

DOSSIER



SECTEUR DENTAIRE : L'ÈRE DU NUMÉRIQUE

- Conception et Fabrication Assistées par Ordinateur (CFAO) et impression 3D s'installent progressivement dans les labos et les cabinets dentaires.

Prothèses, bridges, couronnes, gouttières... Les fabricants rivalisent d'innovation pour se faire une place sur un marché prometteur.

À terme, peut-être de véritables dents artificielles, mais du point de vue du patient, c'est surtout une réduction des coûts grâce à l'automatisation, que l'on attend.

Florent BELLOUARD

PROTHÈSES DENTAIRES : DE L'ARTISANAT À LA SCIENCE

La Conception et Fabrication Assistées par Ordinateur (CFAO) qui permet d'imprimer une prothèse dentaire en 3D a été inventée par un Français : **François Duret**. Récit d'une aventure scientifique et industrielle qui a commencé il y a un peu plus de 40 ans.

« L'invention scientifique réside dans la création d'une hypothèse heureuse et féconde ; elle est donnée par le génie même du savant qui l'a créée. » Cette citation de l'illustre médecin français Claude Bernard, considéré comme le fondateur de la médecine expérimentale, François Duret, l'inventeur français de la **Conception et Fabrication Assistées par Ordinateur (CFAO)** dentaire en 1973, ne la renierait pas. Elle a guidé toute sa carrière de chercheur, du jeune thésard curieux et intuitif au professeur internationalement reconnu. N'est pas Newton qui veut bien sûr, mais force est de constater que le chercheur a très largement contribué à la conception des techniques modernes de fabrication des prothèses dentaires notamment en fabrication additive.

Les prémices

« Au début des années 1970, l'informatique était naissante, les technologies laser faisaient rêver et l'usinage automatique existait dans les grandes usines d'automobile ou d'aviation, se souvient François Duret. Sans que cela soit formalisé, chaque élément du puzzle apparaissait et se développait dans des secteurs parallèles sans jamais se rencontrer. »

En dentisterie, profession médicale relativement empirique, l'idée a commencé à mûrir lentement dans les esprits. Il ne fallait pas simplement énoncer mais prouver cette idée nouvelle car la jeunesse

est toujours un obstacle dans un monde académique. « Il était donc nécessaire de comprendre ce qu'est l'optique tridimensionnelle ou l'informatique capable de numériser notre champ de travail et d'intégrer le savoir-faire du dentiste et du prothésiste si lentement acquis. Il fallait aussi découvrir la robotique et son usinage trop dépendants de matériaux si spécifiques. Enfin, tous les périphériques nécessaires à l'accomplissement de la tâche (articulateurs électroniques, spectrophotomètre...) étaient un domaine encore peu exploré. »

La théorie avance, pas la pratique

Si la CFAO dentaire a bien été inventée en 1970 puis présentée à Lyon en 1973, pendant les 10 ans qui ont précédé cette thèse, de 1963 à 1973, des articles sur des travaux de très haut niveau ont été publiés dans des revues scientifiques. Mais l'or et la céramique dentaire étaient alors les matériaux de référence. Il faudra attendre l'an 2000 pour que la CFAO propose une alternative logique à ces matériaux traditionnels !

Il existait pourtant deux exceptions à cette situation trop tournée vers le passé : la biologie (on parlait de biologie matière fondamentale) et surtout l'orthopédie dento-faciale (ODF). Ces deux disciplines, apparaissaient comme pratiquant des sciences très en avance, presque « mathéma- >>>

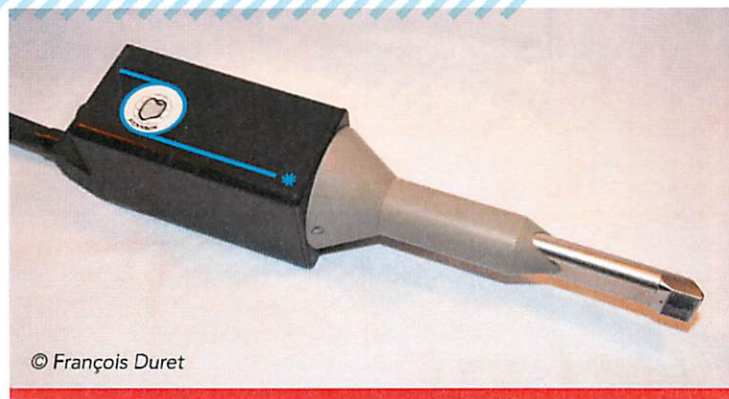
>>> allait même pouvoir choisir la teinte sous-jacente à la céramisation dans les bridges complets. Toutes les sociétés ont donc intégré à leur catalogue l'usinage d'une zircone « maison » et n'ont fait que développer des méthodes d'usinage de plus en plus sophistiquées. **D'une machine outils 3 axes en 1985, on est passé aux 4 axes puis aux 5 axes (7).** Les broches d'usinage sont devenues extrêmement puissantes et les axes de déplacement précis à 5 micromètres (μm) près. Les centres d'usinage, comme on appelle ce type de machine, ont remplacé les petites machines-outils à commande numérique des années 90. Ceci a eu une deuxième répercussion : les centres de fabrication de prothèses se sont multipliés.

« Ceci n'a pas eu que du bon car, forts de cette transmission des prises d'empreintes optiques (numérisées) par Internet, de grands laboratoires, véritables villes de plus de 2 000 prothésistes, sont apparus dans les pays d'Asie comme la Chine ou le Vietnam », estime François Duret.

L'arrivée des premiers systèmes ouverts

Cela est évidemment dû sans doute à la recherche du profit, mais surtout à deux éléments informatiques passés inaperçus aux non spécialistes : l'ouverture des systèmes et l'utilisation d'un langage de communication universel comme la Standard Template Library (STL).

« C'est en effet dans les années 2003-2005 que sont apparus les premiers systèmes ouverts, nous devrions dire les premiers composants indépendants. À partir de cette date, il a été possible d'acheter un système complètement fermé mais aussi un scanner d'une marque, une



© François Duret

- 1985 : caméra intra-orale de première génération -

CAO d'une autre marque et une machine outils d'une troisième. La seule contrainte était de s'assurer de la parfaite communication (compatibilité) entre les différents éléments de la chaîne » précise François Duret.

Les logiciels ont également évolué en parallèle. Mais, affirme le chercheur, « les logiciels utilisés aujourd'hui avaient déjà été imaginés et conçus par Hennson dès 1987. Certes, la qualité de l'image est meilleure et l'ordinateur plus petit, plus rapide, mais tout y était, y compris, mi-1985, la reconnaissance automatique des crêtes, des lignes de finition ou... **des cuspidés (8)** pour déformer les dents théoriques en mémoire. »

La mise au point de l'empreinte numérique

Dernière étape, la mise au point de l'empreinte numérique, grâce à l'amélioration des caméras intra-orales, a renforcé l'attrait pour la CFAO dans les années 2010. En effet, c'est en 2012, que les premières caméras, permettant d'enregistrer les volumes bucco-dentaires en couleur et sans poudre à appliquer sur les dents, sont arrivées sur le marché.

Ainsi la CFAO remplacera vraisemblablement, assez vite, le

« schéma classique » de réalisation des prothèses : prise d'empreinte à l'aide d'une pâte, élaboration d'un mo-

dèle en plâtre, coulage de la prothèse. De surcroît, de plus en plus de laboratoires industriels, comme Biotech en France, intègrent parfaitement la CFAO à l'impression 3D. Selon François Duret : « à l'heure actuelle, la CFAO dentaire représente un marché de 12 milliards d'euros dans le monde ».

À terme sûrement dix à quinze fois plus. Il faudra néanmoins que la grande majorité des professionnels s'équipent, ce qui prendra un certain temps. Les patients pourront alors recevoir leur prothèse définitive dès la première visite chez leur dentiste et peut-être, on peut toujours rêver, à bon marché.



(6) **Zircone** : la zircone est le nom donné à l'oxyde de zirconium (ZrO_2). Dans la classification des céramiques, c'est une céramique polycristalline c'est-à-dire qu'elle ne contient pas de phase vitreuse. Elle est constituée uniquement de cristaux hautement condensés par frittage. Le frittage est un traitement thermique qui élimine les porosités et condense fortement les particules. Résultat : si le matériau est très dense, il sera très résistant mécaniquement.

(7) **Machine outils 3 axes** : la pièce est fixée au châssis et le portique se déplace sur l'axe X (avant-arrière pour parcourir la table d'usinage). Le portique quant à lui sert de base pour le déplacement sur l'axe Y du porte-broche. Le porte-broche enfin sert de base pour le déplacement sur l'axe Z de la broche. **Machine outils 4 axes** : machine 3 axes dotée d'un plateau tournant (le plus souvent parallèle à l'axe X de la machine). **Machine outils 5 axes** : machine 3 axes dotée d'un plateau tournant (le plus souvent parallèle à l'axe X de la machine) dans les deux sens (horaire et anti-horaire)

(8) **Cuspide** : une cuspide est une éminence dure d'une dent. Chacune des canines possède une seule cuspide, alors que les prémolaires en ont deux chacune. Les molaires possèdent normalement quatre ou cinq cuspidés.



- Caméra intra-orale de dernière génération -



le reproche continuel que l'on faisait à la CFAO dentaire (en dehors de son prix) était qu'elle obligeait à utiliser des matériaux conventionnels peu esthétiques (titane ou composites) ou des céramiques fragilisées par l'usinage »

relle de l'un à l'autre. Au tout début des années 90, un nouveau concept fit son apparition : le développement de centres de production industrielle de prothèses avec le système Procera de Matts Andersson. Tous les systèmes étaient encore « fermés » au sens informatique du terme et cela allait durer jusqu'en 2005.

Trois raisons peuvent expliquer cette situation :

1 - La précision d'un appareil de CFAO passe par le contrôle de chaque étape (empreinte optique, CAO et usinage) mais dans un système naissant, le fait d'utiliser des composants de différentes sources peut nuire au résultat final en rendant toute intervention technique difficile.

2 - Les équipes de développement étaient encore peu nombreuses et les systèmes et langages de communication étaient propres à chaque développeur.

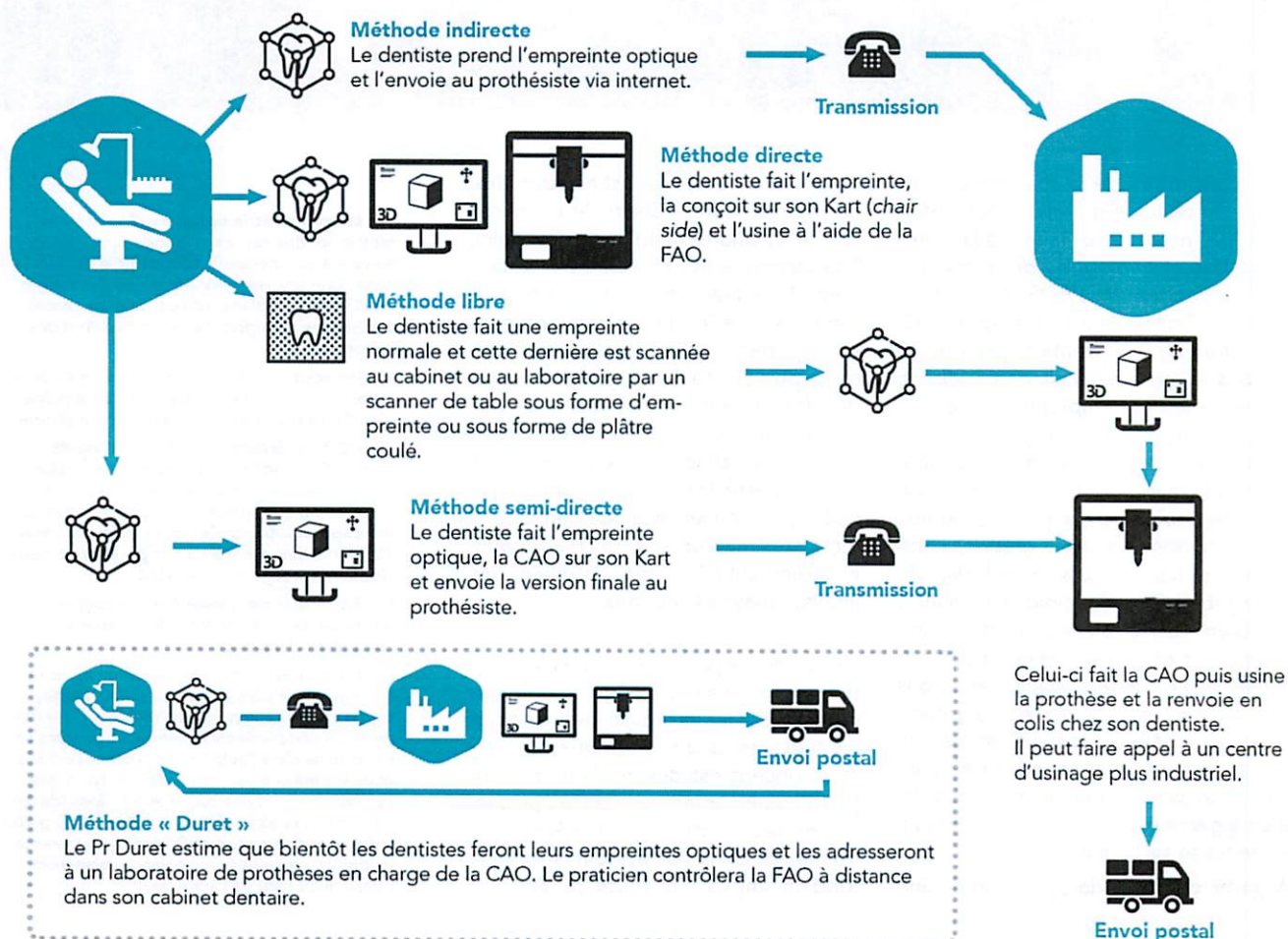
3 - Surtout le retour d'investissements qu'avaient prévus les industriels passait obligatoirement par la vente des matériaux et consommables sur un seul type de machine. La marge sur des machines coûteuses étant faible, chacun entendait se rattraper sur la consommation journalière, ce que limitait le principe du système ouvert.

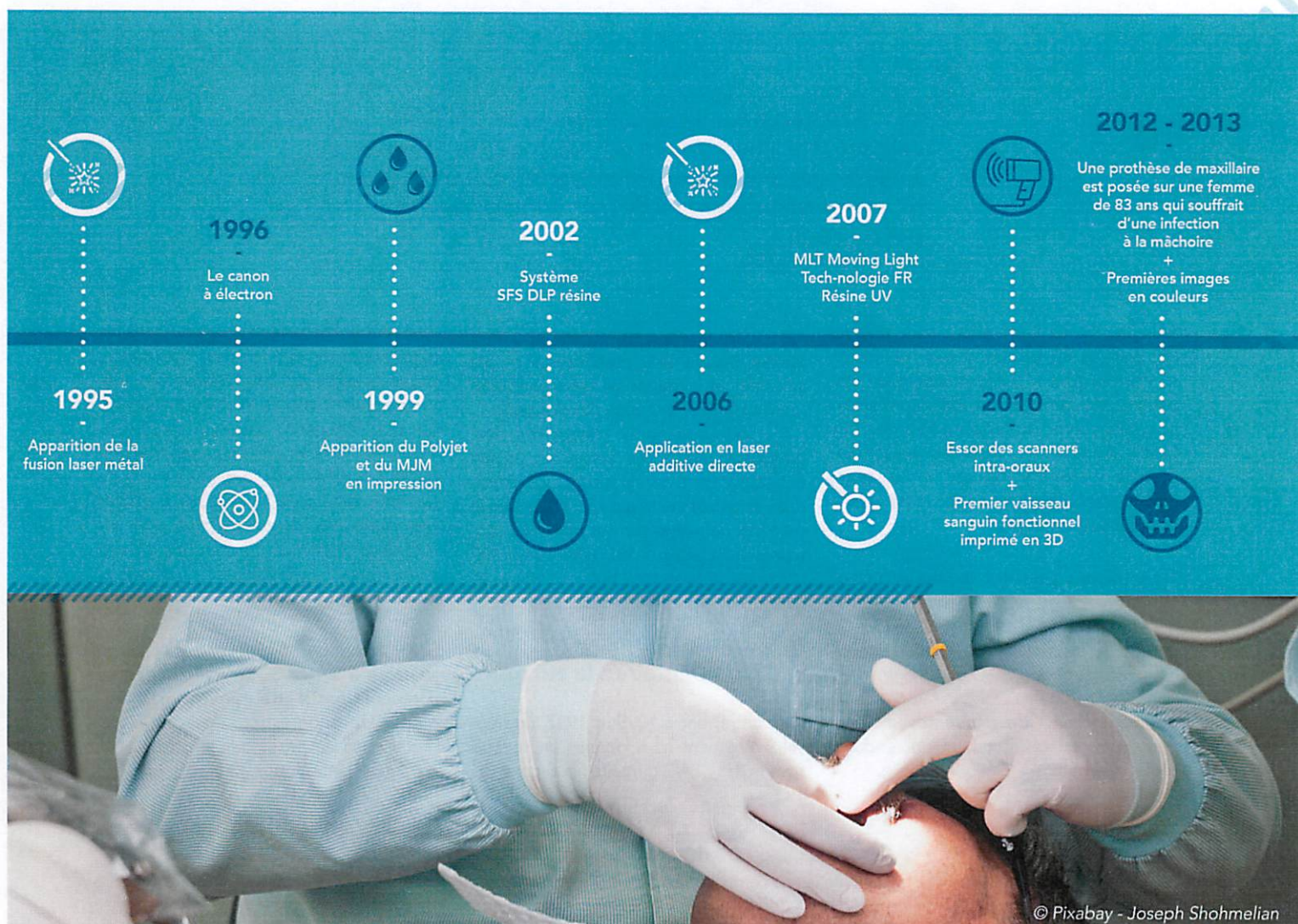
Un second souffle à la CFAO dentaire : la zircone

Par contre, entre 1995 et 1997, un nouvel événement allait donner un second souffle à la CFAO dentaire : la zircone (6).

Rien n'était réellement nouveau dans les applications (inlays, coiffes, couronnes, petits bridges ou facettes) et ces systèmes étaient encore et toujours fermés. Ce qui changeait, c'était le matériau. « En effet, le reproche continuel que l'on faisait à la CFAO dentaire (en dehors de son prix) était qu'elle obligeait à utiliser des matériaux conventionnels peu esthétiques (titane ou composites) ou des céramiques fragilisées par l'usinage », indique François Duret.

Son apparition donna une deuxième jeunesse à la CFAO. Ce matériau ne se contentait pas d'être usinable mais permettait la suppression des armatures métalliques au profit des structures céramiques esthétiques. Bientôt, on >>>





>>> constitutifs de la chaîne n'étaient pas complètement reliés par informatique, mais cette liaison allait être présentée et démontrée deux ans plus tard au congrès de l'ADF (Association Dentaire Française) en novembre 1985. La couronne, une première prémolaire du bas allait être scellée, en direct, un heure après l'empreinte optique... Dans la bouche de mon épouse. Cette "première mondiale" avait été possible grâce à l'équipe de la société Hennson et à une équipe de dentistes généreux de leur temps et de leurs grandes compétences : les docteurs Toubol, Hinault, Georget, Paillet, Sangiolo, Nhamani... et, bien sûr, Fabienne Jordan, Bernard Duret et toute mon équipe. Nous étions alors très en avance et étions prêts à passer à la deuxième phase, celle du développement industriel, grâce au soutien d'un industriel lyonnais courageux Jean-Pierre Hennequin, d'un ingénieur génial Jean-Louis Blouin et de toute son équipe. »

À partir de cette date, et durant une

dizaine d'années, tout est allé très vite. Le premier Cerec (Chairside Economical Restorations of Esthetic Ceramic), The Lemon, a été présenté par le tandem Moerman/Brandestini. Ce système de CFAO a été très rapidement pris en main par le grand groupe Siemens puis Sirona. Deux grands axes de développement se font jour : le tout cabinet ou chair side du Cerec 1 et le mixte cabinet/laboratoire des Français de la société Hennson se sont distingués. Le premier avait des ambitions modestes mais un prix très raisonnable en se limitant à l'intrados (intérieur) des inlays, onlays et facettes (5).

Le deuxième proposait toutes les prothèses de l'inlay au bridge complet en passant par les prothèses adjointes et les traitements d'orthodontie. Ce dernier concept est devenu la norme aujourd'hui. Néanmoins, à cette époque, toutes les solutions proposées fonctionnaient dans des systèmes fermés, rendant impossible toute passe- >>>

(1) **Interférométrie optique (IP)** : l'interférométrie optique est une méthode sans contact servant à caractériser la topographie des surfaces. Une analyse classique donne des images en 2D et en 3D d'une surface, de nombreuses statistiques de rugosité et les dimensions des éléments.

(2) **Intrados** : surface interne d'une prothèse, en rapport avec les tissus d'appui (la cavité préparée). **Extrados** : surface externe de la prothèse

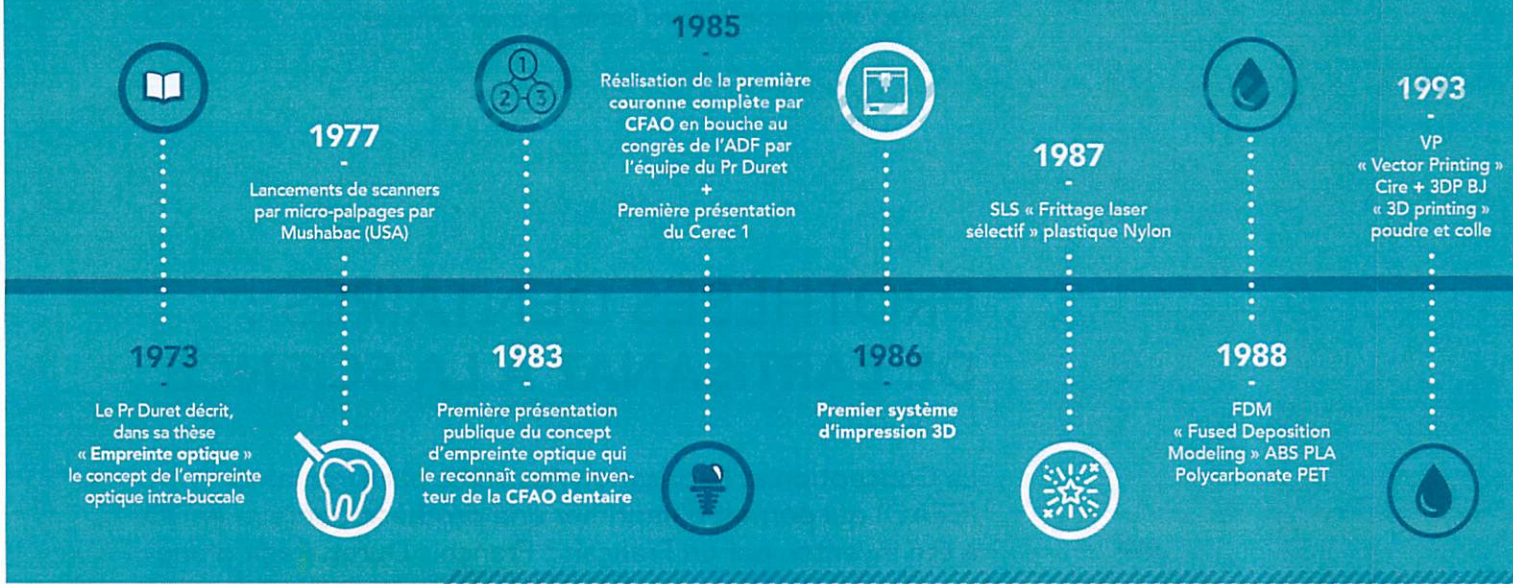
(3) **CCD** : le détecteur CCD, pour l'anglais Charge Coupled Device, assure la conversion d'un signal lumineux en un signal électrique. Cette technique introduite en 1969 par Bell est en usage en astronomie depuis la fin des années 70, fournissant des détecteurs pour les domaines visible, infrarouge et proche UV.

(4) **Entretiens de Garancière** : rencontres annuelles dédiées à la formation continue des chirurgiens-dentistes.

(5) Un **inlay** est une prothèse venant combler la cavité d'une dent cassée ou cariée. L'**onlay** est également une prothèse, mais qui cette fois recouvre une partie de la dent abîmée. Dans un cas comme dans l'autre, cette prothèse est fabriquée sur mesure par un laboratoire spécialisé. Les facettes sont des coquilles très fines (de 0,6 à 0,7 mm d'épaisseur), qui se collent sur la partie visible des dents pour améliorer leur apparence, un peu comme des faux ongles. La plupart du temps, elles sont en céramique.

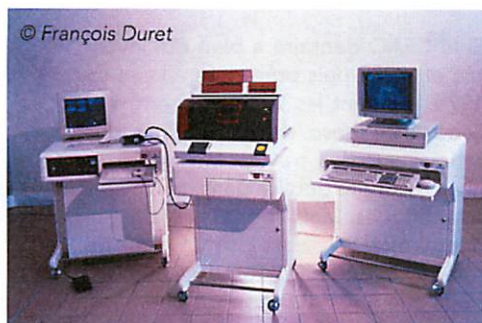
LES PREMIÈRES GRANDES DATES

de la CFAO et de l'impression 3D dentaire



« C'est ce document et les travaux qui suivirent qui validèrent la CFAO aux yeux des scientifiques. Et qui font que la France et la dentisterie française resteront les inventeurs de la CFAO médicale et dentaire. »

tiques ». Il est donc logique que ce soit les chercheurs de ces disciplines qui aient eu recours en premier aux techniques les plus novatrices relevant de l'optique ou de l'informatique, technologies qu'allait reprendre la CFAO dentaire 10 ans plus tard.



© François Duret

La période des pionniers

Pendant cette période dite des pionniers, plusieurs équipes travaillaient indépendamment les unes des autres. Certaines bénéficiant de contrats d'Etat largement subventionnés par des labo-

ratoires comme ceux de l'US Navy, ou celles des universités comme Stanford, Chicago, Londres ou Boston. D'autres se contentant d'un garage privé et subissant les moqueries

de leurs collègues plus académiques. Ce temps d'incubation, qui dura trois ans, s'est terminé par la publication du premier ouvrage totalement consacré à la CFAO dentaire et médicale.

C'est en 1973 que « la synthèse de mes travaux a enfin vu le jour » et a été publiée sous la forme d'une thèse intitulée *Empreinte optique*. « Dans cette thèse, explique François Duret, sont décrites toutes les techniques aujourd'hui utilisées en CFAO : la lecture 3D par interférométrie (1), la conversion analogique digitale, la modélisation informatique avec l'utilisation des dents théoriques pour construire **intrados et extrados** (2), les commandes numériques des machines-outils et l'usinage par soustraction (fraisage, électroérosion) ou par addition (électro-déposition...). Il ne s'agissait plus de faire des mesures de dents ou d'usiner des surfaces occlusales (faces des dents qui viennent en contact avec celles des dents correspondantes de l'autre maxillaire lors de l'occlusion et de la mastication), comme le proposait Gerich Altschuler aux USA, document trop souvent mis en avant pour de sombres

raisons marketing, mais d'expliquer comment faire toutes les prothèses en utilisant une lecture optique 3D, un ordinateur et un centre d'usinage. »

C'est ce document et les travaux qui suivirent qui validèrent la CFAO aux yeux des scientifiques. Et qui font que la France et la dentisterie française resteront les inventeurs de la CFAO médicale et dentaire.

En France, « notre travail a consisté à parfaire les fondements théoriques de la CFAO, à choisir la méthode optique de lecture la plus efficace (en 1979, on délaissera l'holographie pour l'interférométrie Moiré puis pour la profilométrie en 1984). On abandonnera les tubes cathodiques pour les premiers CCD (3) dans la conversion analogique digitale grâce à Thomson et on fera les premiers essais d'usinage avec les sociétés ICN puis surtout Kulman et Lambert », ajoute le professeur.

« La couronne de 20 minutes »

En 1983, leurs travaux allaient être présentés pour la première fois aux **Entretiens de Garancière** (4). Comme l'évoque François Duret : « nous y avons réalisé la première démonstration en public de la CFAO dentaire et de la "couronne en 20 minutes", comme le publiaient les journaux de l'époque. Certes les éléments >>>

PROTHÈSES DENTAIRES : DE L'ARTISANAT À LA SCIENCE

La Conception et Fabrication Assistées par Ordinateur (CFAO) qui permet d'imprimer une prothèse dentaire en 3D a été inventée par un Français : François Duret. Récit d'une aventure scientifique et industrielle qui a commencé il y a un peu plus de 40 ans.

« L'invention scientifique réside dans la création d'une hypothèse heureuse et féconde ; elle est donnée par le génie même du savant qui l'a créée. » Cette citation de l'illustre médecin français Claude Bernard, considéré comme le fondateur de la médecine expérimentale, François Duret, l'inventeur français de la **Conception et Fabrication Assistées par Ordinateur** (CFAO) dentaire en 1973, ne la renierait pas. Elle a guidé toute sa carrière de chercheur, du jeune thésard curieux et intuitif au professeur internationalement reconnu. N'est pas Newton qui veut bien sûr, mais force est de constater que le chercheur a très largement contribué à la conception des techniques modernes de fabrication des prothèses dentaires notamment en fabrication additive.

Les prémices

« Au début des années 1970, l'informatique était naissante, les technologies laser faisaient rêver et l'usinage automatique existait dans les grandes usines d'automobile ou d'aviation, se souvient François Duret. Sans que cela soit formalisé, chaque élément du puzzle apparaissait et se développait dans des secteurs parallèles sans jamais se rencontrer. »

En dentisterie, profession médicale relativement empirique, l'idée a commencé à mûrir lentement dans les esprits. Il ne fallait pas simplement énoncer mais prouver cette idée nouvelle car la jeunesse

est toujours un obstacle dans un monde académique. « Il était donc nécessaire de comprendre ce qu'est l'optique tridimensionnelle ou l'informatique capable de numériser notre champ de travail et d'intégrer le savoir-faire du dentiste et du prothésiste si lentement acquis. Il fallait aussi découvrir la robotique et son usage trop dépendants de matériaux si spécifiques. Enfin, tous les périphériques nécessaires à l'accomplissement de la tâche (articulateurs électroniques, spectrophotomètre...) étaient un domaine encore peu exploré. »

La théorie avance, pas la pratique

Si la CFAO dentaire a bien été inventée en 1970 puis présentée à Lyon en 1973, pendant les 10 ans qui ont précédé cette thèse, de 1963 à 1973, des articles sur des travaux de très haut niveau ont été publiés dans des revues scientifiques. Mais l'or et la céramique dentaire étaient alors les matériaux de référence. Il faudra attendre l'an 2000 pour que la CFAO propose une alternative logique à ces matériaux traditionnels !

Il existait pourtant deux exceptions à cette situation trop tournée vers le passé : la biologie (on parlait de biologie matière fondamentale) et surtout l'orthopédie dento-faciale (ODF). Ces deux disciplines, apparaissaient comme pratiquant des sciences très en avance, presque « mathéma- >>>