

**MOTS-CLÉS** : pulpite, curetage carieux sélectif, coiffage direct, pulpotomie, biomatériau

**KEYWORDS** : *pulpitis, selective carious tissue removal, direct capping, pulpotomy, biomaterial*

# Préservation de la vitalité pulpaire : peut-on être sûr de sa décision ?

## MARION FLORIMOND

Chef de clinique universitaire-associé, Master 2 Développement Inflammation Régénération Université Paris Cité  
Praticien hospitalier Service d'odontologie Hôpital Charles-Foix, Ivry-sur-Seine

## ROCIO GOLBANO-GOMIZ

Master 2 Santé parcours endodontie Université Paris Cité,  
Service d'odontologie hôpital Bretonneau, Paris

## NELLY PRADELLE

Maître de conférences universitaire Université Paris Cité,  
Praticien hospitalier Service d'odontologie hôpital Rothschild, Paris

## MAXIME DROSSARD

Pratique privée, Paris

## TCHILALO BOUKPESSI

Professeur des universités, Université Paris Cité,  
Praticien hospitalier, Service d'odontologie hôpital Pitié-Salpêtrière

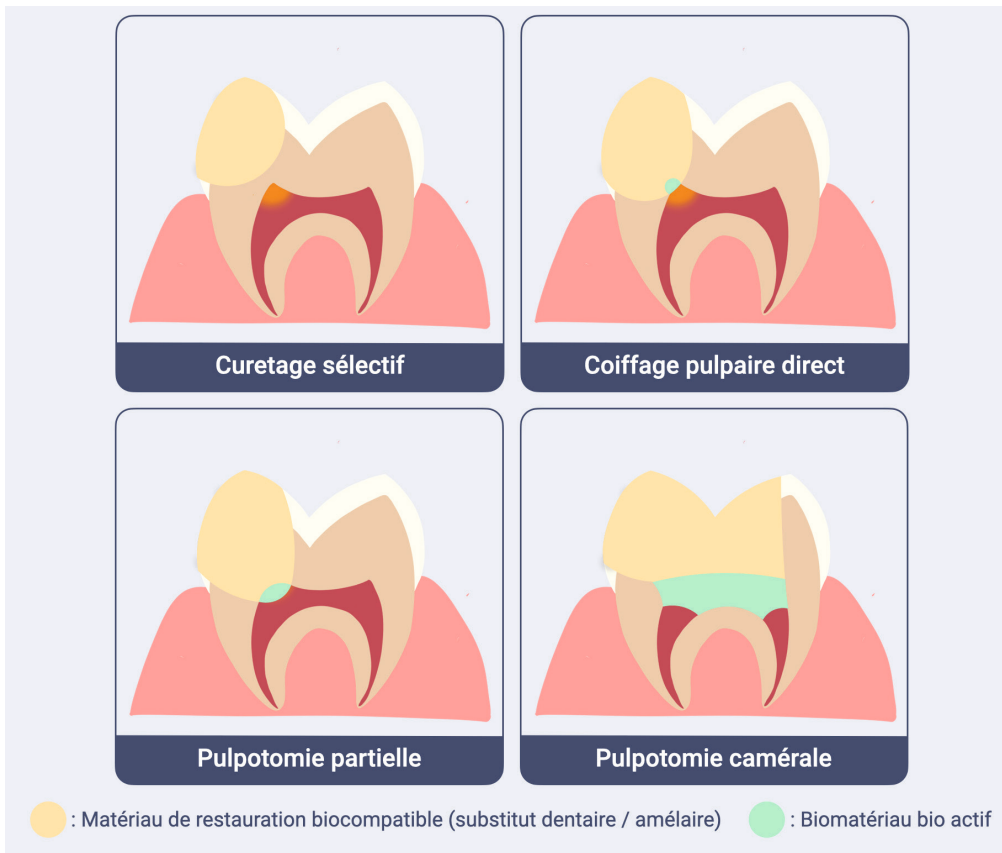
### RÉSUMÉ

Le coût biologique et économique des défauts dans la prise en charge des lésions carieuses profondes est aujourd'hui établi. Il est très important pour les patients, comme pour la santé publique. De nombreux travaux visent à améliorer cette prise en charge, bien que certaines zones restent encore floues dans les connaissances biologiques, de la réponse du complexe pulpo-dentinaire à la progression bactérienne. Le fait de ne pas avoir de consensus dans la prise en charge des caries profondes ainsi que des pulpes exposées entraîne parfois une mauvaise gestion. Cela est à l'origine de réticences vis-à-vis de l'utilisation des traitements de préservation de la vitalité pulpaire. Toutefois, les données acquises jusqu'ici permettent de proposer au chirurgien-dentiste une stratégie diagnostique et thérapeutique applicable au quotidien. L'objectif de cet article est de donner des clés afin d'évaluer au mieux l'état de santé pulpaire et de mieux maîtriser les indications et le pronostic des thérapeutiques de préservation de la vitalité pulpaire.

### ABSTRACT

#### VITAL PULP THERAPY: IS THE DECISION-MAKING SURE?

*The biological and economic cost of failures in the management of deep carious lesions is now well established. It is very important for patients as well as for public health. Many studies aim to improve this management, even if certain areas still remain unclear in the knowledge of the biology especially the response of the dentin-pulp complex to bacterial progression. No consensus in the management of deep caries as well as exposed pulps leads to poor management and is source of hesitation in the implementation of vital pulp therapy. However, the data acquired so far make it possible to allow the dentist to have a diagnostic and therapeutic strategy applicable in a daily practice. The objective of this article is to give the keys to better assess the state of pulpal health and to better control the indications and the prognosis of vital pulp therapy.*



1. Les différentes thérapeutiques de préservation de la vitalité pulpaire sont classifiées selon la quantité de tissu pulpaire éliminée, du curetage sélectif jusqu'à la pulpotomie camérale. Les biomatériaux placés au contact de la plaie pulpaire ont pour but de promouvoir la cicatrisation du complexe pulpo-dentinaire.

## Un peu d'histoire...

Les stratégies thérapeutiques contemporaines fondées sur la préservation tissulaire ont permis une nouvelle émergence des thérapeutiques de préservation de la vitalité pulpaire et, ainsi, de repousser les indications des traitements endodontiques dans le cas de lésions carieuses profondes [1].

En soi, l'idée de préserver la pulpe ne date pas d'aujourd'hui, mais elle a connu des hauts et des bas. D'ailleurs, il est intéressant de reconsidérer son évolution au cours de l'histoire. Des commentaires comme « la pulpe exposée est une pulpe condamnée », écrits dans les années 1920, résonnent d'une façon particulière aujourd'hui. Ces propos condamnant la pulpe sont contrecarrés dans les années 1940-50 par des études scientifiques robustes, cherchant à mettre en évidence des capacités de cicatrisation de la pulpe lésée. La conservation de la vitalité pulpaire serait alors possible mais la prédictibilité du coiffage pulpaire direct semble incertaine (taux de succès entre 60 et 70 %) [2, 3]. De ce fait, le traitement endodontique, considéré plus prédictible, avec des taux de succès compris entre 80 et 90 %, fut le traitement pulpaire de choix. Malgré les études de Baume & Holz et Haskell et coll. [4, 5] montrant des taux de succès équivalents entre le coiffage pulpaire direct et le traitement endodontique, les praticiens restaient réticents à la préservation de la vitalité pulpaire. Il a fallu attendre

les années 2010 pour reconsidérer dans l'arsenal thérapeutique, et dès que cela est possible, les thérapies ayant pour objectif de conserver la pulpe fonctionnelle. Ceci a été rendu possible grâce à une meilleure compréhension des mécanismes biologiques intervenant dans la réparation et la régénération tissulaires ainsi que grâce aux avancées dans le domaine des biomatériaux, avec le développement des ciments à base de silicate calcique. Ainsi, les techniques d'éviction carieuse partielle permettent de diminuer le risque d'exposition pulpaire durant le curetage carieux. Les techniques de coiffage pulpaire direct, pulpotomies partielle ou complète, permettent de conserver la vitalité pulpaire en étant moins invasives que la pulpectomie [6].

## Terminologie et définitions des thérapeutiques de préservation pulpaire

Selon l'*European Society of Endodontics* (ESE) [6], les thérapeutiques de préservation de la vitalité pulpaire regroupent les stratégies de curetage sélectif du tissu carieux (en un ou deux temps), le coiffage pulpaire indirect, le coiffage pulpaire direct, la pulpotomie partielle et la pulpotomie camérale (fig. 1).

Le coiffage pulpaire indirect est la procédure qui consiste, après curetage de la lésion carieuse, à appliquer un matériau au contact d'une dentine souvent dure. Il faut lui préférer une stratégie de curetage sélectif, laissant *in situ* une partie de dentine déminéralisée.

Le coiffage direct est la procédure qui consiste à appliquer un matériau bioactif au contact direct de la plaie pulpaire, puis de mettre en place un matériau de restauration coronaire, dans le but de favoriser la réparation et l'oblitération pulpaire par une barrière minéralisée néoformée.

Deux situations cliniques peuvent être distinguées :

- classe I : exposition pulpaire d'origine non carieuse (traumatique ou iatrogène). Dans ce cas, aucune inflammation pulpaire n'est présente ;
- classe II : exposition pulpaire en présence d'une lésion carieuse profonde.

La pulpotomie est la technique qui consiste à sectionner et à retirer tout ou partie de la pulpe camérale afin de préserver la vitalité du tissu pulpaire résiduel.

La pulpotomie partielle correspond à l'exérèse chirurgicale d'une petite portion de la pulpe camérale superficielle, suivie de l'application d'un matériau bioactif au contact de la pulpe résiduelle et de la mise en place d'un matériau de restauration coronaire d'usage. La pulpotomie complète (également dénommée « pulpotomie camérale » ou « pulpotomie cervicale ») correspond à l'élimination de la totalité du parenchyme pulpaire caméral jusqu'aux orifices canaux, afin de préserver la vitalité de la partie radiculaire restante. Elle est suivie par la mise en place d'un matériau bioactif et d'une restauration coronaire d'usage.

Cette terminologie a permis de mieux considérer ces thérapeutiques dans les différents domaines de l'odontologie que sont la cariologie, l'odontologie pédiatrique, l'odontologie restauratrice et l'endodontie. Elle a également servi à faire changer l'idée selon laquelle le traitement endodontique serait la seule option à considérer pour la gestion des caries profondes et de la pulpe exposée.

## Des bases biologiques pour mieux comprendre la clinique

La meilleure compréhension des mécanismes biologiques impliqués dans la réponse pulpaire permet de mieux appréhender le potentiel réparateur de la pulpe et d'ainsi adapter la thérapeutique. Grâce à cette connaissance, chaque clinicien sera en mesure d'évaluer le potentiel régénérateur du tissu pulpaire et d'envisager, après information au patient, un traitement de préservation de la vitalité pulpaire.

### Les réactions de défense du complexe pulpo-dentinaire

L'équilibre de l'écosystème oral peut être rompu sous l'influence de nombreux facteurs locaux et généraux (alimentation, hygiène orale, pathologies systémiques...). La dysbiose résultante peut être

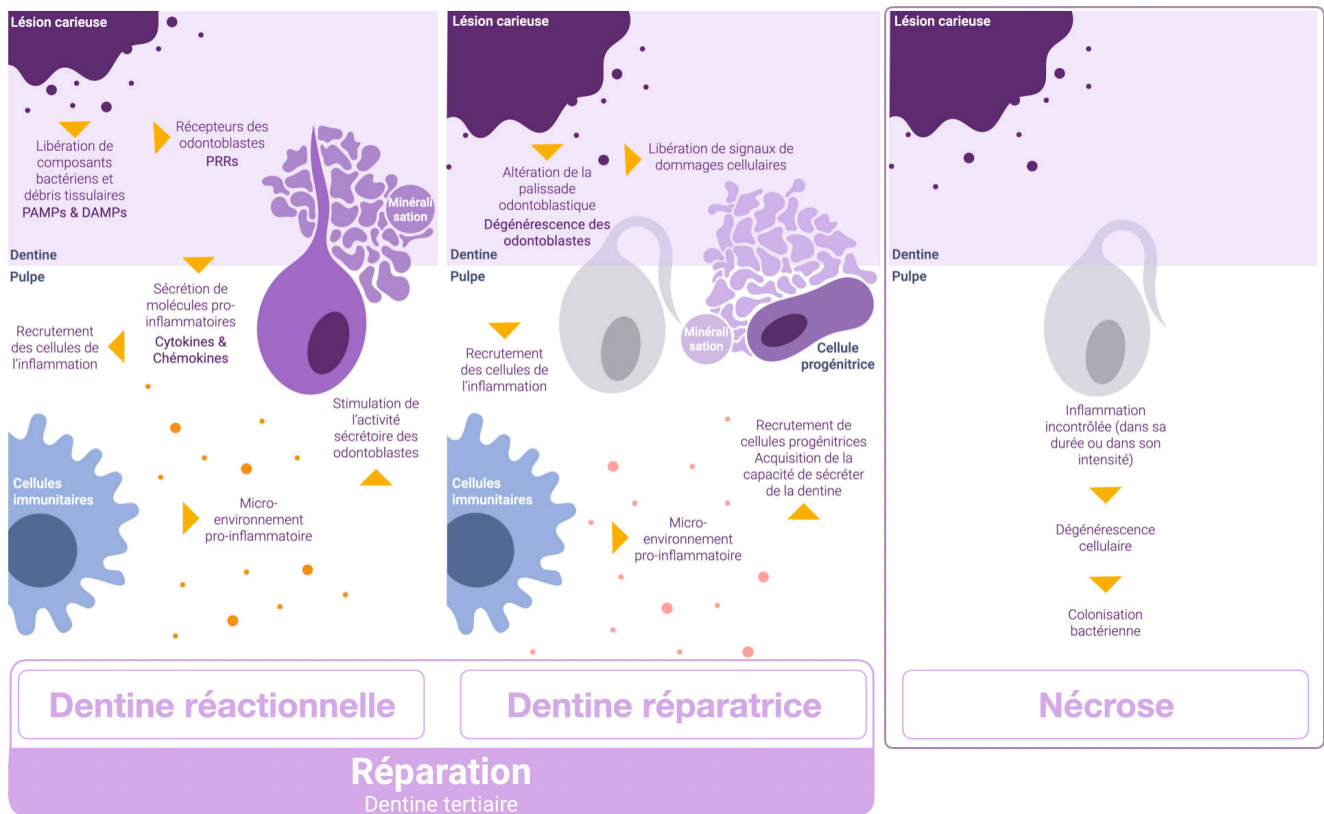
favorable au développement d'espèces bactériennes cariogènes, dont le métabolisme acidogène fait baisser le pH au voisinage des tissus dentaires, rendant l'environnement propice à la déminéralisation des tissus durs de la dent [7]. Les bactéries progressent alors à travers l'émail et la dentine sous-jacente vers l'intérieur de l'organisme, avec un risque d'infection locale et systémique [8, 9]. En réponse à l'invasion de ces micro-organismes, la première ligne de défense cellulaire du système immunitaire est la palissade odontoblastique (fig. 2).

Les odontoblastes, des cellules situées en périphérie de la pulpe, présentent un prolongement qui s'étend dans la dentine et qui leur permet de capter les différentes molécules issues de la progression du processus carieux. En effet, les composés bactériens et les produits de dégradation tissulaire constituent des signaux d'alerte respectivement appelés PAMP (*pathogen-associated molecular patterns*) et DAMP (*damage-associated molecular patterns*). Ils sont captés par les récepteurs des cellules impliquées dans la réponse immunitaire, dont les odontoblastes font partie, grâce à leurs récepteurs appelés PRR (*pattern recognition receptors*) [10]. L'activation des odontoblastes leur permet de diffuser le message d'alerte au sein du tissu pulpaire par la sécrétion de chimiokines et de cytokines, des molécules pro-inflammatoires qui permettent le recrutement de l'ensemble des acteurs de l'inflammation et de l'immunité [11]. Une cascade complexe d'événements moléculaires, cellulaires et vasculaires se met alors en place avec deux objectifs : l'élimination des bactéries et la cicatrisation du complexe pulpo-dentinaire. Trois issues sont alors possibles (fig. 2) :

- Réparation par dentine réactionnelle : la concentration importante en molécules pro-inflammatoires stimule l'activité sécrétrice des odontoblastes, qui produisent un tissu minéralisé appelé « dentine réactionnelle », histologiquement semblable à la dentine physiologique.
- Réparation par dentine réparatrice : lorsque le stimulus inflammatoire est trop brutal ou trop rapide et qu'il conduit à la destruction des odontoblastes, les signaux de dommages cellulaires libérés permettent le recrutement de cellules dites progénitrices qui ont la capacité de se différencier en pseudo-odontoblastes (ou *odontoblast-like cells*). Ces derniers vont également sécréter un tissu minéralisé, qui sera cette fois-ci appelé « dentine réparatrice », dont l'architecture est différente au niveau histologique.
- Nécrose : lorsque le stimulus inflammatoire provoque une réaction inflammatoire incontrôlée ou prolongée, les capacités de cicatrisation peuvent être dépassées et le processus inflammatoire mène à la nécrose du tissu pulpaire. L'endodonte sera alors rapidement colonisé par les bactéries.

Les dentines réactionnelle et réparatrice sont regroupées sous le nom de « dentine tertiaire », par opposition aux dentines primaire et secondaire, physiologiques, qui sont respectivement sécrétées avant et après l'éruption de la dent sur l'arcade. La présence de dentine tertiaire peut être observée radiologiquement.

Les données actuelles laissent à penser que l'issue du processus carieux pour le complexe pulpo-dentinaire est déterminée par le



2. Les différents produits libérés lors de la progression du processus carieux déclenchent une cascade d'événements tissulaires, cellulaires et moléculaires. En fonction du niveau d'inflammation atteint et des caractéristiques du micro-environnement, qui dépendent du stimulus, trois issues sont possibles :

- la sécrétion de dentine réactionnelle par les odontoblastes ;
- la sécrétion de dentine réparatrice par les cellules progénitrices à la suite de leur différenciation ;
- la nécrose tissulaire.

niveau de l'inflammation, qui est à la fois nécessaire à la réparation mais aussi à l'origine de la nécrose. L'amplitude de la réponse inflammatoire est principalement dépendante du stimulus initial (par exemple sévérité, ancienneté de la lésion carieuse) mais est aussi influencée par la procédure opératoire (par exemple échauffement, vibrations) ainsi que par les effets du biomatériau utilisé pour promouvoir la réparation et les conditions de sa mise en œuvre (fig. 3).

A ce jour, l'éventail des stratégies thérapeutiques, dites de préservation de la vitalité pulpaire, a pour objectif de stimuler la formation d'un pont dentinaire par les odontoblastes ou pseudo-odontoblastes. Si ces thérapeutiques sont largement décrites et utilisées en pratique courante, il n'existe pas encore d'outil permettant d'évaluer précisément le niveau d'inflammation pulpaire, ce qui permettrait d'améliorer l'évaluation du pronostic. L'objectif ultime serait de pouvoir détecter cliniquement le tissu pulpaire qui n'a plus de capacités de cicatrisation, afin de l'éliminer sélectivement et de promouvoir la réparation. L'approche actuelle repose

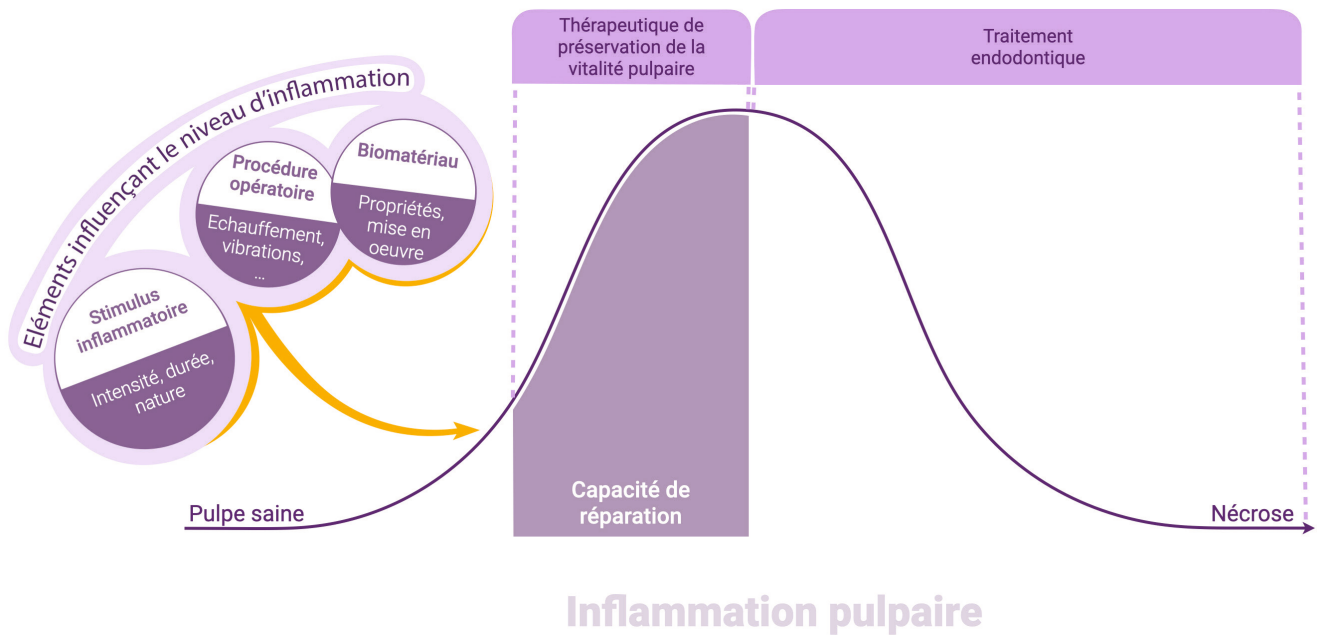
sur une évaluation encore empirique, mais qui s'affine progressivement avec l'avancée des connaissances biologiques et le développement des biomatériaux.

### Les matériaux

Dans le cadre de ces thérapeutiques, les matériaux de choix sont ceux à base de silicate tricalcique.

Le chef de file historique en est le MTA (*mineral trioxide aggregate*). Ce matériau bioactif a été développé au début des années 1990. C'est essentiellement une préparation raffinée de ciment de Portland, un mélange de silicate dicalcique, de silicate tricalcique, d'aluminate de tricalcium, de gypse et d'aluminoferrite tétracalcique. Les études *in vitro* indiquent que le MTA est un matériau biocompatible possédant la capacité de stimuler la différenciation ostéo-odontogénique [12]. La capacité du MTA à induire la dentinogenèse réparatrice ou la formation de pont minéralisé a été démontrée dans les études *in vivo* dans lesquelles le coiffage pulpaire direct et/ou la pulpotomie





**3.** La principale limite des thérapeutiques de préservation de la vitalité pulpaire réside dans l'évaluation du niveau d'inflammation pulpaire. Ce dernier dépend principalement des caractéristiques du stimulus inflammatoire, mais il est aussi influencé par la procédure opératoire et le biomatériau utilisé. L'objectif est de limiter les indications du traitement endodontique aux situations où le complexe pulpo-dentinaire ne possède plus de capacité de réparation.

ont été effectués [13-15]. L'inconvénient majeur de ce matériau est le temps de prise (environ 2 heures) et la présence d'un agent radio-opacifiant, responsable de colorations postopératoires. Plus récemment, le matériau Biodentine™, ciment synthétique hautement purifié à base de silicate tricalcique, a été développé par le laboratoire français Septodont. Ce matériau est présenté sous la forme d'une poudre et d'un liquide, le mélange étant préparé avec un amalgamateur. La poudre est composée de silicate tricalcique, de carbonate de calcium et d'oxyde de zirconium, tandis que le liquide comprend de l'eau, du chlorure de calcium (comme accélérateur de prise) et un agent réducteur d'eau. Ce matériau possède un temps de prise court (12 minutes) et des propriétés physico-mécaniques améliorées par rapport à celles de MTA [16], le rendant plus facile d'utilisation dans les indications de préservation de la vitalité pulpaire.

Ce matériau présente une biocompatibilité similaire à celle du MTA et est capable, *in vitro*, d'induire la différenciation odontoblastique de cellules pulpaires et la minéralisation de leur matrice dans des modèles de cultures classiques [17-19]. *In vivo*, il stimule la formation d'une barrière minéralisée lorsqu'il est utilisé en coiffage direct sur la pulpe [13-20]. Il possède une bonne étanchéité avec la dentine et avec les systèmes adhésifs, malgré des propriétés d'adhérence limitées, l'indiquant comme substitut dentinaire utilisé en technique du sandwich fermé.

D'autres matériaux, dits silicates tricalciques, apparaissent régulièrement sur le marché, mais une attention particulière doit être apportée à leur composition (teneur en silicate tricalcique effective). Le Total Fill Putty® (FKG, La Chaux-de-Fonds, Suisse) est

un matériau qui trouve les mêmes indications que Biodentine™, sa mise en œuvre est plus aisée, il est prêt à l'emploi. Cependant ses propriétés mécaniques sont inférieures [21].

Les matériaux hybrides à base de résine de silicate de calcium, quant à eux, ne semblent pas indiqués pour le coiffage pulpaire direct. Il a été démontré, *in vitro*, que les biomatériaux de coiffage pulpaire sans résine avaient un effet sur la réponse anti-inflammatoire et stimulaient la capacité de régénération de la pulpe, contrairement à ceux contenant de la résine, comme TheraCal® (Bisico), qui modifient la réponse de la pulpe en réduisant le processus de régénération [22].

Sur le plan des propriétés, la bioactivité et l'étanchéité des biomatériaux restaurateurs sont les clés du succès de ces thérapeutiques conservatrices. Il est important d'assurer l'étanchéité d'une part de la plaie dentinaire ou pulpaire et d'autre part de la restauration sus-jacente par des thérapeutiques adhésives adaptées.

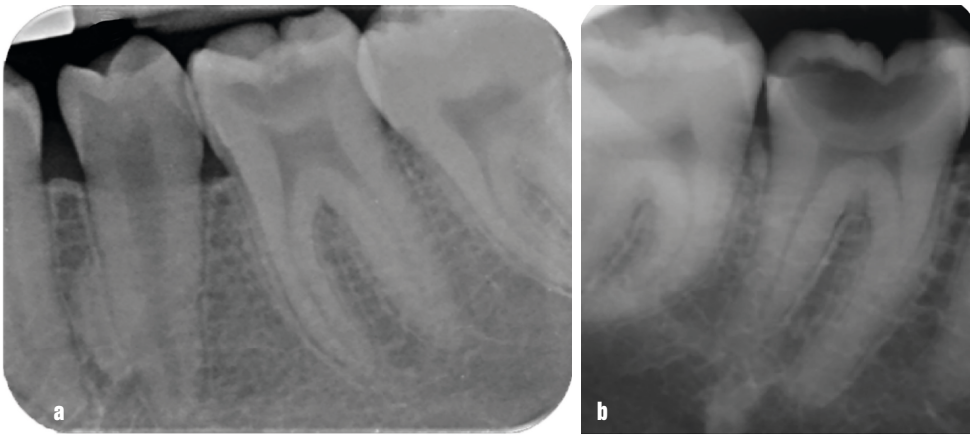
Fort des connaissances concernant les mécanismes biologiques impliqués dans la réparation pulpaire, le praticien prend conscience des potentialités du complexe pulpo-dentinaire ainsi que du bien-fondé des thérapeutiques de préservation de la vitalité pulpaire. Mais, à ce jour, dans la prise en charge quotidienne des patients, les thérapeutiques visant à conserver la vitalité pulpaire ne sont pas toujours reproductibles et le succès n'est pas certain. Une des raisons mises en avant par la littérature scientifique est la difficulté à poser le bon diagnostic pulpaire. Le manque d'informations sur le statut inflammatoire pulpaire demeure le maillon faible de cette stratégie de préservation de la vitalité pulpaire, ainsi que les conditions opératoires.



4. Face à une lésion carieuse profonde, l'évaluation de la santé pulpaire repose sur :

- les caractéristiques de la douleur rapportées par le patient;
- l'examen clinique visuel et tactile, auquel s'ajoutent les tests diagnostiques (par exemple tests de sensibilité, percussion, palpation);
- les examens complémentaires radiologiques.

L'objectif est d'estimer le plus précisément possible la sévérité de l'atteinte pulpaire afin de prendre la décision thérapeutique la plus adaptée et la plus conservatrice.



**5a.** Différence entre lésion carieuse profonde et lésion carieuse extrêmement profonde. Cliché radiographique rétroalvéolaire mettant en évidence sur cette 36 une lésion carieuse profonde (présence d'une épaisseur de dentine entre la lésion et la pulpe).

**b.** Cliché radiographique rétroalvéolaire mettant en évidence sur cette 47 une lésion carieuse extrêmement profonde (pas d'épaisseur de dentine entre la cavité carieuse et la pulpe).

## Évaluation clinique de l'inflammation pulpaire

Le diagnostic pulpaire s'établit grâce au recueil des éléments de l'anamnèse, de l'examen clinique et radiologique (fig. 4). L'anamnèse représente une étape essentielle de la démarche diagnostique et permet de caractériser la douleur du patient. L'examen clinique, par la combinaison des tests de sensibilité thermique et électrique, va permettre de localiser les symptômes et la dent causale, d'évaluer les caractéristiques de la douleur. Le test de percussion axiale renseignera sur une éventuelle inflammation ligamentaire pouvant signer une extension radiculaire de l'inflammation. Ces éléments vont permettre d'identifier une pulpe vivante dans 97 % des cas et une pulpe nécrosée dans 90 % des cas [23, 24].

L'examen radiographique (rétrocoronaire et rétroalvéolaire) est complémentaire mais essentiel au diagnostic et à la prise de décision clinique. En effet, il permettra d'évaluer la profondeur des lésions carieuses dentinaires, la proximité pulpaire, la présence ou non d'une épaisseur de dentine en regard de la cavité carieuse dentinaire, la présence d'une réaction de défense du complexe pulpo-dentinaire, ainsi que la présence d'une image radioclaire

périapicale en rapport avec une lésion inflammatoire périradiculaire d'origine endodontique (LIPOE). Concernant la profondeur de la carie (et par extension la localisation de l'infection), il a été montré que des niveaux significatifs de cellules inflammatoires ne sont pas observés dans la pulpe tant que la carie n'a pas pénétré jusqu'à environ 0,5 mm de la pulpe [25]. Récemment, la relation entre la profondeur de la lésion carieuse et l'inflammation de la pulpe a été examinée de manière histologique [26], en référence aux définitions des caries profondes et extrêmement profondes [6]. Les caries profondes étant définies comme des « lésions atteignant le quart interne » de la dentine, mais avec une zone de dentine dure ou ferme entre le fond de la lésion et la pulpe, ce qui est radiographiquement détectable. D'un autre côté, les lésions carieuses extrêmement profondes sont définies comme « des lésions pénétrant toute l'épaisseur de la dentine jusqu'à la pulpe » (fig. 5). Dans une étude de 68 dents non traitées, regroupées soit en caries profondes soit en caries extrêmement profondes, il a été démontré que dans les lésions profondes, les bactéries étaient généralement confinées à la dentine primaire, tandis que dans les lésions carieuses

extrêmement profondes, les bactéries étaient souvent en contact avec le tissu pulpaire et associées à la présence d'un infiltrat inflammatoire et d'une nécrose pulpaire partielle [26]. Pour appuyer cette observation, une récente étude clinique utilisant les deux classifications validées de la pulpite (AAE (*American Association of Endodontists*, 2013) et [27]), a démontré que non seulement les caries extrêmement profondes étaient plus susceptibles de générer une exposition pulpaire, mais qu'elles étaient également liées à une symptomatologie plus importante et à un échec ultérieur (à un an) après une procédure de pulpotomie partielle [28].

À la lumière de ces nouvelles données de recherche, il est surprenant que la profondeur de la carie et la localisation de l'infection aient été longtemps ignorées dans la démarche diagnostique, qui reposait jusqu'alors principalement sur les symptômes du patient. En effet, la pulpite est soit réversible, soit irréversible. La différence majeure entre ces deux états est la présence d'une douleur spontanée et d'intensité très importante, avec un test de sensibilité pulpaire exacerbé et rémanent dans la pulpite irréversible. Des études ont permis d'établir qu'il n'y a pas systématiquement de corrélation entre le diagnostic clinique, posé grâce aux différents éléments cliniques dont nous disposons, et le diagnostic histologique, qui reflète la réalité de l'inflammation pulpaire [29, 30].

L'étude récente de Domenico Ricucci [30] a ainsi démontré que les outils diagnostiques permettent de poser un diagnostic de pulpite réversible avec une fiabilité de 95 %, alors que leur fiabilité pour poser le diagnostic de pulpite irréversible est de 85 %. Par ailleurs, lorsqu'il s'agit de pulpite histologiquement irréversible, bien souvent, seuls les 2 mm les plus coronaires de la pulpe sont dans un état inflammatoire important, voire en nécrose, alors que le reste de la pulpe ne présente que peu de signes pathologiques.

Cliniquement, face à une pulpite réversible, le clinicien a tendance à mettre en œuvre les thérapies de préservation de la vitalité pulpaire, alors que la pulpite irréversible contre-indique cette possibilité conduisant à l'élimination de la totalité du tissu pulpaire par un traitement endodontique. Si l'on se réfère à l'étude de Ricucci, 1 dent sur 6 diagnostiquées en pulpite irréversible serait en réalité en pulpite réversible et aurait donc subi un traitement endodontique injustifié.

Comme dit précédemment, une deuxième classification des lésions pulpaires a été proposée en 2017 par Wolters et coll. [27]. Cette classification distingue les stades de pulpite initiale, légère, modérée et sévère, et permet entre autres de ne plus utiliser le terme de pulpite « irréversible » qui, jusqu'ici, condamnait la conservation de la vitalité pulpaire. En plus des éléments préopératoires nécessaires à la pose d'un diagnostic, d'autres paramètres peropératoires complètent la prise de décision. Il s'agit de l'examen de la plaie pulpaire. Cet examen vise à observer l'aspect du tissu pulpaire exposé - sain, hémorragique ou ulcéré - et ainsi d'apprécier son degré d'inflammation. Par ailleurs, la durée nécessaire à l'obtention de l'hémostase est aussi une donnée indispensable pour confirmer l'indication d'un coiffage ou d'une pulpotomie dans les cas favorables, ou indiquer la pulpectomie si la pulpe présente un état inflammatoire sévère.

Il est clair qu'à ce jour, devant les faiblesses de nos moyens diagnostiques, de nouveaux outils de diagnostic pulpaire doivent être développés. De plus, comme les antécédents de douleur du patient sont de nature subjective et que la pulpite irréversible peut être asymptomatique jusque dans 60 % des cas [31, 32], des mesures objectives de l'inflammation pulpaire telles que la profondeur de la lésion carieuse, ainsi que des indicateurs cliniques d'activité, comprenant le taux de progression, la couleur de la dentine, les tests de sensibilité (ESE, 2019) et les biomarqueurs inflammatoires pulpaires [33], devraient peut-être être utilisés comme base d'une classification plus fonctionnelle, s'apparentant aux mesures utilisées pour les douleurs orofaciales [34] ou en parodontologie [35] (fig. 6). Plusieurs équipes de chercheurs travaillent sur le sujet dans le monde. Parmi elles, une équipe du laboratoire URP 2496 cherche à déterminer le niveau de marqueurs inflammatoires compatible avec une réparation du complexe pulpo-dentinaire [36]. Ces travaux passent par la mise au point d'un modèle de pulpite chez l'animal et même si les résultats semblent encourageants, la route vers le développement de nouveaux outils diagnostiques reste très longue.

### **La prise de décision clinique : avis partagés et manque de consensus**

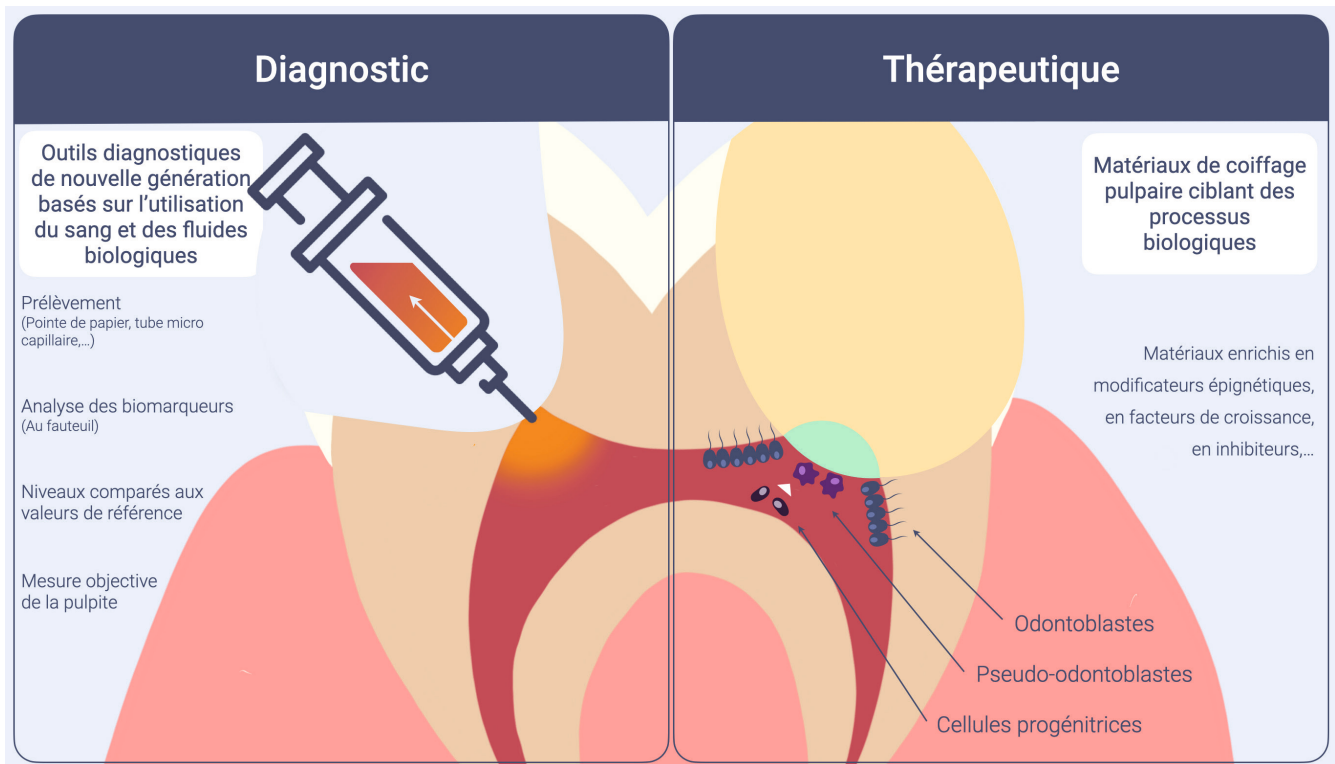
Bien que le sujet de la gestion des lésions carieuses profondes demeure au centre de nos préoccupations cliniques, la prise de décision reste source de division entre les groupes de chercheurs, les sociétés scientifiques et les praticiens.

D'une façon générale, le curetage sélectif doit être privilégié. En effet, les recommandations de l'ESE [6] reposent essentiellement sur les résultats positifs sur 5 ans d'essais cliniques randomisés, portant sur des techniques d'élimination sélective des caries en un et deux temps. Ces recommandations encouragent, en cas de carie profonde avec pulpite réversible, à éviter l'exposition pulpaire. Cette position est confortée par une étude histologique clinique récente, mettant en évidence une faible inflammation pulpaire dans les lésions carieuses profondes par rapport aux caries extrêmement profondes [26].

Pour les cas présentant une pulpite sévère, l'ESE recommande la pulpotomie complète en premier lieu, ou la pulpectomie si l'hémostase ne peut être obtenue. Cependant, de meilleures données prospectives randomisées à long terme sont nécessaires.

L'*American Association of Endodontists* (AAE) considère que l'élimination complète des caries est essentielle pour retirer les tissus infectés et visualiser l'état du tissu pulpaire sous grossissement lorsque des expositions pulpaires se produisent. En effet, les débris carieux résiduels compromettraient la réaction pulpaire et pourraient être à l'origine d'un diagnostic de pulpite plus sévère [37]. Ainsi, l'AAE limite ses recommandations à l'observation et à l'analyse de la pulpe.

A ce jour, il semblerait qu'il n'y ait pas de réel consensus quant à la prise de décision. Ceci peut s'expliquer par le manque d'études comparatives de haut niveau de preuve nécessaires pour soutenir la prise de décision et l'absence d'élaboration de lignes directrices dans ce domaine [38, 6].



**6.** Les perspectives d'amélioration de la prise en charge des lésions carieuses profondes sont suspendues au développement de nouvelles stratégies diagnostiques et thérapeutiques. De nouveaux outils de diagnostic basés sur les marqueurs moléculaires de l'inflammation, utilisables au fauteuil en temps réel, permettraient une évaluation précise et objective du niveau d'inflammation pulpaire et des capacités de réparation. De nouveaux matériaux bioactifs supérieurs aux produits existants ouvriraient de nouvelles possibilités pour aller plus loin dans la stimulation de la réparation du complexe pulpo-dentaire.

En résumé, à l'heure actuelle, malgré le volume de recherches récentes et la publication de plusieurs prises de position de leaders d'opinion, le consensus sur la meilleure façon de gérer les caries profondes et la pulpe exposée reste inexistant. À l'avenir, les moyens d'améliorer la prise de décision dans ce domaine sont d'une importance primordiale pour augmenter la cohérence et la prévisibilité des thérapeutiques de préservation de la vitalité pulpaire pour le bénéfice des patients.

### Procédures cliniques

Plusieurs études récentes ont confirmé des taux de succès élevés après élimination non sélective de la lésion carieuse, entraînant une exposition de la pulpe, et la mise en œuvre d'une procédure de préservation de vitalité pulpaire utilisant un ciment hydraulique à base de silicate de calcium, un microscope opératoire [39, 40] et/ou un agent désinfectant [41, 42]. En effet, il a été montré que le grossissement augmente les résultats et améliore la capacité de l'opérateur à inspecter et à gérer la pulpe endommagée [43]. Toutefois, le microscope opératoire est également beaucoup plus susceptible d'être utilisé par des praticiens spécialisés en endodontie, ce qui biaise les résultats des recherches portant sur cette variable. Ainsi, à ce jour, l'utilisation du grossissement n'a pas été étudiée en tant que variable indépendante dans les études sur la

gestion de l'exposition de la pulpe. Les compétences et l'expérience de l'opérateur peuvent également être une variable importante, déterminant le succès de la thérapeutique conservatrice.

En ce qui concerne la nécessité d'une élimination non sélective des caries, on a récemment beaucoup insisté sur l'importance de l'inspection visuelle du tissu pulpaire (AAE, 2021) pour évaluer les dommages causés à la pulpe, la présence ou non de nécrose dans la chambre pulpaire, l'hémorragie pulpaire [44], afin de compléter l'évaluation de l'inflammation pulpaire [45].

Toutefois, la nature du saignement [46] et/ou la couleur du sang sont des indicateurs subjectifs, moins fiables, du résultat du traitement. D'ailleurs, une étude récente conclut qu'un temps de saignement long n'est pas significativement lié à un échec de la pulpotomie partielle après 1 an [28]. Par conséquent, bien que la visualisation de la pulpe exposée soit proposée comme une raison suffisante pour retirer tout le tissu carieux et exposer la pulpe (ESE, 2019, AAE, 2021), elle n'est pas encore étayée par les études cliniques.

De manière générale, les thérapies conservatrices doivent être fondées sur des procédures d'asepsie strictes. La pose du champ opératoire, la désinfection du site, l'utilisation d'instruments stériles après l'élimination de la carie sont des mesures obligatoires pour que ces thérapeutiques aboutissent au succès.

### Curetage sélectif et coiffage pulpaire indirect

Dans les cas de lésions carieuses profondes, le curetage sélectif du tissu carié sera préconisé. Ce dernier consiste à éliminer partiellement le tissu carieux pour préserver le complexe dentino-pulpaire de l'exposition pulpaire, respecter les critères de dentisterie *a minima* et permettre l'apposition de dentine tertiaire.

L'*International Care Consensus Collaboration* distingue, en fonction de la situation clinique, l'élimination du tissu carieux en rapport avec la paroi pulpaire jusqu'à la dentine ramollie (*soft dentine*) ou jusqu'à la dentine ferme ou en texture de cuir (*firm dentine or leathery dentine*). Pour une lésion carieuse atteignant le tiers externe ou le tiers moyen sans risque d'effraction pulpaire, le curetage pourra se faire jusqu'à la dentine ferme. En revanche, en cas de lésion carieuse profonde, la dentine ramollie pourra être partiellement conservée [47].

Mais dans tous les cas, quand cette technique soit couronnée de succès, les parois cavitaires périphériques sur au moins 2 mm doivent être parfaitement curetées (curetage non sélectif) afin d'éliminer la charge bactérienne et d'assurer l'étanchéité de la restauration adhésive sus-jacente.

Le curetage sélectif peut s'effectuer en un ou deux temps. Le curetage en deux temps, que l'on appelle également curetage par étapes ou *stepwise*, consiste, lors d'une première visite, à cureter le tissu carié sur les parois marginales et à laisser intentionnellement de la dentine ramollie en regard des cornes pulpaires. Un matériau provisoire, à base de silicate de calcium ou d'hydroxyde de calcium recouvert de ciment verre ionomère, est mis en place jusqu'à la seconde visite, 2 à 6 mois plus tard [48]. La première étape vise donc à convertir l'activité lésionnelle en un environnement arrêté ou à progression lente.

Lors de la seconde visite, on élimine la totalité du tissu jusqu'à la dentine ferme, avant de mettre en place une restauration d'usage. Plusieurs études [49-51] ont démontré que cette technique permettait de réduire considérablement les risques d'exposition pulpaire, de symptômes postopératoires et d'échecs des thérapeutiques de préservation de la vitalité pulpaire, par rapport au curetage total. Le deuxième temps du curetage par étapes enregistre tout de même un risque d'exposition pulpaire entre 15 et 20 % (contre 35 % en cas de curetage total) (fig. 7 et 8).

Afin de pallier ce risque toujours présent d'exposition pulpaire, il a été proposé le curetage sélectif en un temps qui consiste à garder le tissu carié ramolli, comme précédemment, mais à mettre en place un matériau bioactif à base de silicate tricalcique et à réaliser la restauration d'usage directement.

Le coiffage pulpaire indirect permet de supprimer le stimulus douloureux lorsqu'il est présent, stopper l'activité de la lésion carieuse, prévenir une nouvelle attaque bactérienne et protéger le complexe pulpo-dentinaire en stimulant le processus de réparation de la pulpe.

### Coiffage pulpaire direct

Le principe de cette thérapeutique est de traiter la plaie pulpaire dans un environnement tissulaire le plus sain possible, en limitant au maximum la contamination bactérienne. Le coiffage pulpaire

direct doit être effectué après un curetage non sélectif de la dentine cariée ayant conduit à une exposition pulpaire. Il ne doit donc être effectué que si la dentine environnante est saine et que la pulpe exposée ne présente aucun signe d'infection. Si ces conditions ne sont pas remplies, des procédures progressivement plus invasives sont indiquées jusqu'à ce que l'aspect clinique indique l'absence d'infection de la dentine et de la plaie pulpaire. Cette stratégie, que l'on pourrait calquer sur la terminologie de « gradient thérapeutique », permettra au clinicien de distinguer les cas où des procédures de pulpotomie peuvent être indiquées de ceux dans lesquels la dégradation de la pulpe est tellement importante que la pulpectomie constitue le traitement de choix.

Après le curetage sélectif de la dentine cariée, s'il y a exposition pulpaire, l'hémostase doit être obtenue avec des boulettes de coton imbibées idéalement d'hypochlorite de sodium à 1 % ou de chlorhexidine 0,2-2 % (fig. 9). En cas d'exposition pulpaire en dentine saine (classe I), la plaie pulpaire peut être nettoyée à l'aide de sérum physiologique stérile.

Il n'existe pas réellement de consensus concernant la solution à utiliser. Récemment, un essai randomisé portant sur une centaine de patients avec une faible symptomatologie ayant reçu un traitement de coiffage pulpaire direct, a évalué l'effet à court terme de l'hypochlorite de sodium ou du sérum physiologique sur la douleur postopératoire et l'échec précoce [52], et à plus long terme, après 1 an [33]. L'hypochlorite de sodium à 2,5 % a considérablement réduit la douleur postopératoire et l'échec précoce.

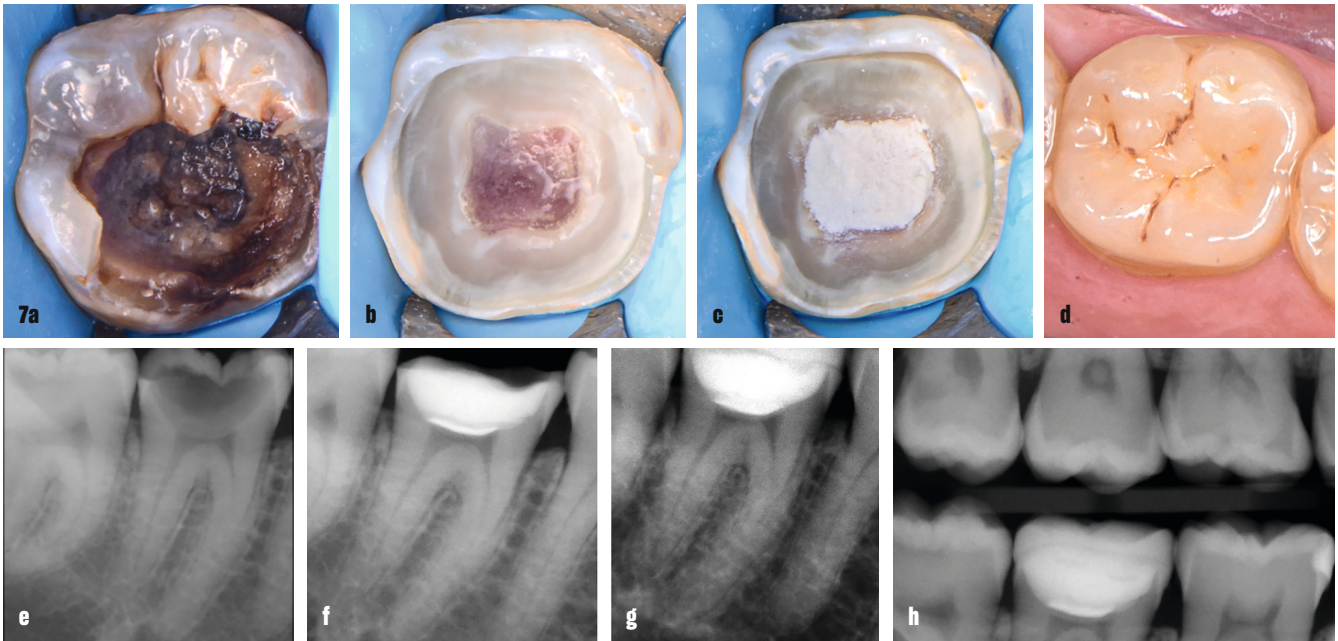
Un an après le coiffage pulpaire direct, les dents, dont la plaie pulpaire avait été traitée avec de l'hypochlorite de sodium, étaient significativement associées à un succès accru. Ces résultats montrent donc que l'élimination des bactéries est associée à un succès; cela étant similaire à l'effet que les pulpotomies, partielle [53] et complète [54], ont sur la réduction de la charge bactérienne au niveau de la pulpe camérale.

Après l'obtention rapide de l'hémostase, le biomatériau de coiffage peut être mis en place sans compression sur la plaie pulpaire, préférentiellement à l'aide d'un applicateur stérile (Porte-Dycal, MTA Gun, embout en Téflon pour porte-amalgame...). Le biomatériau de coiffage recommandé appartient à la famille des ciments hydrauliques à base de silicates calciques (MTA, Biodentine™, TotalFill®...) (fig. 9).

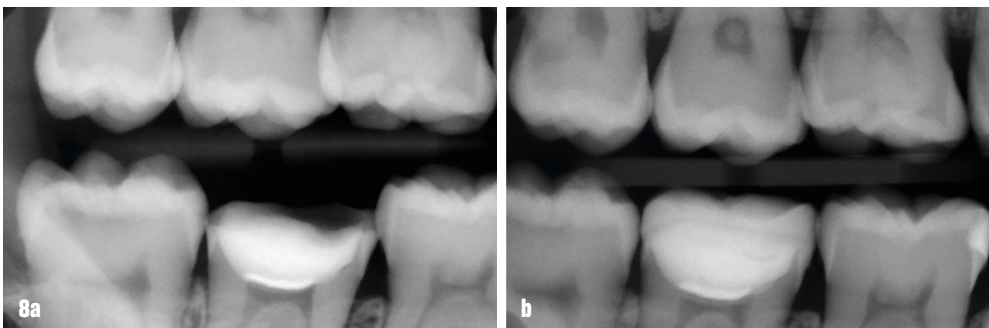
En fonction du matériau sélectionné, une restauration adhésive d'usage pourra être réalisée immédiatement. A défaut, le site coiffé sera protégé par une obturation temporaire étanche avec des ciments verres ionomères. Si le matériau utilisé est la Biodentine™, il peut assurer conjointement le matériau de coiffage et la restauration temporaire. En effet, même si l'obturation définitive peut être réalisée le même jour à l'issue des 12 minutes de prise, il semble préférable de différer cette dernière afin d'assurer une prise optimale du matériau. L'utilisation d'adhésif avec mordantage et rinçage semble préférable [55, 56].

Un suivi clinique et radiographique est mis en place pour évaluer le succès ou non de la thérapeutique.

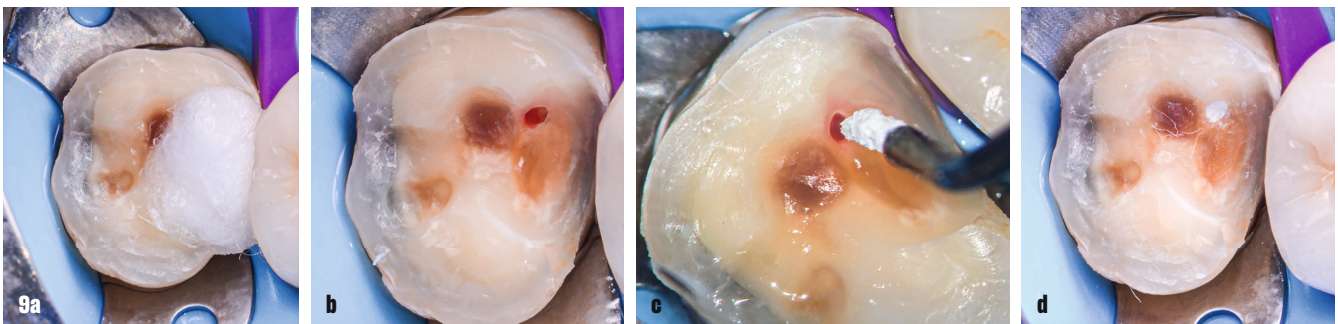




**7a.** Patient présentant des douleurs intermittentes d'intensité faible à modérée. A l'examen clinique, la lésion carieuse sur 46 est volumineuse. Le test de sensibilité pulpaire est positif avec une rémanence inférieure à 20 secondes. Diagnostic : pulpite réversible ou pulpite légère. **b.** Mise en œuvre d'un curetage sélectif du tissu carieux. La paroi pulpaire de la cavité est laissée sans recherche d'une effraction pulpaire, les autres parois sont indemnes de tissu carieux. **c.** Mise en place d'un ciment à base de silicate de calcium (ici le TotalFill®, FKG, Suisse). **d.** La dent une fois la restauration d'usage mise en place. **e.** La radiographie préopératoire montrant la lésion carieuse extrêmement profonde qui aurait dû indiquer la recherche de l'effraction pulpaire et une pulpotomie. Mais la vue clinique de la cavité montre un fond de cavité dentinaire qui pourrait être de la dentine réactionnelle. Il a donc été décidé de préserver cette couche de dentine. **f.** On note la présence du matériau de coiffage qui apparaît bien plus radio-opaque que le matériau de restauration. **g. eth.** Les clichés radiographiques de contrôle à 2 ans.

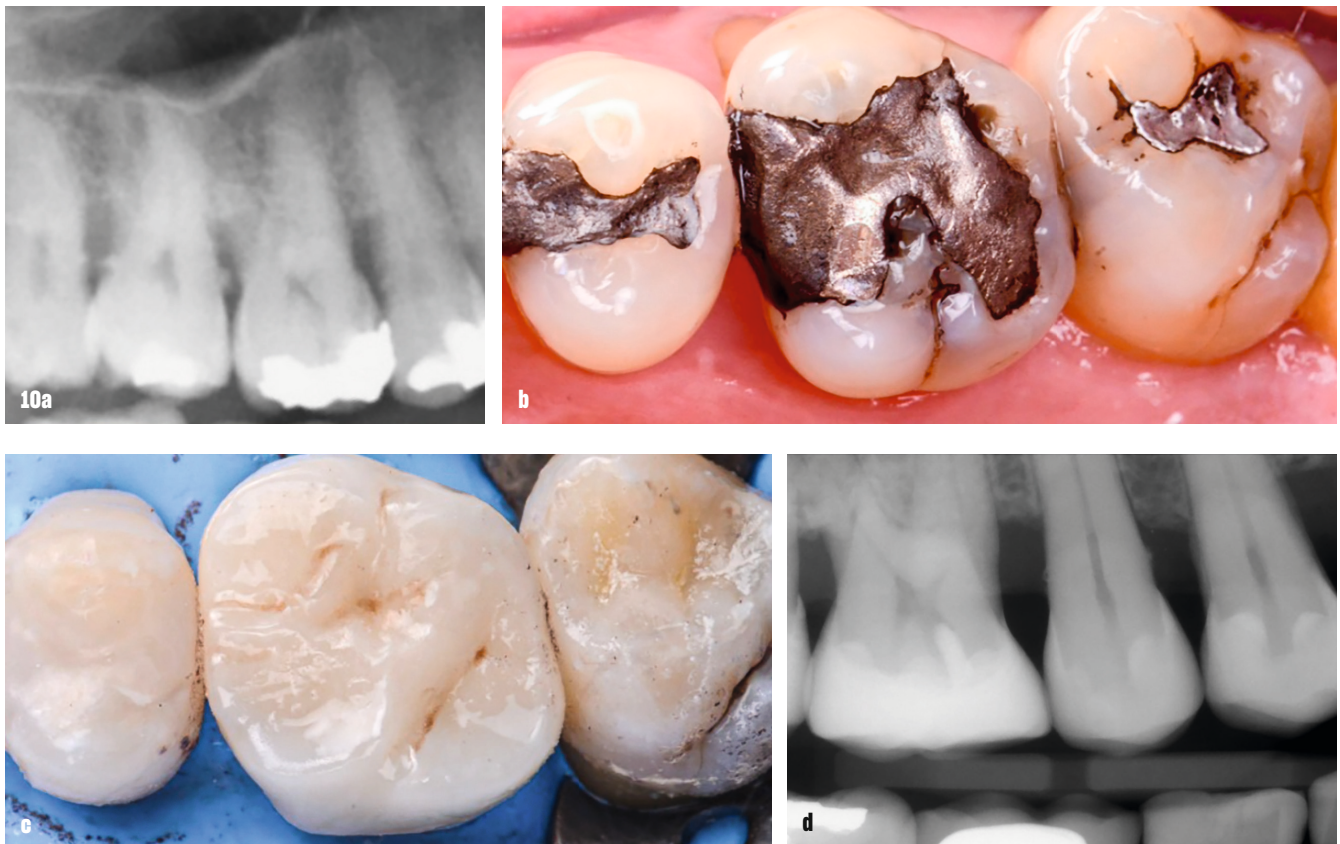


**8a.** Radiographie postopératoire immédiate. **b.** Radiographie postopératoire après 2 ans, permettant de mieux objectiver la synthèse de dentine réactionnelle.



**9a.** Mise en œuvre d'un coiffage pulpaire direct. Exposition accidentelle pendant la phase de curetage de la lésion carieuse sur 16. Lorsque l'effraction pulpaire est objectivée, désinfection de la cavité et recherche de l'hémostase avec une boulette de coton imbibée d'hypochlorite de sodium 2,5 %. **b.** Hémostase. **c.** Mise en place du biomatériau de coiffage au niveau de la plaie pulpaire (ici un ciment de la famille des silicates calciques, TotalFill®, FKG, Suisse). **d.** Matériau parfaitement mis en place et élimination des excès. La restauration d'usage peut être réalisée. *Courtoisie du Dr Atlan Antony.*





**10a et b.** Pulpotomie partielle. 16 présente un amalgame volumineux et une lésion carieuse secondaire. Après dépose et curetage de la lésion, l'exposition pulpaire a été recherchée. Une pulpotomie partielle a été réalisée. **d.** La plaie pulpaire a été coiffée avec du Totalfill® (objectivable radiographiquement). **c.** Puis la dent a été restaurée par un overlay. *Courtoisie du Dr Atlan Antony.*

## Pulpotomie partielle

Le but ultime de la pulpotomie partielle est d'obtenir une plaie chirurgicale propre dans du tissu conjonctif pulpaire non infecté entouré de dentine non infectée minéralisée. Si ces objectifs sont atteints, le nouvel environnement devrait être propice à la guérison. La justification de cette procédure est double : cette procédure sera indiquée si l'hémostase ne peut être obtenue dans un bref délai (plus de 2 minutes). La prise de décision sera donc peropératoire. Par ailleurs, la décision peut être aussi préopératoire. En effet, d'un point de vue histologique, en présence de lésion carieuse extrêmement profonde, il se peut que l'inflammation dissémine au sein de la pulpe camérale. Ainsi, il paraît souhaitable que la pulpe en contact avec la partie profonde de la lésion carieuse soit éliminée pour faciliter l'éviction physique du biofilm et des tissus pulpaire superficiels enflammés pouvant également contenir des micro-organismes [57-59].

La différence technique avec le coiffage direct réside dans le fait que le matériau est maintenu sur une hauteur de quelques millimètres dans l'espace pulpaire, permettant de disposer d'une surface et d'un volume suffisants pour le biomatériau de coiffage pulpaire.

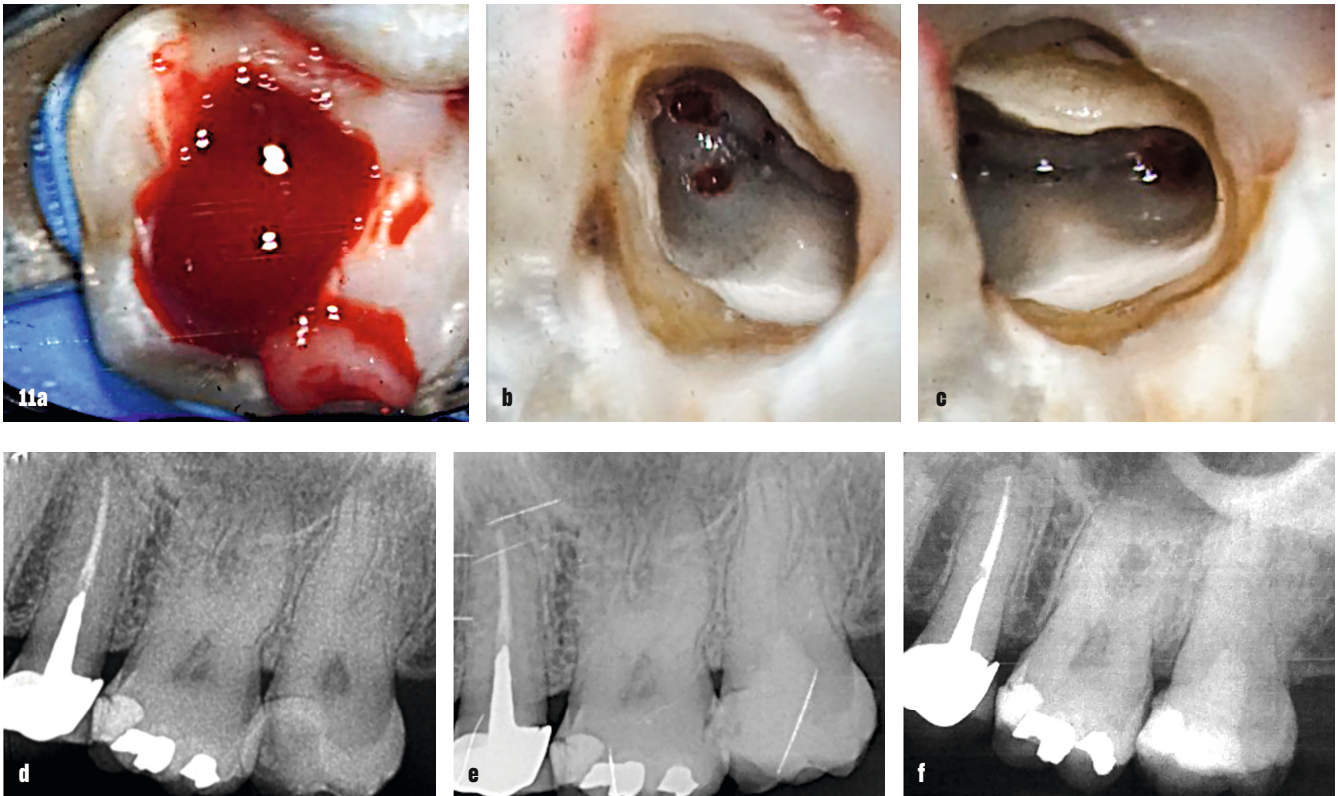
La restauration coronaire est ensuite réalisée comme décrit plus haut, et le suivi est instauré (fig. 10).

Si le degré d'inflammation pulpaire a été sous-évalué, la pulpe est plus hémorragique, du fait de la congestion pulpaire, et l'hémostase sera longue à obtenir, ce qui ne semble plus être préjudiciable pour le pronostic de la pulpotomie partielle.

## Pulpotomie complète

Comme expliqué plus haut, cette procédure peut être indiquée directement après la pose du diagnostic.

La procédure clinique est similaire à la pulpotomie partielle, excepté que la totalité de la masse pulpaire camérale est éliminée jusqu'aux orifices canaux pour assurer l'élimination complète de toute la pulpe inflammatoire. Le tissu pulpaire radulaire est alors coiffé à l'aide d'un matériau de coiffage après obtention de l'hémostase (fig. 11). Cette procédure offre une meilleure chance d'éliminer le tissu enflammé qu'une pulpotomie partielle. L'hémostase est recherchée avec l'application d'une boulette de coton imbibée d'hypochlorite de sodium entre 1 et 2,5 % pendant 2 minutes. Cette étape peut être répétée plusieurs fois. Une fois l'hémostase obtenue, le matériau de coiffage d'une épaisseur minimale (selon les



**11a.** Pulpotomie complète sur une 27 présentant une pulpite irréversible : saignement à l'ouverture de la chambre pulpaire. **b et c.** Obtention de l'hémostase au niveau de toutes les entrées canalaires. **d.** Radiographie rétroalvéolaire préopératoire. **e.** Radiographie post-opératoire immédiate après mise en place de Biodentine<sup>TM</sup> qui a servi comme matériau de coiffage et matériau de restauration temporaire. **f.** Radiographie post-opératoire à 3 mois. Evaluation clinique : aucune symptomatologie, test au froid négatif, test palpation négatif, test percussion négatif. Poches physiologiques. Mobilité I.

indications du fabricant) est posé sur les orifices canalaires. Après sa prise, le matériau de restauration transitoire ou d'usage peut être mis en place. Si la Biodentine<sup>TM</sup> est le matériau de coiffage choisi, elle peut être utilisée également comme matériau de restauration coronaire transitoire et le suivi est mis en place.

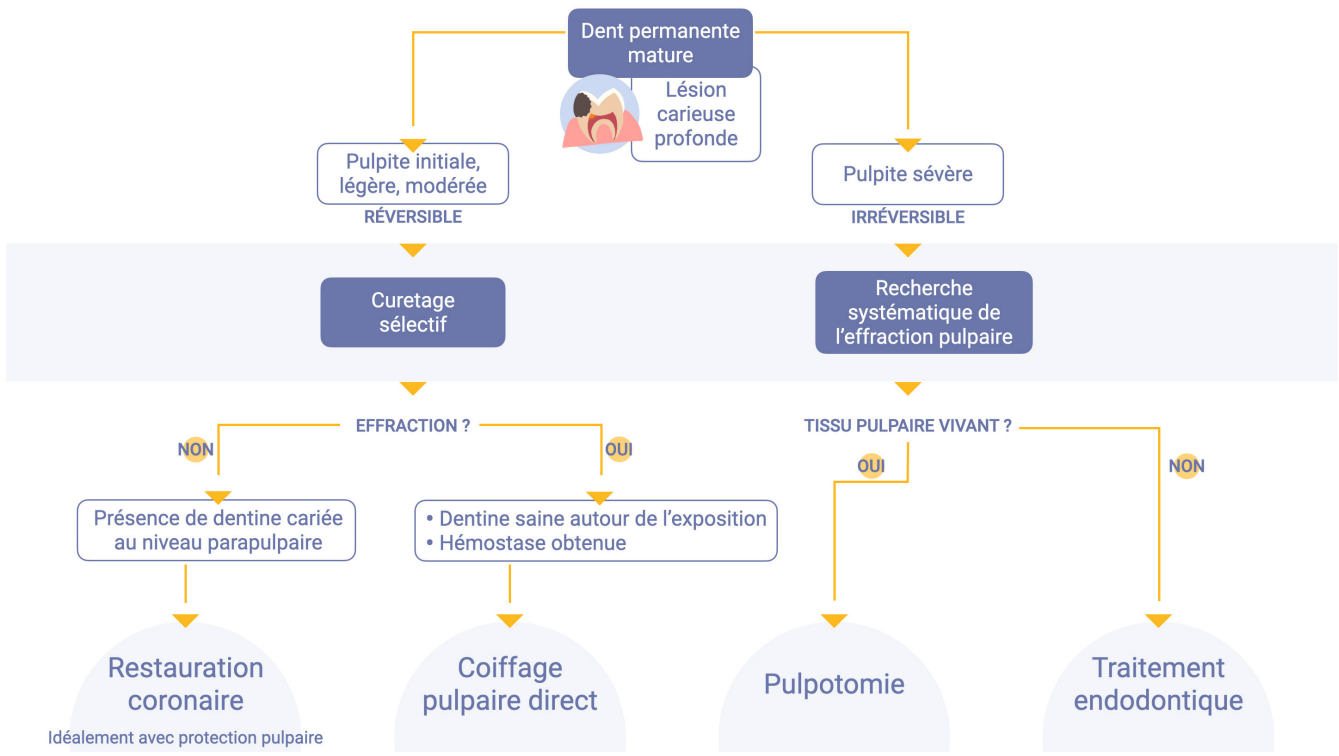
## Importance du suivi

Le suivi est indispensable, d'une part pour vérifier la disparition des signes cliniques initiaux, la non apparition de nouveaux signes cliniques, la formation d'un pont minéralisé, objectivable sur une radiographie après six semaines et, d'autre part, pour intercepter les complications pulpaire (présence d'une LIPOE). L'examen de contrôle comprend les différents tests de palpation, de percussion et de sensibilité (test électrique) et doit avoir lieu après 3 à 4 semaines, 3 mois, 6 mois et 12 mois, puis une fois par an pendant les 4 premières années. Les tests de sensibilité peuvent ne pas être probants. En effet, les dents ayant subi une pulpotomie camérale ne répondront pas forcément aux tests de sensibilité pulpaire. Ceci n'indique en aucun cas un échec de la thérapeutique. C'est aussi la raison pour laquelle des radiographies de contrôle doivent être

régulièrement réalisées pour la détection de radioclartés apicales. Pour les dents immatures, elles permettent de s'assurer de la poursuite du développement radiculaire.

La présence de sensibilités à 48 heures n'est pas rédhibitoire pour le succès de la thérapeutique. D'ailleurs, une prescription d'anti-inflammatoires non stéroïdiens est recommandée. Toutefois, la présence et la persistance de douleurs intenses à 48 heures objectivent une inflammation pulpaire beaucoup plus intense avec une inflammation de la pulpe radiculaire et indiquent un échec « immédiat ». Cet échec est causé par une mauvaise évaluation de l'état inflammatoire pulpaire, qui a probablement été sous-évalué (à condition d'exclure un acte iatrogène ou une contamination peropératoire). En effet, la résolution de l'inflammation fait appel à une balance entre la destruction et la réparation des tissus. Si l'intensité de l'inflammation est très importante, elle va inhiber la réparation et aboutir à la destruction tissulaire. Cet échec de la thérapeutique de préservation de la vitalité pulpaire doit orienter vers la pulpectomie.

Un des intérêts du suivi sur le long terme de ces thérapeutiques est de s'assurer de la non apparition d'une LIPOE. La survenue d'une telle lésion constitue un échec qu'on qualifierait de « tardif ou



12. Diagramme d'aide à la prise de décision, illustrant les recommandations pour les thérapeutiques de préservation pulpaire dans la gestion des caries profondes.

retardé », qui serait causé par un manque d'étanchéité du matériau de coiffage et/ou du matériau de restauration coronaire ou encore une erreur opératoire.

## Pronostic

Bien que l'état inflammatoire de la pulpe soit le facteur pronostique le plus déterminant pour le succès des thérapeutiques de préservation de la vitalité pulpaire [60], d'autres facteurs sous le contrôle de l'opérateur, tels que la désinfection de la plaie pulpaire [33], le choix du matériau de coiffage [41] et l'utilisation d'aides visuelles [43], peuvent également affecter les résultats du traitement.

Cushley et coll. [61] ont mis en évidence dans une récente étude un petit nombre d'essais cliniques non randomisés, de qualité moyenne à médiocre, et 5 essais randomisés présentant un risque élevé de biais [62, 63, 42, 64, 65]. D'après ces études, le taux de succès (cumulé) du coiffage pulpaire avec les ciments à base silicate calcique était de plus de 80 % à 3 ans. Ce taux chute à 59 % avec l'hydroxyde de calcium [61].

Pour la prise en charge de l'exposition carieuse associée à des signes et symptômes indiquant une pulpite irréversible, le coiffage pulpaire n'est pas considéré comme le traitement de choix [66]. En effet, dès lors que le processus carieux progresse dans la pulpe,

un infiltrat bactérien intrapulpaire est présent [26, 30]. Ainsi, l'élimination du tissu pulpaire par une pulpotomie partielle ou complète est indiquée.

Une revue systématique récente a analysé l'efficacité de la pulpotomie camérale sur les dents présentant des signes et des symptômes de pulpite irréversible [67]. Les auteurs ont mis en évidence que de nombreuses études ne décrivaient pas avec précision le diagnostic préopératoire et que l'essentiel des preuves se présentait sous la forme d'études non comparatives [68, 69]. Les auteurs ont tout de même montré un taux de succès clinique et radiographique élevé pour la pulpotomie complète sur les dents présentant des signes et symptômes de pulpite irréversible de 95 % à 12 mois, puis réduit à 88 % après 36 mois de suivi. Concernant les douleurs postopératoires dans les jours et les semaines suivant le traitement, les résultats après pulpotomie et traitement endodontique étaient équivalents [70].

Il a également été montré que la pulpotomie partielle peut être efficace sur les dents présentant des signes et des symptômes indiquant une pulpite irréversible avec des taux de réussite de 83 % à 2 ans avec les ciments à base de silicate calcique [53]. Cependant, la récente étude de Careddu et Duncan, en 2021, a mis en évidence un taux de succès significativement réduit (par rapport à la pulpotomie camérale) pour la pulpotomie partielle à 1 an dans le groupe pulpite sévère (selon la classification de Wolters) [28].



## Conclusion

Préserver la vitalité pulpaire et promouvoir les stratégies thérapeutiques fondées sur la biologie pulpaire représentent le fer de lance de la gestion des caries profondes. En premier lieu, les stratégies de curetage sélectif doivent être mises en œuvre pour éviter l'exposition pulpaire. Pour des cas cliniques avec présence d'une pulpite « irréversible », le curetage sera complet et l'effraction pulpaire recherchée. Une thérapeutique de préservation de la vitalité pulpaire sera mise en œuvre dans les conditions favorables indispensables à son succès (fig. 12). Bien que ces recommandations soient basées sur une multitude de publications dans les domaines de l'endodontie régénérative et de la biologie pulpaire, il demeure un manque évident d'outils diagnostiques de

nouvelle génération, de biomatériaux et/ou biomolécules ciblées ou d'études comparatives de haut niveau examinant les nouvelles modalités de traitement telles que la revitalisation et pulpotomie complète pour les dents présentant une pulpite « irréversible ». Mais finalement, le plus inquiétant, car au détriment de l'intérêt du patient, malgré de multiples recommandations, c'est le manque de consensus clair sur la meilleure façon de gérer les situations cliniques quotidiennes que représentent les caries profondes ou une pulpe exposée. ■

**CORRESPONDANCE**  
tchilalo.boukpepsi@aphp.fr

## Prolongez votre lecture : découvrez nos vidéos en ligne !

SCANNEZ CE QR CODE AVEC VOTRE SMARTPHONE ET VISIONNEZ LA VIDÉO CORRESPONDANTE...



VIDÉO 1 : PRÉSERVATION DE LA QUALITÉ PULPAIRE.  
PEUT-ON ÊTRE SÛR DE SA DÉCISION ?

<https://bit.ly/3CDade8>

## Bibliographie

1. Asgary S, Fazlyab M, Sabbagh S, Eghbal MJ. Outcomes of different vital pulp therapy techniques on symptomatic permanent teeth : a case series. *Iran J Endod* 2014;9(4):295-300.
2. Glass RL, Zander HA. Pulp healing. *J Dent Res* 1949;28(2):97-107.
3. Nyborg H. Healing processes in the pulp on capping; a morphologic study; experiments on surgical lesions of the pulp in dog and man. *Acta Odontol Scand* 1955;13 (suppl.16):i-130.
4. Baume LJ, Holz J. Long term clinical assessment of direct pulp capping. *Int Dent J* 1981;31(4):251-260.
5. Haskell EW, Stanley HR, Chellemi J, Stringfellow H. Direct pulp capping treatment : a long-term follow-up. *J Am Dent Assoc* 1978;97(4):607-612.
6. European Society of Endodontology developed by Duncan HF, Galler KM, Tomson PL, Simon S, El-Karim I, Kundzina R, Krastil G, Dammaschke T, Fransson H, Markvart M, Zehnder M, Bjorndal L. European Society of Endodontology position statement : Management of deep caries and the exposed pulp. *Int J Endod* 2019;52(7):923-934.
7. Tanner ACR, Kressirer CA, Rothmiller S, Johansson I, Chalmers NI. The Caries Microbiome : Implications for Reversing Dysbiosis. *Adv Dent Res* 2018;29(1):78-85.
8. Segura-Egea JJ, Martin-Gonzalez J, Castellanos-Cosano L. Endodontic medicine : connections between apical periodontitis and systemic diseases. *Int J Endod* 2015;48(10):933-951.
9. Peng X, Cheng L, You Y, Tang C, Ren B, Li Y, Xu X, Zhou X. Oral microbiota in human systematic diseases. *Int J Oral Sci* 2022;14(1):14.
10. Staquet MJ, Carrouel F, Keller JF, Baudouin C, Msika P, Bleicher F, Kufer TA, Farges JC. Pattern-recognition receptors in pulp defense. *Adv Dent Res* 2011;23(3):296-301.
11. da Rosa WLO, Piva E, da Silva AF. Disclosing the physiology of pulp tissue for vital pulp therapy. *Int J Endod* 2018;51(8):829-846.
12. Min KS, Yang SH, Kim EC. The combined effect of mineral trioxide aggregate and enamel matrix derivative on odontoblastic differentiation in human dental pulp cells. *J Endod* 2009;35(6):847-851.
13. Tran XV, Gorin C, Willig C, Baroukh B, Pellat B, Decup F, Opsahl Vital S, Chaussain C, Boukpepsi T. Effect of a calcium-silicate-based restorative cement on pulp repair. *J Dent Res* 2012;91(12):1166-1171.
14. Holland R, de Souza V, Murata SS, Nery MJ, Bernabe PF, Otoboni Filho JA, Dezan Junior E. Healing process of dog dental pulp after pulpotomy and pulp covering with mineral trioxide aggregate or Portland cement. *Braz Dent J* 2001;12(2):109-113.
15. Bortoluzzi EA, Broon NJ, Bramante CM, Felipe WT, Tanomaru Filho M, Esberard RM. The influence of calcium chloride on the setting time, solubility, disintegration, and pH of mineral trioxide aggregate and white Portland cement with a radiopacifier. *J Endod* 2009;35(4):550-554.
16. Villat C, Tran XV, Pradelle-Plasse N, Ponthiaux P, Wenger F, Grosgeat B, Colon P. Impedance methodology : A new way to characterize the setting reaction of dental cements. *Dent Mater* 2010;26(12):1127-1132.
17. Laurent P, Camps J, De Meo M, Dejou J, About I. Induction of specific cell responses to a Ca(3)SiO(5)-based posterior restorative material. *Dent Mater* 2008;24(11):1486-1494.
18. Zanini M, Sautier JM, Bernal A, Simon S. Biodentine™ induces immortalized murine pulp cell differentiation into odontoblast-like cells and stimulates biomineralization. *J Endod* 2012;38(9):1220-1226.
19. Daltoe MO, Paula-Silva FW, Faccioli LH, Gatton-Hernandez PM, De Rossi A, Bezerra Silva LA. Expression of Mineralization Markers during Pulp Response to Biodentine™ and Mineral Trioxide Aggregate. *J Endod* 2016;42(4):596-603.
20. Kim J, Song YS, Min KS, Kim SH, Koh JT, Lee BN, Chang HS, Hwang IN, Oh WM, Hwang YC. Evaluation of reparative dentin formation of ProRoot MTA, Biodentine™ and BioAggregate using micro-CT and immunohistochemistry. *Restor Dent Endod* 2016;41(1):29-36.
21. Bayraktar K, Basturk FB, Turkaydin D, Gunday M. Long-term effect of acidic pH on the surface microhardness of ProRoot mineral trioxide aggregate, Biodentine™, and total fill root repair material putty. *Dent Res J (Isfahan)* 2021;18:2.

22. Giraud T, Jeanneau C, Rombouts G, Bakhtiar H, Laurent P, About I. Pulp capping materials modulate the balance between inflammation and regeneration. *Dent Mater* 2019;35(1):24-35.
23. Weisleder R, Yamauchi S, Caplan DJ, Trope M, Teixeira FB. The validity of pulp testing : a clinical study. *J Am Dent Assoc* 2009;140(8):1013-17.
24. Mejare IA, Axelsson S, Davidson T, Frisk F, Hakeberg M, Kvist T, Norlund A, Petersson A, Portenier I, Sandberg H, Tranaeus S, Bergenholtz G. Diagnosis of the condition of the dental pulp : a systematic review. *Int J Endod* 2012;45(7):597-613.
25. Reeves R, Stanley HR. The relationship of bacterial penetration and pulpal pathosis in carious teeth. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol* 1966;22(1):59-65.
26. Demant S, Dabelsteen S, Bjorndal L. A macroscopic and histological analysis of radiographically well-defined deep and extremely deep carious lesions : carious lesion characteristics as indicators of the level of bacterial penetration and pulp response. *Int J Endod* 2021;54(3):319-330.
27. Wolters WJ, Duncan HF, Tomson PL, Karim IE, McKenna G, Dorri M, Stangvaltaite L, van der Sluis LWM. Minimally invasive endodontics : a new diagnostic system for assessing pulpitis and subsequent treatment needs. *Int J Endod* 2017;50(9):825-829.
28. Careddu R, Duncan HF. A prospective clinical study investigating the effectiveness of partial pulpotomy after relating preoperative symptoms to a new and established classification of pulpitis. *Int J Endod* 2021;54(12):2156-2172.
29. Dummer PM, Hicks R, Huws D. Clinical signs and symptoms in pulp disease. *Int J Endod* 1980;1(1):27-35.
30. Ricucci D, Loghin S, Siqueira JF, Jr. Correlation between clinical and histologic pulp diagnoses. *J Endod* 2014;40(12):1932-1939.
31. Michaelson PL, Holland GR. Is pulpitis painful? *Int J Endod* 2002;35(10):829-832.
32. Seltzer S, Bender IB, Ziont M. The Dynamics of Pulp Inflammation : Correlations between Diagnostic Data and Actual Histologic Findings in the Pulp. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol* 1963;16:969-977.
33. Ballal NV, Duncan HF, Wiedemeier DB, Rai N, Jalan P, Bhat V, Belle VS, Zehnder M. MMP-9 Levels and NaOCl Lavage in Randomized Trial on Direct Pulp Capping. *J Dent Res* 2022;101(4):414-419.
34. Pigg M, Nixdorf DR, Law AS, Renton T, Sharav Y, Baad-Hansen L, List T. New International Classification of Orofacial Pain : What Is in It For Endodontists? *J Endod* 2021;47(3):345-357.
35. Papapanou PN, Sanz M, Buduneli N, Dietrich T, Feres M, Fine DH, Flemmig TF, Garcia R, Giannobile WV, Graziani F, Greenwell H, Herrera D, Kao RT, Kerschull M, Kinane DF, Kirkwood KL, Koehler T, Kornman KS, Kumar PS, Loos BG, Machtei E, Meng H, Mombelli A, Needleman I, Offenbacher S, Seymour GJ, Teles R, Tonetti MS. Periodontitis : Consensus report of workgroup 2 of the 2017 World Workshop on the Classification of Periodontal and Peri-Implant Diseases and Conditions. *J Clin Periodontol* 2018;45 Suppl20:S162-S170.
36. Minic S, Florimond M, Sadoine J, Valot-Salengr A, Chausain C, Renard E, Boukpepsi T. Evaluation of Pulp Repair after Biodentine™ Full Pulpotomy in a Rat Molar Model of Pulpitis. *Biomedicines* 2021;9(7).
37. AAE Position Statement on Vital Pulp Therapy. *J Endod* 2021;47(9):1340-1344.
38. Duncan HF, Chong BS, Del Fabbro M, El-Karim I, Galler K, Kirkevang LL, Krastl G, Peters OA, Segura Egea JJ, Kerschull M. The development of European Society of Endodontology S3-level guidelines for the treatment of pulpal and apical disease. *Int J Endod* 2021;54(5):643-645.
39. Bogen G, Kim JS, Bakland LK. Direct pulp capping with mineral trioxide aggregate : an observational study. *J Am Dent Assoc* 2008;139(3):305-315;quiz305-315.
40. Marques MS, Wesselink PR, Shemesh H. Outcome of Direct Pulp Capping with Mineral Trioxide Aggregate : A Prospective Study. *J Endod* 2015;41(7):1026-1031.
41. Mente J, Hufnagel S, Leo M, Michel A, Gehrig H, Panagidis D, Saure D, Pfefferle T. Treatment outcome of mineral trioxide aggregate or calcium hydroxide direct pulp capping : long-term results. *J Endod* 2014;40(11):1746-1751.
42. Kundzina R, Stangvaltaite L, Eriksen HM, Kerosuo E. Capping carious exposures in adults : a randomized controlled trial investigating mineral trioxide aggregate versus calcium hydroxide. *Int J Endod* 2017;50(10):924-932.
43. Khalighinejad N, Aminoshariae A, Kulild JC, Williams KA, Wang J, Mickel A. The Effect of the Dental Operating Microscope on the Outcome of Nonsurgical Root Canal Treatment : A Retrospective Case-control Study. *J Endod* 2017;43(5):728-732.
44. Ricucci D, Siqueira JF, Jr., Li Y, Tay FR. Vital pulp therapy : histopathology and histobacteriology-based guidelines to treat teeth with deep caries and pulp exposure. *J Dent* 2019;86:41-52.
45. Taha NA, About I, Sedgley CM, Messer HH. Conservative Management of Mature Permanent Teeth with Carious Pulp Exposure. *J Endod* 2020;46(9S):S33-S41.
46. Matsuo T, Nakanishi T, Shimizu H, Ebisu S. A clinical study of direct pulp capping applied to carious-exposed pulps. *J Endod* 1996;22(10):551-556.
47. Schwendicke F, Frencken JE, Bjorndal L, Maltz M, Manton DJ, Ricketts D, Van Landuyt K, Banerjee A, Campus G, Domejean S, Fontana M, Leal S, Lo E, Machiulskiene V, Schulte A, Splieth C, Zandona AF, Innes NP. Managing Carious Lesions : Consensus Recommendations on Carious Tissue Removal. *Adv Dent Res* 2016;28(2):58-67.
48. Bjorndal L. Stepwise Excavation. *Monogr Oral Sci* 2018;27:68-81.
49. 49. Leksell E, Ridell K, Cvek M, Mejare I. Pulp exposure after stepwise versus direct complete excavation of deep carious lesions in young posterior permanent teeth. *Endod Dent Traumatol* 1996;12(4):192-196.
50. Hernandez M, Marshall TA. Reduced odds of pulpal exposure when using incomplete caries removal in the treatment of dentinal cavitated lesions. *J Am Dent Assoc* 2014;145(6):574-576.
51. Schwendicke F, Dorfer CE, Paris S. Incomplete caries removal : a systematic review and meta-analysis. *J Dent Res* 2013;92(4):306-314.
52. Ballal NV, Duncan HF, Rai N, Jalan P, Zehnder M. Sodium Hypochlorite Reduces Postoperative Discomfort and Painful Early Failure after Carious Exposure and Direct Pulp Capping-Initial Findings of a Randomized Controlled Trial. *J Clin Med* 2020;9(8).
53. Taha NA, Khazali MA. Partial Pulpotomy in Mature Permanent Teeth with Clinical Signs Indicative of Irreversible Pulpitis : A Randomized Clinical Trial. *J Endod* 2017;43(9):1417-1421.
54. 54. Simon S, Perard M, Zanini M, Smith AJ, Charpentier E, Djole SX, Lumley PJ. Should pulp chamber pulpotomy be seen as a permanent treatment? Some preliminary thoughts. *Int J Endod* 2013;46(1):79-87.
55. Hashem DF, Foxton R, Manoharan A, Watson TF, Banerjee A. The physical characteristics of resin composite-calcium silicate interface as part of a layered/ laminate adhesive restoration. *Dent Mater* 2014;30(3):343-349.
56. Cengiz E, Ulusoy N. Microshear Bond Strength of Tri-Calcium Silicate-based Cements to Different Restorative Materials. *J Adhes Dent* 2016;18(3):231-237.
57. Mejare I, Cvek M. Partial pulpotomy in young permanent teeth with deep carious lesions. *Endod Dent Traumatol* 1993;9(6):238-242.
58. Barrieshi-Nusair KM, Qudeimat MA. A prospective clinical study of mineral trioxide aggregate for partial pulpotomy in cariously exposed permanent teeth. *J Endod* 2006;32(8):731-735.
59. 59. Chailertvanitkul P, Paphangkorakit J, Sooksantisakoonchai N, Pumas N, Pairojarnyoot W, Leela-Apiradee N, Abbott PV. Randomized control trial comparing calcium hydroxide and mineral trioxide aggregate for partial pulpotomies in cariously exposed pulps of permanent molars. *Int J Endod* 2014;47(9):835-842.
60. 60. Al-Hiyasat AS, Barrieshi-Nusair KM, Al-Omari MA. The radiographic outcomes of direct pulp-capping procedures performed by dental students : a retrospective study. *J Am Dent Assoc* 2006;137(12):1699-1705.
61. 61. Cushley S, Duncan HF, Lappin MJ, Chua P, Elamin AD, Clarke M, El-Karim IA. Efficacy of direct pulp capping for management of cariously exposed pulps in permanent teeth : a systematic review and meta-analysis. *Int J Endod* 2021;54(4):556-571.
62. Awawdeh L, Al-Qudah A, Hamouri H, Chakra RJ. Outcomes of Vital Pulp Therapy Using Mineral Trioxide Aggregate or Biodentine™ : A Prospective Randomized Clinical Trial. *J Endod* 2018;44(11):1603-1609.
63. Bjorndal L, Reit C, Bruun G, Markvart M, Kjældgaard M, Nasman P, Thordrup M, Dige I, Nyvad B, Fransson H, Lager A, Ericson D, Petersson K, Olsson J, Santimano EM, Wennstrom A, Winkel P, Gluud C. Treatment of deep caries lesions in adults : randomized clinical trials comparing stepwise vs. direct complete excavation, and direct pulp capping vs. partial pulpotomy. *Eur J Oral Sci* 2010;118(3):290-297.
64. Parinyaprom N, Nirunsittart A, Chuveera P, Na Lampang S, Srisuwan T, Sastraruji T, Bua-On P, Simprasert S, Khoipanich I, Sutharaphan T, Theppimarn S, Ue-Srichai N, Tangtrakooljaroen W, Chompu-Inwai P. Outcomes of Direct Pulp Capping by Using Either ProRoot Mineral Trioxide Aggregate or Biodentine™ in Permanent Teeth with Carious Pulp Exposure
- in 6- to 18-Year-Old Patients : A Randomized Controlled Trial. *J Endod* 2018;44(3):341-348.
65. Suhag K, Duhan J, Tewari S, Sangwan P. Success of Direct Pulp Capping Using Mineral Trioxide Aggregate and Calcium Hydroxide in Mature Permanent Molars with Pulp Exposed during Carious Tissue Removal : 1-year Follow-up. *J Endod* 2019;45(7):840-847.
66. Aguilar P, Linsuwanont P. Vital pulp therapy in vital permanent teeth with cariously exposed pulp : a systematic review. *J Endod* 2011;37(5):581-587.
67. Cushley S, Duncan HF, Lappin MJ, Tomson PL, Lundy FT, Cooper P, Clarke M, El Karim IA. Pulpotomy for mature carious teeth with symptoms of irreversible pulpitis : A systematic review. *J Dent* 2019; 88:103158.
68. Qudeimat MA, Alyahya A, Hasan AA. Mineral trioxide aggregate pulpotomy for permanent molars with clinical signs indicative of irreversible pulpitis : a preliminary study. *Int J Endod* 2017;50(2):126-134.
69. Taha NA, Abdulkhader SZ. Full Pulpotomy with Biodentine™ in Symptomatic Young Permanent Teeth with Carious Exposure. *J Endod* 2018;44(6):932-937.
70. Eghbal MJ, Haeri A, Shahravan A, Kazemi A, Moazami F, Mozayeni MA, Saberi E, Samiei M, Vatanpour M, Akbarzade Baghban A, Fazlyab M, Parhizkar A, Ahmadi M, Akbarian Rad N, Bijari S, Bineshmarvasti D, Davoudi P, Dehghan R, Dehghani M, Ebrahimi H, Emami N, Farajian N, Fereidooni R, Ghobadi G, Ghodrati M, Gohari A, Hashemi A, Hosseini M, Karami E, Khairabadi N, Kozegari S, Labaf Ghazemi H, Majidi A, Malekzadeh P, Mehrabi V, Mohammadi M, Moradi Eslami L, Noghani A, Omatali N, Pourhatami N, Rahbani Nobar B, Rahmani S, Shafaq P, Soofiabadi S, Teimoori S, Vatandoost F, Asgary S. Postendodontic Pain after Pulpotomy or Root Canal Treatment in Mature Teeth with Carious Pulp Exposure : A Multicenter Randomized Controlled Trial. *Pain Res Manag* 2020;2020:5853412.