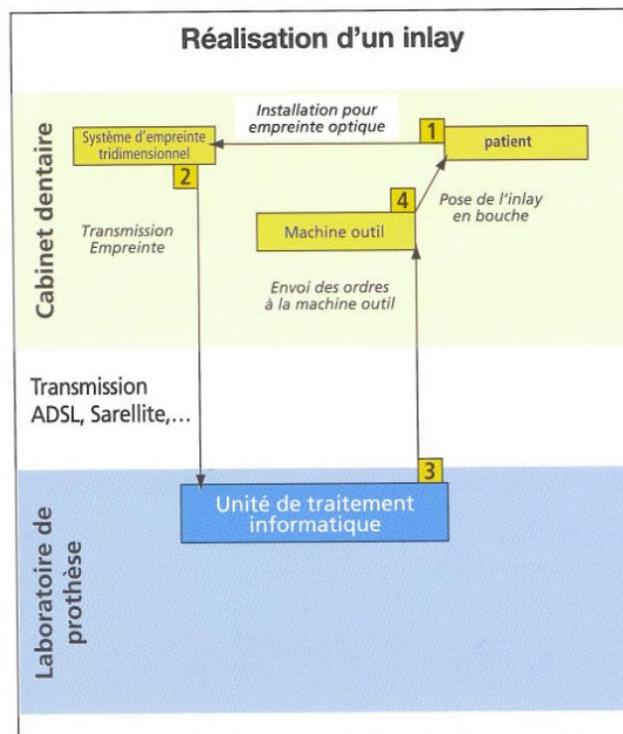


Figure 14 : la chaîne de CFAO pour les cas simples, imaginée par François Duret en 2003 [64]

Le deuxième cas de figure présenté par François Duret concerne les cas de prothèses plus complexes. Comme pour le cas précédent, le chirurgien-dentiste préparera la ou les dents puis prendra une empreinte optique qu'il enverra par internet à l'unité de traitement informatique du laboratoire de prothèse. L'opérateur modélisera « une sorte de prothèse provisoire ou coiffe de contrôle » [64] et commandera à distance la mini fraiseuse située au cabinet dentaire pour l'usinage de cette prothèse provisoire. Une fois usinée, cette pièce prothétique permettra au chirurgien-dentiste de contrôler la qualité de sa préparation et de son empreinte et servira également de couronne provisoire. Si l'empreinte est validée, le prothésiste pourra modéliser la pièce prothétique d'usage et lancer la FAO au laboratoire de prothèse. La pièce prothétique sera ensuite envoyée au chirurgien-dentiste qui pourra la placer en bouche. Cette chaîne de CFAO est présentée dans le schéma ci-après.

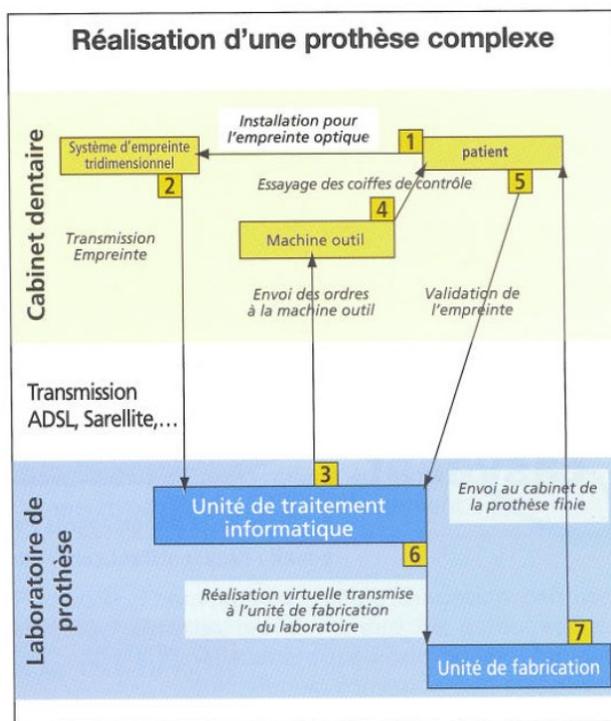


Figure 15 : la chaîne de CFAO pour les cas complexes, imaginée par François Duret en 2003 [64]

Nous pouvons remarquer que pour les deux types de chaîne de CFAO, il y a forcément une interaction avec le laboratoire de prothèse, il s'agit donc plutôt de formes de CFAO semi-directes.

Dans une interview en 2007, François Duret explique ce qu'il imagine pour le futur de la CFAO. Selon lui, la CFAO dentaire sera toujours composée des trois éléments : empreinte optique, CAO et FAO, qui « pourront être partiellement réunis en un, deux ou trois sous ensembles, mais quelle que soit la configuration, ils seront toujours déclinables en ces trois éléments de base. » [28]. Pour lui, l'avenir de la CFAO serait une « intégration totale dans les laboratoires avec communication et périphériques situés dans les cabinets dentaires. » [28]. Cela confirme donc ce qu'il pensait déjà 5 ans plus tôt avec les deux types de chaîne de CFAO présentées précédemment.

En ce qui concerne l'empreinte optique, François Duret imagine qu'elle pourrait passer du mode statique (clichés successifs) au mode dynamique (balayage). Cette innovation a bien eu lieu un an plus tard, avec la caméra LAVA COS de 3M. François Duret parle également de l'intégration de la caméra optique directement sur la tête de la turbine du chirurgien-dentiste. Cela permettrait de filmer la dent au fur et à mesure de la préparation, en temps réel. La comparaison avec un modèle théorique pourrait s'afficher soit sur un écran, soit directement en bouche, par holographie. François Duret parle également de la possibilité de prendre une empreinte optique d'arcade complète et d'analyser l'occlusion en dynamique grâce à des prises de vue. Il imagine aussi associer l'empreinte optique aux méthodes d'imagerie 3D (cone beam, scanner) afin d'obtenir à la fois des informations sur les dents, les tissus mous et les tissus durs.

Pour ce qui concerne la CAO, François Duret imagine une automatisation. En effet, le logiciel proposera de lui même une modélisation de la future prothèse, que le chirurgien-dentiste pourra ensuite valider ou modifier, grâce à des outils virtuels : « le travail se fera dans l'espace avec un modèle qui rappellera les images holographiques que nous voyons dans les films futuristes. » [28].

Pour la partie FAO, François Duret imagine la fabrication de prothèses de manière hétérogène. C'est-à-dire que des matériaux composites seront utilisés pour fabriquer une même prothèse afin de se rapprocher de la réalité. Les matériaux homogènes disparaîtront donc. Pour la teinte, il imagine des matériaux qui pourront « renfermer une pigmentation interne capable d'être activée par un outil dédié présent dans la machine outil » [28]. On pourra donc obtenir une teinte très proche de la teinte d'une dent. Il parle même de « faire pousser la prothèse, grâce aux nano technologies, avec de l'hydroxyapatite fixée sur des fibres organiques (collagène artificiel, pseudo kératine ou élastine). » [28].

2. L'apport de la CFAO sur les autres domaines

Nous allons maintenant parler des avancées que la CFAO a apportées dans d'autres domaines, permettant de mettre en avant les perspectives d'avenir possibles.

Dans l'industrie, l'empreinte optique est désormais utilisée pour le contrôle qualité des pièces fabriquées. En effet, ces pièces sont scannées par une caméra optique, un modèle 3D est ainsi obtenu sur ordinateur puis comparé avec la pièce idéale. Les éventuels défauts peuvent donc être visualisés [33,40].

Dans le domaine médico-légal, l'empreinte optique est utilisée pour étudier des morsures et des blessures.

Dans le domaine médical, la CFAO a permis de réaliser des progrès considérables. Par exemple, en novembre 2014, lors d'un congrès de médecine cardiaque aux Etats-Unis, le Dr Bramlet, un chirurgien américain, a présenté ses recherches sur l'impression 3D de coeur de fœtus. En effet, à partir de l'IRM du coeur d'un foetus possédant une malformation cardiaque, il est possible d'imprimer ce coeur en 3D. Cela permet de mieux visualiser les malformations et de faciliter ainsi la préparation du chirurgien pour l'opération. Plusieurs nourrissons ont déjà bénéficié de cette avancée technologique et on peut imaginer une généralisation de ce genre de pratique pour l'avenir [11,114].

Au CHU de Toulouse, un patient a bénéficié d'une prothèse trachéo-bronchique sur mesure réalisée par CFAO, en février 2017. L'équipe du CHU de Toulouse a travaillé avec une entreprise toulousaine, Anatomik Modeling, spécialisée dans la 3D pour le secteur médical. En effet, à l'aide du scanner du patient, Anatomik Modeling a pu reconstituer la trachée, la bronche et les éventuelles sténoses en 3D puis concevoir la prothèse trachéo-bronchique par CAO. Ensuite un moule de fabrication pour la prothèse a été usiné par FAO. Plusieurs autres patients ont ensuite bénéficié de cette innovation [73,111,112].

Toujours au CHU de Toulouse, l'utilisation d'un nouveau dispositif d'imagerie 3D, Echonavigator inauguré le 6 novembre 2015, permet aux chirurgiens cardiaques de réaliser des opérations à coeur fermé chez l'enfant. Ce logiciel permet de visualiser le coeur en 3D et en dimensions réelles grâce à l'échographie faite au préalable et en combinant cette image aux informations apportées par les rayons X lors du passage de la sonde par voie endovasculaire. Le chirurgien peut donc visualiser le trajet de la sonde en direct et réaliser l'opération de manière guidée et à coeur fermé, ce qui permet des suites opératoires beaucoup moins lourdes pour l'enfant [9,34].

A l'INSERM (INstitut de la Santé Et de la Recherche Médicale) de Bordeaux, les chercheurs du nouvel Accélérateur de Recherche Technologique (ART) BioPrint travaillent sur la bioimpression 3D. Grâce à l'utilisation combinée de trois types de bioimprimantes (laser, jet d'encre, micro-extrusion), il est possible de déposer des cellules souches humaines, couche par couche, pour reproduire un tissu. L'enjeu de l'équipe de l'INSERM est maintenant de réussir à imprimer un tissu vivant, c'est à dire avec un réseau vasculaire lui permettant d'être nourri et oxygéné. De plus, grâce aux informations obtenues par l'IRM d'un cerveau, la bioimprimante combinant micro-extrusion et jet d'encre peut imprimer un modèle 3D de ce cerveau [15]. Dans le futur, le but de la bioimpression 3D est de pouvoir imprimer des organes afin de les greffer. Il sera même possible d'imprimer ces organes à partir des cellules du patient, ce qui évitera le phénomène de rejet de greffe [1].

Nous pouvons imaginer que dans le futur, nous serons capables de bioimprimer une dent, avec les cellules souches du patient. Cette dent serait alors « vivante » puisque la pulpe sera également bioimprimée. Nous pourrions ensuite l'implanter et son intégration serait optimale grâce au desmodonte qui aura également été bioimprimé. On peut remarquer que François Duret avait évoqué une idée proche de celle-ci en 2007, comme nous l'avons vu, il souhaitait « faire pousser la prothèse, grâce aux nano technologies, avec de l'hydroxy-apatite fixée sur des fibres organiques (collagène artificiel, pseudo kératine ou élastine). » [28].

Dans le domaine de l'enseignement, la CFAO commence à être utilisée, comme l'avait prédit François Duret dans sa thèse. Plusieurs études ont été faites sur le sujet, notamment une étude américaine à propos de la notation des Travaux Pratiques (TP) d'étudiants en 2^e année de faculté dentaire. Les dents préparées par les étudiants ont d'abord été notées par l'équipe enseignante, selon des critères bien définis, puis elles ont été scannées grâce au système E4D et chaque préparation a été comparée numériquement avec une préparation idéale préalablement scannée. Le résultat de cette étude a montré qu'il n'existe pas de corrélation entre la notation par l'équipe enseignante et celle effectuée grâce au système E4D [109]. Cela peut s'expliquer par un certain nombre de critères que le logiciel n'a pas pu analyser (le délabrement des dents adjacentes, la propreté du modèle...). Mais cette problématique reste d'actualité et remplacera peut être la notation par un être humain, qui peut être subjective. Nous pouvons citer le prepCheck de Dentsply Sirona qui est un outil destiné à l'enseignement, permettant à l'étudiant, lors du TP, de scanner sa préparation avec la caméra Omnicam

puis de la comparer avec la dent idéale sur le logiciel [88]. L’empreinte optique est donc un outil très utile pour l’auto évaluation ainsi que la visualisation des erreurs.

3. Les innovations attendues

Après avoir vu les perspectives imaginées par François Duret puis l’apport de la CFAO dans les autres domaines, nous allons pouvoir nous intéresser à l’avenir de la CFAO dans notre domaine, grâce aux différentes innovations qui sont attendues. Nous pourrions également déterminer quels sont les difficultés que la CFAO dentaire doit encore surpasser.

3.1. Détection des tissus durs sous-gingivaux

Nous pouvons penser que l’avenir des empreintes optiques résidera dans la possibilité de visualiser des éléments sous-gingivaux, ce qui éviterait le recours aux techniques d’accès aux limites qui sont actuellement nécessaires en cas de limites intrasulculaires [14]. En effet, actuellement, les caméras intra-orales n’enregistrent que ce qu’elles voient, c’est à dire qu’une limite intrasulculaire (ou bien une limite cachée par de la salive ou du sang) ne pourra pas être enregistrée sans les précautions nécessaires.

Comme nous l’avons vu précédemment, François Duret imaginait déjà une empreinte optique secondaire, qui permettrait d’enregistrer à la fois les limites intrasulculaires, l’os sous-jacent et les structures anatomiques (nerf, sinus...) [53].

Une société américaine, S-Ray, a développé un système d’empreinte par ultrasons en 2015. Le but recherché par cette entreprise était de trouver un moyen d’éviter l’utilisation des rayons X pour les radiographies dentaires. Le système ClearView SCAN/R a donc été mis au point dans cette optique et permet de visualiser à la fois les dents et l’os sous-jacent. Cette innovation se rapproche donc de ce qu’imaginait François Duret dans sa thèse, avec l’empreinte optique secondaire [8,18,30,49].



Figure 16 : porte empreinte ClearView SCAN/R de S-Ray [47]

Lors de l'IDS (International Dental Show) 2018, la société Voco a présenté un prototype de caméra intra-orale, appelée IO-Scan, qui permettrait de visualiser les tissus durs sous-gingivaux. En effet, cette caméra utiliserait une méthode d'enregistrement basée sur l'holographie numérique par infrarouge. Les rayons infrarouges délivrés par la caméra pourraient traverser la gencive, la salive ou le sang, se réfléchir sur les tissus durs dentaires sous-gingivaux et être enregistrés par la caméra à leur sortie. Donc grâce à cette technique, l'enregistrement des limites de préparations intrasulculaires serait grandement simplifié. La caméra IO-Scan de Voco n'est qu'un prototype pour le moment, sa commercialisation étant annoncée courant 2018, mais elle promet de grandes avancées pour la CFAO dentaire [14,65].

3.2. Porte-empreinte optique d'arcade complète

Une autre amélioration nous paraît importante pour l'avenir : un porte-empreinte optique d'arcade complète. En effet, grâce à ce type de porte-empreinte, il serait possible de réaliser une empreinte optique d'une arcade en une seule fois et en très peu de temps, sans déformation.

Un prototype de ce type a été présenté par la société Luxembourgeoise Medentic, à l'IDS en 2015 [54]. Ce porte-empreinte optique d'arcade complète, appelé iTray, posséderait de nombreux capteurs optiques permettant d'enregistrer les informations de toute l'arcade et de les transmettre directement en 3D à l'ordinateur [81]. Si la commercialisation d'un tel porte-empreinte voit le jour, il s'agirait d'une innovation majeure dans le domaine, qui permettrait d'étendre encore les indications des empreintes optiques.



Figure 17 : prototype iTray de Medentic : porte-empreinte optique d'arcade complète [81]

Le système ClearView SCAN/R dont nous avons parlé dans le chapitre précédent possède également l'avantage d'être un porte-empreinte optique d'arcade complète [8,18,30,49].

Avec de tels porte-empreintes, il serait possible de réaliser absolument tous les types de prothèse par CFAO : aussi bien les couronnes, que les Prothèses Partielles Amovibles et même les Prothèses Amovibles Complètes. Ce type d'empreinte permettrait également de gagner en rapidité, ce qui est un avantage considérable.

3.3. Usineuse laser

Une autre innovation est en train de se développer : il s'agit d'une usineuse laser. En effet, Dental Wings a présenté la Lasermill lors de l'IDS de 2017 [14]. Cette usineuse utilise des millions d'impulsions laser de haute intensité pour sculpter un bloc de matériau au lieu d'utiliser des fraises [74]. Nous pouvons noter que François Duret avait déjà évoqué cette idée dans sa thèse, comme nous l'avons vu précédemment [53].



*Figure 18 : Usineuse laser
: Lasermill de Dental
Wings [49]*

Les avantages d'un tel système sont multiples. Tout d'abord, il permet une plus grande précision d'usinage (une résolution plus de dix fois supérieure aux machines d'usinage classique selon Dental Wings). Ensuite, il est plus économique car il ne nécessite pas l'utilisation de fraises, cela évite donc les coûts de remplacement des fraises usées. De plus, cette usineuse laser possède un scanner 3D intégré permettant d'effectuer un contrôle-qualité de la pièce au cours de l'usinage ainsi qu'à la fin. Il s'agit donc d'une

machine plus rapide, plus précise et pouvant usiner différents types de matériaux : aussi bien les composites, que les céramiques ou les céramiques hybrides. Selon Dental Wings, les indications de l'usineuse Lasermill sont très étendues : couronnes, inlays, onlays, facettes et même bridges trois éléments [45,46,74].

Depuis la présentation de cette usineuse à l'IDS de 2017, Dental Wings promet sa commercialisation prochaine. Même si elle se fait attendre, cette innovation promet de grandes avancées pour la CFAO dentaire de demain.

3.4. Articulateur virtuel

Un autre progrès qui va certainement s'accroître concerne les articulateurs virtuels. En effet, il est désormais possible, avec certains systèmes, d'enregistrer les mouvements du patient virtuellement. Cela évite donc la manipulation de modèles en plâtre et leur montage en articulateur. De plus, ces techniques apportent plus de précision qu'une simple prise de vue des arcades en occlusion par une caméra intra-buccale [79].

Nous pouvons citer le système Jaw Motion Analyser de Zebris, qui est un système de capture des mouvements mandibulaires par ultrasons et qui permet aussi d'enregistrer l'enveloppe limite des mouvements. Il est composé de deux éléments : un arc inférieur comportant trois émetteurs d'ultrasons, relié à une fourchette positionnée au niveau de l'arcade mandibulaire ; un arc supérieur comportant quatre récepteurs à ultrasons et fixé à l'aide d'un appui nasal et d'une lanière à appui pariétal [79,93,95]. Nous pouvons observer ce système sur l'illustration ci-dessous.



Figure 19 : Système Jaw Motion Analyser de Zebris [95]

Après avoir installé tout le dispositif, il est demandé au patient d'effectuer des mouvements mandibulaires (ouverture/fermeture ; diduction, propulsion...) qui sont automatiquement enregistrés et transmis sur ordinateur. Les données recueillies par cet articulateur virtuel peuvent ensuite être exportées sous la forme d'un fichier XML (eXtensible Markup Language) et intégrées au logiciel de CAO utilisé pour la conception prothétique.

Les articulateurs virtuels de ce type sont déjà commercialisés mais leur utilisation n'est pas très répandue. On peut espérer que dans l'avenir, avec la numérisation de notre profession, ils feront partie des outils de base du cabinet.

3.5. Télédentisterie

Pour finir, une des perspectives d'avenir possibles pour la CFAO dentaire semble être la télédentisterie.

Nous pouvons parler du projet e-DENT, qui est un exemple même de télédentisterie. En effet, depuis 2014 en Languedoc Roussillon, l'ARS (Agence Régionale de Santé) a mis en place un programme de télédentisterie dans les maisons de retraite. Une infirmière formée manipulera une caméra intra-buccale afin de recueillir des images précises de l'état bucco-dentaire des résidents [89,92]. La caméra utilisée est la Soprocare de Acteon : elle permet de filmer les arcades, de réaliser des prises de vue en mode macro mais également de repérer les lésions carieuses, les inflammations gingivales et la plaque [100]. Toutes les données recueillies seront ensuite envoyées au CHU de Montpellier pour être analysées par des chirurgiens-dentistes, qui poseront un diagnostic et proposeront un plan de traitement.

Le même type d'application se fait dans notre région depuis avril 2018. En effet, une infirmière utilise le même type de caméra que pour le projet de Montpellier et prend des clichés intra-oraux des résidents de certains centres ADAPEI (association départementale de parents et amis de personnes handicapées mentales) dans la région Midi-Pyrénées. Les images sont ensuite transmises et CHU de Toulouse, où elles sont analysées par le Dr Michel Sixou et le Dr Maret-Comtesse, afin de hiérarchiser la prise en charge des patients et de définir l'urgence.

Ce système de télédentisterie permet donc de mieux organiser le parcours de soins des personnes âgées mais également d'avoir un suivi bucco-dentaire régulier. Avec les déserts médicaux qui se répandent en France, la télédentisterie (et même la télé-médecine en générale) sont donc des pratiques d'avenir [89,92].

Le Dr Jean-Luc Berruet imagine la mise en application de la télédentisterie dans son article [14]. Le patient du futur pourrait se présenter au cabinet, une assistante lui ferait passer un cone beam, prendrait des empreintes optiques intra-buccales, enregistrerait ses mouvements avec un articulateur virtuel, prendrait des photographies extra-orales... Tout cela dans le but d'obtenir une représentation du patient en 4D, avec tous les éléments nécessaires au diagnostic enregistrés et transmis au praticien. Celui-ci pourrait donc préparer la consultation en amont, grâce à toutes ces informations. Ce système aurait également une valeur médico-légale puisque l'on pourrait conserver les représentations 4D du patient sur ordinateur. On aurait donc une véritable base de données de la denture et de l'évolution de chaque patient. Cela pourrait servir pour la réalisation de prothèses futures, en se basant sur la forme des dents naturelles initiales.

Concernant les perspectives de la CFAO, nous pouvons donc remarquer que François Duret avait une vision plutôt juste de l'avenir, puisque de nombreuses idées qu'il a eu se sont finalement réalisées ou sont sur le point d'être réalisées, comme l'usinage par laser, l'empreinte optique secondaire, les applications multiples de la CFAO dans les autres domaines... Grâce à cette analyse des applications et des innovations dans le domaine de la CFAO, nous avons pu voir que rien n'est encore fixé, la CFAO a encore de nombreux progrès à faire et l'avenir sera riche en nouveautés, pour perfectionner encore plus notre pratique.

Conclusion

Ainsi, la CFAO a vu le jour dans les années 50, dans le secteur de l'industrie, grâce à plusieurs personnes : John Parsons, Patrick J. Hanratty, Pierre Bézier et Paul Faget de Casteljeau. Son évolution a ensuite suivi le schéma suivant : d'abord un développement de quelques systèmes maisons dans les années 60-70, puis une explosion du marché à partir des années 80 jusqu'à nos jours, avec une multiplication des systèmes, aussi bien fermés, qu'ouverts ou semi-ouverts.

Nous avons pu constater que l'histoire de la CFAO, dans le secteur dentaire, a suivi un schéma similaire, grâce à François Duret, pionnier de la CFAO dentaire, avec sa thèse en 1974, exposant le fonctionnement de la CFAO dentaire mais surtout de l'empreinte optique. Puis, dans les années 80, quelques personnes se sont intéressées à la CFAO dentaire : Matts Andersons et Werner Mörmann, qui ont développé leur système et Dianne Rekow, qui n'a malheureusement jamais pu dépasser le stade de l'expérimentation. Dans les années 90, une domination du marché par quelques systèmes fermés a eu lieu, correspondant à peu près à l'époque des systèmes maisons dans l'industrie. Et pour finir, à partir des années 2000 et jusqu'à nos jours, une explosion du marché a eu lieu, avec une multiplication des systèmes.

Nous avons pu remarquer que l'histoire de la CFAO dentaire est étroitement liée à celle de la CFAO dans l'industrie, puisqu'elle utilise des notions de cette dernière et que les premières sociétés à avoir commercialisé des systèmes de CFAO dentaire commercialisaient également des systèmes de CFAO pour l'industrie.

En étudiant l'histoire de la CFAO, nous avons pu apprécier l'évolution de cette technologie dans notre secteur, avec les différentes innovations qui ont jalonné son développement. Nous pouvons citer, par exemple, l'apparition du premier système d'empreinte optique sans poudrage (iTero) en 2005 ; les systèmes ouverts, la même année ; le fonctionnement par balayage rapide (LAVA COS) en 2008 ; les images en couleurs réelles en 2012... Nous avons également pu mettre en évidence que la modélisation 3D pour la CAO est de plus en plus proche de la réalité et que les techniques de FAO par addition sont très prometteuses pour l'avenir.

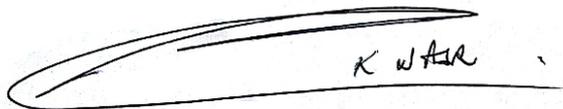
Cette démarche d'analyse de l'histoire nous a également permis de mettre en avant les perspectives d'avenir pour la CFAO. En effet, nous avons pu constater que plusieurs des idées de François Duret en 1974 se sont finalement réalisées (CFAO dans

l'enseignement, FAO par addition, la CFAO comme outil de communication...) tandis que d'autres sont en cours de développement, comme l'empreinte optique secondaire.

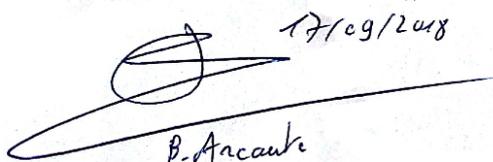
Pour finir, en étudiant les innovations récentes ou à venir, aussi bien dans le domaine dentaire que dans les autres domaines, nous avons pu voir que la révolution numérique n'est pas terminée et que de nombreuses innovations ne demandent qu'à se diffuser, comme les porte-empreintes optiques d'arcades complètes, l'usinage laser, les articulateurs virtuels et bien d'autres encore !

La révolution numérique est donc bien amorcée dans notre domaine mais il faut tout de même être vigilant car nous avons vu ses côtés positifs mais, comme toute chose, elle comporte aussi des points négatifs. En effet, cette révolution numérique risque de changer notre pratique et les rapports que les chirurgiens-dentistes entretiennent avec les prothésistes. Il faut donc que cela se fasse en douceur et dans le respect des principes fondamentaux de notre pratique.

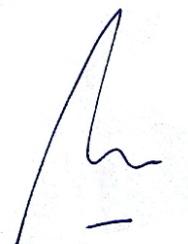
Vu le directeur de thèse


K. W. A. R.

Vu le co-directeur de thèse


17/09/2018
B. Arcaute

Vu, le Président du Jury



le 17/09/18

Bibliographie

1. Bosredon M. «L'objectif final de la bio-impression, c'est la greffe chirurgicale» [Internet]. 20 Minutes. 2014 [cité 22 févr 2018]. Disponible sur: <https://www.20minutes.fr/bordeaux/1259135-20131204-20131204-l-objectif-final-bio-impression-greffe-chirurgicale>
2. Jeannin V. 3M LAVA-COS. Le Fil Dentaire. mai 2011;(63):38–42.
3. 3M. 3M True Definition Scanner : L'expertise du soin oral version numérique [Internet]. 3M. [cité 4 avr 2018]. Disponible sur: http://solutions.3msuisse.ch/3MContentRetrievalAPI/BlobServlet?lmd=1406015139000&locale=fr_FR&assetType=MMM_Image&assetId=1361808249127&blobAttribute=ImageFile
4. 3Shape - Corporate Website [Internet]. 3shape. [cité 4 avr 2018]. Disponible sur: <https://www.3shape.com:443/fr-fr>
5. Yares E. 50 Years of CAD [Internet]. Design World. 2013 [cité 24 nov 2017]. Disponible sur: <http://www.designworldonline.com/50-years-of-cad/>
6. Alexander DC. A Conversation with Dianne Rekow [Internet]. Inside Dentistry. [cité 25 nov 2017]. Disponible sur: <https://www.aegisdentalnetwork.com/id/2012/10/a-conversation-with-dianne-rekow-dds-phd>
7. Tsotsos S. A Historical Perspective Of Tooth Preparation For CEREC Technology [Internet]. Oral Health Group. 2009 [cité 25 nov 2017]. Disponible sur: <https://www.oralhealthgroup.com/features/a-historical-perspective-of-tooth-preparation-for-cerec-technology/>
8. Mazda J. A Lasting Impression : Major developments occurring in scanning technology. IDT, Inside Dental Technology [Internet]. juill 2016 [cité 23 mars 2018];7(7). Disponible sur: <https://www.aegisdentalnetwork.com/idt/2016/07/a-lasting-impression>
9. A Toulouse, trois enfants opérés du coeur grâce à la 3D [Internet]. L'Express.fr. 2015 [cité 20 févr 2018]. Disponible sur: https://www.lexpress.fr/actualite/societe/sante/a-toulouse-trois-enfants-operes-du-coeur-grace-a-la-3d_1742976.html
10. Imburgia M, Logozzo S, Hauschild U, Veronesi G, Mangano C, Mangano FG. Accuracy of four intraoral scanners in oral implantology: a comparative in vitro study. BMC Oral Health. 2 juin 2017;17:92.
11. Advanced Imaging and Modeling | Jump Simulation [Internet]. Jump simulation. [cité 22 févr 2018]. Disponible sur: <http://www.jumpsimulation.org/research-innovation/innovation/advanced-imaging-and-modeling>
12. Yin L, Song XF, Song YL, Huang T, Li J. An overview of in vitro abrasive finishing & CAD/CAM of bioceramics in restorative dentistry. International Journal of Machine Tools and Manufacture. juill 2006;46(9):1013-26.

13. Landerwerlin O. Apports de la CFAO Dentaire [Internet]. LEFILDENTAIRE magazine dentaire. 2015 [cité 29 nov 2017]. Disponible sur: <https://www.lefildentaire.com/articles/analyse/materiel/apports-de-la-cfao-dentaire/>
14. Berruet J-L. Après l'IDS 2017 et avant l'IDS 2019 : un état de l'art sur l'empreinte optique. Dental Tribune version française. nov 2017;24-7.
15. Coquart J. ART BioPrint : imprimer le vivant. Science&Santé, le magazine de l'INSERM. déc 2017;(38):36-9.
16. Patrick. AutoCAD, petite histoire d'un grand succès [Internet]. Blog CAO. 1989 [cité 25 nov 2017]. Disponible sur: <http://www.blog-cao.com/article/histoire/autocad-petite-histoire-dun-grand-succes/>
17. Autodesk. In: Wikipédia [Internet]. 2017 [cité 25 nov 2017]. Disponible sur: <https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Autodesk&oldid=141680919>
18. Inc B. BIOLASE Announces Memorandum Of Understanding With S-Ray To Market, Sell Disruptive Radiation-Free Dental Imaging Device [Internet]. CISION PR Newswire. 2018 [cité 23 mars 2018]. Disponible sur: <https://www.prnewswire.com/news-releases/biolase-announces-memorandum-of-understanding-with-s-ray-to-market-sell-disruptive-radiation-free-dental-imaging-device-300604746.html>
19. Parsons JT, Stulen FL. Brevet US2820187 - Motor controlled apparatus for positioning machine tool - Google Brevets [Internet]. Google Brevets. [cité 24 nov 2017]. Disponible sur: <https://www.google.com/patents/US2820187>
20. Witte DR. Cad-Cam at Bendix Kansas City: The Bicam System [Internet]. Bendix Corp., Kansas City, MO (USA); 1983 avr [cité 24 nov 2017]. Report No.: BDX-613-2887R; CONF-830473-1. Disponible sur: <https://www.osti.gov/scitech/biblio/6256161-cad-cam-bendix-kansas-city-bicam-system>
21. Niedercorn F. CAO : l'entrée de Dassault Systèmes chez Renault fragilise Matra Datavision [Internet]. lesechos.fr. [cité 24 nov 2017]. Disponible sur: https://www.lesechos.fr/17/02/1998/LesEchos/17587-044-ECH_cao---l-entree-de-dassault-systemes-chez-renault-fragilise-matra-datavision.htm
22. GUSQ. Cao un historique [Internet]. Logiciels présenté à; 08:41:22 UTC [cité 24 nov 2017]. Disponible sur: <https://fr.slideshare.net/pdutr/cao-un-historique>
23. CATIA. In: Wikipédia [Internet]. 2017 [cité 24 nov 2017]. Disponible sur: <https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=CATIA&oldid=141730780>
24. SIRONA. CEREC : une fiabilité clinique bien établie [Internet]. 2013 [cité 24 déc 2017]. Disponible sur: <https://www.henryschein-materiel.fr/wp-content/uploads/2015/11/CEREC-VOICI-LES-FAITS-A-VOUS-DE-JUGER.pdf>

25. Arcaute B, Nasr K. CFAO au cabinet dentaire : le matériel disponible en 2017 [Internet]. LEFILDENTAIRE magazine dentaire. 2017 [cité 1 déc 2017]. Disponible sur: <https://www.lefildentaire.com/articles/clinique/esthetique/cfao-au-cabinet-dentaire-le-materiel-disponible-en-2017/>
26. Mangin P. CFAO AU CABINET DENTAIRE: QUELLE EST LA BONNE STRATEGIE ? [Internet]. L'Expert du Dentaire. 2017 [cité 6 janv 2018]. Disponible sur: <http://lexpertdudentaire.com/cfao-cabinet-dentaire-bonne-strategie/>
27. Malau C. CFAO et céramo-céramiques usinables : mise en oeuvre clinique [Internet]. [BREST]: UFR d'odontologie; 2015 [cité 24 nov 2017]. Disponible sur: <https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-01272695/document>
28. Duret F, Duret B, Pelissier B. CFAO Histoire vécue. L'information dentaire [Internet]. 5 sept 2007 [cité 25 nov 2017];89(29). Disponible sur: <http://francoisduret.com/Accueil/media/download/Publication/258-FD%202007%20-%20Information%20dentaire%20n29.pdf>
29. Chronologie FAO [Internet]. [cité 24 nov 2017]. Disponible sur: <http://5axes.free.fr/chronologie.html>
30. ClearView SCAN/R [Internet]. S-ray the Ultrasound Solution. [cité 23 mars 2018]. Disponible sur: <https://www.srayinc.com/product>
31. Rohde J. Closed Vs. Open CAD/CAM – Selecting a Winner [Internet]. dentalcompare. 2014 [cité 29 nov 2017]. Disponible sur: <https://www.dentalcompare.com/Blog/168897-Closed-Vs-Open-CAD-CAM-Selecting-a-Winner/>
32. Jablow M. Closed, open, and selectively open CAD/CAM architecture: what does it mean? [Internet]. Dentistry iQ. 2010 [cité 29 nov 2017]. Disponible sur: <http://www.dentistryiq.com/articles/2010/10/closed-open-and-selectively-open-cad-cam-architecture-what-does-it-mean.html>
33. CODEREAL 3D - Analyse de qualité, déformation et contrôle d'amincissement [Internet]. [cité 20 févr 2018]. Disponible sur: <https://www.codereal3d.fr/pages/fr/menu2/mesure-optique-sans-contact/analyse-de-qualite--deformation-et-controle-d-amincissement-93.html>
34. CHU de Toulouse. Communiqué de presse du CHU de Toulouse : Première européenne dans le traitement de malformations cardiaques chez l'enfant au CHU de Toulouse [Internet]. 2015 [cité 22 févr 2018]. Disponible sur: http://www.chu-toulouse.fr/IMG/pdf/20151201_cp_chu_toulouse_premiere_europeenne_traitement_malformations_cardiaques_enfants.pdf
35. Aeran H, Kumar V, Seth J, Sharma A. Computer Aided Designing-Computer Aided Milling in Prosthodontics: A Promising Technology for Future. IJSS Case Report & Reviews. 2014;1(1):23–27.
36. Rekow D. Computer-aided design and manufacturing in dentistry: a review of the state of the art. The Journal of prosthetic dentistry. 1987;58(4):512–516.

37. MATRA DATAVISION. Conception et fabrication de prothèses dentaires par ordinateur: une première mondiale avec le système de CFAO EUCLID. 1985.
38. Condor Intra-oral Scanner. Decisively different. [Internet]. [cité 4 avr 2018]. Disponible sur: <http://www.condorscan.com/>
39. V. O. Condor Scan Vidéo réalisée à l'ADF 2015 [Internet]. [cité 4 avr 2018]. Disponible sur: https://www.youtube.com/watch?v=W1k_QtisGQE&feature=youtu.be
40. Taleb-Ahmed A, Devieubourg L. Cours de vision industrielle - Contrôle qualité par camera linéaire. J3eA. 2005;4:18.
41. DAC-1. In: Wikipedia [Internet]. 2017 [cité 24 nov 2017]. Disponible sur: <https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=DAC-1&oldid=801756034>
42. Dassault Systèmes. In: Wikipédia [Internet]. 2017 [cité 24 nov 2017]. Disponible sur: https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Dassault_Syst%C3%A8mes&oldid=142713899
43. Garé B. DASSAULT SYSTEMES: L'histoire d'une réussite unique [Internet]. L'1FO. [cité 24 nov 2017]. Disponible sur: <https://www.linformaticien.com/dossiers/les-saga-de-lit/id/20905/dassault-systemes-l-histoire-d-une-reussite-unique.aspx>
44. Rekow D. Dental CAD/CAM systems, a 20-year success story. JADA [Internet]. sept 2006 [cité 25 nov 2017];137. Disponible sur: <https://pdfs.semanticscholar.org/ed9a/ab8451246c88dd9d2fff55f77f976fd9650f.pdf>
45. Dental Wings. Dental Wings Lasermill [Internet]. 2015 [cité 25 mars 2018]. Disponible sur: <https://www.youtube.com/watch?v=4SCzwOdg4mc>
46. Dental Wings. Dental Wings Lasermill - Interview by Newcom Business Media at JDIQ Montréal, 2017 [Internet]. 2017 [cité 25 mars 2018]. Disponible sur: https://www.youtube.com/watch?v=pE3B_dp6v6c
47. Cazier S, Moussally C. Descriptif des différents systèmes d'empreinte optique. Rev Odont Stomat [Internet]. mai 2013 [cité 1 déc 2017];42(2). Disponible sur: <http://www.sop.asso.fr/ros/revue-odonto-stomatologique/ROS0000336>
48. Duret F, Pélissier B. Différentes méthodes d'empreinte en CFAO dentaire. <https://www-em--premium-com.docadis.ups-tlse.fr/data/traites/mb/28-38844/> [Internet]. 23 déc 2016 [cité 30 déc 2017]; Disponible sur: <https://www-em--premium-com.docadis.ups-tlse.fr/article/1098196/resultatrecherche/1>
49. NewsChannel 5. Digital Dentistry: S-RAY to Replace X-Ray [Internet]. [cité 23 mars 2018]. Disponible sur: <https://www.youtube.com/watch?v=4rRLV0foNK4>
50. Preveraud J-F. Disparition de l'un des pères de la CAO française [Internet]. Industrie & Technologies. [cité 24 nov 2017]. Disponible sur: <https://www.industrie-techno.com/disparition-de-l-un-des-peres-de-la-cao-francaise.13824>
51. DWOS Chairside CAD [Internet]. Dental Wings. [cité 10 janv 2018]. Disponible sur: <http://www.dentalwings.com/fr/produits/logiciels/chairside/>

52. Schaefer O, Kuepper H, Thompson GA, Cachovan G, Hefti AF, Guentsch A. Effect of CNC-milling on the marginal and internal fit of dental ceramics: A pilot study. *Dental Materials*. août 2013;29(8):851-8.
53. Duret F. Empreinte optique. [Lyon]: Claude Bernard; 1974.
54. Landerwerlin O, Berruet J-L. Empreinte optique et CFAO dentaire à l'IDS 2015 | *Dental Tribune International* [Internet]. *Dental Tribune*. 2015 [cité 28 nov 2017]. Disponible sur: http://www.dental-tribune.com/articles/specialities/general_dentistry/24397_empreinte_optique_et_cfao_dentaire_a_lids_2015.html
55. LLC R. Euclid (computer program) [Internet]. *Revolvy*. [cité 24 nov 2017]. Disponible sur: https://www.revolvy.com/main/index.php?s=Euclid+%28computer+program%29&item_type=topic
56. Euclid (computer program). In: *Wikipedia* [Internet]. [cité 24 nov 2017]. Disponible sur: [https://en.wikipedia.org/wiki/Euclid_\(computer_program\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Euclid_(computer_program))
57. VintageCG. Evans & Sutherland « The Tactical Edge » Part 1 of 2 [Internet]. [cité 24 nov 2017]. Disponible sur: <https://www.youtube.com/watch?v=06mbwNg1Vw4>
58. AnalogSynthMuseum. Evans & Sutherland First Flight Simulation CG 1972 [Internet]. [cité 24 nov 2017]. Disponible sur: <https://www.youtube.com/watch?v=iMpQuclk2vg>
59. Giacobbi T. Exclusive Preview : E4D CAD/CAM Restorative System [Internet]. *Dentaltown*. 2006 [cité 15 févr 2018]. Disponible sur: <http://www.dentaltown.com/Images/Dentaltown/magimages/jan06/DTJan06pg62.pdf>
60. Duret F. FDuret- Accueil [Internet]. [cité 25 nov 2017]. Disponible sur: <http://francoisduret.com/Accueil/>
61. Duret F. Histoire et résumé sur ma thèse « empreinte optique » [Internet]. François Duret. 2010 [cité 27 févr 2018]. Disponible sur: <http://www.francoisduret.com/Accueil/media/download/Documents/document%2010.pdf>
62. History — *FreeCAD Documentation* [Internet]. *FreeCAD*. [cité 25 nov 2017]. Disponible sur: <https://www.freecadweb.org/wiki/History>
63. Landwerlin ADO. IDS 2013—Les nouveautés en CAD/CAM et imagerie 3D pour le cabinet dentaire. *CAD/CAM*. 2013;3(2):16–20.
64. PCD. Interview du Dr François Duret [Internet]. Pr. François Duret. 2003 [cité 18 janv 2018]. Disponible sur: <http://francoisduret.com/Accueil/media/download/Publication/231-FD%202003%20-%20Interview%20FD%20-%20Profession%20Chirurgien%20Dentiste.pdf>
65. Voco. IO-Scan : subgingival intraoral 3D scanner [Internet]. *VOCO The dentalists*. [cité 20 mars 2018]. Disponible sur: <http://www.voco.com/us/product/io-scan/VC-84-009985-GB.pdf>

66. bigkif. Ivan Sutherland : Sketchpad Demo (1/2) [Internet]. [cité 22 nov 2017]. Disponible sur: https://www.youtube.com/watch?v=USyoT_Ha_bA
67. bigkif. Ivan Sutherland : Sketchpad Demo (2/2) [Internet]. [cité 22 nov 2017]. Disponible sur: <https://www.youtube.com/watch?v=BKM3CmRqK2o>
68. Dassault Aviation. L'histoire de Dassault Aviation, de 1965 à 1986 [Internet]. Dassault Aviation, acteur majeur de l'aéronautique. [cité 24 nov 2017]. Disponible sur: <https://www.dassault-aviation.com/fr/passion/histoire/de-1916-a-nos-jours/1965-1986/>
69. Bie C. L'EMPREINTE OPTIQUE AU CABINET DENTAIRE [Internet]. UNIVERSITE TOULOUSE III; 2015 [cité 29 nov 2017]. Disponible sur: <http://thesesante.ups-tlse.fr/984/1/2015tou33069.pdf>
70. Soenen A, Le Gac O, Sireix C. L'empreinte optique intra-buccale au service de la CFAO semi-directe en clinique [Internet]. LEFILDENTAIRE magazine dentaire. 2014 [cité 20 déc 2017]. Disponible sur: <https://www.lefildentaire.com/articles/clinique/esthetique/empreinte-optique-intra-buccale-au-service-de-la-cfao-semi-directe-en-clinique/>
71. Le Chaffotec W, Denis C. La chaîne numérique en implantologie : exemple du système Sirona en cabinet d'omnipratique. [Rennes]: UFR d'odontologie de Rennes 1; 2016.
72. BERMES-KLAINE R. La fabrication assistée par ordinateur en prothèse. [Nancy]: université Henri Poincare Nancy I; 2013.
73. La société | AnatomikModeling [Internet]. Anatomik Modeling 3D custom-made implants. [cité 20 févr 2018]. Disponible sur: <http://www.anatomikmodeling.com/fr/la-societe>
74. Lasermill System [Internet]. Dental Wings. [cité 17 janv 2018]. Disponible sur: <http://www.dentalwings.com/products/laser-milling-system/>
75. Henry Schein. Lava Precision Solutions : Scanner intra-oral Lava C.O.S. L'empreinte numérique au cabinet dentaire [Internet]. Henry Schein. [cité 4 avr 2018]. Disponible sur: https://www.henryschein.be/be-fr/images/dental/OUTLET_LavaCOS_FR.pdf
76. CNIF. Le guide de la CFAO [Internet]. CNIF (Centre National d'Innovation et de Formation des Prothésistes Dentaires. [cité 30 nov 2017]. Disponible sur: http://www.unppd.org/cnifpd/Guide_CFAO.pdf
77. Galibourg A. Le Numérique en Prothèse Fixée. 2016.
78. Bertrand C, Romieu G, Taouss B. Le système PROCERA: quèsaco? Le fil dentaire. mai 2011;(63):50-5.
79. Cruces A. Les articulateurs virtuels [Internet]. [Lille]: Université du droit et de la Santé Lille 2 faculté de chirurgie dentaire; 2016 [cité 26 mars 2018]. Disponible sur: <http://docplayer.fr/70674442-Universite-du-droit-et-de-la-sante-de-lille-2-faculte-de-chirurgie-dentaire-annee-de-soutenance-2016-n-these-pour-le.html>

80. Pelissier B. Matériaux et CFAO dentaire. Le fil dentaire. mars 2010;(51):58-62.
81. Medentic [Internet]. Science. Simple. [cité 23 mars 2018]. Disponible sur: <http://www.medentic.de/>
82. Numérisation avec CEREC | Dentsply Sirona [Internet]. [cité 31 janv 2018]. Disponible sur: <https://www1.dentsplysirona.com/fr-fr/produits/cad-cam/cad-cam-au-fauteuil/numerisation-avec-cerec.html>
83. Paul de Faget de Casteljau. In: Wikipédia [Internet]. 2017 [cité 24 nov 2017]. Disponible sur: https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Paul_de_Faget_de_Casteljau&oldid=138507492
84. Petit historique de l'impression 3D [Internet]. Serial Makers. 2013 [cité 27 déc 2017]. Disponible sur: <http://serialmakers.com/petit-historique-de-limpression-3d/>
85. Pierre Bézier. In: Wikipédia [Internet]. 2017 [cité 24 nov 2017]. Disponible sur: https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Pierre_B%C3%A9zier&oldid=142671511
86. Place de la CFAO directe dans la dentisterie moderne [Internet]. LEFILDENTAIRE magazine dentaire. 2010 [cité 20 déc 2017]. Disponible sur: <https://www.lefildentaire.com/articles/clinique/esthetique/place-de-la-cfao-directe-dans-la-dentisterie-moderne/>
87. Planmeca. Planmeca Romexis combine imagerie, CAD/CAM et units dentaires [Internet]. Dental Tribune. 2014 [cité 10 janv 2018]. Disponible sur: <https://fr.dental-tribune.com/news/planmeca-romexis-combine-imagerie-cadcam-et-units-dentaires/>
88. prepCheck | Dentsply Sirona [Internet]. Dentsply Sirona. [cité 2 mars 2018]. Disponible sur: <https://www.dentsplysirona.com/en/products/cad-cam/dental-practice/prepcheck.html>
89. Giraudeau N, Valcarcel J, Tassery H, Levallois B, Cuisinier F, Tramini P, et al. Projet e-DENT : téléconsultation bucco-dentaire en EHPAD. European Research in Telemedicine / La Recherche Européenne en Télémédecine. juin 2014;3(2):51-6.
90. PTC Creo. In: Wikipédia [Internet]. 2017 [cité 25 nov 2017]. Disponible sur: https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=PTC_Creo&oldid=142486536
91. Hsuan. Review of Intraoral Scanners at IDS 2017 [Internet]. CEREC Digest. 2017 [cité 2 févr 2018]. Disponible sur: <http://www.cerecdigest.net/2017/04/14/ids-2017-intraoral-scanners-review-revised/>
92. Samari A. SANTÉ Une expérimentation de télé-dentisterie en Languedoc-Roussillon [Internet]. Objectif Gard. 2014 [cité 26 mars 2018]. Disponible sur: <http://www.objectifgard.com/2014/07/06/sante-une-experimentation-de-tele-dentisterie-en-languedoc-roussillon/>
93. Schütz Dental GmbH. Schütz Dental zebris Jaw Motion Analysis - english version [Internet]. [cité 26 mars 2018]. Disponible sur: <https://www.youtube.com/watch?v=MX4rDDFkVhc>

94. Cantayre G, Nasr K. Sept caméras d'empreintes optiques intra-orales au banc d'essai [Internet]. LE FIL DENTAIRE magazine dentaire. 2018 [cité 26 févr 2018]. Disponible sur: <https://www.lefildentaire.com/articles/analyse/materiel/sept-cameras-d-empreintes-optiques-intra-orales-au-banc-d-essai/>
95. Zebris. Simple and precise - the zebris JMAlyser jaw registration system [Internet]. 2016 [cité 27 mars 2018]. Disponible sur: https://www.zebris.de/fileadmin/Editoren/zebris-PDF/zebris-Prospekte-EN/27_9_JMA_EN_150.pdf
96. Dentsply Sirona. Sirona CEREC SW 4.0. Complete Demonstration. [Internet]. [cité 4 avr 2018]. Disponible sur: <https://www.youtube.com/watch?v=l13iu363eEI&feature=youtu.be>
97. Sutherland IE. SKETCHPAD, A MAN-MACHINE GRAPHICAL COMMUNICATION SYSTEM. [Californie]: Massachusetts Institute of Californie; 1963.
98. SME. SME - The Father of the Second Industrial Revolution [Internet]. [cité 24 nov 2017]. Disponible sur: <http://www.sme.org/Tertiary.aspx?id=36002>
99. SolidWorks. In: Wikipédia [Internet]. 2017 [cité 25 nov 2017]. Disponible sur: <https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=SolidWorks&oldid=139225512>
100. SOPROCARE [Internet]. Acteon. [cité 27 mars 2018]. Disponible sur: <https://www.acteongroup.com/fr/mes-produits/imagerie/outils-de-diagnostic/soprocare>
101. The CAD/CAM Hall of Fame [Internet]. American Machinist. 1998 [cité 24 nov 2017]. Disponible sur: <http://www.americanmachinist.com/cadcam-software/cadcam-hall-fame>
102. The CAD/CAM Hall Of Fame [Internet]. Machine Design. 1999 [cité 24 nov 2017]. Disponible sur: <http://www.machinedesign.com/archive/cadcam-hall-fame>
103. Weisberg DE. The Engineering Design Revolution Chapitre 6 : First Commercial CAD System.pdf [Internet]. [cité 24 nov 2017]. Disponible sur: <http://www.cadhistory.net/06%20First%20Commercial%20CAD%20System.pdf>
104. Weisberg DE. The Engineering Design Revolution Chapitre 13 : IBM, Lockheed and Dassault.pdf [Internet]. [cité 24 nov 2017]. Disponible sur: <http://cadhistory.net/13%20IBM,%20Lockheed%20and%20Dassault.pdf>
105. Weisberg DE. The Engineering Design Revolution Chapitre 15 : Patrick Hanratty and MCS [Internet]. [cité 24 nov 2017]. Disponible sur: <http://cadhistory.net/15%20Patrick%20Hanratty%20and%20MCS.pdf>
106. Weisberg DE. The Engineering Design Revolution Chapitre 19 : Siemens PLM Software.pdf [Internet]. [cité 24 nov 2017]. Disponible sur: <http://cadhistory.net/19%20Siemens%20PLM%20Software.pdf>
107. Mörmann WH. The evolution of the CEREC system. The Journal of the American Dental Association. 1 sept 2006;137:7S-13S.

108. Davidowitz G, Kotick PG. The Use of CAD/CAM in Dentistry. *Dental Clinics of North America*. juill 2011;55(3):559-70.
109. Callan RS, Haywood VB, Cooper JR, Furness AR, Looney SW. The validity of using E4D Compare's "% comparison" to assess crown preparations in preclinical dental education. *Journal of dental education*. 2015;79(12):1445–1451.
110. Total Cost of Ownership [Internet]. E4D Technologies. [cité 26 févr 2018]. Disponible sur: <https://e4d.com/tco/>
111. Colin B. Toulouse: Création de la première prothèse trachéo-bronchique 3D conçue sur mesure [Internet]. [cité 20 févr 2018]. Disponible sur: <https://www.20minutes.fr/toulouse/2018647-20170222-toulouse-creation-premiere-prothese-tracheo-bronchique-3d-concue-mesure>
112. Guibert N, Didier A, Moreno B, Mhanna L, Brouchet L, Plat G, et al. Treatment of Post-transplant Complex Airway Stenosis with a Three-Dimensional, Computer-assisted Customized Airway Stent. *American Journal of Respiratory and Critical Care Medicine*. avr 2017;195(7):e31-3.
113. Abduo J, Lyons K, Bennamoun M. Trends in Computer-Aided Manufacturing in Prosthodontics: A Review of the Available Streams. *Int J Dent* [Internet]. 2014 [cité 24 déc 2017];2014. Disponible sur: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4000974/>
114. Un cœur imprimé en 3D qui sauve des bébés [Internet]. Makery. [cité 20 févr 2018]. Disponible sur: <http://www.makery.info/2014/12/02/un-coeur-imprime-en-3d-qui-sauve-des-bebes/>
115. Duret F. Un peu d'histoire... avant de parler d'aujourd'hui et de demain [Internet]. LE FIL DENTAIRE magazine dentaire. 2010 [cité 15 nov 2017]. Disponible sur: <https://www.lefildentaire.com/articles/pratique/technofil/un-peu-dhistoire-avant-de-parler-daujourd'hui-et-de-demain/>

Table des figures

Figure 1 : schéma de la chaîne de CFAO complète par François Duret dans sa thèse "l'empreinte optique" en 1974, page 73 [53].....	22
Figure 2 : Le Dr Werner Mörmann (à gauche) et Marco Brandestini (à droite) avec le CEREC 1 (the "lemon"), en 1985 [107].....	24
Figure 3 : Frise chronologique des grands événements de la CFAO. En bleu : secteur industriel ; en orange : secteur dentaire.....	32
Figure 4 : TRIOS Cart de 3Shape, système en chariot avec écran tactile [4].....	40
Figure 5 : CEREC Omnicam de Sirona, système en chariot avec track-ball [82].....	40
Figure 6 : CondorScan : caméra branchée par USB sur un PC portable [38].....	40
Figure 7 : Représentation 3D par maillage sur le logiciel Euclid, utilisé par François Duret en 1983 [60].....	42
Figure 8 : Représentation 3D par maillage sur le logiciel Euclid, utilisé par François Duret en 1983 [60].....	42
Figure 9 : Représentation 3D sur le logiciel du système CEREC en 2012 [96].....	42
Figure 10 : Représentation 3D sur le logiciel du système Condorscan en 2015 [39].....	42
Figure 11 : Schéma du fonctionnement de la technique par stéréolithographie [113].....	46
Figure 12 : Schéma du fonctionnement de la technique par micro fusion laser [113].....	47
Figure 13 : Schéma du fonctionnement de la technique par impression 3D [113].....	48
Figure 14 : la chaîne de CFAO pour les cas simples, imaginée par François Duret en 2003 [64].....	60
Figure 15 : la chaîne de CFAO pour les cas complexes, imaginée par François Duret en 2003 [64].....	61
Figure 16 : porte empreinte ClearView SCAN/R de S-Ray [47].....	65
Figure 17 : prototype iTray de Medentic : porte-empreinte optique d'arcade complète [81]	66
Figure 18 : Usineuse laser : Lasermill de Dental Wings [49].....	67
Figure 19 : Système Jaw Motion Analyser de Zebris [95].....	68

Tableaux

Tableau 1: Les systèmes d'empreintes optiques actuellement sur le marché.....	52
Tableau 2: Les logiciels de CAO.....	54
Tableau 3: Indications des systèmes de FAO. + : technique peu adaptée ; ++ : technique bien adaptée ; +++ : technique très bien adaptée.....	55

**ACQUISITION NUMÉRIQUE, CFAO DENTAIRE : ORIGINES,
ÉVOLUTIONS ET PERSPECTIVES**

RÉSUMÉ EN FRANÇAIS:

Le numérique étant de plus en plus présent dans notre pratique, nous avons voulu étudier l'histoire de la CFAO depuis ses débuts dans l'industrie pour mieux comprendre son évolution dans notre domaine et les perspectives possibles pour l'avenir. Ce travail traite de l'histoire de la CFAO dans l'industrie puis de son apparition dans notre domaine. Il décrit ensuite les différentes techniques d'acquisition numérique, de CAO et de FAO. Cela nous a permis de présenter les différents systèmes numériques actuels à l'aide de tableaux récapitulatifs. Ce travail explore les perspectives possibles en mettant en relation les idées de François Duret lors de sa thèse et les innovations actuellement en cours de développement, aussi bien dans notre domaine que dans les autres.

TITRE EN ANGLAIS : Digital Dental CAD CAM : origins, evolutions and future prospects

DISCIPLINE ADMINISTRATIVE : Chirurgie Dentaire

MOTS-CLÉS: CFAO, empreinte optique, histoire, acquisition numérique, évolution, perspective, scanner intra-oral

INTITULÉ ET ADRESSE DE L'UFR OU DU LABORATOIRE :

Université Toulouse III-Paul Sabatier
Faculté de chirurgie dentaire
3 chemin des Maraichers
31062 Toulouse Cedex 9

DIRECTEURS DE THÈSE : Docteur Karim NASR et Docteur Bertrand ARCAUTE