

Tour
juin 1976

(1)

F. Duret

I

Analyse d'images holographiques dentaires en vue de la commande des systèmes automatiques

Actuellement la seule méthode utilisée en dentisterie pour reproduire une dent ou le maxillaire avec précision (200 à 500 μm) est l'empreinte négative à l'aide de matériaux plus ou moins élastiques, le positif étant constitué par la dent du patient. Cette méthode utilisée depuis plus de 300 ans n'a subit aucune modification fondamentale, les seuls progrès techniques apportés l'ayant été au niveau des pâtes d'empreintes. (Fig 1) (2)

En fait le véritable problème, c'est à dire la cause physique de l'imprécision de la mesure n'a jamais été abordée. En effet pour résoudre (réduire) cette question d'imprécision il faut diminuer les échanges énergétiques entre le système négatif, le système positif et les autres systèmes environnants, tout en diminuant les modifications d'énergie interne du système négatif. (Fig 2) (2)

Ceci revient à essayer de conserver l'enthalpie de l'ensemble considéré à une valeur fixe, ce qui n'est pas réalisé actuellement dans cette méthode car l'énergie libre est modifiée lors de la mise en contact du produit de prise d'empreinte avec les autres systèmes et l'entropie du système négatif est modifiée lors de la fixation du moulage (modification moléculaire).

Il faut donc, pour éviter de modifier l'enthalpie, utiliser un système ayant peu d'échanges avec les systèmes environnants et ne subissant pas de modification de structure.

Plus un système est simple, moins il est sensible aux variations d'énergie libre et de l'entropie, c'est pourquoi le quantum énergétique nous semble convenir le mieux.

Nous avons choisi comme système négatif l'onde laser et son interférence afin de conserver son aspect tridimensionnel à notre image.

Ainsi pour mesurer notre objet et faire une étude de forme nous projettons un faisceau (laser) sur la dent. Celui-ci après avoir frappé la cible revient sur une plaque holographique en interférence avec une onde de référence. Cette dernière onde ayant pour but de reconstituer l'image virtuelle à la révélation. Elle permet également la mesure de la distance parcourue par le faisceau réfléchi par comparaison des intensités lumineuses. (?)

Un tel rayonnement doit être constitué de rayons rigoureusement parallèles, et les ondes le constituant doivent être en phase , d'autre part le faisceau doit être très fin pour faciliter le balayage de la cible. C'est pourquoi nous avons choisi le rayonnement d'un laser à gaz à émission continue .

L'utilisation en bouche, chez l'homme , et les risques de réactions entre le rayonnement et les tissus vivants notamment la gencive, les yeux et le cerveau nous ont conduit à utiliser un laser de faible puissance (2W) émettant à 450 nm (2 thèse)(1,5,3)

L'onde réfléchie ne porte que la face visible de la dent aussi pour appréhender la totalité du volume nous nous proposons d'associer une deuxième onde balayant l'objet sous un angle de 180° par rapport à la première. (fig 3 et 4)

L'hologramme comportera alors la totalité du volume. Un opérateur, ou un système optique d'analyse approprié, pour avoir la totalité de l'objet devra se déplacer latéralement. Il observera l'effet de parallaxe caractéristique de l'image tridimensionnelle. Les franges sombres arrêtent l'onde de reconstitution, c'est à dire l'onde de référence, les franges claires la laissant passer . Il y a diffraction et interférence ; l'hologramme apparaît comme une onde fixée en cours de route. (4,7,11)

A ce niveau deux modes d'analyse peuvent être pratiqués Le plus simple consiste à projeter sur un écran l'hologram-

me , qui ici n'aura que deux dimensions, afin de permettre une étude détaillée de la dent. Ce procédé est intéressant car il permet de contrôler à tout moment la qualité du travail du praticien. Le deuxième nécessite une analyse de notre hologramme par un système analogique numérique à l'aide du balayage de la plaque par un tube analyseur. (5)

Une plaque holographique moyenne mesure 9 cm sur 12 cm et contient jusqu'à 10^{10} bits en mémoire ($24 \cdot 10^4$ éléments horizontaux et $18 \cdot 10^4$ verticaux) soit une résolution de 3000 mm^{-1} . Un balayage de 40 000 lignes peut nous donner une résolution de $5 \cdot 10^{-3} \text{ mm}$ soit environ 5μ de précision. L'analyse de l'unité élémentaire ne dépasse pas $1 \cdot 10^{-5}$ secondes donc quelques minutes suffisent pour obtenir une précision de 5μ (le balayage peut être lent) (3,12)

La qualité de cette analyse est fonction du niveau d'éclairage quidoit être adapté à la sensibilité du détecteur, de même que la longueur d'onde utilisée doit être adaptée à la sensibilité spécifique tout en restant biologiquement acceptable et que les parasites soient supprimés par l'adjonction de filtres. (6)

Ces hautes précisions peuvent être apportées par des tubes d'analyse ayant des couches de 10μ à 20μ et des dessus d'aiguillettes de $0,1$ à 1μ (vidicon et plumbicon)

Nous transformons sans perdre trop de précision notre image analogique en tension mais le champ d'application du système serait trop faible aussi préfère-t-on travailler en numérique; d'autre part l'intérêt de passer en numérique est de permettre de stocker les données sans qu'aucun facteur ne puisse les modifier. (fig 5) (13)

Ces données devraient nous permettre la commande d'une machine outil. Il s'agit d'un procédé d'automatisation permettant de conduire un organe mécanique mobile à une position déterminée par un ordre. Cette position peut être obtenue par déplacement linéaire ou angulaire selon le degré de liberté du mobile(l'ordre est délivré en coordonnées numériques, cartésiennes ou polaires). (3)

Une bande programme supporte la traduction en langage machine. Les côtes chiffrées de l'hologramme donnent ces ordres. Ils sont transmis à divers mécanismes de gervo-commandes qui les distribueront jusqu'au dispositif de guidage (x, y, z) pour positionner la tête de l'instrument. (fig 6) (8)

Si nous effectuons une lecture de I_{cm} sur I_{cm} (une dent) nous devons avoir en coordonnée 10^4 bits d'information sur une précision de 1μ . L'avance du chariot et son déplacement latéral étant des facteurs constants, les données de 1μ sont parfaitement réalisables sur la plan technique. A ces données devront s'ajouter les données propres à l'appareil telles que (à apparition sporadique)

- le numéro de l'outil
- la séquence de fraisage
- la vitesse de la broche
- la côte d'avance-retour rapide
- la côte d'arrosage
- la fin du programme
- le facteur de choix du métal pour la pièce à usiner

Les coordonnées seront traduites de manière relative ($M_1 \rightsquigarrow M_2$ soit $\Delta x = x_2 - x_1$) plutôt que de manière absolue. Il est utile à ce niveau de faire remarquer qu'une machine à commande numérique explore en rafale les informations reçues contenues dans la bande programme (10 000 à 50 000 lignes/seconde) pour les stocker et les répartir correctement aux organes responsables de l'action finale. (8)(z)

Si nous tenons simplement à reproduire l'objet holographié il n'est pas nécessaire de faire de modification du programme d'analyse. Il nous suffira de sculpter une pièce brute à l'aide du programme établi précédemment. L'intérêt est évidemment discutable mais quelque soit l'analyse employée, la technique conduira au choix de machines différentes:

- l'électro-érosion: pour nous un générateur à impulsion et une électrode très fine (10μ possible de précision)
- l'électro-chimie: utilisable pour la rectification et le perçage.
- l'électro-formage: dépôt sur une forme maîtresse. Cela peut être l'application secondaire de notre taille sans modifi-

cation de programme. L'exemple classique est la technique par dépôt électro galvanique.

- l'usinage chimique: intéressant pour la réalisation d'appareils amovibles par la technique du masque.

- l'ultra son, la haute énergie et le laser pour la finition , le nettoyage et les soudures.

- le fraisage qui est le procédé le plus logique et le plus au point: ce sera soit l'outil qui sera mobile soit ce sera l'instrument. (fig. 7)

Ces méthodes de travail de la pièce prothétique peuvent être utilisées après modification du programme d'analyse afin d'y trouver un plus grand champ d'application. Plutôt que de décrire les voies mathématiques suivies nous donnerons un exemple: la réalisation d'une couronne sur la première molaire inférieure gauche (36) (10)

Une couronne a deux caractéristiques, elle s'ajuste parfaitement à la dent et à la gencive et s'adapte sur le plan anatomique à l'aspect général de la bouche.(usure et grosseur)

Si ce premier caractère peut être considéré comme théorique , le second nécessite une analyse de la dent mais aussi des autres dents afin de tenter de résoudre le problème de l'occlusion. (2)

Deux cas peuvent se présenter: la dent à couronner présente une forme correcte, ou bien elle est très abimée. Dans le premier cas il suffit de prendre deux hologrammes, l'un avant la taille de la dent et l'autre après. L'hologramme avant la taille permettra de commander la sculpture externe sur la pièce de métal ,le deuxième hologramme après correction par un facteur plus et transformation du négatif en positif servant au façonnage de l'intérieur de la couronne. Le facteur plus nous permet de prévoir la place du ciment de scellement.

Dans le deuxième cas (dent abimée) le seul moyen de réaliser la taille extérieure est que l'on dispose en mémoire d'un codage de dent théorique correspondant à la dent que l'on doit couronner.

Le premier temps sera l'analyse de dents autres que la 36 existant dans la bouche (et notamment la 46 ou molaire inf. droite pour des raisons de symétrie) afin d'établir un coefficient d'usure et de forme générale par rapport aux dents théoriques en mémoire. (fig 5)

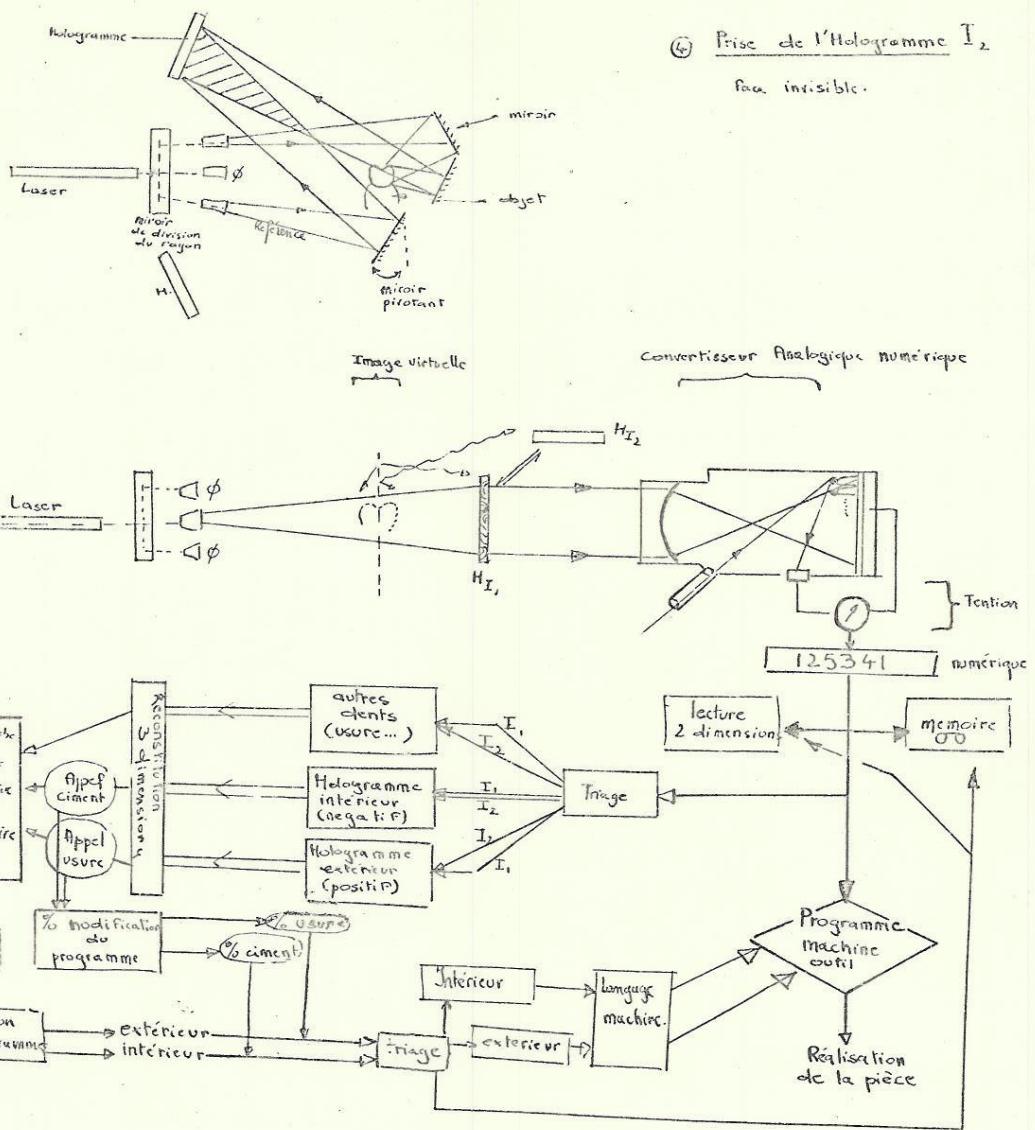
Avant d'effectuer la sculpture extérieure il faudra faire le deuxième hologramme lorsque la dent sera préparée à la prothèse puis en comparant les données choisies(forme du collet ou hauteur du moignon ...) nous sortirons en programme une dent théorique adaptée aux valeurs de la 36. Ce programme avant d'être modifié pour passer la bande de commande de la machine outil passera à travers le rapport correctif établi grâce aux autres dents. Nous ferons une sculpture biologiquement logique avec la bouche du patient. Si la taille extérieure a nécessité toute étude, la taille intérieure est identique en tout point au premier cas. (2)

Des essais seront faits pour savoir si une onde qui ne rebondit pas sur la peau peut rebondir sur l'os: ceci aurait le gros avantage de nous permettre la réalisation par méthode non sanglante d'attelle ou d'implant. (fig 8) (2)

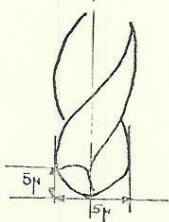
le système envisagé est parfaitement réalisable . Nous utilisons des méthodes de mesures très fines et des supports d'information très stables et qui ne pourront que l'être de plus en plus. D'autre part les possibilités et les facilités de travail sont très importantes aussi avons nous grand espoir dans l'avenir de cette méthode.

adresse de l'auteur:

rue Lamartine
Le Grand Lempes 38 690

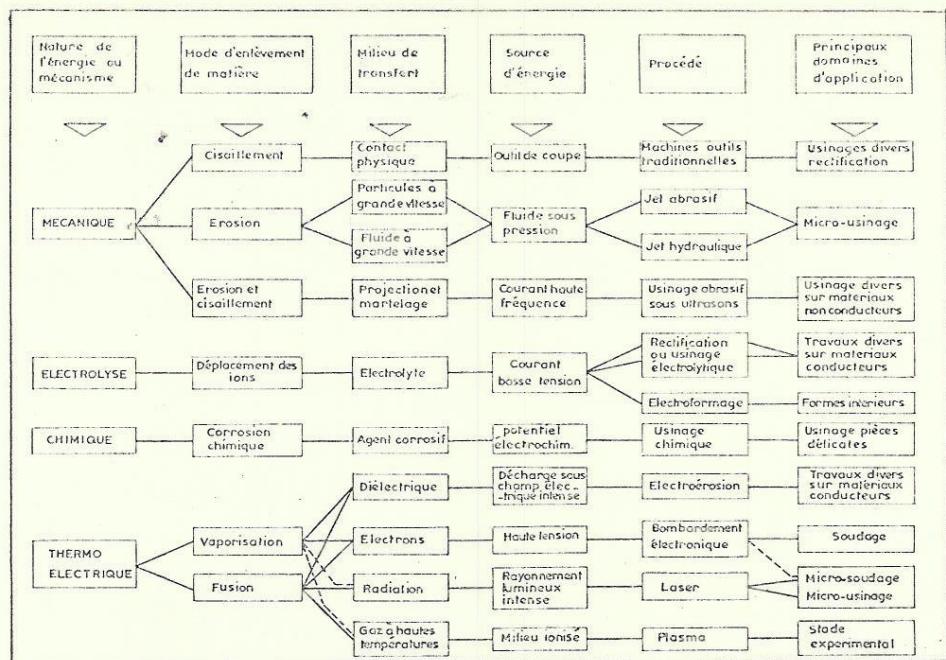


⑤ Programme de commande de machine outil

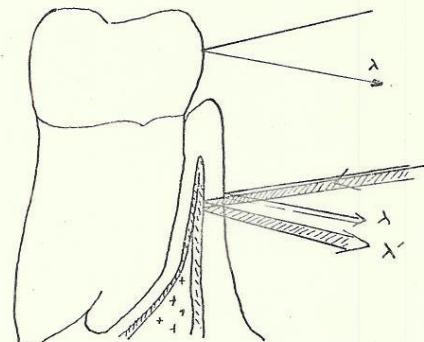


⑥ angle d'attaque de la fraise

4. Georges and Storke , Lensless photography , Int. science and technologie, May 1965, p 52 à 60
5. Goldman, Dermatologique manifestation, Feder. Proc U.S.A 24 , (I) part III , 592-3 , 1965
6. Gordon and Henderson , Applications of Holography in industry, Electro optic, dec. 1971
7. Leith, Reconstitution Waves and comm. théorie J. of Soc. Ann. 52 pl123 , 1962
8. Marty , Usinage non conventionnel , Masson ed. 1972
9. Ronds, Laser radiation on culture of tissues , Ann. N.Y. Ac. Sc. 122 , (2) 713-27 , 1965
10. Stern, Laser en dentisterie, Gaz Med. Frs. 74, (10) 1873-80 , 1967
- II. Sum El , Uses For hologramme, Int. science and technologie Nov. 1967 p50 à59
12. Symposium de Besançon de 1970 sur l'holographie
13. Vienot, Transmission d'informations holographiques Annex Rapport DRME n°I 1970



④ Differents usinages possibles



⑤ Recherche du contour osseux avec λ'

Bibliographie:

1. Dumas, Pérez. Effets biol. du R. laser, C.R.Biol Frs 158, (II) 2111-3 1965
2. Duret. Emprinte optique, thèse 2^e cycle dentaire n° 231, 1974
3. Fournier, thèse 3^e cycle Besançon, 1970

Analysis of dental holographic images for the command of automatic systems

Currently, the only method used in dentistry to reproduce a tooth or the maxillary with precision (200 to 500 µm) is the negative impression method with the help of more or less elastic materials, the patient's tooth being the positive. This method used for more than 300 years hasn't had any fundamental modification; the only technical progress was brought on the impression paste (Fig 1) (2).

En fact, the real problem, that is to say the physical cause of the measurement's imprecision, was never approached. In order to resolve (reduce) this question of imprecision we must decrease the energetic exchanges between the negative system, the positive system and the other environing systems, while decreasing the internal energy modifications of the negative system (Fig 2) (2).

This is the same as trying to keep the total's enthalpy considered like a fixed value, which isn't currently done in this method as the free energy is modified during the contact phase between the impression taking program with the other systems and the negative system's entropy is modified during the fixation of the mould (molecular modification).

So in order to not modify the enthalpy, we must use a system which has few exchanges with the environing systems and which doesn't suffer any structure modification).

The simpler a system is, the less sensitive it is to free energy variations and to entropy, this is why energetic quantum seem the most convenient.

We have chosen for negative system the laser wave and its interference in order to keep the tri dimensional aspect of our image.

Thus, to measure our object and carry out a shape study, we project a ray (laser) on the tooth. After having hit the target, it comes back by interference to a holographic plate with a reference wave. This last wave has the aim of reconstituting the virtual image during the revelation. It also enables the measurement of the distance travelled by the ray reflected by comparison of the light intensities (7).

Such a radiation must be constituted of rigorously parallel rays and the waves which constitute it must be in phase, also, the ray must be very fine to facilitate the sweeping of the goal. This is why we chose radiation from a gas laser with continuous emission.

The in mouth use, for a human being, and the risks between the radiation and the living tissues, specifically the gum, eyes and brain have led us to use a lower power laser (2W) emitting at 450nm (2 thesis) (1, 5, 9).

The reflected wave only hits the visible surface of the tooth so to apprehend the totality of the volume we propose to associate a second wave sweeping the object under an angle of more or less 180° compared to the first (Fig 3 et4).

The hologram will then have the total volume. An operator or an appropriate optical system will have to be laterally mobile to have the totality of the object. It will observe the effect of parallax which is characteristic of tri dimensional imagery. The dark fringes stop the reconstitution wave, that is to say the reference wave; the light fringes let them pass. There is diffraction and interference; the hologram appears as a wave fixed on the way (4, 7, 11).

At this level, 2 analysis modes can be used. The simplest consists of projecting on a screen the hologram, which will only have two dimensions here, in order to enable a detailed study of the tooth. This process is interesting as it enables the control at any time of the quality of the practitioner's work. The second needs an analysis of our hologram with an analogue digital system with the help of a sweeping of the plate by an analysing tube (5).

The average holographic plate measures 9 cm by 12 cm and contains up to 10^{10} bits of memory (24.10^4 horizontal elements and 18.10^4 vertical ones), that is to say a 3000mm^{-1} resolution. A sweeping of 40000 lines can give a 510^{-3} mm resolution, that is to say a precision of about 5μ . The analysis of the elementary unit doesn't go over 1.10^{-5} seconds so a few minutes are enough to get a 5μ precision (the sweeping can be slow) (3, 12).

The quality of this analysis is a function of the level of lighting which must be adapted to the sensitivity of the detector, the used wavelength must also be adapted to the specific sensitivity while staying biologically acceptable and the parasites must be removed by the adjunction of filters (6).

These high precisions can be brought by analysis tubes which have 10^* to 20μ layers and needles of 0.1 to 1μ (vidicon and plumbicon).

We transform without losing too much precision our tension analogue image but the application field of the system would be too low so we prefer working digitally. The interest of going digital is to stock data without any possibility of modification (Fig 5) (13).

This data should enable the command of a machine tool. It is about an automatic process enabling the command of a mobile mechanical organ to a position determined by an order. This position can be obtained by linear or angular movement depending on the freedom degree of the mobile (the order is delivered digitally, Cartesian or polar) (8).

A program band supports the translation in machine language. The numerical measurements of the hologram give these orders. They are transmitted to several servo-order mechanisms which will distribute them to the guiding device (x, y, z) to position the head of the tool (Fig 6) (8).

If we do a reading of 1cm by 1cm (a tooth), we should have for coordinates 10^4 bits of information with a precision of 1μ . The lateral movement of the chariot is one of the constant factors, the 1μ data are perfectly realisable from a technical point of view. To this data we will add the data of the device such as (sporadically)

- number of tool
- drilling sequence
- brooch speed
- quick forward and back measurement
- spraying measurement
- end of program
- choice of metal factor for the manufactured piece.

The coordinates are translated and a relative rather than absolute manner ($M_1 \rightarrow M_2$ which is $\Delta x = x_2 - x_1$). It is useful at this level to notice that digital command device explores by gusts the data received from the program band (10000 to 50000 lines/second) to stock them and spread them correctly to the organs responsible for the final action (8) (2).

If we only want to reproduce the holographed object, it isn't necessary to modify the analysis program. We only need to sculpt a rough piece with the program previously established. The interest is of course debatable but whatever the analysis used, the technique will lead to a choice of different machines:

- electro erosion: for us, an impulsion generator and a very fine electrode (possible 10 μ precision)
- electro chemistry: usable for correction and drilling
- electro forming: deposit on master piece. It can be a secondary application of our sculpture without modification of the program. The classic example is the electro galvanic depot technique.
- Chemical manufacturing: interesting for the realisation of removable devices with the mask technique
 - ultra sound, high energy and laser for the finishing touches and the melding
 - drilling which is the most logical process: either the tool or the instrument will be mobile (Fig 7).

These methods of working of the prosthetic piece can be used after modification of the analysis program in order to find a greater application field. Instead of describing the followed mathematical ways we will give an example: the realisation of a crown on the first left inferior molar (36) (10).

A crown has two characteristics, it is perfectly fitted to the tooth and the gum and adapts anatomically to the general aspect of the mouth (size).

If the first character can be considered as theoretical, the second needs an analysis of the tooth and also of the other teeth in order to resolve the occlusion problem (2).

2 cases can appear: the tooth to be crowned has a correct shape or it is very worn. In the first case, all you need to do is take two holograms, one before shaping the tooth and the other one after. The hologram before the shaping will enable the command of the external sculpture of the metal piece, the second hologram after correction by plus factor and the transformation of the negative into positive enabling the manufacture of the inside of the crown. The plus factor enables to preview the place of the cement. In the second case (worn tooth), the only way to realise an exterior shape is to use the memory of a code for a theoretical tooth corresponding to the tooth to be crowned.

The first action will be the analysis of teeth other than the 36th inside the mouth (and notably the 46th or the right inferior molar for symmetry reasons) in order to establish a wear coefficient and a general shape compared with the theoretical teeth we have memorized (Fig 5).

Before sculpting the exterior, we will take a second hologram when the tooth is prepared with the prosthesis then by comparing the chosen data (shape of the collet, height of the tip...) we will find a program of a theoretical tooth adapted to the values of the 36th. This program, before being modified to go through the command band of the machine tool will go through the corrective report established with the other teeth. We will sculpt biologically with the patient's mouth. If the exterior shaping necessitates all of this complementary study, the interior shaping is identical to the first case (2).

Trials will be done to know if this wave doesn't bounce on the skin and can bounce on the bones: this will have the advantage of enabling the realisation of a non bloody method of implants (Fig 8) (2).

The envisaged system is perfectly doable. We use very fine measurement methods and very stable data supports which can only become finer and more stable. Possibilities and facilities for work are very important, so we have a great hope for the future of this method.