

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEURE ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE

Université de Blida 1 – Faculté de Médecine

Département de Médecine Dentaire

No



MÉMOIRE DE FIN D'ÉTUDE EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLÔME DE
DOCTEUR EN MÉDECINE DENTAIRE

Intitulé du Thème :

*Objectifs, moyens et techniques de
l'assainissement du réseau canalaire.*

Présenté et soutenu le 12 Juillet 2021

Préparé par

CHEGGOUR Kahina

CHENINI Abir

ELAHOUEL Khadidja

BOUHAMIDI Lamia

TOUDERT Mouhamed Maamoun

Dirigé par :

Pr Z. HADJI-OULD ROUIS

Promotrice

Jury composé de :

Dr M. GRIBALLAH

Présidente

Dr S. BOUAKKAZ

Examinatrice

Année Universitaire 2020 – 2021

Remercîment

A nos familles

A nos parents, pour votre soutien et votre amour sans faille. On ne saura vous remercier assez pour tout ce que vous nous avez apporté dans la vie, pour vos valeurs qui nous guident et nous guideront toujours.

A nos frères et sœurs, pour votre présence au quotidien et soutien inconditionnel et accompagnement tout au long de notre très long cursus

Merci à vous !

A notre Directrice de Mémoire :

Professeur Zahia Hadji-Ould Rouis

Merci d'avoir accepté de diriger ce mémoire!

Vous avez fait preuve de patience et de diplomatie pour nous aider à construire ce travail et nous sommes reconnaissants.

Vous êtes une excellente pédagogue et nous n'avons aucun doute que vos qualités vous permettront d'atteindre vos objectifs professionnels.

On vous souhaite une belle et heureuse carrière. Encore un grand merci pour votre aide apporté et votre disponibilité

Au travers de cette thèse, on tient à vous témoigner toutes nos reconnaissances et notre gratitude.

A notre présidente de Jury

Docteur M. GRIBALLAH

*C'est un honneur pour nous de vous avoir
comme présidente de ce jury !*

*Vous vous êtes toujours montrer très
disponible et c'est avec plaisir que nous
avons pu bénéficier de la qualité de votre
enseignement mais aussi de vos précieux
conseils.*

*On vous remercie également pour la
confiance que vous nous avez portée
pendant ces années d'études.*

A notre examinatrice de Jury

Docteur S. BOUAKKAZ

C'est un plaisir de vous compter parmi les membres de ce jury !

On vous remercie pour la qualité de votre enseignement et pour les conseils délivrés en TP comme en clinique, et vos critiques ont été toujours constructives. C'est pourquoi nous sommes ravis que vous jugiez ce travail aujourd'hui

Soyez assuré de notre profond respect et de notre sincère reconnaissance.

Table des matières

| | |
|-------------------|---|
| Introduction..... | 9 |
|-------------------|---|

PREMIER CHAPITRE : OBJECTIFS DE L'ASSAINISSEMENT DU RESEAU CANALAIRE

| | |
|--|-----------|
| 1 .Objectifs de l'assainissement du réseau canalaire..... | 12 |
| 1.1. Objectifs mécaniques..... | 12 |
| 1.2. Objectifs biologiques..... | 12 |
| 2. Rappel sur les structures endodontiques..... | 13 |
| 2.1. Caractéristiques de l'endodonte..... | 13 |
| 2.1.1. L'endodonte..... | 13 |
| 2.1.2. Anatomie endodontique..... | 13 |
| 2.1.2.1. Système pulpaire..... | 14 |
| 2.1.2.2. La complexité du système endocanalaire..... | 15 |
| 3. Microbiologie endodontique..... | 22 |
| 3.1. Rôle des bactéries dans le développement de la pathologie endodontique..... | 22 |
| 3.2. Le biofilm bactérien endodontique..... | 22 |
| 3.2.1. Définition..... | 22 |
| 3.2.2. Composition du biofilm..... | 23 |
| 3.2.3. Conditions de développement du biofilm..... | 24 |
| 3.2.4. Fonction du biofilm..... | 24 |
| 3.2.5. Pathogénicité et virulence du biofilm..... | 25 |
| 3.3. La flore bactérienne d'un réseau canalaire infecté..... | 25 |
| 3.3.1. Les infections endodontiques..... | 25 |
| 3.3.1.1. L'infection primaire..... | 25 |
| 3.3.1.2. L'infection secondaire..... | 26 |
| 3.3.1.3. L'infection persistante..... | 26 |
| 4. Les réservoirs bactériens..... | 26 |
| 4.1. Tubuli dentinaires..... | 26 |
| 4.2. Les canaux..... | 27 |
| 4.3. La zone apicale..... | 27 |

DEUXIEME CHAPITRE : MOYENS DE L'ASSAINISSEMENT DU RESEAU CANALAIRE

| | |
|--|-----------|
| 1. Moyens mécaniques..... | 30 |
| 1.1. Instruments manuels en acier inoxydable..... | 30 |
| 1.1.1. Avantages..... | 31 |
| 1.1.2. Inconvénients..... | 31 |
| 1.2. Instruments en Nickel-Titane..... | 31 |
| 1.2.1. Les instruments en Nickel-Titane manuels..... | 32 |
| 1.2.2. Les instruments en Nickel-Titane mécanisés..... | 32 |

| | |
|---|-----------|
| 1.2.2.1 Les instruments en Nickel-Titane en rotation continue (le système ProTaper®)..... | 32 |
| 1.2.2.2 les instruments en Nickel-Titane en mouvements de réciprocité (Système WaveOne® et Système Reciproc®)..... | 35 |
| 2. Moyens chimiques..... | 37 |
| 2.1. Critères de l'irrigant idéal..... | 37 |
| 2.1.1.hyochlorite de sodium..... | 38 |
| 2.2.1.1 Avantages de l'hypochlorite de sodium..... | 38 |
| 2.2.1.2. Limites et complications de l'hypochlorite de sodium..... | 39 |
| 2.2.2. L'EDTA..... | 40 |
| 2.2.2.1. Avantages de l'EDTA..... | 41 |
| 2.2.2.2. Inconvénients de l'EDTA..... | 41 |
| 2.2.3. La Chlorhexidine..... | 42 |
| 2.2.3.1. Avantages de la Chlorhexidine..... | 42 |
| 2.2.3.2. Inconvénients de la Chlorhexidine..... | 43 |
| 2.2.4. Le MTAD..... | 43 |
| 2.2.4.2.1. Avantages du MTAD..... | 43 |
| 2.2.4.2.2. Inconvénients du MTAD..... | 43 |
| 2.2.5. Les autres produits..... | 44 |
| 2.3. Les dispositifs d'irrigation..... | 44 |
| 2.3.1. Les dispositifs de l'irrigation manuelle conventionnelle..... | 44 |
| 2.3.2. Les dispositifs de l'irrigation assistée..... | 46 |
| 2.3.2.1. Les dispositifs d'irrigation assistée à pression positive..... | 46 |
| 2.3.2.2. Les dispositifs d'irrigation assistée à pression négative..... | 48 |
| 3. Les moyens d'activation des solutions d'irrigation..... | 49 |
| 3.1. Activation manuelle..... | 49 |
| 3.1.1. Avantages..... | 50 |
| 3.1.2. Inconvénients..... | 50 |
| 3.2. Activation chimique..... | 51 |
| 3.2.1. Avantages..... | 51 |
| 3.2.2. Inconvénients..... | 51 |
| 3.3. Activation sonore..... | 51 |
| 3.3.1. Le Vibringe..... | 51 |
| 3.3.2. L'insert EDDY de chez VDWTM..... | 52 |
| 3.3.3. L'Endoactivator®..... | 52 |
| 3.4. Activation ultrasonore..... | 53 |
| 3.5. Activation photonique..... | 54 |

TROISIEME CHAPITRE : TECHNIQUE DE L'ASSAINISSEMENT DU RESEAU CANALAIRE

| | |
|--|-----------|
| 1. Introduction..... | 57 |
| 2. Etapes préliminaires du traitement endodontique..... | 57 |
| 2.1. La radiographie..... | 57 |
| 2.2. Anesthésie..... | 59 |

| | |
|---|-----------|
| 2.3. La reconstitution pré-endodontique..... | 59 |
| 2.4. Pose de la digue..... | 60 |
| 2.5. Préparation de la cavité d'accès..... | 61 |
| 2.6. Le cathétérisme..... | 62 |
| 3. Préparation chimio-mécanique du réseau canalaire..... | 64 |
| 3.1. Préparation chimique du canal..... | 64 |
| 3.1.1. Propriétés des solutions d'irrigation..... | 64 |
| 3.1.2. Protocole opératoire d'irrigation canalaire..... | 65 |
| 3.2. Préparation mécanique du canal..... | 66 |
| 3.2.1. Mise en forme canalaire manuelle « Technique standardisée »..... | 66 |
| 3.2.1.1. Protocole opératoire..... | 66 |
| 3.2.1.2. Avantages et inconvénients..... | 68 |
| 3.2.1.3. Indications et contre-indications..... | 68 |
| 3.2.2. Mise en forme canalaire mécanisée..... | 68 |
| 3.2.2.1. Le concept du « Crown-down »..... | 68 |
| 3.2.2.2. Préparation canalaire en rotation continue..... | 69 |
| 3.2.2.2.1. Protocole opératoire avec le système ProTaper®..... | 69 |
| 3.2.2.2.2. Préparation canalaire en mouvement de Réciprocité..... | 73 |
| Conclusion..... | 77 |

Introduction

La carie dentaire est la pathologie la plus répandue dans le monde. C'est une pathologie infectieuse qui déminéralise les tissus durs de la dent et provoque leur destruction. Après l'atteinte de l'email, la pathologie va s'étendre à la dentine et le patient va commencer à ressentir des douleurs. A ce stade, les bactéries vont pouvoir coloniser les tubuli dentinaires et proliférer jusqu'à la pulpe : il se développe alors une maladie pulpaire et même du péri apex. Le maintien de la vitalité pulpaire n'est plus possible afin de conserver la dent, le chirurgien-dentiste va la dépulper : c'est le traitement endodontique.^[1]

Le traitement endodontique est minutieux et difficile, d'une part par la variabilité anatomique et la complexité du réseau à nettoyer, et d'autre part par le manque de visibilité lors de l'acte.

L'Endodontie a pour objectif de traiter les maladies de la pulpe et du péri apex, et ainsi transformer une dent pathologique en une entité saine, asymptomatique et fonctionnelle sur l'arcade. (HAS, 2008)

La mise en forme canalaire est une étape essentielle du traitement endodontique afin d'éliminer le contenu canalaire et préparer les canaux à l'obturation. L'objectif est d'empêcher l'apparition ou les récurrences des parodontites apicales^[2, 3]. Cette étape est réalisée à l'aide de limes manuelles et mécaniques rotatives.

La majorité de la flore bactérienne sera éliminée par cette préparation mécanique. Mais ce travail va générer des débris dentinaires et être responsable de la formation d'une boue dentinaire ou «smear layer» qui va recouvrir la surface des murs dentinaires et compromettre la suite du traitement canalaire y compris l'étanchéité de l'obturation. D'autre part la complexité du réseau canalaire radiculaire entraîne la présence de zones non instrumentées et/ou non instrumentales qui nous obligent à utiliser des solutions chimiques en complément, donc le traitement mécanique seul est insuffisant pour atteindre les objectifs de l'endodontie. Il est donc impérativement complété par une préparation chimique : c'est l'irrigation^[2, 4, 5].

La préparation canalaire doit donc être considérée comme une préparation chimio- mécanique, où les limites des instruments mécaniques seront palliées par les solutions d'irrigation^[6, 7].

Le praticien a le choix entre divers solutions d'irrigations. Chaque solution d'irrigation présente ses avantages et ses inconvénients respectifs, l'irrigation doit pénétrer dans l'ensemble du réseau canalaire. Aujourd'hui, de nombreux systèmes ont été mis en œuvre pour optimiser l'efficacité des solutions d'irrigation. Les laboratoires dentaires ont bien compris l'importance de l'irrigation canalaire et le marché regorge de systèmes d'irrigation différents, censés potentialiser encore plus cette étape. De nombreuses études sont également parties à la recherche de la solution d'irrigation « parfaite » : celle qui répondra à tous les critères d'efficacité et de biocompatibilité^[8, 9, 10, 11].

L'irrigation en endodontie assure, l'antiseptie par une utilisation régulière et abondante par des solutions antiseptiques. Et en plus de la décontamination bactérienne, la lubrification canalaire et l'évacuation des débris organiques, minérales et de la smear layer (boue dentinaire) : c'est l'assainissement du réseau canalaire^[2, 3].

L'objectif de ce travail, est de rappeler l'importance de la désinfection chimiomécanique en endodontie, en précisant le rôle des différentes solutions d'irrigation mises à notre disposition. Il détaille également les différents moyens et techniques mises en œuvre pour rendre cette désinfection la plus efficace et ainsi réaliser le traitement endodontique dans les meilleures conditions.

Nous présenterons, dans un premier temps, les objectifs de l'assainissement du réseau canalaire. Dans un second temps nous parlerons des différents moyens mécaniques et chimiques pour aboutir à un assainissement optimal. Et enfin nous aborderons les techniques de l'assainissement canalaire permettant la réussite de notre traitement.

Chapitre Premier :

Les objectifs de l'assainissement du réseau canalaire

1. Objectifs de la préparation et de l'assainissement du réseau canalaire

L'assainissement canalaire est une étape essentielle du traitement endodontique. Car il permet l'antisepsie du canal. Il est donc mis en place dès l'ouverture de la chambre pulpaire et jusqu'à l'obturation canalaire. Cependant vu la complexité du réseau canalaire endodontique il est impossible de réaliser une préparation purement mécanique de la totalité du réseau canalaire radiculaire. Pour cela l'irrigation est le complément nécessaire et obligatoire à la préparation des canaux ^[4].

L'objectif principal de l'assainissement du réseau canalaire est la suppression de la totalité du contenu organique canalaire ^[12]. Cependant il existe un objectif secondaire qui ne peut être obtenu que par la combinaison des objectifs mécanique et biologique de cet assainissement.

1.1. Objectifs de la mise en forme canalaire ou Objectifs mécaniques

L'objectif de la mise en forme canalaire consiste à :

- ✓ créer un couloir de circulation pour les solutions d'irrigation afin de leur permettre d'atteindre les zones les plus difficiles, voir inaccessibles du réseau canalaire ^[13].
- ✓ favoriser la pénétration et le renouvellement des solutions d'irrigation ^[14, 15].
- ✓ faciliter le nettoyage et la désinfection d'un système canalaire par l'accès qu'elle procure pour la circulation des solutions d'irrigation ^[16].
- ✓ La mise en forme va permettre la bonne pénétration des solutions d'irrigation jusque dans la zone apicale afin d'éradiquer un maximum de micro-organismes et de toxines présents dans l'endodonte ^[17, 18].

1.2. Objectifs de l'irrigation ou objectifs biologiques

La suppression de la totalité du contenu organique canalaire est l'objectif biologique majeur du traitement endodontique. La complexité anatomique peut constituer un obstacle au bon nettoyage du système canalaire par la présence d'isthmes, canaux ovales, accessoires, latéraux ^[12].

Certaines études montrent qu'environ 35% des surfaces dentinaires intracanales ne sont pas concernées par l'instrumentation, quel que soit le système utilisé (Peters et al. 2001)

Le nettoyage est rendu possible grâce à l'utilisation concomitante de solutions d'irrigations palliant les manques de l'action mécanique permettant ainsi :

- ✓ L'élimination du tissu pulpaire, des débris nécrotiques, de la boue dentinaire et des micro-organismes des zones inaccessibles mécaniquement (Machtou, 1993)
- ✓ le nettoyage et la désinfection de l'ensemble du système canalaire.
- ✓ l'évacuation des copeaux dentinaire et de la smear layer générés par la mise en forme.
- ✓ la lubrification des instruments endodontiques afin de limiter le risque de fracture.
- ✓ l'élimination des micro-organismes, et des débris et la dissolution des débris organiques et minéraux.
- ✓ dissoudre le tissu pulpaire nécrotique

- ✓ désactivation des endotoxines ^[19].

Pour répondre à ces objectifs essentiels du traitement endodontique, le praticien va utiliser divers solutions d'irrigations endodontiques. La circulation et le renouvellement des solutions d'irrigation sont facilités par une mise en forme adéquate.

2. Rappel sur les structures endodontiques

2.1. Caractéristiques de l'endodonte

2.1.1. L'endodonte.

C'est la partie interne de la dent contenant la pulpe, tissu dont dépend la vitalité d'une dent ^[20].

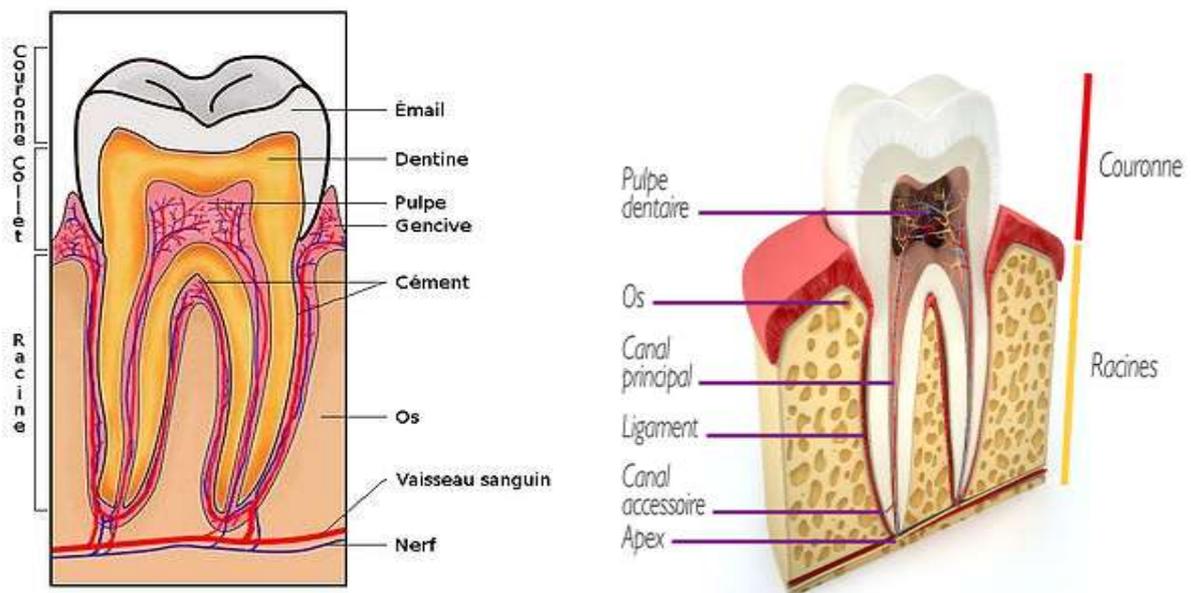


Fig.1 : les différents composants de la dent ^[32]. **Fig.2** : coupe de la dent et son rapport avec

le parodonte ^[33].

2.1.2. Anatomie endodontique

La connaissance de l'anatomie endodontique de base est indispensable au chirurgien-dentiste afin d'anticiper les difficultés du traitement endodontique et d'éviter les échecs de traitement.

2.1.2.1. Système pulpaire

Le système pulpaire est un espace situé au centre de la dentine qui contient la pulpe. La pulpe est la partie essentiellement organique de la dent. C'est un tissu conjonctif lâche fait de : cellules, fibres nerveuses, vaisseaux sanguins et lymphatiques. C'est à ce niveau que se jouent les phénomènes inflammatoires lors d'agression. Cette pulpe abrite une cavité appelée " la cavité pulpaire " qui est délimitée par la dentine sur tout son pourtour et ouverte apicalement par le

foramen, elle renferme le système pulpaire. Cet espace est inextensible et est divisé en deux entités distinctes ^[21].

✓ **la pulpe camérale (ou chambre pulpaire)**

La pulpe camérale est délimitée coronairement par le plafond pulpaire et apicalement par le plancher pulpaire et/ou les entrées canalaire.

✓ **La pulpe radiculaire (ou canal radiculaire),**

C'est la zone où se trouve le canal principal ou les canaux principaux ainsi que les canaux accessoires qui contiennent la pulpe radiculaire. Elle est délimitée coronairement par le plancher pulpaire et/ou les entrées canalaire et apicalement par le foramen apical.

Dans sa portion apicale, le canal radiculaire se rétrécit jusqu'à la jonction cémento-dentinaire (constriction apicale) qui marque la frontière entre l'endodonte et le parodonte. Cette limite se situe à une distance de 0,5 à 3 mm de l'extrémité radiculaire anatomique créant ainsi un espace décrit comme un cône à sommet pulpaire et à base desmodontale, appelé cône cémentaire de Kutler ^[22, 23, 24].

La pulpe camérale

La pulpe radiculaire



Fig.3 : les deux parties de la cavité pulpaire ^[34].

2.1.2.2. La complexité du système endocanalaire



Fig.4 : réseau canalaire d'une molaire supérieure ^[25].

Le système endocanalaire est un système très complexe ^[26]. c'est pour cela que l'on parle de véritable réseau canalaire, avec parfois plusieurs types de ramification ^[27, 28, 22, 29].

Nous distinguons :

- ✓ Les canaux latéraux, situés dans le tiers coronaire du canal et qui relie la pulpe au desmodonte.
- ✓ canaux secondaires, qui sont l'équivalent des canaux latéraux mais situés dans le tiers apical de la racine.
- ✓ Les canaux accessoires, qui correspondent à des ramifications des canaux secondaires.

L'apex ou foramen apical correspond à la jonction amélo-cémentaire et délimite la frontière entre l'endodonte et le paradonte. C'est par ce foramen que passe le paquet vasculo-nerveux qui alimente la pulpe.

L'anatomie apical est très variable d'une racine à une autre de part la position relative entre la constriction apicale et le foramen apical mais également par la situation du foramen apical par rapport à l'apex anatomique de la racine (jusqu'à 3 mm de celle-ci).

L'analyse du complexe endo-canalaire a été introduit par l'étude de Vertucci en 1984 (Vertucci, 1984). Cette recherche a permis de mettre en évidence la complexité canalaire et de classifier les différentes situations Cette dernière distingue huit trajectoires canales différentes en fonction du nombre de canaux entre la chambre pulpaire et l'apex ^[30, 31].

❖ Classification de Vertucci :

est plus élaborée et prévoit 8 types :

- **Type I** : un seul canal avec un seul orifice et un seul foramen apical (1-1).
- **Type II** : deux canaux se rejoignant en un seul canal et présentant une seule sortie foraminale (2-1).
- **Type III** : canal unique se divisant en deux dans la partie moyenne ; les deux canaux se rejoignent dans le tiers apical (1-2-1).
- **Type IV** : deux canaux restant distincts jusqu'au tiers apical (2-2).
- **Type V** : un canal se divisant en deux canaux dans le tiers moyen ou apical (1-2)
- **Type VI** : deux canaux se rejoignant dans le tiers moyen, puis se redivisant dans le tiers apical (2-1-2).
- **Type VII** : un seul canal se divisant, puis se rejoignant et se divisant à nouveau (1-2-1-2).
- **Type VIII** : trois canaux restant distincts jusqu'au tiers apical (3-3).

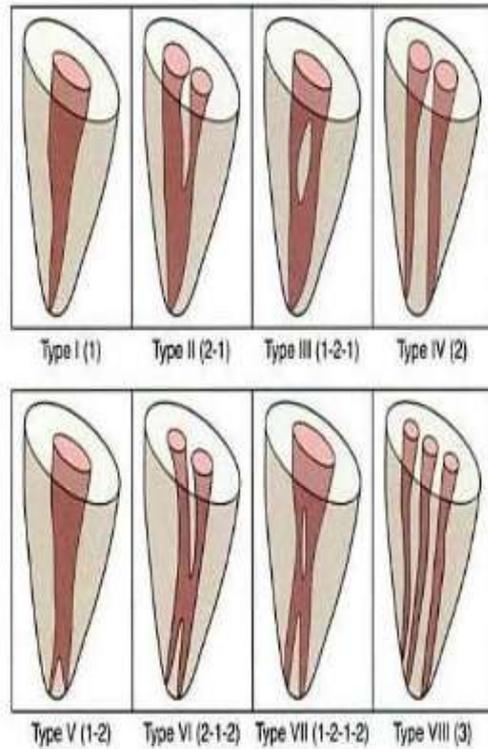


Fig.5 : configurations canalaires de Vertucci (Vertucci, 1984) ^[31].

D'autres classifications ont été proposées, on trouve :

Configuration canalaire

❖ Classification de Weine :

Weine a proposé une classification de l'anatomie canalaire en 4 types :

- **Type I** : un seul canal avec un seul orifice et un seul foramen apical (1-1).
- **Type II** : deux canaux se rejoignant en un seul canal et présentant une seule sortie foraminale (2-1).
- **Type III** : deux canaux distincts, de l'entrée canalaire au foramen apical (2-2).
- **Type IV** : un seul canal qui se divise en deux canaux distincts (1-2).

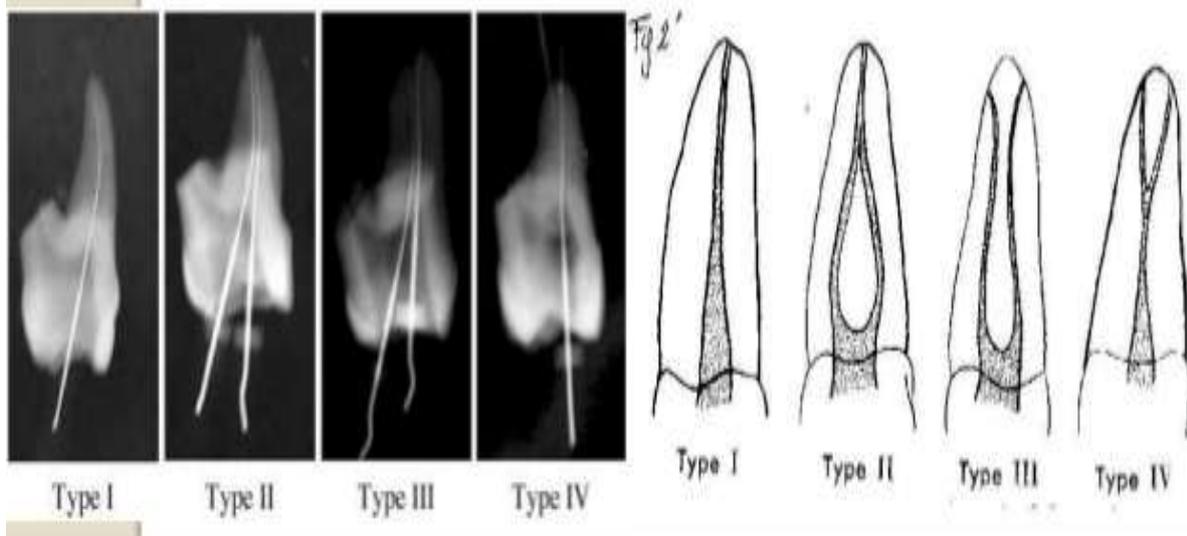


Fig.6 : configuration canalaire selon la classification de weine ^[31].

❖ Classification de dedeus:

Canal principal : se prolonge le long de la racine dès l'entrée canalaire au foramen apical.

Canal latéral : émanation du canal principal mettant en communication l'endodonte et le desmodonte au niveau des deux

tiers coronaires de la racine, son axe est souvent perpendiculaire à l'axe de la dent.

Canal secondaire : naît à partir du canal principal au niveau du tiers apical, son axe est plutôt oblique par rapport à celui du canal principal.

Canal accessoire : c'est une branche latérale du canal secondaire.

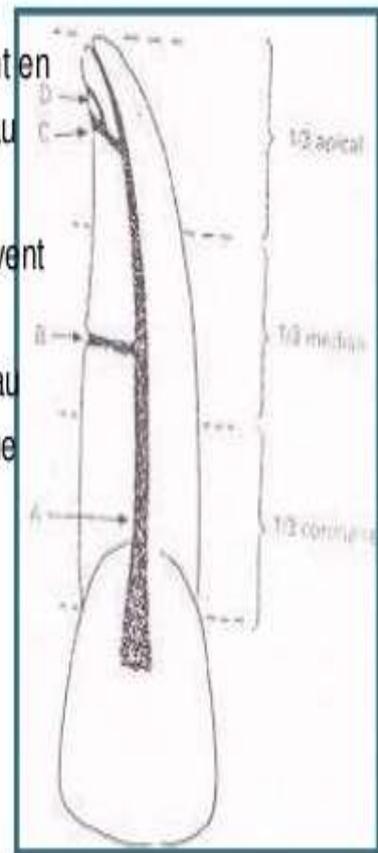


Fig.7 : configuration canalaire selon dedeus ^[31].

❖ Classification de Cohen et Burnes :

Cohen et Burnes ont montré que la complexité de ce système canalaire peut être l'origine de certaines complications mais également que cette complexité est à la cause de voies de communications endo-parodontales qu'il ne faut pas négliger.

Par ailleurs, il a été montré que nous pouvons avoir plusieurs configurations au sein d'une dent.

Type A : Canal unique.

Type B : Canal unique avec bifurcation apicale.

Type C : Coalescence de deux entrées canales associée à une bifurcation apicale.

Type D : Union apicale de deux canaux en un foramen commun.

Type E : Une racine contenant deux canaux.

Type F : Canal présentant une configuration en forme d'arc de cercle.

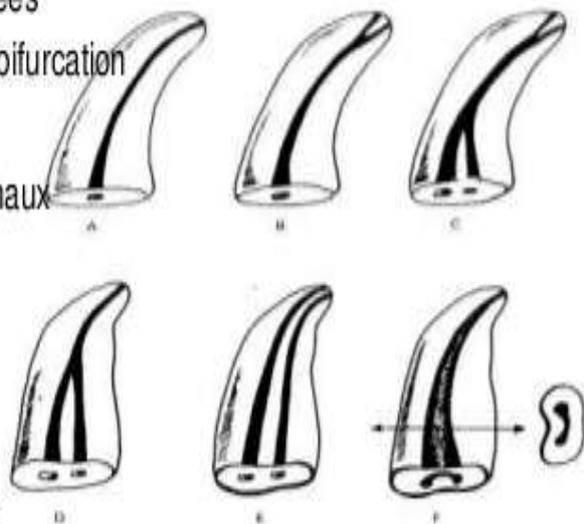


Fig.8 : configuration canalaire de Cohen et Brunnes ^[31].

❖ Classification de BOURDEAU:

Après une étude histologique BOURDEAU a classé les canaux endodontiques en 05 catégories :

- Type A : Canaux surnuméraires.
- Type B : Canaux complémentaires.
- Type C : Canaux intercanalaires.
- Type D : Canaux supplémentaires.
- Type E : Canaux deltaïques .

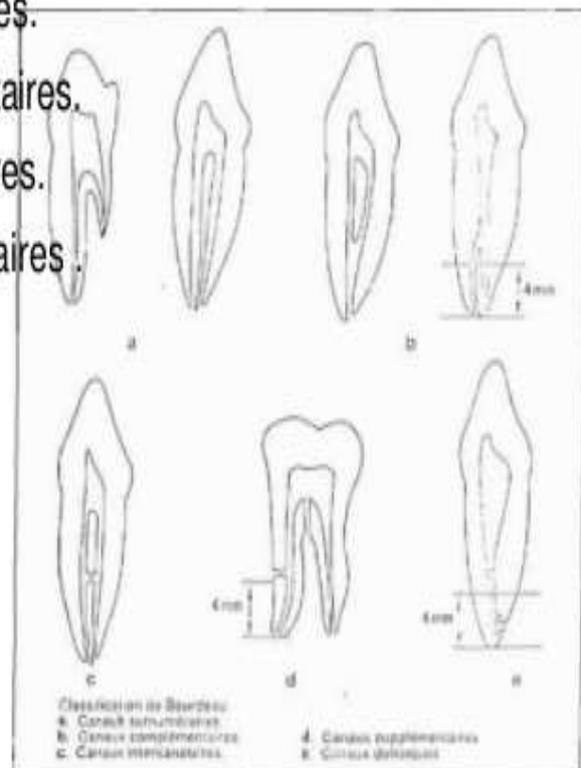


Fig.9 : configuration canalaire selon Bourdeau ^[31].

❖ Classification de CARAMES et APRILE:

Selon la classification de CARAMES et APRILE, la configuration canalaire peut épouser huit trajectoires différentes.

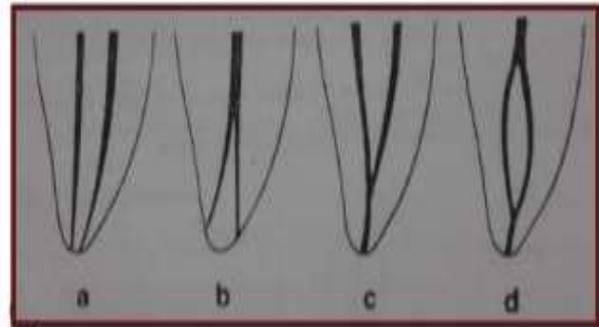
Ramifications longitudinales (A, B, C, D)

-Type A : canaux parallèles au principal,

-Type B : canaux bifurqués,

-Type C : canaux fusionnés,

-Type D : canaux bifurqués et fusionnés.

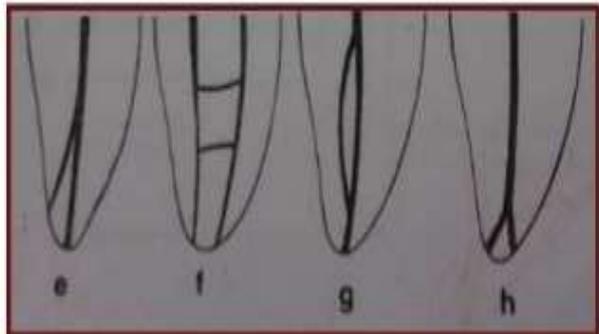


Ramifications collatérales (E, F, G)

-Type E : canaux obliques,

-Type F : canaux intercalaires,

-Type G : canaux récurrents.



Ramifications apicales

-Type h : delta

Fig.10 : configuration canalaire de Carames et Aprile ^[31].

3. La microbiologie endodontique

Les bactéries sont le premier facteur étiologique dans le développement et la progression des maladies pulpaire et péri-apicales. Leur rôle dans les infections dentaires et péri-apicales a été démontré par la théorie des tubuli dentinaires de Rickert et Dixon ^[35].

3.1. Rôle des bactéries dans le développement de la pathologie endodontique

L'infection endodontique correspond à une rupture de l'équilibre fragile existant entre agents agresseurs et défenses de l'hôte.

La destruction des tissus dentaires durs peut s'expliquer par :

✓ **une lésion carieuse**

C'est la première cause d'infections pulpaire et péri-apicales. Cette maladie bactérienne provoque la déminéralisation puis la destruction des tissus durs de la dent permettant ainsi aux bactéries d'atteindre la pulpe ^[36].

✓ **une lésion traumatique**

Elle crée une exposition directe de la pulpe par une fracture, ou indirecte par la présence d'une fêlure qui va permettre la pénétration bactérienne.

✓ **une lésion endo-parodontale**

Une infection parodontale sévère va détruire le cément protégeant la dentine radulaire et permettre aux bactéries de coloniser le système canalaire par les tubuli dentinaires, les foramens accessoires voir le foramen apical.

✓ **une cause iatrogène**

Un soin juxta pulpaire ou une reconstitution défectueuse peut entraîner la nécrose de la pulpe et permettre la contamination bactérienne ^[37].

Quelle que soit l'étiologie, l'exposition de la pulpe aux micro-organismes bactériens va entraîner une pulpopathie et une nécessité de dépulpaion.

L'élimination de ces bactéries du système canalaire est donc primordiale pour la guérison des tissus dentaires et péri-apicaux.

3.2. Le biofilm bactérien endodontique

3.2.1. Définition

La contamination bactérienne de l'endodonte est réalisée par la pénétration intra-canaire d'un ensemble de micro-organismes. D'abord à l'état planctonique (en libre circulation), ils vont au fil de l'infection se regrouper en amas leur permettant de coloniser l'environnement endodontique : le biofilm.

Le biofilm correspond à une communauté structurée de cellules bactériennes incluses dans une matrice polymère qu'elles produisent, et adhérentes à une surface biologique ou non. Cette organisation apporte différents avantages à ces bactéries comme notamment une certaine stabilité (dans un environnement en perpétuel changement), une protection, une

résistance accrue aux défenses de l'hôte ou encore l'expression différente de leur phénotype, par rapport aux bactéries planctoniques, permettant ainsi d'augmenter fortement leur pathogénicité. Le comportement des bactéries de la communauté est alors complètement modifié par rapport à l'état planctonique

Un biofilm possède quatre caractéristiques qui le définissent ainsi :

- ✓ Une habileté à s'auto-organiser.
- ✓ Une résistance aux perturbations de l'environnement.
- ✓ Un pouvoir pathogène accru des bactéries en association plutôt qu'isolées.
- ✓ Une réponse à un changement d'environnement collective plutôt qu'individuelle [38].

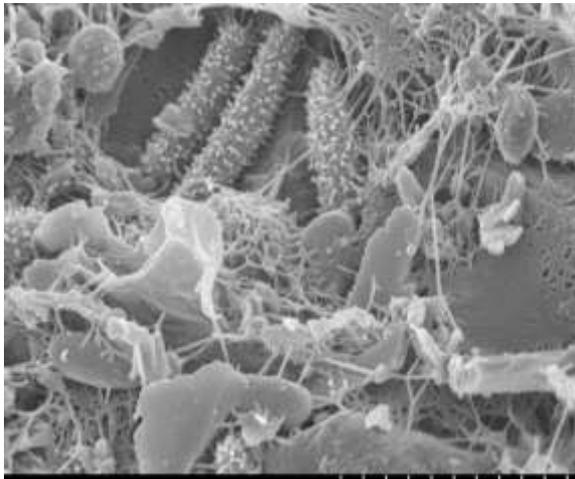


Fig.11 : Bactéries en biofilm [49].



Fig.12 : Bactéries planctoniques [50].

3.2.2. Composition du biofilm

La cavité buccale contient environ 1000 espèces bactériennes différentes identifiées, mais seulement une à deux centaines sont présentes chez un même individu. Ces bactéries se fixent préférentiellement sur certaines zones comme le dos de la langue, le sillon gingivo-dentaire ou encore les restaurations prothétiques.

Seulement 20 à 40 espèces ont été retrouvées (jusqu'à aujourd'hui) dans le microbiote endodontique. Cependant, la structure et la composition de ce biofilm vont évoluer en fonction de la progression de l'infection et des conditions environnementales. En effet, le statut environnemental et nutritionnel du canal radiculaire se modifie selon le stade de l'infection. L'infection va créer un environnement plutôt anaérobie et dépourvue de nutriments [39].

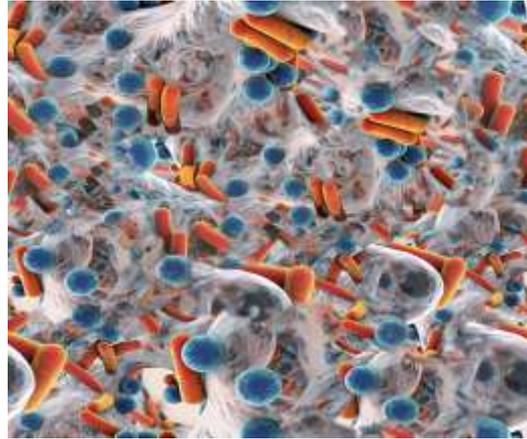


Fig.13 : Bactéries à l'intérieur du biofilm, fond transparent. Les bactéries en forme de tige et sphériques entourées par la matrice de polysaccharide. Illustration 3D ^[51].

3.2.3. Conditions de développement du biofilm

Dans le système canalaire, la variation des facteurs physico-chimiques peut potentiellement influencer le pouvoir pathogène des bactéries et déterminer le devenir de l'infection.

Ces facteurs physico-chimiques appelés déterminants écologiques vont conditionner la prolifération bactérienne et sa diversité, ainsi que la formation du biofilm ^[40].

Ces facteurs sont :

✓ les ressources nutritives

La disponibilité en nutriments exogènes (zone péri-apicale) et endogènes (biofilm) est essentielle pour la survie des bactéries ^[41]. Leurs premières sources d'énergies sont les carbohydrates puis ce sont les protéines et glycoprotéines provenant entre autre de la dégradation pulpaire ^[42].

✓ le gradient d'oxygène

La baisse d'oxygène est nocive pour les défenses de l'hôte alors qu'elle favorisera la croissance des bactéries anaérobies ^[41]. Le niveau d'oxygène dans le canal va également conditionner le caractère aérobie/anaérobie de l'infection.

✓ le pH endocanalaire

Il varie lorsqu'il y a présence d'une infection rendant l'environnement plus acide et propice au développement des bactéries mais nocif pour les cellules de défense du système immunitaire ^[41].

✓ les surfaces disponibles d'adhérence

Le système endodontique dispose de nombreuses zones anatomiques inaccessibles à la préparation canalaire donc idéales au développement des bactéries ^[41].

3.2.4. Fonction du biofilm

Le biofilm assure principalement un rôle protecteur, pour les bactéries, selon quatre principes différents :

✓ une protection passive par une matrice extracellulaire qui empêche partiellement le passage d'éléments antibactériens.

- ✓ une protection métabolique : les bactéries ainsi organisées sont moins actives métaboliquement et donc moins réceptives aux agents antimicrobiens, qui n'attaquent que les bactéries en division.
- ✓ une protection active, en expulsant par des pompes d'efflux certains produits hostiles aux bactéries.
- ✓ une protection génétique caractérisée par des échanges de matériel génétique entre les cellules, des transferts de résistance ainsi que des modifications génotypiques et phénotypiques des micro-organismes, leur conférant des propriétés différentes et une résistance accrue (Donlan and Costerton, 2002).

3.2.5. Pathogénicité et virulence du biofilm

Le biofilm bactérien n'est pas initialement pathogène. Au contraire, il joue un rôle très important dans le développement des défenses immunitaires de l'hôte (Marsh, 2006). Par exemple, la santé dentaire est considérée comme un état d'équilibre dans lequel une population bactérienne coexiste avec l'hôte et où aucun dommage irréparable n'apparaît dans les tissus de ce dernier (Carranza et Newman, 1996).

Pour atteindre une situation pathologique, la charge bactérienne d'une espèce doit être suffisante pour engendrer des dommages tissulaires, dommages causés aussi bien par la bactérie et ses toxines que par le système de défense de l'hôte. Cette charge doit franchir un seuil critique qui déclenche la pathologie. (Siqueira Jr et Rôças, 2008).

Chez un sujet immunodéprimé, quelques bactéries suffiront à déclencher la pathologie alors qu'il en faudra un plus grand nombre chez le sujet sain (Perez, 2012)

Lorsque les microorganismes arrivent au contact des tissus, l'intensité de l'inflammation va dépendre du type et du taux métabolique de microorganismes, de leurs facteurs de pathogénicité, de la durée de l'infection et des défenses de l'hôte. (Perez, 2012).

3.3. La flore bactérienne d'un réseau canalaire infecté

L'infection endodontique se décline selon plusieurs formes et la composition du microbiote varie également en fonction du type d'infection considéré.

3.3.1. Les différents types d'infections endodontiques

3.3.1.1. L'infection primaire

L'infection endodontique primaire résulte d'une invasion bactérienne du tissu pulpaire nécrosé. Durant les différents stades de l'infection, il est possible d'observer des changements au niveau de la composition bactérienne, de plus, selon la nature de la pathologie péri-apicale concomitante celle-ci change également.

L'infection primaire sans lésions péri-apicales dont la pulpe est fermée est généralement caractérisée par **des espèces anaérobies strictes**. Lorsque la chambre est ouverte, les bactéries micro-aérophiles et anaérobies facultatives dominent avec une majorité de Gram positif.

De plus, la composition bactérienne sera différente dans la chambre pulpaire et dans la partie apicale du canal en raison du gradient d'oxygène.

La flore endodontique est donc prédominée par des bactéries anaérobies à Grampositives. Elles sont généralement plus résistantes que les bactéries à Gram négatives car elles survivent en cas de déshydratation, de manque de nutriments, lors de changements des forces ioniques et de pression osmotiques mais également en présence d'antiseptiques ^[41].

3.3.1.2.L'infection secondaire

Les infections secondaires endodontiques résultent des bactéries qui n'étaient pas présentes initialement dans l'infection primaire

Cette colonisation bactérienne s'est donc produite durant le traitement, en inter-séance ou après le traitement endodontique à la suite d'une perte d'étanchéité.

Lors de ce type d'infection, lorsqu'une lésion péri-apicale est présente, le microbiote du canal est principalement constitué d'anaérobies et comporte une quantité importante de bactéries ^[41].

3.3.1.3.L'infection persistante

Il est possible de parler d'infection persistante lorsque des bactéries provenant de l'infection primaire ou secondaire, ont résisté aux différentes stratégies mises en place pour les éliminer lors du traitement endodontique.

Ces bactéries, capables de survivre dans de telles conditions, sont peu nombreuses ; la flore bactérienne va être composée d'un nombre restreint de bactéries différentes ainsi que de certains champignons dans une proportion plus importante que la normale.

4. Les réservoirs bactériens

La complexité du canal pose de grosses difficultés au praticien. En effet, les bactéries vont être protégées des procédures de nettoyage et de mise en forme canalaire en s'immiscant dans les complexités anatomiques et géométriques du canal radiculaire ^[43]. Les biofilms bactériens se développent dans les ramifications apicales, les canaux latéraux, les isthmes et les tubuli dentinaires inaccessibles à la préparation canalaire ^[44].

4.1.Tubuli dentinaires

Les tubuli sont des milieux favorables à la survie microbienne, c'est pourquoi de nombreuses espèces bactériennes endopathogènes y sont présentes en grand nombre ^[44] dont les bactéries anaérobies ont été principalement observées.

Lorsque les bactéries colonisent les tubuli dentinaire, la matrice collagénique contenue dans les tubuli va se minéraliser et obstruer les tubuli dentinaires. La diminution du diamètre des tubuli dentinaires va ainsi freiner la pénétration bactérienne. Cette matrice minéralisée va influencer la capacité des bactéries telles que *Streptococcus mutans* à adhérer à ses fibrilles. L'obstruction complète des tubuli par la matrice minéralisée signe la fin de la pénétration bactérienne ^[44].

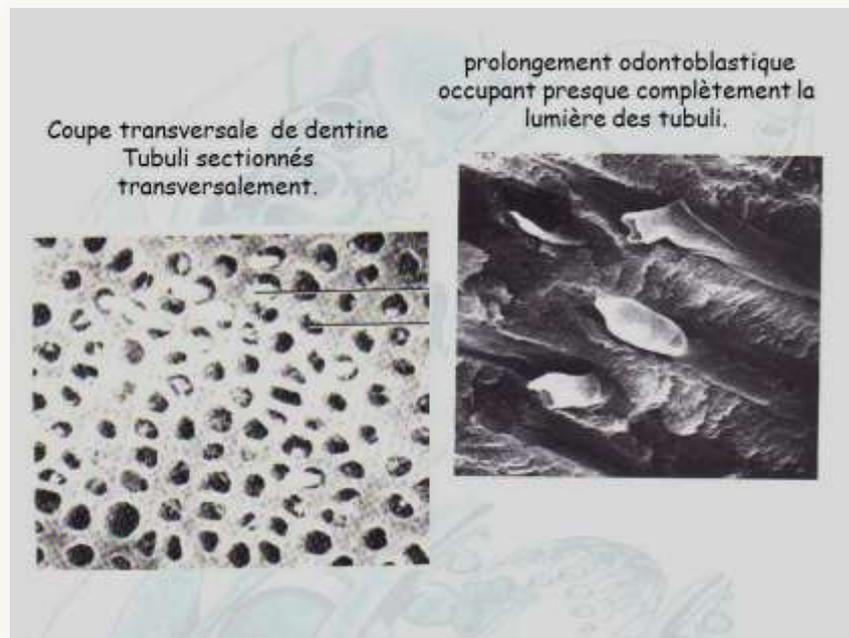


Fig.14 : coupe transversale de la dentine (tubuli sectionnés transversalement)
Et prolongement odontoblastique occupant presque complètement la lumière des tubuli
[52].

4.2. Les canaux

La complexité anatomique des canaux va rendre leur mise en forme plus délicate et donc compliquer la pénétration des solutions d'irrigation permettant leur désinfection. Entre autre, le type de dent, la courbure canalaire et la présence de calcifications sont des facteurs anatomiques qui vont augmenter la difficulté de la préparation canalaire [45].

4.3. La zone apicale

C'est la zone la plus difficile à nettoyer car elle est difficilement accessible aux instruments de préparation endodontiques. Elle est souvent le lieu de développement des bactéries à l'origine de pathologies péri-apicales [44]. La difficulté d'accéder à cette zone est renforcée par la présence des canaux latéraux en amont et par sa configuration très particulière (isthmes, deltas, ramifications apicales [46]). L'irrigation est essentielle pour assainir ces différentes zones anatomiques inaccessibles aux instruments de préparation [47].



Complexité du réseau canalaire : notamment au niveau de zone apicale

Fig.15 : complexité du réseau canalaire ^[48].

Deuxième Chapitre :

les moyens de l'assainissement du réseau canalaire

La préparation ou la mise en forme canalaire constitue une des étapes du traitement endodontique dans laquelle **l'instrumentation est très variée** et omniprésente (moyens mécaniques) qui, associée à une **irrigation abondante** et adaptée (moyens chimiques), reste indispensable pour atteindre les objectifs biologiques et mécaniques de la préparation canalaire.

1. Moyens mécaniques

Il existe actuellement une très grande variété d'instruments sur le marché, constitués d'acier inoxydable ou de **Nickel-Titane (NiTi)**, utilisés avec des techniques manuelles et/ou mécanisées, encore appelées assistées.

1.1. Instruments manuels en acier inoxydable

Les trois instruments de référence de l'instrumentation manuelle sont toujours les limes K et H ainsi que les broches, généralement constituées d'acier inoxydable et répondant à la norme ISO (International Standard Organisation), auxquels nous associons à la demande les tire-nerfs.

✓ Les tire-nerfs

Les tire-nerfs sont fabriqués à partir d'une matrice ronde dans laquelle des entailles sont réalisées pour créer des barbelures. Ils peuvent être utilisés ponctuellement pour éliminer le tissu pulpaire en une seule pièce, dans un canal large avant la mise en forme canalaire ^[53].

✓ Les broches

Ce sont des instruments torsadés ou usinés en acier inoxydable ou en NiTi, de section triangulaire. La principale différence avec la lime réside dans le nombre de tours moins important lors de la torsion du fil. La broche présente donc moins de lames que la lime.

Actuellement les broches ne sont plus utilisés et pour toutes les manœuvres de cathétérisme, on leur préfère les limes K ^[54].

✓ Lime K

Les limes K (pour Kerr) existent en acier inoxydable et en NiTi, torsadées ou usinées de section carrée, le pas de ses instruments reste court donc il représente un grand nombre de spires. Elles sont bien adaptées pour l'exploration et la perméabilisations des canaux ^[55].

✓ Lime H

Les limes H (pour Hedström) ou racleurs, sont des instruments très tranchants, usinés à partir d'une ébauche ronde en forme de chapeau chinois renversé fabriqués en acier inoxydable ou en NiTi. Ils servent essentiellement à l'élargissement après le passage de la lime K de même numéro ^[56].

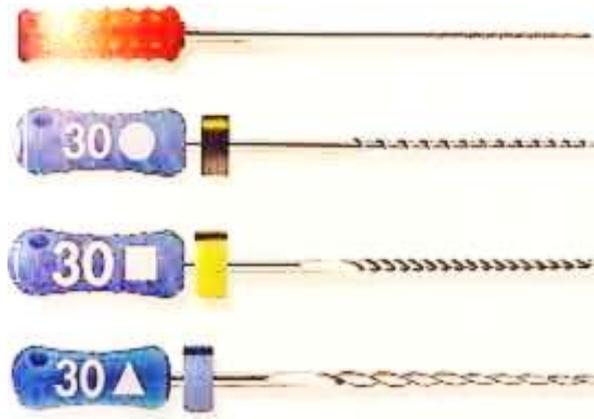


Fig.16 : instruments manuels en acier (Broche, Lime K , lime H , Tire-nerf) [57].

1.1.1. Avantages des instruments en acier inoxydable

Les instruments en acier inox de petit calibre sont incontournables pour l'exploration canalaire et la préparation du passage des instruments de mise en forme en Nickel-Titane (glide path), notamment lorsqu'ils sont précourbés, en effet il faut toujours garder à l'esprit que ces instruments sont indispensables pour :

- ✓ Le cathétérisme initial ;
- ✓ La récapitulation ;
- ✓ La perméabilité apicale ;

1.1.1. Inconvénients des instruments en acier inoxydable

✓ La rigidité

les principaux problèmes rencontrés avec l'acier inox sont liés à sa rigidité qui augmente avec le calibre de l'instrument ce qui rend difficile la mise en forme canalaire des canaux courbes.

✓ La conicité

Leur conicité de 2% ne permet pas d'obtenir la conicité souhaitée au moment de la préparation canalaire [58].

1.2. Instruments en Nickel-Titane

L'évolution de la biotechnologie dans le domaine des thérapeutiques endodontiques, a connu un essor considérable ces dernières décennies.

En effet de nouvelles techniques ne cessent de voir le jour, révolutionnant les anciennes méthodes de préparation canalaire. Ces techniques connaissent un grand engouement, car elles présentent de nombreux avantages par rapport aux techniques traditionnelles :

- ✓ une diminution du risque du transport canalaire ;
- ✓ une conicité majorée favorisant une meilleure préparation ;
- ✓ une ergonomie améliorée.

Toutefois, un respect strict des protocoles et des précautions d'emploi clinique est primordial pour limiter les complications de ces techniques.

Cette évolution concerne l'utilisation d'un nouveau type d'instruments en **Nickel Titane** ou **NiTi**.

Les instruments **NiTi** peuvent être utilisés manuellement ou mécaniquement.

1.2.1. Les instruments Nickel-Titane manuels

Ils sont représentés par deux groupes d'instruments :

✓ Les limes K NiTi

Qui reflètent le même profil que les limes K en acier .Elles servent à la mise en forme manuelle des canaux courbes.

✓ Les limes NiTi manuelles issues d'un système de rotation continue

Les ProTaper® manuels présentent les mêmes caractéristiques que les ProTaper rotatifs mais ils seront utilisés pour la mise en forme des crochets apicaux ou des multiples courbures.

Les efforts et la progression des instruments sont contrôlés par l'opérateur afin de limiter les blocages et les butées. Les manches de ces instruments est plus large que les instruments conventionnels ce qui confère à l'opérateur un couple plus élevé lors de l'utilisation.



Fig.17 : Séquences d'un ProTaper manuel [59].

Remarque

Les instruments NiTi manuels ne peuvent pas remplacer les instruments manuels en acier inoxydable, car leur effet de coupe est largement inférieur à ces derniers (elle ne devient efficace que mécaniquement), d'une part, et que d'autre part, lors du cathétérisme canalaire il est impossible de pouvoir les recourber sur leur tiers apical pour sécuriser la progression de l'instrument, à cause de leur propriété AMF ou Alliage à Mémoire de Forme.

1.2.2. Les instruments Nickel-Titane mécanisés

Il existe deux types de préparation mécanisée pour la mise en forme des canaux à l'aide d'instruments en NiTi :

- ✓ La préparation canalaire en rotation continue ;
- ✓ Et la préparation canalaire par le mouvement de réciprocité.

1.2.2.1. Les instruments NiTi en rotation continue

Dans la préparation canalaire en rotation continue, l'instrument tourne dans le sens horaire (sens des aiguilles d'une montre), en permanence et à vitesse constante entre 250 et 800tours par minute en fonction des systèmes.

Cette technique se base sur « **le concept du- crown-down** » ou préparation **corono-apicale** :

« Le concept du **crown-down** est l'élimination des contraintes coronaires, en commençant la préparation par la zone coronaire du canal afin de pouvoir aborder les derniers millimètres apicaux dans les meilleures conditions. » [60]

De nombreuses séquences instrumentales ont été proposées sur le marché pour la préparation canalair en rotation continue, nous citons :

- ✓ Le système Quantec[®] Série 2000
- ✓ Le Profile[®]
- ✓ La série HERO[®] 642 et HERO SHAPER[®]
- ✓ LE CMA[®] System
- ✓ Le System MTWO[®]
- ✓ Le Système ProTaper[®]. C'est ce dernier que nous allons décrire car il s'agit du système le plus utilisé.

➤ le système ProTaper[®] (Dentsply-Maillefer)

Il a été mis au point en 2001-2002 par James West, CliffRuddle et Pierre Machtou, il comporte une conicité variable de 9 à 12 conicités différentes sur les mêmes instruments, il comporte des arrêtes coupantes. [61]

Le jeu d'instruments se compose de :

- ✓ **Trois Shaping Files**, de conicités croissantes à partir de la pointe :
 - **La shaping file n°1** (bague violette) ou **S1**, est destinée à mettre en forme le tiers coronaire du canal tout en assurant la perméabilité des deux tiers apicaux et le centrage dans le canal.



Fig.18 : La shaping file S1 [62]

- **La shaping file n°2** (bague blanche) ou **S2**, est destinée à mettre en forme le tiers moyen tout en augmentant le volume de la région apicale de façon à faciliter la mise en place de la finishing file n° 1.



Fig.19: La shaping file S2 [62]

- **La shaping file auxiliaire ou Sx**, qui présente la même forme que la shaping file n°1, en plus ramassée, il a la forme de la tour Eiffel.



Fig.20 : La shaping file Sx [62]

Le Shaping file **Sx** peut être utilisé dans les deux cas de figures suivantes :

- Pour relocaliser une entrée canalaire ;
 - Dans le cas d'un canal très court (longueur de travail inférieure à 16mm), en remplacement du S1 et du S2. [63]
- ✓ Et **de trois finishing files**, destinées à obtenir une mise en forme adéquate du tiers apical, il s'agit :
- **Du finishing file n° 1 ou F1** (bague jaune), qui présente sur les derniers millimètres une conicité de 7% et une pointe de 20/100 de mm ;
 - La lime **finishing file n° 2 ou F2** (bague rouge), qui présente sur les derniers millimètres une conicité de 8% et une pointe de 25/100 de mm ;
 - Et la **lime finishing file n°3 ou F3** (bague bleue) qui présente sur les derniers millimètres, une conicité de 9% et une pointe de 30/100 [64].

Pour les finishing files, la couleur de la bague correspond au calibre de la pointe selon la norme ISO, mais pas pour les shaping files **S1** et **S2** dont le calibre de la pointe est respectivement de 18 /100 (S1) et 20 / 100 (S2). Les couleurs violette et blanche ont été conservées pour garder le code couleur habituel de progression d'une séquence standardisée.

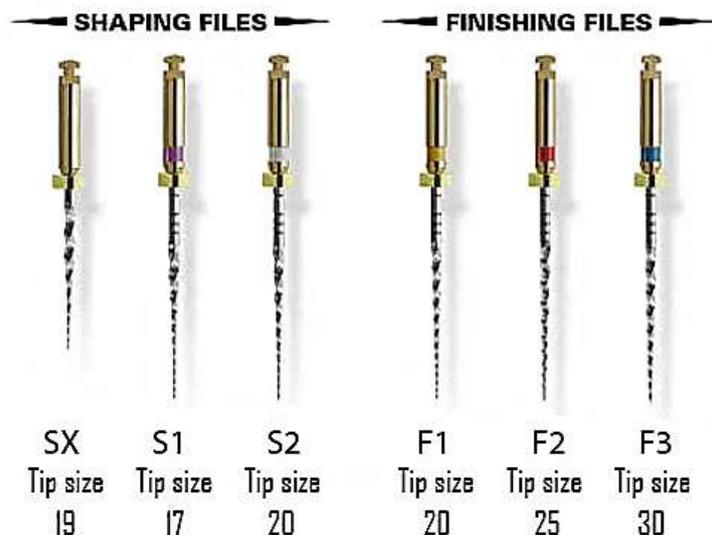


Fig.21 : image de Shaping files S1, S2, SX et des Finishing files F1, F2, F3 [65].

✓ Avantages et inconvénients du ProTaper®

- Des formes originales, avec la présence de conicités multiples sur la lame de chaque instrument. Ces variations de conicité permettent de modeler le dessin de chaque instrument de façon à le faire travailler dans une région spécifique, en suivant le principe d'une préparation corono-apicale.
- L'absence de méplats radiants, un angle d'hélice et un pas variable qui donnent une efficacité de coupe très supérieure aux instruments de la génération précédente.
- Un protocole clinique simplifié, qui consiste à placer chaque instrument de la séquence à la longueur de travail. La mise en forme est obtenue après un seul passage de la séquence, ce qui représente un gain de temps appréciable comparé aux fastidieuses récapitulations nécessaires pour les instruments de la génération précédente.
- Une séquence instrumentale réduite : le canal d'une molaire peut être mis en forme avec trois ou quatre instruments maximum.
- L'inconvénient du ProTaper®, et qui est l'inconvénient majeure de tous les instruments NiTi en rotation continue, est sa faible résistance à la rupture ou fracture instrumentale [66].

1.2.2.2. Les instruments NiTi en mouvement de réciprocité

Ce mouvement a été introduit par Yared en 2008. Il utilise une lime de mise en forme, se rapprochant des limes F2 du ProTaper®, avec alternance de mouvement horaire/antihoraire, d'amplitude variable.

L'amplitude de mouvement de vissage de la lime est plus importante que celui de dévissage, ce qui permet à la lime à chaque alternance de progresser en direction apicale.

La préparation endodontique selon le mouvement de réciprocité est basé sur :

- ✓ la technique des forces équilibrées.
- ✓ L'instrument effectue un mouvement horaire/antihoraire d'amplitude variable.
- ✓ L'instrument réalise d'abord un mouvement anti-horaire pour couper la dentine puis un mouvement horaire pour se désengager du canal et éviter l'effet de vissage.

Les premiers instruments NiTi, mûs par un mouvement de réciprocité, à avoir été proposés sont le système **WaveOne®** (Detrey-Dentply-Maillefer) et le système **Reciproc®** (de chez VdW) dont la particularité est d'avoir un pas de vis inversé ; ce mouvement de réciprocité diminue le stress que subissent les instruments.

✓ Le système WaveOne® (Dentsply-Maillefer)

Le système **WaveOne®** est un système de mise en forme par mouvement de réciprocité à **usage unique** ; il diminue le temps de mise en forme et permet de consacrer plus de temps à l'irrigation et l'obturation. L'usage unique permet également de diminuer le risque de contamination croisée et supprime les étapes de nettoyage et de stérilisation [67].

Le système **WaveOne®** comporte 3 instruments avec une section transversale trapézoïdale, avec une conicité variable plus marquée à la pointe et diminue en remontant vers le mandrin d'instrument :

- **WaveOne® « Primaire » : bague rouge**

Avec un diamètre apical de 25/100 mm, une conicité de 8% dans les trois premiers millimètres apicaux, c'est l'instrument de choix pour la préparation des canaux moyens.

- **WaveOne® « fin » : bague jaune**

Avec un diamètre apical de 20/100 de mm et une conicité de 6%, principalement utilisé dans les canaux fins et étroits lorsque la lime K10 présente une grande résistance de progression.

- **WaveOne® « large » : bague noire**

Avec un diamètre apical de 40/100 de mm, une conicité de 8% dans les trois premiers millimètres apicaux, indiqué lorsque la lime K20 pénètre facilement dans le canal.

Après les 3mm apicaux, la conicité décroît jusqu'au manche, sauf pour le Wave One® fin qui a une conicité constante tout au long de l'instrument) ^[68].



Fig.22 : les limes de système WaveOne ^[69].

✓ **le Système Reciproc® (VdW)**

Le SS Reciproc® est caractérisé par :

- Un design instrumental spécifique avec deux angles de coupe très actifs.
- Une puissance de coupe pour éliminer rapidement les tissus minéraux et organiques.
- Une progression aisée même dans les canaux très fins et courbes.
- Instrument à usage unique, conditionné sous blisters stériles :
- Un gain de temps en éliminant deux étapes de travail : le nettoyage et la stérilisation des instruments

Le SS Reciproc® comporte 3 instruments pour convenir à l'ensemble des cas cliniques :

- Le R25 de diamètre 25/.08 sur les premiers millimètres apicaux ;
- Le R40 de diamètre 40/.06 sur les premiers millimètres apicaux ;
- Et le R50 de diamètre 50/.05 sur les premiers millimètres apicaux ;



Fig.23 : les limes du Système **Reciproc®** [70].

2. Moyens chimiques

Selon Grossman :

« L'irrigation est l'action d'éliminer par lavage à l'aide d'une solution d'irrigation tous les débris organiques, minéraux et micro organiques détachés et mis en suspension par l'instrumentation mécanique »

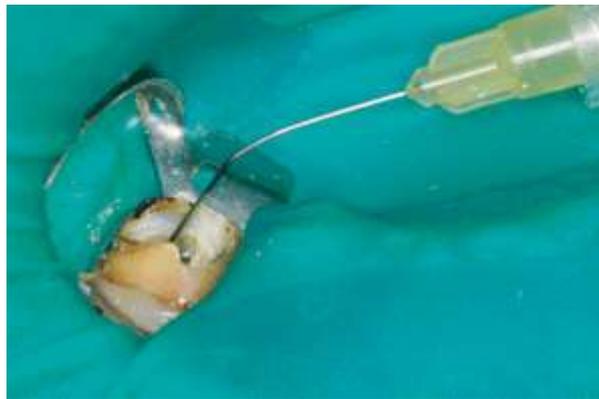


Fig.24 : Irrigation canalaire [71].

L'irrigation assure le nettoyage et la désinfection du système canalaire. Elle doit être renouvelée après chaque passage instrumental. En effet, Les irrigants doivent être mis en contact direct avec toute la surface des parois canalaire, en particulier dans la partie apicale.

Si les instruments mettent en forme le canal principal, ce sont les solutions d'irrigation qui assurent le nettoyage de l'ensemble du système endo-canalair.

2.1. Critères de l'irrigant idéal

Historiquement, de nombreux agents chimiques ont été utilisés pour l'irrigation canalaire, dont certains sont tombés en désuétude essentiellement en raison de manque d'efficacité, de toxicité ou de leur difficulté d'utilisation.

Pour cela la solution d'irrigation doit avoir des propriétés compatibles avec les critères suivants :

- ✓ action bactéricide : elle doit avoir un large spectre antibactérien permettant d'éliminer les différentes variétés de bactéries présentes dans le canal.
- ✓ action solvante : c'est la capacité à dissoudre la matière organique telle que la pulpe nécrosée.
- ✓ action chélatante : c'est la déminéralisation des composés minéraux (smear layer) après leur formation durant la mise en forme canalaire, facilitant la pénétration et l'élargissement des canaux fins et imperméables.
- ✓ durabilité : l'effet de l'irrigant doit rester dans le canal après son élimination (canal aseptique).
- ✓ biocompatibilité et absence de cytotoxicité : elle ne doit pas irriter les tissus péri apicaux et adjacents (la muqueuse buccale).
- ✓ lubrification des instruments : afin de faciliter le passage des instruments dans les canaux, réduisant ainsi leur risque de fracture.
- ✓ capacité de pénétration dans les tubuli dentinaires.
- ✓ capacité de rinçage grâce à la viscosité des irrigants.

La solution doit également être facile à manipuler par le praticien et ne pas représenter un coût important. Une solution d'irrigation répondant à tous ces critères n'existe pas encore, et il est indispensable lors d'un traitement endodontique de combiner plusieurs irrigants pour obtenir un meilleur résultat ^[72, 73].

2.2. Les solutions d'irrigation

2.2.1. L'hypochlorite de sodium

L'hypochlorite de sodium connu classiquement sous le nom « eau de Javel » est la solution la plus utilisée en endodontie depuis les années 1920.

L'hypochlorite de sodium de formule chimique NaOCl, en solution aqueuse se dissocie en acide hypochloreux (HOCl), qui, en milieu basique se dissocie à son tour en ions hypochlorites (OCl⁻) selon la formule suivante :



L'anion hypochlorite (OCl⁻) est à pH dépendant en équilibre avec l'acide hypochloreux (HOCl), ces deux formes actives sont responsables des effets antimicrobiens et solvants de la solution, en présence des débris organiques et de bactéries la quantité d'agents actifs diminue et l'activité de la solution décroît. Seule l'irrigation continue permet d'avoir une solution active en permanence dans le canal et d'optimiser la désinfection endocanalaire ^[74].

La concentration de la solution d'hypochlorite de sodium la plus fréquemment utilisée est comprise entre 2,5 à 5%. En effet, une concentration supérieure à 5% est trop toxique pour être utilisée dans la cavité buccale ; en revanche, à une concentration inférieure à 1%, l'hypochlorite perd son pouvoir solvant, indispensable à l'élimination des tissus organiques au sein du réseau canalaire ^[74].

2.2.1.1. Avantages de l'hypochlorite de sodium

L'hypochlorite de sodium reste aujourd'hui la solution d'irrigation de choix en endodontie en raison de ses caractéristiques, qui répondent mieux aux critères de la solution idéale, à savoir :

✓ **action antibactérienne**

Cette solution possède un large spectre antibactérien et elle est également efficace contre les virus, les spores, les levures...^[75]. c'est un agent antiseptique puissant pour l'élimination des germes impliqués dans les pathologies endodontiques comme *Entérocooccus Faecalis*^[76].

L'anion OCl⁻ formé lors de la réaction acido-basique est un fort oxydant qui va inhiber les enzymes bactériennes et provoquer l'oxydation des groupes sulfhydriles constituant la grande partie des membranes bactériennes, provoquant ainsi leur destruction^[77]. L'efficacité antibactérienne de l'hypochlorite de sodium dépend de sa concentration et de son temps de contact avec les bactéries au sein du canal (au moins 10 minutes).

✓ **action solvante**

L'hypochlorite de sodium est le seul irrigant possédant un effet solvant, lorsque l'acide hypochloreux (HOCl) entre en contact avec les tissus organiques, il agit comme un solvant et libère des ions chlorures. Le chlore libéré dissout les tissus pulpaire et l'ensemble des substances organiques. Ce pouvoir de dissolution augmente avec la concentration, la température, le temps de contact et le renouvellement régulier de la solution^[78].

✓ **action lubrifiante**

Ce qui réduit le risque de fracture des instruments.

✓ Enfin le NaOCl est facilement disponible et peu coûteux.

2.2.1.2. Limites et complications de l'hypochlorite de sodium

✓ **la cytotoxicité de CLONa**

Il a été clairement démontré que l'hypochlorite de sodium a des effets toxiques sur les tissus vivants en fonction de sa concentration, provoquant une hémolyse, une ulcération et une nécrose des tissus^[79].

En cas d'injection accidentelle dans le péri-apex, qui se produit généralement sur les dents dont l'apex est ouvert ou déchiré par l'action d'instruments, ou si la solution est injectée avec une pression trop importante, l'hypochlorite propulsé entraîne une réaction immédiate, extrêmement violente et douloureuse avec un gonflement des tissus et un hématome.



Fig.25 : accident d'extrusion d'hypochlorite de sodium dans le péri-apex à l'origine d'un gonflement (a) ^[80], et d'une ecchymose (b) ^[81].

En cas de projection d'hypochlorite dans les yeux, le patient ressent immédiatement une douleur, une sensation de brûlure, un larmoiement abondant et une rougeur de la cornée. ^[79].

✓ **Instabilité de la solution**

La solution de CLONa n'est pas stable dans le temps, c'est pourquoi il est nécessaire de la renouveler régulièrement au cours du traitement endodontique, et devra être conservée à l'abri de la chaleur ($T < 4C^{\circ}$) et de l'humidité dans un flacon opaque et non métallique (réaction avec les métaux) en respectant les dates de péremption ^[82].

✓ **Inactif sur la matière minérale**

Le NaOCl est totalement inactif sur les composants minéraux, notamment de la « **smear layer** ».

✓ **altération des propriétés mécaniques de la dentine**

L'hypochlorite de Na entraîne l'altération des propriétés mécaniques de la dentine (élasticité et résistance à la flexion), en cas d'exposition prolongée à une concentration élevée de NaOCl.

D'autre part le CLONa à une mauvaise odeur, un mauvais goût, la possibilité d'endommager les vêtements en cas de contact (ces inconvénients peuvent être facilement évités par une protection adéquate du praticien et du patient).

2.2.2. Acide Ethylène Diamine Tétra-Acétique ou EDTA

L'hypochlorite de sodium n'étant actif que sur le composant organique, d'autres solutions d'irrigation sont nécessaires pour se débarrasser du composant minéral de la dentine.

L'EDTA à 17% est la solution chélatante la plus connue en endodontie. Il se présente sous forme liquide en solution aqueuse, ou encore sous forme de gel. L'efficacité de cette solution dépend essentiellement de son PH, elle sera optimale à un PH compris entre 6 et 10 ^[83].

L'EDTA est recommandé lors de la phase d'irrigation finale après la mise en forme afin d'éliminer les composés inorganiques de la boue dentinaire et d'ouvrir les tubuli dentinaires, permettant ainsi une meilleure obturation canalaire.

2.2.2.1. Avantages de l'EDTA

✓ Chélation chimique de la matière minérale

Élimination de la boue dentinaire et élargissement de l'entrée des tubuli dentinaires par déminéralisation de la dentine. Cela entraîne une augmentation de la perméabilité et donc l'amélioration de l'action des irrigants endodontiques utilisés en association avec l'EDTA, ainsi que les matériaux d'obturation.

✓ Lubrification des instruments endodontiques

L'EDTA sous forme de gel permet la lubrification des instruments, limitant ainsi leur risque de fracture, il facilite également l'accès aux canaux étroits et calcifiés ^[78].

✓ Biocompatibilité de l'EDTA

D'après les études menées par Nydard-Ostby, l'extrusion de la solution d'EDTA au-delà du foramen apical ne provoque pas de réactions inflammatoires dans les tissus péri-apicaux (agent biocompatible) ^[84].

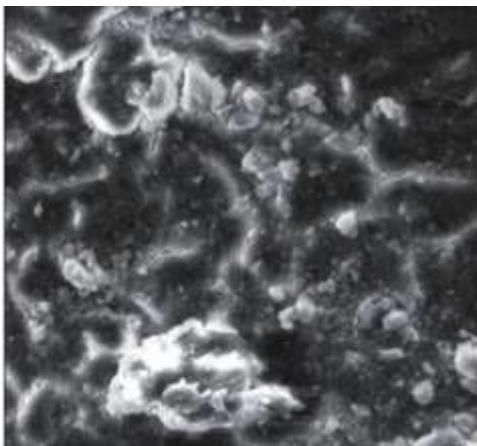


Fig.26 : paroi canalaire sans traitement chimique ^[85].

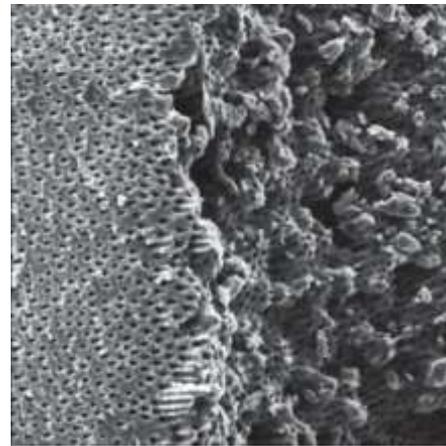


Fig.27 : paroi canalaire traitée à l'EDTA

2.2.2.2. Inconvénients de l'EDTA

✓ Action sur la boue dentinaire

L'EDTA est incapable d'éliminer la totalité de la boue dentinaire, il doit donc être associé à l'hypochlorite de sodium qui a une action solvante afin d'éliminer la totalité de la smear layer ^[86].

✓ Action sur les bactéries

L'action antibactérienne de l'EDTA est très limitée, il doit donc être utilisé en combinaison avec l'hypochlorite de sodium ^[87].

✓ Interaction avec le CLONa

Son interaction avec l'hypochlorite de sodium entraîne une diminution de la concentration en chlore, et donc une diminution de l'action antiseptique de la solution d'hypochlorite de sodium. Il est donc conseillé de vider le canal de son contenu par séchage entre l'utilisation de ces deux solutions ^[88].

✓ Déminéralisation de la dentine péri-tubulaire

Une exposition prolongée de la dentine à l'EDTA peut causer une fragilisation de la dent par déminéralisation de la dentine péri-tubulaire, il est donc nécessaire de ne pas laisser la solution dans le canal pendant plus d'une minute.

2.2.3. La Chlorhexidine

La Chlorhexidine ou digluconate de Chlorhexidine est un agent d'irrigation largement utilisé en dentisterie. Il s'agit d'un biguanide cationique chloré synthétique qui réagit avec les groupements chargés négativement de la paroi bactérienne et la rend perméable, elle peut être utilisée comme solution d'irrigation ou comme médicament intracanaux sous forme de liquide ou de gel à une concentration de 2%. (à 0,2% en parodontologie) ^[89].

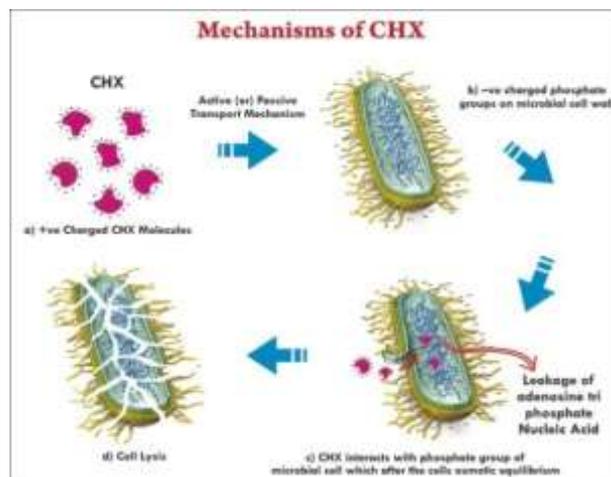


Fig.28 : Mécanisme d'action de la Chlorhexidine ^[90].

2.2.3.1. Avantages de la Chlorhexidine

✓ Action antibactérienne

La Chlorhexidine présente un large spectre antibactérien, notamment contre les bactéries à Gram +. Son effet sur la cellule bactérienne dépend de sa concentration (la solution doit être concentrée à 2% pour avoir un pouvoir bactéricide) ^[83].

✓ Action sur les champignons

C'est un agent antifongique particulièrement efficace sur *Candida albicans* ^[91].

✓ **Cytotoxicité**

La Chlorhexidine est un agent peu cytotoxique qui assure la désinfection des canaux tout en préservant les tissus environnants.

Elle est donc recommandée pour le traitement des dents dont l'apex est encore ouvert ^[92].

✓ **Durée d'action de la Chlorhexidine**

La Chlorhexidine présente une action rémanente par sa fixation sur les tissus durs, ce qui prolonge son action au-delà du temps d'application et empêche ainsi la recolonisation bactérienne ^[93].

✓ **Action de lubrifiante**

Sous forme de gel, la Chlorhexidine permet de lubrifier les instruments et de retirer plus facilement les débris tissulaires et les copeaux dentinaires.

2.2.3.2. Inconvénients de la Chlorhexidine

✓ **Interaction avec le CLONA**

La Chlorhexidine ne doit pas être associées à l'hypochlorite de sodium, ces deux solutions interagissent et forment des précipités bruns jaunâtres difficiles à éliminer qui contiennent de la parachloroaniline et son produit de dégradation (1-chloro-4-nitrobenzène) qui sont carcinogènes et mutagènes.

✓ **Action solvante et chélatante**

La Chlorhexidine est dépourvue de toute action solvante ou chélatante, elle ne peut dissoudre ni les tissus organiques ni la totalité de la boue dentinaire ^[93].

Pour ces raisons, l'utilisation de la Chlorhexidine à 2% comme solution d'irrigation est conseillée en rinçage final après s'être assuré que le canal a été vidé de son contenu et en particulier de toute trace d'hypochlorite de sodium.

2.2.4. Le MTAD

Le MTAD est un produit développé en 2003, comme solution de rinçage final. Il s'agit d'un mélange de tétracyclines (la doxycycline 3%), d'un agent déminéralisant (acide citrique 4,25%) et d'un détergent (le polysorbate 80 0,5%) qui se présente sous la forme d'un antibiotique local.

2.2.4.1. Avantages du MTAD

✓ **Action antibactérienne**

La doxycycline apporte au MTAD une action antibactérienne, persistante. Il est plus efficace que les autres solutions pour la suppression d'*Entérocooccus faecalis* ^[94].

✓ **Action chélatante**

Le MTAD est un agent chélatant qui permet l'élimination de la boue dentinaire, notamment au niveau du tiers apical, et qui est moins érosif que l'EDTA sur la dentine ^[95].

2.2.4.2. Inconvénients du MTAD

✓ **Inconvénients liés à la tétracycline**

La présence de la tétracycline dans la composition du MTAD, complique son utilisation par le risque d'apparition de la résistance bactérienne qui réduit son efficacité antibactérienne, ainsi que le risque de provoquer des allergies et des dyschromies dentaires ^[96].

✓ **Manque de pouvoir solvant**

Le pouvoir solvant de cette solution sur les tissus organiques est très limité.

2.2.5. Les autres produits

D'autres produits ont été introduits pour la désinfection du réseau canalaire, mais peu utilisés de nos jours car leurs inconvénients sont plus importants que leurs avantages. Nous citons :

✓ **L'acide citrique**

À une concentration de 50% l'acide citrique améliore l'état de surface des canaux radiculaires en agissant sur la partie minérale de la boue dentinaire. Le mécanisme d'action de cette solution est donc similaire à celui de l'EDTA tout en étant beaucoup moins toxique que ce dernier.

Cependant, son action érosive sur les parois dentinaires est plus importante et peut fragiliser la dent si son utilisation n'est pas suivie d'un rinçage à l'eau distillée ^[97].

✓ **Le peroxyde d'hydrogène ou H₂O₂ (eau oxygénée)**

Est un antiseptique sous forme d'un liquide incolore, utilisé en dentisterie à des concentrations de 1 à 30%.

Le peroxyde d'hydrogène présente une action assainissante en libérant de l'oxygène, il a également une action blanchissante et moussante intéressante en cas d'hémorragie pulpaire.

Cependant, cette solution présente un spectre antibactérien étroit, et peut être responsable de réactions inflammatoires douloureuses dues à l'accumulation gazeuse dans le péri-apex ^[98].

✓ **Le sérum physiologique**

Il est important d'utiliser le sérum physiologique au cours de la désinfection du système endocanalaire afin d'éviter toute interaction néfaste entre les solutions d'irrigation dans le canal. Cette solution est utilisée pour le rinçage et le nettoyage des canaux, mais ne possède aucune action antibactérienne ou chélatante sur les tissus organiques ou inorganiques ^[98].

2.3. Les dispositifs d'irrigation

Les solutions d'irrigation sont introduites dans l'ensemble du système canalaire, y compris la zone apicale, à l'aide **de différents systèmes**, afin d'obtenir une meilleure désinfection et l'élimination de tous les débris créés lors de la mise en forme du canal radiculaire.

Ces systèmes doivent en outre éviter toute extrusion des produits dans le tissu péri-apical.

Les moyens d'irrigation peuvent être classés en deux types :

- ✓ l'irrigation manuelle conventionnelle
- ✓ et l'irrigation assistée.

2.3.1. Les dispositifs de l'irrigation manuelle conventionnelle

Ce type de dispositif doit permettre une irrigation passive, qui sera réalisée à l'aide d'une seringue en plastique et d'une aiguille à bout ouvert dans l'espace canalaire.

L'efficacité de ce type d'irrigation dépend du débit de la solution, de sa vitesse de pénétration dans le canal et de la pression d'éjection de la solution, tous ces paramètres sont liés au type d'aiguille et au calibre de la seringue utilisée [75].



Fig.29 : seringue d'irrigation en plastique [99].



Fig.30 : Assemblage seringue-aiguille [72].

Le choix de l'aiguille est donc primordial et joue un rôle sur la qualité d'irrigation. Elle doit avoir un diamètre de 28 ou 30/100mm pour pouvoir pénétrer jusqu'au tiers apical et amener l'irrigant dans cette zone, son extrémité peut être ouverte ou fermée.

- Les aiguilles à bout ouvert, permettent de créer un jet de solution vers la zone apicale et elles sont plus efficaces pour renouveler la solution que les aiguilles à extrémité fermée.

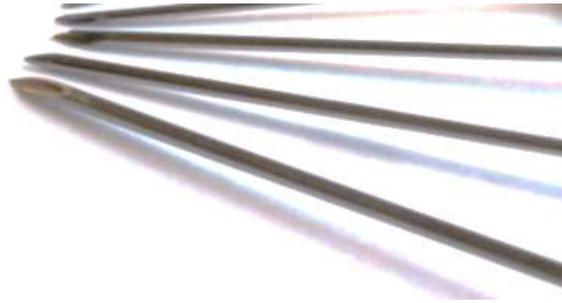


Fig.31 : aiguilles à bout ouvert en biseau ^[100].

- Les aiguilles à bout fermé sont des dispositifs dits de sécurité car elles déversent la solution dans le canal par une ou plusieurs sorties latérales sans risque d'expulsion de débris et d'irrigant en direction apical à l'origine des douleurs postopératoires.

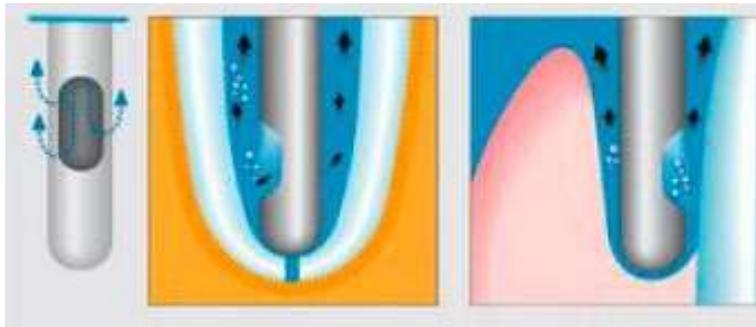


Fig.32 : Aiguilles d'irrigation à extrémité fermée et sortie latérale ^[100].

2.3.2. Les dispositifs de l'irrigation assistée

L'irrigation avec le système classique seringue-aiguille ne permet pas à la solution d'atteindre les derniers millimètres apicaux du canal radiculaire. Pour mieux répondre aux défis de l'irrigation, de nombreux systèmes ont été développés.

Ces systèmes sont composés d'une pièce à main spécifique et ils ont l'avantage d'activer la solution afin d'améliorer le débit et la circulation de celle-ci.

Les dispositifs d'irrigation assistée peuvent être classés en deux groupes :

- ✓ Dispositifs à pression positive
- ✓ Et les dispositifs à pression négative (dépression ou aspiration)

2.3.2.1 Dispositifs d'irrigation assistée à pression positive

✓ Le système RinsEndo (Durr Dental)

Ce système est basé sur un mécanisme d'injection-aspiration d'environ 100 cycles par minute. Il se compose d'une pièce à main qui se connecte au cordon turbine de l'unit dentaire et est associée à une seringue qui sert de réservoir pour la solution d'irrigation et à une cupule placée sur la tête de la pièce à main qui protège le patient et le praticien du risque de projection.

Cette pièce à main permet de délivrer la solution sous forme de flux et de reflux de 65 microlitres grâce à la production d'impulsions à une fréquence de 1,6 Hz ^[75].



Fig.33 : Le Système RinsEndo® avec seringue
les
D'irrigation ^[73].



Fig.34 : Le Système RinsEndo® et
les
cupules de protection ^[101].

Remarque

Il n'y a pas suffisamment de données disponibles pour conclure aux avantages et aux risques de ce système.

Certains auteurs ont trouvé que l'irrigation avec le RinsEndo améliorait significativement la pénétration de la solution dans les canalicules dentinaires, en comparaison à l'irrigation passive avec une seringue ^[102]. Tandis que d'autres ont trouvé que son efficacité à éliminer les débris ou le biofilm était inférieure à l'agitation manuelle de la solution avec un cône de gutta ^[103, 104]. Plusieurs études ont rapporté un risque d'extrusion apicale élevé avec le RinsEndo® ^[105, 106].

✓ Le safety-irrigator

Il s'agit d'un dispositif qui regroupe l'injection intra-canal et l'aspiration afin de faciliter l'irrigation endodontique.

Ce système délivre la solution sous pression positive vers l'apex à travers une aiguille fine à ouverture latérale et l'évacue via une grande aiguille au niveau de l'orifice du canal radiculaire ^[107].

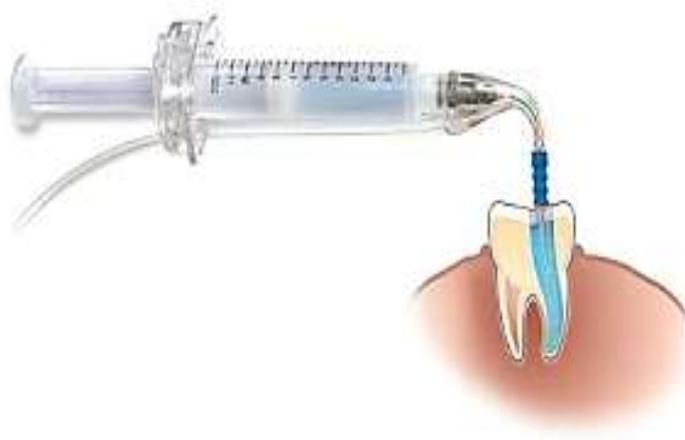


Fig.35 : Le safety-irrigator ^[107].

✓ Le système SAF ou Self-Adjusting fil

Le SAF est une lime creuse en NiTi qui permet à la fois la mise en forme et l'irrigation intracanaulaire. Il est composé d'un maillage souple, compressible, flexible et déformable qui s'adapte à l'anatomie du canal.

Le SAF est monté sur une pièce à main spécifique, dont la vibration génère des mouvements longitudinaux de 0.4 mm d'amplitude ainsi qu'une rotation axiale, qui agite la solution d'irrigation délivrée en permanence dans le maillage grâce à la pompe connectée à cette pièce à main ^[108].

Le dispositif est inséré dans un canal préparé et sécurisé préalablement avec une lime K n°20 et permet l'élimination d'une couche uniforme de la dentine sur toute la surface du canal permettant son élargissement tout en conservant son anatomie initial.



Fig.36 : Le système SAF (moteur avec pompe pour irrigation, contre angle et lime) ^[109].

Remarque

Plusieurs études ont montré une efficacité du SAF à l'élimination des débris et de la boue dentinaire, mais qu'elle reste inférieure au ProTaper®, notamment au niveau des derniers millimètres apicaux grâce à son extrémité borgne qui prévient les risques d'extrusion de la solution mais ne permet pas sa circulation à ce niveau.

Pour l'auteur il semble que le SAF doit davantage être considéré comme un dispositif d'irrigation final, plutôt que comme un instrument de mise en forme canalaire ^[110].

2.3.2.2. Les dispositifs d'irrigation assistée à pression négative

Systeme EndoVac.

L'EndoVac est un dispositif d'irrigation à pression négative, qui permet de délivrer la solution d'irrigation de façon sûre et prévisible dans les derniers millimètres apicaux en utilisant une aspiration.



Fig.37 : Système d'irrigation à pression négative EndoVac [111, 112].

Le système se compose d'une seringue de 20cc qui délivre la solution d'irrigation de façon constante dans la cavité d'accès par l'intermédiaire d'une canule métallique, et d'une tubulure qui est reliée à son extrémité à l'aspiration chirurgicale par un raccord et qui peut recevoir à l'autre extrémité deux types de canules d'aspiration endodontique :

- Une macro-canule en polypropylène de 0.55mm de diamètre, destinée à la désinfection des deux tiers coronaires du canal, en aspirant les gros débris présents à ce niveau. Cette étape est essentielle afin d'éliminer les débris qui pourraient bloquer la micro-canule et ainsi diminuer son efficacité,
- Une micro-canule est le dernier composant de l'EndoVac, elle est en acier inoxydable et a un diamètre de 0,32 mm, son extrémité est fermée et comporte 12 pertuis latéraux qui permettent la désinfection du tiers apical du canal par pression négative.

L'irrigant est déposé dans la cavité d'accès puis attirée jusqu'à l'apex par la micro-canule insérée dans le canal radiculaire, qui va aspirer la solution ainsi que les débris organiques et inorganiques qu'elle emporte avec elle [75].

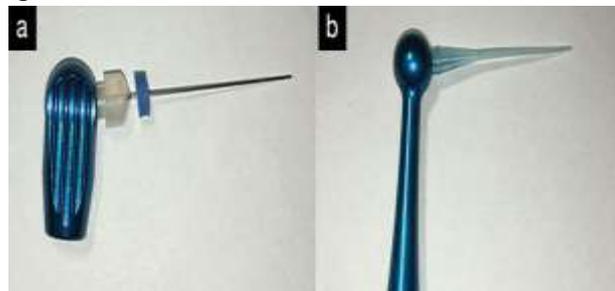


Fig.38 : a) micro-canule b) macro-canule [112].

L'EndoVac permet une diffusion rapide de l'irrigant dans le tiers apical et donc d'obtenir un bon nettoyage de cette zone jusqu'aux derniers millimètres tout en réduisant le risque d'extrusion de solution dans le péri apex [106], et avec moins de douleur postopératoire [113].

Remarque

L'EndoVac est d'utilisation fastidieuse, car c'est un matériel encombrant qui nécessite l'utilisation des quatre mains et son prix de revient n'est pas négligeable.

3. Les moyens d'activation des solutions d'irrigation

Actuellement, plusieurs systèmes s'offrent aux praticiens afin d'améliorer les capacités chimiques et mécaniques des différentes solutions d'irrigation.

L'objectif de l'emploi d'un dispositif d'activation pour la solution d'irrigation est double :

- ✓ Cette activation est censée améliorer la pénétration de la solution au sein du réseau canalaire notamment dans les zones non instrumentalisées par la mise en forme mécanique.
- ✓ Et d'autre part, favoriser le renouvellement de la solution de la manière la plus efficace, et d'améliorer le fonctionnement de celle-ci ^[114].

3.1. Activation manuelle

Cette technique consiste à utiliser une lime manuelle, une aiguille d'irrigation, ou un cône de gutta-percha de conicité augmentée dans un canal rempli de solution d'irrigation.

Ce dernier est le moyen le plus simple et le plus facilement disponible, dont le mouvement de va-et-vient pendant environ 1 minute sur une faible amplitude (2 ou 3mm), génère des changements de pression intra-canalaire, permettant une meilleure distribution de l'irrigant endodontique ^[115].

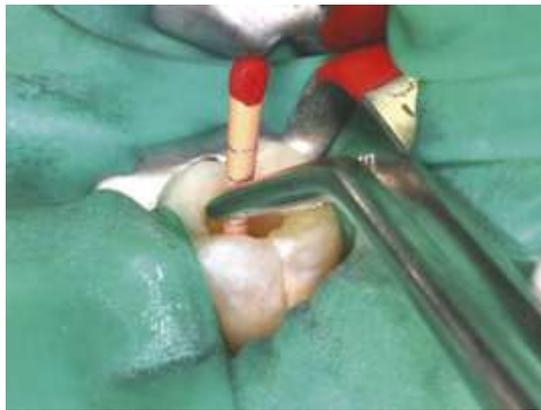


Fig.39 : utilisation clinique du maître cône avec un mouvement vertical de faible amplitude ^[116].

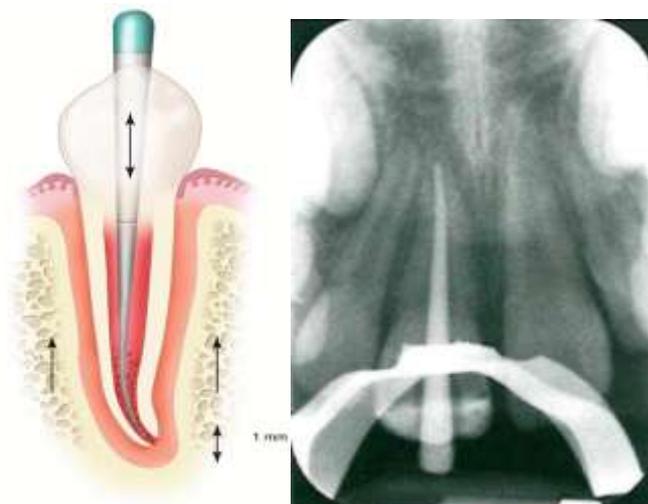


Fig.40 : adaptation intracanalair du maître cône ^[72, 117].

3.1.1. Avantages de cette méthode

Des études au microscope électronique à balayage ont montré que l'activation manuelle favorise l'élimination des débris et de la boue dentinaire, et permet d'obtenir des parois canalaires extrêmement propres, même sur les canaux courbes, avec une efficacité significativement supérieure à celle de l'irrigation à la seringue conventionnelle ^[118].

3.1.2. Inconvénients de la méthode

La limite de cette technique est le risque d'extrusion de la solution d'irrigation dans le péri-apex, d'où l'importance d'ajuster correctement le maître cône dans le canal à l'aide d'un cliché per-opératoire, cône en place, et de couper 1 mm de son extrémité avant utilisation pour éviter tout risque d'extrusion.

D'autre part bien que cette manœuvre soit simple et peu coûteuse, elle reste fastidieuse et parfois délicate, notamment sur une dent pluri-radiculée.

3.2. Activation chimique : par la chaleur

Il est possible de chauffer extemporanément la solution à 60°C en plaçant la seringue d'irrigation dans de l'eau chauffée à 60°C, dans un chauffe-biberon, ou un bain marie.

3.2.1. Avantages de la méthode

Elle agit comme catalyseur et optimise de façon significative l'action bactéricide de l'hypochlorite de sodium.

3.2.2. Inconvénients

Sur le plan pratique, l'optimisation par la chaleur est controversée. En effet, dès que la solution est placée dans le canal, la température redescend rapidement à la température corporelle ce qui rend l'effet catalyseur de très courte durée. De plus, la chaleur entraîne une dissipation plus rapide du taux de chlore actif, ce qui implique un renouvellement plus fréquent de la solution ^[119]. donc son effet d'activation est de très courte durée.

3.3. Activation sonore

Cette activation résulte de la transmission d'ondes issues de la vibration d'un insert spécifique, d'une fréquence comprise entre 20 à 20000hz au sein des solutions d'irrigation. Cette fréquence est plus faible que les ultra-sons donc produit des zones de tension de plus faible amplitude ^[120].

Il existe actuellement trois systèmes d'activation sonore :

3.3.1. Le Vibringe

Il s'agit d'un piston avec une batterie intégrée que l'on insère dans une seringue de 10 ml avec des aiguilles de différentes tailles.

Quand le liquide est apporté, le piston « activant » fait vibrer l'aiguille à une fréquence de 150Hz.

Cette technique a été moins efficace que l'irrigation passive ultra-sonique, mais meilleure que la seringue manuelle classique dans le tiers apical.



Fig.41 : système d'irrigation sonore, le Vibringe [121].

3.3.2. L'insert EDDY de chez VDWTM :

Cet embout en polyamide vibre à une fréquence bien plus élevée, de 5000 à 6000 Hz, et offre toujours une facilité d'utilisation. Il se monte sur une pièce à main spécifique, enfin, ce dispositif est relativement onéreux.



Fig.42 : Insert sonore EDDY VDWTM [122].

3.3.3. L'Endoactivator™

Il se compose d'une pièce à main sonore sans fil qui permet la vibration d'inserts en plastique flexibles et résistants, de calibre et de conicité variable. Son but est d'agiter le liquide pour le faire circuler dans les zones non accessibles avec l'instrumentation manuelle et la seringue d'irrigation.

L'Endoactivator™, utilisé à une fréquence comprise entre 1 et 6 kHz, va induire des vibrations qui seront associées à un mouvement vertical de faible amplitude et latérale, ce qui va provoquer des turbulences hydrodynamiques ayant pour but d'éliminer la *smear layer* et de désagréger le biofilm bactérien [120].

Il est disponible en trois diamètres :

- ✓ petit (diamètre : 15/100^{ème}mm ; conicité : 2%)
- ✓ moyen (diamètre : 25/100^{ème}mm ; conicité : 4%)
- ✓ et large (diamètre : 35/100^{ème}mm ; conicité : 4%).

Le choix de l'insert sera fonction du diamètre foraminaire en fin de mise en forme canalaire, et sera placé à la longueur de travail moins 1mm.

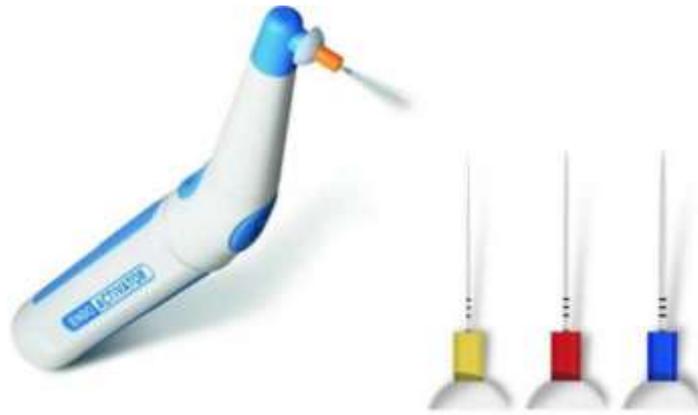


Fig.43 : Système EndoactivatorTM® et les différents inserts : petit (jaune), moyen (rouge) et large (bleu) [123].

L'EndoactivatorTM® a prouvé son efficacité, cependant, L'inconvénient principal de ce système réside dans le coût d'achat. Un réassort des inserts est aussi à prévoir car ils ne sont pas prévus pour des utilisations multiples [120].

3.4. Activation ultrasonore

Les ultrasons ont été introduits en endodontie par Richman en 1957 pour faciliter le parage canalaire. Leur utilisation a été proposée dans le cadre de l'activation des solutions d'irrigation, durant les années 1980.

« **L'irrigation passive ultrasonore** » qui implique la vibration d'une lime dans la solution sans instrumentation simultanée, c'est-à-dire sans contact de la lime ultrasonique avec les parois canalaire, ce qui minimise les effets délétères, est actuellement la seule technique recommandée [124].

Il existe plusieurs types de limes ultrasonores, mais ce sont les Limes K ultrasonores et les limes passives comme les Irrisafe qui sont les plus utilisées.



Fig.44 : limes K ultrasonores « actives » [100]



Fig.45 : limes ultrasonores « passives » [125]

Pour être efficace, la lime doit pouvoir vibrer librement dans le canal sans entrer en contact avec les parois canalaire. La production de turbulences acoustiques permet une agitation très efficace du liquide et une très bonne désinfection des parois ^[126].

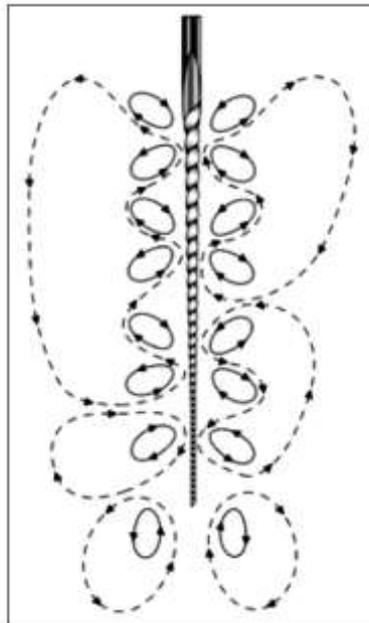


Fig.46 : schéma des turbulences acoustiques issues d'une lime ultrasonore ^[72].

✓ avantages des activateurs ultrasonores

- une meilleure élimination des débris en fin de mise en forme, par rapport à l'irrigation conventionnelle à la seringue ^[127].
- une réduction bactérienne supérieure à celle obtenue avec une irrigation à la seringue lorsqu'il s'agit d'une flore planctonique ^[126].
- un réchauffage de la solution d'irrigation, augmentant ainsi son efficacité.
- une meilleure efficacité sur les zones non instrumentées.

✓ Inconvénients des activateurs ultrasonores

Le principal inconvénient de ce système est la possibilité de contact avec les parois canalaire, qui est généralement inévitable, en particulier dans les canaux courbes. Ce contact va modifier la vibration de la lime et affecter donc l'efficacité de la technique, et il peut également induire une élimination non contrôlée de la dentine radiculaire, créant la boue dentinaire indésirable.

3.5. Activation photonique : le laser

L'utilisation du laser en endodontie n'est pas nouvelle, en revanche son utilisation concernant l'activation des solutions est plus récente.

Les lasers peuvent décontaminer le système intra canalaire en activant la solution d'irrigation utilisée. C'est ce que l'on appelle l'irrigation laser activée (LAI)

L'objectif de la LAI est d'augmenter l'efficacité antimicrobienne de la solution d'irrigation utilisée, d'éliminer la boue dentinaire, mais également le biofilm endodontique.

Une fibre de 300 à 600 micromètres est placée dans le canal et positionnée à la longueur de travail – 5 mm avec une puissance de 11 à 75 mJ et une fréquence de 10 à 15 Hz. Le laser sera alors activé et retiré selon un mouvement hélicoïdal sur une durée de 15 secondes. L'opération sera répétée trois ou quatre fois en alternant rayonnement et irrigation.

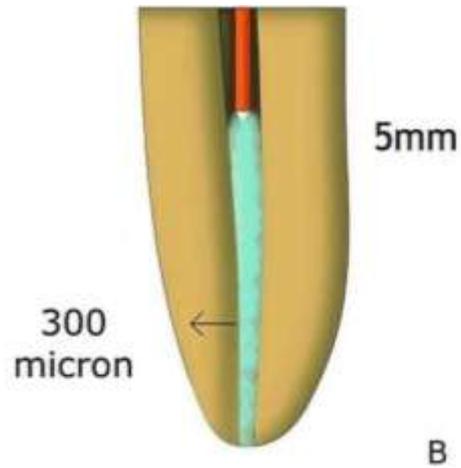


Fig.47 : position de la fibre optique à 5mm de l'apex selon la technique LAI [128].

Troisième Chapitre :

Techniques d'assainissement et de mise en forme du réseau canalaire.

La thérapeutique endodontique doit respecter un protocole opératoire précis et adapté à l'anatomie du système canalaire de chaque personne vu la complexité du réseau canalaire. Les principes de ce protocole ont été établis par Schilder il y a plus de 30 ans, et qui sont le nettoyage et la mise en forme du système canalaire entier : « **Cleaning and shaping** ».

Le protocole opératoire de tout traitement endodontique devra être réalisé par une alternance de la préparation mécanique ou mise en forme canalaire et d'une désinfection chimique ou irrigation, soit **une préparation chimio-mécanique**, dans le but d'obtenir une obturation complète et tridimensionnelle de ces canaux, afin d'assurer la pérennité de la dent sur l'arcade.

1. Etapes préliminaire du traitement endodontiques

1.1. La radiographie

Avant de démarrer le traitement endodontique il est nécessaire de prendre au moins 3 clichés radiographiques en préopératoire, per et postopératoire [129].

1.1.1. La radiographie pré-opératoire

la prise d'une ou plusieurs radiographies pré-opératoires permet de révéler le système canalaire dans sa globalité, elle nous donne des données sur l'anatomie canalaire et sur l'intégrité du parodonte. Ce cliché à visée diagnostique, constitue aussi un élément de référence à l'état antérieur de la dent [129]. Elle nous oriente également sur le niveau de difficulté et les précautions à prendre pour éviter les complications pouvant survenir au cours du traitement (fracture d'instrument, perforation,...). Cette radiographie permet également d'obtenir une estimation de la longueur de travail [130].



Fig.48 : radiographie rétro-alvéolaire pré-opératoire [131].

1.1.2. la radiographie per-opératoire

Les clichés en per-opératoire permettent de contrôler les différentes phases du traitement :

- ✓ l'estimation et le contrôle de la longueur de travail (lime en place). Cette phase peut nécessiter la réalisation de plusieurs clichés rétro-alvéolaires.
- ✓ contrôle du cône en place avant obturation par condensation de gutta-percha.

Le nombre de clichés en per-opérateur peut être réduit par l'utilisation de localisateurs électroniques d'apex ^[56, 129].



Fig.49 : radiographie rétro-alvéolaire per-opératoire ^[131].

1.1.3. La radiographie post-opératoire

Le cliché postopératoire permet de contrôler la qualité de l'obturation et constitue une image de référence pour le suivi du patient ^[56, 129].



Fig.50 : radiographie rétro-alvéolaire de l'obturation canalaire ^[131].

1.2. Anesthésie

L'anesthésie de la dent concernée, lorsque celle-ci est vivante, doit être profonde, obtenue rapidement et durer suffisamment longtemps pour compléter le traitement, sans inconfort pour le patient. Au niveau du maxillaire et le bloc incisivo-canin mandibulaire on utilise l'anesthésie para-apical tandis qu'au niveau du bloc prémolo-molaire mandibulaire une anesthésie tronculaire est effectuée ^[129].

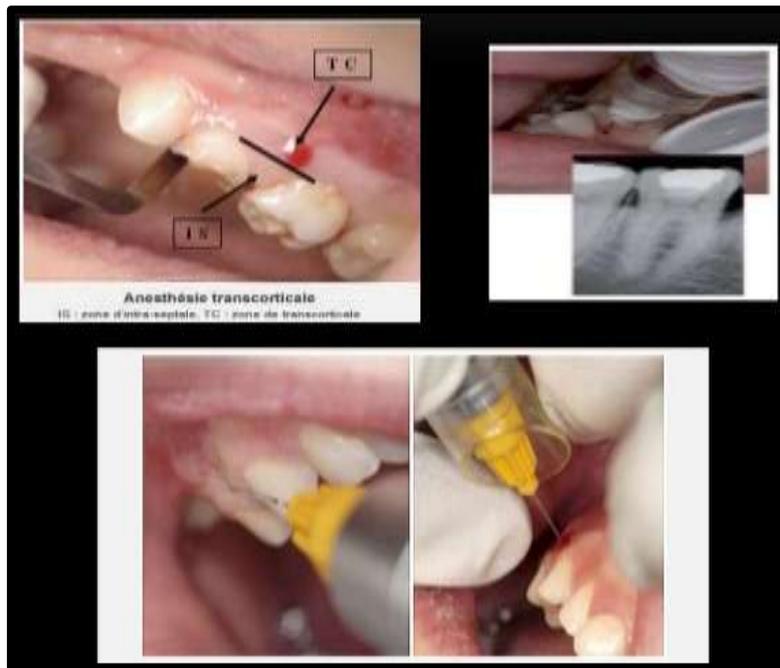


Fig.51 : démonstration du point d'application de l'anesthésie au cours d'un traitement endodontique [56].

1.3. La reconstitution pré-endodontique

Le traitement endodontique intervenant souvent dans un contexte où la dent est fortement délabrée, il est nécessaire de reconstituer les parois dentaires avant d'entamer le traitement endodontique.

La reconstitution pré-endodontique va permettre :

- ✓ de poser facilement et convenablement un champ opératoire étanche et stable durant tout le traitement endodontique afin de respecter les règles d'asepsie,
- ✓ d'obtenir une cavité d'accès à quatre parois, afin de créer un réservoir rempli en permanence de solutions d'irrigation, nécessaires à la désinfection de l'endodonte,
- ✓ de permettre la bonne tenue du pansement provisoire, pour éviter la recontamination bactérienne entre deux séances de traitement endodontique



Fig.52 : reconstitution pré-endodontique [17, 132, 133].

1.4. Pose de la digue (champs opératoire)

La pénétration dans le système endodontique doit se faire dans des conditions d'asepsie optimales [129].

La digue est une feuille de caoutchouc tendue sur un cadre à digue qui va cercler la dent à l'aide d'un crampon adapté. Elle permet d'isoler la dent de l'ensemble des tissus buccaux et ainsi :

- ✓ d'éviter la contamination de l'endodonte par des micro-organismes étrangers respectant ainsi les conditions requises d'asepsie.
- ✓ de protéger le patient des risques d'ingestion (instruments, solutions chimiques).
- ✓ de dégager le champ opératoire pour faciliter l'acte endodontique [17, 133].



Fig.53 : matériels nécessaire pour la pose de la digue dentaire [17, 134].



Fig.54 : mise en place de la digue dentaire [135, 136].

1.5. Préparation de la cavité d'accès

La cavité d'accès doit permettre une bonne visibilité et un bon accès à l'ensemble du système canalaire. C'est une étape importante qui doit faciliter le travail des instruments endodontiques utilisés pour la mise en forme canalaire et éviter la fatigue instrumentale [137]. Au cours de cette étape, il conviendra d'éliminer les contraintes corono-radiculaires et les surplombs dentinaires grâce à l'utilisation d'un évaseur ou foret [138].

La cavité d'accès doit avoir une forme bien déterminée ; Elle doit correspondre à l'anatomie pulpaire de chaque dent, et être en rapport avec la morphologie du plancher pulpaire [56].

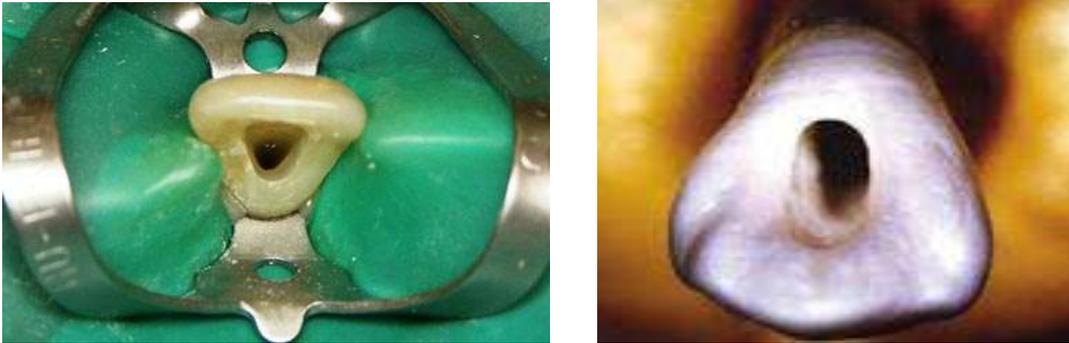


Fig.55 : configuration d'une cavité d'accès endodontique sur une dent monoradiculée incisif et canine [139, 140].



Fig.56 : Configuration d'une cavité d'accès endodontique sur une molaire [141].

1.6. Le cathétérisme et détermination de la Longueur de Travail

Une fois la cavité d'accès correctement réalisée, il convient alors de procéder à la recherche des entrées des orifices des canaux et du trajet (cathétérisme) de ceux-ci, ainsi que de leur Longueur totale de Travail.

1.6.1. Recherche des orifices canaux

La localisation des entrées des orifices canaux doit être réalisée de façon minutieuse ; Tout canal non traité, car l'orifice d'entrée n'a pas été recherché représente un réservoir potentiel de bactéries.



Fig.57 : Recherche des orifices canaux [142].

1.6.2. Le cathétérisme canalaire

La pénétration initiale va permettre l'évaluation de la « perméabilité canalaire », de la forme et de la longueur des canaux (LAURENT et coll.), Le cathétérisme canalaire peut être réalisé manuellement ou électroniquement.

1.6.2.1. Le cathétérisme manuel

Le repérage tactile de certaines anomalies canalaire (cloisons, dédoublements, calcifications), ainsi que la trajectoire générale des canaux est d'une grande importance (courbures ou coudés).

La pénétration lente et progressive à l'intérieur des canaux à l'aide de broches et de limes K de petit diamètre (6/100, 8/100 et 10/100 mm), permettra d'apprécier la direction générale, le diamètre et éventuellement certains obstacles (canaux coudés, formations calciques).

Il est à noter qu'en dehors des canaux larges et rectilignes, tous les instruments de cathétérisme seront précourbés au niveau apical avant d'être introduits dans le canal.



Fig.58 : mode d'action de la lime K [143, 144].

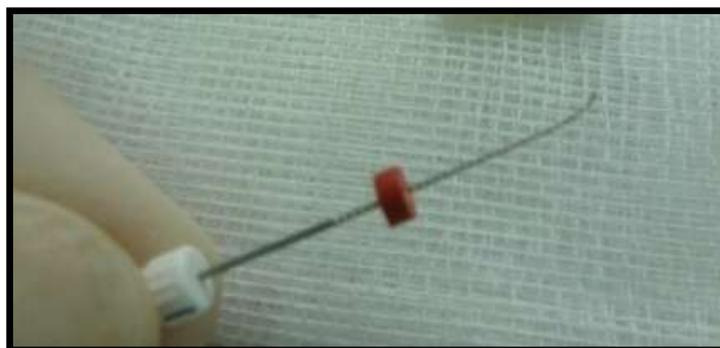


Fig.59 : Lime de cathétérisme précourbée, 15/100^{ème} de mm [145].

2.6.2.2. Le cathétérisme électronique

Des appareils électroniques ont été conçus pour le cathétérisme canalaire et la détermination de la longueur de travail. L'anode sera placée sur la lèvre du patient tandis que la cathode servira à transporter une lime K de cathétérisme jusqu'à l'apex physiologique. L'indication de la progression et de la limite souhaitée sont indiquées sur l'écran du détecteur d'apex. Les détecteurs d'apex permettent de réduire le nombre de clichés radiographiques.



Fig.60 : Détecteur d'apex [146].

Une radiographie broche en place sera prise, il s'agit de la radiographie en per-opératoire en cours de cathétérisme, elle permet aussi de visualiser la **Longueur de Travail** ou **LT**.

2.6.2.3 Détermination de la longueur de travail

La radiographie prise en cours de cathétérisme va nous permettre de déterminer aussi la **LT** ou **Longueur de Travail**, qui ne devra pas dépasser la jonction cémento-dentinaire ou apex physiologique.



Fig.61 : radiographie per-opératoire déterminant la Longueur de Travail [147].

Dans tous les cas, la longueur de travail recommandée, à partir de laquelle devra se faire la mise en forme, est la longueur mesurée depuis le repère coronaire jusqu'au niveau du foramen apical (jonction cémento-dentinaire). Cette longueur est un facteur influençant le pronostic du traitement [148].

3. Assainissement du réseau canalaire : préparation chimio-mécanique

L'assainissement du réseau canalaire repose essentiellement sur une préparation chimio-mécanique, où les zones radiculaires non accessibles aux instruments, sont palliées par les solutions d'irrigation.

Ces dernières nettoient l'ensemble du système canalaire à condition de respecter une séquence opératoire correcte dans un cadre aseptique.

Celle-ci commence par une irrigation constante dès l'ouverture de la cavité d'accès, pendant la mise en forme canalaire et à la fin de la préparation canalaire, afin d'éliminer toutes les bactéries contenues dans le réseau canalaire, et d'enlever les boues dentinaires générées par l'action des instruments de mise en forme.

Cette action est permise par l'association de l'hypochlorite de sodium à 2,5% et un chélateur à base d'EDTA (Acide Ethylène Diamine-TétraAcétique) ^[149]

3.1. Préparation chimique du canal

Les solutions d'irrigation doivent permettre et/ou la désinfection des débris organiques, et avoir une action solvante sur les débris inorganiques ou minéraux.

3.1.1. Propriétés des solutions d'irrigation

✓ Action de l'hypochlorite de sodium ou NaOCl

L'hypochlorite de sodium possède :

- une action antibactérienne à large spectre, il n'existe pas de germe résistant à cette substance connu à ce jour
- un pouvoir solvant sur les débris tissulaires et nécrotiques
- une action blanchissante
- en outre le NaOCl est sporicide et virucide.

L'hypochlorite de Na demeure la solution d'irrigation de référence par son action désinfectante et solvante de la matière organique, cependant son action ne permet pas l'élimination de la phase minérale de la boue dentinaire ou « smear layer », d'où la nécessité de lui adjoindre l'action d'une solution chélatante : l'EDTA.

✓ Action de l'EDTA

L'EDTA ou acide Ethylène-Diamine-Tétra-Acétique est une solution chélatante de la matière inorganique. Il se présente soit sous forme liquide à 17%, ou d'un gel visqueux contenant de 15 à 20% d'EDTA, qui agit sur la partie minérale, qui se trouve dans la boue dentinaire ou « smear layer », crée lors des manœuvres instrumentales effectuées lors de la mise en forme canalaire ^[150].

3.1.2. Protocole opératoire de d'irrigation canalaire

- ✓ Réaliser une irrigation avec une solution d'hypochlorite de sodium dans la cavité d'accès, avant même la pénétration initiale à l'aide des broches fines k N°10 ou k N°15 dans les canaux ;
- ✓ enduire les premiers instruments manuels ou rotatifs, avec un gel d'EDTA au moment de leur pénétration dans les canaux ;

- ✓ procéder à l'irrigation de chaque canal, avec au minimum 1ml d'hypochlorite de sodium entre chaque passage d'instrument, qui sera lui-même nettoyé à l'aide d'une compresse imbibée de NaOCl après son retrait du canal au cours de sa mise en forme.
- ✓ l'irrigation avec le NaOCl, se poursuivra jusqu'à désinfection totale du réseau canalaire, soit, jusqu'à la fin de la mise en forme canalaire.
- ✓ réaliser alors une irrigation à l'EDTA, afin d'éliminer la matière minérale qui se trouve dans la « smear layer », générée par l'instrumentation.
- ✓ réaliser un rinçage final, une fois la mise en forme terminée, de chaque canal avec 1 ml d'hypochlorite de sodium, afin d'éliminer l'EDTA et empêcher ainsi son action dissolvante de la matière minérale des parois canalaire.
- ✓ pour plus d'efficacité, les solutions peuvent être activées avec un insert ultrasonore ou avec un cône de gutta, en pratiquant des mouvements verticaux de faible amplitude durant 2 minutes ^[151].

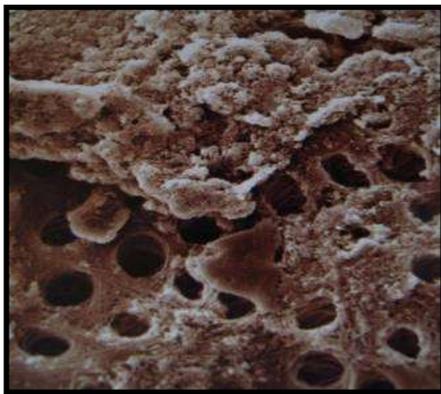


Fig.62 : irrigation avec NaOCl seul ^[152].

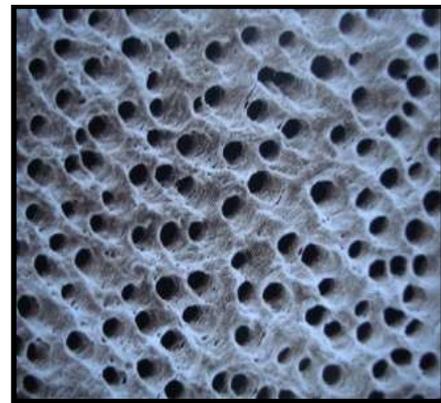


Fig.63 : tubuli dentinaires après irrigation finale à l'EDTA ^[153].

3.2. Préparation mécanique du réseau canalaire

L'objectif principal de la mise en forme canalaire est de maintenir ou de développer une forme fuselée et continue du canal, depuis son orifice d'entrée jusqu'à son apex ; ainsi que de faciliter le nettoyage par les solutions d'irrigation ^[154].

Nous décrivons deux méthodes fondamentales de mise en forme canalaire :

- ✓ **La mise en forme canalaire manuelle** : utilisant des limes de préparations manuelles (limes K) et des racleurs (limes H) en acier inoxydable.
- ✓ **La mise en forme canalaire mécanisée** : utilisant des instruments en NiTi montés sur un tour, tournant à faible vitesse en mouvement de rotation continue ou en réciprocité.

3.2.1. Mise en forme canalaire manuelle : technique standardisée

Plusieurs techniques de mise en forme canalaire utilisant des limes manuelles ont été décrites, nous en citons quelques exemples :

- ✓ La technique standardisée
- ✓ La technique du step-back

- ✓ La technique de step-down
- ✓ La technique du double-flaring

Nous décrirons dans ce chapitre le protocole opératoire de la technique de base, c'est celui de la technique standardisée.

3.2.1.1. Protocole opératoire de la technique standardisée

Après avoir réalisé la cavité d'accès, recherché les orifices des entrées canalaire, sécurisé et déterminé la longueur de travail nous commençons la préparation canalaire à l'aide des limes K et H.

- ✓ Une première irrigation est alors effectuée dans la cavité d'accès et les entrées des orifices canalaire.
- ✓ Prendre une lime K №15 précourbée, et l'introduire dans le canal, jusqu'à la LT, réaliser un mouvement de ¼ de tour dans le sens horaire puis ¼ de tour dans le sens antihoraire, puis retirer l'instrument verticalement avec un mouvement de rotation dans le sens horaire.
- ✓ Cette action est répétée sous irrigation permanente jusqu'au passage libre de la lime k №15 dans le canal.
- ✓ Les limes K de par leurs formes spiralées, possèdent un effet de coupe sur la dentine et donc elles sont utilisées pour élargir le canal.
- ✓ L'instrument est en contact avec les parois canalaire sur une grande partie de sa surface travaillante.
- ✓ Une fois la lime K № 15 retirée du canal, elle sera nettoyée à l'aide d'une compresse imbibée d'hypochlorite de sodium.
- ✓ Rinçage du canal avec 1ml d'hypochlorite de sodium à 2.5%.
- ✓ Vérification de la perméabilité apicale à l'aide d'une lime plus petite telle qu'une lime k № 10.
- ✓ Nous utilisons ensuite une lime de Hedström ou H №15, qui sera introduite dans le canal tout comme les limes k jusqu'à la longueur de travail, puis par un mouvement de traction effectué en appui sur les parois canalaire, retirer la lime H.
- ✓ Cette gestuelle est répéter en alternance avec une irrigation canalaire et le maintien de la perméabilité apicale.
 - Le mouvement de rotation avec les limes H est à proscrire formellement.
 - Les limes H, de par leurs formes de vis, servent à **polir les parois** canalaire après le passage des limes k.
- ✓ Nouvelle irrigation du canal à 1ml d'hypochlorite de sodium 2.5%

L'opération sera répétée avec les limes K20, H20, K25 ; H25 ; K30 ; H30.... jusqu'au passage de toute la séquence instrumentale choisie préalablement, selon le diamètre du canal, et mise en forme complète de celui-ci.

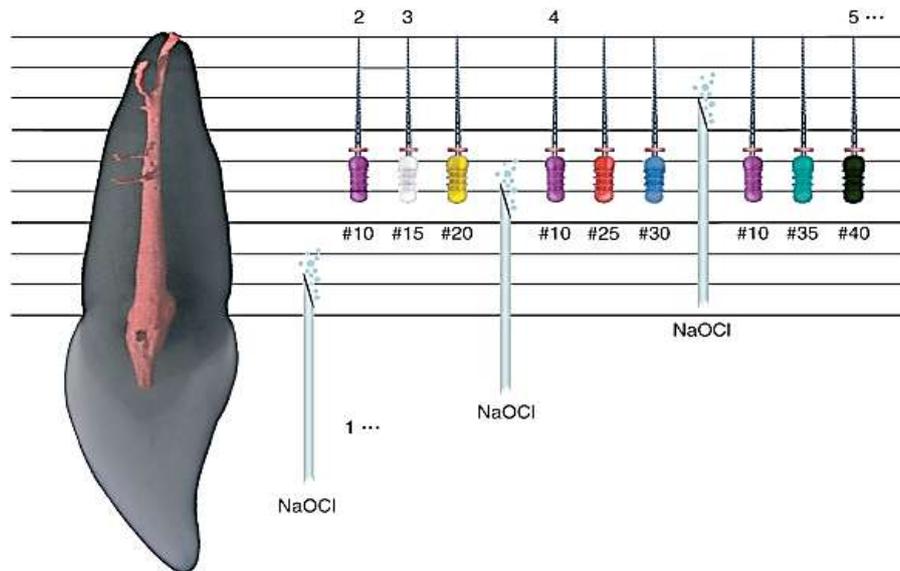


Fig.64: Diagramme de la préparation canalaire par la technique standardisée [155]

3.2.1.2. Avantages et inconvénients de la méthode

✓ **Avantage de la technique**

- Cette technique laisse le diamètre apical aussi étroit que possible.
- Cette méthode aide à préserver la forme originelle du canal.

✓ **Inconvénients de la technique**

- Les gros instruments dont la flexibilité est moindre peuvent entraîner dans les canaux courbes :
 - Une formation d'épaulement.
 - Une déviation de la trajectoire canalaire avec perforation.
 - Une perte de la longueur de travail.
 - Un déplacement ou déchirure du foramen apical.
- L'utilisation de gros instruments sur toute la LT risque de fragiliser les parois canales au niveau apical.

3.2.1.3. Indications et contre-indications de la technique

- **La technique manuelle standardisée est indiquée :**
 - Dans les cas de canaux larges.
 - Ainsi que préconisée dans les cas de canaux rectilignes.
- **La technique manuelle standardisée est contre-indiquée :**
 - Dans les canaux courbes
 - Et dans le cas de canaux fins [156].

3.2.2. Mise en forme canalaire mécanisée

Les concepts de mise en forme ont considérablement évolué ces dernières années grâce à l'introduction des alliages en Nickel-Titane, ce dernier a entraîné une modification : du profil des instruments, de la dynamique instrumentale, et des séquences opératoires.

Le concept actuel reprend le principe de la préparation corono-apicale « **crown down** », associé à l'utilisation d'instruments de conicité différente en rotation continue ou en mouvement de réciprocité [157].

3.2.2.1. Le concept du "crown-down"

Le Concept du « Crown-Down » consiste en un élargissement des entrées canales visant à supprimer les interférences avec un instrument à forte conicité, puis les 2/3 coronaires, et le 1/3 apical sont préparés avec des instruments à conicité décroissant.

La raison principale à l'utilisation de cette approche, est d'éviter à l'instrument d'avoir une trop grande surface de contact avec les parois canales responsable de la friction (effet de gaine), et ainsi réduire l'incidence de fracture par torsion.

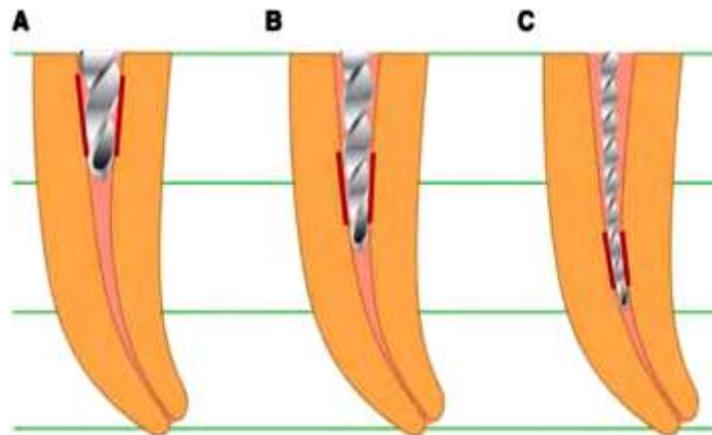


Fig.65 : schématisation de la technique crown down,

3.2.2.2. Préparation canalaire en rotation continue

Avec le développement des instruments endodontiques en NiTi depuis 1988, une multitude de systèmes endodontique mécanisée sont mis sur le marché, pour la préparation canalaire en rotation continue tels que : le système Quantec® 2000, le ProFile®, le ProTaper®, le Master Flex® ...

Nous décrirons dans ce chapitre, le **protocole opératoire du système ProTaper®** qui a été considéré pour longtemps comme un système de référence, et qui demeure jusqu'à ce jour le SS le plus utilisé.

3.2.2.2.1. Protocole opératoire avec le système ProTaper®

✓ Rappel sur les séquences instrumentales du système ProTaper

- Trois shaping files : S1, S2, SX
- Et trois finishing files : F1, F2, F3

✓ Principes de préparation

- La vitesse de rotation doit être comprise entre 200 et 300 tr/min, il est alors conseillé d'utiliser un tour à vitesse limitée, et d'un torque compris entre 1 et 3.
- Le système obéit au concept de préparation corono-apicale ou crown-down ^[158].



Fig.66 : la séquence instrumentale du système ProTaper® ^[159].

✓ Mise en forme canalaire avec le Système ProTaper®

Après toutes les étapes préliminaires, vues plus haut, à savoir : prise d'un cliché radiographique préopératoire, réalisation de la cavité d'accès, recherche de l'entrée des orifices canalaire, puis irrigation initiale à hypochlorite de sodium à 2.5%, nous entamons alors la mise en forme canalaire :

▪ Préparation canalaire du 1/3 coronaire

- Contrôle de la perméabilité du canal à l'aide d'une lime manuelle K№8 ou K№10 précourbée à son tiers apical pour sécuriser la trajectoire canalaire.
- Enduire alors la Shaping File **S1** d'EDTA, puis l'introduire passivement en rotation dans le canal, à la longueur de travail estimée moins environ 3 millimètres, appelée aussi **Longueur Initiale** ou **LI**, soit environ les 2/3 de la hauteur coronaire, puis retirer l'instrument **en marche et en appui pariétal en un mouvement de brossage des parois**.
- Rincer le canal à l'hypochlorite de sodium et nettoyer l'instrument avec une compresse imbibée de CLONA.
- Elimination de la courbure coronaire à l'aide de la shaping file **Sx**, par un mouvement de pompage vertical en appui contre la paroi externe à la courbure si cela est nécessaire, sinon le redressement des entrées canalaires se fait à l'aide de forets de Gates.

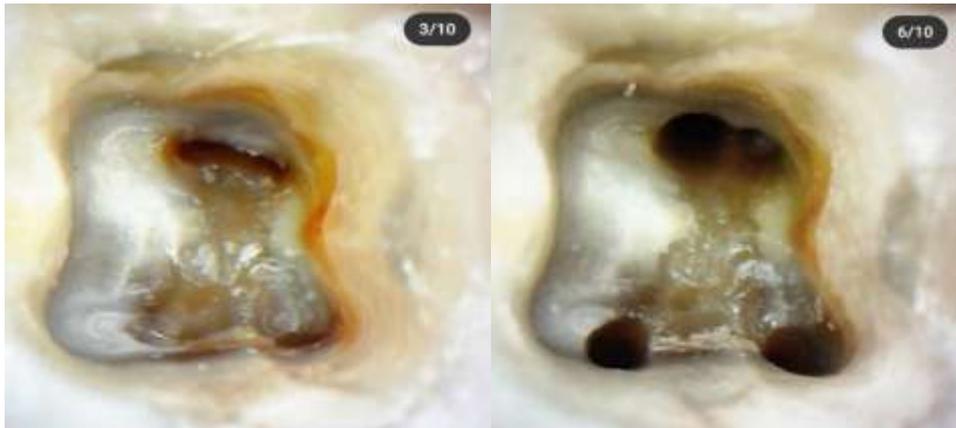


Fig.67 : l'effet du passage de la SX [141].

- Mesure de la **Longueur de Travail** ou **LT** à l'aide d'une lime manuelle K №10 ou №15 précurvée, la vérification se fait sur une radio en per-opératoire lime en place, ou par utilisation d'un localisateur d'apex, toutes les séquences suivantes utilisées seront basées sur cette mensuration.
- La shaping file **S1** est réutilisée de la même manière que la première fois, cette fois sur toute la **Longueur de Travail**, et sous irrigation constante.
- Nettoyage de l'instrument à l'aide d'une compresse imbibée de CLONA à sa sortie.



Fig.68 : irrigation et nettoyage des instruments à l'aide d'une compresse imbibée de NaOCL [145].

■ Préparation canalair du 1/3 moyen

- Passage de la shaping file **S2**, tout au long du canal, à la longueur de travail calculée ou
LT. La shaping file **S2** est utilisée de la même façon que la shaping file **S1** : introduite en rotation continue puis retirée en appui pariétal, sans forcer.
- Répéter le passage du shaping file **S2**, 3 à 4 fois dans le canal, sous irrigation constante au CLONA.

■ Préparation du 1/3 apicale

- Après la **S2**, c'est la finishing file n°1 ou **F1** qui sera introduite dans le canal jusqu'à la longueur de travail, la **F1** est utilisée en rotation continue, avec un mouvement de va et vient dans le canal sans appui ni pression.
- Evaluation du calibre du foramen à l'aide d'une lime K manuelle N°20, si cette dernière passe tout juste jusqu'à la LT, c'est que la mise en forme canalaire est terminée.
- Si le calibre du foramen apical est supérieur à 20 centièmes de mm, c'est la finishing file N°2 ou **F2** qui sera utilisée et éventuellement de la finishing file n°3, qui seront utilisées de la même manière que la F1.
- Le canal doit être abondamment irrigués au CLONA après chaque passage d'instrument.
- Réaliser une irrigation a l'EDTA a 17%, afin d'éliminer la smear layer.
- puis réaliser un dernier rinçage au CLONA afin d'éliminer la solution d'EDTA.
- le canal est ainsi prêt à être obturer

ProTaper® Universal Protocol

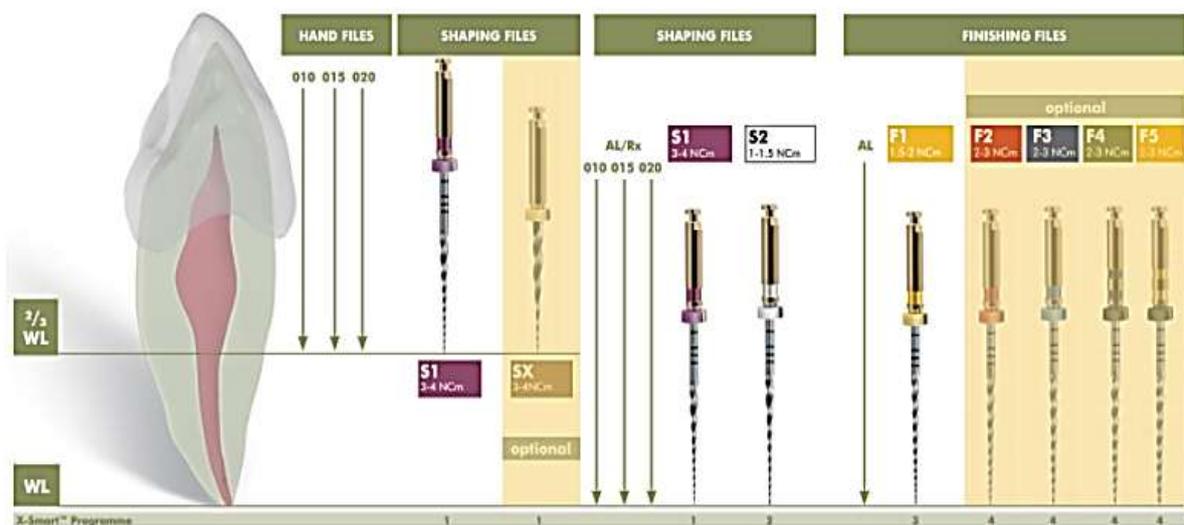


Fig.69 : schéma des séquences du système ProTaper [160, 161].

✓ Avantages de la technique

La technique de la rotation continue, et notamment celle qui est réalisée à l'aide du Système ProTaper® permet :

- un meilleur respect de l'anatomie initiale.
- l'obtention d'une mise en forme conique souhaitée.
- moins de refoulement des débris canaux dans la région péri apicale.

- une préparation pariétale régulière.
 - rapidité dans la mise en forme canalaire nettement supérieure que celle obtenue par la préparation manuelle.
 - confère un certain confort aussi bien pour le patient que pour le praticien.
- ✓ **Inconvénients de la rotation continue**
- les inconvénients sont notamment liés aux instruments NiTi à cause du phénomène de vissage et les risques de fracture.
 - le coût élevé des séquences instrumentales.
 - les mauvaises manipulations de la part des praticiens tels que :
 - les manipulations brutales.
 - les pressions excessives.
 - le non-respect des séquences opératoires.
 - l'engainement ou le blocage de l'instrument.
 - les vitesses de rotation inconstantes ou trop élevées pouvant contribuer à la survenue de fractures ^[162].

3.2.2.2. Préparation canalaire en mouvement de Réciprocité

✓ Principes de la technique

Dans cette technique l'instrument effectue un mouvement de $\frac{3}{4}$ de tour dans le sens horaire (sens de coupe) suivi immédiatement d'un mouvement de désengagement de la lime de $\frac{1}{4}$ de tour dans le sens anti-horaire, cela avec une vitesse équivalente à 300 tr/min.

Ce mouvement nécessite des instruments spécifiques ainsi qu'un moteur qui propose le mouvement de réciprocité.

C'est ainsi que sont apparus les systèmes **WaveOne®** et le système **Reciproc®**.

Dans ce chapitre, Nous allons détailler le protocole opératoire du système Reciproc® ^[163].



Fig.70 : le mouvement de réciprocité ^[164].

✓ Rappel sur les séquences instrumentales du Système Reciproc®

Trois limes sont disponibles :

- **le Reciproc® 1** pour les canaux fins
- **le Reciproc® 2** pour les canaux moyens

- et le **Reciproc® 3** pour les canaux les plus larges

L'instrument à utiliser doit avoir un diamètre et une conicité supérieurs au canal à préparer. D'une manière générale, les canaux étroits seront préparés à l'aide du **Reciproc® 1**, et les canaux plus larges et droits avec le **Reciproc® 2** ou **3**.



Fig.71 : la séquence instrumentale du système Reciproc® [165].

✓ Mise en forme canalaire avec le Système Reciproc® (Dentsply-VDW)

Après les étapes préliminaires à savoir : prise d'un cliché radiographique, préparation de la cavité d'accès, et repérage des orifices canaux, faire alors le choix de la séquence instrumentale du **SS Reciproc®** selon les indications suivantes :

- Si une lime manuelle №30 atteint « passivement » la **Longueur de Travail**, le canal est considéré comme large, et l'instrument le plus approprié est le **Reciproc® 3** (R50) ;
- Si la lime manuelle №25 n'atteint pas « passivement » la **Longueur de Travail**, le canal est alors considéré de taille moyenne et sera instrumenté à l'aide du **Reciproc® 2** (R40).
- Si la lime manuelle №20 n'atteint pas « passivement » la **Longueur de Travail**, le **Reciproc® 1** (R25) sera privilégié.

Une fois le choix de la séquence instrumentale fait, entreprendre alors la mise en forme canalaire avec le **SS Reciproc®** selon les étapes suivantes :

- Réaliser un cathétérisme initial, avec des limes manuelles ou mécanisées de faible diamètre jusqu'à la longueur de travail estimée ou initiale, ou encore **LI**. Si le praticien sent une butée, il s'arrêtera à cette longueur.
- L'instrument est introduit dans le canal, et selon un mouvement de va-et-vient, appelé « *picking* » qui le fait progresser en direction apicale, réaliser alors la mise en forme canalaire avec le **Reciproc®1**, préalablement choisi selon le diamètre du canal, jusqu'à la longueur obtenue (**Longueur Initiale**), sous irrigation abondante au CLONa.

La vitesse de rotation de l'instrument ne doit pas excéder les 300 tours/minute.

- Après deux ou trois passages de l'instrument, ou si un blocage apparaît, l'instrument est retiré, nettoyé à l'aide d'une compresse stérile imbibée d'hypochlorite de sodium et le canal est irrigué avec cette même solution.
- L'instrument est alors remis dans le canal, plus apicalement et sans pression jusqu'à atteindre la longueur obtenue avec la lime K d'exploration canalaire.
- L'étape suivante consiste à repasser les limes manuelles afin d'effectuer un repérage et un pré-élargissement du tiers apical.
Cette étape permet également d'évaluer des courbures apicales non visibles à la radiographie rétro-alvéolaire, et de valider la longueur de travail à l'aide d'une radiographie rétro-alvéolaire per-opératoire (lime K №15).
- Le canal est ensuite mis en forme à l'aide du **Reciproc® 1** jusqu'à l'apex, en l'utilisant comme décrit précédemment, selon un mouvement en « *picking* ».
- Le praticien doit alors jauger le diamètre apical :
 - Si une préparation de 25/100e de mm est suffisante, la mise en forme canalaire est achevée.
 - Si la situation clinique le nécessite, il peut être utile d'utiliser les instruments Reciproc® de conicité et de diamètre de pointe plus importants (Reciproc® 2 et 3).
- Toutefois, si la radiographie pré-opératoire montre un canal très large, alors le même protocole peut être réalisé avec un Reciproc® 2 ou Reciproc® 3 d'emblée.

Remarque

L'opérateur doit prendre garde à réaliser entre chaque instrument une récapitulation à l'aide de limes manuelles en acier inoxydable, et de travailler sous irrigation continue et renouvelée à l'hypochlorite de sodium.

Nous rappelons d'autre part que la préparation canalaire est réalisée **avec un instrument unique du Système Reciproc®**.

La figure ci-dessous schématise et résume le **Protocole Opérateur** à l'aide du **Système Reciproc®** :

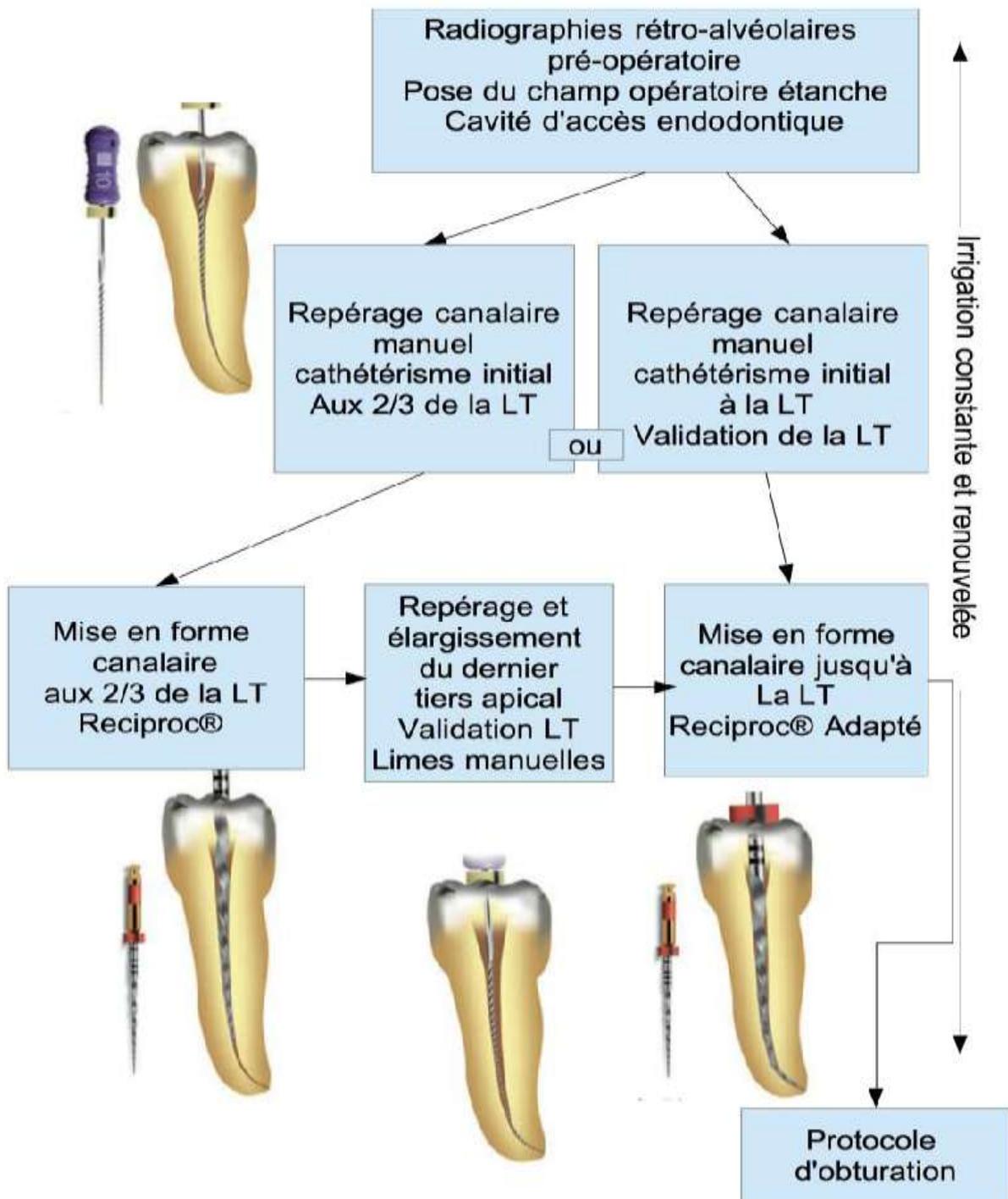


Fig.72 : Mise en forme canalaire avec le **Système Reciproc®** [165, 166, 167].

Conclusion

La thérapeutique endodontique est un acte minutieux et complexe, d'une part par la variabilité anatomique du réseau à nettoyer, et d'autre part par le manque de visibilité lors de l'acte, le traitement endodontique se faisant « **l'aveugle** ».

Les principes de ce traitement reposent sur le nettoyage et la mise en forme du système canalaire entier par l'association de la préparation mécanique et chimique.

L'irrigation est une étape clé et incontournable, qui conditionne la réussite du traitement endodontique. Elle doit être effectuée consciencieusement et doit permettre le nettoyage et la désinfection de l'ensemble du réseau canalaire. En effet, l'anatomie du système endodontique étant complexe et dotée d'une grande variabilité, la simple préparation mécanique ne suffit pas à évacuer l'ensemble des débris organiques pulpaire, des copeaux dentinaires et de la « smear layer » générés par le travail de la mise en forme.

Pour atteindre ces objectifs, de nombreuses solutions d'irrigation existent à l'heure actuelle.

Les plus utilisées sont l'hypochlorite de sodium, et l'EDTA. Ils comportent chacun leurs avantages et leurs inconvénients, mais malheureusement aucune ne possède, toutes les propriétés requises. On retiendra le « **gold standard** » qui se traduit par une utilisation répétée d'hypochlorite de sodium à 2,5% couplée avec une action finale d'agent chélatant : l'EDTA à 17%, tout en potentialisant l'action de la solution par les différents moyens d'activation.

De manière conventionnelle, l'irrigation est réalisée au moyen d'une seringue manuelle contenant la solution. Elle doit être réalisée avec précaution afin d'éviter tout accident (risque d'extrusion dans le péri-apex, projections sur le patient). D'autres moyens d'irrigation plus modernes ont été mis en œuvre: il s'agit de systèmes d'irrigation assistés qui en plus d'amener la solution dans le système endocanalaire, ont l'avantage d'activer l'irrigation.

En effet, un traitement endodontique fait appel à des systèmes de préparation canalaire agissant en synergie avec une solution d'irrigation. Différents systèmes de préparation canalaire existent actuellement manuelle ou mécanisée dont l'objectif principale est de maintenir ou de développer une forme fuselée et continue du canal, depuis son orifice d'entrée jusqu'à son apex ; ainsi que de faciliter le nettoyage par les solutions d'irrigation.

Les évolutions récentes ont permis d'améliorer la sécurité, la qualité et la reproductibilité de la mise en forme, tout en étant moins chronophage pour le praticien.

En conclusion le traitement endodontique repose sur trois piliers interdépendants qui sont : l'irrigation assurant la neutralisation du réseau canalaire, la mise en forme préparant le canal tout en respectant sa trajectoire initiale, et enfin se terminant par une obturation canalaire tridimensionnelle étanche assurant la pérennité de la dent sur l'arcade.

Annexes

Table des abréviations

| Abréviation | Dénomination complète |
|-----------------------------------|---|
| NiTi | Nickel-Titane |
| Lime K | Limes de Kerr |
| Lime H | Limes de Hedström |
| ISO | International Standard Organisation |
| AMF | Alliage à Mémoire de Forme. |
| CLONa | Hypochlorite de sodium |
| HOCl | Acide hypochloreux |
| OCl | Ions hypochlorites |
| PH | Puissance des hydrogènes |
| EDTA | Acide Ethylène Diamine Tétra-Acétique |
| MTAD | Mixture of Tetracycline isomer Acid and Detergent |
| H₂O₂ | Peroxyde d'hydrogène ou (eau oxygénée) |
| SAF | Self-Adjusting fil |
| LAI | Irrigation laser activée |
| LT | Longueur de travail |

Table des Figures

| N° de la figure | Titre | Page |
|------------------------|---|-------------|
| Figure 1 | Les différents composants de la dent. | 13 |
| Figure 2 | Image représentante une section de la dent et son rapport avec le parodonte. | 13 |
| Figure 3 | Les deux parties de la cavité pulpaire. | 14 |
| Figure 4 | Réseau canalaire d'une molaire supérieure. | 15 |
| Figure 5 | Configuration canalaire de Vertucci. | 16 |
| Figure 6 | Configuration canalaire selon la classification de Weine. | 17 |
| Figure 7 | Configuration canalaire selon Dedeus. | 18 |
| Figure 8 | Configuration canalaire de Cohen et Brunes. | 19 |
| Figure 9 | Configuration canalaire selon Bourdeau. | 20 |
| Figure 10 | Configuration canalaire de Carames et Aprile. | 21 |
| Figure 11 | Bactéries en biofilm. | 23 |
| Figure 12 | Bactéries planctoniques. | 23 |
| Figure 13 | Bactéries à l'intérieur du biofilm. | 24 |
| Figure 14 | Coupe transversale de la dentine et Prolongement odontoblastique occupant presque complètement la lumière des tubuli. | 27 |
| Figure 15 | Complexité du réseau canalaire. | 28 |
| Figure 16 | Instruments manuels en acier (Broche, Lime K, lime H, Tire-nerf). | 31 |
| Figure 17 | Séquences d'un ProTaper manuel. | 32 |
| Figure 18 | La shaping file S1. | 33 |
| Figure 19 | La shaping file S2. | 33 |
| Figure 20 | La shaping file auxiliaire Sx. | 34 |
| Figure 21 | Image de Shaping files S1, S2, SX et des Finishing files F1, F2, F3. | 34 |
| Figure 22 | Les limes de système WaveOne. | 36 |
| Figure 23 | les limes du Système RECIPROC®. | 37 |

| | | |
|------------------|---|----|
| Figure 24 | Irrigation canalaire. | 37 |
| Figure 25 | Accident d'extrusion d'hypochlorite de sodium dans le péri apex à l'origine d'un gonflement (a) et d'une ecchymose (b). | 40 |
| Figure 26 | Paroi canalaire sans traitement chimique. | 41 |
| Figure 27 | Paroi canalaire traitée à l'EDTA. | 41 |
| Figure 28 | Mécanisme d'action de la Chlorhexidine. | 42 |
| Figure 29 | Seringue d'irrigation en plastique. | 45 |
| Figure 30 | Assemblage seringue-aiguille. | 45 |
| Figure 31 | Aiguilles à bout ouvert en biseau. | 45 |
| Figure 32 | Aiguilles d'irrigation à extrémité fermée et sortie latérale. | 46 |
| Figure 33 | Le Système RinsEndo avec seringue d'irrigation. | 47 |
| Figure 34 | Le Système RinsEndo et les cupules de protection | 47 |
| Figure 35 | Le safety-irrigator. | 47 |
| Figure 36 | Le système SAF (moteur avec pompe pour irrigation, contre angle et lime). | 48 |
| Figure 37 | Système d'irrigation à pression négative EndoVac. | 48 |
| Figure 38 | a) micro-canule. b) macro-canule. | 49 |
| Figure 39 | Utilisation clinique du maître cône avec un mouvement vertical de faible amplitude. | 50 |
| Figure 40 | Adaptation intracanaire du maître cône. | 50 |
| Figure 41 | Système d'irrigation sonore, le Vibringe. | 51 |
| Figure 42 | Insert sonique EDDY VDWTM. | 52 |
| Figure 43 | Système Endoactivator™ et les différents inserts. | 52 |
| Figure 44 | Limes K ultrasonores « actives ». | 53 |
| Figure 45 | Limes ultrasonores Irrisafe « passives » | 53 |
| Figure 46 | Schéma des turbulences acoustiques issues d'une lime ultrasonore. | 54 |
| Figure 47 | Position de la fibre optique à 5mm de l'apex selon la technique LAI. | 55 |
| Figure 48 | Radiographie rétro-alvéolaire pré-opératoire. | 57 |
| Figure 49 | Radiographie rétro-alvéolaire per-opératoire. | 58 |

| | | |
|------------------|---|----|
| Figure 50 | Radiographie rétro-alvéolaire de l'obturation canalaire. | 58 |
| Figure 51 | Démonstration du point d'application de l'anesthésie au cour d'un traitement endodontique. | 59 |
| Figure 52 | Reconstitution pré-endodontique. | 60 |
| Figure 53 | Matériels nécessaire pour la pose de la digue dentaire. | 60 |
| Figure 54 | Mise en place de la digue dentaire. | 61 |
| Figure 55 | Configuration d'une cavité d'accès endodontique sur une dent monoradiculée incisif et canine. | 61 |
| Figure 56 | Configuration d'une cavité d'accès endodontique sur une molaire. | 61 |
| Figure 57 | Recherche des orifices canaux. | 62 |
| Figure 58 | Mode d'action de la lime k. | 63 |
| Figure 59 | Lime de cathétérisme précurvée, 15/100ème de mm. | 63 |
| Figure 60 | Détecteur d'apex. | 63 |
| Figure 61 | Radiographie peropératoire déterminant la longueur de travail. | 64 |
| Figure 62 | Irrigation avec NaOCL seul. | 66 |
| Figure 63 | Tubuli dentinaires après irrigation finale à l'EDTA. | 66 |
| Figure 64 | Diagramme de la préparation canalaire par la technique standardisée | 67 |
| Figure 65 | Schématisation de la technique crown down. | 69 |
| Figure 66 | La séquence instrumentale du système ProTaper. | 69 |
| Figure 67 | L'effet du passage de la SX. | 70 |
| Figure 68 | Irrigation et nettoyage des instruments à l'aide d'une compresse imbibée de NaOCL. | 71 |
| Figure 69 | Schéma des séquences du système ProTaper. | 72 |
| Figure 70 | Le mouvement de réciprocité. | 73 |
| Figure 71 | La séquence instrumentale du système Reciproc®. | 73 |
| Figure 72 | Mise en forme canalaire avec le système Reciproc®. | 76 |

Références bibliographiques

1. **Baume LJ, Fiore-Donno G, Holz J.** The clinical management of endodontic problems based on new histopathological evidence. *Quintessence Int Dent Dig.* 1974.
2. **Pérard M, Le Clerc J, Gautier T, Perez F, Vulcain J-M, Dautel A, Le Goff A.** Asepsie-antiseptie en endodontie. *EMC - Médecine Buccale* 2013;8(2):1-11 [Article 28-720-X-20]
3. <https://www-em--premium-com.docadis-ups-tlse.fr/article/747696/resultatrecherche/2> [23 Sep. 2014]
4. **Diemer F.** Irrigation en endodontie. Cours des L3. 2014.
5. **Siqueira JF, Rôças IN.** Diversity of Endodontic Microbiota Revisited. *J Dent Res* 88: 969–981, 2009.
6. **Kabalan M, Naaman A, Nehmé W.** Comparaison in vitro de trois systèmes d'irrigation: EndoVas, RinsEndo et seringue pour l'élimination des débris intracanaux. *Int Arab J Dent* 1, 2013.
7. <https://ojs.usj.edu.lb/ojs/index.php/iajd/article/view/14> [21 Oct. 2014]
8. **Ercan E, Özekinci T, Atakul F, Gül K.** Antibacterial Activity of 2% Chlorhexidine Gluconate and 5.25% Sodium Hypochlorite in Infected Root Canal: In Vivo Study. *J Endod* 30: 84–87, 2004.
9. **Hülsmann M, Heckendorff M, Lennon Á.** Chelating agents in root canal treatment: mode of action and indications for their use. *Int Endod J* 36: 810–830, 2003.
10. **Mohammadi Z, Jafarzadeh H, Shalavi S.** Antimicrobial efficacy of chlorhexidine as a root canal irrigant: a literature review. *J Oral Sci* 56: 99–103, 2014.
11. **Rossi-Fedele G, Doğramaci EJ, Guastalli AR, Steier L, de Figueiredo JAP.** Antagonistic interactions between sodium hypochlorite, chlorhexidine, EDTA, and citric acid. *J Endod* 38: 426–431, 2012.
12. **Hess et al., 1925; Vertucci, 2005** The Anatomy of the Root Canals of the Teeth
13. **Gulabivala K, Patel B, Evans G, Yuan-Ling NG.** Effects of mechanical and chemical procedures on root canal surfaces. *Endodont Topics* 2005;10:103-122.
14. **S. Simon.** L'irrigation en endodontie : l'essentiel à connaître à tout prix. *Clinic-Fev* 2011-vol.32.
15. **F. BUKIET, C. ROLLAND, N. GARDON, L. POMMEL.** Optimiser l'antiseptie canalaire par une irrigation efficace. *Réalités cliniques* 2006. Vol. 17, n°4 :371-383.
16. **P. MACHTOU, F. BRONNEC.** Les objectifs de l'irrigation en endodontie. *ALPHA OMEGA NEWS - N° 141 - MAI / JUIN.*
17. **Simon S, Pertot W-J.** *Endodontie.* Rueil Malmaison, France: Editions CdP; 2008.viii+132.
18. Association dentaire française. Commission des dispositifs médicaux. Préparation canalaire. Paris, France: Association dentaire française, impr. 2014; 2014. 50 p.
19. <https://pepite-depot.univ-lille2.fr/nuxeo/site/esupversions/7a7d2a91-57bb-49e6-8289-aeab004f9f8b>
20. [https://fr.slideshare.net/AbdeldjalilGadra/la-physiologie-de-lorgane-dentaire.](https://fr.slideshare.net/AbdeldjalilGadra/la-physiologie-de-lorgane-dentaire)
21. **Piette E, Goldberg M.** La dent normale et pathologique. DeBoeck Université. 2001.

22. **Vertucci F.** Root canal morphology and its relationship to endodontic procedures. *Endod Top.* 2005;(1):3-29
23. <https://pepite-depot.univ-lille2.fr/nuxeo/site/esupversions/91f47457-2ac9-4b8b-9d4d-9a726decbe2d>
24. http://www.dent.wikibis.com/pulpe_dentaire.php
25. <https://www.lefildentaire.com/articles/pratique/ergonomie-materiel/les-technologies-performantes-en-endodontie-l-association-gagnante-du-microscope-operatoire-et-du-laser-erbium-yag/>
26. **Hess W, Zürcher E.** The anatomy of the root-canals of the teeth pp. 199. 4to; 63 plates. Bale, Sons and Danielsson. 16s. *Public Health.* 1924;38:352,)
27. **Carotte P.** Endodontics: Part 4 Morphology of the root canal system. *British Dental Journal.* 2004; 197 : 379-383.)
28. **Weine FS.** The C-shaped mandibular second molar: incidence and other considerations. *J Endod.* 1998;24(5):372-5.
29. **Abbott PV, Yu C.** A clinical classification of the status of the pulp and the root canal system. *Aust Dent J.* 2007;52:17-31)
30. **Hess, W.** The Anatomy of the Root Canals of the Teeth of the Permanent Dentition. 1925. } *British Dental Journal* 197, 379 - 383 (2004) } traitement endodontique novembre 2008.
31. [https://fr.slideshare.net/oussamadahili/traitement-endodontique-cavit-daccs-endodontique.](https://fr.slideshare.net/oussamadahili/traitement-endodontique-cavit-daccs-endodontique)
32. <http://dr-pierre-paoli-chirurgiens-dentistes.fr/endodontie.html>
33. <https://docteur-chenu-christophe.chirurgiens-dentistes.fr/endodontie-paris-13/anatomie-de-la-dent/>
34. <https://www.lecourrierdudentiste.com/dossiers-du-mois/la-cavite-dacces.html>
35. **Harsh A, Vivek H.** Microleakage: Apical Seal vs Coronal Seal. *World J Dent.* 2013;4(2):113-6.
36. **Badet C.** Etude clinique de la carie. *EMC - Médecine Buccale.* 2011;Article 28-260-M-10:1-7.
37. **Bjorndal L.** The caries process and its effect on the pulp: the science is changing and so is our understanding. *J Endod.* 2008;34(7 Suppl):S2-5.
38. **Jhajharia K, Mehta L, Parolia A, Shetty Kv.** Biofilm in endodontics: A review. *J Int Soc Prev Community Dent.* 2015;5(1):1.
39. **Ramachandran Nair PN.** Light and electron microscopic studies of root canal flora and periapical lesions. *J Endod.* 1987;13(1):29-39.
40. **ter Steeg PF, Van der Hoeven JS, de Jong MH, van Munster PJ, Jansen MJ.** Enrichment of subgingival microflora on human serum leading to accumulation of Bacteroides species, Peptostreptococci and Fusobacteria. *Antonie Van Leeuwenhoek.* 1987;53(4):261-72.
41. **Fouad AF.** *Endodontic Microbiology.* John Wiley & Sons; 2009. 365 p.
42. **Peciuliene V, Maneliene R, Balcikonyte E, Drukteinis S, Rutkunas V.** Microorganisms in root canal infections: a review. *Stomatol Issued Public Inst Odontol Stud Al.* 2008;10(1):4-9.
43. **Perard M, Le Clerc J, Gautier T, Perez F, Vulcain J-M, Dautel A, et al.** Asepsie-antisepsie en endodontie. *EMC - Médecine Buccale.* 2013;8(2):1-11 [28-720 - X - 20].

44. **Taschieri S, Del Fabbro M, Samaranayake L, Chang JWW, Corbella S.** Microbille invasion of distal tubules: a literature review and a new perspective. *J Investig Clin Dent.* 2014;5(3):163-70).
45. **Tang L, Sun T, Gao X, Zhou X, Huang D.** Tooth anatomy risk factors influencing root canal working length accessibility. *Int J Oral Sci.* juill 2011;3(3):135-40.
46. **Qing Y, Yang Y, Bei C.** The technology of apical infection control. *Hua Xi Kou Qiang Yi Xue Za Zhi.* oct 2014;32(5):427-31.).
47. **Ricucci D, Siqueira JF.** Fate of the tissue in lateral canals and apical ramifications in response to pathologic conditions and treatment procedures. *J Endod.* 2010;36(1):1-15.).
48. Actes endodontiques complexes et soins sous microscope. CHU de Nantes, 2018. Site internet : <https://www.chu-nantes.fr>
49. <https://www.futura-sciences.com/sante/actualites/medecine-chez-bacteries-il-faut-choisir-nager-protoger-48371/?fbclid=IwAR1cMY8mDobWaNCv-IVvxysLwHLhI-Azh8nOBVPf8kitD-d8Qy7RnCA9rm8>.
50. **DELORME.L.** Biofilm : nouvelle approche dans la guérison des plaies Médecin microbiologiste infectiologue . 7 février 2012 .
51. https://fr.123rf.com/photo_77793273_bact%C3%A9ries-%C3%A0-l-int%C3%A9rieur-du-biofilm-fond-transparent-les-bact%C3%A9ries-en-forme-de-tige-et-sph%C3%A9riques-entour%C3%A9es-pa.html?fbclid=IwAR0IDn6zEHfDm4xcW6msKDy68mox-C1-8m7pf0BtA7yUNAdiz5SESb9GbCQ
52. https://www.information-dentaire.fr/formations/hypersensibilite-dentinaire/?fbclid=IwAR12K-KcowRXx1e8Cs-fUBfxkNB_am12pMmJera4rIKzzzATktTdcaugJnk
53. <https://conseildentaire.com/glossary/tire-nerf/>
54. préparation canalaire, commission des dispositifs médicaux de l'association dentaire française ADF 2014 par Anne CLAISSE ,Martine GUIGAND, Stéphane SIMON page 14.
55. [https://www.fkg.ch/fr/produits/endodontie/cath%C3%A9t%C3%A9risme/limes-k-kerr#:~:text=Les%20limes%20K%20\(Kerr\)%](https://www.fkg.ch/fr/produits/endodontie/cath%C3%A9t%C3%A9risme/limes-k-kerr#:~:text=Les%20limes%20K%20(Kerr)%).
56. <https://fr.slideshare.net/saoussene19/traitement-endodontique>
57. <https://fmedecine.univ-setif.dz/ProgrammeCours/L'instrumentation%20en%20endodontie-%20Dr%20CHAABNIA.pdf>
58. préparation canalaire, commission des dispositifs médicaux de l'association dentaire française ADF 2014 par Anne CLAISSE ,Martine GUIGAND, Stéphane SIMON page 15
59. https://www.google.com/search?q=protaper+manuel&sxsrf=ALeKk00HCcYo_6-XDCOoEYX1MFS7dszQNA:1623736104653&tbm=isch&source=iu&ictx=1&fir=KeA8nYDcX
60. **RUDDLE CJ.** Endodontic canal preparation: brack through cleaning and shaping strategies. *Dentistry today,* 1994 ; 44-49.
61. **Duque, J. A., R. R. Vivan, B. C. Cavenago, P. A. Amoroso-Silva, R. A. Bernardes, B. C. Vasconcelos, et M. A. H. Duarte.** « Influence of NiTi alloy on the root canal shaping capabilities of the ProTaper
62. <https://www.google.com/search?q=LES+SHAPING+FILES&sxsrf=ALeKk01GwT4xdZYvpSNQdQgHYTqQZzf2A:1623127817943&tbm=isch&source=iu&ictx=1&fir=>

63. l'endodontie de A à Z par Stéphane SIMON 2018 page 134
64. Odonto-Stomatologie/février 2002, Dominique **MARTIN**, Jacky **AMOR**, Pierre **MACHTOU** page 38
65. https://www.google.com/search?q=LES+SHAPING+FILES&sxsrf=ALeKk01GwT4xdZYvpSNQdQgHYTqQZzfm2A:1623127817943&source=lnms&tbn=isch&sa=X&ved=2ahUKEwiTso2onofxAhVMcBQKHeEoC5UQ_AUoAXoECAEQAw&biw=1280&bih=689#imgrc=KqKTGLJiN7o9YM
66. Odonto-Stomatologie/février 2002, Dominique **MARTIN**, Jacky **AMOR**, Pierre **MACHTOU** page 37
67. Brochure WaveOneGold2015, https://www.dentsplysirona.com/content/dam/dentsply/web/France/Support/Brochure/2015/120_1507_brochure_Wave_One_gold.pdf
68. **Webber J, Macho P, Pertot W, Kuttler S, Ruddle C, West J, et al.** The WaveOne single-file reciprocating system. *Roots* 2011; 1: 28-33.
69. https://www.google.com/search?q=les+limes+de+syst%C3%A9me+wave+one+&tbn=isch&ved=2ahUKEwj1_riIn4fxAhUNaBoKHcVIDSIQ2-cCegQIABAA&oq=les+limes+de+syst%C3%A9me+wave+one+&gs_lcp=CgNpbWcQAzIECCMQJzIECCMQJ1C0O1jLTWDjVWgAcAB4AIABvAGIAbUOkGEECM4xNJgBAKABAaoBC2d3cy13aXotaW1nwAEB&scient=img&ei=0_e-YLXJO43QacXLtZAC&bih=689&biw=1263&hl=fr#imgrc=8KxQu6mWeIpwCM
70. Séquences du SS RECIPROC : <http://www.dentalelite.fr>
71. **O. EMERI.** l'irrigation canalaire : pourquoi quand et comment L'information dentaire ; N° 6, p : 1-5, 2005
72. Association Dentaire Française. Commission des dispositifs médicaux Irrigation en endodontie Paris, France; 2012.(réf :Markus haapsalo irrigation in endodontic 2010).
73. <http://www.endoexperience.com>.
74. L'endodontie de A à Z Stéphane **SIMON** 2018.
75. Association Dentaire Française. Irrigation en endodontie Paris, France; 2012.
76. **Dunavant TR, Regan JD, Glickman GN, Solomon ES, Honeyman AL.** Comparative Evaluation of Endodontic Irrigants against Enterococcus faecalis Biofilms. *J Endod.* juin 2006.
77. **Kandaswamy D, Venkateshbabu N.** Root canal irrigants. *J Conserv Dent.* 2010.
78. **Pérard M, Le Clerc J, Gautier T, Perez F, Vulcain J-M, Dautel A, et al.** Asepsie-antisepsie en endodontie. EMC - Médecine Buccale. 2013.
79. **Hulsmann M, Hahn W.** Complications during root canal irrigation--literature review and case reports. *Int Endod J.* 2000.
80. **Al-Sebaei M, Halabi O, El-Hakim I.** Sodium hypochlorite accident resulting in life-threatening airway obstruction during root canal treatment: a case report. *Clin Cosmet Investig Dent.* 2015;7:41-44.
81. tissue damage after sodium hypochlorite extrusion during root canal treatment 2009. Site internet:<https://www.oooojournal.net>.
- 82.. **Zehnder M.** Root Canal Irrigants. *J Endod.* mai 2006.
83. Association Dentaire Française. Irrigation en endodontie. Commission des dispositifs médicaux. Paris, France; 2012.

84. **Mohammadi Z, Shalavi S, Jafarzadeh H.** Ethylenediaminetetraacetic acid in endodontics. *Eur J Dent.* 2013.
85. **P.Machtou** irrigation et désinfection en endodontie
86. **Jena A.** Root Canal Irrigants: A Review of Their Interactions, Benefits, And Limitations.
87. **Haapasalo M, Shen Y, Wang Z, Gao Y.** Irrigation in endodontics. *Br Dent J.* mars 2014.
88. **Grawehr M, Sener B, Waltimo T, Zehnder M.** Interactions of ethylenediamine tetraacetic acid with sodium hypochlorite in aqueous solutions. *Int Endod J.*
89. **Mohammadi Z, Abbott PV.** The properties and applications of chlorhexidine in endodontics. *Int Endod J.* 2009.
90. antiseptique en pratique : quel antiseptique pour quel usage? CHU de Nantes. Site internet :<https://www.chu-nantes.fr>.
91. **Torabinajad M.** Root canal irrigants and disinfection. *Endodontics: Colleague for excellence newsletter.* 2011.
92. **Ok E, Adanir N, Hakki S.** Comparison of cytotoxicity of various concentrations origanum extract solution with 2% chlorhexidine gluconate and 5.25% sodium hypochlorite. *Eur J Dent.* 2015.
93. **Gomes BPEFA, Vianna ME, Zaia AA, Almeida JFA, Souza-Filho FJ, Ferraz CCR.** Chlorhexidine in Endodontics. *Braz Dent J.* avr 2013.
94. **Singla MG, Garg A, Gupta S.** MTAD in endodontics: an update review. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endodontology.* sept 2011.
95. **Cruz-Filho AM, Sousa-Neto MD, Savioli RN, Silva RG, Vansan LP, Pécora JD.** Effect of Chelating Solutions on the Microhardness of Root Canal Lumen Dentin. *J Endod.* mars 2011.
96. **Claisse-Crinquette A.** Pharmacologie endodontique (I). Les irrigants. EMC – Médecine Buccale. 2011.
97. **Tartari T, de Almeida Rodrigues Silva E Souza P, Vila Nova de Almeida B, Carrera Silva Junior JO, Faciola Pessoa O, Silva E Souza Junior MH.** A new weak chelator in endodontics: effects of different irrigation regimens with etidronate on root dentinmicrohardness. *Int J Dent.* 2013.
98. pharmacologie endodontique. <http://www.dentisterie.blogspot.com>.
99. irrigation canalaire <https://player.slideplayer.fr/33/10205919/data/images/img14.jpg>
100. <http://www.dentaltix.com>.
101. <http://www.aegisdentalnetwork.com>.
102. **Hauser V, Braun A, Frentzen M.** Penetration depth of a dye marker into dentine using a novel hydrodynamic system (RinsEndo®). *Int Endod J.* 1 août 2007.
103. **Caron G, Nham K, Bronnec F, Macho P.** Effectiveness of Different Final Irrigant Activation Protocols on Smear Layer Removal in Curved Canals. *J Endod.* août 2010.
104. **McGill S, Gulabivala K, Mordan N, Ng Y-L.** The efficacy of dynamic irrigation using a commercially available system (RinsEndo®) determined by removal of a collagen 'bio-molecular film' from an ex vivo model. *Int Endod J.* 1 juill 2008.
105. **Hauser V, Braun A, Frentzen M.** Penetration depth of a dye marker into dentine using a novel hydrodynamic system (RinsEndo®). *Int Endod J.* 1 août 2007.
106. **Desai P, Himel V.** Comparative Safety of Various Intracanal Irrigation Systems. *J Endod.* avr 2009.

107. <https://www.slideshare.net/anuprabhashrivastav/recent-advances-in-irrigation-devices>.
108. **Metzger Z.** The self-adjusting file (SAF) system: An evidence-based update. *J Conserv Dent.* 2014.
109. The Self-Adjusting File. <http://www.dentistuniverse.blogspot.com>.
110. **Paranjpe A, de Gregorio C, Gonzalez AM, Gomez A, Silva Herzog D, Piña AA, et al.** Efficacy of the Self-Adjusting File System on Cleaning and Shaping Oval Canals: A Microbiological and Microscopic Evaluation. *J Endod.* févr 2012.
111. <http://www.kerrdental.com>.
112. <http://www.dentistrytoday.com>.
113. **Gondim E, Setzer FC, Dos Carmo CB, Kim S.** Postoperative pain after the application of two different irrigation devices in a prospective randomized clinical trial. *J Endod.* 2010.
114. **Gulabivala K, Ng Y-L, Gilbertson M, Eames I.** The fluid mechanics of root canal irrigation. *Physiol Meas.* 2010;31(12):R49-84.
115. **Gu LS, Kim JR, Ling J, Choi KK, Pashley DH, Tay FR.** Review of Contemporary Irrigant Agitation Techniques and Devices. *J Endod.* juin 2009.
116. idwebgs.com
117. **Basrani,** Endodontic irrigation : chemical disinfection of the root canal system, 2015.
118. **Caron G, Nham K, Bronnec F, Machtou P.** Effectiveness of Different Final Irrigant Activation Protocols on Smear Layer Removal in Curved Canals. *J Endod.* août 2010.
119. L'endodontie de A à Z. **SIMON Stéphane,** 2018
120. Association dentaire française. Commission des dispositifs médicaux. Irrigation en endodontie. Paris, France: Association dentaire française, impr. 2012; 2012. 52 p.
121. <https://www.medicalexpo.fr/prod/cavex/product-101211-884199.html>
122. <https://www.vdw-dental.com/en/products/detail/eddy/>
123. <https://bhi.be/catalog/appareils/instrumentation-endocanalaire-012021000>
124. **Gu LS, Kim JR, Ling J, Choi KK, Pashley DH, Tay FR.** Review of Contemporary Irrigant Agitation Techniques and Devices. *J Endod.* juin 2009.
125. <https://www.acteongroup.com/Irrisafe>.
126. **Van Der Sluis L, Versluis M, Wu MK, Wesselink PR.** Passive ultrasonic irrigation of the root canal. *Int Endod J.* 2007
127. **Lee S-J, Wu M-K, Wesselink PR.** The effectiveness of syringe irrigation and ultrasonics to remove debris from simulated irregularities within prepared root canal walls. *Int Endod J.* 1 oct 2004.
128. <https://fr.dental-tribune.com/clinical/le-laser-en-endodontie-partie-ii>.
129. Haute Autorité de Santé / Service évaluation des actes professionnels / septembre 2008.
130. **Descamps M.** Les urgences endodontiques pulpaires et périapicales: fiches cliniques pédagogiques [Thèse d'exercice]. [France]: Université du droit et de la santé (Lille). Faculté de chirurgie dentaire; 2013.
131. <https://www.idweblogs.com/e-endo/proposition-de-traitement-face-a-une-lesion-endodontique-importante/>
132. <https://www.youtube.com/watch?v=YpdMU0z68-g>.

133. **Saint-Pierre f.** Traitement endodontique - Rapport d'évaluation [Internet]. Collège de la Haute Autorité de Santé; 2008 [cité 22 avr 2015] p. 66. Disponible sur : http://www.has-sante.fr/portail/jcms/c_736791/fr/traitement-endodontique
134. <https://www.information-dentaire.fr/formations/le-rle-de-lassistante-dentaire/>
135. <https://www.docteurs-gendronneau-brionne.fr/l-equipement-du-cabinet-dentaire/la-digue-dentaire>.
136. https://fr.wikipedia.org/wiki/Composite_dentaire
137. **Simon S, Ctorza-Perez C.** Cavité d'accès en endodontie. EMC Médecine Buccale [Internet]. 2010 [cité 6 févr 2015] ;(Article 28-725-B-10). Disponible sur : <http://www.em-consulte.com/article/251428/cavite-d-acces-en-endodontie>.
138. **Perez F, Gaudin A.** Comment rationaliser la mise en forme canalaire? [Internet]. Dentoréseau. [Cité 25 nov 2014]. Disponible sur : <http://dentoreseau.com/posts/comment-rationaliser-la-mise-en-forme-canalaire>.
139. <https://www.lecourrierdudentiste.com/dossiers-du-mois/la-cavite-dacces.html>.
140. <https://www.eid-paris.com/endodontie/endodontie-8.htm>.
141. <https://www.lefildentaire.com/articles/clinique/endodontie/l-efficacite-en-endodontie/>
142. <https://www.information-dentaire.fr/actualites/cavites-d-acces-endodontiques-mini-invasives/>
143. https://www.google.com/search?q=le+catheterisme+en+endodontie&source=lnms&tbm=isch&sa=X&ved=2ahUKEwjtuKKdqvLwAhWUT8AKHRSQBe0Q_AUoAXoECAEQAw&biw=1366&bih=600#imgrc=mds1IRUFA0-7sM.
144. **MEDIONI E., VENE G.** Traitement radiculaire : assainissement et préparation de la cavité endodontique. E.M.C., 1994 ; [23-030-A-10].
145. **Hadji Z.** : Étude comparative in vitro, entre deux méthodes de préparation canalaire par rotation continue au NiTi et leur influence sur l'étanchéité de l'obturation du système canalaire par gutta thermoplastifiée. Thèse de doctorat en Sciences médicales-Blida-2013 .
146. https://www.google.com/search?q=apex+locator&source=lnms&tbm=isch&sa=X&ved=2ahUKEwjzrbDCr_LwAhWOQEEAHTFfDIcQ_AUoAXoECAIQAw#imgrc=-GQILZKdQw8g2M
147. <https://www.google.com/search?q=preoperative+x+ray+endo&tbm=isch&bih=600&biw=1366&hl=fr&sa=X&ved=2ahUKEwj7wNvyrvLwAhUF7xoKHbtbDjcQBXoECAEQOw#imgrc=ikk9k-XGxJcXjM&imgdii=jDSF8leZQxccSM>
148. **FENNICH M., SAKOUT M., ABDALLAOUI F.** Pour une détermination rationnelle de la longueur de travail en endodontie. Rev Odont Stomat. 2012 ; 41 : 232-243.
149. **J. DAKKAKI, I. BENKIRANE, M. KARAMI, A. EL OUAZZANI,** Désinfection endodontique : Principes et méthodologie ; *Service d'Odontologie Conservatrice. Ibn Rochd. Casablanca* , 19 novembre 2013.
150. **P. MACHTOU, F. BRONNEC.** *Les objectifs de l'irrigation en endodontie. ALPHA OMEGA NEWS - N° 141 - MAI / JUIN 2011.*
151. **Stéphane Simon,** Livre endodontie de A a Z traitement et retraitement ; Edition CDP,2018 ISBN 978-2-84361-408-8, page 172.
152. **CANTATORE G.** L'irrigation de l'endodonte : importance dans le nettoyage et la stérilisation du réseau canalaire.
153. Concepts Cliniques en Endodontie, Ed SNPMD 2005 ; pp : 59-75.

154. **Mahmoud TORABINEJAD , Richard E.WALTON , A.FOUAD , Gérard LÉVY ; Endodontie** Principes et pratique , ISBN : 978-1-4557-5410-6 ; 2015 ; Elsevier Masson page 289.
155. <https://pocketdentistry.com/cleaning-and-shaping-the-root-canal-system>
156. **Mandel, E.**, 2004. ID N° 86-26 du 30 Juin 2004 <http://www.information-dentaire.fr/0115-1405-ID-N-86-26-du-30-Juin-2004.html>.
157. **Martin D, Machtou P.** Evolution des concepts de mise en forme du système canalaire. Endodontie mécanisée. RevOdonto-Stomatol1999 ; 28(1) :13-22).
158. **A.Dane I. Capar**, Effect of Different Torque Settings on Crack Formation in Root Dentin, Journal of endodontics ; 2016, DOI:10.1016/j.joen.2015.10.024 .
159. https://www.google.com/search?q=protaper&sxsrf=ALeKk00JtBBBCJpN1bwioZfU5lCMwPprUQ:1623968440877&source=lnms&tbn=isch&sa=X&ved=2ahUKEwjSza3w2Z_xAhXH4IUKHbF5B9QQ_AUoAXoECAEQAw#imgcr=0q8FSTOrwN1Vkm.
160. <http://ko.ddd.wikidok.net/wp-d/5878dce73317c1dd28557ff0>.
161. Mechanized endodontics : the PROTAPER® system Principes and clinical protocol Dominique MARTIN Jacky AMOR Pierre MACHTOU Faculté de Chirurgie Dentaire Paris VII.
162. Association Dentaire Française. Les systèmes nickel-titane en rotation continue.Paris: ADF; 2003.
163. **Stéphane Simon**, Livre endodontie de A à Z traitement et retraitement ; Edition CDP,2018 ISBN 978-2-84361-408-8, page 154 ;155.
164. https://www.google.com/search?q=mouvement+de+reciprocite&tbn=isch&ved=2ahUKEWjEhYXOzKHxAhUigXMKHZaYD_UQ2-cCegQIABAA&oq=mouvement+de+reciprocite&gs_lcp=CgNpbWcQAzIECAAQGD0CAA6BQgAELEDOggIABCxAxCDAToECAAAQ1COtlZYnJ9XYIyV2gAcAB4BoABhaIAdqhAZIBCTYtMS42LjMuM5gBAKABAaoBC2d3cy13aXotaW1nsAEAwAEB&sc=ient=img&ei=PsnMYMTuK6KCzgOWsb6oDw&bih=600&biw=1366&hl=fr#imgcr=Ovh0LFMvjroSSM.
165. **Yared G.** “Canal Preparation Using Only One Ni-Ti Rotary Instrument: Preliminary Observations.” International Endodontic Journal 41, no. 4 (April 2008): 339–44. doi:10.1111/j.1365-2591.2007.01351.
166. **Wilhelm J.** “Mise En Forme Canalaire Monoinstrumentale En Mouvement Réciproque.” Dental Tribune Study Club Le Magazine, no. 1 (2013): 44–47.
167. RECIPROC® : One File Endo. (En ligne). 2011. (Consulté le 15/01/2015).Disponible <http://www.dentsply.fr/export/sites/default/.content/datas/technicalsupports/DFU-Modes-d-emploi/dfu-reciproc.pdf>.