



N. Lebon^a, L. Tapie^b, F. Duret^c, J-P. Attal^d

Understanding dental CAD/CAM for restorations – dental milling machines from a mechanical engineering viewpoint. Part A: chairside milling machines

**Comprendre la CFAO dentaire pour les restaurations prothétiques –
Machines d'usinage dentaires vue de l'ingénierie mécanique.
Partie A: Machines de fraisage de cabinet**

Résumé

Les machines de fraisage dentaire sont des équipements fondamentaux dans la chaîne CFAO dentaire. Ainsi, de nos jours les machines-outils à commande numérique (MOCN) dentaires sont commercialisées pour les cabinets dentaires (solution chairside). Cet article apporte une analyse du point de vue de l'ingénierie mécanique des MOCN dentaires, dans le but d'aider les dentistes à comprendre l'implication de cette technologie dans la pratique de la dentisterie numérique. Dans une première partie, des concepts techniques associés aux MOCN sont décrits d'un point de vue de l'ingénierie mécanique. Les critères technico-économiques de quatre MOCN de fraisage dentaires disponibles sur le marché sont étudiés. Les critères techniques sont axés sur les capacités des technologies embarquées.

Abstract

The dental milling machine is an important device in the dental CAD/CAM chain. Nowadays, dental numerical controlled (NC) milling machines are available for dental surgeries (chairside solution). This article provides a mechanical engineering approach to NC milling machines to help dentists understand the involvement of technology in digital dentistry practice. First, some technical concepts and definitions associated with NC milling machines are described from a mechanical engineering viewpoint. The technical and economic criteria of four chairside dental NC milling machines that are available on the market are then described. The technical criteria are focused on the capacities of the embedded technologies of these milling machines to mill both prosthetic materials and types of shape restor-

a Nicolas Lebon, PhD, Student in Mechanical Engineering
b Dr. Laurent Tapie, PhD in Mechanical Engineering
c Prof. Francois Duret, DDS, PhD in Odontologic Sciences, Château de Tarailhan, 11560 Fleury d'Aude, France
d Dr. Jean-Pierre Attal, DDS, PhD in Odontologic Sciences

a and b Department of Mechanical Engineering, Paris 13 University, Sorbonne Paris Cité, Saint Denis, France
and Department of Biomaterials, URB2i, Faculty of Dental Surgery, Paris Descartes, Sorbonne Paris Cité, EA4462, Montrouge, France
d Department of Biomaterials, URB2i, Faculty of Dental Surgery, Paris Descartes, Sorbonne Paris Cité, EA4462, Montrouge, France
and Dental Department, Charles-Foix Hospital, AP-HP, Ivry-sur-Seine, France

ations. The economic criteria are focused on investment costs and interoperability with third-party software. The clinical relevance of the technology is assessed in terms of the accuracy and integrity of the restoration.

Keywords: dental milling, CAD/CAM, surface integrity, Cerec, Lyra, E4D, Carestream, Planmeca

Introduction

As computer science technology has become increasingly widespread over the past 40 years, it is now commonplace to employ fully digital computer-aided design and manufacturing (CAD/CAM) processes for creating inlays, crowns, fixed partial dentures, implant abutments, and other dental prostheses. The digital CAD/CAM chain is derived from the manufacturing process used to produce industrial products in the automotive, aerospace, and precision mechanics industries, and was introduced in the 1970s by Dr François Duret.^{1,2}

Since then, CAD/CAM has earned the trust of many practitioners, and even patients. Digital technology and CAD/CAM practice is considered to provide prosthesis quality in terms of esthetics and durability.³ CAD/CAM biomaterial blocks are fabricated and pressed in a reproducible manner, i.e., they offer higher quality than handmade blocks.⁴ Alt et al showed that using the same materials, a temporary restoration milled by CAD/CAM has better mechanical strength compared to a restoration cast by traditional manufacturing.⁵ Davidowitz and Kotick considered that the practice of dental CAD/CAM saves time and includes the possibility for the patient to leave after one appointment, with a final tooth prosthesis.⁶ Richard van Noort asserted that digital dentistry is the future of dental restoration practice.⁷

Despite the attractions of CAD/CAM technology, the dentist still needs to understand the digital workflow^{8,9} and evaluate the clinical relevance of the machining technology for office milling (chairside). Chairside CAD/CAM is performed in one appointment in the practitioner's office. The dentist invests in a milling machine. The efficiency and cost of the milling technology chosen can vary. Milling machine efficiency should be evaluated depending on the capacity of processing materials, which provide prosthesis integrity (anatomic detail, low dental plaque retention, good adhesion, lifetime), and depending on economy (price and manufacturing delay).¹⁰⁻¹⁴

quées à usiner des formes et matériaux prothétiques de restaurations. Les critères économiques sont orientés sur le coût d'investissement et l'interopérabilité de la machine avec un logiciel tiers. Dans un second temps, l'implication clinique des technologies est discutée au travers de l'exac-titude et de l'intégrité de la restauration obtenue.

Mots clefs: *fraisage dentaire, CFAO, intégrité de surface, Cerec, Lyra, E4D, Carestream, Planmeca*

Introduction

L'informatique s'étant largement démocratisée ces quatre dernières décennies, il est devenu courant d'employer un processus de conception et fabrication assistées par ordinateur (CFAO) pour réaliser des inlays, couronnes, prothèses partielles fixes, piliers implantaires, et autres types de prothèses dentaires. La chaîne numérique de CFAO dentaire est dérivée des secteurs industriels comme l'automobile, l'aéronautique, l'industrie mécanique de précision, et a été introduite par le Dr François Duret dans les années 1970.¹⁻² Depuis, la CFAO a gagné la confiance de beaucoup de praticiens, et même de patients. L'utilisation des technologies numériques et de la CFAO est considérée comme pouvant fournir des prothèses de qualité en termes d'esthétique et de longévité.³ La fabrication et le pressage des blocs de biomatériaux dédiés à la CFAO est reproductive, i.e. ils offrent une qualité supérieure comparée aux blocs réalisés manuellement.⁴ Alt et al. ont montré qu'avec le même matériau prothétique, une restauration temporaire obtenue par CFAO possède une meilleure tenue mécanique comparée à une restauration coulée par procédé traditionnel.⁵ Davidowitz et al. considèrent que la pratique de la CFAO dentaire génère un gain de temps, tout en permettant au patient de partir avec sa prothèse dentaire définitive en une seule séance.⁶ Richard Van Noort affirme même que le futur de la pratique de la dentisterie restauratrice est numérique.⁷

Malgré l'enthousiasme envers la CFAO, le dentiste doit comprendre le flux numérique⁸⁻⁹ et évaluer les implications cliniques de cette technologie d'usinage en cabinet. La CFAO au fauteuil est réalisée en un seul rendez-vous au cabinet du praticien. Les praticiens investissent dans des machines de fraisage sans savoir si la technologie choisie est plus ou moins efficace et onéreuse. L'efficacité des machines de fraisage peut être évaluée au travers de

leurs capacités à usiner les matériaux, lesquelles confèrent l'intégrité de la prothèse (détail anatomique, faible rétention de la plaque dentaire, bonne adhésion, durée de vie) et les aspects économiques (coût et délais de fabrication).¹⁰⁻¹⁴

L'analyse de la technologie des machines-outils peut être abordée conjointement avec les biomatériaux prothétiques accessibles (composites, céramiques, et hybrides) et les formes prothétiques usinables (couronnes, facettes, inlays, onlays, bridges, etc.).¹⁵⁻¹⁶

Le but de cet article est de fournir aux dentistes une meilleure compréhension de l'impact de la technologie des machines de fraisage numériques sur la dentisterie numérique. Les concepts techniques associés aux MOCN sont décrits vue de l'ingénierie mécanique. Ces concepts techniques sont illustrés et discutés au travers de comparaisons de MOCN dentaire disponibles dans le commerce et destinées au cabinet.

Concepts et Définitions

Plusieurs définitions et concepts ont besoin d'être expliqués avant d'aborder les machines-outils.

Machine-outil

Une machine-outil est un équipement motorisé qui sous-traite de la matière à une pièce, créant ainsi des copeaux. La figure 1 donne la structure schématique d'une machine-outil en cours d'usinage. La partie principale de la machine-outil est son bâti (structure). Des axes y sont ajoutés pour créer le mouvement entre l'outil et la pièce, i.e. le mouvement d'avance. Les outils sont maintenus en broche par un porte outil. La rotation de l'outil génère le mouvement de coupe. La machine-outil est aussi équipée d'un porte-pièce immobilisant la pièce à usiner.

Commande numérique informatisée

D'après la norme ISO 2806¹⁷, une commande numérique (CN) est un dispositif de commande automatique d'un processus réalisé par un équipement qui utilise des données numériques introduites pendant que l'opération d'usinage est en cours. Aujourd'hui les ordinateurs jouent un rôle primordial dans la plupart des commandes numériques, devenant ainsi des commandes numériques informatisées (CNC).

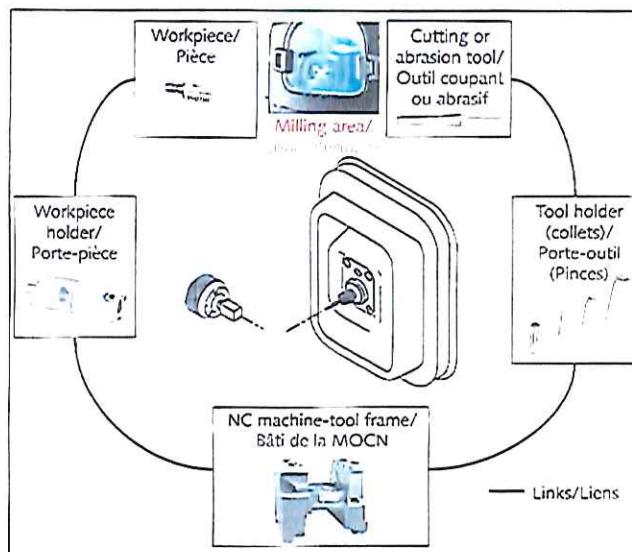


Fig 1 Schematic structure of machine tools when milling.

Fig. 1 Structure schématique d'une machine en cours d'usinage.

Milling machine technology should also be considered for the purpose of milling the prosthetic biomaterials (composites, ceramics, and hybrids) and the type of restoration shapes (crowns, veneers, inlays, onlays, bridges, etc.).^{15,16}

The aim of this article is to give dentists a better understanding of the involvement of numerical controlled (NC) milling machine technology in digital dentistry. The technical concepts associated with NC milling machines are described from a mechanical engineering viewpoint. These technical concepts are illustrated and discussed through comparisons of chairside dental NC milling machines that are available on the market.

Concepts and definitions

Several definitions and concepts are explained in this section.

Machine tool

A machine tool is a power-driven instrument that removes material from a workpiece, thereby creating chips. Figure 1 gives the schematic structure of machine tools when milling. The main part of the machine tool is its frame (skeleton). Axes are added to generate motion between the tool and the workpiece, ie, the feed rate motion. The tools are held on the spin-

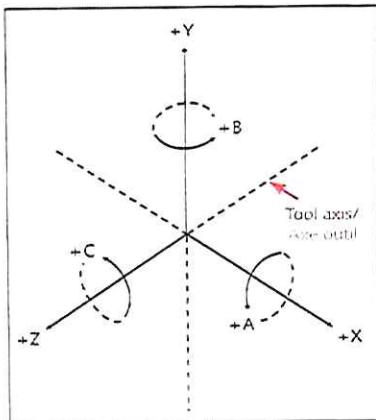


Fig 2 Right-hand coordinate system (extract from ISO 841 standard).¹⁸

Fig. 2 Système de coordonnées main-droite (extrait de la norme ISO 841¹⁸).

dle by a tool holder to generate a rotary cutting motion. A holder that clamps the workpiece is fitted on the machine tool.

Computerized numerical control

According to standard ISO 2806,¹⁷ numerical control is the automatic control of a process performed by a device that makes use of numerical data introduced while the operation is in progress. Today, computers play an integral part in most numerical controls, thus making them computerized numerical controls (CNC).

Numerical controlled machine tool, milling machine, and milling center

A numerical controlled machine tool (NC machine tool) is a programmable machine tool that uses a computer to control the machine tool feed rate and cutting motions, and auxiliary functions to perform the machining process. These computers are called numerical controllers or numerical control units.¹⁷ The feed rate motion is performed by one or several simultaneous movements controlled according to numerical axes. Milling machines/milling centers are NC machine tools dedicated to the milling process. A milling center is an NC machine tool fitted with an automatic tool changer (ATC).

Axis and machine motions

According to standards ISO 2806 and ISO 841,^{17,18} an axis is defined as the principal direction in which a part of a machine can move in a linear or rotary mode (Fig 2). The principal linear motions of the machine, which are parallel to the axes of the machine coordinate system, are designated X, Y, and

Machine-outil contrôlée numériquement, machine de fraisage et centre d'usinage

Une machine-outil à commande numérique (MOCN) est une machine-outil programmable utilisant un ordinateur pour contrôler la vitesse d'avance, le mouvement de coupe, et les fonctions auxiliaires permettant l'usinage. Ces ordinateurs sont appelés commandes numériques ou directeurs de commande numérique.¹⁷ Le mouvement d'avance est généré par un ou plusieurs mouvements simultanés des axes contrôlés numériquement.

Les machines de fraisage/centres d'usinage sont des MOCN spécifiques au procédé de fraisage.

Un centre d'usinage est une MOCN équipée d'un changeur automatique d'outils.

Axes et mouvements machine

D'après les normes ISO 2806 et ISO 841¹⁷⁻¹⁸, un axe est défini comme étant la direction dans laquelle une partie de la machine peut bouger dans un mode linéaire ou rotatif (Fig. 2). Les mouvements linéaires principaux de la machine, parallèles aux axes du système d'axes machine sont désignés par X, Y, et Z. A, B, et C désignent respectivement des axes rotatifs autour des axes linéaires X, Y, et Z.

- Axe Z: L'axe Z est parallèle à l'axe de rotation de la broche principale de la machine. Quand il existe plusieurs broches, l'une est choisie comme principale, de préférence, perpendiculaire à la surface de travail.
- Axe X: Quand cela est possible, l'axe X est horizontal. L'axe X est l'axe le plus long (Z excepté).
- Axe Y: L'axe Y est perpendiculaire aux axes X et Z.

D'après la norme ISO 841¹⁸, quand des mouvements linéaires secondaires parallèles aux translations principales X, Y, et Z, existent ils sont notés respectivement U, V, et W. De la même façon les mouvements linéaires tertiaires sont notés respectivement P, Q et R. Quand des mouvements linéaires non parallèles (ou qui peuvent ne pas l'être) à X, Y, et Z existent ils sont notés U, V, W, P, Q, ou R de manière la plus pratique. Les mouvements linéaires principaux sont ceux les plus proches de la broche principale, les mouvements linéaires secondaires les suivantes les plus proches, et les mouvements linéaires tertiaires les plus éloignés. Pour les machines multi-broches ou possédant de nombreux mouvements parallèles, la désignation de ces mouvements peut être indiquée en utilisant une lettre et un chiffre (e.g. X1, X2, etc.). L'indice doit être un

entier strictement positif. L'indice est facultatif pour les mouvements primaires.

D'après la norme ISO 841¹⁸, quand des rotations secondaires existent en plus des rotations primaires, parallèles ou colinéaires à A, B, C, elles sont notées D ou E (si ces lettres sont disponibles). Comme pour les mouvements linéaires, les rotations peuvent être indiquées.

Demi-axis et axe numérique

Un demi-axis numérique est un axe de déplacement pour lequel un ensemble fini de positions peut être atteint ou un axe de déplacement asservi en position ou en vitesse.

Un axe numérique est un axe de déplacement pour lequel une infinité de positions peut être atteinte à la résolution de positionnement près, ou un axe de déplacement asservi en position et vitesse. La résolution d'un axe est le plus petit déplacement réalisable par un demi-axis, ou un axe, numérique.

Machine de fraisage Chairside pour cabinet dentaire

En Europe, 4 machines industrielles de fraisage dédiées à l'utilisation au fauteuil en cabinets dentaires sont disponibles sur le marché.¹⁹⁻²⁰

Machine de fraisage Cerec MC XL

Développé par Mörmann et Brandestini, et, introduit par Sirona Dental Systems (Charlotte, NC), il s'agit du premier système CFAO pour cabinets dentaires apparu sur le marché en 1987.²¹⁻²² Le système Cerec est le leader du marché (95% de part de marché). Environ 33 000 unités Cerec (toutes versions) sont implantées mondialement en cabinet dentaire (Source interne fabricant). La machine Cerec MC XL (Fig. 3) peut fraiser des inlays, onlays, facettes, couronnes, et bridges. Les matériaux utilisables sont les résines, composites, hybrides, vitrocéramiques feldspathiques pré-frittées, et vitrocéramiques partiellement cristallisées. Le système Cerec est un système CFAO fermé; la machine de fraisage MC XL peut être utilisée uniquement avec le logiciel de CFAO fourni. Il n'est pas possible d'importer dans la machine Cerec un programme CN généré par un logiciel FAO tiers.

La machine de fraisage est composée de deux broches horizontales. Les deux sont utilisées simultanément, l'une

Z. A, B, and C denote rotary axes about linear axes X, Y, and Z, respectively.

- **Z axis:** The Z axis is parallel to the main spindle of the machine. When there are several spindles, one is selected as the main spindle, preferably perpendicular to the workholder surface.
- **X axis:** Where possible, the X axis is horizontal. The X axis is the longest axis (except Z).
- **Y axis:** The Y axis is perpendicular to both the X and Z axes.

According to standard ISO 841,¹⁸ when secondary linear motions parallel to the primary motions exist in addition to the primary linear motions X, Y, and Z, they are denoted U, V, and W, respectively. Similarly, for tertiary motions, they are denoted P, Q, and R, respectively. When linear motions exist which are not (or may not be) parallel to X, Y, and Z, they can be denoted U, V, W, P, Q, or R, as is most convenient. The primary linear motions must be those nearest to the main spindle, the secondary linear motions the next nearest, and the tertiary linear motions the farthest. For machines with multiple units or many parallel movements, the designation of these motions can be indexed by using a letter and a number (eg, X1, X2, etc). The index must be a positive integer greater than zero. The primary motion(s) may or may not have an index.

According to standard ISO 841,¹⁸ when secondary rotary motions exist in addition to the primary rotary motions, either parallel to A, B, or C or compounded or gimbaled to A, B, or C, they are denoted D or E (if these letters are available). As with linear motions, rotary motions may be indexed.

Half numerical axis and numerical axis

A half numerical axis is an axis movement wherein a finite set of positions can be reached, or an axis movement wherein position or speed is monitored.

A numerical axis is an axis movement wherein an infinite set of positions can be reached according to the positioning resolution, or an axis movement wherein position and speed are monitored. Axis position resolution is the smallest displacement that can be achieved on a half or full numerical axis.

Chairside milling machines for dentist's offices

In Europe, four industrial dental milling machines dedicated to chairside dentistry practice can be obtained on the market.^{19,20}

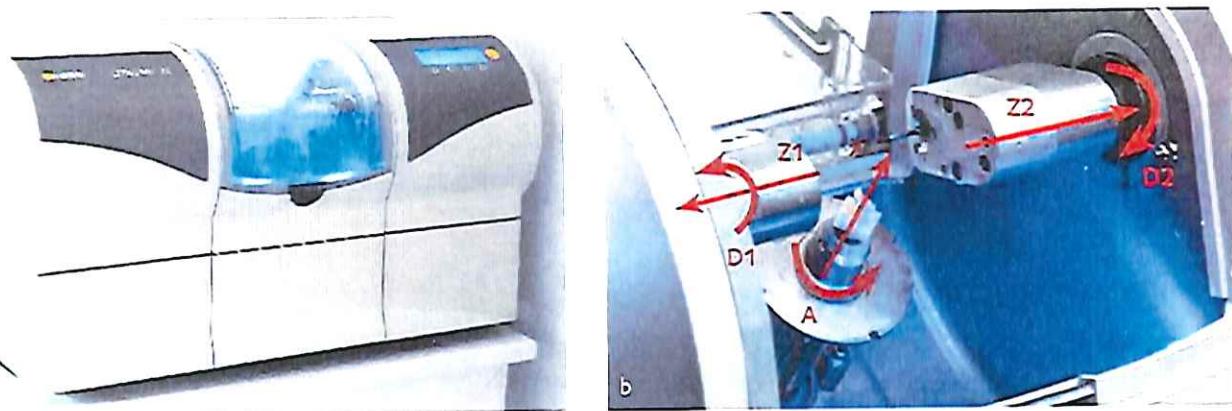


Fig 3a and b Cerec MC XL/InLab MC XL NC milling machine: (a) external view; (b) view of axes.

Fig. 3a et b Machine de fraisage Cerec MC XL/Inlab MC XL. Vue externe (a). Vue des axes (b).

Cerec MC XL milling machine

Developed by Mörmann and Brandestini, and introduced by Sirona Dental Systems (Charlotte, NC), this was the first chairside CAD/CAM system launched on the market for dental offices in 1987.^{21,22} The Sirona Cerec dental system is the market leader (95% of market share). About 33,000 Cerec units (all versions) can be found in dental offices worldwide (from manufacturer internal source). The Cerec MC XL milling machine (Fig 3) can mill inlays, onlays, veneers, crowns, and bridges. The biomaterials milled are resins, composites, hybrids, pre-sintered oxide ceramics, and partially crystallized glass-ceramics. The Cerec system is a closed CAD/CAM system; the MC XL milling machine is only used with the integrated CAD/CAM software. It is not possible to import an NC machining program generated from third-party CAM software into the Cerec milling machine.

This milling machine is composed of two horizontal spindles. Both spindles are used simultaneously; one mills the intrados surface of the prosthesis, and the other mills the extrados surface. As an option, two tools per spindle are provided. Whatever the case, one tool per spindle is used during machining. It is a 4-axis machine tool. The kinematic structure is shown in Figure 3b. The X translation and the A rotation are obtained by the movements given to the workpiece. Translations Z1 and Z2 are obtained on both spindles. Finally, the secondary rotations D1 and D2 are performed by the spindles, which rotate around eccentric axes (length of eccentric axis: 30 mm). All the axes are half-numerical (monitored for position but not speed).

uses la surface intrados de la prothèse et l'autre la surface extrados. En option, deux outils par broche sont possibles. Quelle que soit l'option, un seul outil par broche est en action durant l'usinage. Il s'agit d'une machine-outil 4 axes. La cinématique machine est illustrée Figure 3b. La translation X et la rotation A sont des mouvements donnés à la pièce. Les translations Z1 et Z2 sont des mouvements donnés aux broches. Finalement, les rotations secondaires D1 et D2 sont attribuées aux broches, lesquelles pivotent autour d'un axe excentré (excentration: 30 mm). Tous les axes sont des demi-axes numériques (contrôlés en position, mais pas en vitesse).

Avant chaque usinage, la machine jauge les outils utilisés en diamètre et longueur. La prise de jauge est effectuée sur une partie cylindrique métallique de l'attachement du bloc. L'outil vient en contact sur ce cylindre pour mesurer les jauge. Ensuite l'outil jaugé est utilisé pour vérifier si les dimensions du bloc inséré en machine correspondent à celles déclarées dans le logiciel de FAO par le praticien.

Machine de fraisage LYRA

Commercialisé par la société GACD (Paris, France), ce système (Fig. 4) peut usiner des inlays, onlays, facettes, couronnes et bridges (jusqu'à 3 éléments). Les matériaux utilisables sont les composites, vitrocéramiques feldspathiques pré-frittées, et vitrocéramiques partiellement cristallisées, PMMA, et hybrides. Environ 100 machines d'usinage Lyra sont en fonctionnement (Source interne fabricant). C'est un système complètement ouvert, i.e. la machine de fraisage peut être associée à des logiciels de CAO/FAO tiers.

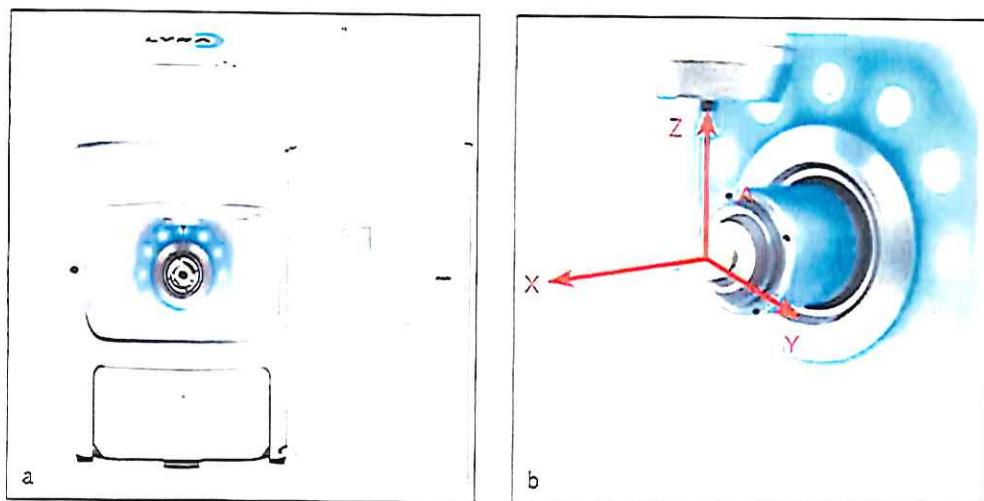


Fig 4a and b Lyra milling machine: (a) external view; (b) view of axes.

Fig. 4a et b Machine de fraisage Lyra. Vue externe (a). Vue des axes (b).

Un programme machine généré par un logiciel de FAO tiers peut être importé (via les ports USB ou RJ45) dans la machine Lyra.

Cette machine 4 axes est équipée d'une broche verticale. La cinématique machine est illustrée Figure 4b. Les translations Y et Z sont des mouvements donnés à la broche. La translation X et la rotation A sont des mouvements donnés à la pièce. Tous les axes sont numériques (asservis en position et vitesse). L'erreur de vitesse et de position sur chaque axe est corrigée en temps réel.

La longueur de l'outil est mesurée, avant chaque usinage, par contact physique du bout de l'outil sur un méplat de l'axe A.

Centre d'usinage E4D Dentist/Planmill 40

Le centre d'usinage E4D Dentist (Fig. 5) a été lancé par D4D Technologies (Richardson, TX, USA) en 2008 en Amérique du nord, et peut usiner des inlays, onlays, facettes, couronnes et bridges (jusqu'à 3 éléments). Les matériaux usinables sont les vitrocéramiques feldspatiques pré-frittées, vitrocéramiques partiellement cristallisées, hybrides, et résine. Planmeca a acheté D4D Technologies en 2013 et depuis la fin de l'année 2013 la machine E4D Dentist est disponible en Europe sous le nom de Planmill 40. Environ 5000 machines E4D/Planmill sont implantées mondialement (Source interne fabricant).

Le centre d'usinage est équipé de deux broches horizontales. Les deux sont utilisées simultanément, l'une usine la surface intrados de la prothèse et l'autre la surface extrados. Il s'agit d'un centre d'usinage 3 axes. La cinéma-

Before each milling, the machine tool performs tool gauging to calibrate the length and diameter of the two tools required for machining. This gauging is done on the metal cylinder stand of the block. The tool comes into contact with the metallic cylinder of the block stand to measure the gauges. Afterwards, the measured tool is used to check that the block dimensions match those recorded by the practitioner in the CAM software.

Lyra milling machine

Marketed by the GACD Company (Paris, France), this system (Fig 4) can mill inlays, onlays, veneers, crowns, and bridges (up to 3 elements). The materials milled are composites, pre-sintered oxide ceramics, partially crystallized glass-ceramics, PMMA, hybrids, composites, and vitro glass-ceramics. About 100 Lyra milling machines are in use (from manufacturer internal source). It is a fully open CAD/CAM system, ie, the milling machine can be used with the associated CAD/CAM software as well as with a third-party machining program. One NC machining program generated from any CAM software can be imported (via USB or RJ45 ports) into the Lyra milling machine.

This machine is equipped with one vertical spindle and has a 4-axis system. The kinematic structure is shown in Figure 4b. The Y and Z translations are performed by the movement given to the spindle. The X translation and the rotation of the A axis are performed by the movement given to the workpiece. All the axes are numerical (position and speed monitored). Each axis position and speed is corrected in real time. Tool length measurement is performed on an A-axis mechanical device before each milling.

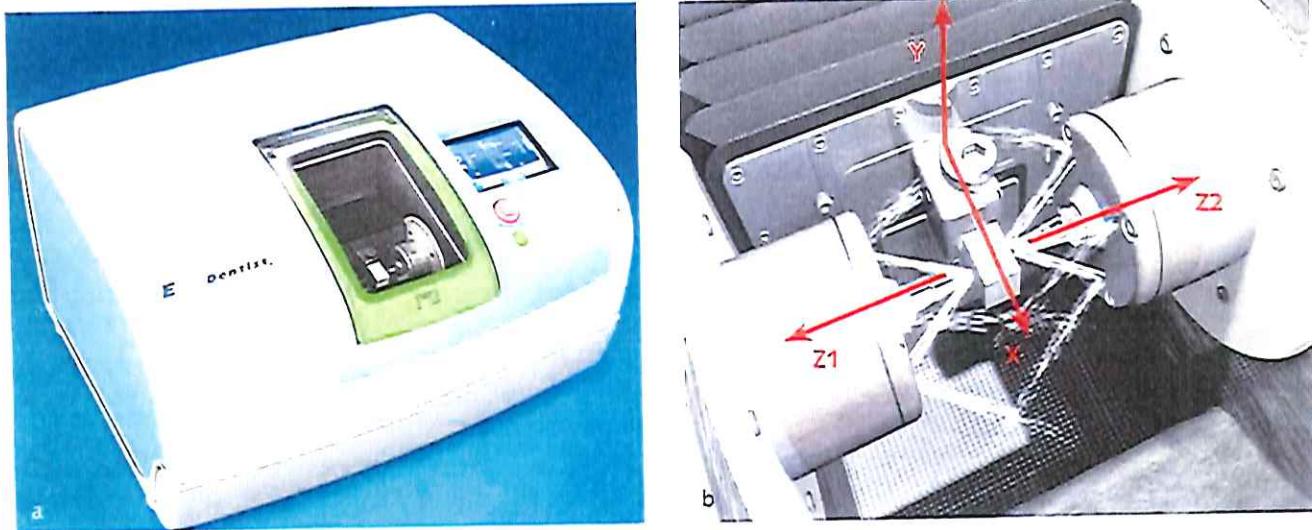


Fig 5a and b E4D Dentist/PlanMill 40 milling center: (a) external view; (b) view of axes.

Fig. 5a et b Centre d'usinage E4D/Planmill 40. Vue externe (a). Vue des axes (b).

E4D Dentist/PlanMill 40 milling center

The E4D Dentist milling center (Fig 5) was introduced by D4D Technologies (Richardson, TX, USA) in 2008 in North America, and can mill inlays, onlays, veneers, crowns, and bridges (up to 3 elements). The materials milled are glass-ceramics, pre-sintered oxide ceramics, partially crystallized glass-ceramics, hybrids, resins, and composites. Planmeca purchased D4D Technologies in 2013, and since the end of 2013 the E4D Dentist has been available in Europe under the name PlanMill 40. About 5000 E4D/PlanMill milling machines can be found worldwide (from manufacturer internal source).

The milling center is equipped with two horizontal spindles. Both are used simultaneously; one mills the intrados of the dental prosthesis, and the other mills the extrados surface. This milling center is a 3-axis system. The kinematic structure is shown in Figure 5b. The X and Y translations are performed by the movements given to the workpiece. The Z1 and Z2 translations are performed on both spindles. All the axes are numerical (position and speed monitored).

This milling center is equipped with an automatic tool changer (ATC). Before each machining, the machine loads both tools on the spindles (according to the prosthetic material). It then gauges (lengths and diameters) both tools. Calibration is performed using an electromechanical sensor fixed on a mobile axis.

tique machine est illustrée Figure 5b. Les translations X et Y sont des mouvements donnés à la pièce. Les translations Z1 et Z2 sont des mouvements donnés aux broches. Tous les axes sont numériques (asservis en position et vitesse).

Le centre d'usinage est équipé d'un changeur automatique d'outils. Avant chaque usinage, la machine charge les deux outils en broches (en adéquation avec le matériau prothétique). Ensuite les jauge (longueurs et diamètres) des 2 outils sont effectuées. Les jauge sont réalisées sur un capteur électromécanique fixé sur un axe mobile.

Machine de fraisage Carestream CS3000

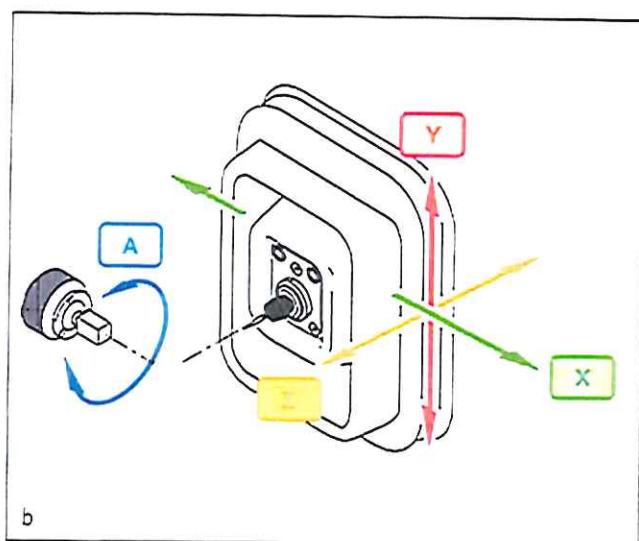
La machine de fraisage (Fig. 6) a été introduite par Carestream dental (New York, United States) et peut usiner des couronnes, inlays, onlays, et facettes. Les matériaux utilisables sont les composites, vitrocéramiques feldspatiques pré-frittées, vitrocéramiques partiellement cristallisées, hybrides, et résine. Environ 100 machines CS3000 sont implantées mondialement (Source interne fabricant). D'après le fabricant il s'agit d'un système de CFAO ouvert.

Cette machine 4 axes est équipée d'une broche horizontale. La cinématique machine est montrée Figure 6b. Toutes les translations (X, Y, Z) sont des mouvements donnés à la broche. La rotation A est un mouvement donné à la pièce. Tous les axes sont numériques (asservis en position et vitesse). L'erreur de vitesse et de position sur



Fig 6a and b Carestream CS3000 milling machine: (a) external view; (b) view of axes.

Fig. 6a et b Machine de fraisage Carestream dental CS3000. Vue externe (a). Vue des axes (b).



chaque axe est corrigée en temps réel. La longueur de l'outil est mesurée avant chaque usinage. La longueur outil est réalisée sur un capteur électromécanique fixe.

Discussion

Les critères techniques et économiques les plus importants utilisés pour comparer les machines de cabinet sont reportés dans le tableau 1.

Cinématique de la machine-outil vs. Formes de la prothèse fraîssée

La cinématique machine a un impact majeur sur les formes et géométries prothétiques réalisables en fraisage.

Toutes les machines de cabinets peuvent usiner des couronnes, inlays, onlays et facettes. Les machines Lyra, Cerec et E4D/Planmill peuvent, en plus, usiner des bridges (3 éléments). Les dimensions maximales de prothèse réalisables sont en partie liées au volume de travail de la machine. Toutes les solutions du marché, pour cabinet dentaire, possèdent le volume de travail suffisant pour usiner des bridges jusqu'à 3 éléments. Cependant l'impossibilité technique concernant les bridges revient aux logiciels de CFAO (qui n'incluent pas la possibilité de concevoir et fraiser des bridges), et non aux machines de fraisage elles-mêmes.

Carestream CS3000 milling machine

This milling machine (Fig 6) was introduced by Carestream Dental (New York, USA). It can mill crowns, inlays, onlays, and veneers. Milled materials are pre-sintered oxide ceramics, partially crystallized glass-ceramics, hybrids, composites, vitroceramics, and resins. About 100 CS3000 milling machines can be found worldwide (from manufacturer internal source). According to the manufacturer, it is an open CAD/CAM system.

The milling machine is equipped with one horizontal spindle with a 4-axis system. The kinematic structure is shown in Figure 6b. All the translations (X, Y and Z) are performed by the movements given to the spindle. The A rotation is achieved by the movement given to the workpiece. All the axes are numerical (position and speed monitored). Each axis position and speed is corrected in real time. Tool length measurement is performed before each milling using a fixed electromechanical sensor.

Discussion

The most important technical and economic criteria used to compare the chairside milling machines are listed in Table 1.

Table 1 Chairside NC milling machine tools for dental offices: technical and economic analysis

Tab. 1 Analyse comparative technique et économique des MOCN pour cabinet dentaire.

Specifications/ Spécifications	Cerec MC XL – Sirona ²³⁻²⁷	Lyra – GACD ²⁸	E4D/Planmill 40 D4D ²⁹	Carestream CS3000 ^{30,31}
Axes/Axes	X, Z, A, D	X, Y, Z, A	X, Y, Z	X, Y, Z, A
Milled materials/ Matériaux usinables	composites, hybrids, pre-sintered oxide ceramics, partially crystallized glass-ceramics, resins/ composites, hybrides, vitrocéramiques feld- spatiques pré-frittées, vitrocéramiques partiel- lement cristallisées, résines	composites, hybrids, pre-sintered oxide ceramics, partially crystallized glass-ceramics, PMMA/ composites, hybrides, vitrocéramiques feld- spatiques pré-frittées, vitrocéramiques partiel- lement cristallisées, PMMA	composites, hybrids, glass-ceramics, pre-sinte- red oxide ceramics, parti- ally crystallized glass-cera- mics, resins/composites, hybrides, vitrocéramiques feldspathiques pré-frittées, vitrocéramiques partiel- lement cristallisées, résines	composites, hybrids, glass-ceramics, pre-sinte- red oxide ceramics, parti- ally crystallized glass-cera- mics, resins/composites, hybrides, vitrocéramiques feldspathiques pré-frittées, vitrocéramiques partiel- lement cristallisées, résines
Milled restorations/ Restaurations usinables	crowns, inlays, onlays, veneers, bridges/ couronnes, inlays, onlays, facettes, bridges	crowns, inlays, onlays, ve- neers, inlays core, bridges (3 elements)/ couronnes, inlays, onlays, facettes, inlays core, brid- ges (3 éléments)	crowns, inlays, onlays, veneers, bridges (3 elements)/ couronnes, inlays, onlays, facettes, bridges (3 éléments)	crowns, inlays, onlays, veneers/ couronnes, inlays, onlays, facettes
Axis motor technology/ Technologie des moteurs d'axes	Stepper motor/ Pas-à-pas	Brushless	Brushless	Brushless
Axis position resolution/ Résolution de positionnement des axes	X Z: 6.25µm D: 0.01° A: 0.06°	X Y Z: 1 µm A: 0.09°	1 µm	X Y Z: 1 µm A: 0.01°
Number of spindles/ Nombre de broches	2	1	2	1
Spindle speed/ Vitesse de la broche	42,000 RPM/ 42 000 tr/min	60,000 RPM/ 60 000 tr/min	50,000 RPM/ 50 000 tr/min	60,000 RPM/ 60 000 tr/min
Power consumption/ Puissance absorbée	Total: 320 Watts/ Total 320 Watts	Total: 1000 Watts Spindle: 250 Watts/ Total 1000 Watts Broche 250 Watts	Total: 300 Watts Spindle: 125 Watts/ Total 300 Watts Broche 125 Watts	Total: 250 Watts Spindle: 230 Watts/ Total 250 Watts Broche 230 Watts
Number of stations in the tool changer/Nombre d' outils en magasin	2 per spindle (option)/ 2 par broche (option)	1	6	1
Number of simultaneous tools per job/Nombre d'outils simultanés au cours de l'usinage	2	1	2	1
Milling repeatability/ Répétabilité d'usinage	25 µm	15 µm	5–10 µm	25 µm
Milling feed rate/ Vitesse d'avance travail	1.0–1.5 mm/min	2000 mm/min	2400 mm/min	2000 mm/min
Numerical control/ Contrôle des axes numériques	Position monitored/ Position contrôlée	Position and speed moni- tored, and correction/As- servi en vitesse et position	Position and speed moni- tored, and correction/As- servi en vitesse et position	Position and speed moni- tored, and correction/As- servi en vitesse et position
Average time to mill a full contour crown/Temps moyen d'usinage d'une couronne	6–11 min	12–18 min	10–15 min	About 15 min/ Environ 15 min
Selling price/Prix de vente	€42,000 (standard) €49,900 (options)/ 42 000 € (standard) 49 900 € (options)	€46,500 or €99 for 20 restorations (volume discount)/ 46 500 € ou 99 € pour 20 prothèses (tarif dégressif)	About €50,000/ Environ 50 000€	About €45,000/ Environ 45 000€

Sur les machines Lyra et Carestream, le 4^{ème} axe rotatif est associé au retournement de 180° du bloc. Premièrement l'extrados est usiné, puis après retournement l'intrados. Le 4^{ème} axe rotatif du Cerec est seulement utilisé pendant la phase d'initialisation (jauges outils et vérification du bloc brut). De plus, le système Cerec est équipé d'axes rotatifs secondaires D qui se substituent aux traditionnels axes de translations Y. Cette cinématique particulière peut être expliquée par le fait que les axes rotatifs sont plus simples à concevoir, à intégrer et moins onéreux.

Pour être biomimétique, l'anatomie des dents naturelles doit être reproduite en gardant les formes et les contre dépouilles. En dépit des 4 axes disponibles sur les 4 machines de fraisage étudiées, seulement 3 axes sont utilisés en continu durant l'usinage. Ainsi le fraisage 3 axes ne permet pas de réaliser des surfaces en contre dépouille. La plupart des machines de fraisage destinées aux cabinets ne peuvent pas usiner de contre dépouilles.

Cinématique de la machine-outil vs. Intégrité de la surface prothétique

La cinématique machine a un impact majeur sur l'intégrité de surface (IS). L'IS est fondamentale pour respecter les fonctionnalités de service prothétique.³² Les formes complexes (comme celles des restaurations dentaires) doivent être fraîssées sous des conditions d'usinage optimales.

Comme expliqué dans le paragraphe précédent, en dépit des 4 axes disponibles sur les machines de fraisage étudiées, seulement 3 axes sont utilisés en continu durant l'usinage. Le point de contact entre l'outil et la prothèse usinée doit être contrôlé au regard de la géométrie de la prothèse. En effet plus ce point de contact est proche de l'axe de rotation de l'outil plus la vitesse de coupe est faible. Si la vitesse de coupe n'est pas en adéquation avec le couple outil-matière en présence, l'enlèvement de matière ne sera pas réalisé dans de bonnes conditions. Ainsi l'IS sera affectée, la rugosité obtenue ne sera pas conforme aux attentes et des fissures pourront être générées. Les conditions d'usinage propices à l'enlèvement de matière sont bien connues en ingénierie mécanique.³³⁻³⁴ Une telle problématique est aussi un enjeu clé en usinage dentaire, d'ailleurs de nombreuses études relatent l'influence des paramètres d'usinage en dentisterie.³⁵⁻³⁶

Malheureusement, ce point de contact entre l'outil et la pièce ne peut pas être maîtrisé avec une cinématique 3 axes. Le manque de maîtrise de ce contact affecte l'IS.

Machine tool kinematics vs milled prosthetic shapes

The machine tool kinematics has a major impact on the possible volumes and shapes of milled restorations.

All the in-office milling machines can mill crowns, inlays, onlays, and veneers. The Cerec, Lyra, and E4D/PlanMill machines can also manufacture bridges (3 elements). The maximum size of restoration that can be milled is linked to the milling workspace volume. All the chairside solutions available on the market have the volume needed to manufacture bridges of up to 3 elements. However, the technical impossibility of manufacturing bridges is attributed to the CAD/CAM software (that does not include the possibility of designing bridges), and not to the milling systems.

With the Lyra and Carestream milling machines, the 4th rotary A axis is associated with the 180-degree overturning of the block, to mill first the extrados and then the intrados after rotation. The Cerec 4th rotary A axis is only used during the initialization phase (gauges and block check). Moreover, the Cerec system is equipped with secondary rotations of the D axes, which replace the usual Y translation. This special kinematics can be explained by the fact that rotary axes are easier and cheaper to design and integrate.

To be biomimetic, natural tooth anatomy must be reproduced by milling the surfaces of complex shapes and undercuts. Despite the 4 axes available on the four milling machines, only 3 axes are used continuously during machining. Thus the 3-axis milling process produces prostheses without undercut surfaces. Most of the office milling machines cannot mill prosthetic shapes with undercut surfaces.

Machine tool kinematics vs prosthetic surface integrity

The machine tool kinematics has a major impact on the surface integrity (SI) of the prosthesis. SI is important for the functional performance of the prosthesis.³² Complex shapes (such as dental restorations) must be milled under efficient material removal conditions.

As explained in the previous paragraph, despite the 4 axes available on the three units, only 3 translation axes are used continuously during machining. The contact surface between the tool and the workpiece must be controlled in accordance with the workpiece shape. Indeed, the closer the contact surface to the rotation axis, the lower the cutting speed. If the cutting speed is not consistent with the tool-ma-

terial couple, material removal is not processed under proper conditions, thereby possibly affecting the SI and resulting in a non-expectant roughness, as well as surface cracks. The use of proper conditions in the material removal process are well known in mechanical engineering industries.^{33,34} Such problems are also a key factor in dental material milling, and several studies are considering the influence of milling parameters.^{35,36}

Unfortunately, this contact surface between tool and workpiece cannot be controlled with 3-axis kinematics. Lack of control of this contact surface affects the SI. This lack of control is well known on metallic materials, but still unknown on dental materials.³⁷

Accuracy and axis technology vs prosthesis accuracy

The embedded motor technology plays a major role in prosthesis accuracy. The final fit (occlusal and marginal gap) partially depends on the prosthesis accuracy obtained after the milling process. The significance of milling accuracy should also be seen in relation to other effects of the CAD/CAM chain. This prosthesis accuracy is closely linked with the accuracy of the embedded technology in the milling machines.

Axis position resolution

The half-numerical axes of the Cerec milling machine are equipped with stepper motor technology. Only a finite number of positions can be reached with such technology. The resolution of the Cerec milling machine axis position is 6.25 µm.

The full-numerical axes of the Lyra, Carestream, and E4D/PlanMill milling machines are fitted with brushless motor technology, making it possible to reach an infinite number of positions. For these milling machines, the axis position resolution is 1 µm.

Each axis position resolution (linear and rotary) has a detrimental effect on global dental prosthesis accuracy. It appears that brushless technology gives better axis position resolution (1 µm vs 6.25 µm, respectively).

Axis numerical control

The Cerec milling machine is equipped with embedded position monitoring. If a position error occurs during machining, the user is warned and the milling process is stopped. The three other machine tools are monitored for position and

Ce manque est bien connu pour les matériaux métalliques, et reste encore inconnu concernant les matériaux prothétiques dentaires.³⁷

Exactitude et technologie des axes vs. Exactitude prothétique

La technologie embarquée des moteurs joue un rôle important sur l'exactitude de la prothèse. L'adaptation finale (jeu occlusal et marginal) dépend en partie de l'exactitude de la prothèse obtenue. L'exactitude d'usinage doit également être mise en relation avec les autres effets des différents maillons de la chaîne de CFAO.

L'exactitude de la prothèse est étroitement liée à l'exactitude des technologies embarquées dans les machines de fraisage.

Résolution des axes

Les demi-axes numériques de la machine Cerec sont équipés de moteurs pas-à-pas. Seulement un nombre fini de positions sont atteignables avec cette technologie. La résolution de positionnement de la machine Cerec est de 6.25 µm.

Les axes numériques des machines Lyra, Carestream, et E4D/planmill sont équipés de moteurs brushless, rendant ainsi une infinité de positions atteignables. Ces machines ont une résolution de positionnement de 1 µm.

La résolution de positionnement de chaque axe (linéaire et rotatif) a un effet préjudiciable sur l'exactitude globale de la prothèse. Il apparaît que les moteurs brushless offrent une meilleure résolution de positionnement (respectivement 1 µm vs 6.25 µm).

Contrôle des axes numériques

La machine de fraisage Cerec est équipée d'un contrôle de position. Si un écart de position intervient durant l'usinage, l'utilisateur est alerté et l'usinage est interrompu. Les 3 autres machines-outils sont asservies, en boucles fermées, en vitesse et position; si un écart de position ou de vitesse intervient durant l'usinage, ces deux types d'écart sont corrigés en temps réel.

Un écart de position a un impact direct sur la géométrie de la prothèse. Cet écart de position peut être surveillé et corrigé. Une boucle fermée augmente l'exactitude de positionnement des axes, puisque l'écart entre positions réelle et théorique est calculé et compensé en temps réel.

Répétabilité d'usinage

La répétabilité d'une machine-outil est son aptitude à toujours usiner exactement la même prothèse, avec éventuellement un écart systématique. Un écart systématique est plus facilement corrigable qu'un écart aléatoire. L'écart aléatoire peut être présent dans le cas de fabrications manuelles.

La répétabilité des machines pour cabinets dentaires varie de 5 à 25 µm. Cependant ces valeurs proviennent de données fabricants, sans aucune information concernant le protocole utilisé pour évaluer la répétabilité. Chaque fabricant peut utiliser son propre protocole d'évaluation: les géométries des prothèses et les méthodes de mesure utilisées peuvent être différentes et difficiles à comparer.

Un examen critique peut être fait concernant les valeurs de répétabilité données dans les brochures commerciales, puisque la répétabilité de la machine peut être utilisée pour évaluer l'exactitude d'une prothèse.

Technologies des broches et des axes vs. Productivité

La productivité est affectée par les technologies embarquées au niveau des axes et des broches. Une productivité plus élevée en cabinet autorise un meilleur retour sur investissement. Les machines de fraisage ayant un débit copeaux plus élevé procurent un meilleur temps d'usinage.

Le débit copeaux est lié à la vitesse de rotation de la broche. Pour les 4 machines étudiées, les vitesses de broches varient de 42.000 à 60.000 tr/min, et la vitesse des broches n'est pas variable. Les machines Lyra et Carestream offrent les vitesses de broches les plus élevées. Les machines Cerec et Planmeca E4D/Planmill sont équipées de deux broches à plus faible vitesse. Deux broches sont utilisées simultanément sur certaines machines pour augmenter la productivité (décroître le temps d'usinage). Cependant, une machine bi-broches n'est pas deux fois plus rapide qu'une machine simple broche. Le temps d'usinage d'une couronne avec la machine E4D/Planmill n'est pas diminué de moitié par rapport à celui observé avec la machine Lyra. Le débit copeaux de la machine Lyra est plus élevé grâce à sa vitesse de broche plus élevée.

Sans variation de vitesse de broches possible, les conditions d'usinage, ne peuvent pas être adaptées au biomatériau usiné. En dentisterie restauratrice pour usiner des biomatériaux céramiques, hybrides et composites, les diamètres outils varient de 0.3 à 4 mm et les vitesses de coupe de 130

speed with closed loops; if a position error or a feed rate loss occurs during machining, these two types of errors are corrected in real time.

An axis position error is directly reflected on the prosthesis shape. This axis position error can be monitored and corrected. The closed loop technology increases axis position accuracy because the difference between the real and theoretical positions is computed in real time.

Milling repeatability

The repeatability of a milling machine is the suitability of the machine tool to always mill exactly the same prostheses type with a systematic accuracy error. A systematic error can be taken into account more easily than a random error, which might occur with manual manufacturing.

The repeatability of dental chairside milling machines ranges from 5 to 25 µm. Nevertheless, these values are given in industrial brochures without any information on the protocol used to evaluate repeatability. Each company can use its own protocol, so the prosthetic shapes and measurement methods can be different. They are therefore difficult to compare.

A critical examination should be made of the repeatability values given in commercial brochures, since milling machine repeatability can be used to evaluate prosthesis accuracy.

Spindle and axis technology vs productivity

Productivity is affected by embedded spindle and axis technologies. Higher chairside productivity allows better returns on investment. Milling machines with higher material removal rates provide better milling time. The material removal rate is linked to spindle speed. For the four milling machines studied, the spindle speeds ranged from 42,000 to 60,000 RPM, and no spindle speed variation is available. The Lyra and Carestream milling machines offer the highest spindle speeds. The Cerec and E4D/PlanMill milling machines are fitted with two lower spindles, which are used simultaneously to increase productivity (decreased milling time). However, a double-spindle machine tool is not often twice as fast as a single-spindle machine tool. The milling time of the E4D/PlanMill milling machine for a crown milling is not half that of the Lyra milling machine. The material removal rate of the Lyra machine is higher than that of the E4D/PlanMill machine due to its spindle speed.

Without spindle speed variation, the cutting speed cannot be adapted to the biomaterial milled. In restorative den-

tistry, tool diameters range from 0.3 to 4 mm, and cutting speeds range from 130 to 300 m/min to mill ceramic, composite, and hybrid biomaterials. High spindle speed is required for these milling conditions: 300,000 RPM with a 0.3-mm diameter bur at a cutting speed of 300 m/min. Thus, the cutting speed can be 5 to 6 times lower than needed.

The material removal rate is also linked to spindle power. The equation below gives a mechanical reminder of the relationship between the power, torque, and rotation speed of the spindle:

$$\text{Power (Watts)} = \text{Torque (N.m)} \times \text{Rotation speed (rad/sec)}$$

According to this equation, for a given spindle power, rotating faster will generate less available torque to mill the prosthesis. The torque required depends on the milling parameters and material milled.³⁸ With a lower available spindle torque, the number of tool-sweeping paths on the prosthesis and machine time are increased. In order to increase productivity, the spindle speed should be as fast as possible according to the cutting speed, and the available torque should be higher in order to decrease the number of tool-sweeping paths. Therefore higher spindle speed and power provide shorter machining time. The Lyra and Carestream machines provide higher spindle speeds and powers, whereas their machining times are not shorter than the Cerec and E4D/PlanMill machines. This can be explained by the choice in the Cerec and E4D/PlanMill machines to embed two spindles to counterbalance the lower power and speed on the spindle.

The material removal rate is also affected by the milling feed rate (relative speed between the tool and the work-piece). The Cerec milling feed rate ranges from 1 to 1.5 mm/min, and the three other milling feed rates are around 2000 mm/min. The Cerec milling feed rate is roughly 1000 times lower, whereas the Cerec milling time seems to be better. This observation can be explained by the specific kinematics of the Cerec milling machine. The secondary rotation axes D1 and D2, around the eccentric axes, are mostly used during the Cerec milling process. These specific rotary tool motions should be as fast as the Lyra, E4D/PlanMill, and Carestream linear tool motions.

The position of the spindle and axes on the milling machine structure should also be considered as a productivity criterion. Spindle and axis failures can occur due to the intrusion of chips and coolant in the machine's mechanical seal. A spindle in vertical position, such as in the Lyra milling machine, is less likely to be affected by the intrusion of chips or coolant.

à 300 m/min. Une vitesse de broche élevée est nécessaire pour respecter ces conditions d'usinage: 30.000 tr/min sont nécessaire avec une fraise de diamètre 0.3 mm et une vitesse de coupe de 300 m/min. Dans ces conditions, la vitesse de coupe possible avec les broches des machines est 5 à 6 fois plus faible comparée à celle nécessaire.

Le débit copeaux est aussi lié à la puissance de la broche. L'équation donne un petit rappel de mécanique à propos des liens entre puissance, couple et vitesse de rotation d'une broche:

$$\text{Puissance (Watts)} = \frac{\text{Couple (N.m)}}{\text{(N.m)}} \times \frac{\text{Vitesse de rotation (rad/sec)}}{\text{(rad/sec)}}$$

D'après l'équation, pour une puissance donnée, une vitesse de rotation plus élevée occasionne un couple plus faible pour fraiser la prothèse. Le couple nécessaire à l'usinage dépend des paramètres d'usinage et du matériau prothétique employé.³⁸ Avec un couple plus faible, le nombre de passes à effectuer sur la prothèse et le temps d'usinage augmentent. De façon à augmenter la productivité, la vitesse de broche doit être la plus élevée possible. Ceci afin de respecter la vitesse de coupe recommandée et augmenter le couple disponible de façon à limiter le nombre de passes nécessaires au balayage de toute la prothèse. Par conséquent une vitesse de broche élevée réduit les temps d'usinage. Les machines Lyra et Carestream fournissent une puissance et une vitesse de rotation les plus élevées, alors que leurs temps d'usinage ne sont pas les plus faibles. Les machines Cerec et E4D/Planmill affichent un temps d'usinage plus faible que les machines Lyra et Carestream. Ceci peut être expliqué par le choix concernant les machines Cerec et E4D/Planmill d'embarquer deux broches pour contrebalancer la faible puissance et la faible vitesse de rotation de la broche.

Le débit copeaux est aussi impacté par la vitesse d'avance (vitesse relative entre l'outil et la pièce). La vitesse d'avance du Cerec varie de 1 à 1.5 mm/min et les 3 autres machines atteignent une vitesse d'avance d'environ 2.000 mm/min. La vitesse d'avance du Cerec est environ 1.000 fois plus faible, alors que le temps d'usinage du Cerec semble le meilleur. Cette observation peut être expliquée par la cinématique particulière de la machine Cerec. Les rotations secondaires D1 and D2 du Cerec, autour d'axes excentrés sont très sollicitées lors d'un usinage. Ces rotations spécifiques doivent être aussi rapides que les translations des machines Lyra, E4D/Planmill et Carestream.

La position de la broche et des axes dans la machine doit aussi être considéré comme un critère de productivité. L'intrusion de copeaux ou de lubrifiant à l'intérieur des broches et des axes de déplacements peut causer des pannes. Une broche verticale, comme sur la machine Lyra, est moins soumise à l'intrusion de lubrifiant et de copeaux.

Protocole de mesure outil vs. Exactitude prothétique

Le protocole de mesure outil impacte l'exactitude de la prothèse. Une dispersion de mesure sur la longueur ou sur le diamètre de l'outil est directement reportée sur les dimensions et la forme de la prothèse.

Toutes les machines de cabinet sont équipées d'un système de mesure des outils. Ce système est fixé soit sur le bâti de la machine soit sur un axe mobile. Les systèmes de mesure sont soit mécanique soit électromécanique. La machine Lyra utilise une butée mécanique fixée sur l'axe A pour mesurer la longueur de l'outil. Avec cette solution, pas besoin de capteur électromécanique supplémentaire. Le risque d'erreur de mesure lié à la présence de copeaux ou lubrifiant encaissant le capteur est nul. Cependant, lorsque le système de mesure est fixé sur un axe mobile, des dispersions de mesure sont générées à cause des défauts de guidage (stabilisation thermique, justesse, répétabilité) de l'axe.

Le Cerec utilise un protocole de mesure outil (longueur et diamètre) similaire en utilisant l'attachement du bloc comme butée mécanique. Cependant, la mesure outil et, finalement, la répétabilité d'usinage dépend des variations de diamètre des attaches des blocs.

Les solutions Carestream et E4D/Planmill évitent les défauts de guidage en fixant le capteur de mesure outil, sur le bâti fixe de la machine. Mais, comme expliqué précédemment des copeaux et du lubrifiant peuvent venir encaisser le capteur, provoquant des erreurs de mesures ou des pannes.

Rigidité du bâti de la machine vs. Exactitude prothétique et IS

Le bâti de la machine-outil est le squelette de la machine, et réalise une grosse partie de la rigidité de la machine. La rigidité de la machine et de l'outil affecte l'exactitude et la rugosité de la prothèse. Durant l'usinage, le phénomène d'enlèvement de matière génère des efforts et des vibra-

Tool measurement protocol vs prosthetic accuracy

The tool measurement protocol impacts on prosthesis accuracy. A tool length or diameter measurement error is directly reflected on the dimension and shape of the prosthesis.

All the chairside milling machines are fitted with a tool gauge calibration feature fixed on the machine frame or on the mobile axis. These calibration features can be mechanical, or can be a gauge sensor. The Lyra uses a mechanical component fixed on the A axis to measure tool length. With this solution, there is no need to add a sensor to perform the tool length measurement. This solution decreases the risk of measurement errors due to the presence of coolant and chips on the sensor. However, when the calibration system is fixed on a mobile axis, a measurement error can occur due to axis guidance system accuracy, repeatability, and thermal stabilization.

The Cerec uses a similar protocol to measure tool gauges (length and diameter) on the cylinder stand of the material block. Thus tool calibration and, finally, milling repeatability depends on the block diameter variations due to the block calibration cylinder.

The Carestream and E4D/PlanMill avoid guidance system faults by fixing a gauge sensor on the machine frame to perform the tool length measurement. However, as explained previously, material chips and coolant can be introduced in the sensor, and induce measurement errors or sensor failures.

Milling machine mechanical structure stiffness vs prosthetic accuracy and SI

The NC machine frame is the skeleton of the milling unit and provides the major part of the stiffness to the milling machine. Milling machine mechanical structure stiffness and tool stiffness affect prosthetic accuracy and surface roughness. During machining, the material removal phenomenon introduces mechanical loads and vibrations on the tool and milling machine structure. Mechanical loads can induce milling machine structure and tool bending that are reflected on the surface dimensions and shape of the prosthesis. Vibrations can also occur due to mechanical parts rotating (spindle motor rotor, axis motors rotor) at high frequency. Such vibrations can have a detrimental effect on prosthesis roughness.

Few industrial technical data are available. However, the manufacturer of the Carestream states that the CS3000 milling machine is "vibration free."³¹

Selling price vs embedded technology, maintenance, and aftersales services

Higher selling price does not mean higher productivity or accuracy. In fact, the selling price of milling machines is based on the embedded technology, maintenance, and aftersales services.

All the chairside systems range from €42,000 to €60,000. Price differences are attributable to the aftersales and maintenance service. Some manufacturers add an additional monthly cost for these services, while others include them in the basic system price. Although all the chairside systems are in the same price range, the embedded technologies differ. The selling price is not totally proportional to the cost of the embedded technology. For instance, stepper motor technology is cheaper to produce and integrate than a brushless motor. The position monitoring technology associated with the stepper motor is cheaper than the position and speed monitoring and correction associated with brushless motors; real-time axis correction equipment is needed for position, speed monitoring, and correction.

The Lyra chain can be rented in Europe. Its cost to the practitioner is €99 for 20 restorations per month, above which a volume discount is applied.

In-office practice vs milling machine use

The milling machine used is a key factor for in-office practice. Different solutions are provided for tool changing operations in order to simplify milling machine use and to save time for practitioners.

For the Carestream and Lyra milling machines, a single tool is used for the complete milling of the prosthesis, whatever the material chosen. This solution simplifies tool purchase and changing operations because only one tool reference is needed. However, tool wear is not equivalent for each material milled. Ceramics generate more tool wear than composites. Therefore, tool-changing frequency is closely linked to the materials milled. To avoid this drawback, the Cerec option (2 tool couples) provides practitioners with tools adapted to the material milled. One tool couple is used for milling composites, the other for ceramics.

The Cerec milling system uses the appropriate bur to mill the prosthetic material. Therefore, the changing frequency of tool couples is similar. However, the use of one or a couple of tools leads to a milling process with a small-diameter finishing

tions sur l'outil et sur la machine. Les efforts induisent aussi bien sur l'outil que sur la machine, des déformations qui se reportent sur les dimensions et la forme de la prothèse. Les vibrations apparaissent lorsque des pièces sont en rotation à hautes fréquences (broches, moteurs d'axes). De telles vibrations ont un effet néfaste sur la rugosité prothétique.

Peu de données techniques sont disponibles à ce sujet. Cependant, le fabricant Carestream indique que sa machine CS3000 est "sans vibrations".³¹

Prix de vente vs. Technologies embarquées, maintenance et service après-vente

Un prix de vente élevé n'est pas gage de meilleure qualité ni de meilleure productivité. En fait le prix de vente des MOCN est basé sur les technologies embarquées, la maintenance, et le service après-vente.

Tous les systèmes destinés aux cabinets coûtent entre 42.000€ et 60.000€. Les écarts de prix sont principalement attribuables à la maintenance et au service après-vente. Certains fabricants facturent en sus ces prestations, alors que d'autres les incluent directement dans le prix de vente. Tous les systèmes pour cabinets sont dans la même gamme de prix alors que les technologies embarquées sont différentes. Le prix de vente n'est donc pas totalement proportionnel aux technologies embarquées. Par exemple les moteurs pas-à-pas sont moins onéreux à produire et à intégrer comparés à des moteurs brushless. Le contrôle de position d'un moteur pas-à-pas est moins coûteux qu'un asservissement de vitesse et position d'un moteur brushless; une électronique de commande temps réel est nécessaire pour obtenir de l'asservissement de vitesse et de position.

Le système Lyra est disponible à la location en Europe. Le coût est de 99€ pour 20 restaurations mensuelles. Un tarif dégressif est appliqué pour des quantités supérieures.

Pratique en cabinet vs. Utilisation des machines de fraisage

L'utilisation d'une machine de fraisage en cabinet est un facteur clé dans la pratique quotidienne. Différentes solutions sont proposées concernant les opérations de remplacements d'outils de façon à simplifier l'utilisation de la machine tout en économisant du temps aux praticiens.

Pour les machines Carestream et Lyra, un seul outil est utilisé pour fraiser la prothèse complète, quel que soit le matériau prothétique. Cette solution simplifie les achats et remplacements d'outil: une seule référence outil à gérer. Cependant, l'usure de l'outil n'est pas équivalente en fonction du matériau prothétique usiné. Les matériaux céramiques génèrent une usure plus prononcée par rapport aux composites. La fréquence de changement d'outil est donc dépendante du matériau fraisé. Afin d'éviter ce biais le système Cerec avec l'option de deux paires d'outils offre la possibilité d'adapter les outils aux matériaux usinés. Un couple d'outils pour l'usinage des composites, l'autre couple pour les céramiques. Le système Cerec utilise les fraises adaptées au matériau prothétique fraisé. Mais malheureusement la fréquence de changement d'outils est similaire pour les deux couples d'outils. Toutefois, l'utilisation d'un ou deux outils mène, de toute façon, à l'utilisation d'outils de faible diamètre en finition. Cet outil de finition peut flétrir sous les efforts d'usinage et même parfois casser. Afin d'éviter ce biais la machine E4D/Planmill est munie d'un changeur automatique d'outil. Trois couples d'outils de différents diamètres, et différentes géométries adaptées aux efforts de coupe et au biomatériau, sont disponibles.

La machine idéale est fonction des besoins du praticien. La technologie de la machine doit aussi être adaptée en fonction des biomatériaux (composites, céramiques, et hybrides) et du type de restaurations (couronnes, facettes, inlays, onlays, bridges, etc.) usinés.¹⁵⁻¹⁶

Conclusion

Les machines de fraisage numériques pour cabinets dentaires ont été décrites au travers des termes techniques et concepts consacrés. Les aspects techniques et économiques les plus importants lors du choix d'un système d'usinage pour cabinets dentaires ont été discutés. Le choix du dentiste doit être guidé par l'impact de la technologie des machines de fraisage sur la qualité de la restauration. Même si, la qualité finale doit être considérée en premier, et joue un rôle majeur sur les prothèses usinées, les critères économiques et l'interopérabilité avec des logiciels tiers sont aussi à prendre en compte lors du choix d'une machine de fraisage pour cabinet dentaire.

tool. This finishing tool can bend under milling mechanical load and tool breakage can sometimes occur. To avoid this drawback, the E4D/PlanMill milling center is equipped with an ATC. Three tool couples are provided, with different tool diameters, and with geometries that can be adapted to the mechanical loads of the milling process and the prosthetic material.

Which milling machine is ideal for a particular practice depends on the needs of the practitioner/s. Milling machine technology should also be considered for the purpose of milling the prosthetic biomaterials (composites, ceramics, and hybrids), as well as the type of restoration shapes (crowns, veneers, inlays, onlays, bridges, etc).^{15,16}

Conclusion

Dental milling machines for dental offices were overviewed in light of the associated technical terms and concepts relating to NC milling. The most important technical and economic aspects were discussed in terms of choosing a chairside milling system. The dentist's choice must be based on the influence of the NC milling technology on the restoration quality. Even though the final quality of the milled prostheses plays a major role in the decision and is the first consideration, the economic criterion and the interoperability with third-party software also need to be taken into account when choosing a chairside milling system.

References

1. Duret F. Empreinte Optique. Faculté d'Ondontologie. MSc thesis. Lyon: Claude Bernard University, 1973:1-400.
2. Duret F. Analysis of Holographic dental image, optical Print, CAD and CAM for dental Robotic prosthesis. Revue Sciences et techniques Biomédicale. 1976:1-8.
3. Mainjot AK. Limites et futur des procédés CFAO pour les prothèses tout céramique. Entretiens de Bichat d'Odontologie-Stomatologie 2012;1:1-5.
4. Giordano R. Materials for chairside CAD/CAM-produced restorations. J Am Dent Assoc 2006;137(suppl):14S-21S.
5. Alt V, Hannig M, Wöstmann B, Balkenhol M. Fracture strength of temporary fixed partial dentures: CAD/CAM versus directly fabricated restorations. Dent Mater 2011;27:339-347.
6. Davidowitz G, Kotick PG. The use of CAD/CAM in dentistry. Dent Clin North Am 2011;55:559-570.

7. van Noort R. The future of dental devices is digital. *Dent Mater* 2012;28:3–12.
8. Tapie L, Lebon N, Mawussi B, Fron Chabouis H, Duret F, Attal J-P. Understanding dental CAD/CAM for restorations – the digital workflow from a mechanical engineering viewpoint. *Int J Comput Dent* 2015;18:21–44.
9. Tapie L, Lebon N, Mawussi B, Fron Chabouis H, Duret F, Attal J-P. Understanding dental CAD/CAM for restorations – accuracy from a mechanical engineering viewpoint. *Int J Comput Dent* 2015;18: 343–367.
10. Davis LG, Ashworth PD, Spriggs LS. Psychological effects of aesthetic dental treatment. *J Dent* 1998;26:547–554.
11. Bertoluzza A, Fagnano C, Monti P, et al. Raman spectroscopy in the study of biocompatibility. *Clin Mater* 1992;9:49–68.
12. Sorensen JA. A rationale for comparison of plaque retaining properties of crown systems. *J Prosthet Dent* 1989;62:264–269.
13. Heintze SD. Crown pull-off test (crown retention test) to evaluate the bonding effectiveness of luting agents. *Dent Mater* 2010;26:193–206.
14. Hickel R, Peschke A, Tyas M, et al. FDI World Dental Federation: clinical criteria for the evaluation of direct and indirect restorations – update and clinical examples. *Clin Oral Investig* 2010;14:349–366.
15. Dirxen C, Blunck U, Preissner S. Clinical performance of a new biomimetic double network material. *Open Dent J* 2013;7:118–122.
16. Zimmermann M, Mehl A, Reich S. New CAD/CAM materials and blocks for chairside procedures. *Int J Comput Dent* 2013;16:173–181.
17. ISO 2806. Industrial automation systems – Numerical control of machines – Vocabulary. 1994.
18. ISO 841. Industrial automation systems and integration – Numerical control of machines – Coordinate system and motion nomenclature. 2001.
19. Potocny DJ, Klim J. CAD/CAM in-office technology: innovations after 25 years for predictable, esthetic outcomes. *J Am Dent Assoc* 2010;141(suppl 2):5S–9S.
20. Liu PR. A panorama of dental CAD/CAM restorative systems. *Compend Contin Educ Dent* 2005;26:507–508,510,512.
21. Mörmann WH. The evolution of the CEREC System. *J Am Dent Assoc* 2006;137(suppl):7S–13S.
22. Mörmann W, Brandestini M. Process for the manufacture of medical and dental, alloplastic, endoprosthetic and exoprosthetic fittings. EP0054785B1, priority date 24 December 1980.
23. Fasbinder DJ. The CEREC system: 25 years of chairside CAD/CAM dentistry. *J Am Dent Assoc* 2010;141(suppl 2):3S–4S.
24. Cerec MC XL. 2016. Online information available at <http://www.sirona.com/ecomaXL/files/A91100-M43-B657-7600-1.pdf&download=1>. Accessed 2 February 2016.
25. USAF Dental Evaluation & Consultation Service. Sirona CEREC inLab MC XL CAD/CAM Milling Machine (Project #08-028). 2010.
26. USAF Dental Evaluation & Consultation Service. Synopsis of CAD/CAM Systems (Project #11-001). 2011.
27. Sirona. 2016. Online information available at <http://www.sironausa.com/us/products/digital-dentistry/cerec-chairside-solutions/>. Accessed 2 February 2016.
28. LYRA. 2016. Online information available at <http://www.lyra-solutions.com/en/equipments/mill/>. Accessed 2 February 2016.
29. Planmeca. 2016. Online information available at <http://www.planmeca.com/CADCAM/Chairside/#planmeca-planmill>. Accessed 2 February 2016.
30. Carestream Dental. 2016. Online information available at <http://www.carestreamdental.com/ddi/en-GB/Mill/CS%203000#Features%20and%20Benefits>. Accessed 2 February 2016.
31. Carestream Dental. 2016. Online information available at <http://www2.carestreamdental.com/cssolutions/product-cs-3000.html>. Accessed 2 February 2016.
32. Astakhov VP. Surface integrity – definition and importance in functional performance. In: Davim JP (ed). *Surface Integrity in Machining*. London: Springer, 2010:1–35.
33. Axinte DA, Dewes RC. Surface integrity of hot work tool steel after high speed milling – experimental data and empirical models. *J Mater Process Tech* 2002;127:325–335.
34. Ginting A, Nouari M. Surface integrity of dry machined titanium alloys. *Int J Mach Tools Manufac* 2009;49:325–332.
35. Yin L, Song XF, Qu SF, Han YG, Wang H. Surface integrity and removal mechanism in simulated dental finishing of a feldspathic porcelain. *J Biomed Mater Res B Appl Biomater* 2006;79:365–378.
36. Yin L, Jahanmir S, Ives LK. Abrasive machining of porcelain and zirconia with a dental handpiece. *Wear* 2003;255:975–989.
37. Daymi A, Boujelbene M, Linares JM, Bayraktar E, Ben Amara A. Surface Integrity Analyses in High Speed Inclined Milling of the Titanium Alloy Ti-6Al-4V. 13th International Research/Expert Conference "Trends in the Development of Machinery and Associated Technology". Hammamet, Tunisia, 16–21 October 2009.
38. Kadırgama K, Noor MM, Rahman MM, Bakar RA, El Hossein A. Fourth order torque prediction model in end milling. *J Appl Sci* 2009;9: 2431–2437.

Address/Adresse

Nicolas Lebon PhD, Department of Mechanical Engineering, Paris 13 University, Sorbonne Paris Cité, Saint Denis, France, Tel.: +33 158076785
E-Mail: lebon@univ-paris13.fr