

UNIVERSITE DU DROIT ET DE LA SANTE DE LILLE 2

FACULTE DE CHIRURGIE DENTAIRE

[Année de soutenance : 2017]

N°:

THESE POUR LE

DIPLOME D'ETAT DE DOCTEUR EN CHIRURGIE DENTAIRE

Présentée et soutenue publiquement le 09 octobre 2017

Par Trystan VANTORRE

Né le 31 octobre 1991 à Grande Synthe

Etude des critères d'évaluation en travaux pratiques
d'endodontie : approche théorique et expérimentale

JURY

Président : Pr Etienne DEVEAUX

Assesseurs : Dr Alain GAMBIEZ

Dr Thibault BECAVIN

Dr Lieven ROBBERECHT

UNIVERSITE DU DROIT ET DE LA SANTE DE LILLE 2

FACULTE DE CHIRURGIE DENTAIRE

[Année de soutenance : 2017]

N°:

THESE POUR LE

DIPLOME D'ETAT DE DOCTEUR EN CHIRURGIE DENTAIRE

Présentée et soutenue publiquement le 09 octobre 2017

Par Trystan VANTORRE

Né le 31 octobre 1991 à Grande Synthe

Etude des critères d'évaluation en travaux pratiques
d'endodontie : approche théorique et expérimentale

JURY

Président : Pr Etienne DEVEAUX

Assesseurs : Dr Alain GAMBIEZ

Dr Thibault BECAVIN

Dr Lieven ROBBERECHT

ACADEMIE DE LILLE
UNIVERSITE DU DROIT ET DE LA SANTE LILLE 2

FACULTE DE CHIRURGIE DENTAIRE
PLACE DE VERDUN
59000 LILLE

Président de l'Université : X. VANDENDRIESSCHE
Directeur Général des Services : P.M. ROBERT
Doyen : Pr. E. DEVEAUX
Vice-Doyens : Dr. E. BOCQUET, Dr. L. NAWROCKI, Pr G. PENEL
Chef des Services Administratifs : S. NEDELEC
Responsable de la scolarité : M. DROPSIT

PERSONNEL ENSEIGNANT DE L'U.F.R.

PROFESSEURS DES UNIVERSITÉS :

P. BEHIN Prothèses
T. COLARD Sciences Anatomiques et Physiologiques,
Occlusodontiques, Biomatériaux, Biophysiques,
Radiologie
E. DEVEAUX Odontologie Conservatrice - Endodontie
Doyen de la Faculté
G. PENEL Responsable de la Sous-Section des Sciences
Biologiques

MAITRES DE CONFÉRENCES DES UNIVERSITÉS :

T. BECAVIN Responsable de la Sous-Section d'**Odontologie**
Conservatrice - Endodontie
A. BLAIZOT Prévention, Epidémiologie, Economie de la Santé,
Odontologie Légale

F. BOSCHIN	Responsable de la Sous-Section de Parodontologie
E. BOCQUET	Responsable de la Sous-Section d' Orthopédie Dento-Faciale
C. CATTEAU	Responsable de la Sous-Section de Prévention, Epidémiologie, Economie de la Santé, Odontologie Légale
A. DE BROUCKER	Sciences Anatomiques et Physiologiques, Occlusodontiques, Biomatériaux, Biophysiques, Radiologie
T. DELCAMBRE	Prothèses
C. DELFOSSE	Responsable de la Sous-Section d' Odontologie Pédiatrique
F. DESCAMP	Prothèses
A. GAMBIEZ	Odontologie Conservatrice - Endodontie
F. GRAUX	Prothèses
P. HILDEBERT	Odontologie Conservatrice - Endodontie
J.M. LANGLOIS	Responsable de la Sous-Section de Chirurgie Buccale, Pathologie et Thérapeutique, Anesthésiologie et Réanimation
C. LEFEVRE	Prothèses
J.L. LEGER	Orthopédie Dento-Faciale
M. LINEZ	Odontologie Conservatrice - Endodontie
G. MAYER	Prothèses
L. NAWROCKI	Chirurgie Buccale, Pathologie et Thérapeutique, Anesthésiologie et Réanimation. Chef du Service d'Odontologie A. Caumartin – CHRU Lille
C. OLEJNIK	Sciences Biologiques
P. ROCHER	Sciences Anatomiques et Physiologiques, Occlusodontiques, Biomatériaux, Biophysiques, Radiologie
M. SAVIGNAT	Responsable de la Sous-Section des Sciences Anatomiques et Physiologiques, Occlusodontiques, Biomatériaux, Biophysiques, Radiologie
T. TRENTESAUX	Odontologie Pédiatrique
J. VANDOMME	Responsable de la Sous-Section de Prothèses

Réglementation de présentation du mémoire de Thèse

Par délibération en date du 29 octobre 1998, le Conseil de la Faculté de Chirurgie Dentaire de l'Université de Lille 2 a décidé que les opinions émises dans le contenu et les dédicaces des mémoires soutenus devant jury doivent être considérées comme propres à leurs auteurs, et qu'ainsi aucune approbation, ni improbation ne leur est donnée

Je dédie cette thèse...

Aux membres du jury,

Monsieur le Professeur Etienne DEVEAUX

Professeur des Universités - Praticien Hospitalier des CSERD

Sous-section Odontologie Conservatrice – Endodontie

Doyen de la Faculté de Chirurgie Dentaire de Lille

Docteur en Chirurgie –Dentaire

Docteur en Sciences Odontologiques

Docteur en Odontologie de l'Université de Lille 2

Habilité à Diriger des Recherches

Membre associé national de l'Académie Nationale de Chirurgie Dentaire

Personne Compétente en Radioprotection

Ancien Président de la Société Française d'Endodontie

Je tiens à vous remercier de m'avoir fait
l'honneur de bien vouloir présider notre
jury. Au cours de mes études, vous avez
su apporter un regard avisé sur mon
travail ce qui m'a été d'une très grande
aide. Soyez assuré de mes sentiments les
plus reconnaissants et les plus
respectueux.

Monsieur le Docteur Alain GAMBIEZ

Maître de Conférences des Universités-Praticien Hospitalier des CSERD

Sous-Section Odontologie Conservatrice - Endodontie

Docteur en Chirurgie Dentaire

D.E.A Sciences de la Vie et de la Santé

Vous avez accepté, avec beaucoup de gentillesse, de siéger dans ce jury. Votre intérêt pour l'endodontie m'a donné envie de développer mes compétences en la matière. Veuillez trouver ici l'expression de mes sincères remerciements et de ma gratitude.

Monsieur le Docteur Thibault BECAVIN

Maître de Conférences des Universités-Praticien Hospitalier des CSERD

Sous-Section Odontologie Conservatrice - Endodontie

Docteur en Chirurgie Dentaire

Responsable de la Sous-Section d'Odontologie Conservatrice et Endodontie

Docteur de l'Université de Lille, mention Odontologie Conservatrice et Endodontie

Je suis très heureux de vous compter
dans ce jury. Vous avez su
m'accompagner tout au long de ma
formation universitaire. Malgré un emploi
du temps chargé, vous avez pris le temps
de contribuer largement à mon étude.

Veillez trouver dans ce travail
l'expression de ma plus grande
reconnaissance.

Monsieur le Docteur Lieven ROBBERECHT

Maître de Conférences des Universités-Praticien Hospitalier des CSERD

Sous-Section Odontologie Conservatrice - Endodontie

Docteur en Chirurgie Dentaire

Docteur de l'Université de Lille mention Odontologie Conservatrice et Endodontie

Quand je pense au temps passé ensemble sur ce travail, je ne saurai imaginer meilleur directeur. Je vous remercie infiniment pour votre constante motivation, votre sérieux, votre amour du travail bien fait, votre disponibilité et votre sympathie. Cette étude n'aurait pas pu voir le jour sans votre rigueur et votre patience. Vous avez su parfaire ma formation et j'espère que ce travail est à la hauteur de vos espérances. Je vous souhaite beaucoup de réussite professionnelle et personnelle.

Table des matières

Table des abréviations	13
1 Introduction	14
2 Approche théorique	15
2.1 L'organe dentaire	15
2.1.1 Physiologie	15
2.1.2 Pathologies	15
2.1.3 Traitement endodontique.....	16
2.2 L'endodontie pré-clinique.....	16
2.2.1 Notions pédagogiques.....	17
2.2.2 Les méthodes passives.....	18
2.2.2.1 Les cours magistraux	18
2.2.3 Les méthodes actives.....	19
2.2.3.1 Les enseignements dirigés	20
2.2.3.2 Le monitorat étudiant.....	20
2.2.3.3 Les travaux pratiques	20
2.3 L'évaluation des étudiants en TP : critères et moyens.....	26
2.3.1 Analyse morphologique.....	27
2.3.2 Isolation.....	28
2.3.3 Cavité d'accès.....	28
2.3.3.1 Ouverture	29
2.3.3.2 Elimination du plafond pulpaire.....	29
2.3.3.3 Relocalisation des entrées canalaies	29
2.3.4 Préparation.....	31
2.3.4.1 Irrigation	32
2.3.4.2 Mise en forme.....	33
2.3.4.2.1 Diamètre apical de préparation	33
2.3.4.2.2 Longueur de travail	34

2.3.4.2.3	Conicité	36
2.3.4.2.4	Erreurs iatrogènes.....	37
2.3.5	Obturation	39
2.3.5.1	Longueur	39
2.3.5.2	Densité et homogénéité.....	40
2.4	Discussion autour de l'évaluation	42
2.4.1	Moyens d'évaluation.....	42
2.4.2	Méthodes d'évaluation	42
2.4.3	Synthèse	47
3	Approche expérimentale	48
3.1	Matériel et méthode	48
3.1.1	Séance de TP.....	49
3.1.1.1	Première séance : cavité d'accès et préparation canalaire.....	50
3.1.1.2	Deuxième séance : obturation canalaire	51
3.1.2	Evaluation conventionnelle.....	51
3.1.2.1	Première séance : cavité d'accès et préparation canalaire.....	52
3.1.2.2	Deuxième séance : obturation canalaire	55
3.1.3	Evaluation expérimentale.....	57
3.1.3.1	Première séance : cavité d'accès et préparation canalaire.....	58
3.1.3.2	Deuxième séance : obturation canalaire	61
3.1.4	Analyse statistique	64
3.2	Résultats.....	64
3.2.1	Quantitatifs	64
3.2.2	Qualitatifs	66
3.3	Discussion	67
4	Conclusion et perspectives	72
	Bibliographie	74

Table des abréviations

- **μ-CT** : "Micro CT" (Micro Computed Tomography) ou Microtomographie à rayons X
- **3D** : 3 dimensions
- **CBCT** : Tomographie volumique à faisceau conique (Cone Beam Computed Tomography)
- **ED** : Enseignement dirigé
- **EDTA** : Acide éthylène diamine tétra-acétique
- **ESE** : Société européenne d'endodontologie (European Society of Endodontology)
- **HAS** : Haute autorité de santé
- **LIPOE** : Lésion inflammatoire péri-radriculaire d'origine endodontique
- **LT** : Longueur de travail
- **MC** : Maître cône de gutta-percha
- **MEB** : Microscope électronique à balayage
- **NaOCl** : Hypochlorite de sodium
- **RCP** : Radiographie cône en place
- **RLP** : Radiographie lime en place
- **TE** : Traitement endodontique
- **TP** : Travaux pratiques

1 Introduction

L'endodontie est une activité fréquemment pratiquée au cabinet dentaire. Elle s'avère mal jugée par les praticiens qui la considèrent comme une discipline complexe, laborieuse et chronophage, en lien avec une certaine appréhension. Or, la pédagogie en chirurgie dentaire repose essentiellement sur l'apprentissage théorique et l'activité pratique. Dans le cadre de la formation universitaire pré-clinique, il est nécessaire de réaliser une évaluation pratique ponctuelle ou continue afin de décider si un étudiant est capable ou non d'aller plus loin dans sa formation. Cela nécessite dès lors l'usage de critères d'évaluation adaptés permettant de quantifier l'apprentissage des étudiants et d'améliorer leur formation pré-clinique.

Cependant, il n'existe pas de critères qualitatifs standardisés pour permettre l'évaluation des Travaux Pratiques (TP) d'endodontie. Face à ce constat, une étude des critères d'évaluation suivant les recommandations émises par l'ESE (European Society of Endodontology) est nécessaire.

L'objectif de cette étude comparative *in vitro* est de mesurer la pertinence des critères d'évaluation utilisés en TP d'endodontie en comparant les scores obtenus en TP pour chaque critère avec les scores obtenus par une évaluation de référence : la microtomographie.

Dans un premier temps, une approche théorique portera sur la pédagogie pratique en endodontie et les modalités d'évaluation. Dans un second temps, une approche expérimentale tentera de répondre à la question de recherche.

2 Approche théorique

Le chirurgien-dentiste omnipraticien est quotidiennement confronté à la réalisation de traitements endodontiques (TE). Pour effectuer ces actes, il est nécessaire de connaître des bases théoriques, pratiques mais également cliniques.

2.1 L'organe dentaire

2.1.1 Physiologie

L'organe dentaire est constitué de 4 types de tissus : l'émail, la dentine, la pulpe et le cément. Il est maintenu dans son environnement par les tissus parodontaux qui sont l'os alvéolaire, le ligament alvéolo-dentaire et la fibro-muqueuse gingivale (36).

L'émail, tissu le plus minéralisé de l'organisme, constitue le tissu de recouvrement coronaire de la dent. Il est dur, rigide et présente une forte résistance à la compression pour supporter les contraintes occlusales auxquelles il est soumis.

La dentine, située entre la pulpe et l'émail, constitue le tissu majoritaire de la dent en masse et en volume. Elle est moins rigide que l'émail et possède une importante résistance à la compression ce qui lui permet de servir de soutien à l'émail et d'absorber les contraintes mécaniques auxquelles elle est soumise.

Le cément recouvre la dentine radiculaire. Il appartient au parodonte car il permet l'attache du ligament parodontal avec l'os alvéolaire. Il est moins minéralisé que l'émail ou la dentine et n'est pas vascularisé. La fibro-muqueuse gingivale fait elle aussi partie du parodonte et recouvre l'os alvéolaire.

La pulpe est le seul tissu non minéralisé de la dent. Elle est très vascularisée et possède des fonctions nutritives, neuro-sensitives et défensives (sclérose dentinaire, dentinogenèse, inflammation) pour éviter les altérations de l'organe dentaire (36).

2.1.2 Pathologies

L'organe dentaire peut être touché par des agressions bactériennes, traumatiques ou iatrogènes. Ces pathologies peuvent altérer le tissu pulpaire. Une fois que la pulpe dentaire est atteinte de façon irréversible il s'en suit un phénomène de contamination bactérienne (54). Il est alors nécessaire de réaliser un TE qui aura

pour but de prévenir l'apparition ou de provoquer la guérison de lésions inflammatoires péri-radicales d'origine endodontique (LIPOE) en regard d'une racine dentaire. Les LIPOE sont le résultat d'une perturbation de l'équilibre dynamique entre les bactéries et leurs toxines présentes dans le canal dentaire et les défenseurs de l'hôte c'est-à-dire les cellules, cytokines et immunoglobulines (54). La pathologie apicale est donc due à l'infection de la pulpe (31,47,72).

2.1.3 Traitement endodontique

Pour traiter l'infection, il est nécessaire d'éliminer au mieux le parenchyme pulpaire, les bactéries et leurs toxines ainsi que les débris organo-minéraux situés dans les canaux radiculaires. Ceci doit être fait en respectant la morphologie de la dent et les tissus parodontaux péri-radicales, pour permettre une obturation étanche et durable. Une fois le système canalaire obturé, le flux de bactéries allant du milieu buccal vers les tissus parodontaux est significativement diminué empêchant une possible recontamination de l'endodonte via le parodonte. L'étanchéité coronaire et radiculaire pérennisera l'organe dentaire qui sera alors maintenu sur arcade (80).

Les techniques de TE ne cessent d'évoluer. Pour qu'elles soient bien mises en œuvre, elles doivent être au centre de la formation initiale et continue du chirurgien-dentiste. Les étapes du TE seront développées par la suite.

2.2 L'endodontie pré-clinique

La société européenne d'endodontologie (ESE) rappelle que les étudiants en formation initiale et continue doivent être capables de mener à bien un TE (29). A ce jour, il n'existe pas de stratégie clairement définie pour permettre aux étudiants de maîtriser les recommandations dictées par l'ESE. Aucun consensus international quant au contenu et à la quantité d'enseignement nécessaire pour mener à bien un TE n'a été énoncé(82,86). L'enseignement peut alors être hétérogène au sein des facultés de chirurgie dentaire (en France et dans d'autres pays), mais il est fondamental de passer par des étapes d'apprentissage pré-clinique pour mener à bien un TE (20,30,53).

2.2.1 Notions pédagogiques

L'apprentissage est un ensemble d'activités permettant d'acquérir ou d'approfondir des connaissances théoriques et pratiques afin de développer des aptitudes (1). Le «triangle pédagogique» de Houssaye illustre bien l'apprentissage (Fig.1) (88). Il décrit 3 points importants concernant les rapports entre :

- les savoirs et les étudiants ;
- les étudiants et l'enseignant ;
- l'enseignant et les savoirs.

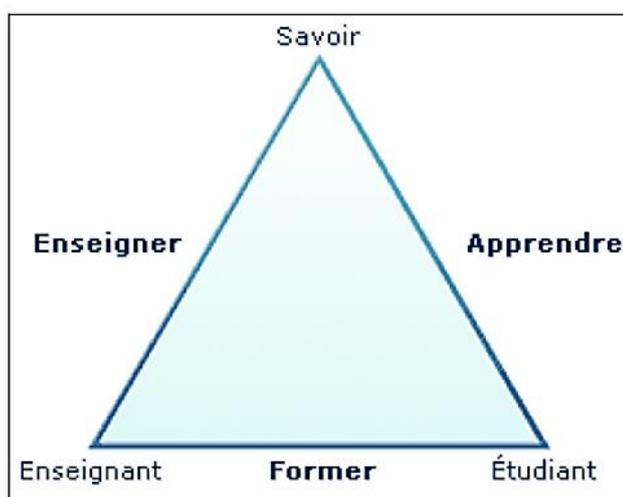


Figure 1 : le triangle pédagogique de Houssaye (88).

Les savoirs sont définis comme étant l'ensemble des connaissances théoriques et pratiques (1). Le Boterf a classé les savoirs en fonction des types d'apprentissage (56). L'apprentissage passe par des savoirs théoriques et pratiques. Les savoirs théoriques permettent de comprendre et d'interpréter, les savoirs pratiques permettent de connaître la démarche à suivre. Il décrit une relation didactique entre les savoirs et l'enseignant. Cette relation permet au formateur de transmettre les savoirs aux étudiants. Les étudiants doivent se rendre disponible, être en capacité d'apprendre et avoir « soif de savoir ». Les enseignants doivent s'adapter au niveau des apprenants, qui eux, s'engagent à part entière dans leur éducation. Il existe donc une relation pédagogique entre ces intervenants qui doivent être « actifs et impliqués dans l'apprentissage » (14). Des stratégies d'apprentissage doivent être mises en place pour que les étudiants accèdent au contenu de la formation (15).

Les stratégies d'apprentissage sont classées en 2 groupes : les méthodes passives et les méthodes actives.

2.2.2 Les méthodes passives

Les méthodes passives permettent aux étudiants de suivre les instructions données par un enseignant sans interagir avec ce dernier. Ces méthodes sont dirigées par un enseignant qui transmet les savoirs aux étudiants via un cours magistral.

2.2.2.1 Les cours magistraux

Dans l'enseignement supérieur, le cours magistral dispensé en amphithéâtre constitue la base de l'enseignement. S'il n'y a pas d'échanges entre les étudiants et l'enseignant, les étudiants doivent alors fournir plus d'efforts pour être attentifs au cours et peuvent se lasser rapidement. A l'heure des nouvelles technologies de l'information et de la communication (NTIC), il est donc important d'avoir une interaction entre le corps enseignant et le corps étudiant de façon à ce que le cours soit plus attractif (53). Proposer différents supports pédagogiques comme des photographies ou des vidéos permet d'introduire le contenu du cours d'une manière attractive. Le but à terme étant d'augmenter le taux de rétention d'informations (92).

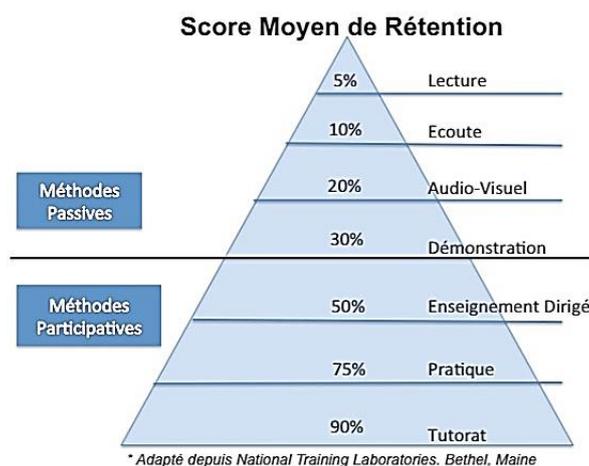


Figure 2 : pyramide de l'apprentissage adaptée du NTL, 1960 (92).

La rétention d'informations est une propriété de la mémoire qui consiste à conserver l'information. D'après la pyramide de l'apprentissage, développée au

laboratoire national de la formation (NTL) à Bethel, les taux de mémorisation après 24 h sont de 5 à 10% pour les présentations photographiques et de 20% pour les présentations vidéos (Fig.2).

Les présentations photographiques :

Elles permettent de présenter des cas cliniques, les points importants d'un cours, des schémas, des illustrations de façon à capter l'attention par le visuel. Le formateur maîtrise un savoir structuré et le transmet directement sous forme d'exposé aux étudiants qui restent passifs. Les étudiants notent le cours et peuvent accéder aux contenus pédagogiques disponibles sur une plateforme en ligne. En revanche, ils peuvent être amenés à s'interroger sur le contenu du cours et se poser des questions.

Les présentation vidéos :

Le support vidéo permet au formateur de délivrer un message standardisé, vivant et reproductible. Il offre un vision concrète du travail à effectuer et permet de mettre en évidence le lien direct entre la théorie et la pratique. C'est par exemple le cas pour la réalisation des cavités d'accès types (63). Les vidéos peuvent ensuite être visionnées plusieurs fois en dehors du cours grâce à une plateforme en ligne. Dans la littérature, les vidéos présentent 4 avantages : la diffusabilité, l'interactivité, la synchronisation et l'autonomisation (22,50).

Les méthodes passives n'impliquent pas les étudiants dans la démarche d'apprentissage. Leur l'attention diminue après quelques minutes et engendre une perte d'informations. La rétention d'informations est donc plus faible pour les méthodes passives (de 5 à 30%) que pour les méthodes actives (de 50 à 90%) (Fig.2).

2.2.3 Les méthodes actives

Les méthodes actives permettent aux étudiants de prendre des initiatives. Ces méthodes sont participatives et impliquent fortement les apprenants en créant une dynamique de motivation. Les étudiants apprennent par l'action et développent ainsi leurs aptitudes de pratiques manuelles (13). Ces méthodes s'illustrent par les enseignements dirigées (ED), le monitorat étudiant et les TP.

2.2.3.1 Les enseignements dirigés

Au cours d'un enseignement dirigé (ED), l'enseignant donne des exercices d'application, de découverte et de réflexion sur des notions abordées pendant les cours magistraux afin d'approfondir le sujet. Souvent, les étudiants sont amenés à préparer un travail au préalable, puis l'enseignant corrige ce travail. Les étudiants travaillent seuls ou en groupe restreint et peuvent poser des questions à l'enseignant. Ils travaillent de façon autonome et l'enseignant intervient seulement en cas de difficultés. L'information transmise est alors plus pertinente. Les ED permettent plus de suivi, plus d'encadrement et un taux de rétention d'informations à 24 h de 50% (Fig.2).

2.2.3.2 Le monitorat étudiant

Le monitorat présente les mêmes objectifs que les ED mais consiste à mettre en place un compagnonnage entre les étudiants. Les étudiants de promotions supérieures encadrent les étudiants d'années inférieures afin de répondre à leurs questions et de les aider à bien assimiler les notions théoriques. Il présente un double avantage :

- mettre en place un auto-apprentissage théorique avec une méthode active pour le moniteur ;
- mettre en place un compagnonnage permettant aux étudiants de développer leurs compétences théoriques et pratiques.

Le taux de rétention d'informations des étudiants à 24 h est de 50% (Fig.2) si le moniteur a bien joué son rôle. Il doit en effet respecter ses engagements envers les étudiants et avoir assimilé le cours afin de pouvoir le transmettre à son tour. En respectant ces principes le moniteur peut bénéficier d'un taux de rétention d'informations à 24 h de 90% (Fig.2). Le monitorat est donc très intéressant pour approfondir les connaissances du moniteur.

2.2.3.3 Les travaux pratiques

En TP, l'enseignant réalise une démonstration puis les étudiants reproduisent le travail à l'identique de façon autonome. Les étudiants bénéficient d'un taux de mémorisation de 30% en visualisant une démonstration puis ce taux passe à 75%

dès qu'ils pratiquent (16). Ces méthodes illustrent bien la transmission d'un savoir-faire. L'enseignant doit recréer des conditions de travail propices à l'immersion des étudiants dans leur futur environnement professionnel. C'est le cas dans une salle de simulation pré-clinique. Pour que les étudiants apprennent à réaliser un TE, Tchorz et coll. ont montré qu'il était possible de travailler sur des modèles synthétiques au cours de l'enseignement pré-clinique (85). Les dents naturelles sont les modèles de travail qui s'approchent le plus d'une situation clinique et sont les plus utilisées pour la formation pratique pré-clinique initiale et continue des praticiens ainsi que pour la recherche en endodontie.

Il existe donc différents outils pédagogiques pour apprendre et les étudiants ne peuvent pas rester passifs pour appréhender leur futur métier de chirurgien dentiste. Ils doivent pratiquer pour apprendre. Proposer un enseignement pratique en endodontie lors de la formation initiale et continue s'avère être indispensable (25,29,53).

Il n'existe pas de consensus précis concernant le contenu théorique de la formation ou la stratégie à adopter pour la formation pratique pré-clinique en endodontie (34). Néanmoins, il est possible de suivre les recommandations proposées par l'ESE qui préconise la réalisation d'un TE en 5 étapes(20,29,30) :

- analyse morphologique ;
- isolation ;
- réalisation d'une cavité d'accès ;
- préparation canalaire ;
- obturation canalaire.

Ces étapes sont réalisées sur un modèle de travail simple (Fig.3) en début de cursus à savoir une dent naturelle mature et non minéralisée ou un modèle synthétique.

Analyse morphologique

La première étape du TE consiste à visualiser la dent afin de s'assurer qu'elle soit mature et sans obturations (23).

L'imagerie radiographique pré-, per- et post-opératoire est indispensable pour mener à bien un TE (5). Lorsqu'elle est réalisée convenablement, elle permet de mettre en évidence de nombreuses informations sur la dent mais ne doit en aucun cas remplacer l'examen clinique (90). La radiographie pré-opératoire permet de mettre en évidence les spécificités anatomiques et d'anticiper les éventuelles difficultés liées au TE. En endodontie, les clichés radiographiques rétro-alvéolaires sont réalisés en première intention car ils permettent de visualiser l'ensemble de la dent en 2 dimensions avec peu de déformations (5). En TP, deux clichés radiographiques d'incidences différentes permettent de compenser ce caractère bi-dimensionnel et d'obtenir un maximum d'informations sur la configuration pulpaire de la dent. Cette étape d'analyse morphologique pré-opératoire est très importante puisque la configuration pulpaire peut être complexe (89) (Fig.3). Seuls les examens tridimensionnels permettent une observation en volume précise et intéressante pour compléter un éventuel manque d'information (17), mais ils sont plus coûteux et plus irradiants que les clichés rétro-alvéolaires. En odontologie, 2 types d'appareils sont utilisés pour obtenir des images en 3 dimensions (3D) : le μ -CT (Micro Computed Tomography) et le CBCT (Cone Beam Computerized Tomography). Le μ -CT (Fig.13) est utilisé *in vitro* pour la recherche et le CBCT est souvent utilisé *in vivo* à des fins cliniques. La classification des principaux types de configurations pulpaires selon Vertucci (A) et complétés par Gulabivala (B) organise les différentes configurations pulpaires selon leur complexité anatomique (89). La complexité du système canalaire impacte directement son traitement, il est donc important de sélectionner une dent adaptée au niveau du praticien. Les étudiants en formation pré-clinique doivent ainsi traiter des dents présentant une configuration pulpaire plus simple en début de cursus puis plus complexe en fin de cursus.

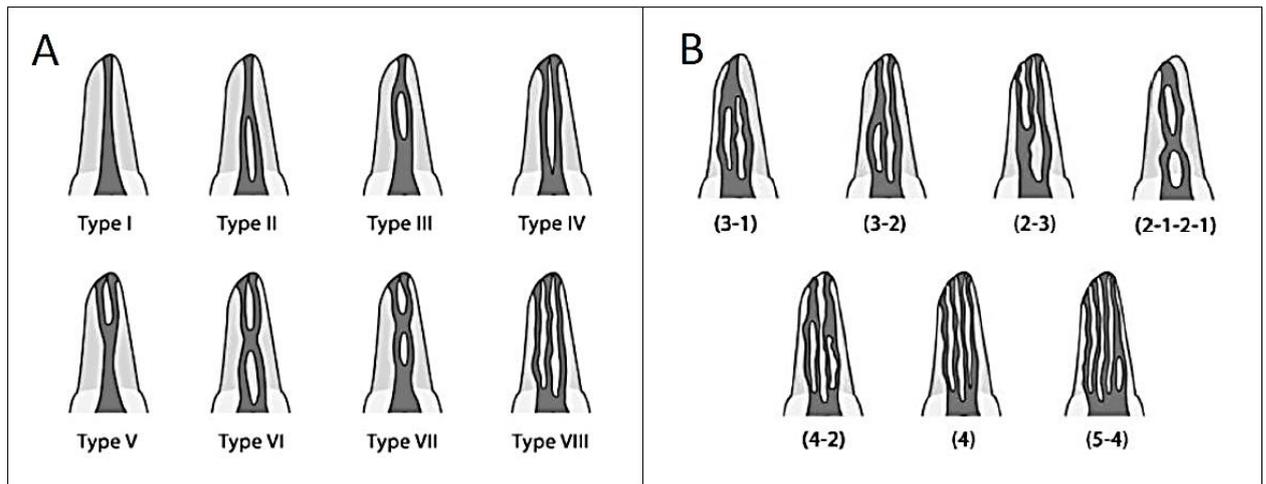


Figure 3: principaux types de configurations pulpaire selon Vertucci (A) et complétés par Gulabivala (B) (89).

Isolation

L'isolation de la dent par un champ opératoire (digue dentaire) est nécessaire pour effectuer un TE dans de bonnes conditions (64). La digue dentaire isole la dent de façon étanche ; la salive ne peut donc pas polluer le champ opératoire et les solutions d'irrigation n'intoxiquent pas le patient (2). Pour le patient, elle permet d'éviter la contamination bactérienne, de protéger les tissus mous, de limiter le risque d'ingestion/inhalation de produits toxiques et d'augmenter son confort. Pour le praticien, elle permet d'augmenter la visibilité et la sensation tactile, de diminuer la formation de buée sur le miroir, les interruptions verbales et le risque d'infection croisée. Ng et coll. ont prouvé que son utilisation augmente le taux de succès d'un TE (64).

Cavité d'accès

Suite à l'isolation, une cavité d'accès est réalisée au niveau de la face occlusale pour les dents postérieures et au niveau de la face palatine ou linguale pour les dents antérieures. Elle est spécifique à chaque dent et permet aux instruments d'accéder au système canalaire. Le but de la cavité d'accès est d'éliminer l'ensemble du plafond pulpaire, de retirer le contenu caméral, de localiser les entrées canalaire et de les élargir (relocalisation) afin d'accéder au tiers apical sans interférences coronaires (29,40,59). La cavité d'accès doit constituer un réservoir pour la solution d'irrigation et assurer le maintien de la restauration temporaire. Elle est un élément clé qui conditionne la suite du TE (57).

Préparation canalaire

- **Irrigation** : le système canalaire est rincé à l'aide de solutions d'irrigations antiseptiques comme l'hypochlorite de sodium concentrée à 2,5% (NaOCl). Ce rinçage permet d'éliminer les débris dentinaire formés conjointement à la mise en forme du canal. En effet, en plus d'une action désinfectante le NaOCl possède une action solvante au niveau des tissus organiques (94). Cette action est obtenue à partir de concentrations supérieures à 0,1% (65). En France, la concentration recommandée est de 2,5% ce qui permet au NaOCl d'avoir une action antibactérienne combinée à l'action solvante. Cette solution d'irrigation est toxique si elle est projetée dans les tissus péri-apicaux. Elle peut aussi être activée pour augmenter son efficacité (activation mécanique, chauffage, ondes sonores/ultrasonores ou photo-activation). Enfin, un autre rinçage en fin de préparation doit être réalisé à l'aide d'EDTA 17%, acide citrique 10% ou de MTAD (mélange de doxycycline, acide citrique et d'un détergent) pour éliminer la composante minérale de la dentine et ainsi parfaire la propreté des parois canalaire (43).

- **Mise en forme** : la mise en forme canalaire permet d'augmenter la conicité et le diamètre du canal pour permettre aux solutions d'irrigation et aux matériaux d'obturation d'atteindre la zone apicale (Fig.4) (80). Au niveau de la limite apicale de préparation, la dimension de la section transversale passant par le centre du canal se définit comme le diamètre apical de préparation. Il est exprimé en centième de millimètre (mm) et doit être choisi selon la situation clinique (largeur du canal, largeur du foramen et pathologie pulpaire en présence). Un diamètre apical de préparation de 25 centièmes de millimètre est couramment utilisé (dent mature et non minéralisée). Entre chaque passage d'instruments manuels ou mécanisés il est nécessaire de rincer à l'aide de solutions d'irrigation (11). Cette démarche conjointe de la mise en forme et de l'irrigation canalaire doit être détaillée lors de la formation initiale et continue car elle est souvent source de confusion.

Le choix de la limite apicale de préparation est controversé en endodontie même si le concept qui consiste à confiner la préparation à l'espace canalaire sans dépassement instrumental fait l'unanimité. Il est nécessaire de choisir une limite apicale de préparation qui coïncide avec la jonction cémento-dentinaire selon Kuttler

(52), la constriction apicale selon Hulsmann et Schaeffer (45) ou le point situé à 0,5 mm en deçà du foramen apical (78). Une bonne connaissance des structures anatomiques permet de choisir une limite apicale de préparation adaptée à la situation clinique (52).

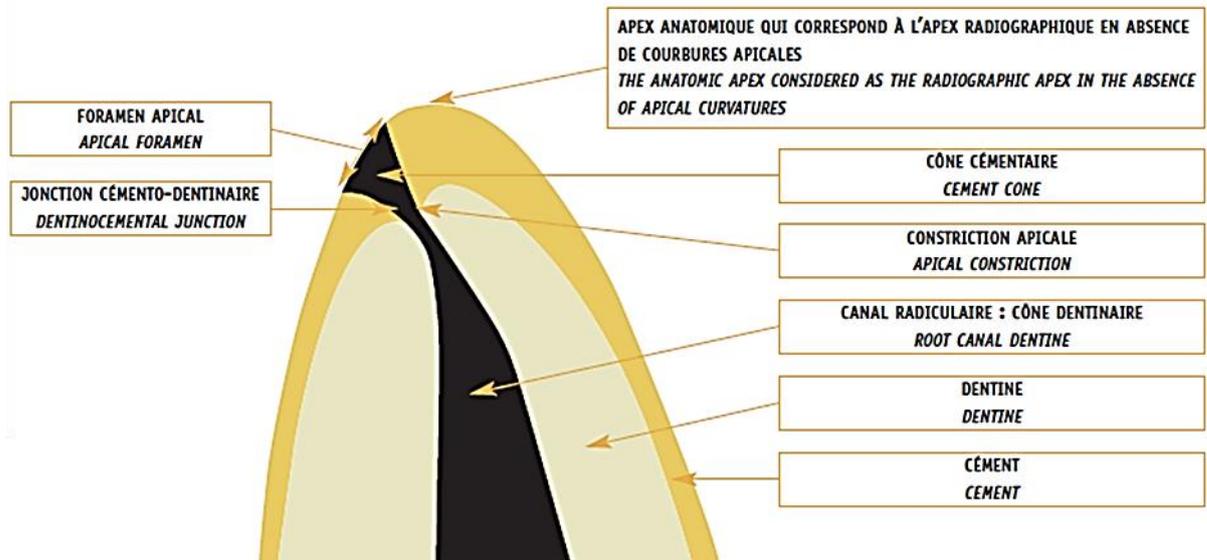


Figure 4: représentation schématique de l'anatomie de la zone apicale d'après Kuttler (image SOP) (32).

Obturation

Le but de l'obturation est d'éviter toute réinfection du système canalaire. Une obturation étanche, tridimensionnelle et durable permet de prévenir une éventuelle recontamination bactérienne des canaux radiculaires précédemment préparés (8,75). Plusieurs méthodes d'obturation existent et doivent être choisies selon la complexité anatomique (Fig.3). Il est courant d'utiliser des cônes de gutta-percha chauffés et associés à des ciments de scellement canalaire. La gutta-percha possède des propriétés thermoplastiques et constitue un excellent matériau d'obturation canalaire. Elle permet d'obturer le système canalaire en 3D de façon stable et durable (8). Les ciments de scellement assurent l'herméticité entre le corps de l'obturation et la dentine radiculaire intra-canalaire (16).

Enfin, le TE doit être recouvert par une reconstitution coronaire étanche pour prévenir une éventuelle recontamination de la dent (68).

La réalisation dans de bonnes conditions d'un TE difficile requiert donc un apprentissage intensif et rigoureux lors de la formation des praticiens. Seule l'évaluation d'un enseignement pratique en endodontie permet de vérifier que les futurs praticiens soient capables de mener à bien un TE (20,30).

2.3 L'évaluation des étudiants en TP : critères et moyens

Pour les étudiants, l'évaluation des TP permet :

- de quantifier l'apprentissage afin d'obtenir un score faisant référence à leur niveau (53) ;
- de repérer, travailler et surmonter les faiblesses (24) ;
- de progresser en traitant des dents de plus en plus complexes au cours de l'année (53).

Pour les enseignants, l'évaluation des TP permet :

- de quantifier un apprentissage afin de décider si un étudiant est capable ou non d'aller plus loin dans sa formation (20,30) ;
- d'analyser la pratique pour la comparer aux recommandations (29) ;
- de cibler les difficultés et de mettre en œuvre des actions pour améliorer la formation (24).

L'évaluation des TP est encadrée par un certain nombre de critères. Classiquement, ces critères d'évaluation permettent de sanctionner et de quantifier l'apprentissage des étapes d'un TE, allant de la cavité d'accès en passant par la préparation canalaire jusqu'à l'obturation. Différents moyens et méthodes d'évaluation sont décrits dans la littérature pour chaque critère clinique et radiographique afin de donner une appréciation qualitative ou quantitative d'un travail. Malheureusement, il n'existe pas de critères qualitatifs standardisés pour permettre l'évaluation des TP d'endodontie (34). Ce chapitre vise donc à recenser et à décrire un maximum de critères et de moyens utilisés aujourd'hui.

2.3.1 Analyse morphologique

Cette étape d'évaluation morphologique pré-opératoire est très importante puisque la configuration pulpaire peut être complexe (Fig.3) (89). Elle se traduit visuellement par :

- une dent adaptée à l'exercice demandé ("réalisation d'une cavité d'accès sur incisive centrale maxillaire" par exemple) ;
- l'absence de délabrement important de la couronne ;
- la présence d'apex mature ;
- une morphologie externe adaptée au niveau de difficulté de la séance de TP (dent saine mono-radiculée, édification radiculaire terminée par exemple) (23).

La radiographie permet de compléter l'appréciation visuelle et de mettre en évidence :

- les spécificités anatomiques liées à la configuration pulpaire de la dent (Fig.3) et les éventuelles difficultés qui en découlent (courbures, calcifications, canaux supplémentaires, pulpolithes) ;
- le nombre de canaux nécessaire à la réalisation de l'exercice et le volume pulpaire ;
- l'absence de délabrement coronaire important ou d'obturation (coronaire et/ou radiculaire) ;
- la morphologie de la zone apicale (Fig.4) (5,90).

La littérature propose actuellement plusieurs moyens et méthodes d'évaluation de la morphologie dentaire :

- une analyse clinique et des radiographies plans de 2 incidences différentes permet d'évaluer la situation initiale, les éventuelles difficultés et de prédire le pronostic du TE (19).
- le CBCT permet d'obtenir des images numériques en 3D de la morphologie dentaire initiale (interne et externe). En endodontie, il est considéré comme un outil indispensable qui complète les radiographies et affine le diagnostic. Cependant, son utilisation doit être justifiée par l'apport d'un bénéfice au TE et ne doit pas être réalisée en première intention (76).
- le μ -CT offre une grande précision pour observer *in vitro* la morphologie interne et

externe d'une dent. Il utilise une technique non destructive permettant d'obtenir : une image en 3D de la dent, des mesures de variations de volume canalaire et de variations de surface sur l'ensemble des canaux (46).

- des coupes observées au microscope électronique à balayage (MEB) et des reconstructions d'images en 3D obtenues par le μ -CT peuvent être utilisées, mais uniquement à des fins de recherche. Ils renseignent encore plus d'informations sur la morphologie dentaire interne et externe (79).

L'évaluation de l'analyse morphologique permet de définir si une dent est "adaptée" ou "non adaptée" à l'exercice et d'anticiper les éventuelles difficultés opératoires.

2.3.2 Isolation

L'isolation de la dent par un champ opératoire est indispensable et augmente le taux de succès du TE (2,64). L'évaluation de l'isolation porte sur la mise en place :

- d'une feuille de digue étanche qui sertit le collet de la dent afin de retenir les solutions d'irrigation ;
- d'un crampon adapté à la dent et qui stabilise le champ opératoire ;
- de ligatures venant parfaire l'étanchéité du champ opératoire (40).

Généralement, la qualité de l'étanchéité du champ opératoire est évaluée visuellement ; mais aucune méthode précise d'évaluation de l'isolation n'est décrite. Cependant, il semblerait intéressant d'évaluer manuellement la stabilité du crampon et visuellement l'étanchéité afin d'apprécier la qualité d'une isolation. L'évaluation clinique serait alors qualitative : "étanche" ou "non étanche".

2.3.3 Cavité d'accès

La cavité d'accès doit répondre à 4 objectifs : éliminer l'ensemble du plafond pulpaire et l'ensemble du contenu caméral ; visualiser les entrées canales en préservant le plancher pulpaire ; accéder directement au système canalaire et au 1/3 apical ou à la première courbure ; contenir les solutions d'irrigation (57,77). L'évaluation d'une cavité d'accès peut être effectuée en plusieurs étapes liées les unes aux autres : l'ouverture, l'élimination du plafond pulpaire et la relocalisation des entrées canales.

2.3.3.1 Ouverture

L'évaluation de l'ouverture coronaire de la cavité d'accès porte sur :

- le respect des objectifs théoriques (cavité d'accès type). L'ouverture doit être adaptée à chaque dent (suffisante sans être excessive) (77) ;
- l'identification et l'accès sans interférence à toutes les entrées canalaire ;
- la présence d'une cavité de dépouille et suffisamment large pour permettre la suppression de l'ensemble du contenu caméral ainsi que la recherche de canaux supplémentaires (57) ;
- l'absence de délabrement coronaire excessif risquant de fragiliser la dent (effondrement d'une cuspide, d'une crête marginale, du pont d'émail ou une perforation) (40).

L'ouverture coronaire est évaluée visuellement pour la comparer à des planches d'anatomie de référence (cavité d'accès type) et par un passage d'une sonde endodontique fine DG16 afin de localiser les entrées canalaire (77).

2.3.3.2 Elimination du plafond pulpaire

L'accès au système canalaire passe par la suppression de la totalité du plafond pulpaire. L'évaluation de l'élimination du plafond pulpaire se traduit par la présence de parois lisses et régulières ; une continuité entre l'ouverture coronaire et les entrées canalaire (40).

L'élimination du plafond pulpaire est évaluée à l'aide d'un sondage à la sonde n°17.

2.3.3.3 Relocalisation des entrées canalaire

Les entrées canalaire doivent être élargies (relocalisées) pour faciliter l'accès aux instruments de préparation canalaire. La relocalisation des entrées canalaire permet de redresser les courbures au détriment de la paroi opposée à la courbe (paroi de sécurité) afin d'accéder au 1/3 apical ou à la 1^{ère} courbure (10,60). L'évaluation de la relocalisation des entrées canalaire se traduit par :

- une bonne visibilité et la propreté des entrées canalaire ;
- une pénétration facile des instruments de préparation (29) ;
- la suppression des triangles dentinaires ;

- un tiers apical ou une 1^{ère} courbure canalaire visible et accessible sans contraintes (60).

L'évaluation clinique de la relocalisation des entrées canalaire s'effectue à l'aide d'une lime manuelle de cathétérisme (lime de perméabilité) et d'une sonde endodontique utilisées toutes les deux sous un microscope opératoire. Le praticien ne doit pas chercher à orienter la lime de perméabilité pour rester dans le canal. La relocalisation des entrées canalaire doit guider la gestuelle instrumentale. Le contrôle du bon redressement de la lime de perméabilité ainsi que le calage du stop en silicone sur la cuspide du même nom que le canal traité est un bon moyen pour évaluer l'absence de triangles dentinaires dans le tiers médian et coronaire du canal (60).

L'évaluation radiographique peut s'effectuer conjointement à l'évaluation clinique à partir de clichés de 2 incidences différentes. En effet, un seul cliché radiographique ne permet pas d'obtenir une visualisation en 3D de la cavité d'accès. Le changement d'incidence radiographique permet ainsi de compenser le caractère bi-dimensionnel lié à la radiographie (45).

Une analyse clinique et radiographique combinée à l'utilisation du microscope opératoire d'endodontie permet ainsi de préciser l'évaluation de l'ouverture, l'élimination de plafond pulpaire et la relocalisation des entrées canalaire d'une cavité d'accès. L'évaluation se fait dans la globalité ou étape par étape. En effet, la réalisation d'une cavité d'accès passe par un ensemble d'étapes indispensables et le manquement à l'une de ces étapes impacte les autres ainsi que la suite du TE (57).

Diemer propose une échelle d'accord pour l'évaluation de la cavité d'accès organisée en 4 niveaux de scorage : "pas du tout d'accord", "plutôt pas d'accord", "plutôt d'accord" et "tout à fait d'accord". Cette échelle peut se traduire numériquement par un score sur 3 allant de 0 à 3 avec 4 valeurs possibles (Fig.5)
(24).

Figure 1 :
Copie d'écran de l'illustration du paramètre « dimension » lors d'une séance de correction
pour une prémolaire mandibulaire

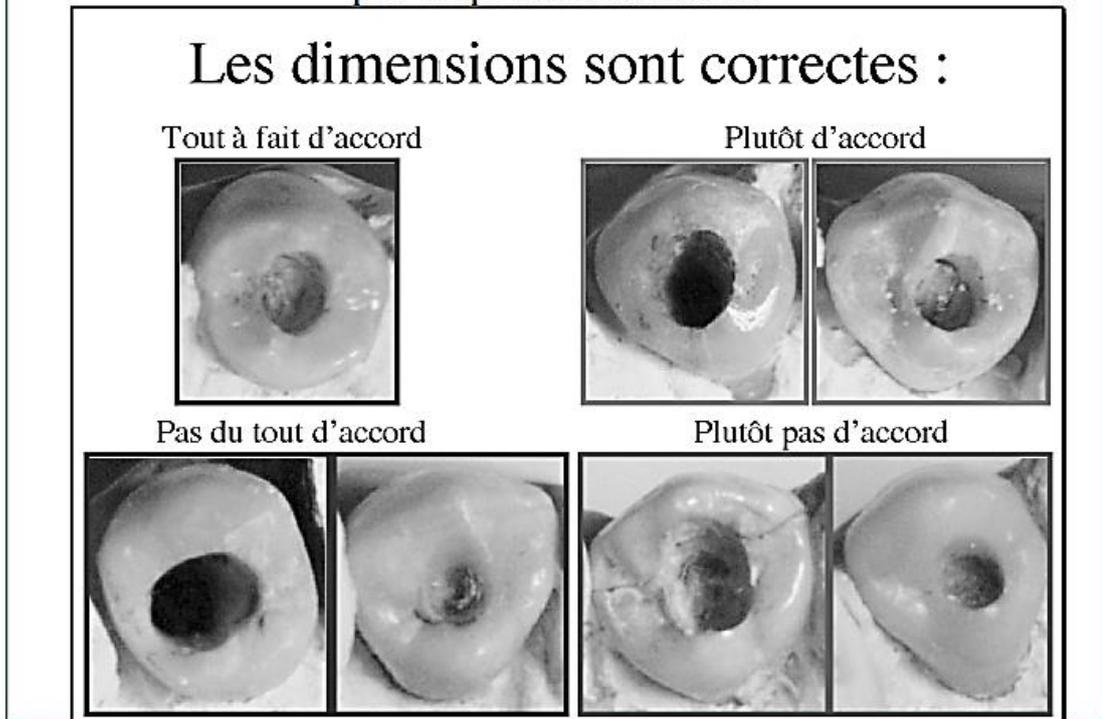


Figure 5 : illustration de l'échelle d'accord de Diemer pour l'évaluation de cavités d'accès réalisées en TP (24).

Enfin, le μ -CT permet l'évaluation du volume canalaire, du pourcentage de surfaces non instrumentées et de la quantité de dentine éliminée (46). Suebnukarn a comparé des cavités d'accès réalisées sur des simulateurs en réalité virtuelle à des cavités d'accès réalisées sur des simulateurs pré-cliniques (dents sur arcade dentaire montée sur une tête fantôme). La précision du μ -CT a permis de calculer le nombre de voxels de dentine éliminés sur les cavités d'accès dans le but de quantifier les erreurs potentiellement commises lors de la réalisation d'une cavité d'accès. Le μ -CT serait donc un moyen pertinent pour l'évaluation expérimentale de la cavité d'accès.

2.3.4 Préparation

Une préparation adéquate passe par un renouvellement régulier de la solution d'irrigation lors de la mise en forme canalaire.

2.3.4.1 Irrigation

L'irrigation doit permettre l'élimination des micro-organismes, des débris organiques et minéraux (propreté des parois canalaire) ainsi que la lubrification des instruments canalaire (29,94).

L'évaluation clinique passe par l'appréciation de la propreté des parois coronaire et canalaire visible.

L'évaluation radiographique de l'irrigation se traduit par l'absence de débris minéraux visible au sein d'un canal (94). En effet, ni les micro-organismes ni les débris organiques ne sont visible à la radiographie contrairement aux débris minéraux qui eux sont radio-opaques et partiellement visible en raison de la faible résolution. Le μ -CT serait encore une fois un bon moyen pour évaluer *in vitro* la qualité d'une irrigation en raison de la haute résolution.

L'appréciation de la qualité d'une irrigation (propreté des parois) s'effectue par différents moyens et méthodes d'évaluation :

- le microscope opératoire permet d'inspecter les parois canalaire et de mesurer visuellement la présence ou l'absence de débris.
- l'utilisation d'un MEB permet d'évaluer de façon plus précise la qualité d'une irrigation (6,43).
- une culture bactérienne réalisée avant l'obturation du canal peut aussi être menée afin de confirmer l'efficacité de la désinfection canalaire (81).

Des méthodes expérimentales d'observation des parois canalaire au MEB permettent de visualiser correctement la propreté des parois canalaire après rinçage (6,43,44). La propreté des parois canalaire suite à une irrigation est alors évaluée en 3 scores :

- score a = absence de détection de la smear layer sur les parois canalaire, tubuli dentinaire ouvert ;
- score b = présence modérée de smear layer, absence de smear layer sur les parois canalaire mais présence de débris dans les tubuli dentinaire ;
- score c = présence abondante de smear layer, la smear layer recouvre les parois canalaire et les tubuli dentinaire (Fig.6).

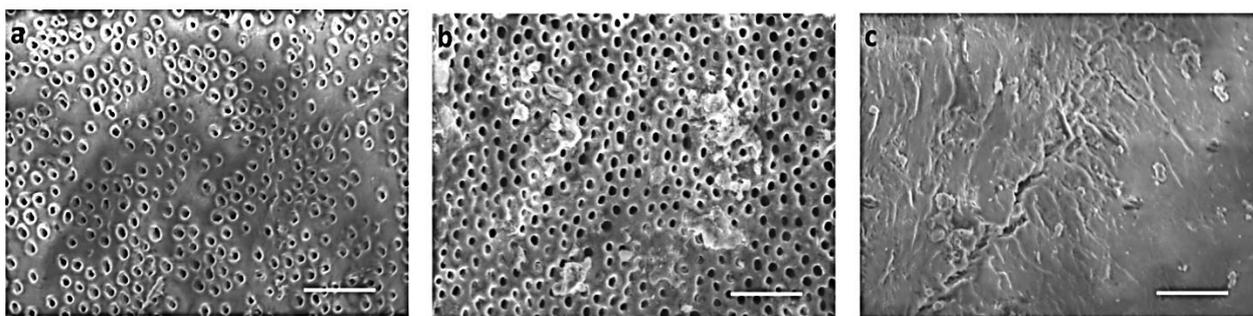


Figure 6 : observation au MEB de la quantité de smear layer/débris présente sur les parois canalaires (barre = 50 μ m) (70).

Aucune échelle de score clinique n'a été énoncée pour évaluer la propreté des parois canalaires. Néanmoins, le calcul de la quantité de débris visible cliniquement sur les parois permettrait de scorer la qualité d'une irrigation (44).

2.3.4.2 Mise en forme

Au cours d'une séance de TP, l'évaluation de la mise en forme canalaire passe par l'appréciation du diamètre apical de préparation, de la longueur de travail (LT), de la conicité et des erreurs iatrogènes.

2.3.4.2.1 Diamètre apical de préparation

Le diamètre apical de préparation est mesuré à la limite apicale de préparation idéalement située en amont de la constriction apicale (Fig.4). Son évaluation se traduit par la capacité de la forme du canal à retenir le matériau d'obturation (40,45).

Il existe plusieurs méthodes et moyens pour évaluer le diamètre apical d'une préparation canalaire :

- passage d'une lime apicale maîtresse (55) ;
- mesure sur des coupes axiales numériques issues de techniques d'imagerie 3D (μ -CT, CBCT) avec la formule de Gambill. Cette formule consiste à mesurer les écarts de diamètre canalaire tous les millimètres. Elle a été initialement utilisée pour mesurer le transport canalaire avant et après préparation mais elle peut également être utilisée pour évaluer le diamètre apical (35).

- des coupes histologiques de racines observées avant et après la mise en forme avec l'aide d'un stéréo-microscope couplé à une caméra à fort grossissement permettent de mesurer précisément le diamètre de la lumière canalaire et donc le diamètre apical de préparation (technique de Bramante) (58,93).

Aucune échelle de scorage clinique n'a été énoncée pour évaluer le diamètre apical de préparation.

2.3.4.2.2 Longueur de travail

La LT se définit comme la distance entre un repère anatomique coronaire et une limite apicale de préparation. Ces 2 points sont définis par l'opérateur en fonction de la situation clinique. L'école américaine indique que la limite apicale de préparation doit coïncider avec la jonction cémento-dentinaire (Fig.4) (52). Cette dernière serait confondue ou serait proche de la constriction apicale et à une distance du foramen apical : 0,5 mm chez le sujet jeune et 0,8 mm chez le sujet âgé en raison de l'apposition cémentaire (Fig.7) (45). Une limite apicale de préparation qui coïncide avec la constriction apicale permettrait d'éviter les dépassements lors de l'obturation (21,45).

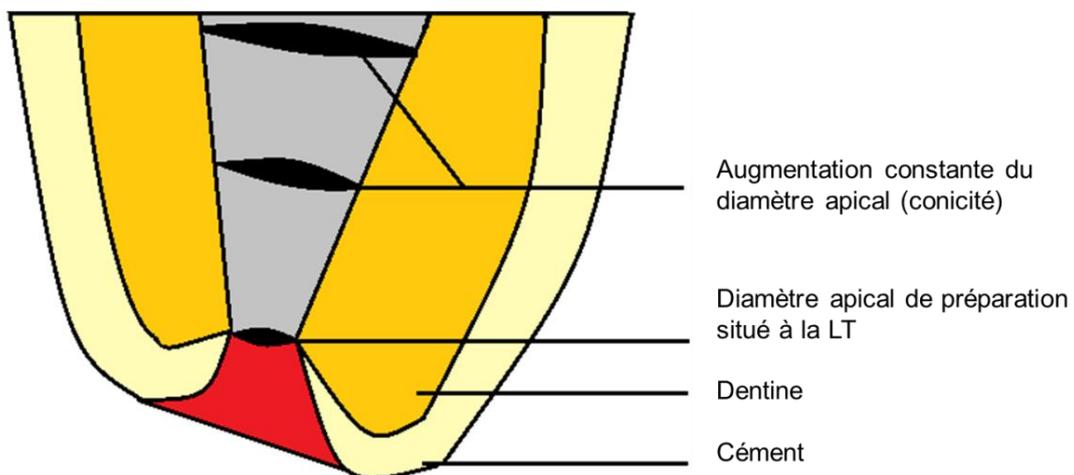


Figure 7 : morphologie schématique du cône apical après préparation selon l'école américaine (78).

Différentes méthodes et différents moyens sont actuellement proposés pour évaluer la LT :

- la radiographie lime en place (RLP) permet d'avoir une estimation de la distance entre la pointe de la lime de perméabilité et l'image de la sortie canalaire (Fig.4). La pointe de la lime doit atteindre l'espace canalaire situé à 0,5 mm du foramen apical (Fig.4) et à 1 mm de l'apex radiographique (85,86,91). Sur une radiographie numérique, des outils de mesure permettent d'estimer la LT. En revanche, la LT radiographique est une projection bi-dimensionnelle d'une réalité tridimensionnelle et peut donc subir des déformations. Hulsmann et Schaeffer ont d'ailleurs montré à partir de 40 clichés radiographiques (sur lesquels la position de la lime paraissait légèrement en deçà de l'apex radiographique), que ces limes dépassaient en réalité du foramen apical dans 50% des cas (45). Ceci peut s'expliquer par la présence de sorties latérales et de voies annexes. En effet, le foramen apical et l'apex radiographique sont 2 entités distinctes (Fig.4).

Peak et coll. ont constaté que le TE présente un taux de réussite plus élevé (87%) lorsqu'il est associé à des obturations canalaires dont la limite est située à moins de 2 mm de l'apex radiographique par rapport à celles qui se situe à plus de 2 mm de l'apex radiographique (77%) (66,74). La limite apicale de préparation doit donc se situer entre 0 et 2 mm de l'apex radiographique afin de nettoyer, travailler et d'obturer au mieux le système canalaire et ainsi augmenter le taux de succès du TE.

- le localisateur d'apex permet de détecter un point situé entre la constriction apicale et le foramen apical zone où le diamètre canalaire augmente et le flux de courant électrique devient élevé (45). Il permet de déterminer une LT électronique à laquelle 0,5 mm sont retirés afin de se situer en amont de la constriction. La LT électronique peut être mesurée en TP (86) et au cours de la pratique quotidienne du chirurgien-dentiste. Néanmoins, elle doit systématiquement être confirmée par une radiographie de contrôle (61,85,86,91). Cette technique combinée semble particulièrement adapté à l'estimation de la LT.

- le μ -CT permet de visualiser en 3D la structure interne et externe d'une dent de façon précise et il permet aussi l'évaluation de la LT (46).

Les différents moyens d'évaluation exposés précédemment permettent d'offrir une estimation de la LT par rapport aux tissus dentaires et peri-radicaux.

La position de la lime de perméabilité sur une coupe histologique d'une racine dentaire permet de déterminer efficacement 3 scores (de gauche à droite) : "sous-estimation de la LT", "bonne estimation de la LT" et "sur-estimation de la LT".



Figure 8 : visualisation de la position d'une lime de perméabilité permettant la détermination de la LT sur des coupes histologiques (23).

2.3.4.2.3 Conicité

La conicité traduit une variation de diamètre par millimètre, le long d'un volume (Fig.8). Si la conicité est constante, le diamètre augmente régulièrement de la pointe de l'instrument vers la base de la partie active. Des instruments peuvent avoir un même diamètre de pointe mais une conicité différente. Pour un instrument à conicité constante de 2% (norme ISO), le diamètre augmentera de 0,02 mm tous les millimètres. Selon les recommandations de l'ESE la préparation canalair doit donner une forme conique et régulière au canal, de manière à favoriser l'effet des solutions d'irrigation (29,75,78). La conicité doit respecter l'anatomie du système canalair originel et maintenir le foramen apical (Fig.4) à sa dimension et sa position naturelle. Ce concept fondé sur la conicité est basé sur une approche Nord-Américaine très largement décrite par Schilder en 1974 (Fig.7) (75).

Pour éliminer la smear layer dans le 1/3 apical il faut augmenter la conicité du canal afin de favoriser l'effet des solutions d'irrigation. Il n'existe pas de standard pour évaluer cliniquement la conicité des canaux, ce qui augmente la subjectivité de ce critère. Néanmoins, il y aurait un lien entre l'augmentation de la conicité d'un canal et la guérison des LIPOE visibles à la radiographie. Une conicité constante allant de

l'entrée canalaire au foramen apical (Fig.5) serait idéale. A l'inverse, une conicité irrégulière présentant des strangulations serait insatisfaisante (73). La conicité pourrait être évaluée à l'aide de méthodes conventionnelles ayant fait leurs preuves :

- le microscope opératoire permettrait d'estimer l'élargissement canalaire.
- la radiographie cône en place (RCP) permettrait également d'y parvenir. Elle est réalisée à l'aide d'un maître cône de gutta-percha (MC) calibré. Lorsque le MC atteint la limite apicale de préparation, le canal présente une conicité au moins égale à celle du MC.
- la radiographie post-opératoire permet d'évaluer la conicité d'un canal. Le canal doit présenter une conicité constante (7,28,73).
- le μ -CT associé aux logiciels informatiques, permet aussi d'évaluer la conicité (46). La différence de mesure entre 2 diamètres canaux divisé par la distance séparant ces 2 diamètres donne une conicité. Les diamètres canaux mesurés avec le μ -CT permettraient donc de donner une conicité en adaptant la formule de Gambill (35).
- la technique de Bramante (exposée en 2.3.4.2.1) permet de mesurer un diamètre canalaire, il serait donc aussi possible d'estimer la conicité du canal en compilant les mesures.

La radiographie post-opératoire permet de déterminer visuellement la conicité canalaire. Un score "satisfaisant" est donné lorsqu'elle est constante et qu'elle ne présente pas d'étranglement au niveau du matériau d'obturation. A l'inverse un score "insatisfaisant" est donné lorsque la conicité n'est pas constante et qu'elle présente au moins un étranglement au niveau du matériau d'obturation (28,71,73).

2.3.4.2.4 Erreurs iatrogènes

La présence de zipping, stripping, butée, fausse route, perforation, fracture instrumentale ou d'un canal non préparé diminue considérablement le succès du TE (19,40). Il faut donc prévenir et éviter ces erreurs iatrogènes à l'aide de règles de bonnes pratiques (Fig.9).

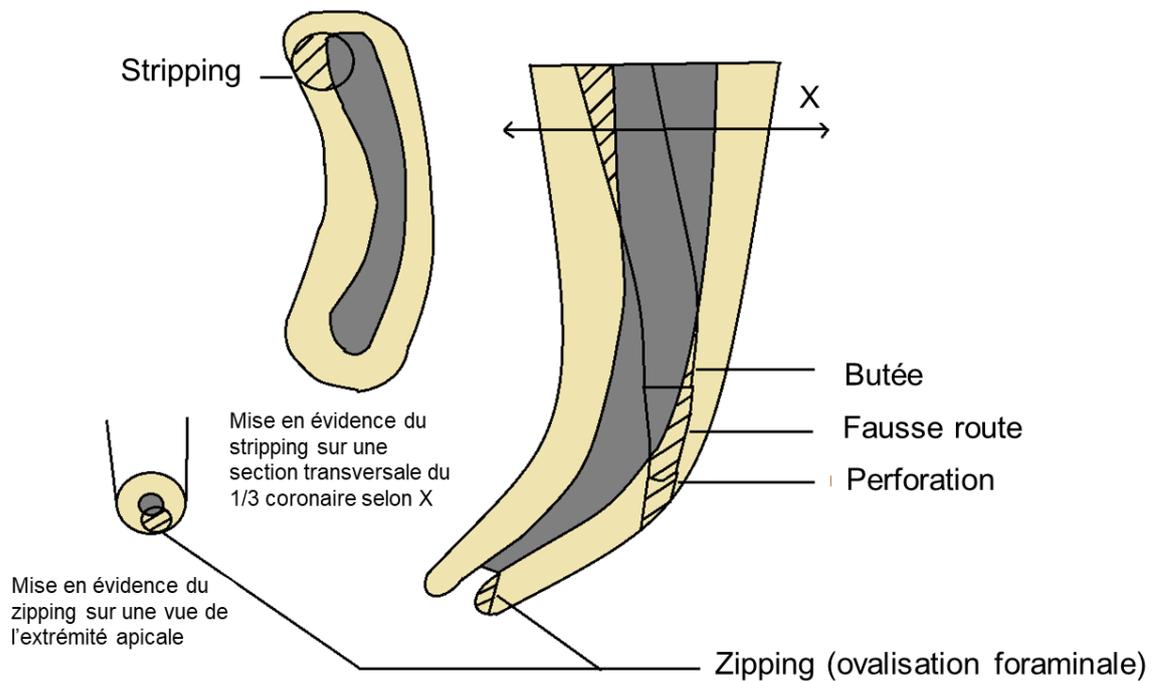


Figure 9 : représentation schématique des erreurs iatrogènes au cours d'une préparation canalaire (12).

Classiquement, les erreurs iatrogènes peuvent être décelées par : l'utilisation de limes de perméabilité sous microscope opératoire (83), la radiographie (7,27,58), le μ -CT (79), le CBCT (83) ou l'histologie (93). Lors de l'évaluation radiographique, la radiographie rétro-alvéolaire, le CBCT et le μ -CT permettent d'identifier :

- un manque d'obturation en longueur (butée) ;
- une obturation qui ne suit pas l'anatomie canalaire originelle (fausse route) ;
- une déportation de la partie interne de la courbure (stripping) ;
- une ovalisation du foramen (zipping) ;
- une extrusion du matériau d'obturation (perforation) ;
- la visualisation de débris instrumentaux fracturés dans le canal (fracture instrumentale) ou d'un canal non préparé (7,27,58).

Ces erreurs sont parfois difficiles à identifier cliniquement en raison de la difficulté à visualiser l'ensemble du système canalaire en 3D. La technique de Bramante (2.3.4.2.1) qui consiste à comparer des sections de racines réalisées avant et après préparation se révèle être un bon moyen pour évaluer l'absence d'erreurs iatrogènes comme par exemple le transport canalaire (93). Néanmoins, les

méthodes d'imagerie en 3D (μ -CT et CBCT) en complément de la radiographie rétro-alvéolaire restent les méthodes de choix pour diagnostiquer une erreur iatrogène.

Eleftheriadis et coll. évaluent les erreurs iatrogènes selon leur présence ou leur absence sur une radiographie post-opératoire. Un score "satisfaisant" est donné en cas d'absence d'erreur iatrogène et un score "insatisfaisant" est donné en cas de présence d'au moins une erreur (27).

En TP, l'évaluation de la préparation canalaire doit donc permettre de d'apprécier la capacité du praticien à respecter l'anatomie canalaire initiale (19).

2.3.5 Obturation

Les clichés radiographiques pré-, per- et post-opératoire permettent d'évaluer la qualité d'un TE en terme de longueur, de densité et d'homogénéité.

2.3.5.1 Longueur

Le matériau d'obturation doit être contenu entre la limite apicale de préparation et l'entrée canalaire de l'ensemble des canaux.

L'évaluation clinique et radiographique de la longueur d'obturation se traduit par l'absence de dépassement à l'apex et l'absence de matériau d'obturation dans la cavité d'accès (l'obturation s'arrête aux l'entrées canalaires). En effet, le niveau de l'obturation apicale est étroitement lié au maintien et au respect de la LT et du diamètre apical de préparation lors de la mise en forme canalaire (40,45). Il faut dans tous les cas que l'ensemble du système canalaire soit obturé (21). L'évaluation de la longueur d'obturation canalaire se traduit donc par une obturation qui atteint la limite apicale de préparation.

La longueur d'obturation est objectivable radiographiquement et doit se situer entre 0 et 2 mm de l'apex radiographique (26,41,49). Néanmoins plusieurs auteurs ont précisé cette mesure en longueur :

- Eckerbom et coll. ont précisé la mesure en indiquant qu'elle devait se situer entre 0,5 mm et 1,5 mm de l'apex radiographique (26) ;

-Tchorz et coll. ont montré que sur une RCP le MC devait se situer entre 0 et 1 mm de l'apex radiographique (85) ;

-Wolgin et Tchorz ont mesuré la LT avec un localisateur d'apex et une radiographie ; elle doit se situer à 0,5 mm du foramen apical et à 1 mm de l'apex radiographique (Fig.4) (85,86,91).

En résumé, il est préférable que l'obturation se situe à moins de 1 mm de l'apex radiographique comme le préconise F.Frisk et coll. (33). Des scores peuvent alors être donnés en fonction de cette référence.

2.3.5.2 Densité et homogénéité

La densité d'obturation doit être suffisante et homogène afin d'éviter les éventuelles recontaminations bactériennes. Le ciment remplit le vide situé entre la dentine et la gutta-percha (18,62). Une obturation qui est moins dense et non homogène aura un impact négatif sur le pronostic du TE (15,64). L'évaluation de la densité d'obturation se traduit par l'absence de zones de vide au sein et autour du matériau d'obturation.

La densité est objectivable sur un cliché radiographique rétro-alvéolaire post-opératoire qui permet de visualiser les bulles au sein du matériau d'obturation et les zones de vide entre la dentine canalaire et le matériau d'obturation (7,28,62,71,87).

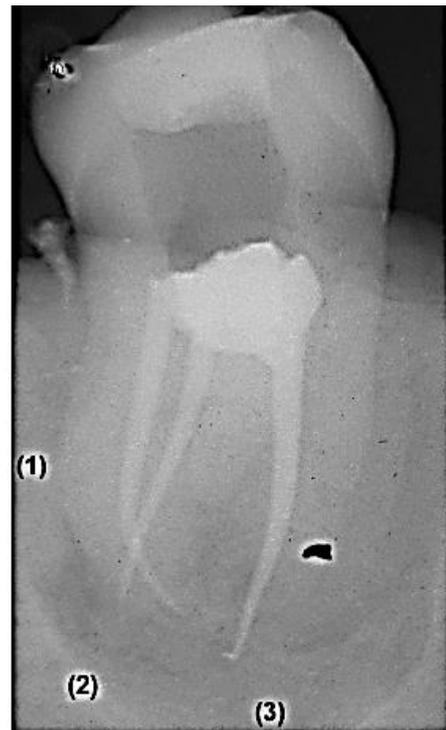
Le μ -CT et le CBCT peuvent également être utilisés pour évaluer très précisément la longueur ainsi que la densité et l'homogénéité d'une obturation canalaire (51). Ces moyens permettent de quantifier le nombre de vides présents au sein et autour du matériau d'obturation ; de mesurer la distance entre le matériau d'obturation et le foramen apical. La précision du μ -CT permet également de différencier le ciment d'obturation de la gutta-percha et de calculer le pourcentage de vide présent au sein d'un canal (4,14,51,95).

La densité de l'obturation est "satisfaisante" lorsque le matériau est suffisamment radio-opaque. L'homogénéité est satisfaisante lorsqu'il n'y a pas de bulles au sein du matériau d'obturation. A l'inverse, l'homogénéité est "insatisfaisante" lorsque des bulles sont présentes au sein du matériau d'obturation ou entre les parois endocanalaire et le matériau d'obturation. Enfin, un matériau d'obturation radio-clair est "insatisfaisant" pour le critère densité (7,28,87).

Exemple d'évaluation réalisé en TP d'endodontie : les travaux de Roman-Richon et coll. ont permis d'évaluer l'obturation des TE réalisés par des étudiants en formation pré-clinique (4^e année) à partir de 3 critères définis visuellement à la radiographie : longueur d'obturation, densité et conicité (71). Un score égal à 0 est donné lorsque le critère est insatisfaisant tandis qu'un score de 1 est donné lorsque le critère est satisfaisant.



Evaluation de la dent numéro 235 :
(prémolaire a 1 canal préparée manuellement)
Score longueur de l'obturation = 0
Score densité de l'obturation = 0
Score conicité = 0



Evaluation de la dent numéro 248 :
(molaire a 3 canaux préparée en rotation continue)
Score longueur de l'obturation = 1
Score densité de l'obturation = 1
Score conicité = 1

Figure 10 : exemple d'évaluation de TP d'endodontie réalisés par des étudiants espagnols en 4^e année sur des dents extraites. Score 1 = travail satisfaisant, Score 0 = travail insatisfaisant.

2.4 Discussion autour de l'évaluation

2.4.1 Moyens d'évaluation

L'évaluation conventionnelle de la qualité d'un TE fait référence à une évaluation clinique complétée par des clichés radiographies et/ou un CBCT ; elle s'applique *in vivo* et *in vitro*. En revanche, l'évaluation expérimentale est uniquement réalisée *in vitro* au laboratoire à l'aide du μ -CT et/ou de l'histologie (analyse de sections de racine, observation au MEB).

Tableau 1: les avantages et les inconvénients des moyens utilisés pour l'évaluation des TP d'endodontie (38,39,42,45).

Type d'évaluation	Moyen utilisé	Avantages	Inconvénients
Evaluation conventionnelle	Clinique	<ul style="list-style-type: none"> - visualisation directe de la zone d'intérêt - observation au microscope opératoire 	<ul style="list-style-type: none"> - difficulté à visualiser la morphologie interne de la dent
	Radiographie	<ul style="list-style-type: none"> - réalisation <i>in vivo</i> - utilisation facile, rapide et reproductible - faible coût - faible irradiation - visualisation de la morphologie interne de la dent - traitement numérique (contraste, mesure) 	<ul style="list-style-type: none"> - faible résolution : manque de précision, artefact - opérateur dépendant (alignement du capteur) - 2D : déformation, superposition
	CBCT	<ul style="list-style-type: none"> - réalisation <i>in vivo</i> - rapidité de l'examen - mise en évidence de zones précises - visualisation en 3D - absence de superposition - méthode non invasive 	<ul style="list-style-type: none"> - irradiation non négligeable du patient (mais moins irradiant qu'un scanner) - précision modérée de l'image
Evaluation expérimentale	μ -CT	<ul style="list-style-type: none"> - haute résolution des images (jusqu'au μm) - visualisation en 3D - absence de superposition - méthode non invasive 	<ul style="list-style-type: none"> - réalisation exclusivement <i>in vitro</i> - coût élevé de l'analyse - temps d'acquisition important - peu de microtomographes disponibles
	Histologie	<ul style="list-style-type: none"> - visualisation directe de la zone d'intérêt - observation à fort grossissement 	<ul style="list-style-type: none"> - préparation longue et méticuleuse - altération de l'échantillon et des données en cas de section - analyse de zones radiculaires et non pas de l'ensemble des parois - coût du matériel

2.4.2 Méthodes d'évaluation

Seules les méthodes expérimentales (μ -CT et histologie) et le CBCT permettent de déceler avec précision d'éventuelles erreurs tandis que les méthodes

conventionnelles (clinique et radiographique) sont moins sensibles. Le CBCT, le μ -CT et l'histologie semblent difficiles à utiliser au cours d'une séance de TP en raison de nombreux inconvénients (Tab.1). Les moyens cliniques et radiographiques sont donc plus adaptés à une séance de TP même s'ils sont moins précis. Les informations fournies par ces 2 méthodes d'évaluation ne permettent pas toujours d'obtenir des données fiables.

Analyse morphologique :

L'analyse visuelle de la dent complétée par des clichés radiographiques en 2 incidences permet de sélectionner simplement et efficacement un modèle de travail adapté à l'exercice demandé lors d'une séance de TP.

Isolation :

L'évaluation clinique seule permet d'évaluer l'étanchéité du champ opératoire de façon simple et reproductible en testant la stabilité du crampon, le sertissage de la digue au collet de la dent et éventuellement la pose de ligatures. Cette évaluation semble pertinente pour évaluer un travail en TP.

Cavité d'accès :

La visualisation directe de la cavité d'accès au microscope opératoire permet de l'évaluer simplement et avec précision (67). Le caractère clinique de cette évaluation peut en revanche générer de la subjectivité pouvant être à l'origine de biais.

Le μ -CT permet d'avoir une mesure reproductible et très sensible pour apprécier l'ouverture, l'élimination du plafond pulpaire et la relocalisation des entrées canalaires mais le temps et le coût nécessaire pour effectuer une acquisition rendent son utilisation difficile pour une séance de TP (Tab.1). Il peut néanmoins servir de référence pour une étude comparative.

Irrigation :

L'évaluation conventionnelle est utile pour évaluer la quantité de débris (volume) et la qualité (aspect) des parois canalaires. Les aides optiques permettent ainsi d'obtenir une appréciation de la propreté des parois à l'échelle microscopique. sans connaître précisément la qualité d'une irrigation.

La radiographie ne met en évidence que les débris minéraux, elle ne permet pas d'évaluer la désinfection, l'étanchéité, l'antisepsie d'une préparation. Cette méthode d'évaluation n'est donc pas assez sensible pour apprécier la qualité d'une irrigation.

L'évaluation expérimentale par μ -CT permet quant à elle d'apprécier la qualité d'une irrigation en visualisant les parois non travaillées et les débris minéraux dans les zones difficilement visibles à l'aide d'aides optiques. L'analyse de coupes histologiques au microscope à fort grossissement permet quant à elle de visualiser les parois non travaillées ainsi que la présence de débris organiques et minéraux (79). Enfin, l'observation de coupes histologiques au MEB permet de visualiser très précisément la présence de débris au niveau des parois (3) et fait donc office de gold standard pour l'évaluation de l'irrigation.

L'évaluation conventionnelle de l'irrigation ne semble donc pas ou peu adaptée à l'évaluation d'un travail réalisé en TP car elle ne fournit pas l'ensemble des informations nécessaires.

Mise en forme :

- diamètre apical de préparation : l'utilisation d'une lime apicale maîtresse semble être un bon moyen pour évaluer le diamètre apical de préparation. Cette mesure doit être corrélée à la mesure de la LT pour s'assurer que la limite apicale de préparation soit bien située (cf.2.3.4.2.1).

- longueur de travail : ce critère est difficilement évaluable sur la radiographie en raison de la difficulté à distinguer la constriction apicale de l'apex radiographique sur les clichés. Tchorz a montré que la LT est plus pertinente lorsqu'elle est mesurée avec un localisateur d'apex en plus de la mesure radiographique (85). Il a aussi démontré qu'il était possible de travailler sur des modèles artificiels simulant le système canalaire d'une dent et permettant une mesure électronique de la LT (86). Wolgin a lui aussi travaillé sur des modèles qui permettent une détermination de la LT avec une mesure électronique (dents naturelles intégrées dans un bloc de résine relié à un localisateur). Il conclue en affirmant que la position exacte de la limite apicale de préparation peut uniquement être déterminée par des moyens histologiques (Fig.8) (91). Dans ce sens, il semblerait intéressant d'effectuer

l'évaluation de la LT en TP avec l'aide d'une radiographie et d'un localisateur d'apex (85,86).

- conicité : pour que la conicité soit considérée comme acceptable, elle doit être suffisante de la partie coronaire à la partie apicale et doit donner un aspect conique au système canalaire (28,71). Les travaux d'Elsayed et de Roman-Richon ne donnent aucune mesure précise pour évaluer la conicité d'un travail. Aucun seuil n'est défini pour différencier l'acceptable du non acceptable sur une radiographie, ce qui rend ce critère subjectif à la libre appréciation du clinicien. Ainsi, seule l'évaluation expérimentale par le μ -CT ou l'histologie serait précise, alors que l'évaluation des RCP réalisées avec des MC convenablement calibrés donnerait une approximation intéressante de la conicité. Certaines études ont ajouté l'évaluation de la conicité du canal comme critère, ce qui peut fournir une estimation de la qualité de la mise en forme canalaire (7,28,62,71).

- erreurs iatrogènes : Eleftheriadis évalue la qualité de la mise en forme canalaire réalisée par des étudiants en formation pré-clinique. Il regroupe les dents présentant des butées, des perforations, des fausses routes ou présentant des fractures instrumentales. Parmi celles-ci, il distingue les dents présentant des difficultés et les dents plus simples à traiter endodontiquement selon plusieurs critères : numéro de la dent, localisation, position et courbure du canal puis position de l'erreur iatrogène (1/3 coronaire, 1/3 médian, 1/3 apical). Il s'appuie surtout sur la courbure des racines pour déterminer la difficulté du cas. Il conclue en considérant que la mise en forme canalaire est souvent mieux réalisée sur une dents antérieure simple et droite alors que les canaux courbés d'une molaires sont plus complexes à traiter et présentent fréquemment des butées (27).

L'évaluation de Eleftheriadis se base uniquement sur l'analyse des clichés post-opératoires. Pourtant, l'interprétation de l'image radiographique en 2 dimensions impose certaines limites exposées précédemment (Tab.1), en particulier par le caractère bi-dimensionnel (45). Une vision en 3D (CBCT ou μ -CT) précise du travail serait une alternative intéressante pour évaluer précisément la présence d'erreurs iatrogènes.

Obturation :

La plupart des études utilisent la longueur et la densité de l'obturation canalairé comme critères pour évaluer TE. Elles ont considéré la limite apicale de l'obturation à 2 mm de l'apex radiographique comme limite basse acceptable pour l'évaluation clinique (18,48,62). La densité de l'obturation standard a quant à elle été définie par l'absence de zones de vide visibles à la radiographie post-opératoire (87).

- densité et homogénéité de l'obturation : seule la présence ou l'absence de zones de vide visibles radiographiquement sur une dent obturée permet de définir si celle-ci est acceptable ou non (87). Malheureusement, aucun standard n'a été décrit dans la littérature.

La méthode d'évaluation pour ce critère ne présente aucune homogénéité au sein des différentes publications. Pour exemple, Elsayed et coll. considère que la densité est acceptable lorsque l'obturation est uniforme et sans zones de vide visibles à la radiographie numérique (28). Balto et coll. précise le critère en indiquant la position des zones de vide situées au sein de la gutta-percha ou entre les parois canalaires et la gutta-percha (7). Moussa-Badran et coll. quant à lui distingue le critère densité et homogénéité de l'obturation (présence de zones de vide visibles au sein de la gutta-percha ou entre les parois canalaires et la gutta-percha) (62). La mesure de la densité de l'obturation à la radiographie ne reflète donc pas la réalité et peut constituer un biais dans l'évaluation des TP d'endodontie (20). Ceci est d'autant plus vrai qu'une modification de l'incidence d'une radiographie entraîne une modification de l'image pouvant être interprétée différemment comme un faux positif ou un faux négatif (45). Une obturation qui semble avoir un bon scellement dans la projection mésio-distale peut montrer un scellement inadéquat dans la projection vestibulo-linguale. L'évaluation de la densité sur une radiographie semble donc peu pertinente (26). En revanche, une vision en 3D (μ -CT ou CBCT) serait intéressante pour observer l'obturation dans sa globalité. Elle permettrait même de mesurer numériquement la présence, la position des zones de vide et le pourcentage de vide au sein du matériau d'obturation (4,14,51,95).

- longueur de l'obturation : l'ajustage en longueur du matériau d'obturation ainsi que l'apex radiographique sont clairement identifiable sur une radiographie. C'est pourquoi, la longueur de l'obturation canalairé s'est révélée être un paramètre de

qualité plus reproductible que la densité (26,41,49). Il semble donc plus facile de mesurer la longueur de l'obturation sur la radiographie que de détecter les zones de vide ou de mesurer une conicité. Encore une fois, la mesure est estimée et il n'est pas possible de savoir si la totalité du système canalaire est obturée.

2.4.3 Synthèse

Il n'existe donc pas de consensus précis quant à la méthode et les moyens employés pour évaluer les TP en endodontie (24). En effet, des moyens différents sont utilisés pour mesurer un critère d'évaluation identique selon les auteurs. L'évaluation conventionnelle présente certaines limites qui peuvent s'expliquer par la sensibilité et la spécificité limitée des critères d'évaluation cliniques et radiographiques disponibles. Les limites des critères radiographiques conventionnels sont liées à leur caractère bi-dimensionnel et au manque de résolution. Elles peuvent donc être palliées par une méthode d'imagerie tridimensionnelle en haute résolution. Dans ce sens, le μ -CT peut être particulièrement adapté. Les critères d'évaluation nécessitent donc une validation scientifique, ce qui permettrait d'améliorer et de standardiser l'évaluation ainsi que l'auto-évaluation des TE menés par les chirurgiens-dentistes.

Dans ce travail, l'analyse des images en 3D et en haute résolution obtenues par le μ -CT permettra d'obtenir des scores de référence pour un travail (évaluation expérimentale). Ces scores seront ensuite comparés aux scores obtenus par une évaluation clinique et radiographique (évaluation conventionnelle). La pertinence des critères d'évaluation utilisés en TP d'endodontie pourra ainsi être évaluée.

3 Approche expérimentale

Cette étude comparative expérimentale a pour but d'évaluer les critères de scorage utilisés en TP d'endodontie. Elle permet de comparer les scores des TP d'endodontie obtenus par une méthode d'évaluation conventionnelle (clinique et radiographique) avec les scores de références (μ -CT) obtenus par une méthode d'évaluation expérimentale.

3.1 Matériel et méthode

L'étude s'est déroulée dans la salle de simulation de la faculté de chirurgie dentaire de Lille, au second semestre de l'année 2016 lors des TP d'endodontie réalisés par les étudiants en 3^e année de chirurgie dentaire (P3).

L'étude a été effectuée en 4 étapes : la cavité d'accès et la préparation canalaires réalisées en TP ont subi une 1^{ère} évaluation conventionnelle puis expérimentale ; les dents ont ensuite été obturées puis une 2^e évaluation conventionnelle puis expérimentale ont été menées. Sept étudiants en 3^e année de chirurgie dentaire ont été sélectionnés sur la base du volontariat. Une molaire maxillaire ou mandibulaire extraite leur a été fournie. Ils ont réalisé un TE d'une molaire maxillaire ou mandibulaire présentant au moins 3 canaux, en 2 étapes. Dans un premier temps, les étudiants ont effectué une cavité d'accès et une préparation canalaires sur la molaire puis dans un second temps ils ont effectué une obturation canalaires de la dent. Après chacune de ces étapes, une évaluation conventionnelle et une acquisition μ -CT. Une évaluation expérimentale a ensuite été menée à partir de ces acquisitions μ -CT. Les évaluations ont été menées par un évaluateur indépendant expérimenté et membre du département d'endodontie de la faculté de chirurgie dentaire. Les scores obtenus par les 2 méthodes d'évaluation ont ensuite été comparés par une analyse statistique afin de déterminer la pertinence des critères de scorage utilisés pour l'évaluation des TE (Fig.11).

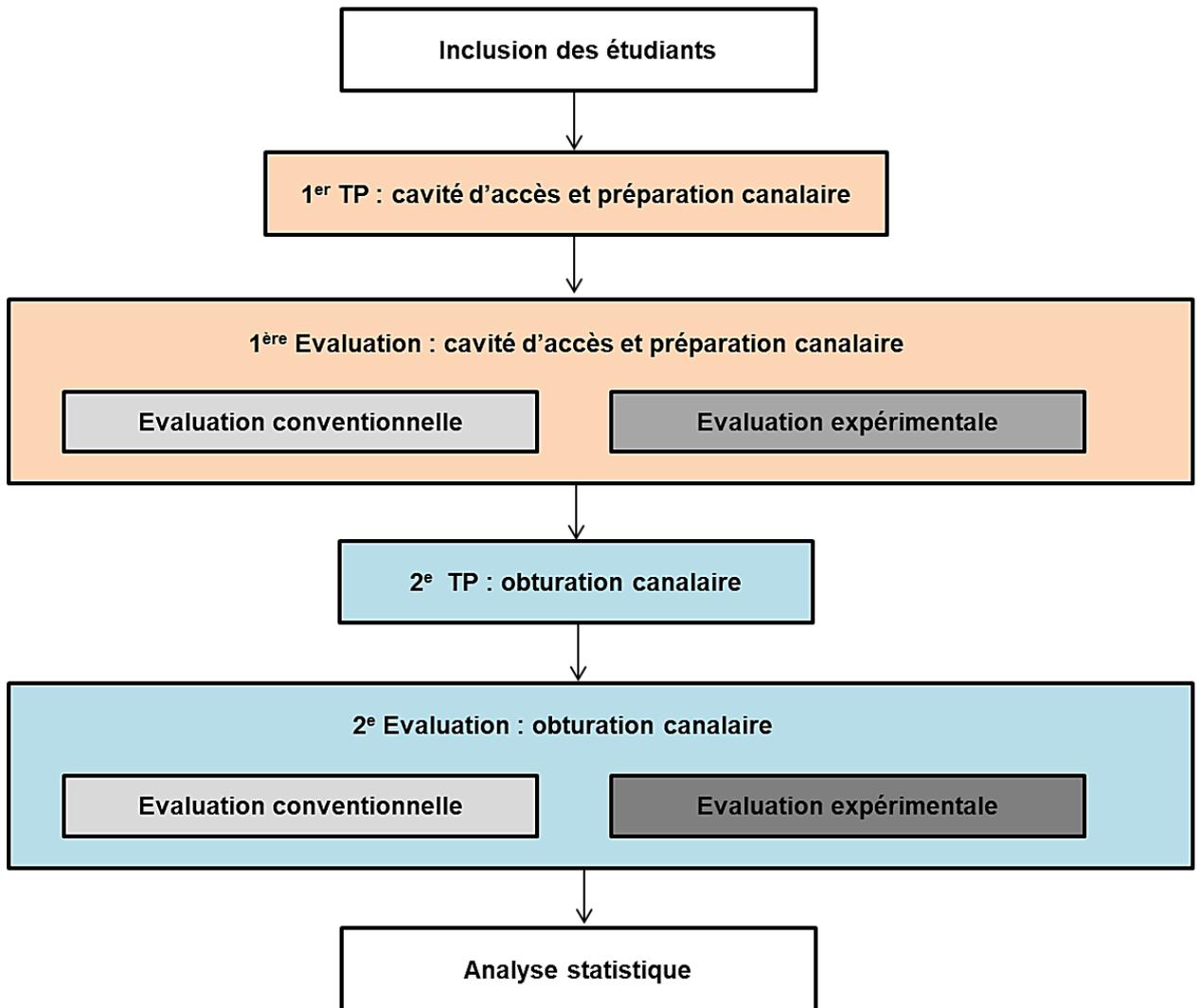


Figure 11 : représentation du déroulement de l'étude.

3.1.1 Séance de TP

Deux clichés radiographiques pré-opératoires en incidence mésio-distale et vestibulo-linguale ont permis d'estimer la longueur pré-opératoire des dents fournies. Au cours de l'étude, le tube radiographique numérique (Kodak 2200 intraoral X-ray system) a été réglé à 60 kV, 7 mA, 0,37 ms et les clichés radiographiques ont été effectués selon la technique des plans parallèles. Les dents incluses devaient présenter une anatomie canalaire simple (Fig.3), une maturité apicale, une couronne sans délabrement important et une absence de TE préalable. Les dents ont été montées sur une arcade dentaire en cire (moule Kavov) qui a été fixée sur un simulateur pré-clinique (tête fantôme A-dec). Le champ opératoire a été mis en place de manière à ce qu'il soit stable et étanche. Les étudiants ont eu à leur disposition l'intégralité du matériel nécessaire au TE (Annexe).

3.1.1.1 Première séance : cavité d'accès et préparation canalaire

Les étudiants ont effectué une cavité de délimitation sur la face occlusale des dents à l'aide d'une fraise boule (standard et/ou long fût) diamantée de 16/10° de mm (Komet) montée sur une turbine. La trépanation de la chambre pulpaire a été effectuée à l'aide d'une fraise boule long col en carbure de tungstène de 16/10° de mm (Komet) montée sur contre angle. Le plafond pulpaire a été éliminé à l'aide d'une fraise Zekria endodontie Z à bout mousse montée sur turbine. La cavité de convenance a été aménagée à l'aide de forets élargisseurs de Gates Glidden (Komet) n°2, n°3, n°4 et n°5 et de forets de Müller (Komet) montés sur contre angle. Les entrées canalaires ont finalement été relocalisées à l'aide de l'instrument Endoflare (Micromega) monté sur contre angle réducteur.

Une lime K (MMC de Micromega) n°15 a ensuite permis de contrôler la perméabilité canalaire jusque la LT préalablement estimée sur les clichés radiographiques pré-opératoires. Une radiographie lime en place (lime K 15, Micromega) a ensuite permis de contrôler la LT. La LT estimée sur les clichés pré-opératoires correspond à la LT lorsque la pointe de la lime de perméabilité se situe entre 0,5 mm et 1 mm de l'apex radiographique de la racine étudiée (85,86,91). En cas de sur-estimation ou de sous-estimation de plus de 2 mm de la LT sur la RLP, l'opération a été répétée jusqu'à rectification dans le but de définir une LT propre à chaque canal. Les canaux ont ensuite été mis en forme en rotation continue jusque la LT avec le système RevoS (MicroMega) monté sur contre angle réducteur selon les recommandations du fabricant (SC1, SC2, SU). Entre chaque passage instrumental, une irrigation par 2 ml d'une solution de NaOCl à 2,5% a été réalisée à l'aide d'une seringue d'irrigation (Dentsply) à embout vissable sur laquelle était vissée une aiguille à pointe non active et à sortie latérale de 30/100° de mm. La perméabilité canalaire a été contrôlée par le passage d'une lime K10 au-delà de la LT entre chaque passage instrumental. Un cône de gutta-percha de conicité 6% a été calibré selon le diamètre apical de préparation. L'ajustage du MC a été évalué par un contrôle visuel, tactile et radiographique. En cas de nécessité, des corrections ont été effectuées.

Une fiche (Annexe) renseignant le diamètre apical de préparation, la LT, le repère anatomique coronaire choisi par l'étudiant et les difficultés rencontrées pour

chaque canal a été complétée par les étudiants et les dents ont été récoltées pour la 1^{ère} évaluation.

3.1.1.2 Deuxième séance : obturation canalaire

Lors de cette séance, les étudiants n'ont pas effectué de radiographies. Les dents ont été repositionnées sur les simulateurs et le champ opératoire a été mis en place. L'opération suivante a été répétée pour chaque canal.

Les étudiants ont calibré en diamètre un MC de 6% pour chaque canal. L'assèchement a été réalisé à l'aide de pointes de papier stériles. Les MC ont été trempés dans une solution de NaOCl à 2,5% pendant 5 minutes avant d'être séchés sur une compresse stérile. Ils ont ensuite été enduits de ciment d'obturation au niveau de leur partie apicale sur environ 2 à 3 mm puis ils ont été placés dans leurs canaux respectifs. Le ciment d'obturation (Cortisol, Dentsply) a été réalisé à partir d'oxyde de zinc en poudre et d'eugénol liquide mélangé à l'aide d'une spatule à ciment et d'une plaque de verre; il devait être filant, brillant et sans grumeau.

Un thermocompacteur de Mac Spadden (Dentsply) ayant un code couleur correspondant au code couleur du dernier instrument passé lors de la préparation canalaire a été utilisé pour l'obturation. Le thermocompacteur a été monté sur un contre-angle bague bleu réglé à 10 000 tours par minute dans le sens horaire et sans aérosol. Le thermocompacteur a été placé parallèlement à chaque MC jusqu'à frottement doux. Le contre-angle a ensuite été mis en rotation jusqu'au ramollissement de la gutta-percha puis l'étudiant a descendu le thermocompacteur jusque la LT -3 mm afin que le MC descende à son tour dans le canal. Le thermocompacteur a enfin été sorti du canal en rotation et en appui pariétal. L'obturation s'est terminée par une compaction réalisée à l'aide d'un fouloir de Machtou (Dentsply) de gros diamètre.

Les dents ont finalement été retirées du support de travail puis récoltées avec la fiche de renseignements (Annexe) complétées par les étudiants.

3.1.2 Evaluation conventionnelle

L'évaluation conventionnelle a été menée à l'aide des moyens cliniques et radiographiques précédemment décrits et disponibles au cabinet dentaire. Elle a

suivi une méthode d'évaluation couramment utilisée au cours d'une séance de TP d'endodontie afin d'attribuer un score pour chaque critère d'évaluation. Il a été choisi de décomposer l'évaluation des TE en plusieurs étapes afin d'étudier plus précisément la pertinence de chaque critère (Tab.4).

3.1.2.1 Première séance : cavité d'accès et préparation canalaire

L'évaluation de la cavité d'accès, de l'irrigation, de la conicité de la préparation canalaire, de la densité et de l'homogénéité de l'obturation a été réalisée en attribuant un score numérique pour chaque critère grâce à une échelle d'accord quantitative. Elle se présente sous forme d'un tableau avec des scores allant de 0 à 4 inspiré de l'échelle d'accord de Likert (69) (Tab.2). Les scores ont été attribués en fonction de l'accord de l'évaluateur par rapport aux objectifs attendus pour chaque critère (Tab.4).

Tableau 2 : tableau illustrant la correspondance entre l'échelle d'accord et le score obtenu suite à l'évaluation des critères quantitatifs.

Echelle d'accord	Score
Tout à fait d'accord	4
Plutôt d'accord	3
Ni en accord ni en désaccord	2
Plutôt pas d'accord	1
Pas du tout d'accord	0

L'évaluation de la cavité d'accès a été réalisée pour chaque molaire en 3 étapes :

- **Ouverture** : la forme, la dimension et la position de l'ouverture coronaire ont été appréciées visuellement à l'aide d'un microscope opératoire (marque) au grossissement (X10). L'évaluateur a été en mesure de voir directement le volume caméral et l'ensemble des entrées canales. Pour cela, une analyse de la pente des parois de la cavité de délimitation a été réalisée. Les interférences présentes au niveau du contour de la cavité de délimitation ont été appréciées tactilement à la sonde DG16. Les interférences présentes au niveau du plancher et les entrées canales ont été appréciées tactilement avec une lime K10. L'évaluateur a quantifié le contenu caméral résiduel et exploré les entrées canales.

- **Elimination du plafond pulpaire** : la présence de plafond pulpaire résiduel a été évaluée visuellement au microscope opératoire et tactilement à l'aide des sondes n°17 et n°19. Les parois devaient être lisses, régulières et présenter une continuité entre l'ouverture coronaire et les entrées canalaires.

- **Relocalisation des entrées canalaires** : l'élargissement des entrées canalaires a été évalué à l'aide d'un microscope opératoire. L'évaluateur devait être en mesure de visualiser directement le tiers apical ou la 1^{ère} courbure canalaire. L'élimination des triangles dentinaires a été évaluée par le passage d'une sonde endodontique DG16 puis d'une lime K10 devant pénétrer aisément dans les 2 premiers tiers canalaires.

L'évaluation de la préparation canalaire a été réalisée pour chaque canal en 5 étapes :

- **Irrigation** : l'évaluateur a apprécié l'absence de débris, la propreté de la cavité d'accès et de la préparation canalaire au microscope opératoire.

- **LT** : le score de LT a été attribué en considérant la différence entre la LT mesurée par l'évaluateur et la LT donnée par l'étudiant. Afin de préserver la constriction apicale et/ou le cône d'arrêt en cas d'erreur réalisée par l'étudiant, la LT a été estimée sur la RCP. Un manque de conicité de la préparation par rapport au MC a été exclu par le passage d'une lime manuelle ISO 2% à la même LT et au même diamètre apical de préparation.

- **Diamètre apical de préparation** : le calcul du diamètre apical de préparation a été réalisé en mesurant la distance entre la position du cône d'arrêt et la LT donnée par l'étudiant sur la fiche de renseignement (Annexe). Le diamètre apical de préparation a ensuite été calculé selon la formule suivante (Fig.12) :

$$\text{Diamètre apical de préparation} = \text{diamètre de la pointe de la lime apicale maîtresse} + \left(\text{conicité du MC calibré par l'évaluateur} \times \text{la distance séparant la pointe de la lime apicale maîtresse et la pointe du MC sur la RCP (Y)} \right)$$

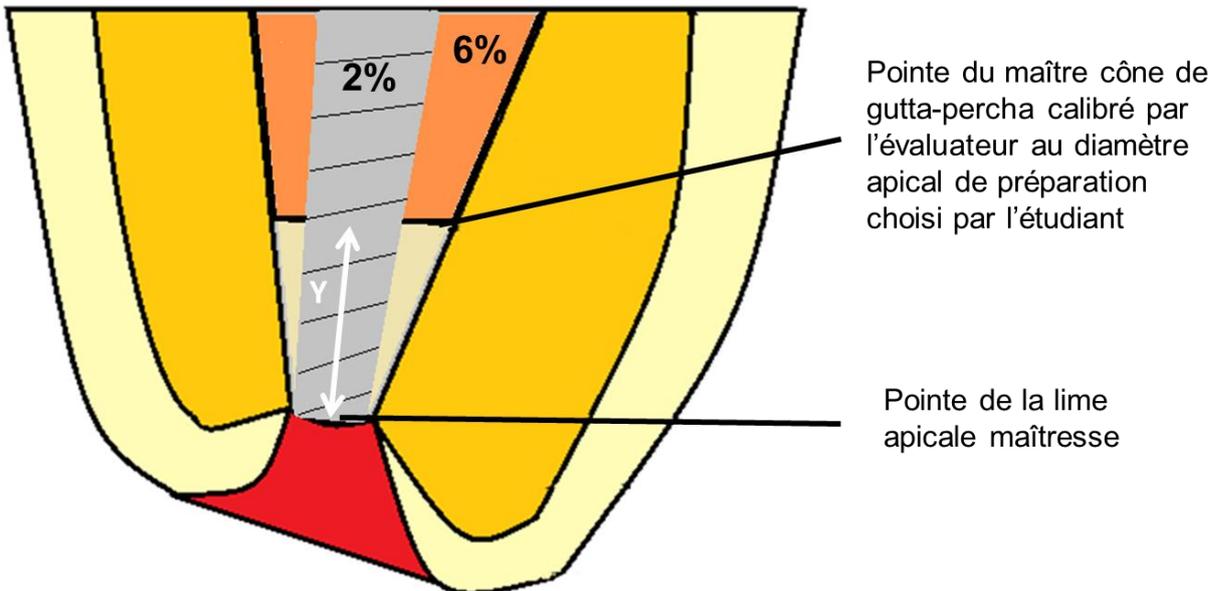


Figure 12 : schéma de la méthode utilisée pour calculer le diamètre apical de préparation. Y correspond à la distance séparant la pointe de la lime apicale maîtresse et la pointe du MC.

- **Conicité** : les scores ont été attribués à la conicité en fonction de l'appréciation visuelle de la conicité sur la RCP (Tab.4).
- **Erreurs iatrogènes** : la présence d'éventuelles erreurs iatrogènes (butées, fausses routes, perforations, fractures instrumentales et les canaux non préparés) a été identifiée à l'aide du microscope opératoire, des RLP et des RCP fournies par l'étudiant. Une fois identifiées, les erreurs iatrogènes ont été confirmées tactilement à l'aide d'un sondage à la sonde endodontique DG16 et d'un passage d'une lime K10. Aucune erreur iatrogène ne devait être présente. L'évaluateur a précisé le type et le nombre d'erreurs sur sa grille de scorage (Tab.4).

Les erreurs iatrogènes ont en revanche été scorées à l'aide de l'échelle suivante (Tab.3) :

Tableau 3 : tableau illustrant la correspondance entre l'échelle d'accord et le score obtenu suite à l'évaluation des critères qualitatifs.

Variable binaire	Score
Présence	1
Absence	0

3.1.2.2 Deuxième séance : obturation canalaire

L'évaluation de l'obturation canalaire a été réalisée pour chaque canal en 2 étapes après avoir réalisé un cliché radiographique post-opératoire en incidence mésio-distale et vestibulo-linguale.

- **Longueur** : les scores ont été attribués à la longueur en fonction de l'ajustage en longueur du matériau d'obturation sur la radio post-opératoire. Un score de 4 a été attribué à la longueur lorsque la distance séparant l'apex radiographique du matériau d'obturation était comprise entre 0 et 0,5 mm ; de 3 lorsque qu'elle était comprise entre 0,5 et 1 mm ; de 2 lorsque qu'elle était comprise entre 1 et 1,5 mm ; de 1 lorsque qu'elle était comprise entre 1,5 et 2 mm et de 0 lorsque qu'elle était supérieure à 2 mm ou en présence d'un dépassement.

- **Densité et homogénéité** : l'évaluateur a apprécié sur ces mêmes clichés l'homogénéité de la densité de l'obturation ainsi que l'absence de bulles au sein du matériau d'obturation. Un score de 4 a été attribué à la densité et l'homogénéité lorsque l'évaluateur était tout à fait d'accord avec les objectifs attendus ; de 3 lorsque qu'il était plutôt d'accord ; de 2 lorsqu'il était ni en accord ni en désaccord ; de 1 lorsqu'il n'était plutôt pas d'accord et de 0 lorsqu'il n'était pas du tout d'accord.

L'évaluation conventionnelle a donc permis d'attribuer un score à chaque critère en fonction de la grille de scorage suivante (Tab.4).

Tableau 4 : grille de scorage utilisée pour l'évaluation conventionnelle.

Critères d'évaluation	Objectifs	Score					
		0	1	2	3	4	
Cavité d'accès	Ouverture <ul style="list-style-type: none"> *bonne forme de l'ouverture coronaire *bonne dimension l'ouverture coronaire *bonne position de l'ouverture coronaire *parois de la cavité de délimitation de dépuille *contenu caméral et ensemble des orifices canalaire visibles directement *pas d'interférences perceptibles lors du passage de la sonde DG16 au niveau du contour de la cavité de délimitation *pas d'interférences perceptibles lors du passage de la lime de perméabilité sur le plancher et les orifices canalaire 	Pas du tout d'accord	Plutôt pas d'accord	Ni en accord ni en désaccord	Plutôt d'accord	Tout à fait d'accord	
		Elimination du plafond pulpaire <ul style="list-style-type: none"> *bonne mise en forme des parois de la cavité de contour *pas d'interférences perceptibles lors du passage de la sonde n°17 sur les parois de la cavité de contour 	Pas du tout d'accord	Plutôt pas d'accord	Ni en accord ni en désaccord	Plutôt d'accord	Tout à fait d'accord
		Relocalisation des entrées canalaire <ul style="list-style-type: none"> *bon élargissement des canaux *1/3 apical ou 1ère courbure des canaux visible directement *pas d'interférences perceptibles lors du passage de la sonde DG16 au niveau des entrées canalaire *pas d'interférences perceptibles lors du passage de la lime de perméabilité au niveau des entrées canalaire *la lime de perméabilité atteint le 1/3 apical ou la 1ère courbure *bon redressement de la lime de perméabilité 	Pas du tout d'accord	Plutôt pas d'accord	Ni en accord ni en désaccord	Plutôt d'accord	Tout à fait d'accord
Préparation	Irrigation <ul style="list-style-type: none"> *absence de débris, les parois canalaire sont propres 	Pas du tout d'accord	Plutôt pas d'accord	Ni en accord ni en désaccord	Plutôt d'accord	Tout à fait d'accord	
		Mise en forme LT <ul style="list-style-type: none"> *différence entre la LT mesuré par l'évaluateur et la LT donné par l'étudiant 	2 mm ou dépassement	1,5 mm	1 mm	0,5 mm	0 mm
		<ul style="list-style-type: none"> *différence entre le diamètre apical de préparation annoncé et le diamètre apical de préparation calculé *appréciation visuelle sur la RCP 	> 0,12 mm	0,09 mm	0,06 mm	0,03 mm	0 mm
Obturation	Longueur d'obturation <ul style="list-style-type: none"> *distance séparant le matériau d'obturation de l'apex radiographique sur la radiographie post opératoire 	Pas du tout d'accord	Plutôt pas d'accord	Ni en accord ni en désaccord	Plutôt d'accord	Tout à fait d'accord	
		Densité et homogénéité <ul style="list-style-type: none"> *la radiographie post opératoire montre un matériau d'obturation dense *la radiographie post opératoire montre un matériau d'obturation ne présentant pas de vides 	2 mm ou dépassement	1,5 mm	1 mm	0,5 mm	0 mm
		<ul style="list-style-type: none"> *absence de perméabilité apicale *absence de déviation de la trajectoire canalaire 	Pas du tout d'accord	Plutôt pas d'accord	Ni en accord ni en désaccord	Plutôt d'accord	Tout à fait d'accord
Erreurs	Butée Fausse route Perforation Fracture instrumentale Canal non préparé	Absence	Présence				
		Absence	Présence				
		Absence	Présence				
		Absence	Présence				
		Evaluation conventionnelle (TP)					

3.1.3 Evaluation expérimentale

Pour l'évaluation expérimentale, les dents ont été montées sur un support en cire à basse viscosité puis scannées à l'aide du μ -CT (Skyscan 1172® ; Bruker) (Fig.13) après la 1^{ère} et la 2^e séance de TP.



Figure 13 : μ -CT du laboratoire PMOI EA 4490.

Les acquisitions ont été réalisées à l'aide d'un filtre cuivre/aluminium à 80 kV, 100 μ A et une résolution de 20,06 μ m, après avoir déterminé les limites haute et basse de la région d'intérêt. La molaire a effectué une rotation de 180° selon son axe vertical sans mouvement aléatoire. Elle a été irradiée pendant 1285 ms tous les 0,9° et une acquisition a duré environ 30 min. Les volumes ont été reconstruits à partir des images scannographiques (NRecon® version 1.6.10, Bruker) puis l'évaluation expérimentale a été menée sur les logiciels DataViewer® et CT-An® (version 1.14.4.1, Bruker). Les mesures de longueur ont été déterminées à partir de voxels complets (Fig.13) qui représentaient un vide. Les voxels incomplets ont été considérés comme représentant la dentine.



Figure 14 : image en coupe acquise par μ -CT d'un canal instrumenté. Les voxels complets (noirs) ont été considérés comme des zones instrumentées tandis que les voxels incomplets (gris) ont été considérés comme des zones non instrumentées.

3.1.3.1 Première séance : cavité d'accès et préparation canalaire

La cavité d'accès et la préparation canalaire ont été évaluées à l'aide d'une échelle d'accord (Tab.2). Cette échelle a été élaborée selon des critères retrouvés dans la littérature. L'évaluation a été menée dans les 3 sens de l'espace par des observations successives de chaque coupe dans un axe longitudinal, transversal et axial.

- **Ouverture** : un score de 4 a été attribué à l'ouverture lorsque l'ensemble des objectifs était rempli ; de 3 lorsque qu'au moins 1 objectif n'avait pas été rempli ; de 2 lorsque 3 objectifs sur 7 étaient remplis ; de 1 lorsque qu'au moins 1 objectif était rempli et de 0 lorsqu'aucun objectif n'était rempli. Les objectifs de l'ouverture ont été évalués visuellement à partir de coupes μ -CT.

- **Élimination du plafond pulpaire** : des zones de persistance de plafond pulpaire ont été recherchés à partir des coupes μ -CT (Fig.15). Un score de 4 a été attribué à l'élimination du plafond pulpaire lorsque l'ensemble des objectifs était rempli ; de 3 lorsque qu'une interférence était visible sur une coupe ; de 2 lorsque qu'un seul objectif était rempli ; de 1 lorsque que les 2 objectifs étaient partiellement remplis et de 0 lorsqu'aucun objectif n'était rempli.

- **Relocalisation des entrées canalaires** : l'élargissement des entrées canalaires et l'élimination des triangles dentinaires ont aussi été évalués visuellement (Fig.15). Un score de 4 a été attribué à la relocalisation des entrées canalaires lorsque l'ensemble des objectifs était rempli ; de 3 lorsque qu'un objectif n'était pas rempli ; de 2 lorsque que 2 objectifs étaient remplis ; de 1 lorsque qu'un objectif était rempli et de 0 lorsqu'aucun objectif n'était rempli.

- **Irrigation** : la présence d'une radio opacité correspondant à des débris de tissus minéralisés a été recherchée dans le but d'informer sur l'irrigation (DataViewer® et CT-An® version 1.14.4.1, Bruker). Les scores ont été attribués à l'irrigation en fonction de la quantité de débris visibles sur les coupes μ -CT (Fig.15).

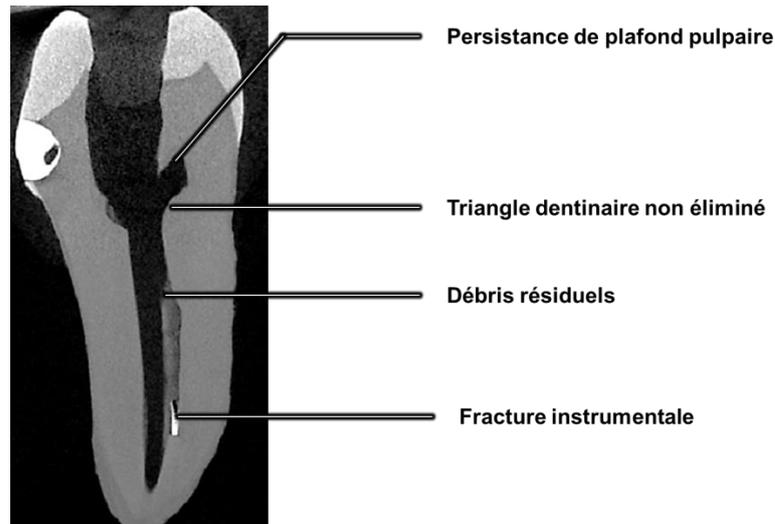


Figure 15 : exemple d'une coupe μ -CT utilisée pour l'évaluation.

- **Diamètre apical de préparation** : le diamètre de la lumière canalaire visible sur la section perpendiculaire au plus grand axe du canal et située à la limite apicale de préparation a été mesuré (Fig.16) (DataViewer®, Bruker). La mesure sur la coupe μ -CT a été réalisée à partir du plus petit diamètre de la lumière canalaire (Fig.16).

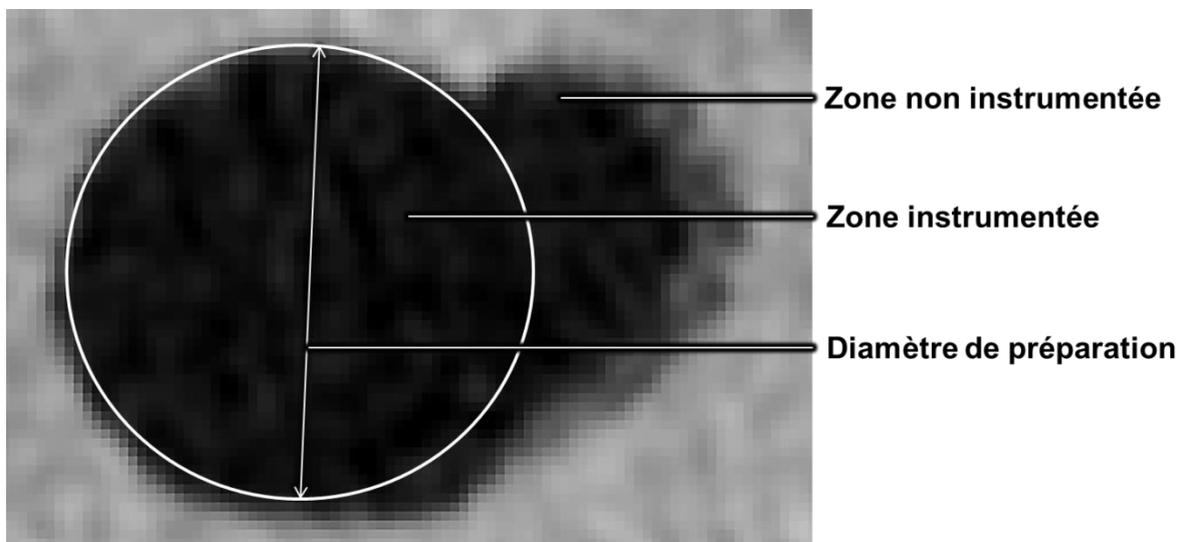


Figure 16 : mesure du diamètre canalaire sur une coupe axiale de la dent acquise par μ -CT. (CT-An® version 1.14.4.1, Bruker).

La différence de mesure entre le diamètre apical de préparation choisi par l'étudiant et le diamètre apical de préparation observé (à 0,02 mm près) a été utilisée pour scorer ce critère. Un score de 4 a été attribué au diamètre apical de préparation lorsque cette différence était nulle ; de 3 lorsqu'elle était comprise entre 0 et 0,02 mm

; de 2 lorsqu'elle était comprise entre 0,02 et 0,04 mm ; de 1 lorsqu'elle était comprise entre 0,04 et 0,06 mm et de 0 lorsqu'elle était supérieure à 0,06 mm (Tab.5).

- **LT** : la distance séparant le foramen apical (Fig.4) de la limite apicale de préparation a été mesurée sur les coupes μ -CT orientées selon le plus grand axe du canal (DataViewer®, Bruker).

Un score de 4 a été attribué à la LT lorsque la distance séparant le foramen apical (Fig.4) de la limite apicale de préparation était comprise entre 0 et 0,5 mm ; de 3 lorsqu'elle était comprise entre 0,5 et 1 mm ; de 2 lorsqu'elle était comprise entre 1 et 1,5 mm ; de 1 lorsqu'elle était comprise entre 1,5 et 2 mm et de 0 lorsqu'elle était supérieure à 2 mm (Tab.5).

- **Conicité** : la conicité de la préparation canalaire a été calculée sur les 5 derniers millimètres de la mise en forme selon la formule suivante (Fig.17) :

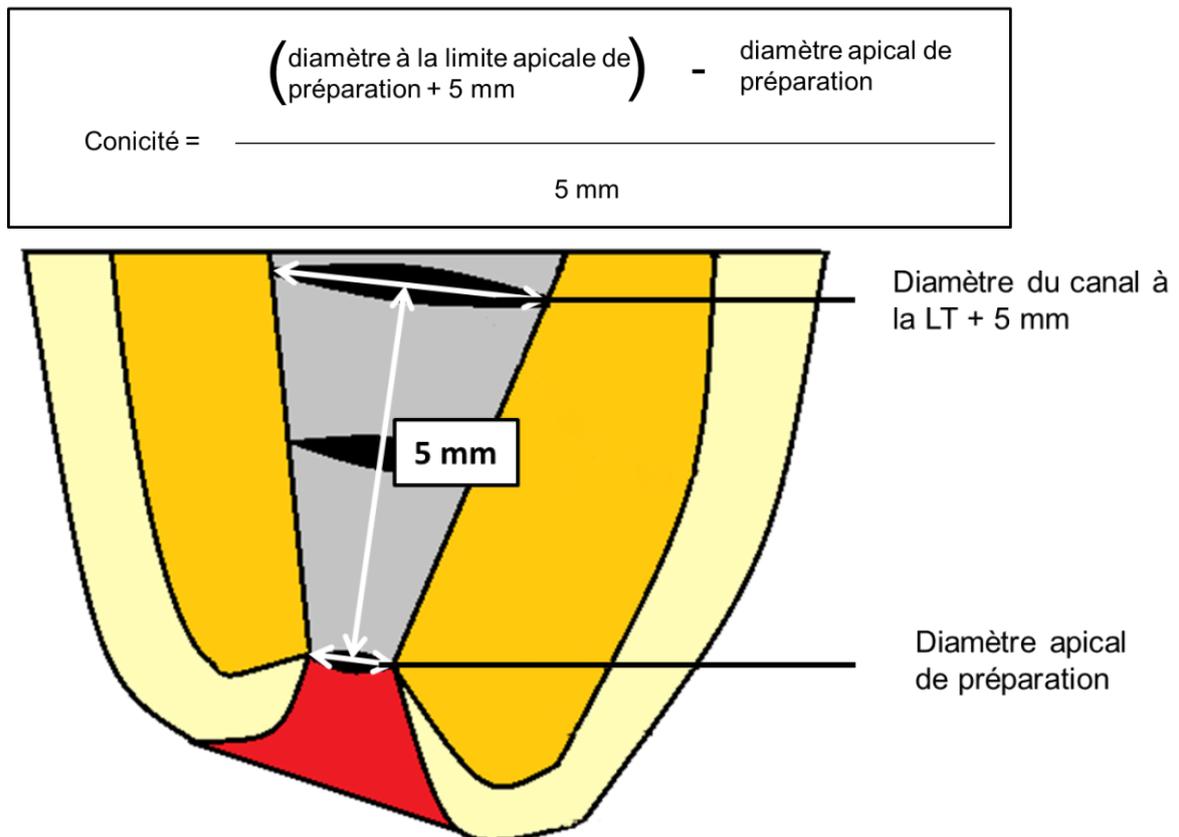


Figure 17 : schématisation du calcul de la conicité au niveau de la mise en forme canalaire apicale.

Un score de 4 a été attribué à la conicité lorsque la conicité des 5 mm apicaux était égale à 6% ; de 3 lorsqu'elle était égale à 5% ou à 7% ; de 2 lorsqu'elle était égale à 4% ou 8% ; de 1 lorsqu'elle était égale à 3% ou 9% et de 0 lorsqu'elle était égale à 2% ou 10% (Tab.5).

- **Erreurs iatrogènes** : la présence (score = 1) ou l'absence (score = 0) a été mesurée de la manière suivante :

- Butée = présence de débris dentinaires formant un bouchon ou visualisation d'une marche au niveau des parois canalaires ;

- Fausse route = non-respect de la trajectoire canalaire ;

- Perforation = mise en forme de la constriction ou perforation d'une paroi canalaire ou coronaire.

- Visualisation d'un canal partiellement ou totalement non préparé.

3.1.3.2 Deuxième séance : obturation canalaire

- **Longueur d'obturation** : la distance X séparant le foramen apical (Fig.4) de l'extrémité apicale du matériau d'obturation a été mesurée pour définir la longueur d'obturation (Fig.18).

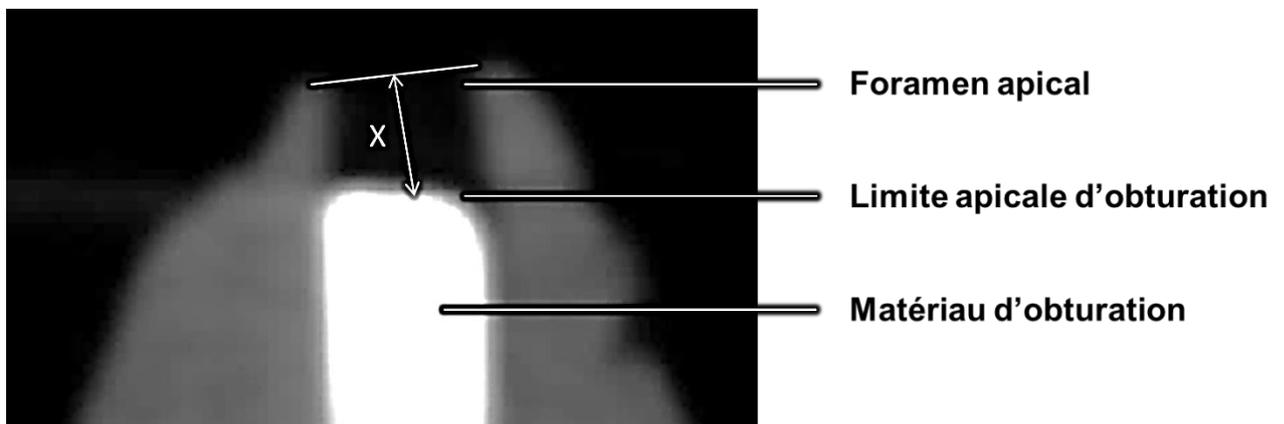


Figure 18 : calcul de la longueur d'obturation (DataViewer®, Bruker).

Un score de 4 a été attribué à la longueur d'obturation lorsque la longueur X était comprise entre 0 et 0,5 mm ; de 3 lorsqu'elle était comprise entre 0,5 et 1 mm ; de 2 lorsqu'elle était comprise entre 1 et 1,5 mm ; de 1 lorsqu'elle était comprise entre 1,5 et 2 mm et de 0 lorsqu'elle était supérieure à 2 mm ou en présence d'un dépassement (Tab.5).

- **Densité et homogénéité** : le volume canalaire a été segmenté et isolé du volume dentaire (CT-An®, Bruker) et sauvegardée au format *.stl*. La région d'intérêt a été déterminée depuis le foramen apical jusqu'à l'entrée canalaire. Elle a ensuite été binarisée par l'application d'un seuil fixe (200/255 niveaux de gris) pour isoler les voxels correspondant au matériau d'obturation. Le rapport entre le nombre de voxels correspondant au matériau d'obturation et le nombre de voxels correspondant au volume canalaire a permis de quantifier le pourcentage de vide présent au sein du canal.

Un score de 4 a été attribué à la densité et l'homogénéité lorsque le pourcentage de matériau d'obturation au sein du canal était supérieur à 95% ; de 3 lorsqu'il était compris entre 91% et 95% ; de 2 lorsqu'il était compris entre 86% et 90%; de 1 lorsqu'il était compris entre 81% et 85% et de 0 lorsqu'il était inférieur ou égal à 80% (Tab.5).

L'évaluation expérimentale a donc permis d'attribuer un score à chaque critère en fonction de la grille de scorage (Tab.5) suivante :

Tableau 5 : grille de scorage utilisée pour l'évaluation expérimentale.

Critères d'évaluation		Objectifs	Score					
			0	1	2	3	4	
Cavité d'accès	Ouverture	<ul style="list-style-type: none"> bonne forme de l'ouverture coronaire bonne dimension de l'ouverture coronaire bonne position de l'ouverture coronaire parois de la cavité de délimitation de dépouille contenu caméral et ensemble des orifices canalaire visibles directement depuis l'accès coronaire pas d'interférences visibles au niveau de la cavité de délimitation pas d'interférences visibles sur le plancher ou les orifices canalaire 	Pas du tout d'accord	Plutôt pas d'accord	Ni en accord ni en désaccord	Plutôt d'accord	Tout à fait d'accord	
	Elimination du plafond pulpaire	<ul style="list-style-type: none"> bonne mise en forme des parois de la cavité de contour pas d'interférences visibles sur les parois de la cavité de contour 	Pas du tout d'accord	Plutôt pas d'accord	Ni en accord ni en désaccord	Plutôt d'accord	Tout à fait d'accord	
	Relocalisation des entrées canalaire	<ul style="list-style-type: none"> bon élargissement des canaux 1/3 apical ou 1ère courbure visible directement à partir de l'accès coronaire pas d'interférences visibles sur la coupe μ-CT bonne élimination des triangles dentinaires 	Pas du tout d'accord	Plutôt pas d'accord	Ni en accord ni en désaccord	Plutôt d'accord	Tout à fait d'accord	
	Irrigation	<ul style="list-style-type: none"> absence de débris, les parois canalaire sont propres 	Pas du tout d'accord	Plutôt pas d'accord	Ni en accord ni en désaccord	Plutôt d'accord	Tout à fait d'accord	
	Préparation	LT	<ul style="list-style-type: none"> distance séparant le foramen apical de la limite apicale de préparation 	>2 mm	2 mm	1,5 mm	1 mm	0,5 mm
		Mise en forme	<ul style="list-style-type: none"> différence de mesure entre le diamètre apical de préparation choisi par l'étudiant et le diamètre canalaire situé à la limite apicale de préparation 	> 0,06 mm	0,06 mm	0,04 mm	0,02 mm	0 mm
		Conicité	<ul style="list-style-type: none"> conicité située dans les 5 mm apicaux (+/- 0,5 %) 	2 ou 10%	3 ou 9%	4 ou 8%	5 ou 7%	6%
	Obturation	Longueur d'obturation	<ul style="list-style-type: none"> distance séparant le matériau d'obturation du foramen apical 	2 mm ou dépassement	1,5 mm	1 mm	0,5 mm	0 mm
		Densité et homogénéité	<ul style="list-style-type: none"> % de matériau d'obturation au sein du canal 	<80%	81-85%	86-90%	91-95%	>95%
	Erreurs	Butée	<ul style="list-style-type: none"> absence de perméabilité apicale 	Absence	Présence			
Fausse route		<ul style="list-style-type: none"> absence de déviation de la trajectoire canalaire 	Absence	Présence				
Perforation		<ul style="list-style-type: none"> absence de perméabilité du plancher, d'une paroi coronaire ou d'une paroi canalaire 	Absence	Présence				
Fracture instrumentale		<ul style="list-style-type: none"> présence de la partie active d'un instrument au sein du canal 	Absence	Présence				
Canal non préparé		<ul style="list-style-type: none"> préparation canalaire 	Absence	Présence				
Evaluation expérimentale (μ-CT)								

3.1.4 Analyse statistique

Les scores obtenus lors de l'évaluation de la cavité d'accès ont été étudiés à l'aide du test non-paramétrique de Wilcoxon Mann-Whitney en raison du faible nombre d'échantillons ($n = 7$). L'analyse de la préparation et de l'obturation canalair ($n = 18$) a débuté par un test de normalité de Kolmogorov-Smirnov. Les échantillons n'ont pas suivi la loi normale. Un test non paramétrique de Wilcoxon Mann-Whitney a donc été réalisé sur les échantillons appariés (GraphPad, Prism edition 5.01) avec un risque α de 5%.

3.2 Résultats

3.2.1 Quantitatifs

Les scores quantitatifs obtenus par l'évaluation conventionnelle ont été comparés à ceux obtenus par l'évaluation expérimentale (Tab.6).

Tableau 6 : résultats des tests statistiques.

	Critère	Evaluation conventionnelle	Evaluation expérimentale	Test	P value	Différence significative
		Moyenne +/- écart type	Moyenne +/- écart type			
Cavité d'accès	Ouverture	1,429 +/- 0,5714	1,714 +/- 0,7143	Wilcoxon	0,5862	Non
	Elimination du plafond pulpaire	2,714 +/- 0,5216	2,286 +/- 0,6801	Wilcoxon	0,1489	Non
	Relocalisation des entrées canalaires	2,286 +/- 0,5216	2,286 +/- 0,5654	Wilcoxon	1	Non
Préparation	Irrigation	1,389 +/- 0,3347	2,278 +/- 0,2658	Wilcoxon	0,003	Oui
	LT	2,556 +/- 0,3355	2,444 +/- 0,3896	Wilcoxon	0,926	Non
	Diamètre apical de préparation	2,278 +/- 0,3214	1,5 +/- 0,4372	Wilcoxon	0,1024	Non
	Conicité	3 +/- 0,3705	2 +/- 0,4201	Wilcoxon	0,0553	Non
Obturation	Longueur d'obturation	2,556 +/- 0,3811	1,278 +/- 0,3598	Wilcoxon	0,008	Oui
	Densité et homogénéité	2,167 +/- 0,3454	0,6111 +/- 0,2003	Wilcoxon	0,0021	Oui

La moyenne des scores obtenus pour chaque critère d'évaluation conventionnel et expérimental est présentée sous forme d'histogrammes appariés (Fig.19).

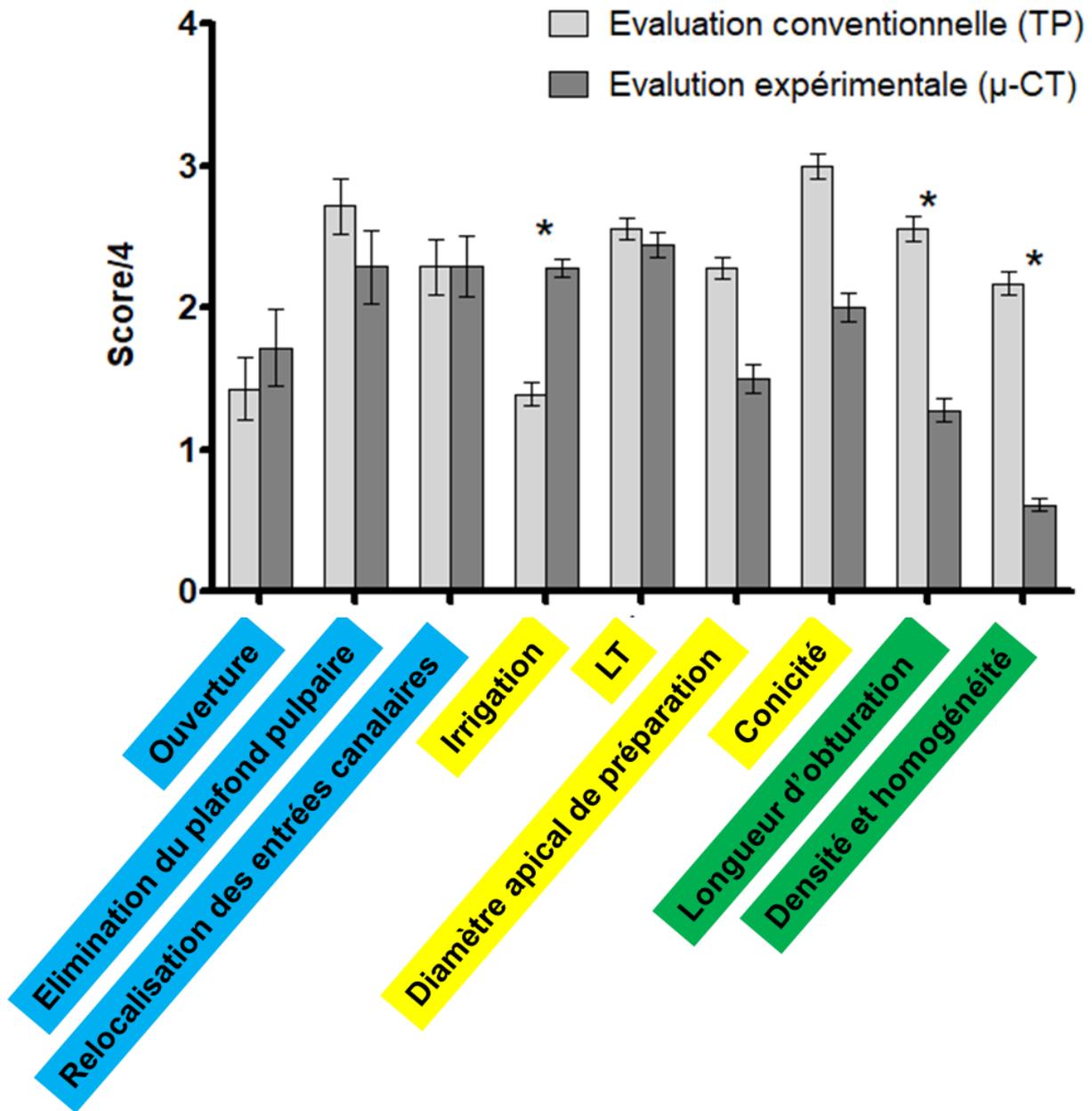


Figure 19 : moyenne des scores et écart-type des critères d'évaluation conventionnelle (TP) et expérimentale (μ-CT) ; (* représente une différence significative).

Au cours de l'évaluation de la cavité d'accès, aucune différence significative n'a été mise en évidence entre les méthodes d'évaluation conventionnelles et expérimentales concernant les critères ouverture ($1,429 \pm 0,5714$; $1,714 \pm 0,7143$, respectivement), élimination du plafond pulpaire ($2,714 \pm 0,5216$; $2,286 \pm 0,6801$, respectivement) et relocalisation des entrées canalaire ($2,286 \pm 0,5216$; $2,286 \pm 0,5654$, respectivement) ($P > 0,05$).

Concernant la préparation canalaire, les scores d'irrigation obtenus par l'évaluation conventionnelle ($1,389 \pm 0,3347$) étaient significativement inférieurs à ceux obtenus par l'évaluation expérimentale ($2,278 \pm 0,2658$) ($P < 0,05$). Les scores de LT obtenus par l'évaluation conventionnelle ($2,556 \pm 0,335$) étaient similaires à ceux obtenus par l'évaluation expérimentale ($2,444 \pm 0,3896$) ($P > 0,05$). Les scores du diamètre apical de préparation et de la conicité obtenus par l'évaluation conventionnelle ($2,278 \pm 0,3214$; $3 \pm 0,3705$), respectivement) étaient supérieurs à ceux obtenus par l'évaluation expérimentale ($1,5 \pm 0,4372$; $2 \pm 0,4201$, respectivement) mais ces différences n'étaient pas significatives ($P > 0,05$) (Tab.6).

Enfin, les scores de longueur d'obturation ainsi que ceux de densité et homogénéité obtenus par l'évaluation conventionnelle ($2,556 \pm 0,3811$; $2,167 \pm 0,3454$, respectivement) étaient significativement supérieurs à ceux obtenus par l'évaluation expérimentale ($1,278 \pm 0,3598$; $0,6111 \pm 0,2003$, respectivement) ($P < 0,05$) (Tab.6).

3.2.2 Qualitatifs

Des scores qualitatifs (0 = absence ; 1 = présence) ont été donnés aux erreurs iatrogènes mises en évidence au cours des 2 types d'évaluation (conventionnelle, n = 12 ; expérimentale, n = 11). Le type d'erreur était différent selon l'évaluation réalisée. Aucune fausse route et aucun canal non préparé n'ont été décelés par les 2 méthodes d'évaluation. Neuf butées ont été observées au cours de l'évaluation conventionnelle dont 3 ont également été décelées par l'évaluation expérimentale. En revanche, l'évaluation conventionnelle a permis de mettre en évidence une seule perforation et 2 fractures instrumentales, tandis que l'évaluation expérimentale a permis d'en déceler 4 et 4, respectivement (Fig.20).

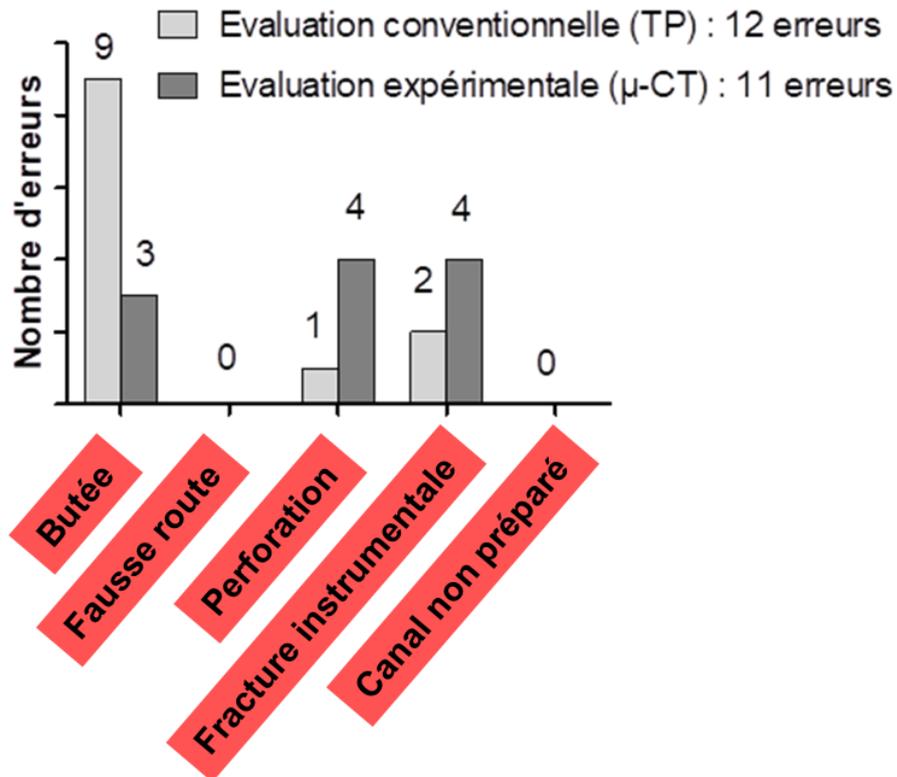


Figure 20 : nombre d'erreurs iatrogènes mises en évidence lors de l'évaluation conventionnelle (TP) et expérimentale (μ-CT).

3.3 Discussion

Les travaux pratiques (TP) d'endodontie jouent un rôle important dans la formation pratique pré-clinique des futurs praticiens. Dans ce sens, l'ESE a montré que l'enseignement pratique pourrait être amélioré afin d'optimiser la formation des praticiens (29). Dans le cadre de la formation universitaire pré-clinique il est nécessaire de réaliser une évaluation ponctuelle ou continue. Ceci permet de quantifier un apprentissage afin de décider si un étudiant est capable ou non d'aller plus loin dans sa formation (20,30) ; d'analyser la pratique pour la comparer aux recommandations (29) et de cibler les difficultés pour mettre en œuvre des actions d'amélioration pédagogique (24). Il n'existe pas de moyens ni de méthodes d'évaluation standardisés pour évaluer un TP d'endodontie. D'ailleurs, peu de travaux concernant ce sujet sont retrouvés dans la littérature et les avis divergent. L'objectif principal de ce travail est d'étudier la pertinence des critères d'évaluation utilisés pour évaluer un TP d'endodontie en comparant les scores obtenus par une méthode d'évaluation conventionnelle (TP) et une méthode d'évaluation expérimentale (μ-CT).

L'homogénéité de l'échantillon d'étudiants et des dents inclus dans l'étude n'a pas été contrôlée. Ceci pourrait constituer un biais d'inclusion en réduisant la puissance statistique liée à des écarts-type élevés lors de l'analyse des résultats. Cependant, la présence d'une forte variabilité du niveau des étudiants et de l'anatomie des dents incluses peut constituer un atout pour une étude pédagogique des TP puisqu'elle permet de couvrir un panel plus large de situations cliniques et d'erreurs réalisées par les étudiants. A l'inverse, l'utilisation de dents synthétiques a été proposée pour les TP d'endodontie et n'a pas d'impact négatif sur l'apprentissage pré-clinique (84,86). Ce type de modèle permet de contrôler et de standardiser le niveau de difficulté de l'exercice demandé à chaque étudiant ce qui ne constitue par l'objectif de ce travail. Les dents traitées par les étudiants lors des 2 séances de TP ont été positionnées sur des arcades dentaires en cire elles-mêmes montées sur des têtes fantômes. Le champ opératoire a ensuite été mis en place, ce qui a permis aux étudiants de travailler dans des conditions proches d'une situation clinique.

Afin d'obtenir une évaluation conventionnelle la plus fidèle possible, les conditions d'évaluation ont été optimisées selon les recommandations émises par l'ESE (29) : observation des dents à l'aide d'un microscope opératoire par un évaluateur indépendant expérimenté en aveugle ayant à sa disposition du matériel spécifiques (sonde DG16, n°17, n°19, lime K10, lime apicale maîtresse, MC calibré par l'évaluateur). La RCP et la radiographie post-opératoire ont été réalisées dans une incidence clinique par l'expérimentateur afin de contrôler la qualité de la préparation et de l'obturation canalair conforméent aux recommandations décrites par l'HAS (40). Cependant, l'absence de standardisation de l'incidence radiographique peut être à l'origine d'interprétations différentes sur les images, ce qui peut constituer un biais de protocole.

Dans cette étude, l'évaluation expérimentale a été menée par microtomographie (μ -CT). Cette technique présente une haute précision pour l'observation radiographique des tissus minéralisés. Elle permet d'obtenir des images tridimensionnelles en haute résolution sans détruire les échantillons (46), ce qui en ferait une méthode idéale pour l'évaluation en volume d'une dent traitée endodontiquement. A notre connaissance, cette application du μ -CT n'a pas encore été décrite dans la littérature. Si cette méthode semble idéale pour l'évaluation des

TP d'endodontie, elle ne peut pas être employée au quotidien en raison du caractère chronophage et du coût important liés à son utilisation.

La qualité globale des TE réalisés par les étudiants dans cette étude était moyenne voire faible. Ceci s'explique par le fait que les étudiants inclus étaient toujours en phase d'apprentissage. L'évaluation de la cavité d'accès (ouverture, élimination du plafond pulpaire, relocalisation des entrées canalaire) n'a pas montré de différences entre les 2 méthodes d'évaluation étudiées (TP et μ -CT). L'instrumentation spécifique disponible pour l'évaluateur lors de l'évaluation conventionnelle (microscope opératoire, sondes et limes K) a ainsi permis d'obtenir une sensibilité acceptable. En effet, elle permet d'apprécier rapidement et simplement la présence d'interférences coronaires, de plafond pulpaire résiduel et de visualiser les entrées canalaire (67). A l'avenir, il pourrait être intéressant d'étudier l'impact de l'utilisation des aides optiques sur la sensibilité de l'évaluation. Il faut garder à l'esprit que le TE est réalisé étape par étape, et que ces étapes sont interdépendantes les unes des autres : le succès d'une étape conditionne le succès de la suivante. Il est donc raisonnable de réfléchir à la nécessité d'évaluer un TE en considérant les objectifs à atteindre séparément ou bien dans leur globalité. Les travaux de Diemer et coll. (24) ont défini des critères d'évaluation ciblés sur des objectifs de la cavité d'accès qui ont été validés. Dans la présente étude, les mêmes objectifs ont été évalués en considérant additionally l'élimination du plafond pulpaire, décrite dans les règles de bonne pratique (40).

Concernant l'irrigation, l'évaluation conventionnelle a été plus sensible que l'évaluation expérimentale. En effet, l'utilisation des aides optiques lors de l'évaluation conventionnelle permet de visualiser les débris macroscopiques présents sur les parois de la cavité d'accès et sur la partie visible des parois canalaire. L'emploi du μ -CT pour évaluer ce paramètre est discutable. En effet, cette méthode présente l'avantage d'observer les tissus minéralisés dans l'ensemble du système canalaire, ce qui n'est pas possible lorsqu'une courbure est présente avec des aides optiques. Cependant, le μ -CT ne permet pas de distinguer la radio-opacité des débris avec celle de la dentine constituant les parois canalaire. Des méthodes expérimentales d'observation au MEB permettent de faire cette distinction, mais ces méthodes sont destructives et ne permettent pas de réaliser l'obturation dans un second temps (70,79).

Les scores de LT ont été similaires pour les 2 méthodes d'évaluation. La mesure de la LT par un évaluateur en TP semble donc adaptée. En revanche, les scores de l'évaluation expérimentale concernant le diamètre apical de préparation et la conicité étaient plus faibles que ceux obtenus par l'évaluation conventionnelle, mais ces différences n'étaient pas significatives. Cette tendance observée doit être confirmée dans une autre étude avec un nombre d'échantillons plus important. La haute précision du μ -CT a permis ici de mettre en évidence les limites de l'évaluation conventionnelle qui a été moins précise pour mesurer le diamètre apical réel de la préparation. Ceci peut s'expliquer par un calibrage approximatif du MC (réglette d'endodontie) et de la pointe de la lime apicale maîtresse. A l'inverse, la résolution de 20 μ m utilisée pour les acquisitions μ -CT a permis d'obtenir une précision supérieure. La haute sensibilité du μ -CT permet également d'expliquer les scores plus faibles de la conicité que ceux obtenus avec la méthode d'évaluation conventionnelle. En effet, l'appréciation clinique de la conicité reste un critère subjectif tandis que l'imagerie tridimensionnelle en haute résolution permet de la calculer de manière rigoureuse. Cependant, des spécificités de l'anatomie canalaire initiale peuvent favoriser la présence d'une conicité élevée n'étant pas générée par la mise en forme ; la conicité peut alors varier selon la zone de mesure sélectionnée. Afin de pallier ces limites la conicité a été calculée sur les 5 derniers mm apicaux.

Les scores obtenus par l'évaluation expérimentale concernant la longueur, la densité et l'homogénéité de l'obturation étaient plus faibles que ceux obtenus par l'évaluation conventionnelle. Ces résultats ne sont pas surprenants car l'évaluation conventionnelle se base sur des images de clichés radiographiques rétro-alvéolaires en 2 dimensions. Ceci ne permet pas d'apprécier une éventuelle sortie latérale ou des variations anatomiques qui pourraient biaiser la mesure de la longueur d'obturation. En ce qui concerne la densité et l'homogénéité, le μ -CT a permis de calculer précisément la densité radiographique réelle du volume canalaire obturé (4,14,51,95). A l'inverse, l'appréciation de la densité et de l'homogénéité sur un cliché radiographique rétro-alvéolaire en 2 dimensions présente un biais lié à son interprétation par l'évaluateur.

L'évaluation conventionnelle a permis de déceler 3 fois plus de butées que l'évaluation expérimentale. Ceci s'explique par l'utilisation d'une lime manuelle pour contrôler la perméabilité canalaire lors de l'évaluation conventionnelle. La présence

d'une butée peut ainsi être décelée en raison de l'arrêt de la progression de la lime en direction apicale. A l'inverse, la détection d'une butée par le μ -CT nécessite l'interprétation de l'observateur ce qui peut entraîner un manque de sensibilité concernant ce paramètre. Enfin, l'évaluation expérimentale était plus sensible dans la détection des perforations et des fractures instrumentales ce qui s'explique une fois encore par l'appréciation de l'ensemble du système canalaire dans les 3 sens de l'espace (37).

4 Conclusion et perspectives

Dans cette étude la pertinence des critères d'évaluation des travaux pratiques (TP) d'endodontie a été évaluée en comparant les scores mesurés par des critères d'évaluation conventionnels et des critères d'une évaluation expérimentale développée pour l'occasion. Sept étudiants ont chacun réalisé un TE pour obtenir un total de 18 canaux qui ont été inclus dans l'étude. Lors d'une première séance la cavité d'accès et la préparation canalaire ont été réalisées. Une première évaluation conventionnelle a été réalisée par un évaluateur aidé d'un microscope opératoire et d'instruments endodontiques utilisés classiquement. Les dents ont été scannées à l'aide d'un microtomographe pour la seconde évaluation dite expérimentale. Les étudiants ont ensuite obturé les dents qui ont été évaluées une seconde fois de la même manière. Ces 2 évaluations ont permis d'attribuer un score pour l'ouverture de la cavité d'accès, l'élimination du plafond pulpaire, la relocalisation des entrées canalaires, l'irrigation, la LT, le diamètre apical de préparation, la conicité, la longueur d'obturation, la densité et l'homogénéité de l'obturation.

Ce travail montre que l'utilisation des critères d'évaluation classiquement employés en TP concernant la cavité d'accès, l'irrigation et la longueur de travail est pertinente lorsqu'un microscope opératoire est disponible. L'évaluation conventionnelle du diamètre apical de préparation et de la conicité a montré une sensibilité inférieure à l'évaluation expérimentale, mais ce résultat est à nuancer en raison de l'absence de différence significative. Une attention particulière doit ainsi être apportée au calibrage du maître cône par l'évaluateur. Le diamètre apical de préparation pourrait être directement mesuré à l'aide d'une ou plusieurs limes apicale maîtresse, mais cette méthode risque d'altérer la zone apicale. Ceci rendrait alors difficile l'explication d'une éventuelle erreur à l'étudiant. En ce qui concerne l'évaluation conventionnelle de l'obturation à l'aide des clichés radiographiques rétro-alvéolaires, ce travail révèle que les scores sont sur-évalués en raison du caractère bi-dimensionnel et de la faible résolution des images. Cependant, dans une situation clinique ou en TP, ces critères d'obturation ne peuvent pas être évalués autrement. L'évaluation, qu'elle soit réalisée par un enseignant ou par un étudiant/praticien (dans le cadre d'une auto-évaluation) doit être menée en étant conscient des limites inhérentes à la radiographie. Enfin, l'évaluation

conventionnelle des erreurs iatrogènes à l'aide du passage d'une lime de perméabilité permet de déceler facilement et simplement une butée contrairement à l'évaluation expérimentale qui est moins sensible. A l'inverse, l'évaluation expérimentale des perforations et des fractures instrumentales est plus sensible que l'évaluation conventionnelle en raison de l'exploration de l'ensemble du système canalaire dans les 3 sens de l'espace.

Ce travail ouvre plusieurs perspectives. Il serait intéressant d'améliorer la puissance d'une telle étude en augmentant le nombre d'étudiants inclus, de standardiser les incidences radiographiques et de considérer la détermination électronique de la LT. Enfin, il pourrait être intéressant pour l'ensemble des enseignants d'endodontie de comparer une méthode d'évaluation globale d'un TE avec une évaluation détaillée étape par étape. Ceci permettrait de fournir un modèle d'évaluation standardisé, simplifié, validé et plus rapide pour la formation des praticiens.

Bibliographie

1. Afnor-Norme FD. Formation professionnelle, terminologie, fascicule explicatif. 1996;50–751.
2. Ahmad IA. Rubber dam usage for endodontic treatment: a review. *Int Endod J.* 2009;42:963–72.
3. Andrabi SM-U-N, Kumar A, Kumar Tewari R, Kumar Mishra S, Iftekhhar H. An in vitro SEM study on the effectiveness of smear layer removal of four different irrigations. *Iran Endod J.* 2012;7:171–6.
4. Araújo VL, Souza-Gabriel AE, Filho C, Da AM, Pécora JD, Silva RG, et al. Volume of sealer in the apical region of teeth filled by different techniques: a micro-CT analysis. *Braz Oral Res.* 2016;30.
5. Arens D, Gluskin AH, Peters OA. Radiographic examination and interpretation. *Prat Lessons Endod Treat Hanover Parc Quintessence Publ Co Inc.* 2009;21–35.
6. Arslan D, Guneser MB, Dincer AN, Kustarci A, Er K, Siso SH. Comparison of Smear Layer Removal Ability of QMix with Different Activation Techniques. *J Endod.* 2016;42:1279–85.
7. Balto H, Al Khalifah S, Al Mugairin S, Al Deeb M, Al-Madi E. Technical quality of root fillings performed by undergraduate students in Saudi Arabia. *Int Endod J.* 2010;43:292–300.
8. Beatty RG, Baker PS, Haddix J, Hart F. The efficacy of four root canal obturation techniques in preventing apical dye penetration. *J Am Dent Assoc.* 1989;633–7.
9. Bireaud A. Pédagogie et méthodes pédagogiques dans l'enseignement supérieur. *Rev Fr Pédagogie.* 1990;13–23.
10. Bronnec F. Localisation des orifices canalaires. *Réal Clin.* 2006;357–70.
11. Bronnec F, Bouillaguet S, Machtou P. Ex vivo assessment of irrigant penetration and renewal during the cleaning and shaping of root canals : a digital subtraction radiographic study. *Int Endod J.* :275–82.
12. Calas P, Vulcain JM. Le concept du Hero 642. *Rev Odonto-Stomat.* 1999;28:56–47.
13. Carré P, Caspar P. *Traité des sciences et des techniques de formation.* 2011. 656 p.
14. Celikten B, Uzuntas CF, Orhan AI, Orhan K, Tufenkci P, Kursun S, et al. Evaluation of root canal sealer filling quality using a single-cone technique in oval shaped canals: An In vitro Micro-CT study. *Scanning.* 2016;38:133–40.
15. Chugal NM, Clive JM, Spångberg LSW. Endodontic infection: some biologic and treatment factors associated with outcome. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral*

Radiol Endodontology. 2003;96:81–90.

16. Claisse A, Barril-cochet I, Flouriot A-C, Guigand M. Obturation canalaire. 2014. (Dossier de L'ADF).
17. Cotton TP, Geisler TM, Holden DT, Schwartz SA, Schindler WG. Endodontic applications of cone-beam volumetric tomography. *Dent Update*. 2010;373–9.
18. Dadresanfar B, Mohammadzadeh Akhlaghi N, Vatanpour M, Atef Yekta H, Baradaran Mohajeri L. Technical quality of root canal treatment performed by undergraduate dental students. *Iran Endod J*. 2008;3:73–8.
19. Dahan S. Facteurs prédictifs du succès des thérapeutiques endodontiques. *Réal Clin*. 2014;25.
20. De Moor R, Hülsmann M, Kirkevang L-L, Tanalp J, Whitworth J. Undergraduate curriculum guidelines for endodontology. *Int Endod J*. 2013;46:1105–14.
21. De Moor RJ, Hommez GM, De Boever JG, Delmé KI, Martens GE. Periapical health related to the quality of root canal treatment in a Belgian population. *Int Endod J*. 2000;33:113–20.
22. Deneff J-F. Les nouvelles technologies de l'information et de la communication (NTIC) dans la formation médicale, au service de l'acquisition et du développement des compétences professionnelles. *Pédagogie Médicale*. 2001;2:42–50.
23. Deroo A-S, Gambiez A. Elaboration de fiches pédagogiques pour les travaux pratiques d'endodontie en D.C.EO.1. [Diplôme d'état de docteur en chirurgie dentaire]. Lille 2; 2010.
24. Diemer F, Lauret M-E, Prats E, Calas P. Evaluation préliminaire d'un dispositif de coévaluation en travaux pratiques d'endodontie. *Pédagogie Médicale*. 2005;6:79–87.
25. Donnelly A, Coffey D, Duncan HF. A re-audit of the technical quality of undergraduate root canal treatment after the introduction of new technology and teaching practices. *Int Endod J*. 2016;10–1.
26. Eckerbom M, Magnusson T. Evaluation of technical quality of endodontic treatment--reliability of intraoral radiographs. *Endod Dent Traumatol*. 1997;13:259–64.
27. Eleftheriadis GI, Lambrianidis TP. Technical quality of root canal treatment and detection of iatrogenic errors in an undergraduate dental clinic. *Int Endod J*. 2005;38:725–34.
28. Elsayed RO, Abu-Bakr NH, Ibrahim YE. Quality of root canal treatment performed by undergraduate dental students at the University of Khartoum, Sudan. *Aust Endod J J Aust Soc Endodontology Inc*. 2011;37:56–60.
29. European Society of Endodontology. Quality guidelines for endodontic

- treatment: consensus report of the European Society of Endodontology. *Int Endod J.* 2006;39:921–30.
30. European Society of Endodontology. Accreditation of postgraduate speciality training programmes in endodontology. Minimum criteria for training specialists in endodontology within europe. *Int Endod J.* 2010;43:725–37.
 31. Fabricius L, Dahlén G, Holm SE, Möller AJ. Influence of combinations of oral bacteria on periapical tissues of monkeys. *Scand J Dent Res.* 1982;90:200–6.
 32. Fennich M, Sakout M, Abdallaoui F. Pour une détermination rationnelle de la longueur de travail en endodontie. *Rev Odont Stomat.* 2012;232–43.
 33. Frisk F, Hugoson A, Hakeberg M. Technical quality of root fillings and periapical status in root filled teeth in Jönköping, Sweden. *Int Endod J.* 2008;41:958–68.
 34. Gatley S, Hayes J, Davies C. Requirements, in terms of root canal treatment, of undergraduates in the European Union: an audit of teaching practice. *Br Dent J.* 2009;207:165–70.
 35. 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;36:904–7.
 36. Goldberg M, Farge P. Manuel d'histologie et de biologie buccale: La dent et ses tissus de soutien. Masson; 1989. 160 p.
 37. Guedes OA, da Costa MVC, Dorilêo MCGO, de Oliveira HF, Pedro FLM, Bandeca MC, et al. Detection of procedural errors during root canal instrumentation using cone beam computed tomography. *J Int Oral Health JIOH.* 2015;7:28–32.
 38. Hannig C, Krieger E, Dullin C, Merten H-A, Attin T, Grabbe E, et al. Volumetry of human molars with flat panel-based volume CT in vitro. *Clin Oral Investig.* 2006;10:253–7.
 39. HAS (Haute Autorité de Santé). Tomographie volumique à faisceau conique de la face - Rapport d'évaluation technologique. 2009;
 40. HAS (Haute Autorité de Santé) Service évaluation des actes professionnels. Traitement Endodontique : Rapport d'évaluation technologique. 2008;
 41. Helminen SE, Vehkalahti M, Wolf J, Murtomaa H. Quality evaluation of young adults' radiographs in Finnish public oral health service. *J Dent.* 2000;28:549–55.
 42. Hodez C, Bravetti P. Imagerie dento-maxillo-faciale par faisceau conique Cone Beam. Suramps Medical; 2010. 251 p. (Sauramps Medical, Montpellier).
 43. Hülsmann M, Heckendorff M, Lennon A. Chelating agents in root canal treatment: mode of action and indications for their use. *Int Endod J.* 2003;36:810–30.

44. Hülsmann M, Rummelin C, Schäfers F. Root canal cleanliness after preparation with different endodontic handpieces and hand instruments: a comparative SEM investigation. *J Endod.* 1997;23:301–6.
45. Hülsmann M., Schaffer E. *Problems in endodontics : Etiology, diagnostics and treatment.* 2009.
46. Hülsmann M, Peters OA, Dummer PMH. Mechanical preparation of root canals: shaping goals, techniques and means. *Endod Top.* 2005;10:30–76.
47. Kakehashi S, Stanley HR, Fitzgerald R., Stanley HR, Fitzgerald R. The surgical exposures of dental pulps in germ-free and conventional laboratory rats. *Oral Surg.* 1965;20:349–340.
48. Kelbauskas E, Andriukaitiene L, Nedzelskiene I. Quality of root canal filling performed by undergraduate students of odontology at Kaunas University of Medicine in Lithuania. *Stomatologija.* 2009;11:92–6.
49. Kirkevang L-L, Hørsted-Bindslev P. Technical aspects of treatment in relation to treatment outcome. *Endod Top.* 2002;2:89–102.
50. Kohler F. *Les NTIC dans les différentes formes d'enseignement.* 32 p.
51. Küçükkaya Eren S, Askerbeyli Örs S, Yılmaz Z. Effect of post space preparation on apical obturation quality of teeth obturated with different techniques : A micro-computed tomographic study. *JOE.* 2017;43:1156–1152.
52. Kuttler Y. Microscopic investigation of root apexes. *J Am Dent Assoc* 1939. 1955;50:544–52.
12. Laboux O, Pottier P, Renard E, Barrier PJ, Mef C. *Petit guide de pédagogie médicale & évaluation clinique.* Collège Natl Enseign En Odontol Conserv; 2011.
54. Lasfargues J-J, Machtou P. Pathogenèse des lésions périapicales. *Réal Clin.* 2001;12:139–48.
55. Lasfargues J-J, Machtou P, CNEOC. *Dictionnaire francophone des termes d'odontologie conservatrice.* 2nd ed. Espace ID; 2010. 112 p.
56. Le Boterf G. *Compétence et navigation professionnelle.* 3ème édition revue et augmentée. Paris. 3rd ed. 2000. 332 p.
57. L.Merametdjian, M.Rolot,F.Perez. Réintervenir en endodontie. 2016;27:208–18.
58. López FU, Travessas JAC, Fachin E, Fontanella V, Grecca F. Apical transportation: two assessment methods. *Aust Endod J J Aust Soc Endodontology Inc.* 2009;35:85–8.
59. Machtou P. *Les 10 points clefs en endodontie : La cavité d'accès.* alpha omega. 2007.
60. Martin Dominique. *Endodontie : prévenir la fracture d'instruments.* 2009;

61. Martins JNR, Marques D, Mata A, Caramês J. Clinical efficacy of electronic apex locators: systematic review. *J Endod.* 2014;40:759–77.
62. Moussa-Badran S, Roy B, Bessart du Parc AS, Bruyant M, Lefevre B, Maurin JC. Technical quality of root fillings performed by dental students at the dental teaching centre in Reims, France. *Int Endod J.* 2008;41:679–84.
63. Naseri M, Shantiaee Y, Rasekhi J, Zadsirjan S, Mojtahed Bidabadi M, Khayat A. Efficacy of video-assisted instruction on knowledge and performance of dental students in access cavity preparation. *Iran Endod J.* 2016;11:329–31.
64. Ng Y-L, Mann V, Gulabivala K. Outcome of secondary root canal treatment: a systematic review of the literature. *Int Endod J.* 2008;41:1026–46.
65. Okino LA, Siqueira EL, Santos M, Bombana AC, Figueiredo J a. P. Dissolution of pulp tissue by aqueous solution of chlorhexidine digluconate and chlorhexidine digluconate gel. *Int Endod J.* 2004;37:38–41.
66. Peak JD, Hayes SJ, Bryant ST, Dummer PM. The outcome of root canal treatment. A retrospective study within the armed forces (Royal Air Force). *Br Dent J.* 2001;190:140–4.
67. Rampado ME, Tjaderhame L, Friedman S, Hamstra S. The benefit of the operative microscope for access cavity preparation by undergraduate students. *J Endod.* 2004;8:63–7.
68. Ray HA, Trope M. Periapical status of endodontically treated teeth in relation to the technical quality of the root filling and the coronal restoration. *Int Endod J.* 1995;12–8.
69. Rensis Likert. A technique for the measurement of attitudes. *Arch Psychol.* 1932;140:1–55.
70. Robberecht L, Dehurtevent M, Lemaitre G, Béhal H, Hornez J-C, Claisse-Crinquette A. Influence of root canal curvature on wall cleanliness in the apical third during canal preparation. *European Endodontic Journal.* 2017;inpress.
71. Román-Richon S, Faus-Matoses V, Alegre-Domingo T, Faus-Llácer V-J. Radiographic technical quality of root canal treatment performed ex vivo by dental students at Valencia University Medical and Dental School, Spain. *Med Oral Patol Oral Cirugia Bucal.* 2014;19:e93-97.
72. Saleh IM, Orstavik D, Ruyter IE, Haapasalo M,. Survival of *Enterococcus faecalis* in infected dentinal tubules after root canal filling with different root canal sealers in vitro. *Int Endod J.* 2004;37:198–193.
73. Santos SMC, Soares JA, Costa GM, Brito-Júnior M, Moreira AN, de Magalhães CS. Radiographic parameters of quality of root canal fillings and periapical status: A retrospective cohort study. *J Endod.* 2010;36:1932–7.
74. Schaeffer MA, White RR, Walton RE. Determining the optimal obturation length: a meta-analysis of literature. *J Endod.* 2005;31:271–4.

75. Schilder H. Cleaning and shaping the root canal. *Dent Clin North Am.* 1974;18:269–96.
76. Setzer FC, Hinckley N, Kohli MR, Karabucak B. A Survey of cone-beam computed tomographic use among endodontic practitioners in the united states. *J Endod.* 2017;43:699–704.
77. Simon S. La cavité d'accès en endodontie. *Endodontie.* 2008;1:47–56.
78. Simon S, Machtou P, Adams N, Tomson P, Lumley P. Apical limit and working length in endodontics. *Dent Update.* 2009;36:146–50, 153.
79. Siqueira JF, Pérez AR, Marceliano-Alves MF, Provenzano JC, Silva SG, Pires FR, et al. What happens to unprepared root canal walls: a correlative analysis using micro-computed tomography and histology/scanning electron microscopy. *Int Endod J.* 2017;8–1.
80. Siqueira JF, Roças IN. Clinical implications and microbiology of bacterial persistence after treatment procedures. *J Endod.* 2008;34:1301–1291.
81. Sjögren U, Figdor D, Persson S, Sundqvist G. Influence of infection at the time of root filling on the outcome of endodontic treatment of teeth with apical periodontitis. *Int Endod J.* 1997;30:297–306.
82. Sonntag D, Bärwald R, Hülsmann M, Stachniss V. Pre-clinical endodontics: a survey amongst German dental schools. *Int Endod J.* 2008;41:863–8.
83. Suter B, Lussi A, Sequeira P. Probability of removing fractured instruments from root canals. *Int Endod J.* 2005;112–23.
84. Tchorz JP, Brandl M, Ganter PA, Karygianni L, Polydorou O, Vach K, et al. Pre-clinical endodontic training with artificial instead of extracted human teeth: does the type of exercise have an influence on clinical endodontic outcomes? *Int Endod J.* 2015;48:888–93.
85. Tchorz JP, Ganter PA, Woelber JP, Stampf S, Hellwig E, Altenburger MJ. Evaluation of an improved endodontic teaching model: do preclinical exercises have an influence on the technical quality of root canal treatments? *Int Endod J.* 2014;47:410–5.
86. Tchorz JP, Hellwig E, Altenburger MJ. Teaching model for artificial teeth and endodontic apex locators. *J Dent Educ.* 2013;77:626–9.
87. Unal GC, Kececi AD, Kaya BU, Tac AG. Quality of root canal fillings performed by undergraduate dental students. *Eur J Dent.* 2011;5:324–30.
88. Vellas E. Comparer les pédagogies: un casse-tête et un défi. 2007;8:9–1.
89. Vertucci FJ. Root canal morphology and its relationship to endodontic procedures. *Endod Top.* 2005;10:3–29.
90. White SC, Pharoah MJ. *Oral radiology: principles and interpretation.* Vol. 7. 2009. 696 p.

91. Wolgin M, Wiedemann P, Frank W, Wrbas K-T, Kielbassa AM. Development and evaluation of an endodontic simulation model for dental students. *J Dent Educ.* 2015;79:1363–72.
92. Wood EJ. Problem-based learning: exploiting knowledge of how people learn to promote effective learning. *Biosci Educ E-J.* 2004;3.
93. Yang GB, Zhou XD, Zheng YL, Zhang H, Shu Y, Wu HK. Shaping ability of progressive versus constant taper instruments in curved root canals of extracted teeth. *Int Endod J.* 2007;40:707–14.
94. Zehnder M. Root canal irrigants. *J Endod.* 2006;32:389–98.
95. Zvi M, Raviz Z, Cohen R. The quality of root canal preparation and root canal obturation in canals treated with rotary versus self-adjusting files: A three-dimensional micro-computed tomographic study. *JOE.* 2010;9.

Table des illustrations

Figures

Figure 1 : le triangle pédagogique de Houssaye (88).....	17
Figure 2 : pyramide de l'apprentissage adaptée du NTL, 1960 (92).....	18
Figure 3: principaux types de configurations pulpaires selon Vertucci (A) et complétés par Gulabivala (B) (89).....	23
Figure 4: représentation schématique de l'anatomie de la zone apicale d'après Kuttler (image SOP) (32).....	25
Figure 5 : illustration de l'échelle d'accord de Diemer pour l'évaluation de cavités d'accès réalisées en TP (24).....	31
Figure 6 : observation au MEB de la quantité de smear layer/débris présente sur les parois canalaires (barre = 50 µm) (70).....	33
Figure 7 : morphologie schématique du cône apical après préparation selon l'école américaine (78).....	34
Figure 8 : visualisation de la position d'une lime de perméabilité permettant la détermination de la LT sur des coupes histologiques (23).....	36
Figure 9 : représentation schématique des erreurs iatrogènes au cours d'une préparation canalair (12).....	38
Figure 10 : exemple d'évaluation de TP d'endodontie réalisés par des étudiants espagnols en 4 ^e année sur des dents extraites. Score 1 = travail satisfaisant, Score 0 = travail insatisfaisant.....	41
Figure 11 : représentation du déroulement de l'étude.....	49
Figure 12 : schéma de la méthode utilisée pour calculer le diamètre apical de préparation. Y correspond à la distance séparant la pointe de la lime apicale maîtresse et la pointe du MC.....	54
Figure 13 : µ-CT du laboratoire PMOI EA 4490.....	57
Figure 14 : image en coupe acquise par µ-CT d'un canal instrumenté. Les voxels complets (noirs) ont été considérés comme des zones instrumentées tandis que les voxels incomplets (gris) ont été considérés comme des zones non instrumentées. .	57
Figure 15 : exemple d'une coupe µ-CT utilisée pour l'évaluation.....	59
Figure 16 : mesure du diamètre canalair sur une coupe axiale de la dent acquise par µ-CT. (CT-An® version 1.14.4.1, Bruker).....	59
Figure 17 : schématisation du calcul de la conicité au niveau de la mise en forme canalair apicale.....	60
Figure 18 : calcul de la longueur d'obturation (DataViewer®, Bruker).....	61

Figure 19 : moyenne des scores et écart-type des critères d'évaluation conventionnelle (TP) et expérimentale (μ -CT) ; (* représente une différence significative).....65

Figure 20 : nombre d'erreurs iatrogènes mises en évidence lors de l'évaluation conventionnelle (TP) et expérimentale (μ -CT).....67

Tableaux

Tableau 1: les avantages et les inconvénients des moyens utilisés pour l'évaluation des TP d'endodontie (38,39,42,45).42

Tableau 2 : tableau illustrant la correspondance entre l'échelle d'accord et le score obtenu suite à l'évaluation des critères quantitatifs.52

Tableau 3 : tableau illustrant la correspondance entre l'échelle d'accord et le score obtenu suite à l'évaluation des critères qualitatifs.55

Tableau 4 : grille de scorage utilisée pour l'évaluation conventionnelle.....56

Tableau 5 : grille de scorage utilisée pour l'évaluation expérimentale.63

Tableau 6 : résultats des tests statistiques.64

Annexe

Liste du matériel utilisé en TP d'endodontie et fiche de renseignement.

Simulateur pré-clinique :	- fantôme (tête + mâchoires + joues)
	- modèle en cire (Kavo)
Plateau d'examen :	- miroir droit
	- paire de precelles
	- sonde droite
	- sonde n°17
	- sonde n°19
	- sonde de Rhein
	- sonde DG16
	- bistouri n°15
Cavité d'accès :	- kit de fraises boules (diamantée standard/long col, carbure de tungstène standard/long col)
	- fraise Zekrya endo Z tungstène
	- fraise de Batt
	- forêts de Müller
	- forêts de Gates glidden
	- instrument Niti Endoflare
	- turbine
	- contre angle bague bleue
Préparation :	- contre angle réducteur
	- réglette graduée d'endodontie (Maillefer)
	- compresses stériles
	- séquenceur RevoS (SC1, SC2, SU)
	- limes K (8, 10, 15, 20, 25, 30, 35 et 40)
	- limes H (8, 10 et 15)
	- hypochlorite de sodium 2,5 %
	- seringue à embout vissable
	- aiguille 30/100ème à sortie latérale
Obturation :	- cônes de gutta-percha calibrés en conicité 6%
	- cônes de gutta-percha (fine-médium fine-fine médium-médium)
	- ciment d'obturation (oxyde de zinc + eugénol)
	- spatule à ciment
	- plaque de verre
	- thermocompacteurs (gutta condensor) de Mac Spadden
	- fouloirs verticaux (plugger/heat carrier) de Machtou

Date :	FEUILLE DE RENSEIGNEMENT N°			
Nom :				
N° série :				
N° dent :	canal 1 :	canal 2 :	canal 3 :	canal 4 :
Diamètre apical de				
LT				
Repère coronaire utilisé				
Difficultés opératoires/ informations complémentaires				

Th. D. : Chir. Dent. : Lille 2 : Année [2017] – N°:

Etude des critères d'évaluation en travaux pratiques d'endodontie : approche théorique et expérimentale. / **Trystan VANTORRE**.- p.(83) : ill. (20) ; réf. (95).

Domaines : Endodontie ; Pédagogie.

Mots clés rameaux : Endodontie ; Etude et enseignement ; Education et recherche ; Evaluation.

FMeSH : Etude comparative ; Microtomographie à rayons X.

L'évaluation des travaux pratiques (TP) d'endodontie est indispensable lors de la formation des praticiens. Cependant, il n'existe pas de critères qualitatifs standardisés pour quantifier un apprentissage. L'ESE (European Society of Endodontology) a émis des recommandations de bonne pratique mais elles ne sont que partiellement appliquées aujourd'hui.

L'objectif de cette étude comparative *in vitro* est de mesurer la pertinence des critères d'évaluation des TP d'endodontie en comparant les scores obtenus en TP pour chaque critère avec les scores obtenus par une évaluation de références : la microtomographie.

Sept étudiants ont chacun réalisé un traitement endodontique pour obtenir un total de 18 canaux qui ont été inclus dans l'étude. Lors d'une première séance, la cavité d'accès et la préparation canalaire ont été réalisés. Une première évaluation conventionnelle a été menée puis les dents ont été scannées à l'aide d'un microtomographe pour la seconde évaluation dite expérimentale. Les étudiants ont ensuite obturé les dents qui ont été évaluées une seconde fois de la même manière. Ces deux évaluations ont permis d'attribuer un score à chaque critère d'évaluation.

L'analyse des résultats a permis de valider l'emploi des critères d'évaluation concernant la cavité d'accès, l'irrigation et la longueur de travail lorsqu'un microscope opératoire était utilisé. Des réserves sont à émettre quant à l'évaluation du diamètre apical de préparation et de la conicité qui seraient peu sensibles ; la qualité de l'obturation est en revanche sur-estimée sur les clichés radiographiques en raison du caractère bi-dimensionnel et de la faible résolution. Enfin, les butées sont facilement repérables à l'aide d'une lime de perméabilité alors que les perforations et les fractures instrumentales sont plus difficiles à déceler cliniquement.

JURY :

Président : Monsieur le Professeur Etienne DEVEAUX
Asseseurs : Monsieur le Docteur Alain GAMBIEZ
Monsieur le Docteur Thibault BECAVIN
Monsieur le Docteur Lieven ROBBERECHT