



HAL
open science

Restauration et traitement endodontique des dents postérieures en une séance unique : un changement de paradigme

Marie-Laure Munoz-Sanchez

► To cite this version:

Marie-Laure Munoz-Sanchez. Restauration et traitement endodontique des dents postérieures en une séance unique : un changement de paradigme. Médecine humaine et pathologie. Université Clermont Auvergne, 2023. Français. NNT : 2023UCFA0031 . tel-04165024

HAL Id: tel-04165024

<https://theses.hal.science/tel-04165024v1>

Submitted on 18 Jul 2023

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

UNIVERSITE CLERMONT AUVERGNE
ECOLE DOCTORALE DES SCIENCES DE LA VIE, SANTE, AGRONOMIE,
ENVIRONNEMENT
CENTRE DE RECHERCHE EN ODONTOLOGIE CLINIQUE (CROC) – UNITE DE
RECHERCHE 4847

THESE
Pour obtenir le grade de
Docteur de l'Université Clermont Auvergne
Discipline : Odontologie

Marie-Laure MUNOZ-SANCHEZ

RESTAURATION ET TRAITEMENT ENDODONTIQUE
DES DENTS POSTERIEURES EN UNE SEANCE UNIQUE :
UN CHANGEMENT DE PARADIGME

Thèse codirigée par Mme le Professeur Martine HENNEQUIN,
Mr le Professeur Pierre-Yves COUSSON
& Mr le Docteur Nicolas DECERLE

Soutenue le 21 Avril 2023

Madame le Professeur Elisabeth DURSUN

Présidente du jury

JURY

Madame le Professeur Claudine WULFMAN
Monsieur le Professeur Cyril VILLAT
Madame le Professeur Martine HENNEQUIN
Monsieur le Professeur Pierre-Yves COUSSON
Monsieur le Docteur Nicolas DECERLE

Rapporteur externe
Rapporteur externe
Directeur
Directeur
Directeur

UNIVERSITE CLERMONT AUVERGNE
ECOLE DOCTORALE DES SCIENCES DE LA VIE, SANTE, AGRONOMIE,
ENVIRONNEMENT
CENTRE DE RECHERCHE EN ODONTOLOGIE CLINIQUE (CROC) – UNITE DE
RECHERCHE 4847

THESE
Pour obtenir le grade de
Docteur de l'Université Clermont Auvergne
Discipline : Odontologie

Marie-Laure MUNOZ-SANCHEZ

RESTAURATION ET TRAITEMENT ENDODONTIQUE
DES DENTS POSTERIEURES EN UNE SEANCE UNIQUE :
UN CHANGEMENT DE PARADIGME

Thèse codirigée par Mme le Professeur Martine HENNEQUIN,
Mr le Professeur Pierre-Yves COUSSON
& Mr le Docteur Nicolas DECERLE

Soutenue le 21 Avril 2023

Madame le Professeur Elisabeth DURSUN

Présidente du jury

JURY

Madame le Professeur Claudine WULFMAN

Rapporteur externe

Monsieur le Professeur Cyril VILLAT

Rapporteur externe

Madame le Professeur Martine HENNEQUIN

Directeur

Monsieur le Professeur Pierre-Yves COUSSON

Directeur

Monsieur le Docteur Nicolas DECERLE

Directeur

Remerciements

Aux membres du jury,

A Madame le Professeur Claudine Wulfman,

Je vous remercie sincèrement d'avoir accepté d'être rapporteur de ce travail et pour l'attention que vous lui avez portée. Je vous prie de recevoir l'expression de ma reconnaissance et de mon respect.

A Monsieur le Professeur Cyril Villat,

Je vous remercie sincèrement d'avoir accepté d'examiner ce travail et pour votre rapport détaillé. Je vous prie de recevoir l'expression de ma gratitude et de mon respect.

A Madame le Professeur Elisabeth Dursun,

Je vous remercie sincèrement d'avoir accepté de faire partie de ce jury et je vous prie de recevoir l'expression de ma reconnaissance et de mon respect.

A Madame le Professeur Martine Hennequin,

Je vous remercie très sincèrement pour votre encadrement lors de ce travail, ainsi que pour votre accueil il y a dix ans maintenant au sein du laboratoire de recherche et au sein de l'équipe d'OCE. J'ai vraiment grandi à vos côtés et je vous remercie de votre bienveillance et de la confiance que vous m'avez accordée. Merci de m'avoir poussée à faire l'internat et à me confronter à de nouveaux défis. Veuillez trouver ici l'expression de mon respect et de ma reconnaissance.

A Monsieur le Professeur Pierre-Yves Cousson,

Je te remercie sincèrement pour ton aide tout au long de ce travail, tu as été d'un grand soutien, particulièrement ces derniers mois. Merci pour tes corrections toujours pertinentes et ta disponibilité. Merci de m'avoir accompagnée lors de mes débuts en tant qu'assistante et pendant mon internat. Merci de m'aider à progresser.

A Monsieur le Docteur Nicolas Decerle,

Je te remercie sincèrement pour ton aide pendant les quatre années de ce travail. Merci pour tes relectures et tes corrections, malgré ton emploi du temps chargé. Ta présence au labo et en clinique nous a manqué cette année. Merci pour ton soutien et ton encadrement pendant les années d'internat. Merci de m'aider à progresser.

Aux membres de mon comité de thèse,

A Madame le Professeur Claire Lassauzay et Madame le Professeur Nathalie Brulat,

Je vous remercie de l'intérêt porté à ce travail et de vos conseils pour l'améliorer. Merci pour votre accompagnement et votre bienveillance. Merci pour votre réactivité lors de mes différents comités de thèse.

A l'équipe d'OCE,

Sophie, Daniela, Raed, Camille, Nadezda, Joelle, Guillemette, je vous remercie pour votre soutien.

Aux équipes universitaires et hospitalières, Valérie et Sacha en tête, je vous remercie pour votre aide technique au cours de ce travail. Merci aux prothésistes du côté hospitalier et du côté universitaire.

A l'équipe du CROC,

Je vous remercie pour votre soutien et pour votre aide au quotidien dans la réalisation de ce travail, ainsi que pour les autres projets hospitalo-universitaires et de recherche. Merci pour votre accueil au sein de cette belle équipe et pour la bonne humeur partagée.

Merci à Caroline Eschevins pour ton aide précieuse.

Merci à Natacha d'avoir été là jusqu'au bout, pour ta gentillesse, ton professionnalisme et ton soutien.

Merci à Noémie pour ton sourire (y compris lors de ces dernières semaines, un peu stressantes...), pour ton aide et pour ton amitié. La prochaine thèse, c'est la tienne !

Merci à Victoire, Anne, Gaëlle et Solange pour les petites pauses au labo et leurs pensées encourageantes.

Merci aux internes, Louise et Pauline tout particulièrement, pour leur énergie et leur positivité.

Merci aux anciennes internes, Laëtitia et Marie-Sophie, pour leurs appels remotivants au cours de ce travail et pour leur présence aujourd'hui qui compte beaucoup pour moi.

Aux étudiants de thèse qui ont participé à ce travail, Alexis, Clément, Charles, Louise, Geoffrey, Annaëlle et Cyril, je vous remercie pour votre aide dans l'aboutissement des différentes parties de ce travail de thèse.

Merci au Professeur Orliaguet et au Professeur Veyrune pour leur soutien logistique et matériel.

Merci à ma famille, pour votre soutien au cours de ce travail et pour votre présence le jour J.

Merci à Raph, pour tout le reste...

RESUME

Le traitement endodontique d'une dent n'est considéré comme terminé que lorsque la restauration coronaire est mise en place afin de garantir l'étanchéité du traitement et la remise en fonction de la dent. La qualité de la restauration coronaire est un des facteurs clé de la réussite à long terme du traitement endodontique. Des défauts d'étanchéité coronaire, propices à la (re)colonisation bactérienne, sont des facteurs contribuant à la survenue et/ou à l'aggravation des pathologies apicales. Le pronostic du traitement endodontique peut être amélioré par la réalisation d'une restauration coronaire immédiate, étanche et définitive. Au vu de l'avancée des technologies et des matériaux, la restauration d'une dent dépulpée peut maintenant être envisagée dans la même séance que le traitement endodontique. Cette thèse a pour objectif d'évaluer la restauration de la dent postérieure traitée endodontiquement en une séance unique et en fonction de certaines conditions spécifiques de soins.

La première partie de ce travail présente le développement et la validation d'un outil d'évaluation radiologique, qui a ensuite été utilisé pour évaluer 360 dents restaurées par coiffe préformées entre 2013 et 2019, chez des patients pris en charge sous AG, donc dans le cadre d'une séance de soin unique la plus courte possible. Toutes les coiffes ont été réévaluées pendant une durée moyenne de 12,5 mois. En général, peu de défauts majeurs ont été scorés pour les coiffes pour les quatre critères sélectionnés.

Par la suite, en alternative à la restauration par coiffe préformée, une étude pilote a été mise en place au sein du service Odontologie afin d'évaluer l'association d'une pulpotomie thérapeutique et d'une restauration par CFAO collée au cours d'une séance de soins unique. Trente dents ont été incluses dans l'étude sur une durée de 18 mois, 28 ont été revues à un mois, 16 à six mois et 8 à un an et toutes les dents revues présentaient un succès de la procédure au regard de critères cliniques et radiologiques.

La troisième partie de ce travail est une étude rétrospective d'analyse des données concernant le taux de survie et les causes d'échec des dents restaurées par endocouronnes CFAO réalisées par des étudiants en formation initiale. Sur les 199 patients inclus dans la cohorte, 225 endocouronnes ont été évaluées pendant une période de 56 +/- 26 mois. Les résultats montraient un bon taux de survie de 81,8 % des dents restaurées par endocouronne (71,8 % à 9 ans).

Enfin, en l'absence de données sur les pratiques de préparation des dents destinées à être restaurées par endocouronne, une étude *in vitro* a été réalisée pour rechercher les facteurs agissant sur la résistance à la fracture de molaires. L'objectif était de déterminer si une combinaison de traitement endodontique, type de préparation et matériaux de restauration de l'endocouronne était plus susceptible qu'une ou plusieurs autres de présenter une meilleure résistance à des tests de fracture.

Les restaurations par coiffe préformée constituent encore une solution fiable de restauration coronaire définitive de la molaire permanente traitée endodontiquement, dans des conditions particulières de soins. Les techniques récentes de CFAO et les améliorations en termes de matériaux (de coiffage pulpaire, de restauration ou de collage) semblent les pistes les plus prometteuses pour les années à venir pour la restauration immédiate de la dent postérieure permanente traitée endodontiquement.

SUMMARY

Endodontic treatment is considered complete once coronal restoration ensures watertight treatment and a functional tooth. The quality of the coronal restoration is one of the key factors in the long-term success of endodontic treatment. Defects in the coronal seal, which are conducive to bacterial (re)colonization, contribute to the occurrence and/or aggravation of apical pathologies. The prognosis of endodontic treatment can be improved by realizing an immediate, tight and definitive coronal restoration. In view of the progress in technologies and materials, restoring an endodontically treated tooth can now be performed in the same session as the endodontic treatment. The objective of this thesis is to evaluate the restoration of an endodontically treated posterior tooth in one session and according to certain specific conditions of care.

The first part of this work presents the development and validation of a radiological evaluation tool, which was then used to evaluate 360 teeth restored with stainless steel crowns (SSC) between 2013 and 2019, in patients managed under general anesthesia, thus in a single and shortest possible care session. All SSCs were re-evaluated within an average of 12.5 months. In general, few major defects were recorded for SSCs according to four selected criteria.

Subsequently, as an alternative to SSC restoration, a pilot study was set up in the Odontology Department to evaluate the outcome of combining a full pulpotomy with a bonded CAD/CAM restoration during a single treatment session. Thirty teeth were included in the study over a period of 18 months, 28 were reviewed at one month, 16 at six months and 8 at one year, and the procedure was successful in all treated teeth according to clinical and radiological criteria.

The third part of this work is a retrospective study analyzing data regarding the survival rate and causes of failure of teeth restored by CAD/CAM endocrowns made by students in initial training. 199 patients were included in the cohort from which 225 endocrowns were evaluated over a period of 56 +/- 26 months. The results showed a good survival rate of 81.8% (71.8% at 9 years) for teeth restored with endocrowns.

Finally, in the absence of data on the preparation practices of teeth intended to be restored by endocrown, an *in vitro* study was performed to investigate factors acting on the fracture resistance of molars. The objective was to determine whether one or more combinations of endodontic treatment, type of preparation, and endocrown restorative materials was more likely to improve resistance to fracture testing.

Stainless steel crown restorations are still a reliable solution for the definitive coronal restoration of endodontically treated permanent molar under specific care conditions. Recent CAD/CAM techniques and improvements in materials (pulp capping, restorative or bonding) seem to be the most promising avenues for immediate restoration of endodontically treated permanent posterior teeth in the coming years.

Table des matières

1	INTRODUCTION	1
1.1	ROLE DE LA RESTAURATION CORONAIRE D'UNE DENT TRAITEE ENDODONTIQUEMENT	1
1.2	EVOLUTION DU CONCEPT DE RESTAURATION DE LA DENT TRAITEE ENDODONTIQUEMENT	1
1.3	DELAI DE REALISATION DE LA RESTAURATION CORONAIRE.....	2
1.4	PROBLEMATIQUE.....	3
1.5	EVALUER LES PRATIQUES PROFESSIONNELLES EN TERMES DE RESTAURATIONS CORONAIRES	4
1.6	OBJECTIFS DE LA THESE	4
2	TRAITEMENT DE LA QUESTION DE RECHERCHE.....	5
2.1	COMMENT RESTAURER LA DENT TRAITEE ENDODONTIQUEMENT SOUS ANESTHESIE GENERALE ?	5
2.1.1	INTRODUCTION	5
2.1.2	MATERIEL ET METHODES	7
2.1.2.1	Population étudiée	7
2.1.2.2	Préparation coronaire pour la restauration par CPP.....	7
2.1.2.3	Critères d'étude	8
2.1.2.4	Collecte des données.....	9
2.1.3	RESULTATS	10
2.1.3.1	Population étudiée	10
2.1.3.2	Résultats descriptifs	10
2.1.4	DISCUSSION	10
2.1.5	CONCLUSION.....	11
2.1.6	TRANSITION	11
2.2	COMMENT TRAITER ET RESTAURER EN UNE SEANCE UNIQUE UNE DENT POSTERIEURE PRESENTANT UN ETAT PULPAIRE INFLAMMATOIRE ET DES PERTES TISSULAIRES IMPORTANTES ?	13
2.2.1	INTRODUCTION	13
2.2.2	MATERIAUX ET METHODES	15
2.2.2.1	Type d'étude.....	15
2.2.2.2	Patients.....	16
2.2.2.3	Procédures de soin	16
2.2.2.4	Évaluations de suivi	17
2.2.2.5	Critères d'étude	18
2.2.2.6	Analyse statistique	18
2.2.3	RESULTATS	18
2.2.4	DISCUSSION	19
2.2.5	CONCLUSION.....	19
2.2.6	TRANSITION	19
2.3	LES RESTAURATIONS PAR ENDOCOURONNE PEUVENT-ELLES ETRE REALISEES DE FAÇON SURE PAR DES ETUDIANTS EN FORMATION INITIALE ?	20
2.3.1	INTRODUCTION	20
2.3.2	MATERIAUX ET METHODES	21
2.3.2.1	Type d'étude.....	21
2.3.2.2	Procédure	21
2.3.2.3	Critères d'étude	23
2.3.2.4	Suivi.....	24
2.3.2.5	Investigateurs.....	24
2.3.2.6	Analyse statistique	24
2.3.3	RESULTATS	25
2.3.4	DISCUSSION	25

2.3.5	CONCLUSION.....	26
2.3.6	TRANSITION	26
2.4	EXISTE-T-IL DES CRITERES SUSCEPTIBLES D'AMELIORER LA RESISTANCE A LA FRACTURE DE LA DENT TRAITEE ENDODONTIQUEMENT ET RESTAUREE PAR ENDOCOURONNE ?.....	27
2.4.1	INTRODUCTION	27
2.4.2	MATERIAUX ET METHODES	28
2.4.2.1	Échantillons et design de l'étude.....	28
2.4.2.2	Procédures de traitements	29
2.4.2.3	Critères d'étude	32
2.4.2.4	Test de charge (résistance à la fracture).....	33
2.4.2.5	Analyse statistique	33
2.4.3	RESULTATS	33
2.4.3.1	Valeurs des tests de résistance :	33
2.4.3.2	Type de fracture :	36
2.4.4	DISCUSSION	37
2.4.5	CONCLUSION.....	38
3	SYNTHESE ET PERSPECTIVES	39
3.1	SYNTHESE.....	39
3.2	PERSPECTIVES	42
4	CONCLUSION	46
5	REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	47
6	ANNEXES	60

Table des illustrations :

Figure 1 : Restauration étape par étape de dents postérieures présentant des lésions carieuses étendues (C) à l'aide de coiffes préformées en acier inoxydable. (1A) : les parois de la chambre pulpaire sont nettoyées ; (1B) : la chambre est remplie de ciment verre ionomère (CVI) à faible viscosité ; (1C) : la digue (Digue) est retirée, et la couronne est réduite en occlusale ; (1D) : la couronne est préparée par un stripping périphérique complet jusqu'au niveau gingival ou sous-gingival ; (1E) : la coiffe (CPP) est remplie de ciment verre ionomère et placée sur la dent préparée. (G : gencive).

Figure 2 : Comparaison schématique des ancrages des endocouronnes réalisées sur des dents traitées par traitement radiculaire ou par pulpotomie thérapeutique (Ec : Endocouronne ; CC : Composite de Collage ; GP : Gutta Percha ; G : Gencive ; B : Biodentine™ ; PR : Pulpe Radiculaire).

Figure 3 : Schéma expérimental de l'étude *in vitro*, avec onze groupes de dix dents nommés : T+ : Témoin positif ; E- : Témoin négatif traitement radiculaire ; P- : Témoin négatif pulpotomie thérapeutique ; ECE : Traitement radiculaire, avec cerclage, E-max ; EPE : Traitement radiculaire, sans cerclage, E-max ; PCE : Pulpotomie, avec cerclage, E-max ; PPE : Pulpotomie, sans cerclage, E-max ; ECC : Traitement radiculaire, avec cerclage, Cerasmart® ; EPC : Traitement radiculaire, sans cerclage, Cerasmart® ; PCC : Pulpotomie, avec cerclage, Cerasmart® ; PPC : Pulpotomie, sans cerclage, Cerasmart®.

Figure 4 : Représentation 3D des différents simulateurs en résine (a : simulateur en résine de dent saine (témoin positif) ; b : simulateur en résine de dent avec une cavité d'accès (contrôle négatif) ; c : simulateur en résine représentant une dent avec une préparation en plateau, d : simulateur en résine représentant une dent avec une préparation en cerclage circonférentiel).

Figure 5 : Comparaison des valeurs moyennes des tests de résistance à la fracture en fonction du type de traitement endodontique, du type de préparation et des matériaux utilisés pour l'endocouronne, pour les dents naturelles (test Anova : *** : $p < 0,001$).

Figure 6 : Comparaison des valeurs moyennes des tests de résistance à la fracture en fonction du type de traitement endodontique, du type de préparation et des matériaux utilisés pour l'endocouronne, pour les simulateurs en résine (test de Kruskal-wallis * : $p < 0,05$; ** : $p < 0,01$; *** : $p < 0,001$).

Liste des tableaux :

Tableau 1 : Abréviations et descriptions des différents groupes.

Tableau 2 : Comparaison des valeurs des tests de résistance à la fracture en fonction du type de traitement endodontique, du type de préparation et des matériaux utilisés pour l'endocouronne pour les dents naturelles et les simulateurs en résine (test de Kruskal-Wallis).

Tableau 3 : Comparaison de la distribution du type de fracture dans chaque groupe pour les dents naturelles.

Liste des abréviations :

AG : Anesthésie Générale

APP : Amélioration des Pratiques Professionnelles

caod/CAOD : nombre de dents temporaires/DEFINITIVES cariées, absentes, obturées à cause de lésions carieuses

MBD : Médecine Bucco-Dentaire

CPP : Coiffes pédodontiques préformées

UF : Unité Fonctionnelle

CHU : Centre Hospitalier Universitaire

HAS : Haute Autorité de Santé

PI : Publications internationales

MEOPA : Mélange Equimolaire d'Oxygène et de Protoxyde d'Azote

CVI : Ciment Verre Ionomère

OC-E : Odontologie Conservatrice et Endodontie

CIC : Corrélations Intra-Classes

CFAO : Conception et Fabrication Assistées par Ordinateur

PAI : Indice Péri Apical

FDI : Fédération Dentaire Internationale

TR : Traitement Radiculaire

PT : Pulpotomie Thérapeutique

DN : Dents Naturelles

SR : Simulateur en Résine

Cerec : « Restauration en Céramique Économique et Esthétique fabriquée à la Chaise »
(Chairside-Economical-Restoration-Esthetic-Ceramic)

PS : Permanence des Soins

LSD : Longueur Système Densité

PAS Endo : Permanence d'Accès aux Soins endodontiques

IRM : Intermediate Restorative Material

3D : trois dimensions

Valorisation par la publication et la communication :

PUBLICATIONS INTERNATIONALES

- PI01 : **Munoz-Sanchez ML**, Linas N, Decerle N, Collado V, Faulks D, Nicolas E, Hennequin M, Cousson PY. Radiological Evaluation of Stainless Steel Crowns Placed on Permanent Teeth in Patients Treated under General Anaesthesia. *Int J Environ Res Public Health*. 2021;18(5):2509.
- PI02 : **Munoz-Sanchez ML**, Veyrune JL, Bessadet M, Lance C, Bonnet G, Nicolas E, Decerle N. Survival Rate of CAD-CAM Endocrowns Performed by Undergraduate Students. *Operative Dentistry*. 2021.
- PI03 : **Munoz-Sanchez ML**, Linas N, Decerle N, Nicolas E, Hennequin M, Cousson PY. A Combination of Full Pulpotomy and Chairside CAD/CAM Endocrown to Treat Teeth with Deep Carious Lesions and Pulpitis in a Single Session: A Preliminary Study. *Int J Environ Res Public Health*. 2020;17(17):6340.
- PI04 : **Munoz-Sanchez ML**, Gravier A, François O, Nicolas E, Hennequin M, Decerle N. In Vitro Resistance of molars and resin simulators treated by Pulpotomy and restored with Endocrown. Soumis au JPD (Journal of Prosthetic Dentistry).

COMMUNICATIONS INTERNATIONALES

- **Munoz-Sanchez Marie-Laure**, Cousson Pierre-Yves, Hennequin Martine. « Full pulpotomy and endocrowns in permanent teeth during one chairside appointment: a cohort study ». European Society of Endodontology (ESE) (Septembre 2019) Vienne (Autriche).
- **Munoz-Sanchez Marie-Laure**, Cousson Pierre-Yves, Decerle Nicolas, Hennequin Martine. « Endodontic and restorative treatments in a single session ». Journées de l'Ecole Doctorale (JED). Clermont-Ferrand, Mai 2022.
- **Munoz-Sanchez Marie-Laure**, Linas Natacha, Decerle Nicolas, Faulks Denise, Collado Valérie, Bessadet Marion, Lance Cindy, Bonnet Jean, Cousson Pierre-Yves, Hennequin Martine, Veyrune Jean-Luc, Nicolas Emmanuel. « Restorative treatment options of posteriors teeth in a single care session ». Journée de pré-congrès (Restorative and prosthetic treatment planning in Special Care Dentistry – ensuring equitable outcomes and maintaining a functioning dentition over the life course). International Association of Disability and oral Health (IADH) (Aout 2022) Paris (France).

COMMUNICATIONS NATIONALES

- **Munoz-Sanchez Marie-Laure**, Decerle Nicolas, Cousson Pierre-Yves, Lance Cindy, Hennequin Martine. « Réhabilitation en une séance de dents permanentes traitées par pulpotomie et endocouronne CFAO ». Journées du CNEOC (Collège National des Enseignants en Odontologie Conservatrice), 2017, Montpellier.

1 Introduction

1.1 Rôle de la restauration coronaire d'une dent traitée endodontiquement

Selon la Haute Autorité de Santé (HAS), un traitement endodontique a pour objectif de soigner les maladies pulpaire et péri apicales et ainsi de transformer une dent pathologique en une entité saine, asymptomatique et fonctionnelle sur l'arcade (1). Les maladies pulpaire et péri apicales regroupent l'ensemble des maladies aiguës ou chroniques, d'origine infectieuse et/ou inflammatoire dont peut souffrir une dent et présentent souvent une origine bactérienne. La plupart des maladies pulpaire et péri apicales résultent de la présence de bactéries et de leurs toxines dans le système canalaire. Outre une asepsie per opératoire rigoureuse, la qualité de l'obturation canalaire est un facteur essentiel impliqué dans le pronostic du traitement endodontique. Le traitement radiculaire ne sera considéré comme terminé que lorsqu'une restauration coronaire de la dent aura été mise en place afin de garantir l'étanchéité du traitement et la remise en fonction de la dent. La qualité de la restauration coronaire a été retrouvée comme étant le facteur clé de la réussite à long terme du traitement endodontique (2). Des défauts d'étanchéité coronaire, propices à la (re)colonisation bactérienne, sont des facteurs contribuant à la survenue et/ou à l'aggravation des pathologies apicales (3). Le pronostic du traitement endodontique peut être amélioré par la réalisation d'une restauration coronaire immédiate, étanche et définitive (4). En effet, la guérison d'une lésion péri apicale est en moyenne deux fois moindre lorsque la restauration coronaire n'est pas étanche (5).

La restauration coronaire, prothétique ou non, fait donc partie intégrante du traitement endodontique et en constitue son ultime étape. Un traitement endodontique est terminé lorsque la restauration coronaire étanche est réalisée. La dent dépulpée peut être restaurée prothétiquement par des techniques différentes, influencées par plusieurs facteurs. La restauration d'une dent dépulpée doit permettre la préservation du maximum de substance dentaire résiduelle, avoir une résistance mécanique adaptée aux contraintes, permettre le maintien de l'étanchéité dentinaire et prévenir une (ré)infection pulpaire (toxines et bactéries) tout en permettant une réintervention canalaire (6). Les objectifs d'une restauration coronaire définitive sont de conserver une dent fonctionnelle sur l'arcade, de maintenir la santé parodontale et de maintenir ou de restaurer les contacts dentaires proximaux. La restauration coronaire doit non seulement préserver la dent de la fracture mais aussi être étanche, compenser le volume dentinaire détruit par adjonction d'une masse de matériau bio-mimétique, bio-compatible voire bio-actif (7) et minimiser la flexion cuspidienne (8,9). Enfin, elle doit restaurer une fonction occlusale optimale et offrir une surface capable de maintenir l'aspect anatomique (forme et couleur), de résister aux contraintes fonctionnelles, de résister à la corrosion buccale et d'être compatible avec le tissu parodontal en cas de contact (7).

1.2 Evolution du concept de restauration de la dent traitée endodontiquement

La restauration de la dent dépulpée reste un défi pour l'omnipraticien du fait des caractéristiques propres à ce type de dents. En effet, les dents traitées endodontiquement présentent des propriétés mécaniques

significativement différentes de celles des dents vitales (10,11). Il y a une cinquantaine d'année, la mise en place d'un ancrage radiculaire et d'une couronne périphérique était censée renforcer la dent dévitalisée (12). Les principaux changements sont liés à une altération des caractéristiques physiques et à une perte de tissus dentaires. La perte de la vitalité de la dent est accompagnée par une légère modification du contenu hydrique de la dent (9%) (13). Les modifications des propriétés biomécaniques et de l'intégrité structurelle des dents sont très probablement principalement dues à la perte volumétrique des tissus durs, à l'étendue de la lésion carieuse, à la propagation de la fracture, à la préparation finale de la cavité, ainsi qu'à la cavité d'accès avant le traitement endodontique (14–18). La destruction coronaire induite par les traumatismes ou les lésions carieuses et par la préparation de la cavité d'accès en vue du traitement endodontique est responsable d'une diminution de la résistance à la fracture (19) et d'une modification de la rigidité des dents traitées dévitalisées (16). La profondeur de cavité, la largeur des isthmes et la perte du plafond pulpaire entraînent une réduction de la rigidité de la dent et un risque de fracture (17,20). La perte de la structure dentaire lors de la préparation de la cavité d'accès modifie la rigidité de la dent de 5 % (21). D'autres études montrent qu'une cavité occlusale entraîne une perte de rigidité de 14 à 44 % (14,22,23). Plus la perte de volume de tissus dentaires est grande, plus la résistance de la dent (pulpée ou non) est diminuée, la perte des crêtes marginales (donc la présence d'une cavité mésio-occluso-distale) restant le facteur le plus déterminant dans la diminution de la résistance à la compression et à la fracture (63%) (14). Ainsi, la fragilité de la dent traitée endodontiquement est proportionnelle à l'élimination des tissus cariés ayant conduit à la nécessité du traitement endodontique et n'est pas due au traitement endodontique en lui-même (16).

1.3 Délai de réalisation de la restauration coronaire

Le délai de la réalisation d'une restauration coronaire est également un facteur important pour la pérennité des dents traitées endodontiquement. Les lipopolysaccharides bactériens peuvent pénétrer le système endo canalaire *via* la restauration temporaire dans un délai de 3 semaines (24) : ainsi, l'Intermediate Restorative Material (IRM®) ne sera plus étanche en 10 jours et les matériaux d'obturation provisoire à base d'oxyde de zinc (Cavit™) en 2 semaines (25). Une étude de Pratt et al, datant de 2016 a recherché l'influence du délai entre la fin du traitement radiculaire et la mise en place d'une restauration coronaire. Elle a montré que les dents restaurées par une couronne plus de quatre mois après le traitement endodontique étaient trois fois plus susceptibles d'être avulsées que les dents couronnées avant ce délai (26). L'avulsion d'une dent traitée endodontiquement était 25 % plus probable lorsque la restauration coronaire finale était réalisée entre 15 à 59 jours après le traitement endodontique et 73 % après 60 jours (27). Les taux de survie à long terme du traitement endodontique de première intention sont négativement affectés par le placement tardif (plus de deux mois) d'une restauration finale par inlay-core et couronne (28).

1.4 Problématique

Au sein de la population générale, pour certains profils de patients, dit à besoins spécifiques, les soins dentaires ne sont pas toujours réalisables dans des conditions conventionnelles pour des raisons médicales, comportementales ou environnementales. Pour ces patients, le recours à des procédures permissives du soin (anesthésie générale en particulier) est nécessaire. L'accès aux soins conservateurs lors de procédures permissives du soin était jusqu'alors peu développé. Dans le passé, la réponse aux besoins dentaires pour les patients à besoins spécifiques était principalement l'avulsion dans une optique de suppression rapide des foyers infectieux ou l'abstention thérapeutique (29–32). Cependant, les dents avulsées n'étaient pas remplacées et une détérioration de la fonction masticatoire ainsi qu'un risque accru de fausses routes étaient retrouvés. Cette réponse est clairement inéquitable, surtout si l'on considère que ces mêmes populations sont les moins susceptibles de bénéficier d'une réhabilitation prothétique suite à la perte d'une dent (33).

Depuis plusieurs années, les protocoles de soins conservateurs et endodontiques se sont développés dans des conditions spécifiques du soin. Ces conditions spécifiques caractérisent un contexte médical, social ou environnemental qui impose des adaptations à la réalisation d'un traitement dentaire dit conventionnel. Ces conditions particulières peuvent être rencontrées lors de situations sanitaires particulières (périodes de pandémie), lors de soins dentaires sous Anesthésie Générale (AG) ou encore lors d'interventions humanitaires en milieu isolé. On peut considérer que ces conditions reflètent la dimension environnementale du handicap, souvent négligée par les définitions habituelles. La dimension environnementale d'accès aux soins est cependant fondamentale. On pourrait inclure également dans les conditions spécifiques du soin un temps d'intervention limité, la nécessité d'une réhabilitation en une seule et courte séance, des conditions ergonomiques particulières, la difficulté d'établir un diagnostic précis, la disponibilité d'un nombre restreint de matériaux et d'équipements et la nécessité de disposer de matériaux faciles à utiliser ou peu coûteux (34).

La spécialité de Médecine Bucco-Dentaire (MBD) prend en charge la santé bucco-dentaire des populations à besoins spécifiques. Avec le développement de cette spécialité (35–38), il est nécessaire de définir des protocoles de traitement efficaces dans des conditions particulières de soin afin d'harmoniser les procédures et de permettre leur diffusion universitaire. L'objectif d'une procédure adaptée est de satisfaire les mêmes objectifs de résultat que la procédure conventionnelle. Si les procédures endodontiques adaptées au contexte des conditions particulières sont bien décrites et montrent les mêmes résultats que les procédures académiques conventionnelles (39,40), les procédures de restaurations des dents traitées endodontiquement sont moins détaillées.

Il est donc nécessaire de repenser certaines indications de traitement en fonction de ces conditions spécifiques de soins et de proposer de nouvelles procédures thérapeutiques. La tendance actuelle va donc vers la provision de soins conservateurs et restaurateurs et la pulpotomie thérapeutique, quand elle est indiquée, est une alternative au traitement radiculaire. Les traitements endodontiques, qu'il s'agisse du traitement radiculaire ou de la pulpotomie thérapeutique, ont été évalués dans des conditions

spécifiques du soin, à savoir sous anesthésie générale (34,39,40), mais peu d'études ont porté sur les procédures de restauration (41,42).

1.5 Evaluer les pratiques professionnelles en termes de restaurations coronaires

Dans ce contexte, une démarche d'évaluation et éventuellement d'amélioration des pratiques professionnelles se révèle nécessaire. C'est une démarche universelle qui concerne tous les domaines d'activités et qui s'est ainsi imposée dans le domaine médical. L'enjeu de l'Amélioration des Pratiques Professionnelles (APP) est de répondre aux exigences légitimes des patients et des usagers du système de santé. L'APP s'inscrit dans une dynamique globale d'amélioration de la qualité et de la sécurité des soins. L'évaluation et l'amélioration des pratiques d'un professionnel de santé consistent à analyser son activité clinique réalisée par rapport aux recommandations professionnelles disponibles actualisées, afin de mettre en œuvre un plan d'amélioration de son activité professionnelle et de la qualité des soins délivrés aux patients. Cette démarche consiste à comparer régulièrement les procédures ou les résultats d'une pratique avec des références académiques ou scientifiques.

L'APP doit être :

- pertinente : ce qu'on va mesurer doit être utile. Il s'agit d'analyser les points qui vont renforcer la capacité du professionnel de santé à se regarder travailler, à s'auto-analyser pour s'améliorer.
- équitable : tous les professionnels de santé doivent avoir la même obligation face à l'APP.
- supportable : le médecin s'engage dans l'évaluation et dans l'amélioration en sachant que ce n'est pas au-dessus de ses moyens ou de ses possibilités.

Cette démarche d'évaluation et d'Amélioration des Pratiques Professionnelles a été mise en place depuis plusieurs années dans le cadre des soins endodontiques. Elle avait pour objectif de définir la qualité et le résultat des traitements endodontiques, afin de rechercher d'une part les facteurs influençant ces traitements, et d'autre part les améliorations susceptibles d'assurer un meilleur service au patient.

Dans cette même dynamique, la restauration de la dent traitée endodontiquement, avec ses particularités et ses contraintes, s'inscrit comme la suite de cette démarche d'APP.

1.6 Objectifs de la thèse

Cette thèse a pour objectif d'évaluer la restauration de la dent postérieure traitée endodontiquement (traitement radiculaire ou pulpotomie thérapeutique) en une séance et en fonction de certaines conditions spécifiques de soins. La problématique sera développée selon 4 approches différentes *via* deux études rétrospectives (43,44), une étude pilote (45) et une étude *in vitro* (46).

2 Traitement de la question de recherche

2.1 Comment restaurer la dent traitée endodontiquement sous Anesthésie Générale ?

2.1.1 Introduction

L'anesthésie générale est une procédure facilitatrice qui doit permettre de fournir des soins dentaires de haute qualité (47,48). L'AG est généralement indiquée lorsqu'un traitement dentaire au fauteuil et sous anesthésie locale n'est pas envisageable, avec ou sans procédure de sédation consciente (47,49). Les indications pour une prise en charge sous anesthésie générale comprennent l'incapacité du patient à coopérer en vigile au fauteuil, un besoin important de soins dépassant ce que le patient peut tolérer, des procédures complexes, une allergie à l'anesthésie locale ou une difficulté sociale d'accès aux soins (précarité). La plupart des patients traités dans des circonstances particulières ont des difficultés d'accès aux soins dentaires, présentent des besoins dentaires importants et un indice CAOD (dents cariées, absentes ou obturées pour raisons de carie) élevé (42,50–52). Malgré l'amélioration globale de la santé bucco-dentaire dans les pays industrialisés, les personnes qui n'ont pas accès à la prévention et/ou aux soins bucco-dentaires cumulent des facteurs de risque de maladies bucco-dentaires (53,54) et constituent des groupes à besoins spécifiques en santé bucco-dentaire. Ces groupes incluent les personnes socialement et économiquement vulnérables (55), les personnes souffrant de phobies spécifiques liées aux soins dentaires (56), ou les personnes souffrant d'un trouble physique, cognitif ou mental (57). Pour toutes ces personnes, la difficulté de coopération pour des soins dentaires en vigile et la multiplicité des soins nécessaires justifient le recours à l'anesthésie générale (58). Très peu d'informations sur les procédures de soins mises en place sous anesthésie générale sont disponibles. Les procédures de soins délivrées par les différentes équipes sont variées (59,60) et le traitement dentaire sous AG a longtemps été associé à des extractions multiples (32,60). Cependant, le remplacement prothétique est souvent difficile chez ces patients, voire impossible. Le résultat probable de la perte non compensée prothétiquement des dents est l'apparition de dysfonctions orales, en particulier chez les patients présentant une déficience neuromotrice ou neurosensorielle préexistante. L'extrême importance de conserver des dents fonctionnelles est de plus en plus reconnue en termes de prévention de la dysphagie et de maintien de la capacité masticatoire. Les patients ayant des besoins égaux doivent bénéficier d'un accès égal, d'une qualité de traitement égale et de résultats de traitement égaux, qu'une procédure facilitatrice soit nécessaire ou non pour réaliser le traitement (61). Il est donc nécessaire d'encourager la réalisation de traitements restaurateurs et endodontiques sous AG, de normaliser les procédures de traitement et d'évaluer les résultats de ces approches thérapeutiques.

Parmi les procédures de soins, le traitement endodontique se pose comme seule alternative à l'avulsion ou à l'implantologie. L'objectif du traitement endodontique est de traiter les dents naturelles présentant une maladie pulpaire ou péri apicale et de les maintenir fonctionnelles sur l'arcade. Les récentes avancées concernant le succès de la pulpotomie pour les dents permanentes présentant une pulpite

réversible et irréversible confirment ce traitement comme faisant partie de l'arsenal thérapeutique lors du traitement d'un patient sous AG (62).

La question de la restauration de la dent traitée endodontiquement sous AG se pose dans la mesure où il n'est pas possible de réaliser une couronne conventionnelle. Il est cependant nécessaire de restaurer la dent le plus rapidement possible pour garantir l'efficacité du traitement endodontique. Les objectifs d'une couronne périphérique conventionnelle sont de conserver une dent fonctionnelle sur l'arcade, de maintenir la santé parodontale et de maintenir ou de restaurer les contacts dentaires proximaux. Une couronne conventionnelle doit protéger le traitement endodontique d'une dent contre la recontamination bactérienne ou protéger une dent vitale contre la maladie carieuse et la contamination bactérienne. Enfin, une couronne conventionnelle doit restaurer une fonction occlusale optimale et peut avoir des propriétés esthétiques. Le concept de réalisation des couronnes conventionnelles est de préparer la dent, de prendre une empreinte et de créer une couronne prothétique parfaitement adaptée à la préparation coronaire.

L'utilisation des coiffes préformées en acier inoxydable (CPP) est bien décrite pour les molaires temporaires présentant des lésions carieuses profondes ou étendues (63–65). Il a été démontré que le risque d'échec ou de douleur à long terme pour les molaires temporaires traitées par pulpotomie ou par pulpectomie et restaurées par CPP est réduit par rapport aux restaurations directes en composite. Les restaurations en composite requièrent un contrôle parfait de l'humidité pour obtenir l'adhésion et prennent beaucoup de temps. Ces deux conditions peuvent être difficiles à gérer dans des circonstances particulières. Peu d'études ont exploré le résultat des restaurations par CPP chez les adultes (66,67). Il a été récemment montré que la survie des dents permanentes postérieures restaurées par coiffes préformées est de 79,2 % après 10 ans (66). Cependant, des questions sont soulevées concernant la capacité des CPP à satisfaire les mêmes objectifs que ceux exigés pour une couronne périphérique conventionnelle. Les CPP sont préfabriquées dans un alliage inoxydable nickel-chrome. Elles sont sélectionnées pour être utilisées en fonction de leur adaptation à la dent et ne sont donc pas créées sur mesure à partir d'une empreinte dentaire. L'une des difficultés de la mise en place des CPP consiste à assurer l'ajustement cervical tout en restaurant les points de contact interdentaires. La préparation coronaire pour la mise en place des CPP est assez invasive et l'adaptation marginale peut être approximative. En fait, les concepts de préparation coronaire pour une CPP se rapprochent de ceux qui étaient appliqués pour une couronne à bague, procédure qui relève du catalogue historique de la dentisterie. Il n'existe pas de directive académique concernant la préparation coronaire pour les CPP sur les molaires permanentes. De même, il n'existe que peu d'études évaluant les CPP comme restauration des dents postérieures permanentes. Il est pertinent de considérer le rapport bénéfice/risque de la mise en place des CPP, en particulier dans des circonstances particulières. En effet, sous AG, les CPP constitueraient parfois la seule possibilité pour restaurer une dent permanente postérieure traitée endodontiquement et ce en une séance, afin d'éviter son avulsion. Il est également important que la morbidité parodontale potentielle à plus long terme des CPP soit étudiée.

Cette étude rétrospective avait pour objectif de collecter et analyser les radiographies de dents permanentes postérieures restaurées par CPP dans le but d'évaluer leur morbidité potentielle lorsqu'elles sont mises en place sous anesthésie générale.

2.1.2 Matériel et méthodes

2.1.2.1 Population étudiée

La population étudiée était constituée de tous les patients de l'Unité Fonctionnelle (UF) de Soins Spécifiques du service Odontologie du CHU de Clermont-Ferrand, traités sous AG entre janvier 2013 et avril 2019. Les patients pris en charge sous AG regroupaient des populations présentant une anxiété ou une phobie en lien avec les soins dentaires et un nombre important de soins dentaires prévisibles, des patients médicalement compromis, des patients présentant un handicap physique et/ou intellectuel et des patients présentant un réflexe nauséux sévère. Tout patient âgé de plus de 18 ans, pour lequel au moins une molaire permanente a été restaurée par CPP, et pour lequel au moins une radiographie était disponible, a été inclus dans l'étude. L'âge et le sexe, la date de la prise en charge sous AG et les dates des clichés radiologiques pendant la période de suivi postopératoire ont été recueillis dans les dossiers des patients. La période de suivi variait d'un patient à l'autre en fonction de la capacité individuelle à accéder aux soins dentaires. Certains patients ont bénéficié de contrôles réguliers, tandis que d'autres n'ont été vus qu'en cas de problèmes infectieux ou traumatiques aigus. De plus, selon la capacité du patient à supporter un examen radiographique, les radiographies postopératoires étaient soit des radiographies rétro-alvéolaires, soit des radiographies panoramiques. Les patients étaient examinés de manière conventionnelle à l'état vigile ou sous sédation consciente (par Mélange Equimolaire d'Oxygène et de Protoxyde d'Azote, MEOPA). Pour les patients non coopérants dans ces conditions, l'examen dentaire était retardé et réalisé lors d'une séance ultérieure de soins sous sédation par midazolam ou en anesthésie générale. Ni la sédation au midazolam, ni l'AG n'étaient indiquées dans l'unique but de réaliser les clichés radiographiques pour cette étude.

2.1.2.2 Préparation coronaire pour la restauration par CPP

Les protocoles opératoires pour les traitements conservateurs et endodontiques sous AG ont été précédemment décrits dans une étude réalisée par l'équipe de Clermont-Ferrand (68). Les CPP pour les dents permanentes sont disponibles en six tailles basées sur l'anatomie de la première molaire supérieure ou inférieure (couronnes en acier inoxydable 3M™ pour les molaires permanentes). La procédure de mise en place de la CPP est illustrée dans la Figure 1. Après traitement endodontique (pulpotomie thérapeutique ou traitement radiculaire), les parois de la chambre pulpaire sont nettoyées (figure 1A) et la chambre est remplie de ciment verre ionomère de faible viscosité (CVI) (Figure 1B). Une fois que le ciment a pris, le champ opératoire (digue) est retiré. La couronne est ensuite réduite en occlusal (Figure

1C) et préparée par un stripping périphérique complet jusqu'au niveau gingival ou sous-gingival (Figure 1D). La largeur entre les deux dents adjacentes détermine la taille de la coiffe choisie. La préparation coronaire est ensuite ajustée au diamètre interne de la CPP, si nécessaire. Les critères d'ajustement sont les suivants : (i) les limites cervicales de la CPP recouvrent les limites cervicales de la dent préparée ; (ii) la hauteur de la crête marginale de la CPP correspond à celle des dents adjacentes ; (iii) les contacts proximaux avec les dents adjacentes sont rétablis ; et (iv) l'occlusion est vérifiée à l'aide d'un papier d'occlusion de 200 μm , la mâchoire étant déplacée en intercuspidation maximale par l'opérateur. La coiffe est remplie de ciment verre ionomère de haute ou basse viscosité (respectivement Fuji IX et Fuji II) et placée sur la dent préparée (Figure 1E).

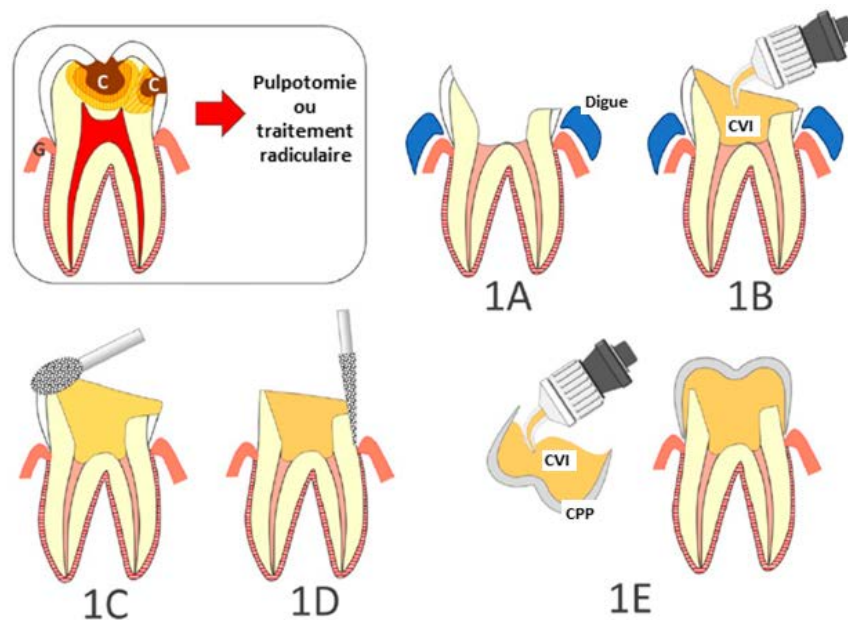


Figure 1 : Restauration étape par étape de dents postérieures présentant des lésions carieuses étendues (C) à l'aide de coiffes préformées en acier inoxydable. (1A) : les parois de la chambre pulpaire sont nettoyées ; (1B) : la chambre est remplie de ciment verre ionomère (CVI) à faible viscosité ; (1C) : la digue (Digue) est retirée, et la couronne est réduite en occlusale ; (1D) : la couronne est préparée par un stripping périphérique complet jusqu'au niveau gingival ou sous-gingival ; (1E) : la coiffe (CPP) est remplie de ciment verre ionomère et placée sur la dent préparée. (G : gencive).

2.1.2.3 Critères d'étude

1) Critères d'évaluation radiographique

Après une recherche dans la littérature (63,66,69–73), quatre enseignants en Odontologie Conservatrice et Endodontie (OC-E) ont défini quatre critères pour l'analyse des radiographies des restaurations par coiffe préformée (i) l'adaptation marginale (6 catégories) ; (ii) le contact proximal avec la dent adjacente (5 catégories) ; (iii) la présence d'un débord de CVI (4 catégories) ; et (iv) la résorption de l'os alvéolaire interdentaire (5 catégories).

Le critère " résorption osseuse alvéolaire " a été évalué par comparaison de la position de la crête alvéolaire entre la radiographie prise à T1 lors de l'AG (soit la radiographie préopératoire, soit, par défaut, la radiographie postopératoire immédiate) et la radiographie de suivi la plus récente (T2). Les trois autres critères, "adaptation marginale", "contact proximal" et "présence d'un débord de CVI", ont été évalués sur la radiographie disponible la plus récente prise lors d'un examen de suivi de routine (T2). Chaque critère a été évalué deux fois, une fois pour le côté mésial et une fois pour le côté distal de la dent restaurée par CPP.

2) Outil de calibration

Un outil de calibration de 60 diapositives a été créé avec le logiciel PowerPoint (Microsoft Corporation, Redmond, Washington, DC, USA). Pour chaque catégorie des quatre critères de l'étude, trois diapositives ont été créées. Chaque diapositive comprenait deux images radiographiques : une radiographie prise à T1 pendant l'AG (soit la radiographie préopératoire, soit par défaut la radiographie postopératoire immédiate) et une radiographie prise à T2 lors du rendez-vous de contrôle le plus récent.

3) Validité de l'outil de calibration

La validité et la stabilité de l'évaluation des critères de l'étude ont été testées par trois investigateurs indépendants, qui ont évalué l'ensemble des 60 diapositives deux fois à deux semaines d'intervalle. Des valeurs de corrélations intra-classes (CIC) pour les évaluations intra- et inter-examineurs élevées ont démontré que les évaluations inter et intra-examineurs étaient stables et fiables.

2.1.2.4 Collecte des données

1) Radiographies des CPP réalisées sous AG

Les patients âgés de plus de 18 ans, traités sous AG, pour lesquels une ou plusieurs molaires permanentes ont été restaurées par CPP, ont été identifiés à l'aide de la base de données de l'hôpital. Les radiographies correspondant aux CPP des patients identifiés ont été recueillies et anonymisées. Chaque diapositive comprenait deux images radiographiques recueillies à partir du dossier patient : une radiographie prise à T1 pendant l'AG (sur la base d'une radiographie rétro-alvéolaire ou de l'orthopantomogramme, soit la radiographie préopératoire, soit, par défaut, la radiographie postopératoire immédiate) et une radiographie prise à T2 lors du dernier rendez-vous de contrôle (radiographie rétro-alvéolaire ou orthopantomogramme).

2) Évaluation des critères radiologiques

Un examinateur calibré, qui avait participé au processus de validation de l'outil de calibration, a évalué tous les critères radiologiques de l'étude pour l'ensemble des radiographies. La période de temps entre la première et la deuxième radiographie a été notée pour le critère "Résorption osseuse alvéolaire". Pour

des raisons statistiques, les temps de suivi ont été regroupés en deux périodes de réévaluation pour faciliter l'interprétation : <1 an et ≥ 1 an. La corrélation potentielle entre les critères de l'étude a été testée à l'aide du coefficient de corrélation de Pearson ($\alpha = 0,05$).

2.1.3 Résultats

2.1.3.1 Population étudiée

Entre 2013 et 2019, 360 molaires permanentes ont été restaurées par CPP chez 198 patients ($36,7 \pm 11,2$ ans, de 18 à 93 ans). Parmi les patients, 100 étaient des hommes ($37,7 \pm 10,7$ ans, de 19 à 67 ans) et 98 femmes ($35,8 \pm 11,7$ ans, de 18 à 93 ans). Les raisons de l'orientation vers une prise en charge sous AG étaient une anxiété ou une phobie liée aux soins dentaires pour 156 patients (78,8 %), des conditions médicales systémiques pour huit patients (4%), une démence pour un patient (0,5%) et une déficience intellectuelle et/ou physique impliquant une insuffisance de coopération pour les soins en vigile pour 33 patients (16,7 %). Les 360 CPP ont été réévaluées en moyenne à $12,5 \pm 17,8$ mois (de 0,5 à 79 mois).

2.1.3.2 Résultats descriptifs

Dans l'ensemble, aucun défaut ou seulement un défaut mineur a été enregistré pour la majorité des CPP pour les critères "Adaptation marginale" (62,5%, $n = 320$), "Contact proximal" (82,2%, $n = 236$) et "Débord de CVI" (95,8%, $n = 337$). Une adaptation marginale acceptable était moins souvent atteinte qu'un contact proximal acceptable ou l'absence de débord de ciment. Le critère "Résorption de l'os alvéolaire" n'a pas pu être évalué pour 144 CPP (40%) pour au moins une des faces proximales de la dent concernée. Sur les 216 dents évaluées radiologiquement, 194 (89,8%) ne présentaient aucun défaut parodontal et seules 14 présentaient une résorption osseuse alvéolaire majeure (6,5%). Une corrélation a été trouvée entre la résorption de l'os alvéolaire et l'absence de contact proximal mésial ($r = 0,46$, $p < 0,001$) et l'absence de contact proximal distal ($r = 0,19$, $p < 0,01$). Il n'y avait aucune corrélation entre la résorption de l'os alvéolaire et le débord de ciment ou l'adaptation marginale.

2.1.4 Discussion

Cette étude a montré que la restauration des dents permanentes postérieures par CPP en acier inoxydable sous anesthésie générale présentait un faible risque de morbidité parodontale à moyen terme et pouvait être utilisée dans ces conditions de séance de soin unique et courte. Ce résultat doit cependant être interprété avec prudence, car l'évaluation n'était basée que sur des critères radiologiques. Une étude à plus long terme sur l'impact parodontal des CPP basée sur des critères cliniques est nécessaire pour compléter les résultats.

La mise en place d'une intubation nasotrachéale étant parfois contre-indiquée par l'anesthésiste, la présence d'une intubation orotrachéale rend la prise d'empreinte très complexe. L'insertion et la désinsertion du porte-empreinte, ainsi que la gestion du matériau représentent des étapes à risque lors de la réalisation d'une empreinte physico-chimique sous AG car il faut une attention particulière pour ne pas retirer de façon non désirée le packing servant de protection aux voies aérodigestives supérieures. L'absence d'empreinte lors de la mise en place d'une CPP permet de s'affranchir de ces difficultés. Une autre difficulté rencontrée lors de la réalisation de prothèse fixée sous AG est le contrôle de l'adaptation occlusale qui est très perturbé du fait de la présence de la canule d'intubation. L'enregistrement de l'occlusion est exclusivement guidé par le praticien sans contrôle du patient, ce qui peut augmenter les risques d'erreur et de suroccclusion. Lorsque l'intubation est orotrachéale, la sonde peut être poussée sur le côté, dans une certaine mesure, mais elle interfère souvent par frottement avec les dernières dents de l'arcade, ce qui tend à modifier la position de la mandibule. Lorsque l'intubation est naso trachéale, la sonde a pour effet de repousser la langue en avant, générant des interférences linguales lors de la prise d'occlusion. Cependant l'avantage des coiffes est leur malléabilité leur permettant de se déformer légèrement pour s'adapter au schéma occlusal.

Les CPP permettent de restaurer la fonction masticatoire et elles procurent une stabilité pour la déglutition (42,74). Une précédente étude de cohorte a démontré qu'une approche de réhabilitation globale, incluant la pose de CPP pour les molaires permanentes, permettait d'améliorer la qualité de vie en lien avec la santé orale après l'AG (42). Les résultats de ce travail sont également en accord avec une étude récente à grande échelle, qui a conclu que les CPP sont une option de traitement durable pour la restauration des dents postérieures présentant un important délabrement coronaire, dans le contexte de l'AG (66). L'outil d'évaluation radiologique des CPP développé et utilisé dans cette étude pourrait être utilisé dans de futures études longitudinales prospectives.

2.1.5 Conclusion

Les résultats montrent que la restauration des dents permanentes postérieures à l'aide de coiffes préformées en acier inoxydable placées sous AG présente un faible risque de morbidité parodontale. Ceci soutient la mise en place de restaurations des dents postérieures traitées endodontiquement par CPP plutôt que l'avulsion. D'autres études basées sur des critères cliniques doivent être entreprises pour compléter les résultats actuels.

2.1.6 Transition

Il est donc acceptable de restaurer par CPP une dent permanente postérieure traitée endodontiquement. L'avènement des procédures de collage et des techniques de Conception et Fabrication Assistées par

Ordinateur (CFAO) d'une part et de matériaux bio actifs permettant la préservation de la vitalité pulpaire d'autre part permet maintenant d'envisager des procédures alternatives, qui une fois validées en procédure de routine, pourront être appliquées dans des circonstances particulières.

2.2 Comment traiter et restaurer en une séance unique une dent postérieure présentant un état pulpaire inflammatoire et des pertes tissulaires importantes ?

2.2.1 Introduction

La question de la restauration des dents en pulpite aiguë réversible, présentant une perte tissulaire importante du fait d'une lésion carieuse profonde (« deep or extremely deep carious lesions », selon Bjørndal (75)) ou d'une importante préparation cavitaire, se pose également en termes de traitement pulpaire d'une part et de restauration coronaire d'autre part.

Au cours de la dernière décennie, grâce aux progrès simultanés de la recherche sur la biologie pulpaire et du développement de matériaux bioactifs, des recommandations ont été émises concernant l'élimination des tissus cariés et le traitement des lésions carieuses sur dents vitales, dans le but de préserver les tissus dentaires sains et de conserver les dents à long terme. Les principes d'intervention minimale guident désormais la dentisterie restauratrice et l'endodontie (76,77). Lorsqu'une dent avec un important délabrement coronaire présente un diagnostic de pulpite réversible, il existe deux approches possibles d'intervention minimale. L'approche conservatrice vise à prévenir l'exposition pulpaire par un coiffage pulpaire indirect et à induire une réaction pulpaire par la formation de dentine réparatrice à la périphérie de la pulpe camérale, à proximité de la lésion carieuse. Cette approche vise à maintenir l'intégrité des tissus par une technique de curetage sélectif et à restaurer la perte de tissu coronaire par une restauration directe avec des matériaux d'insertion en phase plastique. Le taux de réussite de cette procédure varie largement, de 56 % à 100 % (78–80).

L'autre approche, préservatrice, consiste à traiter l'inflammation pulpaire par une pulpotomie thérapeutique (retrait de toute la pulpe coronaire camérale jusqu'au niveau du/des canal/aux) (81–84) puis à restaurer la dent avec une restauration indirecte impliquant un recouvrement cuspidien. Cette approche était celle utilisée dans l'étude. Elle est plus invasive que la première, mais peut être considérée comme une "approche préservatrice" car son objectif est de maintenir la dent sur l'arcade à long terme et de limiter le risque de fracture dentaire, liée à une importante restauration directe. D'un point de vue pulpaire, il semble préférable de réintervenir le moins possible sur une dent. Le taux de réussite des procédures de pulpotomie thérapeutique varie entre 82,9% et 100%, en fonction de la restauration coronaire (83–87). De nombreuses études sont actuellement publiées sur l'indication de la pulpotomie totale à visée thérapeutique en cas de lésions carieuses de grande étendue associées à une pulpite réversible ou irréversible. Dans ces conditions, le taux de succès de ces pulpotomies varie de 37,5 à 97,5% (82,88–90).

L'objectif de la pulpotomie thérapeutique est de préserver la vitalité et la fonction de la portion radulaire de la pulpe (85,91) et de permettre la formation d'un pont dentinaire à l'interface matériau d'obturation-pulpe, limitant la pénétration d'irritants bactériens et protégeant la pulpe radulaire restante (92,93). Le maintien de la vitalité radulaire présente de nombreux avantages :

- Les mécanismes proprioceptifs de la pulpe radiculaire permettraient de réduire la propension à la fracture dentaire (94–96) ;
- Grâce à son immunocompétence, la pulpe vitale est capable d'initier plusieurs mécanismes de défense pour se protéger contre l'invasion bactérienne (97,98) ;
- Le complexe dentine-pulpe continuerait également à se protéger en stimulant la formation d'une dentine tertiaire ou d'une barrière minéralisée contre les agressions (99).

Différentes études ont montré une association statistiquement significative entre la réussite d'une pulpotomie thérapeutique et la qualité de la restauration coronaire associée (100–102). Le choix du matériau a un impact sur le succès de la pulpotomie, moins élevé avec une restauration par composite en méthode directe (87). Un meilleur taux de survie des dents est également observé lorsque la restauration est effectuée dans les deux jours suivant l'exposition pulpaire, ce qui souligne la nécessité de limiter le nombre de séances de traitement ainsi que le temps entre les séances successives (98).

Quelle que soit la technique de maintien de la vitalité pulpaire, le degré de réussite dépend donc de la possibilité de réaliser la restauration coronaire définitive dès la première séance de soin. En effet, d'un point de vue restaurateur, plus une dent subit de réinterventions, plus son intégrité structurelle est affaiblie.

La dentisterie a connu de nombreuses évolutions en ce sens, rendues possibles par l'amélioration des biomatériaux de restauration et de collage ainsi que, plus récemment, par le développement de l'empreinte optique et de la CFAO. Les actuels principes biomimétiques correspondent à la réalisation de restaurations compatibles avec les propriétés mécaniques, biologiques et optiques des tissus dentaires sous-jacents (103). Le collage amélaire ou dentinaire permet de s'affranchir de moyens de rétention mécanique comme l'ancrage radiculaire. La dentisterie adhésive autorise en outre la préservation de la vitalité pulpaire et évite une destruction supplémentaire (104). Le taux de survie des restaurations partielles collées en vitrocéramique varie, selon les études, de 92 à 95 % après cinq ans voir 91 % après dix ans (105). A chaque fois que cela est possible, il faut privilégier une restauration partielle collée, sans ancrage radiculaire, plus économe en tissus sains. C'est la « No post, No crown dentistry », évoquée par Pascal Magne (106).

A ce principe de biomimétisme est associée la notion de gradient thérapeutique, particulièrement développée en odontologie conservatrice : il est nécessaire de différer au maximum la première restauration d'une dent par des méthodes de diagnostics précoces de lésions carieuses, des scellements de sillon... Les techniques de curetage sélectif seront à privilégier ainsi que des préparations cavitaires minimalement invasives. L'étanchéité, le collage et la qualité globale de la restauration doivent être recherchés. Enfin, la réparation d'une restauration existante sera à considérer avant son remplacement complet (107). Ce gradient thérapeutique peut être adapté au degré de délabrement de la dent postérieure : restaurations directes, restaurations indirectes partielles (inlay, onlay, overlay, endocouronne), restaurations indirectes complètes (couronne périphérique). Les restaurations indirectes doivent être réalisées lorsque le cahier des charges des restaurations directes ne peut plus être rempli. Les

restaurations partielles collées en technique indirecte ne sont donc indiquées que lorsqu'une restauration directe ne l'est plus. L'importance de la perte tissulaire compromet la réalisation de restauration directe : plus la restauration est volumineuse, plus la contraction lors de la photopolymérisation est importante et entraîne un problème pour l'étanchéité à long terme (108). De plus, la difficulté à réaliser une anatomie occlusale correcte, un point de contact optimal ou un profil d'émergence soigné oriente vers la réalisation d'une restauration indirecte (109). Ainsi, il était couramment admis qu'une dent dont la perte tissulaire se limite à la cavité d'accès occlusale avec conservation des crêtes marginales (classe I) puisse être restaurée de manière directe *via* un matériau inséré en phase plastique. Les restaurations directes ont une mise en place rapide, mais leur indication semble limitée à de faibles délabrements (19). De même, la restauration semi-directe ou indirecte, sollicitant une étape de laboratoire qui rallonge l'intervalle de pose, était envisagée quand la perte tissulaire est de plus grande étendue (classe III). Les taux de survie des dents présentant des lésions carieuses intéressant plus de trois surfaces sont plus élevés lorsqu'elles sont restaurées à l'aide de couronnes (complètes ou partielles) plutôt que par restaurations en composite (110). Les dents restaurées indirectement avec des matériaux type composite ou céramique présentent : une meilleure résistance à la fracture et une meilleure intégrité marginale, une réduction de l'infiltration marginale cervicale et une moindre rugosité de surface, moins de sensibilité postopératoire et d'irritation des tissus mous que les dents restaurées directement en composite (111–115). Dans l'ensemble, les restaurations indirectes ont un taux d'échec annuel moyen inférieur à celui des restaurations directes sur les dents postérieures (116). Le développement de la technologie CFAO au fauteuil a permis de réaliser une restauration indirecte d'une dent en une seule séance. Ainsi, il peut y avoir un avantage à restaurer immédiatement les dents traitées par pulpotomie thérapeutique et présentant des lésions carieuses profondes en utilisant des restaurations indirectes.

Cette étude originale avait pour but d'évaluer le résultat de l'association d'une pulpotomie thérapeutique et d'une endocouronne réalisée immédiatement par empreinte optique et apport de la CFAO sur des dents présentant des lésions carieuses importantes et une inflammation pulpaire réversible ou non.

2.2.2 Matériaux et méthodes

2.2.2.1 Type d'étude

Il s'agit d'un rapport de cas sur une série de patients, basé sur les données recueillies lors des séances de soins dentaires. L'approbation éthique de l'étude a été obtenue le 15 mai 2020 (CECIC Rhône-Alpes-Auvergne, Grenoble, IRB 5921). L'étude a été menée conformément à la Déclaration d'Helsinki. Tous les patients ont reçu des informations sur l'étude et ont donné leur consentement pour y participer.

2.2.2.2 Patients

Les patients présentant une molaire permanente avec une lésion carieuse profonde ou extrêmement profonde, associée à un diagnostic de pulpite réversible, chronique ou irréversible ont été recrutés dans le service Odontologie du Centre Hospitalier Universitaire de Clermont-Ferrand entre novembre 2017 et janvier 2020. Les diagnostics pulpaire et péri apicaux préopératoires ont été établis après un examen clinique et radiologique. La dent traitée devait pouvoir être restaurée par endocouronne après la pulpotomie (nombre, épaisseur et position des parois dentaires après curetage compatibles avec une restauration collée, sans ancrage radiculaire). Les radiographies rétro-alvéolaires préopératoires ont été réalisées à l'aide d'angulateurs et par technique des plans parallèles.

2.2.2.3 Procédures de soin

Le traitement par pulpotomie et la restauration des dents ont été effectués au fauteuil au cours d'une seule et même séance de soin.

- Pulpotomie thérapeutique : Après une anesthésie locale ou locorégionale (avec une solution adrénalinée à 1 : 200 000), la digue a été mise en place. La lésion carieuse a été curetée avec une fraise boule multilame, de taille adaptée, montée sur contre angle bague bleue. La chambre pulpaire a été ouverte à l'aide d'une fraise diamantée haute vitesse stérile sous irrigation ; la cavité d'accès a été réalisée avec une fraise Endo-Z de 21 mm. A partir de ce moment, une irrigation abondante avec une solution d'hypochlorite de sodium à 2,5 % a été mise en place. La pulpotomie a été effectuée jusqu'au niveau des orifices canaux. Si l'hémostase n'était pas atteinte, le tissu pulpaire était amputé de 2 mm sous le niveau de l'entrée du canal à l'aide d'un foret de Gates. L'hémostase a été obtenue en appliquant une boulette de coton imbibée d'une solution d'hypochlorite de sodium à 2,5 % pendant 3 min et en répétant cette application, si nécessaire, pendant 6 min maximum. La Biodentine™ a été mélangée selon les instructions du fabricant et placée sur une épaisseur de 3 ou 4 mm au-dessus du tissu pulpaire radiculaire. Après le temps de prise initial de 12 min, la digue a été retirée pour la préparation coronaire.
- Préparation coronaire : Un abaissement occlusal d'au moins 2 mm a été prévu pour l'ensemble de la surface occlusale afin de prévoir l'espace pour la restauration céramique dans un objectif de recouvrement cuspidien complet. Contrairement aux préparations pour endocouronne décrites pour les dents traitées au niveau canalair, l'ancrage central de l'endocouronne de la dent traitée par pulpotomie a été placé dans la chambre pulpaire, en maintenant une épaisseur de la Biodentine™ d'environ 3 mm au-dessus du plancher pulpaire et en éliminant les contre-dépouilles dans la cavité d'accès (Figure 2). Les limites de la préparation étaient supragingivales pour faciliter l'empreinte et le collage.

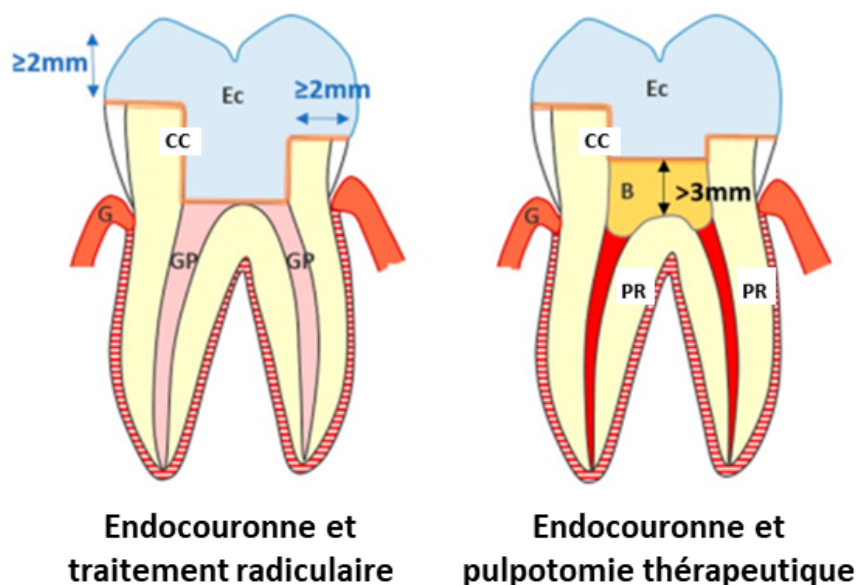


Figure 2 : Comparaison schématique des ancrages des endocouronnes réalisées sur des dents traitées par traitement radiculaire ou par pulpotomie thérapeutique (Ec : Endocouronne ; CC : Composite de Collage ; GP : Gutta Percha ; G : Gencive ; B : Biodentine™ ; PR : Pulpe Radiculaire).

- Empreinte optique et collage de l'endocouronne : Une empreinte optique a été obtenue avec une caméra Cerec® Omnicam. La digue a ensuite été remise en place. Les endocouronnes ont été modélisées, puis fabriquées dans des blocs d'IPS e.max® CAD ou d'Enamic® selon le cas clinique. Le temps de fabrication était d'environ 15 minutes pour les deux matériaux. Les endocouronnes IPS e.max® CAD ont été essayées sur les dents avant une cuisson de 25 minutes. Toutes les endocouronnes ont été mordancées à l'acide fluorhydrique pendant 20 secondes pour IPS e.max® CAD et 30 secondes pour Enamic® respectivement. Les endocouronnes ont ensuite été collées avec un composite de collage à double polymérisation : photopolymérisable et dual (Variolink® Esthetic DC). Une radiographie périapicale postopératoire a été prise après le collage de la restauration à l'aide d'un angulateur et selon la technique des plans parallèles.

2.2.2.4 Évaluations de suivi

Les patients ont été invités à revenir pour un contrôle à un mois (T1), six mois (T2) et un an (T3) après le traitement. A chaque étape, un examen clinique et radiographique de la dent traitée était effectué. L'examen clinique a été réalisé pour vérifier : (i) la présence de la dent sur l'arcade, (ii) l'absence de douleur dentaire ou d'épisode douloureux rapporté par le patient, et (iii) l'absence de signe clinique de maladie infectieuse lié au traitement par pulpotomie thérapeutique (œdème, fistule ou mobilité dentaire). Les radiographies rétro-alvéolaires ont été à nouveau prises à l'aide d'un angulateur et selon la technique des plans parallèles. L'évaluation radiologique a été réalisée pour évaluer et comparer le score de l'Indice Péri Apical (PAI) de la dent traitée après la période de suivi, le score PAI initial étant

relevé à T0 (117). La calcification du canal/des canaux a également été vérifiée radiologiquement tout au long de la période de suivi.

2.2.2.5 Critères d'étude

Le résultat de la pulpotomie a été évalué sur la base de critères cliniques et radiologiques (99). Deux investigateurs ont été entraînés pour interpréter les scores PAI avec un test et un retest à 15 jours d'intervalle sur 100 radiographies illustrant les cinq catégories du score. Pour l'évaluation des critères radiologiques, toutes les images postopératoires ont été proposées dans un ordre aléatoire et interprétées par les deux investigateurs calibrés. En cas de désaccord, une décision consensuelle a été prise par les deux examinateurs et par un troisième investigateur calibré. Des valeurs de corrélations intra-classes (CIC) pour les évaluations intra- et inter-examineurs élevées ont démontré que les évaluations inter et intra-examineurs étaient stables et fiables.

2.2.2.6 Analyse statistique

Une analyse descriptive a été effectuée en termes de pourcentage de dents satisfaisant aux critères de réussite. Le nombre d'inclusions nécessaires pour obtenir un taux de réussite pour les dents traitées par pulpotomie à la Biodentine™ et immédiatement restaurées par endocouronne qui soit égal ou supérieur à celui des dents vitales traitées par la technique d'excavation partielle (hypothèse de non-infériorité) a été calculé (78). Le nombre de sujets requis observés un an après le traitement était de 8 ($\alpha = 5\%$, $\beta = 10\%$).

2.2.3 Résultats

Trente patients ont été inclus dans cette étude, avec un total de 16 molaires inférieures et 14 molaires supérieures. Huit molaires ont été examinées à chaque étape de suivi de l'étude. Le recrutement du nombre de sujets requis a pris 27 mois. Douze patients (40 %) ont été perdus de vue au cours du suivi. Dans l'ensemble, aucune pulpotomie inefficace n'a été observée, quelle que soit la durée du suivi. Après un et six mois, respectivement 23/28 (82%) et 15/16 (94%) des pulpotomies observées étaient efficaces. Toutes les pulpotomies évaluées après un an (8/8) étaient efficaces et ne présentaient pas de calcification canalaire. Dans la plupart des cas, la catégorisation en pulpotomies incertaines était liée à des critères cliniques plutôt que radiologiques.

2.2.4 Discussion

Il s'agit de la première étude décrivant le résultat de dents traitées par pulpotomie thérapeutique et restaurées immédiatement par endocouronne CFAO. L'analyse de cette étude était basée sur une hypothèse de non-infériorité, qui supposait que les résultats à long terme de l'association d'une pulpotomie thérapeutique et d'une endocouronne CFAO mise en place immédiatement seraient au moins équivalents à ceux d'une technique d'excavation partielle suivie par une restauration directe permanente ou temporaire. Cette hypothèse a été vérifiée. Cependant, la conception de l'étude n'inclut pas de procédure de randomisation et de groupe contrôle. Par conséquent, les résultats de ce travail doivent être confirmés dans le cadre d'un suivi à plus long terme afin de permettre une comparaison avec les données de la littérature. La discussion de ces résultats dans le contexte de la préservation/conservation offre une nouvelle perspective pour justifier cette approche de dentisterie minimalement invasive.

Cette étude suggère que l'association d'une inflammation pulpaire (pulpite) et d'une lésion carieuse profonde constituerait une entité étiologique d'une maladie pour laquelle l'association d'une pulpotomie thérapeutique et d'une endocouronne CFAO mise en place immédiatement après serait le traitement spécifique.

2.2.5 Conclusion

Dans les limites de cette étude préliminaire, l'association d'une pulpotomie thérapeutique et d'une restauration immédiate par endocouronne CFAO peut être recommandée en toute sécurité pour traiter, en une seule séance, des molaires permanentes sévèrement endommagées et présentant une inflammation pulpaire, réversible ou non. Cette nouvelle combinaison préserve le bio-potentiel résiduel de la pulpe, assurant un continuum endo-prothétique avec pour objectif un succès à long terme.

2.2.6 Transition

D'un point de vue universitaire, il paraît maintenant intéressant d'évaluer la faisabilité des restaurations par endocouronne par les étudiants en formation initiale. Ainsi il sera possible de proposer l'association d'une pulpotomie thérapeutique et d'une endocouronne CFAO en une séance comme alternative au traitement radiculaire et à la couronne périphérique pour les patients du service Odontologie.

2.3 Les restaurations par endocouronne peuvent-elles être réalisées de façon sûre par des étudiants en formation initiale ?

2.3.1 Introduction

La restauration des dents postérieures présentant une importante perte de tissus coronaires reste un domaine d'intérêt majeur, notamment dans le traitement des dents traitées endodontiquement. Auparavant, les techniques de collage étaient mal maîtrisées et la proposition de restauration la plus courante passait par l'utilisation d'une couronne périphérique avec un ancrage radiculaire pour en améliorer la rétention. Cette technique était délabrante et ne permettait pas une préservation maximale des tissus dentaires de la dent. En effet, le recours à l'ancrage radiculaire diminue la résistance à la fracture de la dent en raison de la perte supplémentaire de dentine radiculaire saine (118) et le risque de perforation est augmenté (119). La préparation radiculaire affecte le comportement biomécanique de la dent restaurée (120). Le module d'élasticité des alliages non précieux (Chrome-Cobalt et Nickel-Chrome) est supérieur à celui de la dentine (121). Ainsi, sous l'effet des forces occlusales, la présence du tenon majore le risque de fracture radiculaire indiquant l'avulsion de la dent (122).

Les techniques actuelles envisageables, en fonction de l'état de délabrement de la dent, passent par des techniques de collage (tenon fibré, facette, restauration partielle collée...). En 1995, Pissis a proposé une restauration indirecte originale conçue comme une couronne monobloc, afin d'éliminer l'ancrage radiculaire (123). Bindl et Mörmann ont ensuite amélioré, en 1999, le concept en désignant l'« endocouronne » comme une céramique monolithique adhésive ancrée dans la chambre pulpaire, en exploitant les propriétés de rétention mécanique des parois de la chambre (124). Plusieurs études ont indiqué que le design des préparations pour endocouronne était compatible avec les applications des systèmes de Conception et de Fabrication Assistées par Ordinateur (124,125).

Ce nouveau type de restauration a fait l'objet de nombreuses évaluations (124,126–128), mais toutes ces études étaient difficiles à comparer en raison des différences de matériaux, de type de dent ou de procédures. Récemment, une revue systématique a été menée pour déterminer si les endocouronnes constituaient une option restauratrice appropriée avec un résultat prévisible pour les dents postérieures traitées endodontiquement et présentant un important délabrement coronaire (129). Huit études cliniques ont été incluses, rapportant des taux de survie variant entre 69 % et 100 %, selon le type de dent (molaire ou prémolaire) et une période de suivi moyenne allant de 6 à 116 mois (129).

Des études récentes ont rapporté des résultats optimistes à long terme pour des endocouronnes CFAO (127,128) qui suggèrent que ces traitements devraient plus être développés pour le traitement des dents postérieures traitées endodontiquement et présentant des pertes tissulaires coronaires importantes. La validation des procédures et la diffusion des connaissances fondées sur la preuve passent par la mise en place d'enseignements universitaires. Par conséquent, il semble nécessaire de former à la fois les étudiants en formation initiale et en formation continue sur la façon d'utiliser ces nouvelles technologies. Les dernières études portant sur l'évaluation des endocouronnes avaient pour opérateurs des praticiens

expérimentés. Aucune étude ne porte sur les étudiants en formation initiale. L'amélioration des pratiques professionnelles nécessite d'évaluer une procédure (la restauration par endocouronne), de donner les connaissances et de s'assurer que les étudiants possèdent les compétences cliniques requises pour fournir un traitement de qualité. A terme, cela permettrait, en outre, d'actualiser les informations sur la diversité des soins prothétiques et de proposer des traitements adaptés aux données actuelles de la science, qui pourraient être facilement accessibles aux patients.

Ainsi, cette étude avait pour objectif d'évaluer le succès des restaurations de dents traitées endodontiquement par endocouronne CFAO, réalisées par des étudiants en formation initiale supervisés par un enseignant et de rechercher les facteurs potentiels d'échecs.

2.3.2 Matériaux et méthodes

2.3.2.1 Type d'étude

Il s'agissait d'une étude observationnelle de cohorte ouverte basée sur des données cliniques issues de procédures thérapeutiques, dont l'utilisation a été autorisée par le comité d'éthique local. Tous les patients ont été informés de l'étude et ont donné leur consentement pour participer. De juillet 2011 à mai 2018, tout patient adulte fréquentant le service Odontologie du CHU de Clermont-Ferrand a été invité à participer s'il avait reçu l'indication de restaurer une dent postérieure permanente traitée endodontiquement avec une endocouronne. Après l'inclusion, le patient a reçu un rendez-vous pour la procédure de restauration de sa dent.

2.3.2.2 Procédure

- Opérateurs - Les technologies CFAO pour les soins prothétiques sont organisées en routine. Les internes et les étudiants en 4ème, 5ème ou 6ème année, ont travaillé sous la supervision de quatre enseignants qui vérifiaient chacune des six étapes suivantes : 1) l'indication pour la restauration par endocouronne ; 2) la préparation dentaire ; 3) l'empreinte optique ; 4) la modélisation et la conception par ordinateur de la restauration ; 5) le collage de la pièce prothétique ; et 6) l'ajustement occlusal et le polissage.
- Préparation de la dent - Les endocouronnes sont des restaurations guidées par des principes conservateurs (130,131) qui préservent le maximum de surface dentaire pour le collage. La préparation de la dent consistait en un rebord cervical circulaire périphérique et une cavité centrale rétentive dans la chambre pulpaire, sans ancrage radiculaire (124). Une extension intraradiculaire de la préparation pour endocouronne affectait négativement à la fois l'adaptation marginale et l'ajustement interne de la restauration finale (132). La profondeur d'extension dans

la chambre pulpaire de l'endocouronne n'était pas supérieure à 2 mm (133). Une épaisseur minimale de 2 mm devait être aménagée sur l'ensemble de la surface occlusale pour créer un espace suffisant pour le matériau de restauration dans un objectif de recouvrement cuspidien complet. La préparation axiale a été réalisée pour permettre la continuité entre la cavité d'accès et la chambre pulpaire ; et, toujours dans l'intérêt d'une préservation maximale des tissus résiduels sains, toute contre-dépouille a été comblée avec une résine composite pour éviter une surpréparation inutile de la cavité. L'utilisation d'une petite quantité de résine composite peut être utile pour améliorer la géométrie interne et éliminer les contre-dépouilles de la préparation endodontique (134). Tous les angles des lignes internes ont été arrondis. L'endocouronne restaure la surface occlusale et la partie occlusale des parois dentaires, comme cela est également possible avec un overlay. Il n'y a pas eu de préparation périphérique. La préparation devait être supragingivale pour faciliter l'empreinte optique et le collage. Si la partie occlusale des parois résiduelles avait moins de 2 mm d'épaisseur, les parois ont alors été réduites en hauteur jusqu'à atteindre les 2 mm nécessaires en épaisseur.

- Matériaux de l'endocouronne - Deux vitrocéramiques renforcées d'Ivoclar Vivadent (IPS Empress CAD [avec des cristaux de leucite] et IPS e.max CAD [avec du disilicate de lithium]) ont été utilisées comme matériaux pour les endocouronnes, en fonction des indications du superviseur.
- Usinage - Pour la durée de l'étude, le système Bluecam avec Cerec 3D et Cerec SW 4, puis le système Omnicam avec Cerec Omnicam 4.4 et Cerec Omnicam SW 4.5 pour la numérisation et l'usinage de l'endocouronne ont été utilisés. La cristallisation a été obtenue en 20 minutes pour les restaurations IPS e.max CAD (Programat CS, Ivoclar Vivadent). Les pièces IPS Empress CAD ont été glacées au four.
- Préparation des endocouronnes - Après le fraisage, les pièces en céramique ont été préparées avec de l'acide fluorhydrique à 9,5 % (Porcelain Etch, Ultradent), selon les recommandations du fabricant, pendant différentes durées (60 sec pour IPS Empress CAD, 20 sec pour IPS e.max CAD). Un silane a ensuite été appliqué sur l'intrados de la surface de l'endocouronne (Monobond Plus, Ivoclar Vivadent).
- Collage - Deux procédures de collage ont été suivies. Pour les dents restaurées sans mise en place d'une digue, un mordantage sélectif a été effectué, limité à l'émail et un ciment de scellement composite auto-adhésif (RelyX Unicem, 3M Oral Care) a été utilisé pour coller l'endocouronne. Pour les dents restaurées avec mise en place de la digue, l'émail a été mordancé pendant 30 secondes et la dentine pendant 15 secondes. Un adhésif à double polymérisation (Excite DSC, Ivoclar Vivadent) et un composite de collage à double polymérisation : photopolymérisable et dual (Variolink II, Ivoclar Vivadent) ont été utilisés pour le collage.
- Finition - Les contacts proximaux ont été vérifiés avec du fil dentaire. Le contrôle de l'occlusion a été effectué avec des fraises de finition et à l'aide d'un papier d'occlusion de 200 µm.

2.3.2.3 Critères d'étude

1) Critères primaires

La présence de la dent avec l'endocouronne était le critère principal utilisé pour calculer le taux de survie des dents restaurées. La survie était définie comme la dent restant sur l'arcade avec sa restauration par endocouronne, avec ou sans modifications apportées pendant la période d'observation (135).

2) Critères secondaires

- Qualité des endocouronnes :

La qualité des endocouronnes survivantes a été évaluée selon les critères de la Fédération Dentaire Internationale (FDI) (136). Deux investigateurs indépendants ont procédé aux évaluations selon la procédure de calibration de la FDI, adaptée pour une évaluation visuelle. Ils ont évalué 14 des 16 critères de la FDI à chaque session de contrôle. A chaque étape de l'évaluation, les enquêteurs étaient en aveugle de l'opérateur, du matériel, des procédures et de la durée du suivi. Les critères de la FDI sont regroupés en trois catégories : 1) Propriétés esthétiques (état de surface, coloration de surface, stabilité de la teinte et de la translucidité et forme anatomique) ; 2) Propriétés fonctionnelles (fracture et rétention, adaptation marginale, contour occlusal et usure, point de contact proximal/bourrage alimentaire, examen radiographique et point de vue du patient) ; et 3) Propriétés biologiques (hypersensibilité postopératoire et vitalité pulpaire, carie récurrente/érosion/abfraction, intégrité des dents, réponse parodontale, muqueuse adjacente et santé bucco-dentaire ou générale du patient). Les critères d'hypersensibilité postopératoire/vitalité pulpaire et de contour occlusal/usure n'étaient pas applicables dans cette étude. Chaque critère a été noté de 1 à 5, les valeurs les plus élevées signifiant une mauvaise qualité (le score 1 est "cliniquement excellent/très bon", le score 2 est "cliniquement bon", le score 3 est "cliniquement suffisant/ satisfaisant", le score 4 est "cliniquement insatisfaisant" et le score 5 est "cliniquement mauvais").

- Causes d'échec des endocouronnes :

Les échecs ont été classés en deux catégories (137,138) : i) échec défavorable ou catastrophique - la dent a été perdue ou était non restaurable en raison d'une fracture en dessous de la limite osseuse ; ii) échec favorable - l'endocouronne a été partiellement ou totalement perdue (décollement), mais la dent était encore restaurable avec une autre endocouronne ou un autre type de restauration, ou l'endocouronne a fracturé sans que la dent ne se fracture.

Pour chaque cas d'échec défavorable, les modélisations informatiques du logiciel Cerec des restaurations ont été collectées et analysées par les investigateurs en aveugle. L'épaisseur minimale de chaque pièce a été mesurée en utilisant les outils "cut" et "measure" du logiciel Cerec. Le défaut d'épaisseur a été enregistré pour les pièces dont l'épaisseur minimale était inférieure à 2 mm. La

continuité de la limite périphérique, qui a été tracée pour procéder à l'usinage, a été analysée. Les défauts de position des limites ont été vérifiés conformément à la littérature (139).

2.3.2.4 *Suivi*

La première évaluation a été effectuée à la fin de la séance de collage de l'endocouronne pour les cas sans utilisation de digue et une semaine plus tard pour les cas de restaurations collées sous digue. Le délai d'une semaine était lié à l'utilisation de la digue, qui pouvait altérer le degré de réhydratation de la dent et, par conséquent, sa teinte. La pose de la digue pouvait également induire un saignement gingival. Cela pouvait influencer l'évaluation des critères correspondants de la FDI : "stabilité de la teinte et de la translucidité", "réponse parodontale" et "muqueuse adjacente". Le patient s'est ensuite vu proposer d'autres rendez-vous : le premier, 6 mois après le traitement, puis tous les ans par la suite. Des examens cliniques ont été effectués pour évaluer la survie de la dent sur l'arcade, la présence de l'endocouronne et, le cas échéant, sa qualité selon les critères de la FDI.

2.3.2.5 *Investigateurs*

Deux enquêteurs ont été calibrés sur un site de formation et de calibration en ligne (www.e-calib.info) en décembre 2011. Chacun d'entre eux a évalué chaque restauration de manière indépendante à chaque étape de l'étude. Après les deux évaluations, les scores ont été comparés. Lorsque les évaluations étaient comprises entre 1 et 3, les deux valeurs ont été moyennées. Lorsqu'au moins un investigateur a obtenu un score de 4 ou de 5, une valeur consensuelle était alors obtenue après réexamen du patient.

2.3.2.6 *Analyse statistique*

Les tests statistiques ont été réalisés avec le logiciel SPSS 22.0. Les probabilités de survie ont été estimées avec la méthode de Kaplan-Meier. Les critères de score FDI ont été comparés entre la première et la dernière évaluation, avec le test t de Student apparié. Pour évaluer l'impact de la durée du suivi, les données relatives aux critères de la FDI qui étaient significatives après le test t de Student ont été réparties en quatre quartiles équivalents, en fonction des valeurs de la durée du suivi. Une analyse de la variance (ANOVA) a été appliquée pour les comparaisons entre groupes. Le test du log-rank a été appliqué pour comparer les probabilités de survie, en fonction du type de dent et de l'utilisation de la digue liée au système de collage utilisé.

2.3.3 Résultats

De juillet 2011 à mai 2018, 343 molaires ou prémolaires traitées endodontiquement ont été restaurées par endocouronnes chez 315 patients. Parmi eux, 199 patients ont été inclus dans la cohorte. Cinquante-sept patients ont été perdus de vue, un patient est décédé et 56 ont manqué le dernier rendez-vous. Au total, 225 endocouronnes ont été évaluées pendant $56,11 \pm 25,94$ mois, 113 étant rappelées de 6 mois à 4 ans et 112 rappelées de 5 ans à 9 ans. La distribution des endocouronnes par année d'étude de l'opérateur était de 18,7 % en 4e année, 41 % en 5e année, 20,9 % en 6e année et 19,4 % des opérateurs étaient des internes. La distribution d'endocouronne par sexe des étudiants opérateurs était de 43,9% d'hommes et de 56,1% de femmes.

Le taux de survie des dents restaurées était de 81,8%. Le taux de survie estimé par méthode de Kaplan-Meier était de 71,8 % à 9 ans. Les taux de survie n'ont pas été affectés par le type de dent, l'utilisation d'une digue ou le système de collage. Le taux de succès estimé selon Kaplan-Meier était de 58 % à 9 ans.

Les comparaisons des scores moyens pour les critères de la FDI entre l'évaluation initiale et finale dans le groupe "succès" des endocouronnes ont été faites. Une dégradation statistiquement significative a pu être notée pour les critères "coloration de surface", "stabilité de la teinte et de la translucidité" et "point de vue du patient", tandis que les critères "forme anatomique" et "santé buccale et générale" ont montré une amélioration statistiquement significative au fil du temps. La stabilité de la teinte et de la translucidité était le seul critère variant différemment selon la durée du suivi.

La valeur moyenne du score FDI pour le quartile 1 avec le suivi de courte durée était significativement plus faible que les trois autres groupes avec un suivi de plus longue durée.

L'analyse rétrospective des 41 cas d'échecs sur les captures d'images de modélisation dans le logiciel Cerec a montré que presque toutes les restaurations du groupe "échec" pouvaient s'expliquer par l'épaisseur de céramique ou par une erreur dans les limites de préparation préalablement définies par l'étudiant sur le scan numérique.

2.3.4 Discussion

Les restaurations par endocouronne CFAO de la dent postérieure permanente traitée endodontiquement peuvent être réalisées par des étudiants en formation initiale avec un faible risque d'échec avant cinq ans. L'introduction de nouvelles procédures dans le cursus dentaire nécessite des discussions sur plusieurs points. Dispenser aux étudiants un enseignement sur les endocouronnes plutôt que sur les couronnes conventionnelles présente plusieurs avantages. Tout d'abord, l'endocouronne peut être réalisée immédiatement après ou dans la séance suivant le traitement endodontique, ce qui réduit le nombre de visites du patient. De plus, il a été rapporté que la mise en place précoce de la restauration

coronaire permanente augmente la longévité de la dent permanente traitée endodontiquement (28). Depuis l'avènement de la technologie CFAO au fauteuil, les endocouronnes peuvent être collées en une seule séance, alors que les couronnes conventionnelles nécessitent au moins 3 séances. Deuxièmement, par rapport à une restauration conventionnelle avec ancrage radiculaire et couronne périphérique, la restauration par endocouronne ne représente qu'une seule interface de collage. On retrouve donc une unité de structure biomécanique "restauration en céramique - composite de collage - dent résiduelle" (140). Limiter le nombre d'interfaces de collage rend la restauration moins sensible aux effets néfastes de la dégradation de la couche hybride (141).

Le taux de survie des endocouronnes évalué dans la présente étude (71,8 % à 9 ans) était similaire à celui d'une étude récente sur des couronnes périphériques conventionnelles, avec ou sans tenon, réalisées par des étudiants de 4ème et 5ème année en Arabie Saoudite (76% à 8 ans) (27).

2.3.5 Conclusion

Les étudiants de premier cycle peuvent être formés aux techniques d'empreinte optique et de collage leur permettant de restaurer des dents postérieures permanentes traitées endodontiquement par des endocouronnes. La supervision de l'enseignant devrait couvrir toutes les étapes de l'endocouronne afin de limiter le nombre d'échecs. Les critères d'évaluation de cette étude peuvent être utilisés par tout praticien ou enseignant qui cherche à évaluer les pratiques professionnelles selon la méthode du cycle de Deming.

2.3.6 Transition

La restauration par endocouronne de dents permanentes postérieures traitées endodontiquement peut être réalisée de façon sûre par les étudiants en formation initiale. L'enseignement théorique de cette procédure doit maintenant être amélioré et il devrait être possible de proposer aux étudiants un protocole permettant d'augmenter la survie future des dents restaurées par endocouronne, et ce à l'aide de la recherche.

2.4 Existe-t-il des critères susceptibles d'améliorer la résistance à la fracture de la dent traitée endodontiquement et restaurée par endocouronne ?

2.4.1 Introduction

La restauration des dents traitées endodontiquement reste un défi biologique et biomécanique (142). Les facteurs affectant le résultat de la restauration coronaire ont été largement étudiés. L'étendue de la perte de tissus coronaires, l'utilisation d'un ancrage radulaire et le tracé de la limite périphérique, en particulier avec ou sans cerclage circonferentiel, sont encore actuellement discutés (143). Jusqu'à récemment, la déshydratation des dents traitées endodontiquement (11,144) et/ou la perte supplémentaire de tissus due à la préparation canalaire (145) étaient des hypothèses pour expliquer les échecs à long terme dus aux fractures radulaires. Au cours de la dernière décennie, l'évolution des technologies CFAO et des thérapeutiques de régénération pulpaire a conduit à proposer de nouvelles solutions pour les restaurations des dents traitées endodontiquement. Il a déjà été rapporté que des restaurations par endocouronnes CFAO pouvaient être réalisées sur des dents postérieures ayant subi un traitement radulaire (E) avec un faible risque d'échec après plusieurs années (43,127,128). Il a également été rapporté que les endocouronnes CFAO pouvaient être recommandées en toute sécurité pour restaurer des molaires permanentes présentant d'importantes pertes tissulaires coronaires, associées à un diagnostic de pulpite et traitées par pulpotomie thérapeutique (P) (45). L'intérêt de cette nouvelle combinaison de traitements est la préservation du bio-potentiel résiduel de la pulpe radulaire, assurant un continuum endo-prothétique avec un objectif de succès à long terme. Avant de procéder à d'autres essais cliniques, des évaluations *in vitro* sont nécessaires pour fonder les procédures cliniques sur des preuves. En effet, trois points doivent être pris en considération : i) le comportement mécanique des endocouronnes est-il lié au traitement endodontique de la dent (P ou E) ? ; ii) quel est le bénéfice de l'effet de cerclage ? ; iii) quels sont les effets relatifs du matériau utilisé pour l'endocouronne (composite ou céramique) ?

Cette étude a un objectif annexe. Il est difficile de collecter des molaires naturelles saines présentant les mêmes caractéristiques anatomiques (146) à des fins de recherche ou dans un objectif pédagogique. De plus, les premières et deuxièmes molaires sont souvent endommagées (lésion carieuse, usure, fêlure...) avant d'être extraites et les troisièmes molaires sont souvent séparées lors de l'avulsion pour préserver un maximum d'os. D'un point de vue éducatif et scientifique, la communauté dentaire aurait un réel intérêt à utiliser des simulateurs validés à la place des dents naturelles. Des simulateurs dentaires ont été créés avec différents matériaux (147,148). Les simulateurs en résine imprimés en 3D ont d'abord été développés pour des raisons pédagogiques (149) et il a été rapporté que leur utilisation avait des effets positifs sur la confiance en soi des étudiants (150). Les simulateurs imprimés en 3D n'ont pas encore été utilisés en comparaison avec des dents naturelles lors de tests mécaniques expérimentaux.

Cette étude *in vitro* avait pour premier objectif de comparer la résistance à la fracture de molaires mandibulaires naturelles, traitées soit par pulpotomie thérapeutique, soit par traitement radiculaire et restaurées par endocouronne, selon deux matériaux différents et deux formes de préparation différentes. Un deuxième objectif était d'utiliser des simulateurs imprimés en 3D dans les mêmes conditions que les dents naturelles afin d'évaluer si les simulateurs en résine pouvaient être une alternative valable aux dents naturelles lors des tests de résistance.

2.4.2 Matériaux et méthodes

2.4.2.1 Échantillons et design de l'étude

- Dents naturelles (DN) : Cent dix molaires mandibulaires humaines, extraites pour des raisons orthodontiques ou parodontales, sans caries, fissures de l'émail ou défauts anatomiques ont été collectées sur une période de 9 mois et conservées dans une solution de chlorure de sodium (NaCl 0,9%). Les autorisations d'utilisation des dents naturelles ont été obtenues auprès des patients du service Odontologie du CHU de Clermont-Ferrand. Les dents ont été réparties aléatoirement en onze groupes en fonction des traitements endodontiques, des matériaux utilisés pour les endocouronnes et du type de préparation périphérique (Figure 3).

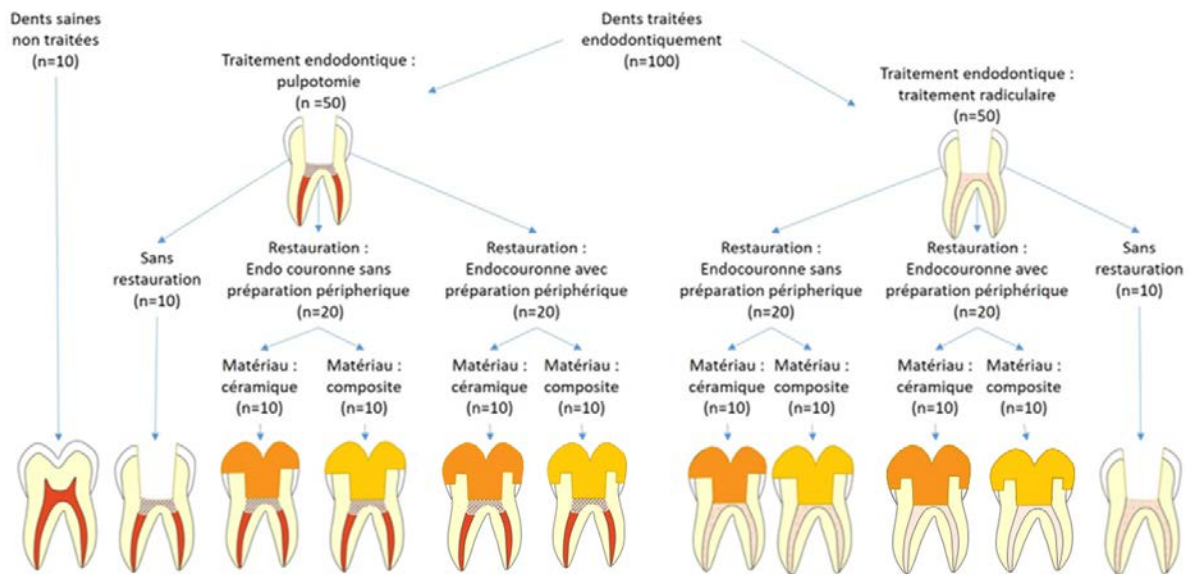


Figure 3 : Schéma expérimental de l'étude *in vitro*, avec onze groupes de dix dents nommés : T+ : Témoin positif ; E- : Témoin négatif traitement radiculaire ; P- : Témoin négatif pulpotomie thérapeutique ; ECE : Traitement radiculaire, avec cerclage, E-max ; EPE : Traitement radiculaire, sans cerclage, E-max ; PCE : Pulpotomie, avec cerclage, E-max ; PPE : Pulpotomie, sans cerclage, E-max ; ECC : Traitement radiculaire, avec cerclage, Cerasmart® ; EPC : Traitement radiculaire, sans cerclage, Cerasmart® ; PCC : Pulpotomie, avec cerclage, Cerasmart® ; PPC : Pulpotomie, sans cerclage, Cerasmart®.

- Simulateurs en résine de dents imprimés en 3D (SR) : Cent dix simulateurs de dents de la première molaire inférieure gauche (36) ont été créés par modélisation 3D avec une racine mésiale avec deux canaux indépendants et une racine distale avec un canal central. Les duplicata ont été produits par fabrication additive avec des résines blanches (Createeth™ ; plateforme 3D-Print UCA Partner de l'Université Clermont Auvergne). Quatre modèles ont été créés à l'aide du logiciel Blender (Blender Foundation) afin de reproduire les mêmes caractéristiques pour la présence/absence de cavité d'accès et pour les types de limites périphériques : dix duplicata de dents saines, vingt duplicata avec cavité d'accès, quarante duplicata avec préparation périphérique en plateau et quarante duplicata avec cerclage périphérique.

2.4.2.2 Procédures de traitements

Traitements endodontiques :

- Traitement radiculaire (E) : L'ouverture de la chambre pulpaire a été faite avec une fraise diamantée (Komet, Gebrüder Brasseler, Lemgo, Allemagne), la cavité d'accès a été réalisée avec une fraise Endo-Z (Dentsply Sirona, Bensheim Allemagne). Une lime n°10 K a été utilisée pour déterminer la longueur de travail. Les canaux ont été instrumentés avec une lime NiTi en mouvement alternatif (Wave One Primary Dentsply Sirona, Bensheim Allemagne). L'irrigation a été faite avec une solution d'hypochlorite de sodium à 2,5%. L'obturation finale a été faite avec un ciment à l'oxyde de zinc et à l'eugénol (Sealite, Pierre Roland, Mérignac France) et des cônes de Gutta Percha appropriés à la lime Niti choisie (Wave One Primary Dentsply Sirona, Bensheim Allemagne). Les canaux radiculaires ont été obturés par compaction thermomécanique. Pour les simulateurs imprimés en 3D, la procédure de traitement était la même, à l'exception de l'ouverture de la chambre, car les simulateurs ont été imprimés avec une cavité d'accès.
- Pulpotomie thérapeutique (P) : Après ouverture et création de la cavité d'accès, une préparation du tiers radiculaire coronaire a été réalisée avec un foret de Gates Glidden n°2 (Dentsply Sirona, Bensheim Allemagne). L'irrigation a été faite avec une solution d'hypochlorite de sodium à 2,5%. Le séchage a été obtenu avec une boulette de coton. Le matériau bioactif (Biodentine™, Septodont, Saint Maur des Fossés, France) a été positionné dans la chambre pulpaire et compacté avec un fouloir à amalgame. Un endo-stop a été positionné sur le fouloir pour mesurer une épaisseur de 3 mm de matériau de coiffage. Pour les simulateurs imprimés en 3D, la procédure de traitement était identique, à l'exception de l'ouverture de la chambre car les simulateurs étaient imprimés avec une cavité d'accès.

Préparations périphériques :

Les différentes préparations périphériques sont représentées dans la Figure 4.

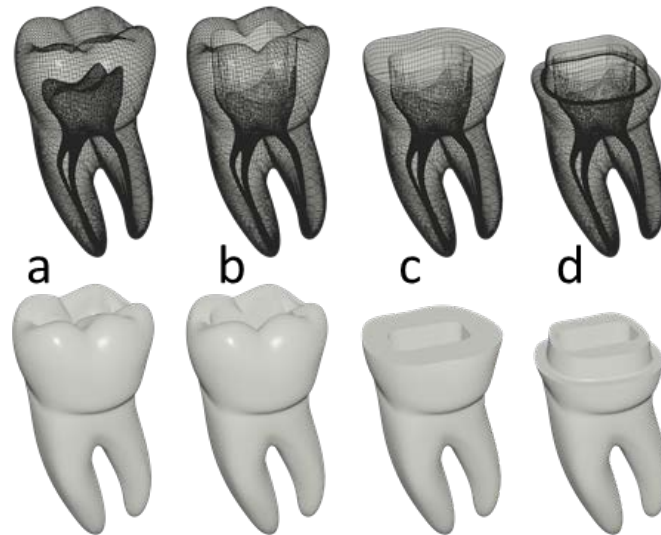


Figure 4 : Représentation 3D des différents simulateurs en résine (a : simulateur en résine de dent saine (témoin positif) ; b : simulateur en résine de dent avec une cavité d'accès (contrôle négatif) ; c : simulateur en résine représentant une dent avec une préparation en plateau, d : simulateur en résine représentant une dent avec une préparation en cerclage circonférentiel).

- Préparation en plateau : La profondeur de la réduction occlusale a été marquée sur les dents avec une fraise dédiée (Deep Marker, Komet, Gebrüder Brasseler, Lemgo, Allemagne). Le plateau a été régularisé avec une fraise disque diamantée (Komet, Gebrüder Brasseler, Lemgo, Allemagne). Pour les simulateurs imprimés en 3D, cette procédure de traitement était inutile car les simulateurs ont été imprimés avec la préparation périphérique en plateau.
- Préparation du cerclage circonférentiel : Après la préparation en plateau, le marqueur de profondeur a été réutilisé pour marquer une hauteur de 2 mm sur chaque face et une fraise guidée de 2 mm a été utilisée pour réaliser la préparation du cerclage périphérique. Les simulateurs imprimés en 3D ont été imprimés avec la préparation en cerclage circonférentiel. Les procédures de préparation des échantillons sont détaillées dans le Tableau 1.

Tableau 1 : Abréviations et descriptions des différents groupes.

GROUPES	Abréviations	
	Dent naturelle	Simulateurs en résine
Témoin positif (dent non traitée endodontiquement, avec couronne intacte, sans préparation ni cavité d'accès)	DN-T+	SR-T+
Pulpotomie (P), sans cerclage, E-max (Céram) (dent traitée endodontiquement par pulpotomie thérapeutique et couronne restaurée par une endocouronne en E-max, avec une préparation de type plateau (Plat), pas de cerclage)	DN-PPE	SR-PPE
Pulpotomie (P), sans cerclage, Cerasmart® (Compo) (dent traitée endodontiquement par pulpotomie thérapeutique et couronne restaurée par une endocouronne en Cerasmart®, avec une préparation de type plateau (Plat), pas de cerclage)	DN-PPC	SR-PPC
Pulpotomie (P), avec cerclage, E-max (Céram) (dent traitée endodontiquement par pulpotomie thérapeutique et couronne restaurée par une endocouronne en E-max, avec une préparation de type cerclage (Cerc))	DN-PCE	SR-PCE
Pulpotomie (P), avec cerclage, Cerasmart® (Compo) (dent traitée endodontiquement par pulpotomie thérapeutique et couronne restaurée par une endocouronne en Cerasmart®, avec une préparation de type cerclage (Cerc))	DN-PCC	SR-PCC
Traitement radiculaire (E), sans cerclage, E-max (Céram) (dent traitée endodontiquement par traitement radiculaire complet et couronne restaurée par une endocouronne en E-max, avec une préparation de type plateau (Plat), pas de cerclage)	DN-EPE	SR-EPE
Traitement radiculaire (E), sans cerclage, Cerasmart® (Compo) (dent traitée endodontiquement par traitement radiculaire complet et couronne restaurée par une endocouronne en Cerasmart®, avec une préparation de type plateau (Plat), pas de cerclage)	DN-EPC	SR-EPC
Traitement radiculaire (E), avec cerclage, E-max (Céram) (dent traitée endodontiquement par traitement radiculaire complet et couronne restaurée par une endocouronne en E-max, avec une préparation de type cerclage (Cerc))	DN-ECE	SR-ECE
Traitement radiculaire (E), avec cerclage, Cerasmart® (Compo) (dent traitée endodontiquement par traitement radiculaire complet et couronne restaurée par une endocouronne en Cerasmart®, avec une préparation de type cerclage (Cerc))	DN-ECC	SR-ECC
Témoin négatif pulpotomie (dent traitée endodontiquement par pulpotomie thérapeutique et couronne non restaurée présentant une cavité d'accès) (P-)	DN-P-	SR-P-
Témoin négatif traitement radiculaire (dent traitée endodontiquement par traitement canalair complet et couronne non restaurée présentant une cavité d'accès) (E-)	DN-E-	SR-E-

Modélisation/conception de la restauration et usinage :

Les dents ont été montées dans un maître modèle et scannées avec la caméra Cerec Primescan (Dentsply Sirona Dental System Bensheim, Allemagne). Les restaurations ont été conçues avec la fonction « biocopie » à partir d'une dent de référence provenant d'un modèle Frasaco (Frasaco GmbH Tettngang, Allemagne). Toutes les endocouronnes ont été usinées avec une unité de fraisage Cerec InLab MCXL (Dentsply Sirona Dental System Bensheim, Allemagne). La cristallisation des restaurations en céramique a été réalisée à l'aide d'un four Programat CS (Ivoclar Vivadent Schaan Lichtenstein). Pour les simulateurs 3D, la fonction de modélisation « biocopie » du système Cerec Primescan a été appliquée en utilisant le simulateur de dents non traitées (SR-T+) comme modèle. Le protocole de collage a été réalisé en suivant les instructions du fabricant, pour les deux matériaux différents.

Protocole de collage :

- Collage des endocouronnes Emax : Avant le scellement, les surfaces internes des endocouronnes ont été mordancées pendant 20 s à l'aide d'acide fluorhydrique à 9 % (Porcelain Etch, Ultradent, South Jordan, États-Unis). Après rinçage (30 secondes) et séchage, un silane a été appliqué pendant 1 min (Monobond Plus, Ivoclar Vivadent Schaan Lichtenstein). La dent a été mordancée avec de l'acide orthophosphorique à 35% (CyberEtch, Henry Schein, Joué-les-Tours, France) et l'agent de collage Excite (Ivoclar Vivadent Schaan Lichtenstein) a été appliqué avec une micro-brosse. Le collage des endocouronnes a été réalisé avec le composite de collage à double polymérisation Variolink DC (Ivoclar Vivadent Schaan Lichtenstein) sous pression digitale. Une photopolymérisation a été réalisée 2 fois pendant 20 secondes.
- Collage des endocouronnes Cerasmart (GC Tokyo, Japon) : Avant le scellement, les surfaces internes des endocouronnes ont été mordancées pendant 20 secondes à l'aide d'acide fluorhydrique à 9 % (Porcelain Etch, Ultradent, South Jordan, États-Unis). Après rinçage (30 secondes) et séchage, un silane a été appliqué (G Multi Primer, GC, Tokyo, Japon). La dent a été mordancée avec de l'acide orthophosphorique à 35% (CyberEtch, Henry Schein, Joué-les-Tours, France) et l'agent de collage G-Premio BOND (G Multi Primer, GC, Tokyo, Japon) a été appliqué à l'aide d'une micro-brosse, après 10 secondes d'attente, 5 secondes de séchage et une légère polymérisation pendant 10 secondes. Le collage des endocouronnes a été réalisé avec le composite de collage à double polymérisation G-CEM LinkForce (G Multi Primer, GC, Tokyo, Japon) sous pression digitale. Une photopolymérisation a été réalisée deux fois pendant 20 secondes.

2.4.2.3 Critères d'étude

La résistance à la fracture (en Newton) a été le premier critère d'étude. Le critère secondaire était le type de fracture : i) une fracture catastrophique se situant sous la jonction cémento-amélaire et s'étendant jusqu'à la racine ; ii) une fracture favorable se situant au-dessus de la jonction cémento-amélaire. Les facteurs explicatifs étaient : i) le type de traitement endodontique : TR ou PT ; ii) le type de préparation pour les endocouronnes : avec un cerclage circonférentiel de 2 mm ou une préparation en plateau ; iii) le matériau des endocouronnes : céramique (IPS e.max CAD®) ou composite (Cerasmart®).

2.4.2.4 Test de charge (résistance à la fracture)

Les 110 dents naturelles et les 110 simulateurs en résine imprimés en 3D ont été coulés individuellement dans une résine époxy autdurcissante (U-Pol Plastikit, Wellingborough, Royaume-Uni). Chaque échantillon a été placé dans les mors d'une machine d'essai universelle (Zwick Roell UTS 20K, Arslaquenexy, France). Les essais de compression ont été réalisés avec une sphère en acier inoxydable de 5 mm de diamètre placée au milieu de la face occlusale et selon un angle de 45° par rapport au grand axe de la dent. Les échantillons ont été mis en charge à la vitesse de 0,5 mm/min jusqu'à la rupture. Une mesure a été effectuée automatiquement toutes les 0.1 s. Une diminution de 30% de la force de charge entraînait l'arrêt automatique de l'enregistrement.

2.4.2.5 Analyse statistique

Les données statiques ont été analysées avec le logiciel SPSS (IBM Corp, 28.0.1.1). La distribution de chaque échantillon a été testée par un test de Shapiro-Wilk. Dans le cas où tous les échantillons présentaient une distribution normale, les échantillons ont été comparés par une analyse de variance (ANOVA) à sens unique avec un test post hoc de Student-Newman-Keuls. Si un échantillon présentait une distribution anormale, les échantillons ont alors été comparés par un test de Kruskal-Wallis. La distribution du type de fracture a été comparée par un test du Khi-2. Les valeurs de résistance des dents naturelles et des simulateurs en résine ont été comparées pour chaque condition avec un test de Mann-Whitney. L'égalité de variance entre les groupes SR et DN a été comparée avec le test de Levene.

2.4.3 Résultats

2.4.3.1 Valeurs des tests de résistance :

Les valeurs moyennes des forces maximales conduisant à la fracture des groupes d'échantillons sont présentées dans les Figures 5 et 6. Le test de Shapiro-Wilk a validé une distribution normale pour tous les groupes de dents naturelles, mais n'a pas validé la distribution normale pour les simulateurs en résine.

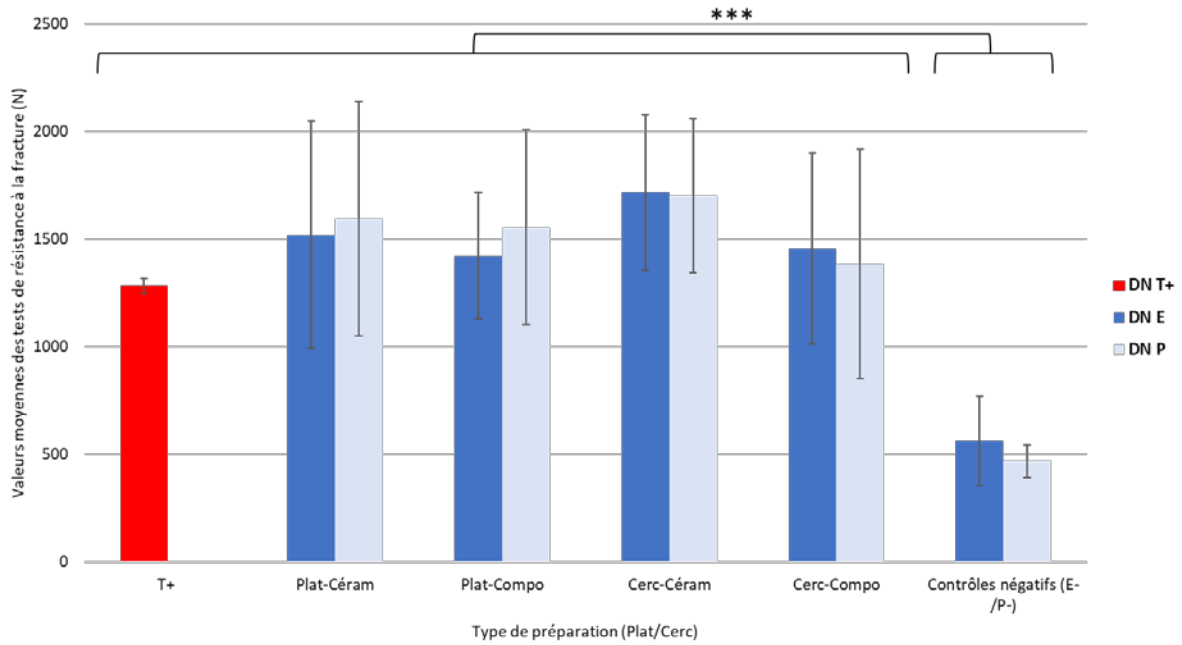


Figure 5 : Comparaison des valeurs moyennes des tests de résistance à la fracture en fonction du type de traitement endodontique, du type de préparation et des matériaux utilisés pour l'endocouronne, pour les dents naturelles (test Anova : *** : $p < 0,001$).

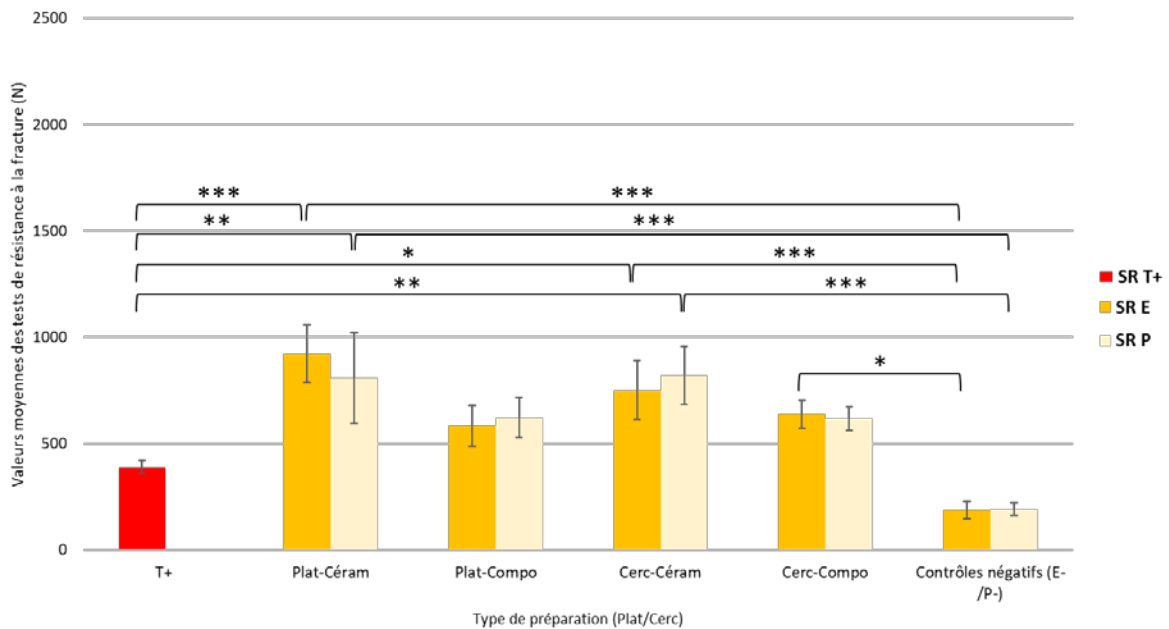


Figure 6 : Comparaison des valeurs moyennes des tests de résistance à la fracture en fonction du type de traitement endodontique, du type de préparation et des matériaux utilisés pour l'endocouronne, pour les simulateurs en résine (test de Kruskal-wallis * : $p < 0,05$; ** : $p < 0,01$; *** : $p < 0,001$).

Une analyse de la variance a été réalisée pour les groupes de dents naturelles, puis un test de Kruskal-Wallis a été effectué pour comparer les résultats des groupes de dents naturelles et de simulateurs en résine (Tableau 2).

Tableau 2 : Comparaison des valeurs des tests de résistance à la fracture en fonction du type de traitement endodontique, du type de préparation et des matériaux utilisés pour l'endocouronne pour les dents naturelles et les simulateurs en résine (test de Kruskal-Wallis).

		Dents naturelles												
		T+	PPE	PPC	PCE	PCC	EPE	EPC	ECE	ECC	P-	E-		
Simulateurs en résine imprimés en 3D	T+		NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	p=0.003	p=0.009		
	PPE	p=0.008		NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	p<0.001	p<0.001		
	PPC	NS	NS		NS	NS	NS	NS	NS	NS	p<0.001	p<0.001		
	PCE	p=0.001	NS	NS		NS	NS	NS	NS	NS	p<0.001	p<0.001		
	PCC	NS	NS	NS	NS		NS	NS	NS	NS	p=0.001	p=0.003		
	EPE	p<0.001	NS	NS	NS	NS		NS	NS	NS	p<0.001	p<0.001		
	EPC	NS	NS	NS	NS	NS	NS		NS	NS	p<0.001	p=0.002		
	ECE	p=0.014	NS	NS	NS	NS	NS	NS		NS	p<0.001	p<0.001		
	ECC	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS		p<0.001	p<0.001		
	P-	NS	p<0.001	NS	p<0.001	NS	NS	p<0.001	NS	p<0.001	p=0.024	NS		
	E-	NS	p<0.001	NS	p<0.001	NS	NS	p<0.001	NS	p=0.02	NS	NS		

NS : non significatif

Pour les groupes de dents naturelles, l'analyse de variance ANOVA a séparé deux groupes homogènes, les contrôles négatifs regroupant les dents traitées au niveau radiculaire et les dents traitées par pulpotomie thérapeutique sans restauration coronaire (E- et P-) et tous les autres échantillons, c'est-à-dire les dents saines non traitées (contrôles positifs, T+) et les dents traitées et restaurées. Les groupes de contrôle négatif ont montré une résistance significativement plus faible que les dents saines non traitées ou les dents traitées avec restauration coronaire.

Les résultats du test de Kruskal-Wallis étaient différents pour les simulateurs en résine par rapport aux dents naturelles. Les simulateurs en résine avec des restaurations en céramique et des traitements endodontiques (E ou P) avaient une plus grande résistance que les simulateurs sans traitement (T+) ou les simulateurs sans restauration (P- et E-). Les simulateurs de dents saines non traitées (contrôle positif, T+) avaient la même résistance que les simulateurs avec traitement endodontique (pulpotomie ou traitement radiculaire) sans restauration (contrôles négatifs, P- et E-). Les simulateurs avec restaurations en composite avaient la même résistance que les simulateurs sans restauration, sauf pour les restaurations en composite avec préparation en cerclage périphérique et en cas de traitement radiculaire (E).

2.4.3.2 Type de fracture :

Parmi les 110 dents naturelles, 36 présentaient une fracture favorable. La répartition du type de fracture en fonction des différents groupes est décrite dans le Tableau 3. Le type de fracture était toujours moins favorable pour les dents traitées que pour les dents saines. Le type de fracture de tous les groupes de dents traitées était le même que celui des groupes de contrôles négatifs, sauf pour le groupe de dents traitées par pulpotomie et endocouronne en céramique avec préparation en plateau qui était toujours catastrophique.

Tableau 3 : Comparaison de la distribution du type de fracture dans chaque groupe pour les dents naturelles.

Groupes	Fracture Favorable (n)	Fracture Catastrophique (n)	Significativité (Khi-2), comparé au groupe contrôle positif	Significativité (Khi-2), comparé aux groupes contrôles négatifs (P- ou E-)
T+	10	0		
P-	5	5	p<0.01	
PPE	0	10	p<0.001	p<0.01
PPC	3	7	p<0.01	NS
PCE	1	9	p<0.001	NS
PCC	3	7	p<0.01	NS
E-	4	6	p<0.01	
EPE	2	8	p<0.001	NS
EPC	3	7	p<0.01	NS
ECE	2	8	p<0.001	NS
ECC	3	7	p<0.01	NS

NS : non significatif

Parmi les 110 simulateurs en résine, trois seulement ont eu une fracture favorable. Le type de fracture était catastrophique pour les simulateurs en résine, quel que soit le matériau, la préparation ou le traitement endodontique.

2.4.4 Discussion

Il s'agit du premier travail comparant le comportement mécanique *in vitro* de dents naturelles et de simulateurs traités soit par pulpotomie, soit par traitement radiculaire. Pour les dents naturelles, la pulpotomie et le traitement radiculaire ont eu un impact similaire sur la résistance et le type de fracture des dents, indépendamment de la composition du matériau de l'endocouronne et du type de limite périphérique. Ces résultats suggèrent que les indications de restauration par endocouronne ne seraient pas basées sur la résistance mécanique des dents traitées endodontiquement. D'autres paramètres comme le diagnostic pulpaire, les facteurs de risque d'usure occlusale et proximale et l'effet de cerclage pourraient être pris en compte. Enfin, l'intérêt de l'effet de cerclage pourrait être recherché, au moins dans le but d'améliorer la résistance mécanique des endocouronnes. L'étude annexe a démontré que le comportement mécanique des simulateurs en résine ne reproduisait pas celui des dents naturelles.

De nombreuses études récentes ont montré que la qualité de la restauration coronaire, son étanchéité et le délai avant sa réalisation seraient des facteurs clés pour le succès de la pulpotomie (83,84,86,151). Un meilleur taux de survie de la dent est observé si la restauration est réalisée dans les deux jours suivant l'exposition pulpaire, soulignant ainsi la nécessité de limiter le nombre de séances de traitement et le délai entre celles-ci (98). Ainsi, lorsque la pulpotomie est biologiquement indiquée et que la restauration par endocouronne peut être réalisée dans un délai court, ce traitement peut être proposé aux patients sans perte de chance d'un point de vue mécanique pour la dent, par rapport au traitement radiculaire. De plus, les patients passent moins de temps au fauteuil et les risques iatrogènes inhérents au traitement radiculaire (fracture instrumentale, stripping...) pourraient être évités. C'est particulièrement vrai pour les molaires où les perforations iatrogènes sont plus fréquentes, surtout si elles présentent des courbures importantes (152). Aujourd'hui, l'utilisation des tenons est de plus en plus limitée car ils n'augmentent pas la résistance des dents et ne sont indiqués qu'en cas de perte importante de tissu dentaire pour augmenter la rétention des restaurations (153). L'utilisation de tenons dans le secteur postérieur est vraiment réduite et l'endocouronne (154) ou une restauration par overlay après comblement de la chambre par une résine composite (155) sont même proposées pour les dents présentant un important délabrement coronaire. A cet égard, l'indication du traitement par pulpotomie n'est plus limitée.

Une des limites de ce travail est l'absence de vieillissement artificiel. Étant donné le grand nombre de conditions testées dans cette étude, l'ajout du thermocyclage aurait doublé le nombre de dents nécessaires. Or, la collecte des dents est une partie complexe de ce type d'étude dans un système de santé qui encourage la conservation des dents, et où, dans le concept de chirurgie minimalement

invasive, l'extraction de dents complètes est rare. Une autre limite est que ce travail a été conduit sur des molaires mandibulaires et ne peut être généralisé pour d'autres dents postérieures, notamment la prémolaire maxillaire qui est une dent à haut risque de fracture. Dans certaines études *in vitro*, par exemple, l'utilisation de tenons fibrés a augmenté la résistance à la fracture des prémolaires maxillaires (156), ce qui n'est pas le cas pour les autres dents postérieures (153). Une étude d'analyse par éléments finis a suggéré que les endocouronnes pourraient être la meilleure restauration pour les prémolaires maxillaires (157). D'autres études devraient être menées pour examiner l'effet du type de dents sur la résistance à la fracture des endocouronnes. Enfin, on peut s'interroger sur la pertinence de comparer *in vitro* la résistance à la fracture de dents naturelles traitées soit par traitement radiculaire, soit par pulpotomie thérapeutique. L'hypothèse de départ était le fait que, *in vivo*, l'humidité de la dentine augmente le module de Young de la dentine radiculaire (158), ce qui, à son tour, agirait comme un facteur de protection contre la fracture. Cependant, dans les études *in vitro*, toutes les dents avulsées ne contiennent pas de tissu pulpaire et on ne peut donc pas s'attendre à une différence de résistance à la fracture entre les groupes avec traitement radiculaire ou pulpotomie. Des études de suivi *in vivo* à long terme seraient donc nécessaires pour estimer l'impact de la présence de tissu pulpaire radiculaire vital sur la résistance de la dent traitée par pulpotomie. Dans ces études, d'autres paramètres pourraient agir comme des facteurs de confusion, car l'étendue des dommages tissulaires serait plus importante pour les dents ayant subi un traitement radiculaire que pour les dents ayant subi une pulpotomie. Cette étude a démontré que les simulateurs en résine imprimés en 3D ne pouvaient pas être utilisés à la place des dents naturelles pour les études de résistance *in vitro*. Cependant, la variance des valeurs moyennes de résistance est plus faible pour les simulateurs imprimés en 3D que pour les dents naturelles. Ceci suggère que la modélisation de simulateurs en résine permet de contrôler la variabilité de la taille et de la forme des dents naturelles. Ainsi, la modélisation de simulateurs pourrait avoir un intérêt pour les études expérimentales lorsque de nouveaux matériaux, au comportement mécanique proche de ceux de l'émail et de la dentine, seront utilisés dans les imprimantes.

2.4.5 Conclusion

La pulpotomie et le traitement radiculaire ont eu un impact similaire sur la résistance et le type de fracture des dents restaurées par endocouronne, indépendamment de la composition du matériau de l'endocouronne et du type de limite périphérique. Cette étude suggère que les endocouronnes peuvent donc être choisies comme restauration pour les dents traitées par pulpotomie thérapeutique. Cette étude offre de nouvelles perspectives dans le traitement en une seule séance au fauteuil des dents atteintes de maladie pulpaire inflammatoire, en combinaison avec l'utilisation des technologies d'empreinte optique et de collage.

3 Synthèse et perspectives

3.1 Synthèse

Les principaux résultats de ce travail de thèse permettent de conclure sur plusieurs points. La restauration des dents postérieures présentant des pertes tissulaires importantes reste un champ d'investigation important, notamment pour les dents traitées endodontiquement. La qualité de la restauration coronaire définitive et le délai avant sa réalisation sont des facteurs clés de réussite du traitement endodontique. Une restauration coronaire définitive réalisée dans la même séance de soin que le traitement endodontique permettrait donc d'assurer une étanchéité immédiate satisfaisant ainsi aux critères de la HAS. L'efficacité des procédures endodontiques serait alors optimisée.

Si le délabrement coronaire contre indique la restauration par méthode directe, deux solutions restent alors envisageables dans le contexte du soin en une séance unique : la restauration par une pièce collée (onlay, overlay ou endocouronne) réalisée en CFAO chairside (donc en une séance, au fauteuil) ou la restauration par coiffe préformée. Pour l'instant, la possibilité de restauration par les techniques de CFAO chairside sous AG reste limitée par la disponibilité de l'équipement nécessaire et le coût d'investissement. Les inconvénients d'adaptation occlusale imparfaite et relatifs à l'empreinte physico-chimique peuvent être perçus comme un obstacle à la réalisation de réhabilitations prothétiques sous anesthésie générale.

La première partie de ce travail suggère que, dans des conditions particulières du soin, les CPP sont indiquées pour maintenir les dents sur l'arcade et éviter l'avulsion lorsqu'une couronne fixe conventionnelle n'est pas possible. La mise en place des CPP permettrait un taux de survie plus important de dents permanentes postérieures traitées endodontiquement que des restaurations en composite ou en ciment verre ionomère pour les patients traités dans des circonstances particulières.

Cependant, il est nécessaire de développer des méthodes alternatives aux empreintes physico-chimiques pour pouvoir proposer aux patients une offre de soins complète. L'essor du numérique n'a cessé de révolutionner les soins dentaires ces dernières années. Au fur et à mesure que les concepts et les technologies utilisés en dentisterie évoluent, il devient possible de fournir des couronnes sur mesure, même dans des conditions particulières de soin.

Les empreintes optiques pour CFAO, associées aux techniques modernes de collage, représentent l'alternative aux empreintes physico-chimiques permettant la réalisation d'empreintes simplifiée et sécurisée pour le patient. Elles pourraient être utilisées pour fournir des restaurations entièrement fonctionnelles et parfaitement adaptées, comme les endocouronnes, le tout en une seule séance, au fauteuil en vigile (45) ou sous AG.

Comme pour toute procédure de soin, il est nécessaire d'évaluer son efficacité avant de la mettre en place en pratique de routine. Les restaurations par endocouronne réalisées par des praticiens spécialisés et expérimentés ont montré un taux de réussite de 99,8% à 4,5 ans en moyenne (127). Ce taux était de

81,8 % pour une durée moyenne de suivi similaire pour les endocouronnes réalisées par les étudiants en Formation Initiale à Clermont-Ferrand. Ainsi, l'expérience du praticien semble avoir un impact sur le taux de survie des restaurations coronaires indirectes, en particulier pour les endocouronnes.

Il était alors nécessaire d'analyser les raisons des échecs des endocouronnes, dans une démarche d'Amélioration des Pratiques Professionnelles et dans l'optique d'optimiser cette procédure de soin. Les raisons d'échec ont été décrites dans une revue systématique récente qui regroupe huit études avec une durée de suivi variable : l'échec des restaurations était principalement dû à une perte de rétention (53 %) et à une fracture (14 %) (129). Le taux de décollement varie entre 0 % et 16 %. En général, un protocole de collage non respecté est souvent évoqué pour expliquer le décollement des pièces en céramique (129,159,160). Il pourrait être suggéré que l'utilisation d'une digue pourrait influencer le taux de survie des endocouronnes en réduisant le nombre d'échecs dus au décollement. En fait, quatre des huit études ont rapporté l'utilisation d'une digue, mais leurs taux de succès pour les endocouronne ne différaient pas de ceux qui ne l'utilisaient pas (129). De plus, de nombreuses études n'ont pas trouvé de lien de causalité entre l'utilisation de la digue et l'amélioration des performances des restaurations directes collées (161–163). L'analyse des échecs des endocouronnes par fracture a rapporté une variation allant de 0% à 9% (129). Une revue récente de la littérature a montré un lien entre une épaisseur inférieure à 2 mm et l'échec des restaurations par onlay en céramique (159). Le présent travail rapporte que l'épaisseur insuffisante de la préparation était également un facteur de risque de fracture des endocouronnes, lorsque les étudiants étaient opérateurs. La supervision des enseignants pourrait être renforcée, couvrant toutes les étapes des procédures de réalisation d'une endocouronne. En particulier, l'analyse de captures d'images lors de la modélisation de la limite périphérique et les épaisseurs de céramique prévues pourrait faire l'objet d'une plus grande attention. Apprendre aux étudiants comment utiliser les outils numériques des logiciels de CFAO pour évaluer l'épaisseur de la future restauration pourrait prévenir les échecs.

Cette première partie sur les endocouronnes a montré que les restaurations par endocouronne CFAO de la dent postérieure permanente traitée endodontiquement peuvent être réalisées par des étudiants en formation initiale avec un faible risque d'échec avant cinq ans. Il était alors nécessaire de déterminer s'il existait une combinaison de :

- matériaux pour l'endocouronne (composite ou céramique),
- forme de préparation pour l'endocouronne (avec cerclage ou préparation en plateau) et
- traitement endodontique de la dent restaurée (traitement radiculaire ou pulpotomie thérapeutique)

qui permettait une meilleure résistance à la fracture de la dent postérieure traitée endodontiquement et restaurée par endocouronne. Il aurait ainsi été possible d'enseigner cette combinaison aux étudiants comme étant la plus susceptible d'assurer la survie la plus longue à la dent.

Les résultats de ce travail montraient que la résistance des dents restaurées était similaire lorsqu'on compare les endocouronnes en composite ou en céramique. Ce point est discuté dans des études précédentes et reste un sujet d'intérêt. Une combinaison originale en deux parties, composée d'un « noyau » en résine composite dans la chambre pulpaire et d'un overlay en céramique au-dessus a été proposée. Il a été démontré que la résistance mécanique des restaurations en deux parties était similaire à celle des endocouronnes en céramique (164).

Le présent travail a montré qu'il n'y a pas d'effet de cerclage dans le cas de préparations pour endocouronnes. Des études *in vitro* ont montré un effet protecteur du cerclage par rapport à la fracture (119,165,166), et des études *in vivo* ont montré un taux de survie très élevé, dans lequel les échecs étaient dus au décollement de l'endocouronne et non à une fracture (127,128). Lorsque les dents étaient préparées pour des couronnes complètes, l'effet de cerclage était considéré comme un critère important pour le pronostic de survie, mais cet effet a été récemment discuté dans une revue systématique (143). Pour les dents traitées par pulpotomie, une couche du matériau utilisé pour le coiffage pulpaire est toujours présente dans le volume de la chambre et remplit plus ou moins tout le volume caméral comme pourrait le faire un « noyau » en résine composite. Dans de telles situations, la question est de savoir si le matériau de coiffage pulpaire peut avoir des qualités biomécaniques permettant de le considérer comme un noyau de base. Il a été démontré que la Biodentine™ a une valeur de résistance à la compression plus élevée que le CEM (Calcium Enriched Mixture Cement) ou le MTA (Mineral Trioxide Aggregate), atteignant la résistance de la dentine (167), mais restant inférieure à celle du composite (168). Afin de remplacer un noyau en composite par un noyau en Biodentine™, il est nécessaire de vérifier s'il est possible de coller une endocouronne en céramique sur de la Biodentine™. Il a été démontré que la résistance au cisaillement et la force de liaison sont plus faibles pour l'interface Biodentine™/céramique que pour l'interface composite/céramique (169). Pour améliorer la résistance de l'interface Biodentine™/céramique, certains auteurs suggèrent d'appliquer une couche de composite entre l'overlay en Emax et le noyau de Biodentine™. Le système de collage avec le dihydrogénophosphate de 10-méthacryloyloxydécyle (10-MDP) semble donner une meilleure qualité d'interface que les autres systèmes de collage (170). Pour les dents naturelles, la pulpotomie et le traitement radiculaire ont eu un impact similaire sur la résistance et le type de fracture des dents, indépendamment de la composition du matériau de l'endocouronne et du type de limite périphérique.

Ce travail suggère que les endocouronnes peuvent donc être choisies comme restauration pour les dents traitées par pulpotomie, ce qui a été confirmé par l'étude pilote évaluant l'association de deux thérapeutiques minimalement invasives, tant au niveau endodontique que restaurateur.

L'échec d'une thérapie de maintien de la vitalité pulpaire peut être causé par l'une des deux principales étiologies, la première étant liée à l'incapacité de la pulpe à répondre à l'inflammation ou à l'infection, la seconde étant liée à une étanchéité insuffisante entre le matériau de coiffage pulpaire et la restauration coronaire. Les étiologies pulpaires pourraient être dues soit à une inflammation étendue résultant d'un

diagnostic imprécis, soit à une contamination peropératoire. Dans de telles situations, l'échec du traitement se produit dans les semaines suivant l'intervention. D'autre part, les échecs de pulpotomie dues à une contamination coronaire sont retardés, se produisant plusieurs mois ou années après le traitement. Des essais cliniques et des études récentes (81,84,171), qui ont sélectionné attentivement des pulpes vitales et évité soigneusement la contamination per-opératoire ont été menés avec succès, indépendamment du diagnostic pulpaire. Ainsi, on pourrait émettre l'hypothèse que les taux d'échec rapportés étaient dus à une contamination coronaire postopératoire plutôt qu'à des étiologies pulpaires. La combinaison d'une pulpotomie thérapeutique à la Biodentine™ et d'une restauration immédiate par endocouronne CFAO peut ainsi être recommandé en toute sécurité pour traiter, en une seule séance, des molaires permanentes sévèrement endommagées et présentant une inflammation pulpaire, réversible ou non.

3.2 Perspectives

A l'avenir, il semble donc nécessaire de restaurer le continuum endo-prothétique le plus rapidement possible et de considérer la restauration coronaire de la dent traitée endodontiquement comme la dernière étape de la procédure de soin, garantissant son succès. Plusieurs axes d'amélioration peuvent ainsi être proposés.

Le premier concerne la systématisation de la procédure de soin décrite dans ce travail (association pulpotomie thérapeutique à la Biodentine™ et restauration immédiate dans la même séance par endocouronne CFAO) à l'ensemble des patients se présentant au service Odontologie de Clermont-Ferrand en pulpite aigue (réversible ou non), avec une dent présentant un important délabrement coronaire. L'endocouronne pourra être proposée en Enamic®, qui est un matériau hybride, disponible dans le service odontologie de Clermont-Ferrand depuis de nombreuses années. Grâce à sa structure à double réseau céramique-polymère, ce matériau d'assemblage conjugue les propriétés de la céramique et des matériaux composites. Cette catégorie de matériau présente une meilleure résistance à l'usure que d'autres matériaux hybrides tels que le Cérasmart de GC et est mécaniquement comparable à l'émail en termes de dureté et d'usure (172,173). Une étude *in vitro* récente a conclu que les propriétés mécaniques des blocs CFAO d'Enamic® (entre autres) étaient compatibles avec la fabrication de restaurations unitaires selon la norme ISO pour les céramiques (174). De plus, il ne nécessite pas de cuisson et permet une restauration coronaire définitive et étanche de la dent traitée endodontiquement en un temps relativement court, compatible avec le soin en une séance. Une autre possibilité passe par l'utilisation de blocs Cerec entièrement cristallisés en disilicate de lithium, comme la LiSi de GC. Ce matériau présente de bonnes performances mécaniques, des propriétés physiques intéressantes dont une résistance élevée à l'usure et à la flexion, et ce sans cuisson, permettant une restauration de la dent en une séance (175,176). La disponibilité des caméras optiques et la nécessité d'un devis (et donc d'un temps de réflexion associé) restent deux limites à la systématisation de cette procédure. Ainsi, la mise

en place de coiffes préformées est toujours d'actualité pour les dents présentant d'importantes pertes tissulaires au niveau coronaire et traitées endodontiquement, et ce aussi bien en vigile, dans le cadre des urgences ou sous AG.

Le deuxième axe d'amélioration concerne les soins dispensés dans les situations d'urgence dentaire. Depuis la crise sanitaire, au CHU de Clermont-Ferrand, les patients consultant la permanence des soins (PS) en urgence pour une pathologie pulpaire et/ou périapicale sont pris en charge dans le cadre d'une unité de permanence d'accès aux soins endodontiques, intitulée « PAS Endo ». La création de la PAS Endo répond à un besoin connu de soins dentaires d'urgence et a été décidée suite à la crise sanitaire du COVID-19, qui a modifié pendant plusieurs mois le fonctionnement des services hospitaliers. Dans le cadre de l'odontologie, le problème était majeur du fait de l'aérosolisation causée par la majorité des soins. Limiter le nombre de passage des patients permettait donc logiquement une réduction de ce risque, imposée par les autorités sanitaires.

L'unité de PAS endo vise au traitement endodontique définitif de la dent causale en une ou deux séances, restauration coronaire comprise. Les activités de la PAS Endo relèvent de la spécialité de Médecine Bucco-dentaire. Ainsi, lorsqu'un patient se présente en PS au service odontologie de Clermont-Ferrand pour une urgence pulpaire ou péri apicale aigue, il est transféré dans l'unité de PAS Endo, dès confirmation du diagnostic. Il y est alors pris en charge dans l'objectif d'un soin en une séance unique, associant traitements endodontique et restaurateur, si la pathologie et la symptomatologie le permettent. L'objectif est d'offrir, outre une résolution de la douleur par un traitement endodontique adapté, une restauration étanche et pérenne dans l'attente si nécessaire d'une réhabilitation prothétique d'usage. Avec un tel protocole, la prise en charge de l'étiologie douloureuse du patient se trouve complétée par un principe conservateur des dents.

Une étude récente a permis de valider les traitements endodontiques réalisés en PAS Endo en termes de qualité post opératoire immédiate (score LSD) et d'efficacité à long terme (comparaison de l'Indice Péri Apical sur la radio rétro alvéolaire à un an et sur la radio post opératoire immédiate) (177). Les données qualitatives récoltées lors de cette étude sont en corrélation avec celles récoltées en polyclinique et sous anesthésie générale dans le service de Clermont-Ferrand (39,40,178).

Les restaurations coronaires réalisées en PAS Endo sont encore principalement des restaurations directes, même si une restauration indirecte collée ou scellée paraît plus indiquée par rapport à l'état de délabrement coronaire de la dent (lésion carieuse initiale, associée aux procédures d'aménagement de la cavité d'accès). La réalisation du soin complet en une séance incite à éviter les restaurations temporaires type IRM[®] ou Cavit[™] et à leur préférer des matériaux plus étanches comme le composite ou l'amalgame. Quelques coiffes préformées seulement sont réalisées. Le patient est ensuite invité à reprendre rendez-vous pour la réhabilitation prothétique définitive adaptée. L'étude menée au service odontologie a montré que seuls 14% des patients revus à un an avaient effectivement fait remplacer la restauration directe réalisée en fin de soin en PAS Endo par la restauration définitive préconisée (177).

Une possibilité d'amélioration pourrait être la proposition systématique d'un prochain rendez-vous pour la restauration prothétique par CFAO dans une unité dédiée ou au sein même de la PAS Endo si l'organisation le permet et dans un délai court (quelques jours après le traitement endodontique). Le patient repartirait alors de la PAS Endo avec sa dent traitée, un devis pour une prise en charge de sa mutuelle et un rendez-vous pour la restauration définitive de sa dent. Il serait peut-être plus enclin à venir à ce rendez-vous si celui-ci lui est fixé d'office et rapidement après le soin. De même, toujours si l'organisation de la PAS Endo le permettait, il semble envisageable de prévoir la restauration de la dent traitée en PAS Endo dans la même séance que le soin endodontique, si le patient est enclin à signer le devis immédiatement. Ce changement de pratiques suite au traitement endodontique permettrait d'envisager la restauration très rapidement après le soin et ainsi de rétablir le continuum endo-prothétique et d'éviter l'errance thérapeutique du patient. Une étude médico-économique pourrait être mise en place pour évaluer l'impact d'une restauration dans la même séance que le traitement endodontique plutôt qu'en deux séances ou plus. Ce type de travail pourrait confirmer l'intérêt économique de la restauration immédiate et définitive d'une dent traitée endodontiquement en plus de son intérêt médical, qui n'est plus à prouver.

D'autres axes d'amélioration restent également à établir car ce travail s'est intéressé uniquement à la restauration de la dent postérieure molaire traitée endodontiquement et n'a fait qu'aborder la restauration des prémolaires dévitalisées, avec la problématique de la prémolaire maxillaire. Qu'en est-il de la restauration de la dent antérieure traitée endodontiquement et présentant d'importantes pertes tissulaires coronaires ? Le délabrement peut être d'origine carieuse, comme pour toutes les autres dents : il indiquera alors une procédure de soin pouvant associer traitements endodontique et restaurateur.

Il est également important de rappeler que les dents antérieures maxillaires (incisives centrales et latérales) sont les plus susceptibles de subir un traumatisme des tissus durs (fracture coronaire avec ou sans exposition pulpaire). Il sera alors nécessaire de pouvoir proposer aux patients un traitement associant prise en charge à minima de l'exposition pulpaire, si elle a eu lieu, et restauration esthétique de la dent, afin de minimiser l'impact psychologique du traumatisme. Une restauration directe par composite pourra être indiquée dans un premier temps, mais la restauration définitive peut également passer par une procédure associant CFAO et collage, en fonction de l'importance de la perte coronaire. Une facette ou une couronne périphérique peuvent alors être nécessaires, sur dent traitée endodontiquement ou non. La restauration de la dent sera à privilégier dans la séance, de manière à étanchéifier un traitement radiculaire ou une thérapeutique de maintien de la vitalité pulpaire (coiffage pulpaire direct ou indirect, pulpotomie partielle ou totale) ou de manière à éviter une symptomatologie douloureuse via les tubuli exposés dans les cas de fracture non compliquée.

Un dernier axe d'amélioration est celui de l'enseignement. Au niveau de la formation initiale, les procédures de réalisation d'une endocouronne ont été évaluées au cours de ce travail d'un point de vue

pratique avec l'analyse des principales causes d'échec et le taux de survie des restaurations réalisées par les étudiants, mais l'enseignement théorique et pré clinique de l'endocouronne n'a pas été évalué. Il serait nécessaire de réaliser cette évaluation afin de proposer, aux vues des résultats de ce travail, une amélioration des procédures et une rationalisation de l'enseignement de la restauration par endocouronne de la dent postérieure traitée endodontiquement. Des Travaux Pratiques (TP) pré cliniques ont été mis en place avec formation et entraînement aux outils de CFAO et préparation pour une endocouronne sur simulateur dentaire Cre@teeth traité endodontiquement. De même, un programme est proposé en formation continue, à destination des praticiens libéraux, sur la même thématique : utilisation des outils de CFAO et tests des différentes caméras optiques, mise en place de la digue, forme de préparation répondant aux critères de l'endocouronne et protocoles de collage.

Des enseignements conjoints avec la sous section de prothèse sont en cours de réflexion pour l'année 2024 : les étudiants de DFASO1 (quatrième année) réaliseraient une pulpotomie thérapeutique à la Biodentine™ en TP d'Endodontie et la préparation, l'empreinte et la modélisation pour l'endocouronne CFAO le lendemain dans le cadre du TP de prothèse. Ce travail en équipe leur permettrait un entraînement à l'association pulpotomie thérapeutique et restauration par endocouronne CFAO en une séance, qu'ils pourront être amenés à réaliser en clinique par la suite.

La prise de décision transversale (Odontologie Conservatrice et Endodontie et Prothèse) sur l'indication de l'endocouronne en clinique est également importante et rentre dans la spécialité de Médecine Bucco-Dentaire.

4 Conclusion

La restauration rapide de la dent postérieure dévitalisée, si possible dans la même séance que le traitement endodontique, reste un défi pour le praticien. Les techniques récentes de Conception et Fabrication Assistées par Ordinateur et les améliorations en termes de matériaux (de coiffage pulpaire, de restauration ou pour le collage) semblent les pistes les plus prometteuses pour les années à venir.

Les restaurations par coiffe préformée constituent encore une solution fiable de restauration coronaire définitive de la molaire permanente traitée endodontiquement, dans des circonstances particulières, comme l'Anesthésie Générale ou la nécessité d'un soin en une séance unique (crise sanitaire, interventions humanitaires, soins de dispensaires...) et permettent de conserver des dents asymptomatiques et fonctionnelles sur l'arcade.

C'est à travers la réflexion sur les pratiques applicables par le praticien en Médecine Bucco-Dentaire aux patients présentant des besoins spécifiques que doivent ressortir de nouvelles procédures, appliquées dans un second temps aux patients de la population générale.

5 Références bibliographiques

1. Haute Autorité de Santé. Traitement endodontique, rapport d'évaluation technologique [Internet]. 2008 sept [cité 13 févr 2017] p. 1-66. Disponible sur: http://www.has-sante.fr/portail/upload/docs/application/pdf/2009-01/rapport_traitement_endodontique.pdf
2. Siqueira JF Jr, Rôças IN, Alves FRF, Campos LC. Periradicular status related to the quality of coronal restorations and root canal fillings in a Brazilian population. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod.* 2005;100(3):369-74.
3. Sritharan A. Discuss that the coronal seal is more important than the apical seal for endodontic success. *Aust Endod J J Aust Soc Endodontology Inc.* déc 2002;28(3):112-5.
4. Heling I, Gorfil C, Slutzky H, Kopolovic K, Zalkind M, Slutzky-Goldberg I. Endodontic failure caused by inadequate restorative procedures: Review and treatment recommendations. *J Prosthet Dent.* 2002;87(6):674-8.
5. de Kuijper MCFM, Cune MS, Özcan M, Gresnigt MMM. Clinical performance of direct composite resin versus indirect restorations on endodontically treated posterior teeth: A systematic review and meta-analysis. *J Prosthet Dent.* 2021;S0022-3913(21)00634-X.
6. Bolla M. Possibilités thérapeutiques et critères décisionnels. In: Restaurer la dent dépulpée. *L'Information Dentaire.* 2014. p. 21-30. (Tout simplement).
7. Decup, F, Gaucher, C. Approche bioconservatrice des tissus pour les restaurations indirectes. 2014;25:279-87.
8. Hargreaves K, Berman L. Cohen's Pathways of the Pulp Expert Consult. 10^e éd. St. Louis, Mo: Mosby; 2010. 992 p.
9. Torabinejad M, Walton RE. *Endodontics: Principles and Practice.* Elsevier Health Sciences; 2009. 496 p.
10. Sedgley CM, Messer HH. Are endodontically treated teeth more brittle? *J Endod.* 1992;18(7):332-5.
11. Papa J, Cain C, Messer HH. Moisture content of vital vs endodontically treated teeth. *Endod Dent Traumatol.* 1994;10(2):91-3.
12. Stern N, Hirshfeld Z. Principles of preparing endodontically treated teeth for dowel and core restorations. *J Prosthet Dent.* 1973;30(2):162-5.
13. Gutmann J. The dentin-root complex: Anatomic and biologic considerations in restoring endodontically treated teeth. *J Prosthet Dent.* 1992;67(4):458-67.
14. Dietschi D, Duc O, Krejci I, Sadan A. Biomechanical considerations for the restoration of endodontically treated teeth: a systematic review of the literature--Part 1. Composition and micro- and macrostructure alterations. *Quintessence Int Berl Ger* 1985. 2007;38(9):733-43.

15. Dietschi D, Duc O, Krejci I, Sadan A. Biomechanical considerations for the restoration of endodontically treated teeth: a systematic review of the literature, Part II (Evaluation of fatigue behavior, interfaces, and in vivo studies). *Quintessence Int Berl Ger* 2008;39(2):117-29.
16. Reeh ES, Messer HH, Douglas WH. Reduction in tooth stiffness as a result of endodontic and restorative procedures. *J Endod.* 1989;15(11):512-6.
17. Linn J, Messer HH. Effect of restorative procedures on the strength of endodontically treated molars. *J Endod.* 1994;20(10):479-85.
18. Reeh ES, Douglas WH, Messer HH. Stiffness of endodontically-treated teeth related to restoration technique. *J Dent Res.* 1989;68(11):1540-4.
19. Rocca GT, Krejci I. Crown and post-free adhesive restorations for endodontically treated posterior teeth: from direct composite to endocrowns. *Eur J Esthet Dent Off J Eur Acad Esthet Dent.* 2013;8(2):156-79.
20. Pantvisai P, Messer HH. Cuspal deflection in molars in relation to endodontic and restorative procedures. *J Endod.* 1995;21(2):57-61.
21. Trope M, Ray HL Jr. Resistance to fracture of endodontically treated roots. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol.* 1992;73(1):99-102.
22. Bukiet, F, Lehmann, N., Tirlet, G. Restauration partielle collée de la dent dépulpée, préserver pour différer l'échéance prothétique. *Réal Clin.* 2004;15:67-78.
23. Laplanche, O, Leforestier, E, Medioni, E, Bolla, M. Les reconstitutions coronoradiculaires : principes généraux et critères de décision. *Strat Prothétiques.* 2008;8:255-68.
24. Williamson AE, Dawson DV, Drake DR, Walton RE, Rivera EM. Effect of root canal filling/sealer systems on apical endotoxin penetration: a coronal leakage evaluation. *J Endod.* 2005;31(8):599-604.
25. Balto H. An assessment of microbial coronal leakage of temporary filling materials in endodontically treated teeth. *J Endod.* 2002;28(11):762-4.
26. Pratt I, Aminoshariae A, Montagnese TA, Williams KA, Khalighinejad N, Mickel A. Eight-Year Retrospective Study of the Critical Time Lapse between Root Canal Completion and Crown Placement: Its Influence on the Survival of Endodontically Treated Teeth. *J Endod.* 2016;42(11):1598-603.
27. Sadaf D. Survival Rates of Endodontically Treated Teeth After Placement of Definitive Coronal Restoration: 8-Year Retrospective Study. *Ther Clin Risk Manag.* 2020;16:125-31.
28. Yee K, Bhagavatula P, Stover S, Eichmiller F, Hashimoto L, MacDonald S, et al. Survival Rates of Teeth with Primary Endodontic Treatment after Core/Post and Crown Placement. *J Endod.* 2018;44(2):220-5.
29. Mac Giolla Phadraig C, Nunn J, McCallion P, McCarron M. Prevalence of edentulism among adults with intellectual disabilities: A narrative review informed by systematic

- review principles. *Spec Care Dent Off Publ Am Assoc Hosp Dent Acad Dent Handicap Am Soc Geriatr Dent.* 2018;38(4):191-200.
30. Kovacić I, Tadin A, Petricević N, Mikelić B, Vidović N, Palac A, et al. Changes of the dental service delivered to patients with intellectual disability under general anaesthesia in Dental Polyclinic Split, Croatia, during the years 1985-2009. *Coll Antropol.* 2012;36(3):785-9.
 31. Jockusch J, Sobotta BAJ, Nitschke I. Outpatient dental care for people with disabilities under general anaesthesia in Switzerland. *BMC Oral Health.* 2020;20(1):225.
 32. Maestre C. The use of general anaesthesia for tooth extraction in young handicapped adults in France. *Br Dent J.* 1996;180(8):297-302.
 33. Mac Giolla Phadraig C, Nunn J, Carroll R, McCarron M, McCallion P. Why do edentulous adults with intellectual disabilities not wear dentures? Wave 2 of the IDS TILDA cohort study. *J Prosthodont Res.* 2017;61(1):61-6.
 34. Linas N, Decerle N, Munoz-Sanchez ML, Faulks D, Collado V, Nicolas E, et al. Long-term Outcomes of Full Pulpotomy in Permanent Molars for Patients Treated in a Single, Short Session under Special Conditions. *J Endod.* 2020;46(11):1597-604.
 35. Collado V, Faulks D, Hennequin M. A survey of the difficulties encountered during routine hygiene and health care by persons with special needs. *Disabil Rehabil.* 2008;30(14):1047-54.
 36. Dougall A, Fiske J. Access to special care dentistry, part 1. *Access. Br Dent J.* 2008;204(11):605-16.
 37. Mugayar L, Hebling E, Dias PV. Special care dentistry: a new specialty in Brazil. *Spec Care Dent Off Publ Am Assoc Hosp Dent Acad Dent Handicap Am Soc Geriatr Dent.* 2007;27(6):232-5.
 38. Hunter ML, Hunter B, Thompson SA, McLaughlin WS. Special Care Dentistry: attitudes of Specialists in Paediatric Dentistry practising in the UK to the creation of a new specialty. *Int J Paediatr Dent.* 2004;14(4):246-50.
 39. Alsaleh I, Cousson P, Nicolas E, Hennequin M. Is endodontic treatment performed under general anaesthesia technically acceptable? *Clin Oral Investig.* 2012;16(6):1599-606.
 40. Cousson P, Nicolas E, Hennequin M. A follow-up study of pulpotomies and root canal treatments performed under general anaesthesia. *Clin Oral Investig.* 2014;18:1155-63.
 41. Mallineni SK, Yiu CKY. A Retrospective Review of Outcomes of Dental Treatment Performed for Special Needs Patients under General Anaesthesia: 2-Year Follow-Up. Medina-Solis CE, éditeur. *Sci World J.* 2014;2014:748353.
 42. Decerle N, Cousson PY, Nicolas E, Hennequin M. A Comprehensive Approach Limiting Extractions under General Anesthesia Could Improve Oral Health. *Int J Environ Res Public Health.* 2020;17(19):7336.

43. Munoz-Sanchez ML, Bessadet M, Lance C, Bonnet G, Veyrune JL, Nicolas E, et al. Survival Rate of CAD-CAM Endocrowns Performed by Undergraduate Students. *Oper Dent*. 2021;46(5):505-15.
44. Munoz-Sanchez ML, Linas N, Decerle N, Collado V, Faulks D, Nicolas E, et al. Radiological Evaluation of Stainless Steel Crowns Placed on Permanent Teeth in Patients Treated under General Anaesthesia. *Int J Environ Res Public Health*. 2021;18(5):2509.
45. Munoz-Sanchez ML, Linas N, Decerle N, Nicolas E, Hennequin M, Cousson PY. A Combination of Full Pulpotomy and Chairside CAD/CAM Endocrown to Treat Teeth with Deep Carious Lesions and Pulpitis in a Single Session: A Preliminary Study. *Int J Environ Res Public Health*. 2020;17(17):6340.
46. Munoz-Sanchez ML, Gravier A, François O, Nicolas E, Hennequin M, Decerle N. In Vitro Resistance of molars and resin simulators treated by Pulpotomy and restored with Endocrown. *Soumis à Journal of Prosthetic Dentistry*
47. Glassman P. A review of guidelines for sedation, anesthesia, and alternative interventions for people with special needs. *Spec Care Dent Off Publ Am Assoc Hosp Dent Acad Dent Handicap Am Soc Geriatr Dent*. 2009;29(1):9-16.
48. Mallineni SK, Yiu CKY. Dental treatment under general anesthesia for special-needs patients: analysis of the literature. *J Investig Clin Dent*. 2016;7(4):325-31.
49. anesthesie_odontologie_rap.pdf [Internet]. 17 déc 2018; Disponible sur: https://www.has-sante.fr/portail/upload/docs/application/pdf/anesthesie_odontologie_rap.pdf
50. Pegon-Machat E, Jourdan D, Tubert-Jeannin S. [Oral health inequalities: Determinants of access to prevention and care in France]. *Sante Publique Vandoeuvre--Nancy Fr*. 2018;30(2):243-51.
51. Anders PL, Davis EL. Oral health of patients with intellectual disabilities: a systematic review. *Spec Care Dent Off Publ Am Assoc Hosp Dent Acad Dent Handicap Am Soc Geriatr Dent*. 2010;30(3):110-7.
52. Kanaffa-Kilijanska U, Kaczmarek U, Kilijanska B, Frydecka D. Oral health condition and hygiene habits among adult patients with respect to their level of dental anxiety. *Oral Health Prev Dent*. 2014;12(3):233-9.
53. Rothmaier K, Bücher K, Metz I, Pitchika V, Hickel R, Heinrich-Weltzien R, et al. Preventive and invasive treatment in special needs patients: a German retrospective study. *Clin Oral Investig*. 2017;21(4):1343-50.
54. Yap E, Parashos P, Borromeo GL. Root canal treatment and special needs patients. *Int Endod J*. 2015;48(4):351-61.
55. Ismail AI, Sohn W, Tellez M, Willem JM, Betz J, Lepkowski J. Risk indicators for dental caries using the International Caries Detection and Assessment System (ICDAS). *Community Dent Oral Epidemiol*. 2008;36(1):55-68.

56. Pohjola V, Lahti S, Vehkalahti MM, Tolvanen M, Hausen H. Age-specific associations between dental fear and dental condition among adults in Finland. *Acta Odontol Scand.* 2008;66:278-85.
57. Hannele Syrjälä AM, Ylöstalo P, Sulkava R, Knuutila M. Relationship between cognitive impairment and oral health: results of the Health 2000 Health Examination Survey in Finland. *Acta Odontol Scand.* 2007;65:103-8.
58. Haute Autorité de Santé. Indications et contre-indications de l'anesthésie générale pour les actes courants d'odontologie et de stomatologie [Internet]. Haute Autorité de Santé; 2005. Disponible sur: http://www.has-sante.fr/portail/jcms/c_464907/indications-et-contre-indications-de-lanesthesie-generale-pour-les-actes-courants-dodontologie-et-de-stomatologie?xtmc=&xtcr=1
59. Jamjoom MM, al-Malik MI, Holt RD, el-Nassry A. Dental treatment under general anaesthesia at a hospital in Jeddah, Saudi Arabia. *Int J Paediatr Dent Br Paedodontic Soc Int Assoc Dent Child.* 2001;11(2):110-6.
60. Gallagher JE, Fiske J. Special Care Dentistry: a professional challenge. *Br Dent J.* 2007;202(10):619-29.
61. Faulks D, Molina G. How to provide the evidence base for techniques and interventions that ensure equal treatment outcomes for people with disability? *Spec Care Dentist.* 2018;38(3):119-20.
62. Alqaderi H, Lee C, Borzangy S, Pagonis T. Coronal pulpotomy for cariously exposed permanent posterior teeth with closed apices: A systematic review and meta-analysis. *J Dent.* 2016;44:1-7.
63. Schüler IM, Hiller M, Roloff T, Kühnisch J, Heinrich-Weltzien R. Clinical success of stainless steel crowns placed under general anaesthesia in primary molars: an observational follow up study. *J Dent.* 2014;42(11):1396-403.
64. Innes NPT, Ricketts D, Chong LY, Keightley AJ, Lamont T, Santamaria RM. Preformed crowns for decayed primary molar teeth. *Cochrane Database Syst Rev.* 2015;(12):CD005512.
65. Chen K, Lei Q, Xiong H, Chen Y, Luo W, Liang Y. A 2-year clinical evaluation of stainless steel crowns and composite resin restorations in primary molars under general anaesthesia in China's Guangdong province. *Br Dent J.* 2018;225(1):49-52.
66. Sigal AV, Sigal MJ, Titley KC, Andrews PB. Stainless steel crowns as a restoration for permanent posterior teeth in people with special needs: A retrospective study. *J Am Dent Assoc.* 2020;151(2):136-44.
67. Zagdwon AM, Fayle SA, Pollard MA. A prospective clinical trial comparing preformed metal crowns and cast restorations for defective first permanent molars. *Eur J Paediatr Dent.* 2003;4(3):138-42.
68. Linas N, Faulks D, Hennequin M, Cousson P. Conservative and endodontic treatment performed under general anesthesia: A discussion of protocols and outcomes. *Spec Care Dentist.* 2019;39(5):453-63.

69. Linkevicius T, Puisys A, Vindasiute E, Linkeviciene L, Apse P. Does residual cement around implant-supported restorations cause peri-implant disease? A retrospective case analysis. *Clin Oral Implants Res.* 2013;24(11):1179-84.
70. Vindasiute E, Puisys A, Maslova N, Linkeviciene L, Peciuliene V, Linkevicius T. Clinical Factors Influencing Removal of the Cement Excess in Implant-Supported Restorations. *Clin Implant Dent Relat Res.* 2015;17(4):771-8.
71. Serino G, Hultin K. Periimplant Disease and Prosthetic Risk Indicators: A Literature Review. *Implant Dent.* 2019;28(2):125-37.
72. Sharaf AA, Farsi NM. A clinical and radiographic evaluation of stainless steel crowns for primary molars. *J Dent.* 2004;32(1):27-33.
73. Shi JY, Jie-Ni null, Zhuang LF, Zhang XM, Fan LF, Lai HC. Peri-implant conditions and marginal bone loss around cemented and screw-retained single implant crowns in posterior regions: A retrospective cohort study with up to 4 years follow-up. *PloS One.* 2018;13(2):e0191717.
74. Bourdiol P, Hennequin M, Peyron MA, Woda A. Masticatory Adaptation to Occlusal Changes. *Front Physiol.* 2020;11:263.
75. Bjørndal L, Simon S, Tomson PL, Duncan HF. Management of deep caries and the exposed pulp. *Int Endod J.* 2019;52(7):949-73.
76. Schwendicke F, Frencken JE, Bjørndal L, Maltz M, Manton DJ, Ricketts D, et al. Managing Carious Lesions: Consensus Recommendations on Carious Tissue Removal. *Adv Dent Res.* 2016;28(2):58-67.
77. Wolters W, Duncan H, Tomson P, Karim I, McKenna G, Dorri M, et al. Minimally invasive endodontics: a new diagnostic system for assessing pulpitis and subsequent treatment needs. *Int Endod J.* 2017;50(9):825-9.
78. Bjørndal L, Reit C, Bruun G, Markvart M, Kjaeldgaard M, Näsman P, et al. Treatment of deep caries lesions in adults: randomized clinical trials comparing stepwise vs. direct complete excavation, and direct pulp capping vs. partial pulpotomy. *Eur J Oral Sci.* 2010;118(3):290-7.
79. Maltz M, Koppe B, Jardim JJ, Alves LS, de Paula LM, Yamaguti PM, et al. Partial caries removal in deep caries lesions: a 5-year multicenter randomized controlled trial. *Clin Oral Investig.* 2018;22(3):1337-43.
80. Hayashi M, Fujitani M, Yamaki C, Momoi Y. Ways of enhancing pulp preservation by stepwise excavation--a systematic review. *J Dent.* 2011;39(2):95-107.
81. Simon S, Perard M, Zanini M, Smith A, Charpentier E, Djole S, et al. Should pulp chamber pulpotomy be seen as a permanent treatment? Some preliminary thoughts. *Int Endod J.* 2013;46(1):79-87.
82. Taha NA, Ahmad MB, Ghanim A. Assessment of Mineral Trioxide Aggregate pulpotomy in mature permanent teeth with carious exposures. *Int Endod J.* 2017;50(2):117-25.

83. Zanini M, Hennequin M, Cousson P. Which procedures and materials could be applied for full pulpotomy in permanent mature teeth? A systematic review. *Acta Odontol Scand.* 2019;77(7):541-51.
84. Taha NA, Abdelkhader SZ. Outcome of full pulpotomy using Biodentine in adult patients with symptoms indicative of irreversible pulpitis. *Int Endod J.* 2018;51(8):819-28.
85. Aguilar P, Linsuwanont P. Vital Pulp Therapy in Vital Permanent Teeth with Cariously Exposed Pulp: A Systematic Review. *J Endod.* 2011;37(5):581-7.
86. Awawdeh L, Al-Qudah A, Hamouri H, Chakra RJ. Outcomes of Vital Pulp Therapy Using Mineral Trioxide Aggregate or Biodentine: A Prospective Randomized Clinical Trial. *J Endod.* 2018;44(11):1603-9.
87. Kunert GG, Kunert IR, da Costa Filho LC, de Figueiredo JAP. Permanent teeth pulpotomy survival analysis: retrospective follow-up. *J Dent.* 2015;43(9):1125-31.
88. Kumar V, Juneja R, Duhan J, Sangwan P, Tewari S. Comparative evaluation of platelet-rich fibrin, mineral trioxide aggregate, and calcium hydroxide as pulpotomy agents in permanent molars with irreversible pulpitis: A randomized controlled trial. *Contemp Clin Dent.* 2016;7(4):512-8.
89. Caliskan MK. Success of pulpotomy in the management of hyperplastic pulpitis. *Int Endod J.* 1993;26(2):142-8.
90. Asgary S, Eghbal MJ. Treatment outcomes of pulpotomy in permanent molars with irreversible pulpitis using biomaterials: a multi-center randomized controlled trial. *Acta Odontol Scand.* 2013;71(1):130-6.
91. European Society of Endodontology. Quality guidelines for endodontic treatment: consensus report of the European Society of Endodontology. *Int Endod J.* 2006;39(12):921-30.
92. Kakehashi S, Stanley HR, Fitzgerald RJ. The Effects Of Surgical Exposures Of Dental Pulps In Germ-Free And Conventional Laboratory Rats. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol.* 1965;20:340-9.
93. Cotton WR. Bacterial contamination as a factor in healing of pulp exposures. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol.* 1974;38(3):441-50.
94. Randow K, Glantz PO. On cantilever loading of vital and non-vital teeth. An experimental clinical study. *Acta Odontol Scand.* 1986;44(5):271-7.
95. Loewenstein WR, Rathkamp R. A study on the pressoreceptive sensibility of the tooth. *J Dent Res.* 1955;34(2):287-94.
96. Ou KL, Chang CC, Chang WJ, Lin CT, Chang KJ, Huang HM. Effect of damping properties on fracture resistance of root filled premolar teeth: a dynamic finite element analysis. *Int Endod J.* 2009;42(8):694-704.
97. Ward J. Vital pulp therapy in cariously exposed permanent teeth and its limitations. *Aust Endod J Aust Soc Endodontology Inc.* 2002;28(1):29-37.

98. Barthel C, Rosenkranz B, Leuenberg A, Roulet J. Pulp Capping of Carious Exposures: Treatment Outcome after 5 and 10 Years: A Retrospective Study. *J Endod.* 2000;26(9):525-8.
99. Zanini M, Hennequin M, Cousson PY. A Review of Criteria for the Evaluation of Pulpotomy Outcomes in Mature Permanent Teeth. *J Endod.* 2016;42(8):1167-74.
100. Demarco FF, Rosa MS, Tarquínio SBC, Piva E. Influence of the restoration quality on the success of pulpotomy treatment: a preliminary retrospective study. *J Appl Oral Sci.* 2005;13(1):72-7.
101. Cox CF, Bergenholtz G, Heys DR, Syed SA, Fitzgerald M, Heys RJ. Pulp capping of dental pulp mechanically exposed to oral microflora: a 1-2 year observation of wound healing in the monkey. *J Oral Pathol.* 1985;14(2):156-68.
102. Huth KC, Hajek-Al-Khatat N, Wolf P, Ilie N, Hickel R, Paschos E. Long-term effectiveness of four pulpotomy techniques: 3-year randomised controlled trial. *Clin Oral Investig.* 2012;16(4):1243-50.
103. Magne P, Belser U. Restaurations adhésives en céramique sur dents antérieures: Approche biomimétique. Quintessence International. Paris; 2003. 406 p.
104. Toledano, C. L'overlay: le successeur de la couronne périphérique. *L'information dentaire.* Inf Dent. 2016;35:22-9.
105. Morimoto S, Rebello de Sampaio FBW, Braga MM, Sesma N, Özcan M. Survival Rate of Resin and Ceramic Inlays, Onlays, and Overlays: A Systematic Review and Meta-analysis. *J Dent Res.* 2016;95(9):985-94.
106. Magne, P. Pascal Magne: « It should not be about aesthetics but tooth-conserving dentistry ». Interview by Ruth Doherty. *Br Dent J.* 2012;4(213):189-91.
107. Opdam N, Frankenberger R, Magne P. From « Direct Versus Indirect » Toward an Integrated Restorative Concept in the Posterior Dentition. *Oper Dent.* 2016;41(S7):S27-34.
108. Batalha-Silva S, de Andrada MAC, Maia HP, Magne P. Fatigue resistance and crack propensity of large MOD composite resin restorations: direct versus CAD/CAM inlays. *Dent Mater Off Publ Acad Dent Mater.* 2013;29(3):324-31.
109. Dahan, L, Raux, F. Pourquoi et quand faire un inlay-onlay? *Inf Dent.* 2010;34:19-26.
110. Dammaschke T, Nykiel K, Sagheri D, Schäfer E. Influence of coronal restorations on the fracture resistance of root canal-treated premolar and molar teeth: a retrospective study. *Aust Endod J.* 2013;39(2):48-56.
111. Dalpino P, Francischone C, Ishikiriyama A, Franco E. Fracture resistance of teeth directly and indirectly restored with composite resin and indirectly restored with ceramic materials. *Am J Dent.* 2002;15(6):389-94.
112. Desai PD, Das UK. Comparison of fracture resistance of teeth restored with ceramic inlay and resin composite: an in vitro study. *Indian J Dent Res.* 2011;22(6):877.

113. Liberman R, Ben-Amar A, Herteanu L, Judes H. Marginal seal of composite inlays using different polymerization techniques. *J Oral Rehabil.* 1997;24(1):26-9.
114. Duquia R de CS, Osinaga PWR, Demarco FF, de V Habekost L, Conceição EN. Cervical microleakage in MOD restorations: in vitro comparison of indirect and direct composite. *Oper Dent.* 2006;31(6):682-7.
115. Manhart J, Neuerer P, Scheibenbogen-Fuchsbrunner A, Hickel R. Three-year clinical evaluation of direct and indirect composite restorations in posterior teeth. *J Prosthet Dent.* 2000;84(3):289-96.
116. Manhart J, Chen H, Hamm G, Hickel R. Buonocore Memorial Lecture. Review of the clinical survival of direct and indirect restorations in posterior teeth of the permanent dentition. *Oper Dent.* 2004;29(5):481-508.
117. Orstavik D, Kerekes K, Eriksen H. The periapical index: a scoring system for radiographic assessment of apical periodontitis. *Endod Dent Traumatol.* 1986;2(1):20-34.
118. Lazari PC, Oliveira RCN de, Anchieta RB, Almeida EO de, Freitas Junior AC, Kina S, et al. Stress distribution on dentin-cement-post interface varying root canal and glass fiber post diameters. A three-dimensional finite element analysis based on micro-CT data. *J Appl Oral Sci Rev FOB.* 2013;21(6):511-7.
119. Einhorn M, DuVall N, Wajdowicz M, Brewster J, Roberts H. Preparation Ferrule Design Effect on Endocrown Failure Resistance: Ferrule Design Effect Endocrown Failure Resistance. *J Prosthodont.* 2019;28(1):e237-42.
120. Roscoe MG, Noritomi PY, Novais VR, Soares CJ. Influence of alveolar bone loss, post type, and ferrule presence on the biomechanical behavior of endodontically treated maxillary canines: strain measurement and stress distribution. *J Prosthet Dent.* 2013;110(2):116-26.
121. Laviolle, O., Bartala, M. Restaurations coronaires préprothétiques à ancrage radiculaire : clinique et laboratoire. 2009;28-730-V-10.
122. Raedel M, Fiedler C, Jacoby S, Boening KW. Survival of teeth treated with cast post and cores: A retrospective analysis over an observation period of up to 19.5 years. *J Prosthet Dent.* 2015;114(1):40-5.
123. Pissis P. Fabrication of a metal-free ceramic restoration utilizing the monobloc technique. *Pract Periodontics Aesthetic Dent PPAD.* 1995;7(5):83-94.
124. Bindl A, Mörmann WH. Clinical evaluation of adhesively placed Cerec endo-crowns after 2 years--preliminary results. *J Adhes Dent.* 1999;1(3):255-65.
125. Fages M, Bennasar B. The endocrown: a different type of all-ceramic reconstruction for molars. *J Can Dent Assoc.* 2013;79:d140.
126. Bindl A, Richter B, Mörmann WH. Survival of ceramic computer-aided design/manufacturing crowns bonded to preparations with reduced macroretention geometry. *Int J Prosthodont.* 2005;18(3):219-24.

127. Fages M, Raynal J, Tramini P, Cuisinier FJ, Durand JC. Chairside Computer-Aided Design/Computer-Aided Manufacture All-Ceramic Crown and Endocrown Restorations: A 7-Year Survival Rate Study. *Int J Prosthodont.* 2017;30(6):556-60.
128. Belleflamme MM, Geerts SO, Louwette MM, Grenade CF, Vanheusden AJ, Mainjot AK. No post-no core approach to restore severely damaged posterior teeth: An up to 10-year retrospective study of documented endocrown cases. *J Dent.* 2017;63:1-7.
129. Govare N, Contrepolis M. Endocrowns: A systematic review. *J Prosthet Dent.* 2020;123(3):411-418.e9.
130. Dogui H, Abdelmalek F, Amor A, Douki N. Endocrown: An Alternative Approach for Restoring Endodontically Treated Molars with Large Coronal Destruction. *Case Rep Dent.* 2018;2018:1581952.
131. Lander E, Dietschi D. Endocrowns: a clinical report. *Quintessence Int Berl Ger.* 2008;39(2):99-106.
132. Gaintantzopoulou MD, El-Damanhoury HM. Effect of Preparation Depth on the Marginal and Internal Adaptation of Computer-aided Design/Computer-assisted Manufacture Endocrowns. *Oper Dent.* 2016;41(6):607-16.
133. Hayes A, Duvall N, Wajdowicz M, Roberts H. Effect of Endocrown Pulp Chamber Extension Depth on Molar Fracture Resistance. *Oper Dent.* 2017;42(3):327-34.
134. Magne P, Carvalho AO, Bruzi G, Anderson RE, Maia HP, Giannini M. Influence of no-ferrule and no-post buildup design on the fatigue resistance of endodontically treated molars restored with resin nanoceramic CAD/CAM crowns. *Oper Dent.* 2014;39(6):595-602.
135. Vagropoulou GI, Klifopoulou GL, Vlahou SG, Hirayama H, Michalakis K. Complications and survival rates of inlays and onlays vs complete coverage restorations: A systematic review and analysis of studies. *J Oral Rehabil.* 2018;45(11):903-20.
136. Decerle N, Bessadet M, Munoz-Sanchez ML, Eschevins C, Veyrone J, Nicolas E. Evaluation of Cerec endocrowns: a preliminary cohort study. *Eur J Prosthodont Restor Dent.* 2014;22(2):89-95.
137. Sedrez-Porto JA, Rosa WL de O da, da Silva AF, Münchow EA, Pereira-Cenci T. Endocrown restorations: A systematic review and meta-analysis. *J Dent.* 2016;52:8-14.
138. El-Damanhoury HM, Haj-Ali RN, Platt JA. Fracture resistance and microleakage of endocrowns utilizing three CAD-CAM blocks. *Oper Dent.* 2015;40(2):201-10.
139. Beier US, Grunert I, Kulmer S, Dumfahrt H. Quality of impressions using hydrophilic polyvinyl siloxane in a clinical study of 249 patients. *Int J Prosthodont.* 2007;20(3):270-4.
140. Politano G, Van Meerbeek B, Peumans M. Nonretentive Bonded Ceramic Partial Crowns: Concept and Simplified Protocol for Long-lasting Dental Restorations. *J Adhes Dent.* 2018;20(6):495-510.

141. De Munck J, Van Landuyt K, Peumans M, Poitevin A, Lambrechts P, Braem M, et al. A critical review of the durability of adhesion to tooth tissue: methods and results. *J Dent Res.* 2005;84(2):118-32.
142. Ferrari M, Pontoriero DIK, Ferrari Cagidiaco E, Carboncini F. Restorative difficulty evaluation system of endodontically treated teeth. *J Esthet Restor Dent.* 2022;34(1):65-80.
143. Dotto L, Girotto LPS, Correa Silva Sousa YT, Pereira GKR, Bacchi A, Sarkis-Onofre R. Factors influencing the clinical performance of the restoration of endodontically treated teeth: An assessment of systematic reviews of clinical studies. *J Prosthet Dent.* 2022;S002239132200213X.
144. Helfer AR, Melnick S, Schilder H. Determination of the moisture content of vital and pulpless teeth. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol.* 1972;34(4):661-70.
145. Soares CJ, Santana FR, Silva NR, Preira JC, Pereira CA. Influence of the endodontic treatment on mechanical properties of root dentin. *J Endod.* 2007;33(5):603-6.
146. Lee SJ, Lee S, Lim J, Ahn SJ, Kim TW. Cluster analysis of tooth size in subjects with normal occlusion. *Am J Orthod Dentofac Orthop Off Publ Am Assoc Orthod Its Const Soc Am Board Orthod.* 2007;132(6):796-800.
147. Robberecht L, Hornez JC, Dehurtevent M, Dufour T, Labreuche J, Deveaux E, et al. Optimization and Preclinical Perception of an Artificial Simulator for Endodontic Training: A Preliminary Study. *J Dent Educ.* 2017;81(3):326-32.
148. Reymus M, Stawarczyk B, Winkler A, Ludwig J, Kess S, Krastl G, et al. A critical evaluation of the material properties and clinical suitability of in-house printed and commercial tooth replicas for endodontic training. *Int Endod J.* 2020;53(10):1446-54.
149. Höhne C, Schmitter M. 3D Printed Teeth for the Preclinical Education of Dental Students. *J Dent Educ.* 2019;83(9):1100-6.
150. Delfosse C, Marquillier T, Ndoye S, Cousson PY, Hennequin M, Catteau C. Effect on undergraduate student self-confidence in using 3D printed primary molars for root canal treatment simulation training. *Eur Arch Paediatr Dent Off J Eur Acad Paediatr Dent.* 31 oct 2022; doi: 10.1007/s40368-022-00764-0 [Epub ahead of print]
151. Asgary S, Fazlyab M, Sabbagh S, Eghbal M. Outcomes of different vital pulp therapy techniques on symptomatic permanent teeth: a case series. *Iran Endod J.* 2014;9(4):295-300.
152. Sarao SK, Berlin-Broner Y, Levin L. Occurrence and Risk Factors of Dental Root Perforations: A Systematic Review. *Int Dent J.* 2021;71(2):96-105.
153. Bhuva B, Giovarruscio M, Rahim N, Bitter K, Mannocci F. The restoration of root filled teeth: a review of the clinical literature. *Int Endod J.* 2021;54(4):509-35.
154. Biacchi GR, Mello B, Basting RT. The endocrown: an alternative approach for restoring extensively damaged molars. *J Esthet Restor Dent Off Publ Am Acad Esthet Dent Al.* 2013;25(6):383-90.

155. Magne P, Goldberg J, Edelhoff D, Güth JF. Composite Resin Core Buildups With and Without Post for the Restoration of Endodontically Treated Molars Without Ferrule. *Oper Dent.* 2016;41(1):64-75.
156. Iaculli F, Rengo C, Lodato V, Patini R, Spagnuolo G, Rengo S. Fracture resistance of endodontically-treated maxillary premolars restored with different type of posts and direct composite reconstructions: A systematic review and meta-analysis of in vitro studies. *Dent Mater.* 2021;37(9):e455-84.
157. Lin CL, Chang YH, Chang CY, Pai CA, Huang SF. Finite element and Weibull analyses to estimate failure risks in the ceramic endocrown and classical crown for endodontically treated maxillary premolar. *Eur J Oral Sci.* 2010;118(1):87-93.
158. Huang TJG, Schilder H, Nathanson D. Effects of moisture content and endodontic treatment on some mechanical properties of human dentin. *J Endod.* 1992;18(5):209-15.
159. Abduo J, Sambrook RJ. Longevity of ceramic onlays: A systematic review. *J Esthet Restor Dent.* 2018;30(3):193-215.
160. van Dijken JW, Hasselrot L, Ormin A, Olofsson AL. Restorations with extensive dentin/enamel-bonded ceramic coverage. A 5-year follow-up. *Eur J Oral Sci.* 2001;109(4):222-9.
161. Brunthaler A, König F, Lucas T, Sperr W, Schedle A. Longevity of direct resin composite restorations in posterior teeth. *Clin Oral Investig.* 2003;7(2):63-70.
162. Raskin A, Setcos JC, Vreven J, Wilson NH. Influence of the isolation method on the 10-year clinical behaviour of posterior resin composite restorations. *Clin Oral Investig.* 2000;4(3):148-52.
163. Daudt E, Lopes GC, Vieira LC. Does operatory field isolation influence the performance of direct adhesive restorations? *J Adhes Dent.* 2013;15(1):27-32.
164. Carvalho AO, Bruzi G, Anderson RE, Maia HP, Giannini M, Magne P. Influence of Adhesive Core Buildup Designs on the Resistance of Endodontically Treated Molars Restored With Lithium Disilicate CAD/CAM Crowns. *Oper Dent.* 2016;41(1):76-82.
165. Ahmed MAA, Kern M, Mourshed B, Wille S, Chaar MS. Fracture resistance of maxillary premolars restored with different endocrown designs and materials after artificial ageing. *J Prosthodont Res.* 2022;66(1):141-50.
166. Tribst JPM, Dal Piva AM de O, Jager N, Bottino MA, Kok P, Kleverlaan CJ. Full-Crown Versus Endocrown Approach: A 3D-Analysis of Both Restorations and the Effect of Ferrule and Restoration Material. *J Prosthodont.* 2021;30(4):335-44.
167. Kayahan MB, Nekoofar MH, Kazandağ M, Canpolat C, Malkondu O, Kaptan F, et al. Effect of acid-etching procedure on selected physical properties of mineral trioxide aggregate. *Int Endod J.* 2009;42(11):1004-14.
168. Subash D, Shoba K, Aman S, Bharkavi SKI, Nimmi V, Abhilash R. Fracture Resistance of Endodontically Treated Teeth Restored with Biodentine, Resin Modified GIC and Hybrid Composite Resin as a Core Material. *J Clin Diagn Res JCDR.* 2017;11(9):ZC68-70.

169. Al-Manei KK. Shear Bond Strength of E. Max Ceramic Restoration to Hydraulic Calcium Silicate Based Cement (Biodentine): An In Vitro Study. *Eur Endod J* [Internet]. 2020 [cité 24 nov 2022]; Disponible sur: <http://eurendodj.com/jvi.aspx?un=EEJ-75046&volume=>
170. Pradelle-Plasse N, Mocquot C, Semennikova K, Colon P, Grosgeat B. Interface between calcium silicate cement and adhesive systems according to adhesive families and cement maturation. *Restor Dent Endod*. 2021;46(1):e3.
171. European Society of Endodontology (ESE) developed by:, Duncan HF, Galler KM, Tomson PL, Simon S, El-Karim I, et al. European Society of Endodontology position statement: Management of deep caries and the exposed pulp. *Int Endod J*. 2019;52(7):923-34.
172. Laborie M, Naveau A, Menard A. CAD-CAM resin-ceramic material wear: A systematic review. *J Prosthet Dent*. 2022;S0022-3913(22)00076-2.
173. Tokunaga J, Ikeda H, Nagamatsu Y, Awano S, Shimizu H. Wear of Polymer-Infiltrated Ceramic Network Materials against Enamel. *Mater Basel Switz*. 2022;15(7):2435.
174. Goujat A, Abouelleil H, Colon P, Jeannin C, Pradelle N, Seux D, et al. Mechanical properties and internal fit of 4 CAD-CAM block materials. *J Prosthet Dent*. 2018;119(3):384-9.
175. Garoushi S, Säilynoja E, Vallittu PK, Lassila L. Fracture-behavior of CAD/CAM ceramic crowns before and after cyclic fatigue aging. *Int J Prosthodont*. 23 févr 2021; doi: 10.11607/ijp.7207. Epub ahead of print
176. Vichi A, Zhao Z, Paolone G, Scotti N, Mutahar M, Goracci C, et al. Factory Crystallized Silicates for Monolithic Metal-Free Restorations: A Flexural Strength and Translucency Comparison Test. *Mater Basel Switz*. 2022;15(21):7834.
177. Gély, L. Evaluation des traitements endodontiques réalisés dans la PAS Endo du service Odontologie de Clermont-Ferrand. Pour l'obtention du Diplôme d'état de docteur en Chir-Dent. 2022; Faculté de Clermont-Ferrand.
178. Cousson PY, Decerle N, Munoz-Sanchez ML, Roux D, Doméjean S, Nicolas E, et al. The « Plan » phase of a Deming cycle: Measurement of quality and outcome of root canal treatments in a university hospital. *Eur J Dent Educ Off J Assoc Dent Educ Eur*. 2019;23(1):e1-11.

6 Annexes

Annexe 1 : PI01 : Munoz-Sanchez ML, Linas N, Decerle N, Collado V, Faulks D, Nicolas E, Hennequin M, Cousson PY. Radiological Evaluation of Stainless Steel Crowns Placed on Permanent Teeth in Patients Treated under General Anaesthesia. *Int J Environ Res Public Health*. 2021;18(5):2509.

Résumé :

Des évaluations des traitements dentaires fondées sur des preuves scientifiques sont nécessaires pour soutenir le développement de services dentaires de soins spécifiques.

Cette étude rétrospective a permis de collecter et analyser des radiographies de dents permanentes restaurées par coiffe préformée en acier inoxydable (CPP) chez des patients traités sous anesthésie générale.

Entre 2013 et 2019, 360 molaires permanentes ont été restaurées par coiffes préformées chez 198 patients adultes. Un investigateur calibré a utilisé un outil original validé pour évaluer quatre critères radiographiques pour les molaires restaurées par CPP : (i) l'adaptation marginale ; (ii) le contact proximal interdentaire ; (iii) la présence d'un débord du ciment verre ionomère (CVI) ; et (iv) la perte d'os alvéolaire. Dans l'ensemble, aucun défaut ou un défaut mineur a été signalé pour la majorité des CPP pour les critères "Adaptation marginale" (62,5 %, n = 320), "Contact proximal" (82,2 %, n = 236) et "Débord de CVI" (95,8 %, n = 337). Une résorption de l'os alvéolaire a été signalée dans 6,5 % des cas, n = 14, après une période moyenne de 8,9 ± 14,3 mois.

Il a été démontré que la restauration des dents permanentes à l'aide de CPP placées sous anesthésie générale présente un faible risque de morbidité parodontale à moyen terme lorsqu'elle est évaluée radiographiquement.



Article

Radiological Evaluation of Stainless Steel Crowns Placed on Permanent Teeth in Patients Treated under General Anaesthesia

Marie-Laure Munoz-Sanchez ^{1,2}, Natacha Linas ^{1,2}, Nicolas Decerle ^{1,2}, Valérie Collado ^{1,2}, Denise Faulks ^{1,2} , Emmanuel Nicolas ^{1,2} , Martine Hennequin ^{1,2,*} and Pierre-Yves Cousson ^{1,2}

¹ CROC, Université Clermont Auvergne, F-63000 Clermont-Ferrand, France; m-laure.munoz-sanchez@uca.fr (M.-L.M.-S.); natacha.linas@uca.fr (N.L.); nicolas.decerle@uca.fr (N.D.); valerie.collado@uca.fr (V.C.); denise.faulks@uca.fr (D.F.); emmanuel.nicolas@uca.fr (E.N.); p-yves.cousson@uca.fr (P.-Y.C.)
² CHU Clermont-Ferrand, Service d'Odontologie, F-63003 Clermont-Ferrand, France
* Correspondence: martine.hennequin@uca.fr

Abstract: Evidence-based evaluations of dental treatment are needed to support the development of special care dentistry services. This retrospective study was designed to collect and analyse X-ray images of permanent teeth restored with stainless steel crowns (SSC) in patients treated under general anaesthesia. Between 2013 and 2019, 360 permanent molars were crowned with SSCs in 198 adult patients. One calibrated investigator used an original validated tool to evaluate four radiographic criteria for molars restored with SSCs: (i) marginal adaptation; (ii) interdental proximal contact; (iii) the presence of glass ionomer cement overflow; and (iv) the loss of alveolar bone. Overall, no defect or a minor defect was reported for the majority of SSCs for the criteria “Marginal adaptation” (62.5%, $n = 320$), “Proximal contact” (82.2%, $n = 236$) and “Cement overflow” (95.8%, $n = 337$). Alveolar bone resorption was reported in 8.3% of cases, $n = 14$, after a mean period of 8.9 ± 14.3 months. It was shown that the restoration of permanent teeth using SSCs placed under general anaesthesia presents a low risk of periodontal morbidity in the medium term when assessed radiographically.

Keywords: stainless steel crown; general anaesthesia; evaluation



Citation: Munoz-Sanchez, M.-L.; Linas, N.; Decerle, N.; Collado, V.; Faulks, D.; Nicolas, E.; Hennequin, M.; Cousson, P.-Y. Radiological Evaluation of Stainless Steel Crowns Placed on Permanent Teeth in Patients Treated under General Anaesthesia. *Int. J. Environ. Res. Public Health* **2021**, *18*, 2509. <https://doi.org/10.3390/ijerph18052509>

Academic Editor: Francisco Javier Rodríguez Lozano

Received: 28 December 2020
Accepted: 25 February 2021
Published: 3 March 2021

Publisher's Note: MDPI stays neutral with regard to jurisdictional claims in published maps and institutional affiliations.



Copyright: © 2021 by the authors. Licensee MDPI, Basel, Switzerland. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

1. Introduction

Within dental public health, it is well recognised that persons from marginalised groups and/or disabled persons have difficulty accessing dental services for environmental, social and medical reasons [1–3]. It is also accepted that dental treatment sometimes has to be provided in what are qualified as “special circumstances” [4]—for example, patients requiring general anaesthesia or sedation services due to a lack of cooperation; patients requiring treatment during pandemic periods or humanitarian crises; patients that cannot or are unlikely to attend subsequent appointments due to acute medical or mental health issues; homeless patients, travellers, refugees, etc. These special circumstances have in common the need for effective treatment in a single short session. In the past, the response to dental need in special circumstances was predominantly extraction or abstention [5–8]. This response is clearly inequitable, particularly when considering that these same populations are the least likely to benefit from prosthetic rehabilitation following tooth loss [9].

Special care dentistry (SCD) is concerned with the oral health of such populations and, with the development of SCD specialties around the world [10–13], it is increasingly urgent to define effective treatment protocols for special circumstances [4,14]. Endodontic treatments, whether they be root canal treatment or full pulpotomy, have been evaluated when performed under general anaesthesia [4,15,16], but few studies have reported on restorative procedures [17,18]. Preformed stainless steel crown (SSC) restorations represent

a viable treatment choice for severely carious or fractured posterior permanent teeth [19]. The use of SSCs is well described for deciduous molars with deep or extensive carious lesions [20–22]. It has been shown that the risk of failure or long-term pain in deciduous molars treated by pulpotomy or pulpectomy and restored with SSCs is reduced compared to direct composite restorations. Composite restorations require perfect moisture control to achieve adhesion and are time-consuming. Both these conditions may be difficult to manage in special circumstances. Few studies have explored the outcome of SSC restorations in adults [19,23]. It was recently reported that the survival of posterior permanent teeth restored with SSCs is 79.2% after 10 years. However, serious concerns are raised regarding the ability of prefabricated SSCs to satisfy the same goals as those required from a conventional crown. SSCs are prefabricated in a stainless nickel-chromium alloy. They are selected for use according to their adaptation to the tooth rather than being custom-made from a dental impression. One of the difficulties in placing SSCs lies in ensuring cervical adjustment whilst restoring interdental contact points. Indeed, coronal preparation for SSC placement is aggressive and marginal adaptation may be approximate. The authors are unaware of any academic guidelines regarding coronal preparation for SSCs in permanent molars. It is pertinent to consider the benefit/risk ratio for the placement of SSCs, particularly when placed in special circumstances. It is also important that the potential longer term periodontal morbidity is investigated and reported.

This study aims to evaluate the radiological outcome of SSCs placed on permanent molars for patients treated under general anaesthesia (GA).

2. Materials and Methods

2.1. Study Design

This retrospective study was designed to collect and analyse X-ray images of permanent teeth restored with SSC in patients treated under GA. Study ethics approval was obtained on the 5th of January 2021 (CECIC Rhône-Alpes-Auvergne, Grenoble, IRB 5921) and was performed in accordance with the ethical standards as laid down in the 1964 Declaration of Helsinki and its later amendments.

2.2. Study Population

The study population consisted of all outpatients from the special care unit of the Dental University Hospital of Clermont-Ferrand, France, treated under GA between January 2013 and April 2019. Patients treated under GA included patients presenting anxiety disorders and high levels of carious disease, medically compromised patients, patients with physical and/or intellectual disability and patients presenting with a severe gag reflex. Any patient ≥ 18 years old, for whom at least one permanent molar was restored with an SSC, and for whom at least one radiograph was available, was included in the study. A patient's age and gender, date of SSC restoration under GA, and dates for consecutive X-ray images during the post-operative follow-up period were recorded from patient files. The follow-up period varied among patients depending on their ability to access dental care. Some patients had regular check-ups, while others were only seen when they had infectious or traumatic problems. Moreover, depending on the patient's ability to cope with radiographic examination, post-operative images were either retro-alveolar or panoramic radiographs. Patients were examined conventionally or under relative analgesia. For patients who could not cooperate under these conditions, dental examination was delayed and completed at a later treatment session under midazolam sedation or general anaesthesia. Neither midazolam sedation nor general anaesthesia was indicated solely for the radiographic examination goals of this study.

2.3. Coronal Preparation for SSC Restoration

Operating protocols for conservative and endodontic treatment under GA have previously been reported [24]. SSCs for permanent teeth are available in six sizes based on the anatomy of the upper or lower first molar (3M™ Stainless Steel crowns for permanent

molars). The procedure for SSC placement is illustrated in Figure 1. Following endodontic treatment (either pulpotomy or root canal treatment), the walls of the pulp chamber are cleaned (Figure 1A) and the chamber is filled with low viscosity glass ionomer cement (GIC) (Figure 1B). Once the GIC is set, the rubber dam (RD) is removed. The crown is then reduced occlusally (Figure 1C) and prepared by complete peripheral stripping to the gingival or sub-gingival level (Figure 1D). The width between the two adjacent teeth determines the size of SSC selected. The coronal preparation is then adjusted to the internal diameter of the SSC as necessary. The criteria for adjustment are (i) the cervical limits of the SSC cover the cervical limits of the prepared tooth; (ii) the marginal crest height of the SSC matches that of the adjacent teeth; (iii) proximal contacts with the adjacent teeth are restored; and (iv) occlusion is checked using 200 μm articulating paper with the jaw moved into maximal tooth contact by the operator. The SSC is filled with high or low viscosity glass ionomer cement (respectively Fuji IX and Fuji II) and placed on the prepared tooth (Figure 1E).

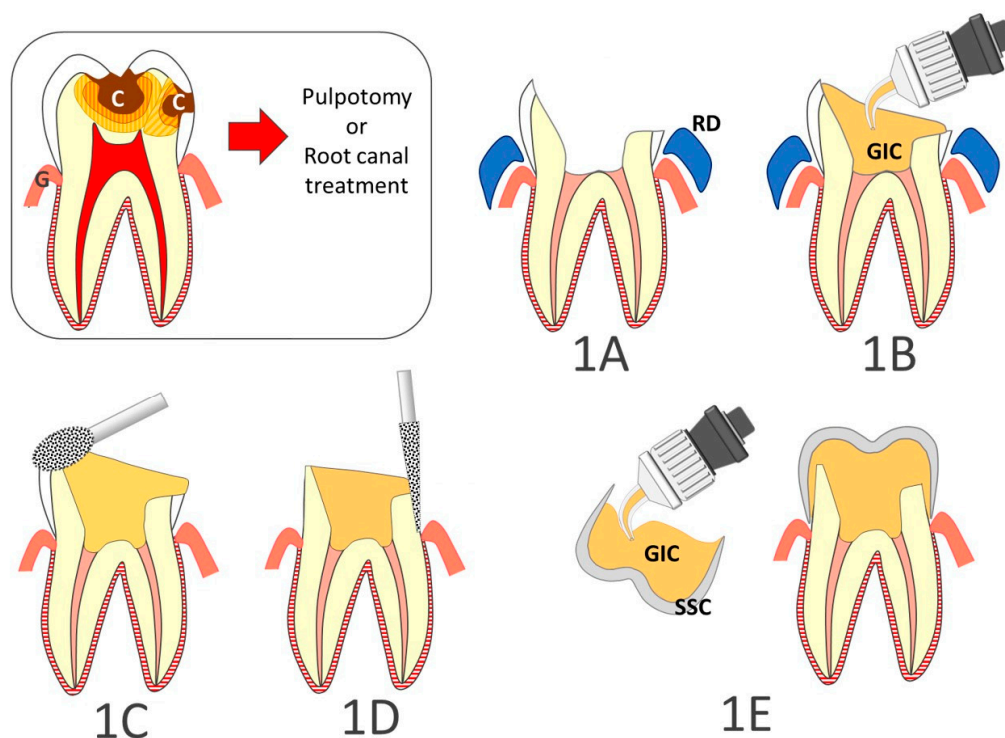


Figure 1. Step by step restoration of posterior teeth with large carious lesions (C) using stainless steel crowns. (1A): the walls of the pulp chamber are cleaned; (1B): the chamber is filled with low viscosity glass ionomer cement (GIC); (1C): the rubber dam (RD) is removed, and the crown is reduced occlusally; (1D): the dental crown is prepared by complete peripheral stripping to the gingival or sub-gingival level; (1E): The stainless steel crown (SSC) is filled with glass ionomer cement and placed on the prepared tooth. (G, Gingiva).

2.4. Study Criteria

2.4.1. Criteria for Radiographic Assessment

Following discussion based on the literature [19,20,25–29], four teachers in restorative dentistry and endodontics devised four criteria for the analysis of X-ray images of SSC restorations: (i) marginal adaptation (6 categories); (ii) proximal contact with adjacent tooth (5 categories); (iii) presence of glass ionomer cement (GIC) overflow (4 categories); and (iv) resorption of interdental alveolar bone (5 categories). Descriptive criteria for scoring each category and data interpretation are presented in Table 1. A guide was created to illustrate each category using X-ray images of SSCs (Figure 2).

Table 1. Description of the categories of the four study criteria and their data interpretation.

Criteria	Descriptive Categories	Data Interpretation
Marginal adaptation scored on T2 X-ray image	The SSC profile is well adapted to the contour of the crown preparation.	No defect or overhang
	The SSC does not reach the contour of the crown preparation, but the defect is less than the radiological thickness of the SSC.	Minor defect or overhang
	The SSC overhangs the contour of the crown preparation, but the overhang is less than the radiological thickness of the SSC.	Major defect or overhang
	The SSC does not reach the contour of the crown preparation, and the defect is greater than the radiological thickness of the SSC.	Major defect or overhang
Proximal contact scored on T2 X-ray image	The SSC overhangs the contour of the crown preparation, and the overhang is greater than the radiological thickness of the SSC.	Major defect or overhang
	The criteria “marginal adaptation” cannot be evaluated on the X-ray image.	Not interpretable
	The image shows an area of white pixels between the proximal faces of adjacent teeth, indicating a contact zone and the presence of a contact point. Clinically, there would be an appropriate contact point.	No defect
	The image shows a small area of black or dark grey pixels between the proximal faces of adjacent teeth, indicating a slight gap between adjacent teeth. Clinically, there would be a weak contact point.	Minor defect
Glass Ionomer Cement (GIC) overflow scored on T2 X-ray image	The image shows a large area of black or dark grey pixels between the proximal faces of adjacent teeth, indicating a wide gap and the absence of a contact point. Clinically, there would be no contact point.	Major defect
	Contact point absent due to absence of adjacent tooth or teeth.	Not applicable
	The criteria “proximal contact” cannot be evaluated on the X-ray image.	Not interpretable
	No noticeable GIC overflow.	No overflow
Alveolar bone resorption scored by comparing T1 and T2 X-ray images	Slight GIC overflow.	Minor overflow
	Large GIC overflow.	Major overflow
	The criteria “presence of GIC overflow” cannot be interpreted on the X-ray image.	Not interpretable
	The level of alveolar bone crest, compared to the furcation, is similar between T1 and T2, for both mesial and distal sides (or for the opposite side to the extraction if an adjacent tooth has been extracted).	No or minor resorption
The criteria “alveolar bone resorption” is not applicable because the adjacent tooth or teeth have been extracted between T1 and T2.	The level of alveolar bone crest, compared to the furcation, is slightly but not significantly reduced between T1 and T2, for either the mesial and/or the distal side (physiological resorption).	Major resorption
	The level of alveolar bone crest, compared to the furcation, is significantly reduced between T1 and T2, for either the mesial and/or the distal side (pathological resorption).	Major resorption
	The criteria “alveolar bone resorption” is not applicable because the adjacent tooth or teeth have been extracted between T1 and T2.	Not applicable
	The criteria “alveolar bone resorption” cannot be evaluated on the X-ray image.	Not interpretable

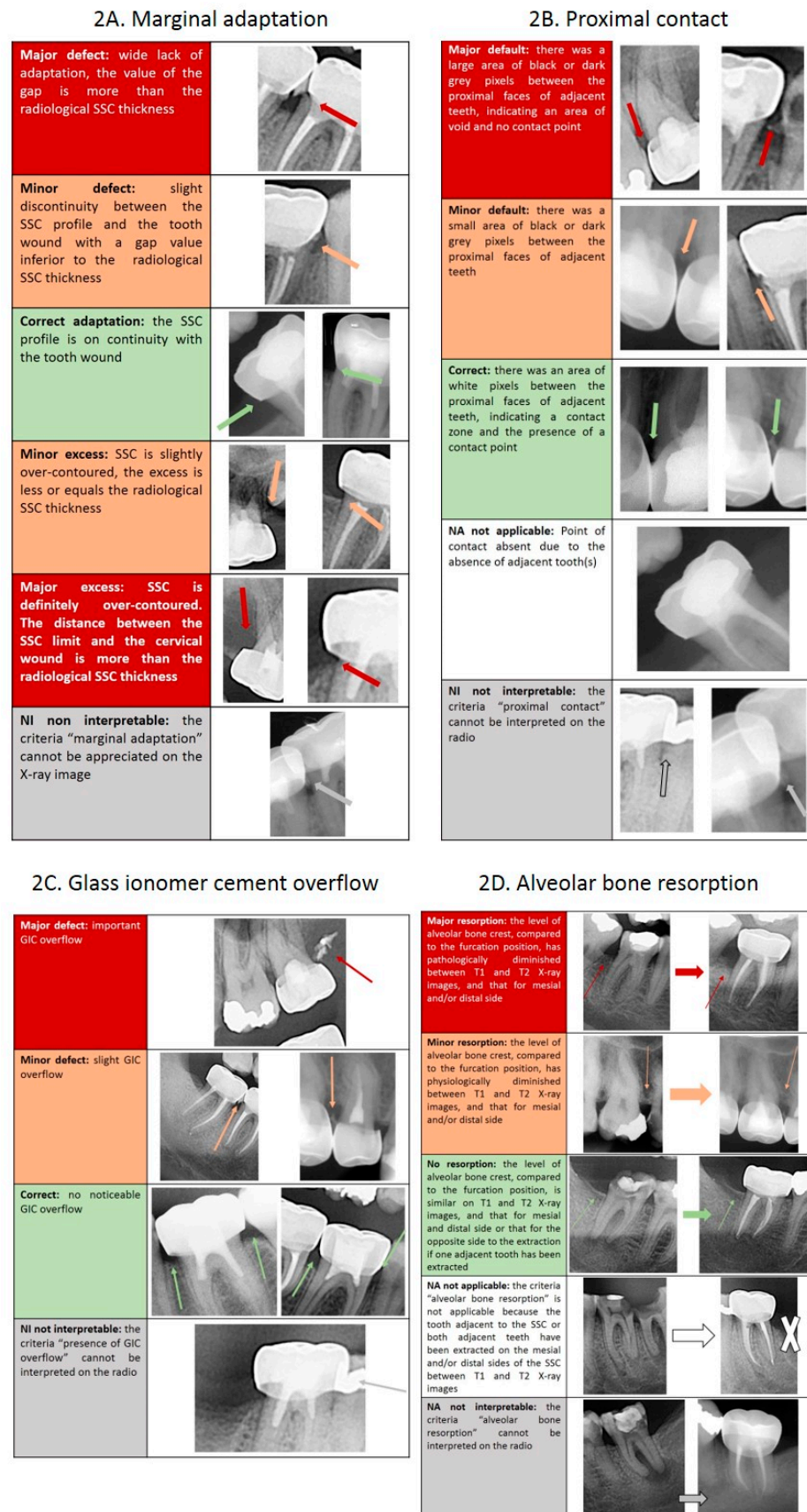


Figure 2. Scoring guide for calibration ((2A): marginal adaptation; (2B): proximal contact; (2C): presence of cement overflow; (2D): alveolar bone resorption).

The criterion “alveolar bone resorption” was evaluated by the comparison of the position of the alveolar crest between the radiograph taken at T1 during the GA session (either the preoperative X-ray, or by default, the immediate postoperative X-ray) and the most recent follow-up X-ray image (T2). The other three criteria, “marginal adaptation”, “proximal contact”, and “presence of GIC overflow”, were assessed on the most recent available X-ray collected during the routine follow-up examination (T2). Each criterion was scored twice, once for the mesial side and once for the distal side of the restored tooth.

2.4.2. Calibration Tool

A calibration tool of 60 slides was created with PowerPoint software (Microsoft Corporation, Redmond, Washington, DC, USA). For each category of each of the four study criteria, three slides were created. Each slide consisted of two X-ray images: one radiograph taken at T1 during the GA session (either the preoperative X-ray, or by default, the immediate postoperative X-ray), and one radiograph taken at T2 during the most recent check-up appointment. X-ray images were resized to the same format. When multiple teeth were present on the X-ray, the tooth to be scored was indicated by an arrow and M was overprinted on the mesial face.

2.4.3. Validity of the Calibration Tool

Reliability and stability of the study criteria evaluation were tested by three independent investigators, who assessed the set of 60 slides twice with a two-week interval. Intra-class coefficient for intra-rater and inter-rater evaluations are presented in Tables 2 and 3, respectively. High ICC values demonstrated that inter and intra-investigators' evaluations were stable and reliable.

2.5. Data Collection

2.5.1. Radiographs of SSCs Performed under GA

Patients ≥ 18 years old, treated under GA, during which one or more SSCs were placed on permanent teeth, were identified using the hospital database. The radiographs corresponding to the SSCs of the identified patients were downloaded and anonymised. Each slide comprised two X-ray images collected from one patient record: one radiograph taken at T1 during the GA session (based on retro-alveolar or panoramic radiograph, either the preoperative X-ray, or by default, the immediate postoperative X-ray), and one radiograph taken at T2 during the latest check-up appointment (retro-alveolar or panoramic radiograph). A PowerPoint document was created in the same format as the calibration tool.

2.5.2. Evaluation of Radiological Criteria

One calibrated investigator, who had participated in the validation process of the calibration tool (investigator #3), scored all the radiological criteria for the pool of X-ray images using the study criteria. The time period between the initial and the second radiograph was noted for the criterion “Alveolar bone resorption”. For statistical reasons, the follow-up times were grouped into two re-evaluation periods for ease of interpretation: <1 year and ≥ 1 year. Potential correlation between study criteria was tested using the Pearson correlation coefficient ($\alpha = 0.05$).

Table 2. Intra-class correlation coefficient (ICC) for intra-rater validity for each study criterion (n: number of cases).

	Mesial Marginal Adaptation	Distal Marginal Adaptation	Mesial Proximal Contact	Distal Proximal Contact	Mesial GIC Overflow	Distal GIC Overflow	Mesial Alveolar Bone Resorption	Distal Alveolar Bone Resorption
Investigator #1	0.973 n = 56	0.968 n = 54	0.955 n = 54	0.999 n = 55	0.936 n = 55	1 n = 53	0.914 n = 57	0.999 n = 55
Investigator #2	0.766 n = 59	0.781 n = 57	0.999 n = 52	0.999 n = 56	0.882 n = 60	0.848 n = 60	0.930 n = 46	0.946 n = 46
Investigator #3	0.906 n = 52	0.781 n = 51	0.998 n = 49	0.999 n = 54	0.936 n = 54	0.92 n = 53	0.995 n = 49	0.992 n = 52

Table 3. Intra-class correlation coefficient (ICC) for inter-rater assessment for each study criterion (n: number of cases).

	Mesial Marginal Adaptation	Distal Marginal Adaptation	Mesial Proximal Contact	Distal Proximal Contact	Mesial GIC Overflow	Distal GIC Overflow	Mesial Alveolar Bone Resorption	Distal Alveolar Bone Resorption
Investigator #1 vs. Investigator #2	0.818 n = 56	0.762 n = 54	0.952 n = 52	0.935 n = 54	0.760 n = 55	0.920 n = 53	0.827 n = 49	0.984 n = 50
Investigator #1 vs. Investigator #3	0.671 n = 53	0.603 n = 51	0.972 n = 51	0.934 n = 54	0.807 n = 54	0.824 n = 52	0.831 n = 52	0.91 n = 52
Investigator #2 vs. Investigator #3	0.624 n = 54	0.619 n = 53	0.995 n = 51	0.998 n = 56	0.826 n = 54	0.757 n = 56	0.984 n = 47	0.903 n = 48

3. Results

3.1. Study Population

Between 2013 and 2019, 360 permanent molars were crowned with SSCs in 198 patients (36.7 ± 11.2 years, from 18 to 93 years). Of the patients, 100 were men (37.7 ± 10.7 years, from 19 to 67 years) and 98 were women (35.8 ± 11.7 years, from 18 to 93 years). The reasons for being referred for dental care under GA were dental anxiety or phobia for 156 patients (78.8%), medical systemic conditions for 8 patients (4%), dementia for 1 patient (0.5%), and intellectual or physical disabilities for 33 patients (16.7%). The 360 SSCs were re-evaluated on average at 12.5 ± 17.8 months (from 0.5 to 79 months).

The flowchart of inclusions is presented in Figure 3.

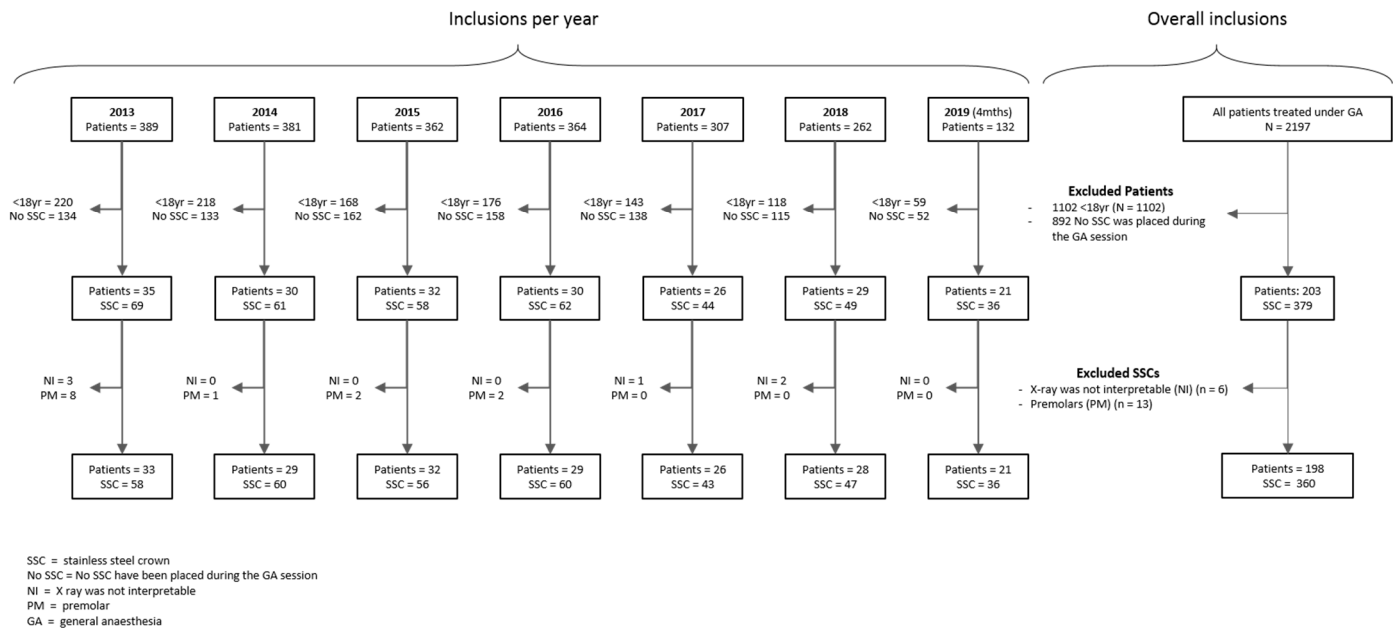


Figure 3. Flowchart for inclusions.

3.2. Descriptive Results

Overall, no defect or only a minor defect was recorded for the majority of SSCs for the criteria “Marginal adaptation” (62.5%, n = 320), “Proximal contact” (82.2%, n = 236), and “Cement overflow” (95.8%, n = 337) (Table 4). Acceptable marginal adaptation was less often achieved than acceptable proximal contact or the absence of cement overflow.

The criterion “Alveolar bone resorption” could not be scored for 144 SSCs (40.0%) for at least one of the proximal faces. Of the 216 teeth evaluated radiologically, 194 (89.8%) had no periodontal defect (Table 5) and only 14 showed major resorption (8.3%).

Correlation was found between alveolar bone resorption and both mesial proximal contact (r = 0.46, p < 0.001) and distal proximal contact (r = 0.19, p < 0.01). There was no correlation between alveolar bone resorption and either cement overflow or marginal adaptation.

Table 4. Evaluation of SSCs for “Marginal Adaptation”, “Proximal contact”, and “Cement overflow”.

	Marginal Adaptation (n = 320 SSCs)	Proximal Contact (n = 236 SSCs)			Cement Overflow (n = 337 SSCs)
		Mesial and Distal	Mesial or Distal If Absence of Adjacent Tooth	Sub-Total	
No defect	94 (29.4%)	46 (19.5%)	97 (41.1%)	143 (60.6%)	270 (80.1%)
Minor defect	106 (33.1%)	22 (9.3%)	29 (12.3%)	51 (21.6%)	53 (15.7%)
Major defect	120 (37.5%)	11 (4.7%)	31 (13.1%)	42 (17.8%)	14 (4.2%)

Table 5. Evaluation of SSCs for “Alveolar bone resorption” ($n = 216$).

	<12 Months (2 ± 2.4 Months)	≥12 Months (31.8 ± 13.7 Months)	Total (8.9 ± 14.3 Months; Max: 0.5 Months Min: 66 Months)
No resorption or minor resorption for both mesial and distal faces	99 (76.2%)	31 (23.8%)	130 (100%)
No resorption or minor resorption for one face and extraction of the adjacent tooth for the other face	52 (81.3%)	12 (18.7%)	64 (100%)
Major resorption	8 (57.1%)	6 (42.9%)	14 (100%)
Not applicable because of extraction of both adjacent teeth	7 (87.5%)	1 (12.5%)	8 (100%)
Total	166 (76.9%)	50 (23.1%)	216 (100%)

4. Discussion

This study reports that the restoration of permanent teeth using stainless steel crowns placed under general anaesthesia presents a low risk of periodontal morbidity, at least in the medium term. This finding is initially surprising and should be interpreted with caution, as the evaluation was based only on radiological criteria. A long-term investigation into the periodontal impact of SSCs based on clinical criteria is needed to complete the present results. Retention of dental plaque and calculus, gingival bleeding, and periodontal pocketing characterise the periodontal morbidity of SSCs clinically. However, long-term periodontal evaluation is likely to be difficult in the target population treated under GA, complicating the feasibility of such a study. Uncooperative behaviour and failure to return for follow-up could reduce the quantity and quality of data collected. Moreover, a lack of oral hygiene and high levels of medical comorbidity and medication could act as confounding factors for periodontal morbidity. Another limit of the current study is that occlusal adaptation could not be evaluated, as solely radiological criteria were used. SSCs are chosen as the restoration of choice for placement in special circumstances by our team because it is assumed that they restore dental function, i.e., that they maintain chewing function and provide a stable occlusion for swallowing [18,30]. A previous cohort study demonstrated that a comprehensive restorative approach, including SSC placement for permanent molars, helped to increase chewing activity and oral health-related quality of life following rehabilitation [18]. The current results are also in accordance with a recent, large-scale study, which concluded that SSCs are a durable treatment option for the restoration of the severely carious posterior permanent dentition, in the context of GA [19]. The original scale used in the current study for the radiological evaluation of SSCs could be used in future prospective, longitudinal investigations.

The restoration of severely damaged posterior teeth remains a key area of interest, particularly in the treatment of endodontically treated teeth. The most common restorations are full or partial crowns, with or without a cast or prefabricated post and core. Two reviews have reported that there is insufficient reliable evidence to determine which treatment is most effective [31,32]. SSCs were not considered in these reviews and uncertainty about the comparative clinical performance of SSCs or conventional crowns and fillings is related to differences in treatment concepts. The objectives of a conventional crown are to retain a functional tooth on the arch, to maintain periodontal health, and to maintain or restore proximal dental contacts. A conventional crown should protect the endodontic treatment of a restored tooth from bacterial recontamination or protect a vital tooth from carious disease and bacterial contamination. Finally, a conventional crown should restore optimal occlusal function and may have aesthetic properties. With conventional crowns, the concept is to prepare the tooth, to take an impression, and to create a prosthetic crown which is perfectly adapted to the coronal preparation. In these conditions, major defects are rare. With preformed SSCs, the concept is reversed. The tooth is adapted to the SSC, such that

the SSC has the best possible proximal and occlusal contact. This exercise is difficult and requires experience. In this study, a higher frequency of major defects was reported first for the criterion “marginal adaption”, and second for “proximal contact”. Although not analysed in the data given here, it is harder to place SSCs on some teeth than others. For instance, in patients with long term loss of tooth substance, teeth may move mesially or vertically, closing the interdental space and altering the occlusion. In this case, it may be necessary to adjust the occlusion by reducing enamel thickness of the adjacent or opposing teeth, or to correct the profile of the SSC with the risk of crown perforation. In the presence of sub-gingival limits, it can be difficult to achieve continuous cervical coverage as SSCs are pre-sized in height. Seeking and applying solutions in all of these situations is time consuming and may compromise the success of SSC placement.

This study suggests that SSCs are indicated to maintain teeth on the arch and avoid extraction when conventional fixed crowns are not possible under special circumstances. In these situations, conventional indirect restorations cannot be provided because this type of restoration involves multiple steps and the intervention of a dental technician. In special circumstances, the risk–benefit ratio is not in favour of multiplying dental sessions. In addition, impression-taking is complicated under GA, particularly if orotracheal intubation is used. Most patients treated in special circumstances have difficulties accessing dental care, present high levels of dental need, high levels of decayed, missing or filled teeth (DMFT) and severely damaged teeth [18,33–35]. It is known that survival rates for teeth with carious cavities on more than three surfaces are higher when restored with full or partial crowns rather than with composite restorations [36]. This supports placement of SSCs rather than composite or glass ionomer cement restorations for patients treated in special circumstances. In addition, sealing SSCs with GIC may compensate for the possible lack of SSC adaption, as it has good filling and sealing properties. GIC has been shown to be better at preventing microleakage and has better retentive strength than either zinc phosphate or zinc polycarboxylate cement [37–39].

As the concepts and technology used in dentistry evolve, it may become possible to provide custom-made crowns even in special circumstances. Digital impressions, or computer aided design and manufacturing (CAD/CAM), associated with modern bonding techniques, could be used chairside to provide fully functional restorations that fit perfectly, all in one session [40]. For the moment, this opportunity is limited by the availability of the necessary equipment and the investment cost, but also by the limitations of bonding techniques. Bonding currently requires supra-gingival cervical margins onto enamel, and sufficient residual tooth tissue for strength. In the meantime, it is possible that SSC restoration is the next best solution to avoid extraction in permanent posterior teeth.

5. Conclusions

For some patients, environmental or individual conditions mean that dental treatment has to be performed in special circumstances. Although SSC placement is a well-recognised technique in the primary dentition, little information is available regarding SSC use in permanent teeth. It was therefore important to study the risks and benefits of this procedure in special circumstances. The results show that the restoration of permanent teeth using stainless steel crowns placed under general anaesthesia presents a low risk of periodontal morbidity, when assessed radiographically. This supports the placement of SSC restorations over extraction for severely damaged teeth when treatment is required in one single and short session, such as under GA, or during pandemic periods or humanitarian crises. Further studies based on clinical criteria should be undertaken to complete the current results.

Author Contributions: Conceptualization P.-Y.C.; formal analysis E.N., M.H. and P.-Y.C.; investigation M.-L.M.-S., N.L., N.D., V.C. and D.F.; methodology M.H.; supervision M.H.; writing—original draft M.-L.M.-S. and P.-Y.C.; drawing M.H.; writing—review and editing M.-L.M.-S., D.F., M.H. and P.-Y.C. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

Funding: This research received no external funding.

Institutional Review Board Statement: Study ethics approval was obtained on the 5th of January 2021 (CECIC Rhône-Alpes-Auvergne, Grenoble, IRB 5921) and was performed in accordance with the ethical standards as laid down in the 1964 Declaration of Helsinki and its later amendments.

Informed Consent Statement: Ethical statements of this study considered that the patients had to be informed for the possible use of their data but that they had not to signed written informed consent.

Conflicts of Interest: The authors declare no conflict of interest.

References

1. Peres, M.A.; Macpherson, L.M.D.; Weyant, R.J.; Daly, B.; Ventur, R.; Mathur, M.R.; Listl, S.; Celeste, R.K.; Guarnizo-Herreño, C.C.; Kearns, C.; et al. Oral diseases: A global public health challenge. *Lancet Lond. Engl.* **2019**, *394*, 249–260. [CrossRef]
2. Faulks, D.; Freedman, L.; Thompson, S.; Sagheri, D.; Dougall, A. The value of education in special care dentistry as a means of reducing inequalities in oral health. *Eur J. Dent. Educ. Off. J. Assoc. Dent. Educ. Eur.* **2012**, *16*, 195–201. [CrossRef]
3. Gondlach, C.; Catteau, C.; Hennequin, M.; Faulks, D. Evaluation of a Care Coordination Initiative in Improving Access to Dental Care for Persons with Disability. *Int. J. Environ. Res. Public Health* **2019**, *16*, 2753. Available online: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC6696062/> (accessed on 27 December 2020). [CrossRef] [PubMed]
4. Linas, N.; Decerle, N.; Munoz-Sanchez, M.-L.; Faulks, D.; Collado, V.; Nicolas, E.; Hennequin, M.; Cousson, P. Long-term Outcomes of Full Pulpotomy in Permanent Molars for Patients Treated in a Single, Short Session under Special Conditions. *J. Endod.* **2020**, *46*, 1597–1604. [CrossRef] [PubMed]
5. Mac Giolla Phadraig, C.; Nunn, J.; McCallion, P.; McCarron, M. Prevalence of edentulism among adults with intellectual disabilities: A narrative review informed by systematic review principles. *Spec. Care Dent. Off. Publ. Am. Assoc. Hosp. Dent. Acad. Dent. Handicap. Am. Soc. Geriatr. Dent.* **2018**, *38*, 191–200. [CrossRef] [PubMed]
6. Kovacic, I.; Tadin, A.; Petricevic, N.; Mikelić, B.; Vidović, N.; Palac, A.; Filipovic-Zero, I.; Celebić, A. Changes of the dental service delivered to patients with intellectual disability under general anaesthesia in Dental Polyclinic Split, Croatia, during the years 1985–2009. *Coll. Antropol.* **2012**, *36*, 785–789. [PubMed]
7. Jockusch, J.; Sobotta, B.A.J.; Nitschke, I. Outpatient dental care for people with disabilities under general anaesthesia in Switzerland. *BMC Oral Health* **2020**, *20*. Available online: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC7433094/> (accessed on 27 December 2020). [CrossRef]
8. Maestre, C. The use of general anaesthesia for tooth extraction in young handicapped adults in France. *Br. Dent. J.* **1996**, *180*, 297–302. [CrossRef]
9. Mac Giolla Phadraig, C.; Nunn, J.; Carroll, R.; McCarron, M.; McCallion, P. Why do edentulous adults with intellectual disabilities not wear dentures? Wave 2 of the IDS TILDA cohort study. *J. Prosthodont. Res.* **2017**, *61*, 61–66. [CrossRef] [PubMed]
10. Collado, V.; Faulks, D.; Hennequin, M. A survey of the difficulties encountered during routine hygiene and health care by persons with special needs. *Disabil. Rehabil.* **2008**, *30*, 1047–1054. [CrossRef] [PubMed]
11. Dougall, A.; Fiske, J. Access to special care dentistry, part 1. *Access. Br. Dent. J.* **2008**, *204*, 605–616. [CrossRef] [PubMed]
12. Mugayar, L.; Hebling, E.; Dias, P.V. Special care dentistry: A new specialty in Brazil. *Spec. Care Dent. Off. Publ. Am. Assoc. Hosp. Dent. Acad. Dent. Handicap. Am. Soc. Geriatr. Dent.* **2007**, *27*, 232–235. [CrossRef]
13. Hunter, M.L.; Hunter, B.; Thompson, S.A.; McLaughlin, W.S. Special Care Dentistry: Attitudes of Specialists in Paediatric Dentistry practising in the UK to the creation of a new specialty. *Int. J. Paediatr. Dent.* **2004**, *14*, 246–250. [CrossRef] [PubMed]
14. Faulks, D.; Fabián Molina, G. How to provide the evidence base for techniques and interventions that ensure equal treatment outcomes for people with disability? *Spec. Care Dent. Off. Publ. Am. Assoc. Hosp. Dent. Acad. Dent. Handicap. Am. Soc. Geriatr. Dent.* **2018**, *38*, 119–120. [CrossRef] [PubMed]
15. Cousson, P.-Y.; Nicolas, E.; Hennequin, M. A follow-up study of pulpotomies and root canal treatments performed under general anaesthesia. *Clin. Oral. Investig.* **2014**, *18*, 1155–1163. [CrossRef]
16. Alsaleh, I.; Cousson, P.-Y.; Nicolas, E.; Hennequin, M. Is endodontic treatment performed under general anaesthesia technically acceptable? *Clin. Oral. Investig.* **2012**, *16*, 1599–1606. [CrossRef] [PubMed]
17. Mallineni, S.K.; Yiu, C.K.Y. A retrospective review of outcomes of dental treatment performed for special needs patients under general anaesthesia: 2-year follow-up. *Sci. World J.* **2014**, *2014*, 748353. [CrossRef] [PubMed]
18. Decerle, N.; Cousson, P.-Y.; Nicolas, E.; Hennequin, M. A Comprehensive Approach Limiting Extractions under General Anesthesia Could Improve Oral Health. *Int. J. Environ. Res. Public Health* **2020**, *17*, 7336. [CrossRef]
19. Sigal, A.V.; Sigal, M.J.; Tittley, K.C.; Andrews, P.B. Stainless steel crowns as a restoration for permanent posterior teeth in people with special needs: A retrospective study. *J. Am. Dent. Assoc.* **2020**, *151*, 136–144. [CrossRef] [PubMed]
20. Schüler, I.M.; Hiller, M.; Roloff, T.; Kühnisch, J.; Heinrich-Weltzien, R. Clinical success of stainless steel crowns placed under general anaesthesia in primary molars: An observational follow up study. *J. Dent.* **2014**, *42*, 1396–1403. [CrossRef]
21. Innes, N.P.T.; Ricketts, D.; Chong, L.Y.; Keightley, A.J.; Lamont, T.; Santamaria, R.M. Prefabricated crowns for decayed primary molar teeth. *Cochrane Database Syst. Rev.* **2015**, *12*, CD005512. [CrossRef]

22. Chen, K.; Lei, Q.; Xiong, H.; Chen, Y.; Luo, W.; Liang, Y. A 2-year clinical evaluation of stainless steel crowns and composite resin restorations in primary molars under general anaesthesia in China's Guangdong province. *Br. Dent. J.* **2018**, *225*, 49–52. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
23. Zagdwon, A.M.; Fayle, S.A.; Pollard, M.A. A prospective clinical trial comparing preformed metal crowns and cast restorations for defective first permanent molars. *Eur. J. Paediatr. Dent.* **2003**, *4*, 138–142. [[PubMed](#)]
24. Linas, N.; Faulks, D.; Hennequin, M.; Cousson, P.-Y. Conservative and endodontic treatment performed under general anesthesia: A discussion of protocols and outcomes. *Spec. Care Dent. Off. Publ. Am. Assoc. Hosp. Dent. Acad. Dent. Handicap. Am. Soc. Geriatr. Dent.* **2019**, *39*, 453–463. [[CrossRef](#)]
25. Linkevicius, T.; Puisys, A.; Vindasiute, E.; Linkeviciene, L.; Apse, P. Does residual cement around implant-supported restorations cause peri-implant disease? A retrospective case analysis. *Clin. Oral. Implants Res.* **2013**, *24*, 1179–1184. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
26. Vindasiute, E.; Puisys, A.; Maslova, N.; Linkeviciene, L.; Peculiene, V.; Linkevicius, T. Clinical Factors Influencing Removal of the Cement Excess in Implant-Supported Restorations. *Clin. Implant. Dent. Relat. Res.* **2015**, *17*, 771–778. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
27. Serino, G.; Hultin, K. Periimplant Disease and Prosthetic Risk Indicators: A Literature Review. *Implant. Dent.* **2019**, *28*, 125–137. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
28. Sharaf, A.A.; Farsi, N.M. A clinical and radiographic evaluation of stainless steel crowns for primary molars. *J. Dent.* **2004**, *32*, 27–33. [[CrossRef](#)]
29. Shi, J.-Y.; Jie-Ninull Zhuang, L.-F.; Zhang, X.-M.; Fan, L.-F.; Lai, H.-C. Peri-implant conditions and marginal bone loss around cemented and screw-retained single implant crowns in posterior regions: A retrospective cohort study with up to 4 years follow-up. *PLoS ONE* **2018**, *13*, e0191717. [[CrossRef](#)]
30. Bourdiol, P.; Hennequin, M.; Peyron, M.-A.; Woda, A. Masticatory Adaptation to Occlusal Changes. *Front. Physiol.* **2020**, *11*, 263. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
31. Fedorowicz, Z.; Carter, B.; de Souza, R.F.; Chaves C de, A.L.; Nasser, M.; Sequeira-Byron, P. Single crowns versus conventional fillings for the restoration of root filled teeth. *Cochrane Database Syst. Rev.* **2012**, *16*, CD009109.
32. Shu, X.; Mai, Q.-Q.; Blatz, M.; Price, R.; Wang, X.-D.; Zhao, K. Direct and Indirect Restorations for Endodontically Treated Teeth: A Systematic Review and Meta-analysis, IAAD 2017 Consensus Conference Paper. *J. Adhes. Dent.* **2018**, *20*, 183–194. [[PubMed](#)]
33. Pegon-Machat, E.; Jourdan, D.; Tubert-Jeannin, S. Oral health inequalities: Determinants of access to prevention and care in France. *Sante Publique Vandoeuve Nancy Fr.* **2018**, *30*, 243–251. [[CrossRef](#)]
34. Anders, P.L.; Davis, E.L. Oral health of patients with intellectual disabilities: A systematic review. *Spec. Care Dent. Off. Publ. Am. Assoc. Hosp. Dent. Acad. Dent. Handicap. Am. Soc. Geriatr. Dent.* **2010**, *30*, 110–117. [[CrossRef](#)]
35. Kanaffa-Kilijanska, U.; Kaczmarek, U.; Kilijanska, B.; Frydecka, D. Oral health condition and hygiene habits among adult patients with respect to their level of dental anxiety. *Oral. Health Prev. Dent.* **2014**, *12*, 233–239. [[PubMed](#)]
36. Dammaschke, T.; Nykiel, K.; Sagheri, D.; Schäfer, E. Influence of coronal restorations on the fracture resistance of root canal-treated premolar and molar teeth: A retrospective study. *Aust. Endod. J. J. Aust. Soc. Endodontol. Inc.* **2013**, *39*, 48–56. [[CrossRef](#)]
37. Memarpour, M.; Mesbahi, M.; Rezvani, G.; Rahimi, M. Microleakage of adhesive and nonadhesive luting cements for stainless steel crowns. *Pediatr. Dent.* **2011**, *33*, 501–504. [[PubMed](#)]
38. Reddy, R.; Basappa, N.; Reddy, V.V. A comparative study of retentive strengths of zinc phosphate, polycarboxylate and glass ionomer cements with stainless steel crowns—an in vitro study. *J. Indian Soc. Pedod. Prev. Dent.* **1998**, *16*, 9–11. [[PubMed](#)]
39. Khinda, V.I.S.; Grewal, N. Retentive [correction of Preventive] efficacy of glass ionomer, zinc phosphate and zinc polycarboxylate luting cements in preformed stainless steel crowns: A comparative clinical study. *J. Indian Soc. Pedod. Prev. Dent.* **2002**, *20*, 41–46.
40. Munoz-Sanchez, M.-L.; Linas, N.; Decerle, N.; Nicolas, E.; Hennequin, M.; Cousson, P.-Y. A Combination of Full Pulpotomy and Chairside CAD/CAM Endocrown to Treat Teeth with Deep Carious Lesions and Pulpitis in a Single Session: A Preliminary Study. *Int. J. Environ. Res. Public Health* **2020**, *17*, 6340. [[CrossRef](#)]

Annexe 2 : PI02 : Munoz-Sanchez ML, Veyrune JL, Bessadet M, Lance C, Bonnet G, Nicolas E, Decerle N. Survival Rate of CAD-CAM Endocrowns Performed by Undergraduate Students. Operative Dentistry. 2021.

Résumé :

Objectifs : Cette étude visait à évaluer le succès des restaurations de dents traitées endodontiquement par endocouronne réalisées par des étudiants de premier cycle sous la supervision d'un enseignant. L'étude visait également à identifier les facteurs susceptibles d'entraîner des échecs de ces restaurations par endocouronne.

Méthodes et matériel : Cette étude de cohorte ouverte observationnelle était basée sur les données cliniques des restaurations par endocouronne réalisées par des internes et des étudiants de premier cycle en 4e, 5e et 6e année, de juillet 2011 à mai 2018. La présence de la dent avec endocouronne sur l'arcade était le principal critère utilisé pour calculer le taux de survie des dents restaurées. La qualité des endocouronnes toujours présente sur l'arcade a été évaluée en se référant aux critères de la Fédération Dentaire Internationale. Les cas d'échec ont été catégorisés en favorables ou défavorables.

Résultats : Au total, 343 dents traitées endodontiquement ont été restaurées par endocouronne chez 315 patients. Parmi eux, 199 patients (225 endocouronnes) ont été suivis pendant une période de 56 ± 26 mois. Le taux de survie des dents restaurées était de 81,8 %, le taux de survie de Kaplan-Meier estimé étant de 71,8 % à 9 ans. Parmi les 41 cas d'échec, 32 étaient favorables (décollement et/ou fractures de la céramique) et 9 étaient défavorables.

Conclusion : Les restaurations par endocouronne de la dent postérieure traitée endodontiquement par technologie CFAO peuvent être réalisées par des étudiants de premier cycle avec un faible risque d'échec. La supervision de l'enseignant pourrait être renforcée, en couvrant toutes les étapes de la procédure d'endocouronne afin d'éviter les échecs dus à une épaisseur insuffisante ou à une perte de rétention.

Survival Rate of CAD–CAM Endocrowns Performed by Undergraduate Students

ML Munoz-Sanchez • M Bessadet • C Lance • G Bonnet
JL Veyrune • E Nicolas • M Hennequin • N Decerle

Clinical Relevance

Computer-aided design–computer-aided manufacturing (CAD–CAM) endocrown restorations could be carried out by undergraduates on posterior endodontically treated teeth with a low risk of failure. A minimum 2 mm ceramic thickness and a rigorous bonding protocol are two key prerequisites for the success of these restorations.

SUMMARY

Objectives: This study aimed to evaluate the success of computer-aided design–computer-aided manufacturing (CAD–CAM) endocrown

restorations of endodontically treated teeth (ETT) performed by supervised undergraduate students. The study also intended to identify possible factors that may lead to failures.

Marie Laure Munoz-Sanchez, DDS, University Clermont Auvergne CHU de Clermont-Ferrand, France

Marion Bessadet, DDS, PhD, University Clermont Auvergne CHU de Clermont-Ferrand, France

Cindy Lance, DDS, PhD, University Clermont Auvergne CHU de Clermont-Ferrand, France

Guillaume Bonnet, DDS, PhD, University Clermont Auvergne CHU de Clermont-Ferrand, France

Jean Luc Veyrune, DDS, PhD, HDR, University Clermont Auvergne CHU de Clermont-Ferrand, France

*Martine Hennequin, DDS, PhD, HDR, University of Clermont Auvergne, Clermont-Ferrand, France

Emmanuel Nicolas, DDS, PhD, HDR, University Clermont Auvergne, CHU de Clermont-Ferrand, France

Nicolas Decerle, DDS, PhD, University Clermont Auvergne CHU de Clermont-Ferrand, France

*Corresponding author: UFR d'Odontologie, 2 rue de Braga, 63000 Clermont-Ferrand, France; e-mail: martine.hennequin@uca.fr

<http://doi.org/10.2341/20-126-C>

Methods and Materials: This observational open cohort study was based on clinical data from endocrown restorations performed by residents and undergraduate students in their 4th, 5th, and 6th year from July 2011 to May 2018. The presence of a tooth with an endocrown on the arch was the main criteria used to calculate the survival rate of restored teeth. The quality of the remaining endocrowns was evaluated referring to the FDI criteria. The cases of failure were categorized into either favorable or unfavorable.

Results: A total of 343 ETT were restored with endocrowns in 315 patients. Among them, 199 patients encompassing 225 endocrowns were followed during a 56 ± 26 month period. The survival rate of restored teeth was found to be 81.8%, the estimated Kaplan–Meier survival rate being 71.8% at 9 years. Among the 41 failed cases, 32 were favorable (debonding and/or ceramic fractures) and 9 were unfavorable.

Conclusion: Endocrown restorations of posterior ETT using CAD–CAM technologies could be carried out by undergraduates with a low risk of failure. Teacher supervision could be reinforced, covering all steps of each endocrown procedure in order to avoid failures due to insufficient thickness or loss of retention.

INTRODUCTION

Training in the restoration of severely damaged posterior teeth remains a key area of interest, particularly in the treatment of endodontically treated teeth (ETT). Previously, the most common proposal was the use of a complete crown with a radicular anchorage (including cast and prefabricated post and cores). However, in the long term, high risks for tooth fracture were reported.¹ Direct restorations, full or partial crowns, offer alternative proposals to radicular anchorage. Two reviews reported that there was insufficient reliable evidence to determine which treatments would be more effective.^{2,3}

In 1995, Pissis proposed an original indirect restoration designed as a monobloc crown, in order to eliminate the radicular anchorage.⁴ The concept was then improved by Bindl and Mörmann, who labelled the “endocrown” as an adhesive monolithic ceramic restoration anchored in the pulp chamber, exploiting the mechanical retention properties of the pulp chamber walls.⁵ Several studies reported that the design for endocrown preparations was compatible with computer-aided design–computer-aided manufacturing (CAD–CAM) system applications.^{5,6} Many evaluations of this new type of restoration have been carried out;^{5,7–9} but all studies were difficult to compare due to differences in materials, tooth type, or procedure. Recently, a systematic review was conducted to state whether endocrowns were an appropriate restorative option with a predictable outcome for extensively damaged ETT.¹⁰ Eight clinical studies were included, reporting survival rates varying between 69% and 100%, depending on tooth type (molar or premolar) and a mean follow-up period ranging from 6 to 116 months.¹⁰

Recent studies reported optimistic long-term results for CAD–CAM endocrowns^{8,9} that suggested such treatments would be further developed for the treatment of severely damaged posterior ETT. Therefore, it seems necessary to train both undergraduates and postgraduates on how to use these new technologies. In the latest studies into endocrown evaluations, the operators were experienced practitioners, and there was no evidence of students

(especially undergraduates) possessing the clinical competencies required in order to successfully provide endocrown treatment. Introducing new procedures during the clinical stage of dental studies raises the issue of quality of care, even if students treat patients while under the teachers’ supervision. Particularly in the case of prosthodontic care, failures occurred late, usually when students had completed their studies. That could lead to insurance claims and requests for reimbursements from the establishments. Indeed, assessing the quality of endocrowns would help to update information about the quality of prosthodontic care, which should be readily available to patients treated by dental students.

In this way, this study aimed to evaluate the success of CAD–CAM endocrown restorations of root-filled teeth carried out by supervised undergraduate students and to search for possible factors that may lead to failures.

METHODS AND MATERIALS

Type of Study

This was an observational open cohort study based on clinical data from therapeutic procedures, the use of which was authorized by the local ethics committee. All patients were informed about the study and gave their consent to participate. From July 2011 to May 2018, any adult patient attending the University Dental Hospital of Clermont-Ferrand was invited to participate if he or she had received indication to restore a permanent posterior ETT with an endocrown. After enrolment, the patient was given an appointment for the tooth restoration procedure.

Procedure

Operators — CAD–CAM technologies for prosthodontics are organized as a routine procedure. Residents and undergraduate students in their 4th, 5th, or 6th year worked under the supervision of four teachers who checked each of the six following steps: 1) indication for the endocrown restoration; 2) dental preparation; 3) digital scan; 4) computer designs of the restoration; 5) bonding and sealing; and 6) occlusal adjustment and polishing.

Tooth Preparation — Endocrowns are restorations guided by conservative principles^{11,12} that preserve the maximum amount of tooth surface for bonding. Tooth preparation consisted of a circular cervical butt margin and a central retentive cavity in the pulp chamber, without root anchoring (Figure 1).⁵ Intraradicular extension of the endocrown preparation negatively

affected both the marginal adaptation and the internal fit of the final restoration.¹³ Endocrown pulp chamber extension depth was not greater than 2 mm.¹⁴ A minimum thickness of 2 mm had to be achieved under the entire occlusal surface in order to create sufficient space for the restorative material in a full cuspal coverage objective. The axial preparation was carried out to permit continuity between the access cavity and pulp chamber, with a total occlusal convergence angle of 7°; and, always in the interest of maximum preservation of residual tissue, any undercut would be filled with a resin composite to avoid unnecessary overpreparation of the cavity. The use of a small resin composite supply may be useful to provide enhanced geometry and remove undercuts from the endodontic preparation.¹⁵ All internal line angles were rounded. The endocrown restored the occlusal surface and occlusal part of the dental walls, as is also achieved with an overlay. There was no peripheral preparation. The preparation was to be supragingival to facilitate digital scanning and bonding. If the occlusal part of the residual walls was less than 2 mm thick, the walls were then reduced in height until reaching 2 mm.

Endocrown Materials — Two reinforced glass-ceramics from Ivoclar Vivadent (IPS Empress CAD [with leucite crystals] and IPS e.max CAD [with lithium disilicate]) were used for milling endocrowns, depending on the supervisor indications.

Milling — For the duration of the study, a Bluecam system with Cerec 3D and Cerec SW 4, then an Omnicam system with Cerec Omnicam 4.4 and Cerec Omnicam SW 4.5 were used for digital scanning and endocrown milling. Crystallization was achieved within 20 minutes for IPS e.max CAD restorations (Programat CS, Ivoclar Vivadent). IPS Empress CAD pieces were oven glazed.

Etching — After milling, ceramic pieces were etched with 9.5% hydrofluoric acid (Porcelain Etch, Ultradent), according to the manufacturer's recommendations, for different durations (60 sec for IPS Empress CAD, 20 sec for IPS e.max CAD). A silane was then applied to the intaglio surface of the endocrown (Monobond Plus, Ivoclar Vivadent).

Bonding — Two bonding procedures were followed. For cases being treated without the use of a rubber dam, a selective etching was made, limited to enamel, and an auto-adhesive cement (RelyX Unicem, 3M Oral Care) was used for sealing the endocrown. For teeth being treated using a rubber dam, enamel was etched for 30 seconds and dentin for 15 seconds. A dual

cure adhesive (Excite DSC, Ivoclar Vivadent) and a resin cement (Variolink II, Ivoclar Vivadent) were used for bonding and sealing, respectively.

Finishing — Proximal contacts were checked with dental floss. Control for occlusion was made with finishing burs and using 200 µm occlusion paper.

Study Criteria

Primary Criteria — The presence of the tooth with the endocrown was the main criteria used to calculate the survival rate of restored teeth. Survival was defined as the tooth remaining in the arch and the restoration of the tooth with or without modifications made during the observation period.¹⁶

Secondary Criteria — The quality of the surviving endocrowns was evaluated, referring to the FDI criteria.¹⁷ Two independent investigators assessed according to the FDI calibration procedure, adapted for a visual assessment. They proceeded to the evaluation of 14 of the 16 FDI criteria at each control session. At each step of evaluation, the investigators were blinded from the operator, the materials and procedures, and the follow-up duration.

FDI criteria are grouped into three categories: 1) Aesthetic properties (condition surface, surface coloring, color and translucency stability, and anatomical shape); 2) Functional properties (fracture and retention, marginal adaptation, contouring occlusal and wear, proximal contact point/food blockage, radiographic examination, and the patient's point of view); and 3) Biological properties (postoperative hypersensitivity and pulp vitality, recurrent decay/erosion/abfraction,

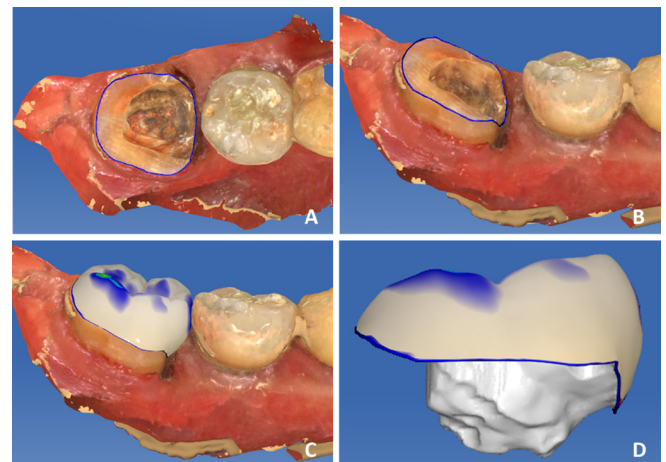


Figure 1: Cerec screenshots for computer design of the endocrown: A) Occlusal view of the preparation; B) buccal view of the preparation; C) buccal view of the Cerec endocrown model before milling; D) endocrown model before milling.

tooth integrity, periodontal response, adjacent mucous membrane, and oral or general health). The criteria for postoperative/pulp vitality and for occlusal contour/wear were not applicable in this study. Each criteria was scored from 1 to 5—the highest values signifying poor quality (score 1 is “clinically excellent/very good”, score 2 is “clinically good”, score 3 is “clinically sufficient/satisfactory”, score 4 is “clinically unsatisfactory,” and score 5 is “clinically poor.”).

The causes for failure were categorized into two types^{18,19}: i) Unfavorable or catastrophic failure—the tooth was lost or unrestorable due to fracture below the height of bone level simulation; ii) favorable failure—the endocrown was partially or totally lost (debonding), but the tooth was still restorable with another endocrown or other type of restoration, or the endocrown was fractured without fracture of the tooth.

For each unfavorable failure case, Cerec computer designs of the restorations were collected and analyzed by the blinded investigators. The minimal thickness of each piece was measured using the “cut” and “measure” tools of the Cerec software. Thickness default was recorded for the pieces with a minimal thickness of lower than 2 mm. The continuity of the peripheral limit, which was selected to proceed to milling, was analyzed. The defaults in limits position were checked in accordance with the literature.²⁰

Follow-up

The first evaluation was carried out during the endocrown bonding session for the cases without rubber dam use and one week later for the cases bonded under rubber dam. The one-week delay was related to the use of rubber dam, which could alter the degree of rehydration in the tooth and, in turn, its color. The clamp could also induce gingival bleeding. This could influence evaluation of the corresponding FDI criteria: “color and translucency stability,” “periodontal response,” and “adjacent mucous membrane”. The patient was then scheduled for further appointments 6 months post-treatment, and every year thereafter. Clinical examinations were conducted to assess the survival of the tooth at the arch, the presence of the endocrown, and, where relevant, its quality using FDI criteria.

Investigators

Two investigators were trained on an online training and calibration site (www.e-calib.info) in December 2011 (MLMS, ND). Each of them evaluated each restoration independently at each study step. After both evaluations, the scores were compared. When evaluations ranged from 1 to 3, both the values were

averaged. When at least one investigator scored 4 or 5, a consensual value was then obtained after re-examination of the patient.

Statistical Analysis

The statistical tests were carried out with the software SPSS 22.0. The survival probabilities were estimated with Kaplan–Meier method. The FDI score criteria were compared between the first and the last evaluation, with paired student’s *t*-test.

To evaluate the impact of the follow-up duration, data for the FDI criteria being significant after student’s *t*-test were subcategorized into four equivalent quartiles based on the values of the follow-up duration. ANOVA was applied for intergroup comparisons. Log-rank testing was applied to compare survival probabilities, according to tooth type and the rubber dam utilization linked with the bonding system used.

RESULTS

From July 2011 to May 2018, 343 root-filled molar or premolar teeth were restored with endocrowns in 315 patients. Among them, 199 patients were included in the cohort. Fifty-seven patients were lost to follow-up, one patient was deceased, and 56 missed the last appointment. The flow diagram of the cohort is presented in Figure 2.

Overall, 225 endocrowns were evaluated during 56.11 ± 25.94 months, 113 being recalled from 6 months to 4 years and 112 being recalled from 5 years to 9 years. The distribution of endocrowns per student year was 18.7% in 4th year, 41% in 5th year, 20.9% in 6th year, and 19.4% were residents. The distribution of endocrowns per student gender was 43.9% male students and 56.1% female students.

The survival rate of restored teeth was of 81.8%. The estimated Kaplan–Meier survival rate was 71.8% at 9 years (Figure 3). The survival rates were not affected by tooth type, use of rubber dam, or bonding system. The estimated Kaplan–Meier success rate was 58% at 9 years (Figure 4).

The comparisons of mean scores for FDI criteria between initial and final evaluation in the group of successful endocrowns are presented in Table 1. A statistically significant degradation could be noted for the criteria “surface staining,” “color stability and translucency,” and “patient’s view,” whereas the “anatomic form” and “oral and general health” criteria showed a statistically significant improvement over time. Color stability and translucency was the single variable varying differently with follow-up duration

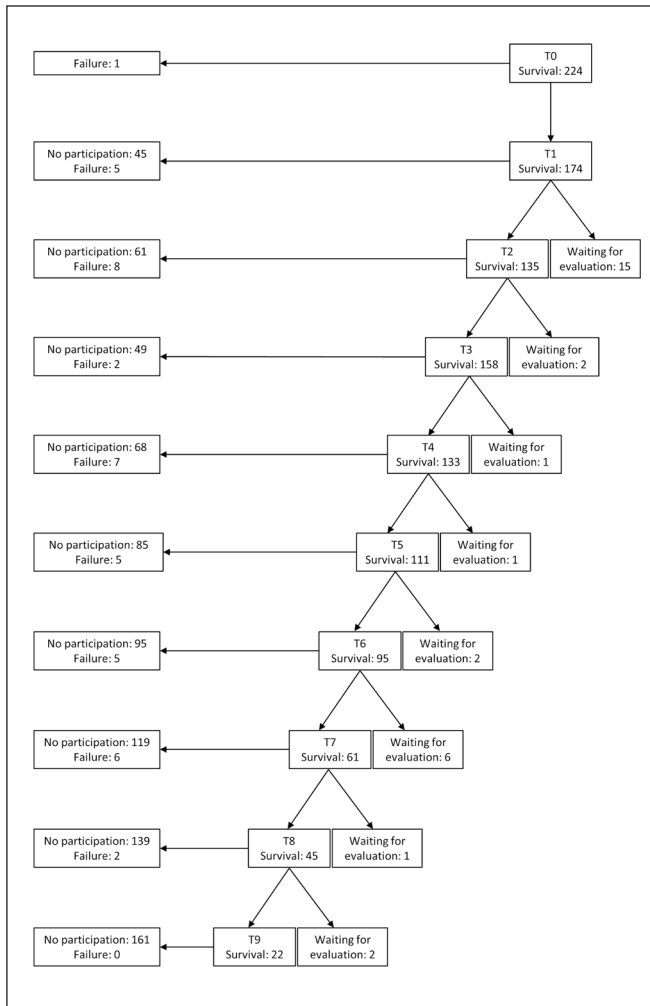


Figure 2: Flow diagram of the endocrown cohort.

(Table 2). Mean FDI score value for Quartile 1 with short duration follow-up was significantly lower than the three other groups with longer duration follow-up.

The distribution of the retrospective evaluation results, of 41 cases of failure on captured images in the Cerec system, is presented in Table 3. The analysis of failures showed that almost all failed restorations could be explained by the ceramic thickness or by an error in the preparation limits previously defined by the student on the digital scan.

DISCUSSION

Endocrown restorations of posterior ETT using CAD-CAM technologies could be carried out by undergraduates with a low risk of failure before five years. Exposing the students to the outcome of their work would be a matter to be covered in teaching. However, students who had treated their patients for 2

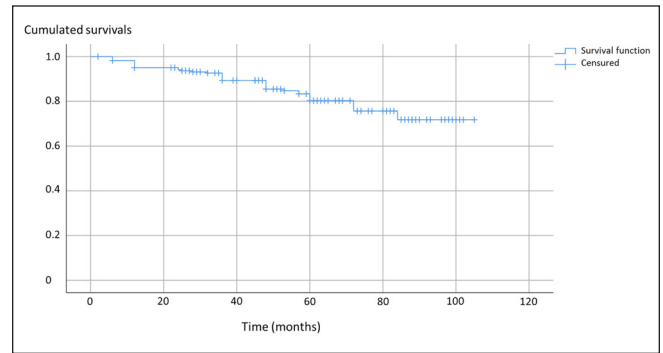


Figure 3: Survival function of endocrowns carried out by students on root-filled molars and premolars.

or 3 years and then left university could not experience the long-term results of their prosthetic work. The representations they have of the success, failures, and limits of the dental treatments were not based on self-experimentation. It is, therefore, important to analyze the clinical activities of the students in order for new classes of students to be able to appreciate the possible differences between literature data and the realistic outcome of their activities. Introducing new procedures into the dental curriculum required discussions on several points: i) which improvements the new procedure is supposed to bring to professional practices; ii) are the survival rates of endocrowns performed by students comparable to those of conventional peripheral crowns performed by students and to those of endocrowns performed by experimental operators?; iii) what could be learned from the failure of endocrowns performed by students?; iv) what should be changed in the endocrown operative protocol in order to attenuate the impact of time on FDI criteria and, in particular, on color stability and translucency.

Providing teaching on endocrowns rather than conventional crowns to students has several

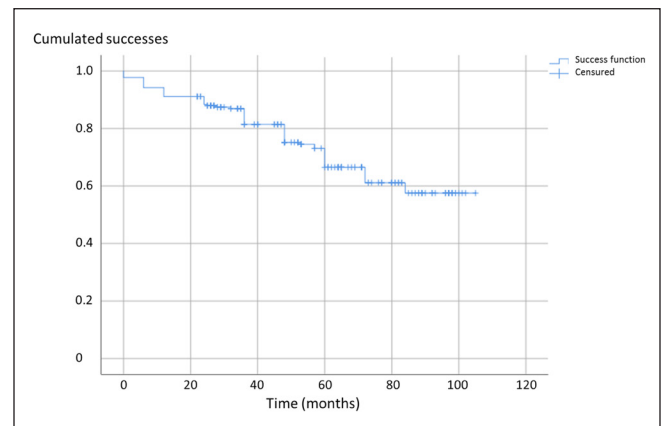


Figure 4: Kaplan-Meier success curve of endocrowns carried out by students on root-filled molars and premolars.

Table 1: Comparison of the Mean FDI Scores Values (\pm SD) for Each Clinical Criteria Between Initial and Final Evaluation in the Group of Successful Endocrowns ($n=184$)

	Initial Evaluation	Final Evaluation	Comparison (Paired Student's t- Test)
Surface luster	1.08 \pm 0.23	1.04 \pm 0.21	NS
Surface staining	1.04 \pm 0.17	1.11 \pm 0.34	$p=0.008$
Color stability and translucency	1.93 \pm 0.63	2.24 \pm 0.79	$p<0.001$
Anatomic form	1.51 \pm 0.64	1.32 \pm 0.57	$p<0.001$
Fracture and retention	1.01 \pm 0.12	1.04 \pm 0.28	NS
Marginal and adaptation	1.51 \pm 0.70	1.55 \pm 0.66	NS
Contact points			
Mesial contact point	1.37 \pm 0.64	1.54 \pm 0.88	NS
Distal contact point	1.49 \pm 0.82	1.48 \pm 0.92	NS
Radiographic examination	1.38 \pm 0.85	1.34 \pm 0.77	NS
Patient's view	1.08 \pm 0.36	1.21 \pm 0.66	$p=0.008$
Recurrence of caries, erosion, abfraction	1.01 \pm 0.07	1.03 \pm 0.26	NS
Tooth integrity	1.01 \pm 0.07	1.01 \pm 0.08	NS
Periodontal response	1.23 \pm 0.52	1.21 \pm 0.51	NS
Adjacent mucosa	1.01 \pm 0.08	1.01 \pm 0.07	NS
Oral and general health	1.01 \pm 0.08	1.00 \pm 0.00	$p=0.02$

FDI criteria scores: 1: clinically excellent/very good; 2: clinically good; 3: clinically sufficient/satisfactory; 4: clinically unsatisfactory; 5: clinically poor.

advantages. Firstly, it could be performed immediately or during the consecutive session following endodontic treatment, reducing the number of patient visits. Moreover, it has been reported that early placement of permanent coronal restoration increases the longevity of ETT.²¹ Since the advent of the chairside CAD-CAM system, endocrowns can be bonded in one session. However, conventional crowns take at least 3 sessions. Secondly, compared to conventional restoration with root anchorage and peripheral metal or ceramic crown, the endocrown restoration represents only one single bonding interface. It forms an adhesively luted ceramic restoration-composite cement-residual tooth structure biomechanical unit.²² Limiting the number of bond interfaces renders the restoration less susceptible to the adverse effects of degradation of the hybrid layer.²³

The survival rate of endocrowns assessed in the present study (71.8% at 9 years) is similar to that of a recent study on classical peripheral crowns, with or without post, made by 4th and 5th year students in Saudi Arabia (76% at 8 years).²⁴ The practitioner's experience seems to have an impact on the survival rate of indirect coronal restoration, whatever its type.

It was reported that teeth that were treated by 4th year students were more likely to be extracted than those treated by 5th year students.²⁴ It could be argued that students with less knowledge and/or motor skills have a higher risk of unfavorable or catastrophic failures leading to extractions.

If there was already an impact of the level of experience (between the 4th and 5th year of study) on the survival rate of endocrowns, it, therefore, seems normal to find a noticeable difference between the survival rates of restorations carried out by students and those carried out by experienced practitioners. Endocrown restorations performed by specialized practitioners showed a success rate of 99.8% to 4.5 years on average, which is higher than the results of the present study (81.8% for a similar average follow-up time).⁸ This difference is also reflected in the success rate of conventional crown restorations performed by specialists (98.7%) compared to the same restorations performed by students (76%).²⁴

Failure cases among endocrowns performed by the students are higher than among those carried

Tables 2: Comparison of FDI Mean Scores (\pm SD) for Clinical Criteria Between Initial and Final Assessment at Different Follow-up Duration in the Group of Successful Endocrowns (n=184)

Quartiles of Follow-up Duration (Months)	Quartile 1 n=46		Quartile 2 n=46		Quartile 3 n=46		Quartile 4 n=46		Comparisons	
	Mean \pm SD	Min – Max	Mean \pm SD	Min – Max	Mean \pm SD	Min – Max	Mean \pm SD	Min – Max	F	Risk alpha
Mean \pm SD	29.0 \pm 10		51.0 \pm 17		71.5 \pm 12		133.0 \pm 17			
Min – Max	22–36		39–63		64–80		81–105			
Mean scores \pm SD for FDI criteria	Initial	Final	Initial	Final	Initial	Final	Initial	Final	F	Risk alpha
Surface staining	1.02 \pm 0.10	1.08 \pm 0.26	1.0 \pm 0.10	1.10 \pm 0.27	1.00 \pm 0.00	1.13 \pm 0.45	1.11 \pm 0.28	1.14 \pm 0.34	ns	
Color stability and translucency	1.73 \pm 0.60	1.87 \pm 0.62	2.10 \pm 0.59	2.35 \pm 0.82	2.12 \pm 0.73	2.31 \pm 0.86	1.77 \pm 0.50	2.42 \pm 0.75	5.001	p=0.002
Anatomic form	1.28 \pm 0.47	1.16 \pm 0.37	1.70 \pm 0.72	1.40 \pm 0.57	1.63 \pm 0.74	1.26 \pm 0.51	1.43 \pm 0.53	1.43 \pm 0.73	2.837	p=0.039
Patient's view	1.01 \pm 0.07	1.21 \pm 0.72	1.07 \pm 0.23	1.15 \pm 0.43	1.23 \pm 0.66	1.26 \pm 0.83	1.02 \pm 0.10	1.22 \pm 0.63	ns	
Oral and general health	1.00 \pm 0.00	1.00 \pm 0.00	1.01 \pm 0.07	1.00 \pm 0.00	1.00 \pm 0.00	1.00 \pm 0.00	1.04 \pm 0.14	1.00 \pm 0.00	ns	

Abbreviation: ns = not significant.

Table 3: Retrospective Evaluations of 41 Cases of Failures on Captured Images in the Cerec System

Failure Type	Criteria	Correct	Ceramic Thickness Less Than 2 mm (A)	Peripheral Limits (B)	A+B
Favorable failure	Endocrown fracture	0	7	4	3
	Debonding	2	2	1	5
	Periodontal failure	1	0	0	0
	Recurrent Carious Lesion	0	1	0	0
	Endodontic Retreatment	1	0	0	2
	Operator's mistake	0	1	0	1
	Dental fracture	0	1	0	0
Subtotal		4	28		
Unfavorable failure	Endocrown fracture	0	1	2	0
	Periodontal failure	0	0	1	0
	Recurrent Carious Lesion	0	0	0	2
	Tooth fracture	1	1	0	1
Subtotal		1	8		

out by experimental practitioners in previous studies (Table 4). This provided the opportunity to analyze the reasons behind endocrown failures. Reasons for failure were reported in a recent systematic review that included eight studies of variable follow-up period

duration: the unsuccessful restorations were mainly due to loss of retention (53%) and fracture (14%).¹⁰ The rate of debonding occurrence varied between 0% and 16%. Generally, insufficient bonding protocol is often evoked to explain ceramic pieces debonding.^{10,25,26} It

Table 4: Survival and Failures Rates of Endocrowns on Endodontically Treated Teeth (ETT) Reported in Previous Studies According to the Sealing Protocols

Study	Number	Bonding Protocol	Rubber Dam Use	Survival Rate	Follow-up Period (Months)		Failures		
					Mean	Range	Debonding	Fracture	
								Endo-crown	Tooth
Bindl and Mörmann (1999) ⁵	19	Tetric Ivoclar Vivadent; Panavia 21 TC, Kuraray Noritake	Yes : 4 cases No: 15 cases	All: 95% M: 93.3% PM: 100%	26±6	14–35.5	5.3%	0	0
Otto (2004) ³³	10	Duo Cement Plus, Coltène	Yes	All: 100%	15±ND	12-16	0	0	0
Bindland others (2005) ⁷	86	Tetric Ivoclar Vivadent	No	M: 87.1% PM: 68.8%	52±15	ND	16.3%	0	2.3%
Bernhart and others (2010) ³⁴	20	Panavia F2.0, Kuraray Noritake	Yes	M: 90%	ND	max: 24 ± 2	0	5%	5%
Decerle and others (2014) ¹⁷	16	RelyX Unicem, 3M	Yes	M: 90.9% PM: 100%	6	ND	0	0	0
Otto and Mörmann (2015) ³⁵	25	Duo Cement Plus, Coltène	Yes	M: 90.5% PM: 75%	116±ND	109-146	8%	4%	0
Belleflamme and others (2017) ⁹	99	Variolink II, Ivoclar Vivadent	ND	All: 99%	44.7±34.6	ND	2%	0	1%
Fages and others (2017) ⁸	235	RelyX Unicem, 3M	No	M: 99.8%	55.2±5.13	ND	0	0.43%	0
Present study	178	RelyX Unicem, 3M	No	All: 78.7%	61.0±24.5	2-105	5.6%	9 %	1.7%
	47	Variolink II, Ivoclar Vivadent	Yes	All: 93.6%	37.6±22.9	6-98	0	2.1%	2.1%

Abbreviations: M = molars; ND = no data; PM = premolars.

could be suggested that the use of a rubber dam could influence the survival rate of endocrowns by reducing the number of failures due to debonding. In fact, Table 4 shows that four out of the eight studies reported the use of a rubber dam, but their success rates for endocrown did not differ from those which did not use it. In addition, many studies have not found a causal link between rubber dam use and improvement of performances of direct adhesive restorations.²⁷⁻²⁹ The analysis of endocrown failures by fracture reported a variation ranging from 0% to 9%. One recent literature review showed a link between a thickness inferior to 2 mm and failure of ceramic onlay.²⁵ The present study reports that insufficient preparation thickness is also a cause for fractured endocrowns, when students are operators. Teacher supervision could be reinforced, covering all steps of the endocrown procedures. In particular, captured image analysis for the design of the finish line and the expected ceramic thicknesses could be awarded more attention. Teaching students how to use the digital tools of CAD–CAM software to evaluate the thickness of future restoration could prevent failures.

Among the FDI criteria associated with time, some improved and others worsened between the initial and the final evaluations. The improvement of anatomical form could be explained by physiological wear of the prosthodontic part and/or by the occlusal setting that occurs spontaneously during the first weeks postoperatively. Degradation of the “patient’s view” could be linked to the “color stability and translucency” and “surface staining” criteria. It was already shown that the color of root-filled teeth changed with time,³⁰ and the criteria “color stability and translucency” is time-dependent appearing after several years (Table 2). Three proposals were reported to improve CAD–CAM restoration aesthetics. First, nonvital bleaching carried out before the restoration was recommended to prevent discolorations over time³¹; however, the long-term results are limited. Second, changing the design of the preparation finish line would have more predictable aesthetic results. A shoulder preparation design or the positioning of the circular, cervical butt margin near the gingival margin are described protocols that result in less enamel thickness, in turn, altering the quality of bonding. A 45° bevel design for the preparation finish line resulted in a better esthetic integration limiting the loss of tissue. This design would be more favorable in terms of bonding and resistance.²² This was indicated for endocrowns where aesthetic requirements are met. Third, when the endocrown was made into composite blocks, a discrete double bevel on both the restoration limit and

the enamel border was created with a fine diamond cutting rotary instrument to 1.5-mm thickness. This minimal preparation could then be filled with a resin composite layer in order to improve the aesthetics of the restoration-tooth transition.³²

This study had some limitations. Firstly, the return rates of the patients decreased with time, half of the endocrown cohort being lost to follow-up after 5 years. The limited number of trained investigators could partially explain this low rate. Their presence in the service was limited to some days, and some evaluations were probably lost for this reason. However, return rates in open cohorts are often low, particularly for studies conducted on routine care. The ethical frame of studies on routine care did not allow any changes in the organization nor the observed dental procedure. For this reason, it was not possible to recall the patients for evaluation appointments. Secondly, endocrown evaluations were only taken on by calibrated investigators. Comparisons of T0 evaluations between calibrated investigators and students would be possible. Asking the student operator to evaluate the endocrown he/she carried out at T0 would be interesting, as that would allow him/her to use the evaluation criteria, and to then ask themselves what the outcome of the treatment should be. Moreover, this could prepare the students for self-evaluation of professional practices, giving them tools to compare direct or indirect restorations, for example.

CONCLUSIONS

Undergraduate students could be trained to restore root-filled posterior teeth with CAD–CAM endocrowns. Teacher supervision should cover all steps of carrying out endocrown procedures in order to limit the number of failures. The evaluation criteria of this study could be referred to any practitioner or teacher aiming to evaluate the professional practices according to the Deming cycle method.

Acknowledgement

This study did not receive any external financial support directed to its development, aside from the author’s support and human and facilities’ resource.

Regulatory Statement

This study was conducted in accordance with all the provisions of the human subjects’ oversight committee guidelines and policies of Comité d’Ethique des Centres d’Investigation Clinique del’inter-région Rhône-Alpes-Auvergne. The approval code issued for this study is CE-CIC-GREN-11/17.

Conflict of Interest

The authors of the present study certify that they have no proprietary, financial, or other personal interest of any nature or kind in any product, service, and/or company that is presented in the present article.

(Accepted 6 November 2020)

REFERENCES

- Raedel M, Fiedler C, Jacoby S, & Boening KW (2015) Survival of teeth treated with cast post and cores: A retrospective analysis over an observation period of up to 19.5 years *Journal of Prosthetic Dentistry* 114(1) 40-45. <https://doi.org/10.1016/j.prosdent.2014.08.017>
- Fedorowicz Z, Carter B, de Souza RF, Chaves C de AL, Nasser M, & Sequeira-Byron P (2012) Single crowns versus conventional fillings for the restoration of root filled teeth *Cochrane Database Systematic Reviews* 5 CD009109. <https://doi.org/10.1002/14651858.CD009109.pub2>
- Shu X, Mai Q-Q, Blatz M, Price R, Wang X-D, & Zhao K (2018) Direct and Indirect Restorations for Endodontically Treated Teeth: A Systematic Review and Meta-analysis, IAAD 2017 Consensus Conference Paper *Journal of Adhesive Dentistry* 20(3) 183-194. <https://doi.org/10.3290/j.jad.a40762>
- Pissis P (1995) Fabrication of a metal-free ceramic restoration utilizing the monobloc technique *Practical Periodontics Aesthetic Dentistry* 7(5) 83-94.
- Bindl A & Mörmann WH (1999) Clinical evaluation of adhesively placed Cerec endo-crowns after 2 years--preliminary results *Journal of Adhesive Dentistry* 1(3) 255-265.
- Fages M & Bennasar B (2013) The endocrown: a different type of all-ceramic reconstruction for molars *Journal of the Canadian Dental Association* 79 d140.
- Bindl A, Richter B, & Mörmann WH (2005) Survival of ceramic computer-aided design/manufacturing crowns bonded to preparations with reduced macroretention geometry *International Journal of Prosthodontics* 18(3) 219-224.
- Fages M, Raynal J, Tramini P, Cuisinier FJ, & Durand J-C (2017) Chairside computer-aided design/computer-aided manufacture all-ceramic crown and endocrown restorations: A 7-year survival rate study *International Journal of Prosthodontics* 30(6) 556-560. <https://doi.org/10.11607/ijp.5132>
- Belleflamme MM, Geerts SO, Louwette MM, Grenade CF, Vanheusden AJ, & Mainjot AK (2017) No post-no core approach to restore severely damaged posterior teeth: An up to 10-year retrospective study of documented endocrown cases *Journal of Dentistry* 63 1-7. <https://doi.org/10.1016/j.jdent.2017.04.009>
- Govare N & Contrepolis M (2020) Endocrowns: A systematic review *Journal of Prosthetic Dentistry* 123(3) 411-418.e9. <https://doi.org/10.1016/j.prosdent.2019.04.009>
- Dogui H, Abdelmalek F, Amor A, & Douki N (2018) Endocrown: An alternative Approach for restoring endodontically treated molars with large coronal destruction *Case Reports in Dentistry* 2018 1581952. <https://doi.org/10.1155/2018/1581952>
- Lander E & Dietschi D (2008) Endocrowns: a clinical report *Quintessence International* 39(2) 99-106.
- Gaintantzopoulou MD & El-Damanhoury HM (2016) Effect of preparation depth on the marginal and internal adaptation of computer-aided design/computer-assisted manufacture endocrowns *Operative Dentistry* 41(6) 607-616. <https://doi.org/10.2341/15-146-L>
- Hayes A, Duvall N, Wajdowicz M, & Roberts H (2017) Effect of endocrown pulp chamber extension depth on molar fracture resistance *Operative Dentistry* 42(3) 327-334. <https://doi.org/10.2341/16-097-L>
- Magne P, Carvalho AO, Bruzi G, Anderson RE, Maia HP, & Giannini M (2014) Influence of no-ferrule and no-post buildup design on the fatigue resistance of endodontically treated molars restored with resin nanoceramic CAD/CAM crowns *Operative Dentistry* 39(6) 595-602. <https://doi.org/10.2341/13-004-L>
- Vagropoulou GI, Klifopoulou GL, Vlahou SG, Hirayama H, & Michalakis K (2018) Complications and survival rates of inlays and onlays vs complete coverage restorations: A systematic review and analysis of studies *Journal of Oral Rehabilitation* 45(11) 903-920. <https://doi.org/10.1111/joor.12695>
- Decerle N, Bessadet M, Munoz-Sanchez ML, Eschevins C, Veyrune J, & Nicolas E (2014) Evaluation of Cerec endocrowns: A preliminary cohort study *European Journal of Prosthodontics and Restorative Dentistry* 22(2) 89-95.
- Sedrez-Porto JA, Rosa WL de O da, da Silva AF, Münchow EA, & Pereira-Cenci T (2016) Endocrown restorations: A systematic review and meta-analysis *Journal of Dentistry* 52 8-14. <https://doi.org/10.1016/j.jdent.2016.07.005>
- El-Damanhoury HM, Haj-Ali RN, & Platt JA (2015) Fracture resistance and microleakage of endocrowns utilizing three CAD-CAM blocks *Operative Dentistry* 40(2) 201-210. <https://doi.org/10.2341/13-143-L>
- Beier US, Grunert I, Kulmer S, & Dumfahrt H (2007) Quality of impressions using hydrophilic polyvinyl siloxane in a clinical study of 249 patients *International Journal of Prosthodontics* 20(3) 270-274.
- Yee K, Bhagavatula P, Stover S, Eichmiller F, Hashimoto L, MacDonald S, & Barkley G (2018) Survival rates of teeth with primary endodontic treatment after core/post and crown placement *Journal of Endodontics* 44(2) 220-225. <https://doi.org/10.1016/j.joen.2017.08.034>
- Politano G, Van Meerbeek B, & Peumans M (2018) Nonretentive bonded ceramic partial crowns: Concept and simplified protocol for long-lasting dental restorations *Journal of Adhesive Dentistry* 20(6) 495-510. <https://doi.org/10.3290/j.jad.a41630>
- De Munck J, Van Landuyt K, Peumans M, Poitevin A, Lambrechts P, Braem M, & Van Meerbeek B (2005) A critical review of the durability of adhesion to tooth tissue: Methods and results *Journal of Dental Research* 84(2) 118-132. <https://doi.org/10.1177/154405910508400204>
- Sadaf D (2020) Survival Rates of Endodontically Treated teeth after placement of definitive coronal restoration: 8-Year retrospective study *Therapeutics and Clinical Risk Management* 16 125-131. <https://doi.org/10.2147/TCRM.S223233>

25. Abduo J & Sambrook RJ (2018) Longevity of ceramic onlays: A systematic review *Journal of Esthetics and Restorative Dentistry* **30**(3) 193-215. <https://doi.org/10.1111/jerd.12384>
26. van Dijken JW, Hasselrot L, Ormin A, & Olofsson AL (2001) Restorations with extensive dentin/enamel-bonded ceramic coverage. A 5-year follow-up *European Journal of Oral Sciences* **109**(4) 222-229. <https://doi.org/10.1034/j.1600-0722.2001.00063.x>
27. Brunthaler A, König F, Lucas T, Sperr W, & Schedle A (2003) Longevity of direct resin composite restorations in posterior teeth *Clinical Oral Investigations* **7**(2) 63-70. <https://doi.org/10.1007/s00784-003-0206-7>
28. Raskin A, Setcos JC, Vreven J, & Wilson NH (2000) Influence of the isolation method on the 10-year clinical behaviour of posterior resin composite restorations *Clinical Oral Investigations* **4**(3) 148-152. <https://doi.org/10.1007/s007840000069>
29. Daudt E, Lopes GC, & Vieira LC (2013) Does operator field isolation influence the performance of direct adhesive restorations? *Journal of Adhesive Dentistry* **15**(1) 27-32. <https://doi.org/10.3290/j.jad.a28194>
30. Greta DC, Colosi HA, Gasparik C, & Dudea D (2018) Color comparison between non-vital and vital teeth *Journal of Advanced Prosthodontics* **10**(3) 218-226. <https://doi.org/10.4047/jap.2018.10.3.218>
31. Rocca GT & Krejci I (2013) Crown and post-free adhesive restorations for endodontically treated posterior teeth: from direct composite to endocrowns *European Journal of Esthetic Dental* **8**(2) 156-179.
32. Rocca GT, Bonnafous F, Rizcalla N, & Krejci I (2010) A technique to improve the esthetic aspects of CAD/CAM composite resin restorations *Journal of Prosthetic Dentistry* **104**(4) 273-275. [https://doi.org/10.1016/S0022-3913\(10\)60138-2](https://doi.org/10.1016/S0022-3913(10)60138-2)
33. Otto T (2004) Computer-aided direct all-ceramic crowns: preliminary 1-year results of a prospective clinical study *International Journal of Periodontics and Restorative Dentistry* **24**(5) 446-455. <https://doi.org/10.11607/prd.00.0601>
34. Bernhart J, Bräuning A, Altenburger MJ, & Wrbas KT (2010) Cerec3D endocrowns--two-year clinical examination of CAD/CAM crowns for restoring endodontically treated molars *International Journal of Computerized Dentistry* **13**(2) 141-154.
35. Otto T, & Mörmann WH (2015) Clinical performance of chairside CAD/CAM feldspathic ceramic posterior shoulder crowns and endocrowns up to 12 years *International Journal of Computerized Dentistry* **18**(2) 147-161.

Annexe 3 : PI03 : Munoz-Sanchez ML, Linas N, Decerle N, Nicolas E, Hennequin M, Cousson PY. A Combination of Full Pulpotomy and Chairside CAD/CAM Endocrown to Treat Teeth with Deep Carious Lesions and Pulpitis in a Single Session: A Preliminary Study. *Int J Environ Res Public Health*. 2020;17(17):6340.

Résumé :

Les chances de réussite d'une pulpotomie thérapeutique peuvent dépendre de la possibilité de réaliser la restauration coronaire en une seule et même séance. Le développement de la technologie CFAO (conception et fabrication assistées par ordinateur) au fauteuil a permis de réaliser la restauration indirecte des dents traitées endodontiquement en une seule séance.

Cette étude visait à évaluer les résultats à long terme d'une dent présentant un diagnostic de pulpite et une lésion carieuse profonde et/ou étendue, traitée par pulpotomie thérapeutique à la Biodentine™ et immédiatement restaurée par une endocouronne CFAO dans la même séance de soins. L'étude a porté sur une cohorte de 30 molaires qui ont été traitées par pulpotomie et endocouronne CFAO. Des examens cliniques et radiologiques ont été programmés à 1, 6 et 12 mois après l'opération.

Dans l'ensemble, tous les traitements ont été efficaces à tous les moments du suivi.

Les résultats de cette étude doivent être confirmés par un suivi à plus long terme pour permettre une comparaison avec la littérature.

Cette combinaison originale de traitements endodontiques et restaurateurs offre un continuum endo-prothétique en une seule séance, avec l'objectif d'un succès à long terme.



Article

A Combination of Full Pulpotomy and Chairside CAD/CAM Endocrown to Treat Teeth with Deep Carious Lesions and Pulpitis in a Single Session: A Preliminary Study

Marie-Laure Munoz-Sanchez ^{1,2}, Natacha Linas ^{1,2}, Nicolas Decerle ^{1,2}, Emmanuel Nicolas ^{1,2} ,
Martine Hennequin ^{1,2,*} and Pierre-Yves Cousson ^{1,2}

¹ Centre de Recherche en Odontologie Clinique (CROC), Université Clermont Auvergne, F-63000 Clermont-Ferrand, France; mlmunozsanchez@gmail.com (M.-L.M.-S.); natacha.linas@uca.fr (N.L.); nicolas.decerle@uca.fr (N.D.); emmanuel.nicolas@uca.fr (E.N.); p-yves.cousson@uca.fr (P.-Y.C.)

² CHU Clermont-Ferrand, Service d'Odontologie, F-63003 Clermont-Ferrand, France

* Correspondence: martine.hennequin@uca.fr

Received: 29 July 2020; Accepted: 27 August 2020; Published: 31 August 2020



Abstract: A higher chance of carrying out a successful full pulpotomy may depend on whether the coronal restoration can be completed within a single appointment. The development of chairside CAD/CAM (Computer Aided Design and Manufacturing) technology has made it possible to carry out indirect restoration of endodontically treated teeth in a single session. This study aimed to evaluate the long-term outcome of a full pulpotomy with Biodentine™ immediately covered with a chairside CAD/CAM endocrown on teeth affected by pulpitis and deep carious lesions. The investigation involved a cohort of 30 molars that were treated by pulpotomy and CAD/CAM endocrown. Clinical and radiological examinations were scheduled at 1, 6, and 12 months postoperatively. Overall, all treatments were effective at any time during the follow-up. The results of this study need to be confirmed with a longer-term follow-up to allow for comparison with the literature. This original combination of endodontic and restorative treatments provides an Endo-prosthetic continuum in a single session, with the objective of long-term success in terms of tooth health.

Keywords: deep carious lesions; pulpitis; full pulpotomy; chairside; CAD/CAM restoration

1. Introduction

Over the last decade, aided by simultaneous progress in biological research and development of materials, recommendations have been made for carious tissue removal and caries management in vital teeth with the aim of preserving tooth tissue and retaining teeth in the long term. Minimum intervention principles now guide both restorative dentistry and endodontics [1,2]. When a tooth with severe coronal tissue damage is diagnosed with reversible pulpitis, there are two possible minimal intervention approaches. The conservative approach aims to prevent pulpal exposure and to induce pulpal reaction by the formation of reparative dentine in the periphery of the cameral pulp, localized at the front of the carious decay. This approach aims to maintain tissue integrity by treating reversible pulpitis with a stepwise removal technique and then restoring the loss of coronal tissue with plastic materials. The success rate for this procedure varies widely from 56% to 100% [3–5]. The alternative approach is to treat pulpitis with a full pulpotomy (removal of the entire coronal pulp to the level of the canal) [6–9] to restore coronal damage with direct plastic materials with cusp coverage [9] or preformed crowns [10]. This approach is more invasive than the first option, but can be seen as a “preservative approach”

as its goal is to preserve the tooth on the arch in the long term. The success rate of full pulpotomy procedures varies between 82.9% and 100%, depending on the coronal restoration [8,9,11–13]. A better tooth survival rate is found when the restoration is carried out within two days of pulp exposure, highlighting the need to limit the number of treatment sessions as well as the time between successive sessions [14]. Thus, as for all vital pulp therapy, the degree of success for full pulpotomy may depend on whether the coronal restoration can be carried out within the same appointment.

For deep carious lesions or teeth weakened by considerable cavity preparation, indirectly bonded restoration is more suitable than direct restoration [15]. Survival rates of teeth with carious cavities on more than three surfaces are higher when restored with full or partial crowns rather than with composite restorations [16]. Teeth that are indirectly restored with composite or ceramic have better fracture resistance and marginal integrity, reduced cervical marginal microleakage and less surface roughness, postoperative sensitivity, and soft-tissue irritation than those directly restored with composite [15,17–20]. Overall, indirect restorations have a lower annual mean failure rate than direct restorations in posterior teeth [21].

There may be a benefit in restoring pulpotomised teeth with deep carious lesions using indirect restorations. The development of chairside CAD/CAM (Computer Aided Design and Manufacturing) technology has made it possible to carry out indirect restoration of a tooth in one single session. This study aimed at evaluating the outcome of the original combination of full Pulpotomy and Immediate CAD/CAM Endocrown (PICCE) on teeth with large carious lesions and pulpitis.

2. Materials and Methods

2.1. Type of Study

This is a case report on a series of patients based on data collected during dental care sessions. Study Ethics approval was obtained on 15 May 2020 (CECIC Rhône-Alpes-Auvergne, Grenoble, IRB 5921). The study was conducted in accordance with the Declaration of Helsinki. All patients were given information about the study and gave their consent to participate.

2.2. Patients

Patients presenting one molar with a deep or extremely deep carious lesion, according to Bjørndal et al. [22], associated with a diagnosis of reversible, chronic or irreversible pulpitis were recruited from the Dental Department of the University Hospital of Clermont-Ferrand between November 2017 and January 2020. The full list of inclusion and exclusion criteria is presented in Table 1.

Preoperative pulpal and periapical diagnoses were established after clinical and radiological examination. Preoperative retro-alveolar radiographs were taken using film holders and a paralleling technique.

2.3. Pulpotomy and Restoration Procedures

Pulpotomy and tooth restoration were conducted chairside over the course of a single session. After local or locoregional anesthesia (with adrenaline solution at 1:200,000), the rubber dam was placed. The pulp chamber was opened using a sterile high-speed diamond bur under water coolant; the access cavity was created with 21 mm Endo-Z bur. From this point on, abundant irrigation with a 2.5% sodium hypochlorite solution was performed. Pulpotomy is performed until canal orifices level, unless hemostasis is not reached. In that case, the pulp tissue was amputated at 2 mm beneath the level of the canal orifices using a Gates drill. Hemostasis was achieved by applying a cotton pellet moistened with 2.5% sodium hypochlorite solution for 3 min and repeating, if required, for up to 6 min. Biodentine™ was mixed according to the manufacturer's instructions and placed in a 3-mm or 4-mm layer above the pulp tissue. After the initial setting time of 12 min, the rubber dam was removed for coronal preparation.

Table 1. Inclusion and exclusion criteria.

Inclusion criteria	- <i>Related to the patient</i>
	○ Patient accepting the protocol, speaking French, without contributory medical history
	- <i>Related to the tooth</i>
Inclusion criteria	○ Mature permanent molar
	○ Possibility of installing a rubber dam
	○ Number, thickness and location in relation to the gingival limit of residual walls remaining after curettage compatible with a CAD/CAM restoration
Inclusion criteria	○ Absence of periodontal lesion
	○ Restorable teeth, probing pocket depth and mobility are within normal limits
	- <i>Related to the pulpal status</i>
Inclusion criteria	○ Clinical diagnosis of reversible (low intense, short-lasting induced pain, positive response to vitality tests, without pain on apical palpation of the soft tissues or percussion pain, no radiologically visible apical image, PAI 1 or 2) or irreversible (spontaneous, radiating pain that lingers after removal of the stimulus, without pain on apical palpation of the soft tissues or percussion pain, no radiologically visible apical image, PAI 1 or 2) pulpitis
	○ Clinical diagnosis of chronic irreversible (episodes of spontaneous or induced pain, positive response to vitality tests, without pain on apical palpation of the soft tissues or percussion pain, no radiologically visible apical image, PAI 1 or 2) pulpitis
	- <i>Related to the patient</i>
Exclusion criteria	○ Patient refusing the protocol, not understanding French, with medical contraindication
	- <i>Related to the tooth</i>
	○ Temporary teeth, immature permanent teeth
Exclusion criteria	○ Number, thickness and location in relation to the gingival limit of residual walls remaining after curettage compatible with a direct restoration (amalgam or resin composite)
	○ Non restorable teeth
	○ Impossibility to install a rubber dam
Exclusion criteria	○ Periodontal pathology
	○ No pulp exposure after caries excavation
	- <i>Related to the pulpal status</i>
Exclusion criteria	○ Necrotic and/or infected tooth (negative response to the vitality tests, pain on apical palpation of the soft tissues, percussion pain, radiologically visible apical image, PAI 3, 4 or 5)
	- <i>Extemporaneous exclusion criteria</i>
	○ Identification during the protocol of necrosis of at least one of the root canals (absence of bleeding): partial or total necrosis
Exclusion criteria	○ Bleeding could not be controlled after full pulpotomy in 6 min

An occlusal clearance of at least 2 mm was arranged under the entire occlusal surface in order to save space for the ceramic restoration with an objective of full cuspal coverage. As opposed to the endocrown preparations described for root-filled teeth, the central anchorage of the pulpotomised tooth's endocrown was sited within the pulp chamber, maintaining the Biodentine™ thickness to about 3 mm over the pulpal floor and eliminating undercuts in the access cavity (Figure 1).

The preparation limits were supragingival to facilitate impression and bonding. An optical impression was obtained with a Cerec® Omnicam camera (Figure 2A–D). The rubber dam was then replaced. The endocrowns were designed and manufactured in blocks of IPS e.max® CAD or Enamic® depending on the clinical case (Figure 2E,F). Manufacturing time was about 15 min for both materials. IPS e.max® CAD endocrowns were tried on the teeth before being fired for 25 min. All endocrowns were etched with hydrofluoric acid for 20 s for IPS e.max® CAD and 30 s for Enamic® respectively. After priming, endocrowns were sealed with a dual cure resin cement (Variolink® Esthetic DC) (Figure 3). A postoperative periapical radiograph was taken after restoration placement using a film holder and a paralleling technique.

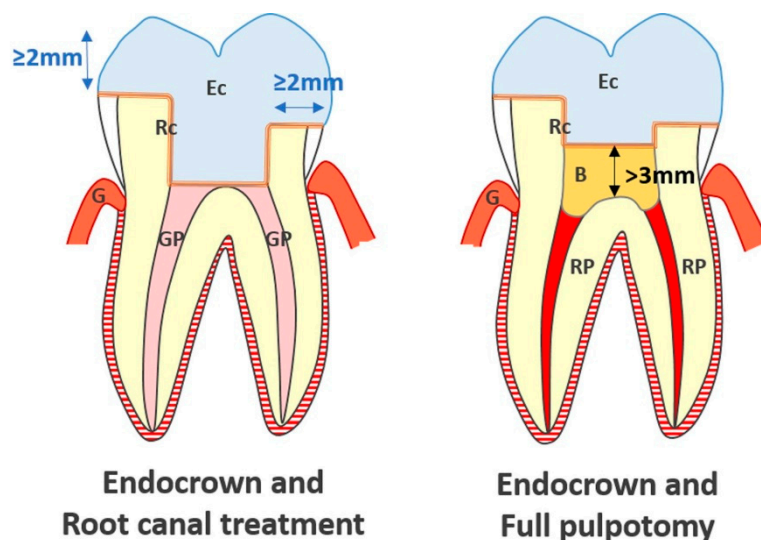


Figure 1. Schematic comparison of central anchorages of endocrowns carried out on teeth treated with root canal treatment or full pulpotomy (Ec: Endocrown; Rc: Resin Cement; GP: Gutta Percha; G: Gingiva; B: Biodentine™; RP: Radicular Pulp).

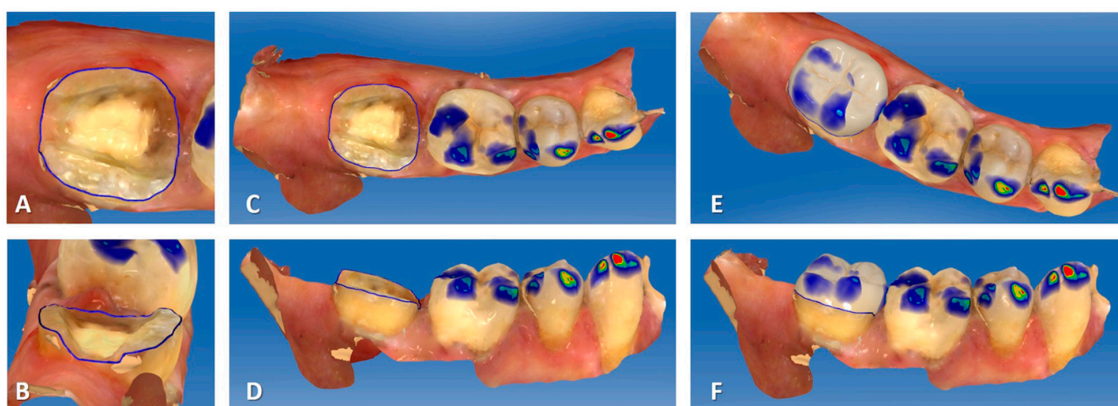


Figure 2. Cerec® screenshots for endocrown modeling ((A): occlusal view of the preparation; (B): distal view; (C): occlusal view of the quadrant; (D): buccal view of the quadrant; (E): occlusal view of the Cerec® endocrown model before machining; (F): buccal view of the Cerec® endocrown model before machining).

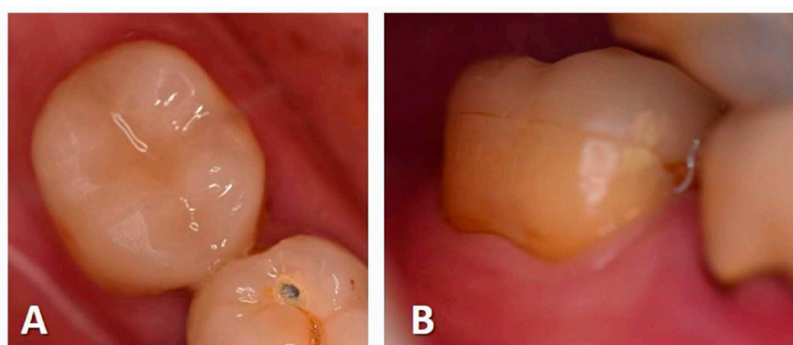


Figure 3. Intraoral photographs of tooth 47 at 18 months postoperative ((A): occlusal view; (B): buccal view).

2.4. Follow up Evaluations

Patients were asked to come back for a check-up 1 month (T1), 6 months (T2), and one year (T3) after treatment. At each stage, a clinical and radiographic examination of the treated tooth was

carried out (Figure 4). Clinical examination was conducted to verify: (i) the presence of the tooth on the arch; (ii) the lack of dental pain or pain-related behavior declared by the patient, and (iii) the lack of clinical symptoms of infectious disease related to the therapeutic pulpotomy treatment (oedema, fistula or tooth mobility). Retro-alveolar radiographs were taken using film holders and a paralleling technique. Radiological evaluation was conducted to evaluate and compare the Periapical Index (PAI) score of the treated tooth after the follow-up period, with the initial PAI score being T0 [23]. Pulp canal calcification was also radiologically checked throughout the follow-up period.

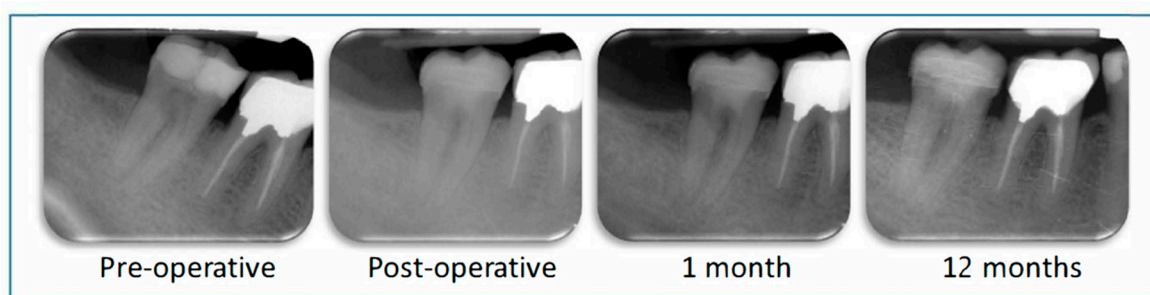


Figure 4. Radiological monitoring of tooth 47 during one year post-operatively. The Periapical Index (PAI) score remains at 1 throughout the follow-up period.

2.5. Study Criteria

The outcome of the pulpotomy was evaluated on the basis of clinical and radiological criteria (Table 2) [24].

Two investigators were trained to interpret PAI scores with a test and retest 15 days apart on 100 X-rays illustrating the five score categories. The intra-class correlation coefficient (ICC) for inter-rater assessment was 0.95 ($p < 0.001$) for the test phase and 0.93 ($p < 0.001$) for the retest at 15 days. Intra-rater validity was 0.87 ($p < 0.001$) for the first expert and 0.90 ($p < 0.001$) for the second expert. The first examiner's reliability was 0.87 ($p < 0.001$) relative to the expert panel on the test and 0.89 ($p < 0.001$) on the retest at 15 days, while the reliability relative to the expert panel for the second examiner was 0.86 ($p < 0.001$) on the test and 0.88 ($p < 0.001$) on the retest.

For the evaluation of radiological criteria, all postoperative images were proposed in a random order and interpreted by two calibrated investigators. In the event of a disagreement, a consensual decision was reached between both readers and a third calibrated investigator.

2.6. Statistical Analysis

Descriptive analysis was carried out in terms of the percentage of teeth satisfying the success criteria. BiostaTGV (Sentinelles Network, Paris, France) was used to calculate the number of inclusions necessary to achieve a success rate for teeth treated with Biodentine™ pulpotomy and immediately restored that equals or exceeds that for vital teeth treated by the stepwise excavation technique (non-inferiority hypothesis) [3]. The number of required subjects observed one year after treatment was 8 ($\alpha = 5\%$, $\beta = 10\%$).

Table 2. Zanini et al. criteria for the evaluation of the outcome of pulpotomy.

Outcome of Pulpotomy	Clinical Criteria		Radiographic Criteria
	Functional Tooth	Noninfected Tooth	
Success, effective pulpotomy	Lack of pain declaration and Presence of the tooth and Sealing properties of the restoration	Absence of spontaneous pain and Absence of pain on chewing and Lack of swelling and Lack of swelling and sinus tract and Negative response to axial percussion test and Negative response to apical palpation test and Periodontal probing < 2mm	PAI at T0 = 1 and PAI at Tx = 1, PAI at T0 = 2 and PAI at Tx ≤ 2, or PAI at T0 ≥ 3 and PAI at Tx ≤ 2 and lack of radicular lacunae
Uncertain outcome	Lack of pain declaration and Presence of the tooth and Sealing properties of the restoration	Absence of spontaneous pain and Absence of pain on chewing and Lack of swelling and Lack of swelling and sinus tract and Negative response to axial percussion test and Negative response to apical palpation test and Periodontal probing < 2mm	PAI at T0 = 1 and PAI at Tx = 2, PAI = 3 at both T0 and Tx, and lack of radicular lacunae
Failure, ineffective pulpotomy	Lack of pain declaration and/or Presence of the tooth and/or Sealing properties of the restoration	Absence of spontaneous pain and/or Absence of pain on chewing and/or Lack of swelling and Lack of swelling and sinus tract and/or Negative response to axial percussion test and/or Negative response to apical palpation test and/or Periodontal probing < 2mm	PAI at T0 = 1 or 2 and PAI at Tx ≥ 3, PAI at T0 ≥ 3 and PAI at Tx > 3 and/or presence of radicular lacunae

PAI, Periapical Index; T0: date of treatment; Tx: longest follow-up times (T1, T2 or T3).

3. Results

Thirty patients were included in this study, with a total of 16 lower and 14 upper molars (Table 3).

Table 3. Descriptive criteria for the included teeth at the initial (T0) and final evaluation (T3).

Descriptive Criteria	Initial Evaluation (T0)	12 Month Follow-Up (T3)
Diagnosis		
Reversible pulpitis	23	5
Irreversible pulpitis	2	1
Chronic pulpitis	5	2
Total	30	8
Björndal classification		
Deep carious lesion	14	4
Extremely deep carious lesion	14	4
No carious lesion	2	
Total	30	8
Endocrown material		
IPS e.max® CAD	15	2
Enamic®	15	6
Total	30	8

Total numbers of teeth in each category were noted in bold.

Eight molars were examined at each follow-up stage of the study. The recruitment of the required number of subjects took 27 months.

The flow chart of the participants in the cohort is presented in Figure 5.

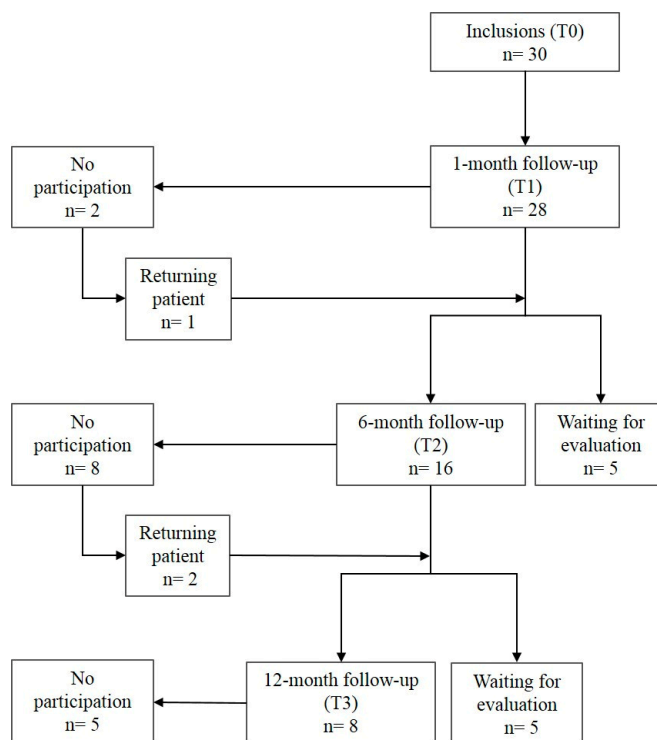


Figure 5. Flow chart of the study.

Twelve patients (40%) were lost to the study during follow-up. The distribution of the teeth according to the clinical and radiological study criteria is reported in Table 4.

Table 4. Distribution of teeth according to the outcome of the combined treatment (full pulpotomy and immediate coverage with endocrown) at different follow-up times: T1 (1 month), T2 (6 months) or T3 (12 months).

Outcome	Follow-up Time	Clinical Criteria		Radiographic Criteria	Total
		Functional Tooth	Non-Infected Tooth		
Effective outcome	T1	28 (100%)	24 (86%)	27 (96%)	23
	T2	16 (100%)	16 (100%)	15 (94%)	15
	T3	8 (100%)	8 (100%)	8 (100%)	8
Uncertain	T1	0	4 (14%) *	1 (4%)	5
	T2	0	0	1 (6%)	1
	T3	0	0	0	0
Ineffective outcome	T1	0	0	0	0
	T2	0	0	0	0
	T3	0	0	0	0

* all four cases are related to percussion pain; Total numbers of teeth in each category of outcome were noted in bold.

Overall, no ineffective pulpotomies were observed regardless of the follow-up duration. After one and six months, 23/28 (82%) and 15/16 (94%) of observed pulpotomies, respectively, were effective. All pulpotomies evaluated after one year (8/8) were effective, and with no canal calcification. In most of the cases, the categorization into uncertain pulpotomies was related to clinical, rather than radiological, criteria.

4. Discussion

This is the first study to describe the outcome of immediate indirect restorations for pulpotomised teeth. The analysis of this study was based on a non-inferiority hypothesis, which assumed that long-term outcomes of PICCE would be at least equivalent to those of a stepwise technique followed by a direct permanent or temporary restoration. This hypothesis was verified.

This study presents some limitations related especially to the analysis strategy and high rate of subjects lost to follow up. Indeed, the data were not analyzed using an intention-to-treat approach. An analysis carried out whereby the denominator ($n = 30$) stays the same regardless of what happens to the patient, the assumption made is that all the patients who were lost to follow up had negative outcomes, then the success rate would be significantly less favorable to the treatment procedure presented. As such, it is likely that the true success rate lies somewhere between the percentages given and the percentages obtained using an intention-to-treat analytical approach. The difficulty of strictly following the study protocol within the ethical setting and consequently the high loss to follow up rate, impacts the results. In addition, the study design does not include a randomization procedure and a control group. Consequently, the results of this study need to be confirmed in a longer-term follow-up to allow comparison with data in the literature, as the indirect CAD/CAM endocrowns are expected to provide better long-term results than direct restorations in pulpotomised teeth. Discussing these results within the context of preservation/conservation provides a new perspective to justify this minimalist dentistry approach.

Failed pulp therapy could be caused by one of two main aetiologies, the first being related to the pulp's inability to respond to inflammation or infection, and the second being related to insufficient sealing between the pulp capping material and the coronal restoration. The causes for pulpal aetiologies could be due to either extended inflammation resulting from an imprecise diagnosis or peroperative contamination. In such situations, treatment failure occurs in the weeks directly following the procedure. On the other hand, failed pulpotomies due to coronal contamination are delayed, occurring several months or years after treatment.

There is still debate over the use of full pulpotomy as a treatment for pulpal disease, as this depends on the pulpal status. In previous studies evaluating the outcome of full pulpotomy in permanent teeth, the terminology used to describe the teeth concerned varied considerably. Different terms, such as reversible pulpitis, irreversible pulpitis, symptomatic teeth, vital teeth with carious exposure, and chronic pulpitis, have been used [8]. The terminology for clinical pulp diagnosis and pulpal treatment conditions is currently being debated [2,25]. The variability of the diagnostic terminology raises the question as to the pertinence of categorizing all these pulpal statuses as different diseases. It has already been demonstrated that the histological state of the pulp is not related to the clinical signs and symptoms [26–28]. Consequently, the pulpal diagnosis is based on clinical and radiological signs. Moreover, while endodontists consider endodontic treatment to be fully complete after coronal restoration, the status of pulpal and coronal decay is not taken into account when establishing the diagnosis. Returning to the definition of a disease could help with understanding the clinical issues around this debate. According to the historical medical definition, a disease is characterized by an aetiology, a pathogeny, a semiological context (signs and symptoms) and a treatment, which is specific to the given disease. This study suggests that the association of pulpal inflammation and deep carious lesion would constitute an aetiological entity for a disease for which the combination of full pulpotomy and immediate placement of a CAD/CAM endocrown would be the specific treatment. In this case, the term pulpal inflammation groups together different inflammatory statuses, including reversible, irreversible or chronic pulpitis, all of which seem to be successfully treated by PICCE. PICCE could therefore be defined as the preservative approach for a tooth with pulpitis and deep carious lesion.

Recent trials and studies [6,9,29] which selected vital pulp and carefully avoided per-operative contamination have been carried out successfully regardless of pulpal diagnosis. Thus, it could be hypothesized that the reported failure rates were due to post-operative coronal contamination rather than pulpal aetiologies. In cases involving deep carious lesions, residual dentine would be more or less demineralized, which would possibly reduce the mechanical performance of bonded restorations [30,31]. Moreover, the greater extent of coronal tissue loss necessitates bigger scale restorations, with cusp and margin reconstitutions, which could increase the risk of fracturing and partial or total debonding of direct restorations. When teeth are treated under a two-visit protocol separated by an interval of 8–12 weeks, there is a risk that the temporary cement will compromise the coronal seal, particularly for cavities with fewer than four residual walls. These complications lead to bacterial contamination, impeding the healing potential of the pulp. This healing ability is already affected by the carious process, in addition to the conservative procedure itself. A stepwise, two-stage removal could mean that the fibroblast batch is consumed prematurely, which has a further negative effect on the restorative response of the pulp in the face of new aggressions.

In most teeth with pulpitis, the pulp chamber dentine is sound, providing an excellent substrate for optimal adhesion. The arrangement of the cameral cavity increases the surface of sound dentine available for bonding indirect restorations [32–34]. Biodentine™ allows a definitive restoration to be bonded immediately after its initial setting time [35–37]. Endocrowns are restorations guided by conservative principles [34,38]. Compared to inlays, endocrowns appear to be an effective solution for restoring severely damaged posterior teeth because they provide potential protection against debonding at the dentine-restoration interface and increased crown stiffness [39].

5. Conclusions

Within the limitations of this preliminary study, full Pulpotomy and Immediate CAD/CAM Endocrown (PICCE) could be safely recommended to treat, during a single session, severely damaged permanent molars with pulpitis. This new combination preserves the residual biological potential of the pulp, ensuring an endo-prosthetic continuum with the objective of long-term success.

Author Contributions: Conceptualization, P.-Y.C. and M.H.; methodology, P.-Y.C., E.N. and M.H.; data collection, M.-L.M.-S., N.L., P.-Y.C. and N.D.; writing—original draft preparation, M.-L.M.-S. and P.-Y.C.; writing—review and editing, M.-L.M.-S., E.N., P.-Y.C. and M.H.; supervision, M.H. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

Funding: This research received no external funding.

Conflicts of Interest: The authors declare no conflict of interest.

References

1. Schwendicke, F.; Frencken, J.E.; Bjørndal, L.; Maltz, M.; Manton, D.J.; Ricketts, D.; Van Landuyt, K.; Banerjee, A.; Campus, G.; Doméjean, S.; et al. Managing carious lesions: Consensus recommendations on carious tissue removal. *Adv. Dent. Res.* **2016**, *28*, 58–67. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
2. Wolters, W.J.; Duncan, H.F.; Tomson, P.L.; Karim, I.E.; McKenna, G.; Dorri, M.; Stangvaltaite, L.; Van Der Sluis, L.W.M. Minimally invasive endodontics: A new diagnostic system for assessing pulpitis and subsequent treatment needs. *Int. Endod. J.* **2017**, *50*, 825–829. [[CrossRef](#)]
3. Bjørndal, L.; Reit, C.; Bruun, G.; Markvart, M.; Kjaeldgaard, M.; Näsman, P.; Thordrup, M.; Dige, I.; Nyvad, B.; Fransson, H.; et al. Treatment of deep caries lesions in adults: Randomized clinical trials comparing stepwise vs. direct complete excavation, and direct pulp capping vs. partial pulpotomy. *Eur. J. Oral Sci.* **2010**, *118*, 290–297. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
4. Maltz, M.; Koppe, B.; Jardim, J.J.; Alves, L.S.; De Paula, L.M.; Yamaguti, P.M.; Almeida, J.C.F.; Moura, M.S.; Mestrinho, H.D. Partial caries removal in deep caries lesions: A 5-year multicenter randomized controlled trial. *Clin. Oral Investig.* **2018**, *22*, 1337–1343. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
5. Hayashi, M.; Fujitani, M.; Yamaki, C.; Momoi, Y. Ways of enhancing pulp preservation by stepwise excavation—A systematic review. *J. Dent.* **2011**, *39*, 95–107. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
6. Simon, S.; Pérard, M.; Zanini, M.; Smith, A.J.; Charpentier, E.; Djole, S.X.; Lumley, P.J. Should pulp chamber pulpotomy be seen as a permanent treatment? Some preliminary thoughts. *Int. Endod. J.* **2013**, *46*, 79–87. [[CrossRef](#)]
7. Taha, N.A.; Ahmad, M.B.; Ghanim, A. Assessment of Mineral Trioxide Aggregate pulpotomy in mature permanent teeth with carious exposures. *Int. Endod. J.* **2017**, *50*, 117–125. [[CrossRef](#)]
8. Zanini, M.; Hennequin, M.; Cousson, P. Which procedures and materials could be applied for full pulpotomy in permanent mature teeth? A systematic review. *Acta Odontol. Scand.* **2019**, *77*, 541–551. [[CrossRef](#)]
9. Taha, N.A.; Abdelkader, S.Z. Outcome of full pulpotomy using Biodentine in adult patients with symptoms indicative of irreversible pulpitis. *Int. Endod. J.* **2018**, *51*, 819–828. [[CrossRef](#)]
10. Cousson, P.-Y.; Nicolas, E.; Hennequin, M. A follow-up study of pulpotomies and root canal treatments performed under general anaesthesia. *Clin. Oral Investig.* **2014**, *18*, 1155–1163. [[CrossRef](#)]
11. Aguilar, P.; Linsuwanont, P. Vital Pulp Therapy in Vital Permanent Teeth with Cariously Exposed Pulp: A Systematic Review. *J. Endod.* **2011**, *37*, 581–587. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
12. Awawdeh, L.; Al-Qudah, A.; Hamouri, H.; Chakra, R.J. Outcomes of Vital Pulp Therapy Using Mineral Trioxide Aggregate or Biodentine: A Prospective Randomized Clinical Trial. *J. Endod.* **2018**, *44*, 1603–1609. [[CrossRef](#)]
13. Kunert, G.G.; Kunert, I.R.; Filho, L.C.D.C.; De Figueiredo, J.A.P. Permanent teeth pulpotomy survival analysis: Retrospective follow-up. *J. Dent.* **2015**, *43*, 1125–1131. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
14. Barthel, C.R.; Rosenkranz, B.; Leuenberg, A.; Roulet, J.F. Pulp Capping of Carious Exposures: Treatment Outcome after 5 and 10 Years: A Retrospective Study. *J. Endod.* **2000**, *26*, 525–528. [[CrossRef](#)]
15. Dalpino, P.H.P.; E Francischone, C.; Ishikiriyama, A.; Franco, E.B. Fracture resistance of teeth directly and indirectly restored with composite resin and indirectly restored with ceramic materials. *Am. J. Dent.* **2002**, *15*, 389–394. [[PubMed](#)]
16. Dammaschke, T.; Nykiel, K.; Sagheri, D.; Schäfer, E. Influence of coronal restorations on the fracture resistance of root canal-treated premolar and molar teeth: A retrospective study. *Aust. Endod. J.* **2012**, *39*, 48–56. [[CrossRef](#)]
17. Desai, P.; Das, U.; Pd, D.; Uk, D. Comparison of fracture resistance of teeth restored with ceramic inlay and resin composite: An in vitro study. *Indian J. Dent. Res.* **2011**, *22*, 877. [[CrossRef](#)]

18. Liberman, R.; Ben-Amar, A.; Herteanu, L.; Judes, H. Marginal seal of composite inlays using different polymerization techniques. *J. Oral Rehabilitation* **1997**, *24*, 26–29. [[CrossRef](#)]
19. Duquia, R.C.S.; Osinaga, P.W.R.; Demarco, F.F.; Habekost, L.V.; Conceição, E.N. Cervical Microleakage in MOD Restorations: In Vitro Comparison of Indirect and Direct Composite. *Oper. Dent.* **2006**, *31*, 682–687. [[CrossRef](#)]
20. Manhart, J.; Neuerer, P.; Scheibenbogen-Fuchsbrunner, A.; Hickel, R. Three-year clinical evaluation of direct and indirect composite restorations in posterior teeth. *J. Prosthet. Dent.* **2000**, *84*, 289–296. [[CrossRef](#)]
21. Manhart, J.; Chen, H.; Hamm, G.; Hickel, R. Buonocore Memorial Lecture. Review of the clinical survival of direct and indirect restorations in posterior teeth of the permanent dentition. *Oper. Dent.* **2004**, *29*, 481–508.
22. Bjørndal, L.; Simon, S.; Tomson, P.L.; Duncan, H.F. Management of deep caries and the exposed pulp. *Int. Endod. J.* **2019**, *52*, 949–973. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
23. Ørstavik, D.; Kerekes, K.; Eriksen, H.M. The periapical index: A scoring system for radiographic assessment of apical periodontitis. *Dent. Traumatol.* **1986**, *2*, 20–34. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
24. Zanini, M.; Hennequin, M.; Cousson, P.-Y. A Review of Criteria for the Evaluation of Pulpotomy Outcomes in Mature Permanent Teeth. *J. Endod.* **2016**, *42*, 1167–1174. [[CrossRef](#)]
25. Hashem, D.; Mannocci, F.; Patel, S.; Manoharan, A.; Brown, J.; Watson, T.; Banerjee, A. Clinical and radiographic assessment of the efficacy of calcium silicate indirect pulp capping: A randomized controlled clinical trial. *J. Dent. Res.* **2015**, *94*, 562–568. [[CrossRef](#)]
26. Dummer, P.M.H.; Hicks, R.; Huws, D. Clinical signs and symptoms in pulp disease. *Int. Endod. J.* **1980**, *13*, 27–35. [[CrossRef](#)]
27. Mejàre, I.; Axelsson, S.; Davidson, T.; Frisk, F.; Hakeberg, M.; Kvist, T.; Norlund, A.; Petersson, A.; Portenier, I.; Sandberg, H.; et al. Diagnosis of the condition of the dental pulp: A systematic review. *Int. Endod. J.* **2012**, *45*, 597–613. [[CrossRef](#)]
28. Garfunkel, A.; Sela, J.; Ulmanky, M. Dental pulp pathosis. Clinicopathologic correlations based on 109 cases. *Oral Surg. Oral Med. Oral Pathol.* **1973**, *35*, 110–117. [[CrossRef](#)]
29. Duncan, H.F.; Galler, K.M.; Tomson, P.L.; Simon, S.; El Karim, I.; Kundzina, R.; Krastl, G.; Dammaschke, T.; Fransson, H.; Markqvart, M.; et al. European Society of Endodontology position statement: Management of deep caries and the exposed pulp. *Int. Endod. J.* **2019**, *52*, 923–934.
30. Marshall, G.W.; Habelitz, S.; Gallagher, R.; Balooch, M.; Balooch, G.; Marshall, S. Nanomechanical properties of hydrated carious human dentin. *J. Dent. Res.* **2001**, *80*, 1768–1771. [[CrossRef](#)]
31. Isolani, C.P.; Sarkis-Onofre, R.; Lima, G.S.; Moraes, R.R. Bonding to Sound and Caries-Affected Dentin: A Systematic Review and Meta-Analysis. *J. Adhes Dent* **2018**, *20*, 7–18. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
32. Fages, M.; Bennasar, B. The endocrown: A different type of all-ceramic reconstruction for molars. *J. Canadian Dent. Assoc.* **2013**, *79*, d140.
33. Biacchi, G.R.; Mello, B.; Basting, R.T. The Endocrown: An Alternative Approach for Restoring Extensively Damaged Molars. *J. Esthet. Restor. Dent.* **2013**, *25*, 383–390. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
34. Dogui, H.; Abdelmalek, F.; Amor, A.; Douki, N. Endocrown: An Alternative Approach for Restoring Endodontically Treated Molars with Large Coronal Destruction. *Case Rep. Dent.* **2018**, *2018*, 1581952. [[CrossRef](#)]
35. Palma, P.; Marques, J.; Falacho, R.I.; Vinagre, A.; Santos, J.M.; Ramos, J.C. Does Delayed Restoration Improve Shear Bond Strength of Different Restorative Protocols to Calcium Silicate-Based Cements? *Materials* **2018**, *11*, 2216. [[CrossRef](#)]
36. Kusumvalli, S.; Diwan, A.; Pasha, S.; Devale, M.R.; Chowdhary, C.D.; Saikia, P. Clinical evaluation of biodentine: Its efficacy in the management of deep dental caries. *Indian J. Dent. Res.* **2019**, *30*, 191–195. [[CrossRef](#)]
37. Pham, C.-L.; Kratunova, E.; Marion, I.; da Fonseca, M.A.; Alapati, S.B. Effect of Overlying Material on Final Setting of Biodentine® in Primary Molar Pulpotomies. *Pediatr. Dent.* **2019**, *41*, 140–145.

38. Lander, E.; Dietschi, D. Endocrowns: A clinical report. *Quintessence Int.* **2008**, *39*, 99–106.
39. Dejak, B.; Mlotkowski, A.; Romanowicz, M. Strength estimation of different designs of ceramic inlays and onlays in molars based on the Tsai-Wu failure criterion. *J. Prosthet. Dent.* **2007**, *98*, 89–100. [[CrossRef](#)]



© 2020 by the authors. Licensee MDPI, Basel, Switzerland. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

Annexe 4 : PI04 : Munoz-Sanchez ML, Gravier A, François O, Nicolas E, Hennequin M, Decerle N. In Vitro Resistance of molars and resin simulators treated by Pulpotomy and restored with Endocrown. Soumis au JPD (Journal of Prosthetic Dentistry).

Résumé :

Exposé du problème : Les endocouronnes sont conçues pour restaurer au niveau coronaire des dents traitées endodontiquement par traitement radiculaire complet (RCT). Récemment, des endocouronnes ont été proposées pour des dents traitées par pulpotomie thérapeutique (FP). Mais il n'existe pas de données sur les évaluations *in vitro* de cette combinaison.

Objectif : Cette étude vise à évaluer le comportement mécanique de dents traitées par pulpotomie et restaurées par endocouronne, selon deux types de préparation périphérique et deux matériaux pour l'endocouronne. Le deuxième objectif était d'évaluer si les simulateurs en résine imprimés en 3D pouvaient être une alternative fiable aux dents humaines lors des tests de résistance *in vitro*.

Matériel et méthodes : Cent dix molaires humaines extraites ont été réparties de manière aléatoire en 11 groupes et cent dix simulateurs en résine ont été répartis de la même manière, selon le type de traitement endodontique (RCT ou FP), le matériau utilisé (céramique ou composite) et le type de préparation périphérique (cerclage périphérique ou préparation en plateau). Les échantillons ont été mis en bloc dans de la résine époxy avant d'être soumis à une force de compression oblique jusqu'à la rupture.

Résultats : Pour les dents humaines, l'analyse de variance a permis de séparer deux groupes homogènes, l'un regroupant les dents traitées endodontiquement (traitement radiculaire ou pulpotomie) sans restauration coronaire (groupes contrôles négatifs) et tous les autres échantillons, c'est-à-dire les dents saines non traitées (contrôles positifs) et les dents traitées et restaurées. La résistance à la fracture était en moyenne plus faible pour les simulateurs en résine que pour les dents naturelles dans tous les groupes. Pour les simulateurs en résine, la répartition des groupes n'était pas la même, avec ici une séparation en fonction du matériau de restauration de l'endocouronne.

Conclusion : Dans les limites de cette étude, la résistance à la fracture n'est pas le critère le plus important pour choisir le matériau, le type de préparation ou le traitement endodontique pour une dent restaurée par endocouronne. Les simulateurs de résine ne sont pas validés en remplacement des dents naturelles humaines pour les études de résistance *in vitro*.

Implications cliniques : Cette étude suggère que l'endocouronne peut donc être choisie comme restauration pour les dents traitées par pulpotomie.

The Journal of Prosthetic Dentistry

In vitro resistance of molars and resin simulators treated by pulpotomy and restored with endocrown --Manuscript Draft--

Manuscript Number:	
Article Type:	Research and Education
Keywords:	endodontic treated teeth; pulpotomy; endocrown; fracture strength
Corresponding Author:	Nicolas Decerle, Ph.D. Clermont-Ferrand, Auvergne FRANCE
First Author:	Marie-Laure Munoz-Sanchez, MSc
Order of Authors:	Marie-Laure Munoz-Sanchez, MSc Alexis Gravier Olivier François Emmanuel Nicolas, Prof. Ph.D. HDR Martine Hennequin, Prof. Ph.D. HDR Nicolas Decerle, Ph.D.
Abstract:	<p>Statement of problem. Endocrowns are designed to restore crowns of endodontically treated teeth with root canal treatment (RCT). Recently endocrowns were proposed for teeth treated with full pulpotomy (FP). But there is no data on in vitro evaluations for this combination.</p> <p>Purpose. This study aims to evaluate the mechanical behavior of pulpotomy treated teeth with endocrown, according to different protocols for preparation design and materials. The second goal was to assess whether 3D printed resin simulators could be a reliable alternative for human teeth during in vitro strength tests.</p> <p>Materiel and Methods. One hundred and ten human extracted molars were randomized in 11 groups, and one hundred and ten resin simulators were separated in the same way, according to the type of endodontic treatment (RCT or FP), the material used (ceramic or composite) and the design of peripheric preparation (ferrule or flat preparation). The samples were embedded in epoxy resin blocks before being subjected to oblique compressive load until failure.</p> <p>Results. For the human teeth, analysis of variance separated 2 homogeneous groups, one regrouping the endodontically treated or pulpotomy treated teeth without coronal restoration (negative control groups) and all the other samples i.e., the untreated teeth (positive controls) and the treated and restored teeth. Strength resistance was lower for resin simulator than for natural teeth in all groups, and the group repartition wasn't the same with separation about the material.</p> <p>Conclusion. In the limit of this study the strength resistance is not the most important criterion to choose the type of material, preparation, or endodontic treatment for endocrown. Resin simulators are not efficient for in vitro strength studies.</p> <p>CLINICAL IMPLICATIONS</p> <p>This study suggests that endocrown can therefore be chosen as a restoration for pulpotomy-treated teeth.</p>

In Vitro Resistance of molars and resin simulators treated by Pulpotomy and restored with Endocrown

Marie-Laure Munoz-Sanchez, DDS, MSc ^{1,2}, Alexis Gravier ³, Olivier François ¹, Emmanuel Nicolas DDS, PhD, HDR ^{1,2}, Martine Hennequin DDS, PhD, HDR ^{1,2} and Nicolas Decerle DDS, PhD ^{1,2*}

1: Université Clermont Auvergne, CROC, F-63000 Clermont-Ferrand, France

2: CHU Clermont-Ferrand, Service d'odontologie, F-63003 Clermont-Ferrand, France.

3: Institut Pascal UMR CNRS 6602, Université Clermont Auvergne, F-63000 Clermont-Ferrand, France.

Corresponding author:

Dr Nicolas Decerle

Department of Restorative Dentistry and Endodontics

Clermont-Ferrand Odoontology

2 rue de Braga

63100 Clermont-Ferrand

Email: Nicolas.decerle@uca.fr

Tel: +33 4 73 17 73

Marie-Laure Munoz-Sanchez: Conceptualization, Methodology, Investigation, Writing – Original Draft, Writing—review and editing. Alexis Gravier: Methodology. Olivier François: Software. Martine Hennequin: Conceptualization, Methodology, Investigation, Writing—review and editing, Supervision. Emmanuel Nicolas: Formal analysis, Writing—review and

editing. Nicolas Decerle: Conceptualization, Methodology, Investigation, Writing – Original Draft, Writing—review and editing, Supervision.

ACKNOWLEDGMENTS

The authors would like to thank Prof. Veyrune and Prof. Orliaguet for financial and administrative supports respectively. The authors would thank also Caroline Eschevins for technical assistance. This study was supported by GC (Tokyo, Japon), who donated the materials used in this study.

[Click here to view linked References](#)

ABSTRACT:

Statement of problem. Endocrowns are designed to restore crowns of endodontically treated teeth with root canal treatment (RCT). Recently endocrowns were proposed for teeth treated with full pulpotomy (FP). But there is no data on *in vitro* evaluations for this combination.

Purpose. This study aims to evaluate the mechanical behavior of pulpotomy treated teeth with endocrown, according to different protocols for preparation design and materials. The second goal was to assess whether 3D printed resin simulators could be a reliable alternative for human teeth during *in vitro* strength tests.

Materiel and Methods. One hundred and ten human extracted molars were randomized in 11 groups, and one hundred and ten resin simulators were separated in the same way, according to the type of endodontic treatment (RCT or FP), the material used (ceramic or composite) and the design of peripheric preparation (ferrule or flat preparation). The samples were embedded in epoxy resin blocks before being subjected to oblique compressive load until failure.

Results. For the human teeth, analysis of variance separated 2 homogeneous groups, one regrouping the endodontically treated or pulpotomy treated teeth without coronal restoration (negative control groups) and all the other samples i.e., the untreated teeth (positive controls) and the treated and restored teeth. Strength resistance was lower for resin simulator than for natural teeth in all groups, and the group repartition wasn't the same with separation about the material.

Conclusion. In the limit of this study the strength resistance is not the most important criterion to choose the type of material, preparation, or endodontic treatment for endocrown. Resin simulators are not efficient for *in vitro* strength studies.

CLINICAL IMPLICATIONS

This study suggests that endocrown can therefore be chosen as a restoration for pulpotomy-treated teeth.

Keywords: endodontic treated teeth; pulpotomy; endocrown; fracture strength

INTRODUCTION

Restoring endodontically treated teeth has long been a biological and biomechanical challenge¹. Factors affecting the outcome of coronal restoration have been investigated extensively. The extent of coronal tissue loss, the use of a root anchorage, and the design of the peripheral limit, in particular with or without a circumferential ferrule, are still topics of discussion². Until recently, dehydration of the treated teeth^{3,4} and/or additional loss of tissues due to the canal preparation⁵, were hypotheses used to explain long term failures due to root fractures. During the last decade, the evolution of CAD/CAM procedures and pulp regeneration therapeutics has led to new solutions for restorations of endodontically treated teeth. It was already reported that CAD/CAM endocrown restorations could be performed on posterior teeth with root canal treatment (RCT), a solution that has been assessed as having low risk of failure after several years⁶⁻⁸. It was also reported that CAD/CAM endocrowns could be safely recommended to restore severely damaged permanent molars with pulpitis treated with full pulpotomy (FP)⁹. The combination of endocrown and full pulpotomy has the advantage of preserving the residual biological potential of the pulp and ensuring an endo-prosthetic continuum with the objective of long-term success. Before carrying out further clinical trials, *in vitro* assessments are needed to base clinical procedures on evidence. Indeed, three points should be taken into consideration: i) it is unknown whether the mechanical behavior of endocrowns differs between teeth being treated with full pulpotomy or root canal treatment; ii) the design of the coronal preparation has already been investigated but the results are still being debated². In particular, additional experiments comparing coronal preparation with or without peripheral ferrule are needed; iii) contradictory results have

been reported on the relative resistance of both composite and ceramic materials used for endocrown milling¹⁰.

This study has an ancillary goal that concerns the interest of using 3D printed resin simulators rather than human teeth for *in vitro* experiments. Collecting sound human molars with the same anatomical characteristics¹¹ for *in vitro* studies as well as for educational issues is difficult. Moreover, the first and second molars collected for studies are often damaged before being extracted due to carious process or restorations and the third molars are often cut during extraction to preserve most of the bone. The dental community would certainly benefit from using validated simulators instead of natural human teeth. Dental simulators have been created with different materials^{12,13}. 3D printed resin simulators were first developed for pedagogical puposes¹⁴ and it was reported that their use had positive effects on students' self-confidence¹⁵. 3D printed simulators have not yet been used in comparison with human teeth during experimental mechanical tests. This *in vitro* study was above all designed to compare the fracture resistance of human mandibular molars, treated either by full pulpotomy or by root canal treatment and then prepared according two designs of coronal preparation to be finally restored with an endocrown milled using either a composite or ceramic block. The second goal was to assess whether 3D printed resin simulators could be a reliable alternative for human teeth during *in vitro* strength tests.

MATERIALS AND METHODS

Samples and study design

Human teeth (HT): Authorizations for using natural human teeth were obtained from patients treated in the dental department of the university hospital of Clermont-Ferrand, France. One hundred and ten human mandibular molars, extracted for orthodontic or periodontal reasons, without caries, enamel cracks or anatomical defects were collected and kept in sodium chloride (NaCl 0.9%) solution. Teeth were randomly divided into eleven groups according to endodontic treatments, type of coronal preparation and milling materials for endocrowns (Figure 1): 10 teeth were kept sound without any preparation; fifteen teeth received root canal treatment, the crown being prepared with a flat margin; fifteen other teeth received full pulpotomy, the crown being prepared with peripheral ferrule preparation.

Procedures for endodontic treatment and coronal preparation are detailed in Table 1.

Table 1. Procedures for endodontic treatment and coronal preparation.

ENDODONTIC TREATMENTS	
Root canal treatment:	Opening of the pulp chamber: with diamond bur (Komet, Gebrüder Brasseler, Lemgo, Allemagne) Creation of the access cavity with an Endo-Z bur (Dentsply Sirona, Bensheim Germany). A no. 10 K file was used to determine the working length. Instrumentation of the root canals: with a Niti file in reciprocating movement (Wave One Primary Dentsply Sirona, Bensheim Germany). Irrigation was ensured with a 2.5% sodium hypochlorite solution. Obturation: with a zinc oxide eugenol sealer (Sealite, Pierre Roland, Merignac France), and an appropriate Gutta Percha point for the Niti file (Wave One Primary Dentsply Sirona, Bensheim, Germany). Root canals were obturated by thermomechanical compaction. For 3D printed simulators, the treatment procedure was the same, except for the chamber opening as the simulators were printed with an access cavity.
Full Pulpotomy:	After opening and creating the access cavity, a third coronary preparation was made with a Gates Glidden Drill no. 2 (Dentsply Sirona, Bensheim Germany). Irrigation: with a 2,5% sodium hypochlorite solution. Drying was obtained with cotton pellet. Positioning of the bioactive material (Biodentine®, Septodont, Saint Maur des Fossés, France) in the pulp chamber, compacted with an amalgam plugger. An endo-stop was positioned on it to measure 3 mm thickness of obturation material.
CORONAL PREPARATIONS	
Flat margin coronal preparation:	The depth of occlusal reduction was marked on the teeth with a specialized bur (Deep Marker, Komet, Gebrüder Brasseler, Lemgo, Germany). Regularization of the margin with a diamond wheel bur (Komet, Gebrüder Brasseler, Lemgo, Germany).

Peripheral ferrule preparation:	After flat margin preparation, the deep marker was reused to mark 2 mm height on each face and a 2 mm guided bur was used to produce the ferrule preparation.
ENDOCROWN MATERIALS AND PROTOCOLS	
Restoration design and milling:	Teeth were mounted in a master model and scanned with Cerec Primescan (Dentsply Sirona Dental System, Bensheim, Germany). Design of the restorations with the biocopy function from a reference tooth from a Frasco model (Frasaco GmbH, Tettang, Germany). All endocrowns were milled with a Cerec InLab MCXL milling unit (Dentsply Sirona Dental System, Bensheim, Germany). Crystallization of the ceramic restorations using a Programat CS furnace (Ivoclar Vivadent, Schaan, Lichtenstein). For the 3D simulators, the biocopy modelling function of the Cerec Primescan system was applied using the simulator of untreated teeth as model.
Emax adhesive protocol:	Endocrown intrados: etching for 20 s using 9% hydrofluoric acid (Porcelain Etch, Ultradent, South Jordan, United States). After rinsing (30 s) and drying, a silane coupling agent was applied for 1 min (Monobond Plus, Ivoclar Vivadent, Schaan, Lichtenstein). Tooth or simulator: etching with 35% orthophosphoric acid (CyberEtch, Henry Schein, Joué-les-Tours, France), and ExciTE (Ivoclar Vivadent Schaan Lichtenstein) bonding applied with a microbrush. Cementation: Variolink Esthetic DC (Ivoclar Vivadent Schaan Lichtenstein) under digital pressure. A light cure was performed 2 times for 20 s.
Cerasmart (GC Tokyo, Japan) adhesive protocol:	Endocrown intrados: etching for 20 s using 9% hydrofluoric acid (Porcelain Etch, Ultradent, South Jordan, United States). After rinsing (30 s) and drying, a primer agent was applied (G Multi Primer, GC, Tokyo, Japan). Tooth or simulator: etching with 35% orthophosphoric acid (CyberEtch, Henry Schein, Joué-les-Tours, France), and G-Premio BOND bonding (G Multi Primer, GC, Tokyo, Japan) applied with a microbrush, and after 10 s waiting, 5 s drying and light curing for 10 s. Cementation: G-CEM LinkForce (GC Tokyo, Japan) under digital pressure. A light cure was performed twice for 20 s.

Resin simulators (RS): One first lower left molar was created by 3D modeling using Blender software (Blender Foundation) with one mesial root with two independent canals and one distal root with one central canal. Four versions of this model were then created, differing in the presence or absence of endodontic access cavity, and type of crown preparation (Figure 2). Ten duplicates of the model without coronal preparation or access cavity (Figure 2a), 20 duplicates with access cavity (Figure 2b), 40 duplicates with flat peripheral coronal preparation (Figure 2c) and 40 duplicates with 2mm peripheral ferrule (Figure 2d) were then printed (Stratasys®).

Study criteria

The main study criterion was the fracture strength resistance given in Newtons. The secondary criterion was the type of fracture¹⁶: i) a catastrophic fracture was below the cementoenamel junction and extended up to the root; ii) a favorable fracture was one which was above the cementoenamel junction. The explicative factors were: i) the type of endodontic treatment: RCT or FP; ii) the type of preparation for the endocrowns: with 2 mm circumferential ferrule (Fer) or flat margin (Fla); iii) the material of the endocrowns: ceramic (IPS e.max CAD®, Ce) or composite (Cerasmart®, Co).

Loading test

All the 110 human teeth and 110 3D printed resin simulators were embedded individually in self-cured epoxy resin (U-Pol Plastikit, Wellingborough, United Kingdom). Each sample was placed in the fixture of a universal testing machine (Zwick Roell UTS 20K, Ars-Laquenexy, France). The compression tests were carried out with a 5-mm diameter stainless steel sphere placed on the middle of the occlusal face and according to a 45° angle to the long axis. The samples were loaded at a rate of 0.5 mm/min until fracture. A measure was made automatically every 0.1 s. A 30% reduction of load strength resulted in automatically stopping the recording.

Statistical analysis

Data were analyzed statistically with SPSS software (IBM Corp, 28.0.1.1). The distribution of each group was tested by a Shapiro-Wilk test. In the case where all groups had a normal distribution, the groups were compared by one-way analysis of variance (ANOVA) with a Student-Newman-Keuls post hoc test. If one group showed an abnormal distribution, the samples were compared by a Kruskal-Wallis test. The distribution of the fracture type was compared with a Khi-2 test. The comparison of

human teeth and resin simulator strength values were compared for each condition with a Mann-Whitney test. The equality of variance between the RS groups and HT groups was compared with Levene test.

RESULTS

Strength test values

The mean values of the maximum forces leading to the fracture of the sample groups are presented in Figure 3 and Figure 4.

The Shapiro-Wilk test validated a normal distribution for all the groups of human teeth, but did not validate the normal distribution for the resin simulators. An analysis of variance was performed for the human teeth groups and then a Kruskal-Wallis test was performed to compare the results from groups of human teeth and resin simulators (Table 2).

Table 2. Comparison of strength test values according to the type of endodontic treatment, the type of preparation and the materials used for endocrowns for the human teeth and the resin simulators (Kruskal-Wallis test).

		Human teeth										
		C+	FP-Fla-Ce	FP-Fla-Co	FP-Fer-Ce	FP-Fer-Co	Rct-Fla-Ce	Rct-Fla-Co	Rct-Fer-Ce	Rct-Fer-Co	FP-	Rct-
Resin simulators	C+		NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	p=0.003	p=0.009
	FP-Fla-Ce	p=0.008		NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	p<0.001	p<0.001
	FP-Fla-Co	NS	NS		NS	NS	NS	NS	NS	NS	p<0.001	p<0.001
	FP-Fer-Ce	p=0.001	NS	NS		NS	NS	NS	NS	NS	p<0.001	p<0.001
	FP-Fer-Co	NS	NS	NS	NS		NS	NS	NS	NS	p=0.001	p=0.003
	Rct-Fla-Ce	p<0.001	NS	NS	NS	NS		NS	NS	NS	p<0.001	p<0.001
	Rct-Fla-Co	NS	NS	NS	NS	NS	p=0.05		NS	NS	p<0.001	p=0.002
	Rct-Fer-Ce	p=0.014	NS	NS	NS	NS	NS	NS		NS	p<0.001	p<0.001
	Rct-Fer-Co	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS		p<0.001	p<0.001
	FP-	NS	p<0.001	NS	p<0.001	NS	p<0.001	NS	p<0.001	p=0.024		NS
Rct-	NS	p<0.001	NS	p<0.001	NS	p<0.001	NS	p<0.001	p=0.02	NS		

(NS: Non significant)

For human teeth groups, the ANOVA test separated two homogeneous groups, the negative controls grouping the Root canal treated teeth or Full Pulpotomy treated teeth without coronal restoration (Rct- and FP-) and all the other samples, i.e., the untreated

sound teeth (positive control, C+) and the treated and restored teeth. The negative control groups showed significantly lower resistance than the untreated sound teeth or teeth treated with coronal restoration.

The results of the Kruskal-Wallis test were different for the resin simulator in contrast to natural human teeth. The resin simulators with ceramic restorations and either endodontic treatments (Rct or FP) had greater resistance than the simulators without treatment, and those without restoration. Untreated simulators (positive control, C+) had the same resistance as simulators with endodontic treatment without restoration (negative controls, Rct- and FP-). Simulators with composite restorations had the same fracture resistance as simulators without restorations except for composite restorations with circumferential ferrule preparation and in the case of Rct.

Fracture type:

Amongst the 110 human teeth, 36 had favorable fractures. The distribution of the type of fracture depending on the different groups is visible in Table 3.

Table 3. Comparison of distribution of the type of fracture in each group for the human teeth (Khi-2 test).

Groups	Favorable Fracture (n)	Catastrophic Fracture (n)	Significance compared to the positive control	Significance compared to the negative control (FP- or Rct-)
C+	10	0		
FP-	5	5	p<0.01	
FP-Fla-Ce	0	10	p<0.001	p<0.01
FP-Fla-Co	3	7	p<0.01	NS
FP-Fer-Ce	1	9	p<0.001	NS
FP-Fer-Co	3	7	p<0.01	NS
Rct-	4	6	p<0.01	
Rct-Fla-Ce	2	8	p<0.001	NS
Rct-Fla-Co	3	7	p<0.01	NS
Rct-Fer-Ce	2	8	p<0.001	NS
Rct-Fer-Co	3	7	p<0.01	NS

NS: non-significant

The type of fracture was always less favorable for treated teeth than for sound teeth. The type of fracture of all the groups of treated teeth was the same as the negative control groups except for the group of teeth treated by pulpotomy and flat margin ceramic endocrown (FP-Fla-Ce), which was always catastrophic.

Amongst the 110 resin simulators, 3 had favorable fractures. The distribution of the type of fracture depending on the different groups is visible in Table 4.

Table 4. Comparison of distribution of the type of fracture in each group for the resin simulators (Khi-2 test).

Groups	Favorable Fracture (n)	Catastrophic Fracture (n)	Significance compared to the positive control	Significance compared to the negative control (FP- or Rct-)
C+	0	10		
FP-	0	10	NS	
FP-Fla-Ce	0	10	NS	NS
FP-Fla-Co	1	9	NS	NS
FP-Fer-Ce	0	10	NS	NS
FP-Fer-Co	1	9	NS	NS
Rct-	0	10	NS	
Rct-Fla-Ce	0	10	NS	NS
Rct-Fla-Co	1	9	NS	NS
Rct-Fer-Ce	0	10	NS	NS
Rct-Fer-Co	0	10	NS	NS

NS: non-significant

The type of fracture was catastrophic for resin simulators regardless of the material, the preparation, or the endodontic treatment.

DISCUSSION

To our knowledge, this is the first work on assessing the *in vitro* mechanical behavior of molars treated either with pulpotomy or root canal treatment. For human teeth, pulpotomy and root canal treatment had similar impacts on the strength resistance and the

type of tooth fracture, regardless of the composition of the milling material and the type of the peripheral limit. These results suggest that indications to use endocrown restoration would not be based on the mechanical resistance of endodontic treated teeth. Other parameters such as the pulpal diagnosis, the risks factors for occlusal and proximal wear, and the ferrule effect, could be considered. Finally, the interest of the ferrule effect could be reexamined, at least with the objective of improving the mechanical resistance of endocrowns. The ancillary study demonstrated that the mechanical behavior of resin simulators did not reproduce that of human teeth.

Pulpal diagnosis should be performed first to indicate either pulpotomy or root canal treatment. Full pulpotomy has been indicated for the treatment of reversible pulpitis associated with a carious lesion or a healthy pulp after traumatic pulp exposure in primary teeth and immature permanent teeth¹⁷. In mature permanent teeth, it was used as an emergency procedure before root canal treatment in teeth with irreversible pulpitis¹⁸. During the last decade, better understanding of pulpal biology and the development of bioactive materials has led to reinvestigating pulpotomy as a definitive treatment for vital mature permanent teeth needing root canal treatment due to inflammatory conditions. Pulpotomy and root canal treatment demonstrate comparable and effective postoperative pain relief, since the pulpotomy procedure provides a significant gain in time compared to root canal treatment¹⁹. Pulpal necrosis or the infection of one or more canals are contraindications for performing a pulpotomy. Many recent studies have shown that the quality of the coronal restoration, its sealing and the delay before its implementation are key factors for the success of pulpotomy²⁰⁻²³. Better tooth survival rate is observed if the restoration is carried out within two days of pulpal exposure, thus emphasizing the need

to limit the number of treatment sessions and the time between them²⁴. Thus, when pulpotomy is biologically indicated and endocrown restoration can be performed within a short time, this treatment can be offered to patients without loss of chance from the mechanical point of view for the tooth, compared to root canal treatment. Moreover, patients spend less time in the chair and the iatrogenic risks inherent to root canal treatment (instrumental fracture, stripping, etc.) can be avoided. This is particularly true in molars where iatrogenic perforations are more frequent, especially if they have significant curvatures²⁵. Today, the use of posts is limited because it does not increase the tooth resistance and is indicated only in case of high loss of dental tissue to increase the retention of restorations²⁶. Furthermore, the use of posts in the posterior sector is considerably reduced and an endocrown²⁷ or overlay with composite build up²⁸ is even proposed for severely damaged tooth. In this respect, the indication for pulpotomy treatment is no longer limited.

This study showed that the resistance strength of the restored teeth is similar when comparing composite and ceramic endocrown. This point has been discussed in previous studies and remains a subject of interest. Finite element studies have shown less stress generated for ceramic²⁹⁻³² and composite³³⁻³⁵ endocrowns. In contrast, *in vitro* studies have reported better resistance with less favorable fractures for ceramic endocrowns^{16,36} than for composite endocrowns^{16,37-39}. Moreover, indications for the use of ceramic rather than composite endocrowns should be considered with regard to the high-rate of composite wear^{40,41}. Clinicians are faced with a conflictual choice between ceramic and composite endocrowns. On the one hand, composite material leads to fractures of the endocrown, allowing the tooth to be re-restored. On the other hand, ceramic material

offers a sustainable solution to restore the proximal and occlusal contacts. An original two-piece combination of one build-up made of resin composite in the pulp chamber and a ceramic overlay was proposed. It was demonstrated that the mechanical resistance of the 2-piece restorations was similar to that of ceramic endocrowns⁴². For teeth treated by pulpotomy, a layer of the material used for pulp capping is always present in the chamber volume and more or less fills all the pulp volume, as is done in a build-up. In such situations, the question is whether the pulp capping material could have sufficient biomechanical qualities for it to be considered as a core build-up. Several studies have reported the use of Mineral Trioxide Aggregate material (MTA), calcium enriched mixture (CEM) and Biodentine[®] for pulp capping after full pulpotomy. It was demonstrated that Biodentine[®] has higher resistance value to compressive strength than CEM or MTA, which reaches the resistance of dentine⁴³, but remains lower than that of composite⁴⁴. In order to replace a composite core with a Biodentine[®] core, it is necessary to verify whether it is possible to bond a ceramic endocrown on Biodentine[®]. It was shown that regarding resistance to shear, bond strength is lower for the Biodentine[®]/ceramic interface than for composite/ceramic⁴⁵. To improve the resistance of the Biodentine[®]/ceramic interface, some authors suggest applying a composite layer between the Emax overlay and the Biodentine[®] core. The bonding system with 10-MDP seems to give better interface quality than other bonding systems⁴⁶. Further studies are necessary to investigate the quality of the interface between both materials used for endocrowns and a core build-up, and particularly to test whether the quality of the interface also depends on the type of ceramic used for endocrowns.

The present study showed that there is no ferrule effect in the case of preparations for endocrowns. However, when the teeth were prepared for full crowns, the ferrule effect was considered as an important criterion for survival prognosis. Indeed, this effect was recently discussed in a systematic review². *In vitro* studies showed a protective effect of the ferrule in relation to the fracture⁴⁷⁻⁴⁹, and *in vivo* studies showed a very high survival rate in which failures were due to debonding of the endocrown and not to fracture^{7,8}. The advantages of preparations with a ferrule were related to the height of the ferrule and the bevel of the margin. A recent finite element study proposed to perform a 20° bevel, which would produce the same effect as a conventional ferrule³⁴. For the present study, a 2 mm ferrule was chosen because it was reported in the literature that this value was necessary to protect the teeth with full crowns from catastrophic failure. Although one study showed that a height of 1 mm was a better value for endocrown restoration⁴⁸, another study showed a contradictory result with better protection with the 2 mm ferrule than with a 1 mm ferrule⁴⁹. In the present study, the presence of the ferrule had no effect on fracture resistance, although the absolute resistance value was recorded for the group with a ceramic endocrown with a ferrule preparation (group Rct-Fer-Ce). Including a smaller number of groups with a focus on teeth treated by pulpotomy might increase the possibility of making these differences significant.

This study demonstrated that 3D printed resin simulators could not be used in place of human teeth for *in vitro* resistance studies. However, the variance of the mean strength value was lower for 3D printed simulators than for human teeth. This suggests that the modeling of resin simulators allows controlling the variability of natural human teeth size and shape. Thus, the modeling of simulators could be interesting in experimental studies

in which new materials with mechanical behaviors close to those of enamel and dentin will be used in printers.

One limit of this study is the absence of artificial ageing. Given the large number of conditions tested in this study, the addition of thermocycling would have doubled the number of teeth needed. However, collecting teeth is a complex part of this type of study in a health care system that encourages the conservation of teeth, and where, in the concept of minimally invasive surgery, the extraction of complete teeth is rare. Another limit is that this study was conducted on mandibular molars, and cannot be generalized for other posterior teeth, particularly the maxillary premolar which is a tooth at high risk of fracture. For certain *in vitro* studies, for example, the use of a fiber post increased the fracture resistance of maxillary premolars⁵⁰ which is not the case for the other posterior teeth²⁶. A finite element study suggested that endocrowns could be the best restoration for maxillary premolars⁵¹. Further studies could be designed to investigate the effect of the type of teeth on endocrown fracture resistance. Finally, one can question the relevance of comparing the *in vitro* fracture resistance of natural teeth treated either with root canal treatment or full pulpotomy. The starting hypothesis was the fact that, *in vivo*, dentin moisture decreases the Young's modulus of radicular dentine⁵², in turn acts as a protective factor against fracture. However, in the *in vitro* studies, not all the avulsed teeth contained pulp tissue, and one cannot expect any difference in fracture resistance between groups with root canal treatment or pulpotomy. *In vivo* long-term follow-up studies would therefore be necessary to estimate the impact of the presence of vital pulp tissue on tooth strength. In such studies, other parameters could act as confounding

factors, as the extent of the tissue damage would be greater in teeth with root canal treatment than in teeth with pulpotomy.

CONCLUSION

Pulpotomy and root canal treatment had similar impacts on the strength resistance and the type of fracture of teeth restored with endocrowns, regardless of the composition of the milling material and the type of peripheral limit. This study suggested that endocrowns can therefore be chosen as a restoration for teeth treated by pulpotomy. This study provides new perspectives for treating teeth with inflammatory pulpal disease in one single chairside session, in combination with the use of CAD/CAM processing.

REFERENCES

1. Ferrari M, Pontoriero DIK, Ferrari Cagidiaco E, Carboncini F. Restorative difficulty evaluation system of endodontically treated teeth. *J Esthet Restor Dent.* 2022;34(1):65-80.
2. Dotto L, Giroto LPS, Correa Silva Sousa YT, Pereira GKR, Bacchi A, Sarkis-Onofre R. Factors influencing the clinical performance of the restoration of endodontically treated teeth: An assessment of systematic reviews of clinical studies. *J Prosthet Dent.* 2022:S0022-3913(22)00213-X.
3. Helfer AR, Melnick S, Schilder H. Determination of the moisture content of vital and pulpless teeth. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol.* 1972;34(4):661-70.
4. Papa J, Cain C, Messer HH. Moisture content of vital vs endodontically treated teeth. *Endod Dent Traumatol.* 1994;10(2):91-3.
5. Soares CJ, Santana FR, Silva NR, Preira JC, Pereira CA. Influence of the endodontic treatment on mechanical properties of root dentin. *J Endod.* 2007;33(5):603-6.
6. Munoz-Sanchez ML, Bessadet M, Lance C, Bonnet G, Veyrune JL, Nicolas E, Hennequin M, Decerle N. Survival Rate of CAD-CAM Endocrowns Performed by Undergraduate Students. *Oper Dent.* 2021;46(5):505-515.
7. Belleflamme MM, Geerts SO, Louwette MM, Grenade CF, Vanheusden AJ, Mainjot AK. No post-no core approach to restore severely damaged posterior teeth: An up to 10-year retrospective study of documented endocrown cases. *J Dent.* 2017;63:1-7.
8. Fages M, Raynal J, Tramini P, Cuisinier FJ, Durand JC. Chairside Computer-Aided Design/Computer-Aided Manufacture All-Ceramic Crown and Endocrown Restorations: A 7-Year Survival Rate Study. *Int J Prosthodont.* 2017;30(6):556–560.
9. Munoz-Sanchez ML, Linas N, Decerle N, Nicolas E, Hennequin M, Cousson PY. A Combination of Full Pulpotomy and Chairside CAD/CAM Endocrown to Treat Teeth with Deep Carious Lesions and Pulpitis in a Single Session: A Preliminary Study. *Int J Environ Res Public Health.* 2020;17(17):6340.
10. Beji Vijayakumar J, Varadan P, Balaji L, Rajan M, Kalaiselvam R, Saeralathan S, Ganesh A. Fracture resistance of resin based and lithium disilicate endocrowns. Which is better? - A systematic review of *in-vitro* studies. *Biomater Investig Dent.* 2021;8(1):104-111.

11. Lee SJ, Lee S, Lim J, Ahn SJ, Kim TW. Cluster analysis of tooth size in subjects with normal occlusion. *Am J Orthod Dentofacial Orthop.* 2007;132(6):796-800.
12. Robberecht L, Hornez JC, Dehurtevent M, Dufour T, Labreuche J, Deveaux E, Chai F. Optimization and Preclinical Perception of an Artificial Simulator for Endodontic Training: A Preliminary Study. *J Dent Educ.* 2017;81(3):326-332. PMID: 28250039.
13. Reymus M, Stawarczyk B, Winkler A, Ludwig J, Kess S, Krastl G, Krug R. A critical evaluation of the material properties and clinical suitability of in-house printed and commercial tooth replicas for endodontic training. *Int Endod J.* 2020;53(10):1446-1454.
14. Höhne C, Schmitter M. 3D Printed Teeth for the Preclinical Education of Dental Students. *J Dent Educ.* 2019;83(9):1100-1106.
15. Delfosse C, Marquillier T, Ndoye S, Cousson PY, Hennequin M, Catteau C. Effect on undergraduate student self-confidence in using 3D printed primary molars for root canal treatment simulation training. *Eur Arch Paediatr Dent.* 2022 Oct 31.
16. Altier M, Erol F, Yildirim G, Dalkilic EE. Fracture resistance and failure modes of lithium disilicate or composite endocrowns. *Niger J Clin Pract.* 2018;21(7):821-826.
17. Pulp Therapy for Primary and Immature Permanent Teeth. *Pediatr Dent.* 2017;39(6):325-333.
18. Eren B, Onay EO, Ungor M. Assessment of alternative emergency treatments for symptomatic irreversible pulpitis: a randomized clinical trial. *Int Endod J.* 2018 Apr;51 Suppl 3:e227-e237. doi: 10.1111/iej.12851. Epub 2017 Oct 16.
19. Eghbal MJ, Haeri A, Shahravan A, Kazemi A, Moazami F, Mozayeni MA, et al. Postendodontic Pain after Pulpotomy or Root Canal Treatment in Mature Teeth with Carious Pulp Exposure: A Multicenter Randomized Controlled Trial. *Pain Res Manag.* 2020;2020:5853412.
20. Asgary S, Fazlyab M, Sabbagh S, Eghbal MJ. Outcomes of different vital pulp therapy techniques on symptomatic permanent teeth: a case series. *Iran Endod J.* 2014;9(4):295-300.
21. Awawdeh L, Al-Qudah A, Hamouri H, Chakra RJ. Outcomes of Vital Pulp Therapy Using Mineral Trioxide Aggregate or Biodentine: A Prospective Randomized Clinical Trial. *J Endod.* 2018;44(11):1603-1609.

22. Taha NA, Abdelkhader SZ. Outcome of full pulpotomy using Biodentine in adult patients with symptoms indicative of irreversible pulpitis. *Int Endod J.* 2018;51(8):819-828.
23. Zanini M, Hennequin M, Cousson PY. Which procedures and materials could be applied for full pulpotomy in permanent mature teeth? A systematic review. *Acta Odontol Scand.* 2019;77(7):541-551.
24. Zanini M, Hennequin M, Cousson PY. Which procedures and materials could be applied for full pulpotomy in permanent mature teeth? A systematic review. *Acta Odontol Scand.* 2019;77(7):541-551.
25. Sarao SK, Berlin-Broner Y, Levin L. Occurrence and risk factors of dental root perforations: a systematic review. *Int Dent J.* 2020;71(2):96–105.
26. Bhuva B, Giovarruscio M, Rahim N, Bitter K, Mannocci F. The restoration of root filled teeth: a review of the clinical literature. *Int Endod J.* 2021;54(4):509-535.
27. Biacchi GR, Mello B, Basting RT. The endocrown: an alternative approach for restoring extensively damaged molars. *J Esthet Restor Dent.* 2013;25(6):383-90.
28. Magne P, Goldberg J, Edelhoff D, Güth JF. Composite Resin Core Buildups With and Without Post for the Restoration of Endodontically Treated Molars Without Ferrule. *Oper Dent.* 2016;41(1):64-75.
29. Gulec L, Ulusoy N. Effect of Endocrown Restorations with Different CAD/CAM Materials: 3D Finite Element and Weibull Analyses. *Biomed Res Int.* 2017;2017:5638683.
30. Abtahi S, Alikhasi M, Siadat H. Biomechanical behavior of endocrown restorations with different cavity design and CAD-CAM materials under a static and vertical load: A finite element analysis. *J Prosthet Dent.* 2022;127(4):600.e1-600.e8.
31. Meng Q, Zhang Y, Chi D, Gong Q, Tong Z. Resistance fracture of minimally prepared endocrowns made by three types of restorative materials: a 3D finite element analysis. *J Mater Sci Mater Med.* 2021;32(11):137.
32. He J, Zheng Z, Wu M, Zheng C, Zeng Y, Yan W. Influence of restorative material and cement on the stress distribution of endocrowns: 3D finite element analysis. *BMC Oral Health.* 2021;21(1):495.

33. Zheng Z, He Y, Ruan W, Ling Z, Zheng C, Gai Y, Yan W. Biomechanical behavior of endocrown restorations with different CAD-CAM materials: A 3D finite element and in vitro analysis. *J Prosthet Dent.* 2021;125(6):890-899.
34. Zheng Z, Sun J, Jiang L, Wu Y, He J, Ruan W, Yan W. Influence of margin design and restorative material on the stress distribution of endocrowns: a 3D finite element analysis. *BMC Oral Health.* 2022;22(1):30.
35. Sedrez-Porto JA, Rosa WL, da Silva AF, Münchow EA, Pereira-Cenci T. Endocrown restorations: A systematic review and meta-analysis. *J Dent.* 2016;52:8-14.
36. Acar DH, Kalyoncuoğlu E. The fracture strength of endocrowns manufactured from different hybrid blocks under axial and lateral forces. *Clin Oral Investig.* 2021;25(4):1889-1897.
37. Sedrez-Porto JA, Münchow EA, Cenci MS, Pereira-Cenci T. Which materials would account for a better mechanical behavior for direct endocrown restorations? *J Mech Behav Biomed Mater.* 2020;103:103592.
38. Pedrollo Lise D, Van Ende A, De Munck J, Umeda Suzuki TY, Cardoso Vieira LC, Van Meerbeek B. Biomechanical behavior of endodontically treated premolars using different preparation designs and CAD/CAM materials. *J Dent.* 2017;59:54-61.
39. El-Damanhoury HM, Haj-Ali RN, Platt JA. Fracture resistance and microleakage of endocrowns utilizing three CAD-CAM blocks. *Oper Dent.* 2015;40(2):201-10.
40. Matzinger M, Hahnel S, Preis V, Rosentritt M. Polishing effects and wear performance of chairside CAD/CAM materials. *Clin Oral Investig.* 2019;23(2):725-737.
41. Vanoorbeek S, Vandamme K, Lijnen I, Naert I. Computer-aided designed/computer-assisted manufactured composite resin versus ceramic single-tooth restorations: a 3-year clinical study. *Int J Prosthodont.* 2010;23(3):223-30.
42. Carvalho AO, Bruzi G, Anderson RE, Maia HP, Giannini M, Magne P. Influence of Adhesive Core Buildup Designs on the Resistance of Endodontically Treated Molars Restored With Lithium Disilicate CAD/CAM Crowns. *Oper Dent.* 2016;41(1):76-82.
43. Kayahan MB, Nekoofar MH, Kazandağ M, Canpolat C, Malkondu O, Kaptan F, Dummer PM. Effect of acid-etching procedure on selected physical properties of mineral trioxide aggregate. *Int Endod J.* 2009;42(11):1004-14.

44. Subash D, Shoba K, Aman S, Bharkavi SKI, Nimmi V, Abhilash R. Fracture Resistance of Endodontically Treated Teeth Restored with Biodentine, Resin Modified GIC and Hybrid Composite Resin as a Core Material. *J Clin Diagn Res.* 2017;11(9):ZC68-ZC70.
45. Al-Manei KK, Ban Owaiwid A, AlDhafiri R, Al-Manei K, AlHarran S, Alsulaimani R. Shear Bond Strength of E. Max Ceramic Restoration to Hydraulic Calcium Silicate Based Cement (Biodentine): An In Vitro Study. *Eur Endod J.* 2020;5(3):288-294.
46. Pradelle-Plasse N, Mocquot C, Semennikova K, Colon P, Grosogeat B. Interface between calcium silicate cement and adhesive systems according to adhesive families and cement maturation. *Restor Dent Endod.* 2020;46(1):e3.
47. Ahmed MAA, Kern M, Mourshed B, Wille S, Chaar MS. Fracture resistance of maxillary premolars restored with different endocrown designs and materials after artificial ageing. *J Prosthodont Res.* 2022;66(1):141-150.
48. Einhorn M, DuVall N, Wajdowicz M, Brewster J, Roberts H. Preparation Ferrule Design Effect on Endocrown Failure Resistance. *J Prosthodont.* 2019;28(1):e237-e242.
49. Tribst JPM, Dal Piva AMO, de Jager N, Bottino MA, de Kok P, Kleverlaan CJ. Full-Crown Versus Endocrown Approach: A 3D-Analysis of Both Restorations and the Effect of Ferrule and Restoration Material. *J Prosthodont.* 2021;30(4):335-344.
50. Iaculli F, Rengo C, Lodato V, Patini R, Spagnuolo G, Rengo S. Fracture resistance of endodontically-treated maxillary premolars restored with different type of posts and direct composite reconstructions: A systematic review and meta-analysis of in vitro studies. *Dent Mater.* 2021;37(9):e455-e484.
51. Lin CL, Chang YH, Chang CY, Pai CA, Huang SF. Finite element and Weibull analyses to estimate failure risks in the ceramic endocrown and classical crown for endodontically treated maxillary premolar. *Eur J Oral Sci.* 2010;118(1):87-93.
52. Huang TJ, Schilder H, Nathanson D. Effects of moisture content and endodontic treatment on some mechanical properties of human dentin. *J Endod.* 1992;18(5):209-15.

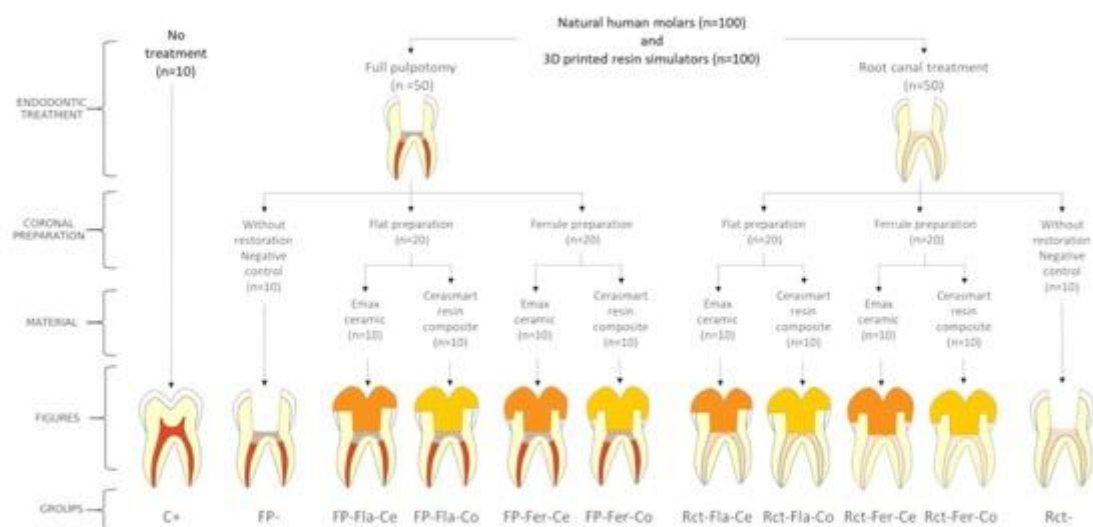


Figure 1. Study design

C+: Sound teeth (Positive control)

FP-: Teeth with FP and no restoration (Negative control for FP treated teeth),

FP-Fla-Ce: FP treated teeth restored with a Flat margin ceramic endocrown,

FP-Fla-Co: FP treated teeth restored with a Flat margin composite endocrown,

FP-Fer-Ce: FP treated teeth restored with a ceramic endocrown with 2 mm circumferential ferrule,

FP-Fer-Co: FP treated teeth restored with a resin composite endocrown with a 2 mm circumferential ferrule,

Rct-Fla-Ce: Root canal treated teeth restored with a ceramic endocrown with a flat margin, Rct-Fla-Co: Root canal treated teeth restored with a resin composite endocrown with flat margin,

Rct-Fer-Ce: Root canal treated teeth restored with a ceramic endocrown with a 2 mm circumferential ferrule,

Rct-Fer-Co: Root canal treated teeth restored with a composite endocrown with a 2 mm circumferential ferrule,

Rct-: Teeth with RCT without restoration (Negative control for root canal treated teeth)).

This study design was duplicated with 3D printed resin simulators.



Figure 2. 3D representation of the different resin simulators

(a: resin simulator representing sound teeth; b: resin simulator representing teeth with an access cavity used for negative control; c: resin simulator representing teeth with a flat peripheral coronal preparation, d: resin simulator representing teeth with a 2mm peripheral ferrule).

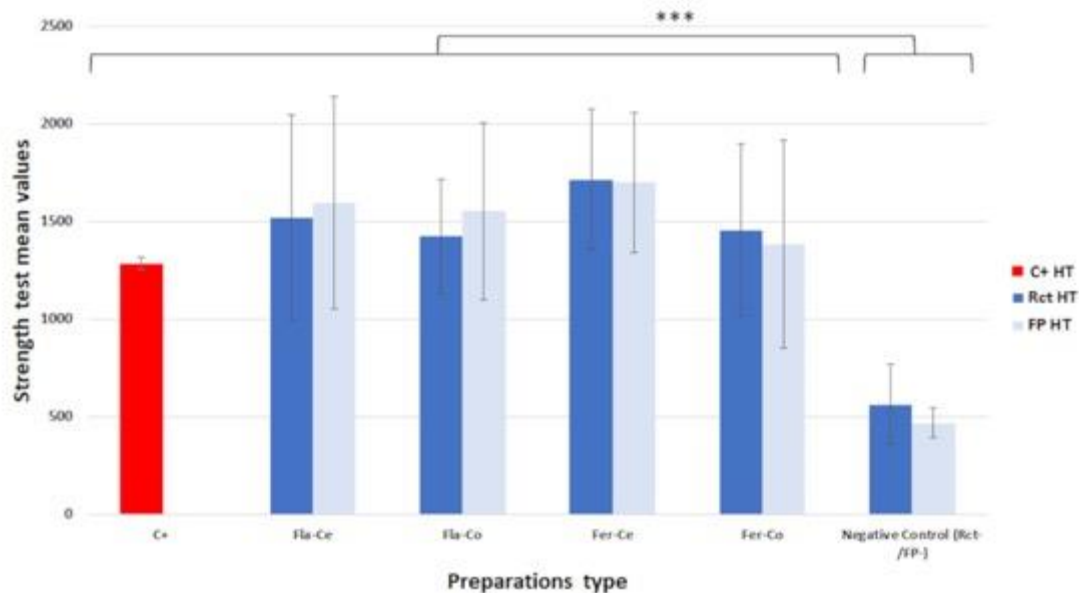


Figure 3. Comparison of strength test mean values assessed for human teeth according to the type of endodontic treatment, the type of coronal preparation and the materials used for endocrown milling (Anova test: ***: $p < 0.001$).

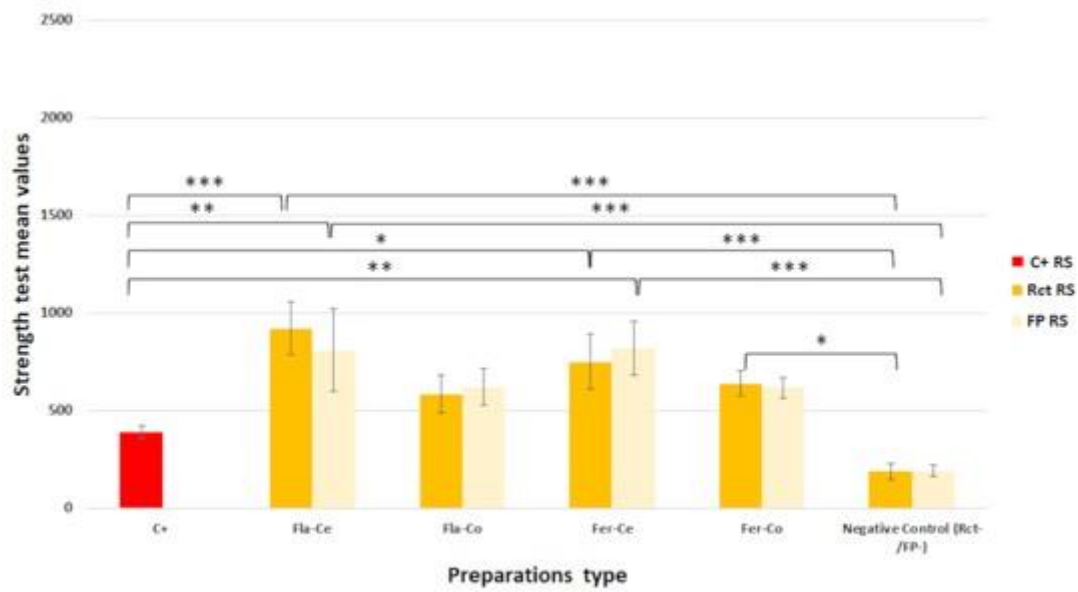


Figure 4. Comparison of strength test mean values assessed for resin simulators according to the type of endodontic treatment, the type of coronal preparation and the materials used for endocrown milling (Kruskal-wallis test *: $p < 0.05$; **: $p < 0.01$; ***: $p < 0.001$).

ENDODONTIC TREATMENTS	
Root canal treatment:	<p>Opening of the pulp chamber: with diamond bur (Komet, Gebrüder Brasseler, Lemgo, Allemagne)</p> <p>Creation of the access cavity with an Endo-Z bur (Dentsply Sirona, Bensheim Germany). A no. 10 K file was used to determine the working length.</p> <p>Instrumentation of the root canals: with a Niti file in reciprocating movement (Wave One Primary Dentsply Sirona, Bensheim Germany). Irrigation was ensured with a 2.5% sodium hypochlorite solution.</p> <p>Obturation: with a zinc oxide eugenol sealer (Sealite, Pierre Roland, Merignac France), and an appropriate Gutta Percha point for the Niti file (Wave One Primary Dentsply Sirona, Bensheim, Germany).</p> <p>Root canals were obturated by thermomechanical compaction. For 3D printed simulators, the treatment procedure was the same, except for the chamber opening as the simulators were printed with an access cavity.</p>
Full Pulpotomy:	<p>After opening and creating the access cavity, a third coronary preparation was made with a Gates Glidden Drill no. 2 (Dentsply Sirona, Bensheim Germany).</p> <p>Irrigation: with a 2,5% sodium hypochlorite solution. Drying was obtained with cotton pellet.</p> <p>Positioning of the bioactive material (Biodentine®, Septodont, Saint Maur des Fossés, France) in the pulp chamber, compacted with an amalgam plugger. An endo-stop was positioned on it to measure 3 mm thickness of obturation material.</p>
CORONAL PREPARATIONS	
Flat margin coronal preparation:	<p>The depth of occlusal reduction was marked on the teeth with a specialized bur (Deep Marker, Komet, Gebrüder Brasseler, Lemgo, Germany). Regularization of the margin with a diamond wheel bur (Komet, Gebrüder Brasseler, Lemgo, Germany).</p>
Peripheral ferrule preparation:	<p>After flat margin preparation, the deep marker was reused to mark 2 mm height on each face and a 2 mm guided bur was used to produce the ferrule preparation.</p>
ENDOCROWN MATERIALS AND PROTOCOLS	
Restoration design and milling:	<p>Teeth were mounted in a master model and scanned with Cerec Primescan (Dentsply Sirona Dental System, Bensheim, Germany).</p> <p>Design of the restorations with the biocopy function from a reference tooth from a Frasco model (Frasco GmbH, Tettwang, Germany).</p> <p>All endocrowns were milled with a Cerec InLab MCXL milling unit (Dentsply Sirona Dental System, Bensheim, Germany).</p> <p>Crystallization of the ceramic restorations using a Programat CS furnace (Ivoclar Vivadent, Schaan, Lichtenstein).</p> <p>For the 3D simulators, the biocopy modelling function of the Cerec Primescan system was applied using the simulator of untreated teeth as model.</p>
Emax adhesive protocol:	<p>Endocrown intrados: etching for 20 s using 9% hydrofluoric acid (Porcelain Etch, Ultradent, South Jordan, United States). After rinsing (30 s) and drying, a silane coupling agent was applied for 1 min (Monobond Plus, Ivoclar Vivadent, Schaan, Lichtenstein).</p> <p>Tooth or simulator: etching with 35% orthophosphoric acid (CyberEtch, Henry Schein, Joué-les-Tours, France), and ExciTE (Ivoclar Vivadent Schaan Lichtenstein) bonding applied with a microbrush.</p> <p>Cementation: Variolink Esthetic DC (Ivoclar Vivadent Schaan Lichtenstein) under digital pressure. A light cure was performed 2 times for 20 s.</p>
Cerasmart (GC Tokyo, Japan) adhesive protocol:	<p>Endocrown intrados: etching for 20 s using 9% hydrofluoric acid (Porcelain Etch, Ultradent, South Jordan, United States). After rinsing (30 s) and drying, a primer agent was applied (G Multi Primer, GC, Tokyo, Japan).</p> <p>Tooth or simulator: etching with 35% orthophosphoric acid (CyberEtch, Henry Schein, Joué-les-Tours, France), and G-Premio BOND bonding (G Multi Primer, GC, Tokyo, Japan) applied with a microbrush, and after 10 s waiting, 5 s drying and light curing for 10 s.</p> <p>Cementation: G-CEM LinkForce (GC Tokyo, Japan) under digital pressure. A light cure was performed twice for 20 s.</p>

Table 1. Procedures for endodontic treatment and coronal preparation.

		Human teeth										
		C+	FP-Fla-Ce	FP-Fla-Co	FP-Fer-Ce	FP-Fer-Co	Rct-Fla-Ce	Rct-Fla-Co	Rct-Fer-Ce	Rct-Fer-Co	FP-	Rct-
Resin simulators	C+		NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	p=0.003	p=0.009
	FP-Fla-Ce	p=0.008		NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	p<0.001	p<0.001
	FP-Fla-Co	NS	NS		NS	NS	NS	NS	NS	NS	p<0.001	p<0.001
	FP-Fer-Ce	p=0.001	NS	NS		NS	NS	NS	NS	NS	p<0.001	p<0.001
	FP-Fer-Co	NS	NS	NS	NS		NS	NS	NS	NS	p=0.001	p=0.003
	Rct-Fla-Ce	p<0.001	NS	NS	NS	NS		NS	NS	NS	p<0.001	p<0.001
	Rct-Fla-Co	NS	NS	NS	NS	NS	p=0.05		NS	NS	p<0.001	p=0.002
	Rct-Fer-Ce	p=0.014	NS	NS	NS	NS	NS	NS		NS	p<0.001	p<0.001
	Rct-Fer-Co	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS		p<0.001	p<0.001
	FP-	NS	p<0.001	NS	p<0.001	NS	p<0.001	NS	p<0.001	p=0.024		NS
Rct-	NS	p<0.001	NS	p<0.001	NS	p<0.001	NS	p<0.001	p=0.02	NS		

Table 2. Comparison of strength test values according to the type of endodontic treatment, the type of preparation and the materials used for endocrowns for the human teeth and the resin simulators (Kruskal-Wallis test).

Groups	Favorable Fracture (n)	Catastrophic Fracture (n)	Significance compared to the positive control	Significance compared to the negative control (FP- or Rct-)
C+	10	0		
FP-	5	5	p<0.01	
FP-Fla-Ce	0	10	p<0.001	p<0.01
FP-Fla-Co	3	7	p<0.01	NS
FP-Fer-Ce	1	9	p<0.001	NS
FP-Fer-Co	3	7	p<0.01	NS
Rct-	4	6	p<0.01	
Rct-Fla-Ce	2	8	p<0.001	NS
Rct-Fla-Co	3	7	p<0.01	NS
Rct-Fer-Ce	2	8	p<0.001	NS
Rct-Fer-Co	3	7	p<0.01	NS

Table 3. Comparison of distribution of the type of fracture in each group for the human teeth (Khi-2 test).

Groups	Favorable Fracture (n)	Catastrophic Fracture (n)	Significance compared to the positive control	Significance compared to the negative control (FP- or Rct-)
C+	0	10		
FP-	0	10	NS	
FP-Fla-Ce	0	10	NS	NS
FP-Fla-Co	1	9	NS	NS
FP-Fer-Ce	0	10	NS	NS
FP-Fer-Co	1	9	NS	NS
Rct-	0	10	NS	
Rct-Fla-Ce	0	10	NS	NS
Rct-Fla-Co	1	9	NS	NS
Rct-Fer-Ce	0	10	NS	NS
Rct-Fer-Co	0	10	NS	NS

Table 4. Comparison of distribution of the type of fracture in each group for the resin simulators (Khi-2 test).

**MUNOZ-SANCHEZ Marie-Laure – « RESTAURATION ET TRAITEMENT ENDODONTIQUE
DES DENTS POSTERIEURES EN UNE SEANCE UNIQUE :
UN CHANGEMENT DE PARADIGME »**

- (Thèse : Université ; Université Clermont Auvergne ; 2023) –

Résumé : Le traitement endodontique d'une dent n'est considéré comme terminé que lorsque la restauration coronaire est mise en place afin de garantir l'étanchéité du traitement et la remise en fonction de la dent. La qualité de la restauration coronaire est un des facteurs clé de la réussite à long terme du traitement endodontique. Des défauts d'étanchéité coronaire, propices à la (re)colonisation bactérienne, sont des facteurs contribuant à la survenue et/ou à l'aggravation des pathologies apicales. Le pronostic du traitement endodontique peut être amélioré par la réalisation d'une restauration coronaire immédiate, étanche et définitive. Au vu de l'avancée des technologies et des matériaux, la restauration d'une dent dépulpée peut maintenant être envisagée dans la même séance que le traitement endodontique. Cette thèse a pour objectif d'évaluer la restauration de la dent postérieure traitée endodontiquement en une séance unique et en fonction de certaines conditions spécifiques de soins.

La première partie de ce travail présente le développement et la validation d'un outil d'évaluation radiologique, qui a ensuite été utilisé pour évaluer 360 dents restaurées par coiffe préformées entre 2013 et 2019, chez des patients pris en charge sous AG, donc dans le cadre d'une séance de soin unique la plus courte possible. Toutes les coiffes ont été réévaluées pendant une durée moyenne de 12,5 mois. En général, peu de défauts majeurs ont été scorés pour les coiffes pour les quatre critères sélectionnés. Par la suite, en alternative à la restauration par coiffe préformée, une étude pilote a été mise en place au sein du service Odontologie afin d'évaluer l'association d'une pulpotomie thérapeutique et d'une restauration par CFAO collée au cours d'une séance de soins unique. Trente dents ont été incluses dans l'étude sur une durée de 18 mois, 28 ont été revues à un mois, 16 à six mois et 8 à un an et toutes les dents revues présentaient un succès de la procédure au regard de critères cliniques et radiologiques.

La troisième partie de ce travail est une étude rétrospective d'analyse des données concernant le taux de survie et les causes d'échec des dents restaurées par endocouronnes CFAO réalisées par des étudiants en formation initiale. Sur les 199 patients inclus dans la cohorte, 225 endocouronnes ont été évaluées pendant une période de 56 +/- 26 mois. Les résultats montraient un bon taux de survie de 81,8 % des dents restaurées par endocouronne (71,8 % à 9 ans).

Enfin, en l'absence de données sur les pratiques de préparation des dents destinées à être restaurées par endocouronne, une étude *in vitro* a été réalisée pour rechercher les facteurs agissant sur la résistance à la fracture de molaires. L'objectif était de déterminer si une combinaison de traitement endodontique, type de préparation et matériaux de restauration de l'endocouronne était plus susceptible qu'une ou plusieurs autres de présenter une meilleure résistance à des tests de fracture.

Les restaurations par coiffe préformée constituent encore une solution fiable de restauration coronaire définitive de la molaire permanente traitée endodontiquement, dans des conditions particulières de soins. Les techniques récentes de CFAO et les améliorations en termes de matériaux (de coiffage pulpaire, de restauration ou de collage) semblent les pistes les plus prometteuses pour les années à venir pour la restauration immédiate de la dent postérieure permanente traitée endodontiquement.

MOTS CLES : Traitement endodontique ; Pulpotomie ; Coiffe préformée ; Anesthésie Générale ; Endocouronne ; CFAO

KEY WORDS : Endodontic treatment ; Pulpotomy ; Stainless Steel Crown ; General Anesthesia ; Endocrown ; CAD/CAM