



HAL
open science

Étude des effets de la préparation canalaire à l'aide de la microtomographie : analyse comparative innovante de 3 systèmes rotatifs en NiTi

Kevin John Fouillen

► To cite this version:

Kevin John Fouillen. Étude des effets de la préparation canalaire à l'aide de la microtomographie : analyse comparative innovante de 3 systèmes rotatifs en NiTi. Sciences du Vivant [q-bio]. 2015. dumas-01477684

HAL Id: dumas-01477684

<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-01477684>

Submitted on 27 Feb 2017

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

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



Distributed under a Creative Commons Attribution - NonCommercial - NoDerivatives 4.0 International License



université de bretagne
occidentale



THÈSE POUR L'OBTENTION DU
DIPLOME D'ÉTAT DE
DOCTEUR EN CHIRURGIE DENTAIRE

Année : 2015
Thèse N° : 29 013

présentée par

Kevin John FOUILLEN

Né le 25 octobre 1989 à LYON (8ème)

Préparée à l'UFR d'Odontologie de BREST

ÉTUDE DES EFFETS DE LA
PRÉPARATION CANALAIRE A
L'AIDE DE LA
MICROTOMOGRAPHIE :

ANALYSE COMPARATIVE INNOVANTE DE 3
SYSTEMES ROTATIFS EN NiTi

Thèse soutenue le 19 juin 2015

devant le jury composé de :

Pr Reza ARBAB-CHIRANI

PU/PH, Université de Bretagne Occidentale - *Président*

Dr Karen VALLAEYS

MCA/PA, Université de Bretagne Occidentale - *Directrice*

Dr Alain ZERILLI

MCU/PH, Université de Bretagne Occidentale - *Assesseur*

Dr Valérie CHEVALIER-HERISSET

MCU/PH, Université de Bretagne Occidentale - *Assesseur*

Dr Emilie THIEBAUT

Praticien attaché, CHRU de Brest - *Invitée*

Mr Gaël BOURBOUZE

Ingénieur, Centre de Ressources Techniques de Morlaix - *Invité*

UNIVERSITÉ DE BRETAGNE OCCIDENTALE

PRÉSIDENT

Monsieur Pascal OLIVARD

DIRECTEUR GÉNÉRAL DES SERVICES

Monsieur Stéphane CHARPENTIER

CORPS PROFESSORAL DE L'U.F.R. D'ODONTOLOGIE DE BREST

Année Universitaire 2014-2015

DOYEN

Monsieur Reza ARBAB CHIRANI

PROFESSEURS DES UNIVERSITÉS

57-03 Sciences Biologiques

Monsieur Jacques-Olivier PERS

58-01 Odontologie Conservatrice

Monsieur Reza ARBAB CHIRANI

58-02 Prothèse

poste vacant

MAITRES DE CONFÉRENCES DES UNIVERSITÉS

56-01 Pédodontie

Monsieur Hervé FORAY

56-01 Pédodontie

Madame Frédérique d'ARBONNEAU

56-03 Prévention Epidémiologie

Monsieur Alain ZERILLI

56-03 Prévention Epidémiologie

Monsieur Bertrand PIVER

57-01 Chirurgie Buccale

Monsieur Guy LE TOUX

57-02 Chirurgie Buccale

Madame Sylvie BOISRAME-GASTRIN

57-03 Sciences Biologiques

Madame Laëtitia LE POTTIER

58-01 Odontologie Conservatrice

Madame Valérie CHEVALIER-HERISSET

58-01 Odontologie Conservatrice

Madame Karen VALLAEYS (associée)

58-02 Prothèse

Monsieur Vincent JARDEL

58-02 Prothèse

Madame Elisabeth LEIZE-ZAL

58-03 Sciences anatomiques et physiologiques,
occlusodontiques, biomatériaux,
biophysique et radiologie

Madame Céline BODERE

58-03 Sciences anatomiques et physiologiques,
occlusodontiques, biomatériaux,
biophysique et radiologie

Monsieur Brice CHAUVEL

ASSISTANTS

57-01 Parodontologie

Madame Juliette COAT

57-01 Parodontologie

Madame Claire HENRY-ALBARET

57-02 Chirurgie Buccale et Pathologique

Madame Aurélie HACQUARD

57-02 Chirurgie Buccale et Pathologique

Monsieur Cédric LANSONNEUR

58-01 Odontologie Conservatrice

Madame Anaïs BONNABESSE

58-01 Odontologie Conservatrice

Madame Charlotte GOUEDARD

58-02 Prothèse

Madame Gabrielle LEON

58-02 Prothèse

Monsieur Vincent BERTHELOT

ASSISTANTS ASSOCIES

56-02 Orthopédie Dento Faciale

Madame Kristelle MELONE

57-03 Sciences Biologiques

Madame Kahina AMROUCHE

58-02 Prothèses

Monsieur Gabriel SCOLAN

À Monsieur le Professeur Reza ARBAB-CHIRANI,

Professeur des Universités – Praticien Hospitalier, UFR d’Odontologie, UBO, Brest
Chef du service d’Odontologie du CHRU de Brest

Qui nous fait l’honneur d’accepter de présider le jury de notre thèse.

*Nous vous prions d’agréer l’expression de notre
profonde reconnaissance.*

*Soyez assuré de tout notre respect et de notre
gratitude pour la qualité de l’enseignement que
vous nous avez accordé.*

Que ce travail en soit le témoignage.

À Madame le Docteur Karen VALLAEYS,

Maître de Conférences Associé, UFR d'Odontologie, UBO, Brest

Praticien attaché, CHRU de Brest

Qui nous a fait l'honneur de diriger notre travail.

Nous vous remercions de nous avoir associé à vos travaux de recherche, ce fut un plaisir de travailler avec vous sur ce projet.

Veillez trouver dans ce travail l'expression de notre respect le plus sincère et de notre profonde estime.

À Monsieur le Docteur Alain ZERILLI,

Maître de Conférences des Universités, UFR d'Odontologie, UBO, Brest
Praticien hospitalier, CHRU de Brest

Vous nous faites l'honneur d'avoir accepté de siéger au sein de notre jury de thèse.

*Nous vous remercions de la qualité de
l'enseignement que vous nous avez dispensé
et des valeurs que vous nous avez transmises
aux cours de nos études.*

*Veillez trouver dans ce travail l'expression de
notre sincère reconnaissance.*

À Madame le Docteur Valérie CHEVALIER-HERISSET,

Maître de Conférences des Universités, UFR d'Odontologie, UBO, Brest
Praticien hospitalier, CHRU de Brest

Vous nous faites l'honneur d'avoir accepté de siéger au sein de notre jury de thèse.

Soyez assurée de notre profonde gratitude pour vos enseignements, votre disponibilité et les grandes qualités humaines que vous nous avez montré pendant nos années d'études.

Veillez trouver dans ce travail l'expression de notre sincère reconnaissance.

À Madame le Docteur Emilie THIEBAUT,

Ancienne Assistante Hospitalo-Universitaire, UFR d'Odontologie, UBO, Brest
Praticien attaché, CHRU de Brest

Vous nous faites l'honneur d'avoir accepté de siéger au sein de notre jury de thèse.

Nous avons été très sensible à vos précieux conseils, à votre disponibilité et à votre soutien pendant nos études et par la suite.

Veillez trouver ici l'assurance de notre admiration et de notre profond respect.

À Monsieur Gaël BOURBOUZE,

Ingénieur, Centre de Ressources Techniques de Morlaix

Vous nous faites l'honneur d'avoir accepté de siéger au sein de notre jury de thèse.

Nous vous remercions pour la qualité de vos explications et votre disponibilité au cours de nos travaux.

Veillez trouver ici toute notre reconnaissance pour votre précieuse collaboration.

Je certifie sur l'honneur ne pas avoir repris pour mon propre compte des propos, des citations, des illustrations déjà publiés.

A BREST, le 19 juin 2015

Kevin John FOUILLEN

ÉTUDE DES EFFETS DE LA PRÉPARATION CANALAIRE À L'AIDE DE LA MICROTOMOGRAPHIE :

ANALYSE COMPARATIVE INNOVANTE DE 3 SYSTÈMES ROTATIFS
EN NiTi

PLAN

INTRODUCTION

Chapitre I : PREPARATION CANALAIRE EN ENDODONTIE

- 1.1 Principes généraux
- 1.2 Etapes de la préparation canalaire
 - 1.2.1 Cavité d'accès
 - 1.2.2 Pénétration initiale et détermination de la longueur de travail
 - 1.2.3 Parage canalaire
 - 1.2.4 Mise en forme canalaire
 - 1.2.5 Irrigation
- 1.3 Incidents dans la préparation canalaire
 - 1.3.1 Erreurs de préparation
 - 1.3.1.1 Butée, faux-canal et perforation
 - 1.3.1.2 Déplacement du foramen apical
 - 1.3.1.3 Fragilisation des parois canales
 - 1.3.2 Fracture instrumentale
 - 1.3.2.1 Fracture par torsion
 - 1.3.2.2 Fracture par fatigue cyclique
- 1.4 Techniques de préparations
 - 1.4.1 Instrumentation manuelle
 - 1.4.2 Techniques de préparation assistées
 - 1.4.2.1 Les alliages Nickel-Titane
 - 1.4.2.2 Les instruments utilisés en rotation continue
 - 1.4.2.2.1 Principes
 - 1.4.2.2.2 PathFile®
 - 1.4.2.2.3 ProTaper Next®
 - 1.4.2.2.4 Prototype
 - 1.4.2.3 Les instruments utilisés en réciprocité
 - 1.4.2.3.1 Principes
 - 1.4.2.3.2 Wave One®

Chapitre II : MOYENS D'ETUDE ET D'EVALUATION DE LA PREPARATION CANALAIRE

- 2.1 Moyens d'évaluation
 - 2.1.1 Radiographie conventionnelle

- 2.1.2 Tomographie Volumique à Faisceau Conique (CBCT)
 - 2.1.2.1 Présentation
 - 2.1.2.2 Description du Planmeca ProMax 3D Mid®
- 2.1.3 Microtomographie (μ CT)
 - 2.1.3.1 Présentation
 - 2.1.3.2 Description du V-Tome-X 240D®
- 2.2 Support d'évaluation
 - 2.2.1 Racines mésiales des molaires mandibulaires
 - 2.2.1.1 Description de la morphologie externe
 - 2.2.1.2 Description de la morphologie interne
 - 2.2.1.3 Courbure de canaux mésiaux des molaires mandibulaires
 - 2.2.2 Notion de courbure canalaire
 - 2.2.2.1 Angle de courbure
 - 2.2.2.2 Rayon de courbure
- 2.3 Critères d'évaluation
 - 2.3.1 Déplacement canalaire
 - 2.3.1.1 Transport canalaire
 - 2.3.1.1.1 Méthode de Gambill
 - 2.3.1.1.2 Méthode des centres de gravité
 - 2.3.1.2 Capacité de centrage
 - 2.3.1.3 Redressement canalaire
 - 2.3.2 Surfaces dentinaires
 - 2.3.2.1 Modification de l'aire des surfaces
 - 2.3.2.2 Pourcentage de surfaces non instrumentées
 - 2.3.3 Volumes dentinaires
 - 2.3.4 Géométrie canalaire : Structure Model Index

Chapitre III : PROPOSITION D'UNE METHODE D'ETUDE INNOVANTE DES EFFETS DE LA PREPARATION CANALAIRE

- 3.1 Revue de la littérature
- 3.2 Position du problème
- 3.3 Description de la méthode
 - 3.3.1 Superposition des volumes
 - 3.3.2 Notion de déviation
 - 3.3.3 Cartographie de la préparation canalaire
 - 3.3.3.1 Etalonnage de l'échelle
 - 3.3.3.1.1 Dentine pariétale infectée

- 3.3.3.1.2 Transport canalaire et étanchéité apicale
- 3.3.3.2 Proposition d'une échelle
- 3.3.4 Création d'étiquettes
- 3.4 Evaluation de la méthode

Chapitre IV : ETUDE DES EFFETS DE LA PREPARATION CANALAIRE A L'AIDE DE LA MICROTOMOGRAPHIE : Analyse comparative innovante de 3 systèmes rotatifs en NiTi.

- 4.1 Objectifs
- 4.2 Matériels et Méthodes
 - 4.2.1 Sélection de l'échantillon
 - 4.2.2 Randomisation
 - 4.2.3 Préparation canalaire
 - 4.2.4 Procédures d'imagerie
 - 4.2.4.1 Acquisitions et analyse au MCT
 - 4.2.4.2 Acquisitions et analyse au CBCT
 - 4.2.5 Analyse et traitement des images
 - 4.2.5.1 Analyse de la cartographie de la préparation
 - 4.2.5.2 Analyse du tableur
 - 4.2.5.3 Analyse du CT et de CA selon Gambill versus étiquettes
- 4.3 Résultats
 - 4.3.1 Analyse statistique
 - 4.3.2 Etude des surfaces
 - 4.3.2.1 Ensemble du canal
 - 4.3.2.2 Tiers apical
 - 4.3.3 Transport canalaire et capacité de centrage
 - 4.3.3.1 Transport canalaire
 - 4.3.3.2 Capacité de centrage
 - 4.3.4 Données issues du tableurs
 - 4.3.4.1 Déviation 3D moyenne
 - 4.3.4.2 Direction de la déviation moyenne sur x
- 4.4 Discussion
- 4.5 Conclusion

CONCLUSION

ANNEXES

BIBLIOGRAPHIE

INTRODUCTION

La Haute Autorité de Santé établit dans un rapport de 2008 que le traitement endodontique (TE) a pour objectif de traiter les pathologies pulpaires et périapicales, c'est à dire de transformer une dent pathologique en une entité saine, asymptomatique et fonctionnelle sur l'arcade.

Les indications du traitement endodontique sont l'inflammation irréversible de la pulpe ou la nécrose pulpaire, avec ou sans lésions apicales associées, ou alors un pronostic défavorable au maintien de la vitalité pulpaire au cours de la restauration coronaire. Leurs étiologies sont variées et peuvent être inflammatoire, infectieuse ou traumatique.

Le traitement endodontique est un acte technique courant de l'arsenal thérapeutique du Chirurgien-Dentiste, il représente 16% des actes conservateurs et, en 2004, la Caisse Nationale d'Assurance Maladie en a recensé plus de 6 millions de cotations (HAS, 2008).

Selon les études, 44 à 77% des sujets présentent au moins une lésion périapicale et dans la population française une étude de 2002 indique que 19% des dents sont dévitalisées (Boucher *et al.*, 2002).

Le traitement endodontique est une procédure concernant le réseau canalaire radiculaire qui consiste à éliminer et neutraliser toutes les substances organiques (résidus tissulaires, bactéries, produits de l'inflammation) responsable de la pathologie pulpaire. Ceci est permis par 3 actions fondamentales définies par Herbert Schilder dès 1974 :

D'abord le nettoyage ou désinfection canalaire c'est à dire l'élimination de son contenu, puis la préparation canalaire c'est à dire sa mise en forme de manière à permettre ensuite son obturation (Schilder, 1974).

La préparation canalaire est une étape essentielle du traitement dont la bonne réalisation permet une obturation de qualité. Ces deux phases engagent le pronostic du traitement endodontique.

Dans ce travail nous nous intéresserons à cette étape fondamentale du traitement endodontique :

Tout d'abord, nous commencerons par définir la préparation canalaire, ses objectifs et ses moyens de mise en œuvre selon les conceptions cliniques récentes.

Ensuite nous nous intéresserons à l'étude de la préparation canalaire au travers des moyens, des supports et des critères d'évaluation actuellement reconnus dans la littérature.

Puis nous proposerons une nouvelle approche de cette évaluation grâce à une méthode innovante.

Enfin nous présenterons une étude dont les objectifs sont de comparer les performances de mise en forme de 3 systèmes rotatifs et de valider la nouvelle approche en comparant ses résultats avec ceux de la méthode de référence.

CHAPITRE I : PREPARATION CANALAIRE EN ENDODONTIE.

1.1 Principes généraux

Les objectifs essentiels de la préparation canalaire, énoncés par Schilder, sont l'élimination du contenu organique du système endocanalaire, son assainissement et la mise en forme du canal principal en respectant son anatomie pour permettre son obturation (Schilder, 1974).

L'élimination du contenu canalaire fera appel à la fois à des moyens mécaniques et chimiques. La complexité du système canalaire laisse des zones non accessibles à la préparation mécanique (canaux accessoires, delta apicaux...).

Ce sont de véritables refuges pour la prolifération bactérienne qui peuvent être responsables de l'échec de certains traitements canalaires. Seule l'irrigation abondante du système canalaire par un irrigant adapté (antiseptique, solvant, lubrifiant et biocompatible) améliore le nettoyage et la désinfection des zones non accessibles aux instruments endodontiques, l'élimination de l'enduit pariétal et l'évacuation de l'ensemble des débris issus de la préparation (Claisse-Crinquette, 2011).

Le succès endodontique passe donc par une préparation chimio-mécanique associant :

- Le parage et la mise en forme canalaire par l'instrumentation d'une part.
- La désinfection et l'évacuation grâce à l'action de la solution d'irrigation d'autre part.

La préparation canalaire est un acte chirurgical, elle doit impérativement se dérouler sous digne (champ opératoire) dans des conditions d'asepsie stricte.

La mise en forme sera plus ou moins délabrante selon la pathologie pulpaire ou apicale préexistante et les erreurs de préparations peuvent être nombreuses.

C'est une étape clé du traitement endodontique dont la bonne réalisation conditionnera la qualité de l'obturation et le pronostic du traitement (Médioni et Vené, 1995).

1.2 Etapes de la préparation canalaire

1.2.1 Réalisation de la cavité d'accès

La réalisation de la cavité d'accès est la première étape du traitement endodontique. Il s'agit d'éliminer le contenu organique et minéral de la chambre pulpaire et ménager une voie d'accès clinique au système endocanalaire pour l'instrumentation, l'irrigation et l'obturation.

Les étapes suivantes de la thérapeutique endodontique, préparation canalaire et obturation, dépendent de la qualité de sa réalisation (Simon et Ctorza-Perez, 2010).

La cavité d'accès idéale répond à 5 objectifs :

- Supprimer la totalité du plafond pulpaire (fig.1.1)
- Visualiser des orifices canaux (fig. 1.2)
- Permettre un accès direct au canal sans interférence avec les parois coronaires
- Assurer un réservoir permanent pour l'irrigant
- Assurer une assise au pansement temporaire (Simon *et al.*, 2012).

Si la perte de substance coronaire à l'issue de l'éviction carieuse est importante et que les parois résiduelles ne permettent pas d'assurer une cavité d'accès acceptable, une reconstitution pré-endodontique est nécessaire. Sa réalisation doit être conforme aux objectifs ci-dessus et permettre la pose du champ opératoire indispensable au traitement.

1.2.2 Pénétration initiale et détermination de la longueur de travail

La pénétration initiale (ou cathétérisme) est définie comme l'exploration de la trajectoire canalaire et son pré-élargissement. Ils permettent de sécuriser le passage des instruments rotatifs de préparation.

Cette perméabilisation canalaire permettra de déterminer avec précision la longueur de travail, elle peut être réalisée à l'aide d'instruments manuels de faible diamètre et précourbés (limes K 08, 10 ou 15) ou en utilisant des instruments rotatifs Nickel-Titane spécifiques (Claisse *et al.*, 2014).

L'atteinte des objectifs du traitement endodontique nécessite le choix d'une limite apicale de préparation mesurée par rapport à un repère coronaire fixe. La détermination de cette distance, appelée longueur de travail ou LT, est indispensable pour assurer la cicatrisation du périapex et garantir un pronostic favorable au traitement.

La limite apicale est définie par la constriction apicale qui représente la frontière entre l'endodonte et le parodonte, matérialisée par le double cône dentino-cémentaire de Kuttler (Pérard *et al.*, 2010).

Différentes techniques permettent de déterminer la longueur de travail :

- Détermination radiographique lime en place : (fig.1.3)

Un instrument de faible diamètre est inséré dans le canal jusqu'à la constriction apicale (sensibilité tactile) et une radiographie intra-orale est réalisée pour s'assurer de la position à l'apex de l'extrémité instrumentale.

La LT est mesurée directement sur l'instrument entre sa pointe et le stop placé préalablement sur un repère coronaire.

Cette mesure est très utilisée mais peu précise en raison des risques de déformation de la situation 3D en image 2D entraînant fréquemment des surestimations de la LT et de la non concordance entre l'apex radiologique et l'apex anatomique et de la variabilité de la distance entre eux (0,5 à 2mm).

- Détermination électronique de la LT :

Cette méthode est reconnue actuellement comme plus fiable que la radiographie notamment grâce aux progrès des localisateurs d'apex (Cianconi *et al.*, 2010 ; Vieyra *et al.*, 2010).

La mesure de la longueur de travail doit être vérifiée régulièrement car la mise en forme peut entraîner un redressement canalaire et diminuer en conséquence la LT.

Pour permettre l'accès des instruments à la constriction apicale et la détermination de la LT, il est nécessaire de réaliser une première pénétration du canal sur toute sa longueur, le cathétérisme.

1.2.3 Parage canalaire

Le parage (ou débridement) consiste à éliminer l'ensemble des constituants canaux organiques (tissus pulpaire vivants ou nécrosés) ou minéraux (dentine pariétale infectée et calcifications) et les microorganismes pathogènes présents dans le canal (Beer *et al.*, 2008).

Le débridement est assuré au moyen :

- D'une élimination mécanique des constituants canaux par l'instrumentation
- De leur dissolution chimique dans l'irrigant
- Du rinçage abondant permettant l'évacuation de l'ensemble et la désinfection canalaire.

1.2.4 Mise en forme canalaire

Le Collège National des Enseignants en Odontologie Conservatrice et Endodontie (CNEOC) définit la mise en forme canalaire comme l' « *aménagement de l'espace canalaire principal du canal radiculaire selon une forme prédéterminée (conique) pour faciliter son nettoyage et permettre le remplissage du réseau canalaire par un matériau d'obturation* » (CNEOC, 2004).

Elle est réalisée à l'aide de différents instruments utilisés selon une séquence spécifique en fonction du type d'instrumentation choisi (manuels acier inoxydable, rotatifs NiTi).

Les techniques actuelles de préparation suivent le concept développé par Marshall et Papin, la technique du « crown-down », dont l'objectif consiste à mettre en forme d'abord les 2 tiers coronaires puis de progresser vers l'apex (Marshall et Papin, 1980). Cette méthode a pour objectif de libérer les instruments de leurs contraintes coronaires afin de faciliter leur travail dans le tiers apical. La progression des instruments sera mieux contrôlée et évitera les transports apicaux.

La mise en forme canalaire doit impérativement respecter l'anatomie initiale du canal et ne pas déplacer latéralement le foramen apical.

Le fuselage, créé par la mise en forme grâce à l'action des instruments endodontiques, va permettre d'assurer l'insertion sans obstacle des cônes de gutta-percha jusqu'à la butée apicale pour obtenir une obturation canalaire optimale (Beer *et al.*, 2008).

1.2.5 Irrigation

De manière à respecter le principe de préparation chimio-mécanique, il convient de procéder à une irrigation abondante du système endocanalaire tout au long du protocole opératoire.

L'irrigation canalaire doit permettre de :

- Dissoudre les débris issus de la préparation
- Créer un flux pour leur évacuation
- Nettoyer et désinfecter les zones non accessibles à l'instrumentation
- Avoir un effet bactéricide
- Lubrifier les instruments endodontiques.

L'hypochlorite de Sodium (NaOCl) reste actuellement l'irrigant de référence pour son effet antibactérien, ses facultés de dissolution, de lubrification et sa toxicité tissulaire relative.

Un agent chélateur comme l' EDTA (Ethylène Diamine Tétra-Acétate) est utilisé en complément lors de la préparation canalaire des canaux minéralisés et/ou en rinçage final pour ses propriétés chélatrices de dissolution importante de la boue dentinaire (Beer *et al.*, 2008).

1.3 Incidents de la préparation canalaire

1.3.1 Erreurs de préparation (Simon *et al.*, 2012)

En présence d'une courbure canalaire, les instruments prennent appui sur la face interne de la courbure, un bras de levier est ainsi engendré, les déplaçant vers l'extérieur de la courbure.

Cela entraîne une déviation, un déplacement de la trajectoire canalaire : c'est le transport canalaire.

1.3.1.1 Butée, faux-canal et perforation

Le déplacement de la pointe de l'instrument vers l'extérieur de la courbure contribue à la création d'une butée (« *encoche pariétale résultant d'une manœuvre iatrogène* ») (fig.1.4a).

Si l'instrument est forcé en direction apicale, la butée créera un faux canal (« *déviaton de la trajectoire canalaire caractérisée par la création d'un canal iatrogène* ») qui peut aboutir à une perforation (« *communication entre l'endodonte et le parodonte d'origine iatrogène (action mécanique)* ») (CNEOC, 2004) (fig.1.4b).

1.3.1.2 Déplacement du foramen apical

- Déplacement interne du foramen : Si la préparation canalaire est réalisée en deçà de la LT (sous-instrumentation) il y a création d'une butée apicale (fig.1.4c).
- Déplacement externe du foramen : si l'instrument dépasse le foramen, au delà de la LT (sur-instrumentation) il y a ovalisation du foramen apical (foramen déchiré) ou zipping (fig.1.4d).

1.3.1.3 Fragilisation des parois canales

Le mouvement de va-et-vient des instruments associé au phénomène de déplacement peut fragiliser les parois canales jusqu'à créer une perforation latérale notamment dans la zone interradiculaire (intérieur de la courbure), c'est le stripping.

1.3.2 Fracture instrumentale (Simon *et al.*, 2012)

1.3.2.1 Fracture par torsion

Une fracture par torsion survient lorsque l'instrument subit une déformation au delà de sa limite d'élasticité. L'instrument perd alors ses propriétés d'élasticité, il ne revient plus à sa forme initiale : la torsion est visible à l'examen visuel.

Si la torsion persiste la fracture se produira plus ou moins rapidement dans les cas suivants:

- Canal non exploré (défaut de cathétérisme)
- Préalargissement non suffisant (canal minéralisé)
- Travail en force

1.3.2.2 Fracture par fatigue cyclique

La fatigue cyclique de l'instrument endodontique est l'accumulation de stress dans l'alliage au cours de ses utilisations successives et particulièrement lors du travail d'un canal courbé.

C'est une accumulation multifactorielle impossible à détecter en examinant l'instrument, contrairement à la torsion, dont elle réduit par ailleurs la résistance.

Les fractures par fatigue se produisent lorsque les instruments sont usagés et non remplacés suffisamment souvent. Le risque de fracture augmente aussi nettement avec le rayon de courbure du canal.

1.4 Techniques de préparation

Pour illustrer cette partie nous décrivons les systèmes instrumentaux utilisés dans l'étude, il en existe beaucoup d'autres.

1.4.1 Instrumentation manuelle

Il s'agit d'instruments en acier inoxydable dont les caractéristiques sont normalisées (ISO 3630-1) :

- Correspondance entre le diamètre de la pointe et un code couleur
- Conicité constante à 2%
- Partie active de 16mm et 3 longueurs disponibles : 21,25 et 31mm.

Il en existe 3 types : (Arbab-Chirani *et al.*, 2010) (fig.1.5)

- Lime K (Kerr) : rigide avec un pas d'hélice court et un grand nombre de spire, sa section est carrée ou triangulaire. Ces limes sont utilisés dans un mouvement de traction et/ou de rotation pour réaliser la perméabilisation et la mise en forme canalaire.
- Lime H (Hedstroem) ou Racleur : ses spires sont rapprochées et l'angle de coupe est ouvert le rendant très tranchant. Sa coupe est circulaire. C'est un instrument de mise en forme et d'élargissement permettant d'éliminer les débris, il est utilisé exclusivement dans un mouvement de traction.
- Broche : équivalente de la lime K, de section triangulaire, ses spires sont plus éloignées le pas d'hélice étant plus important. Elles sont utilisées exclusivement en rotation pour explorer le canal.

Les instruments manuels sont utilisés en alternance et avec des diamètres croissants.

Ce sont les instruments les plus anciens, leur utilisation seule est fastidieuse et chronophage mais elle reste d'actualité dans 2 cas :

- Pour les limes de faible diamètre dans la phase initiale du traitement endodontique pour le repérage des entrées canalaire et la pénétration initiale des canaux avant le passage des instruments rotatifs
- Lorsque l'utilisation des techniques mécanisées est contre-indiquée.

1.4.2 Techniques de préparation assistée

Les techniques de préparation assistée ont été développées à partir des années 90 pour faciliter la préparation canalaire et en améliorer l'ergonomie. Ces instruments sont montés sur un contre-angle réducteur et sont animés d'un mouvement mécanique de rotation continue ou de réciprocité selon la méthode.

L'efficacité de ces instruments augmente grâce à leurs caractéristiques mécaniques innovantes (design, diamètre, conicité...) et à l'alliage Nickel-Titane avec lequel ils sont conçus. Ces évolutions visent à diminuer le transport canalaire et la fracture instrumentale. Les séquences instrumentales ont été réduites progressivement pour aboutir actuellement à un instrument unique de préparation pour certains systèmes.

1.4.2.1 Les alliages Nickel-Titane

Les instruments endodontiques utilisés en préparation assistée sont conçus dans un alliage Nickel-Titane (NiTi) contenant approximativement 50% de Nickel et 50% de Titane en teneur atomique, même si ces proportions peuvent varier légèrement selon les fabricants.

Les alliages NiTi ont deux caractéristiques mécaniques particulières qui justifient leur intérêt :

- Mémoire de forme : capacité de garder en mémoire une forme initiale et d'y retourner après une déformation grâce à un changement de température (exploitée en Orthopédie Dento-Faciale)
- Superélasticité : capacité de déformation importante (exploitée en Endodontie)

Les particularités de leur comportement mécanique s'expliquent par un changement de phase solide-solide : la transformation martensitique, selon les conditions de température ou les contraintes mécaniques.

En effet l'alliage NiTi se présente sous 2 formes cristallographiques : (fig.1.6)

- Austénite : à basse température ou sans contrainte.
- Martensite : si échauffement ou si application de contraintes mécaniques.

La figure 1.7 montre la courbe de traction caractéristique d'un alliage NiTi utilisé en endodontie.

On peut voir qu'en dessous de la limite de transformation (± 500 MPa), l'alliage a un comportement élastique (élasticité de la phase austénitique).

Au-dessus de cette contrainte seuil, la transformation de phase (austénite \rightarrow martensite) a lieu, donnant naissance à un alliage biphasé austénite/martensite.

L'alliage NiTi atteint des niveaux de déformation importants (le plateau superélastique), on parle de comportement superélastique.

Au-delà d'une déformation maximale (± 8 %), la transformation martensitique est totale et le comportement redevient purement élastique (élasticité de la phase martensitique) jusqu'à rupture.

Lors de la décharge, la transformation inverse (martensite \rightarrow austénite) se met en place, on constate qu'aucune déformation résiduelle ne subsiste à la fin de la décharge (Arbab-Chirani *et al.*, 2010).

Pour aller plus loin, certains fabricants ont développé des alliages NiTi recevant un traitement thermique spécifique qui augmenterait selon eux la flexibilité de l'instrument et sa résistance à la fatigue cyclique (Dentsply-Maillefer et SybronEndo) :

- M-Wire® (Dentsply-Maillefer) : GTX®, ProTaper Next®, Wave One®
- R-phase® (SybronEndo) : Twisted-Files® (TF).

Gambarini *et al.* ont pu démontrer la supériorité des alliages NiTi avec traitement thermique sur les NiTi conventionnels (Gambarini *et al.*, 2008).

De manière générale, les études s'accordent sur la supériorité des instruments rotatifs en NiTi sur les instruments manuels en acier inoxydable : (Claisse *et al.*, 2014)

- Diminution du transport de la trajectoire canalaire originelle évitant ainsi les butées et les déchirures du foramen apical
- Réduction de la quantité de débris refoulés dans le périapex à l'origine de desmodontite postopératoire
- Préparation canalaire plus rapide (séquences réduites) laissant davantage de temps à l'irrigation
- Résultats fiables et reproductibles améliorant la qualité du traitement et son pronostic.

1.4.2.2 Les instruments utilisés en Rotation Continue (RC)

1.4.2.2.1 Principes

La préparation en rotation continue se définit comme l'utilisation d'un instrument animé d'un mouvement rotatif (CNEOC, 2010) continu dans le sens horaire, à vitesse réduite et constante.

Ces instruments sont montés sur un contre-angle réducteur relié à un micromoteur dont la vitesse de rotation et le couple peuvent être réglés.

1.4.2.2.2 PathFile® (Dentsply-Maillefer, Ballaigues, Suisse)

Développé par la société Dentsply en 2008, c'est un dispositif de pénétration initiale en NiTi en rotation continu destiné à la perméabilisation du trajet canalaire sans utiliser d'instrument manuel en acier inoxydable, source potentiel d'erreurs de préparation.

Le PathFile® (PF) comporte les caractéristiques suivantes :

- Diamètre apical de 0.13 (violet), 0.16 (blanc), ou 0.19 mm (jaune) (fig.1.8)
- Conicité de 2% régulière sur toute la longueur de l'instrument
- 3 longueurs disponibles : 21, 25 et 31 mm
- Pointe arrondie, non travaillante (fig.1.9) évitant tout risque de butée
- Section carrée, offrant 4 lames de coupe (fig.1.9)
- Hélice à droite permettant une coupe horaire en rotation continue, son pas est régulier. Le PathFile® doit être monté sur un contre angle réducteur pour être utilisé à une vitesse de 300 rpm pour un torque compris entre 2 et 5 Ncm (Dentsply-Maillefer).

Le PathFile® reprend la géométrie éprouvée des limes K manuelles tout en affichant de nouvelles propriétés :

- 4 lames assurant une efficacité de coupe importante facilitant un pré-élargissement canalaire progressif jusqu'à l'apex.
- Alliage NiTi associé à la faible conicité rendant cet instrument extrêmement flexible
- Pointe est non travaillante.
-

Ces caractéristiques permettent de diminuer significativement les erreurs de préparation (butée, épaulement, faux canal, transport canalaire, élargissement apical) retrouvées pour les instruments de cathétérisme manuel (Berutti *et al.*, 2009 ; Castellucci *et al.*, 2010).

Son utilisation est indiquée pour toute préparation canalaire à l'exception de courbure apicale franche et sévère, comme pour l'ensemble des instruments endodontiques de préparation assistée.

Le protocole opératoire est le suivant : (Dentsply-Tulsa Dental Specialties)

- Evaluer l'anatomie canalaire sur la radiographie préopératoire et réaliser la cavité d'accès
- Explorer le canal à l'aide de limes K 08 ou K10 jusqu'à la longueur de travail si possible
- Vérifier la LT à l'aide d'un localisateur d'apex ou d'un cliché lime en place
- Passer successivement les PathFile® 013, 016 et 019 en pénétrant progressivement le canal sans pression apicale jusqu'à la LT (fig. 1.10)
- Utiliser si besoin un lubrifiant canalaire pour faciliter le cathétérisme
- Irriguer abondamment entre chaque instrument
- Revérifier la LT à l'aide d'une lime K 15 avant de passer aux instruments de préparation canalaire.

1.4.2.2.3 ProTaper Next® (Dentsply-Maillefer, Ballaigues, Suisse)

Cette séquence instrumentale est commercialisée depuis 2013 par la société Dentsply-Maillefer. Il s'agit de l'évolution du ProTaper Universal®. La séquence a été réduite et le profil largement modifié. Ces instruments sont usinés dans un alliage NiTi « MWire® » ce qui augmenterait la flexibilité et la résistance à la fatigue cyclique tout en assurant une excellente efficacité de coupe (Alapati *et al.*, 2009 ; Zhou *et al.*, 2013).

Le ProTaper Next® (PTN) est défini par les caractéristiques suivantes :

- Séquence instrumentale de base réduite à 2 instruments : (fig. 1.11)
 - X1 (bague jaune) de diamètre 17/100 à la pointe et de conicité apicale 4%
 - X2 (bague rouge) de diamètre 25/100 à la pointe et de conicité apicale 6%

- Séquence complémentaire de 3 instruments : (fig. 1.11)
 - X3 (bague bleue) 30/100, 7% (équivalent F3 ProTaper Universal)
 - X4 (double bague noire) 40/100, 6% (équivalent F4 PT Universal)
 - X5 (double bague jaune) 50/100, 6% (équivalent F5 PT Universal)

- Conicité variable le long de la partie travaillante, croissante de la pointe à la partie médiane puis décroissante jusqu'au fût. (ex : X2 4% à la base, 7% au 1/3 médian et 6% à l'extrémité)
- 3 longueurs disponibles : 21, 25 et 31mm
- Pointe arrondie non travaillante
- Section rectangulaire et excentrée, offrant 2 angles de coupe
- Sens de coupe horaire (hélice à droite) dont le pas augmente le long de la partie travaillante
- Profil torsadé, axe de rotation décalé.

La séquence s'adapte sur un contre angle réducteur animé par un moteur réglé à 300rpm et pour un torque compris entre 2 et 5,2 Ncm (Dentsply-Maillefer).

La rotation est asymétrique ce qui donne un mouvement de reptation (ondulation) à l'instrument.

La variation de la conicité le long de l'instrument permet de diminuer l'effet de vissage et de blocage en diminuant les contacts avec les parois canalaires (Ruddle, 2001). Les pressions exercées sur l'instrument et la fatigue diminuent, la progression par ondulation est ainsi facilitée tout comme l'évacuation des débris issus de la mise en forme (fig. 1.12).

La séquence est simplifiée par rapport au ProTaper Universal® puisque le X1 et le X2 remplacent respectivement les S1-S2 et F1-F2.

Le Sx peut être utilisé pour assurer l'ouverture des entrées canalaires si besoin et les X3 à X5 sont équivalents au F3 à F5 de l'ancienne séquence.

Ainsi la nouvelle séquence permet un gain de temps et d'efficacité par rapport à la précédente (Bürklein *et al.*, 2014).

Par ailleurs, à instrument équivalent, le diamètre et la conicité des pointes de la séquence du ProTaper Next ont été diminués de manière à permettre une préparation apicale plus conservatrice par rapport à celle obtenue jusque là par la séquence ProTaper Universal® (Dentsply-Tulsa Dental Specialties).

Ainsi grâce à son design asymétrique et sa flexibilité, et malgré un diamètre plus fin, le ProTaper Next® est capable de travailler le canal tout autant qu'un instrument de diamètre plus important mais dont l'axe de rotation est droit (Ruddle *et al.*, 2013 ; Capar *et al.*, 2014).

Le protocole clinique est le suivant : (fig.1.13) (Dentsply-Tulsa Dental Specialties)

- Réaliser la cavité d'accès et évaluer l'anatomie canalaire sur la radiographie préopératoire
- Utiliser le Sx pour élargir l'entrée canalaire si nécessaire
- Réaliser un cathétérisme initial jusqu'à la longueur de travail (LT) : K08 ou K10 ou protocole PathFile® conseillé par Dentsply
- Déterminer la LT à l'aide d'une radiographie instrument en place ou du localisateur d'apex
- Commencer par le X1 qui est descendu progressivement jusqu'à la LT en un ou plusieurs mouvements si nécessaire en alternance avec une lime K
- Puis le X2 de la même manière que le précédent jusqu'à ce qu'il descende passivement à la LT

- Vérifier la préparation à l'aide d'une lime 25/100 à l'apex, si elle résiste au retrait la mise en forme est suffisante, sinon utiliser X3 à X5 jusqu'à ce que la préparation soit satisfaisante
- Chaque instrument est inséré progressivement dans le canal avec un mouvement de brossage délicat des parois jusqu'à la LT
- Irriguer abondamment et récapituler entre chaque instrument
- En cas de résistance, remonter l'instrument, le nettoyer et l'inspecter, irriguer le canal et vérifier sa perméabilité
- L'utilisation d'un lubrifiant est fortement recommandée par le fabricant ainsi que la présence permanente de la solution d'irrigation dans le canal.

1.4.2.2.4 Prototype

Ce prototype est en cours de développement, ses caractéristiques sont confidentielles mais nous disposons néanmoins des informations suivantes :

- Diamètre 25/100
- conicité de 7%
- 4 arêtes de coupe dans la partie apicale (section carrée), puis 3 arêtes (section triangulaire)
- Design asymétrique : 1 face décalée et variable le long de la partie travaillante
- Traitement thermique de l'alliage NiTi.

1.4.2.3 Les instruments utilisés en réciprocité

1.4.2.3.1 Principe

La réciprocité consiste en une alternance de mouvements rotatifs horaires et antihoraires (réciproques), d'amplitude variable (asymétrique) qui permet une rotation de 360° en 3 cycles de mouvements alternatifs.

Elle est basée sur le concept des forces équilibrées décrit par Roane en 1985 qui permettrait à l'instrument de rester centré dans le canal et d'éliminer la dentine pariétale de manière homogène (Roane *et al.*, 1985).

L'intérêt du mouvement réciproque est la réduction de la fatigue cyclique de l'instrument assurant une durée de vie plus longue et un meilleur maintien du centrage dans le canal, limitant le transport canalaire ou apical (Simon *et al.*, 2012).

1.4.2.3.2 Le Wave One® (Dentsply-Maillefer, Ballaigues, Suisse)

Il s'agit d'un instrument en NiTi, destiné à être utilisé seul pour l'ensemble de la préparation canalaire. Le WaveOne® a été développé en 2010 par la société Dentsply à partir du ProTaper F2® (Dentsply-Maillefer) d'après les travaux de Yared qui proposait de l'utiliser non plus en rotation continue et au sein d'une séquence instrumentale mais seul et animé d'un mouvement de réciprocité, confirmé ensuite par les travaux de DeDeus puis de Paqué (Yared, 2008 ; De-Deus *et al.*, 2010a, 2010c ; Paqué *et al.*, 2011).

Le WaveOne® est usiné dans un alliage NiTi dit « MWire® » qui a subi un traitement thermique innovant permettant d'augmenter la flexibilité et la résistance à la fatigue (Shen *et al.* 2006 ; Gambarini *et al.* 2012).

Le WaveOne® (WO) présente les caractéristiques suivantes : (fig.1.14)

- 3 diamètres apicaux : 0,21 mm (jaune, « fin »), 0,25 mm (rouge, « primary ») et 0,40mm (noir, « large »)
- Conicité variable, décroissante le long de la partie travaillante de l'instrument (de 8% de conicité apicale sur 3mm à 5,5% à la base) à l'exception du « fin » (0,21mm) qui présente une conicité régulière à 6%
- 3 longueurs : 21, 25 et 31 mm
- Pointe non travaillante assurant le guidage

- Section triangulaire (3 angles de coupe) qui varie le long de sa partie travaillante : (fig. 1.15)
- Vers la pointe elle est triangulaire concave : les arêtes sont vives et l'angle de coupe est marqué
- Dans la partie moyenne et vers la base elle est triangulaire convexe avec 3 arêtes plus douces
 - Sens de coupe antihoraire (hélice à gauche).
 - Pas de l'hélice et angle d'hélice (=angle de coupe) croissants de l'extrémité à la base.

La conicité inversée de la partie travaillante de l'extrémité apicale à la garde de l'instrument, associée à son profil original, permet une bonne flexibilité et une efficacité de coupe importante tout en restant conservateur dans la préparation du tiers coronaire du canal. L'évacuation des débris issus de la préparation est facilitée par la section variable et le pas d'hélice croissant de la pointe à la garde (Bürklein *et al.*, 2012).

Le WaveOne doit être adapté sur un contre-angle réducteur 6:1 sur un moteur WaveOne spécifique (X smart plus®, Dentsply-Maillefer) (fig.1.16) qui permet d'appliquer un mouvement de réciprocité de 300 rpm alternant une rotation antihoraire de coupe de 170° avec une rotation horaire de retrait de 50° (Dentsply-Maillefer).

Le mouvement de réciprocité réduit le stress sur l'instrument, le rendant plus résistant à la fatigue cyclique et empêche par nature tout phénomène de vissage (Varela-Patiño *et al.*, 2010 ; De-Deus *et al.*, 2010).

Son protocole d'utilisation est simple : (fig.1.17)

- Après évaluation radiographique de l'anatomie canalaire et réalisation de la cavité d'accès
- Réaliser un cathétérisme initial à l'aide d'instruments manuels fins ou du PathFile®
- Déterminer la LT à l'aide d'une radiographie instrument en place ou du localisateur d'apex
- Explorer le canal à l'aide d'une lime K10 pour sélectionner le diamètre approprié :
 - WO 25/100 (primary) dans la majorité des cas (lime 10 à la LT sans résistance)
 - WO 21/100 (fin) lorsque le canal est étroit (résistance à la pénétration de la lime 10)
 ou en cas de blocage au cours de la mise en forme canalaire
 - WO 40/100 (large) pour les canaux larges (lime K 20 à la LT) ou si à l'issue de la préparation une lime K 25 flottait à l'apex.
- Insérer progressivement l'instrument sélectionné dans le canal par un mouvement de va-et-vient léger et sans pression jusqu'au 2/3 du canal
- Revérifier la LT
- Terminer la mise en forme canalaire jusqu'à la longueur de travail

- Tous les 3 mouvements ou en cas de blocage, retirer l'instrument, le nettoyer et rincer abondamment le canal
- L'utilisation d'un irrigant en permanence dans le canal et de lubrifiants ou d'agents chélateurs (EDTA) est conseillée (Webber *et al.*, 2011).

2.1 Moyens d'évaluation

L'étude de l'anatomie endodontique et des effets de la préparation canalaire est au cœur des préoccupations des chirurgiens-dentistes et des chercheurs.

L'exploration de la préparation canalaire est réalisée actuellement à l'aide de méthodes d'imagerie médicale non invasives, *in vivo* ou *in vitro* en fonction des doses de rayons X délivrée :

- Radiographie conventionnelle
- Tomographie Volumique à Faisceau Conique - Cone Beam Computed Tomography (CBCT)
- Microtomographie – Micro Computed Tomography (μ CT ou MCT).

2.1.1 Radiographie conventionnelle

La radiographie intra buccale est la technique d'imagerie la plus utilisée au quotidien en Odontologie puisqu'il s'agit de la méthode *in vivo* la plus rapide et la moins ionisante pour le patient. Les clichés rétro-alvéolaires apportent des éléments complémentaires au diagnostic clinique notamment sur l'anatomie radiculaire et canalaire ainsi que sur l'os alvéolaire environnant et l'espace desmodontal.

Des études sur le transport canalaire, déviation du canal originel après instrumentation, peuvent être réalisées à l'aide de la radiographie par superposition de 2 images pré et postopératoires avec un instrument en place (Bürklein *et al.*, 2014).

Pour permettre la superposition, un système de repositionnement précis est élaboré lors des acquisitions (bloc de résine individuel par dent, distance et alignement tube-captteur constants) et un logiciel de traitement de l'image est utilisé.

Cependant, il ne faut pas oublier que cela reste une image en 2 dimensions. Les superpositions peuvent constituer de véritables sources d'erreurs, notamment dans la visualisation des canaux (Hodez et Bravetti, 2010) et de leur courbure si elle est dans un autre plan que celui de l'incidence (Özer, 2011).

Cette technique est facile à utiliser, peu coûteuse et potentiellement informative sur l'efficacité de l'instrument, mais elle reste assez peu précise et n'a pas la capacité de divulguer des informations volumétriques. De plus, elle est très opérateur-dépendante et des imprécisions de superposition des radiographies peuvent exister. C'est pourquoi elle est actuellement délaissée au profit des techniques d'imagerie sectionnelle (de coupe) qui permettent des études en 3D.

2.1.2 Tomographie Volumique à Faisceau Conique (CBCT)

2.1.2.1 Présentation

La technique consiste en un générateur de rayons X (RX) qui émet un faisceau ouvert de forme conique traversant l'objet à explorer avant d'être analysé après atténuation par un système de détection. Le tube à RX et l'aire des détecteurs sont solidaires et alignés. Ils réalisent une rotation (180 à 360°) autour de l'objet ce qui permet d'acquérir une série d'images planes numérisées (images natives) se répartissant selon la trajectoire circulaire de rotation du système. Ces données numériques dans les différents plans de l'espace sont transmises à un ordinateur qui reconstruit un volume grâce à des algorithmes mathématiques (HAS, 2009).

L'unité de volume est le voxel (« volume element ») (fig. 2.1), c'est un parallélépipède rectangle caractérisé par la taille de ses arêtes. Il est l'équivalent 3D du pixel (« picture element ») d'une image 2D.

Pour un scanner X conventionnel, le faisceau est linéaire et plan (Fan Beam). Il réalise plusieurs rotations autour de l'objet pour le numériser entièrement (fig. 2.2). Le volume est reconstitué par superposition de coupes dites « natives ». Les voxels sont des parallélépipèdes rectangles dont la hauteur est différente de la largeur ou de la profondeur, ils sont dits anisotropes. (fig.2.1). La résolution spatiale dans l'axe perpendiculaire aux coupes dépend de leurs épaisseurs (Vallaey et Hodez, 2014).

La particularité du faisceau conique (Cone Beam) est de balayer l'objet en une seule rotation (fig.2.2). Les voxels obtenus sont cubiques, les 3 arêtes ont la même taille, ils sont dits isotropes (fig.2.1). Les coupes obtenues ont la même résolution spatiale quelle que soit leur orientation. La résolution spatiale d'une image CBCT est indépendante de l'orientation des coupes et ne dépend que de la taille des voxels (Vallaey et Hodez, 2014).

Les caractéristiques du volume exploré sont soumises à 3 contraintes antagonistes : (HAS, 2009)

- Taille du cylindre :

Elle est déterminée par le diamètre du faisceau conique (collimation) et de celle du récepteur.

- Taille des voxels :

Plus le volume du cylindre est faible et plus les voxels seront petits, la résolution sera importante.

- Temps de reconstruction :

Il augmente avec la taille du volume et la résolution attendue (taille des voxels).

La résolution d'une acquisition est définie par la résolution spatiale (ou définition) et la résolution en densité (ou contraste) : (HAS, 2009)

- Résolution Spatiale : c'est la précision de l'image. Elle est définie par la taille du voxel lors de l'acquisition, fonction du type de détecteur et du champ d'exploration (le volume) et varie proportionnellement au nombre de voxel (Vallaey et Hodez, 2014). Pour un nombre de voxel donné, plus le champ est limité meilleure est la définition.
- Résolution en Densité : c'est le pouvoir de discriminer les variations de densité au sein des structures étudiées, c'est à dire le nombre de niveaux de gris.

Le scanner X (tomodensitométrie) utilise l'échelle de Hounsfield mais le CBCT doit se contenter d'une simple modulation du noircissement et du contraste, ce n'est pas une méthode densitométrique (Cazévian et Pasquet, 2011).

Intérêts du CBCT : (Vallaey et Hodez, 2014)

- Technique d'imagerie sectionnelle la moins irradiante
- Résolution supérieure au Scanner X (voxel isotrope)
- Examen de référence de la sphère ORL et Maxillo-faciale.

2.1.2.2 Description du ProMax 3D Mid Planmeca®

Nous avons réalisé les acquisitions CBCT de l'étude grâce au Planmeca ProMax 3D Mid® (Planmeca Oy, Helsinki, Finlande) du Service d'Odontologie du CHRU de Brest (fig.2.3). Il est composé :

- D'un tube à rayon X D-054-SB-P® (Toshiba, Tokyo, Japon) qui présente :
 - Voltage de 54 à 90 kV
 - Intensité de 1 à 14 mA
 - Capacité de reconnaissance des détails de 100 µm.



Figure 2.3 :

Planmeca ProMax 3D Mid® du Service d'Odontologie du CHRU de Brest

- D'un détecteur Flat Panel® caractérisé par :
 - Taille : 130 x 130 mm
 - Résolution maximale des voxels : 100 μ m.

L'objet à numériser est placé sur un support fixe et l'appareil est réglé de manière à ce que cet objet soit au centre du volume d'acquisition à l'aide de repères lasers. C'est l'ensemble tube-détecteur qui réalise une rotation de 200 à 360° autour de l'objet pendant l'acquisition.

Pour l'étude, nous avons choisi la haute résolution (90kV et 14mA) soient des voxels de 100 μ m, pour un volume d'acquisition réduit de 40 x 50 mm.

Les données de numérisation sont transmises à un ordinateur de traitement dédié qui assure la reconstruction de l'image par un algorithme mathématique. Les images sont ensuite accessibles via un deuxième ordinateur grâce au logiciel de visualisation Planmeca Romexis 3D explorer® (Planmeca Oy, Helsinki, Finlande) qui en permet l'analyse. Ce programme présente 4 fenêtres (fig.2.4) qui permettent de visualiser l'objet dans les 3 plans de l'espace ainsi que sa reconstruction 3D.

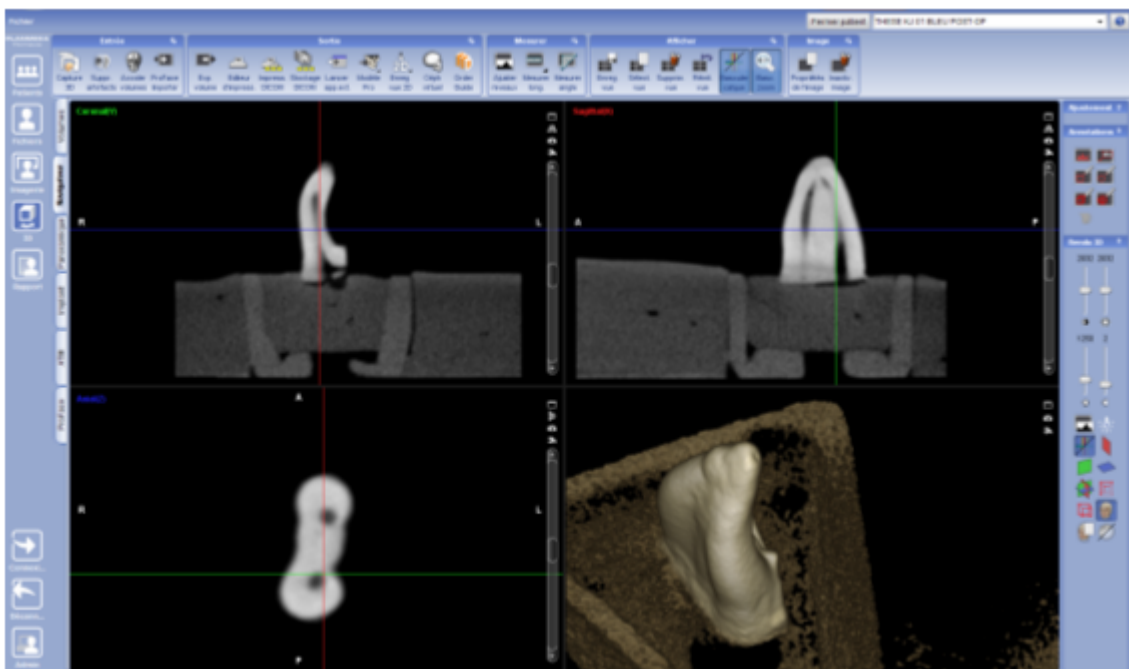


Figure 2.4 : fenêtre du logiciel Planmeca Romexis 3D explorer®

2.1.3 Microtomographie (MCT ou μ CT)

2.1.3.1 Présentation

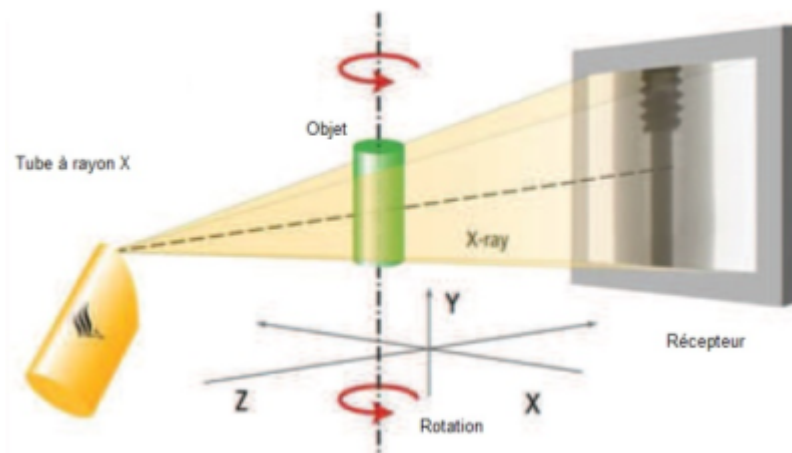
La microtomographie est une technique d'imagerie sectionnelle par faisceau conique.

Le microtomographe présente les mêmes propriétés que le CBCT :

- Faisceau conique
- Voxel isotrope
- Acquisition du volume en une seule rotation
- Reconstitution tridimensionnelle (imagerie volumique) et de coupe (imagerie sectionnelle).

Mais le μ CT présente quelques particularités qui augmentent ses performances :

- La résolution (définition et contraste) est nettement supérieure :
 - Volume d'acquisition plus faible
 - Tube délivrant un faisceau de Rx plus irradiant
 - Détecteur plus précis
 - Temps d'acquisition plus important.
- Le tube à RX et le détecteur sont solidaires et alignés mais restent statiques, c'est l'objet qui effectue une rotation pendant l'émission du faisceau (fig.2.5).



*Figure 2.5 : Schema du fonctionnement de la microtomographie
(CRT Morlaix)*

Les applications de la microtomographie sont essentiellement industrielles (métrologie, ingénierie) ou de recherche ex vivo (exploration de la préparation canalaire en Endodontie par exemple).

2.1.3.2 Description du V-tome-X 240D®

Notre étude utilise le microtomographe du Centre de Ressources Techniques (CRT) de Morlaix (fig.2.6). Il s'agit du V-tome-X 240D® (General Electrics Measurement & Control, Billerica, Massachussets, USA). Il est équipé :



Figure 2.6 : le V-tome-X 240D® du CRT de Morlaix

- D'un tube à rayon X (xs-240D) dont les caractéristiques suivantes : (fig.2.7)
 - Angle directionnel de sortie de 60°
 - voltage de 10 et 240 kV
 - intensité de 5 à 3000 μA

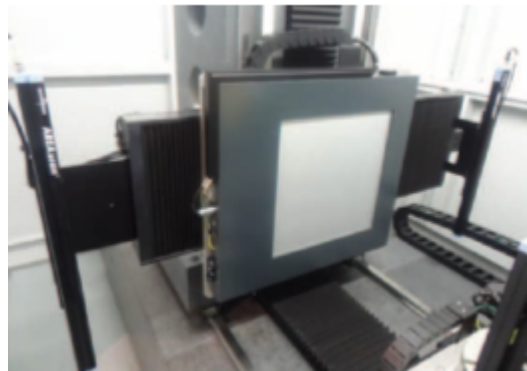
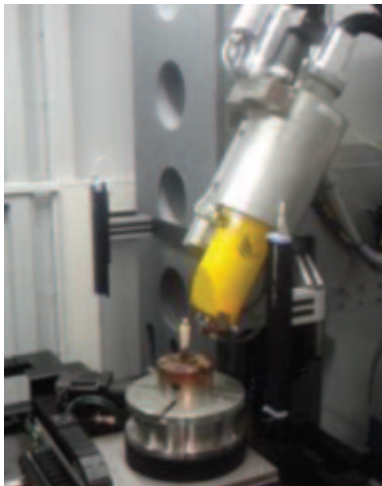


Figure 2.7 :
tube (gauche) et détecteur du V-tome-X 240D®

- D'un détecteur haute résolution (XRD 1640) présentant : (fig.2.7)
 - Résolution de 1024 à 2048 x 1024 pixels de 400 x 400 μm
 - échelle de 65 536 niveaux de gris : 16 bits
 - vitesse acquisition : 15 images/seconde
 - taille : 400 x 400 mm
 - résolution maximale des voxels : <2 μm .

L'objet à scanner est placé sur un support rotatif entre le tube à rayon X et le détecteur qui sont fixes. C'est le support qui assure la rotation de 360° de l'objet pendant l'acquisition. Pour l'étude nous avons choisi de paramétrer le tube (120kV et 300 μ A) et le récepteur de telle sorte que la résolution atteigne des voxels de 20 μ m.

Le traitement des images natives est assuré successivement par les logiciels Phoenix datos|x acquisitionCT software® et datos|x reconstruction CT software® (GE Measurement & Control, Billerica, Massachusetts, USA) installés sur un ordinateur exclusivement dédié à cette tâche. Ils permettent de convertir les images en volume 3D sous la forme d'une numérisation de nuages de points grâce à un algorithme mathématique. L'image en 3 dimensions est formée grâce à des milliers de points dont la nuance de niveau de gris reflète les reliefs et les vides.

Les acquisitions microtomographiques sont exploitées ensuite à l'aide de 3 autres logiciels :

- VG Studio 2.0® (Volume Graphics, Heidelberg, Allemagne) :
Mise en évidence le système canalaire grâce à un outil de détection de porosité et superposition des volumes radiculaires pré et post-opératoire.
- My VGL 2.0® (Volume Graphics GmbH, Heidelberg, Allemagne) : outils de mesures et de coupes (fig 2.8a).
- Focus Inspection Viewer 9.1® (Nikon, Tokyo, Japon) : superpositions, mesures, coupes et exploitation 3D (fig 2.8b).

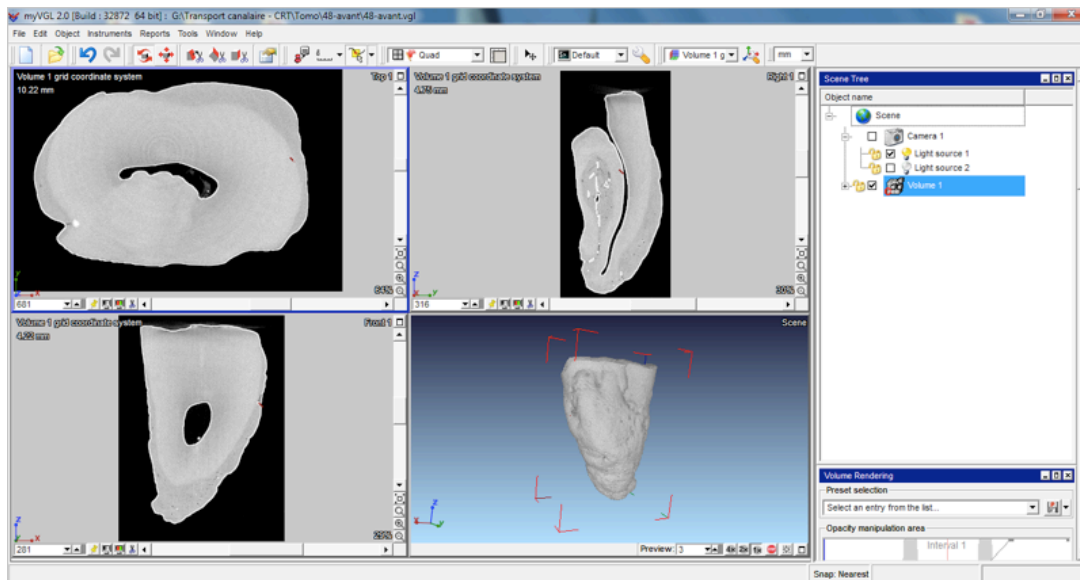


Figure 2.8a : aperçu du logiciel My VGL 2.0®.

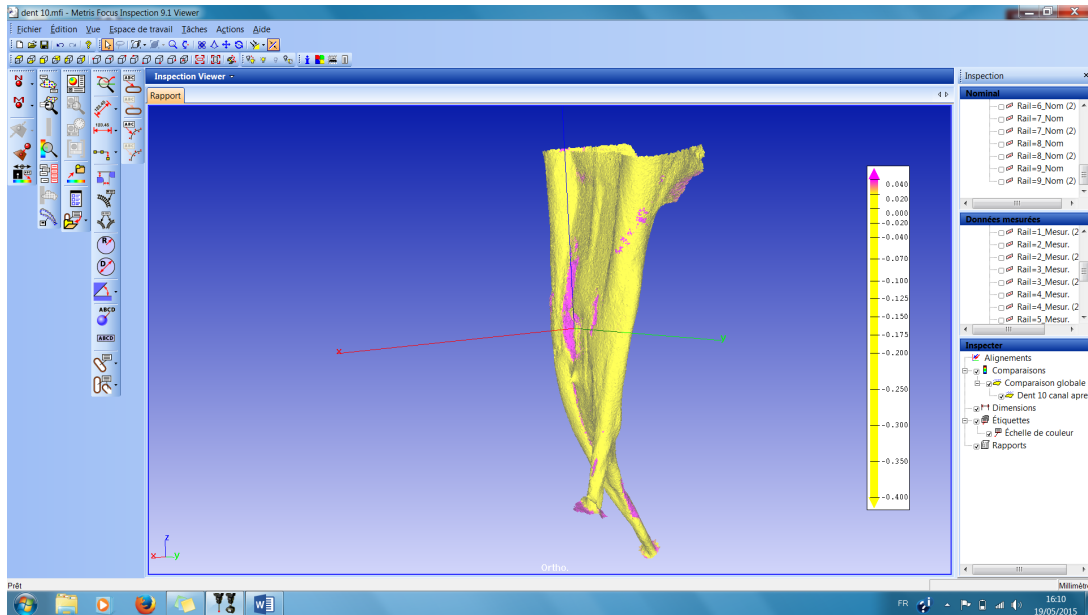


Figure 2.8b : aperçu du logiciel Focus Inspection Viewer 9.1®

2.2 Support d'évaluation

La majorité des études des effets de la préparation canalair sont réalisées sur des racines présentant des canaux courbes :

- Racines mésiales de molaires mandibulaires pour l'essentiel des articles de la littérature
- Molaires maxillaires dans une moindre mesure (Kim *et al.*, 2013 ; You *et al.*, 2011 ; Özer, 2011)
- Prémolaires (Tambe *et al.*, 2014) ou incisives maxillaires (Peters *et al.*, 2010) plus rarement.

2.2.1 Rappels sur l'anatomie des racines mésiales des molaires mandibulaires

Les molaires mandibulaires possèdent 2 racines, une racine mésiale en avant et une distale en arrière.

Ici nous n'évoquerons que l'anatomie de la racine mésiale des molaires mandibulaire dans le mesure où celles-ci ont été sélectionnées pour l'étude. Leur description anatomique permet de justifier ce choix.

2.2.1.1 Description de la morphologie externe (Woelfel et Scheid, 2007)

La racine est large dans le plan vestibulo-lingual, l'apex est large et arrondi. Elle est plus étroite dans le plan mésio-distal et l'apex est plus pointu, son diamètre diminue progressivement vers l'apex.

En vue vestibulaire :

La racine mésiale des molaires mandibulaires est courbée vers l'arrière, elle présente donc une convexité mésiale et sa partie apicale se courbe en direction distale. Cette courbure peut varier de manière importante.

En vue proximale :

Une dépression plus ou profonde apparaît sur les faces mésiale et/ou distale de la racine, elles s'étendent depuis la ligne cervicale jusqu'à l'apex ce qui indique la présence probable de 2 canaux dans la largeur de la racine : l'un vestibulaire, l'autre lingual.

Cette zone située généralement au niveau du tiers coronaire de la racine représente une zone à risque lors de la préparation canalaire des canaux mésiaux (stripping, isthme canalaire).

2.2.1.2 Description de la morphologie interne – anatomie canalaire : (Médioni et Vené, 1994)

La racine mésiale de la 1ère molaire mandibulaire contient en majorité (40%) deux canaux mésiaux séparés, l'un vestibulaire (canal Mv), l'autre lingual (canal MI) (fig.2.9 et 2.10) (type IV dans la classification de Vertucci).

Elle présente aussi fréquemment une configuration de type II (30 %) : les 2 canaux fusionnent au tiers apical (fig.2.9).

La racine mésiale est le siège de très nombreuses anastomoses transverses et de canaux latéraux fréquents.

Dans le cas de la 2ème molaire mandibulaire l'anatomie endodontique a des caractéristiques semblables à celle de la racine mésiale de la 1ère mais les variations sont plus importantes : Type II essentiellement et la configuration canalaire en C est plus fréquente.

En vue vestibulaire :

Les canaux mésiaux présentent une courbure vers distal plus ou moins importante en fonction de la courbure de la racine elle même (fig.2.9).

En vue proximale :

Les canaux mésiaux convergent en direction apicale et fusionnent parfois en un tronc commun terminal : le canal mésio-vestibulaire présente une courbure linguale alors que le canal mésio-lingual est courbé en direction vestibulaire (fig.2.9).

Ces canaux présentent donc une double courbure le long de leur trajet, dans les plans mésio-distal et vestibulo-lingual.

2.2.1.3 Courbure des canaux mésiaux des molaires mandibulaires

Schäfer a réalisé une étude sur la courbure canalaire des dents permanentes et notamment celle des canaux des racines mésiales des molaires mandibulaires (50 1ères et 50 2èmes molaires mandibulaires)

Les résultats de cette étude sont présentés dans le tableau ci-dessous : (Schäfer *et al.*, 2002)

Plan vestibulo-lingual	Canal	Angle α (°)			Rayon R (mm)		
		médian	min	max	médian	min	max
1ère molaire mandibulaire	Mv	25	9	48	10,6	4,3	27,9
	MI	22	0	44	10,6	0	21,4
2ème molaire mandibulaire	Mv	26	0	50	8,6	0	28,3
	MI	23	0	51	10,7	0	20,8

Ce point anatomique révèle l'intérêt de sélectionner les racines mésiales de ces molaires et de leurs canaux dans les études portant sur la préparation canalaire :

- racine mésiale bien individualisée et facile à séparer de la couronne et de la racine distale
- courbures canalaires dans les 3 plans de l'espace
- présence très fréquente de 2 canaux séparés Mv et MI (2 entrées canalaires, 2 foramens apicaux et 2 trajets indépendants)
- dents fréquemment extraites, donc disponibles pour les études.

2.2.2 Notion de courbure canalaire

L'évaluation de la courbure canalaire des racines mésiales des 1ères molaires mandibulaires revêt une importance capitale dans la sélection et la standardisation de l'échantillon.

2.2.2.1 Angle de courbure

L'ensemble des études utilise la mesure de l'angle de courbure canalaire exprimée en degré (°) pour caractériser la courbure canalaire des racines étudiées.

Cette mesure a été définie par Schneider selon la méthode suivante : (fig. 2.11)

- Une radiographie de la dent est réalisée selon la méthode des plans parallèles et en incidence vestibulo-buccale
- une première droite est tracée selon le grand axe du canal
- un point d'intersection entre cette droite et la courbure canalaire est mis en évidence
- une seconde droite est ensuite tracée depuis le foramen apical jusqu'à ce point d'intersection
- l'angle aigu (α) formé entre les 2 droites est mesuré à l'aide d'un rapporteur (Schneider 1971).

Cette méthode permet de définir trois types de courbure :

absence de courbure :	$\alpha < 5^\circ$
courbure faible :	$\alpha < 10^\circ$
courbure modérée :	$10^\circ < \alpha < 25^\circ$
courbure sévère :	$\alpha > 25^\circ$

Depuis, l'ensemble des auteurs utilise la mesure de l'angle de Schneider pour évaluer le degré de courbure canalaire. Cependant, un certain nombre d'objections ont été faites à cette méthode (Pruett *et al.*, 1997 ; Schäfer *et al.*, 2002) dans la mesure où il s'agit là d'une méthode arbitraire et très opérateur-dépendante, elle ni précise et ni reproductible. Il est important de prendre en compte un deuxième paramètre important définissant la courbure canalaire : le rayon de courbure.

2.2.2.2 Rayon de courbure

Pruett définit le rayon de courbure en faisant appel aux principes de la géométrie :

Il assimile la courbure canalaire à la corde d'un cercle hypothétique dont la valeur du rayon, exprimé en millimètre (fig.2.12), correspond au rayon de courbure.

Le rayon de courbure représente la manière plus ou moins abrupte dont la courbure se produit.

Plus le rayon de courbure est faible, plus la courbure est sévère (Pruett *et al.*, 1997).

Pruett établit ainsi que deux canaux peuvent avoir un angle de courbure identique tout en ayant des rayons de courbure différents et réciproquement, à rayons égaux, les angles peuvent différer. L'angle et le rayon de courbure sont 2 paramètres indépendants (fig 2.12).

La position de la courbure le long du canal est aussi importante pour ces deux paramètres : plus le départ de la courbure est apical et plus celle-ci sera marquée (Pruett *et al.*, 1997).

Reprenant ces travaux, Schäfer établit une relation mathématique pour calculer le rayon de courbure en fonction de l'angle de courbure : (fig 2.13)

- Sur une radiographie en incidence vestibulo-linguale une première droite (a) est tracée le long du grand axe du canal avant la courbure
- Un point A est placé sur la ligne (a) à l'endroit où le canal entame sa courbure

- Un point B est placé au niveau du foramen apical
- Une seconde ligne est tracée entre les points A et B, c'est la droite (b)
- L'angle aigu (α) formé entre les 2 droites est mesuré, c'est l'angle de courbure (Schneider, 1971).
- La partie courbe du canal située entre les points A et B est assimilée à l'arc d'un cercle hypothétique définie par son rayon (r). Cet arc est lui même définie par sa corde (S), la droite entre les point A et B
- Une équation trigonométrique est appliquée pour démontrer le rapport suivant :

$$R = \frac{S}{2 \sin(\alpha)}$$

avec

R : le rayon de courbure (mm)

S : la corde (mm)

α : angle de courbure (radian) $\alpha(\text{rad}) = \alpha(^{\circ}) * \pi/180$ (Schäfer et al. 2002)

Estrela a développé ensuite une méthode de calcul de la courbure canalaire sur des clichés Cone-Beam à l'aide de tracés informatiques (Estrela *et al.*, 2008) utilisant un logiciel de traitement de l'image :

- Tracé de 2 droites de 6mm de part et d'autre de la courbure selon le grand axe du canal
- Tracé des perpendiculaires à 3 mm dont l'intersection formera le centre d'un cercle dont les 2 premières droites en sont les tangentes et le 2 perpendiculaires, les rayons. (fig.2.14)
- La courbure est définie à la fois par le rayon du cercle (=rayon de courbure) et l'angle entre les 2 perpendiculaires (= angle de courbure).

Cette méthode dérive de celle décrite par Schäfer mais devrait être plus précise et reproductible dans la mesure où les tracés sont effectués par le logiciel (fig.2.15).

Il propose ensuite une classification de la courbure canalaire à partir de calculs du rayon de courbure par logiciel informatique sur cliché 3D Cone-Beam : (Estrela *et al.*, 2008)

faible rayon : $R \leq 4$ mm : courbure sévère
rayon modéré : $4 < R \leq 8$ mm : courbure moyenne
rayon large : $R > 8$ mm : courbure faible

2.3 Critères d'évaluation :

Les effets de la préparation canalaire sont évalués selon plusieurs critères :

- L'état de surface de la dentine pariétale
- Les volumes canaux, ou les volumes dentinaires éliminés
- Le déplacement canalaire
- Le Structure Model Index.

2.3.1 Déplacement canalaire

Au cours de la mise en forme canalaire, il est important de créer une conicité continue et régulière tout en conservant le trajet canalaire initial et la position du foramen apical.

Néanmoins la présence d'une courbure canalaire peut rendre difficile l'atteinte de ces objectifs. La capacité des instruments rotatifs à rester centrés dans le canal est essentielle pour assurer un élargissement correct, en évitant de fragiliser la racine et de créer un déplacement canalaire.

Il est défini par le CNEOC comme la « *déviaton iatrogène (intraradiculaire) du trajet du canal principal, due à la mémoire élastique des instruments endodontiques* » (CNEOC, 2010).

Le déplacement canalaire peut entraîner : (Ingle *et al.*, 2008 ; Gutmann et Lovdhal, 2011)

- L'élimination excessive de la dentine pariétale fragilisant la racine et pouvant entraîner une fracture.
- Le redressement du trajet canalaire
- La survenue des erreurs de préparation (butée, perforation, zipping, stripping...)
- La diminution de la longueur de travail.

Wu estime qu'au delà de 300 µm, le déplacement canalaire entraîne un défaut d'étanchéité de l'obturation, particulièrement au niveau du tiers apical (Wu *et al.*, 2000).

Peters a déterminé que le déplacement canalaire n'excède pas 150µm dans la plupart des cas et qu'en dessous de cette limite, le transport reste acceptable (Peters, 2004).

Les études de la préparation canalaire sont nombreuses et le déplacement est le paramètre le plus souvent repris par les auteurs.

Le déplacement canalaire peut être évalué selon 3 critères :

- Le transport canalaire (canal/apical transportation)
- La capacité de centrage (centering ability)
- Le redressement canalaire (straightening)

2.3.1.1 Transport canalaire

Dans son lexique des termes endodontiques, l'American Association of Endodontists (AAE, 2012) définit le transport canalaire (canal transportation, CT) ou transport apical (apical transportation) comme « *l'élimination excessive de la dentine pariétale sur l'extérieur de la courbure dans la moitié apicale du canal en raison de la tendance des instruments à revenir à leur forme droite originelle pendant la préparation canalaire* ».

2.3.1.1.1 Méthode de Gambill

La méthode proposée par Gambill est la méthode actuelle de référence modifiée par Gergi : (Gambill *et al.*, 1996 ; Gergi *et al.*, 2010).

Le déplacement canalaire est évalué en comparant la mesure de la plus courte distance entre la surface canalaire avant instrumentation et la surface radiculaire externe, en mésial et en distal, avec la même mesure après instrumentation.

Les mesures sont réalisées sur des coupes pré et postopératoires à des niveaux d'intérêt (fig.2.16).

La formule suivante est utilisée pour calculer le transport :

$$CT = (a1 - a2) - (b1 - b2)$$

a : mesures mésiales

1 : mesures préopératoires

b : mesures distales

2 : mesures postopératoires

Si le résultat du calcul est égal à 0, il n'y a pas de transport canalaire

Si en revanche le résultat est différent de 0, il y a transport :

- Résultat positif (>0) : transport canalaire en direction mésiale
- Résultat négatif (<0) : transport canalaire en direction distale.

De nombreux auteurs utilisent cette méthode d'évaluation du transport canalaire pour étudier la préparation canalaire et comparer les performances de différents systèmes. Leurs résultats permettent parfois d'évaluer la direction du transport qui diffère le long du canal (You *et al.*, 2011 ; Stern *et al.*, 2012 ; Kim *et al.*, 2013).

- 1/3 apical : transport vers mésial à l'extérieur de la courbure :

De manière assez logique du fait du redressement de l'instrument rotatif générant butée ou ovalisation apicales.

- 1/3 médian : transport vers la furcation, en distal, à l'intérieur de la courbure
C'est la zone où les instruments semblent être le mieux centrés.
- 1/3 coronaire : transport vers la furcation et le plancher, à l'intérieur de la courbure.

En général ce transport est généré du fait que l'appui des instruments est déporté vers le plancher dans les conditions cliniques.

Limites de cette méthode :

- Évaluation très opérateur-dépendante dans le choix des distances mesurées sur les coupes et donc faiblement reproductible.
- La direction du transport est évaluée uniquement dans le plan mésio-distal : évaluation 2D alors que le canal est courbé dans les 3 directions de l'espace.
- Souvent les résultats du calcul sont présentés en valeurs absolues : perte d'information sur la direction du transport.

2.3.1.1.2 Méthodes des centres de gravité

Une autre méthode existe pour quantifier le transport canalaire, elle a été développée par Peters (Peters *et al.*, 2001). Il s'agit de calculer sur chacune des coupes tomographiques le centre de gravité du canal avant et après instrumentation grâce à un logiciel informatique. Ensuite le transport canalaire est calculé en mesurant la distance entre les 2 centres de gravité pré et postopératoires sur chaque coupe.

Une moyenne du transport est calculée par la suite pour les tiers apical, médian et coronaire (Paqué *et al.*, 2011 ; Zhao *et al.*, 2014 ; Marceliano-Alves *et al.*, 2014).

Limite de cette méthode :

L'évaluation est uniquement quantitative. Le transport est mesuré en μm mais sa direction n'est pas évaluée. En revanche, les calculs sont numériques et donc non opérateur-dépendants contrairement à la méthode précédente.

2.3.1.2 Capacité de centrage

La capacité de centrage (Centering Ability : CA) est la capacité d'un instrument à conserver une position centrale dans le canal et de s'y maintenir durant la préparation de manière à éviter de produire un transport canalaire.

Gambill s'appuie sur son calcul du transport pour proposer une formule permettant d'évaluer le centrage (Gambill *et al.*, 1996 ; Gergi *et al.*, 2010) :

$$CA = \frac{(a1 - a2)}{(b1 - b2)} \text{ ou } \frac{(b1 - b2)}{(a1 - a2)}$$

Dans cette formule le numérateur sera la différence la plus faible, le dénominateur la plus importante de telle sorte que le score sera supérieur ou égal à 1.

CA = 1 centrage parfait, pas de transport canalaire

CA < 1 défaut de centrage, transport canalaire

De nombreuses études ont été réalisées pour déterminer les paramètres instrumentaux influençant leur capacité de centrage :

- Alliage de fabrication des instruments : acier inoxydable ou alliage Ni/Ti
- Design de l'instrument : section, conicité et pointe
- Technique de préparation : manuelle, rotation continue ou réciprocité

Une revue de la littérature a permis de conclure que la capacité de centrage est supérieure pour les instruments présentant les caractéristiques suivantes (Kandaswamy *et al.*, 2009) :

- Alliage Ni/Ti
- Conicité et section (=diamètre) plus faible
- Pointe non travaillante
- Préparation en réciprocité > rotation continue > manuelle (Simon *et al.*, 2012 ; Claisse *et al.*, 2014).

2.3.1.3 Redressement canalaire

La préparation canalaire induit un redressement du trajet initial par transport canalaire, l'angle de courbure diminue et le rayon de courbure augmente en conséquence.

Le redressement canalaire (ou curve straightening) est mesuré en comparant l'angle (α en °) ou le rayon de courbure (R en mm) pré et postopératoire.

Ces mesures sont effectuées sur des coupes (CBCT) selon la méthode d'Estrela (fig.2.15) (Estrela *et al.*, 2008 ; Özer, 2011 ; Capar *et al.*, 2014) et exprimées selon la mesure en ° ou en mm.

Une autre méthode utilise la superposition de clichés radiographiques pré et postopératoires instruments en place. (Bürklein *et al.*, 2014 ; Saber *et al.*, 2014). Cette superposition est réalisée à l'aide d'un programme de traitement de l'image (fig.2.17) et est permise par un système de repositionnement précis de la racine dans le système d'acquisition fixe (distance, incidence, parallélisme...).

2.3.2 Surfaces dentinaires

L'instrumentation des parois de la dentine canalaire est évaluée de 2 manières :

- Aires de la surface dentinaire pré et post instrumentation
- Pourcentage des surfaces non instrumentées.

2.3.2.1 Modification de l'aire des surfaces dentinaires.

L'aire des parois canalaire avant et après instrumentation est calculée à l'aide d'un logiciel de traitement des reconstitutions 3D (Cone Beam ou μ -CT) (Gergi *et al.*, 2014).

L'élargissement canalaire est ainsi mesuré et peut permettre de comparer les performances de mise en forme de différents systèmes instrumentaux de préparation canalaire.

2.3.2.2 Pourcentage des surfaces non instrumentées

Le pourcentage est déterminé en évaluant les surfaces dentinaires postopératoires correspondant strictement aux images préopératoires. Ce paramètre exprime le pourcentage du nombre de voxels de surface inchangés sur le nombre total de voxels de surface (Gergi *et al.*, 2014).

De nombreuses études récentes ont montré l'impossibilité pour les systèmes modernes de préparer la totalité des surfaces canalaires (fig.2.18), selon les auteurs entre 20 et 40 % des surfaces ne sont pas instrumentées lors de la mise en forme canalaire (Hülsmann, 2013), ce pourcentage est réduit à 8,6% pour le Self Adjusting File (SAF) (Peters *et al.*, 2010).

Ce paramètre est donc extrêmement intéressant pour comparer la capacité d'un instrument à nettoyer les surfaces canalaires (fig.2.19).

2.3.3 Volumes dentinaires

Le volume de dentine éliminé par la préparation est déterminé en mm^3 en soustrayant le volume canalaire préopératoire au volume canalaire postopératoire (fig. 2.20).

Ces volumes ont été calculés grâce au logiciel de traitement de l'image après reconstruction 3D des coupes tomodensitométriques issues de Cone-Beam ou μ -CT (Capar *et al.*, 2014).

2.3.4 Géométrie canalaire : Structure Model Index

Le Structure Model Index ou SMI est un paramètre qui permet d'estimer la caractéristique plane ou ronde d'une structure 3D.

Ce paramètre a été décrit initialement par Hildebrand pour évaluer la microarchitecture osseuse (Hildebrand et Rüegsegger, 1997), puis repris dans les études de la préparation canalaire.

Le SMI est calculé, par un logiciel de traitement de l'image 3D, d'après la formule suivante:

$$SMI = 6 \cdot \frac{(BV \frac{dS}{dr})}{BS^2}$$

SMI = 0 : structure plane

SMI = 3 : structure ronde (SMI = 4 : sphère parfaite)

0 < SMI < 3 : forme intermédiaire

Des études comparent les scores de SMI pré et postopératoires :

- Le SMI permet de caractériser la forme initiale de la section canalaire et son évolution après instrumentation : forme « en ruban » s'arrondissant après préparation. (Paqué *et al.*, 2009),
- c'est un bon indicateur de la création d'une conicité régulière le long du canal puisqu'il évalue la convexité des parois canalaire (Marceliano-Alves *et al.*, 2014),
- le SMI augmente après instrumentation puisque le canal préparé devient nécessairement plus rond du fait de la mise en forme (You *et al.*, 2011 ; Kim *et al.*, 2013).

Chapitre III : PROPOSITION D'UNE NOUVELLE METHODE D'ETUDE TRIDIMENSIONNELLE DU TRANSPORT CANALAIRE.

3.1 Revue de la littérature

Le transport canalaire occasionné lors de la mise en forme des canaux courbes est l'un des critères de comparaison principaux des performances de préparation canalaire des différents systèmes rotatifs mis sur le marché.

Depuis 15 ans, l'étude de ce critère d'évaluation est largement retrouvée dans la littérature scientifique. Nous avons sélectionné dans les tableaux ci-après les publications des 5 dernières années qui comparent la mise en forme canalaire de différents systèmes instrumentaux grâce au transport canalaire à l'aide d'imageries μ CT ou CBCT.

Les tableaux 3.1 et 3.2 reprennent les principales publications de ces 5 dernières années pour lesquelles la mise en forme canalaire est évaluée en fonction du transport canalaire à l'aide de la microtomographie ou du Cone Beam.

Tableau 3.1 : Revue de la littérature récente de l'évaluation du transport canalaire à l'aide de la microtomographie (μ CT).

Auteur - Date	Résolution	Type de racine (nombre de canaux)	Critères d'évaluation	Niveaux de coupe	Courbure
Gergi <i>et al.</i> , 2014a	20 μ m	24 M Md (48)	CT, CA	1/3 AMC	25-35°
Gergi <i>et al.</i> , 2014b	20 μ m	24 M Md (48)	CT, CA, S%, V	1/3 A et C	25-35°
Junaid <i>et al.</i> , 2014	35 μ m	20 M Md (40)	CT	1,2,3,4,5mm	20°
Marceliano- Alves <i>et al.</i> , 2014	70 μ m	32 M Md (64)	CT, SMI, V et S	1/3 AMC	10-20°
McRay <i>et al.</i> , 2014	35 μ m	27 M Md (54)	CT, CA	1,3,5,7mm	20-40
Vallaeys <i>et al.</i> , 2014	20 μ m	36 M Md (72)	CT, CA	1,3,5,7mm	25-35° 5-7,5mm
Zhao <i>et al.</i> , 2014	30 μ m	36 M Md (108)	CT, S%, V	1/3 AMC	5-35°
Kim <i>et al.</i> , 2013	16 μ m	20 M Mx (40)	CT, SMI	1,2,3,5mm	20-45°
Stern <i>et al.</i> , 2012	28 μ m	30 M Md (60)	CT, V	1/3 AMC	20-45°
Freire <i>et al.</i> , 2011	11,84 μ m	15 M Md (30)	CT, CA	1,2,3,4,5,6,7 mm	25-35° <10 mm
You <i>et al.</i> , 2011	16 μ m	20 M Mx (40)	CT, S, V, SMI	1,2,3,5mm	20-45°
Paqué <i>et al.</i> , 2011	20 μ m	25 M Md (50)	CT, S%, V	1/3 AMC	20-40° (+/- 9mm)

Tableau 3.2 : Revue de la littérature récente de l'évaluation du transport canalaire à l'aide du Cone Beam (CBCT).

Auteur - Date	Résolu- tion	Type de racine (nombre de canaux)	Critères d'évaluation	Niveaux de coupe	Evaluation de la courbure
Arora <i>et al.</i> , 2014	?	40 M Md (40)	CT, CA	3,5,7,9,11mm	20-40°
Capar <i>et al.</i> , 2014	75µm	120 M Md (120)	CT, CA, S, V	2, 5, 8mm	20-40° 3,5-10,8mm
Elnaghy et Elsaka, 2014	125µm	60 M Md (60)	CT, CA, V	3, 5, 7mm	25-35°
Tambe <i>et al.</i> , 2014	?	30 PM Md (30)	CT, CA	3, 8,15mm	0-10°
Elsherief <i>et al.</i> , 2013	125µm	42 M Md (81)	CT, CA,	1/3 AMC	15-45°
Hashem <i>et al.</i> , 2012	130µm	40 M Md (40)	CT, CA, V	1.3, 2.6, 5.2, 7.8mm	25-40°
Özer, 2011	125µm	60 M Mx (60)	CT	2, 3, 4mm	25-47°
Gergi <i>et al.</i> , 2010	?	? (90)	CT, CA	1/3 AMC	25-35° <10mm
Oliveira <i>et al.</i> , 2009	?	40 M Mx(40)	CT, CA	1/3 A	22-38° 3,9-11,42mm
Pasternak-Júnior <i>et al.</i> , 2009	200µm	30 M Mx (27)	CT, CA	3(A), 6(M), 9(C)mm	32-49° 5,5-9,9mm

3.2 Position du problème

La majorité des articles utilise la méthode de Gambill, c'est la méthode de référence, largement éprouvée dans la littérature, mais celle-ci présente des limites :

- Evaluation très opérateur-dépendante dans le choix des distances mesurées manuellement sur les coupes et donc faiblement reproductible.
- La direction du transport est évaluée uniquement dans le plan mésio-distal : évaluation 2D alors que le canal est courbé dans les 3 directions de l'espace.

Les résultats sont souvent présentés en valeurs absolues : perte d'information sur la direction du transport.

- Le transport canalaire n'est évalué que sur des coupes à des niveaux d'intérêts (1, 3, 5 mm de l'apex par exemple), la méthode ne permet pas d'en faire une évaluation sur l'ensemble du canal.

Face à ces limites, il nous paraît judicieux de réfléchir à une nouvelle méthode qui permettrait une évaluation du transport canalaire et serait :

- Reproductible et moins opérateur dépendante
- Tridimensionnelle, explorant le transport dans tous les plans de l'espace
- Globale c'est à dire sur l'ensemble du canal.

3.3 Description de la méthode

3.3.1 Superposition des volumes

Pour explorer les effets de la préparation canalaire après instrumentation 2 acquisitions de tomographie à faisceau conique (μ CT et CBCT) sont réalisées avant et après instrumentation.

Contrairement à la méthode de Gambill, l'évaluation ne s'effectuera plus sur chacune des acquisitions mais sur la superposition des volumes issus de ces acquisitions.

Le logiciel VGstudio 2.0® (Volume Graphics GmbH, Heidelberg, Allemagne) permet de reconstruire les volumes radiculaires (surfaces externes) et canalaire pré et postopératoires.

Ces 2 volumes sont individualisés en deux nuages de points distincts :

- La surface radiculaire n'est pas intéressée par la préparation canalaire, elle est donc constante sur les deux volumes et peut servir de référence lors de la superposition des volumes pré et postopératoires.
- Les surfaces canalaires sont modifiées puisque instrumentées elles peuvent donc être comparées par superposition des volumes pré et postopératoires.

La superposition des volumes est réalisée. Elle est ensuite analysée grâce au logiciel Focus Inspection 9.1® (Nikon, Tokyo, Japon). Les nuages de points de la surface radiculaire se repositionnent parfaitement ce qui permet de superposer le nuage de points du canal instrumenté sur celui du canal initial.

Les volumes sont orientés dans l'espace de telle sorte que (fig. 3.1) :

- axe x (rouge) : mésio-distal, dans l'épaisseur de la racine,
- axe y (vert) : vestibulo-lingual, dans la largeur de la racine,
- axe z (bleu) : corono-apical, sur la longueur de la racine.

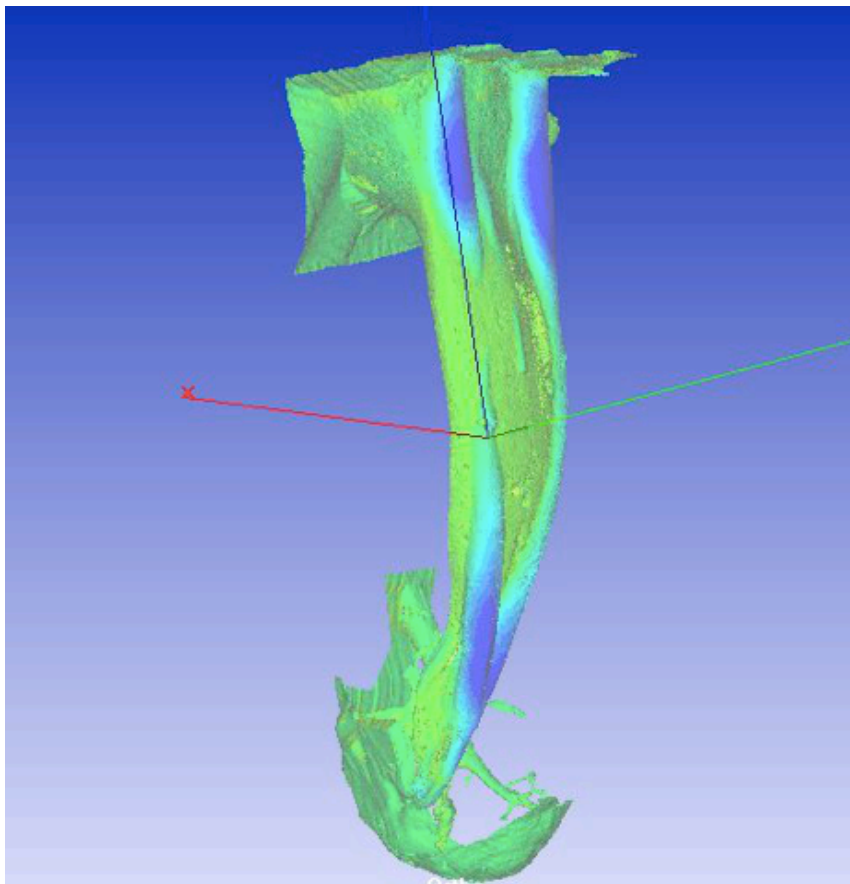


Figure 3.1 : Volume superposé et orienté dans Focus Inspection 9.1®

L'analyse de la superposition permet de mettre en évidence la déviation de chacun des points du volume canalaire de sa position préopératoire (dite « nominale ») à sa position postopératoire (dite « mesurée »). C'est le logiciel qui calcule grâce à un algorithme mathématique la correspondance entre points mesurés et points nominaux : il associe à un point nominal le point mesuré situé à la plus courte distance (déviations), en général c'est une projection perpendiculaire à la tangente à surface du point nominatif.

Chaque point, nominal ou mesuré, est défini par ses coordonnées dans l'espace (exemple : Nom. x, Nom. y, Nom. z). Ainsi entre les coordonnées des points nominal et mesuré, la déviation peut être exprimée sur les 3 axes (vecteurs : Dev x, Dev y et Dev z) et dans les 3 directions de l'espace (somme des 3 vecteurs : Dev 3D).

Le logiciel fournit l'ensemble de ces données dans un classeur Excel (Redmond, WA, USA).

Parmi ces données nous retiendrons essentiellement :

- « Dev. 3D » : la déviation 3D exprimant le déplacement de chaque point dans l'espace depuis sa position nominale jusqu'à sa position mesurée. C'est le travail instrumental en chaque point.
- « Dev. X » : la déviation sur l'axe x (mésio-distal) c'est à dire le déplacement du point entre sa coordonnée x nominale (Nom. x) à sa coordonnée x mesurée (Mes. x).
Son intérêt est de pouvoir orienter le travail instrumental sur l'axe mésio-distal en fonction de l'orientation de l'axe X. Elle donne une idée du transport canalaire et de son orientation.

Dans la formule de Gambill, « Dev. 3D » correspond à la différence entre les plus courtes distances « canal-surface » pré et postopératoires. Cette donnée est calculée directement par le logiciel :

$$M1 - M2 = \text{Dev. 3D (M)}$$

$$D1 - D2 = \text{Dev. 3D (D)}$$

$$CT = (M1 - M2) - (D1 - D2) = \text{Dev. 3D (M)} - \text{Dev. 3D (D)}$$

- « Nom. z » : il s'agit des coordonnées des points nominaux sur l'axe z (axe corono-apical) qui permettent de classer les points selon leurs niveaux le long de la racine (ex : tiers apical).

3.3.2 Notion de déviation

Pour chaque point, la déviation (= Dev. 3D) représente le trajet, la distance entre les points nominatifs et mesurés correspondants, c'est à dire le travail instrumental, la préparation canalaire en ce point.

La déviation en un point est exprimée en mm ou μm et sa valeur doit être négative (> 0) pour mesurer un retrait de matière, un élargissement canalaire, lors de la mise en forme.

Si sa valeur est nulle (= 0), les points nominal et mesuré coïncident, il n'y a pas eu de préparation en ce point.

Néanmoins la déviation est parfois positive et signe une apposition, un ajout de matière, après instrumentation. Cette apposition est contradictoire et théoriquement impossible, il s'agit alors soit d'un défaut d'élimination de la boue dentinaire ou de débris plus importants issus de la préparation, soit d'un défaut de superposition.

Il est important à ce stade de bien distinguer déviation et transport :

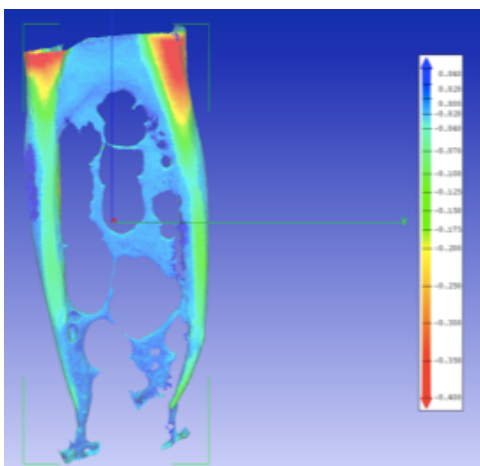
- La déviation exprime l'intensité de la préparation en un point du volume
- Le transport est défini dans un plan et résulte de la différence entre les déviations de 2 points antagonistes dans ce plan : formule de Gambill
- Le transport est toujours inférieur ou égal à une déviation.

3.3.3 Cartographie de la préparation canalaire.

Pour chaque point, la déviation tridimensionnelle entre sa position nominale (avant instrumentation) et mesurée (après instrumentation) donne la largeur de la préparation canalaire en ce point.

Ainsi, une cartographie de l'intensité de la préparation peut être réalisée sur l'ensemble du volume canalaire permettant de mettre en évidence des zones plus ou moins instrumentées (fig. 3.2).

L'intensité du travail instrumental (c'est à dire la déviation 3D) est mis en évidence sur la carte par un code couleur, des couleurs froides (bleu) sont affectées aux zones les moins travaillées et des couleurs chaudes (rouge) le sont aux zones les plus instrumentées.



*Figure 3.2 :
exemple de cartographie
couleur de l'intensité du travail
instrumental.*

3.3.3.1 Etalonnage de l'échelle

Pour préciser la cartographie de la mise en forme canalaire une échelle de couleur doit être définie et justifiée au regard de plusieurs considérations de qualité de préparation.

La préparation doit être suffisante pour permettre l'élimination de la dentine pariétale infectée et assurer une conicité régulière compatible avec l'obturation sans pour autant être excessive, non économe en tissus, fragilisant la racine et compromettant l'étanchéité apicale de l'obturation (*Simon et al.*, 2012).

Pour ce faire, 2 impératifs ont été pris en compte :

- Profondeur de la dentine pariétale infectée, à éliminer
- Etanchéité apicale de l'obturation en cas de transport canalaire.

3.3.3.1.1 Dentine pariétale infectée

Il existe plusieurs études de la pénétration bactérienne dans les tubuli dentinaires en microscopie électronique (fig. 3.3 et 3.4) dont les résultats varient beaucoup selon la méthode :

In Vivo : dents extraites présentant une pathologie pulpaire dont la dentine pariétale est observée au microscope pour mesurer la profondeur de la colonisation bactérienne,

- 10 à 150 μm sur pulpe nécrotique selon Sen (*Sen et al.*, 1995),
- 375 μm maximum (parodontite apicale) pour Peters (*Peters et al.*, 2001a).

In Vitro : racines extraites, instrumentées, contaminées par *Enterococcus faecalis* et mises en culture.

- Autour de 200 μm pour les estimations basses (*Chivatxaranukul et al.*, 2008 ; *Al-Nazhan et al.*, 2014).
- Au delà de 600 μm au maximum (*Parmar et al.*, 2011 ; *Ran et al.*, 2015).

Ces études in vitro montrent une pénétration bactérienne extrêmement profonde (fig. 3.5) mais les conditions expérimentales favorisent cette pénétration (préparation canalaire, culture, un seul germe...).

Nous retiendrons les résultats des études in vivo. Un travail compris entre 150 et 300 μm semblerait éliminer suffisamment de dentine infectée, tout en respectant l'impératif d'économie tissulaire.

3.3.3.1.2 Transport canalaire et étanchéité apicale

Wu et al. ont démontré qu'un transport canalaire dans le tiers apical dépassant 300 μm réduit l'étanchéité de l'obturation (*Wu et al.*, 2000).

Peters précise qu'un transport canalaire en deçà de $150\mu\text{m}$ n'a pas de conséquence sur la qualité préparation canalaire (Peters, 2004).

3.3.3.2 Proposition d'une échelle

Focus Inspection propose une échelle à 16 nuances de couleur que nous avons paramétrées en fonction de l'instrumentation des surfaces (fig. 3.6) de manière à faire ressortir 4 grands domaines :

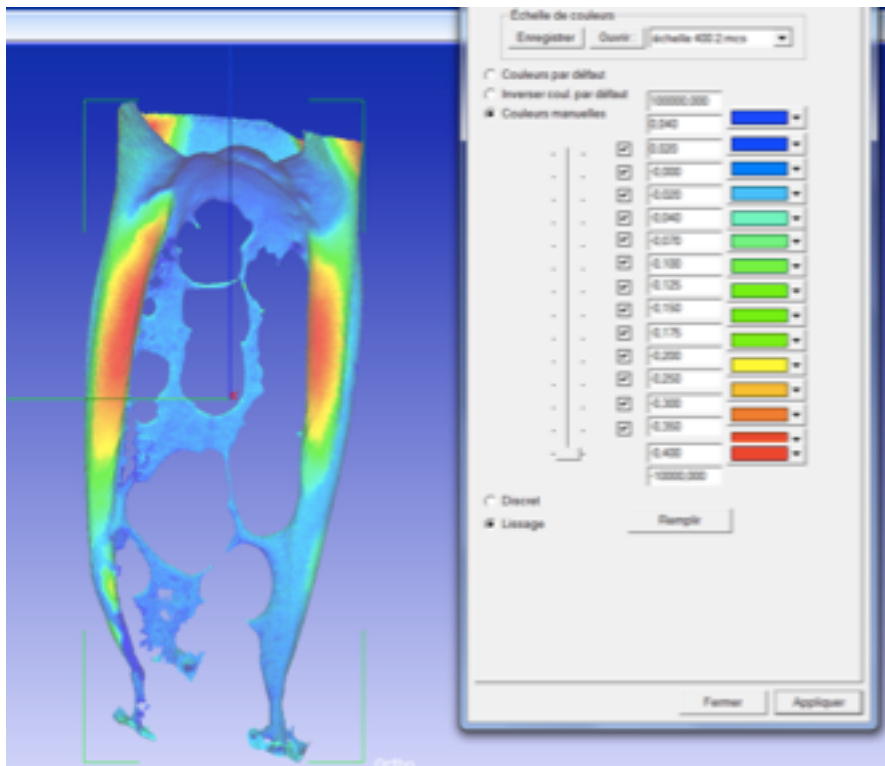


Figure 3.6 : Echelle de cartographie proposée dans ce travail.

- DOMAINE BLEU : zones pas ou peu instrumentées de $> + 40 \mu\text{m}$ à $- 40 \mu\text{m}$
($> + 40 \mu\text{m}$, de 20 à 40 μm , de 0 à 20 μm , de 0 à - 20 μm , de -20 à -40 μm)

Ces domaines sont situés de part et d'autre de 0. La résolution des acquisitions au μCT étant de 20 μm , une marge d'erreur de 2 voxels (= 40 μm) est définie autour de 0, à la précision du voxel et de celle du repositionnement lors de la superposition.

Dans ce domaine, la préparation dans les zones accessibles à l'instrumentation est insuffisante voire inexistante, en revanche les zones non accessibles (isthme, réseau secondaire et accessoire) y sont naturellement retrouvées du fait de l'impossibilité de mise en forme (fig.3.7).

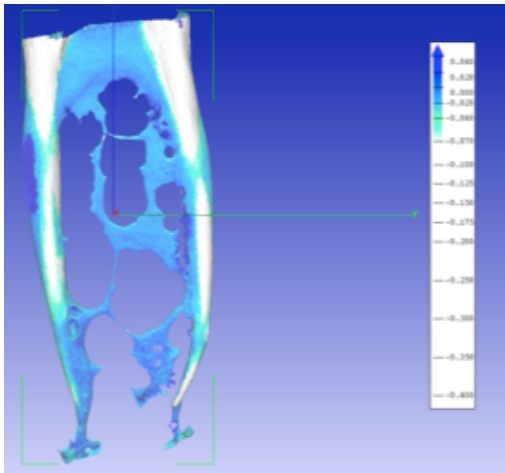


Figure 3.7 :
Zones peu ou pas instrumentées,
de $> + 40 \mu\text{m}$ à $- 40 \mu\text{m}$.

- DOMAINE VERT : zones instrumentées de -40 à $-150 \mu\text{m}$

(de -40 à $-70 \mu\text{m}$, de -70 à $-100 \mu\text{m}$, de -100 à $-125 \mu\text{m}$, de -125 à $-150 \mu\text{m}$),

On retrouve ici la valeur de $150 \mu\text{m}$ en deçà de laquelle un transport canalaire ne pose pas de problème (Peters 2004). Le travail instrumental dans ce domaine est tout à fait satisfaisant, l'élimination de la dentine pariétale infectée est relativement bonne (fig. 3.8).

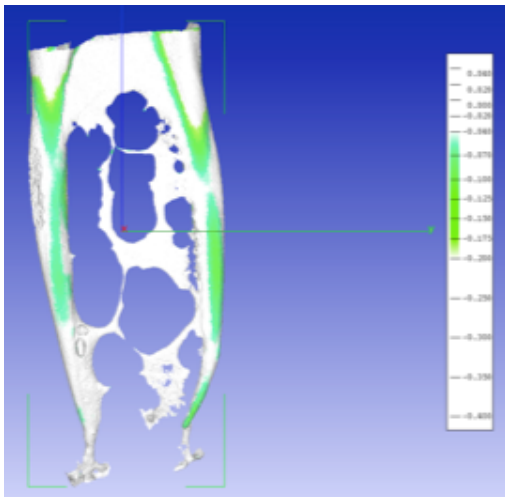


Figure 3.8 :
zones instrumentées
de -40 à $-150 \mu\text{m}$.

- JAUNE : zones très instrumentées de -150 à $-300 \mu\text{m}$

(de -150 à $-175 \mu\text{m}$, de -175 à $-200 \mu\text{m}$, de -200 à $-250 \mu\text{m}$, de -250 à $-300 \mu\text{m}$),

Ce domaine marque une zone de tendance à la sur-instrumentation et un risque accru de transport canalaire, en revanche l'élimination de la dentine infectée reste satisfaisante (fig. 3.9).

- ROUGE : zones excessivement travaillées de -300 à $> 400 \mu\text{m}$
(de -300 à $-350 \mu\text{m}$, de -350 à $-400 \mu\text{m}$, et $> 400 \mu\text{m}$).

Au delà de $300 \mu\text{m}$, le risque de transport canalaire ayant des conséquences sur l'obturation est inacceptable (Wu et al. 2000). De plus il y a une instrumentation excessive des parois canalaire (fig. 3.9) non économe, potentiellement délabrante et fragilisant la racine (Simon *et al.*, 2012).

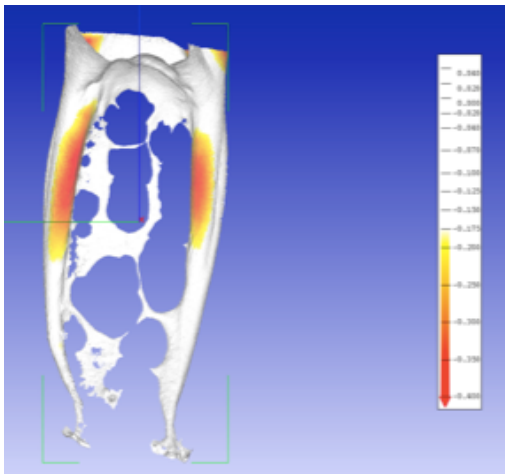


Figure 3.9 :
zones très instrumentées
de -150 à $-300 \mu\text{m}$ (jaune)
et zones excessivement travaillées
de -300 à $> 400 \mu\text{m}$ (rouge).

L'interrogation du logiciel Focus Inspection nous donne ainsi le nombre et le pourcentage de points situés dans chacun de ces domaines. Il est important cependant de bien éliminer les points dont la déviation est positive ($> 40 \mu\text{m}$), zones d'erreur (fig. 3.10), avant de calculer les pourcentages relatifs à chaque domaine.

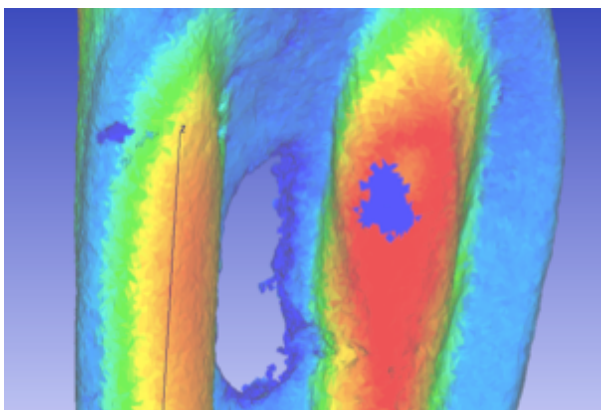


Figure 3.10 :
Débris dentinaire non éliminé
(bleu) apposé sur une zone très
instrumentée (rouge)

Grâce à cette méthode de cartographie de la préparation canalaire, il est possible d'identifier les surfaces instrumentées ou non et de différencier les surfaces selon l'intensité de la préparation canalaire. Cette méthode permet une analyse tridimensionnelle quantitative et qualitative de la préparation canalaire sur l'ensemble du volume canalaire, à tout niveau et dans les 3 plans de l'espace.

Il est possible d'affiner l'analyse par tiers (apical, moyen et/ou coronaire) en exploitant les données issues du tableur.

3.3.4 Création d'étiquettes.

Le logiciel Focus Inspection permet de sélectionner n'importe quel point du volume (fig 3.11) pour en mesurer et analyser directement les paramètres (Dev. x, Dev. 3D...), c'est la création d' « étiquettes » :

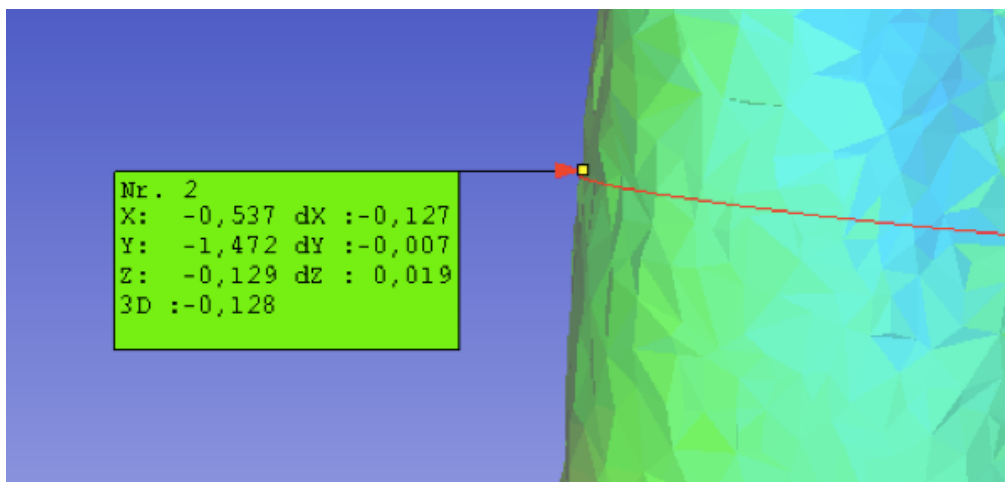


Figure 3.11 : création d'une étiquette en un point et visualisation des paramètres.

L'intérêt est de pouvoir obtenir n'importe quelle information sur n'importe quel point sur l'ensemble du volume, les paramètres sont calculés là encore par le logiciel. Ainsi les résultats sont absolument reproductibles et non opérateur-dépendants.

Grâce aux étiquettes, la méthode de Gambill peut être utilisée en apposant, à un niveau précis et dans le plan mésio-distal, une étiquette au point le plus mésial et au point le plus distal, puis en appliquant la formule suivante :

$$CT = (M1 - M2) - (D1 - D2) = \text{Dev. 3D (M)} - \text{Dev. 3D (D)}$$

$$CA = (M1 - M2) / (D1 - D2) = \text{Dev. 3D (M)} / \text{Dev. 3D (D)} \text{ ou inversement.}$$

Cette méthode dérivée de celle proposée par Gambill est ainsi moins opérateur-dépendante et plus reproductible dans la mesure où l'opérateur ne vient sélectionner qu'un seul point, le logiciel calculant la mesure et la présentant directement sur l'étiquette.

3.4 Evaluation de la nouvelle méthode

La méthode proposée par Gambill est la référence communément admise par la communauté scientifique, elle est reprise dans la plupart des études évaluant la préparation canalaires à travers le transport canalaires. La nouvelle approche que nous envisageons, tout en s'appuyant sur la méthode Gambill largement éprouvée, propose de rendre cette méthode performante, reproductible et tridimensionnelle.

Pour évaluer la nouvelle approche, nous avons comparé ses résultats avec ceux de la méthode de Gambill (fig.3.12) :

- Sur coupe, à des niveaux d'intérêt : 1, 3 et 5 mm de l'apex (fig.3.13),
- Mesures en mésial et en distal selon les deux méthodes,
- Calcul des CT et CA selon les formules de Gambill.

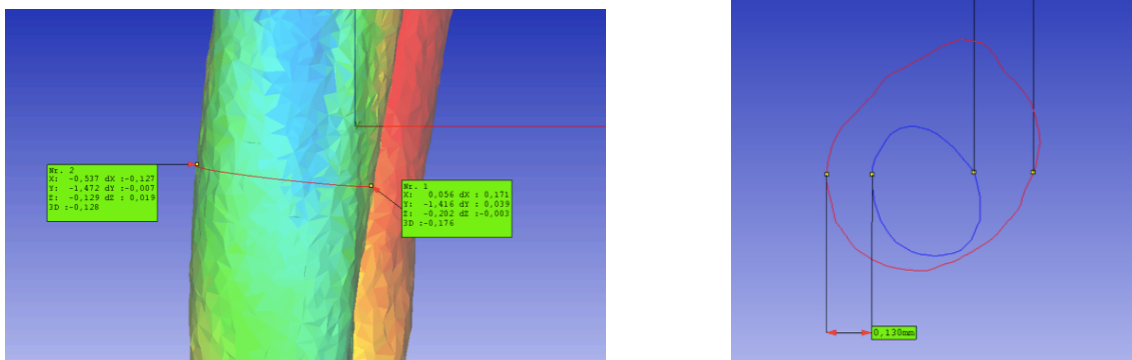


Figure 3.12 : mesures selon les 2 méthodes au même niveau, étiquettes à gauche et Gambill à droite (en bleu coupe préop. et en rouge coupe postop.)

Les coupes ont été réalisées perpendiculairement à un axe z courbé, adapté le long de la courbure de chaque canal pour plus de précision.

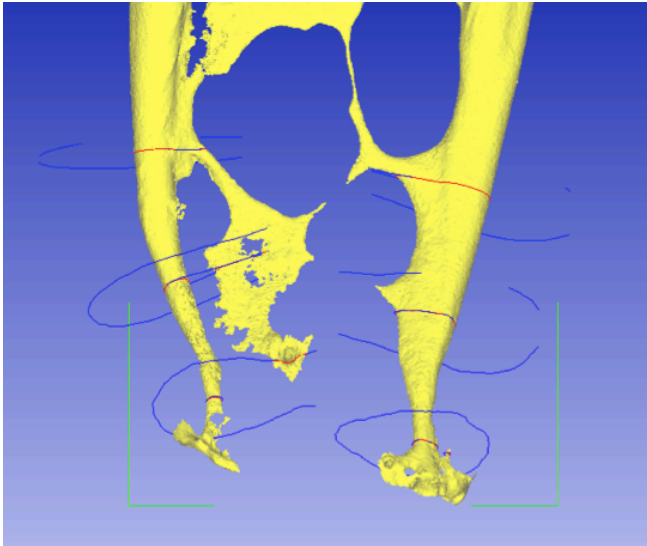


Figure 3.13 :
Coupes à 1, 3 et 5 mm de l'apex

Les résultats de cette évaluation apparaissent dans l'étude présentée au chapitre IV.

CHAPITRE IV : ETUDE DES EFFETS DE LA PREPARATION CANALAIRE A L'AIDE DE LA MICROTOMOGRAPHIE : Analyse comparative innovante de 3 systèmes rotatifs en NiTi.

4.1 Objectifs.

Cette étude répond à 3 objectifs :

- Utiliser la précision de la microtomographie et ses capacités de reconstruction 3D.
- Evaluer la mise en forme canalaire de 3 systèmes de préparation assistée : WaveOne®, ProTaper Next® et un prototype,
 - Comparer leurs performances de préparation selon le transport canalaire et la capacité de centrage
 - Réaliser une étude quantitative et qualitative des surfaces instrumentées,
- Introduire une nouvelle approche de la méthode de Gambill.

4.2 Matériels et Méthodes

4.2.1 Sélection de l'échantillon :

Nous avons examiné 142 premières ou deuxièmes molaires mandibulaires humaines parmi la réserve du département d'Odontologie Conservatrice et Endodontie de l'UFR d'Odontologie de Brest. Les raisons de leur extraction ne sont pas connues.

Les critères d'inclusion sont les suivants :

- présence de 2 canaux (mésio-vestibulaire et mésio-lingual) dans la racine mésiale.
- racine mésiale de Type II de Vertucci (2 entrées distinctes et 2 apex séparés).
- angle de courbure compris entre 20 et 40°.
- rayon de courbure compris entre 4 et 9 mm.

Les critères d'exclusion sont :

- Canaux en S ou canal unique, fusion canalaire, chiasma.
- Apex unique, apex ouvert.
- Canaux instrumentés et/ou obturés.
- Canaux minéralisés, racine résorbée.
- Double courbure.

Ces critères sont évalués après observation à l'œil nu et analyse radiographique (Kodak Dental Imaging Software 6.11.7.0).

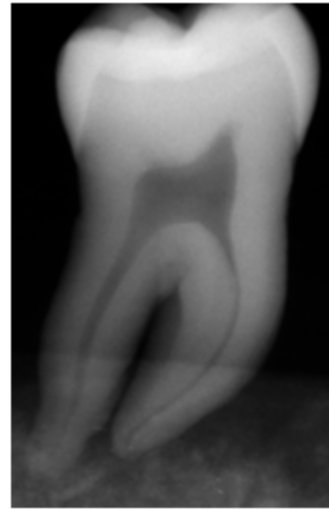


Figure 4.1 (gauche) : Dispositif de radiographie extra orale.

Figure 4.2 (droite) : Radiographie en incidence vestibulo-linguale.

Chaque molaire est radiographiée selon 2 incidences, l'une vestibulo-linguale (vue clinique, fig. 4.2), l'autre mésio-distale (vue proximale, fig. 4.4). La dent (ou la racine) est placée sur un socle en cire (fig. 4.1) par sa racine de telle sorte que le grand axe de la racine soit parallèle au capteur Kodak RVG 5100® fixé sur ce même socle et perpendiculaire au faisceau de rayons X issu du tube radiographique (300kHz, 60-70kV) Kodak 2200 Carestream Dental® (Kodak, Rochester, NY, USA). La molaire se situe à égale distance du tube et du capteur, celle-ci est réduite au minimum pour une meilleure résolution.

Incidence vestibulo-linguale : (fig 4.2)

Elle permet de déterminer l'angle de courbure α des canaux de la racine mésiale, déterminé en fonction de la méthode de Schneider (Schneider, 1971) ainsi que le rayon de courbure R d'après la formule de Schäfer (Schäfer *et al.*, 2002). Des incidences légèrement décalées en mésial et en distal selon le principe de Clark permettent de mettre en évidence l'existence de 2 canaux en évitant la superposition des images des lumières canalaires. Elles permettent aussi d'en apprécier globalement l'anatomie.

Incidence mésio-distale : (fig 4.4)

Ces clichés sont réalisés après séparation de la racine mésiale du reste de la molaire et cathétérisme initial à l'aide de limes K 08 (fig. 4.3). Les limes sont laissées en place de manière à s'assurer de la séparation des deux trajets canalaires et pour permettre d'évaluer les longueurs de travail.

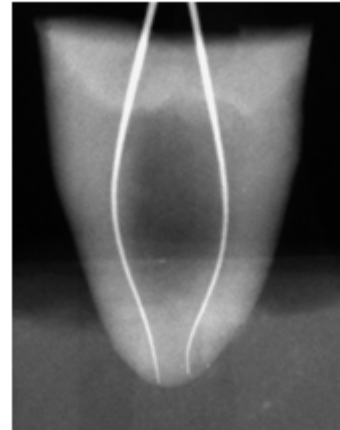


Figure 4.3 (gauche) : Dispositif de radiographie extra orale, lime en place.

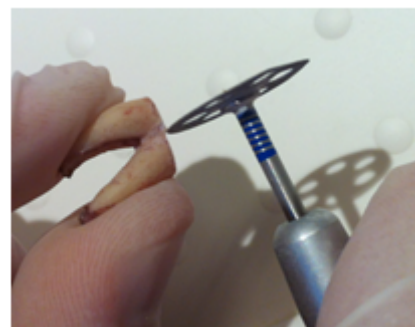
Figure 4.4 (droite) : Radiographie lime en place en incidence mésio-distale.

Ainsi 45 racines mésiales de 1ère et 2ème molaires mandibulaires ont été sélectionnées pour être incluses dans l'étude. Les racines mésiales ont été séparées du reste de la dent à l'aide d'un disque diamanté (Flex®, Edenta AG®, Au, Suisse). Dans un premier temps, la couronne et les racines sont séparées au niveau de la jonction cémento-amélaire au dessus de la furcation de façon à préserver le plancher pulpaire (fig. 4.5). Dans un second temps, les deux racines sont séparées au milieu de la furcation parallèlement au grand axe de la racine mésiale.(fig. 4.6).

Les racines mésiales sont désinfectées dans une solution d'hypochlorite de sodium (NaOCl) à 2,5% et nettoyées par ultrasons. Elles sont ensuite conservées séparément dans des tubes numérotés (fig. 4.7) contenant une solution de sérum physiologique (NaCl).



*Figure 4.5 :
Séparation de la couronne et des racines.*



*Figure 4.6 :
Séparation des 2 racines.*

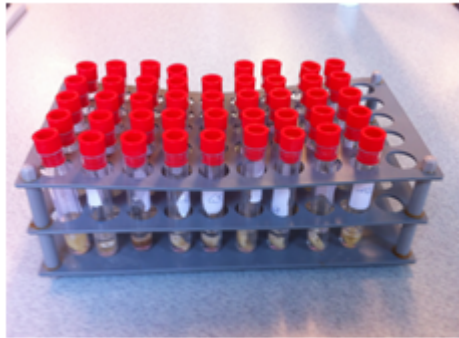


Figure 4.7 :
Porte-tubes contenant chacune des racines sélectionnées.

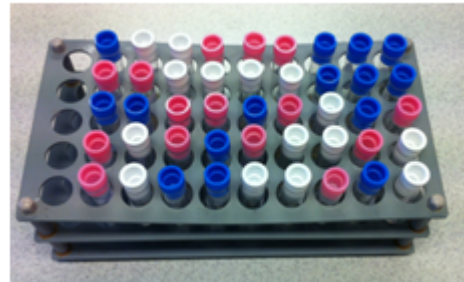


Figure 4.8 :
Les racines sont randomisées en 3 groupes et distinguées selon la couleur du bouchon.

4.2.2 Randomisation :

Les 45 racines (90 canaux) sont réparties de manière randomisée en 3 groupes de 15 racines (n = 30 canaux) : (fig.4.8)

Groupe 1 (bleu) : ProTaper Next® : PTN (Dentsply-Maillefer, Ballaigues, Suisse)

Groupe 2 (blanc) : WaveOne® : WO (Dentsply-Maillefer, Ballaigues, Suisse)

Groupe 3 (rose) : Prototype

Groupe	Angle de courbure (°)			Rayon de courbure (mm)		
	PTN	WO	Prototype	PTN	WO	Prototype
Moyenne	28,8	29,7	30,1	7,2	7,1	6,5

Tableau 4.1 : Angles et rayons de courbure moyens selon les 3 groupes.

La répartition est vérifiée à l'aide d'un test de Kruskal-Wallis pour s'assurer d'une répartition uniforme des racines selon l'angle et le rayon de courbure (tableau 4.1).

- Kruskal-Wallis pour l'angle de courbure ($p=0,8 > 0,01$)
- Kruskal-Wallis pour le rayon de courbure ($p=0,5 > 0,01$)

Le test ne révèle aucune différence statistiquement significative dans la répartition des 3 groupes, ni en terme d'angle de courbure ni en terme de rayon de courbure.

Un tableau récapitulatif des valeurs de l'angle et du rayon de courbure figure en annexe 1

4.2.3 Préparation des canaux radiculaires :

Les entrées canalaires sont repérées et la perméabilité canalaire est vérifiée à l'aide d'une lime K10 (MicroMéga, Besançon, France). La longueur de travail est déterminée en retirant 1mm à la longueur de la lime lorsqu'elle affleure à l'apex.

Les racines des 3 groupes ont été préparées par un opérateur expérimenté unique selon les recommandations des fabricants et les instruments sont renouvelés régulièrement.

30 canaux mésio-vestibulaires ou mésio-linguaux ont été instrumentés par chacun des 3 systèmes :

Groupe 1 (n=30) :

PathFile® (Dentsply-Maillefer, Ballaigues, Suisse) : 13/100 (violet) et 16/100 (blanc)

+ ProTaper Next® (Dentsply-Maillefer, Ballaigues, Suisse) 17/100 (X1 – jaune) et 25/100 (X2 - rouge)

Groupe 2 (n=30) :

PathFile® (Dentsply-Maillefer, Ballaigues, Suisse) : 13/100 (violet) et 16/100 (blanc)

+ WaveOne® (Dentsply-Maillefer, Ballaigues, Suisse) : WO primary® 25/100

Groupe 3 (n=30) :

Prototype cathétérisme

+ prototype de préparation

Pendant la préparation, entre chaque instrument et à la fin, le canal est irrigué à l'aide de 1mL d'une solution d'hypochlorite de sodium (NaOCl) à 2,5%. Un agent chélateur, l'EDTA (Ethylène Diamine TetraAcétate) 17% a été utilisé à la fin de la préparation pour un rinçage assurant l'élimination de la boue dentinaire (3 mL pendant 3 minutes) suivi d'une dernière irrigation au NaOCl à 2.5% activé aux ultrasons (3 x 10 secondes).

Les instruments sont vérifiés avant chaque passage et, sauf signes de fatigue, ils sont changés toutes les 3 racines. La préparation apicale a été harmonisée pour les 3 groupes. Les instruments finaux ont un diamètre apical de 0,25mm : PTN X2 (25/100), WO primary (25/100) et prototype (25/100).

4.2.4 Procédure d'imagerie et Analyse

Une acquisition (Microtomographe et Cone Beam) est réalisée avant et après préparation canalaire.

Les paramètres étudiés sont le transport canalaire, la capacité de centrage, l'instrumentation des surfaces dentinaires et le % de surfaces non instrumentées.

4.2.4.1 Acquisitions et analyses μ CT

Les racines ont été scannées par le microtomographe du Centre de Ressource Techniques (CRT) de Morlaix V-Tome-X 240D® (GE Measurement & Control, Billerica, MA, USA) dont le tube à rayon X est réglé à un voltage de 120kV et à une intensité de 300 μ A. La résolution atteinte est de 20 μ m et le temps d'acquisition est de 20min.

Les racines sont placées dans une mousse puisque le niveau de résolution atteint au μ CT permet une superposition des volumes pré et postopératoires grâce à la surface radiculaire externe sans passer par des systèmes de repositionnement précis pour les 2 acquisitions.

Le logiciel VGstudio 2.0® (Volume Graphics GmbH, Heidelberg, Allemagne) est utilisé pour réaliser la reconstruction tridimensionnelle des volumes radiculaires pré et post-instrumentation.

La superposition est ensuite analysée grâce au logiciel Focus Inspection Viewer 9.1® (Nikon, Tokyo, Japon) qui permet de mettre en évidence les surfaces et volumes canalaire avant et après préparation, de faire des coupes normalisées à n'importe quel niveau d'intérêt pour y faire des mesures précises de cotes ou encore de réaliser une cartographie 3D grâce à une échelle de couleur.

Ces outils nous permettent d'évaluer le déplacement canalaire, les volumes dentinaires éliminés ou encore les zones non instrumentées.

4.2.4.2 Acquisitions et analyses CBCT

Les racines ont aussi été scannées par tomographie volumique à faisceau conique grâce au ProMax 3D Mid Planmeca (Planmeca Oy, Helsinki, Finlande) dont le tube à Rx Toshiba D-054-SB-P (Toshiba, Tokyo, Japon) est réglé à 90kV et 14mA. Le volume d'acquisition a été réglé à 40X50 mm, la taille des images est de 401x401x501 et la résolution des images est de 100 μ m. Le temps d'acquisition est d'environ 12 secondes et le temps total d'acquisition/reconstruction est inférieur à 2 minutes.

Lors des acquisitions CBCT pré et postopératoires, les racines doivent être repositionnées de manière extrêmement précise dans la mesure où le plus faible niveau de résolution rend impossible une superposition des volumes radiculaires pré et post-opératoires.

Pour ce faire nous avons mis au point un système de repositionnement (fig. 4.9 et 4.10):

- un socle silicone est adapté sur une mentonnière (silicone bleu clair)
- une logette de repositionnement est aménagée à l'aide d'un emporte-pièce asymétrique (résine bleu foncé) sur le socle au centre du cylindre d'acquisition.
- une clé de repositionnement individuelle (silicone jaune) portant l'empreinte de la section cervicale est réalisée pour chacune des racines.

Cet artifice nous permet de repositionner parfaitement la racine dans la même situation spatiale dans le volume d'acquisition.

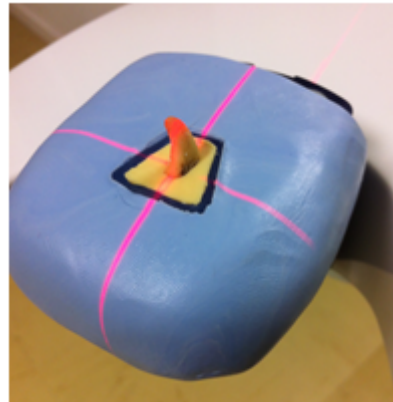
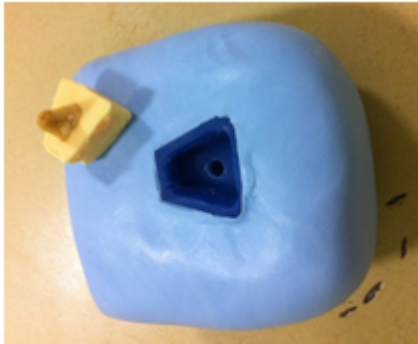


Figure 4.9 (gauche) : système de repositionnement des racines pour le CBCT

Figure 4.10 (droite) : repositionnement sur la mire du CBCT

Les images issues du CBCT sont accessibles via le viewer Planmeca Romexis 3D Explorer®.

Les paramètres de l'étude sont mesurés :

- grâce au viewer
=> si superposition impossible mesure sur les 2 volumes
- grâce aux logiciels VG studio 2.0, My VGL 2.0 et Focus Inspection Viewer 9.1®
=> si superposition des 2 volumes

L'évaluation à l'aide du CBCT fait l'objet d'une étude multicentrique (Beyrouth, Brest et Toulouse) dont les résultats ne seront pas détaillés ci-après. Dans ce travail nous nous sommes concentrés uniquement sur l'analyse microtomographique.

4.2.5 Analyse et traitement des images

La reconstruction 3D de chaque racine est analysée à l'aide des outils de Focus Inspection Viewer 9.1® :

- Cartographie 3D,
- Tableur des paramètres de tous les points du volume,
- Mesures du transport et du centrage sur coupe 2D versus étiquettes sur le volume 3D.

4.2.5.1 Analyse de la cartographie de la préparation

L'échelle de couleur, précédemment décrite, est appliquée à chaque volume ce qui permet de calculer les pourcentages de la surface canalaire affectée à chaque domaine.

Les différents paramètres obtenus sont les suivants : (annexe 3)

- % d'erreurs ($> + 40 \mu\text{m}$)
Celui-ci est éliminé pour calculer les % relatifs suivants,
- % de surfaces non instrumentées (ou peu instrumentées) : domaine bleu (de $+40$ à $-40 \mu\text{m}$)
- % de surfaces instrumentées légèrement à moyennement : domaine vert (de -40 à $-150 \mu\text{m}$)
- % de surfaces instrumentées moyennement à largement : domaine jaune (de -150 à $-300 \mu\text{m}$)
- % de surfaces instrumentées excessivement : domaine rouge (au-delà de $-300 \mu\text{m}$)
- % de surfaces instrumentées : domaines vert, jaune et rouge.

4.2.5.2 Analyse du tableur

Le logiciel nous exporte un tableur dans Excel (Redmond, WA, USA) dans lequel l'ensemble des paramètres de chaque point du volume est compilé : (annexe 2)

- Coordonnées nominales et mesurées : Nom. x, Nom. y, Nom. z ; Mes. x, Mes. y, Mes. z
- Déviations sur les axe x, y et z : Dev. x, Dev. y, Dev. z
- Déviation 3D : Dev. 3D

La mesure de la moyenne de la déviation selon l'axe x (Dev. x moyenne) sur l'ensemble des points du volume nous donne une information quant à la direction du travail instrumental. Son orientation en mésial ou en distal nous permet d'évaluer la direction du transport canalaire.

La mesure de la moyenne de la déviation globale (Dev. 3D moyenne) permet de quantifier le travail instrumental global des surfaces canalaires c'est à dire l'élimination de la dentine pariétale.

Les coordonnées nominales sur l'axe z nous permettent de sélectionner les points selon leur niveau le long de la racine. Ainsi, l'étude des Dev. x moyenne et Dev. 3D moyenne ainsi que des % des différents domaines de préparation peut être ciblée notamment sur le tiers apical (annexe 2).

4.2.5.3 Analyse du transport canalaire et de la capacité de centrage Gambill versus étiquettes.

Pour chaque canal un axe z adapté à la courbure canalaire est tracé puis 3 coupes perpendiculaires à cet axe sont réalisées à 1, 3 et 5 mm de l'apex (fig 4.11).

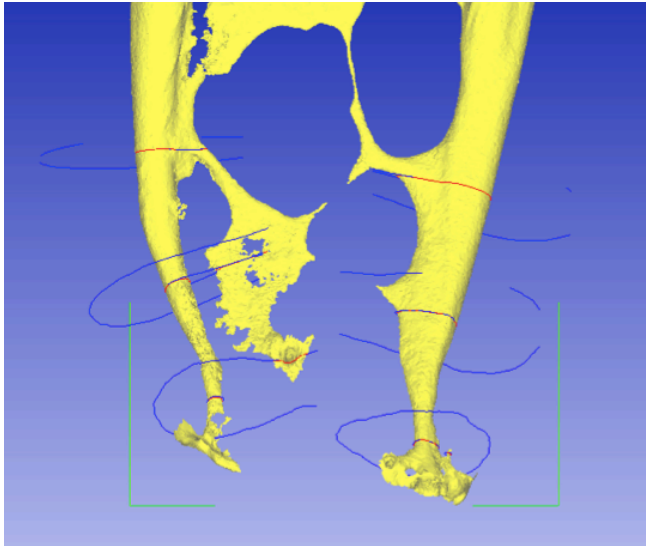


Figure 4.11 :
3 niveaux de coupes perpendiculaires à l'axe de courbure de chaque canal et respectivement à 1, 3 et 5 mm de l'apex.

Sur coupe 2D d'abord, le transport canalair (CT) et le ratio de centrage de l'instrument (CA) sont calculés selon la méthode de Gambill (annexe 4)

Dans ce cas la particularité de la superposition des volumes pré et postopératoires fait que les distances les plus courtes entre la lumière canalair et la surface radiculaire avant et après instrumentation en mésial et en distal ne sont plus mesurées. C'est la différence entre ces 2 mesures, c'est à dire la distance entre les lumières canalaires avant et après instrumentation, qui est mesurée directement (fig. 4.12).

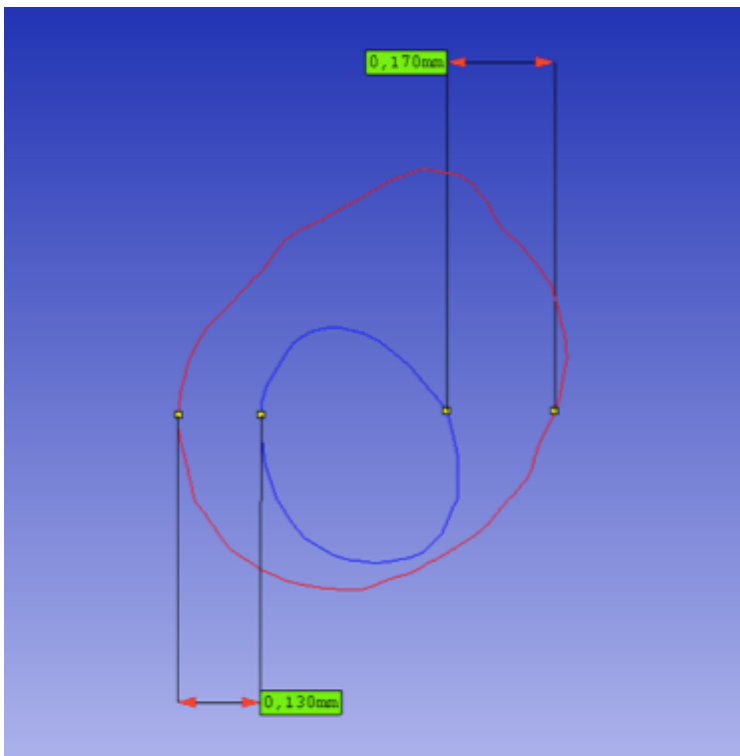


Figure 4.12 :
Mesure du transport grâce à la mesure directe de la distance entre la coupe bleue (préop) et rouge (postop) sur un axe mésio-distal

Puis c'est sur le volume 3D orienté dans le plan mésio-distal que des étiquettes sont apposées directement en mésial et en distal au niveau des coupes (fig. 4.13).

Sur chaque étiquette la Dev. 3D est précisée, la formule de Gambill est utilisée avec ses mesures pour calculer les CT et CA (annexe 4).

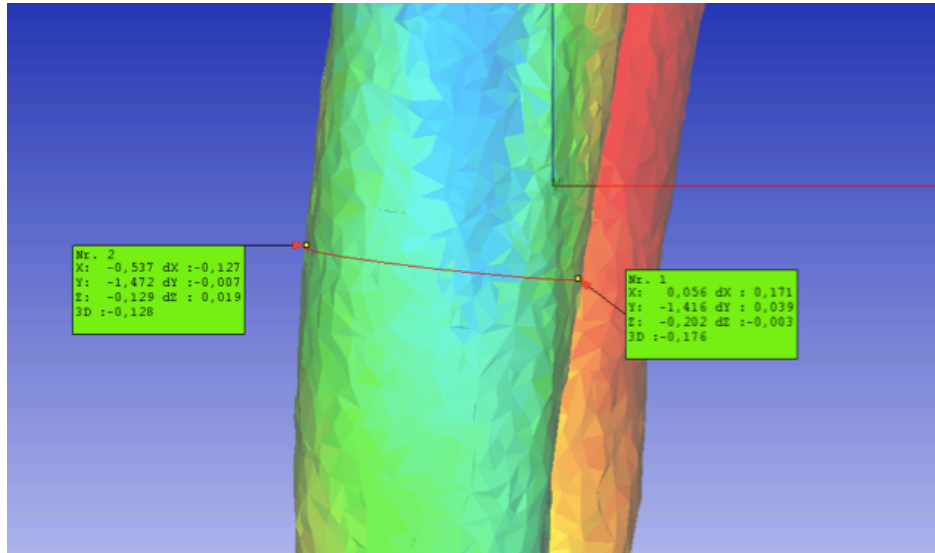


Figure 4.13 :

Mesure du transport grâce à 2 étiquettes, en mésial et en distal au niveau de coupe (rouge)

Les résultats de CT et CA sur les différentes coupes sont comparés de manière à déterminer si la nouvelle méthode donne des résultats analogues à ceux obtenus par la méthode de référence.

Les résultats de CT et CA sur ces coupes sont comparés également à ceux obtenus pour le tiers apical par l'analyse du tableur.

4.3 Résultats

L'ensemble des résultats de l'étude sont présentés en annexe (annexe 2 à 4). Il est à noter que pendant les préparations, un seul instrument a été fracturé dans un canal qui a été éliminé de l'étude.

4.3.1 Analyse statistique

Les tests statistiques utilisés sont des tests non paramétriques (Kruskal- Wallis, Mann-Whitney) avec un seuil de significativité à 5%.

Le détail des analyses statistiques est disponible en annexe de ce travail (annexe 5 à 9).

4.3.2 Etudes des surfaces

4.3.2.1 Ensemble du canal

Canal	Surface non instru.			-0,40 à -0,150 mm			-0,150 à -0,300 mm			> -0,300 mm		
	PTN	WO	Proto	PTN	WO	Proto	PTN	WO	Proto	PTN	WO	Proto
Moy. %	57,2	56,6	63,2	19,4	22,1	18,9	13,5	13,8	11,7	9,8	7,5	6,1

Tableau 4.2 : instrumentation des surfaces sur l'ensemble du canal pour les 4 domaines.

Sur l'ensemble du canal (tableau 4.2), aucune différence statistiquement significative n'a pu être démontrée entre les 3 groupes, ni sur le % de surfaces non instrumentées (ou instrumentées) ni pour chaque domaine de travail instrumental (bleu, vert, jaune, rouge).

4.3.2.2 Tiers apical

1/3 apical	Surface non instru.			-0,40 à -0,150 mm			-0,150 à -0,300 mm			> -0,300 mm		
	PTN	WO	Proto	PTN	WO	Proto	PTN	WO	Proto	PTN	WO	Proto
Moy. %	53,4	67,5	74,2	31,5	24,3	20	11,7	7,1	5,6	2,7	1,1	0,1

Tableau 4.3 : Instrumentation des surfaces sur le tiers apical pour les 4 domaines.

Sur le tiers apical (tableau 4.3), une différence statistiquement significative a été démontrée par un test non paramétrique de Kruskal-Wallis ($p = 0,0253 < 0,05$) entre les groupes à propos des surfaces non instrumentées :

Le prototype tend à laisser davantage de surfaces non instrumentées que le ProTaper Next® et dans une moindre mesure le WaveOne®.

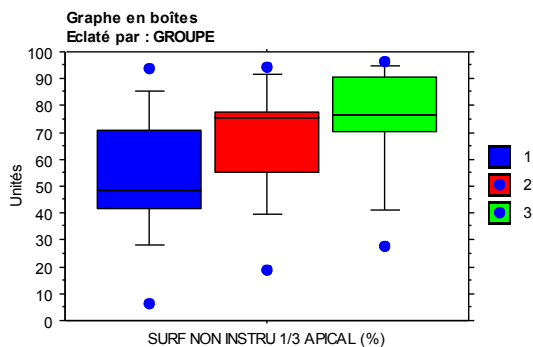


Fig. 4.14 : boîtes à moustaches de la répartition des % de surfaces non instrumentées pour les 3 groupes sur le tiers apical

En revanche aucune différence statistiquement significative n'est retrouvée pour chaque domaine de travail instrumental (bleu, vert, jaune, rouge).

4.3.3 Transport canalaire et capacité de centrage

4.3.3.1 Transport canalaire

Groupe	Méthode de Gambill			Méthode des étiquettes		
	PTN	WO	Prototype	PTN	WO	Prototype
CT (μm)	104,8	70,3	62,4	105	70,5	73,3

Tableau 4.4 : transport canalaire moyen pour les 3 groupes selon les 2 méthodes.

Il n'existe pas de différence statistiquement significative entre les valeurs du transport canalaire issues de la méthode de Gambill et de celle des étiquettes (tableau 4.4) : test U de Mann-Whitney, $p = 0,67 > 0,05$. La méthode proposée donne donc des résultats équivalents à ceux de la méthode de référence pour la mesure du transport canalaire.

Concernant le transport canalaire global, aucune différence statistiquement significative n'est mise en évidence entre les groupes.

En revanche, des différences significatives entre les 3 groupes sont démontrées en affinant l'analyse par niveaux de coupe.

Gambill	1 mm			3 mm			5 mm		
Groupe	PTN	WO	Proto	PTN	WO	Proto	PTN	WO	Proto
CT (μm)	46,7	28,1	22,3	121	65,8	80,7	126,9	104	65,5

Tableau 4.5 : transport canalaire moyen par niveau de coupe selon la méthode de Gambill

Pour les résultats issus des mesures par la méthode de Gambill (tableau 4.5), un test de Kruskal-Wallis permet de mettre en évidence une différence statistiquement significative ($p = 0,019 < 0,05$) entre les groupes à 5 mm de l'apex. Il y aurait moins de transport canalaire occasionné par le prototype à 5 mm que dans les autres groupes (fig. 4.15).

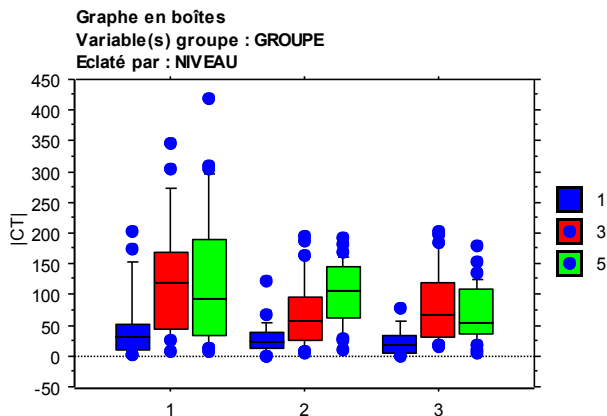


Figure 4.15 : boîtes à moustaches de la répartition du transport en fonction des 3 groupes pour les 3 niveaux (couleur).

Etiquette	1 mm			3 mm			5 mm		
Groupe	PTN	WO	Proto	PTN	WO	Proto	PTN	WO	Proto
CT (μm)	33,1	29,2	26,1	125,4	69,2	90,6	130,1	104,3	79,1

Tableau 4.6 : transport canalaire moyen par niveau de coupe selon la méthode des étiquettes

Pour les mesures de transport issues des 2 méthodes (tableaux 4.5 et 4.6) :

Un test de Kruskal-Wallis montre une différence statistiquement significative ($p < 0,001$) du transport canalaire entre les 3 niveaux de coupe, pour tous les groupes et dans chacun d'entre eux (fig. 4.16), le transport canalaire est significativement inférieur à 1 mm de l'apex.

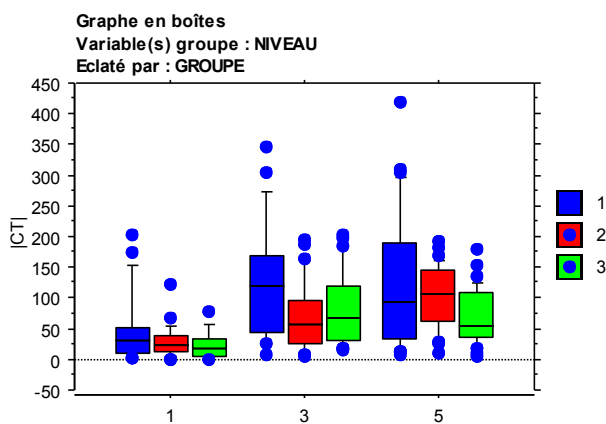


Figure 4.16 : boîtes à moustaches de la répartition du transport en fonction des 3 niveaux pour les 3 groupes (couleur).

4.3.3.2 Capacité de centrage

Groupe	Méthode de Gambill			Méthode des étiquettes		
	PTN	WO	Proto	PTN	WO	Proto
CA (%)	34	37	42	21	31	32

Tableau 4.7 : capacité de centrage moyenne pour les 3 groupes selon les 2 méthodes.

Contrairement au transport, il existe une différence statistiquement significative entre les valeurs de la capacité de centrage selon la méthode de Gambill et celle des étiquettes (tableau 4.7) : Test U de Mann-Whitney, $p = 0,011 < 0,05$.

Aucune différence statistiquement significative n'est mise en évidence entre les groupes ou entre les niveaux sur la capacité de centrage globale, ni par les mesures issues de la méthode de Gambill, ni par celles des étiquettes.

En revanche des différences significatives sont retrouvées pour les 2 méthodes en affinant par niveau de coupe.

Gambill	1 mm			3 mm			5 mm		
Groupe	PTN	WO	Proto	PTN	WO	Proto	PTN	WO	Proto
CA (%)	33	33	53	26	44	31	41	34	46

Tableau 4.8 : capacité de centrage moyenne par niveaux de coupe selon la méthode de Gambill.

D'après les mesures par la méthode de Gambill (tableau 4.8), un test de Kruskal-Wallis montre une différence statistiquement significative ($p = 0,028 < 0,05$) pour le groupe 3 entre les niveaux : la capacité de centrage du prototype est significativement moindre à 3 mm de l'apex qu'au 2 autres niveaux (fig. 4.17).

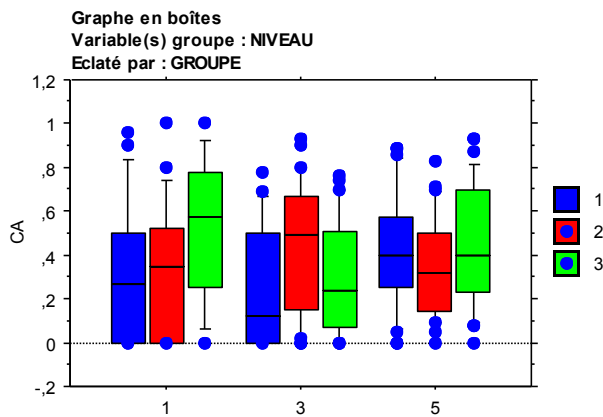


Figure 4.17 : boîtes à moustaches de la répartition du centrage en fonction des 3 niveaux pour les 3 groupes (couleur).

Étiquette	1 mm			3 mm			5 mm		
Groupe	PTN	WO	Proto	PTN	WO	Proto	PTN	WO	Proto
CA (%)	28	20	34	21	43	27	36	32	36

Tableau 4.9 : capacité de centrage moyenne par niveau de coupe selon la méthode des étiquettes.

Pour les mesures issues des étiquettes (tableau 4.9) :

A 3 mm de l'apex, un test de Kruskal-Wallis met en évidence une différence statistiquement significative ($p = 0,034 < 0,05$) entre les groupes : la capacité de centrage du WaveOne est significativement supérieure à celle des 2 autres groupes (fig. 4.18).

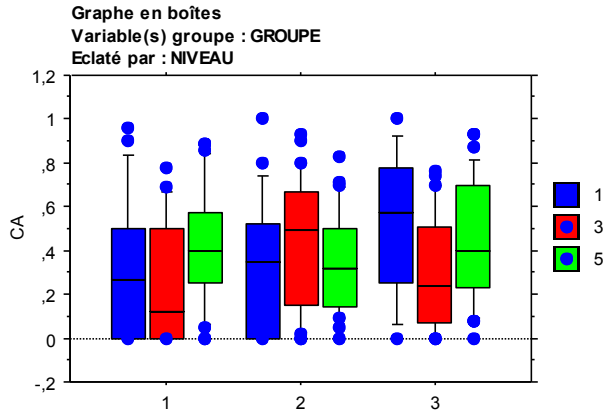


Figure 4.18 : boîtes à moustaches de la répartition du centrage en fonction des 3 groupes pour les 3 niveaux (couleur).

Pour le groupe 2 (WaveOne®), une différence statistiquement significative du centrage est démontrée en fonction des niveaux : la capacité de centrage est significativement inférieure à 1 mm de l'apex qu'elle ne l'est aux 2 autres niveaux (fig. 4.19) :

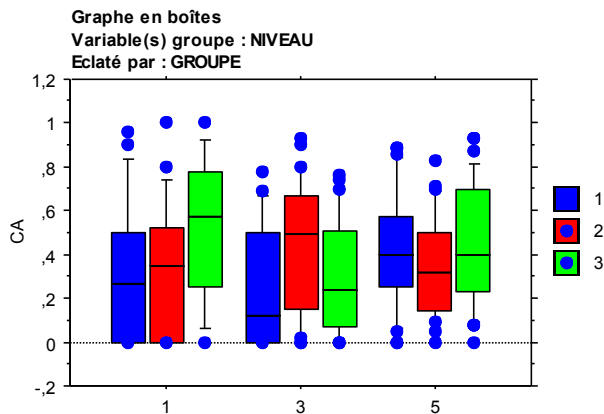


Figure 4.19 : boîtes à moustaches de la répartition du centrage en fonction des 3 niveaux pour les 3 groupes (couleur).

4.3.4 Données issues du tableur

4.3.4.1 Déviation 3D moyenne

Groupe	Canal			Tiers apical		
	PTN	WO	Proto	PTN	WO	Proto
Dev. 3D moy. (µm)	- 71	- 71	- 56	- 53	- 35	- 24

Tableau 4.10 : déviation 3D moyenne des 3 groupes sur l'ensemble du canal et sur le tiers apical.

Aucune différence statistiquement significative n'est mise en évidence entre les groupes ni sur l'ensemble du canal ni sur le tiers apical (tableau 4.10).

4.3.4.2 Direction de la déviation moyenne sur X

La Dev. x moyenne est orientée en mésial pour 89% des canaux et 80% si on considère le tiers apical.

Le transport canalaire est donc très majoritairement opéré en direction mésiale, à l'extérieur de la courbure.

4.4 Discussion

L'objectif de cette étude est d'évaluer les effets de la préparation canalaire de 3 systèmes endodontiques mécanisés et d'en comparer les performances grâce à la microtomographie.

Nous avons choisi ici de réaliser une analyse de l'instrumentation des surfaces canalaires d'une part et d'étudier le transport canalaire d'autre part.

Le transport canalaire est un effet indésirable lors de la mise en forme. Il est dû aux caractéristiques des instruments NiTi et à la courbure canalaire, qui peut occasionner des erreurs de préparation telles qu'une butée, une perforation ou un stripping. Ces erreurs sont responsables d'une fragilisation de la racine pouvant mettre en cause le pronostic du traitement endodontique (Simon *et al.*, 2012).

L'instrumentation des surfaces canalaires et la persistance de zones non instrumentées après la préparation ont également des conséquences sur le succès ou l'échec du traitement.

Les moyens d'évaluation de la préparation canalaire sont nombreux comme la technique de Bramante ou la radiographie conventionnelle mais elles présentent des limites importantes, elles sont invasives ou bidimensionnelles.

La microtomographie est une technique d'imagerie 3D de très haute résolution, reproductible et non invasive. C'est une technique validée pour l'évaluation ex vivo de l'anatomie et des effets de la préparation canalaire (Peters *et al.*, 2001b ; Gergi *et al.*, 2010 ; Shen et Cheung, 2013).

Les effets de la préparation ont été évalués à une haute résolution de 20 μm pour l'étude, ce qui est un bon compromis entre la précision des images et le bruit généré.

La microtomographie produit des sections fiables et précises des volumes canalaires avant et après instrumentation, qui sont exploitées dans cette étude, grâce au logiciel Focus Inspection 9.1®.

Des racines mésiales de molaires mandibulaires ont été utilisées dans l'étude ce qui permet de se rapprocher des conditions cliniques (courbure et diamètre canalaire). Toutefois, la séparation de la partie coronaire empêche les instruments étudiés de subir les contraintes liées à l'aménagement des voies d'accès.

Les canaux de ces racines ont été choisis en raison de leur courbure anatomique, angle compris entre 20-40° et rayon de 4 à 9 mm dans notre étude, ce qui est conforme aux données de la littérature et fait de ces canaux de bons supports pour l'étude des effets de la préparation.

Pour mesurer le transport canalaire, la technique de référence actuelle est celle de Gambill même s'il en existe d'autres, comme celle des centres de gravité.

Mais la technique de Gambill présente quelques limites, en particulier celle d'être réalisée sur coupe 2D issue d'un volume 3D et celle de ne faire la mesure du transport qu'en direction mésio-distale, ignorant la double courbure canalaire. Il y a donc une perte d'information importante.

Il nous paraît important de procéder à une évaluation tridimensionnelle du transport canalaire, à l'aide du volume 3D issu de la microtomographie.

Dans cette étude nous proposons donc une nouvelle approche de l'évaluation des effets de la préparation canalaire tout en nous appuyant sur la méthode de Gambill reconnue comme la référence actuelle.

Une cartographie de l'instrumentation des surfaces canalaires est réalisée grâce à la superposition des volumes pré et postopératoires à l'aide du logiciel Focus Inspection 9.1®.

Cette cartographie et ses données permettent de procéder à une analyse quantitative et qualitative de la préparation des surfaces canalaires. Elle permet de réaliser directement des mesures sur le volume au moyen d'étiquettes pour évaluer le transport canalaire tout en appliquant la formule de Gambill.

Le développement constant des instruments NiTi a permis d'augmenter la qualité de la mise en forme et d'en diminuer les erreurs (Haapasalo et Shen, 2013). Le design d'un instrument et sa dynamique sont responsables de sa capacité à travailler les surfaces et à mettre en forme le canal. Ces éléments nous ont conduits à sélectionner 3 systèmes NiTi très différents dans leurs caractéristiques pour évaluer et comparer leur performance de mise en forme canalaire.

Le ProTaper Next® est une séquence réduite, de conicité variable, son profil est asymétrique et offre 2 lames de coupe. Ce design apporte une grande flexibilité à l'instrument, il permet un mouvement de reptation qui réduit les contraintes (Ruddle, 2001), facilite la pénétration et améliore la mise en forme pour un diamètre réduit (Ruddle *et al.*, 2013 ; Capar *et al.*, 2014).

Le Wave One® est un instrument unique de réciprocité, de conicité décroissante dont la section triangulaire est variable et offre 3 lames de coupe. Son design lui donne une bonne flexibilité, une efficacité de coupe importante et une bonne évacuation des débris (Bürklein *et al.*, 2012). La réciprocité limite le stress et empêche le vissage (Varela-Patiño *et al.*, 2010).

Le prototype est en cours de développement, son profil est asymétrique et sa conicité constante, c'est un instrument unique. Il est intéressant d'évaluer ses performances et de les comparer à celles des deux instruments précédents largement publiés dans la littérature.

Le PathFile® est une séquence réduite de 2 instruments dédiée au cathétérisme. Cet instrument permet une meilleure pénétration initiale du canal que les limes K manuelles. Il induit moins de modification du trajet canalaire initial et moins d'erreur de préparation (Berutti *et al.*, 2009).

Il permet de réduire le transport canalaire et d'assurer une préparation plus conservatrice (Elnaghy et Elsaka, 2014).

Il existe encore peu d'études disponibles comparant les performances de mises en forme du ProTaper Next® et du WaveOne® en raison de leur commercialisation récente.

Notre étude n'a pas montré de différences significatives dans le transport canalaire ou la capacité de centrage entre les 3 instruments alors que 2 études ont mis en évidence moins de transport canalaire et donc un centrage supérieur pour le ProTaper Next® comparé au WaveOne® (Zhao *et al.*, 2014 ; Wu *et al.*, 2015). En revanche lorsque l'analyse est affinée à 3mm, la méthode des étiquettes nous montre un centrage significativement supérieur pour WaveOne®.

Cette absence de résultats significatifs peut s'expliquer par la perte d'informations au niveau des volumes canaux lors des acquisitions μ CT en raison de la persistance d'eau dans le réseau canalaire du à un mauvais séchage, notamment à 1mm. En effet le logiciel VGstudio 2.0® lorsqu'il sélectionne les vacuités (c'est à dire de l'air, la lumière canalaire) a pu confondre l'eau présente dans le canal avec la surface canalaire.

McRay et al. suggèrent que l'augmentation de la conicité apicale et du diamètre de l'extrémité instrumentale pourrait avoir une conséquence sur le transport et le centrage (McRay *et al.*, 2014).

Pasternak et al. montrent dans une étude que l'augmentation du diamètre apical n'a pas de conséquence sur le transport ni le centrage mais précisent que les instruments utilisés présentent une conicité apical réduite à 2% ce qui assure à ces instruments une bonne flexibilité pouvant pallier à l'augmentation du diamètre (Pasternak-Júnior *et al.*, 2009).

Des auteurs ont révélé que les instruments dont la conicité apical excède 4% ne devrait pas être utilisés pour les canaux courbés puisqu'ils induiraient plus de transport (Kum *et al.*, 2000 ; Schäfer et Vlassis, 2004).

Pourtant d'autres études plus récentes ont démontré que des instruments dont la conicité apicale est de 6% (ProTaper Next®) ou 8% (WaveOne®) peuvent être utilisés dans les canaux courbés sans augmentation du transport canalaire (Bürklein *et al.*, 2013 ; Celik *et al.*, 2013 ; Zhao *et al.*, 2013).

L'utilisation du PathFile® avant la préparation canalaire peut aussi expliquer les performances analogues en terme de transport et de centrage du WaveOne® et du ProTaper Next® dans notre étude conformément à une étude préalable (Freire *et al.*, 2011).

Nous avons démontré que le ProTaper Next® laisse moins de surfaces non instrumentées que le WaveOne® ou le prototype au niveau du tiers apical, en revanche aucune différence significative n'apparaît si l'on considère le canal entier, Zhao et al. arrivent au même résultat (Zhao *et al.*, 2014).

Les pourcentages de surfaces non instrumentées de l'étude (autour de 60%) sont nettement supérieurs à ceux de la littérature, 20 à 40% selon une revue de Hülsmann (Hülsmann, 2013).

Cet écart peut s'expliquer par le fait que dans l'étude, les surfaces non instrumentées comprennent les surfaces non travaillées du canal accessible à l'instrumentation et celles du réseau endocanalaire non accessibles aux instruments. Les zones non accessibles à l'instrumentation (isthme, canaux

accessoires...) n'ont en effet pas été exclues lors de l'exploitation des volumes 3D pour se rapprocher au mieux de la réalité clinique.

Dans cette étude, le prototype a tendance à induire moins de transport canalaire, il semble avoir un meilleur centrage même si aucune différence statistiquement significative n'est mise en évidence. Il laisse néanmoins plus de surfaces non instrumentées, en particulier au niveau du tiers apical.

Par ailleurs, l'étude montre une différence significative du transport canalaire entre les niveaux. Pour tous les groupes et dans chacun d'entre eux, le transport canalaire est inférieur à 1 mm de l'apex.

Il serait intéressant de réaliser une étude utilisant les instruments de finition des séquences pour évaluer leur travail au tiers apical et les conséquences sur le transport canalaire.

Les performances des instruments sont liées à leur design et à leurs caractéristiques (Arbab-Chirani *et al.*, 2011) mais Peters *et al.* estiment que la préparation canalaire est davantage influencée par l'anatomie canalaire que par les différences de comportement instrumental (Peters *et al.*, 2001b). Ainsi le praticien doit connaître les caractéristiques des instruments endodontiques, les recommandations du fabricant et leurs limites de manière à choisir la séquence appropriée pour un cas clinique donné.

Un des objectifs de cette étude est d'évaluer une nouvelle approche de la méthode de Gambill en utilisant les outils du logiciel Focus inspection Viewer 9.1®.

La cartographie de l'intensité du travail instrumental permet de visualiser en trois dimensions l'élimination de la dentine pariétale sur l'ensemble du canal, et d'évaluer de manière quantitative et qualitative les zones instrumentées ou non. Elle donne également une indication du risque de transport canalaire.

Par ailleurs les mesures directes du transport canalaire par le biais d'étiquettes à n'importe quel point du volume et dans n'importe quel plan permettent d'évaluer le transport dans les 3 directions de l'espace exploitant au mieux les données issues de la reconstitution 3D. Ces mesures semblent moins opérateur-dépendantes que pour la méthode de référence parce qu'elle réduit considérablement le nombre de mesures et de choix fait par l'opérateur.

Sur le transport canalaire, les résultats issus de la nouvelle approche sont homogènes à ceux retrouvés par la méthode de Gambill (Mann-Whitney, $p < 0,05$). Cette méthode innovante est donc validée par les résultats de l'étude pour le transport canalaire.

En revanche les résultats de notre approche pour le centrage, pourtant issus des mêmes mesures, ne sont pas en accord avec ceux retrouvés par la méthode de Gambill. La nature de la formule de Gambill pour le centrage explique peut être ces différences. Cette nouvelle approche devra être testée à nouveau pour nous permettre d'obtenir des résultats plus pertinents.

4.5 Conclusion

D'après les résultats de notre étude, le ProTaper Next® laisse moins de surfaces non instrumentées que le WaveOne® et le prototype.

Les 3 systèmes donnent des résultats similaires en terme de capacité de centrage et de transport canalaire.

Le transport canalaire est moindre à 1 mm de l'apex que à 3 ou 5 mm pour tous les groupes.

La nouvelle approche de la méthode de Gambill donne des résultats valides en ce qui concerne le transport canalaire.

CONCLUSION

Lorsque les effets de la préparation canalaire sont évalués dans la littérature, le pourcentage de surfaces non instrumentées après la mise en forme est compris entre 20 et 40% (Hülsmann, 2013). Il est de l'ordre de 60% dans notre étude, Ainsi, malgré l'instrumentation, il persiste encore de la dentine potentiellement infectée et en quantité importante dans le réseau canalaire, notamment dans le cas des dents nécrosées.

Néanmoins le taux de succès des traitements endodontiques varie entre 86 et 96% (HAS, 2008).

Le pronostic du TE reste excellent malgré la persistance de dentine pariétale infectée dans certains cas.

La mise en forme canalaire est une étape certes importante mais ce n'est qu'une étape du traitement global. Les étapes préalables à la mise en forme et l'obturation radiculaire conditionnent elles aussi le pronostic.

Il est important de préciser que la préparation canalaire est à la fois mécanique et chimique. L'efficacité de la préparation mécanique du tiers apical est difficilement vérifiable cliniquement et l'instrumentation totale du réseau endocanalaire est une illusion.

Le rôle de l'irrigation est ainsi réaffirmé, l'irrigant va permettre de désinfecter l'ensemble du réseau, d'autant plus s'il est activé (Macedo *et al.*, 2014), et créer un flux efficace pour l'évacuation des débris. Il est important d'insister aussi sur la nécessité de travailler dans des conditions aseptiques grâce à la mise en place impérative d'un champ opératoire étanche (digue) pour éviter une nouvelle contamination de l'endodonte.

Il est capital d'assurer à la fois une étanchéité apicale, par l'obturation canalaire, et une étanchéité coronaire peropératoire et postopératoire de manière à protéger le traitement.

Tous ces éléments indispensables sont faciles à mettre en œuvre cliniquement et relativement peu coûteux. Ils permettent de pallier partiellement les défauts et les difficultés de la préparation.

Les progrès de l'imagerie sectionnelle permettent d'évaluer de plus en plus précisément l'anatomie canalaire et les effets de la préparation.

L'imagerie donne au praticien des informations sur le réseau endocanalaire (canaux secondaires ou latéraux, anastomose ...) mais la technique instrumentale ne lui permet pas actuellement de travailler l'ensemble du réseau.

La microtomographie reste la méthode de référence *ex vivo* pour l'étude de l'anatomie canalaire et pour l'évaluation des effets de la préparation canalaire. L'utilisation du Cone Beam pour l'étude de l'anatomie canalaire est déjà validée (Michetti *et al.*, 2010) mais qu'en est il de l'évaluation des effets de la préparation ou de la recherche en Endodontie ?

L'autre volet de l'étude se propose d'essayer de répondre à cette problématique.

BIBLIOGRAPHIE

AAE. Glossary of Endodontic Terms. 8th ed. Chicago: American Association of Endodontists; 2012.

Alapati SB, Brantley WA, Iijima M, Clark WAT, Kovarik L, Buie C, et al. Metallurgical characterization of a new nickel-titanium wire for rotary endodontic instruments. *J Endod.* 2009 Nov;35(11):1589–93.

Al-Nazhan S, Al-Sulaiman A, Al-Rasheed F, Alnajjar F, Al-Abdulwahab B, Al-Badah A. Microorganism penetration in dentinal tubules of instrumented and retreated root canal walls. In vitro SEM study. *Restor Dent Endod.* 2014 Nov;39(4):258–64.

Arbab-Chirani R, Chevalier V, Arbab-Chirani S, Calloch S. Instrumentation canalaire de préparation. *Encyclopédie Médico Chirurgicale.* 2010;Odontologie(23-050-A-08).

Arbab-Chirani R, Chevalier V, Arbab-Chirani S, Calloch S. Comparative analysis of torsional and bending behavior through finite-element models of 5 Ni-Ti endodontic instruments. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod.* 2011 Jan;111(1):115–21.

Arora A, Taneja S, Kumar M. Comparative evaluation of shaping ability of different rotary NiTi instruments in curved canals using CBCT. *J Conserv Dent.* 2014;17(1):35–9.

Beer R, Baumann M, Kielbassa A. Atlas de poche d'endodontie. Flammarion. 2008.

Berutti E, Cantatore G, Castellucci A, Chiandussi G, Pera F, Migliaretti G, et al. Use of nickel-titanium rotary PathFile to create the glide path: comparison with manual preflaring in simulated root canals. *J Endod.* 2009 Mar;35(3):408–12.

Berutti E, Chiandussi G, Paolino DS, Scotti N, Cantatore G, Castellucci A, et al. Canal shaping with WaveOne Primary reciprocating files and ProTaper system: a comparative study. *J Endod.* 2012a Apr;38(4):505–9.

Berutti E, Paolino DS, Chiandussi G, Alovise M, Cantatore G, Castellucci A, et al. Root canal anatomy preservation of WaveOne reciprocating files with or without glide path. *J Endod.* 2012b Jan;38(1):101–4.

Boucher Y, Matossian L, Rilliard F, Machtou P. Radiographic evaluation of the prevalence and technical quality of root canal treatment in a French subpopulation. *Int Endod J.* 2002 Mar;35(3):229–38.

Bramante CM, Berbert A, Borges RP. A methodology for evaluation of root canal instrumentation. *J Endod.* 1987 May;13(5):243–5.

Bürklein S, Benten S, Schäfer E. Shaping ability of different single-file systems in severely curved root canals of extracted teeth. *Int Endod J.* 2013 Jun;46(6):590–7.

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 May;45(5):449–61.

Bürklein S, Mathey D, Schäfer E. Shaping ability of ProTaper NEXT and BT-RaCe nickel-titanium instruments in severely curved root canals. *Int Endod J.* 2014 Aug 25;

Capar ID, Ertas H, Ok E, Arslan H, Ertas ET. Comparative study of different novel nickel-titanium rotary systems for root canal preparation in severely curved root canals. *J Endod.* 2014 Jun;40(6):852–6.

Castellucci A, Cantatore G, Berutti E. The PathFile™: a new series of rotary nickel titanium instruments for mechanical pre-flaring and creating the glide path. *Revue d'Odonto-Stomatologie;* 2010.

Cazévian R, Pasquet G. Cone beam : Imagerie diagnostique en odontostomatologie. Elsevier Masson; 2011.

Cazévian R, Pasquet G. L'imagerie médicale en Odontologie. Editions CdP; 2005.

Celik D, Taşdemir T, Er K. Comparative study of 6 rotary nickel-titanium systems and hand instrumentation for root canal preparation in severely curved root canals of extracted teeth. *J Endod.* 2013 Feb;39(2):278–82.

Chivatxaranukul P, Dashper SG, Messer HH. Dentinal tubule invasion and adherence by *Enterococcus faecalis*. *Int Endod J.* 2008 Oct;41(10):873–82.

Cianconi L, Angotti V, Felici R, Conte G, Mancini M. Accuracy of three electronic apex locators compared with digital radiography: an ex vivo study. *J Endod.* 2010 Dec;36(12):2003–7.

Claisse A, Rocher P, Descroix V. Préparation canalair. ADF. 2014.

Claisse-Crinquette A. Pharmacologie endodontique (I). Les irrigants. *Encyclopédie Médico Chirurgicale.* 2011;Odontologie(23-025-B-20).

CNEOC. Dictionnaire Francophone des termes d'Odontologie Conservatrice. Paris: Editions SNPMD; 2010.

Dentsply-Maillefer. Available from: <http://www.dentsplymaillefer.com>

Dentsply-Tulsa Dental Specialties. Available from: <http://www.tulsadentalspecialties.com/>

De-Deus G, Barino B, Zamolyi RQ, Souza E, Fonseca A, Fidel S, et al. Suboptimal debridement quality produced by the single-file F2 ProTaper technique in oval-shaped canals. *J Endod.* 2010a Nov;36(11):1897–900.

De-Deus G, Brandão MC, Barino B, Di Giorgi K, Fidel RAS, Luna AS. Assessment of apically extruded debris produced by the single-file ProTaper F2 technique under reciprocating movement. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod.* 2010b Sep;110(3):390–4.

De-Deus G, Moreira EJJ, Lopes HP, Elias CN. Extended cyclic fatigue life of F2 ProTaper instruments used in reciprocating movement. *Int Endod J.* 2010c Dec;43(12):1063–8.

Elnaghy AM, Elsaka SE. Evaluation of Root Canal Transportation, Centering Ratio, and Remaining Dentin Thickness Associated with ProTaper Next Instruments with and without Glide Path. *J Endod.* 2014 Oct 7;

Elsherief SM, Zayet MK, Hamouda IM. Cone-beam computed tomography analysis of curved root canals after mechanical preparation with three nickel-titanium rotary instruments. *J Biomed Res.* 2013 Jul;27(4):326–35.

Estrela C, Bueno MR, Sousa-Neto MD, Pécora JD. Method for determination of root curvature radius using cone-beam computed tomography images. *Braz Dent J.* 2008;19(2):114–8.

Freire LG, Gavini G, Branco-Barletta F, Sanches-Cunha R, dos Santos M. Microscopic computerized tomographic evaluation of root canal transportation prepared with twisted or ground nickel-titanium rotary instruments. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod.* 2011 Dec;112(6):e143–8.

Gambarini G, Grande NM, Plotino G, Somma F, Garala M, De Luca M, et al. Fatigue resistance of engine-driven rotary nickel-titanium instruments produced by new manufacturing methods. *J Endod.* 2008 Aug;34(8):1003–5.

Gambarini G, Rubini AG, Al Sudani D, Gergi R, Culla A, De Angelis F, et al. Influence of different angles of reciprocation on the cyclic fatigue of nickel-titanium endodontic instruments. *J Endod.* 2012 Oct;38(10):1408–11.

Gambill JM, Alder M, del Rio CE. Comparison of nickel-titanium and stainless steel hand-file instrumentation using computed tomography. *J Endod.* 1996 Jul;22(7):369–75.

Gergi R, Arbab-Chirani R, Osta N, Naaman A. Micro-computed tomographic evaluation of canal transportation instrumented by different kinematics rotary nickel-titanium instruments. *J Endod.* 2014a Aug;40(8):1223–7.

Gergi R, Osta N, Bourbouze G, Zgheib C, Arbab-Chirani R, Naaman A. Effects of three nickel titanium instrument systems on root canal geometry assessed by micro-computed tomography. *Int Endod J.* 2014b Apr 9;

Gergi R, Rjeily JA, Sader J, Naaman A. Comparison of canal transportation and centering ability of twisted files, Pathfile-ProTaper system, and stainless steel hand K-files by using computed tomography. *J Endod.* 2010 May;36(5):904–7.

Gutmann J, Lovdhal P. *Problem solving in Endodontics : Prevention, Identification, and Management.* 5th ed. Elsevier; 2011.

Haapasalo M, Shen Y. Evolution of nickel-titanium instruments from past to future. *Endodontic Topics.* 2013;(29):3–17.

HAS. *Traitement Endodontique : Rapport d'évaluation technologique.* 2008.

HAS. *Tomographie Volumique à Faisceau Conique de la face (Cone Beam Computerized Tomography).* 2009.

Hashem AAR, Ghoneim AG, Lutfy RA, Foda MY, Omar GAF. Geometric analysis of root canals prepared by four rotary NiTi shaping systems. *J Endod.* 2012 Jul;38(7):996–1000.

Hildebrand TOR, Rügsegger P. Quantification of Bone Microarchitecture with the Structure Model Index. *Comput Methods Biomech Biomed Engin.* 1997;1(1):15–23.

Hodez C, Bravetti P. *Imagerie dento-maxillo-faciale par faisceau conique "Cone-Beam."* Sauramps médical; 2010.

Hülsmann M. Effects of mechanical instrumentation and chemical irrigation on the root canal dentin and surrounding tissues. *Endodontic Topics.* 2013;29:55–86.

Ingle J, Bakland L, Baumgartner J. *Ingle's Endodontics 6.* 6th ed. McGraw-Hill Education; 2008.

Junaid A, Freire LG, da Silveira Bueno CE, Mello I, Cunha RS. Influence of single-file endodontics on apical transportation in curved root canals: an ex vivo micro-computed tomographic study. *J Endod.* 2014 May;40(5):717–20.

Kandaswamy D, Venkateshbabu N, Porkodi I, Pradeep G. Canal-centering ability: An endodontic challenge. *J Conserv Dent*. 2009;12(1):3–9.

Kim H-C, Hwang Y-J, Jung D-W, You S-Y, Kim H-C, Lee W. Micro-computed tomography and scanning electron microscopy comparisons of two nickel-titanium rotary root canal instruments used with reciprocating motion. *Scanning*. 2013 Apr;35(2):112–8.

Kum KY, Spångberg L, Cha BY, Il-Young J, Msd null, Seung-Jong L, et al. Shaping ability of three ProFile rotary instrumentation techniques in simulated resin root canals. *J Endod*. 2000 Dec;26(12):719–23.

Macedo RG, Robinson JP, Verhaagen B, Walmsley AD, Versluis M, Cooper PR, et al. A novel methodology providing insights into removal of biofilm-mimicking hydrogel from lateral morphological features of the root canal during irrigation procedures. *Int Endod J*. 2014 Nov;47(11):1040–51.

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 multifile rotary systems: a micro-CT study. *Int Endod J*. 2014 Nov 14;

Marshall F, Papin J. A crown-down pressureless preparation root canal enlargement technique. *Technique manual*. Portland: Oregon Health Sciences University; 1980.

McRay B, Cox TC, Cohenca N, Johnson JD, Paranjpe A. A micro-computed tomography-based comparison of the canal transportation and centering ability of ProTaper Universal rotary and WaveOne reciprocating files. *Quintessence Int*. 2014 Feb;45(2):101–8.

Médioni E, Vené G. Traitement radiculaire : assainissement et préparation de la cavité endodontique. *Encyclopédie Médico Chirurgicale*. 1995;Odontologie(23-050-A-10).

Médioni E, Vené G. Anatomie endodontique fondamentale et clinique. <http://scdproxy.univ-brest.fr:2215/data/traites/od1/23-08688/> [Internet]. [cited 2015 Jan 26]; Available from: <http://scdproxy.univ-brest.fr:2215/article/20400>

Michetti J, Maret D, Mallet J-P, Diemer F. Validation of cone beam computed tomography as a tool to explore root canal anatomy. *J Endod*. 2010 Jul;36(7):1187–90.

Oliveira CAP, Meurer MI, Pascoalato C, Silva SRC. Cone-beam computed tomography analysis of the apical third of curved roots after mechanical preparation with different automated systems. *Braz Dent J*. 2009;20(5):376–81.

Özer SY. Comparison of root canal transportation induced by three rotary systems with noncutting tips using computed tomography. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod.* 2011 Feb;111(2):244–50.

Paqué F, Ganahl D, Peters OA. Effects of root canal preparation on apical geometry assessed by micro-computed tomography. *J Endod.* 2009 Jul;35(7):1056–9.

Paqué F, Zehnder M, De-Deus G. Microtomography-based comparison of reciprocating single-file F2 ProTaper technique versus rotary full sequence. *J Endod.* 2011 Oct;37(10):1394–7.

Parmar D, Hauman CHJ, Leichter JW, McNaughton A, Tompkins GR. Bacterial localization and viability assessment in human ex vivo dentinal tubules by fluorescence confocal laser scanning microscopy. *Int Endod J.* 2011 Jul;44(7):644–51.

Pasternak-Júnior B, Sousa-Neto MD, Silva RG. Canal transportation and centring ability of RaCe rotary instruments. *Int Endod J.* 2009 Jun;42(6):499–506.

Pérard M, Le Goff A, Hingant B. Choix de la limite apicale et de la longueur de travail. *Encyclopédie Médico Chirurgicale.* 2010;Odontologie(23-050-A-03).

Peters LB, Wesselink PR, Buijs JF, van Winkelhoff AJ. Viable bacteria in root dentinal tubules of teeth with apical periodontitis. *J Endod.* 2001a Feb;27(2):76–81.

Peters OA. Current challenges and concepts in the preparation of root canal systems: a review. *J Endod.* 2004 Aug;30(8):559–67.

Peters OA, Boessler C, Paqué F. Root canal preparation with a novel nickel-titanium instrument evaluated with micro-computed tomography: canal surface preparation over time. *J Endod.* 2010 Jun;36(6):1068–72.

Peters OA, Laib A, Göhring TN, Barbakow F. Changes in root canal geometry after preparation assessed by high-resolution computed tomography. *J Endod.* 2001b Jan;27(1):1–6.

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.* 2001c Apr;34(3):221–30.

Pruett JP, Clement DJ, Carnes DL. Cyclic fatigue testing of nickel-titanium endodontic instruments. *J Endod.* 1997 Feb;23(2):77–85.

- Ran S, Wang J, Jiang W, Zhu C, Liang J. Assessment of dentinal tubule invasion capacity of *Enterococcus faecalis* under stress conditions ex vivo. *Int Endod J*. 2015 Apr;48(4):362–72.
- Roane JB, Sabala CL, Duncanson MG. The “balanced force” concept for instrumentation of curved canals. *J Endod*. 1985 May;11(5):203–11.
- Ruddle CJ. The ProTaper endodontic system: geometries, features, and guidelines for use. *Dent Today*. 2001 Oct;20(10):60–7.
- Ruddle CJ, Machtou P, West JD. The shaping movement: fifth-generation technology. *Dent Today*. 2013 Apr;32(4):94, 96–9.
- Saber SEDM, Nagy MM, Schäfer E. Comparative evaluation of the shaping ability of ProTaper Next, iRaCe and Hyflex CM rotary NiTi files in severely curved root canals. *Int Endod J*. 2014a Apr 3;
- Saber SEDM, Nagy MM, Schäfer E. Comparative evaluation of the shaping ability of WaveOne, Reciproc and OneShape single-file systems in severely curved root canals of extracted teeth. *Int Endod J*. 2014b Mar 27;
- Schäfer E, Diez C, Hoppe W, Tepel J. Roentgenographic investigation of frequency and degree of canal curvatures in human permanent teeth. *J Endod*. 2002 Mar;28(3):211–6.
- Schäfer E, Vlassis M. Comparative investigation of two rotary nickel-titanium instruments: ProTaper versus RaCe. Part 1. Shaping ability in simulated curved canals. *Int Endod J*. 2004 Apr;37(4):229–38.
- Schilder H. Cleaning and shaping the root canal. *Dent Clin North Am*. 1974 Apr;18(2):269–96.
- Schneider SW. A comparison of canal preparations in straight and curved root canals. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol*. 1971 Aug;32(2):271–5.
- Sen BH, Piskin B, Demirci T. Observation of bacteria and fungi in infected root canals and dentinal tubules by SEM. *Endod Dent Traumatol*. 1995 Feb;11(1):6–9.
- Shen Y, Cheung GS. Methods and models to study nickel-titanium instruments. *Endodontic Topics*. 2013
- Shen Y, Cheung GS, Bian Z, Peng B. Comparison of defects in ProFile and ProTaper systems after clinical use. *J Endod*. 2006 Jan;32(1):61–5.

Simon S, Ctorza-Perez C. Cavité d'accès en endodontie. Encyclopédie Médico Chirurgicale. 2010;Odontologie(23-045-A-05).

Simon S, Pierre Machtou, Pertot W. Endodontie. Editions CdP. 2012.

Stern S, Patel S, Foschi F, Sherriff M, Mannocci F. Changes in centring and shaping ability using three nickel–titanium instrumentation techniques analysed by micro-computed tomography (μ CT). *Int Endod J*. 2012 Jun;45(6):514–23.

Tambe VH, Nagmode PS, Abraham S, Patait M, Lahoti PV, Jaju N. Comparison of canal transportation and centering ability of rotary protaper, one shape system and wave one system using cone beam computed tomography: An in vitro study. *J Conserv Dent*. 2014a;17(6):561–5.

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*. 2014 Sep 24;

Vallaeys K, Hodez C. Imagerie dentomaxillaire par faisceau conique : principes, matériels, indications et dosimétrie. *Réalités Cliniques*. 2014;25(2):103–14.

Varela-Patiño P, Ibañez-Párraga A, Rivas-Mundiña B, Cantatore G, Otero XL, Martin-Biedma B. Alternating versus continuous rotation: a comparative study of the effect on instrument life. *J Endod*. 2010 Jan;36(1):157–9.

Vieyra JP, Acosta J, Mondaca JM. Comparison of working length determination with radiographs and two electronic apex locators. *Int Endod J*. 2010 Jan;43(1):16–20.

Webber J, Machtou P, Pertot W, Kuttler S, Ruddle C, West J. The WaveOne single-file reciprocating system. *Roots*. 2011;1:28–33.

Woelfel JB, Scheid RC. Anatomie dentaire Application à la pratique de la chirurgie dentaire. Maloine; 2007.

Wu H, Peng C, Bai Y, Hu X, Wang L, Li C. Shaping ability of ProTaper Universal, WaveOne and ProTaper Next in simulated L-shaped and S-shaped root canals. *BMC Oral Health*. 2015;15(1):27.

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 Apr;26(4):210–6.

Yared G. Canal preparation using only one Ni-Ti rotary instrument: preliminary observations. *Int Endod J.* 2008 Apr;41(4):339–44.

You S-Y, Kim H-C, Bae K-S, Baek S-H, Kum K-Y, Lee W. Shaping ability of reciprocating motion in curved root canals: a comparative study with micro-computed tomography. *J Endod.* 2011 Sep;37(9):1296–300.

Zhao D, Shen Y, Peng B, Haapasalo M. Micro-computed tomography evaluation of the preparation of mesiobuccal root canals in maxillary first molars with Hyflex CM, Twisted Files, and K3 instruments. *J Endod.* 2013 Mar;39(3):385–8.

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 Sep 6;

Zhou H, Bin Peng, Zheng Y. An overview of the mechanical properties of nickel-titanium endodontic instruments. *Endodontic Topics.* 2013;29:42–54.

FOUILLEN Kevin John		N° thèse : 29 013
<u>TITRE :</u> <p style="text-align: center;">Etude des effets de la préparation canalaire à l'aide de la microtomographie : Analyse comparative innovante de 3 systèmes rotatifs en NiTi.</p>		
Thèse ; Chir. Dent. ; Brest ; 2015 ; (N°29 013)		
<u>RESUME :</u> <p>La préparation canalaire est une étape fondamentale du traitement endodontique dont l'objectif est d'éliminer la dentine canalaire infectée tout en établissant une conicité régulière au canal principal pour permettre son obturation. Cette mise en forme canalaire est réalisée au moyen d'instruments mécanisés en NiTi.</p> <p>L'étude des effets de la préparation canalaire notamment à l'aide de la microtomographie permet de comparer les performances de différents systèmes d'instrument endodontique.</p> <p>L'objet de ce travail est de proposer une nouvelle approche dans l'étude des effets de la préparation canalaire en comparant les performances de préparation de 3 systèmes rotatifs NiTi grâce à une méthode d'évaluation innovante.</p>		
<u>RUBRIQUE DE CLASSEMENT :</u>		ENDODONTIE
<u>MOTS CLES :</u>	<ul style="list-style-type: none"> - Préparation canalaire - Transport canalaire - Instruments endodontiques rotatifs - Microtomographie 	
<u>JURY :</u>	<ul style="list-style-type: none"> - M. le Professeur Reza ARBAB-CHIRANI - <u>Mme le Docteur Karen VALLAEYS</u> - M. le Docteur Alain ZERILLI - Mme. le Docteur Valérie CHEVALIER – HERISSET - Mme le Docteur Emilie THIEBAUT - M. Gaël BOURBOUZE 	
<u>ADRESSE DE L'AUTEUR :</u> <p style="text-align: center;">FOUILLEN Kevin John 1 rue Victor Hugo 29200 BREST</p>		

