

**UNIVERSITE DE LILLE**  
**FACULTE DE CHIRURGIE DENTAIRE**

Année de soutenance : 2020

N°:

THESE POUR LE  
**DIPLOME D'ETAT DE DOCTEUR EN CHIRURGIE DENTAIRE**

Présentée et soutenue publiquement le 02 DECEMBRE 2020

Par Taniah IKOGOU

Née le 24 août 1994 à Libreville – GABON

**Capacité de mise en forme des instruments**  
**F6 SkyTaper<sup>®</sup>, HyFlex<sup>®</sup> EDM OneFile et One Curve<sup>®</sup>:**  
**Une étude comparative par microtomographie**

**JURY**

Président : Monsieur le Professeur E. DEVEAUX  
Assesseurs : Monsieur le Docteur P. HILDELBERT  
Monsieur le Docteur A. GAMBIEZ  
Monsieur le Docteur L. ROBBERECHT



Président de l'Université	:	Pr. J-C. CAMART
Directeur Général des Services de l'Université	:	M-D. SAVINA
Doyen	:	Dr. E. BOCQUET
Vice-Doyen	:	Dr. A. de BROUCKER
Responsable des Services	:	S. NEDELEC
Responsable de la Scolarité	:	M. DROPSIT

### **PERSONNEL ENSEIGNANT DE L'U.F.R.**

#### **PROFESSEURS DES UNIVERSITES :**

<b>P. BEHIN</b>	Prothèses
<b>T. COLARD</b>	Fonction-Dysfonction, Imagerie, Biomatériaux
<b>E. DELCOURT-DEBRUYNE</b>	Professeur Emérite Parodontologie
<b>C. DELFOSSE</b>	Responsable du Département d' <b>Odontologie Pédiatrique</b>
<b>E. DEVEAUX</b>	Dentisterie Restauratrice Endodontie

## **MAITRES DE CONFERENCES DES UNIVERSITES**

K. AGOSSA	Parodontologie
T. BECAVIN	Dentisterie Restauratrice Endodontie
A. BLAIZOT	Prévention, Epidémiologie, Economie de la Santé, Odontologie Légale.
P. BOITELLE	Prothèses
<b>F. BOSCHIN</b>	Responsable du Département de <b>Parodontologie</b>
<b>E. BOCQUET</b>	Responsable du Département d' <b>Orthopédie Dento-Faciale</b> <b>Doyen de la Faculté de Chirurgie Dentaire</b>
<b>C. CATTEAU</b>	Responsable du Département de <b>Prévention, Epidémiologie, Economie de la Santé, Odontologie Légale.</b>
A. de BROUCKER	Fonction-Dysfonction, Imagerie, Biomatériaux
M. DEHURTEVENT	Prothèses
T. DELCAMBRE	Prothèses
F. DESCAMP	Prothèses
A. GAMBIEZ	Dentisterie Restauratrice Endodontie
F. GRAUX	Prothèses
<b>P. HILDEBERT</b>	Responsable du Département de <b>Dentisterie Restauratrice Endodontie</b>
C. LEFEVRE	Prothèses
J.L. LEGER	Orthopédie Dento-Faciale
M. LINEZ	Dentisterie Restauratrice Endodontie
T. MARQUILLIER	Odontologie Pédiatrique
G. MAYER	Prothèses
<b>L. NAWROCKI</b>	Responsable du Département de <b>Chirurgie Orale</b> Chef du Service d'Odontologie A. Caumartin - CHRU Lille
<b>C. OLEJNIK</b>	Responsable du Département de <b>Biologie Orale</b>
P. ROCHER	Fonction-Dysfonction, Imagerie, Biomatériaux
L. ROBBERECHT	Dentisterie Restauratrice Endodontie
<b>M. SAVIGNAT</b>	Responsable du Département des <b>Fonction-Dysfonction, Imagerie, Biomatériaux</b>
T. TRENTESAUX	Odontologie Pédiatrique
<b>J. VANDOMME</b>	Responsable du Département de <b>Prothèses</b>

### ***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.

## ***Remerciements***

**AUX MEMBRES DU JURY,**

**Monsieur le Professeur Etienne DEVEAUX**

**Professeur des universités - praticien hospitalier des CSERD**

**Section réhabilitation orale**

**Département dentisterie restauratrice endodontie**

**Docteur en chirurgie dentaire**

**Docteur en sciences odontologiques**

**Docteur en odontologie de l'Université de Lille 2**

**Habilité à diriger des recherches**

**Doyen honoraire de la faculté de chirurgie dentaire de Lille**

**Membre associé national de l'Académie nationale de chirurgie dentaire**

**Personne Compétente en Radioprotection**

**Ancien président de la Société française d'endodontie**

**Chevalier dans l'ordre des palmes académiques**

*C'est un honneur que vous me faites en acceptant la présidence de ce Jury. Merci pour votre disponibilité et votre réactivité malgré vos nombreuses fonctions. Vous avez contribué à la réalisation de cette étude dès les débuts et je vous en remercie fortement. Veuillez trouver dans ce travail, l'expression de ma profonde reconnaissance.*

**Monsieur le Docteur Pierre HILDEBERT**

**Maître de conférences des universités - praticien hospitalier des CSERD**

**Section réhabilitation orale**

**Département dentisterie restauratrice endodontie**

**Docteur en chirurgie dentaire**

**Docteur en odontologie de l'Université de Lille 2**

**Responsable du département de dentisterie restauratrice endodontie**

*Je suis heureuse de pouvoir vous compter dans ce jury et je vous en remercie. C'est un honneur pour moi d'avoir pu bénéficier de vos enseignements et de votre expérience. Veuillez trouver dans ce travail l'expression de mon admiration et de mon profond respect.*

**Monsieur le Docteur Alain GAMBIEZ**

**Maître de conférences des universités - praticien hospitalier des CSERD**

**Section réhabilitation orale**

**Département dentisterie restauratrice endodontie**

**Docteur en chirurgie dentaire**

**D.E.A. sciences de la vie et de la santé**

*Je tiens à vous témoigner ma gratitude pour avoir accepté et fait en sorte de faire partie de ce jury.*

*Votre gentillesse et vos connaissances en endodontie m'ont fait aimer cette discipline et donné l'envie de mieux me former dans ce domaine. Je vous en suis profondément reconnaissante. Veuillez trouver dans ce travail, l'expression de ma haute considération.*

**Monsieur le Docteur Lieven ROBBERECHT**

**Maître de conférences des universités - praticien hospitalier des CSERD**

**Section réhabilitation orale**

**Département dentisterie restauratrice endodontie**

**Docteur en chirurgie dentaire**

**Docteur en odontologie de l'Université de Lille**

**Master I informatique médicale - Lille 2**

**Master II biologie et santé - Lille 2**

*Merci infiniment, Docteur Robberecht, de m'avoir fait confiance en me proposant ce sujet. J'ai appris énormément à vos côtés grâce à votre rigueur et votre sens critique. Ils me serviront tout au long de mon parcours, croyez-le.*

*Merci de m'avoir permis l'accès à des outils que je n'aurais pas eu l'occasion d'utiliser en d'autres circonstances. Je tiens à vous dire que malgré les difficultés rencontrées, les délais à respecter ou encore les analyses supplémentaires à effectuer, ce fut un réel plaisir de travailler sur ce sujet. J'ose espérer que le résultat est à la hauteur de vos attentes.*

*Merci pour le temps que vous m'avez consacré et pour votre réactivité hors pair. Je n'aurai pu imaginer meilleur directeur de thèse.*

*Sincèrement.*

**AUX MEMBRES COLLABORATEURS,**

**Madame la Docteure Kadiatou SY**

*Je vous dis un grand Merci Docteure SY pour votre aide et votre disponibilité lors du protocole de mise en forme des échantillons. Merci pour vos nombreux conseils et votre gentillesse. Je vous souhaite tout le meilleur.*

**Monsieur le Docteur Benjamin VERRIEST**

*Tu as été le précurseur de ce travail Benjamin ! Toujours disponible, tu as répondu à mes interrogations avec clarté et précision à chaque fois. Je te remercie pour tout le travail que tu as fait en amont et ta présence dans la continuité de cette étude. Puisses-tu trouver dans ce dernier volet, le résultat de ce long travail ^^.*

**Monsieur Jérôme DELATTRE**

*Cher Jérôme, un immense Merci pour ta précieuse aide, pour tes explications concernant les outils informatiques et le temps passé à réfléchir sur la programmation des paramètres ! Que ce fût long hahah ! Merci à toi et à toute l'équipe du MABLab pour m'avoir accueillie dans une ambiance chaleureuse et agréable pendant près d'une année ! Ça a été un véritable plaisir d'y venir et de voir petit à petit les résultats se dessiner. Puisses-tu trouver dans ce travail le résultat de tant d'heures d'analyses informatiques ^^.  
Affectueusement.*



# Table des matières

<b>1. Introduction</b>	<b>18</b>
<b>2. Matériels et méthodes</b>	<b>21</b>
2.1 Préparation des échantillons	21
2.2 Analyse d'image	22
2.3 Paramètres étudiés	24
2.4 Analyse statistique	27
<b>3. Résultats</b>	<b>28</b>
3.1 Temps de préparation	28
3.2 Volume de dentine éliminée	29
3.3 Vitesse de préparation	30
3.4 Surfaces canalaires non instrumentées	31
3.5 Transport canalair	32
<b>4. Discussion</b>	<b>35</b>
<b>5. Conclusion</b>	<b>41</b>
<b>Références bibliographiques</b>	<b>42</b>
<b>Annexes</b>	<b>52</b>
Annexe 1 : Design des instruments étudiés	52
Annexe 2 : Angle $\alpha$ (Schneider) et rayon de courbure R (Pruett)	53
Annexe 3 : Protocole de préparation des échantillons	54

## **Tables des abréviations**

HAS : Haute autorité de santé

NiTi : Nickel-Titane

NaOCl : Hypochlorite de Sodium

EDTA : Acide éthylène diamine tétra-acétique

# 1. Introduction

La thérapeutique endodontique consiste à traiter les maladies de la pulpe et du péri-apex dans le but de transformer une dent pathologique en une entité saine, asymptomatique et fonctionnelle sur l'arcade [59]. Pour répondre à cet objectif, Schilder énonçait en 1974, les principes de mise en forme, de nettoyage et d'obturation tridimensionnelle du système canalaire [67,68]. Ces principes constituent encore la base de la thérapeutique endodontique conventionnelle actuelle.

La mise en forme et le nettoyage du système canalaire associent l'action concomitante d'une préparation instrumentale et d'une solution d'irrigation chimique antiseptique. Leur objectif est d'éliminer le plus complètement possible les bactéries, leurs toxines et les débris vivants ou nécrosés qui peuvent servir de support à la prolifération bactérienne et déclencher ou entretenir la pathologie pulpaire et péri-apicale [51]. Dans ce processus, la préparation instrumentale est d'une importance cruciale car elle doit pouvoir préserver la configuration et la forme originale du canal afin d'éviter de fragiliser la dent [31, 67].

Les instruments de préparation canalaire ont subi de nombreuses évolutions au cours du temps. Au départ manuelle, séquentielle et en acier inoxydable, l'instrumentation canalaire s'est ensuite mécanisée grâce à l'apparition de l'alliage nickel-titane (NiTi). Ce dernier a permis d'améliorer l'efficacité et la rapidité de la mise en forme canalaire en comparaison à l'acier inoxydable [22]. Les propriétés de superélasticité et de mémoire de forme du NiTi [41] constituent un atout pour le traitement des racines courbes [5] car elles permettent des préparations plus centrées, plus conservatrices et de ce fait une réduction des risques de perforations, de butées ou encore de transport canalaire. Aussi, l'évolution des alliages et profils en NiTi a permis de réduire le nombre d'instruments nécessaires à la préparation canalaire en développant le concept de mono-instrument à usage unique.

Dans un souci de simplification des procédures, de rapidité et d'efficacité de nettoyage, trois mono-instruments en alliage nickel-titane que sont : F6 SkyTaper® (Komet, Lemgo, Allemagne), HyFlex® EDM OneFile (Coltene-Whaledent, Altstätten,

Suisse), et One Curve<sup>®</sup> (Coltene-Whaledent Micro-Mega, Besancon, France) ont été commercialisés respectivement en 2015, 2011 et 2018. Conditionnés sous forme de blisters stériles, ces instruments sont amenés progressivement à la longueur de travail. A ce jour, aucune étude comparative de l'efficacité de mise en forme de ces trois instruments entre eux n'a encore été menée.

Le système F6 SkyTaper<sup>®</sup> est un système de limes en NiTi à usage unique composé de cinq diamètres de pointe croissants (20, 25, 30, 35 et 40/100 de mm) disponible en trois longueurs (21 mm, 25 mm et 31 mm). Tous les instruments ont une conicité constante de 6% [9, 12]. La section transversale est constante en double « S » sur toute la longueur travaillante. Un seul instrument est sélectionné en fonction de la situation clinique avec un diamètre de pointe qui doit être supérieur de 10/100 de mm à la lime de cathétérisme utilisée.

Les limes HyFlex<sup>®</sup> EDM OneFile autoclavables sont composées d'un alliage NiTi traité thermiquement par un procédé CM (pour « controlled memory ») et par un procédé d'électro-érosion [32]. Elles possèdent un diamètre de pointe de 25/100 de mm ainsi qu'une conicité et une section transversale variables : conicité de 8% sur les 4 mm de la pointe instrumentale, puis 4% en remontant vers le mandrin ; la section transversale est rectangulaire à la pointe de l'instrument, trapézoïdale dans sa partie moyenne et presque triangulaire en direction du mandrin [24, 48].

La lime One Curve<sup>®</sup> est une lime à usage unique dont l'alliage NiTi a subi un traitement breveté nommé C-wire<sup>®</sup>. Celui-ci consiste en un électro-polissage suivi d'un traitement thermique [74]. Cette technologie confère à l'instrument des propriétés de mémoire de forme et rend possible sa pré-courbure [77]. La lime présente un diamètre de pointe de 25/100 de mm et une conicité constante de 6%. Sa section transversale est variable : triple hélice sur les 3 mm de la pointe, zone de transition sur les 7 mm suivants et double « S » sur les 6 derniers mm (Annexe 1).

La microtomographie à rayons X (micro-CT ou  $\mu$ -CT) est une technique d'imagerie radiographique tridimensionnelle qui permet de visualiser un objet de manière précise et non destructrice [75]. Elle est particulièrement adaptée pour évaluer les changements morphologiques du canal dentaire avant et après instrumentation [6,

52] ce qui en fait l'outil le plus adéquat pour l'analyse des capacités de mise en forme d'un instrument endodontique [40].

L'objectif de ce travail est de comparer les capacités de mise en forme de trois mono-instruments, F6 SkyTaper<sup>®</sup>, HyFlex<sup>®</sup> EDM OneFile et One Curve<sup>®</sup>, dans des canaux courbes de dents humaines par microtomographie. Les paramètres étudiés sont le temps de préparation canalaire, le volume de dentine éliminée, la vitesse de préparation canalaire, le pourcentage de surfaces canalaires non instrumentées et le transport canalaire. La première hypothèse nulle est qu'il n'y a pas de différence significative entre les systèmes étudiés. La seconde hypothèse nulle est qu'il n'y a pas de différence significative du transport canalaire à 3, 5 et 7 mm du foramen apical.

## **2. Matériels et méthodes**

### **2.1 Préparation des échantillons**

Cinquante-deux premières molaires maxillaires humaines matures, exemptes de résorptions externe ou interne et n'ayant subi aucun traitement endodontique ou cavité d'accès préalable ont été sélectionnées pour cette étude (accord du comité d'éthique local : DC-2008-642). Seule les racines mésio-vestibulaires ont été considérées.

Les racines ont été nettoyées puis conservées dans une solution saline isotonique à température ambiante. La longueur radiculaire a été standardisée à 15 mm en réalisant un plateau occlusal à l'aide d'un disque diamanté. La cavité d'accès a été aménagée et le contrôle de la perméabilité canalaire a été vérifié à l'aide d'une lime de cathétérisme manuelle K Ø10 (MMC, Micro-Mega). Deux radiographies lime en place (incidence mésio-distale et incidence vestibulo-linguale) ont ensuite été réalisées pour chaque échantillon. Le logiciel ImageJ (version 1.51k, National Institutes of Health, USA) a permis de déterminer l'angle de courbure  $\alpha$  selon la méthode de Schneider [69] et le rayon de courbure R selon la méthode de Pruett [58, 25] (Annexe 2). Les racines avaient un angle de courbure compris entre 20° et 42° ( $27,53^\circ \pm 5,60$ ) et un rayon de courbure compris entre 2 et 12 mm ( $7,22 \text{ mm} \pm 1,96$ ) (tableau 1).

Les échantillons ont ensuite été répartis de manière aléatoire grâce au logiciel Excel 2008 et ses fonctions Alea et Rang pour former trois groupes expérimentaux (n=15/groupe) selon le système de mise en forme canalaire utilisé et un groupe témoin (n=7) :

- F6 SkyTaper : #25.06,
- HyFlex EDM OneFile : #25.08,
- One Curve : #25.06,
- Groupe Témoin : non instrumenté.

**Tableau 1 : Répartition des échantillons entre les groupes expérimentaux concernant l'angle et le rayon de courbure**

Système	Angle de courbure $\alpha$ (°)		Rayon de courbure R (mm)	
	Moyenne	Ecart-type	Moyenne	Ecart-type
F6 SkyTaper	27,27	5,12	7,06	2,09
HyFlex EDM	26,75	5,00	7,18	1,95
One Curve	28,52	6,79	7,43	1,95

Un pré-élargissement de l'ensemble des échantillons a été réalisé par une lime One G® (Micro-Mega) de diamètre 14/100<sup>e</sup> de mm et de conicité 3% selon les recommandations du fabricant [37]. Cette étape a permis de standardiser la morphologie des canaux entre les groupes expérimentaux.

La mise en forme a été réalisée par une enseignante qualifiée en dentisterie restauratrice et endodontie de la faculté de chirurgie dentaire de Lille, et indépendante de la collecte et de l'analyse des données. L'opérateur a préalablement subi une phase d'apprentissage à l'utilisation des instruments.

Chaque instrument a été utilisé selon les recommandations du fabricant et pour un unique canal. L'instrument a été amené à la longueur de travail en plusieurs vagues et à l'aide d'un moteur de rotation continue (Acteon) (300 rpm, 2,5 N.cm).

Le protocole d'irrigation était conventionnel et standardisé en éjectant 1 ml d'une solution d'hypochlorite de sodium (NaOCl) concentrée à 2,5% entre chaque passage d'instrument à l'aide d'une seringue munie d'une aiguille à éjection latérale de 27 gauges. L'irrigation finale a été réalisée avec 0,6 ml d'une solution d'acide éthylène diamine tétra-acétique (EDTA) liquide à 17% pendant une minute suivie d'un séchage du canal à l'aide de pointes de papier et d'un rinçage par 3 ml d'hypochlorite de sodium (Annexe 3).

## **2.2 Analyse d'image**

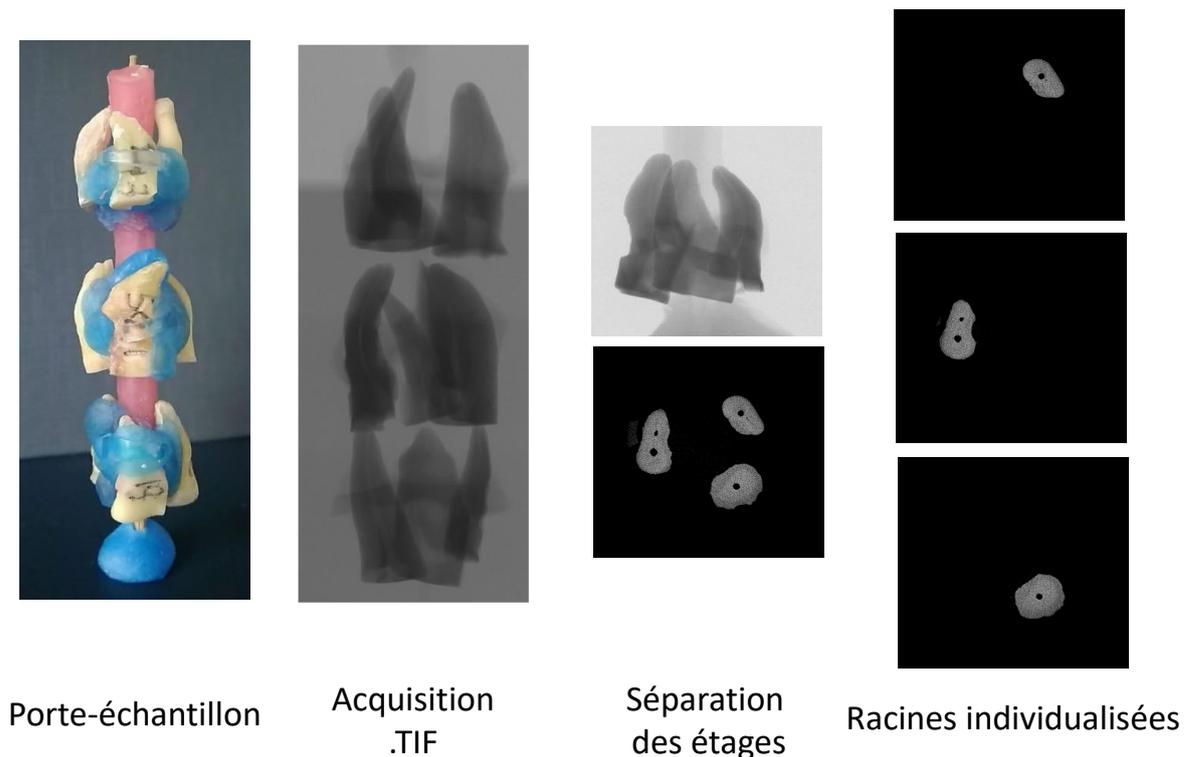
Tous les échantillons ont été scannés à l'aide d'un microtomographe (SkyScan 1172 ; Bruker), (95 kV, 100  $\mu$ A, résolution isotropique : 21,85  $\mu$ m, pas de rotation : 0,4° autour de l'axe vertical, 180°, filtre aluminium + cuivre) avant et après la préparation canalair pour obtenir les scans pré- et post-opératoires.

Un porte-échantillon de 8 cm de hauteur a été spécialement conçu pour scanner de manière simultanée 9 racines réparties en 3 étages de 3 racines chacun et ainsi optimiser le temps d'acquisition du microtomographe (figure 1).

Les données d'acquisitions obtenues au format .TIF ont ensuite été analysées au travers de 4 logiciels successifs :

Le logiciel NRecon (version 1.7.4.6, Skyscan, Bruker), (Beam hardening : 80%, Smoothing : 1, ring artefact correction 2, échelle de gris : -692 et 1818 Hounsfield) a permis d'isoler indépendamment les trois étages et de reconstruire les données d'acquisition sous forme de coupes transversales à l'axe longitudinal radiculaire. Les fichiers obtenus ont été enregistrés au format .BMP.

Le logiciel CTan Version1.20.2.0(64bit) (Skyscan, Bruker) a permis dans un second temps de définir une ROI (Region Of Interest) afin d'individualiser chaque racine grâce à la délimitation de ses extrémités. Les données des coupes transversales selon l'axe longitudinal radiculaire ont été enregistrées au format .BMP.



**Figure 1 :** *Acquisition par microtomographie des racines incluses dans l'étude : fixation sur un porte-échantillon, scan par microtomographie, reconstruction et individualisation des racines*

Les volumes des racines ont ensuite été reconstruits dans le logiciel Avizo (2019.4) afin d'obtenir des modèles virtuels tridimensionnels. Une superposition des modèles pré- et post-opératoire a été réalisée à l'aide de l'outil « Register Image » et les volumes de pulpe ont été segmentés des volumes du couple dentine-émail grâce à l'outil « baguette magique » du menu « segmentation editor ». Seules les données des volumes pulpaire pré- et post-opératoires ont été exportées au format .STL

Enfin, les volumes pulpaire superposés (registrés) ont été chargés dans le logiciel CATIA R (Version 5.20) afin d'effectuer les mesures de transport canalaire. Les fichiers ont été sauvegardés au format .CATPART.

### **2.3 Paramètres étudiés**

Le temps de préparation canalaire a été chronométré et correspond au temps de mise en forme, d'irrigation, de changement instrumental, de contrôle de la perméabilité canalaire et de séchage (annexe 3).

Le volume de dentine éliminée (figure 2) a été calculé à l'aide du logiciel Avizo (2019.4) selon la formule suivante :

$$\text{Volume de dentine éliminé} = \text{Volume pulpaire final} - \text{Volume pulpaire initial} \text{ (mm}^3\text{)}$$

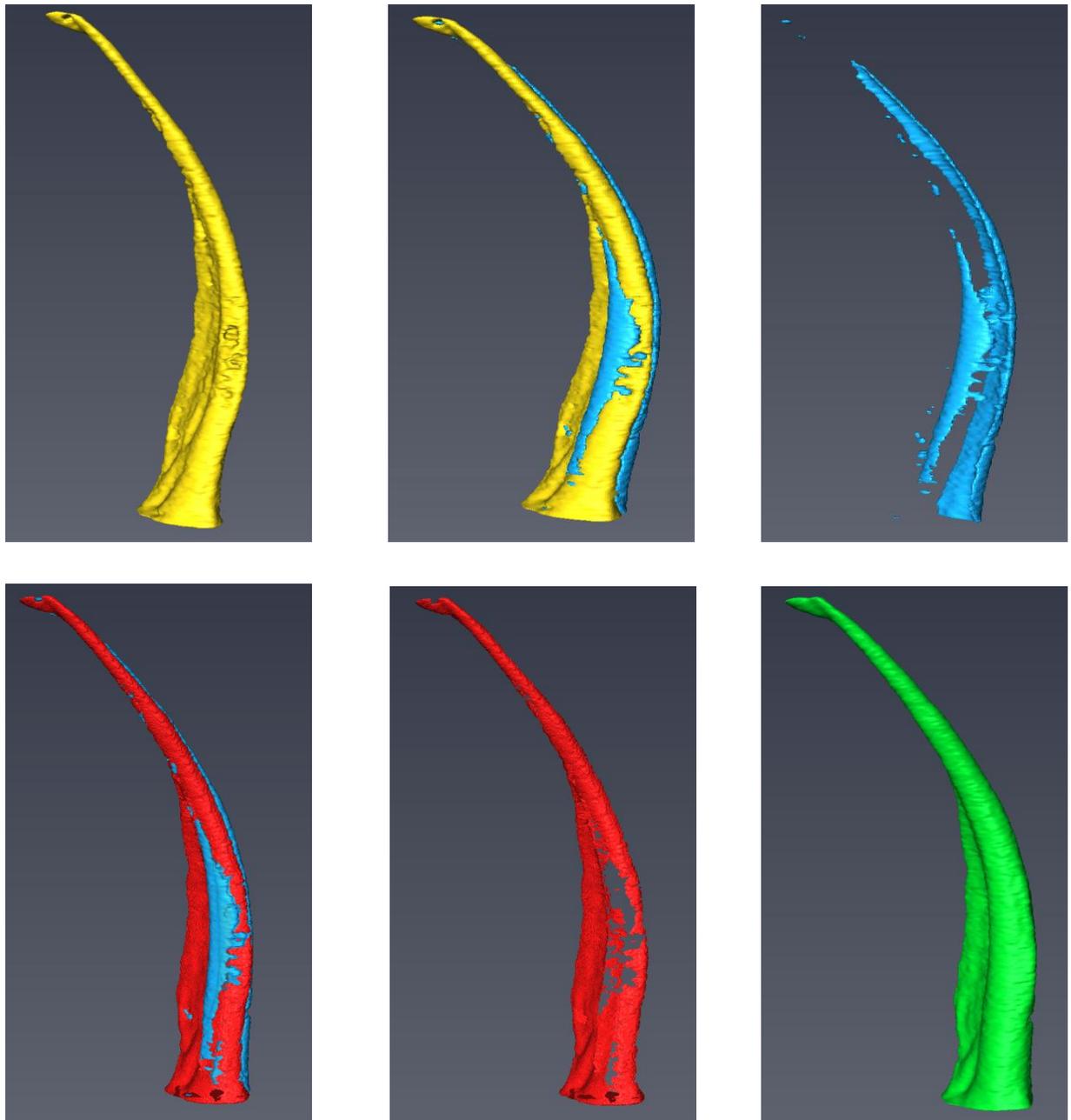
La vitesse de préparation canalaire correspond au volume de dentine éliminée rapporté au temps de préparation canalaire. Elle a été calculée selon la formule suivante :

$$\text{Vitesse de préparation canalaire} = \frac{\text{volume de dentine éliminée (mm}^3\text{)}}{\text{temps de préparation canalaire (min)}}$$

Le pourcentage de surfaces canalaire non instrumentées (figure 2) a été calculé sur Avizo (2019.4) selon la formule suivante :

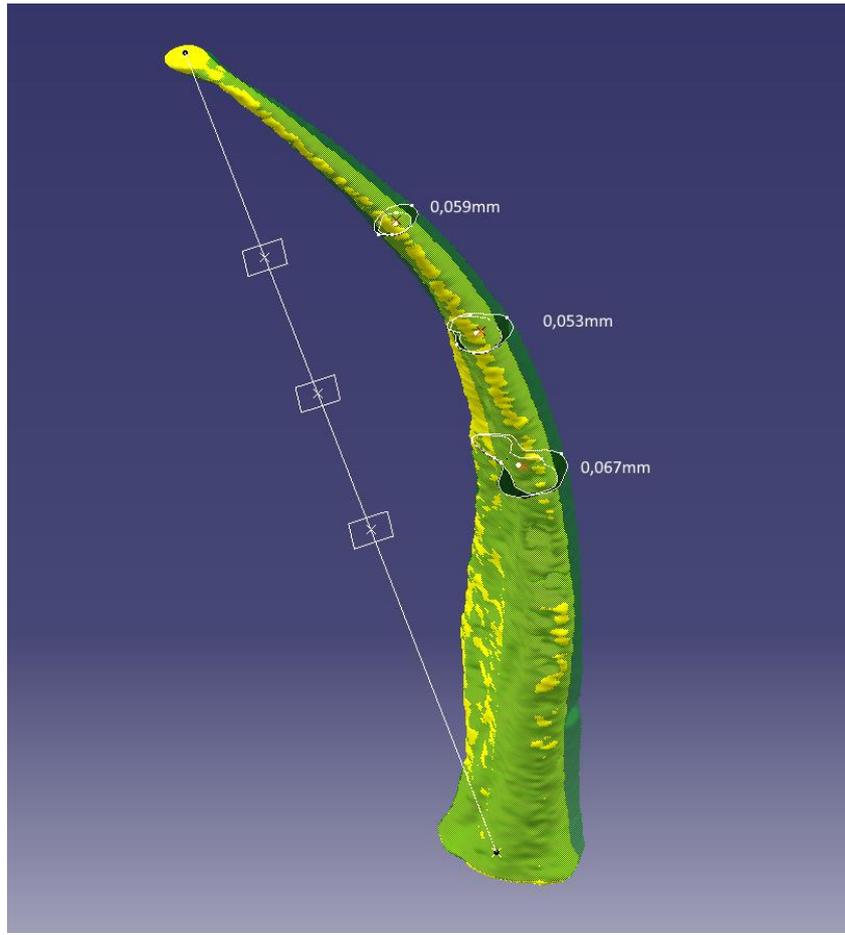
$$\frac{\text{Surface préopératoire} - (\text{surface préopératoire} \cap \text{surface dentine éliminée})}{\text{Surface préopératoire}} \times 100$$

Le transport canalaire (figure 3 et 4) a été mesuré à l'aide du logiciel CATIA R (Version 5.20). Il correspond à la distance séparant les centres de gravité pré- et post-opératoire du canal à 3, 5 et 7 mm du foramen apical.

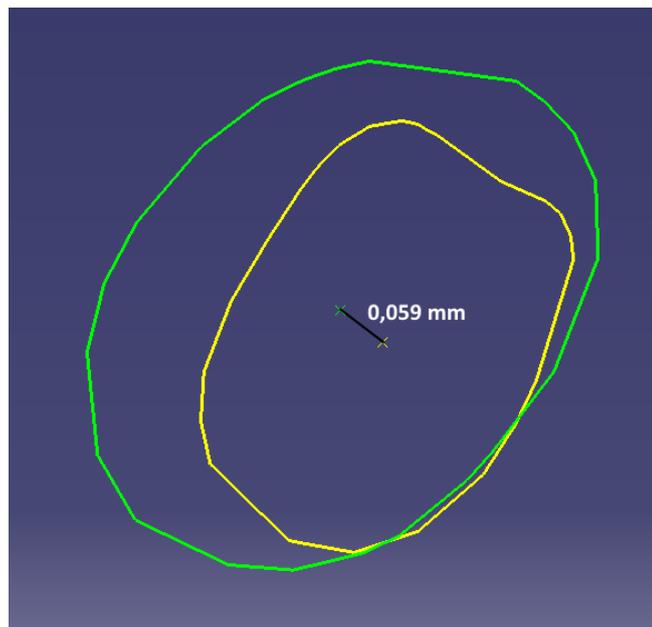


- Volume pulpaire pré-opératoire
- Volume de dentine éliminée
- Surfaces non instrumentées
- Volume pulpaire final

**Figure 2 :** *Volume pulpaire segmenté et visualisation des paramètres « volume de dentine éliminée » et « surfaces non instrumentées »*



**Figure 3 :** *Calcul du transport canalaire à 3, 5 et 7 mm du foramen apical.*



**Figure 4 :** *Déplacement du centre de gravité à 3 mm du foramen apical*

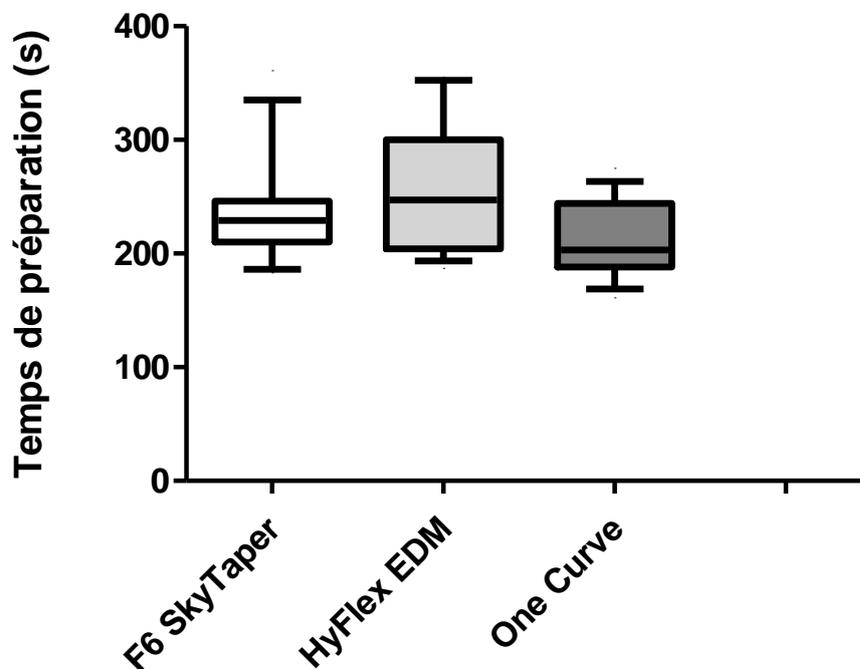
## **2.4 Analyse statistique**

La normalité de la distribution des données a été contrôlée par un test de Kolmogorov-Smirnov pour toutes les variables. Une différence statistiquement significative a été recherchée pour chaque paramètre entre les 3 systèmes étudiés et à l'aide du logiciel GraphPad Prism 5 (version 5.01) ( $\alpha=5\%$ ). Une analyse non paramétrique de Kruskal-Wallis suivie d'un post-test de comparaison multiple de Dunn a été réalisée pour les paramètres suivants : temps de préparation canalair, volume de dentine éliminée, pourcentage de surfaces canalaires non instrumentées et transport canalair. Une analyse paramétrique ANOVA suivie d'un post-test de Tukey a été réalisée pour le paramètre vitesse de préparation canalair.

### 3. Résultats

Les résultats sont présentés sous forme de « box-plot » pour chaque paramètre et un tableau récapitulatif permet de faciliter la compréhension. Aucune fracture instrumentale n'a été relevée au cours de la mise en forme canalaire.

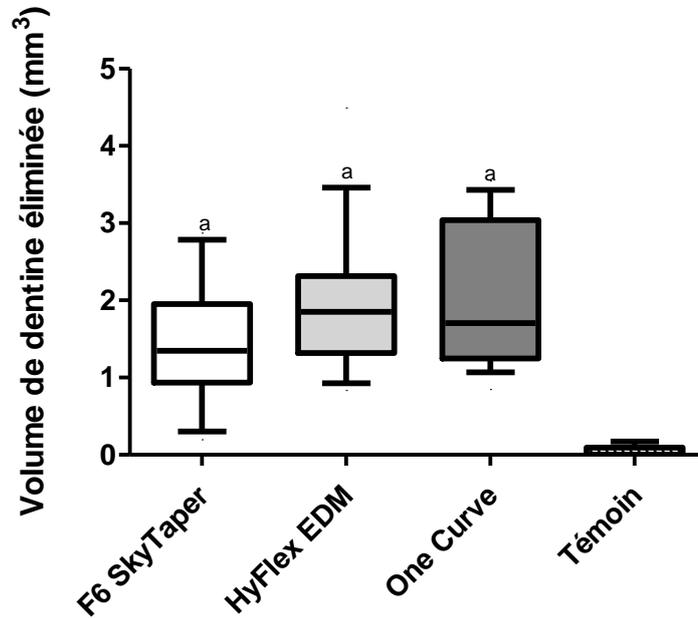
#### 3.1 Temps de préparation



**Figure 5 :** Temps de préparation canalaire des instruments étudiés (médiane, Q1-Q3, 10<sup>e</sup>- 90<sup>e</sup> percentile). (Kruskal-Wallis, post-test Dunn,  $p=0,0964$ ).

La préparation canalaire était plus rapide avec le système One Curve ( $214,1 \pm 34,4$  s), suivie du système F6 SkyTaper ( $236,4 \pm 47,06$ ) et de l'HyFlex EDM ( $257,4 \pm 57,75$  s), mais ces différences n'étaient pas significatives ( $p>0,05$ ).

### 3.2 Volume de dentine éliminée



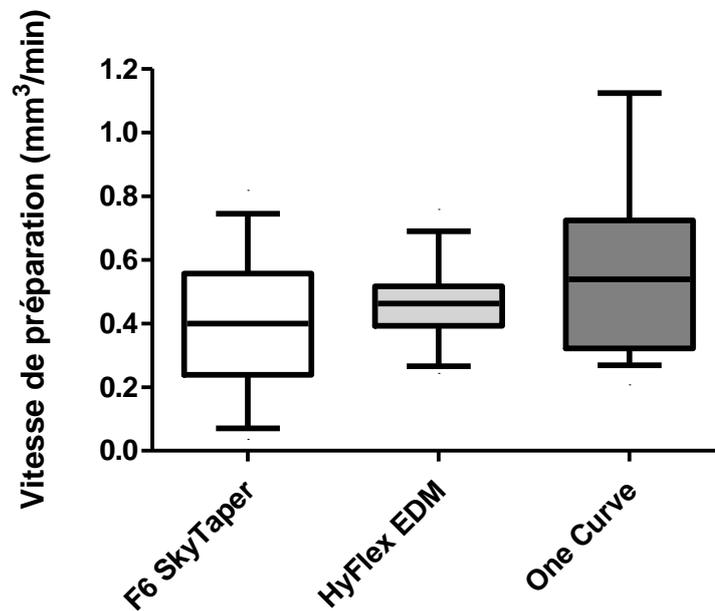
**Figure 6 :** Volume de dentine éliminée par les instruments étudiés (médiane, Q1-Q3, 10<sup>e</sup>-90<sup>e</sup> percentile). (Kruskal-Wallis, post-test Dunn,  $p=0,002$ ).

*a* : différence significative avec le groupe témoin ( $p<0,05$ )

Les trois systèmes étudiés ont éliminé un volume de dentine significativement supérieur à celui du groupe témoin ( $p<0,05$ ).

Le système HyFlex EDM a éliminé un volume de dentine plus important ( $1,987 \pm 0,893 \text{ mm}^3$ ) que le système One Curve ( $1,982 \pm 0,873 \text{ mm}^3$ ) ( $p>0,05$ ). Le système F6 SkyTaper a éliminé moins de dentine ( $1,492 \pm 0,822 \text{ mm}^3$ ) que les deux autres ( $p>0,05$ ) mais ces différences n'étaient pas significatives.

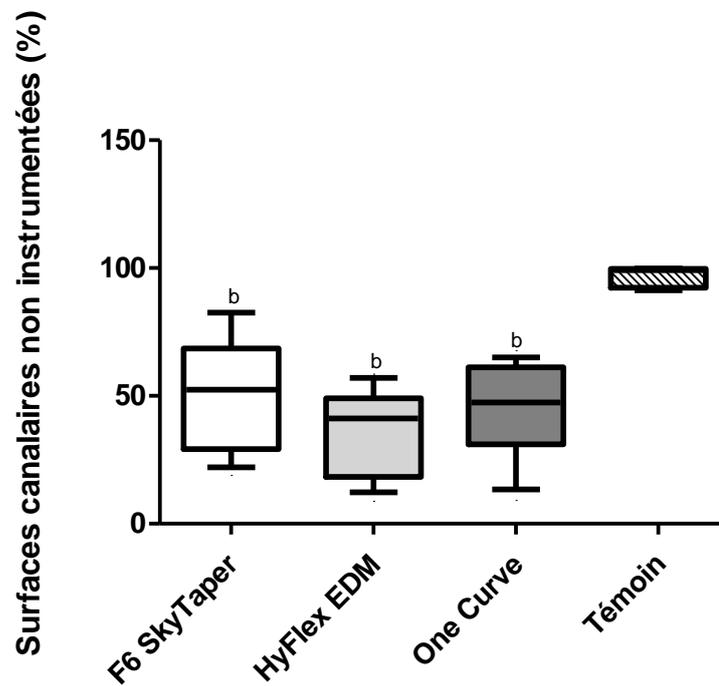
### 3.3 Vitesse de préparation



**Figure 7 :** Vitesse de préparation des trois systèmes étudiés (médiane, Q1-Q3, 10<sup>e</sup>-90<sup>e</sup> percentile). (ANOVA, post-test de Tukey,  $p=0,093$ ).

Le système F6 SkyTaper était plus lent ( $0,395 \pm 0,221$ ) que le système HyFlex EDM ( $0,453 \pm 0,136$ ) pour préparer le système canalaire ( $p>0,05$ ). Le système One Curve était le plus rapide ( $0,575 \pm 0,290$ ) mais ces différences n'étaient pas significatives ( $p>0,05$ ).

### 3.4 Surfaces canalaires non instrumentées



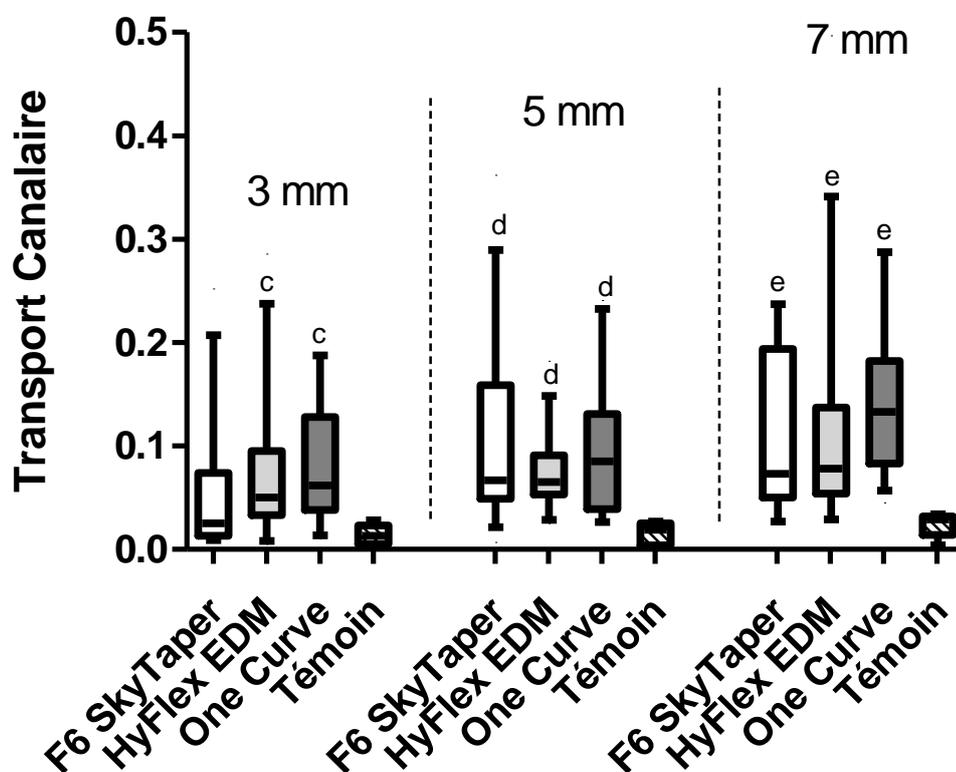
**Figure 8 :** Pourcentage de surfaces canalaires non instrumentées par système de mise en forme (médiane, Q1-Q3, 10<sup>e</sup>-90<sup>e</sup> percentile). (Kruskal-Wallis, post test de Dunn,  $p=0,0001$ ).

*b* : différence significative avec le groupe témoin ( $p<0,05$ )

Les surfaces canalaires non instrumentées était significativement plus importantes dans le groupe témoin comparé aux systèmes étudiés ( $p<0,05$ ).

La proportion de surfaces non instrumentées était plus importante pour le système F6 SkyTaper ( $50,19 \pm 21,92\%$ ) que pour le système One Curve ( $43,17 \pm 17,86\%$ ) ( $p>0,05$ ). Le système HyFlex EDM One file a présenté la proportion de parois non instrumentées la plus faible ( $36,16 \pm 16,38\%$ ) mais ces différences n'étaient pas significatives ( $p>0,05$ ).

### 3.5 Transport canalaire



**Figure 9 :** Transport canalaire réalisé par les instruments à 3, 5 et 7 mm du foramen apical (médiane, Q1-Q3, 10<sup>e</sup>–90<sup>e</sup> percentile). (Kruskal-Wallis, post-test Dunn).

c : différence significative avec le groupe témoin à 3 mm ( $p=0,0085$ )

d : différence significative avec le groupe témoin à 5 mm ( $p=0,0010$ )

e : différence significative avec le groupe témoin à 7 mm ( $p=0,0006$ )

Le transport canalaire était significativement plus élevé pour tous les groupes expérimentaux par rapport aux témoins à 3, 5 et 7 mm ( $p<0,05$ ), excepté pour le système F6 SkyTaper à 3 mm du foramen apical. De même, le transport canalaire a significativement augmenté pour l'ensemble des systèmes entre 3 mm ( $0,075 \pm 0,069$ ) et 7 mm ( $0,122 \pm 0,092$ ) du foramen apical ( $p=0,0046$ ).

A 3 mm du foramen apical : le transport canalaire était plus important pour le système One Curve ( $0,084 \pm 0,050$  mm) que pour le système HyFlex EDM ( $0,079 \pm 0,076$  mm)

et le F6 SkyTaper ( $0,062 \pm 0,072$  mm), mais ces différences n'étaient pas significatives ( $p > 0,05$ ).

A 5 mm du foramen apical : le transport canalaire était plus important pour le système F6 SkyTaper ( $0,110 \pm 0,096$ ) que le système One Curve ( $0,094 \pm 0,071$  mm) et le système HyFlex EDM ( $0,073 \pm 0,040$  mm), mais ces différences n'étaient pas significatives entre les instruments ( $p > 0,05$ ).

A 7 mm du foramen apical : Le système One Curve a présenté un transport plus important ( $0,143 \pm 0,077$  mm) que le système HyFlex EDM ( $0,115 \pm 0,118$  mm) et que le système F6 SkyTaper ( $0,110 \pm 0,078$  mm), mais ces différences n'étaient pas significatives ( $p > 0,05$ ).

**Tableau 2 : Récapitulatif des résultats pour chaque paramètre par système de mise en forme**

	Temps de préparation	Volume de dentine éliminée	Vitesse de préparation	Surfaces non instrumentées	Transport canalaire (mm)		
	(s)	(mm <sup>3</sup> )	(mm <sup>3</sup> /min)	(%)	3 mm	5 mm	7 mm
	Moyenne (écart-type)	Moyenne (Ecart-type)	Moyenne (Ecart-type)	Moyenne (Ecart-type)	Moyenne (Ecart-type)	Moyenne (Ecart-type)	Moyenne (Ecart-type)
F6 SkyTaper	236,400 (47,060)	1,492 (0,822) <sup>a</sup>	0,395 (0,221)	50,190 (21,920) <sup>b</sup>	0,062 (0,072)	0,110 (0,096) <sup>d</sup>	0,110 (0,078) <sup>e</sup>
HyFlex EDM	257,400 (57,750)	1,987 (0,893) <sup>a</sup>	0,453 (0,136)	36,160 (16,380) <sup>b</sup>	0,079 (0,076) <sup>c</sup>	0,073 (0,040) <sup>d</sup>	0,115 (0,118) <sup>e</sup>
One Curve	214,100 (34,400)	1,982 (0,873) <sup>a</sup>	0,575 (0,290)	43,170 (17,860) <sup>b</sup>	0,084 (0,050) <sup>c</sup>	0,094 (0,071) <sup>d</sup>	0,143 (0,077) <sup>e</sup>
Total (F6 SkyTaper, HyFlex EDM, One Curve)	na	na	na	na	0,075 (0,069) <sup>¶</sup>	0,092 (0,072)	0,123 (0,092) <sup>¶</sup>
Témoin	na	0,040 (0,069)	na	99,800 (3,739)	0,014 (0,010)	0,017 (0,009)	0,023 (0,011)
Valeur du <i>p</i>	0,096	0,002	0,093	< 0,001	0,009	0,001	< 0,001

La même lettre en exposant indique une différence significative avec le groupe témoin de la même colonne. Les groupes avec le symbole ¶ présentent une différence significative ( $p=0,0046$ ). na : non applicable

## 4. Discussion

L'objectif de cette étude était de comparer la capacité de mise en forme des mono-instruments F6 SkyTaper, HyFlex EDM OneFile et One Curve en s'appuyant sur les paramètres « temps de mise en forme », « volume de dentine éliminée », « vitesse de préparation canalaire », « surfaces canalaires non instrumentées » et « transport canalaire » à 3, 5 et 7 mm du foramen apical. La première hypothèse nulle a été acceptée et la seconde hypothèse nulle a été rejetée.

De nombreuses études comparatives d'instruments endodontiques sont réalisées sur des canaux simulés en résine [7, 10, 85]. Ces simulations peuvent être une alternative aux dents naturelles car elles présentent l'avantage d'une standardisation et d'une reproductibilité des échantillons concernant la longueur de travail, l'angle de courbure ou encore la conicité canalaire [38]. Cependant, certaines caractéristiques anatomiques ne peuvent pas être reproduites telles que les courbures tridimensionnelles ou encore la constriction apicale naturelle [61]. L'étude de Lim et Webber [38] souligne de plus que la résine est moins dure et moins compressible que la dentine radulaire, et que les forces nécessaires pour la mettre en forme sont environ deux fois plus faibles que celles requises pour de la dentine. En outre, la chaleur dégagée par les instruments de préparation canalaire peut ramollir la résine [34] et selon l'étude de Baumann et coll. [4], les instruments ont tendance à adhérer au plastique et à visser dans le canal, pouvant être à l'origine de fractures instrumentales. Dans cette étude, l'utilisation de dents naturelles a permis de se rapprocher au mieux de la pratique endodontique *in vivo* et d'évaluer la réelle efficacité des instruments de préparation canalaire.

Afin de réduire le biais lié à la variabilité anatomique naturelle et de se rapprocher des standards retrouvés dans la littérature, seule la racine mésio-vestibulaire des premières molaires maxillaires a été sélectionnée [2, 19, 80, 87] avec un rayon de courbure standardisé [30, 63, 86]. Un pré-élargissement a également été réalisé avant la mise en forme canalaire [14, 26, 42].

Tous les instruments ont été utilisés à 300 tr/mn avec un couple de 2,5 N.cm. Le système HyFlex EDM peut néanmoins être utilisé à 400 tr/mn selon les

recommandations du fabricant. Dans la littérature, les vitesses appliquées à cet instrument diffèrent en fonction des auteurs [17, 48, 56]. Cependant, afin de comparer les instruments entre eux et en limitant les biais de protocole, la vitesse de rotation, la dynamique instrumentale (progression corono-apicale avec appui pariétal dans l'axe de pénétration du canal), le diamètre de pointe et la longueur de travail ont été standardisés.

La microtomographie à rayon X constitue à l'heure actuelle la technique de pointe dans l'évaluation des capacités de mise en forme d'un instrument endodontique. Grâce à sa haute résolution, son caractère non destructif et non invasif, elle est une innovation pour l'imagerie tridimensionnelle et est largement utilisée dans les études de recherche [13, 38, 45].

Dans ce travail, un groupe témoin d'échantillons non instrumentés a été inclus. Malgré l'absence de préparation instrumentale, de faibles valeurs de surfaces canalaires instrumentées, de transport canalaire et de dentine éliminée ont été observées. Ceci montre que le protocole d'évaluation mis en œuvre ici n'est pas infaillible. Ces résultats peuvent s'expliquer par une accumulation de faibles biais informatiques intervenus lors des phases d'acquisition, de reconstruction, de définition de la région d'intérêt, de superposition, de segmentation ou encore lors de l'évaluation spécifique à chaque paramètre. Cependant, ces valeurs restent très faibles et prouvent la validité du protocole utilisé. De plus, les différences significatives observées entre les instruments et le groupe témoin montrent que chaque instrument a mis en forme le système canalaire en éliminant de la dentine sur les parois canalaires. Classiquement, les travaux publiés présentent rarement un groupe témoin [46, 79, 82, 87, 88, 90], ce qui ne permet pas de conclure que les différences observées entre les groupes sont réellement liées aux instruments et non pas au protocole expérimental.

#### *Temps de préparation canalaire*

Le temps de préparation canalaire était compris entre 236 et 258 secondes pour l'ensemble des systèmes étudiés. Ces valeurs sont plus élevées que celles qui sont classiquement décrites pour le F6 SkyTaper (entre 75 et 103 s) [9, 11, 15]. Ces durées plus courtes que les nôtres peuvent s'expliquer par l'absence d'un protocole d'irrigation

incluant un temps d'action de l'EDTA liquide à 17% en fin de préparation associé à une irrigation finale à l'hypochlorite de sodium [39], de même que l'absence d'un temps de séchage. De plus, deux des trois études ont été effectuées sur des dents en résine dans lesquelles l'irrigant était de l'éthanol [11] et une association d'eau distillée et de glycérine [15]. Or, ces irrigants peuvent avoir un impact sur le comportement instrumental avec la résine [11]. Aussi, la plus faible dureté de la résine par rapport à la dentine [38] peut expliquer une durée de préparation canalaire plus faible.

Comme dans notre étude, Pedulla et coll. ne mettent pas en évidence de différence significative entre les systèmes F6 SkyTaper et HyFlex EDM concernant le temps de préparation canalaire. Ils ont réalisé leur étude sur des incisives centrales mandibulaires mais ne mentionnent pas les durées de préparation obtenues ni leur définition du temps de préparation canalaire [47].

A notre connaissance, cette étude est la première à mesurer la durée de préparation canalaire effectuée par le One Curve, qui était le plus rapide.

#### *Volume de dentine éliminée et vitesse de préparation*

Le système HyFlex EDM a éliminé dans cette étude un volume de dentine plus important (1,987 mm<sup>3</sup>) que les deux autres systèmes mais sans différence significative. Silva et coll. mesurent pour le système HyFlex EDM un volume de dentine éliminée plus faible, d'environ 1,6 mm<sup>3</sup> sur des molaires maxillaires. Ces différences avec la présente étude peuvent s'expliquer par le fait que les auteurs ont inclus à la fois des canaux larges de racines palatines et des canaux plus fins de racines mésio-vestibulaires [43, 70]. De plus, l'étude de Rubio et coll. présente des résultats similaires aux nôtres : le système HyFlex EDM élimine plus de dentine que le système F6 SkyTaper dans le tiers apical, moyen et coronaire mais sans différences significatives [65].

Selon Espir et coll., le volume de dentine éliminée peut varier en fonction de l'anatomie des dents humaines [18], à savoir le type de dent, la présence de canaux ovales, circulaires ou encore en forme de « C ». De même, la longueur de travail de l'échantillon ou encore la technique de calcul sont des facteurs qui peuvent moduler les résultats obtenus.

Dans cette étude, la tendance à un volume plus important de dentine éliminé par le système HyFlex EDM peut s'expliquer par le design de l'instrument qui présente une conicité de 0,08, supérieure à celle du F6 SkyTaper et du One Curve (0,06). Ceci permet une préparation plus conique et donc une élimination plus importante de dentine le long des parois.

En considérant le volume de dentine éliminé rapporté au temps de préparation instrumentale, le système One Curve a montré une tendance à une vitesse de préparation canalair plus rapide que les autres. En effet, ce paramètre permet de mesurer la réelle efficacité de coupe des instruments [42]. L'efficacité de coupe supérieure du One Curve par rapport au HyFlex EDM pourrait s'expliquer par la section triangulaire et en double S avec des angles de coupe actifs et de larges cuvettes de dégagement qui facilitent l'évacuation des copeaux dentinaires [8, 62]. Par ailleurs, les instruments en NiTi peuvent se présenter sous trois phases structurales : austénite, R-Phase et martensite. Les instruments NiTi conventionnels, comme le F6 SkyTaper, sont composés majoritairement d'une phase austénitique [44, 64, 76, 89] tandis que les systèmes HyFlex EDM et One Curve eux, se composent majoritairement d'une phase martensitique [32, 77] permise par les traitements thermiques [91]. La prépondérance d'une phase martensitique améliore l'efficacité de coupe des instruments [14,42], ce qui pourrait expliquer la meilleure efficacité de coupe du One Curve par rapport au F6 SkyTaper.

### Surfaces canalaires non instrumentées

Plusieurs études s'accordent sur le fait que 10 à 50% des parois canalaires restent non préparées après instrumentation [73]. Pour Peters et coll. (2001) ou encore Pertot et Pommel, ce sont environ 35% des surfaces canalaires des molaires maxillaires qui ne sont pas concernées par l'instrumentation, indépendamment du système utilisé [54, 51]. En effet, les spécificités de l'anatomie canalair rendent inaccessibles à l'instrumentation de nombreux volumes comme les feuilletts, les isthmes, les deltas, ou encore les canaux accessoires [72]. Les résultats obtenus dans la présente étude sont donc en accord avec ceux de la littérature.

Par ailleurs, bien que les différences ne soient pas significatives entre les instruments, le système HyFlex EDM est celui qui a le plus instrumenté les surfaces

canalaires. Là encore, ceci peut s'expliquer par la conicité plus importante de cet instrument qui a permis d'avoir un contact plus important avec les parois dentinaires. En effet, l'étude de Perez et coll. montre qu'une augmentation de la conicité entraîne une diminution des surfaces canalaires non préparées [49]. Dans l'étude de Rubio et coll. [65], le système HyFlex EDM a laissé moins de surfaces canalaires non instrumentées que le système F6 SkyTaper mais sans différence significative. Leurs conclusions sont ainsi similaires aux nôtres mais les valeurs qu'ils obtiennent sont plus faibles (entre 0 et 20%) et peuvent s'expliquer par le fait qu'ils aient utilisé des dents monoradiculées avec plus de canaux circulaires que dans la présente étude.

### Transport canalaire

Le transport canalaire est un paramètre important dans l'évaluation de la préservation de l'anatomie canalaire initiale [27, 33] car il permet d'illustrer l'augmentation du risque de déviation de la trajectoire d'un instrument. La méthode d'évaluation du transport canalaire développée par Peters et coll. est largement utilisée [in 13]. Elle utilise la haute résolution de la microtomographie pour mesurer le déplacement du centre de gravité du canal qui a lieu lors de la mise en forme [20, 52-54], le plus souvent à 3, 5 et 7 mm du foramen apical [23, 36, 71, 84].

Dans ce travail, tous les instruments étudiés ont provoqué un transport canalaire significatif par rapport au témoin. Wu et coll. démontrent qu'un transport canalaire apical supérieur à 0,3 mm a un impact négatif sur le pronostic du traitement endodontique en favorisant la persistance des micro-organismes et des résidus nécrotiques [83, in 29 et 56]. De plus, selon Peters (2004), un transport canalaire n'excédant pas 0,15 mm correspond à un maintien acceptable de la trajectoire canalaire [55, in 16]. Le déplacement mesuré dans la présente étude pour les trois systèmes est inférieur à 0,15 mm ce qui leur permet de préserver l'anatomie canalaire initiale et les rend tous compatibles avec une utilisation clinique.

Les trois systèmes ont montré un transport canalaire croissant en s'éloignant de la limite apicale de préparation. Razcha et coll. observent des résultats similaires pour les systèmes One Curve et HyFlex EDM sans différence significative du transport canalaire à 3, 5 et 7 mm sur des racines mésiales de molaires mandibulaires [60].

Tufenkci et coll. ont des résultats similaires significatifs pour le système One Curve sur des modèles canalaires en résine [78]. Bürklein et coll. ont mesuré un transport canalaire de 0,06 mm situé à 0,5 mm du foramen apical sur des dents extraites ayant un angle de courbure compris entre 25° et 35° pour le système F6 SkyTaper, similaire au nôtre [9]. De nombreuses études montrent une augmentation du transport canalaire en s'éloignant du foramen apical mais aucune explication n'est généralement donnée [50, 53, 57, 79, 80]. Une hypothèse pourrait provenir du design instrumental : la section plus large de l'instrument en direction du mandrin par rapport à sa pointe pourrait lui conférer plus de rigidité. Ceci pourrait être à l'origine d'un transport canalaire plus important en cervical et expliquer un meilleur centrage de la pointe des instruments. Haupt et coll. justifient également cette augmentation du transport canalaire en direction coronaire par la conicité majorée des instruments qui ont tendance à redresser la trajectoire [28, *in* 66].

Comme mentionné précédemment, les systèmes HyFlex EDM et One Curve ont subi un traitement thermique et se trouvent dans un état de phase martensitique qui leur confère plus de flexibilité, de ductilité et des propriétés de mémoire de forme que les instruments non traités [44, 89]. Ils peuvent donc plus facilement respecter la trajectoire canalaire que les instruments NiTi conventionnels principalement en phase austénitique comme le F6 SkyTaper [64, 76]. Cependant, aucune différence significative dans le transport canalaire n'a été constatée ici tout comme dans de nombreux travaux similaires [21, 28, 35, 81, 91].

Les conclusions de ce travail doivent être nuancées en raison du petit nombre d'échantillons inclus par groupe. Cependant, ce nombre d'échantillon (n=15/groupe) correspond à celui classiquement retrouvé dans la littérature pour ce type d'étude [1, 3, 46]. Toutefois, des travaux avec un échantillonnage plus important sont nécessaires pour confirmer ces résultats.

## **5. Conclusion**

Ce travail avait pour objectif d'évaluer la capacité de mise en forme des instruments One Curve, F6 SkyTaper et HyFlex EDM One File dans des canaux courbes de dents humaines. Dans les limites de cette étude, le transport canalaire a diminué en direction de la limite apicale de préparation et tous les instruments ont mis en forme le système canalaire selon les recommandations de sécurité actuelles en préservant la trajectoire canalaire apicale. Aucune différence entre les instruments étudiés n'a été observée concernant le temps de préparation canalaire, le volume de dentine éliminée, la vitesse de préparation canalaire, les surfaces non instrumentées et le transport canalaire.

## Références bibliographiques

1. Ahmetoglu F, Keles A, Simsek N, Ocak MS, Yologlu S. Comparative evaluation of root canal preparations of maxillary first molars with self-adjusting file, reciproc single file, and revo-s rotary file: A micro-computed tomography study. *Scanning*. 2015;37(3):218–25.
2. Alovisi M, Cemenasco A, Mancini L, Paolino D, Scotti N, Bianchi C, et al. Micro-CT evaluation of several glide path techniques and ProTaper Next shaping outcomes in maxillary first molar curved canals. *Int Endod J*. 2017;50(4):387–97.
3. Ba-Hattab R, Pröhl AK, Lang H, Pahncke D. Comparison of the shaping ability of GT® Series X, Twisted Files and AlphaKite rotary nickel-titanium systems in simulated canals. *BMC Oral Health*. 2013;13(1):2–7.
4. Baumann MA, Roth A. Effect of experience on quality of canal preparation with rotary nickel-titanium files. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod*. 1999;88(6):714–8.
5. Bergmans L, Van Cleynenbreugel J, Wevers M, Lambrechts P. Mechanical root canal preparation with NiTi rotary instruments: Rationale, performance and safety. Status Report for the American Journal of Dentistry. *Am J Dent*. 2001;14(5):324–33.
6. Blake Nielsen R, Alyassin A, Peters D, Carnes D, Lancaster J. Microcomputed tomography: An advanced system for detailed endodontic research. *J Endod*. 1995;21(11):561–8.
7. Bonaccorso A, Cantatore G, Condorelli G, Schäfer E, Tripi T. Shaping Ability of Four Nickel-Titanium Rotary Instruments in Simulated S-Shaped Canals. *J Endod*. 2009;35(6):883–6.
8. Bürklein S, Hinschitza K, Dammaschke T, Schäfer E. Shaping ability and cleaning effectiveness of two single-file systems in severely curved root canals of extracted teeth: Reciproc and WaveOne versus Mtwo and ProTaper. *Int Endod J*. 2012;45(5):449–61.
9. Bürklein S, Jäger PG, Schäfer E. Apical transportation and canal straightening with different continuously tapered rotary file systems in severely curved root canals: F6 SkyTaper and OneShape versus Mtwo. *Int Endod J*. 2017;50(10):983–90.

10. Burroughs J, Bergeron B, Roberts M, Hagan J, Himel V. Shaping ability of three nickel-titanium endodontic file systems in simulated s-shaped root canals. *J Endod*. 2012;38(12):1618–21.
11. Christofzik D, Bartols A, Faheem MK, Schroeter D, Groessner-Schreiber B, Doerfer CE. Shaping ability of four root canal instrumentation systems in simulated 3D-printed root canal models. *PLoS One*. 2018;13(8):1–14.
12. Dagna A, Gastaldo G, Beltrami R, Chiesa M, Poggio C. F360 and F6 Skytaper: SEM evaluation of cleaning efficiency. *Ann Stomatol (Roma)*. 2015;VI (3-4):69–74.
13. de Sousa-Neto MD, Silva-Sousa YC, Mazzi-Chaves JF, Carvalho KKT, Barbosa AFS, Versiani MA, et al. Root canal preparation using micro-computed tomography analysis: A literature review. *Braz Oral Res*. 2018;32:20–43.
14. Deari S, Zehnder M, Al-Jadaa A. Effect of dentine cutting efficiency on the lateral force created by torque-controlled rotary instruments. *Int Endod J*. 2020;53(8):1153–61.
15. Donnermeyer D, Viedenz A, Schäfer E, Bürklein S. Impact of new cross-sectional designs on the shaping ability of rotary NiTi instruments in S-shaped canals. *Odontology*. 2020;108(2):174–9.
16. Duque JA, Vivian RR, Duarte MAH, Alcalde MP, Cruz VM, Borges MMB, et al. Effect of larger apical size on the quality of preparation in curved canals using reciprocating instruments with different heat thermal treatments. *Int Endod J*. 2019;52(11):1652–9.
17. Elashiry MM, Saber SE, Elashry SH. Comparison of shaping ability of different single-file systems using microcomputed tomography. *Eur J Dent*. 2020;14(1):70–6.
18. Espir CG, Nascimento-Mendes CA, Guerreiro-Tanomaru JM, Cavenago BC, Hungaro Duarte MA, Tanomaru-Filho M. Shaping ability of rotary or reciprocating systems for oval root canal preparation: a micro-computed tomography study. *Clin Oral Investig*. 2018;22(9):3189–94.
19. Fabra-Campos H, Rodríguez-Vallejo J. Digitization, analysis and processing of dental images during root canal preparation with Quantec Series 2000 instruments. *Int Endod J*. 2001;34(1):29–39.

20. Marceliano-Alves MFV, Sousa-Neto MD, Fidel SR, Steier L, Robinson JP, Pécora JD, et al. Shaping ability of single-file reciprocating and heat-treated multife rotary systems: A micro-CT study. *Int Endod J*. 2015;48(12):1129–36.
21. Filizola de Oliveira DJ, Leoni GB, da Silva Goulart R, Sousa-Neto MD de, Silva Sousa YTC, Silva RG. Changes in geometry and transportation of root canals with severe curvature prepared by different heat-treated nickel-titanium instruments: a micro-computed tomographic study. *J Endod*. 2019;45(6):768–73.
22. Gambill J, Alder M, Del Rio C. Comparison of nickel-titanium and stainless steel hand-file instrumentation using computed tomography. *J Endod*. 1996;22(7):369–75.
23. González-Chapela J, Castelo-Baz P, Varela-Patiño P, Martín-Biedma B, Ruíz-Piñón M. Alternating versus continuous rotation: root canal transportation and centering ratio with the ProTaper Next. *J Conserv Dent*. 2017;20(4):255–9.
24. Gündoğar M, Özyürek T. Cyclic Fatigue Resistance of OneShape, HyFlex EDM, WaveOne Gold, and Reciproc Blue nickel-titanium instruments. *J Endod*. 2017;43(7):1192–6.
25. Hartmann R, Fensterseifer M, Peters O, de Figueiredo J, Gomes M, Rossi-Fedele G. Methods for measurement of root canal curvature: a systematic and critical review. *Int Endod J*. 2019;52(2):169–80.
26. Hartmann RC, Peters OA, de Figueiredo JAP, Rossi-Fedele G. Association of manual or engine-driven glide path preparation with canal centring and apical transportation: a systematic review. *Int Endod J*. 2018;51(11):1239–52.
27. Hasheminia SM, Farhad A, Sheikhi M, Soltani P, Hendi SS, Ahmadi M. Cone-beam computed tomographic analysis of canal transportation and centering ability of single-file systems. *J Endod*. 2018;44(12):1788–91.
28. Haupt F, Pult JRW, Hülsmann M. Micro-computed Tomographic Evaluation of the shaping ability of 3 reciprocating single-file nickel-titanium systems on single- and double-curved root canals. *J Endod*. 2020;46(8):1130–5.
29. Huang Z, Quan J, Liu J, Zhang W, Zhang X, Hu X. A microcomputed tomography evaluation of the shaping ability of three thermally-treated nickel-titanium rotary file systems in curved canals. *J Int Med Res*. 2019;47(1):325–34.
30. Hülsmann M, Herbst U, Schäfers F. Comparative study of root-canal preparation using Lightspeed and Quantec SC rotary NiTi instruments. *Int Endod J*. 2003;36(11):748–56.

31. Hülsmann M, Peters OA, Dummer P. Mechanical preparation of root canals: shaping goals, techniques and means. *J Endod.* 2009;9(5):543–7.
32. Iacono F, Pirani C, Generali L, Bolelli G, Sassatelli P, Lusvardi L, et al. Structural analysis of HyFlex EDM instruments. *Int Endod J.* 2017;50(3):303–13.
33. Karabucak B, Gatan AJ, Hsiao C, Iqbal MK. A Comparison of apical transportation and length control between EndoSequence and guidance rotary instruments. *J Endod.* 2010;36(1):123–5.
34. Kum KY, Spängberg L, Cha BY, Il-Young J, Seung-Jong L, Chan-Young L. Shaping ability of three profile rotary instrumentation techniques in simulated resin root canals. *J Endod.* 2000;26(12):719–23.
35. Kumar BS, Pattanshetty S, Prasad M, Soni S, Pattanshetty KS, Prasad S. An in-vitro evaluation of canal transportation and centering ability of two rotary nickel titanium systems (Twisted Files and Hyflex files) with conventional stainless steel hand K-flexofiles by using spiral computed tomography. *J Int oral Heal JIOH.* 2013 Oct;5(5):108–15.
36. Kyaw Moe MM, Ha JH, Jin MU, Kim YK, Kim SK. Root canal shaping effect of instruments with offset mass of rotation in the mandibular first molar: a micro-computed tomographic study. *J Endod.* 2018;44(5):822–7.
37. Lee J, Kwak S, Ha J, Abu-Tahun I, Kim H. Mechanical properties of various glide path preparation nickel-titanium rotary instruments. *J Endod.* 2019;45(2):199–204.
38. Lim K, Webber J. The validity of simulated root canals for the investigation of the prepared root canal shape. *Int Endod J.* 1985;18(4):240–6.
39. Machtou P. Irrigation et désinfection en endodontie. *JPIO Endod.* 2012;219–42.
40. Marciano M, Duarte M, Ordinola-Zapata R, Del A, Del Carpio-Perochena A, Cavenago B, et al. Applications of micro-computed tomography in endodontic research. *Current Microscopy Contributions to Advances in Science and Technology* (A. Méndez-Vilas, Ed.). 2012;782–788.
41. MC Mahon T. Instrument unique et traitement thermique, le couple idéal ? *Clinic n°364.* Editions CdP. 2018;(39):17–22.
42. Morgental RD, Vier-Pelisser FV, Kopper PMP, De Figueiredo JAP, Peters OA. Cutting efficiency of conventional and martensitic nickel-titanium instruments for coronal flaring. *J Endod.* 2013;39(12):1634–8.
43. Nelson SJ, Ash M. *Wheeler's Dental anatomy, physiology, and occlusion.* 9th ed. St. Louis: Saunders; 2012.

44. Ounsi HF, Nassif W, Grandini S, Salameh Z, Neelakantan P, Anil S. Evolution of nickel-titanium alloys in endodontics. *J Contemp Dent Pract*. 2017;18(11):1090–6.
45. Park J, Lee J, Ha B, Choi J, Perinpanayagam H. Three-dimensional analysis of maxillary first molar mesiobuccal root canal configuration and curvature using micro-computed tomography. *Oral Surgery, Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endodontology*. 2009;108(3):437–42.
46. Pasqualini D, Alovisi M, Cemenasco A, Mancini L, Paolino DS, Bianchi CC, et al. Micro-computed tomography evaluation of ProTaper next and BioRace shaping outcomes in maxillary first molar curved canals. *J Endod*. 2015;41(10):1706–10.
47. Pedullà E, Genovesi F, Rapisarda S, La Rosa GRM, Grande NM, Plotino G, et al. Effects of 6 single-file systems on dentinal crack formation. *J Endod*. 2017;43(3):456–61.
48. Pedullà E, Lo Savio F, Boninelli S, Plotino G, Grande NM, La Rosa G, et al. Torsional and cyclic fatigue resistance of a new nickel-titanium instrument manufactured by electrical discharge machining. *J Endod*. 2016;42(1):156–9.
49. Pérez AR, Alves FRF, Marceliano-Alves MF, Provenzano JC, Gonçalves LS, Neves AA, et al. Effects of increased apical enlargement on the amount of unprepared areas and coronal dentine removal: a micro-computed tomography study. *Int Endod J*. 2018 Jun;51(6):684–90.
50. Perez 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(2):271–6.
51. Pertot W, Pommel L. Mise en forme et nettoyage du système canalaire. *JPIO Endod*. 2012;187–218.
52. Peters O, Laib A, Rügsegger P, Barbakow F. Three-dimensional analysis of root canal geometry by high-resolution computed tomography. *J Dent Res*. 2000;79(6):1405–9.
53. Peters OA, Arias A, Paqué F. A Micro-computed tomographic assessment of root canal preparation with a novel instrument, TRUShape, in mesial roots of mandibular molars. *J Endod*. 2015;41(9):1545–50.

54. Peters OA, Schönenberger K, Laib A. Effects of four Ni-Ti preparation techniques on root canal geometry assessed by micro computed tomography. *Int Endod J*. 2001;34(3):221–30.
55. Peters OA. Current challenges and concepts in the preparation of root canal systems: A review. *J Endod*. 2004;30(8):559–67.
56. Pinheiro SR, Alcalde MP, Vivacqua-Gomes N, Bramante CM, Vivian RR, Duarte MAH, et al. Evaluation of apical transportation and centring ability of five thermally treated NiTi rotary systems. *Int Endod J*. 2018;51(6):705–13.
57. Poly A, AlMalki F, Marques F, Karabucak B. Canal transportation and centering ratio after preparation in severely curved canals: analysis by micro-computed tomography and double-digital radiography. *Clin Oral Investig*. 2019;23(12):4255–62.
58. Pruett J, Clement D, Carnes D. Cyclic fatigue testing of nickel-titanium endodontic instruments. *J Endod*. 1997;23(2).
59. Rapport de la HAS sur le traitement endodontique. HAS. 2008;1–66.
60. Razcha C, Zacharopoulos A, Anestis D, Mikrogeorgis G, Zacharakis G, Lyroudia K. Micro-computed tomographic evaluation of canal transportation and centering ability of 4 heat-treated nickel-titanium systems. *J Endod*. 2020;46(5):675–81.
61. Robberecht L, Chai F, Dehurtevent M, Marchandise P, Bécavin T, Hornez JC, et al. A novel anatomical ceramic root canal simulator for endodontic training. *Eur J Dent Educ*. 2017;21(4):e1–6.
62. Robberecht L, Dehurtevent M, Lemaitre G, Béhal H, Hornez JC, Claisse-Crinquette A. Influence of root canal curvature on wall cleanliness in the apical third during canal preparation. *Eur Endod J*. 2017;2(1):8–13.
63. Rödiger T, Hülsmann M, Kahlmeier C. Comparison of root canal preparation with two rotary NiTi instruments: ProFile .04 and GT Rotary. *Int Endod J*. 2007;40(7):553–62.
64. Rubio J, Zarzosa JI, Pallarés A. A comparative study of cyclic fatigue of 10 different types of endodontic instruments: An in vitro study. *Acta Stomatol Croat*. 2019;53(1):28–36.
65. Rubio J, Zarzosa JI, Pallarés A. Comparison of shaping ability of 10 rotary and reciprocating systems: an in vitro study with autocad. *Acta Stomatol Croat*. 2017 Sep;51(3):207–16.

66. Saleh AM, Gilani PV, Tavanafar S, Schäfer E. Shaping ability of 4 different single-file systems in simulated S-shaped canals. *J Endod.* 2015;41(4):548–52.
67. Schilder H. Cleaning and shaping the root canal. *Dental Clinics of North America.* 1974. Vol. 18, p. 269–96.
68. Schilder H, Hargreaves K. Filling root canals in three dimensions. *J Endod.* 2006;32(4):281–90.
69. Schneider S. A comparison of canal preparations in straight and curved root canals. *Oral Surgery, Oral Med Oral Pathol.* 1971;32(2):271–5.
70. Silva EJNL, Martins JNR, Lima CO, Vieira VTL, Braz Fernandes FM, De-Deus G, et al. Mechanical tests, metallurgical characterization, and shaping ability of nickel-titanium rotary instruments: a multimethod research. *J Endod.* 2020;46(10):1485–94.
71. Silva EJNL, Pacheco PT, Pires F, Belladonna FG, De-Deus G. Microcomputed tomographic evaluation of canal transportation and centring ability of ProTaper Next and Twisted File Adaptive systems. *Int Endod J.* 2017;50(7):694–9.
72. Siqueira JF. Histological evaluation of the effectiveness of five instrumentation techniques for cleaning the apical third of root canals. *J Endod.* 1997;23(8):499–502.
73. 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;32:1–19.
74. Staffoli S, Grande N, Plotino G, Özyürek T, Gündoğar M, Fortunato L, et al. Influence of environmental temperature, heat-treatment and design on the cyclic fatigue resistance of three generations of a single-file nickel–titanium rotary instrument. *Odontology.* 2019;107(3):301–7.
75. Swain M, Xue J. State of the art of micro-CT applications in dental research. *Int J Oral Sci.* 2009;1(4):177–88.
76. Thompson SA. An overview of NiTi alloys used in dentistry. *Int Endod J.* 2000;33(4):297–310.
77. Topçuoğlu Hs, Topçuoğlu G, Kafdağ Ö, Balkaya H. Effect of two different temperatures on resistance to cyclic fatigue of one Curve, EdgeFile, HyFlex CM and ProTaper next files. *Aust Endod J.* 2019;(4):1–5.
78. Tufenkci P, Orhan K, Celikten B, Bilecenoglu B, Gur G, Sevimay S. Micro-computed tomographic assessment of the shaping ability of the One Curve, One

- Shape, and ProTaper Next nickel-titanium rotary systems. *Restor Dent Endod.* 2020;45(3):1–11.
79. Vallaeys K, Chevalier V, Arbab-Chirani R. Comparative analysis of canal transportation and centring ability of three Ni–Ti rotary endodontic systems: Protaper®, MTwo® and Revo-S™, assessed by micro-computed tomography. *Odontology.* 2016;104(1):83–8.
  80. van der Vyver P, Paleker F, Vorster M, de Wet F. root canal shaping using nickel titanium, m-wire, and gold wire: a micro-computed tomographic comparative study of One Shape, ProTaper Next, and WaveOne Gold instruments in maxillary first molars. *J Endod.* 2019;45(1):62–7.
  81. Venino PM, Citterio CL, Pellegatta A, Ciccarelli M, Maddalone M. A micro-computed tomography evaluation of the shaping ability of two nickel-titanium instruments, HyFlex EDM and ProTaper Next. *J Endod.* 2017;43(4):628–32.
  82. Versiani MA, Carvalho KKT, Mazzi-Chaves JF, Sousa-Neto MD. Micro-computed tomographic evaluation of the shaping ability of XP-endo Shaper, iRaCe, and EdgeFile systems in long oval-shaped canals. *J Endod.* 2018;44(3):489–95.
  83. Wu MK, Fan B, Wesselink PR. Leakage along apical root fillings in curved root canals. Part I: effects of apical transportation on seal of root fillings. *J Endod.* 2000;26(4):210–6.
  84. Yildiz ED, Arslan H, Sumbullu M, Bayrakdar IS, Sumbullu MA, Karatas E. Effect of instrument speed when used in reciprocating motion on root canal transportation and centering ability. *J Conserv Dent.* 2017;20(4):234–6.
  85. Yoshimine Y, Ono M, Akamine A. The shaping effects of three nickel-titanium rotary instruments in simulated S-shaped canals. *J Endod.* 2005;31(5):373–5.
  86. You SY, Kim HC, Bae KS, Baek SH, Kum KY, Lee W. Shaping ability of reciprocating motion in curved root canals: a comparative study with micro-computed tomography. *J Endod.* 2011;37(9):1296–300.
  87. Zanesco C, Só MVR, Schmidt S, Fontanella VRC, Grazziotin-Soares R, Barletta FB. Apical transportation, centering ratio, and volume increase after manual, rotary, and reciprocating instrumentation in curved root canals: analysis by micro-computed tomographic and digital subtraction radiography. *J Endod.* 2017;43(3):486–90.

88. Zhao D, Shen Y, Peng B, Haapasalo M. Root canal preparation of mandibular molars with 3 nickel-titanium rotary instruments: a micro-computed tomographic study. *J Endod.* 2014;40(11):1860–4.
89. Zhou H, Peng B, Zheng Y-F. An overview of the mechanical properties of nickel-titanium endodontic instruments. *Endod Top.* 2013;29(1):42–54.
90. Zuolo ML, Zaia AA, Belladonna FG, Silva EJNL, Souza EM, Versiani MA, et al. Micro-CT assessment of the shaping ability of four root canal instrumentation systems in oval-shaped canals. *Int Endod J.* 2018;51(5):564–71.
91. Zupanc J, Vahdat-Pajouh N, Schäfer E. New thermomechanically treated NiTi alloys – a review. *Int Endod J.* 2018;51(10):1088–103.

## Table des illustrations

### Figures

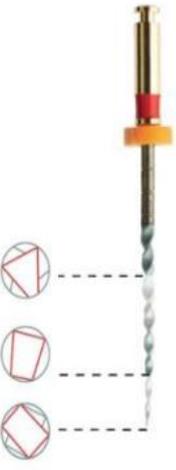
<b>Figure 1</b> : Acquisition par micro-tomographie des racines incluses dans l'étude : fixation sur un porte-échantillon, scan par micro-tomographie, reconstruction et individualisation des racines.....	23
<b>Figure 2</b> : Volume pulpaire segmenté et visualisation des paramètres « volume de dentine éliminée » et « surfaces non instrumentées » .....	25
<b>Figure 3</b> : Calcul du transport canalaire à 3, 5 et 7 mm du foramen apical.....	26
<b>Figure 4</b> : Déplacement du centre de gravité à 3 mm du foramen apical .....	26
<b>Figure 5</b> : Temps de préparation canalaire des instruments étudiés (médiane, Q1-Q3, 10 <sup>e</sup> - 90 <sup>e</sup> percentile). (Kruskal-Wallis, post-test Dunn, p=0,0964).....	28
<b>Figure 6</b> : Volume de dentine éliminée par les instruments étudiés (médiane, Q1-Q3, 10 <sup>e</sup> -90 <sup>e</sup> percentile). (Kruskal-Wallis, post-test Dunn, p=0,002). .....	29
<b>Figure 7</b> : Vitesse de préparation des trois systèmes étudiés (médiane, Q1-Q3, 10 <sup>e</sup> - 90 <sup>e</sup> percentile). (ANOVA, post-test de Tukey, p=0,093).....	30
<b>Figure 8</b> : Pourcentage de surfaces canalaires non instrumentées par système de mise en forme (médiane, Q1-Q3, 10 <sup>e</sup> -90 <sup>e</sup> percentile). (Kruskal-Wallis, post test de Dunn, p=0,0001).....	31
<b>Figure 9</b> : Transport canalaire réalisé par les instruments à 3, 5 et 7 mm du foramen apical (médiane, Q1-Q3, 10 <sup>e</sup> -90 <sup>e</sup> percentile). (Kruskal-Wallis, post-test Dunn).....	32

### Tableaux

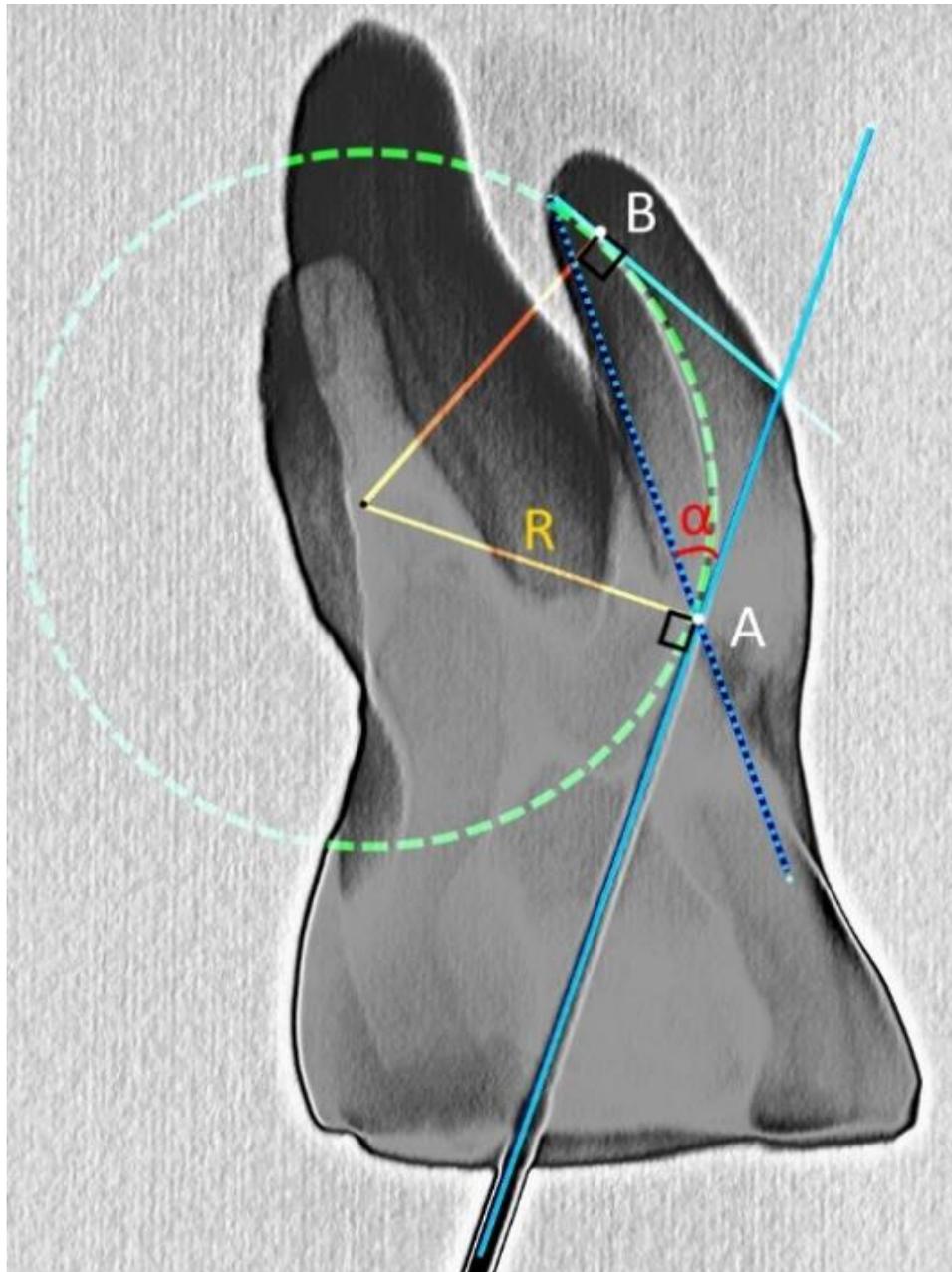
<b>Tableau 1</b> : Répartition des échantillons entre les groupes expérimentaux concernant l'angle et le rayon de courbure .....	22
<b>Tableau 2</b> : Récapitulatif des résultats pour chaque paramètre par système de mise en forme .....	34

## Annexes

### Annexe 1 : Design des instruments étudiés

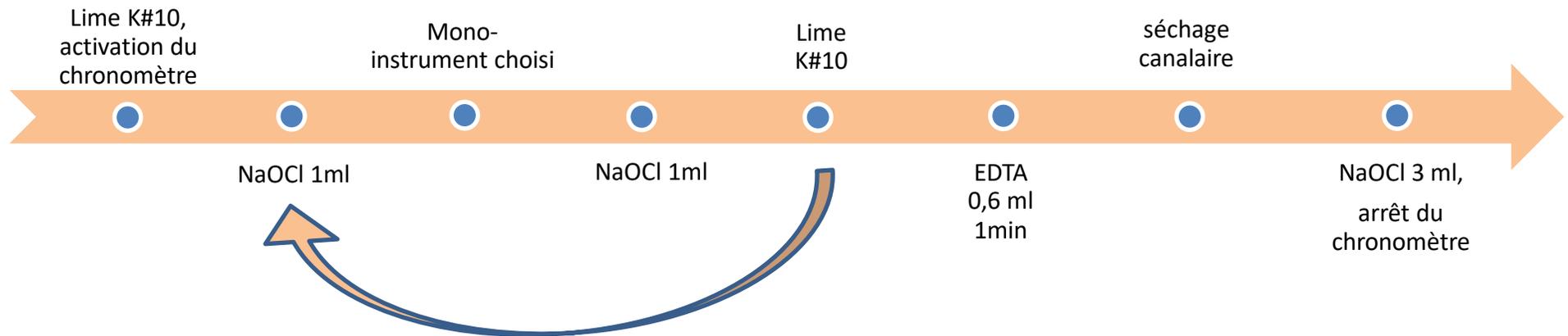
F6 Skytaper®, #25/.06	HyFlex® EDM OneFile, #25/.08	One Curve®, #25/.06
 <ul style="list-style-type: none"> <li>- Conicité constante 6%,</li> <li>- Absence de traitement thermique</li> </ul>	 <ul style="list-style-type: none"> <li>- Conicité de 8% à la pointe puis 4% en remontant vers le mandrin,</li> <li>- Traitement thermique CM « Controlled Memory »,</li> <li>- Traitement EDM « Electro Discharge Machining »</li> </ul>	 <ul style="list-style-type: none"> <li>- Conicité constante de 6%,</li> <li>- Traitement breveté C-Wire®</li> </ul>

**Annexe 2 : Angle  $\alpha$  (Schneider) et rayon de courbure R (Pruett)**



Schneider est le premier à décrire la courbure canalaire. Cependant il ne tient compte que d'un seul paramètre : l'angle  $\alpha$ . La courbure canalaire sera alors précisée par plusieurs auteurs dont Pruet avec un deuxième paramètre qu'est le rayon R de courbure. Celui-ci indique la sévérité ou l'importance de la pente avec laquelle le canal se courbe. Plus le rayon est petit, plus la courbure est sévère.

### Annexe 3 : Protocole de préparation des échantillons



La mise en forme instrumentale préconise de ne pas forcer un instrument dans le canal et d'effectuer un mouvement de va-et-vient avec remontées régulières. La flèche de retour indique le passage de l'instrument en vagues successives jusqu'à l'atteinte de la limite apicale de préparation.



**Thèse d'exercice : Chir. Dent. : Lille : Année 2020 – N°:**

Capacité de mise en forme des instruments F6 SkyTaper®, HyFlex® EDM OneFile et One Curve® : Une étude comparative par microtomographie / IKOGOU Taniah- p. (54) : ill. (11) ; réf. (91).

**Domaines** : Dentisterie Restauratrice et Endodontie

**Mots clés Rameau:** Endodontie-Appareils et matériel ; Microtomographie ;

**Mots clés FMeSH:** Endodontie-Instrumentation ; Microtomographie aux rayons X ;

**Mots clés libres** : One Curve® ; F6 SkyTaper® ; HyFlex® EDM OneFile.

**Résumé de la thèse :**

- Objectif : Comparer la capacité de mise en forme des instruments F6 SkyTaper, HyFlex EDM OneFile et One Curve par microtomographie.
- Matériel et Méthodes : Cinquante-deux racines mésio-vestibulaires de premières molaires maxillaires avec un angle de courbure compris entre 20° et 42° ont été randomisées en trois groupes expérimentaux (n=15/groupe) et un groupe témoin (n=7). Les racines ont été mises en forme selon les recommandations du fabricant. Tous les échantillons ont été scannés par micro-CT avant et après instrumentation et les paramètres suivant ont été évalués : « temps de préparation instrumentale », « volume de dentine éliminée », « vitesse de préparation », « surface non instrumentées » et « transport canalaire ». Une analyse paramétrique ANOVA suivie d'un post-test de Tukey a été réalisée pour le paramètre vitesse de préparation. Une analyse non paramétrique de Kruskal-Wallis suivie d'un post-test de Dunn a été réalisée pour les autres paramètres.
- Résultats et Discussion : Aucune fracture instrumentale n'a été relevée durant la préparation. Aucune différence significative n'a été mise en évidence entre les instruments concernant tous les paramètres ( $p>0,05$ ). Le transport canalaire a significativement augmenté en s'éloignant de la limite apicale de préparation ( $p<0,05$ ).
- Conclusion : Tous les instruments ont mis en forme le système canalaire et préservé la trajectoire canalaire apicale en respectant les standards actuels de sécurité.

**JURY :**

**Président :** Monsieur le Professeur E. DEVEAUX

**Assesseurs :**

Monsieur le Docteur P. HILDEBERT

Monsieur le Docteur A. GAMBIEZ

Monsieur le Docteur L. ROBBERECHT

**Membres invités :**

Madame la Docteure K. SY