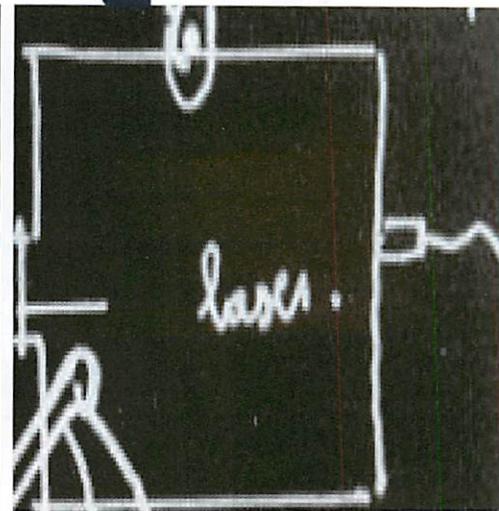
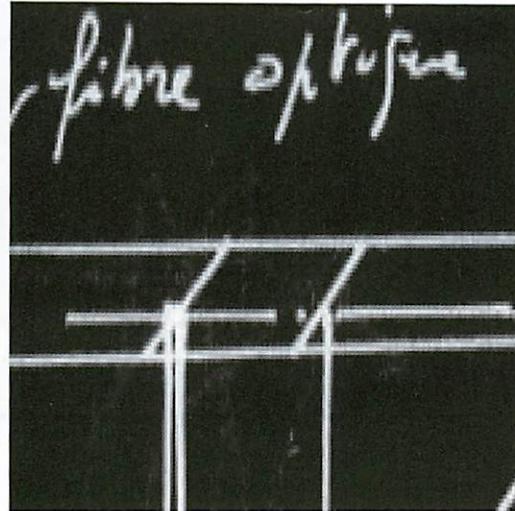
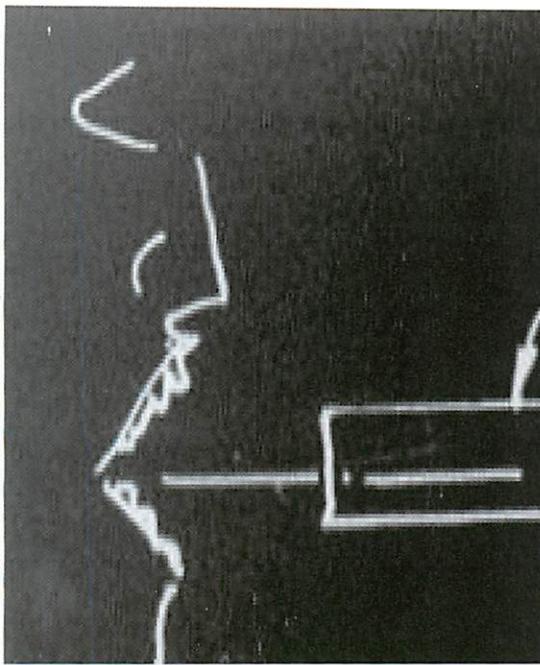
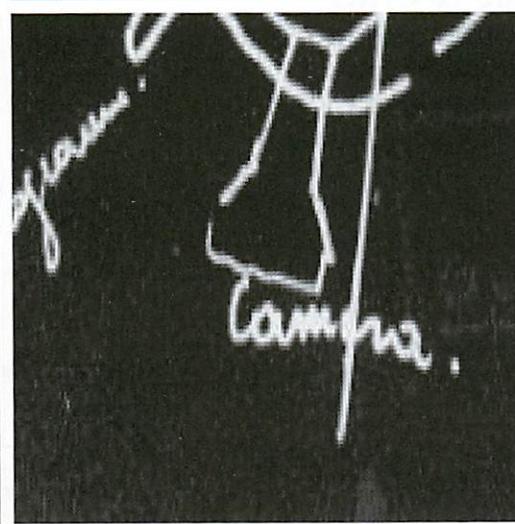
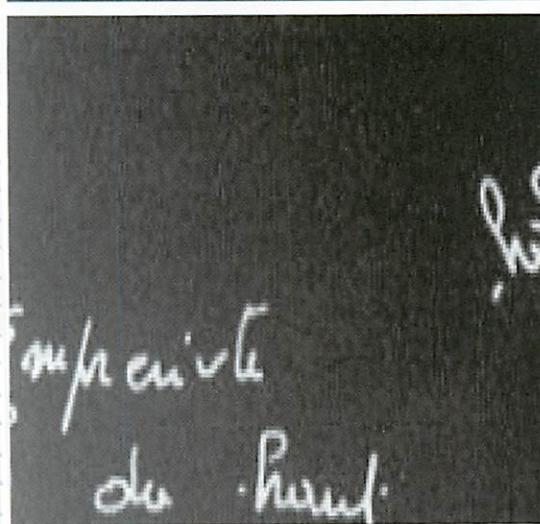
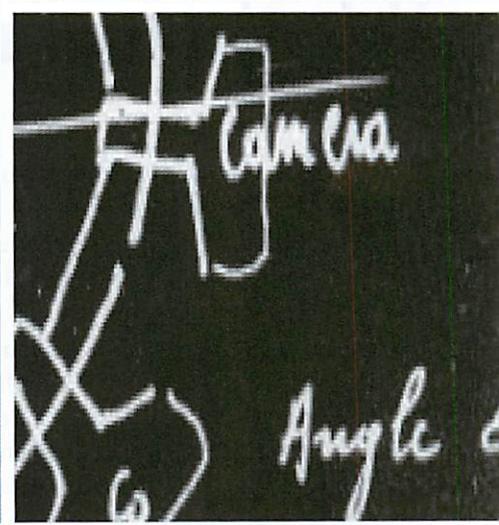


HISTORIQUE



Les premiers pas
des scanners
intra-buccaux
**de 1970
à 2000**



Par
Dr François Duret

Les premiers pas des scanners intrabuccaux (IIS) en dentisterie (1970 à 2000)

Voir n'est pas mesurer

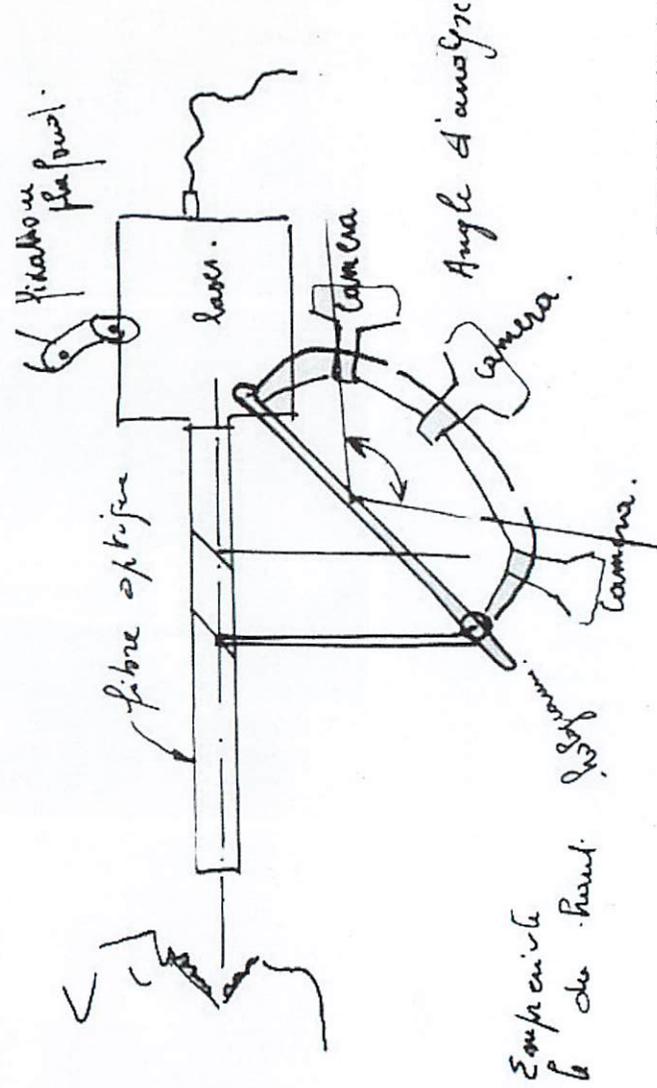
Une empreinte optique en dentisterie n'est ni plus ni moins que la mesure d'une surface (une dent ou une arcade) dans l'espace en 3 dimensions (voire plus).

Nous en avions parlé largement dans l'un de nos articles de votre Technologie Dentaire en 2011 (n° 295-296), nous ne reviendrons donc pas sur cette analyse qui est reproduite dans ce dossier de 2017 page 65. Pourtant, aborder l'histoire de la CFAO nous oblige à rappeler certains principes de base comme celui de ne pas confondre, comme c'est souvent le cas, mesurer une dent et voir cette dernière en 3D.

La naissance de la CFAO dentaire a montré que cette confusion est toujours possible et qu'elle a souvent fait espérer des choses impossibles à nos chercheurs imaginatifs. Pourtant, il est évident que si, avec nos deux yeux, nous pouvons voir en 3D, nous ne pouvons pas mesurer les objets observés.

Bref, cette confusion entre visualisation et mesure fait que, pour chacun comme pour tous, rien ne nous semble original ou difficile aujourd'hui pour ce qui est de faire « du 3D » comme affirmé trop souvent.

C'est aller bien trop vite, de l'observation profane à la conclusion scientifique.



“ *Voir n’est pas mesurer, mais cette confusion est toujours possible, et elle a souvent fait espérer des choses impossibles.* ”

● Les temps anciens

Cette dualité inconciliable a hanté notre perception du monde, et il faut savoir que la passion de la vue en relief ne date pas d’aujourd’hui

Du Moyen âge, ont été retrouvées des images que l’on qualifierait aujourd’hui de « stéréoscopiques » parce que vues d’une certaine manière, un œil fermé puis l’autre, le décalage des images représentées ne fait aucun doute.

Même Van Gogh s’y est exercé dans un couple de tableaux célèbres dont l’appariement est apparu fortuitement lors d’une exposition de ce grand peintre dans son musée en Hollande.

De la même manière, nous avons tous, ou presque, quelque part dans le grenier de nos grands-parents des représentations stéréoscopiques de grands monuments ou de terribles scènes de la guerre 14-18. Il nous suffisait alors, enfant, de mettre nos yeux en face de deux oculaires, une sorte de jumelle, présentant chacun une image d’un même objet vu d’un angle différent, pour obtenir l’effet 3D comme si nous y étions.

● Fin du XVII^{ème} siècle au début du XX^{ème} siècle

Premières formules de calcul dans l’espace

Voir en 3D n’est pas mesurer en 3D. Et c’est là que le bât blesse. Descartes et tous ses contemporains, mathématiciens, philosophes du siècle des lumières l’ont compris très vite et ont essayé et trouvé des formules magiques en trigonométrie permettant de trouver la position d’un point dans l’espace.

Ils y sont arrivés, et aujourd’hui nous appliquons ces formules de base dans nos IOS (Intra Oral Scanner) ou dans nos scanners de table, mais un point n’est pas une surface, et une surface simple n’est pas une surface occlusale brillant de tout son éclat dans une bouche trop sombre. Certes la stéréoscopie, puisqu’on appelle ces

principes mathématiques comme cela, était une solution, mais elle n’était pas applicable en dentisterie avec les moyens dont on disposait au début du XX^e siècle. Chacun l’avait admis et la pâte d’empreinte avait encore de beaux jours devant elle.

● Milieu du XX^{ème} siècle

Premières représentations 3D holographiques

Il aura fallu attendre la publication de Gabor en 1947 dans la revue Nature (et son prix Nobel en 1948) pour ré-exciter tous les appétits y compris, et surtout, ceux de nos confrères dentistes/chercheurs américains. C’est pour cette raison que dès les années 60, l’ami de Gabor, Leith, et son coéquipier Upatnieks, aux USA, œuvrèrent très activement dans le Michigan dans les représentations 3D holographiques en orthodontie ou en esthétique (je dis bien représentation, pas mesure !).

● Les années 60

Holographie et mesure de points isolés

À cette simple représentation faciale en 3D, souvent par holographie, fut ensuite associée la mesure de la position spéciale de certains points importants (comme le sous orbitaire, sous mentonnier ...). Le démarrage de l’empreinte optique, ou plutôt l’utilisation de l’optique en dentisterie, car il est difficile de parler encore d’empreinte optique, fut donc une association entre la mesure de la position de certains points et la représentation spatiale 3D d’un visage sans mesure.

Holographie et interférométrie

L’équipe de Langue, dans une publication restée célèbre, ajouta même une belle analyse interférométrique de surface des profils aux diagnostics classiques de ses prédécesseurs.

Pourquoi l'orthodontie me demanderez-vous ? Tout simplement parce que c'est dans ce domaine que se trouvait une branche très « mathématique » de la dentisterie de l'époque : calculs d'angles, de statistiques ... C'est d'ailleurs de Burston que m'est arrivé l'un de mes premiers soutiens américains. Ainsi, Savara ou Van der Linden n'hésitèrent pas à appliquer la stéréoscopie dans leurs analyses d'angles et de déroulé des diagnostics à base de points connus dans l'espace.

Cette méthode associative n'était pas encore applicable à la prothèse car, comme je le disais, connaître un point dans l'espace est une chose, en connaître des millions et les mesurer en bouche ou sur modèle en est une autre. Deux équipes sont apparues dans cette nouvelle approche de la dentisterie moderne : celle du Capitaine Bruce R. Altschuler et celle que je commençais à constituer dans le laboratoire de physiologie de la faculté des Sciences de Lyon (Pr Perrez). Bruce et son collègue Swinson ne le firent pas directement pour la construction de modèles virtuels en prothèse, mais évoquèrent seulement cette possibilité dans un rapport interne traitant des mesures des déformations des prothèses adjointes dans la lignée des auteurs comme les équipes de Ash, Savara ou Frarah. Ils expliquèrent sur quelques lignes la possibilité de faire une empreinte holographique et de réaliser une prothèse sans expliquer comment.

Cette conclusion était un peu trop hâtive car s'ils pouvaient voir les déformations interférométriques, ils ne pouvaient pas en mesurer les valeurs « optiquement parlant ». Ils oublièrent simplement en route que l'holographie n'a jamais été une méthode de mesure mais de visualisation 3D.

Évidemment, du haut de mes vingt ans je ne pouvais pas connaître les travaux «confidential/army» de Bruce R. Altschuler dans les laboratoires de l'US Air Force.

● Fin des années 60

Naissance du concept de CFAO dentaire et interférométrie

À la suite du fameux congrès sur l'holographie à Besançon en 1969, auquel j'ai assisté comme étudiant à la faculté des sciences, fasciné par l'holographie, je compris très vite que représentation 3D n'était pas mesure 3D. De mémoire j'en fus très déçu car cela compliquait sérieusement mes plans «paléontologiques». Pourtant, fin 1970 j'inventais le concept de CFAO dentaire.

● Les années 70

Du concept à la solution « empreinte optique »

Après avoir inventé ce concept de CFAO dentaire, il ne me fallut pas moins de 3 ans pour trouver une solution à ce problème de « visualisation/mesure ». Cette solution aujourd'hui réputée crédible fut transmise au président de l'Université de Lyon pour approbation sous la forme d'une thèse de 2^e cycle en 1973 (photo 1) appelée comme par hasard « empreinte optique » (visible sur mon site www.francoisduret.com) !



Page de garde de la thèse de 2^{ème} cycle

Plus de 100 pages sur les 300 sont consacrées à comment et pourquoi il est possible de mesurer une image interférométrique en passant par le stratagème du balayage calibré sur écran (je proposais de le faire avec un tube Vidicon car à l'époque, le CCD n'existait pas).

La suite des années 70 ne fut pas marquée par des progrès phénoménaux dans ce domaine car seules deux équipes étaient réellement concernées : celle de Altschuler et Young aux US et la nôtre sous la bienveillance de deux hommes formidables, les Professeurs J. Dumas à

“ ...La caméra bicéphale nous a suffi pour faire la première empreinte en démonstration mondiale «live» en 1983 (Antenne 2/ journal télévisé de 20h). ”

Lyon et J. Thouvenot à Tours. Si l'on ajoute à cela les encouragements bienveillants du professeur américain Crammer et l'illustrissime Pr Kastler, on comprendra facilement que notre engagement était total, d'autant plus que nous ignorions tout des travaux de l'équipe américaine.

Par sensibilité personnelle sans doute, alors qu'aux US l'effort et les publications/rapports portaient surtout sur le balayage mécanique (Mushabac) ou sur de l'optique mécanisée (Smidth) par « points » ou par « franges » (inapplicable en bouche, d'où le fameux brevet d'Altschuler de 1981) en France c'est surtout le mode de lecture et de mesure interférométrique qui occupait toute notre attention. Il fut l'objet de deux conférences, de deux publications (1976 et 1977) et d'un certain nombre de notes d'auteurs. Fin 1978, je décidais de mettre les bouchées doubles avec mon oncle, une petite équipe de fidèles et plus que jamais avec l'aide de mes deux professeurs.

● **Fin des années 70**
Abandon des Américains et nouvelles équipes en Allemagne et en Suisse

Plus tard nous apprîmes qu'en France nous étions devenus les seuls travaillant la CFAO car l'équipe américaine avait arrêté ses travaux en 1979.

Nous ne le restâmes pas longtemps puisque 9 ans après que nous ayons inventé la CFAO dentaire, deux Allemands (Rooder et Hetlinger) se lancèrent sur nos traces en 1979, rejoints deux ans plus tard (décembre 1980) par l'équipe suisse de Zurich (Moermann et Brandestini).

● **1981**
Première caméra bicéphale et première empreinte optique

Devant la complexité du déchiffrage et la fragilité des montages holographiques par rayonnement cohérent (LASER) nous avons décidé, en 1979, d'opter pour une forme d'holographie interférométrique macroscopique : le Moiré (U. de Strasbourg).

Avec l'aide de Thomson CSF, de la SA Fort et de Matra Optique nous réussîmes à monter la première caméra mondiale de CFAO dentaire type IOS (IOS = Intra Oral Scanner) comme nous disons maintenant, utilisant

deux CCD TH X31135 équipant la caméra bicéphale (scannage vestibulaire et linguale en même temps) dite « de la Garancière » (photos 2a et b).



Caméra « sonde » dite « de la Garancière » 1982



Détail de la tête de la sonde 1982.

Elle a fonctionné dès la fin de l'année 1981 mais était terriblement imprécise. Elle nous a malgré tout suffi à faire, pour le ministère de la Recherche, en février 1981 la première empreinte, et en septembre 1983 la première démonstration mondiale en « live » (Antenne 2/ journal télévisé de 20h). Elle nous a surtout permis de trouver les fonds nécessaires à nos travaux.

● **1984**
Première caméra IOS

Comme la caméra était très imprécise nous avons décidé de rester dans le moiré interférométrique mais dans sa version électronique multi phases (ou phase profilo-métrique). Cette méthode avait le double avantage d'être

très précise et d'être insensible à l'albédo (la couleur) de la dent (1983).

Mon ami de 10 ans, Jean Michel Decaudin, DG de la fameuse société SA Bertin, jeune opticien à l'époque, m'avait encouragé lors d'une rencontre mémorable pour nous dans le Jura à La Pesse.

Avec son aide nous fîmes les premiers essais de la première caméra mondiale IOS fin 1983 - début 1984 puis la réalisâmes au sein de la société Hennson créée à cet effet (photo 3).



IOS Hennson 84-91 avec à côté le bout de Omnicam Cerec Sirona 2014

Celle-ci permettait des prises multi vues (jusqu'à 18 one shoot) à projection conique de lumière structurée (Laser argon, puis LED Cohérentes avec un système anti-speckel) et d'un réglage automatique de la profondeur de champ (d'une précision autour de 80 µm).

● Novembre 1985

Première couronne usinée au monde

Nous avons présenté cette IOS en fonctionnement à l'ADF de novembre 1985. Comme cette réalisation a été faite en public devant 800 confrères (et non pas dans l'atmosphère confinée et invérifiable d'un laboratoire) la couronne fabriquée (une 25) et scellée est considérée comme la première prothèse au monde réalisée par CFAO. Cela avait pris 2 heures, usinage, maquillage et scellement compris et ... 12 ingénieurs. Tout le matériel étant sur la scène en novembre 1985 (photo 4).



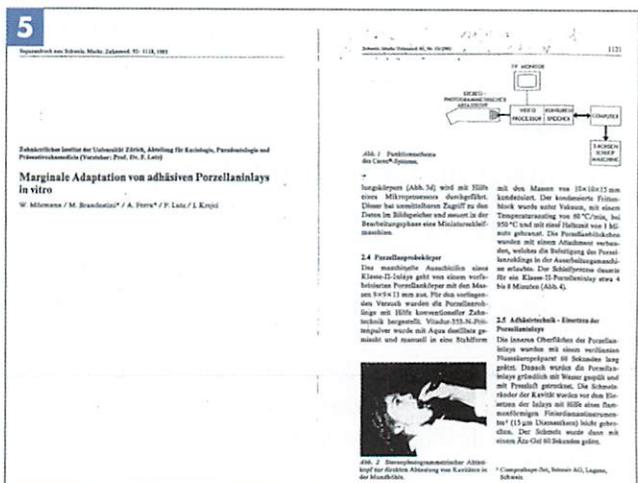
Système complet présenté à l'ADF en 1985.

Le premier « Chairside » au sens où nous l'entendons aujourd'hui était visible et contrôlable par chacun. Ce fut aussi la première démonstration mondiale (et télévisée) clinique et pratique du concept de la CFAO dentaire.

● Décembre 1985

Copie optique sur Cerec

Un mois plus tard, en décembre 1985, apparut soudainement la première publication sur le Cerec 1 à moteur « à eau » de W. Moerman et M. Brandestini dans une publication du Schweiz (photo 5).

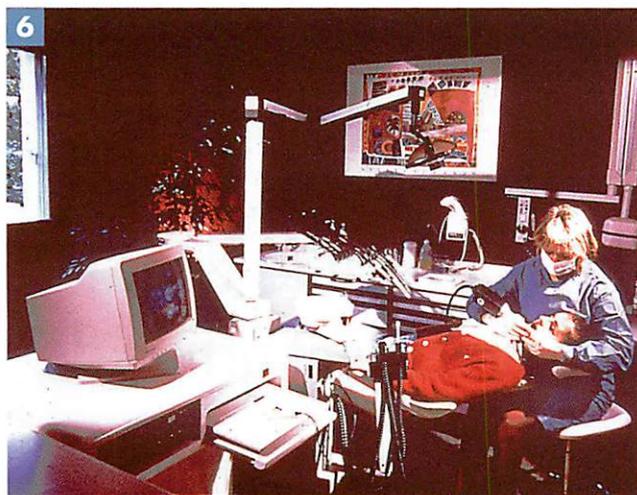


Premier article sur le Cerec en Allemagne en décembre 1985.

“ ... Le premier « Chairside » au sens actuel du terme est donc sans doute le système Hennson. ”

Msch. Zahnmed. 95, n° 12. Cet article avait pour objet « l'adaptation marginale adhésive d'un inlay en porcelaine réalisé in vitro » suite à un abstract du JDR n° 305. Ils utilisaient une projection simple parallèle de lumière structurée, une vue unique (d'où l'absence de vue occlusale antagoniste obligeant à faire la surface occlusale à la main) et un réglage de profondeur de champ manuel à l'aide d'une souris/boule.

La destination des deux systèmes n'était pas la même : le Cerec n'était qu'un système de « copie optique ». Il ne réalisait que l'intrados des inlays et avait pour vocation de remplacer les composites par des céramiques alors que le système Hennson était un véritable système de CFAO dentaire complet capable de faire toutes les prothèses en tous matériaux en cabinet (Chairsides actuels) ou avec connexion internet avec un laboratoire (Cahier de Prothèse n° 50 p. 73-110, 1985) (photo 6).



6 Empreinte réalisée au fauteuil dans un cabinet dentaire.

Le premier « Chairside » au sens actuel du terme est donc sans doute le système Hennson.

Les deux IOS étaient évidemment incomparables puisque l'un pouvait faire l'empreinte optique d'une arcade complète (18 vues en one shoot) haute et basse et les rapports d'occlusion (Hennson) alors que l'autre ne faisait qu'une seule vue de la cavité d'un inlay/onlay sans occlusion, sans modélisation et sans espace ciment (Cerec).

C'est durant cette période que d'autres équipes apparurent avec des idées d'IOS plus ou moins différentes, celle de D. Rekow aux USA (stéréo), d'Aoky puis Kimura,

Watanabe et Shomura (interférométrie) au Japon. Leurs travaux ne connurent pas le succès des deux équipes européennes. Les équipes japonaises firent des articles de très haute qualité (d'où mon travail plus tard avec GC à partir de 1994) mais malheureusement sans suite.

● Les années 1990

Fin de Hennson et envol de Cerec

Bref, hors scanner de laboratoire, les IOS n'étaient qu'au nombre de deux en 1990, celui du Système Hennson (Duret) et celui du Cerec 1 (Moerman/Brandestini). À partir de 1992, Hennson commença à connaître des difficultés financières (malgré la vente d'une quarantaine de systèmes dans le monde). Cette période difficile fut suivie d'un marasme complet malgré la reprise par une PMI médicale qui ne sut jamais donner le souffle initial de Hennson : Sopha Bioconcept. La passion n'y était plus. Le projet français disparut corps et âme en 1994 mettant dans la gêne 60 utilisateurs et laissant malheureusement le champ libre au seul Cerec 1 puis 2 en 1995. Ceci explique pourquoi les IOS n'évoluèrent pratiquement pas entre 1990 et 2005.

La disparition de Hennson international donna un coup de frein spectaculaire à toutes les évolutions et tous les développements des IOS dignes de ce nom. Il faudra attendre 2005 pour les voir réapparaître lentement.

Développement des scanners de laboratoire

Par contre cette période fut la grande période du développement des scanners de table dont la plus grande partie utilisa le concept des franges à pas variables de B. Altschuler (1981). Ce fut aussi le temps de la copie, le pillage devrais-je dire, des travaux de Hennson.

● Les années 2000

IOS de première génération par projection de lumière structurée

En 2005 fut repris dans les scanners intrabuccaux (IOS) le principe de l'empreinte optique par projection de lumière structurée, en système de triangulation ou en

...
“ *Les scanners intrabuccaux sont plus sophistiqués, plus rapides et moins complexes, mais le principe de base reste le même.* ”

section confocale, démontré pour la première fois par Henson int. en 1983 puis 1985.

Certes les scanners intrabuccaux sont plus sophistiqués, plus rapides et moins complexes, mais le principe de base reste le même : nous projetons sur la dent par le canal lumière un réseau matriciel de lumière structurée dont on connaît (en mémoire) la forme, le design, la position de la focale des optiques, voire la longueur d'onde (après qu'un développeur soit passé temporairement par le stade balayage d'une ligne). Cette lumière se déforme sur la dent et n'est nette que dans une tranche de profondeur de champ, c'est cette lumière déformée qu'observe la partie caméra de l'IOS. Les logiciels sont capables de comparer la lumière originelle non déformée et mémorisée à celle qui est déformée par les dents. La soustraction (très complexe) de ces deux informations « déformée/non déformée » donne évidemment la forme de l'objet.

Cette méthode de mesure par projection de lumière structurée définit ce que l'on peut appeler les IOS de

première génération. Avec une IOS première génération vous ne mesurez pas l'objet lui-même mais la lumière déformée et projetée (d'où la nécessité quelquefois d'un dépôt blanc pour bien voir cette lumière déformée dans la bouche).

IOS par focalisation-défocalisation

Certaines techniques se sont affranchies du concept de la lumière structurée. Ce sont les systèmes 3M (focalisation-défocalisation) et Itero (sélection de plusieurs profondeurs de champ à l'aide d'un rayonnement polarisé). Nous avons détaillé ces concepts dans notre article de 2011.

Nous pourrions les résumer en disant que le système par triangulation mesure la lumière déformée sur toute la profondeur de champ alors que le système confocal mesure par tranches de profondeur de champ prédéfinies.

Mais, au juste, quelles sont les nouveautés dans le domaine des IOS depuis notre précédent article de 2011?

À la suite de la reproduction de l'article de 2011 (voir page suivante) décrivant en détail les technologies utilisées jusqu'à cette époque, nous détaillons les différentes technologies présentes de nos jours et les principales évolutions survenues depuis cette époque.

F Duret

Juillet/Août 2017

n° 367/368

Les dossiers de

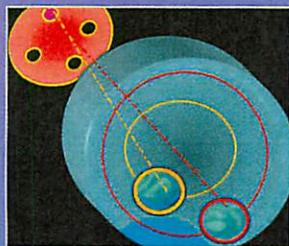
Technologie
DENTAIRE

ENQUÊTE

Activité 2016 des
labos, CAD/CAM et
Empreinte Numérique

L'EMPREINTE NUMÉRIQUE

Terminologie, Historique,
Fonctionnement et
Technologies actuelles
des caméras



LES SYSTÈMES

Les différentes caméras
et logiciels de prise
d'empreinte digitale



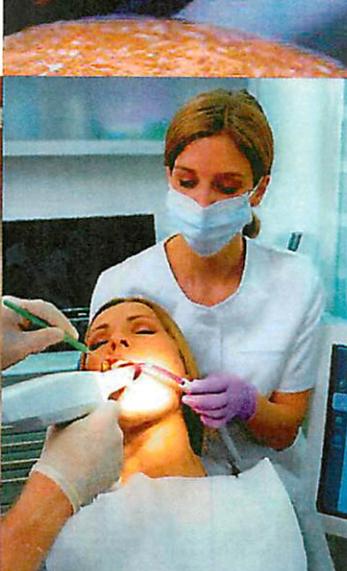
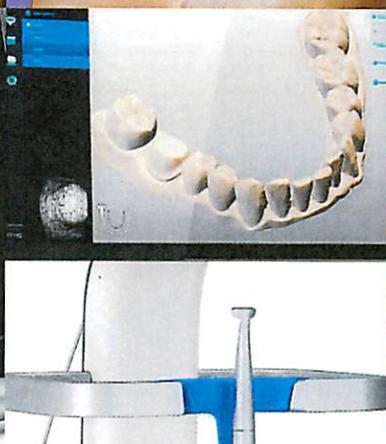
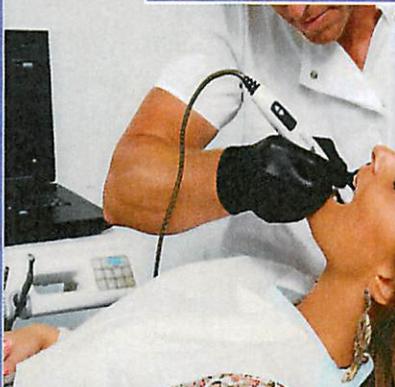
PROCÉDURE

Toutes les étapes de
prise d'empreinte
numérique au cabinet



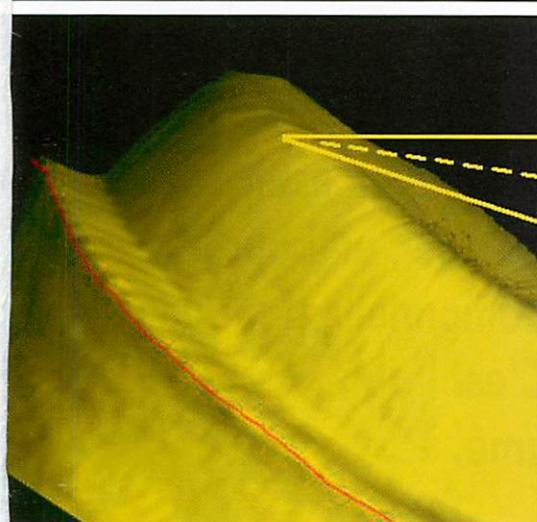
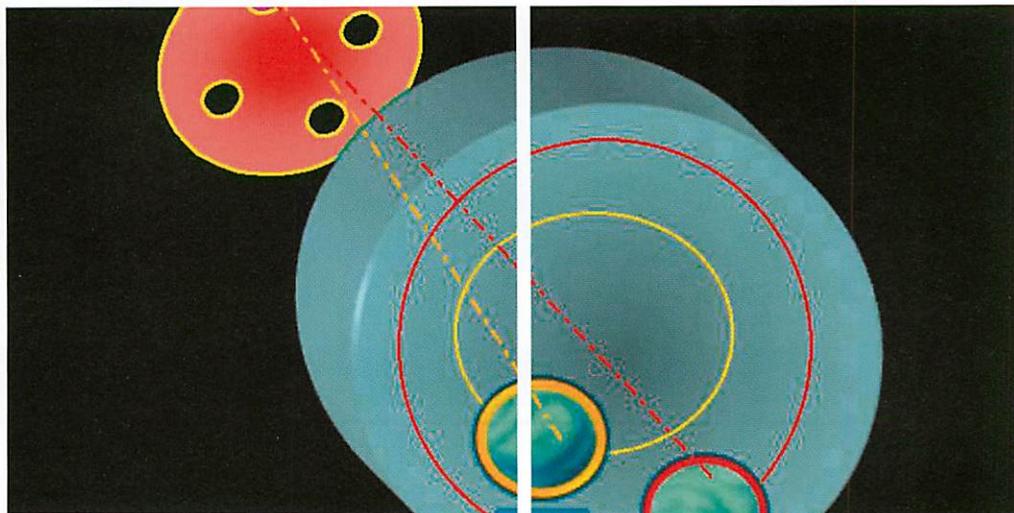
**Dossier
SPÉCIAL**

Empreinte Numérique

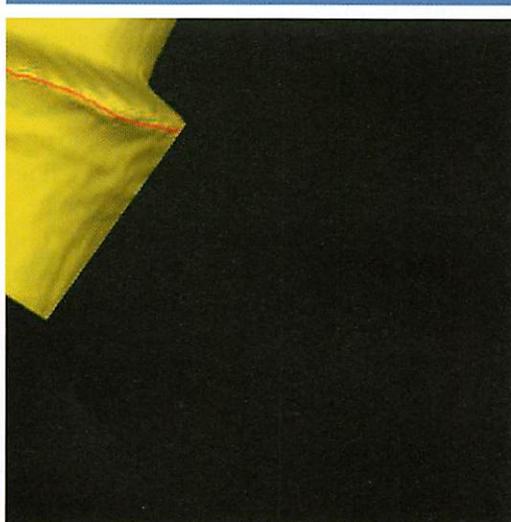
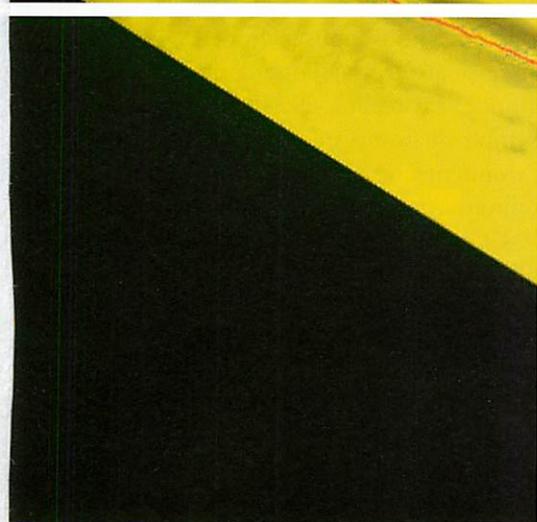
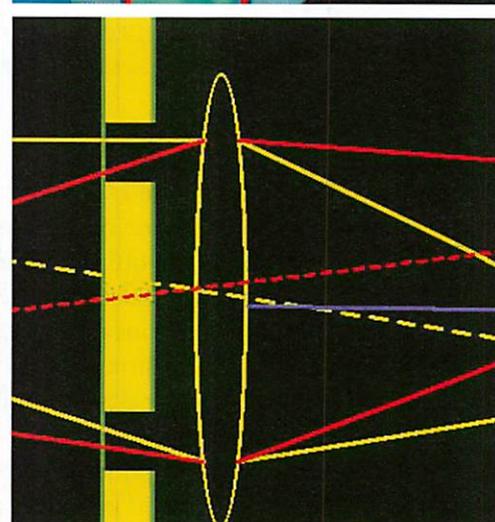


*Tous les systèmes présents sur le marché
Comparatif des options et fonctions des logiciels d'empreinte*

FONCTIONNEMENT



Le fonctionnement des
caméras
endobuccales



Par
Dr François Duret

65

Le fonctionnement des Caméras endobuccales

NDLR :

Nous reproduisons ici l'article sur le fonctionnement des caméras déjà paru en 2011 dans notre premier dossier sur l'empreinte numérique. À la suite de cet exposé, un nouvel article de François Duret vous présente les évolutions survenues depuis, dans ces technologies.

La dentisterie n'échappe pas à la grande vague des révolutions sociales et technologiques qui marquent le début de ce nouveau siècle, et cette mutation n'est pas anodine : nous allons quitter les produits d'empreinte que nous utilisons depuis 300 ou 400 ans pour les remplacer par des caméras vidéo. Le coup est à la fois rude et exaltant. Il est rude car il s'agit d'une remise en cause que nous pensions pouvoir repousser à notre fin d'exercice, mais il est aussi exaltant car nous allons vivre un véritable bouleversement professionnel.

Cette révolution est très importante car l'empreinte est à la base de la quasi-totalité de nos travaux collaboratifs entre le laboratoire et le cabinet dentaire. Toucher à ce sacro-saint plâtre ou cet incontournable alginate relève plus de l'outrage que du progrès scientifique. Qu'importe, un petit groupe de chercheurs a osé l'hérésie et il est en passe de réussir. N'en déplaise aux râleurs, c'est tant mieux pour notre profession.

Mais, au juste, comment est-il possible de substituer, en bouche, l'empreinte traditionnelle par une caméra 3D ? C'est l'objet de ce très court résumé.

Tout d'abord, généralisons pour nous amuser un peu : Une surface rose d'alginate peut être ressentie comme une longue étendue continue. En réalité, elle doit être comprise comme un ensemble de points très rapprochés qui, par leur proximité, donnent une impression d'uniformité. À l'échelle atomique, nous avons même des espaces entre ces points. L'objet d'une prise d'empreinte est de rendre accessible à l'opérateur, dentiste puis prothésiste, cette surface que le patient ne peut mettre à notre disposition que dans un temps très court.

Toute technique permettant de copier pour reproduire dans l'espace (en 3D) la surface des arcades dentaires peut être considérée comme une méthode de prise d'empreinte.

Cette copie peut être un simple transfert de surface, sans que l'opérateur ait des indications sur l'objet copié : ce sont nos techniques d'empreintes classiques. Ce peut être aussi des techniques permettant ce transfert mais renfermant en plus un fichier d'informations contenant la position spatiale (x, y, z) de chacun des points constituant la surface : ce sont les nouvelles techniques de micro-palpation ou d'empreinte optique.

“ *L’empreinte est à la base de la quasi totalité de nos travaux collaboratifs entre le laboratoire et le cabinet dentaire.* ”

Ces dernières s’imposent de plus en plus car, après un certain nombre de transformations, elles permettent de disposer de ces fichiers sous une forme numérique directement utilisable par l’ordinateur et tous ses softwares. L’ordinateur voit donc arriver, durant la prise d’empreinte, une succession de points très rapprochés, disposant chacun d’une carte d’identité renfermant au minimum 3 valeurs (x, y et z). Ces 3 nombres correspondent à la position spatiale du point par rapport à un point commun, de référence, ayant pour valeur (0,0 et 0). On parle classiquement de « nuage de points » dans un référentiel connu. Une prise d’empreinte optique sera pour l’ordinateur une suite de fichiers d’autant plus importants que le nombre de points est élevé. Ce nombre de points sera d’autant plus élevé que nous voulons une grande précision, c’est-à-dire des points de petite taille.

Pour une vue précise à 10 µm ce sont des millions de points que recevra l’ordinateur. Si l’empreinte optique a besoin de 3000 vues par seconde, ce qui est le cas des scanners IR, nous parlerons de centaines de millions de points pour une arcade. Ceci explique pourquoi les scanners endobuccaux ne se sont réellement imposés que très récemment. L’ordinateur pouvant assurer une telle puissance de calcul restait encore très cher, en tout cas trop cher pour notre métier.

Mais comment arriver à mesurer avec des caméras 3D endo-buccales ?

Nous en arrivons au cœur du sujet. Quels sont les moyens mis en œuvre pour mesurer la position de ces points en bouche constituant une partie ou toute la surface d’une arcade ?

Il existe aujourd’hui, en dentisterie, deux grandes méthodes d’empreinte pouvant fournir des informations numériques. Il s’agit de l’empreinte par micro-palpation (style Procera ou Cadim) et de l’empreinte optique (tous les autres systèmes d’empreinte pour CFAO). Si pour l’analyse sur modèle en plâtre ce choix reste vaste (il existe plus de 40 appareils différents pour la numérisation au laboratoire), il reste relativement confidentiel au niveau des caméras endobuccales. Nous en avons identifié sept disponibles sur le marché.

Précisons tout de suite que la méthode d’empreinte par micro-palpation est particulièrement lente. De ce fait, elle n’est pas applicable en bouche malgré quelques essais restés sans suite (Mushabac ou Rekow). Le moindre bougé du patient ou du palpeur fixé sur les dents durant la lecture conduit à d’irréversibles erreurs de référence.

La situation est très différente avec l’empreinte optique. Elle peut être très rapide et elle a l’avantage d’être d’une manipulation relativement simple. Ce sont les raisons pour lesquelles elle a été plébiscitée par les cliniciens désireux de s’engager dans la voie de la numérisation. Ce choix a été rendu possible après un certain temps, non pas parce qu’il était mauvais, mais parce que certains critères, pour être résolus, avaient besoin de voir progresser les développements scientifiques. Ainsi, la puissance de calcul des ordinateurs, la finesse des capteurs optiques CCD (Charge Coupled Device), la miniaturisation des lentilles ou des éclairages avec un bon rapport qualité/prix étaient des préalables incontournables.

Il existe aujourd’hui plusieurs méthodes d’empreinte optique pour mesurer une arcade en bouche. Les deux les plus utilisées sont issues

- 1) des principes de la triangulation, donc de la stéréoscopie ;
- 2) des principes que nous pouvons appeler, pour la première fois, d’intensité de vol, pour faire un parallèle avec la technique bien connue dite « de temps de vol ».

1. Les caméras endobuccales 3D et la triangulation...

Vision binoculaire (stéréoscopie) et triangulation

C'est la technique la plus simple et la plus connue. C'est aussi la plus pratiquée en dentisterie. Le principe consiste à reproduire la vision binoculaire humaine ... avec quelques arrangements ...

Comme le montre la figure 1, le même point vu sur une arcade, par exemple la pointe d'une cuspside, n'aura pas la même position sur la rétine de l'œil droit (x et y) et sur celle de l'œil gauche (x' et y'). Le cerveau est capable de retrouver instinctivement ces deux points (que l'on appelle points homologues), de constater la différence de position sur les deux rétines et d'en déduire la distance qui sépare l'œil de ce point. En faisant cette constatation sur l'ensemble des points d'une arcade, il sera capable de construire une vue dans l'espace 3D. Mathématiquement, la recherche de cette distance « z » n'est qu'un simple calcul trigonométrique que tout ordinateur est capable d'exécuter très rapidement.

Balayage laser d'un point lumineux

La bouche étant particulièrement sombre et la recherche des points homologues pas forcément évidente, surtout sur des surfaces lisses, blanches et brillantes, les caméras d'empreinte optique remplacent le deuxième œil par la projection d'un point lumineux (laser). Nous retrouvons dans la figure 2 les deux distances (x et y) et (x' et y') vues sur les rétines. L'ordinateur connaissant la distance (x et y) car elle dépend du balayage de son système mécanique réglé en usine, il ne lui reste plus qu'à mesurer la position (x' et y') du point lumineux sur le CCD pour trouver, par le même calcul trigonométrique, la valeur de « z » correspondant

fig 1

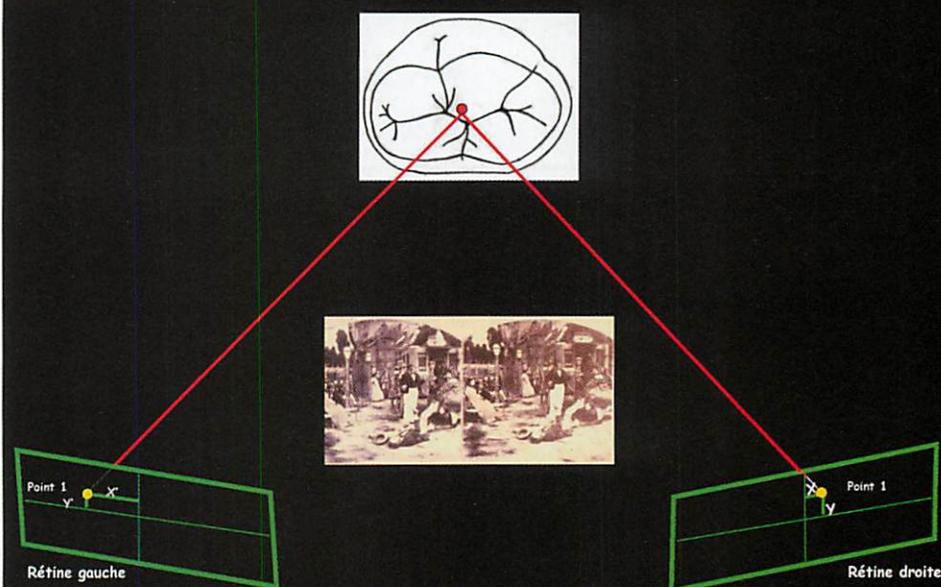


Figure 1:vue Stéréoscopique au niveau de l'oeil humain

fig 2

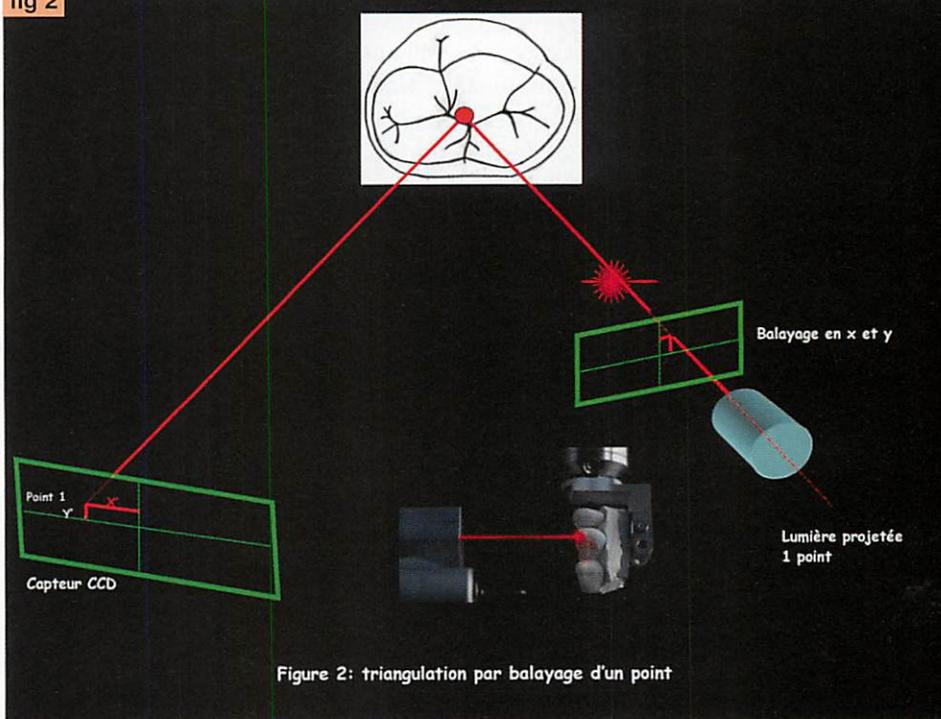


Figure 2: triangulation par balayage d'un point

“ *La stéréoscopie est la technique la plus simple, la plus connue et la plus pratiquée en dentisterie.* ”

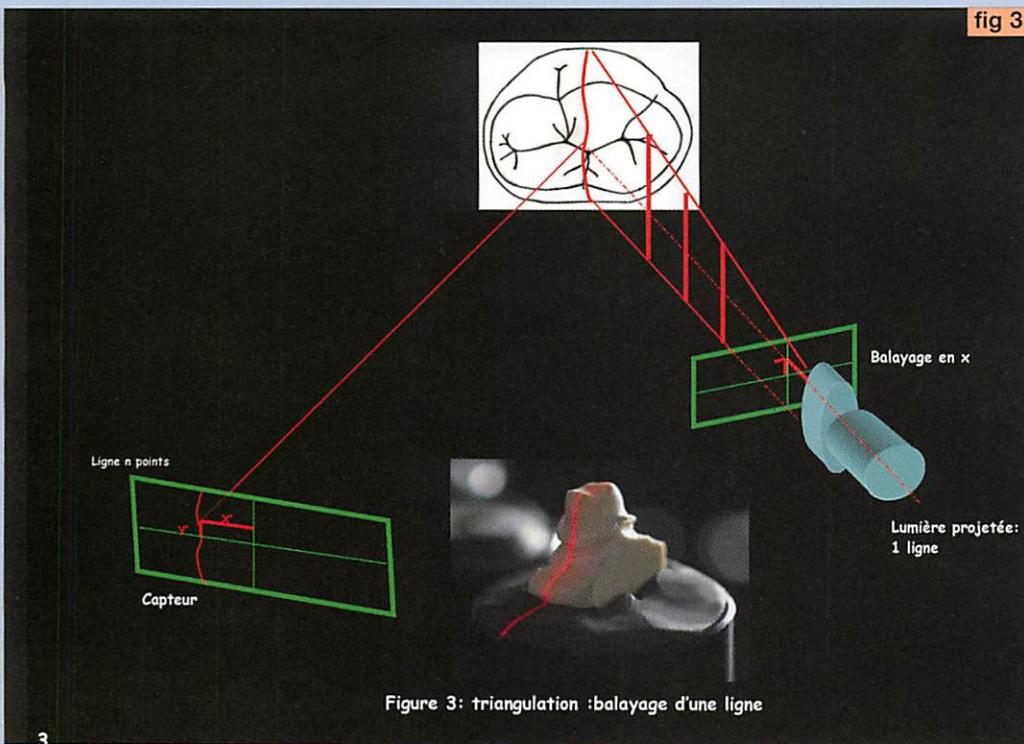


Figure 3: triangulation :balayage d'une ligne

fig 3

à la troisième dimension ou distance CCD/point objet. Cette technique de balayage (ou de scannage) par un seul point n'est utilisable que dans les scanners de table car le modèle en plâtre ne peut pas bouger pendant le cheminement du point lumineux. Elle est trop lente pour être appliquée en bouche.

Balayage laser de lignes (franges) lumineuses

On lui préfère aujourd'hui la projection (balayage) d'une ligne de points (figure 3) qui, associée aux nouveaux systèmes de balayage motorisés ultra-rapides, appelés piézo, permet la saisie de plus de 3000 images différentes par seconde. Nous retrouvons ce principe de balayage en lignes dans des caméras comme la IOS, la 3Shape, la Cyrtina ou l'HintEls (figure 4). Ces caméras utilisent en général la projection d'une frange (ou ligne) laser rouge ou bleue qui balaye l'arcade en continu. La prise de vue, c'est-à-dire la fixation sur le CCD du profil de la ligne, se fera à la volée, donnant au praticien une grande liberté de manipulation. Il lui suffit de déplacer lentement la caméra à la surface de l'arcade pour construire et enrichir progressivement l'empreinte virtuelle. On parle d'empreinte optique dynamique. La corrélation des vues, c'est-à-dire l'addition des vues les unes après les autres pour ne représenter qu'un seul objet est rendue possible grâce à deux concepts complémentaires.

Le premier consiste à accumuler le maximum de profil avant de bouger la caméra. Cela est possible car les prises sont rapides et nombreuses. Le deuxième est d'avoir toujours un recouvrement (1/3 en commun minimum) entre deux vues différentes. Cela est possible si l'opérateur ne déplace pas trop vite sa caméra.

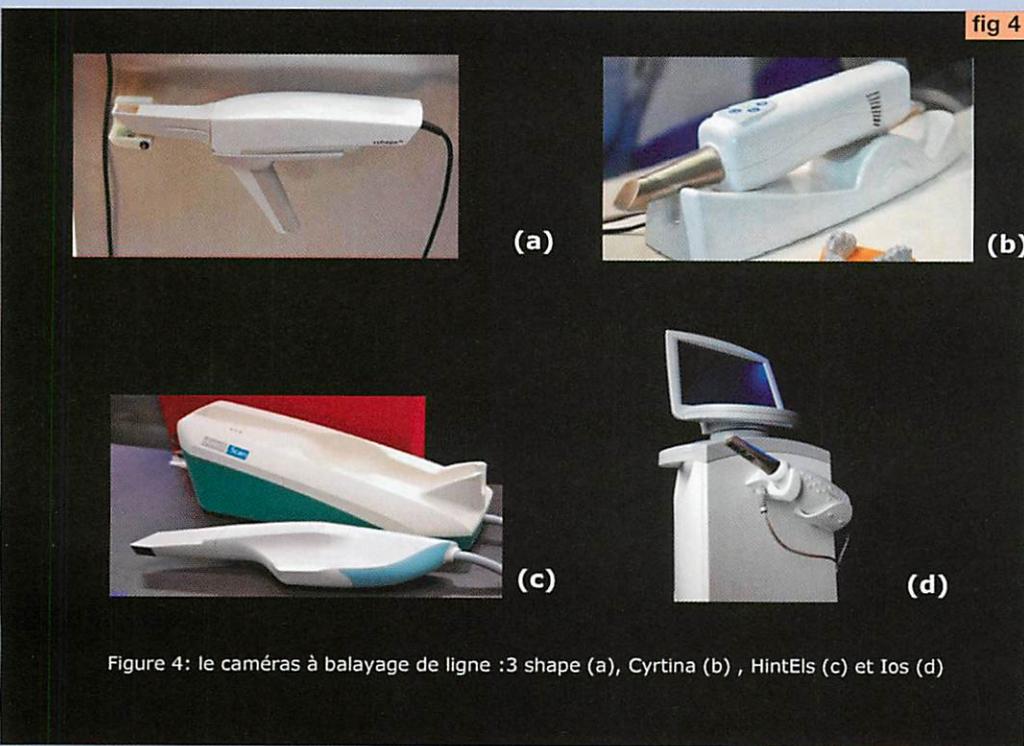


fig 4

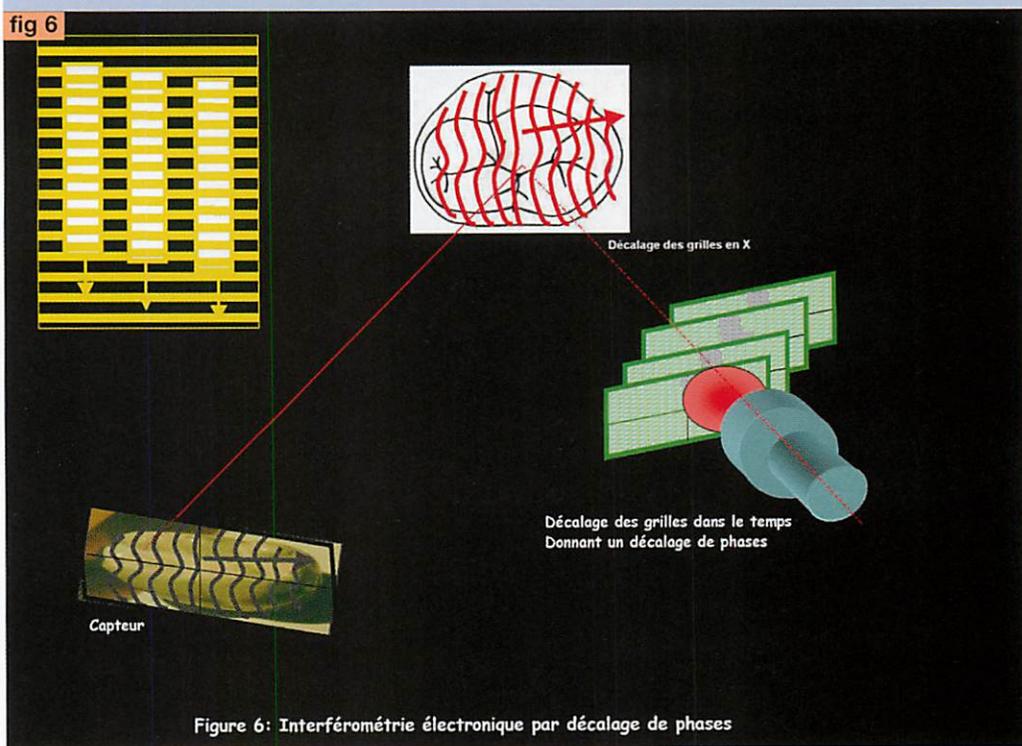
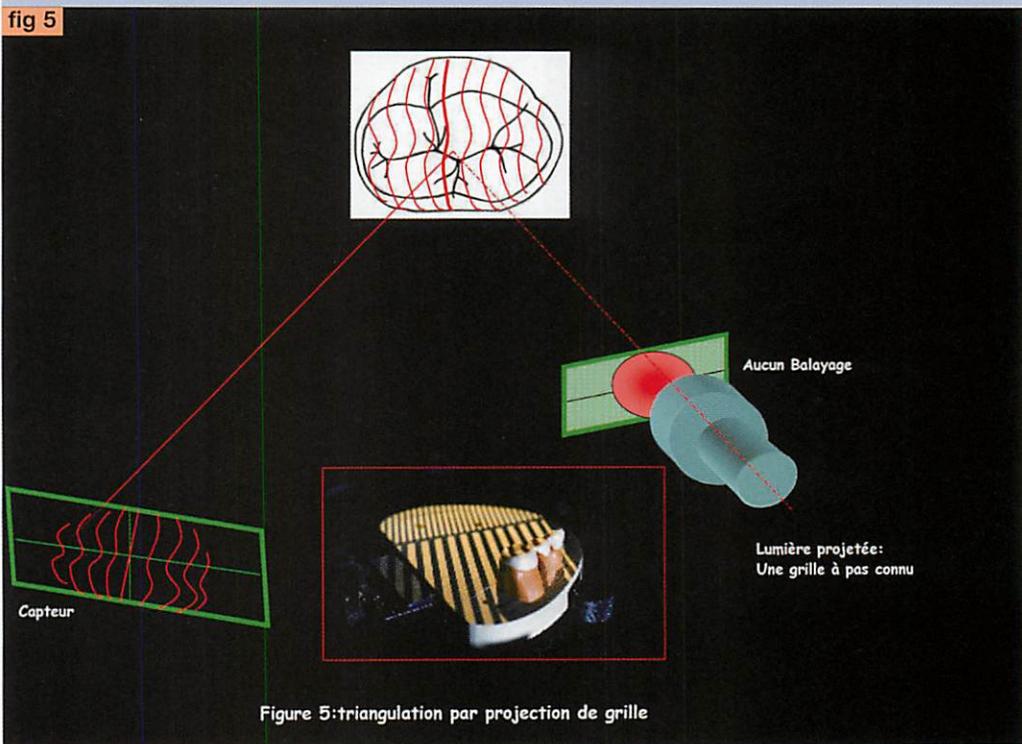
Figure 4: le caméras à balayage de ligne :3 shape (a), Cyrtina (b) , HintEls (c) et Ios (d)

Balayage laser d'ensembles de lignes (franges) lumineuses parallèles

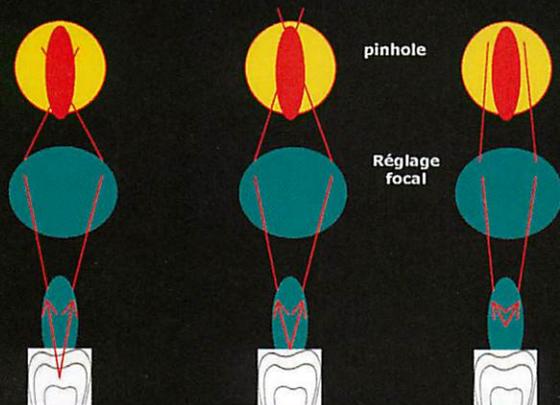
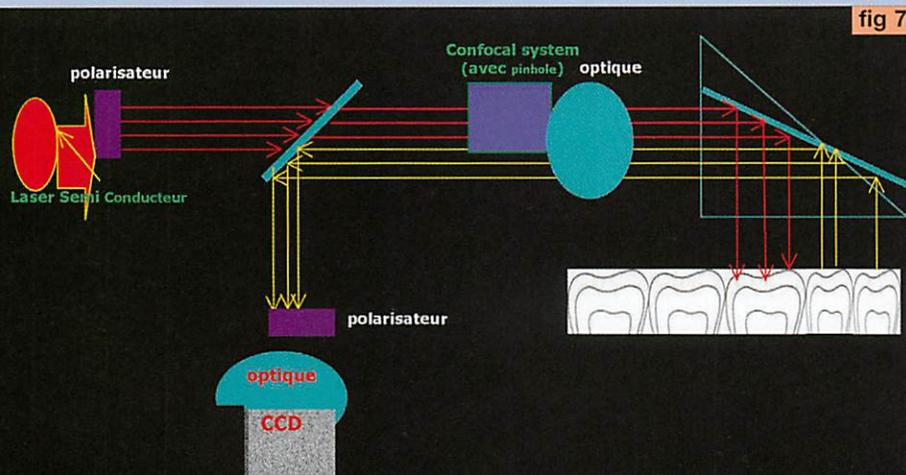
Il existe quelques variantes en développement à cette méthode de projection de lignes de profil. Certains systèmes à l'étude ne projettent pas seulement une ligne mais un ensemble de lignes parallèles identiques (figure 5) alors que d'autres projettent plusieurs ensembles de lignes parallèles au même moment sous des angles différents (travaux de G. Hausler). Le principe reste le même mais avec ces montages nous accélérons la procédure clinique et augmentons la précision.

Le décalage de phase en optique statique

Une variante intéressante est apportée par le Cerec. Il s'agit toujours de projeter un ensemble de lignes très rapprochées (entre 10 et 50 μm suivant les systèmes) mais de le faire d'un coup, sans balayage, puis, caméra toujours immobile, de déplacer (piézo) ce groupe de lignes très légèrement sur l'arcade (en dentisterie ce déplacement à une valeur de $\pi/2$) (figure 6). On appelle cette méthode la mesure par « décalage de phases ». Une vue 3D est construite à l'aide d'un minimum de 3 à 4 vues en grilles décalées. Il faut donc que le patient ne bouge pas pendant cette prise, mais ce n'est plus un problème aujourd'hui car les caméras intègrent extrêmement rapidement les images captées sur un CCD. Le praticien déplacera alors sa caméra et recommencera. Comme ce n'est pas un film, mais des vues coup par coup, on parle d'empreinte optique statique.



2. Les caméras endobuccales 3D et l'intensité de vol



le système Cadent/itéro ou concept intensité de vol



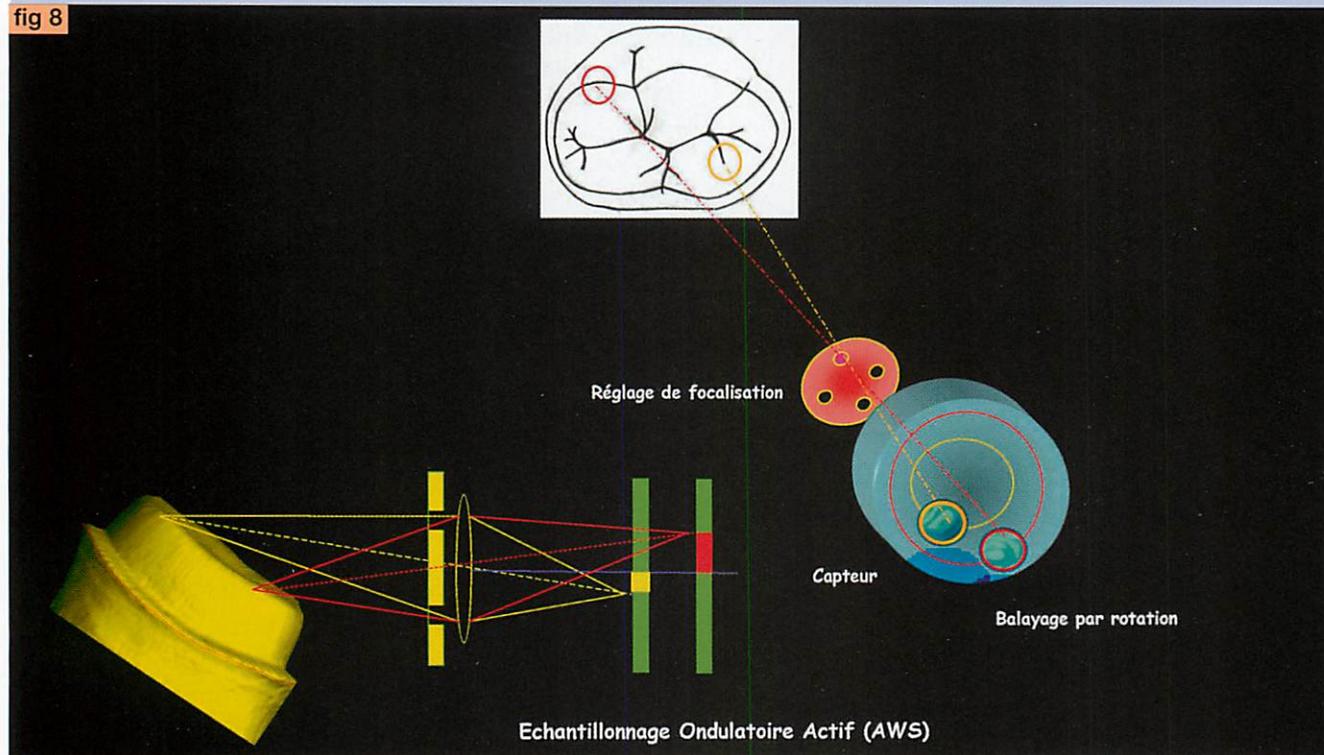
Seule dans sa catégorie, la société Cadent (figure 7) a évolué en passant du système en décalage de phases (développé par Hennson et Cerec) à celui que j'appellerai ici « d'intensité de vol ». Par ce nouveau choix, la caméra Itéro est indiscutablement originale. Le principe consiste à projeter une multitude de points (entre 100.000 et 300.000) sur l'arcade. Chacun de ces points va rebondir à la surface et revenir vers le CCD.

Un système de « lentilles absorbantes » déplace le plan focal, c'est-à-dire balaye la profondeur de champ, du point le plus bas (la gencive) au point le plus haut (les cuspidés). Si un point lumineux, revenant de la surface, se trouve très bien focalisé il sera puissant et traversera un « filtre sélectif des intensités » appelé polarisateur. Si ce n'est pas le cas, il sera « détruit ». C'est un peu comme lorsque, enfant, nous déplaçons notre loupe pour brûler une feuille : hors focal, la tache lumineuse est large et la puissance insuffisante pour brûler, dans le plan focal c'est l'inverse et la fumée s'échappe ... Ici, hors focal le point disparaît, alors que dans le plan focal il traverse le « filtre » qui est un orifice très fin appelé « Pinhole » et vient imprégner le CCD. Nous avons donc une sorte de coupure en tranche de l'arcade en fonction des intensités.

La méthode est rapide et précise. Les seuls points acceptés étant ceux de forte intensité, le coating, c'est-à-dire le recouvrement de poudre blanche ou poudrage, n'est pas nécessaire.

3. Le cas particulier du Lava COS

fig 8



“ *Le Lava Cos utilise le principe de l’AWS qui allie les avantages de la triangulation, de la focalisation/dé-focalisation.* ”

Le Lava Cos est un cas particulier. Première caméra d’empreinte optique dynamique en dentisterie, développée par le MIT de Boston, il utilise le principe de l’AWS (Active Wavefront Sampling) qui allie les avantages de la triangulation, de la focalisation/dé-focalisation des appareils télémétriques (Leica) et de l’axe de vision (presque) confondu à l’axe de projection, comme le revendique à juste titre la Conoscopie du nouveau scanner de table de Procera.

C’est un beau programme particulièrement efficace.

La caméra est belle et le principe adopté AWS lui permet d’être peu encombrante en bouche (figure 8).

Cela consiste à viser une très petite partie de l’arcade et de faire une mise au point de netteté sur cette petite zone. La zone étant petite, la profondeur de champ est

réduite, donc l’erreur en Z faible. Le calculateur mesure le déplacement des lentilles pour partir du point zéro au point de netteté.

Ce mouvement, le même que nous faisons avec nos appareils photo pour avoir une vue nette, indique au logiciel la distance entre le CCD et la petite surface enregistrée sur le CCD (d’où le principe appelé aussi focalisation/défocalisation).

Dans le Lava Cos, l’opération est plus complexe car c’est la position de l’image sur un disque tournant, en fonction de l’axe de visée qui donne la distance, mais le principe de base est strictement le même. Il suffit alors de balayer l’arcade, petite zone par petite zone, pour voir se construire progressivement le modèle virtuel. Nous avons bien une empreinte optique dynamique.

Quelques remarques de bon ton :

“ C’est la mort de la sur-empreinte, le rêve pour beaucoup ! ”

fig 9

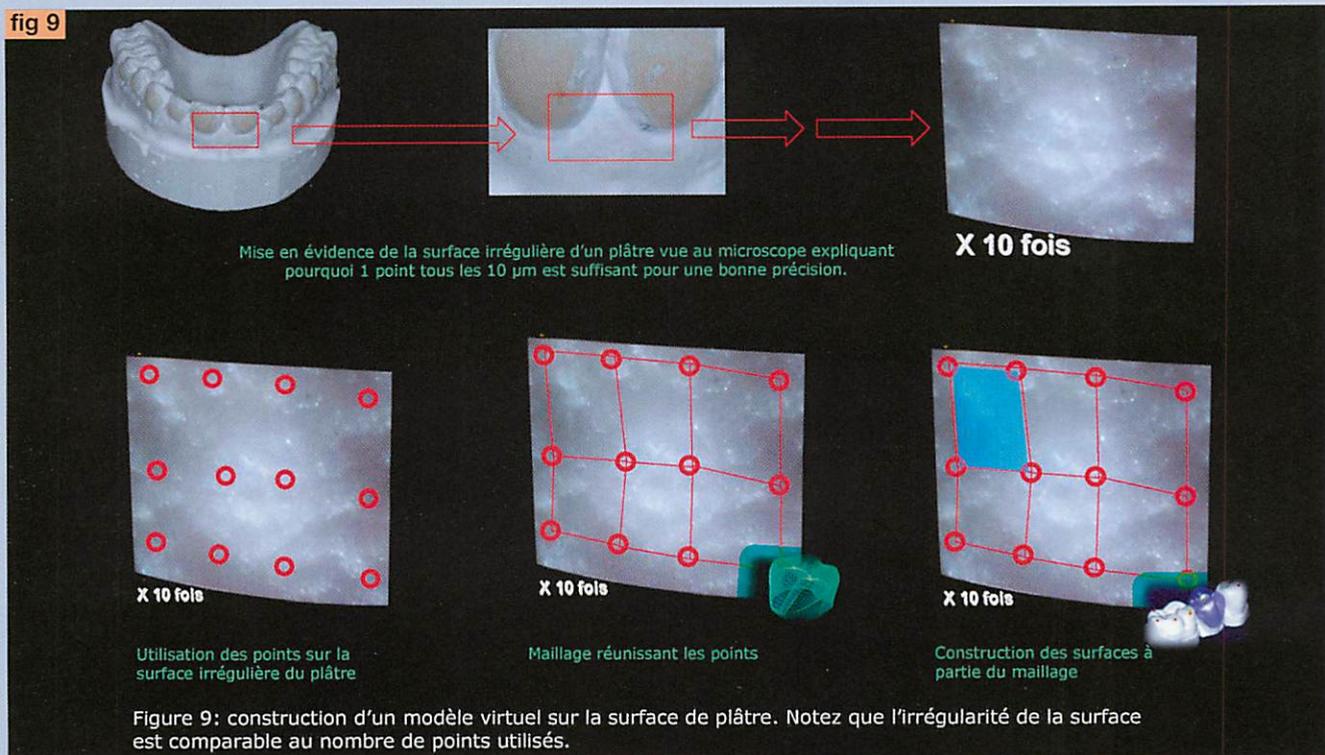


Figure 9: construction d'un modèle virtuel sur la surface de plâtre. Notez que l'irrégularité de la surface est comparable au nombre de points utilisés.

La précision de l'image à l'écran n'est pas la précision de l'empreinte (figure 9) : pour avoir rapidement une vue à l'écran et informer l'opérateur sur la qualité de son travail, la vue qui s'affiche en temps quasi réel est une vue simplifiée utilisant 1 point sur 3 (ou sur 5) pour sa modélisation. Cela a l'avantage d'aller très vite et est très difficilement discernable à l'œil. Le software de modélisation, lui, travaille sur la totalité des points.

Intérêt du poudrage

Le coating (poudrage) ne sert pas à empêcher les points lumineux projetés de rentrer dans la dent et limiter la précision. Heureusement et soyez rassuré ! Ceux qui rentrent dans la dent ne ressortent pas ou alors sont inexistantes car très peu puissantes par rapport aux points réfléchis. Le coating sert à la fois à limiter l'effet dévastateur des variations de couleurs (sauf en décalage de phases) dans une bouche (couronne métal, céramique, dents naturelles ...) mais surtout à favoriser le signal sur le bruit, c'est-à-dire faire en sorte que les parasites (de lumière, bruit électroniques...) soient très inférieurs à la visualisation des points, lignes ou grilles projetés et réfléchis par la dent. On peut limiter le coating en utilisant de la lumière bleue

car elle rend les dents plus crayeuses (voir nos dents dans une boîte de nuit !) mais les CCD sont moins sensibles à cette longueur d'onde. À l'inverse, ils sont très sensibles à la lumière rouge mais les points ont tendance à s'étaler. En réalité ce n'est pas important car les logiciels, par une opération d'itération (répétition) mathématique, retrouveront le centre du point et ne tiendront compte que de cette position centrale pour construire leurs surfaces.

Recalage automatique

Enfin, il est important de signaler que de nouveaux softwares, présentés dans le LavaCOS 3M en 2007, permettent de repositionner une nouvelle vue dans un flot d'anciens clichés. Ils procèdent par reconnaissance de certains éléments anatomiques numérisés présents dans les deux vues, anciennes et nouvelles. C'est fondamental car cela permet de poser la caméra et de la reprendre à tout moment pour compléter une vue qui serait imparfaite ou d'écarter un sulcus peu visible. C'est la mort de la sur-empreinte, le rêve pour beaucoup ! Cela permet aussi de corrélérer une arcade supérieure et une arcade inférieure (occlusion) pour une mise en articulateur virtuelle aujourd'hui statique et demain ... dynamique comme nous le faisons en 1987 avec l'Access Articulator !

Il nous reste à convertir ces informations analogiques en valeurs numériques

fig 10

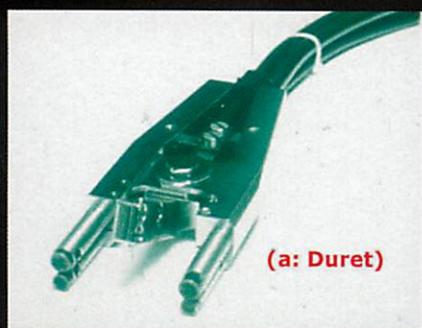


Figure 10: évolution des caméras endobuccales: sur 30 ans 1982 (a), 1985 (b), 1992 (c), 2007 (d), 2011 (e),

... Mais ceci est une autre histoire, non incluse dans le présent résumé.

Le flux lumineux sera transformé en information électrique car il videra plus ou moins les puits de potentiel (en fonction de son intensité) présents dans chaque pixel de la surface active du CCD. La quantité nécessaire d'électricité pour re-remplir ces puits et les ramener à leurs valeurs initiales nous dira si le pixel a reçu ou non de la lumière. C'est cette quantité (niveau de gris), ou ce choix de lumière reçue : oui/non (noir ou blanc), qui sera la valeur numérique retenue, base du traitement informatique. La boucle est bouclée, la conversion analogique (lumière) et numérique (chiffre) est faite : l'empreinte est devenue numérique.

Elle aura mis 40 ans pour cela ... (figure 10) ◆

Par François Duret

“ *Le flux lumineux sera transformé en information électrique ... L'empreinte est devenue numérique.* ”

Référence à lire : F. Duret, B. Pélissier : Différentes méthodes d'empreinte en CFAO dentaire, EMC (Elsevier Masson SAS, Paris) Médecine buccale, 28-740-R-10,2010.

Juillet/Août 2017

n° 367/368

Les dossiers de

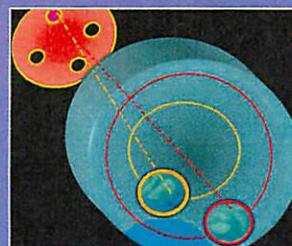
Technologie
DENTAIRE

ENQUÊTE

Activité 2016 des
labos, CAD/CAM et
Empreinte Numérique

L'EMPREINTE NUMÉRIQUE

Terminologie, Historique,
Fonctionnement et
Technologies actuelles
des caméras



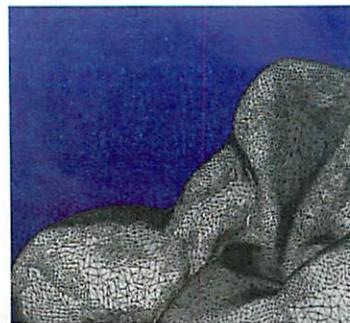
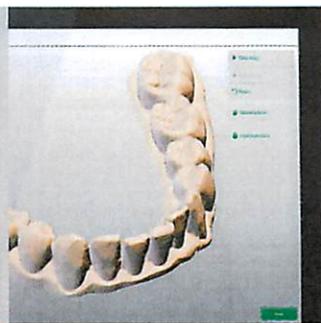
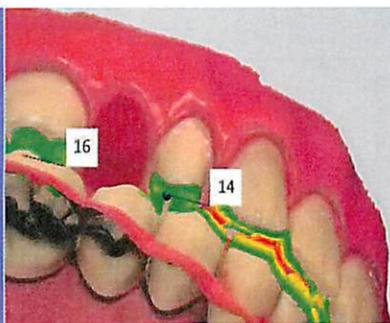
LES SYSTÈMES

Les différentes caméras
et logiciels de prise
d'empreinte digitale



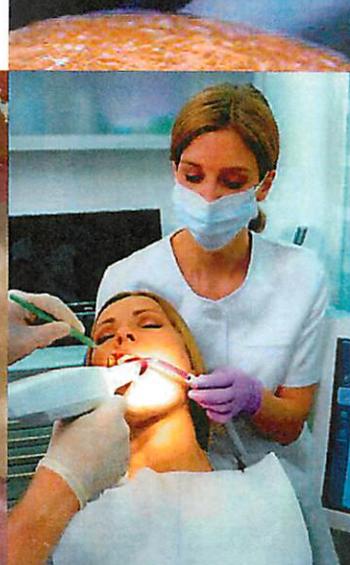
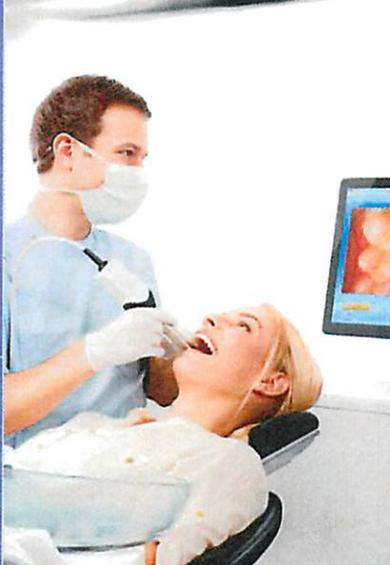
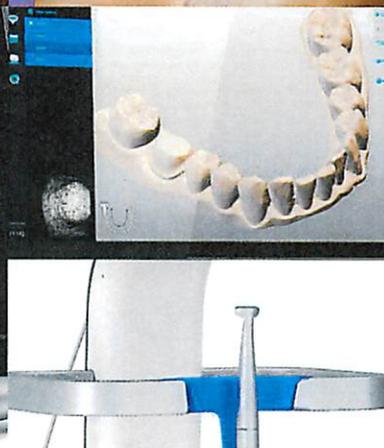
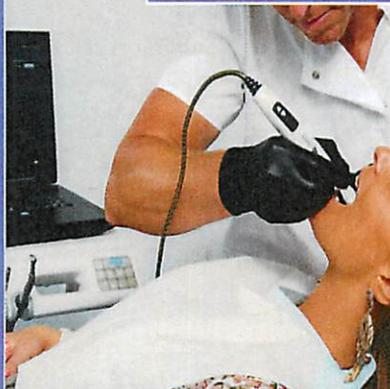
PROCÉDURE

Toutes les étapes de
prise d'empreinte
numérique au cabinet



**Dossier
SPÉCIAL**

Empreinte Numérique



*Tous les systèmes présents sur le marché
Comparatif des options et fonctions des logiciels d'empreinte*