



UNIVERSITE DE LILLE

FACULTE DE CHIRURGIE DENTAIRE

Année de soutenance : 2023

N° : 4735

THESE POUR LE

DIPLOME D'ETAT DE DOCTEUR EN CHIRURGIE DENTAIRE

Présentée et soutenue publiquement le 31 mars 2023

Par Charlotte D'ALLENDE

Née le 12 février 1996 à Calais - France

XP-ENDO SHAPER[®] :

CHANGEMENT DE PARADIGME DE MISE EN FORME CANALAIRE

JURY

Président : Monsieur le Professeur Etienne DEVEAUX

Assesseurs : Monsieur le Docteur Alain GAMBIEZ

Monsieur le Docteur Lieven ROBBERECHT

Madame le Docteur Marine HENAUT

Membre invité : Monsieur le Docteur Alexandre DEMETRIOU



Président de l'Université	:	Pr. R. BORDET
Directrice Générale des Services de l'Université	:	M-D. SAVINA
Doyen UFR3S	:	Pr. D. LACROIX
Directrice des Services d'Appui UFR3S	:	G. PIERSON
Doyen de la faculté d'Odontologie – UFR3S	:	Pr. C. DELFOSSE
Responsable des Services	:	M. DROPSIT
Responsable de la Scolarité	:	G. DUPONT

PERSONNEL ENSEIGNANT DE LA FACULTE.

PROFESSEURS DES UNIVERSITES :

K.AGOSSA	Parodontologie
P. BEHIN	Prothèses
T. COLARD	Fonction-Dysfonction, Imagerie, Biomatériaux
C. DELFOSSE	Doyen de la faculté d'Odontologie – UFR3S Odontologie Pédiatrique
E. DEVEAUX	Responsable du Département de Dentisterie Restauratrice Endodontie

MAITRES DE CONFERENCES DES UNIVERSITES

T. BECAVIN	Fonction-Dysfonction, Imagerie, Biomatériaux
A. BLAIZOT	Prévention, Epidémiologie, Economie de la Santé, Odontologie Légale.
P. BOITELLE	Responsable du Département de Prothèses
F. BOSCHIN	Responsable du Département de Parodontologie
C. CATTEAU	Responsable du Département de Prévention, Epidémiologie, Economie de la Santé, Odontologie Légale.
X. COUDEL	Biologie Orale
A. de BROUCKER	Fonction-Dysfonction, Imagerie, Biomatériaux
M. DEHURTEVENT	Prothèses
T. DELCAMBRE	Prothèses
F. DESCAMP	Prothèses
M. DUBAR	Parodontologie
A. GAMBIEZ	Dentisterie Restauratrice Endodontie
F. GRAUX	Prothèses
M. LINEZ	Dentisterie Restauratrice Endodontie
T. MARQUILLIER	Odontologie Pédiatrique
G. MAYER	Prothèses
L. NAWROCKI	Responsable du Département de Chirurgie Orale Chef du Service d'Odontologie A. Caumartin - CHRU Lille
C. OLEJNIK	Responsable du Département de Biologie Orale
P. ROCHER	Fonction-Dysfonction, Imagerie, Biomatériaux
L. ROBBERECHT	Dentisterie Restauratrice Endodontie
M. SAVIGNAT	Responsable du Département des Fonction-Dysfonction, Imagerie, Biomatériaux
T. TRENTESAUX	Responsable du Département d' Odontologie Pédiatrique
J. VANDOMME	Prothèses

Réglementation de présentation du mémoire de Thèse

Par délibération en date du 29 octobre 1998, le Conseil de la Faculté de Chirurgie Dentaire de l'Université de Lille a décidé que les opinions émises dans le contenu et les dédicaces des mémoires soutenus devant jury doivent être considérées comme propres à leurs auteurs, et qu'ainsi aucune approbation, ni improbation ne leur est donnée.

Table des matières

Introduction	8
1. Le traitement endodontique	9
1.1 Définitions et objectifs	9
1.2 L'anatomie du complexe pulpo-dentinaire	11
1.2.1 La pulpe coronaire	12
1.2.2 La pulpe radicaire	12
1.2.2.1 Classification de la morphologie canalaire	12
1.2.2.2 La complexité de l'anatomie canalaire	15
1.3 La mise en forme canalaire chimico-mécanique actuelle	23
1.3.1. La préparation mécanique	23
1.3.1.1 Système de rotation continue	23
1.3.1.2 Système de mouvement en réciprocité	24
1.3.2. La préparation chimique	25
1.3.3. Difficultés d'accès	28
2. Le système canalaire XP-endo Shaper®	33
2.1 Un système adaptatif tridimensionnel	33
2.1.1 Le principe de l'enveloppe de mouvement	33
2.1.2 Un instrument unique de mise en forme	34
2.1.2.1 Un système de choix dans la majorité des canaux	34
2.1.2.2 Limitation de l'extrusion des débris apicaux	35
2.2 Technicité : deux technologies combinées	36
2.2.1 L'alliage MaxWire® (Martensite-Austénite Electropolishing-Flex)	36
2.2.1.1 Traitement thermo-mécanique	36
2.2.1.2 Résistance à la fatigue	39
2.2.1.2.1 Résistance à la fatigue cyclique	39
2.2.1.2.1 Résistance à la fatigue par torsion	41
2.2.1.3 Micro-fêlures dentinaires	44
2.2.2 La pointe Booster Tip	46
2.3 Spécifications et conditionnement	46
2.4 Protocole d'utilisation	47
3. Évaluation des capacités de mise en forme canalaire	48
3.1 Intérêts	48
3.1.1 L'efficacité de la préparation canalaire mécanique	48
3.1.2 L'efficacité de la préparation canalaire chimique	52
3.1.3 Intérêt lors du retraitement endodontique	54
3.2 Limites	55
3.2.1 Le coût	55
3.2.2 Le micromoteur	55
3.2.3 L'ajustage du maître cône	55
3.2.4 L'obturation	55
3.2.5 La fracture instrumentale	55
3.2.6 Evidence based dentistry	55
Conclusion	56

Tables des abréviations

CBCT : Cone Beam Computed Tomography

Micro-CT : micro-Computed Tomography

NiTi : Nickel-Titane

EDTA : acide éthylènediamine tétra acétique

NaOCl : hypochlorite de sodium

AMD : activation manuelle dynamique

PUI : irrigation passive ultrasonique

AHTD : débris de tissus durs accumulés

SNI : irrigation à la seringue et à l'aiguille

Introduction

Depuis 1974 à, le concept de mise en forme actuel en endodontie est la conicité constante de préparation selon Schilder : mettre le canal sous la forme d'un cône régulier de base coronaire favorisant ainsi l'instrumentation apicale et l'intrusion des solutions d'irrigation. Mais ce concept initial de mise en forme n'est pas sans conséquence car engendre des pertes de substances au niveau de l'organe dentaire et ainsi le fragilise physiquement et mécaniquement : ces pertes de substances dentaires peuvent être liées à la sur-instrumentation pouvant être causée par le nombre de séquences instrumentales d'un système mais aussi et surtout par la suppression excessive de parois dentinaires lors de l'utilisation des instruments conventionnels de forme conique qui ne sont pas adaptés à l'anatomie canalaire. De plus, aucun instrument actuel imposant une conicité constante au canal ne permet de débrider la totalité des surfaces canalaires. C'est pour cela qu'aujourd'hui, il existe une recherche perpétuelle à propos d'un nouveau concept de mise en forme moins invasif afin de pouvoir s'éloigner du paradigme initial de conicité constante : un concept adaptatif dont l'instrumentation prend en considération le débridement de la totalité du complexe canalaire tout en s'adaptant à l'anatomie tridimensionnelle de celui-ci.

Ainsi, ce travail évoquera la complexité anatomique du système endodontique qui rappelle les limites de la mise en forme canalaire conventionnelle, et portera sur la problématique suivante : quelles innovations pourraient permettre d'instrumenter davantage de surfaces canalaires tout en préservant et en s'adaptant à l'anatomie tridimensionnelle de la complexité canalaire ? Tout en sachant qu'il est important de garder en tête que les innovations technologiques sont belles et bien présentes afin de guider et d'assister le praticien. C'est au praticien lui-même de rester maître de sa décision thérapeutique. Cette décision thérapeutique doit impérativement prendre en considération les souhaits et les possibilités du patient, l'expérience du praticien et pour finir les preuves scientifiques.

Afin de répondre à cette question, dans un premier temps l'abord du traitement endodontique et plus particulièrement du complexe pulpo-dentinaire est de mise afin d'apprécier toute sa complexité et la mise en forme canalaire actuelle avec ses limites. Puis dans un second volet, la présentation d'une innovation technologique apportée sur le marché par FKG Dentaire : le système XP-endo Shaper[®] qui présente un changement de paradigme par rapport à la mise en forme canalaire actuelle. Pour finir, une discussion est rédigée afin de comparer les capacités de mise en forme canalaire du système XP-endo Shaper avec les systèmes conventionnels actuels d'après les articles scientifiques publiés à ce jour.

1. Le traitement endodontique

Selon la Haute Autorité de Santé, le traitement endodontique est une thérapeutique qui vise à traiter les pulpopathies et les maladies du périapex. La résultante est de transformer une dent pathologique en une entité saine, asymptomatique et fonctionnelle sur l'arcade.

1.1 Définitions et objectifs

Les tissus durs de la dent représentent une barrière mécanique mais si elle est détruite que ce soit de façon partielle ou complète, les micro-organismes pénètrent dans l'endodonte, plusieurs voies sont possibles :

- par l'ouverture de la chambre pulpaire : cette ouverture est créée le plus fréquemment au niveau trans coronaire. Elle est la conséquence d'une lésion carieuse profonde (figure 1 - 1), d'un traumatisme pulpaire, ou d'un acte iatrogène par exemple une restauration non étanche (Figure 1 - 2), ce sont les bactéries salivaires et les bactéries de la plaque dentaire qui atteignent directement l'endodonte,
- par des anomalies pathologiques de la dent via des fissures, fêlures, érosions, abrasions (figure 1 - 3),
- par une lésion du parodonte : les bactéries parodontopathogènes présentes dans les poches peuvent accéder à l'endodonte par les canaux accessoires (figure 1 - 4),
- par voie générale (figure 1 - 5), c'est une voie de contamination rare, qui est sujette à controverse [64].

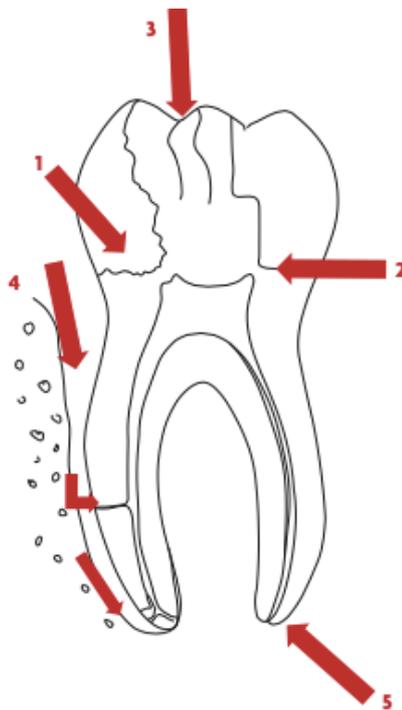


Figure 1 - 1 à 5 : dessin des voies de contamination bactérienne de l'endodonte [64].

Le système endodontique constitue donc un passage potentiel des bactéries de la cavité buccale vers la structure osseuse sous-jacente. Si l'endodonte est ouvert dans la cavité buccale, cela devient un véritable tunnel de bactéries vers le parodonte profond. Ainsi, le traitement endodontique repose sur la fermeture de ce passage afin de contrer le transport de ces micro-organismes et donc de pouvoir éviter l'apparition ou l'aggravation d'un processus inflammatoire au niveau de l'os sous-jacent [63].

L'objectif primaire du traitement endodontique est de prévenir ou d'éliminer l'infection, d'une part avec la réduction significative de la charge bactérienne et de leurs toxines au niveau du système canalaire, d'autre part avec l'élimination de tous les résidus pulpaire susceptibles de servir d'appuis et d'éléments nutritifs à cette prolifération bactérienne [64].

Les objectifs principaux sont :

- la mise en forme canalaire jusqu'au foramen apical par l'action mécanique des instruments,
- le nettoyage du système endodontique par l'action chimique des solutions d'irrigation,
- l'assèchement du système canalaire,
- assurer l'étanchéité de l'obturation tridimensionnelle du complexe endodontique ; cela va permettre de fermer toutes les connexions entre l'endodonte et le parodonte. Une restauration coronaire sera associée à l'étanchéité de l'obturation afin d'assurer le succès au long terme du traitement endodontique [63].

1.2 L'anatomie du complexe pulpo-dentinaire

Le complexe pulpo-dentinaire est un organe unique qui possède la capacité d'adaptation et la capacité de réponse à une multitude de stimuli. La dentine et la pulpe sont interdépendantes, ce qui affecte la dentine se répercute au niveau pulpaire et inversement [62]. La dentine est recouverte par l'émail au niveau de la partie coronaire et par le cément au niveau de la partie radiculaire. Sa fonction est d'assurer le support de l'organe dentaire, elle lui confère d'ailleurs ses propriétés élastiques [71].

La morphologie du complexe pulpaire est homothétique aux contours extérieurs de la dent : aux pointes cuspidiennes correspondent les cornes pulpaire, elles sont dites procidentes [67]. A noter qu'il faut prendre en compte que la dentine et la pulpe sont des tissus qui ont une capacité de se modifier physiologiquement face à certaines situations pathologiques ou non ; ces réactions peuvent provoquer des variations de forme et de volume au sein de la cavité pulpaire. Le système pulpaire (figure 2) est divisé en une partie coronaire : la chambre pulpaire, et une partie radiculaire : les canaux radiculaires [71].

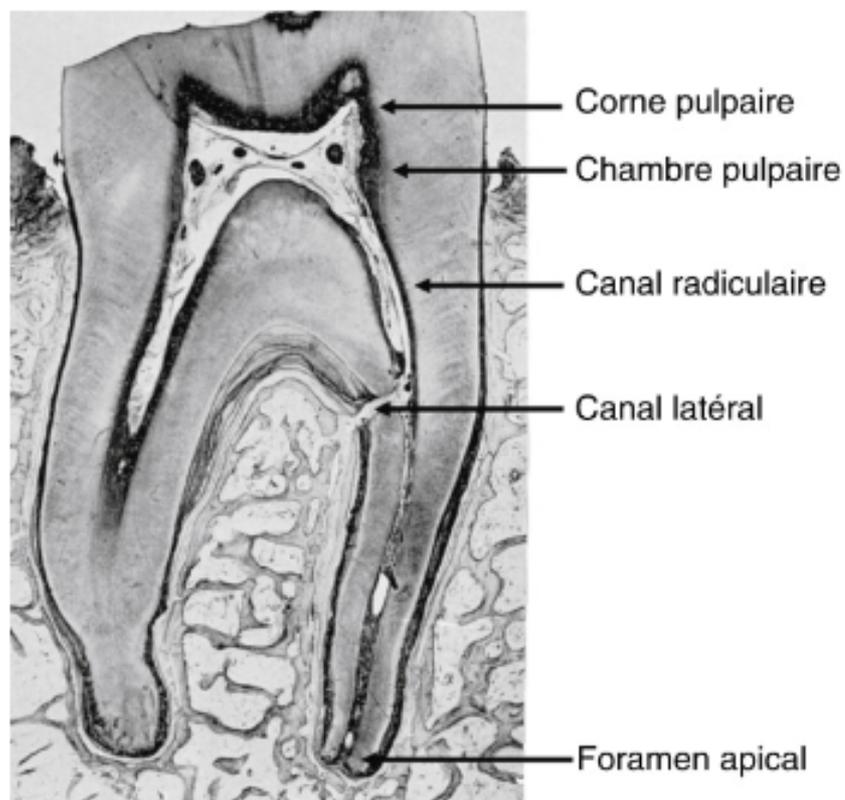


Figure 2 : les régions anatomiques du système pulpaire [64].

1.2.1 La pulpe coronaire

Au niveau de la pulpe coronaire nous retrouvons la chambre pulpaire. La forme générale de la chambre pulpaire en vue occlusale est intimement liée à celle du contour de la couronne dentaire : c'est-à-dire triangulaire pour les incisives et les canines, ovale pour les prémolaires, quadrangulaires pour les molaires. Elle contient quatre parois axiales (vestibulaire, linguale, mésiale et distale). La chambre pulpaire est limitée en haut par le plafond pulpaire et en bas par le plancher pulpaire où s'ouvrent les orifices d'entrées canalaire [69].

1.2.2 La pulpe radiculaire

La pulpe radiculaire représente les canaux radiculaires, elle s'étend le long de la racine : de l'entrée des orifices canalaire jusqu'à son extrémité où se trouve le foramen apical.

1.2.2.1 Classification de la morphologie canalaire

Les systèmes de classification de *Weine et al.* (1969), *Vertucci et al.* (1974) et *Weine* (1982) ont été les plus couramment utilisées et ont été utiles pour catégoriser de nombreuses configurations de canaux. Des rapports de *Verma et Love* en 2011, *Kim et al.* en 2013, *Lee et al.* en 2014, *Leoni et al.* en 2014 sur l'identification des variations du canal anatomique externe et interne à l'aide d'une technologie d'imagerie 3D avancée ont révélé que les caractéristiques morphologiques du système canalaire radiculaire sont très complexes et que de nombreuses configurations canalaire ont été décrites comme non classifiables. Effectivement, la littérature révèle des incohérences concernant la classification de l'anatomie interne de plusieurs types de dents, par exemple, les prémolaires maxillaires avec trois canaux (figure 3). *Vertucci et al.* ont classé cette variation comme type VIII définit pour trois canaux radiculaires séparés et distincts s'étendant de la chambre pulpaire à l'apex; cependant, aucune information n'est fournie dans la classification pour décrire si ces canaux sont encastrés dans des dents à racine unique, double ou triple [2].



Figure 3 : vues externe et modèles Micro-CT 3D de trois premières prémolaires maxillaires [2].

La nouvelle classification d'Ahmed et al. en 2017 présente quant à elle, la morphologie canalaire d'une dent avec précision grâce à un code unique pour le numéro de la dent, le nombre de racines et la configuration du canal.

Cette classification ne prend pas en compte les anomalies déjà abordées dans la littérature telles que les canaux en forme de C, les anomalies du développement liées à la racine ou au canal radiculaire, les fusions de racines et d'autres qui possèdent leur propre taxinomie. Ce classement d'Ahmed et al. (figure 4) comprend des codes pour trois éléments distincts qui sont :

- le numéro de la dent (TN),
- le nombre de racines (R) situé en exposant avant le numéro de la dent (^R TN), donc une dent avec une racine sera codée (¹ TN) : dès la division d'une racine, il sera codé deux racines ou plus, (² TN R1 R2),
- la conformation du canal radiculaire dans chaque racine est située en exposant après le numéro de la dent : cette configuration définit le cheminement du système canalaire à partir du ou des orifices (^O), puis dans le canal (^C) jusqu'au foramen (^F), ce qui donne en codage ^RTN ^{O-CF} [1].

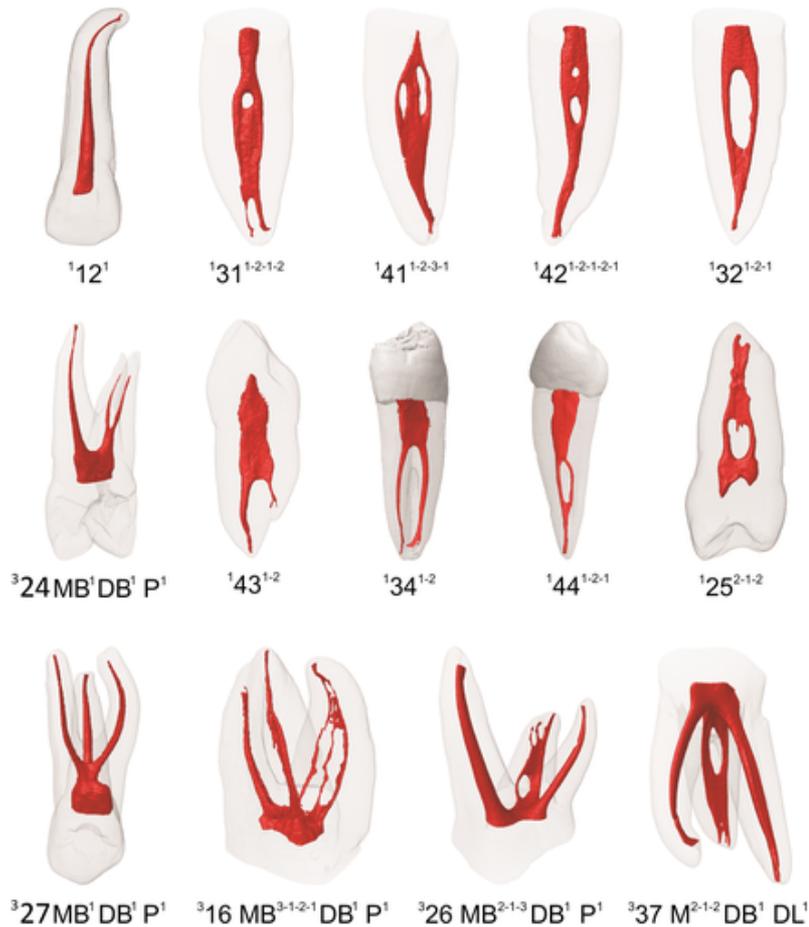


Figure 4 : modèles Micro-CT 3D de différents groupes de dents avec des morphologies radiculaires et canales classées selon Ahmed et al [1].

La classification d'*Ahmed et al.* permet de préciser la classification de la morphologie racinaire et canalaire tout en surmontant les limites des classifications préexistantes qui ne prennent pas en compte les dents à racines multiples et aux configurations complexes, ce qui la rend favorable au déploiement de sa mise en œuvre [36].

Buchanan et al. ont réalisé une étude de tomodensitométrie à faisceau conique (CBCT) afin d'étudier l'anatomie de la prémolaire maxillaire d'une sous-population sud-africaine de manière approfondie en utilisant deux systèmes de classification : le système *Vertucci* et le système *Ahmed*. Ces deux systèmes ont décrit de manière adéquate la morphologie canalaire des prémolaires maxillaires, cependant le système *Ahmed et al.* a fourni des informations plus concises sur les dents complexes [14].

1.2.2.2 La complexité de l'anatomie canalaire

L'anatomie de la pulpe radulaire est complexe car les canaux radulaires peuvent se ramifier, se diviser, s'anastomoser, créant ainsi un véritable réseau.

Le scientifique *De Deus* (figure 5) énonce une définition des canaux qui existent et divise la racine en trois parties :

- la base de la racine qui est le tiers coronaire radulaire,
- le corps de la racine, entre la base et l'apex,
- l'apex radulaire qui est l'extrémité de la racine sur environ 3 millimètres.

Ces nombreux canaux sont des divisions collatérales du canal principal qui celui-ci correspond au tronc du réseau de l'anatomie canalaire reliant la chambre pulpaire au foramen apical :

- les canaux latéraux, sont des ramifications du canal principal communiquant avec le ligament alvéolo-dentaire le plus souvent au niveau du corps radulaire,
- les canaux secondaires représentent des ramifications du canal principal communiquant avec le desmodonte au niveau de l'apex radulaire,
- les canaux accessoires sont des ramifications d'un canal secondaire communiquant avec le desmodonte au niveau du tiers apical [19].

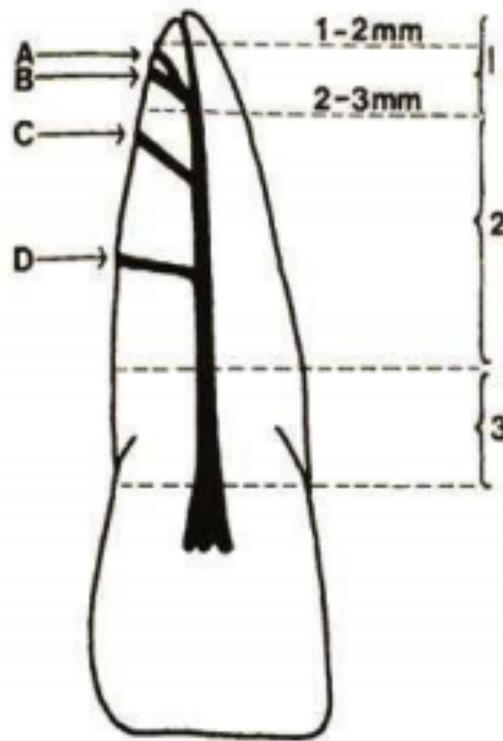


Figure 5 : dessin illustrant la base (3), le corps (2), l'apex (1) radulaire; le canal accessoire (A), secondaire (B) et latéral (C,D) [19].

En coupe transversale, la morphologie canalaire est homothétique à la morphologie de la racine (figure 6). Les canaux peuvent être de forme ronde, ovale, ovale long ou en forme de ruban et cela peut varier de coronaire en apical : par exemple, la coupe transversale peut se présenter sous forme d'un sablier au tiers cervical, fuselée au tiers médian et de forme ovale dans le tiers apical de la racine [71].

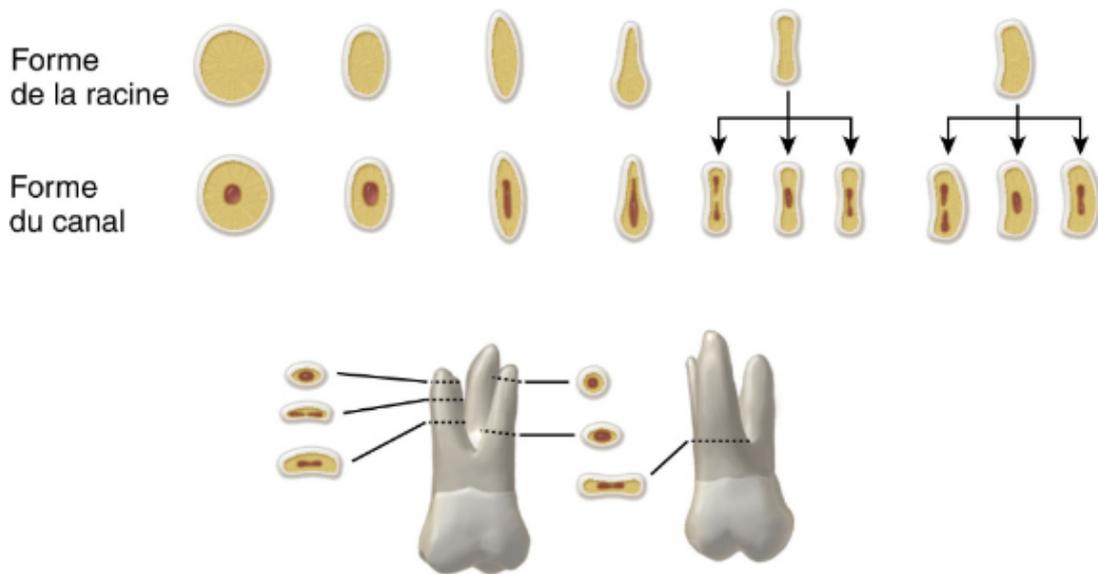


Figure 6 : schéma des variations géométriques courantes en coupe transversale de la morphologie des racines et des canaux radiculaires [71].

D'après une étude de *Mike R Bueno et al.*, les formes en coupe transversale du canal radiculaire des dents permanentes humaines varient en fonction du groupe de la dent et en fonction des tiers de la racine. La récurrence la plus élevée du canal rond se trouve à 1 et 2 millimètres du foramen apical au niveau des incisives centrales maxillaires et des première et deuxième prémolaires mandibulaires. De plus, des canaux de forme ovale sont présents dans quasiment tous les groupes de dents et dans les tiers de la racine [15]. *Sushmita Shrestha et al.* ont réalisé une étude à propos de la détermination de la forme du canal radiculaire apical à différents niveaux en fonction du diamètre : la forme la plus courante est ovale [60].

Sur cette coupe dans le sens bucco-lingual des deux racines d'une molaire mandibulaire (figure 7) est représentée la forme ovale de l'anatomie canalaire de la racine distale, qui tend à être ovale allongée au niveau du tiers moyen radiculaire. Cet aspect anatomique courant crée des difficultés quant à la préparation canalaire de ces extensions anatomiques dans le sens bucco-lingual. De plus, au niveau des canaux radiculaires mésiaux, une courbure est visible [30].

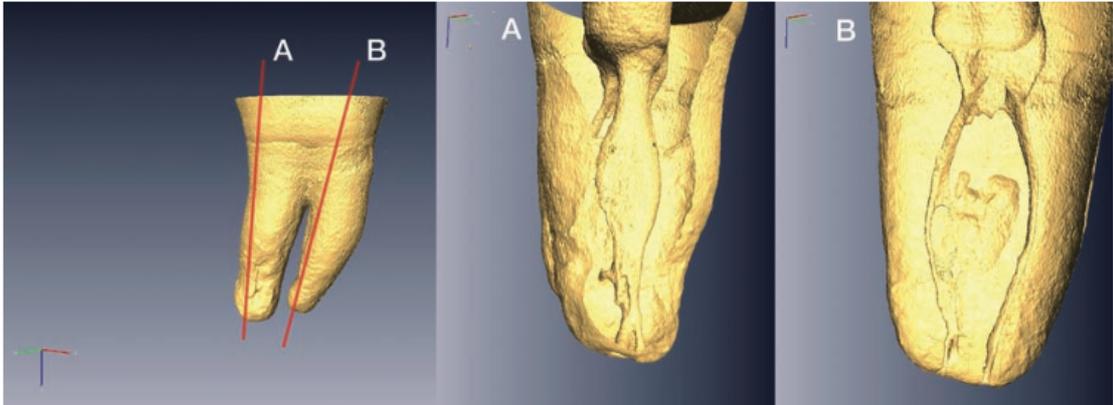


Figure 7 : coupes bucco-linguales au niveau de la racine distale (A) et de la racine mésiale (B) d'une première molaire mandibulaire [30].

Les courbures des canaux radiculaires font partie intégrante de cette complexité du système canalaire. Elles apportent un niveau de difficultés supplémentaires (plus ou moins accrue en fonction du degré de l'angle de courbure) quant à leur préparation. Plusieurs méthodes existent pour mesurer l'angle de courbure, la plus connue est celle de *Schneider* (figure 8). Cet angle est obtenu sur une radiographie rétro-alvéolaire grâce à deux droites : une droite tracée dans la partie coronaire de la dent dans l'axe canalaire puis une droite dont l'origine passe par le foramen apical jusqu'à ce qu'elle coupe la première droite à la déviation de l'axe canalaire principal. Cette méthode distingue les canaux à courbure légère avec un angle de courbure inférieur à 10° , à courbure modérée entre 10° et 30° puis à courbure sévère dont l'angle est supérieur à 30° [13].

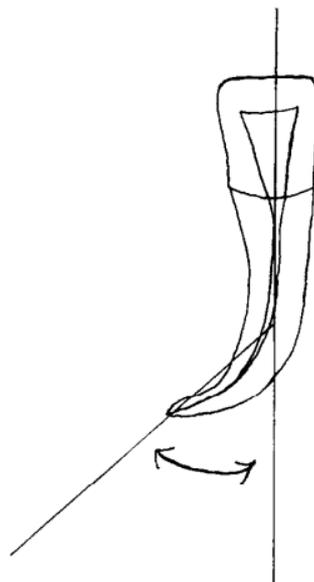


Figure 8 : schéma illustrant la méthode de Schneider afin de déterminer l'angle de courbure canalaire [56].

D'après l'étude de Schäfer, il a été établi qu'environ 84% des dents possèdent des courbures canalaires perceptibles radiographiquement [55]. A savoir que la majorité des instruments endodontiques actuels sont conçus à partir d'ébauches métalliques droites et sont donc enclin à s'adapter à des canaux radiculaires droits. La préparation de la courbure canalair avec ces instruments engendre alors une suppression de matière asymétrique, ce qui entraîne un agencement inégal des forces à différentes zones de contact (figure 9). Ce qui a pour conséquence une sur-préparation de la courbure externe au niveau apical et une sur-préparation de la courbure interne au niveau des parties coronales des racines incurvées [52].

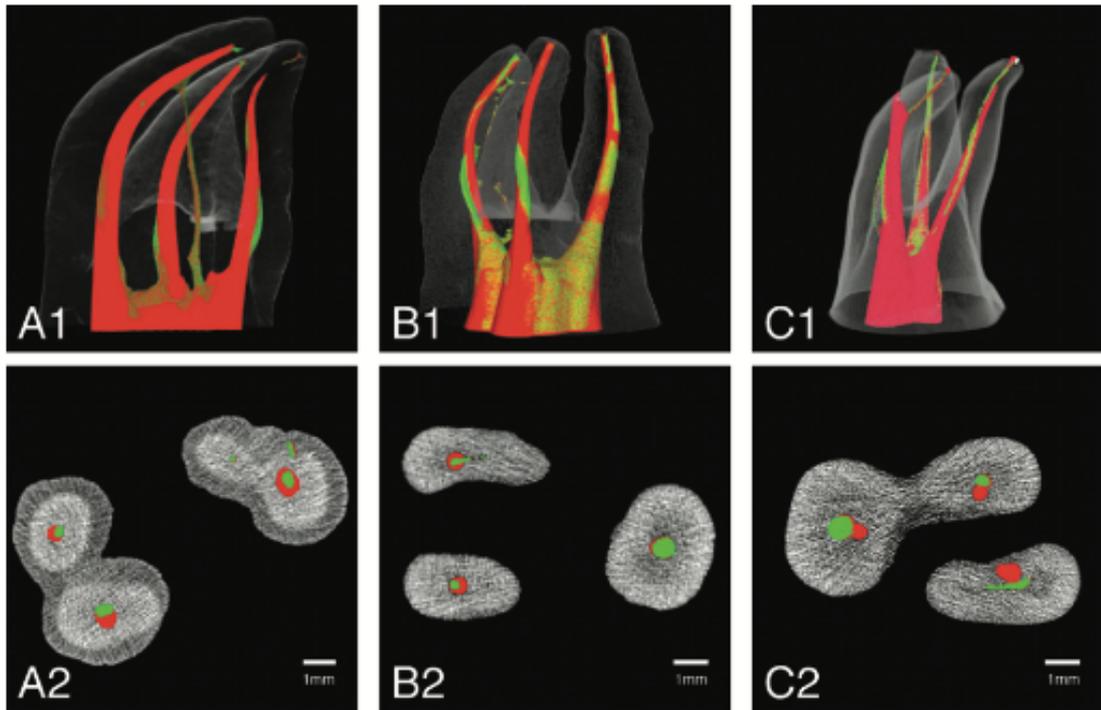


Figure 9 : images micro-CT 3D et coupes transversales de l'anatomie radulaire et de la préparation des canaux avec en rouge la forme post-opératoire du canal et en vert la forme du canal en préopératoire; A : préparation avec des instruments coniques variables; B : avec des instruments 0,04 et 0,06; C : avec des instruments coniques oscillants [52].

De par sa complexité anatomique, la pulpe radicaire peut présenter des canaux isthmiques qui correspondent à d'espaces canaux rejoignant deux ou plusieurs canaux radiculaires (figure 10). Ces isthmes contiennent du tissu pulpaire, c'est pourquoi leur présence au niveau du tiers coronaire radicaire doit être supprimée afin d'éliminer tout débris pulpaire. Si la présence de l'isthme se situe entre le tiers médian radicaire et le tiers apical, celui-ci devra être abordé dans le meilleur des cas comme un canal supplémentaire c'est-à-dire traité et obturé [46].

Ces structures anatomiques sont le plus couramment retrouvées au niveau du système canalaire des dents permanentes postérieures notamment la première molaire mandibulaire au niveau de sa racine mésiale qui en présente dans 88% des cas surtout dans les 5 millimètres apicaux [26].

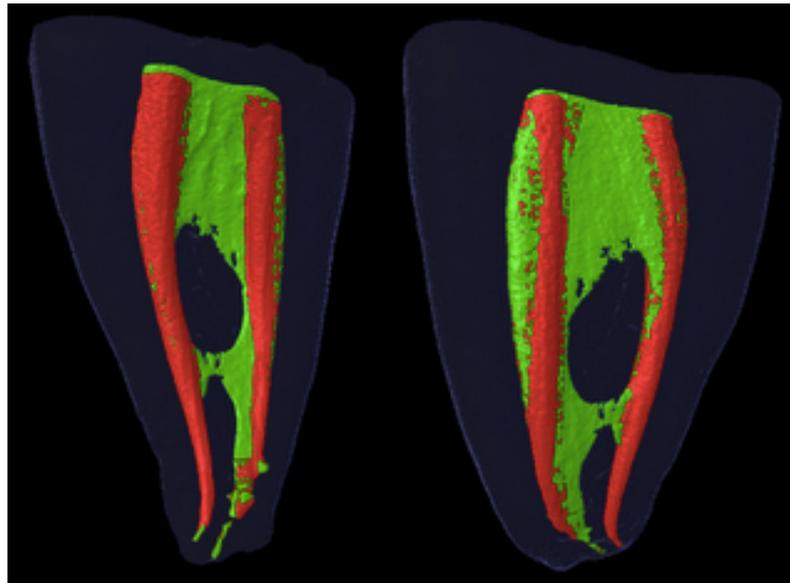


Figure 10 : modèles Micro-CT 3D d'isthmes d'une molaire mandibulaire représentant la préparation des canaux mésiaux en rouge et les zones isthmiques non préparées en vert [74].

De plus, il existe la présence de feuillets qui sont des parties de rétrécissement ou d'aplatissement de la pulpe au niveau d'un canal radicaire. A la différence des isthmes, les feuillets ne rejoignent pas un autre canal mais se dirigent vers l'extérieur de la racine.

Pour ce qui est de la région apicale, elle est formée de deux cônes : le cône dentinaire dont la base se situe au niveau de l'orifice caméral et son sommet au niveau de la jonction cémento-dentinaire. Et le cône cémentaire dont le sommet est la jonction cémento-dentinaire et la base le foramen apical qui est l'apex physiologique et représente la principale sortie du canal vers le parodonte. L'apex anatomique est représenté par le dôme apical c'est-à-dire le point le plus éminent de la racine ou vertex de la dent. Tandis que l'apex radiologique, c'est la projection de l'image sur un support radiologique au niveau plus apical de la dent (il est donc différent de l'apex anatomique lors de courbures radiculaires).

L'ensemble (figure 11) peut être comparé à un sablier dont le rétrécissement est la constriction apicale, c'est à ce niveau que la pulpe radiculaire atteint son diamètre le plus étroit puis s'accroît jusqu'à rejoindre la surface externe de la racine [49]. D'après *Harran et coll.* (2003) le foramen apical se trouve dans 27,7% des cas au niveau de l'apex anatomique. Mais il est le plus souvent situé à 0,48 millimètres de ce dôme apical chez le sujet jeune et de 0,6 millimètres chez le sujet âgé d'après *Kuttler* (1955) [27].

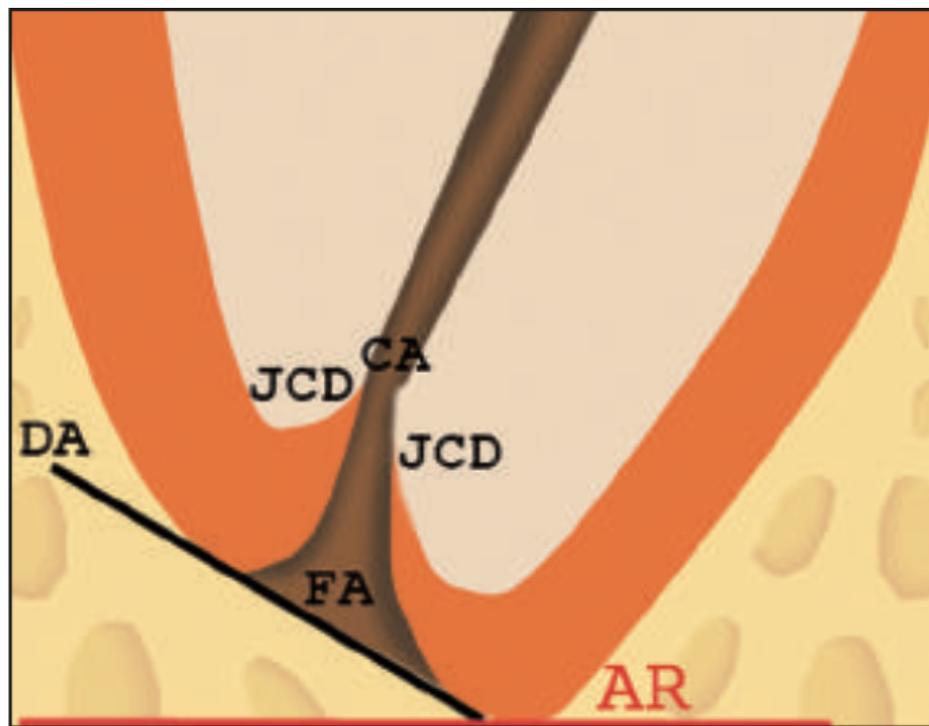


Figure 11 : schéma de la région apicale avec la constriction apicale (CA), la jonction cémento-dentinaire (JCD), le foramen apical (FA), le dôme apical (DA) et l'apex radiologique (AR) [64].

Cette région apicale a une anatomie inconstante car le canal principal peut s'enrouler, s'anastomoser, se diviser en plusieurs canaux afin de former un delta apical. Ce delta apical est un réseau complexe qui est représenté par le canal radiculaire principal qui se divise en ramifications dans sa partie la plus apicale formant ainsi un entonnoir qui se dirige vers le parodonte rendant donc indiscernable ce canal principal (figure 12).

On retrouve cette particularité anatomique principalement au niveau des molaires maxillaires (figure 13) et mandibulaires. A noter que le delta apical se différencie du canal accessoire par le fait que le canal radiculaire principal est discernable lors de la présence de canaux accessoires [28].

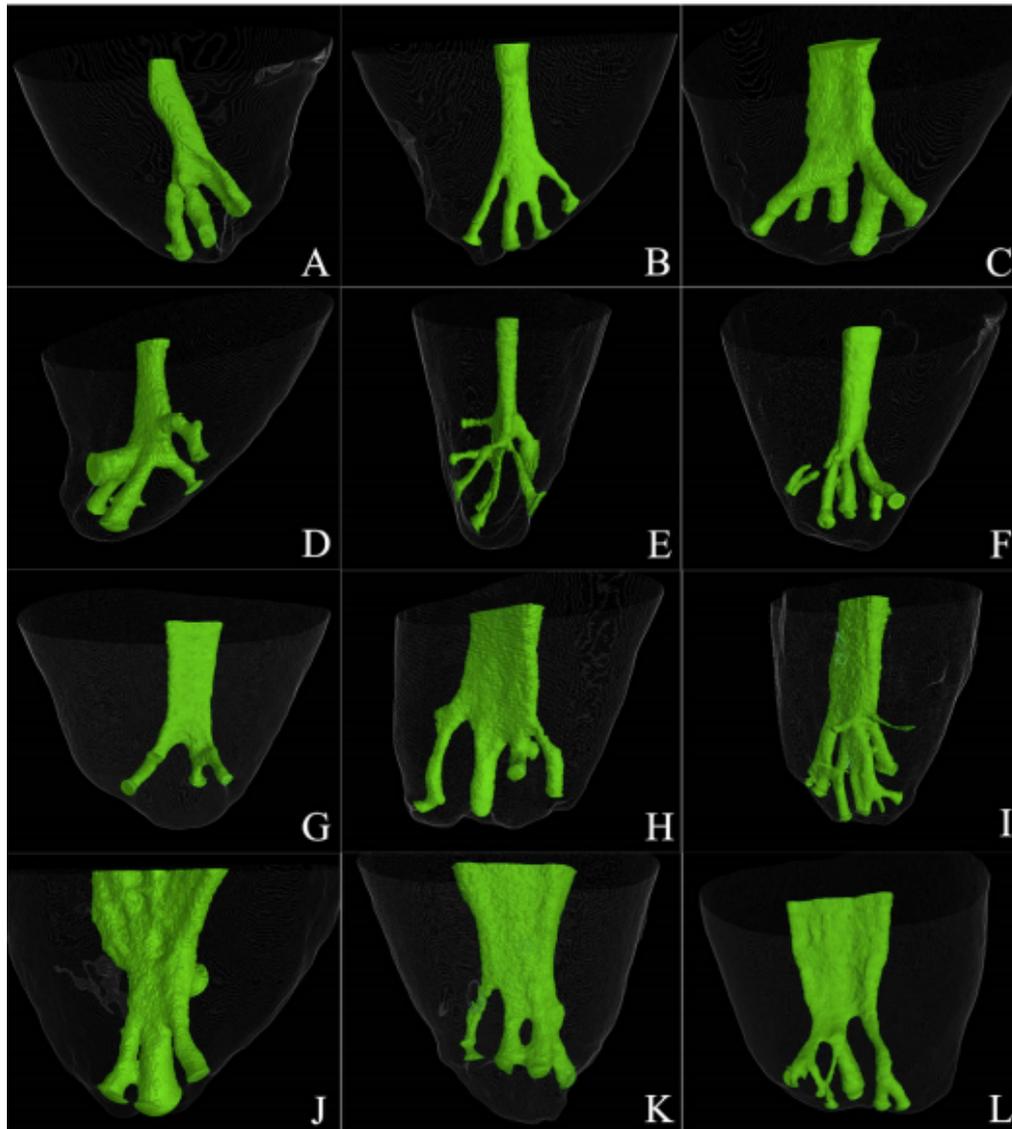


Figure 12 : modèles Micro-CT 3D de deltas apicaux de différents groupes de dents: A à F dents antérieures, G à I prémolaires, J à L molaires [28].

Une étude de *Shrestha et al.* a rapporté la présence d'isthmes dans 8,6% des cas et la présence de deltas apicaux dans 14,6% des cas des première prémolaires mandibulaires d'une population népalaise [59].

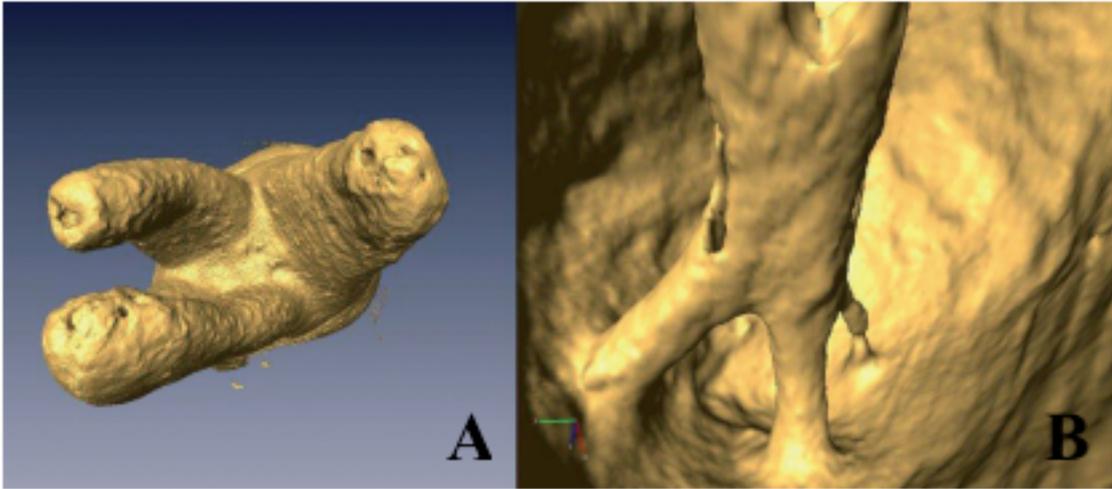


Figure 13. A : vue apicale des apex d'une première molaire maxillaire gauche où est visible 4 foramens apicaux ; B : grossissement de l'anatomie interne de la racine palatine où est présent un delta apical [30].

Le système canalaire est donc complexe et divers étant donné que chaque dent possède une anatomie interne particulière. Une étude de *Tomaszewska et al.* a analysé le complexe canalaire des troisièmes molaires maxillaires grâce à la tomodensitométrie (figure 14). Cette étude a mis en avant le fait qu'il n'existe pas de modèle de canal radiculaire spécifique. Au contraire cette étude a démontré une large diversité d'anatomie canalaire [70].

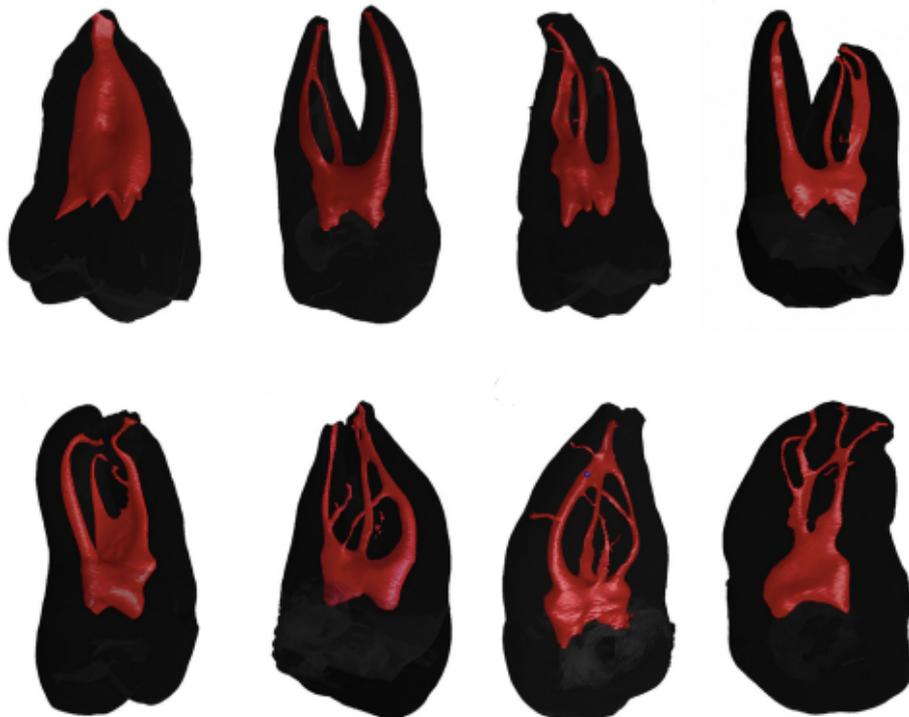


Figure 14 : modèles Micro-CT 3D du complexe canalaire de troisièmes molaires maxillaires [70].

1.3 La mise en forme canalaire chimico-mécanique actuelle

La finalité de la mise en forme canalaire chimico-mécanique est la préparation mécanique des canaux radiculaires jusqu'au foramen apical afin d'assurer la préparation chimique de l'ensemble de l'endodonte.

1.3.1. La préparation mécanique

La phase d'instrumentation mécanique a pour but de faciliter la désorganisation du biofilm bactérien tout en préservant au maximum la forme initiale du canal. Les systèmes endodontiques conventionnels actuels sont les systèmes de rotation continue et de mouvement en réciprocité.

1.3.1.1 Système de rotation continue

Depuis l'apparition en 1995 des premiers instruments de rotation continue en nickel titane, un grand nombre de systèmes a vu le jour. Ces systèmes, ont deux propriétés communes : l'alliage en nickel titane (NiTi) et la conicité majorée qui peut être constante ou variable au niveau du même instrument. Ces systèmes se distinguent par leur section transversale (triangulaire, pentagonale), par leur angle d'hélice négatif ou positif, par leur pas d'hélice qui peut être constant ou variable sur un même instrument et s'ils sont associés ou non à un traitement thermique de l'alliage. Ces différentes propriétés leur attribuent une certaine élasticité, une énergie de coupe, une résistance à la fracture et un abord différent par rapport à l'effet de vissage dans le canal radiculaire [64].

Ce système de rotation continue applique à la séquence d'instruments une rotation de 360° dans le sens horaire : ce qui élabore une mise en forme canalaire de forme conique symétrique (figure 15).

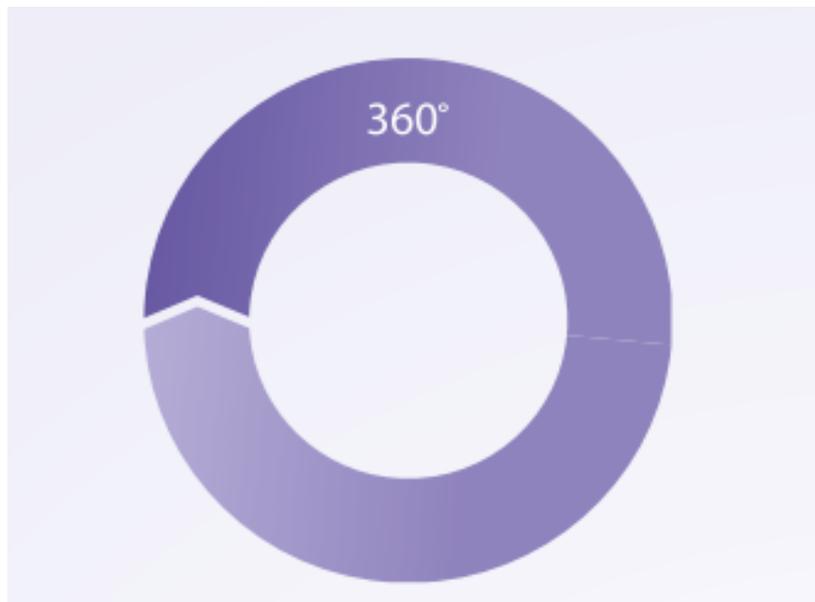


Figure 15 : schéma de mouvement en rotation continue [35].

1.3.1.2 Système de mouvement en réciprocity

Décrit en 2008 par Yared, un système en réciprocity mono-instrumental représente un mouvement alternatif d'amplitude différente dans un sens et dans l'autre (figure 16) : c'est-à-dire qui lui permet d'animer les limes de conicité majorée d'un mouvement horaire-antihoraire à amplitudes inégales (tout en sachant que le mouvement horaire est plus ample que le mouvement antihoraire) afin de faire évoluer la lime dans le canal et d'éviter de repousser les débris en direction apicale [64]. Ce système de mise en forme canalaire a été élaboré afin de trouver une solution aux fractures instrumentales lors de l'utilisation du système en rotation continue. C'est pour cela que ce mouvement de réciprocity a une action de vissage horaire puis une action inverse : ce qui permet de diminuer l'effet de couple au moment où l'instrument atteint la dentine [42].

Le mouvement réciproque élabore une mise en forme canalaire conique asymétrique afin de limiter la fatigue cyclique de l'instrument et d'éliminer tout effet de vissage et d'aspiration [3].



Figure 16 : schéma de mouvement en réciprocity [35].

1.3.2. La préparation chimique

La mise en forme canalaire mécanique seule n'est pas suffisante pour réduire au maximum les agents pathogènes de l'endodonte. C'est pour cela que la préparation mécanique et chimique est indispensable pour y parvenir. L'objectif de la solution d'irrigation est d'accéder à l'ensemble de l'endodonte et plus particulièrement aux zones des parois canales non accessibles par l'instrumentation mécanique. Elle va permettre la dissolution de la boue dentinaire (ou smear layer) qui est une couche de débris localisée sur les parois canales lors de leur mise en forme par l'instrumentation mécanique. La boue dentinaire est composée de tissus organiques vitaux et nécrosés, de tissus inorganiques, d'agents microbiens et de leurs toxines [57].

Dans la pratique clinique, il est nécessaire d'utiliser une combinaison des solutions d'irrigation dans une chronologie spécifique afin d'atteindre l'objectif de dissoudre cette boue dentinaire et d'augmenter les chances de succès du traitement endodontique [32]. Dans un premier temps, l'acide éthylène diamine tétra acétique (EDTA) est utilisé afin de dissoudre la boue dentinaire. C'est un agent chélateur qui assure la suppression des tissus inorganiques (minéraux) de la boue dentinaire. Il en résulte donc une ouverture des tubuli dentinaires (figure 17) qui facilitera la désinfection et le passage du matériau d'obturation [11]. Puis dans un second temps, l'hypochlorite de sodium (NaOCl) est employé en complément de l'EDTA. Le NaOCl est le gold standard des solutions d'irrigation grâce à son action antimicrobienne à large spectre, sa capacité à dissoudre la matière organique, sa rapidité d'action. Elle est utilisée pendant toute la période instrumentale et lors du rinçage final afin de permettre la désinfection des tubuli dentinaires et donc du complexe canalaire [18].

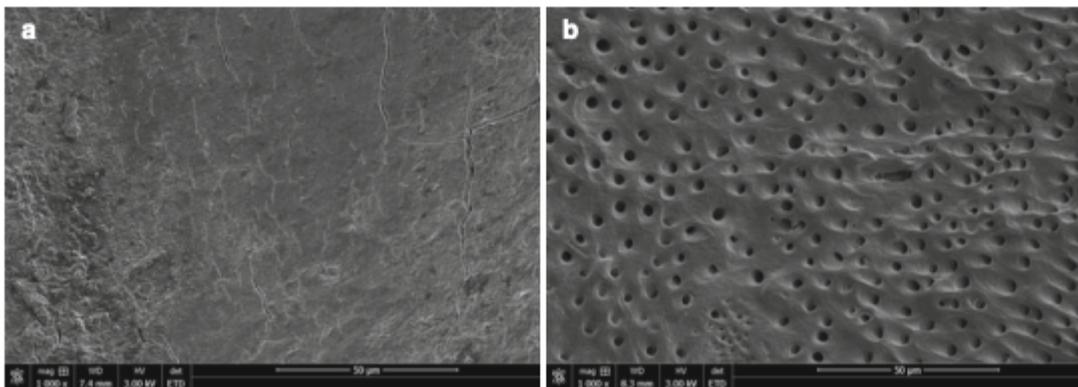


Figure 17 : images au microscope d'une paroi canalaire instrumentée mécaniquement avec boue dentinaire (a) et après élimination de la boue dentinaire grâce à l'irrigation NaOCl et au rinçage final à l'EDTA (b) [10].

Il a été démontré par rapport à l'utilisation classique passive de la seringue et d'une aiguille que la solution d'irrigation soit activée afin d'augmenter les chances de succès de la désinfection et donc du traitement endodontique.

Car le transport passif de la solution après la pointe de l'aiguille n'atteint pas plus de 1 à 2 millimètres dans le canal radiculaire (figure 18), au-delà il n'y a donc pas d'échange d'irrigants cette zone est appelée la « zone morte » ou « dead zone » [18].

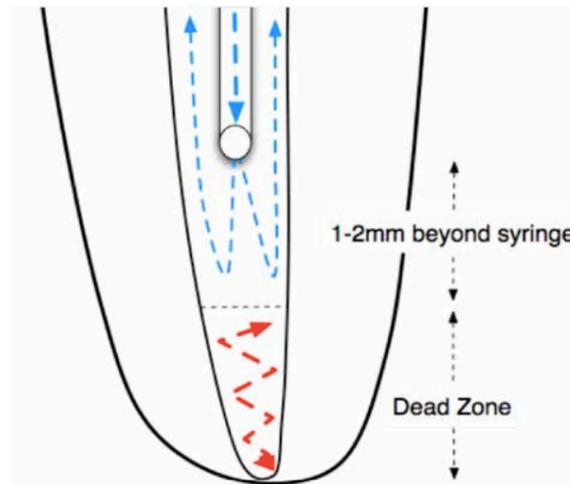


Figure 18 : schéma avec la zone d'échange de l'irrigant d'1 à 2mm au-delà de la seringue et la "zone morte" avec cette absence d'échange de l'irrigant [18].

Pour pallier à cette « zone morte », il existe plusieurs techniques actives afin d'agiter la solution d'irrigation. Notamment l'activation manuelle dynamique (AMD), qui se réalise avec le maitre cône de gutta percha adapté dont la conicité est inférieure à celle de la préparation canalaire finale (figure 19). Cela va permettre à la solution de remonter le long du cône et donc de créer une influence hydrodynamique nécessaire à la progression de l'irrigant jusqu'au niveau de la région apicale [10]. Plusieurs études ont prouvé l'action de l'AMD, dont celle de *Huang et al.* qui a démontré l'efficacité de l'irrigation dynamique face à l'irrigation passive sur un modèle ex vivo de biofilm au niveau des canaux [34]. De même pour l'étude de *Saber Sel et Hashem* [54] et celle de *Andrabi et al.* [7] qui ont montré de bons effets de l'AMD sur l'élimination de la boue dentinaire.

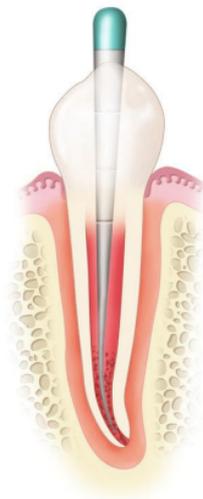


Figure 19 : schéma du maitre cône adapté afin de rendre possible le transport de l'irrigant [10].

L'AMD est une technique efficace mais fastidieuse étant donné qu'il faut qu'elle soit réalisée correctement de façon précise avec des vérifications radiographiques peropératoires. Auquel cas, il existe un risque d'extrusion apicale de l'irrigant au niveau du péri-apex [10]. Une étude de *Boutsiouki et al.* a démontré que l'AMD extrudait de façon significative plus de solution d'irrigation dans le péri-apex que l'activation ultrasonique et sonique [12]. Il existe d'autres techniques comme celle de l'irrigation passive ultrasonique qui en terme d'efficacité de dissolution de la boue dentinaire est jusqu'à plus de dix fois plus élevée par rapport à l'utilisation classique passive de la seringue [32]. L'irrigation passive ultrasonique génère une énergie d'environ 40kHz au sein de la solution d'irrigation ce qui crée l'apparition d'un flux acoustique de celle-ci (figure 20). Ce flux se caractérise par l'élaboration le long de l'insert de tourbillons (ou vortex) et donc va permettre d'augmenter la turbulence du débit et d'améliorer le transport de l'irrigant dans l'ensemble du système canalaire ; y compris la zone apicale à condition de pouvoir permettre le positionnement de l'insert relativement proche de la longueur de travail désignée [43].

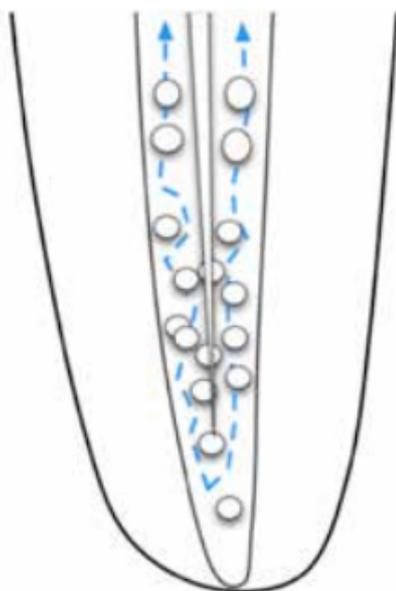


Figure 20 : schéma du flux acoustique créé par l'instrument ultrasonique [10].

1.3.3. Difficultés d'accès

La préparation mécanique rencontre des difficultés d'accès à l'ensemble des parois canales, de par la complexité anatomique du système canalaire mais aussi de par les caractéristiques de la majorité des instruments mécaniques actuels. Des études ont révélé grâce à la tomodensitométrie qu'un ensemble de surface canalaire n'est pas instrumentée lors de la mise en forme des canaux quel que soit l'instrument conique utilisé, et d'autant plus pour les canaux incurvés, ovales qui sont rencontrés très fréquemment (figure 21-23). Selon *Siqueira Junior et al.*, pour ce qui est des canaux ronds, des études ont démontré que pour différents systèmes de préparation mécanique, 10 à 50% des surfaces canales sont non instrumentées. Et ceci est d'autant plus élevée pour les canaux de forme ovale où il a été révélé après mise en forme, 10 à 80% de zones canales non instrumentées [66].

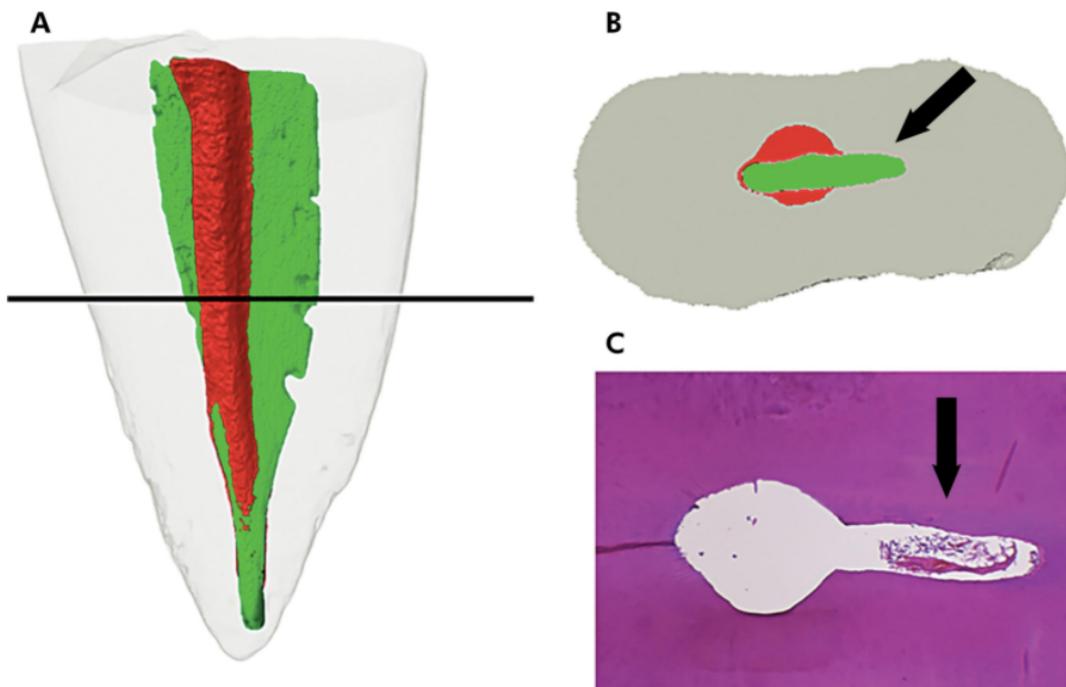


Figure 21 : modèles Micro-CT superposés d'une molaire (A) et coupe transversale du tiers médian radiculaire (B) avant (en vert) et après (en rouge) la préparation des canaux radiculaires avec des instruments rotatifs NiTi; coupe histologique illustrant des résidus de tissus pulpaire (C) [66].

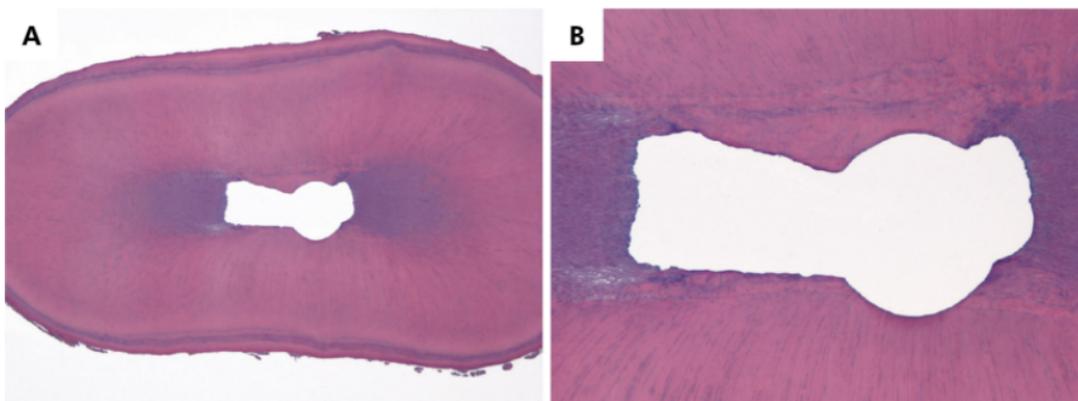


Figure 22 : coupe transversale au tiers médian d'une incisive mandibulaire avec grossissement x16 au microscope (A), avec grossissement au microscope x50 (B) [66].

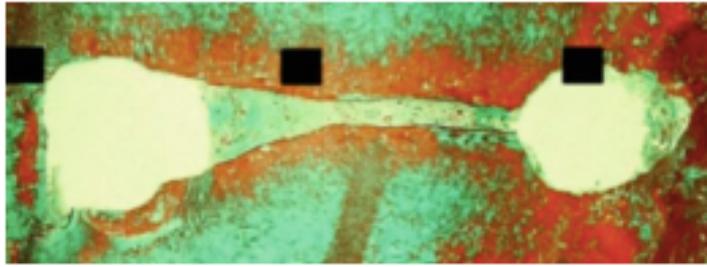


Figure 23 : coupe transversale de la racine mésiale d'une molaire mandibulaire après mise en forme canalaire à l'aide d'instruments rotatifs NiTi [10].

Par conséquent, au niveau de ces parois canalaires non instrumentées, le biofilm bactérien persiste ce qui diminue les chances de succès du traitement endodontique. Ce biofilm est inséré dans une matrice de substances polymères extracellulaires autoproduite et est une structure hautement organisée qui fonctionne par mode de croissance microbienne où les microorganismes forment des amas dynamiques en interaction et qui sont irréversiblement attachés entre eux [16].

Siqueira et al. ont réalisé une étude ex vivo afin de pouvoir apprécier la capacité de la préparation mécanique de 3 systèmes de mise en forme canalaire (Self Adjusting File®, Reciproc®, Twisted File®) avec la tomodynamométrie (figure 24) et d'apprécier la désinfection avec une méthode analytique de quantification bactérienne à l'aide de cultures des canaux des molaires mandibulaires.

Ces cultures ont révélé qu'après préparation chimio-mécanique de ces différents canaux par les trois systèmes mécaniques présentés ci-dessus et par l'hypochlorite de sodium concentré à 2,5% : le pourcentage de surfaces canalaires non préparées oscillait entre 20,1% et 34,6% [65].

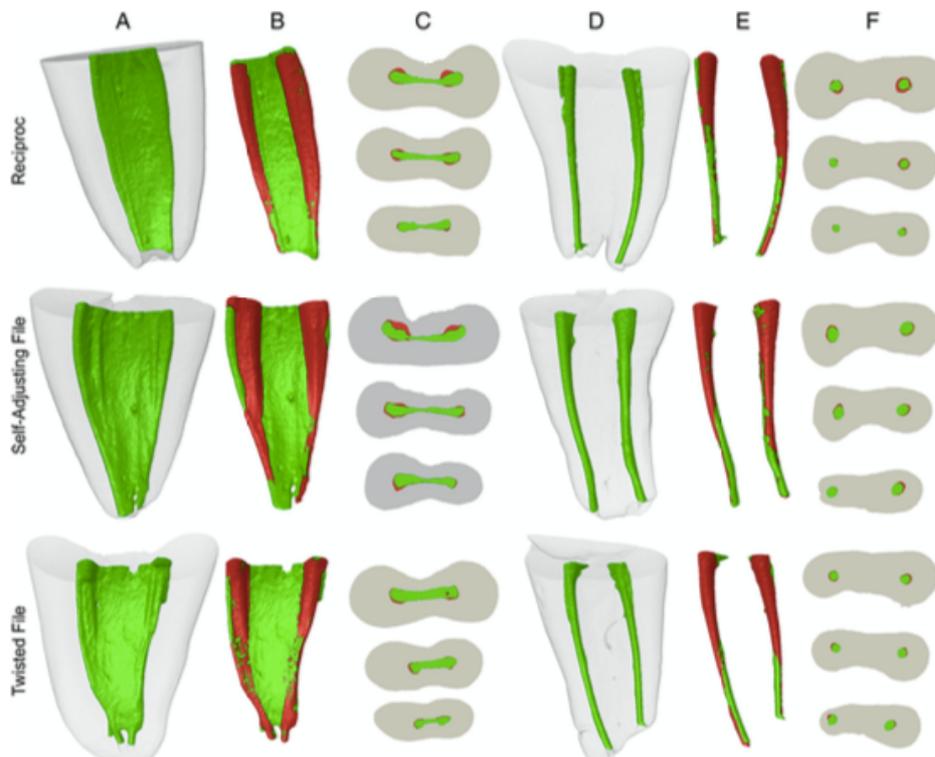


Figure 24 : modèles 3D micro-CT et 2D (coupes transversale au tiers coronaire, moyen et apical) de la morphologie interne des racines mésiales des molaires mandibulaires, avant (vert) et après (rouge) préparation canalaire de 3 systèmes de mise en forme : Self adjusting File®, Reciproc®, Twisted File® [65].

La solution d'irrigation rencontre donc des difficultés d'étalement au niveau de l'ensemble du système canalaire. Au niveau de ces zones non instrumentées, la solution d'irrigation n'atteint pas ou atteint mais à une concentration insuffisante ces surfaces non préparées; ainsi le biofilm bactérien résiduel à ces endroits serait donc intact ou éliminé de façon partielle [66].

Une étude de *Versiani et al.* a permis de cartographier quantitativement et qualitativement cet étalement de la solution d'irrigation au niveau de molaires mandibulaires avec la tomodensitométrie (figure 25) [75].

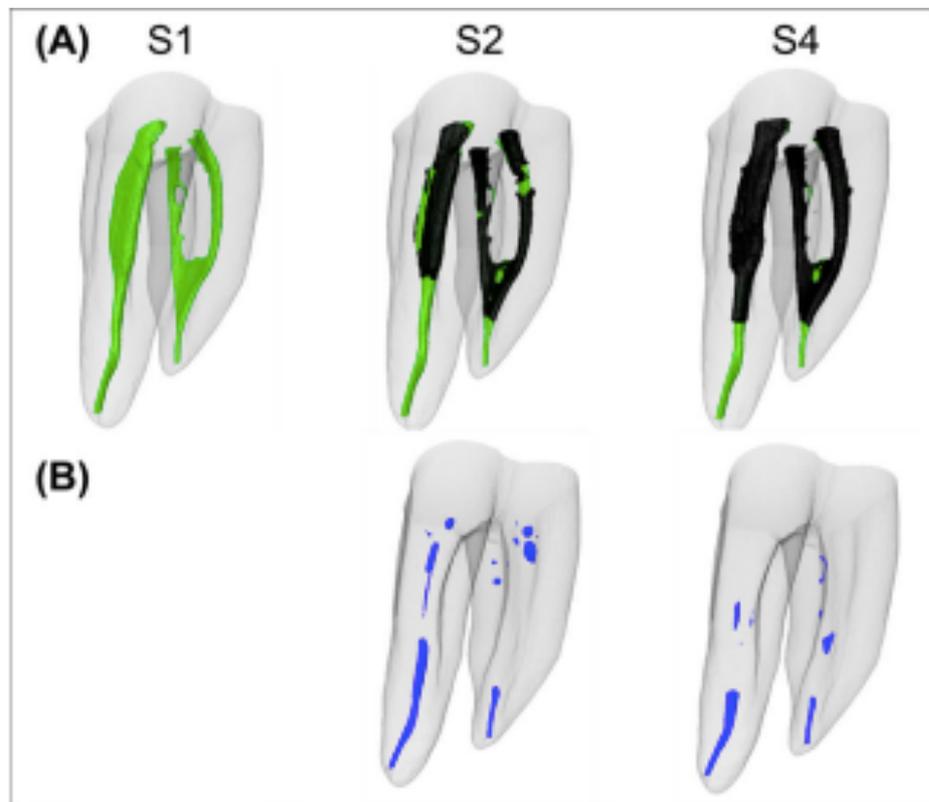


Figure 25 : molaire mandibulaire de type II de Vertucci avec modèles 3D micro-CT (A) avant le traitement canalaire (en vert) avec superposition de l'irrigant (en noir), avec modèles 3D micro-CT (B) révélant les zones exemptes de solution d'irrigation (en bleu) [75].

Ces difficultés d'accès à l'ensemble du complexe canalaire lors de la préparation chimiomécanique contraignent le nettoyage, la désinfection et donc le remplissage adapté par le matériau d'obturation des canaux radiculaires. Ce qui feint négativement les chances de succès du traitement endodontique [39].

L'instrumentation mécanique de mise en forme canalaire actuelle mentionnée précédemment agit majoritairement au niveau du canal principal, et celle-ci ne prépare pas toutes les parois canalaire. Elle tend à préparer le canal principal en une forme conique, circulaire. Il persiste alors des extensions buccales et linguales non préparées dans le cas de canaux de forme ovale (figure 26), ce qui cause une préparation canalaire de qualité insuffisante [25].

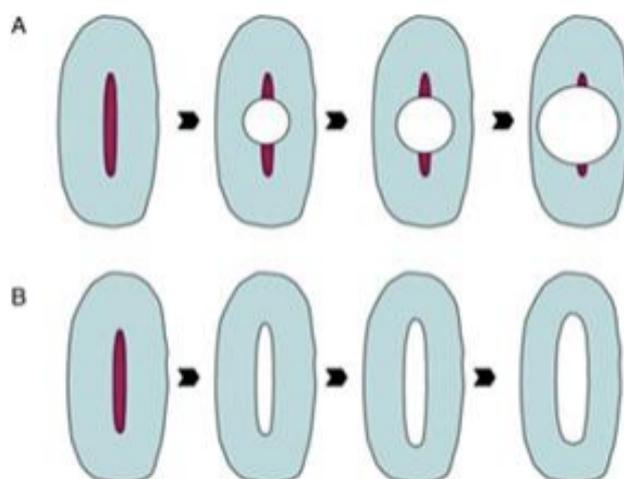


Figure 26 : A : schéma des zones non préparées (en rouge) d'un canal ovale par les systèmes rotatifs NiTi ; B : schéma de la mise en forme canalaire idéale d'un canal ovale [38].

Pour ce qui est de l'activation ultrasonique, la flexibilité de l'alliage métallique de l'insert permet de s'engager au niveau de courbures légères mais malgré ça, leur principale limite est le risque de fracture lors de contacts non ponctuels avec les parois canalaire [43]. De plus, lors de ces contacts avec les parois radiculaires, l'instrument ultrasonique n'est plus capable de vibrer correctement ce qui engendre un flux acoustique moindre dans les canaux incurvés [6]. Cette technique d'activation est alors intéressante pour ce qui est des canaux droits, mais pose problème pour ce qui est des canaux courbes régulièrement rencontrés (figure 27).

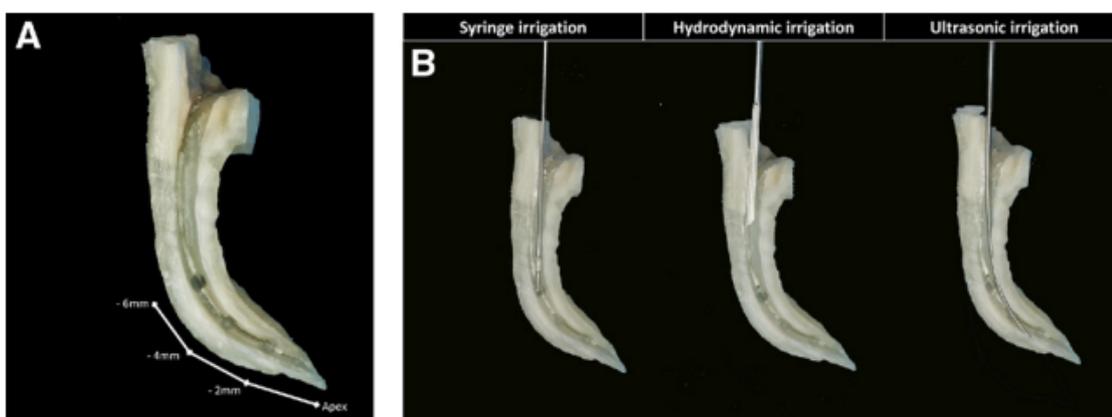


Figure 27 : coupe sagittale d'une racine représentant un canal courbe (A) avec la position de trois groupes d'instruments d'activation d'irrigation (B) [6].

Afin de conclure cette première partie, le taux de succès du traitement endodontique dépend de la prise en charge d'une complexité anatomique qui est le système canalaire radiculaire. La préparation chimico-mécanique actuelle n'est pas suffisamment appropriée à cette complexité : les instruments conventionnels ne préparent qu'environ 20% des aires du canal [47]. De plus, ces instruments ne préservent pas les tissus dentaires car ils sont de forme conique, alors que la forme canalaire la plus rencontrée est ovale. De la même manière, les techniques d'irrigations conventionnelles actuelles ne sont pas appropriées pour atteindre de façon optimale l'ensemble de la complexité du système canalaire.

Quelles innovations pourraient permettre d'instrumenter davantage de surfaces canalaires tout en préservant et en s'adaptant à l'anatomie tridimensionnelle de la complexité canalaire ?

Introduit en 2015, le système XP-endo Shaper[®], de par sa physionomie design, présente un changement de paradigme de la mise en forme canalaire. Ce design innovant va permettre d'exploiter de façon plus optimale cette complexité du système endodontique en s'adaptant à la forme des canaux radiculaires.

De même pour l'introduction du système XP-endo Finisher[®], instrument représentant une innovation dans le domaine de l'irrigation. C'est un instrument mécanique de nettoyage uniquement ayant pour objectif d'atteindre les zones anatomiques complexes dans les trois dimensions grâce à sa capacité d'expansion de l'irriguant.

2. Le système canalaire XP-endo Shaper[®]

Le système XP-endo Shaper[®] est introduit en 2015 par le fabricant FKG Dentaire (La Chaux-de-Fonds, Suisse) dans un contexte de recherche de mise en forme canalaire dite optimale dans le sens où c'est l'instrument qui s'adapte au système canalaire et non l'inverse.

2.1 Un système adaptatif tridimensionnel

La conception de ce système avec cette physionomie design permet de niveler de façon régulière l'ensemble de l'espace du canal radiculaire en insistant sur la troisième dimension [73].

2.1.1 Le principe de l'enveloppe de mouvement

Le système XP-endo Shaper[®] s'adapte à la forme du canal grâce à sa capacité de mise en forme canalaire tridimensionnelle et permet donc une endodontie conservatrice moins invasive. Contrairement aux systèmes traditionnels où le canal radiculaire doit s'adapter à la forme des instruments coniques. C'est grâce à sa forme sinusoïdale que ce système adaptatif tridimensionnel fonctionne selon le principe de l'enveloppe de mouvement plus communément appelé mouvement en forme de serpent (figure 28). L'instrument effectue un mouvement rotatif asymétrique qui prend une forme semi-circulaire en se dilatant et en se contractant à une certaine température, ce qui lui permet d'être envoyé contre les parois canalaire. C'est de par ce principe de l'enveloppe que l'XP-endo Shaper[®] s'adapte à la morphologie tridimensionnelle des canaux radiculaires [73].



Figure 28 : la forme sinusoïdale du XP-endo Shaper[®] fonctionne selon le principe de l'enveloppe de mouvement afin d'effectuer l'élargissement du canal radiculaire [64].

2.1.2 Un instrument unique de mise en forme

C'est un système unique en rotation continue dont la vitesse oscille entre 800 et 1000 tours par minute et avec un torque de 1 Newton-centimètre.

2.1.2.1 Un système de choix dans la majorité des canaux

C'est grâce à cette vitesse élevée, que l'XP-endo Shaper[®] effectue ce principe de l'enveloppe de mouvement. Ce mouvement permet de réaliser la mise en forme adéquate de la majorité des canaux tout en respectant leur anatomie initiale.

D'après l'étude d'*Azim et al.*, la capacité du système XP-endo Shaper[®] à pouvoir s'étendre par rapport à sa taille d'origine permet de mettre en forme plus de parois canalaires et donc de s'adapter à la morphologie des canaux de forme ovale [9], de même pour les canaux radiculaires larges selon *Arıcan Öztürk et al.* [8]. L'étude de *Perez Morales et al.* a prouvé sa capacité de mise en forme dans la préparation des canaux radiculaires à courbure modérée (c'est-à-dire avec une courbure allant de 10° à 20°), tout en maintenant la morphologie originale de ces canaux [51]. Pour ce qui est des canaux radiculaires avec des courbures sévères entre 25° et 40°, *Webber et al.* ont étudié que le système XP-endo Shaper[®] s'adaptait aussi à leur anatomie originelle [76]. Puis pour finir, l'étude d'*Alfadley et al.* a permis d'apprécier l'adaptation du système XP-endo Shaper[®] dans les canaux radiculaires à courbure sévère avec un angle de 60° en forme de J. Ces recherches qui se sont intéressées à la capacité de mise en forme canalair de ce système ont permis d'établir que cet instrument unique est de choix pour le traitement de la plupart des canaux radiculaires [5].

2.1.2.2 Limitation de l'extrusion des débris apicaux

Le système XP-endo Shaper[®] possède par rapport aux instruments conventionnels la conicité la plus minime à 1%. De ce fait, étant donné que l'instrument utilise moins d'espace dans le canal radiculaire les débris sont évacués plus facilement en direction coronaire diminuant ainsi le risque d'extrusion de débris au-delà de l'apex (figure 29). De plus, contrairement aux systèmes conventionnels (dont la vitesse varie de 300 à 600 tours par minute), le système XP-endo Shaper[®], grâce à sa rotation continue à haute vitesse, génère des turbulences (figure 29); ce qui permet d'agiter les débris en direction coronaire, d'éviter leur compactage au niveau des parois canalaire et de diminuer l'accumulation de boue dentinaire afin de faciliter la pénétration de la solution d'irrigation au niveau des tubuli dentinaires [48].



Figure 29 : coupe transversale de la pointe d'un instrument conventionnel (à gauche) et du XP-endo Shaper[®] (à droite) à 1,6cm de la longueur de travail (source : brochure FKG 2019).

Une étude d'Uslu *et al.* a examiné la quantité d'extrusion de débris en direction apicale avec les systèmes Reciproc Blue[®], Hyflex EDM[®] et XP-endo Shaper[®] sur 60 prémolaires mandibulaires à racine unique randomisées dans 3 échantillons (n=20). Après la mise en forme canalaire, les débris extrudés en apical ont été quantifiés en valeurs médianes, minimales et maximales en grammes (tableau 1).

Tableau 1 : poids (en gramme) de l'extrusion de débris apicaux engendrés par Reciproc Blue[®], Hyflex EDM[®] et XP-endo Shaper[®] [72].

Group	n	Median	Minimum	Maximum
Reciproc Blue	20	0.0115 ^a	0.0020	0.0308
HyFlex EDM	20	0.0091 ^{ab}	0.0036	0.0277
XP-endo Shaper	20	0.0060 ^b	0.0004	0.0162
P value		.003		

Les 3 systèmes testés ont généré l'extrusion de débris en apical. Le système XP-endo Shaper[®] a provoqué de façon significative moins d'extrusion de débris que le Reciproc Blue[®]. Mais par rapport au Hyflex EDM[®], les données ne sont pas significatives même si elles semblent y tendre. Le XP-endo Shaper[®] d'après ces données est le système canalaire qui provoque le moins d'extrusion de débris apicaux [72].

2.2 Technicité : deux technologies combinées

C'est grâce à sa technicité que l'XP-endo Shaper[®] est un système mono-instrumental de mise en forme canalaire à large spectre qui permet de simplifier les séquences endodontiques. Elle est la résultante de l'association de deux technologies innovantes : l'alliage MaxWire[®] et la pointe Booster Tip.

2.2.1 L'alliage MaxWire[®] (Martensite-Austénite Electropolishing-Flex)

Le principe de l'enveloppe de mouvement qui permet à l'instrument de se dilater et de se contracter en fonction de la température est permise grâce à une technologie exclusive de FKG : l'alliage MaxWire[®].

2.2.1.1 Traitement thermo-mécanique

MaxWire[®] est un alliage exclusif de dernière génération des NiTi qui associe à la fois l'effet mémoire de forme et la superélasticité. Ces propriétés sont obtenues par traitement de l'alliage de façon thermo-mécanique et plus précisément par la transformation martensitique réversible [78]. C'est une transformation dite displacive du premier ordre, c'est-à-dire qui présente une déformation homogène du réseau cristallin (sans qu'il y ait de diffusion d'atomes) qui a lieu lors de changements thermodynamiques; c'est pour cela que cette transformation martensitique est dite réversible. Elle représente le passage de la phase austénitique à la phase martensitique et inversement [31].

Cet alliage existe dans deux conformations cristallines différentes appelées :

- la phase austénite (dite phase mère) stable à haute température avec une conformation cristalline rigide cubique B2, elle apporte à l'alliage sa rigidité,
- la phase martensitique (dite phase fille) stable à basse température avec des cristaux de forme monoclinique B19 qui peuvent être orientés différemment et donc révéler la phase martensitique auto-accomodée ou la phase martensitique orientée. Cette phase apporte à l'alliage sa ductilité [50].

L'effet de mémoire de forme et la superélasticité sont induites lors de la transformation martensitique réversible de ces deux phases soit par la contrainte soit par la température (figure 30) [58].

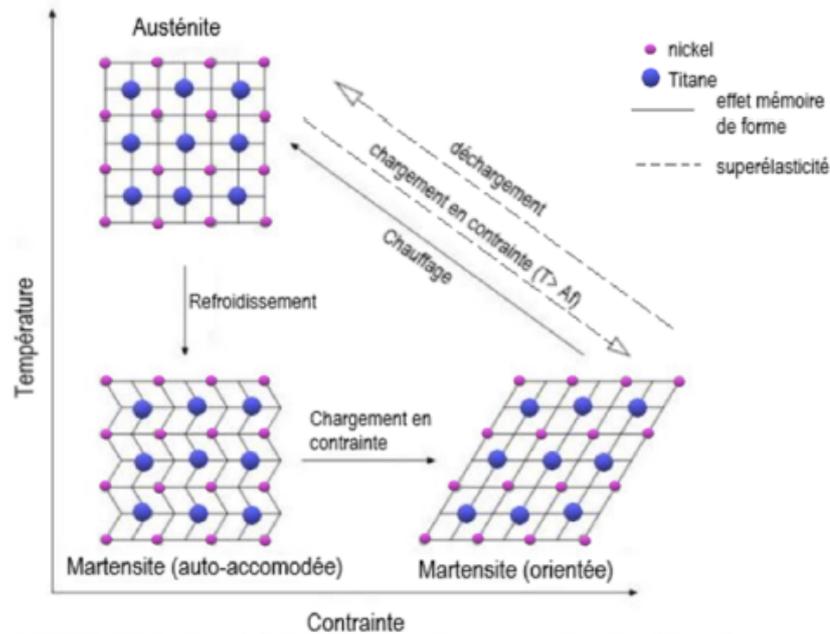


Figure 30 : graphique représentant le mécanisme de l'effet de mémoire de forme et de la superélasticité avec en abscisse la contrainte et en ordonnée la température [17].

L'effet de mémoire de forme, c'est la compétence de l'alliage NiTi déformé à récupérer sa forme initiale. [78] Ce mécanisme se réalise lors de la transformation de phase martensite stable en phase austénite induite par un changement de température (figure 32), et plus précisément lors du passage de la température ambiante à 20° à la température intra-canaulaire à 35°. A cette température ambiante de 20°, le XP-endo Shaper[®] est dans sa phase martensitique et se présente de forme relativement droite et ductile. Dès la pénétration de l'instrument dans les entrées canales où la température passe à 35° se réalise la transformation martensitique réversible de la phase martensitique à la phase austénite dont résulte cet effet de mémoire de forme : l'instrument est donc dans sa phase austénite et est de forme incurvée, en serpent rigide (figure 31) [29].

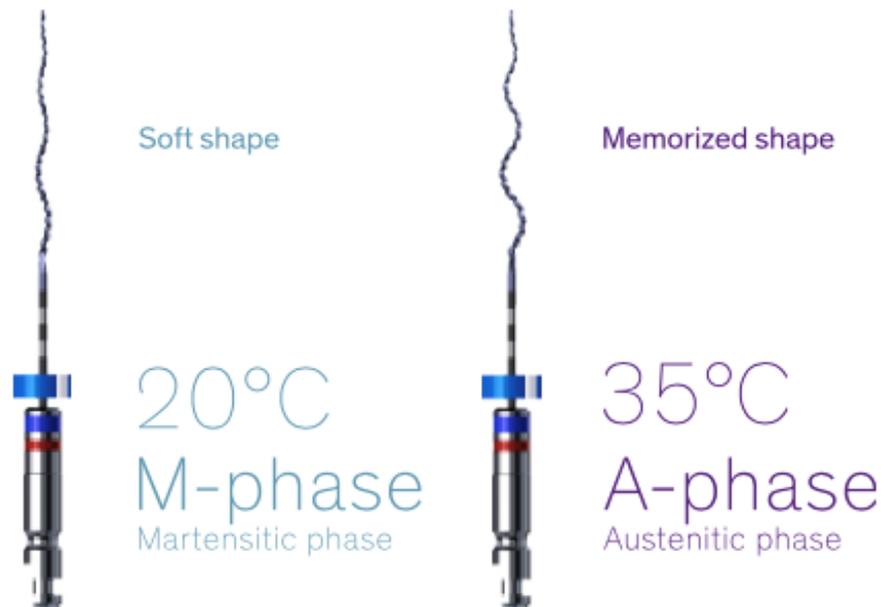


Figure 31 : l'instrument XP-endo Shaper® : dans sa phase martensitique à température ambiante avec sa forme droite ductile; dans sa phase austénique à température intracanalair avec sa forme incurvée en serpent in rigide (source : brochure FKG 2019).

La superélasticité c'est la déformation élastique rattrapable en totalité jusqu'à 8% de déformation [78]. Ce mécanisme se réalise lors de la transformation de phase austénite stable en phase de martensite induite par une contrainte (figure 32), ces chargements sont ceux appliqués sur les parois canalaire pendant leur préparation instrumentale. Lors de l'introduction au niveau des entrées canalaire l'instrument XP-endo Shaper® est en phase austénite, puis lors de la mise en forme canalaire l'instrument applique des chargements au niveau de ces parois ce qui engendre l'apparition de martensites orientés et c'est de cette transformation de la phase austénite à la phase martensitique d'où résulte le mécanisme de superélasticité. Puis l'instrument revient en phase austénite lors de l'arrêt des contraintes au niveau des parois canalaire et inversement [29].

De ce fait, en rotation continue à vitesse élevée cette transformation martensitique réversible lors de changement de températures et de contraintes permet au système XP-endo Shaper® d'effectuer ce principe de l'enveloppe. Cela lui permet de s'adapter à l'anatomie tridimensionnelle du système canalaire en se dilatant et en se contractant au fur et à mesure jusqu'à la longueur de travail désirée.

2.2.1.2 Résistance à la fatigue

Il existe deux mécanismes de fatigue : la fatigue cyclique qui se manifeste lors de contraintes répétitives de compression et de traction au niveau de l'instrument en rotation libre dans une courbure canalaire aboutissant à une fatigue du métal. Et La fatigue par torsion qui survient lors du phénomène de vissage de l'instrument c'est-à-dire quand une partie de celui-ci se verrouille en intracanalair et que le moteur continue sa rotation [22].

2.2.1.2.1 Résistance à la fatigue cyclique

L'alliage MaxWire[®] (Martensite-Austenite Electropolishing-Flex) subit en plus du traitement thermo-mécanique un traitement de surface électrochimique final appelé l'électropolissage qui est réalisé après le processus de fabrication de l'instrument. Ce traitement a une incidence positive sur la résistance à la fatigue et plus précisément à la fatigue cyclique [29]. Ce traitement a pour objectif principal de limiter au maximum les impuretés à l'origine de défauts de surface qui diminueraient la résistance à la fatigue cyclique de l'instrument. Pour cela l'XP-endo Shaper[®] est immergé durant 70 à 90 secondes dans une solution électrolytique entre deux électrodes. Un potentiel électrique et un courant y sont appliqués dans la solution entraînant un équilibre entre la formation d'une couche de passivation homogène et la dissolution ionique de la surface de l'instrument; ce qui permet la suppression de façon sélective des imperfections de surface sous forme d'ions métalliques dissouts et d'améliorer la résistance à la fatigue cyclique de l'XP-endo Shaper[®] [44]. Une étude de *Silva et Al.* a comparé la résistance à la fatigue cyclique de l'instrument XP-endo Shaper[®] et de l'instrument TRUShape[®] (tableau 2). Le nombre de cycles avant rupture et le temps de rupture ont été mesuré dans un canal dit superficiel en acier inoxydable avec un angle de courbure de 60°. Puis la surface des instruments fracturés ont été étudiée au microscope électronique à balayage (figure 32) [61].

Tableau 2 : comparaison de la résistance à la fatigue cyclique entre XP-endo Shaper[®] et TRUShape[®] [61].

Instrument	Nombre de cycles avant rupture	Temps de rupture (en seconde)
XP-endo Shaper	1653 ± 235	124 ± 17
TRUShape	496 ± 20	99 ± 4

Les résultats de cette étude démontrent une meilleure résistance à la fatigue cyclique pour le XP-endo Shaper[®] que pour le TRUShape[®].

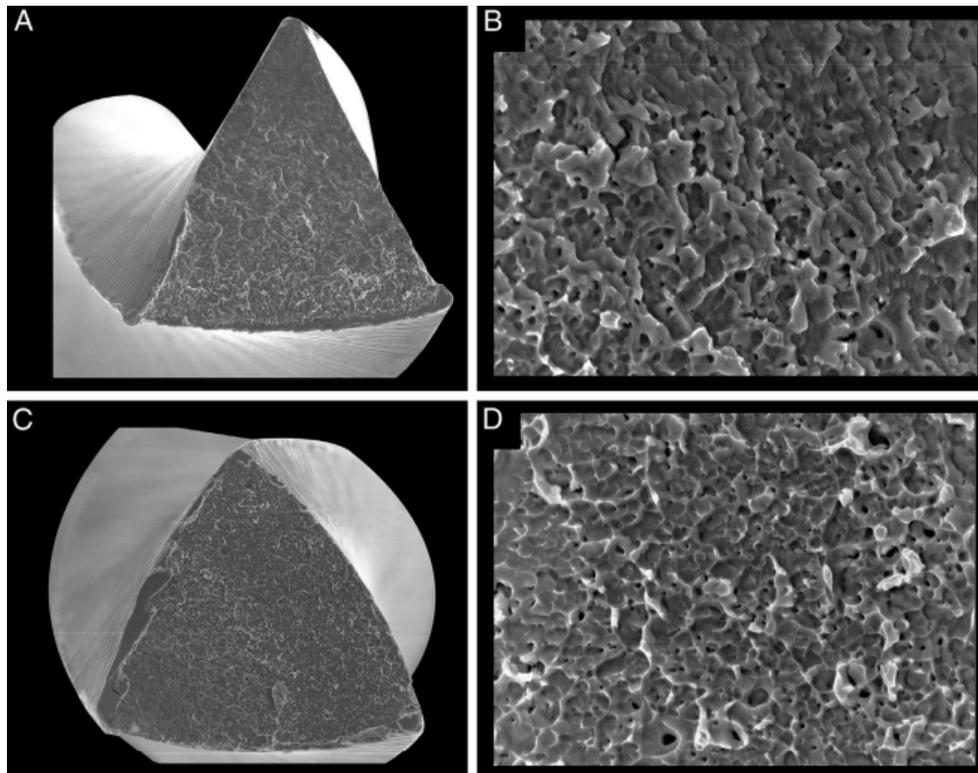


Figure 32 : images au microscope électronique à balayage (G x250 et G x1000) des surfaces fracturées de XP-endo Shaper[®] (A, B) et TRUShape[®] (C, D) après les tests de fatigue cyclique [61].

Ces images au microscope électronique à balayage illustrent une plus grande résistance à la fatigue cyclique pour l'instrument XP-endo Shaper[®] de par la présence de micro vides en quantité plus importante au niveau de la surface de l'instrument TRUShape[®]. De même pour l'étude d'Elnaghy et Elsaka, qui a comparé le nombre de cycles avant rupture cyclique de différents instruments et a obtenu des résultats similaires (tableau 3). L'instrument XP-endo Shaper[®] illustre une meilleure résistance à la fatigue cyclique comparativement à d'autres instruments [23].

Tableau 3 : comparaison du nombre de cycles avant rupture cyclique pour les instruments XP-endo Shaper[®], HyFlex CM[®], Vortex Blue[®], TRUShape[®] et iRace[®] [23].

Instrument	Nombre de cycles avant rupture
XP-endo Shaper	563.75 ± 21.46
HyFlex CM	482.05 ± 27.3
Vortex Blue	464.7 ± 34.14
TRUShape	250.65 ± 25.51
iRace	145.45 ± 19.57
p value	< 0.001

2.2.1.2.1 Résistance à la fatigue par torsion

Le couple de torsion est un paramètre indispensable à prendre en considération lors de l'évaluation de la résistance à la fatigue par torsion d'un instrument. En effet, plus le couple de torsion est faible, plus les forces subies par l'instrument sont faibles et moins il y a de risque de fatigue par torsion. Selon FKG Dentaire, l'instrument XP-endo Shaper[®] possède un couple de torsion minime de 1 Newton – centimètre (Ncm). De plus, la vitesse de rotation élevée de l'instrument lui permet d'éviter la fracture par effet d'harponnage au niveau de la dentine. Pour finir, l'électropolissage mentionné précédemment a aussi pour but d'adoucir les arêtes de coupes de l'instrument XP-endo Shaper[®] et donc d'améliorer sa résistance à la fatigue par torsion en contournant le phénomène de vissage ; cela permet d'augmenter l'efficacité de coupe par la même occasion [29].

Mais en comparant cet instrument à d'autres systèmes, le XP-endo Shaper[®] ne possède pas la meilleure résistance à la fatigue par torsion. L'étude de *Silva et al.* a comparé la résistance à la fatigue par torsion de l'instrument XP-endo Shaper[®] et de l'instrument TRUShape[®] en mesurant la charge de couple maximale et l'angle de rotation jusqu'à la fatigue par torsion de chaque instrument (tableau 4). L'instrument XP-endo Shaper[®] possède un angle de rotation plus élevé avant fracture par torsion que le TRUShape[®]. Mais la fatigue par torsion se réalise à une charge de couple inférieure à celui du TRUShape[®] [61].

Tableau 4 : comparaison de la résistance à la fatigue par torsion entre XP-endo Shaper[®] et TRUShape[®] [61].

Instrument	Couple (Ncm)	Angle de rotation (°)
XP-endo Shaper	0,84 ± 0,11	776 ± 27
TRUShape	1,68 ± 0,14	400 ± 22

L'étude d'Elnaghy et Elsaka a comparé la résistance à la fatigue par torsion de différents instruments en appréciant la moyenne du nombre de charge avant la rupture de différents instruments (tableau 5) : les instruments FlexMaster[®] et ProFile Vortex[®] possède une meilleure résistance à la fatigue par torsion que les instruments TRUShape[®] et XP-endo Shaper[®] [24].

Tableau 5 : comparaison du nombre de charge avant rupture par torsion pour les instruments XP-endo Shaper[®], TRUShape[®], ProFile Vortex[®] et FlexMaster[®] [24].

Instrument	Nombre de charge avant rupture
XP-endo Shaper	490,27 ± 38,44
TRUShape	524,23 ± 32,14
ProFile Vortex	723,63 ± 32,89
FlexMaster	740,97 ± 33,57

D'après ces études comparatives, l'instrument XP-endo Shaper[®] possède le couple de torsion et le nombre de charge les plus faibles par rapport aux autres instruments étudiés. Cela s'explique par différents critères comme le processus d'usinage, le type d'alliage, le traitement thermique, la conception de coupe. Tout d'abord les instruments FlexMaster[®], ProFile Vortex[®], TRUShape[®] possèdent des sections transversales triangulaires convexes alors que l'instrument XP-endo Shaper[®] possède une section transversale triangulaire équilatérale (figure 33) : cette conception de coupe génère des contraintes plus élevées au milieu de chaque côté car la distance entre ceux-ci et le centre géométrique du triangle équilatéral est plus petite que celle d'une conception de coupe triangulaire convexe. De plus, l'XP-endo Shaper[®] possède la plus faible surface qui est de 26 498 μm^2 contre 93 138 μm^2 pour le FlexMaster[®] et 60 115 μm^2 pour le TRUShape[®]. Mais il possède aussi le diamètre central le plus faible alors qu'il a été démontré que plus le diamètre central de l'instrument est élevé plus il est résistant à la fatigue par torsion. Pour finir, le système XP-endo Shaper[®] est pourvu de la plus faible conicité initiale (0,01) et cela diminue sa résistance à la fatigue. Ces différents critères mentionnés exposent la moindre résistance à la fatigue par torsion de l'XP-endo Shaper[®] par rapport aux différents instruments étudiés [24].

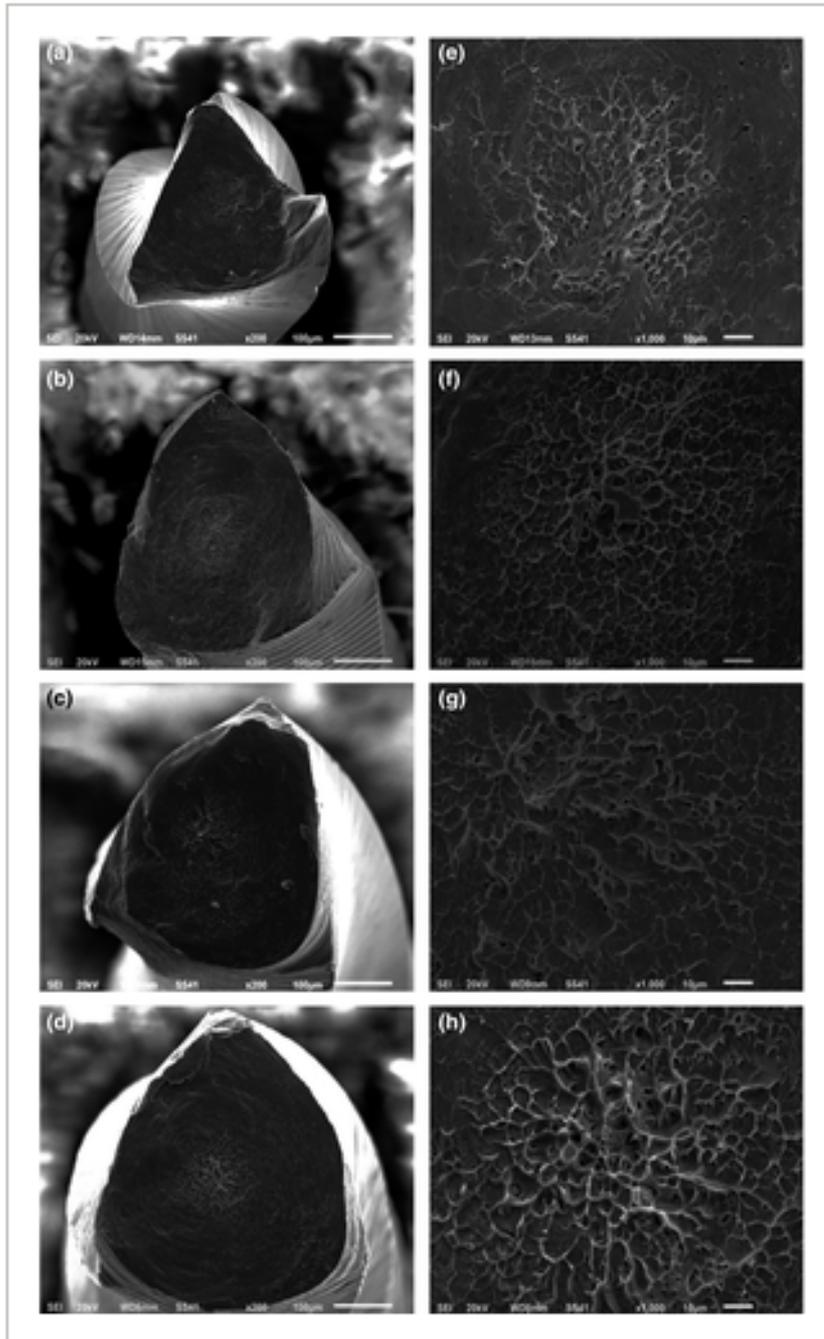


Figure 33 : images au microscope électronique à balayage (Gx200 et Gx1000) des surfaces fracturées de XP-endo Shaper[®] (a, e) TRUSHape[®] (b, f) ProFile Vortex[®] (c, g) et FlexMaster[®] (d, h) après les tests de fatigue par torsion [24].

Selon les recommandations du fabricant FKG Dentaire, la réalisation d'un cathétérisme avec une lime K à un diamètre minimum ISO 15 de conicité 2% est nécessaire avant toute utilisation du système XP-endo Shaper[®] afin de pouvoir réduire les contraintes de torsion au niveau de l'instrument et donc de palier à cette résistance de fatigue plus faible [61].

2.2.1.3 Micro-fêlures dentinaires

Les systèmes d'instrumentation conventionnels en Nickel-Titane induisent un stress et une pression au niveau des parois canalaires d'où résulte la formation de micro-fêlures dentinaires. De par sa flexibilité obtenue par la superélasticité de l'alliage MaxWire[®], le système XP-endo Shaper[®] applique une pression significativement moindre au niveau des parois canalaires et permet la diminution de ces micro-fêlures dentinaires (figure 34) [68].

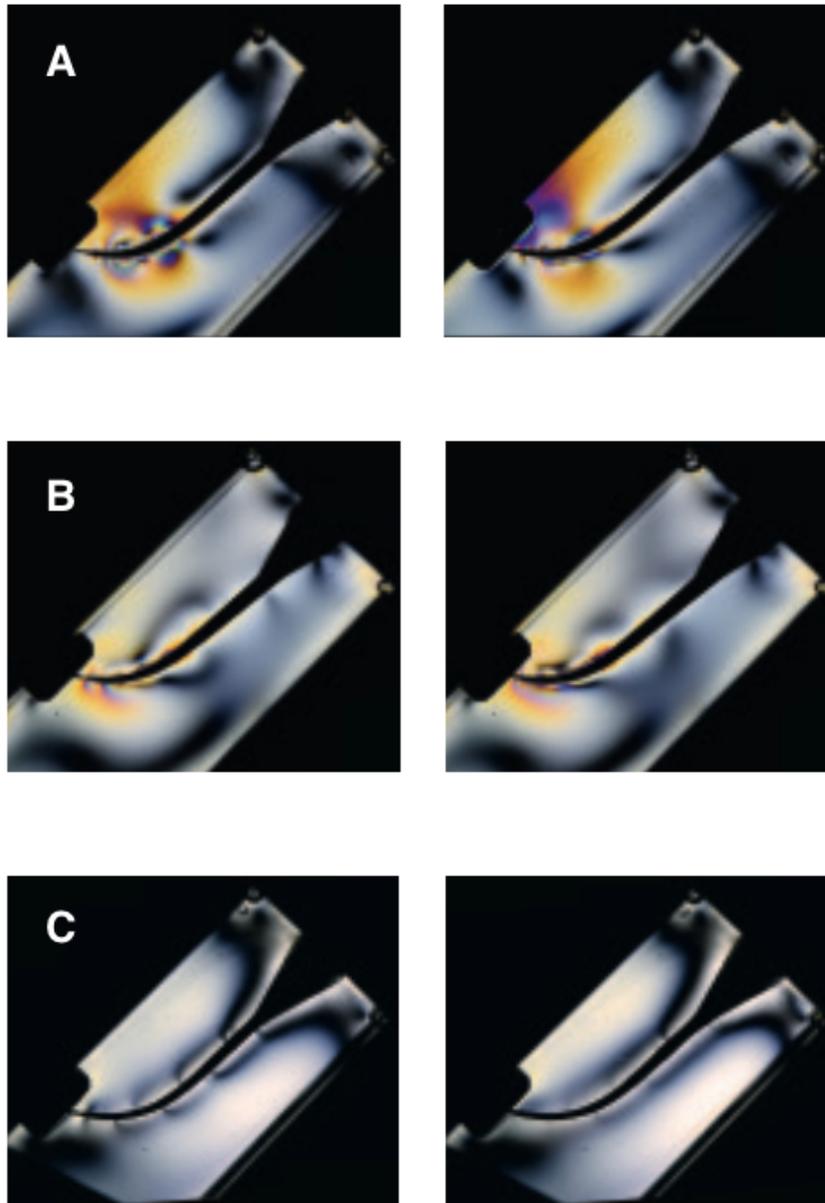


Figure 34 : test photoélastique sur un bloc de plastique afin de représenter le stress induit par les instruments au niveau des parois canalaires lors de leur mise en forme.

*A : par un système de mouvement en réciprocité; B : par un système en rotation continue conventionnel; C : par le système XP-Endo Shaper[®]
(source : brochure FKG 2019).*

L'étude d'Aksoy *et al.* en 2019 a permis de réaliser l'évaluation par micro-CT de la formation de micro-fêlures dentinaires par les systèmes XP-endo Shaper[®], Reciproc Blue[®] et le Protaper Universal[®] de 30 premières et deuxièmes molaires mandibulaires au niveau de leurs canaux mésiaux distincts. Ces 30 molaires ont été randomisées en 3 échantillons (dont n = 10) pour chaque système.

Ces micro-fêlures ont été illustrées sur des coupes transversales coronaires, médianes et apicales qui ont été superposées (figure 35) et réparties en pourcentage selon leur localisation au niveau radulaire (tableau 6) [4].

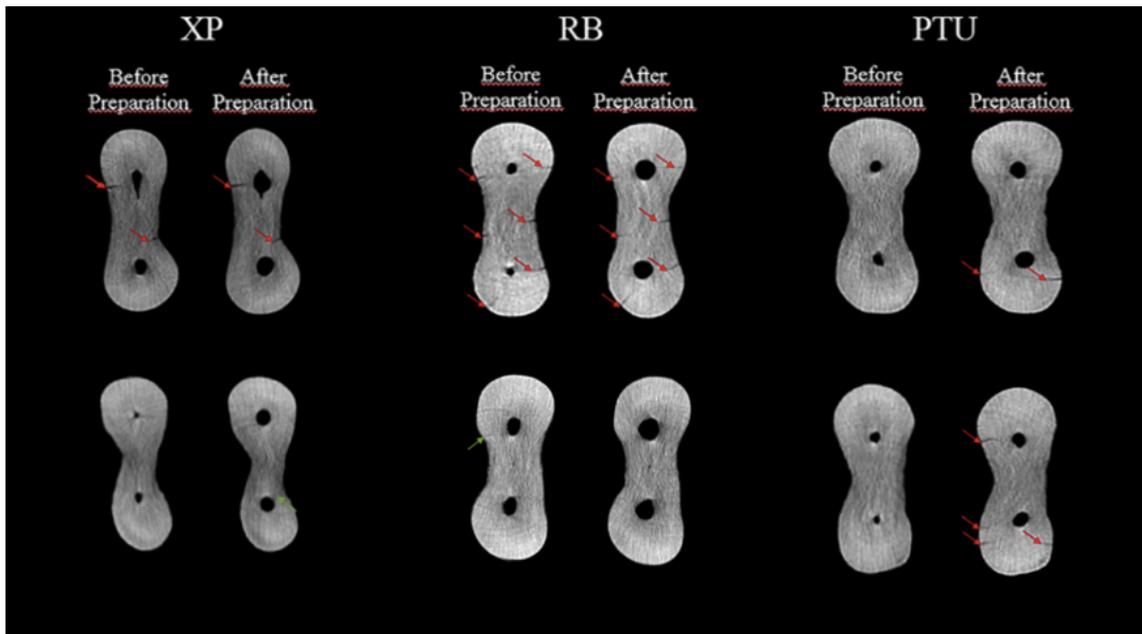


Figure 35 : coupes transversales avant et après préparation canalaire avec le XP-endo Shaper® (XP), le Reciproc Blue® (RB) et le ProTaper Universal® (PTU) illustrant les micro-fêlures (flèches rouges) [4].

Tableau 6 : répartition des micro-fêlures (%) avant et après préparation canalaire [4].

	XP-endo Shaper	Reciproc Blue	ProTaper Universal
Before preparation			
Coronal	37.25	34.50	33.08
Middle	41.23	42.80	42.22
Apical	21.52	22.70	24.70
After preparation			
Coronal	37.25	34.50	35.20
Middle	41.23	42.80	39.43
Apical	21.52	22.70	25.37

Ces résultats illustrent l'absence d'apparition de micro-fêlures dentinaires sur les racines mésiales des molaires mandibulaires après mise en forme canalaire avec le XP-endo Shaper® et le Reciproc Blue®, à l'inverse du ProTaper Universal®. Puis l'interprétation des images de coupe de cette étude ont permis de montrer que : 2.11% des micro-fêlures dans l'échantillon de l'XP-endo Shaper® ont évolué en fêlures complètes, contre 3.69% des micro-fêlures dans l'échantillon du Reciproc Blue®.

2.2.2 La pointe Booster Tip

C'est une technologie innovante qui, en association avec l'alliage MaxWire[®], confère la technicité de l'instrument XP-endo Shaper[®]. Cette pointe possède une géométrie exclusive avec 6 arêtes de coupe permettant à l'instrument d'être centré dans le canal et donc de limiter au maximum le transport canalaire [64]. La pointe Booster Tip initie la préparation canalaire à un diamètre ISO 15 qui est inférieur à celui de l'instrument. Cela permet d'augmenter au fur et à mesure le diamètre de mise en forme jusqu'à atteindre le diamètre final ISO 30 de l'XP-endo Shaper[®] (figure 36) [50].

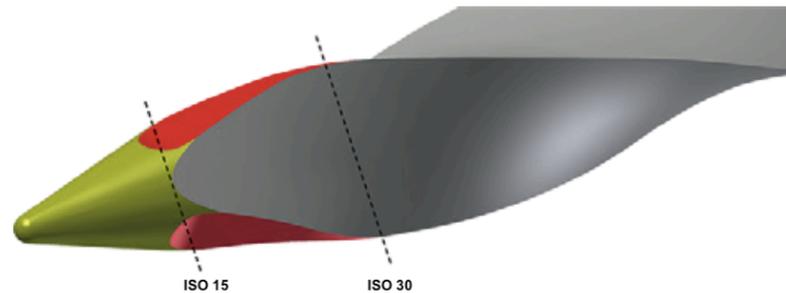


Figure 36 : pointe Booster Tip de l'instrument XP-endo Shaper[®]
(source : brochure FKG 2019).

2.3 Spécifications et conditionnement

Le système XP-endo Shaper[®] est un instrument à usage unique disponible en différentes longueurs : 21 millimètres, 25 millimètres et 31 millimètres ayant pour conicité 4% en ISO 30. La longueur de l'instrument est différenciée grâce à la couleur de l'endo stop : l'endo stop rouge pour la longueur de 21 millimètres, l'endo stop bleu pour ce qui est de la longueur de 25 millimètres et l'endo stop noir pour celle de 31 millimètres. La conicité de 4% est représentée par la bague étroite de couleur rouge au niveau de l'instrument, de même pour le diamètre ISO 30 illustré par la bague plus large de couleur bleu (figure 37).

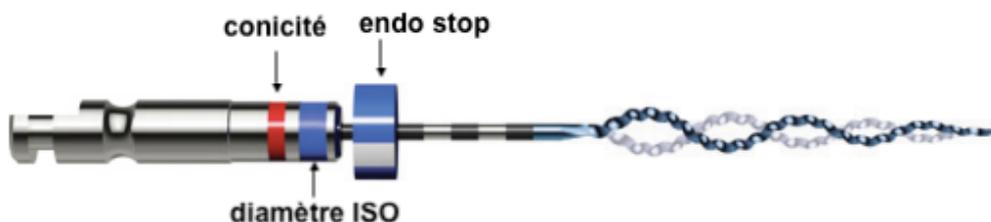


Figure 37 : l'instrument XP-endo Shaper[®] de 25 millimètres de longueur (endo stop bleu), de conicité 0,04 (4%) et de diamètre ISO 30 (source : brochure FKG 2019).

L'instrument XP-endo Shaper[®] se conditionne sous blister stérile de 3 ou de 6 unités pour un coût indicatif de 91 euros et 170 euros. L'apparition d'un système connu sous le nom de séquence XP-endo Shaper Plus[®] permet d'apprécier un traitement endodontique complet : du cathétérisme au nettoyage des canaux radiculaires. Le kit contient 4 instruments et se compose d'une lime K 10, d'une lime K 15, de l'instrument XP-endo Shaper[®] et XP-endo Finisher[®] pour un coût indicatif de 60 euros.

2.4 Protocole d'utilisation

Selon les recommandations du fabricant : avant toute utilisation du système XP-endo Shaper[®], la réalisation d'un cathétérisme avec au minimum une lime K 15 est de mise pour la majorité des canaux. Pour ce qui des canaux calcifiés, étroits ou avec des courbures sévères, la réalisation d'un cathétérisme avec au minimum une lime K 10 est de mise. Puis la pointe de l'instrument est introduite à l'arrêt au niveau de l'entrée canalaire jusqu'à atteindre une résistance. Dès lors l'instrument XP-endo Shaper[®] est légèrement retiré puis mis en rotation continue à une vitesse allant de 800 à 1000 tours par minute (figure 38-A). La progression jusqu'à la longueur de travail s'opère via des mouvements légers de va-et-vient (figure 38-B) : après 3 à 5 mouvements, si la longueur de travail n'est pas atteinte, arrêt des mouvements légers afin de pouvoir réaliser l'irrigation et vérifier la perméabilité. Puis renouveler ces 3 à 5 mouvements. Lors de l'obtention de la longueur de travail souhaitée, est effectué l'irrigation puis 10 mouvements longs et légers de va-et-vient supplémentifs (figure 38-C). Ces mouvements élargissent progressivement le canal et ainsi permettent à l'instrument XP-endo Shaper[®] de se déployer et de développer davantage son mouvement d'enveloppe. Avec cette technique, la section initiale du canal est préservée et le canal est élargi de façon homothétique avec un diamètre ISO 30 de conicité 4% à la partie apicale en ayant effectué en tout et pour tout entre 15 à 20 mouvements légers de va-et-vient avec l'instrument.

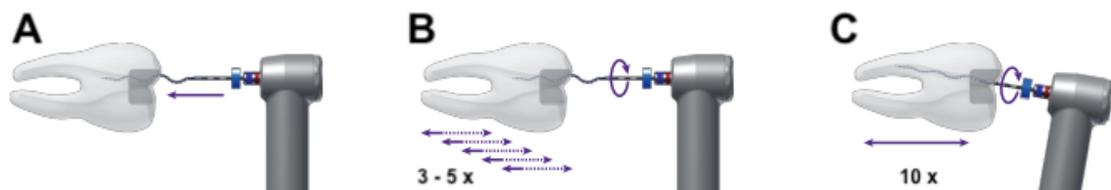


Figure 38-A à C : protocole d'utilisation de l'instrument XP-endo Shaper[®] lors de la mise en forme canalaire (source : instruction d'usage de FKG).

3. Évaluation des capacités de mise en forme canalaire

La préparation chimico-mécanique par les systèmes endodontiques actuels rencontre des complications d'accès à l'ensemble des surfaces canales mais aussi des complications de préservation de la morphologie initiale des canaux radiculaires, notamment ceux de forme ovale.

3.1 Intérêts

L'intérêt principal du système XP-endo[®] est d'atteindre de façon plus optimale l'ensemble de la complexité du système canalaire tout en respectant son anatomie tridimensionnelle; avec l'utilisation de l'XP-endo Shaper[®] lors de la préparation mécanique et de l'XP-endo Finisher[®] lors de la préparation chimique canalaire.

3.1.1 L'efficacité de la préparation canalaire mécanique

Azim a comparé en 2017 à l'aide de la micro-CT l'efficacité de la préparation canalaire mécanique de l'XP-endo Shaper[®] par rapport à un système conventionnel, le Vortex Blue[®] avec les temps de préparation recommandés par les fabricants. L'étude porte sur un échantillon de 20 incisives centrales mandibulaires dont le canal est de forme ovale. Les résultats (tableau 7) dévoilent en comparaison avec le Vortex Blue[®] que le XP-endo Shaper[®] permet une augmentation du pourcentage du volume canalaire, de la surface canalaire mais aussi qu'il élimine une quantité plus importante de dentine retirée tout en façonnant moins de débris. Le pourcentage de surface intacte avec le système XP-endo Shaper[®] est de 38.6%, pourcentage largement inférieur par rapport au Vortex Blue[®] avec 58.8% : ce qui lui permet de préparer une surface canalaire plus conséquente qu'avec le Vortex Blue[®]. De plus, cette étude illustre que le Vortex Blue[®] accroît le diamètre canalaire en section transversale de forme conique. Contrairement à l'XP-endo Shaper[®] qui possède une section transversale de forme ovale (figure 39) conservant de façon plus significative l'anatomie initiale du canal des incisives mandibulaires incluses dans l'étude [9].

Tableau 7 : comparaison de l'efficacité de la préparation canalaire mécanique de l'XP-endo Shaper[®] et du Vortex Blue[®] [9].

	XP-endo Shaper	Vortex Blue
% d'augmentation du volume canalaire	41.3 ± 24.6	19.6 ± 14.4
% d'augmentation de la surface canalaire	12.7 ± 9.2	8.3 ± 9.2
% de surface intacte	38.6 ± 8.1	58.8 ± 8.5
Débris (mm ³)	0.10 ± 0.05	0.16 ± 0.07
Dentine retirée (mm ²)	1.73 ± 0.92	0.98 ± 0.49

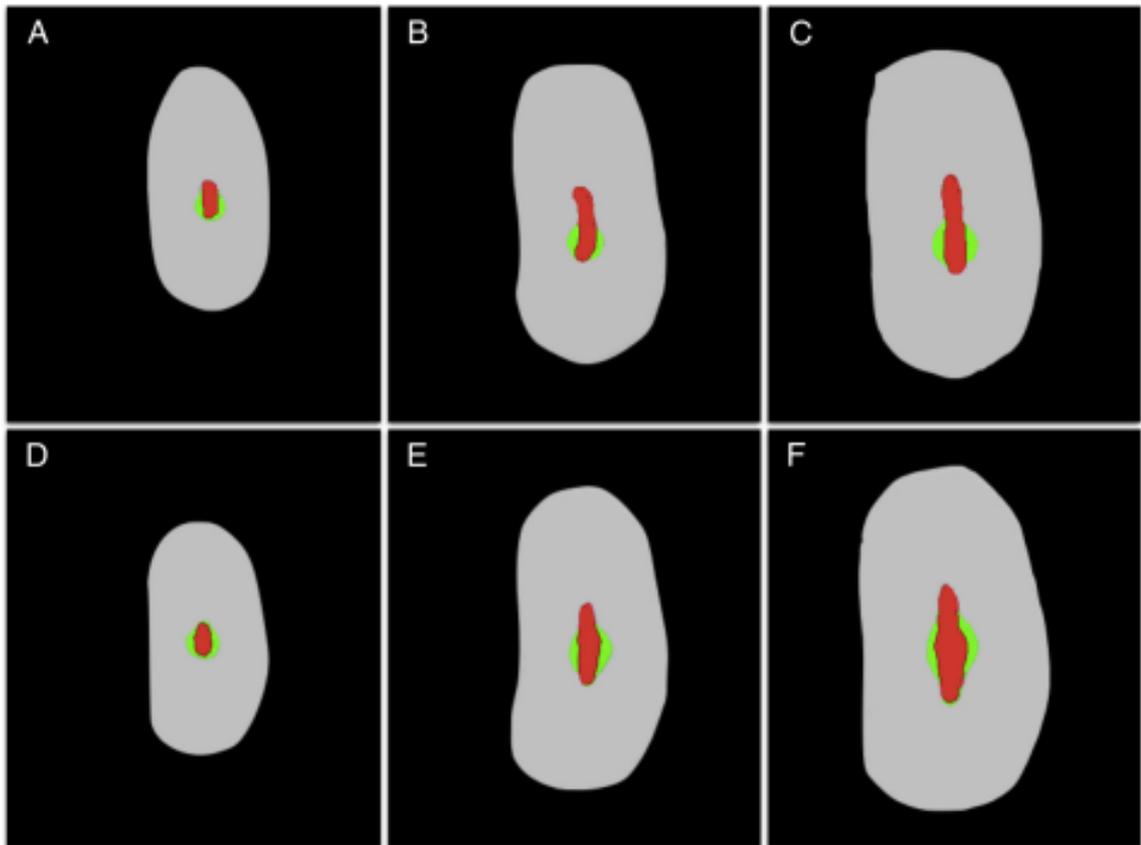


Figure 39 : modèles superposés micro-CT en coupes transversales d'un canal d'une incisive centrale mandibulaire de forme ovale et plat au niveau du tiers apical (A, D) ; médian (B, E) et coronaire (C, F) avant (rouge) et après (vert) préparation canalaire par Vortex Blue[®] (A-C) et par XP-endo Shaper[®] (D-F) [9].

De même pour l'étude de *Marques et al.* en 2021 dont le but était de comparer la capacité de mise en forme mécanique des systèmes XP-endo Shaper[®] et Mtwo[®] avec les temps de préparation recommandés par les fabricants. Cette étude a été réalisée au niveau des canaux distaux de forme ovale allongée des molaires mandibulaires à l'aide de la micro-CT. Ces deux systèmes ont illustré une capacité de mise en forme mécanique similaire, sans différence significative pour ce qui est des pourcentages de l'augmentation du volume canalaire, du volume de dentine retirée, de l'augmentation de la surface canalaire et des parois canalaires intactes. Les résultats de cette présente étude de *Marques et al.* est en accord avec d'autres études à propos du fait qu'il n'y ait pas de différences notables entre le système XP-endo Shaper[®] et certains systèmes conventionnels pour ce qui est de l'efficacité de mise en forme canalaire en respectant le protocole du temps de préparation des fabricants respectifs. Ces études sont celles de *Lacerda et al.* pour les systèmes conventionnels TRUShape[®] et Self-Adjusting File[®], celle de *Versiani et al.* pour les systèmes iRace[®] et Edge File[®] et l'étude de *Zhao et al.* pour le Reciproc Blue[®] [41].

Une étude de *De Deus et al* en 2019, à l'aide de la micro-CT, a introduit le concept d'une mise en forme dépendante du temps afin d'acquérir une préparation canalaire mécanique plus optimale avec le système XP-endo Shaper[®] sur un échantillon de 10 racines mésiales de molaires mandibulaires. Contrairement aux études mentionnées précédemment, cette étude n'a pas utilisé ce système uniquement selon les recommandations du fabricant : après la préparation recommandée, chaque modèle a été soumis à 15, 30 et 45 secondes d'instrumentation active supplémentaire au niveau de la longueur de travail (figure 40). Cette augmentation du temps de travail a entraîné l'augmentation significative ($P < 0.001$) du volume canalaire, de la surface canalaire, du volume de dentine retirée et la diminution significative ($P < 0.001$) de la surface et du nombre de parois intactes. Sauf pour ce qui est du temps de préparation supplémentaire de 15 secondes où dans ce cas il n'y a pas eu de différences significatives ($P = 0.149$) au niveau de ces paramètres étudiés (tableau 8)[20].

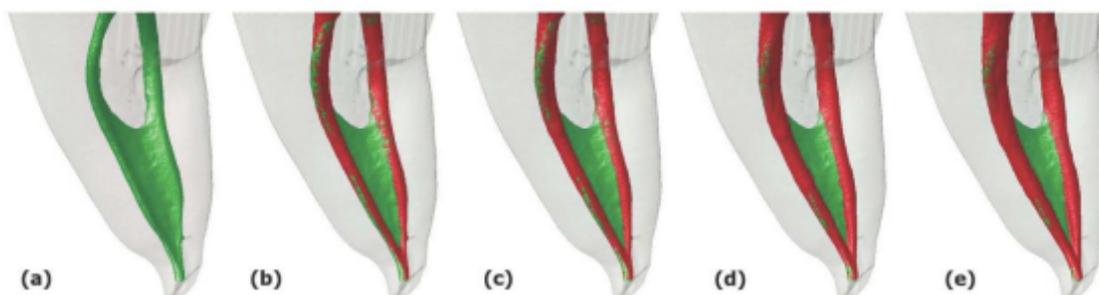


Figure 40 : modèles 3D d'un canal radiculaire mésial d'une molaire mandibulaire (a) Canal sans préparation; (b) après préparation selon les recommandations du fabricant; après une instrumentation active supplémentaire de (c) 15 secondes, (d) 30 secondes, (e) 45 secondes au niveau de la longueur de travail (couleur verte : zone préopératoire, couleur rouge zone post-opératoire [20].

Tableau 8 : variation en pourcentage à différents temps de l'efficacité de la préparation canalaire mécanique avec l'XP-endo Shaper[®] [20].

	Après préparation selon les recommandations du fabricant	Après instrumentation supplémentaire de 15 secondes	Après instrumentation supplémentaire de 30 secondes	Après instrumentation supplémentaire de 45 secondes
% d'augmentation du volume canalaire	41.53%	48.18%	58,69%	65.22%
% d'augmentation de la surface canalaire	8.72%	10.59%	13.56%	15.59%
% surface intacte	31.82%	29.27%	25.0%	22.74%
% dentine retirée	0.0020%	0.0023%	0.0029%	0.0032%

D'après la présente étude, cette augmentation du temps de travail de ce système XP-endo Shaper[®] est une alternative intéressante afin d'améliorer l'efficacité de la préparation canalaire mécanique, sans pour cela engendrer une éventuelle fracture de l'instrument ni une éventuelle fracture de la racine mésiale due à une supposée sur-préparation canalaire. Ce sont des éventualités à prendre en compte lors de la stratégie de mise en forme canalaire; c'est pour cela qu'il faut veiller à ne pas aller au-delà de la durée d'utilisation active supplémentaire étudiée, car selon l'étude de *Peters* en 2004, l'utilisation prolongée d'un instrument augmente les risques de fractures instrumentales [20].

Poly et al. ont comparé en 2021 à l'aide de la micro-CT l'efficacité de mise en forme mécanique des systèmes conventionnels WaveOne Gold[®], TRUShape[®] avec le système XP-endo Shaper[®] tout en suivant le protocole suggéré par l'étude de *De Deus* avec l'application de 45 secondes additionnelles au protocole suggéré par le fabricant. Trente racines distales de forme ovale de molaires mandibulaires ont été préparées puis différents critères ont été étudiés, notamment le pourcentage de dentine retirée et le pourcentage de surfaces intactes (tableau 9). La comparaison de ces trois systèmes a permis de résulter que le XP-endo Shaper[®] a un pourcentage de dentine retirée plus élevée tout en ayant le pourcentage le plus faible de surface canalaire intacte [53].

Tableau 9 : comparaison de l'efficacité de la préparation canalaire mécanique de l'XP-endo Shaper[®], du WaveOne Gold[®] et de TRUShape[®] [53].

	WaveOne Gold [®]	TRUShape [®]	XP-endo Shaper [®]
Volume canalaire (mm ³)	9.33 ± 3.64	8.58 ± 3.83	10.05 ± 3.21
Surface canalaire (mm ²)	74.94 ± 22.45	79.06 ± 23.05	85.14 ± 28.50
Surface intacte (%)	11.46 ± 4.00	12.45 ± 5.84	5.25 ± 2.57
Dentine retirée (mm ³)	1.81 ± 0.80	1.89 ± 0.83	3.29 ± 1.51

Le système XP-endo Shaper[®] dispose d'une meilleure efficacité de préparation canalaire mécanique par rapport aux principaux systèmes conventionnels dès lors qu'après la préparation mécanique recommandée par le fabricant est soumis un temps de préparation supplémentaire. A savoir que malgré ce temps de préparation supplémentaire pour l'étude, le système XP-endo Shaper[®] conserve l'un de ses principaux avantages qui est la vitesse de réalisation de la préparation canalaire mécanique.

3.1.2 L'efficacité de la préparation canalaire chimique

Le système XP-endo Finisher[®] (figure 41) est un instrument rotatif conçu par le fabricant FKG Dentaire (La Chaux-de-Fonds, Suisse) afin d'augmenter l'efficacité de l'action chimique lors du nettoyage du complexe canalaire en activant de façon mécanique la solution d'irrigation. C'est un instrument à usage unique de diamètre ISO 25, de conicité nulle, disponible en longueur de 21 et de 25 millimètres qui s'utilise en rotation continue à une vitesse de 1 000 tours par minute avec un couple de 1 Newton - centimètre. De même que pour le système XP-endo Shaper[®], le système XP-endo Finisher[®] réalise le principe de l'enveloppe en se dilatant et en se contractant en fonction de la température grâce à l'alliage MaxWire[®]. Ces caractéristiques mentionnées ci-dessus confèrent au système XP-endo Finisher[®] une certaine flexibilité, une résistance à la fatigue cyclique, une capacité d'expansion pouvant couvrir un champ de travail de 6 millimètres de diamètre soit 100 fois plus qu'un instrument classique de la même taille : ce qui lui permet de balayer l'ensemble des parois canales quelle que soit leur complexité morphologique telles que les parois des canaux irréguliers, larges, en forme de C, de forme ovale, les isthmes, les furcations tout en préservant leur anatomie initiale [37].



Figure 41 : le système XP-endo Finisher[®] de 25 millimètres de longueur (endo stop bleu), de conicité nulle (absence de bague étroite), et de diamètre ISO 25 (bague large rouge) (source : brochure FKG 2019).

L'étude de *Moldauer et al.* en 2017 a comparé le système XP-endo Finisher[®] et l'irrigation passive ultrasonique à propos de leur efficacité d'élimination de la Smear Layer, et ce après instrumentation mécanique du canal radiculaire. Pour ce qui est des résultats, le système XP-endo Finisher[®] avec le NaOCl 2.5% et l'EDTA 17% obtient le pourcentage le plus élevé de tubuli dentinaires ouverts au niveau de chaque tiers médian et apical des prémolaires mandibulaires incluses dans l'étude avec une différence significative comparées au PUI avec le NaOCl 2.5% et l'EDTA 17% [45].

Zhao et al. ont étudié en 2019 l'efficacité de 3 méthodes d'irrigation en étudiant les réductions en pourcentage de l'AHTD dans les canaux en forme de C de molaires mandibulaires (figure 42) : le système Reciproc Blue® (RB) associé à l'irrigation passive ultrasonique (PUI), le système XP-endo Shaper® (XP-S) associé à l'irrigation par le XP-endo Finisher® (XP-F) et le système Reciproc Blue® (RB) associé à l'irrigation à la seringue et à l'aiguille (SNI).

Les sous-groupes d'irrigation par PUI et XP-endo Finisher® possèdent une meilleure réduction en pourcentage de l'AHTD et ont éliminé plus de débris par rapport à l'irrigation SNI. De plus, *Zhao et al.* ont mis en évidence que le Reciproc Blue® a laissé de façon significative un pourcentage d'AHTD plus élevé que l'XP-endo Shaper® (2.8% contre 1.1%) et qu'il possède 33.04% de surfaces canalaires intactes contre 30.45% pour l'XP-endo Shaper®. Dans cette présente étude, le système XP-endo Shaper® associé au système XP-endo Finisher® est la combinaison qui possède l'efficacité de préparation mécanique et chimique la plus optimale [77].

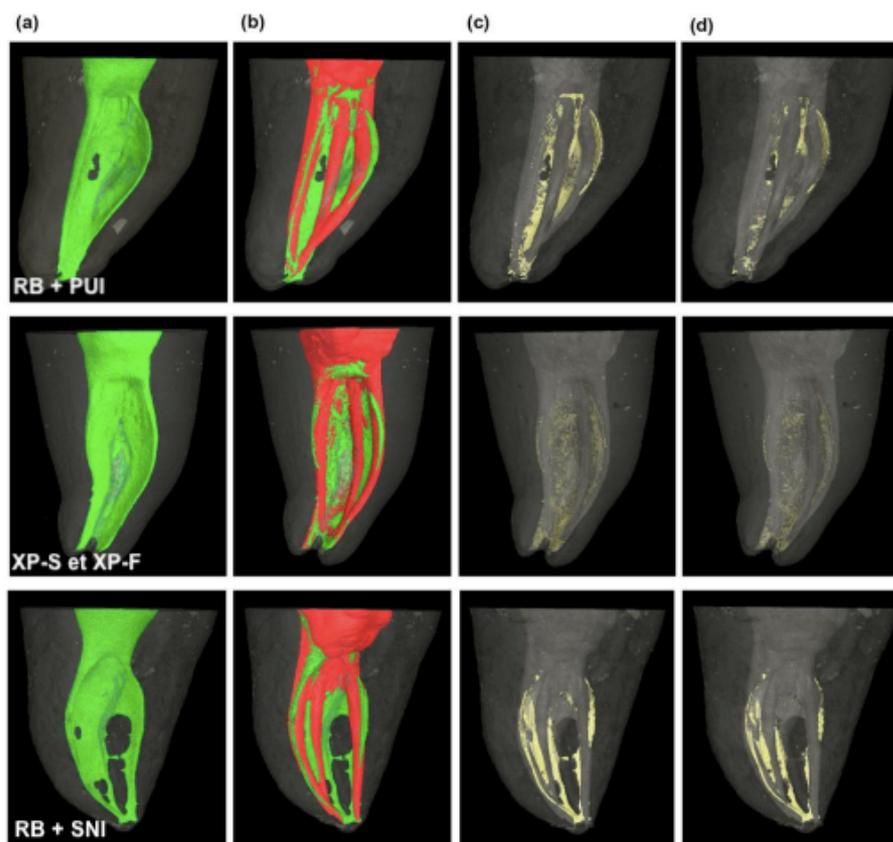


Figure 42 : modèles 3D de canaux radiculaires en forme de C de molaires mandibulaires en pré-instrumentation (a); superposition pré-instrumentation et post-instrumentation (b); volume d'AHTD en jaune après instrumentation (c); volume d'AHTD en jaune après irrigation supplémentaire (d) [77].

Selon les recommandations du fabricant : avant toute utilisation de l'XP-endo Finisher®, l'application du protocole d'irrigation habituel doit être réalisé, de plus le canal doit toujours contenir une solution d'irrigation. Ce système s'utilise une fois la mise en forme des canaux finalisée : positionner l'endo-stop au niveau de la longueur de travail correspondante puis une fois l'XP-endo Finisher® inséré légèrement à l'arrêt au niveau de l'entrée canalair, enclencher le moteur et progresser dans le canal radulaire pendant 1 minute en réalisant environ 60 lents et doux mouvements dans le sens longitudinal d'environ 7 à 8 millimètres. Après avoir effectué l'irrigation finale et l'assèchement canalair, l'obturation biocéramique est recommandée.

3.1.3 Intérêt lors du retraitement endodontique

D'après le fabricant FKG Dentaire, la lime XP-endo Shaper® peut être indiquée lors de retraitement endodontique à une vitesse recommandée entre 1 000 et 2 500 tours par minute et un couple à 1 Ncm :

- dans un premier temps, insérer la lime XP-endo Shaper® dans le canal jusqu'à l'approche avec la gutta-percha puis démarrer le moteur à la vitesse recommandée (figure 43-A),
- réaliser des mouvements de picotage jusqu'à atteindre la gutta-percha puis exécuter une faible pression afin de faire évoluer la lime dans le canal jusqu'à la longueur de travail désirée (figure 43-B),
- l'instrument s'enroule autour de la gutta-percha, puis par de lents mouvements verticaux réalisés de longs morceaux de gutta-percha s'extraient (figure 43-C).

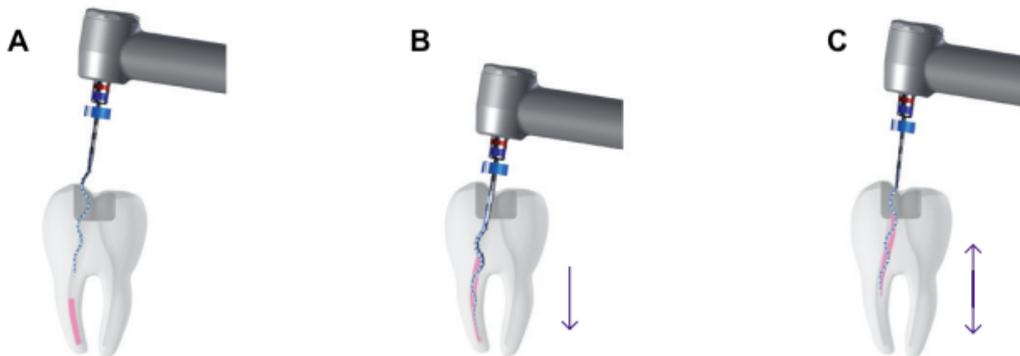


Figure 43-A à C : protocole d'utilisation de l'instrument XP-endo Shaper® lors de la désobturation (source : instruction d'usage de FKG).

3.2 Limites

3.2.1 Le coût

L'aspect financier est plus conséquent par rapport à d'autres limes disponibles sur le marché avec un coût de la lime XP-endo Shaper[®] compris entre 28 et 30 euros l'unité, d'autant plus que la lime est à usage unique.

3.2.2 Le micromoteur

La vitesse élevée du micromoteur endodontique allant de 800 à 1000 tours minutes peut représenter un frein à l'utilisation pour le praticien.

3.2.3 L'ajustage du maître cône

L'ajustage du maître cône peut s'avérer limité dans certains cas de figures notamment lors de la mise en forme d'un canal de forme ovale, le calibrage sera moins systématique que lors de la mise en forme d'un canal de forme plutôt conique. De même, en l'absence de tug back, il est recommandé pour les systèmes conventionnels d'augmenter le diamètre de préparation. Or dans le cas de la lime XP-endo Shaper[®], le seul diamètre disponible est le diamètre ISO 30 : ce qui nécessite de recalibrer manuellement le diamètre de préparation du maître cône.

3.2.4 L'obturation

La technique d'obturation recommandée par le fabricant avec l'utilisation de produits pré-mélangés en biocéramique tel que Totalfill BC Points[®] et Totalfill BC sealer[®] présente d'une part une réintervention endodontique difficile de par la quasi-impossibilité de retrouver une perméabilité apicale [33]. D'autre part, une désobturation pour raison prothétique ne peut être envisagée dans la même séance principalement à cause du temps de prise élevée du ciment en biocéramique [40].

3.2.5 La fracture instrumentale

Malgré la résistance à la fatigue de l'instrument XP-endo Shaper[®] énoncée précédemment, le risque zéro n'existe pas. C'est pour cela qu'il faut prendre en considération la possibilité de fractures instrumentales de l'XP-endo Shaper[®] et donc à la difficulté de l'atteindre dans le canal de par son design en forme de serpent.

3.2.6 Evidence based dentistry

Celle principalement rencontrée à la rédaction de cette thèse est l'échantillonnage faible de plusieurs études en rapport avec le système XP-endo Shaper[®]. Mais aussi le fait qu'il existe des variations de méthodologie entre les études, ce qui pourrait expliquer la non-similarité de certains résultats : l'étude d'*Azim et al.*, 38.6% des parois canalaires sont restées intactes au niveau des incisives mandibulaires contre 9.42% des parois canalaires intactes selon *Versiani et al.* [73]. Pour finir, en raison de l'arrivée récente sur le marché du système XP-endo Shaper[®], il n'existe que peu d'articles publiés à ce jour.

Conclusion

Grâce à son principe de l'enveloppe de mouvement, le système XP-endo Shaper® apporte une évolution dans le domaine de l'instrumentation endodontique : en proposant un système qui s'adapte à la complexité de la morphologie canalaire tout en permettant d'atteindre davantage de surfaces canalaires lors de leur mise en forme. Ce système permet de réaliser une mise en forme propre à chaque canal contrairement aux systèmes conventionnels d'où résulte une préparation mécanique commune de forme conique. L'instrument XP-endo Shaper® possède des atouts majeurs, notamment par son efficacité de mise en forme dans la majorité des canaux, pour sa vitesse de réalisation de mise en forme, sa résistance à la fatigue cyclique, sa limitation d'extrusion des débris apicaux, sa moindre présence de micro-fêlures au niveau des parois dentinaires. Mais ce système possède quelques limites pragmatiques, notamment le coût technique, l'appréhension d'utilisation par le praticien de par la vitesse élevée du micromoteur, du risque encouru en cas de fracture instrumentale mais aussi des inconvénients non négligeables d'une technique d'obturation en biocéramique. C'est pour cela que ces atouts et limites sont à prendre en considération par le praticien lors de sa décision thérapeutique. L'approche intellectuelle de ce nouveau concept de mise en forme décrit dans ce travail permet d'ouvrir le champ des possibilités en termes de conservation tissulaire et d'endodontie à minima en attendant la publication d'études supplémentaires.

En définitive, il peut s'avérer intéressant d'envisager des études supplémentaires, d'une part, à propos du travail de *De Deus et al.* en 2019 afin de mieux appréhender la durée d'instrumentation additionnelle du XP-endo Shaper® tout en respectant le rapport bénéfice-risque [20].

D'autre part, l'alliage MaxWire®, technologie exclusive de FKG, a étendu ses champs de compétences en proposant le système XP-endo Finisher R® ayant les mêmes propriétés que le système XP-endo Finisher® (avec la capacité de mémoire de forme, son pouvoir d'expansion) tout en possédant un diamètre plus large (ISO 30) que ce dernier (ISO 25). Cela lui permet d'acquérir une certaine rigidité qui lui permet d'être efficace dans l'élimination des résidus d'obturations, en particulier au niveau des zones canalaires difficiles d'accès lors des retraitements endodontiques. Il serait donc intéressant d'étudier et de comparer l'efficacité de ce système par rapport à d'autres systèmes conventionnels comme l'étude de *De Deus et al.* qui a évalué les capacités des instruments XP-endo Finisher R® et l'irrigation passive par ultrasons comme technique de référence lors de l'élimination des restes d'obturation canalaire de forme ovale [21].

Références bibliographiques

- [1] Ahmed HMA, Dummer PMH. A new system for classifying tooth, root and canal anomalies. *Int Endod J* 2018;51:389–404.
- [2] Ahmed HMA, Versiani MA, De-Deus G, Dummer PMH. A new system for classifying root and root canal morphology. *Int Endod J* 2017;50:761–70.
- [3] Ahn S-Y, Kim H-C, Kim E. Kinematic effects of nickel-titanium instruments with reciprocating or continuous rotation motion: a systematic review of in vitro studies. *J Endod* 2016;42:1009–17.
- [4] Aksoy Ç, Keriş EY, Yaman SD, Ocağ M, Geneci F, Çelik HH. Evaluation of xp-endo shaper, reciproc blue, and protaper universal niti systems on dentinal microcrack formation using micro-computed tomography. *J Endod* 2019;45:338–42.
- [5] Alfadley A, Alrajhi A, Alissa H, Alzegaibi F, Hamadah L, Alfouzan K, et al. Shaping ability of xp endo shaper file in curved root canal models. *Int J Dent* 2020;2020:e4687045.
- [6] Amato M, Vanoni-Heineken I, Hecker H, Weiger R. Curved versus straight root canals: the benefit of activated irrigation techniques on dentin debris removal. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endodontology* 2011;111:529–34.
- [7] Andrabi SM-U-N, Kumar A, Mishra SK, Tewari RK, Alam S, Siddiqui S. Effect of manual dynamic activation on smear layer removal efficacy of ethylenediaminetetraacetic acid and smearclear: an in vitro scanning electron microscopic study. *Aust Endod J* 2013;39:131–6.
- [8] Arıcan Öztürk B, Atav Ateş A, Fişekçioğlu E. Cone-beam computed tomographic analysis of shaping ability of xp-endo shaper and protaper next in large root canals. *J Endod* 2020;46:437–43.
- [9] Azim AA, Piasecki L, da Silva Neto UX, Cruz ATG, Azim KA. Xp shaper, a novel adaptive core rotary instrument: micro-computed tomographic analysis of its shaping abilities. *J Endod* 2017;43:1532–8.
- [10] Basrani B. *Endodontic irrigation: chemical disinfection of the root canal system*. Cham: Springer; 2015.
- [11] Bighetti Trevisan RL, Scatolin RS, Castro Raucci LMS de, Raucci Neto W, Froner IC. Effects of EDTA gel and chlorhexidine gel on root dentin permeability. *Microsc Res Tech* 2018;81:191–7.
- [12] Boutsoukis C, Psimma Z, Kastrinakis E. The effect of flow rate and agitation technique on irrigant extrusion ex vivo. *Int Endod J* 2014;47:487–96.
- [13] Bronnec F, Caron G. Le traitement endodontique des premières molaires. *Réal Clin* 2008;19:339-51.
- [14] Buchanan GD, Gamiieldien MY, Tredoux S, Vally ZI. Root and canal configurations of maxillary premolars in a south african subpopulation using cone beam computed tomography and two classification systems. *J Oral Sci* 2020;62:93–7.

- [15] Bueno MR, Estrela C, Azevedo BC, Cintra Junqueira JL. Root canal shape of human permanent teeth determined by new cone-beam computed tomographic software. *J Endod* 2020;S0099-2399(20)30348-4.
- [16] Costerton JW, Lewandowski Z, DeBeer D, Caldwell D, Korber D, James G. Biofilms, the customized microniche. *J Bacteriol* 1994;176:2137–42.
- [17] Dadbakhsh S, Speirs M, Humbeeck JV, Kruth J-P. Laser additive manufacturing of bulk and porous shape-memory niti alloys: from processes to potential biomedical applications. *MRS Bull* 2016;41:765–74.
- [18] Darcey J, Jawad S, Taylor C, Roudsari RV, Hunter M. Modern endodontic principles part 4 : irrigation. *Dent Update* 2016;43:20–33.
- [19] De Deus QD. Frequency, location, and direction of the lateral, secondary, and accessory canals. *J Endod* 1975;1:361–6.
- [20] De-Deus G, Belladonna FG, Simões-Carvalho M, Cavalcante DM, Ramalho CNMJ, Souza EM, et al. Shaping efficiency as a function of time of a new heat-treated instrument. *Int Endod J* 2019;52:337–42.
- [21] De-Deus G, Belladonna FG, Zuolo AS, Cavalcante DM, Carvalhal JCA, Simões-Carvalho M, et al. Xp-endo finisher r instrument optimizes the removal of root filling remnants in oval-shaped canals. *Int Endod J* 2019;52:899–907.
- [22] Eble A. Prévenir et traiter la fracture des instruments endodontiques en niti (nickel-titane). *Actual Odonto-Stomatol* 2012:151–60.
- [23] Elnaghy A, Elsaka S. Cyclic fatigue resistance of xp-endo shaper compared with different nickel-titanium alloy instruments. *Clin Oral Investig* 2018;22:1433–7.
- [24] Elnaghy AM, Elsaka SE. Torsional resistance of xp-endo shaper at body temperature compared with several nickel-titanium rotary instruments. *Int Endod J* 2018;51:572–6.
- [25] F P, M B, T A, Oa P. Preparation of oval-shaped root canals in mandibular molars using nickel-titanium rotary instruments: a micro-computed tomography study. *J Endod* 2010;36.
- [26] Fan B, Pan Y, Gao Y, Fang F, Wu Q, Gutmann JL. Three-dimensional morphologic analysis of isthmuses in the mesial roots of mandibular molars. *J Endod* 2010;36:1866–9.
- [27] Fennich M, Sakout M, Abdallaoui F. For a rational evaluation of working length in endodontics. *ROS* 2012:232–43.
- [28] Gao X, Tay FR, Gutmann JL, Fan W, Xu T, Fan B. Micro-CT evaluation of apical delta morphologies in human teeth. *Sci Rep* 2016;6:36501.
- [29] Gavini G, Santos M dos, Caldeira CL, Machado ME de L, Freire LG, Iglecias EF, et al. Nickel–titanium instruments in endodontics: a concise review of the state of the art. *Braz Oral Res* 2018;32.

- [30] Grande NM, Plotino G, Gambarini G, Testarelli L, D'Ambrosio F, Pecci R, et al. Present and future in the use of micro-CT scanner 3D analysis for the study of dental and root canal morphology. *Ann Ist Super Sanita* 2012;48:26-34.
- [31] GUÉNIN G. Alliages à mémoire de forme. *Tech Ing Matér Act Intell* 1996;base documentaire : TIB126DUO.
- [32] Haapasalo M, Shen Y, Wang Z, Gao Y. Irrigation in endodontics. *Br Dent J* 2014;216:299–303.
- [33] Hess D, Solomon E, Spears R, He J. Retreatability of a bioceramic root canal sealing material. *J Endod* 2011;37:1547–9.
- [34] Huang T-Y, Gulabivala K, Ng Y-L. A bio-molecular film ex-vivo model to evaluate the influence of canal dimensions and irrigation variables on the efficacy of irrigation. *Int Endod J* 2008;41:60–71.
- [35] Bertrand C, Spironelli Ramos C, Apap M, Pelissier B. Le système genius : moteur et limes pour mouvement réciproque et rotation continue. *Dent Trib Fr* 2019;10.
- [36] Karobari MI, Parveen A, Mirza MB, Makandar SD, Nik Abdul Ghani NR, Noorani TY, et al. Root and root canal morphology classification systems. *Int J Dent* 2021;2021:6682189.
- [37] Kolli S, Balasubramanian SK, Kittappa K, Mahalaxmi S. Efficacy of xp-endo Finisher files in endodontics. *Aust Endod J* 2018;44:71–2.
- [38] Laplaud J. Évaluation ex-vivo du respect des trajectoires canalaires, lors de la mise en forme des canaux ovalaires avec un instrument prototype. *Médecine humaine et pathologie* 2015. dumas-01267523
- [39] Lin LM, Rosenberg PA, Lin J. Do procedural errors cause endodontic treatment failure? *J Am Dent Assoc* 1939 2005;136:187–93.
- [40] Loushine BA, Bryan TE, Looney SW, Gillen BM, Loushine RJ, Weller RN, et al. Setting properties and cytotoxicity evaluation of a premixed bioceramic root canal sealer. *J Endod* 2011;37:673–7.
- [41] Marques JLC, Freire LG, Scardini I de L, Vieira BR, de Sousa FB, dos Santos M. Shaping efficiency of xp-endo shaper and mtwo instruments in long oval root canals: a micro-CT study. *Aust Endod J* 2021;47:624–30.
- [42] Martin D. Mouvement réciproque : de mise en forme. *JSOP* 2012:26–31.
- [43] Martin D, Bronnec F. Activation des solutions d'irrigation 2017:7.
- [44] Mohammadi Z, Soltani MK, Shalavi S, Asgary S. A review of the various surface treatments of niti instruments. *Iran Endod J* 2014;9:235–40.
- [45] Moldauer B. Comparison of the xp-endo finisher file system and passive ultrasonic irrigation (PUI) on smear layer removal after root canal instrumentation effectiveness of two irrigation methods on smear layer removal. *JDOH* 2017;4:1–7.

- [46] Nallapati S. A review of root canal anatomy & clinical management. *ROS* 2010;239–62.
- [47] Paqué F, Balmer M, Attin T, Peters OA. Preparation of oval-shaped root canals in mandibular molars using nickel-titanium rotary instruments: a micro-computed tomography study. *J Endod* 2010;36:703–7.
- [48] Pawar BA, Pawar AM, Atram J, Luke AM, Bhardwaj A, Kfir A, et al. Apical debris extrusion during instrumentation of oval root canals in primary teeth using manual versus motorized files: an ex vivo study. *Sci Rep* 2021;11:3859.
- [49] Pérard M, Le Goff A, Hingant B, Le Clerc J, Pérez F, Vulcain J-M, et al. Choix de la limite apicale et de la longueur de travail. *Encycl Méd-Chir* 2010.
- [50] Pérez F. Traitement thermique des instruments endodontiques en Nickel-Titane: quel apport pour les praticiens? *Réal Clin* 2019;30:276–85.
- [51] Pérez Morales M de las N, González Sánchez JA, Olivieri Fernández JG, Laperre K, Abella Sans F, Jaramillo DE, et al. Trushape versus xp-endo shaper: a micro-computed tomographic assessment and comparative study of the shaping ability—An In Vitro Study. *J Endod* 2020;46:271–6.
- [52] Peters O. Current challenges and concepts in the preparation of root canal systems: a review. *J Endod* 2004;30:559–67.
- [53] Poly A, Marques F, Moura Sassone L, Karabucak B. The shaping ability of waveone gold, trushape and xp-endo shaper systems in oval-shaped distal canals of mandibular molars: a microcomputed tomographic analysis. *Int Endod J* 2021;54:2300–6.
- [54] Saber SE-D, Hashem AAR. Efficacy of different final irrigation activation techniques on smear layer removal. *J Endod* 2011;37:1272–5.
- [55] Schäfer E, Diez C, Hoppe W, Tepel J. Roentgenographic investigation of frequency and degree of canal curvatures in human permanent teeth. *J Endod* 2002;28:211–6.
- [56] Schneider SW. A comparison of canal preparations in straight and curved root canals. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol* 1971;32:271–5.
- [57] Şen BH, Wesselink PR, Türkün M. The smear layer: a phenomenon in root canal therapy. *Int Endod J* 1995;28:141–8.
- [58] Shen Y, Zhou H, Zheng Y, Peng B, Haapasalo M. Current challenges and concepts of the thermomechanical treatment of nickel-titanium instruments. *J Endod* 2013;39:163–72.
- [59] Shrestha R, Srii R, Shrestha D. Diversity of root canal morphology in mandibular first premolar. *Kathmandu Univ Med J KUMJ* 2019;17:223–8.
- [60] Shrestha S, Karki S, Agrawal N, Vikram M, Singh V, Shrestha A. Prevalence of different types of apical root canal morphology and their treatment recommendations in an institute. *JNMA J Nepal Med Assoc* 2018;56:616–20.

- [61] Silva EJNL, Vieira VTL, Belladonna FG, Zuolo A de S, Antunes H dos S, Cavalcante DM, et al. Cyclic and torsional fatigue resistance of xp-endo shaper and trushape instruments. *J Endod* 2018;44:168–72.
- [62] Simon, Cooper, Berdal, Machtou, Smith. *Biologie pulpaire : comprendre pour appliquer au quotidien* 2008;37:209–35.
- [63] Simon S. *L'endodontie de A à Z: traitement et retraitement*. 2018;5:73-83.
- [64] Simon S, Machtou P, Pertot W-J, Diogenes A. *Endodontie*. 2020;7;10.
- [65] Siqueira JF, Alves FRF, Versiani MA, Rôças IN, Almeida BM, Neves MAS, et al. Correlative bacteriologic and micro-computed tomographic analysis of mandibular molar mesial canals prepared by self-adjusting file, reciproc, and twisted file systems. *J Endod* 2013;39:1044–50.
- [66] Siqueira Junior JF, Rôças I das N, Marceliano-Alves MF, Pérez AR, Ricucci D. Unprepared root canal surface areas: causes, clinical implications, and therapeutic strategies. *Braz Oral Res* 2018;32:e65.
- [67] Stambaugh RV, Wittrock JW. The relationship of the pulp chamber to the external surface of the tooth. *J Prosthet Dent* 1977;37:537–46.
- [68] Thaliyadeth LB, Chakravarthy D, S N P. Xp-endo Shaper: one file shaper system. *J Sci Dent* 2018;8:47–8.
- [69] Tilotta F, Lautrou A, Lévy G. *Anatomie dentaire*. ELSEVIER Masson. 2018.
- [70] Tomaszewska IM, Leszczyński B, Wróbel A, Gładysz T, Duncan HF. A micro-computed tomographic (micro-CT) analysis of the root canal morphology of maxillary third molar teeth. *Ann Anat - Anat Anz* 2018;215:83–92.
- [71] Torabinejad M. *Endodontie: principes et pratique*. 2016.
- [72] Uslu G, Özyürek T, Yılmaz K, Gündoğar M, Plotino G. Apically extruded debris during root canal instrumentation with reciproc blue, hyflex edm, and xp-endo shaper nickel-titanium files. *J Endod* 2018;44:856–9.
- [73] Velozo C, Albuquerque D. Microcomputed tomography studies of the effectiveness of xp-endo shaper in root canal preparation: a review of the literature. *ScientificWorldJournal* 2019;2019:3570870.
- [74] Versiani MA, Carvalho KKT, Martins JNR, Custódio ALN, Castro MAA, Akaki E, et al. Effects of root canal enlargement on unprepared areas and coronal dentine thickness of three-rooted maxillary first premolars with different root configurations: a stepwise micro-CT study. *Int Endod J* 2022;55:1262–73.
- [75] Versiani MA, De-Deus G, Vera J, Souza E, Steier L, Pécora JD, et al. 3D mapping of the irrigated areas of the root canal space using micro-computed tomography. *Clin Oral Investig* 2015;19:859–66.

- [76] Webber M, Piasecki L, Jussiani EI, Andrello AC, dos Reis PJ, Azim KA, et al. Higher speed and no glide path: a new protocol to increase the efficiency of xp shaper in curved canals—An In Vitro Study. *J Endod* 2020;46:103–9.
- [77] Zhao Y, Fan W, Xu T, Tay FR, Gutmann JL, Fan B. Evaluation of several instrumentation techniques and irrigation methods on the percentage of untouched canal wall and accumulated dentine debris in c-shaped canals. *Int Endod J* 2019;52:1354–65.
- [78] Zupanc J, Vahdat-Pajouh N, Schäfer E. New thermomechanically treated niti alloys – a review. *Int Endod J* 2018;51:1088–103.

Tables des figures

Figure 1 - 1 à 5 : dessin des voies de contamination bactérienne de l'endodonte [64].....	9
Figure 2 : les régions anatomiques du système pulpaire [64].....	11
Figure 3 : vues externe et modèles Micro-CT 3D de trois premières prémolaires maxillaires [2].	13
Figure 4 : modèles Micro-CT 3D de différents groupes de dents avec des morphologies radiculaires et canalaire classées selon Ahmed et al [1].	14
Figure 5 : dessin illustrant la base (3), le corps (2), l'apex (1) radulaire; le canal accessoire (A), secondaire (B) et latéral (C,D) [19].....	15
Figure 6 : schéma des variations géométriques courantes en coupe transversale de la morphologie des racines et des canaux radiculaires [71].	16
Figure 7 : coupes bucco-linguales au niveau de la racine distale (A) et de la racine mésiale (B) d'une première molaire mandibulaire [30].	17
Figure 8 : schéma illustrant la méthode de Schneider afin de déterminer l'angle de courbure canalaire [56].	17
Figure 9 : images micro-CT 3D et coupes transversales de l'anatomie radulaire et de la préparation des canaux avec en rouge la forme post-opératoire du canal et en vert la forme du canal en préopératoire; A : préparation avec des instruments coniques variables; B : avec des instruments 0,04 et 0,06; C : avec des instruments coniques oscillants [52].	18
Figure 10 : modèles Micro-CT 3D d'isthmes d'une molaire mandibulaire représentant la préparation des canaux mésiaux en rouge et les zones isthmiques non préparées en vert [74].	19
Figure 11 : schéma de la région apicale avec la constriction apicale (CA), la jonction cémento-dentinaire (JCD), le foramen apical (FA), le dôme apical (DA) et l'apex radiologique (AR) [64].	20
Figure 12 : modèles Micro-CT 3D de deltas apicaux de différents groupes de dents: A à F dents antérieures, G à I prémolaires, J à L molaires [28].	21
Figure 13. A : vue apicale des apex d'une première molaire maxillaire gauche où est visible 4 foramens apicaux ; B : grossissement de l'anatomie interne de la racine palatine où est présent un delta apical [30].	22
Figure 14 : modèles Micro-CT 3D du complexe canalaire de troisièmes molaires maxillaires [70].	22
Figure 15 : schéma de mouvement en rotation continue [35].	23
Figure 16 : schéma de mouvement en réciprocité [35].	24
Figure 17 : images au microscope d'une paroi canalaire instrumentée mécaniquement avec boue dentinaire (a) et après élimination de la boue dentinaire grâce à l'irrigation NaOCl et au rinçage final à l'EDTA (b) [10].	25
Figure 18 : schéma avec la zone d'échange de l'irrigant d'1 à 2mm au-delà de la seringue et la "zone morte" avec cette absence d'échange de l'irrigant [18].	26
Figure 19 : schéma du maître cône adapté afin de rendre possible le transport de l'irrigant [10].	26

Figure 20 : schéma du flux acoustique créé par l'instrument ultrasonique [10].	27
Figure 21 : modèles Micro-CT superposés d'une molaire (A) et coupe transversale du tiers médian radulaire (B) avant (en vert) et après (en rouge) la préparation des canaux radulaires avec des instruments rotatifs NiTi; coupe histologique illustrant des résidus de tissus pulpaire (C) [66].	28
Figure 22 : coupe transversale au tiers médian d'une incisive mandibulaire avec grossissement x16 au microscope (A), avec grossissement au microscope x50 (B) [66].	28
Figure 23 : coupe transversale de la racine mésiale d'une molaire mandibulaire après mise en forme canalaire à l'aide d'instruments rotatifs NiTi [10].	29
Figure 24 : modèles 3D micro-CT et 2D (coupes transversale au tiers coronaire, moyen et apical) de la morphologie interne des racines mésiales des molaires mandibulaires, avant (vert) et après (rouge) préparation canalaire de 3 systèmes de mise en forme : Self adjusting File®, Reciproc®, Twisted File® [65].	29
Figure 25 : molaire mandibulaire de type II de Vertucci avec modèles 3D micro-CT (A) avant le traitement canalaire (en vert) avec superposition de l'irrigant (en noir), avec modèles 3D micro-CT (B) révélant les zones exemptes de solution d'irrigation (en bleu) [75].	30
Figure 26 : A : schéma des zones non préparées (en rouge) d'un canal ovale par les systèmes rotatifs NiTi ; B : schéma de la mise en forme canalaire idéale d'un canal ovale [38].	31
Figure 27 : coupe sagittale d'une racine représentant un canal courbe (A) avec la position de trois groupes d'instruments d'activation d'irrigation (B) [6].	31
Figure 28 : la forme sinusoïdale du XP-endo Shaper® fonctionne selon le principe de l'enveloppe de mouvement afin d'effectuer l'élargissement du canal radulaire [64].	33
Figure 29 : coupe transversale de la pointe d'un instrument conventionnel (à gauche) et du XP-endo Shaper® (à droite) à 1,6cm de la longueur de travail (source : brochure FKG 2019).	35
Figure 30 : graphique représentant le mécanisme de l'effet de mémoire de forme et de la superélasticité avec en abscisse la contrainte et en ordonnée la température [17].	37
Figure 31 : l'instrument XP-endo Shaper® : dans sa phase martensitique à température ambiante avec sa forme droite ductile; dans sa phase austénique à température intra-canaire avec sa forme incurvée en serpent rigide (source : brochure FKG 2019).	38
Figure 32 : images au microscope électronique à balayage (G x250 et G x1000) des surfaces fracturées de XP-endo Shaper® (A, B) et TRUShape® (C, D) après les tests de fatigue cyclique [61].	40
Figure 33 : images au microscope électronique à balayage (Gx200 et Gx1000) des surfaces fracturées de XP-endo Shaper® (a, e) TRUShape® (b, f) ProFile Vortex® (c, g) et FlexMaster® (d, h) après les tests de fatigue par torsion [24].	43
Figure 34 : test photoélastique sur un bloc de plastique afin de représenter le stress induit par les instruments au niveau des parois canalaire lors de leur mise en forme. A : par un système de mouvement en réciprocity; B : par un système en rotation continue conventionnel; C : par le système XP-Endo Shaper® (source : brochure FKG 2019).	44
Figure 35 : coupes transversales avant et après préparation canalaire avec le XP-endo Shaper® (XP), le Reciproc Blue® (RB) et le ProTaper Universal® (PTU) illustrant les micro-fêlures (flèches rouges) [4].	45

Figure 36 : pointe Booster Tip de l'instrument XP-endo Shaper© brochure FKG 2019).....	(source : 46
Figure 37 : l'instrument XP-endo Shaper© de 25 millimètres de longueur (endo stop bleu), de conicité 0,04 (4%) et de diamètre ISO 30 (source : brochure FKG 2019).....	46
Figure 38-A à C : protocole d'utilisation de l'instrument XP-endo Shaper© lors de la mise en forme canalair (source : instruction d'usage de FKG).	47
Figure 39 : modèles superposés micro-CT en coupes transversales d'un canal d'une incisive centrale mandibulaire de forme ovale et plat au niveau du tiers apical (A, D) ; médian (B, E) et coronaire (C, F) avant (rouge) et après (vert) préparation canalair par Vortex Blue© (A-C) et par XP-endo Shaper© (D-F) [9].	49
Figure 40 : modèles 3D d'un canal radiculaire mésial d'une molaire mandibulaire (a) Canal sans préparation; (b) après préparation selon les recommandations du fabricant; après une instrumentation active supplémentaire de (c) 15 secondes, (d) 30 secondes, (e) 45 secondes au niveau de la longueur de travail (couleur verte : zone préopératoire, couleur rouge zone post-opératoire [20].	50
Figure 41 : le système XP-endo Finisher© de 25 millimètres de longueur (endo stop bleu), de conicité nulle (absence de bague étroite), et de diamètre ISO 25 (bague large rouge) (source : brochure FKG 2019).	52
Figure 42 : modèles 3D de canaux radiculaires en forme de C de molaires mandibulaires en pré-instrumentation (a); superposition pré-instrumentation et post-instrumentation (b); volume d'AHTD en jaune après instrumentation (c); volume d'AHTD en jaune après irrigation supplémentaire (d) [77].....	53
Figure 43-A à C : protocole d'utilisation de l'instrument XP-endo Shaper© lors de la désobturation (source : instruction d'usage de FKG).....	54

Table des tableaux

Tableau 1 : poids (en gramme) de l'extrusion de débris apicaux engendrés par Recipro Blue [®] , Hyflex EDM [®] et XP-endo Shaper [®] [72].	35
Tableau 2 : comparaison de la résistance à la fatigue cyclique entre XP-endo Shaper [®] et TRUShape [®] [61].	39
Tableau 3 : comparaison du nombre de cycles avant rupture cyclique pour les instruments XP-endo Shaper [®] , HyFlex CM [®] , Vortex Blue [®] , TRUShape [®] et iRace [®] [23].	40
Tableau 4 : comparaison de la résistance à la fatigue par torsion entre XP-endo Shaper [®] et TRUShape [®] [61].	41
Tableau 5 : comparaison du nombre de charge avant rupture par torsion pour les instruments XP-endo Shaper [®] , TRUShape [®] , ProFile Vortex [®] et FlexMaster [®] [24].	42
Tableau 6 : répartition des micro-fêlures (%) avant et après préparation canalaire [4].	45
Tableau 7 : comparaison de l'efficacité de la préparation canalaire mécanique de l'XP-endo Shaper [®] et du Vortex Blue [®] [9].	48
Tableau 8 : variation en pourcentage à différents temps de l'efficacité de la préparation canalaire mécanique avec l'XP-endo Shaper [®] [20].	50
Tableau 9 : comparaison de l'efficacité de la préparation canalaire mécanique de l'XP-endo Shaper [®] , du WaveOne Gold [®] et de TRUShape [®] [53].	51

XP-endo Shaper® : changement de paradigme de mise en forme canalaire /
Charlotte D'ALLENDE. - p.76 : ill.43 ; tabl.9 ; réf.78.

Domaines : Endodontie

Mots clés Rameau : Odontostomatologie – Appareils et matériels ; mise en forme canalaire

Résumé de la thèse :

Dans ce travail, un changement de paradigme de mise en forme canalaire moins invasif est mis en avant, s'éloignant ainsi de celui de la conicité constante établi par Schilder en 1974. Ce nouveau concept de mise en forme a pour principal objectif de s'adapter à l'anatomie originelle du complexe canalaire, c'est-à-dire que l'instrument de mise en forme ne doit plus imposer sa forme au canal.

C'est pour cette raison que le fabricant FKG Dentaire (La Chaux-de-Fonds, Suisse) a introduit sur le marché en 2015 le système XP-endo®, système présenté comme s'adaptant à l'anatomie tridimensionnelle canalaire grâce à son principe de l'enveloppe de mouvement. En effet, les études actuelles montrent que l'utilisation combinée de l'XP-endo Shaper® lors de la préparation canalaire mécanique et celle de l'XP-endo Finisher® lors de la préparation canalaire chimique est plus appropriée à appréhender la totalité du complexe canalaire. Contrairement à la préparation chimico-mécanique actuelle moins conservatrice d'une part et d'autre part moins qualitative.

Le système XP-endo® permettrait donc une meilleure capacité de mise en forme canalaire que les systèmes instrumentaux conventionnels.

JURY :

Président : Monsieur le Professeur Etienne DEVEAUX

Asseseurs : Monsieur le Docteur Alain GAMBIEZ
Monsieur le Docteur Lieven ROBBERECHT
Madame le Docteur Marine HENAUT

Membre invité : Monsieur le Docteur Alexandre DEMETRIOU