



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

Nicolas Lebon

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

Part B: labside milling machines

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

Partie B: Centres d'usinage pour laboratoires et centres de production dentaires

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 laboratoires et centres de production dentaires (solution labside). 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, les critères technico-économiques de quatre centres d'usinage pour laboratoires dentaires et deux pour centres de production, disponibles sur le marché sont étudiés. Les critères techniques sont axés sur la capacité des technologies embarquées dans les centres

Abstract

Nowadays, dental numerical controlled (NC) milling machines are available for dental laboratories (labside solution) and dental production centers. This article provides a mechanical engineering approach to NC milling machines to help dental technicians understand the involvement of technology in digital dentistry practice. The technical and economic criteria are described for four labside and two production center dental NC milling machines available on the market. The technical criteria are focused on the capacities of the embedded technologies of milling machines to mill prosthetic materials and various restoration shapes. The economic criteria are focused on investment cost and interoperability with third-party software. The clinical relevance of the technology is discussed through the accuracy and integrity of the restoration.

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

It can be asserted that dental production center milling machines offer a wider range of materials and types of restoration shapes than labside solutions, while labside solutions offer a wider range than chairside solutions. The accuracy and integrity of restorations may be improved as a function of the embedded technologies provided. However, the more complex the technical solutions available, the more skilled the user must be. Investment cost and interoperability with third-party software increase according to the quality of the embedded technologies implemented.

Each private dental practice may decide which fabrication option to use depending on the scope of the practice.

d'usinage dentaires, 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 de cette nouvelle technologie est discutée au travers de l'exactitude et de l'intégrité de la restauration obtenue.

Il peut être affirmé que les centres d'usinage pour centres de production dentaires offrent un choix plus étendu de matériaux et de types de restaurations accessibles, comparés aux centres d'usinage pour laboratoires dentaires. Tandis que les solutions pour laboratoires dentaires offrent un choix plus étendu de matériaux et de types de restaurations accessibles, comparés aux machines de cabinets dentaires. L'exactitude et l'intégrité des restaurations produites peuvent être améliorées en fonction des technologies embarquées. Cependant, plus les solutions techniques intégrées dans les MOCN sont complexes, plus l'utilisateur doit être expérimenté. Le coût d'investissement et l'interopérabilité avec un logiciel tiers augmentent avec le niveau de qualité des technologies implémentées.

Le type de restauration prothétique de la pratique quotidienne en cabinet dentaire doit permettre de définir quel type de fabrication choisir.

Mots clé: *fraisage dentaire, CFAO, intégrité de surface, Cerec, DMG MORI, Kavo, CharlyDental, Roland*

Keywords: *dental milling, CAD/CAM, surface integrity, Cerec, DMG MORI, Kavo, CharlyDental, Roland*

Introduction

As digital technology has become increasingly widespread, it is now commonplace to employ fully digital computer-aided design/computer-aided manufacturing (CAD/CAM) processes for creating inlays, crowns, fixed partial dentures, implant abutments, and other dental prostheses. CAD/CAM has earned the trust of many practitioners and dental technicians.

Despite the attractions of CAD/CAM technology, the practitioner still needs to evaluate the clinical relevance of the machining technology according to the type of production chosen: office milling (chairside) or outsourced milling (labside). For chairside CAD/CAM, the machining tasks are performed in the practitioner's office. For labside CAD/CAM, the machining tasks are outsourced to a dental laboratory or production center. Each private dental practice may decide which fabrication option to use depending on the scope of

Introduction

La technologie numérique s'étant largement démocratisée, il est maintenant commun d'employer une chaîne numérique complète de conception et de fabrication assistée par ordinateur (CFAO) pour fabriquer des inlays, couronnes, bridges, implants et autres prothèses dentaires. La CFAO a gagné la confiance de beaucoup de praticiens, et de techniciens dentaires. Malgré l'engouement pour la CFAO, le dentiste doit évaluer les implications cliniques de cette technologie d'usinage conjointement avec le type de production choisie: usinage en cabinet (chairside) ou externalisé (labside). Pour la CFAO en cabinet la fabrication est réalisée dans le cabinet dentaire. Au contraire pour la CFAO externalisée, la fabrication est sous-traitée dans un laboratoire ou centre de production dentaire. La pratique quotidienne en cabinet doit permettre de décider quel type de fabrication choisir. 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).¹⁻⁵

Le but de cet article est de donner aux dentistes une meilleure compréhension de l'impact de la technologie des machines de fraisage numériques sur la dentisterie numérique. Les types de fabrication (cabinet ou externalisée) sont discutés en comparant les technologies des machines de cabinets, des centres d'usinage pour laboratoires et centres de production dentaires.

Centres d'usinage pour laboratoires dentaires

environ 40 centres d'usinage sont disponibles sur le marché. Pour notre étude, 4 centres d'usinage représentatifs du marché sont étudiés: deux centres d'usinage développés spécialement pour le domaine dentaire (Cerec InLab MCXL et Kavo Arctica Engine) et deux centres d'usinage dérivés de domaines applicatifs différents comme la joaillerie, l'orthopédie et la podologie, la micromécanique, et la gravure (CharlyDental CD04-S et Roland DWX-50).

Centre d'usinage Cerec InLab MCXL

Il s'agit de la machine Cerec MCXL (voir Partie A), équipée toutes options (2 outils sur les 2 broches).

Centre d'usinage Kavo Arctica Engine

Ce centre d'usinage (Fig. 1) est développé par Kavo Dental (Biberach, Germany). Il est assez récent et plus de 1000 systèmes sont installés dans le monde (Source interne fabricant). Le centre d'usinage Kavo peut fraiser des inlays, onlays, facettes, couronnes, et bridges. Les matériaux usinables sont les résines, cires, composites, hybrides, céramiques pré-frittées, PMMA, et alliages de titane. D'après le fabricant il s'agit d'un système de CFAO pouvant recevoir des fichiers STL provenant d'une source tiers.

Le centre Arctica Engine 5 axes est équipé d'une broche orientable. La cinématique machine est illustrée Figure 1b. Les translations Y et Z et la rotation A sont des

the practice. Either the practitioner or the dental technician invests in one or more milling machines. The efficiency and cost of the milling technology varies. Milling machine efficiency should be evaluated through the capacity of processing biomaterials (composites, ceramics, and hybrids), which provide prosthesis integrity (eg, anatomic details, low dental plaque retention, good adhesion, longevity). The type of restoration shapes (crowns, veneers, inlays, onlays, bridges, etc) and those of economy (price, and manufacturing time).¹⁻⁵

The aim of this article is to give practitioners and dental technicians a better understanding of the involvement of numerical controlled (NC) milling machine technology in digital dentistry. Which fabrication option to use (chairside or labside) is discussed through comparisons of chairside and labside dental NC milling machine technologies.

Labside milling centers for dental laboratories

About 40 milling centers are currently available on the market. For the purpose of this article, four relevant milling centers are studied: two milling centers that have been exclusively developed for dental prosthesis milling (Cerec InLab MCXL, and Kavo Arctica Engine), and two milling centers that are derived from other applications such as jewelry, orthopedics and chiropody, micromachining, and engraving (CharlyDental CD04-S, and Roland DWX-50).

Cerec InLab MCXL milling center

This is the in-office Cerec MCXL milling center (see Part A of this article series), fitted with all options (2 × 2 spindles).

Kavo Arctica Engine milling center

This milling center (Fig 1) was recently developed by the manufacturer Kavo Dental (Biberach, Germany). More than 1000 of these systems have been installed worldwide (from manufacturer internal source). The Arctica Engine can mill crowns, inlays, onlays, veneers, and bridges. The milled materials are composites, hybrids, resins, PMMA, pre-sintered ceramics, waxes, and titanium alloys. According to the manufacturer, this milling system (CAD/CAM software and machine) can receive STL files from a third-party device.

The Arctica Engine milling center is equipped with one tilted spindle. This is a 5-axis milling center. The kinematic structure is shown in Figure 1b. Translations Y and Z and rotation

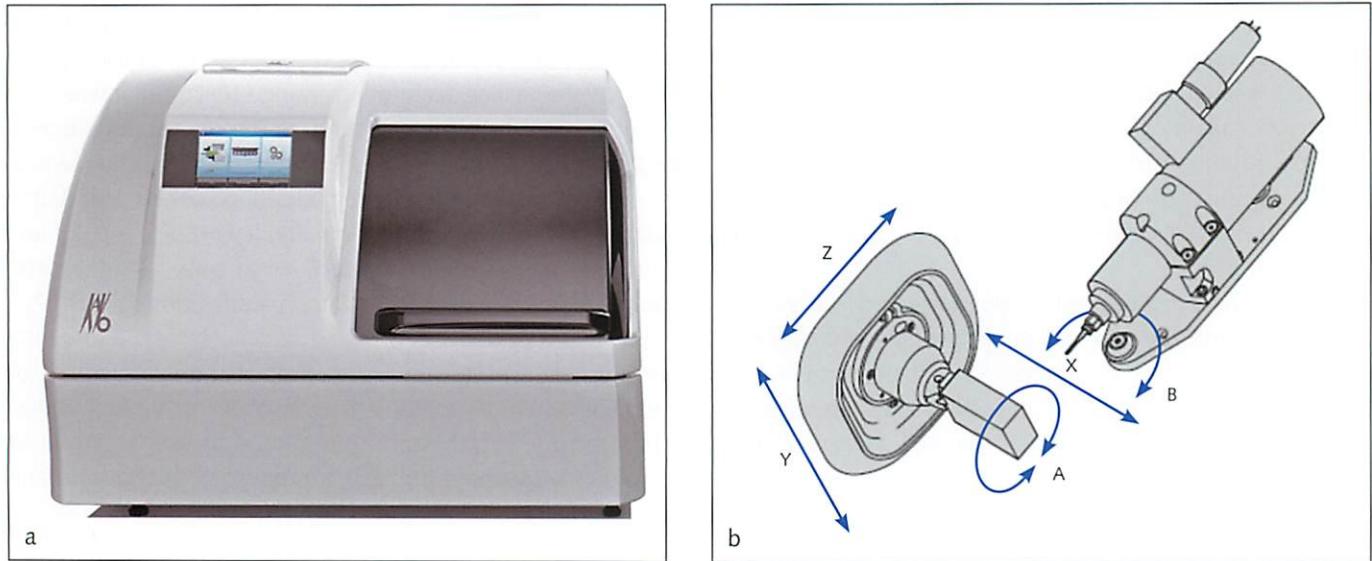


Fig 1a and b Kavo Arctica Engine milling center: (a) external view; (b) view of axes.

Fig. 1a et b Centre d'usinage Kavo Arctica Engine. Vue externe (a). Vue des axes (b).

A are obtained by the movements given to the workpiece. Translation X and rotation B are achieved by the spindle displacement. The three translations and two rotations are used simultaneously in continuous mode when milling. All the axes are half-numerical (monitoring of position but not speed).

This milling center is equipped with an ATC. Two removable magazines (one for grinding tools, one for cutting tools) with six tool stations are available for the ATC. The tools are measured (length and diameter) before and after each milling with a laser optical system. A measurement is performed after each milling to check whether tool breakage occurred during the milling operation. The optical system is fixed on the mobile Y and Z axes.

CharlyDental CD04-S milling center

This milling center (Fig 2) was developed by the manufacturer Mecanumeric (Albi, France). According to the manufacturer, around 200 units have been installed worldwide (from manufacturer internal source). The CD04-S milling center can mill crowns, inlays, onlays, inlay cores, veneers, and bridges. The milled materials are hybrids, composites, pre-sintered ceramics, resins, PMMA, waxes, and pre-sintered chromium/cobalt. This milling center can be integrated in a fully open CAD/CAM system and can download (by USB or RJ45 ports) programs generated from any third-party open CAM software.

mouvements donnés à la pièce. La translation X et la rotation B sont des mouvements donnés à la broche. Les 5 axes peuvent être utilisés en continu pendant l'usinage. Tous les axes sont demi-numériques (asservis en position, mais pas en vitesse).

Ce centre d'usinage est équipé d'un changeur automatique d'outils. Deux panoplies interchangeables d'outils sont disponibles (une panoplie pour les outils abrasifs, une panoplie pour les outils coupants) avec 6 emplacements.

Les outils sont mesurés (longueur et diamètre), avant et après chaque usinage, par un système laser. La mesure, après chaque usinage, permet de vérifier si une casse d'outil s'est produite durant la fabrication. Le système laser est fixé sur les axes mobiles Y et Z.

Centre d'usinage CharlyDental CD04-S

Ce centre d'usinage (Fig. 2) est développé par le fabricant Mecanumeric (Albi, France). Le fabricant annonce environ 200 systèmes installés dans le monde (Source interne fabricant). Le centre d'usinage peut usiner des inlays, onlays, facettes, couronnes et bridges. Les matériaux utilisables sont les composites, céramiques, hybrides, PMMA, cires, résine, et alliages chrome/cobalt pré-frittés. Ce centre peut être complètement intégré dans une chaîne CFAO ouverte, et peut recevoir (par ports USB ou RJ45) des programmes CN générés par un logiciel de FAO tiers.

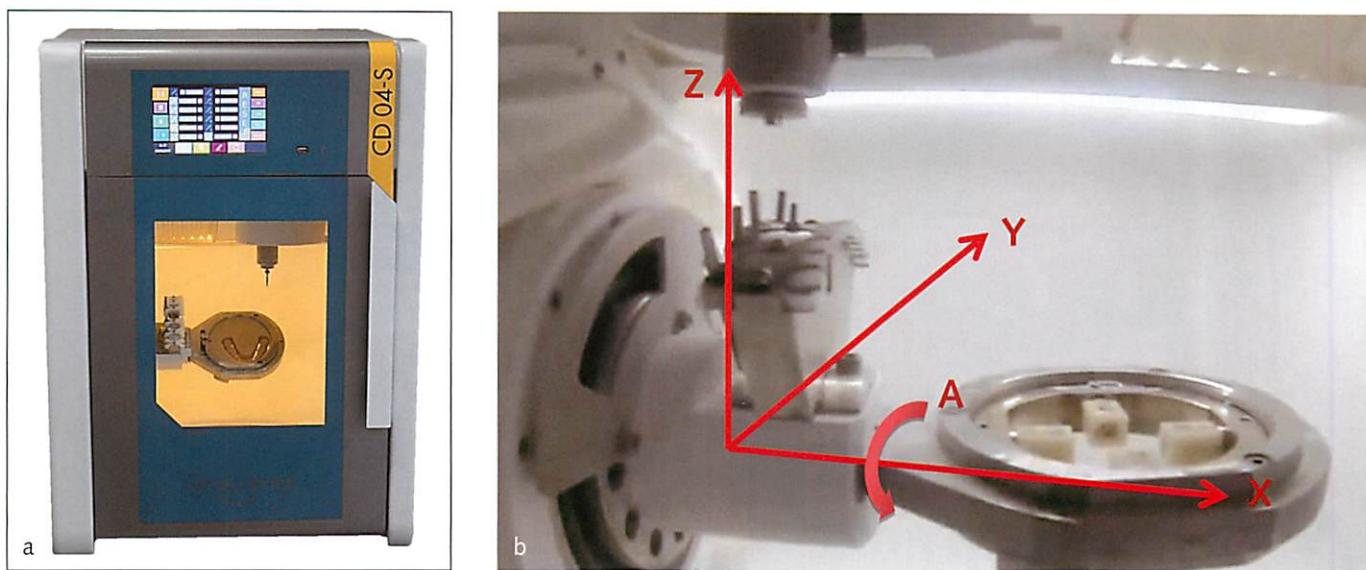


Fig 2a and b CharlyDental CD04-S milling center: (a) external view; (b) view of axes.

Fig. 2a et b Centre d'usinage Charlydental CD04-S. Vue externe (a). Vue des axes (b).

Cette machine 4 axes est équipée d'une broche verticale. La cinématique machine est illustrée Figure 2b. Les translations X et Z sont des mouvements donnés à la broche. La translation Y et la rotation A sont des mouvements donnés à la pièce. Tous les axes sont numériques (asservis en position et vitesse). Ce centre est équipé d'un changeur automatique d'outils 12 postes. Les longueurs d'outils sont mesurées par un capteur électromécanique avant et après chaque usinage. Il intègre un diagnostic de bris d'outil informant l'utilisateur en cas d'outil cassé. Le capteur est fixé sur les axes mobiles Y et A.

Centre d'usinage Roland DWX-50

Ce centre d'usinage (Fig. 3) est développé par le fabricant Roland DGA Corporation (Hamamatsu, Japan). Le centre DWX-50 peut usiner des inlays, onlays, facettes, couronnes et bridges. Les matériaux usinables sont les composites, céramiques pré-frittées, hybrides, PMMA, cires, et résines. Ce centre peut être complètement intégré dans une chaîne CFAO ouverte, et peut recevoir (par ports USB ou RJ45) des programmes CN générés par un logiciel de FAO tiers.

Ce centre 5 axes est équipé d'une broche verticale. La cinématique machine est illustrée Figure 3b. Les translations X, Y et Z sont des mouvements donnés à la broche. Les rotations A et B sont des mouvements donnés à la pièce. Les 5 axes peuvent être utilisés en continu pendant

The CD04-S is a 4-axis milling center equipped with one vertical spindle. The kinematic structure is shown in Figure 2b. Translations X and Z are obtained by the movements given to the spindle. Translation Y and rotation A are obtained by the movement given to the workpiece. All the axes are numerical (position and speed monitored).

The CD04-S is equipped with an ATC. Twelve tool stations are available. Tool lengths are measured by an electro-mechanical sensor before and after each operation. It integrates a tool diagnostics feature that informs users if a tool is broken. The sensor is fixed on the mobile Y and A axes.

Roland DWX-50 milling center

This milling center (Fig 3) was developed by the manufacturer Roland DGA Corporation (Hamamatsu, Japan). It can mill crowns, inlays, onlays, veneers, and bridges. The milled materials are composites, hybrids, pre-sintered ceramics, resins, PMMA, and waxes. This milling center can be integrated in a fully open CAD/CAM system and can receive programs generated from any third-party open CAM software.

The DWX-50 is a 5-axis milling center equipped with one vertical spindle. The kinematic structure is shown in Figure 3b. Translations X, Y, and Z are obtained by the movements given to the spindle. Rotations A and B are obtained by the movement given to the workpiece. All the axes are used simultaneously in continuous mode when

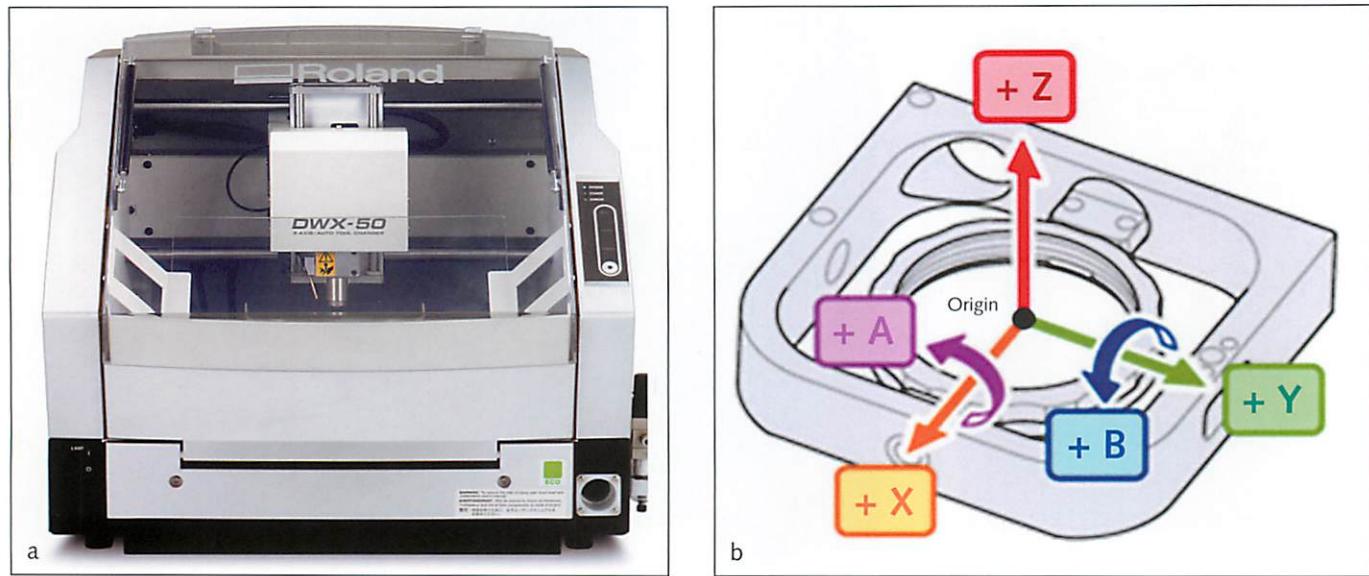


Fig 3a and b Roland DWX-50 milling center: (a) external view; (b) view of axes.

Fig. 3a et b Centre d'usinage Roland DWX-50. Vue externe (a). Vue des axes (b).

milling. All the axes are half-numerical (no monitoring of position or speed).

The DWX-50 is equipped with an ATC. Five tool stations are available. Tool lengths are measured by a fixed electro-mechanical sensor before and after each operation. It integrates a tool diagnostics feature that informs users if a tool was broken during the milling operation.

Discussion (labside milling centers for dental laboratories)

The most important technical and economic criteria used to compare the labside NC milling centers are listed in Table 1.

Machine tools kinematic vs milled prosthetic shapes

All the labside milling centers have kinematics and working space to mill crowns, inlays, onlays, veneers, and bridges. Some labside milling centers can mill larger plural prostheses due to larger working space. The DWX-50 and CD04-S milling centers can be fitted with single blocks, like chairside milling machines, and with wafers (\varnothing 98 mm; thickness 10 to 26 mm).

These milling centers are 4- or 5-axis kinematic structures fitted with the three translations (X, Y, Z) and the A

l'usinage. Tous les axes sont des demi-axes numériques (non asservis en position, ou en vitesse).

Ce centre est équipé d'un changeur automatique d'outils 5 postes. Les longueurs d'outils sont mesurées par un capteur électromécanique avant et après chaque usinage. Il intègre un diagnostic de bris d'outil informant l'utilisateur en cas d'outil cassé.

Discussion (Centres d'usinage pour laboratoires dentaires)

Les critères techniques et économiques les plus importants utilisés pour comparer les centres d'usinage pour laboratoires dentaires sont reportés dans le tableau 1.

Cinématique de la machine-outil vs. Forme de la prothèse fraisée

Tous les centres d'usinage pour laboratoires dentaires possèdent la cinématique et le volume de travail suffisant pour usiner des couronnes, inlays, onlays, facettes, et bridges. Certains centres d'usinage peuvent usiner des prothèses plurielles plus grandes, suivant leur volume de travail. Identiquement aux machines de cabinets, les centres Roland DWX 50 et CharlyDental peuvent recevoir des blocs unitaires, et des disques (\varnothing 98 mm; épaisseur 10–26 mm).

Table 1 Labside NC milling centers for dental laboratories: technical and economic analysis

Tab. 1 Analyse comparative technique et économique des MOCN pour laboratoires dentaires

Specifications/ Spécifications	Cerec InLab MCXL Sirona ⁶⁻¹⁰	Arctica Engine Kavo ¹¹	CD04-S CharlyDental ¹²	DWX-50 Roland ¹³⁻¹⁴
Axes/Axes	X, Z, A, D	X, Y, Z, A, B	X, Y, Z, A	X, Y, Z, A, B
Milled materials/ Matériaux usinables	composites, hybrids, pre-sintered oxide, partially crystallized glass-ceramics, resins/ composites, hybrids, vitrocéramiques feld- spatiques pré-frittées, vitrocéramiques partiel- lement cristallisées, résines	composites, hybrids, pre-sintered ceramics, titanium alloys, PMMA, waxes, resins/ hybrids, composites, céramiques pré-frittées, alliages de titane, PMMA, cires, résines	composites, hybrids, pre-sintered ceramics, resins, PMMA, waxes, pre-sintered chromium/cobalt/ hybrids, composites, céramiques pré-frittées, résines, PMMA, cires, chrome/cobalt pré-fritté	composites, hybrids, pre-sintered ceramics, resins, PMMA, waxes/ hybrids, composites, céramiques pré-frittées, résines, PMMA, cires
Milled restorations/ Restaurations usinables	crowns, inlays, onlays, veneers, bridges/ couronnes, inlays, onlays, facettes, bridges	crowns, inlays, onlays, veneers, bridges/ couronnes, inlays, onlays, facettes, bridges	crowns, inlays, onlays, veneers, inlay cores, bridges/ couronnes, inlays, onlays, facettes, inlays core, bridges	crowns, inlays, onlays, veneers, bridges/ couronnes, inlays, onlays, facettes, bridges
Axis motor technology/ Technologie des moteurs d'axes	Stepper motor/ Pas-à-pas	Stepper motor/ Pas-à-pas	Brushless	Stepper motor/ Pas-à-pas
Axis position resolution/ Résolution de positionnement des axes	X Y: 6.25 µm D: 0.01° A: 0.06°	X Y Z: 1.25 µm A B: 0.09°	1 µm	X Y Z: 1.25 µm A B: 0.0028°
Number of spindles/ Nombre de broches	2	1	1	1
Spindle speed/ Vitesse de la broche	42,000 RPM/ 42 000 tr/min	5,000–50,000 RPM max/ 5 000–50 000 tr/min max	60,000 RPM/ 60 000 tr/min	6,000–30,000 RPM/ 6 000–30 000 tr/min
Power consumption/ Puissance absorbée	Total: 320 W/ Total 320 Watts	Total: 1500 W Spindle: 500 W/ Total 1500 Watts Broche 500 Watts	Total: 1000 W Spindle: 500 W/ Total 1000 Watts Broche 500 Watts	Total: 275 W Spindle: 100 W/ Total 275 Watts Broche 100 Watts
Number of stations in the tool changer/Nombre d' outils en magasin	4	6	12	5
Number of simultaneous tools per job/Nombre d'outils simultanés au cours de l'usinage	2	1	1	1
Milling repeatability/ Répétabilité d'usinage	25 µm	> 15 µm	5–7 µm	50 µm
Milling feed rate/ Vitesse d'avance travail	1.0–1.5 mm/min	3000 mm/min maximum	2100 mm/min	X-Y: 6–3600 mm/min Z: 6–1800 mm/min A-B: 11.25 RPM
Numerical control/ Contrôle des axes numériques	Position monitored/ Position contrôlée	Position monitored/ Position contrôlée	Position and speed mon- itored, and correction/ Asservi en vitesse et position	None/Non
Average time to mill a full contour crown/Temps moyen d'usinage d'une couronne	6–11 min	10–15 min	10–14 min	12–18 min
Selling price/Prix de vente	€49,900	€43,000	€41,000	€30,000

rotary axis. On the CD04-S and MCXL milling centers, the 4th rotary A-axis is associated with 180-degree block overturning to first mill the extrados and then the intrados after rotation. The Arctica Engine and DWX-50 milling centers are equipped with a B rotary axis giving the 5th axis motion. Whereas chairside milling centers cannot mill prosthetic shapes with undercutting, labside milling centers allow milling shapes with undercutting. However, with a 4-axis milling center, such as the CD04-S and MCXL, undercuts can only be milled in the YZ plane given by the A rotary axis. To avoid this drawback, the 5-axis milling centers, such as the Arctica Engine and DWX-50, can mill undercuts in the YZ plane given by the A rotary axis, in the XZ plane given by the B rotary axis, or in any planes given by the simultaneous rotations on the A and B rotary axes.

Machine tools kinematics vs prosthetic surface integrity (SI)

Labside milling centers can mill prosthetic shapes with simultaneous motions on the translation and rotary axes. The contact surface between tool and workpiece can be better controlled, providing better milling conditions. Thus, prosthetic surface integrity (SI) should be better. However, with 4-axis milling centers, such as the CD04-S and MCXL, the tool can only be tilted in the YZ plane given by the A rotary axis. Therefore, the contact surface cannot always give the best cutting conditions. Better cutting conditions are achieved with 5-axis milling centers, such as the Arctica Engine and DWX-50. The tool can be tilted simultaneously in the feed rate direction (tilt angle direction) and in the perpendicular plane of the feed rate direction (lead angle direction). The combination of continuous A and B rotary axis motions during milling gives the tilt and lead angles to the tool. The contact surface between the tool and workpiece is linked to these two angles. Therefore, the contact surface can be better controlled to achieve better cutting conditions and SI. This milling process continuously tilts and controls the tool according to the prosthetic surface, and is mostly performed during finishing operations. Finishing operations give the final SI of the prostheses.

Ces centres d'usinage ont une cinématique 4 ou 5 axes composée de 3 translations (X, Y, Z) et au moins une rotation A. Sur les machines CharlyDental et Cerec MCXL, le 4^{ème} axe rotatif A est associé au retournement de 180° du bloc. Premièrement l'extrados est usiné, puis après retournement l'intrados. Les centres Kavo et Roland sont munis d'un 5^{ème} axe rotatif B. Alors que les machines de cabinets ne peuvent pas usiner de contre dépouilles, les centres d'usinage pour laboratoires sont capables d'en usiner. Cependant, avec un centre d'usinage 4 axes comme le CharlyDental et le Cerec MCXL, les contre dépouilles sont usinables seulement dans le plan YZ grâce à l'axe A. Afin d'éviter ce biais, les centres 5 axes, comme le Kavo Arctica et le Roland DWX-50, sont capables d'usiner des contre dépouilles dans le plan YZ grâce à l'axe A, dans le plan XZ grâce à l'axe B, ou dans un plan quelconque grâce aux rotations simultanées A et B.

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

Les centres d'usinage pour laboratoires peuvent usiner des prothèses en utilisant simultanément les axes rotatifs et les translations disponibles. Le contact entre l'outil et la prothèse est mieux géré, améliorant les conditions d'usinage. Ainsi l'IS prothétique peut être améliorée. Cependant, avec un centre d'usinage 4 axes, comme le CharlyDental ou le Cerec MCXL, l'outil ne peut être incliné par l'axe rotatif A que dans le plan YZ. De ce fait l'usinage ne peut pas toujours être réalisé dans les conditions optimales. De meilleures conditions sont obtenues avec un centre 5 axes, comme le Kavo Arctica ou le Roland DWX-50. L'outil peut être dépinçé simultanément dans un plan de la direction de l'avance (angle tilt) et dans un plan perpendiculaire à la direction de l'avance (angle lead). La combinaison des rotations continues des axes A et B donne à l'outil les angles de dépinçage tilt et lead. Le point de contact entre l'outil et la pièce est lié à ces deux angles. Ainsi le contact peut être mieux contrôlé conduisant à de meilleures conditions d'usinage et d'IS. Le dépinçage et le contrôle en continu de la position de l'outil sur la surface de la prothèse est fréquemment employé en fraisage de finition. Ce sont les opérations de finition qui engendrent l'IS finale sur les prothèses.

Exactitude et technologie des axes vs. Exactitude prothétique

Résolution de positionnement des axes, asservissement des axes numériques et répétabilité d'usinage

Seul le CharlyDental est équipé de moteurs d'axes brushless, les 3 autres centres d'usinage étudiés sont équipés de moteurs d'axes pas-à-pas. La résolution des axes linéaires varie de 1 µm à 6.25 µm. Les axes du centre d'usinage Roland DWX-50 ne sont pas asservis. Les axes du Cerec sont surveillés de façon à alerter et stopper l'usinage en cas de défaut. Le Kavo Arctica est asservi en boucle fermée; si un écart de position apparaît, la position est corrigée en temps réel. Le CharlyDental est asservi en boucles fermées; si un écart de position ou de vitesse apparaît, l'écart est corrigé en temps réel.

La fonction d'anticipation "look ahead" peut être utilisée avec la technologie de moteur brushless. Cette fonction permet d'anticiper les accélérations/décélérations de trajectoire.

Une relation peut être établie entre la technologie des axes et la répétabilité d'usinage: pour le centre CharlyDental (technologie brushless, asservissement vitesse et position) la répétabilité d'usinage est de 5–7 µm, alors que la répétabilité des centres Cerec, Roland et Kavo (technologie pas-à-pas et pas de fonction d'anticipation) varie de 15 à 50 µm.

L'asservissement des axes et la fonction d'anticipation améliore l'exactitude de la prothèse usinée.

Technologies des broches et des axes vs. Productivité

Pour les 4 systèmes étudiés la vitesse de rotation de broche varie de 42 000 à 60 000 tr/min. Les systèmes Roland et Kavo offrent une vitesse de broche variable. Ceci rendant possible l'adaptation de la vitesse de coupe au biomatériau usiné. Comme pour les machines de cabinets, la vitesse de coupe (130–300 m/min avec une fraise de diamètre compris entre 0.3 et 4 mm) attendue ne peut pas toujours être atteinte.

La puissance des broches varie de 100 à 500 W, i.e. identique aux machines de cabinets. Le temps d'usinage moyen d'une couronne est le même que sur les machines de cabinets. D'après l'équation:

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

Accuracy and axis technology vs prosthesis accuracy

Axis position resolution, axis numerical control, and milling repeatability

Only the CD04-S milling center is equipped with brushless motor technology; the other three milling centers discussed in this article are equipped with stepper motor axis technology. The linear axis resolution ranges from 1 µm to 6.25 µm. The axes of the DWX-50 milling center are not monitored. The axes of the MCXL milling center are position monitored to warn the user and stop the milling process if a position error occurs. The Arctica Engine milling center is position monitored with closed loops; if a position error occurs during machining, this position error is corrected in real time. The CD04-S milling center is position and speed monitored with closed loops; if a position error or a feed rate loss occurs during machining, these two types of error are corrected in real time.

The "look ahead" function can be used with the brushless embedded motor technology. This function is able to anticipate trajectory and acceleration/deceleration.

A relationship can be established between the axis technology and milling repeatability: for the CD04-S milling center (brushless technology, real-time position and speed correction), milling repeatability is 5 to 7 µm, whereas for the MCXL, DWX-50, and Arctica Engine milling centers, repeatability (stepper technology and no "look ahead" anticipation) ranges from 15 to 50 µm.

Real-time position monitoring and correction, as well as "look ahead" technologies, increase milled prosthesis accuracy.

Spindle and axis technology vs productivity

For the four milling centers overviewed, the spindle speeds range from 42,000 to 60,000 RPM. The DWX-50 and Arctica Engine systems offer spindle speed variation. This makes it possible to adapt the cutting speed to the biomaterial milled. For the chairside milling centers, the cutting speed expected (130 to 300 m/min with a bur diameter between 0.3 and 4 mm) cannot always be reached.

The spindle power ranges from 100 to 500 W, which is the same as the chairside milling centers. The milling time for a single crown remains the same as for the chairside milling centers. According to the following equation:

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

(see Part A), the Arctica Engine milling center provides the best combination of spindle speed and power, whereas the milling time is not lower than that of the three other milling centers studied. The milling process used for milling also explains this drawback. The Arctica Engine milling process is composed of roughing operations performed with two tools, semi-finishing operations performed with two tools, and finishing operations performed with two tools. During this milling process, six automatic tool changes are needed, which introduces productivity loss; no material removal is processed during tool changing. On the other hand, no tool changing is required for the Cerec milling process. However, it should be borne in mind that the milling process directly impacts on the SI. Shorter milling time is often associated with a lower SI. The balance between productivity, SI, and embedded technology should be taken into account. To maintain a suitable SI within the same milling time as its competitor, Kavo chose to provide a more powerful spindle to counterbalance productivity loss when tool changing.

The material removal rate is also affected by the milling feed rate (relative speed between the tool and the work-piece). The MCXL milling feed rate ranges from 1 to 1.5 mm/min, and the milling feed rates of the three other milling centers are around 3000 mm/min. As explained previously, the secondary rotary axes D1 and D2 around the eccentric axes are mostly used during milling, and should be as fast as the tool motions in other milling centers giving the same range of milling time. It should be noted that the axis maximum feed rate is higher for lab-side than for chairside milling centers, whereas their milling times are equivalent. The feed rate needed to mill zirconia should be lower than chairside and labside axis maximum feed rates, giving the same milling time for a crown.

Tool measurement protocol vs prosthetic accuracy

The MCXL measurement protocol is the same as that presented for the chairside milling center. All the other milling centers are fitted with an electromechanical sensor or laser measurement system to perform tool gauge calibration. As explained previously, such technologies can induce more measurement errors due to the presence of coolant and chips on the sensor. The Arctica Engine laser measurement system is fixed on the Y and Z axes. The CD04-S and DWX-50 measurement sensors are fixed on 1 or 2 axes. When the

(voir Partie A), le centre Kavo Arctica procure la meilleure combinaison de vitesse et puissance de broche, alors que le temps d'usinage n'est pas le plus faible des 4 systèmes. Cet inconvénient peut s'expliquer par les stratégies d'usinage utilisées. Le centre Kavo Arctica utilise des stratégies d'usinage avec des opérations d'ébauche réalisées avec 2 outils, puis des opérations de demi-finition réalisées avec 2 outils, et des opérations de finition réalisées avec 2 outils. Durant l'usinage, 6 changements automatiques d'outils sont effectués, faisant baisser la productivité. Il n'y a pas de débit copeaux durant les changements d'outils. Aucun changement d'outil n'est requis sur le Cerec. Cependant, il faut garder en mémoire que les stratégies d'usinage impactent directement l'IS. Des temps d'usinage plus court sont souvent associés à de plus faibles IS. Un compromis entre productivité, IS et technologie embarquée doit être trouvé. Pour maintenir un niveau d'IS acceptable avec le même temps d'usinage que ces concurrents Kavo a choisi d'intégrer une broche plus puissante pour contrebalancer la perte de productivité liée aux changements d'outils.

Le débit copeaux est aussi affecté par la vitesse d'avance (vitesse relative entre la pièce et l'outil). La vitesse d'avance du Cerec varie de 1 à 1.5 mm/min et les 3 autres machines détiennent une vitesse d'avance d'environ 3000 mm/min. Comme expliqué précédemment, les rotations secondaires D1 et D2 du Cerec, autour d'axes excentrés sont très sollicitées lors d'un usinage et sont finalement aussi rapides que les translations des autres centres d'usinage, établissant un temps d'usinage équivalent. Il est souligné que les vitesses d'avance maximum sont plus élevées sur les centres d'usinage de laboratoires que sur les machines de cabinets, alors que leurs temps d'usinage sont équivalents. La vitesse d'avance recommandée pour usiner de la zircone doit être plus faible que les vitesses maximales des axes disponibles sur les machines chairsides et labside. Ce qui donne des temps d'usinage similaires lors de l'usinage d'une couronne en zircone quel que soit la machine.

Protocole de mesure outil vs. Exactitude prothétique

Le protocole de mesure des outils Cerec a déjà été présenté dans la Partie A. Tous les autres centres d'usinage sont équipés de capteurs électromécaniques ou de système laser, pour opérer les jauge outils. Comme précédemment expliqué, ces systèmes subissent les actions du lubrifiant et des copeaux, pouvant produire des erreurs de mesure.

Le laser de mesure Kavo est fixé sur les axes Y et Z. Les capteurs de mesure Charlyrobot et Roland sont fixés sur 1 ou 2 axes mobiles. 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.

Rigidité du bâti de la machine vs. Exactitude prosthétique et SI

Comme expliqué précédemment dans la Partie A, durant l'usinage la structure de la machine doit résister aux efforts mécaniques et aux vibrations générées. Peu de données techniques sont disponibles à ce sujet. Le centre d'usinage Kavo Arctica possède un bâti en granite. Les bâtis en granite sont utilisés dans l'industrie mécanique de précision pour absorber les vibrations et encaisser les efforts mécaniques. De ce fait les centres d'usinage à bâti granite sont meilleurs, mais leur masse est plus élevée, et doivent donc être installés sur un socle approprié.

Prix de vente vs. Technologies embarquées

Les machines pour laboratoires dentaires coutent de 30 000 € à 50 000 € et sont aussi onéreuses que les machines pour cabinets dentaires, alors que, la technologie employée est souvent plus évoluée (magasin outils, 4 ou 5 axes continus, meilleure CN) et efficace (meilleures conditions de coupe, meilleure exactitude prothétique).

Ceci peut être expliqué par la différence de taille de part de marché entre cabinets et laboratoires. Les machines pour les cabinets sont développées et produites spécifiquement pour ce marché. Les centres d'usinage pour les laboratoires sont généralement dérivés d'applications médicales ou industrielles. Ainsi, le nombre de centres d'usinage vendus et supérieur au nombre de machines pour cabinets vendues. Ainsi le retour sur investissement des fabricants est plus élevé pour les centres d'usinage pour laboratoires comparé aux machines pour cabinets.

Pratique en cabinet vs. Utilisation des centres d'usinage

La plupart des centres d'usinage sont équipés d'un changeur automatique d'outils avec plusieurs emplacements. Les renouvellements d'outils usés ou cassés sont des manipulations chronophages et plusieurs références d'outils sont à gérer.

calibration sensor is fixed on a mobile axis, a measurement error can occur due to axis guidance system accuracy, repeatability, or thermal stabilization.

Milling machine mechanical structure stiffness vs prosthetic accuracy and SI

As explained in Part A, the machine structure must resist the mechanical loads and vibrations introduced by the milling process. Few industrial technical data are provided. The frame of the Arctica Engine is made of granite. Granite frames are used in mechanical precision industries to absorb vibrations and resist mechanical loads, thus milling centers with granite frames are better; however, the mass of a milling center with a granite frame is higher, and these systems should be installed on an appropriate base.

Selling price vs embedded technology

Labside milling centers range from €30,000 to €50,000, ie, they are as expensive as chairside milling centers despite the fact that the embedded technology of labside milling centers is very often more advanced (ATC, 4 or 5 axes in simultaneous motion when milling, better axis numerical control), and more efficient (better milling conditions, better prosthesis accuracy). This can be explained by the difference between the chairside market and the labside market. Milling machines developed and produced for the chairside market are specifically dedicated for the dental CAD/CAM market, whereas those developed and produced for the labside market are mostly derived from various medical and industrial applications. Thus, the number of labside milling centers sold by manufacturers is higher than the number of (the more specific) chairside milling centers sold. Therefore, for manufacturers, the return on development and production investment is lower for labside than for chairside milling centers.

In-lab practice vs milling machine use

Most of the milling centers are equipped with an ATC with several tool stations. The tool renewal manipulations are time-consuming, and several tool references need to be purchased. In the dental laboratory, these considerations are not considered to be a major drawback because, unlike practitioners, dental technicians can adapt the tool diameter and geometry according to the prosthesis shape, and the tool material according to the prosthesis biomaterial, thus giving better prosthesis SI and accuracy.

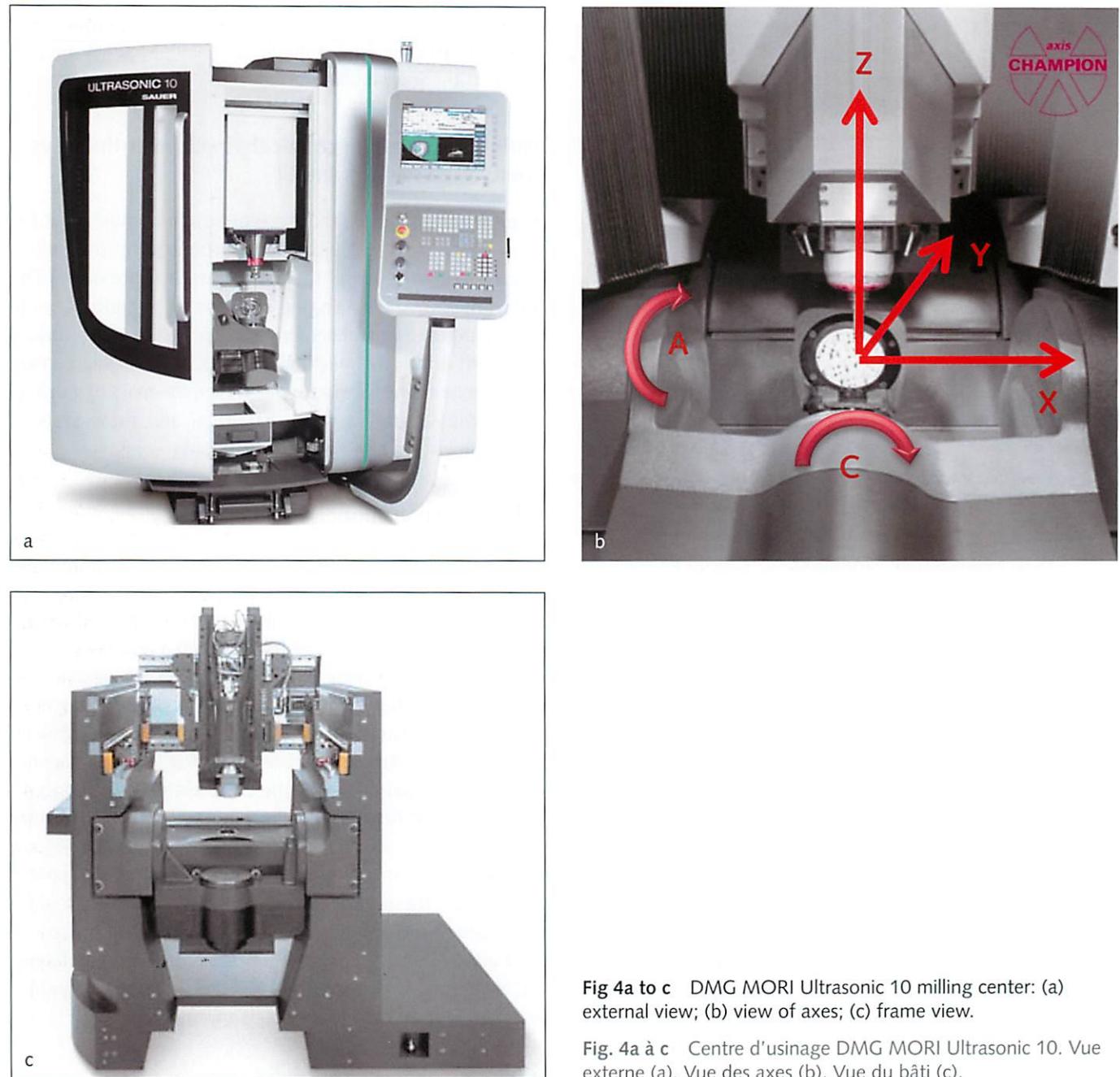


Fig 4a to c DMG MORI Ultrasonic 10 milling center: (a) external view; (b) view of axes; (c) frame view.

Fig. 4a à c Centre d'usinage DMG MORI Ultrasonic 10. Vue externe (a). Vue des axes (b). Vue du bâti (c).

Labside milling centers for production centers

Several milling centers are available for dental production centers. Indeed, most industrial milling centers with high-speed milling spindles can be used to mill dental prosthesis materials. The Realmecca RM3-5 dental center is an exam-

Dans un laboratoire dentaire, ces considérations ne sont pas handicapantes. À l'inverse des dentistes, les techniciens de laboratoires dentaires sont capables d'adapter les diamètres et la géométrie des outils à la géométrie de la prothèse. Ils peuvent aussi adapter l'outil en fonction du biomatériau usiné. Cela donne une meilleure exactitude et intégrité de surface prothétique.

Centres d'usinage pour centres de production dentaires

plusieurs centres d'usinage sont disponibles pour les centres de production dentaires. En fait, la plupart des centres d'usinage industriels avec des broches très haute vitesse peuvent fraiser des matériaux prothétiques dentaires. Le centre d'usinage Realmeca RM3-5 est un exemple de machine industrielle adaptée aux applications dentaires.¹⁵ Il s'agit d'une machine 5 axes munie d'une broche 50 000 tr/min. Dans le cadre de cette étude, le centre d'usinage DMG MORI Ultrasonic est plus particulièrement détaillé (Fig. 4). Ce dernier est représentatif de l'offre commerciale des centres d'usinage pour centres de production. De plus une assistance vibratoire pour l'usinage de la zircone frittée est intégrée à la broche.

Centre d'usinage DMG MORI Ultrasonic

Ce centre d'usinage (Fig. 4) est fourni par DMG MORI (Leonberg, Germany). Tous les types de prothèses et tous les matériaux sont usinables avec ce centre. Il peut être complètement intégré dans une chaîne de CFAO ouverte, et peut recevoir des programmes CN générés par un logiciel de FAO tiers.

Ce centre 5 axes continus est équipé d'une broche verticale. La cinématique machine est illustrée Figure 4b. Les translations X, Y et Z sont des mouvements donnés à la broche. Les rotations A et C sont des mouvements donnés à la pièce. Ces 5 mouvements sont utilisées simultanément et en continu pendant l'usinage. Tous les axes sont numériques (asservis en position et vitesse). Les erreurs de vitesse et de position sur chaque axe sont corrigées en temps réel.

Ce centre d'usinage est équipé d'un changeur automatique d'outils. Seize emplacements sont disponibles dans le magasin outils. Le technicien a la possibilité de choisir la géométrie de l'outil et le matériau prothétique. Un système laser est utilisé pour mesurer les jauge outils (diamètre et longueur). Les jauge sont stockées en mémoire, évitant ainsi la remesure à chaque usinage. Un magasin automatisé (par un robot) de disques de biomatériaux et un magasin d'outils de 60 emplacements sont disponibles en option.

La broche est équipée d'une assistance vibratoire. Avec cette technologie, le mouvement de coupe est complété par des oscillations (20KHz–50KHz) générées par un système breveté d'actionneur inductif, suivant l'axe Z.

ple of an industrial milling center adapted for dental applications.¹⁵ It is a 5-axis unit with a 50,000 RPM spindle unit. For the purpose of this study, the DMG MORI Ultrasonic 10 milling center (Fig 4) is investigated in detail. This milling center, with vibratory assistance for milling sintered zirconia embedded in the spindle, is representative of what is commercially available for dental production centers.

DMG MORI Ultrasonic 10 milling center

This milling center, supplied by DMG MORI (Leonberg, Germany), can machine all types of restorations and biomaterials. It can be integrated in a fully open CAD/CAM system and can receive programs generated from any third-party open CAM software. It is a continuous 5-axis milling center equipped with one vertical spindle. The kinematic structure is shown in Figure 4b. Translations X, Y, and Z are obtained by the movements given to the spindle. The A and C rotations are obtained by the movement given to the workpiece. The three translations and two rotations are used simultaneously in continuous mode when milling. All the axes are numerical (position and speed monitored). Each axis position and speed is corrected in real time.

This milling center is equipped with an ATC. Sixteen tool stations are available. The technician can choose the tool geometry and material. An optical laser system is used to measure the tool gauges (diameters and lengths), which are stored in memory, so it is not necessary to take tool measurements for each operation. An automatic wafer storage (powered by a robot), and 60 automatic tool changes are available as options.

Vibratory assistance is added on the spindle in this milling center. With this technology, traditional tool rotation (cutting motion) is enhanced by an oscillating movement in the longitudinal direction (20 to 50 KHz in the Z-axis direction) by means of a patented kinematic inductive actuator system.

Table 2 Labside NC milling center for production centers: technical and economic analysis

Tab. 2 Analyse comparative technique et économique des MOCN pour centres de production dentaires

Specifications/Spécifications	DMG MORI Ultrasonic 10 ^{16,17}
Axes/Axes	X, Y, Z, A, C
Milled materials/Matériaux usinables	All/Tous
Milled restorations/Restaurations usinables	Crowns, inlays, onlays, veneers, bridges/couronnes, inlays, onlays, facettes, bridges
Axis motor technology/Technologie des moteurs d'axes	Brushless
Axis position resolution/Résolution de positionnement des axes	1 µm
Number of spindles/Nombre de broches	1
Spindle speed/Vitesse de la broche	40,000 RPM max, 60,000 RPM max (option)/40000 tr/min max, 60000 tr/min max (option)
Power consumption/Puissance absorbée	Total 25 kW, Spindle 9 kW/ Total 25KWatts, Broche 9KWatts
Number of stations in the tool changer/Nombre d'outils en magasin	1
Number of simultaneous tools per job/Nombre d'outils simultanés au cours de l'usinage	16, 60 (option)
Milling repeatability/Répétabilité d'usinage	8 µm
Milling feed rate/Vitesse d'avance travail	10 m/min, 100–150 RPM/10 m/min, 100-150 tr/min
Numerical control/Contrôle des axes numériques	Position and speed monitoring, correction and "look ahead"/Asservi en vitesse et position et fonction d'anticipation
Average time to mill a full contour crown/Temps moyen d'usinage d'une couronne	9 min
Selling price/Prix de vente	€220,000 without options/ 220 000€ sans option

Discussion (labside milling centers for production centers)

The most important DMG MORI Ultrasonic 10 technical and economic criteria are shown in Table 2.

Machine tool kinematics vs milled prosthetic shapes and SI

As already stated, the DMG MORI Ultrasonic 10 is a 5-axis milling center that can mill prostheses with undercuts. The contact surface between the tool and the workpiece, and the cutting conditions, are better controlled. With the kinematic superposition of the tool rotation with an additional oscillation, high-performance materials that were traditionally difficult to machine can now be machined economically with excellent results. The low process forces enable the fabrication of thin-walled structures and result in longer tool life, as well as significantly reduced micro-

Discussion (centres d'usinage pour centres de production dentaires)

Les critères techniques et économiques les plus importants concernant le centre d'usinage DMG MORI Ultrasonic 10 sont reportés dans le tableau 2.

Cinématique de la machine-outil vs. Géométrie et intégrité de la surface prothétique

Comme discuté dans le paragraphe précédent, le centre d'usinage 5 axes DMG MORI Ultrasonic peut usiner des prothèses avec des contre dépolisseuses; le contact entre la pièce et l'outil, et les conditions de coupe sont mieux contrôlées. Avec l'ajout de l'assistance vibratoire, les matériaux à hautes performances traditionnellement difficiles à usiner sont maintenant accessibles, à coût raisonnable et résultats excellents. Les faibles efforts de coupe, permettant la fabrication de voiles minces, améliorent la durée de

vie des outils, et réduisent les microfissures induites dans le matériau. Dépendamment des propriétés du matériau, d'excellents états de surface sont réalisables.¹⁷

Exactitude et technologie des axes vs. Exactitude prothétique

Résolution de positionnement des axes, asservissement des axes numériques et répétabilité d'usinage

Ce centre d'usinage est muni d'une technologie CN avancée et précise. Ce centre contient des moteurs brushless. La résolution des axes de translation est de 1 µm et la répétabilité d'usinage de 8 µm. Le centre d'usinage Ultrasonic est asservi en position et vitesse; les erreurs de vitesse et de position sur chaque axe sont corrigées en temps réel. Le centre d'usinage Ultrasonic est aussi équipé de la fonction "look-ahead": anticipation d'accélération / décélération qui peut se produire sur la trajectoire outil.

Technologies des broches et des axes vs. Productivité

Ce centre est équipé d'une puissante broche verticale. La vitesse de rotation maximum est de 40 000 tr/min et 60 000 tr/min en option, pour une puissance de broche de 9kW. D'après l'équation:

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

(voir Partie A), le couple disponible à la broche est élevé, offrant la possibilité de fraiser des prothèses avec un débit copeaux élevé.

La vitesse d'avance maximum du centre d'usinage Ultrasonic est de 10 m/min. Les moteurs linéaires offrent de hautes performances dynamiques à ce centre d'usinage (accélération jusqu'à 2 g). L'association de la broche et des moteurs linéaires procure à ce centre un haut niveau de productivité et un temps d'usinage d'une couronne le plus faible (9 min).

La superposition du mouvement de coupe aux oscillations additionnelles hautes fréquences autorise l'usinage de matériaux durs comme la zircone frittée. La variation de la vitesse de coupe, et l'asservissement vitesse et position des axes en boucles fermées sont disponibles sur ce centre d'usinage. Ainsi la vitesse de coupe peut être adaptée au biomatériau usiné, et en combinaison avec la ciné-

cracks in the material. Depending on the material's properties, excellent surface finishes can be achieved.¹⁷

Accuracy and axis technology vs prosthesis accuracy

Axis position resolution, axis numerical control, and milling repeatability

This milling center, which is equipped with advanced and accurate CNC technologies, contains embedded brushless motors. The linear axis resolution is 1 µm, and the milling repeatability is 8 µm. It is position and speed monitored with closed loops; position errors and speed loss are corrected in real time. It is also equipped with a "look-ahead" function to anticipate the high acceleration/deceleration that can occur on the tool trajectory.

Spindle and axis technology vs productivity

This milling center is fitted with a powerful vertical spindle. The maximum spindle speed is 40,000 RPM, with 60,000 RPM as an option, and the spindle power is 9 kW. According to the following equation:

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

(see Part A), the milling torque is high, making it possible to mill prostheses with a high material removal rate.

The maximum feed rate of the DMG MORI Ultrasonic 10 milling center is 10 m/min. Linear motors provide high dynamic performances to the milling center (acceleration up to 2 g). The combination of the spindle and the linear motors gives this milling center a high level of productivity, and the lowest milling time for a crown (9 min).

The kinematic superposition of the tool rotation with an additional high frequency oscillation allows the milling of very hard materials such as sintered zirconia. Spindle speed variation, monitoring, and real-time correction are available. Thus, the cutting speed is adapted to the bio-material milled and, in combination with the 5-axis structure, can be maintained at a constant speed on the prosthesis shape.

Tool measurement protocol vs prosthetic accuracy

The tool gauges (length and radius) are measured with a laser measurement system. Each gauge is stored in the CNC memory. The tool gauge storage avoids measuring the gauges of the tools loaded at each automatic tool change. The laser device is mounted on the frame to avoid measurement dispersions.

Milling machine mechanical structure stiffness vs prosthetic accuracy and SI

A cast iron frame is provided for better machine tool stiffness (Fig 4c). Like granite frames, cast iron frames are good choices for milling machines.

Selling price vs embedded technology

The selling price of the DMG MORI Ultrasonic 10 is €22,000 without options, which matches that of other advanced and accurate embedded technology and production centers. Such milling centers are dedicated to high productive milling processes and production, working 24 hours a day with several prostheses on the same material wafer. The huge difference in selling price compared to labside milling centers can be explained by the greater efficiency, productivity, and accuracy of the dental production center milling centers. The DMG MORI Ultrasonic 10 is the only milling center currently able to mill all prosthetic metallic or non-metallic materials, including sintered ceramics such as HIP 3Y-TZP. The machining of HIP zirconia avoids the problems associated with the lack of control of shrinkage during post-milling sintering.

Discussion (in-office or outsourced milling)

Prosthesis shape and milled material

Most chairside milling machines (see Part A) are designed to mill unit restorations (crowns, inlays, onlays, and veneers). The milling of bridges with more than three elements is only available on labside milling centers. According to the milling center workspace, 14-element prostheses can be produced. Milling restorations with undercuts is only possible using a 5-axis milling center in dental laboratories or production centers.

Several ceramics, composites, and hybrid materials can be milled on chairside milling centers. Practitioners should examine the technical brochures to obtain details on the

matique 5 axes, la vitesse de coupe sur toute la prothèse peut être maintenue constante.

Protocole de mesure outil vs. Exactitude prothétique

Les jauge outils (longueur et rayon) sont mesurées par l'intermédiaire d'un système laser. Chaque jauge est stockée dans la mémoire de la CN. Le stockage des jauge outil en mémoire évite la remesure à chaque chargement automatique d'un outil.

Le système laser est fixé au bâti de la machine, limitant ainsi les dispersions.

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

Un bâti fonte est préconisé pour une meilleure rigidité de la machine (Fig. 4c). Les bâti de machines en granite ou en fonte sont des choix pertinents.

Prix de vente vs. Technologies embarquées

Le prix de vente de l'Ultrasonic est de 220 000€ sans options. Ce prix correspond bien aux technologies de pointe et de précision intégrées et aux centres de production dentaires. Ce type de centre d'usinage est dédié à la production haute cadence travaillant 24 h/24, avec de nombreuses restaurations dans le même disque.

L'écart de prix important avec les centres d'usinage pour laboratoires dentaires peut être expliqué par une meilleure efficacité, productivité et précision des centres d'usinage pour centres de production dentaires. Le centre DMG MORI Ultrasonic est le seul actuellement capable d'usiner des prothèses métalliques, et non-métalliques, incluant la zircone frittée comme la 3Y-TZP. L'usinage de la zircone à l'état frittée supprime les problèmes de maîtrise du retrait pendant le post-traitement.

Discussion (Usinage en cabinet ou externalisée)

Forme prothétique et matériaux usinés

La plupart des machines pour cabinets (voir Partie A) sont conçues pour usiner des restaurations unitaires (couronnes, inlays, onlays, facettes). L'usinage de bridges de plus de 3 éléments est possible uniquement sur les

centres d'usinage pour laboratoires ou centres de production. En fonction du volume de travail du centre d'usinage, des restaurations plurales jusqu'à 14 éléments peuvent être usinées. L'usinage de restaurations avec contre dépouilles est possible uniquement avec un centre d'usinage 5 axes en laboratoires ou centre de production dentaires.

Plusieurs matériaux céramiques, composites et hybrides sont usinables avec les machines de cabinets. Les praticiens doivent examiner les documentations techniques pour connaître les détails des matériaux accessibles. Des accords commerciaux sont signés entre fabricants de biomatériaux CFAO et fabricants de systèmes CFAO. L'étendue des matériaux accessibles en laboratoires ou centres de production est plus vaste. Il est bien connu que les laboratoires dentaires usinent de la cire pour préparer des wax ups. L'usinage de matériaux métalliques (alliages de titane ou de chrome-cobalt) est possible seulement avec les centres d'usinage pour laboratoires ou centres de production. Certaines céramiques frittées (zircone frittée) peuvent être fraîsées en centres de production, en évitant ainsi le retrait lié au frittage.

Qualité de la prothèse

L'exactitude de la prothèse et l'IS sont meilleures avec une production externalisée. Cependant, certains praticiens préfèrent garder l'usinage en cabinet pour être plus réactifs et réaliser aux patients, en un seul rendez-vous, une restauration.⁶

Une corrélation peut être établie entre résolution de positionnement d'axes et la répétabilité d'usinage. Les centres d'usinage ayant une meilleure résolution de positionnement affichent une meilleure répétabilité d'usinage. Les centres DMG MORI et CharlyDental possèdent la meilleure résolution d'axes (1 µm) et engendrent la meilleure répétabilité d'usinage (5 à 10 µm).

L'asservissement des axes en position et vitesse limite les défauts géométriques sur les prostheses, et maintient le procédé d'usinage dans de bonnes conditions pour obtenir une meilleure IS.

Le protocole de mesure des outils est aussi un facteur clé introduisant des dispersions géométriques sur la prothèse fraîsée.

La rigidité du bâti doit être corrélée avec les déformations mécaniques qui affectent directement l'exactitude prothétique, et les vibrations qui affectent directement la rugosité de la surface.

materials proposed. Commercial agreements exist between dental CAD/CAM providers and CAD/CAM materials companies. The range of materials accessible for labside milling centers is wider. It is noteworthy that dental laboratories can mill waxes to prepare restoration wax-ups. The milling of metallic materials (titanium or chrome–cobalt alloys) is only available on labside milling centers. Some sintered ceramics (HIP zirconia) can be milled on production centers to avoid sintering shrinkage.

Prosthesis quality

Prosthesis accuracy and SI are better with outsourced milling. However, some practitioners prefer to continue milling in their offices because they can be more reactive, and can make a final restoration for their patients in one appointment.⁶

A relationship exists between axis position resolution and milling repeatability. Milling centers fitted with better axis position resolution achieve better milling repeatability. The DMG MORI Ultrasonic 10 and CD04-S milling centers are fitted with the best axis position resolution (1 µm), and give the best milling repeatability (5 to 10 µm).

Axis position, as well as speed monitoring and correction, allow for the limiting of geometrical errors on the prosthesis shape, and maintain the milling process in good condition to achieve better SI. The tool measurement protocol is also a key factor that can introduce geometrical dispersion on the dimensional properties of the milled restoration. Frame stiffness should be correlated with mechanical bending (which directly affects prosthesis accuracy) and vibrations (which directly affects surface roughness).

Considering these technical criteria, the milling process should be outsourced to dental laboratories or production centers, whose milling centers can provide the most advanced and accurate technologies. However, considering the clinical relevance of prosthesis quality, no study has yet shown that chairside milling centers are less efficient than labside ones. Practitioners should take into consideration their own experience with in-office and/or outsourced production when assessing the clinical relevance of such technologies. Practitioners and dental technicians should bear in mind that the more advanced and accurate embedded technologies could be too powerful and efficient to meet their clinical needs.

Productivity and investment

The spindle material removal rate is a key factor for productivity. Although all the spindle speeds available on milling machines are in the same range of values, it is noteworthy that the powers available to remove material are higher for production centers. Axis motor technology is another key factor for productivity. Brushless motors ensure higher tool acceleration and feedrate, thereby decreasing milling time. Higher production rates are achieved with automatic tool changing. Bigger tools can be used for roughing and semi-finishing operations, removing bigger chip thicknesses without bending. Milling several prostheses simultaneously in the same wafer is more efficient than milling a single prosthesis on a single block. Considering these aspects of productivity, it is obvious that a production center may invest in a more productive milling center, while the need for productivity in the dental office is on a smaller scale.

As practitioners need to produce a single prosthesis less frequently, the delay in treating patients seems to be the more relevant aspect to consider. With chairside CAD/CAM, shorter manufacturing delays are achieved, and the practitioner's schedule is simplified. With labside CAD/CAM, delays depend on the order books of the dental technician's laboratory, and on the privileged relationship between the practitioner and the dental technician.¹⁸

Daily practice of digital dentistry

Unlike practitioners or dental technicians, the technicians in production centers are highly skilled in dental NC milling, and prosthesis production is their core activity. Thus, milling centers are provided with several open functions and technologies that require experts who are well trained in NC milling. The milling centers provided specifically for practitioners or dental technicians are more didactic and closed.

Dental technicians are considered by dental CAD/CAM providers as midrange users of NC milling; the core of their activity is to use CAD/CAM to design and produce dental prostheses. Despite the low level of openness of milling centers provided for dental laboratories, dental technicians can adapt certain milling parameters, such as tools and milling conditions.

Practitioners often have neither the NC milling knowledge nor the time to keep up to date with the continually evolving technology. Thus, chairside milling machine solutions are produced as closed devices for the almost automatic milling of restorations with simplified milling machine operations.

Considérant ces critères techniques, la production de prothèses dentaires devrait être externalisée en laboratoires ou centres de production dentaires. Ces derniers possèdent les technologies les plus avancées et justes.

Cependant, en considérant les implications cliniques de la qualité prothétique, aucune étude ne montre que les machines pour cabinets sont moins efficaces que les centres d'usinage. Les praticiens doivent utiliser leur propre expérience entre production en cabinet ou externalisée pour juger des implications cliniques de telles technologies. Dentistes et techniciens dentaires doivent garder en mémoire que les technologies intégrées les plus avancées et précises peuvent dépasser leurs besoins cliniques.

Productivité et investissement

Le débit copeaux est un facteur clé pour la productivité. Toutes les vitesses de broches disponibles sur les systèmes étudiés sont du même ordre de grandeur. Mais il est remarqué que la puissance disponible à la broche est plus importante sur les centres d'usinage pour centres de production dentaires.

La technologie des moteurs d'axes est aussi un facteur clé pour la productivité. Les moteurs brushless assurent de plus grandes accélérations et vitesses d'avance, diminuant ainsi le temps d'usinage. Des taux de production plus élevés sont atteints avec des changeurs automatiques d'outils. Des outils plus gros peuvent être utilisés en ébauche et demi-finition, enlevant ainsi plus de copeaux sans flétrir.

Le fraisage de plusieurs prothèses simultanément dans le même disque est plus efficace comparé à l'usinage d'une prothèse unique dans un bloc unitaire. En considérant ces aspects de productivité, il est évident qu'un centre de production dentaire devrait investir dans un centre d'usinage plus productif. Au contraire, le besoin de productivité en cabinet dentaire ne peut pas être considéré de la même façon. Les dentistes produisent fréquemment des prothèses unitaires. Le délai de traitement semble être le plus important. Avec la CFAO en cabinet des délais plus courts sont tenus, et l'agenda du dentiste est simplifié. Avec la CFAO externalisée, les délais dépendent du carnet de commandes du laboratoire et de la relation privilégiée entretenue entre praticien et technicien dentaire.¹⁸

Pratique quotidienne de la dentisterie numérique

A l'instar des dentistes ou techniciens en laboratoires dentaires, les techniciens de centres de production sont hautement compétents dans les domaines du fraisage dentaire sur CN et la production de prothèses dentaires. Ainsi les centres d'usinage sont dotés de nombreuses options et de technologies ouvertes nécessitant des experts qualifiés en fraisage sur CN. Les machines ou centres d'usinage destinés aux dentistes ou techniciens de laboratoires sont plus didactiques et fermés.

Les techniciens de laboratoires dentaires sont considérés par les fabricants de CFAO dentaires comme des utilisateurs de CN moyens. Leur cœur de métier est de concevoir et fabriquer des prothèses dentaires par l'intermédiaire de la CFAO. En dépit du faible niveau d'ouverture des centres d'usinage pour laboratoires dentaires, les techniciens de laboratoires peuvent tout de même gérer certains paramètres d'usinage comme les outils et les conditions d'usinage.

Souvent, les dentistes n'ont pas le niveau de connaissance en fraisage par CN ou le temps nécessaire pour effectuer une veille technologique. Ainsi les machines de cabinets sont des solutions fermées permettant une automatisation de l'usinage et une simplification des opérations.

Conclusion

Les centres d'usinage pour laboratoires et centres de production dentaires ont été analysés, et comparées aux machines d'usinage pour cabinets dentaires. Les technologies mises en œuvre et les possibilités d'exploitation des systèmes, augmentent en technicité et en offres commerciales du cabinet vers le centre de production. Les aspects techniques et économiques les plus importants lors du choix d'un centre d'usinage ont été discutés. Le choix d'une production en cabinet ou externalisée ne doit pas être seulement considérée d'un point de vue économique. L'implication clinique de la technologie en relation avec le type de production choisie est un facteur clé dans la pratique de la CFAO dentaire.

Conclusion

Dental milling centers for dental laboratories and production centers are overviewed in this article and compared with dental milling centers for dental offices. The article also discusses the most important technical and economic aspects to consider when choosing a milling system. The technologies used, and the potential of operating systems, are becoming increasingly advanced. Cost should not be the only consideration when making the choice between in-house or outsourcing for the milling of prostheses. The clinical relevance of the technology in accordance with the type of production chosen is also a key factor in CAD/CAM restorative dentistry practice.

References

1. Davis LG, Ashworth PD, Spriggs LS. Psychological effects of aesthetic dental treatment. *J Dent* 1998;26:547–554.
2. Bertoluzza A, Fagnano C, Monti P, et al. Raman spectroscopy in the study of biocompatibility. *Clin Mater* 1992;9:49–68.
3. Sorensen JA. A rationale for comparison of plaque retaining properties of crown systems. *J Prosthet Dent* 1989;62:264–269.
4. Heintze SD. Crown pull-off test (crown retention test) to evaluate the bonding effectiveness of luting agents. *Dent Mater* 2010;26:193–206.
5. 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. *J Clin Oral Investig* 2010;14:349–366.
6. Fasbinder DJ. The Cerec system: 25 years of chairside CAD/CAM dentistry. *J Am Dent Assoc* 2010;141(suppl 2):3S–4S.
7. Cerec MC XL. 2015. Online information available at <http://www.sirona.com/ecomaXL/files/A91100-M43-B657-7600-1.pdf&download=1>. Accessed January 2015.
8. USAF Dental Evaluation & Consultation Service. Sirona Cerec inLab MC XL CAD/CAM Milling Machine (Project #08-028), 2010.
9. USAF Dental Evaluation & Consultation Service. Synopsis of CAD/CAM Systems (Project #11-001), 2011.
10. Sirona. 2015. Online information available at <http://www.sironausa.com/us/products/digital-dentistry/cerec-chairside-solutions/>. Accessed January 2015.
11. Kavo Arctica Engine. 2015. Online information available at <http://www.Kavo.com/Products/CADCAM-systems/ARCTICA.aspx>. Accessed January 2015.
12. CharlyDental CD04-S. 2015. Online information available at <http://www.charlydental.com/produits/2-67/cam-milling-machine/fraiseuses-dentaires-compactes-pour-l-usinage-a-sec-et-sous-irrigation.html>. Accessed January 2015.

13. Roland DWX-50. 2016. Online information available at <http://www.rolanddg.co.uk/products/dental/dwx-series/>. Accessed May 2016.
14. Dental Lab Products. 2012. Online information available at <http://www.dentalproductsreport.com/lab/article/roland-3d-dwx-50-dental-milling-machine-outperforms-its-footprint-keating-dental-arts>. Accessed January 2015.
15. REALMECA RM3-5. 2016. Online information available at <http://www.realmeca.com/en/rm3-5-dental>. Accessed May 2016.
16. DMG MORI Ultrasonic 10. 2015. Online information available at <http://us.dmgmori.com/products/ultrasonic/ultrasonic-universal/ultrasonic-10>. Accessed January 2015.
17. DMG MORI Ultrasonic. 2015. Online information available at <http://fr.dmgmori.com/blob/123488/ec7ee5a110160f-b8521a7261241b1d2/pb0uk13-dental-series-pdf-data.pdf>. Accessed January 2015.
18. Touchstone A, Nieting T, Ulmer N. Digital transition: the collaboration between dentists and laboratory technicians on CAD/CAM restorations. *J Am Dent Assoc* 2010;141(suppl 2):15S-19S.

Address/Adresse

Nicolas Lebon PhD, Department of Mechanical Engineering, Paris 13 University, Sorbonne Paris Cité, Saint Denis, France, Tel.: +033 158076785
E-Mail: lebon@univ-paris13.fr