

Protection pulpo-dentinaire et adhésion : évolution des concepts biologiques et implications cliniques en pratique quotidienne.

Mots clés :

Odontologie conservatrice
Protection pulpo-dentinaire
Adhésion
Concepts biologiques

Pulp-dentin protection and adhesive systems: evolution of the biological concepts and clinical implications in daily practice.

Keywords:

Conservative dentistry
Pulp-protection
Adhesion
Biological concepts

EL ARROUF Nisrine*, SAKOUT Majid **, ABDALLAOUI Faïza**

* Résidente en odontologie conservatrice, Centre de Consultations et Traitements Dentaires de RABAT - MAROC.

**Professeur agrégé en odontologie conservatrice, Centre de Consultations et Traitements Dentaires de RABAT - MAROC.

***Professeur d'enseignement supérieur et chef de service d'odontologie conservatrice, Centre de Consultations et Traitements Dentaires de RABAT - MAROC.

r é s u m é

La dentisterie restauratrice a pour objectif de restituer à l'organe dentaire sa forme, sa fonction et son esthétique en préservant au maximum la vitalité et la santé pulpaire. Actuellement, l'évolution des matériaux et techniques adhésifs, permet une préparation conservatrice et un scellement étanche du complexe pulpo-dentinaire qui minimise la percolation bactérienne et la sensibilité post-opératoire, réunissant ainsi, les conditions adéquates pour maintenir la vitalité pulpaire.

Plusieurs stratégies de protection pulpaire sont aujourd'hui valables. D'un point de vue biologique, différents paramètres ont montré leur importance dans le succès des thérapeutiques bioconservatrices. Certains de ces paramètres sont directement en rapport avec la situation clinique tandis que d'autres résultent des choix de l'opérateur tant du point de vue des techniques opératoires que des matériaux choisis. Leur prise en compte doit guider l'opérateur vers les choix les plus appropriés, en mesure d'éliminer le facteur causal initial et d'assurer la préservation durable de la vitalité pulpaire. Ce travail s'intéresse aux concepts biologiques actuels de la protection pulpo-dentinaire, en mettant l'accent sur la nouvelle approche basée sur « le collage total » des restaurations bioconservatrices qui s'imposent de plus en plus dans notre pratique quotidienne.

abstract

The goals of restorative therapy are not only to restore the tooth form and function, but also to minimize postoperative sensitivity and preserve pulp vitality. Today, thanks to the evolution of adhesive materials and techniques, more conservative tooth preparations are possible, and adhesive restorations seal the dentin-pulp complex to minimize microleakage providing appropriate conditions for the maintenance of pulp vitality.

Now, several valuable strategies can be applied to insure the protection of dentin-pulp complex. From a biological point of view, the success of bioconservative therapeutics depends on different parameters. Some of them are linked to the clinical situation, the others are directly related to the operator's choices (technical procedures and materials).

This paper reviews current restorative biological concepts of pulp protection, with emphasis on a new approach based on total adhesion of restorations.



Si les matériaux et techniques actuels permettent une restauration satisfaisante des pertes tissulaires, en rétablissant la fonction et l'esthétique de l'organe dentaire, l'implication de la composante biologique de nos thérapeutiques réclame une attention particulière pour assurer la restauration et la protection de l'intégrité du complexe pulpo-dentinaire.

En effet, quelle que soit la technique utilisée et le matériau employé au cours de la thérapeutique, la composante biologique joue un rôle déterminant dans la gravité de l'atteinte pulpaire et dans la possibilité de récupération postopératoire.

En fait, face à toute irritation du complexe pulpo-dentinaire, la pulpe - comme tout autre tissu conjonctif - réagit par un phénomène inflammatoire. Néanmoins, il s'agit du seul tissu conjonctif capable, du moins dans une certaine mesure, de se protéger lui-même des agressions externes en secrétant de la dentine dite tertiaire (réactionnelle ou réparatrice) (Goldberg et Smith 2004 ; Mjör 2001).

L'évolution de cet état inflammatoire dépendra :

- d'une part de la nature, de l'intensité et la durée de l'agent agresseur pulpaire,
- et d'autre part, de l'état de santé pulpaire et sa capacité à se défendre, et donc de l'efficacité des moyens de défense mis en œuvre (Smith et coll., 2002).

De ce fait, l'obtention d'une cicatrisation dentino-pulpaire passe par l'instauration d'un traitement réfléchi, qui se base sur trois points qui méritent considération : (Chazel et coll., 2006 ; Scheldle et coll., 1998).

- Les caractéristiques de l'agression pulpo-dentinaire ;
- Le recours à des techniques opératoires respectant le complexe pulpo-dentinaire ;
- Les propriétés des matériaux utilisés aux fins de restauration coronaire ; plus particulièrement leurs effets délétères, aussi bien liés à leur éventuelle cytotoxicité propre, qu'à leur toxicité indirecte par défaut d'étanchéité au niveau de l'interface dent/restauration conduisant à une prolifération bactérienne à ce niveau.

L'objectif de ce travail est de mettre en évidence les exigences biologiques inhérentes à toute restauration adhésive, seul garant d'une protection pulpo-dentinaire effective.

Although current materials and techniques can satisfactorily restore dental tissue losses and re-establish tooth function and esthetics, an attention must be particularly paid during treatment to the biological component involved in restoring and protecting the integrity of the pulp-dentin complex.

Indeed, not depending on the used technique and material for a treatment, the biological component plays a determining role in the severity of pulpal involvement and the possibility of postoperative recovery.

Facing to any irritation of the pulp-dentin complex, the pulp - like other connective tissue - reacts by an inflammatory response. Nevertheless, it is the only connective tissue, at least to a certain extent, capable of self-defense from external attacks by secreting so-called tertiary (reactionary or reparative) dentin (Goldberg and Smith, 2004; Mjör 2001).

The evolution of pulp inflammation will depend on:

- the nature, intensity and duration of pulp injury and,
- the pulpal health status and its self-defense capacity including the efficacy of the established defense mechanisms (Smith et al., 2002).

Therefore, a treatment must be thoughtfully planned to obtain pulp-dentin healing considering the followings (Chazel et al., 2006; Scheldle et al., 1998):

- Characteristics of pulp-dentin injury;
- Use of operative techniques respecting the pulp-dentin complex;
- Properties of materials used for coronal restoration: more particularly their deleterious effects related to their possible cytotoxicity and indirect toxicity due to sealing defect leading to bacterial accumulation at the tooth/restoration interface.

The objective of this article is to describe the biological requirements significant to effective pulp-dentin protection of any adhesive restoration.



Les irritations du complexe dentino-pulpaire : implications cliniques.

L'agression du complexe pulpo-dentinaire engendre un traumatisme et une réaction inflammatoire préjudiciables à la santé pulpaire. Cette agression peut être provoquée par plusieurs facteurs étiologiques dont principalement la carie, les traumatismes, les abrasions, les érosions, les lésions opératoires iatrogènes, et les percolations marginales des obturations coronaires (Wisithphrom et coll., 2006 ; Farges et coll., 2001).

L'infection bactérienne, reste le facteur d'agression le plus incriminé. Les toxines bactériennes, vont gagner la pulpe à travers les tubuli dentinaires, et provoquer une inflammation pulpaire, dont le caractère - réversible ou irréversible - varie en fonction de l'intensité et de l'ancienneté de l'agression (Tziafas et coll., 2007 ; Levin 2003).

À cette agression primaire va s'ajouter une seconde agression provoquée par nos thérapeutiques qui dépendra du :

Traumatisme opératoire

- notamment de la nature et l'intensité de l'activité mécanique résultant de techniques conventionnelles de mise en forme cavitaire (fraisage et polissage), susceptibles de générer des effets thermiques ou vibratoires particulièrement délétères (Levin 2003 ; et Yngcuk et coll., 1998).

Zach et Cohen (1965) ont montré qu'une élévation de la température pulpaire de 5,5°C chez le singe, entraînait des nécroses pulpaires dans 15 % des cas et qu'une élévation de la température pulpaire de 11°C aboutissait au même résultat dans 60 % des cas.

- D'autre part, la déshydratation (par séchage prolongé) ou la brûlure dentinaire (absence d'irrigation abondante lors de la préparation) peuvent altérer la pulpe de manière irréversible. L'agression pulpaire se manifeste histologiquement par la propulsion des noyaux odontoblastiques dans les tubuli dentinaires et la formation de tractus morts (Messer 2002 ; Mjör et Ferrari, 2002).

- Il est aussi primordial de signaler que les protocoles de restauration incluant une photopolymérisation, doivent également prendre en compte l'élévation de température inhérente à ce mode de réaction de prise (Wisithphrom et coll., 2006 ; Lehmann et coll., 2005).

Irritations of the pulp-dentin complex: clinical implications.

Irritations of the pulp-dentin complex engender trauma and inflammatory reaction harmful to the pulpal health. Several etiological factors are mainly caries, traumas, abrasions, erosions, iatrogenic operative lesions, and marginal leakage of coronal restorations (Wisithphrom et al., 2006; Farges et al., 2001).

Bacterial infection remains the most important cause of pulp pathology. Through dentinal tubules, bacterial toxins can reach the pulp and provoke pulpal inflammation that can be reversible or irreversible depending on the intensity and duration of the attack (Tziafas et al., 2007; Levin 2003).

Dental treatment procedures can have also deleterious effects on the pulp-dentin complex:

Operative trauma

- the nature and intensity of mechanical cavity shaping with conventional techniques (tooth tissue cutting and polishing) particularly generating deleterious thermal or vibratory effects (Levin 2003; Yngcuk et al., 1998).

Zach and Cohen (1965) showed that a pulpal temperature rise of 5.5°C and 11°C in monkey led to pulp necrosis respectively in 15% and 60% of the cases.

- Moreover, dentin desiccation (by prolonged drying) or dentin burn (absence of copious irrigation during cutting) can irreversibly alter the pulp. Histologically, this injury can be observed as odontoblasts with nucleus aspirated in dentinal tubules and the formation of dead tracts (Messer 2002; Mjör and Ferrari, 2002).

- In restorative protocols using photopolymerization, it is essential to take into account the temperature rise inherent to this setting reaction mode (Wisithphrom et al., 2006; Lehmann et al., 2005).





Sachant que les températures élevées (Brackett et coll., 2003) affectent le métabolisme cellulaire et la microcirculation pulpaire, une surpolymérisation reste potentiellement dangereuse.

- Cette élévation de température doit être également évitée, lors de la finition et du polissage des restaurations, en assurant un refroidissement continu grâce à l'utilisation d'un spray abondant (Ritter et coll., 2003).

La profondeur de la cavité ou la notion de l'épaisseur de dentine résiduelle

(Remaining Dentine Thickness :RDT)

Selon Mjör et Nordahl (1996), la densité et le diamètre tubulaire sont plus importants sur la zone dentinaire interne au voisinage de la pulpe (5,34 % à 6,37 % de la surface totale de la dentine) qu'au niveau externe à proximité de la jonction amélo-dentinaire (0,44 % à 1,26 % de la surface totale de la dentine). Par conséquent, le risque d'exposition directe ou indirecte de la pulpe est proportionnel à la profondeur de la préparation dentaire.

Dans les cavités profondes - pour lesquelles l'épaisseur de dentine résiduelle est inférieure à 0,5 mm - le nombre et la taille des tubuli « ouverts » sont tels que la communication avec le parenchyme pulpaire serait comparable à celle d'une exposition pulpaire vraie (Smith et coll., 2002 ; Simon et coll., 2008).

La perméabilité dentinaire reste un facteur inévitable à prendre en considération dans nos procédures thérapeutiques. Elle permet, à la fois, de filtrer les substances irritantes et de laisser diffuser celles stimulantes ou cicatrisantes.

En effet, les tubuli dentinaires constituent le site de mouvements liquidiens bidirectionnels par l'intermédiaire de mécanismes divers (filtration, diffusion, osmose, force capillaire), qui vont transmettre les différents types d'agressions (mécaniques, thermiques, chimiques, bactériennes, hydrauliques) que peut subir l'organe pulpo-dentinaire (Mjör 2001 ; Ciucchi et coll., 1995).

Murray et coll. (2002b, 2008) ont montré que l'épaisseur de la dentine résiduelle (RDT) avait un impact certain sur la survie des odontoblastes, la sécrétion de la dentine réactionnelle et la sévérité de l'inflammation pulpaire. Selon ces auteurs, ces effets délétères (mort cellulaire, arrêt de la sécrétion de la dentine réactionnelle et inflammation pulpaire), peuvent être en corrélation avec le degré des lésions cellulaires subies au sein des odontoblastes d'une part, et d'autre part en relation avec l'effet tampon protecteur que joue la dentine vis-à-vis de la pulpe, en modulant la sévérité des stimuli.

Since cellular metabolism and pulpal microcirculation are affected by high temperatures (Brackett et al., 2003), a prolonged polymerization remains potentially dangerous.

- During finishing and polishing of restorations, temperature rise must be also avoided by ensuring a continuous cooling with abundant water spray (Ritter et al., 2003).

Cavity depth or Remaining Dentine Thickness

(RDT)

According to Mjör and Nordahl (1996), the density and diameter of dentinal tubules are more significant in internal dentin closest to the pulp (5.34 - 6.37% of total dentin surface) than those of external dentin near the dentino-enamel junction (0.44 - 1.26% of total dentin surface). Consequently, the risk of direct or indirect exposure of the pulp is proportional to the depth of cavity preparation.

In deep cavities where the remaining dentin thickness (RDT) is lower than 0.5 mm, the number and size of "opened" dentinal tubules providing communication with pulp tissue would be comparable to those of a true pulpal exposure (Smith et al., 2002; Simon et al., 2008).

Dentin permeability must be taken into account in treatment procedures. Irritating substances and stimulating or healing substances can simultaneously diffuse through dentin.

Indeed, bidirectional fluid movements through dentinal tubules occur by different mechanisms (filtration, diffusion, osmosis, capillary force) and will transmit various types of attacks (mechanical, thermal, chemical, bacterial, hydraulic) to the pulp-dentin complex (Mjör 2001; Ciucchi et al., 1995).

Murray et al. (2002b, 2008) showed that the RDT had certain impact on odontoblast survival, reactionary dentin secretion and pulpal inflammation severity. According to the authors, deleterious effects (cell death, arrest of reactionary dentin secretion and pulpal inflammation) are in correlation with the degree of cellular lesions inside odontoblasts and the protective buffering effect of dentin modulating the severity of stimuli towards the pulp.



Cependant, les études histologiques de Torstenson et Brännström (1992) ont conclu qu'en l'absence de toute contamination bactérienne au niveau pulpaire, aucune cellule inflammatoire n'a été mise en évidence, même avec une épaisseur de dentine résiduelle de 0,15mm et sans interposition de matériau de protection pulpo-dentinaire.

La notion de désinfection des cavités est aussi primordiale, afin de diminuer la charge bactérienne et de prévenir la diffusion de leurs toxines sous les restaurations composites, où toutes les conditions requises pour leur développement sont assurées (humidité, température, et nature du substrat résineux).

Néanmoins, si les bactéries peuvent diffuser, les agents antiseptiques utilisés peuvent également diffuser via les tubuli ; leur toxicité potentielle doit donc être prise en compte (Simon et coll., 2008).

Cependant, la dentine représente la première ligne de défense de l'organe pulpo-dentinaire. Les mécanismes qui s'y déroulent sont efficaces et vont tous dans le sens d'une diminution de la perméabilité de la dentine agressée. Ceux-ci se manifestent par :

Le vieillissement physiologique ou sénescence du complexe dentino-pulpaire :

La sénescence du complexe dentino-pulpaire est caractérisée par une réduction du volume pulpaire, du nombre et de l'activité des éléments cellulaires (odontoblastes, fibroblastes), et par la réduction de la vascularisation (diminution des axes vasculaires et calcification des gaines des axes résiduels) au profit de fibres et de calcifications. Il convient aussi de noter une réduction du diamètre des tubuli dentinaires par apposition de dentine péri-tubulaire, aboutissant à une sclérose responsable de la réduction de la perméabilité dentinaire. Ces caractéristiques histologiques décrites par (Farges et coll., 2001) sont de nature à amoindrir les réactions de réparation.

However, the histological study of Torstenson and Brännström (1992) concluded that in an absence of any bacterial contamination of the pulp tissue even with a 0.15mm RDT and without pulp-dentin protection material, no inflammatory cell was observed.

Disinfection of cavities is also essential in order to decrease bacterial accumulation and prevent diffusion of bacterial toxins especially under composite restorations where all the conditions required for development of bacteria are present (humidity, temperature, and nature of the resin substrate).

Since bacterial toxins can penetrate through dentin to the pulp, antiseptic agents can also diffuse through dentinal tubules. Their potential toxicity must be thus taken into account (Simon et al., 2008).

However, dentin represents the first line of defense of the pulp-dentin complex with the following effective mechanisms to a decreased permeability of the attacked dentin :

Physiological ageing or senescence of the pulp-dentin complex:

Senescence of the pulp-dentin complex is characterized by a reduction of the pulp volume with decreased cell number and activity (odontoblasts, fibroblasts) and a reduction of vascularization (decreased vascular axes and calcification of residual vascular sheaths) to be replaced with fibers and pulp stones. A reduced diameter of dentinal tubules is also noted by apposition of peritubular dentin leading to dentin sclerosis responsible for reduced dentin permeability. These histological characteristics described by (Farges et al., 2001) can decrease the reparative reactions.





La sénilité pulpaire conséquence des- agressions antérieures subies par la dent :

Le complexe pulpo-dentinaire suivra les mêmes modifications histologiques, sauf qu'elles surviennent de manière précoce, désordonnée et anarchique, signant ainsi son vieillissement prématuré. Le potentiel de cicatrisation pulpaire, ainsi que les moyens de défense diminuent avec la multiplication de ces agressions, quelle que soit leur origine (Farges et coll., 2001 ; Chazel et coll., 2006).

Dans l'agression pulpaire, le danger principal vient de l'accumulation des agressions. Le complexe dentino-pulpaire peut réagir favorablement face à une agression isolée, mais la pathologie pulpaire peut devenir irréversible à la suite d'agressions multiples et répétées même de faible intensité (Murray et coll., 2008).

C'est pourquoi, comme rapporté par Messer (2002), il est important de minimiser les effets iatrogènes de nos thérapeutiques, favoriser la cicatrisation et maintenir à long terme la santé du complexe pulpo-dentinaire par une restauration coronaire biofonctionnelle, étanche et biocompatible.

Les matériaux de protection pulpaire : quand et comment ?

Les matériaux de protection pulpo-dentinaire doivent répondre à certains critères dont les plus importants sont la biocompatibilité, la stimulation de la dentinogenèse, ainsi que l'isolation vis-à-vis des agressions d'origine physico-chimique, en particulier, les variations thermiques et la toxicité propre des matériaux des restaurations définitifs.

Pour raison de compatibilité, les matériaux de protection dentino-pulpaire les plus utilisés actuellement, dans le cas des restaurations adhésives, sont les adhésifs amélo-dentaires, les ciments verres ionomères, et l'hydroxyde de calcium.

Il apparaît clairement, que la notion d'épaisseur de dentine résiduelle est déterminante dans le choix du matériau de protection pulpaire. Ceci s'est imposé face à une réalité histologique :

- au-delà de 1,5 mm d'épaisseur supposée de dentine résiduelle l'utilisation d'un adhésif amélo-dentinaire s'avère suffisante (Smith et coll., 2002 ; Ritter et coll., 2003).
- Lorsque l'épaisseur supposée de dentine résiduelle est entre 0,5 mm et 1,5 mm, l'utilisation des substituts dentinaires (à base de ciments verres ionomères) est envisageable, (Pameijer et coll., 1991 ; Smith et coll., 2002)

Pulp senescence as a consequence of previous attacks undergone by the tooth:

In this situation, the pulp-dentin complex will follow the same histological modifications described earlier but in a premature, disorganized and anarchical fashion, indicating therefore a premature ageing. The potential of pulpal healing and defense decreases with the multiplication of previous pulp injuries not depending on their origin (Farges et al., 2001; Chazel et al., 2006).

Injury that can cause danger to the pulp comes from accumulated attacks. The pulp-dentin complex can favorably react against a single injury but pulp pathology can become irreversible following multiple and repeated attacks even of weak intensity (Murray et al., 2008).

As reported by Messer (2002), it is therefore important to minimize iatrogenic effects from dental treatment to favor pulp healing and to maintain in a long term the pulp-dentin complex health by a biofunctional, sealed and biocompatible coronal restoration.

Materials of pulp protection: when and how?

Materials of pulp-dentin protection must respond to certain important criteria such as biocompatibility, stimulation of dentinogenesis, as well as elimination of the attacks of physico-chemical origin, in particular, thermal variations and toxicity of materials used for final restorations.

For compatibility reason, materials for pulp-dentin protection the most presently used in adhesive restorations are enamel-dentin adhesive systems, glass ionomer cements, and calcium hydroxide.

From histological observation, the RDT is obviously determining in the choice of material for pulp protection:

- When the supposed RDT is beyond 1.5 mm, the use of an enamel-dentin adhesive is shown to be sufficient (Smith et al., 2002; Ritter et al., 2003).
- When the supposed RDT is between 0.5 mm and 1.5 mm, the use of dentin substitutes with glass ionomer cements is possible (Pameijer et al., 1991; Smith et al., 2002),



- lorsqu'elle est inférieure à 0,5 mm, il est préférable d'utiliser des fonds de cavité à base d'hydroxyde de calcium (Murray et coll., 2000 ; Ritter et coll., 2003).

Les systèmes adhésifs amélo-dentinaires

Le principe fondamental de l'adhésion des systèmes adhésifs modernes est basé sur leur rétention micromécanique et chimique sur des surfaces amélaire et dentinaires préalablement déminéralisées par un acide. Ils ont en commun d'utiliser la technique du mordantage total et impliquent la formation d'une couche hybride (Stangel et coll., 2007 ; Degrange 2005).

On dispose de 2 grandes classes de systèmes adhésifs (Stangel et coll., 2007 ; Degrange 2005).

Les systèmes adhésifs avec mordantage préalable : M&R

Les premiers systèmes sont les systèmes en 3 temps. Leur mise en oeuvre sur le substrat amélo-dentinaire s'effectue en 3 étapes successives :

- le mordantage par un gel d'acide orthophosphorique (37 %). Le but d'un tel conditionnement est d'obtenir, non seulement une préparation de la surface amélaire afin de la rendre propice à un bon collage, mais surtout une déminéralisation du substrat dentinaire nécessaire à la formation d'une couche hybride.
- la mise en place d'un primaire puis de la résine adhésive. Le primaire est une solution à base de solvant (eau, acétone, éthanol) et contenant un ou plusieurs monomères amphiphiles.
- la résine adhésive pénètre les tubuli dentinaires et s'infiltré dans la dentine déminéralisée. Il est à noter que chacune des étapes est bien distincte de l'autre. L'agent mordant, le primaire et la résine adhésive sont ici conditionnés séparément.

Une première évolution de ce protocole conduit à l'avènement de systèmes adhésifs en 2 temps : systèmes adhésifs monoflacons (ou one-step) pour lesquels, après application classique du gel de mordantage sur l'émail et la dentine, il y a utilisation d'une combinaison (primaire + adhésif) présents dans un seul et même flacon. L'inconvénient majeur de ces systèmes, hormis le fait qu'il faille parfois passer plusieurs couches du produit (ce qui, finalement, ne tend pas vers une simplification du protocole opératoire) est la difficulté majeure pour l'opérateur d'obtenir un émail sec garant d'une bonne étanchéité marginale et surtout une dentine humide mais non « mouillée ». En effet un séchage trop appuyé entraîne un collapsus des fibres collagéniques, et à l'inverse un excès d'eau signifie la formation de lacunes au sein de l'interface dentine/adhésif.

- when the RDT is less than 0.5 mm, an application of calcium hydroxide at the bottom of the cavity is preferable (Murray et al., 2000; Ritter et al., 2003).

Enamel-dentin adhesive systems

The fundamental principle of modern adhesive systems is based on micromechanical and chemical retention on enamel and dentin surfaces primarily demineralized by an acid. Most systems use the total-etch technique and imply hybrid layer formation (Stangel et al., 2007; Degrange 2005).

2 large classes of adhesive systems can be distinguished (Stangel et al., 2007; Degrange 2005).

Adhesive systems with preliminary etching: Etching & Rinsing

3-step systems.

These systems require an application of materials on enamel and dentin substrate in 3 successive steps:

- Etching with an orthophosphoric acid gel (37%). The purpose of such conditioning is to obtain not only a preparation of enamel surface to make it suitable for good bonding but also a demineralization of dentin substrate necessary for hybrid layer formation.

- Application of a primer then a bonding resin. Primer is a solvent-based solution (water, acetone, ethanol) containing one or several amphiphilic monomers.

- Bonding resin penetrates into dentinal tubules and infiltrates into demineralized dentin. Each step in these adhesive systems is therefore distinguished from one to another. Etching agent, primer and bonding resin are conditioned in separate bottles.

Later, 2-step adhesive systems were developed called one-bottle adhesive systems (or one-step). Following to classic application of etching gel and rinsing, a combination of primer and bonding resin conditioned in the same bottle is applied onto etched enamel and dentin. Since a product application in several coats may be needed, this system does not finally provide a simplified operative protocol. The main disadvantage of these systems lies on the difficulty for the operator to obtain a dry enamel guarantee of a good marginal seal and especially a moist but not "wet" dentin. Indeed, an over-drying results in a collapse of collagen fibers and, on the contrary, an excess of water leads to the formation of gaps within the dentin/adhesive interface. In both cases, an immediate result is a lack of seal and a loss of bonding. Therefore, the obtained results ra-





Dans les deux cas le résultat à terme est un manque d'étanchéité et une perte d'adhésion. Les résultats obtenus dépendent ainsi plus de la mise en oeuvre du produit par le praticien que de ses performances propres (Degrange et coll., 2001).

Les systèmes adhésifs

auto-mordançants :

SAM (sans mordantage préalable)

Pour tenter de pallier ce défaut, une autre voie a été ouverte, celle des systèmes adhésifs auto-mordançants (ou self-etching primers/self-etch adhesives).

Si on les classe selon leur protocole d'utilisation, on distingue :

- les systèmes à deux étapes cliniques qui nécessitent le passage consécutif de deux produits. Tout d'abord un primaire acide à laisser agir suivi d'une évaporation légère, puis d'une résine souvent chargée. Cette deuxième couche dissipe les contraintes subies par la restauration.
- les systèmes à une étape clinique qui ne présentent qu'un seul produit à appliquer. Cependant, beaucoup se présentent en deux flacons pour des raisons de stabilité de produits dans le temps et notamment l'hydrolyse rapide des fonctions ester à pH 1,5/2,5. On doit alors mélanger une goutte de chacun juste avant l'application.

Avec les systèmes adhésifs auto-mordançants nous obtenons une action simultanée de déminéralisation et d'imprégnation du support amélo-dentinaire. L'action auto-mordançante est due à des monomères présents en solution, rendus acides par la fixation d'un ou plusieurs groupements acides (carboxyliques ou phosphates).

Au niveau de l'émail les monomères résineux pénètrent au sein des espaces créés, en englobant les cristaux d'émail dissous car ils ne sont pas évacués par rinçage. Les monomères favorisent l'infiltration de la résine. Au niveau de la dentine la phase minérale est dissoute afin que des monomères puissent diffuser au travers du réseau de collagène avant d'être polymérisés, et ceci en infiltrant la boue dentinaire : « smear layer ».

Les adhésifs auto-mordançants incarnent sans doute un progrès dans la résolution de la problématique du collage de matériaux résineux aux structures dentaires. En améliorant l'ergonomie et la rapidité d'exécution, ils rendent le protocole clinique du collage moins sujet aux perturbations liées à l'opérateur et aux conditions cliniques. Cependant, les faciès d'attaque générés par les SAM sur l'émail apparaissent moins rétentifs que ceux que procurent l'acide phosphorique. Au niveau de la dentine, la persistance de la boue dentinaire et son épaisseur peut entraîner une diminution de l'adhérence de certains SAM (Degrange 2005).

ther depend on the clinician's manner of product application than on the product's proper performances (Degrange et al., 2001).

Self-etching adhesive systems

In order to improve the above-mentioned defect, self-etching adhesive systems (or self-etching primers/ self-etch adhesives) have been developed.

According to the usage protocol, we can distinguish:

- Two-clinical-step systems require a consecutive application of two products. Firstly, an acid primer is applied and let react followed by a slight evaporation, then an often filled resin is applied. This second layer distributes stresses from polymerization setting of restoration.
- One-clinical-step systems present only one single product to be applied. However, many are conditioned in two bottles for reasons of product stability over time in particular rapid hydrolysis of ester functions at pH 1.5/2.5. A mixture of a drop of each bottle is needed just before product application.

With self-etching adhesive systems, demineralization and impregnation of enamel-dentin support is simultaneously obtained. The etching action of these systems is due to monomers present in the solution, made acidic by the fixation of one or several acid groups (carboxylic or phosphate).

On enamel, resin monomers penetrate into the created spaces by encapsulating dissolved enamel crystals not removed by rinsing. The monomers favor resin infiltration. On dentin, the mineral phase is dissolved so that monomers can infiltrate "smear layer" diffuse through the collagen network before being polymerized.

Self-etching adhesives doubtlessly represent a progress to solve the problem of adhesion with resin materials to dental structures. With improved ergonomics and reduced operative procedure, these systems render clinical bonding protocol less subject to the operator and clinical conditions. However, the etched enamel surface created by self-etching adhesives seems less retentive than those created by phosphoric acid. On dentin, existing smear layer and its thickness can result in a decreased adhesion of certain self-etching adhesives (Degrange 2005).



Mais rappelons que la réussite de tout collage reste subordonnée à la rigueur du praticien dans la préparation des tissus amélo-dentaires. Il est conseillé, dans la pratique quotidienne de s'habituer aux caractéristiques d'usage d'un adhésif pour l'utiliser de façon optimale (Degrange et coll., 2001).

Les ciments verre-ionomères (CVI)

Les CVI se présentent sous les formes chémo ou photopolymérisables. Ils possèdent plusieurs propriétés qui permettent leur utilisation comme matériau de protection pulpo-dentinaire pour des lésions de profondeur moyenne ($0,5\text{mm} \leq \text{EDR} \leq 1,5\text{mm}$), ou encore avec interposition d'hydroxyde de calcium au niveau des zones juxta-pulpaire dans les cavités profondes (Pameijer et coll., 1991 ; Murray et coll., 2003).

Cette précaution est dictée par la cytotoxicité des CVI et leur pH initialement bas ($\text{pH} < 3$) au moment de leur insertion (Grégoire et coll., 2008).

Leurs principaux avantages, vantés par (Mount et coll., 2002), sont représentés par leur biocompatibilité ($\text{EDR} \geq 0,5\text{mm}$), leur adhésion physico-chimique aux structures dentaires par échange ionique (ce qui améliore l'étanchéité des restaurations) et leur pouvoir cariostatique par libération de fluor.

Ils peuvent être utilisées entre la dentine préparée et le matériau de restauration, soit en couche très fine ($< 0,5\text{mm}$) soit avec une épaisseur plus importante ($> 1\text{mm}$) comme matériau de substitution dentinaire. Dans ce dernier cas de figure, l'utilisation des CVI en technique « sandwich », permet de diminuer la quantité de composites à polymériser. Leur coefficient de dilatation thermique proche de celui de la dentine, leur permet d'agir, en quelque sorte, comme une couche élastique absorbant les contraintes de polymérisation du composite qui les recouvre ; de plus, en diminuant le volume du composite utilisé, on limite le phénomène de contraction inhérent à la polymérisation, et par conséquent on améliore l'étanchéité de la restauration (Leinfelder et coll., 2001 ; Murray et coll., 2002b).

L'hydroxyde de calcium.

Réputé pour son pouvoir dentinogénique, l'hydroxyde de calcium est indiqué sous tous les types de restaurations lorsque l'épaisseur de la dentine résiduelle est faible ou inexistante ($\leq 0,5\text{mm}$).

Cette action est le résultat de la stimulation de la phosphatase alcaline qui est favorable à la dentinogenèse, et de la précipitation des phosphates de calcium qui permettent la minéralisation.

It must be, however, kept in mind that the success of any adhesion (bonding) remains subordinate to the operator's rigor in preparation of enamel-dentin substrate. It is recommended, in daily practice, to become accustomed to a usage protocol of one adhesive system in order to obtain the optimal result (Degrange et al., 2001).

Glass ionomer cements (GICs)

GICs exist in chemical-cured or photopolymerizable forms. Due to several properties, these materials can be used as pulp-dentin protection material in cavity of average depth ($0.5\text{mm} \leq \text{RDT} \leq 1.5\text{mm}$) or with an application of calcium hydroxide at the zones nearest to the pulp in deep cavities (Pameijer et al., 1991; Murray et al., 2003).

This precaution is made due to possible cytotoxicity of GICs and their initially low pH ($\text{pH} < 3$) when placement of freshly prepared cement (Grégoire et al., 2008).

Their main advantages, indicated by (Mount et al., 2002), are biocompatibility (when $\text{RDT} \geq 0.5\text{mm}$), physico-chemical adhesion to tooth structures by ionic exchange (improving sealing of restorations) and cariostatic property by fluoride release.

They can be placed between prepared dentin and restorative material, either in very thin layer ($< 0.5\text{mm}$) or with a more thickness ($> 1\text{mm}$) as dentin substitute. In the latter situation, the use of GIC in sandwich technique can reduce the amount of composite resin. Since the coefficient of thermal expansion of GICs is close to that of dentin, they can then act, in a sense, as an elastic layer absorbing polymerization stresses generated by overlying composite. Furthermore, by decreasing the volume of composite to be used, polymerization contraction is limited and the sealing of the restoration is consequently improved (Leinfelder et al., 2001; Murray et al., 2002b).

Calcium hydroxide.

Well-known for its dentinogenic effect, calcium hydroxide ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) is indicated under all types of restorations when the RDT is low or non-existent ($\leq 0.5\text{mm}$).

This action results from stimulation of alkaline phosphatase favorable to dentinogenesis and precipitation of calcium phosphates allowing mineralization.





Son pH alcalin (11,5-12), lui confère en plus une action antibactérienne (la majorité des bactéries ne peuvent survivre à un pH > 9), et les ions Ca⁺⁺ libérés vont maintenir dans le temps un milieu défavorable à la prolifération bactérienne (Duncan et coll., 2009).

Ce matériau aurait cependant une aptitude à dissoudre la dentine (dissolution prolongée et rémanente), et ainsi libérer progressivement des facteurs de croissance (TGFβ) (Mjör et coll., 2002 ; Graham et coll., 2006). Ces facteurs libérés, pourraient cheminer à travers les tubuli vers le parenchyme pulpaire, et déclencher ainsi une réaction pulpaire, notamment odontoblastique (Smith et coll., 2008).

Ainsi stimulées, ces cellules sortiraient de leur phase quiescente, et secréteraient la dentine tertiaire :

- soit par la formation de **dentine réactionnelle** si les odontoblastes et les cellules de la couche de Höhl sont encore vivants et biologiquement actifs,
- soit en réponse à une effraction pulpaire, par la formation de **dentine réparatrice** sécrétée par des « néo-odontoblastes ».

Dans ce cas de figure, contrairement à un tissu conjonctif conventionnel, la cicatrisation de la palissade odontoblastique ne se fait pas par division des cellules bordant la plaie, mais suite à l'attraction de nouvelles cellules et leur différenciation en cellule sécrétrice de dentine (néo-odontoblaste, odontoblaste de seconde génération ou odontoblast-like cell). Ces cellules pulpaires qui ont le potentiel de se différencier - et dont on ne connaît pas l'origine - n'expriment pas les molécules considérées comme caractéristiques du phénotype odontoblaste, mais ont des caractéristiques très proches des ostéoblastes (Goldberg et coll., 2001 ; Smith et coll., 2008). Le processus de remplacement de ces cellules dans le processus de cicatrisation pulpo-dentinaire n'est à ce jour pas clairement établi ; de nombreux auteurs tendent à penser que les processus mis en jeu seraient les mêmes que ceux impliqués dans l'odontogenèse initiale (Mitsiadis et coll., 2004).

Cependant, la non-adhésion du Ca(OH)₂ à la dentine et ses faibles propriétés mécaniques imposent de l'appliquer ponctuellement en fine couche, uniquement dans les zones les plus profondes (EDR < 0,5mm), de manière à conserver, dans les zones de dentine plus épaisse, une surface maximale de collage et donc à optimiser l'étanchéité de l'obturation. Il sera protégé par un matériau de restauration intermédiaire (comme par ex. une couche de ciment aux verres ionomères), avant la mise en place du matériau définitif (Ritter et coll., 2003 ; Stanley 2002 ; Grégoire et Millas, 1995).

Its antibacterial action is related to alkaline pH (11.5-12) (most bacteria cannot survive at pH > 9). Moreover, released Ca⁺⁺ ions will maintain over time an environment unfavorable to bacterial proliferation (Duncan et al., 2009).

Ca(OH)₂ would have, however, a capacity to dissolve dentin (prolonged dissolution) that can gradually release growth factors (TGFβ) (Mjör et al., 2002; Graham et al., 2006). These released growth factors could diffuse through dentinal tubules towards pulp tissue and activate pulpal and notably odontoblastic reaction (Smith et al., 2008).

Once stimulated, pulp cells and odontoblasts would exit from their quiescent phase to secrete tertiary dentin:

- either by formation of **reactionary dentin** if odontoblasts and cells in the Höhl's layer are still vital and biologically active,
- or in response to a pulpal exposure, by formation of **reparative dentin** secreted by "neo-odontoblasts".

In this situation, contrary to general connective tissue, healing of the odontoblastic layer does not occur by division of cells lining the wound, but further to an attraction of new cells that will differentiate into cells secreting dentin (neo-odontoblast, odontoblast of second generation or odontoblast-like). These pulpal cells with the potential to differentiate - of unknown origin - do not express molecules considered as characteristics of odontoblastic phenotype, but very close to osteoblasts (Goldberg et al., 2001; Smith et al., 2008).

Although the replacement process of these cells in pulp-dentin healing is presently not yet clearly elucidated, several authors tend to think that the involved processes would be the same as those involved in initial odontogenesis (Mitsiadis et al., 2004).

Due to its non-adhesive property to dentin and weak mechanical properties, Ca(OH)₂ should be locally applied in thin layer only in the deepest zones (RDT < 0.5mm) so as to preserve at maximum tooth surface for bonding optimizing the sealing of restoration. It will be then protected by an intermediary restorative material (for example, a layer of GIC) prior to placement of final material (Ritter et al., 2003; Stanley 2002; Grégoire and Millas, 1995).



Si l'utilisation de l'hydroxyde de calcium, comme fond protecteur sous les restaurations aux composites, reste encore un réflexe pour un bon nombre de praticiens, la légitimité de cette pratique fait l'objet d'une controverse dans le milieu de la recherche fondamentale.

En 1994, une revue de littérature de Cox et Suzuki, conclut que les avantages à court terme de l'hydroxyde de calcium étaient contrebalancés par ces inconvénients à long terme, principalement par le fait que ce matériau ne peut assurer un scellement biologique étanche aux pénétrations bactériennes. L'étude de Tziafas et coll. (1996) a mis quant à elle l'accent sur l'incapacité du Ca(OH)₂ à induire la dentinogenèse réparatrice au niveau des sites pulpaire périphériques chez les chiens.

D'un autre côté, selon l'étude de Unemori et Coll. (2001), l'utilisation des fonds protecteurs aurait tendance à augmenter les risques de survenue de sensibilités post-opératoires.

En fait, l'amélioration des systèmes adhésifs a fortement réduit la nécessité d'utiliser des protections pulpaire à l'exception toutefois des cavités très profondes (RDT < 0,5mm) (Ritter et coll., 2003).

Enfin, si l'on se réfère à la revue de littérature réalisée par Olsson et coll. (2006) – concernant la formation de barrière calcique suite à un coiffage pulpaire sur dents humaines il apparaît que :

- les études utilisant de l'hydroxyde de calcium comme produit de coiffage, présentent le plus grand nombre de succès, ce qui corrobore les résultats obtenus lors de recherches sur les animaux (Pitt Ford 1985 ; Cox et Coll., 1996) ;
 - alors que le coiffage avec les matériaux adhésifs contraste avec les résultats obtenus sur le modèle animal (Olmez et coll., 1998 ; Kitasako et coll., 1999).
- On rapporte un faible taux de formation de barrière calcique suite à la procédure de coiffage par les matériaux adhésifs, avec l'installation d'une inflammation pulpaire plus prononcée sur les dents humaines.

Toutefois, cette revue de littérature a permis à Olsson et coll. (2006) de mettre en évidence un nombre de défaillances au niveau des études sélectionnées (études non randomisées, taille réduite de l'échantillon, absence de groupes contrôles, conditions non cliniques...).

En effet, sur les 21 études sélectionnées, 20 étaient jugées à faible niveau de preuve scientifique. Ainsi, dans la limite des connaissances actuelles, il est difficile de conclure quant à l'efficacité d'un produit de coiffage par rapport à un autre. Cependant, il paraît nécessaire dans l'avenir, de mener des études à plus haut niveau de preuves scientifiques.

Although locally clinical use of Ca(OH)₂ as protective base under composite restorations still remains a reflex for many clinicians, this practice is controversial in the area of basic research.

In 1994, a review of literature of Cox and Suzuki concluded that the short-term advantages of Ca(OH)₂ were counterbalanced by long term disadvantages, especially the inability of this material to ensure a biological seal against bacterial penetrations. The study of Tziafas et al. (1996) emphasized the incapacity of Ca(OH)₂ to induce reparative dentinogenesis in peripheral pulpal sites in dogs.

Moreover, according to the study of Unemori et al. (2001), the use of bases for pulp protection would tend to increase the risks of postoperative sensitivities.

In fact, with improved adhesive systems, the need of based for pulp protection is strongly reduced with an exception, however, in very deep cavities (RDT < 0.5mm) (Ritter et al., 2003).

Finally, according to the review of literature by Olsson et al. (2006) concerning the formation of calcic barrier further to a pulp capping in human teeth, it seems that:

- the studies using Ca(OH)₂ as capping material present the highest number of success confirming the results from studies in animals (Pitt Ford 1985; Cox et al., 1996);
 - pulp capping with adhesive materials gave a result in contrast with those obtained from animal model (Olmez et al., 1998; Kitasako et al., 1999).
- In human studies, a weak rate of calcic barrier formation when pulp capping with adhesive materials and more pronounced pulpal inflammation are reported.

However, this review of literature allowed Olsson et al. (2006) to demonstrate a number of drawbacks of the selected studies (non-randomized studies, reduced sample size, absence of control groups, non-clinical conditions). Indeed, on twenty-one selected studies, twenty studies were judged to be of low-level scientific evidence. With limited current knowledge, it is therefore difficult to conclude as for the efficacy of one capping material with regard to another. However, future studies of higher-level scientific evidence are needed.





Un nouveau concept de protection pulpaire : le collage total ou « *total adhesion* »

Le modèle actuel de dentisterie restauratrice a le triple objectif de maîtriser les causes d'agression avant intervention, d'économiser les tissus minéralisés et limiter le traumatisme opératoire en cours d'intervention, et de maintenir les résultats dans le temps après obturation moyennant une restauration adhésive biocompatible, biofonctionnelle et étanche.

Ce modèle est rendu possible grâce aux constants progrès réalisés en matière de dentisterie adhésive. L'économie tissulaire qu'il autorise, présente un double intérêt :

- d'abord sur le plan biomécanique par la réduction de la taille des cavités (résistance des structures dentaires résiduelles, et leur renforcement par le collage),
- qui s'accompagne essentiellement de la diminution du nombre des tubuli ouverts, et donc des voies de communication vers le parenchyme pulpaire, ce qui présente un intérêt biologique certain (Simon et coll., 2008).

Les tubuli ouverts seront par la suite scellés par les prolongements résineux des adhésifs polymérisés.

Le respect des principes biologiques en dentisterie adhésive exige cependant, toute la rigueur et la minutie opératoire du praticien dans le respect du protocole du collage d'une part, et d'autre part, elle demande la coopération active du patient et sa compliance durable pour le maintien d'une hygiène buccale irréprochable.

Ces conditions sont indispensables pour garantir l'étanchéité et donc la protection du complexe pulpo-dentinaire, et par conséquent, prévenir la récurrence carieuse et assurer la longévité des restaurations (Lasfargues et coll., 2000).

Le collage total, signifie l'adhésion à toutes les surfaces de la préparation, même celles qui sont très proches de la pulpe. C'est cette notion de « total adhesion » qui a soulevé la controverse sur l'utilisation des fonds protecteurs sous les restaurations adhésives (Ritter et coll., 2003).

Cette approche thérapeutique a pour objectif la recherche et l'obtention simultanée de l'herméticité et l'adhérence des restaurations coronaires grâce aux systèmes adhésifs actuels, qui selon Lopes et coll. (2002) et Stangel et coll. (2007), permettent d'obtenir des valeurs d'adhérence supérieure à 20 MPa sur l'émail, de 15 et 20 MPa sur la dentine, et de garantir une étanchéité interfaciale satisfaisante.

Plusieurs auteurs (Ritter et coll., 2003 ; Mjör 2001 ; Smith et coll., 2002 ; Hebling et coll., 1999 ; Blank 1999) s'accordent à penser que ce scellement hermétique du complexe pulpo-dentinaire vis-à-vis des bactéries de

A new concept of pulp protection: “*total adhesion*”

Current restorative dentistry has three main objectives, to control the causes of pulp injury before intervention, to preserve mineralized tissues and reduce operative trauma during intervention, and to maintain the long term results with biocompatible, biofunctional and sealed adhesive restorations.

With constant progress in adhesive dentistry, minimal intervention dentistry is possible and presents a double benefit:

- from a biomechanical point of view, a reduction of cavity size (resistance of residual tooth structures and reinforcement by adhesion),
- from a biological point of view, a decreased number of opened dentinal tubules and thus communications towards pulp tissue (Simon et al., 2008).

Opened dentinal tubules will afterward be sealed by polymerized resin tags.

Biological principles in adhesive dentistry must be respected requiring both the operator's rigor and operative meticulousness by following the bonding protocol and patient's active cooperation and durable compliance for a perfect oral hygiene control.

These conditions are indispensable to ensure sealing and thus protection of the pulp-dentin complex. Consequently, recurrent caries can be prevented ensuring the longevity of restorations (Lasfargues et al., 2000).

Total adhesion means bonding of all the surfaces of the preparation even those very close to the pulp. This “total adhesion” concept raised the controversy on the use of protective bases under adhesive restorations (Ritter et al., 2003).

The objective of this treatment approach is to simultaneously obtain hermetic seal and adhesion of coronal restorations with current adhesive systems. According to Lopes et al. (2002) and Stangel et al. (2007), bonding values superior to 20 MPa on enamel, 15 and 20 MPa on dentin can be obtained from current systems ensuring a satisfactory interface seal.

Several authors (Ritter et al., 2003; Mjör 2001; Smith et al., 2002; Hebling et al., 1999; Blank 1999) agree that hermetic sealing of the pulp-dentin complex against bacteria from oral cavity allows the pulp to self-protect by elabo-



la cavité buccale, lui permet de se protéger en élaborant une barrière dentinaire. En effet, il a été démontré que le degré d'inflammation pulpaire était en corrélation avec le niveau de pénétration bactérienne en direction de la pulpe, et non pas en relation avec la toxicité intrinsèque des matériaux d'obturations.

De ce fait, la réponse pulpaire ne dépend pas du type de matériau employé, mais de sa capacité à prévenir la diffusion bactérienne et est donc corrélée à son étanchéité.

Hybridation et couche hybride

Les mécanismes de collage actuels, incluent la formation d'une couche hybride, terme introduit par Nakabayashi en 1982, pour désigner l'imprégnation morphologique de la dentine vitale par la résine de collage. Cependant, sa création est toujours associée au prétraitement de la dentine par des acides ou par des primaires acides. En effet, comme l'expliquent Stangel et coll. (2007), deux stratégies de l'adhésion qui reposent sur une gestion différente de la boue dentinaire sont utilisées dans les systèmes adhésifs modernes. On a ceux qui retirent la boue dentinaire (M&R : mordantage et rinçage), et ceux qui la maintiennent en l'incorporant comme substrat pour le collage (SAM : systèmes auto-mordantants).

Le mordantage de la dentine élimine la boue dentinaire, et par déminéralisation intra- et peritubulaire ouvre les tubuli et provoque l'exposition des fibres de collagène des dentines péri et intertubulaires. Les initiateurs d'adhésion, contenant à la fois des groupements hydrophiles qui vont se lier aux fibres de collagène et des groupements hydrophobes qui permettent la copolymérisation avec la résine adhésive, sont à l'origine de cette couche hybride qui, complétée par la résine de collage, interpénètre le réseau de collagène imprégné des primaires et s'infiltre dans les tubuli.

Ainsi, la couche hybride est constituée de la matrice dentinaire organique (fibres de collagène), de cristallites d'hydroxyapatite résiduels, de monomères résineux et de solvants. Elle aboutit à un joint étanche qui, empêchant l'infiltration bactérienne, isole le complexe pulpo-dentinaire des irritations bactériennes (infection), physiques (micropompage) et chimiques (cytotoxicité) (Mjör 2001). De plus, la couche de résine adhésive agit comme un amortisseur vis-à-vis des contraintes mécaniques, atténuant les effets de la contraction de polymérisation, les forces de mastication et les conséquences dues aux déformations des tissus dentaires et des chocs thermiques (dilatométrie thermique). Une telle couche de matériau élastique est susceptible de résister aux contraintes de retrait de polymérisation du composite de restauration et de ce fait améliore l'adaptation marginale et la rétention des restaurations.

rating a dentin barrier. Indeed, it was demonstrated that the degree of pulpal inflammation was in correlation with the level of bacterial penetration in the pulpal direction and not with the intrinsic toxicity of the restorative materials.

Therefore, pulpal response does not depend on the type of the employed material but on its sealing and capacity to prevent bacterial leakage.

Hybridization and hybrid layer

Current bonding mechanisms involve a formation of hybrid layer, term coined by Nakabayashi in 1982, to indicate morphological impregnation of vital dentin by bonding resin. However, its creation is always associated to the pretreatment of dentin by acids or acid primers. Indeed, as explained by Stangel et al. (2007), two adhesive strategies based on different management of dentin smear layer are used in modern adhesive systems. They are the systems with smear layer removal (etching and rinsing) and those with smear later preservation by incorporating it as substrate for adhesion (self-etching systems).

Etching of dentin eliminates dentin smear layer demineralizes intra-and peritubular dentin opening dentinal tubules and exposing collagen fibers of of peri- and intertubular dentins. Adhesive initiators, simultaneously containing hydrophilic groups to be bound to collagen fibers and hydrophobic groups to copolymerize with adhesive resin, are important in the formation of hybrid layer. Adhesive resin will then interpenetrate the collagen network impregnated with primers and infiltrates into dentinal tubules.

The hybrid layer is, therefore, composed of organic dentin matrix (collagen fibers), residual hydroxyapatite crystals, resin monomers and solvents. Its formation leads to a sealed interface preventing bacterial infiltration and isolating the pulp-dentin complex from bacterial (infection), physical (fluid movement) and chemical (cytotoxicity) irritations (Mjör 2001).

Furthermore, the adhesive resin layer acts as a shock absorber against mechanical stresses minimizing the effects of polymerization contraction, masticatory forces and the consequences due to deformations of tooth tissues and thermal shocks. This elastic layer may resist to polymerization contraction stresses of composite restorations improving marginal adaptation and retention of the restorations.





En effet, le retrait de prise qui accompagne inévitablement toute réaction de polymérisation, se traduit par des contraintes exercées au niveau des interfaces avec les tissus dentaires. Il peut se produire des décohésions le plus souvent localisées induisant des défauts d'étanchéité (Van Meerbeek et coll., 1999, 2003 ; Lambrechts et coll., 2000).

La souffrance du système dentino-pulpaire est principalement attribuée aux variations de pression intra-tubulaire. Les systèmes adhésifs auto-mordançants ont pour principal avantage en clinique, de réduire très sensiblement le risque de sensibilité post-opératoire. Contrairement aux adhésifs nécessitant un pré-mordantage, ils n'éliminent pas les bouchons de boue dentinaire, mais les imprègnent. Ces bouchons à l'orifice des tubuli ont l'avantage de réduire considérablement la perméabilité dentinaire (Degrange 2005).

Pashley (1984) a en effet montré que la boue dentinaire intervenait pour 86% dans la résistance à l'écoulement des fluides intra-tubulaires. L'obturation tubulaire efficace explique le taux réduit de sensibilités post-opératoires observées en clinique avec les SAM (Mjör 2001). Besnault et Colon (2000) rapportèrent que l'incorporation de charges minérales de petite taille au sein des systèmes adhésifs permet de limiter le retrait de la résine adhésive, mais procure également à la couche adhésive des propriétés mécaniques lui permettant de dissiper au mieux les contraintes exercées lors du retrait de polymérisation du composite de restauration.

Récemment, une nouvelle génération de produits adhésifs a vu le jour. Son objectif est de compléter l'action de l'agent adhésif en lui conférant des propriétés complémentaires, telle qu'une désinfection rémanente.

Cette génération est le fruit des travaux d'Anderson et coll. (1985) qui reposent sur la mise en évidence de la persistance in vivo de bactéries au niveau des parois cavitaires, au sein de la boue dentinaire ou au niveau de la jonction amélo-dentinaire. Ce problème se pose particulièrement pour les systèmes auto-mordançants, qui dissolvent la boue dentinaire sans totalement l'éliminer (Besnault et coll., 2000).

Dans ces produits, on a ajouté le 12- Methacryloyloxy-Dodecyl-Pyridinium Bromide (MDPB) aux vertus antibactériennes (Tziafas et coll., 2007 ; Simon et coll., 2008). L'incorporation d'autres agents bioactifs tel que le fluor au sein des systèmes adhésifs apparaît comme une voie de recherche importante aujourd'hui. Ces recherches s'appuient sur le modèle de la technologie des ciments verre-ionomères, pour lesquels une reminéralisation peut être obtenue. Les résultats in vivo des études de Ferracane et coll. (1998), ont montré une diffusion du fluor sous forme d'un gradient de concentration au sein de la couche hybride et de la dentine sous-jacente, mais uniquement lorsque l'étanchéité est dégradée.

Indeed, setting contraction inevitably accompanying any polymerization reaction is translated by stresses generated at the tooth-restoration interfaces. Local debonding can occur leading to sealing defects (Van Meerbeek et al., 1999, 2003; Lambrechts et al., 2000).

Variations of intra-tubular pressure can mainly cause injury to the pulp-dentin complex. Self-etching adhesive systems present clinical advantage in appreciably reducing postoperative sensitivity. Contrary to adhesive systems requiring preliminary etching, self-etching adhesives do not remove dentin smear plugs and layer but impregnate them. These smear plugs at dentinal tubule orifices can considerably reduce dentin permeability (Degrange 2005).

Pashley (1984) indeed showed that dentin smear layer can reduce intra-tubular fluid movement to 86 %. Effective obturation of dentinal tubules explains reduced postoperative sensitivities observed in clinic with self-etching systems (Mjör 2001).

Besnault and Colon (2000) reported that small-size fillers incorporated in adhesive systems can reduce shrinkage of bonding resin and also provides mechanical properties to the adhesive layer allowing a maximum distribution of stresses generated during polymerization contraction of restorative composite.

A new generation of adhesive products has recently been introduced to providing additional disinfection property to adhesive agent.

Based on the study of Anderson et al. (1985), in vivo persistence of bacteria was demonstrated on cavity walls, within dentin smear layer or at the dentino-enamel junction. This problem arises particularly for self-etching systems which dissolve without totally eliminating dentin smear layer (Besnault et al., 2000).

In order to provide these adhesives with antibacterial property, 12-Methacryloyloxy Dodecyl Pyridinium Bromide (MDPB) monomers are incorporated (Tziafas et al., 2007; Simon et al., 2008).

An incorporation of other bioactive agents such as fluoride in adhesive systems seems to be at present under active research. These researches are based on the GIC technology model to obtain remineralization. The in vivo results of the study by Ferracane et al. (1998) showed a diffusion of fluoride in a concentration gradient fashion within the hybrid layer and underlying dentin, but only when the seal is degraded.



Cliniquement, l'effet bénéfique de ce relargage limité de fluor n'est pas connu. On ignore en particulier si les taux de relargage sont suffisants pour induire une protection contre la déminéralisation et les caries récurrentes. Cependant, ce mode d'action basé sur la perte d'étanchéité, reste en contradiction avec l'objectif même du collage, à savoir l'obtention d'une étanchéité la plus parfaite possible au niveau des interfaces, condition *sine qua non* pour éradiquer la percolation.

Étanchéité et protection pulpo-dentinaire

Écartant l'usage systématique en situation para-pulpaire de matériaux intermédiaires dits protecteurs et dentinogènes - mais considérés aujourd'hui comme mécaniquement fragiles et d'efficacité discutable - l'ensemble des auteurs modernes souligne l'importance primordiale de l'étanchéité des restaurations sur les interfaces qui, élimine les principales causes d'irritation pulpaire (d'origine bactérienne, mécanique ou chimique), ce qui est à l'origine de la disparition de l'inflammation pulpaire et de l'apparition de la cicatrisation pulpaire (Bergenholtz 2000 ; Chazel et coll., 2006).

Ces nouveaux arguments autorisent un changement de comportement clinique dont les procédures sont résolument orientées vers la recherche de l'étanchéité par hybridation systématique des interfaces collées, permettant d'assurer du même coup l'adhésion et la protection biologique. Selon Van Meerbeek et coll. (1999) et Degrange (2005) ces objectifs ne sont atteints qu'en suivant une méthodologie rigoureuse respectant avec soin les modalités d'application spécifique pour chaque système adhésif, avec un protocole opératoire approprié (champ opératoire, mordantage des surfaces, choix du type de l'adhésif et de la résine composite, stratification de fines couches de composite -2mm- pour diminuer la contraction de polymérisation, choix d'une lampe avec mode de polymérisation progressif, respect de la cinétique de polymérisation, orientation du vecteur de polymérisation...). Cependant, la formation d'un joint réellement étanche au contact de la dentine, se heurte à la complexité des substrats que l'on rencontre en clinique d'une part, la teneur hydrique de la dentine d'autre part. En effet, les parois d'une même cavité peuvent être composées de différents types de tissus : dentines secondaire, tertiaire, sclérotique, déminéralisée, reminéralisée ou même hyperminéralisée. La spécificité de ces différents états est nécessairement conséquente sur les valeurs d'adhésion et d'étanchéité aux interfaces cavitaires.

L'interphase dentine-adhésif apparaît souvent imparfaite. La zone de dentine déminéralisée peut n'être que partiellement infiltrée par les monomères. Ce différentiel entre l'épaisseur de tissu déminéralisé et l'épaisseur de

Clinically, the beneficial effect of this limited fluoride release is unknown. It is not known also if the rates of fluoride release are sufficient for a protection against demineralization and recurrent caries.

However, this mode of action based on the loss of seal remains contradictory to the objective of adhesion, that is to obtain the most perfect seal at the interfaces indispensable for microleakage prevention.

Sealing and pulp-dentin protection

Except in a zone close to the pulp where so-called protective and dentinogenic intermediary materials - but considered today as mechanically fragile and of debatable efficiency - is systematically used, all modern authors emphasize that sealing of restorations at the tooth-material interfaces is of primary significance in order to eliminate the main causes of pulpal irritation (of bacterial, mechanical or chemical origin), reduce pulpal inflammation and promote pulpal healing (Bergenholtz 2000; Chazel et al., 2006).

These new arguments have changes clinical practice and procedures toward a search for hermetic seal by systematic hybridization of the bonded interfaces simultaneously ensuring adhesion and biological protection. According to Van Meerbeek et al. (1999) and Degrange (2005), these objectives are achieved only when a rigorous methodology is followed and the modalities of specific application for each adhesive system are carefully respected. Appropriate operative protocols such as rubber dam application, etching of surfaces, choice of adhesive type and composite resin, stratification of composite in thin layer of 2mm increment to decrease polymerization contraction, choice of a lamp with progressive mode of polymerization, respect for the kinetics of polymerization, orientation of the vector of polymerization, etc. must be followed.

However, the formation of a real sealed interface in contact with dentin is complicated by dentin substrate of variable clinical quality and water content in dentin. Indeed, surrounding walls of the same cavity can consist of various types of tissues: secondary, tertiary, sclerotic, demineralized, remineralized or even hypermineralized dentin. Dentin of variable specificity inevitably affects bonding values and sealing at the cavity interfaces.

The dentin-adhesive interface seems often imperfect. The demineralized dentin zone can be only partially infiltrated by monomers. The difference between the thickness of demineralized dentin and that of infiltrated dentin can





l'infiltration est générateur de défauts à la base de la couche hybride, sources de nano-fuites (Mjör 2001).

Toutefois, en s'intéressant à la protection biologique, il s'avère indispensable d'évoquer l'importance de l'évaluation préalable du terrain (Fouad et Levin 2006 ; Murray et coll., 2002a), c'est-à-dire de l'état initial du complexe pulpo-dentinaire avant les travaux de restauration. En effet, comme le rappellent Ritter et coll. (2003), nombre d'échecs (douleurs postopératoires, pulpites, nécroses) sont dus à des erreurs de diagnostic, supposant, à tort, des capacités de récupération malheureusement dépassées de l'organe pulpo-dentinaire.

Ces aléas, suggérés dans la classification à visée thérapeutique des pulpopathies de Baume catégorie II :

« pulpes vivantes avec symptomatologie dont on estime pouvoir conserver la vitalité... » doivent être pris en compte et aboutir en cas de doute à l'instauration systématique d'une période d'assainissement, objectivée par l'insertion à moyen terme d'un pansement dentinaire à base de verre-ionomères (Decup 2005).

Grâce à leurs propriétés antibactériennes et leur adhésion chimique aux parois cavitaires, ces matériaux assurent les conditions optimales pour une cicatrisation pulpo-dentinaire (Murray et coll., 2002a).

D'un autre côté, Mjör et coll. (2002) supposent qu'en présence d'une inflammation pulpaire, la pénétration de la résine dans les tubuli dentinaires serait rendue plus difficile à cause de l'augmentation de la pression du fluide intratubulaire. L'adhésion obtenue dans cette condition, présenterait alors un défaut d'étanchéité (phénomènes de microleakage et de nanoleakage).

Ainsi, par principe de précaution face à ces cas douteux, ce n'est qu'après une phase de temporisation et le constat d'un état pulpaire normal que sont instaurées les procédures d'adhésion puis de restauration définitive (Decup 2005 ; Mjör et coll., 2002).

Cependant, toute la difficulté réside dans la définition de cet « état normal » de la pulpe. En effet, il manque en pratique clinique, un moyen de diagnostic fiable du degré d'inflammation pulpaire nécessaire à connaître pour l'instauration et le développement de thérapies biologiques.

Les seuls tests objectifs à disposition du clinicien sont les tests thermiques, voire électriques ; bien que très utiles, ils ne renseignent que sur la persistance d'une innervation au sein de la pulpe, alors qu'une évaluation de la persistance du système vasculaire serait une aide beaucoup plus précieuse

(Simon et coll., 2008 ; Bjørndal et Mjör, 2001).

Des tentatives d'utilisation de la Fluxmétrie Laser Doppler ont été confrontées à la particularité anatomique de la dent (étroitesse du volume de la pulpe, enfermée dans une masse minérale qui se comporte comme une barrière aux radiations) (Roy et coll., 2006).

cause defects at the base of the hybrid layer leading to nano-leakage (Mjör 2001).

With an attention paid to biological protection, it is however indispensable to evaluate the initial status of the pulp-dentin complex before the works of restoration before starting a restorative procedure (Fouad and Levin, 2006; Murray et al., 2002a). Indeed, as reminded by Ritter et al. (2003), number of failures such as postoperative pains, pulpitis and pulp necrosis are due to diagnostic errors wrongly estimating reparative capacity of the pulp-dentin complex.

These unpredictable pulp reactions in pulps defined in the treatment category II classification of pulp pathologies by Baume as: "vital pulps with a history of pain that a vitality conservation is possible..." must be taken into account and in case of doubt a systematic disinfection must be performed using temporary dentin dressing with glass ionomer bases (Decup 2005).

Due to antibacterial properties and chemical adhesion to cavity walls, GICs ensure optimal conditions for a pulp-dentin healing (Murray et al., 2002a).

Moreover, Mjör et al. (2002) suggested that in the presence of pulpal inflammation, resin penetration into dentinal tubules would be achieved with difficulty because of increased intratubular fluid pressure. Adhesion obtained in this condition would present then a defect of seal leading to microleakage and nanoleakage.

With precaution in doubtful cases, it is thus only after temporization period and revealed observation of a normal pulp status that bonding procedures then definitive restoration can begin (Decup 2005; Mjör et al., 2002).

However, the definition of "normal status" of the pulp presents clinical difficulty. In clinical practice, there is no reliable diagnostic means to detect pulpal inflammation degree necessary for the establishment and development of biological treatment.

The only objective tests available for the clinician are thermal and electric tests. Although highly useful, these tests inform only the existence of pulp innervation while an evaluation of the existence of vascular system would be much more helpful (Simon et al., 2008; Bjørndal and Mjör, 2001).

Attempts to use Laser Doppler Flowmetry were confronted with anatomical particularity of the tooth (narrow pulp volume, enclosed in a mineral mass presenting as a barrier to x-ray) (Roy et al., 2006).



En pratique clinique, à la suite de la période de temporisation (deux semaines) - l'absence de toute symptomatologie pulpaire, autorisera la mise en place de la restauration définitive.

En effet la limite généralement admise de réversibilité de l'inflammation pulpaire correspond au terme de « pulpite aiguë » caractérisée par l'apparition de douleur spontanée (Jean et coll., 1995).

À la lecture de multiples observations cliniques, il semble bien pour Van Meerbeek (1999) que le respect des principes de collage précédemment évoqués aboutisse, aussi bien lors de travaux d'obturation cavitaire que de collages sur dents pulpées d'éléments cosmétiques comme des coiffes céramo-céramiques ou facettes, à une absence totale de symptomatologie postopératoire.

Les études in vitro « les batailles de l'adhésion » organisées depuis Juin 2000 par Degrange et coll. (2001), ont permis de tester des adhésifs auprès de milliers de praticiens (plus de 10 000 tests, plus de 80 adhésifs) et d'apprécier notamment la sensibilité de manipulation de ces produits : les M&R en 3 temps et les SAM en 2 temps montrent les meilleurs résultats. La variabilité est également importante au sein d'une même classe d'adhésif et entre les différentes classes.

L'opérateur semble être le facteur le plus important dans la réussite du protocole de collage.

Vieillessement de l'interface collée.

Malgré l'évolution significative des systèmes adhésifs, l'interface collée reste le point faible de toute restauration adhésive.

La majorité des études, (Breschi et coll., 2008), rapportent la supériorité des performances des adhésifs en trois étapes, ayant recours au mordantage acide à condition toutefois de respecter le protocole opératoire. Les adhésifs auto-mordantants en une seule étape offrent eux les résultats les moins durables. En d'autres termes la simplification des procédures cliniques se fait au détriment de l'efficacité de collage. Ceci se traduit dans le temps, sur le plan microscopique, par la dégradation de la couche hybride responsable du vieillissement de l'interface collée (Degrange 2005 ; Breschi et coll., 2008).

Selon Degrange (2005) et Breschi et coll. (2008), la longévité clinique de la couche hybride semble impliquer des facteurs physiques et chimiques. Les facteurs physiques -comme les forces occlusales de mastication et les variations thermiques- induisent des cycles de stress par alternance de phénomènes d'expansion et de rétraction au niveau de l'interface collée, ce qui va affecter sa stabilité.

In clinical practice – following to the period of two-week temporization - a final restoration is allowed in an absence of pulpal symptom.

Indeed, the generally accepted limit of reversibility of pulpal inflammation corresponds to « acute pulpitis » characterized by spontaneous pain (Jean et al., 1995).

From several clinical observations during restoration and bonding of cosmetic materials such as all-ceramic veneers on vital teeth, Van Meerbeek (1999) indicated that the respect for the previously evoked principles of adhesion would lead to a total absence of postoperative symptom. In in vitro studies “bonding battles” organized since June, 2000 by Degrange et al. (2001), more than 10 000 bonding tests with more than 80 adhesive materials were performed by thousand clinicians to evaluate notably technique sensitivity of these materials. 3-step etching and rinsing and 2-step self-etching adhesive systems were shown to give the best results. A significant variability was observed within the same class of adhesives and between different classes.

The operator seems to be the factor the most important in the success of bonding protocol.

Ageing of the bonded interface

In spite of significant evolution of adhesive systems, the bonded interface remains the weak point of any adhesive restoration.

Most studies reported the superiority in performance of 3-step adhesives with acid etching providing that the operative protocol must be respected (Breschi et al., 2008). One-step self-etching adhesives offer the least durable results. In other words, a simplification of clinical procedures is obtained to the detriment of bonding efficacy. Microscopically, it is observed as a degradation of the hybrid layer responsible for ageing of the bonded interface (Degrange 2005; Breschi et al., 2008).

According to Degrange (2005) and Breschi et al. (2008), clinical longevity of the hybrid layer seems to be influenced by physical and chemical factors. Physical factors such as occlusal forces of mastication and thermal variations induce stress cycles with alternated expansion and shrinkage phenomena affecting the bonded interface and its stability.





Les facteurs chimiques intéressent essentiellement les agents acides présents dans la salive, les aliments, le fluide dentinaire et les produits de dégradation des bactéries (corrélés au degré de l'hygiène bucco-dentaire), responsables de la dégradation des fibres de collagènes non protégées par la résine adhésive, et l'hydrolyse de cette dernière. Le vieillissement du joint collé est le résultat de la dégradation de la couche hybride par la synergie des phénomènes de dégradation qui vont affecter chacun de ses constituants.

De manière plus globale, une imprégnation insuffisante de la dentine par le système adhésif, une grande perméabilité de l'interface collée, une polymérisation incomplète, et une activation d'enzymes collagénolytiques endogènes en absence de toute contamination bactérienne responsables de la dégradation des fibres de collagène, et une mauvaise hygiène buccale, sont parmi les facteurs récemment inculpés dans la réduction de la longévité de l'interface collée, principale cause des récives carieuses et des complications pulpaire (Degrange 2005 ; Breschi et coll., 2008).

Chemical factors such as acidic agents present in saliva, food, dentinal fluid and bacterial degradation products are responsible for degradation of collagen fibers not protected by adhesive resin and also hydrolysis of adhesive resin. Ageing of the bonded interface is the result of degradation synergy of each component constituting the hybrid layer.

Globally, insufficient impregnation of dentin by adhesives, high permeability of the bonded interface, incomplete polymerization, activation of endogenous collagenolytic enzymes responsible for collagen fiber degradation in absence of any bacterial contamination and poor oral hygiene are among the factors recently reported to result in a reduced longevity of the bonded interface, main cause of recurrent caries and pulpal complications (Degrange 2005; Breschi et al., 2008).



Conclusion

Une protection pulpo-dentinaire effective est possible avec les techniques adhésives actuelles. L'ignorance des concepts biologiques, des moyens technologiques ou des méthodes d'adaptation à la biologie reste la cause principale de l'échec de nos restaurations collées.

Actuellement, les procédures sont résolument orientées vers la recherche de l'étanchéité par hybridation systématique des interfaces collées, permettant d'assurer du même coup l'adhésion et la protection biologique, réunissant ainsi, les conditions adéquates pour maintenir la vitalité pulpaire.

L'injonction d'Hippocrate « Primum non nocere » doit demeurer un principe cardinal dans notre pratique quotidienne. On devrait garder à l'esprit qu'une simple négligence survenue pendant la réalisation d'une simple restauration, peut être à l'origine d'une étiologie iatrogène, qui peut induire une série de complications pulpaires.

Conclusion

An effective pulp-dentin protection is possible with current adhesive techniques. Unawareness of biological concepts, present technology or biological adaptation methods remains the main cause of failure in bonded restorations.

At present, adhesive procedures are determinedly directed towards sealing by systematic hybridization of the bonded interfaces, simultaneously ensuring adhesion and biological protection and providing adequate conditions to maintain pulpal vitality.

The Hippocratic Oath « First, do no harm » must remain a cardinal principle in daily practice. It must be kept in mind that a simple negligence even during a simple restoration can become an iatrogenic cause leading to pulpal complications.

Traduction : Ngampis SIX

Demande de tirés-à-part :

Nisrine EL ARROUF - Faculté de Médecine Dentaire - Université Mohamed V - BP 6212 instituts - RABAT - MAROC



- ANDERSON M.H., CHARBENEAU G.T.
A comparison of digital and optical criteria for detecting carious dentin. *J Prosth Dent* 1985;**53**:643-646. (Cat.2)
- BERGENHOLTZ G.
Evidence for bacterial causation of adverse pulpal responses in resin based dental restoration. *Crit Rev Oral Biol Med* 2000;**11**:467-480. (Cat.1)
- BESNAULT C., COLON P.
L'adhésion aux tissus dentaires. *Rev Odonto Stomat* 2000;**4**:209-216. (Cat.3)
- BJØRNDAL L., MJÖR I.A.
Pulp-dentin biology in restorative dentistry. Part 4: Dental caries- characteristics of lesions and pulpal reactions. *Quintess Int* 2001;**32**:717-736. (Cat.3)
- BLANK U.
Coiffage pulpaire direct : systèmes adhésifs ou hydroxyde de calcium ? *Réal Clin* 1999;**10**(2):225-235. (Cat.3)
- BRACKETT W.W., COVEY D.A., HAISCH L.D.
The effect of elevated temperatures on the dentin adhesion of resin composites. *Oper Dent* 2003;**28**(3):303-306. (Cat.2)
- BRESCHI L., MAZZONI A., RUGGERI A., CADENARO M., DI LENARDA R., DE STEFANO DORIGO E.
Dental adhesion review : Aging and stability of the bonded interface. *Dent Mater* 2008;**24**:90-101. (Cat.3)
- CHAZEL J.-C., ESBER S., KOUASSI M., PELISSIER B.
Pulpathies iatrogènes. Étiologies, prévention et traitements. *Encycl Méd Chir* [28-260-V-10] 2006. (Cat.3)
- CIUCCHI B., BOUILLAGUET S., HOLTZ J.
La perméabilité dentinaire et ses implications cliniques. *Réal clin* 1995;**6**(2):145-157. (Cat.3)
- COX C.F., SUBAY R.K., OSTRO E., SUZUKI S., SUZUKI S.H.
Tunnel defects in dentin bridges: their formation following direct pulp-capping. *Oper Dent* 1996;**21**:4-11. (Cat.2)
- COX C.F., SUZUKI S.
Re-evaluating pulp protection: calcium hydroxyde liners vs. cohesive hybridization. *J Amer dent Ass* 1994;**125**:823-831. (Cat.3)
- DECUP F.
Procédures cliniques pour les restaurations composites. *Réal clin* 2005;**16**(4):377-394. (Cat.3)
- DEGRANGE M.
Les adhésifs amélo-dentinaires. *Réal clin* 2005;**16**(4):327-348. (Cat.3)
- DEGRANGE M., HITMI I., GONTHIER S., BASSET F., BIAOUI J.
Efficiency of new enamel-dentin bonding systems : assessment by general practitioners. In *Advances in operative dentistry*. Chicago : *Quintess pub* 2001;173-183. (Cat.2)
- DUNCAN H.F., RAMACHANDRAN NAIR P.N., PITT FORD T.R.
Vital pulp treatment: a review. *Endo Prac Today*, 2009;**2**(4):247-258. (Cat.3)
- FARGE J.C., MAGLOIRE H.
Le complexe pulpo-dentinaire. In *La dent normale et pathologique*. Ed: *De Boeck Univer Bruxelles*, 2001 (Cat.3)
- FERRACANE J.L., MITCHEM J.C., ADEY J.D.
Fluoride penetration into the hybrid layer from a dentin adhesive. *Amer J Dent* 1998;**11**:23-28.
- FOUAD A., LEVIN L.
Pulpal reaction to caries and dental procedures. In *Pathways of the pulp*. 9th Ed: *CV Mosby St Louis* 2006;514-540. (Cat.3)
- GOLDBERG M., SMITH A. J.
Cells And Extracellular Matrices Of Dentin And Pulp : A Biological Basis For Repair And Tissue Engineering. *Crit Rev Oral Biol Med* 2004;**15**(1):13-27.
- GOLDBERG M., SIX N., DECUP F., BOURD K., PALMIER K., LASFARGUES J.J. SALIH E., VEIS A.
Minéralisation de la pulpe dentaire. Comment induire, à la demande de la dentine réparatrice ou faire minéraliser l'ensemble de la pulpe radriculaire : ingénierie tissulaire et thérapeutiques pulpaires de demain en odontologie. *Cah ADF* 2001;**11**:25-32. (Cat.2)
- GRAHAM L., COOPER P.R., CASSIDY N., NOR J.E., SLOAN A.J., SMITH A.J.
The effect of calcium hydroxide on solubilisation of bio-active dentine matrix components. *Biomaterials* 2006;**27**(14):2865-2873.
- GREGOIRE G., POPULER P., MAGNE S., GUYONNET J.-J.
Biocompatibilité des matériaux utilisés en odontologie. EMC (Elsevier Masson SAS, Paris), *Odontol* 23-063-G-15, 2008, *Méd buc* 28-225-H-10, 2008. (Cat.3)
- GREGOIRE G., MILLAS A.
La protection dentino-pulpaire : pourquoi, quand, comment ? *Réal Clin* 1995;**6**(2):159-172. (Cat.3)
- HEBLING J., GIRO E.M., COSTA C.A.
Human pulpal response after an adhesive system application in deep cavities. *J Dent* 1999;**27**:557-564.
- JEAN A., ALLIOT-LICHT B., LABOUX O., MARION D.
Conserver la pulpe vivante : dans quelles limites. *Réal clin* 1995;**6**(2):183-192. (Cat.4)
- KITASAKO Y., INOKOSHI S., TAGAMI M.
Effects of direct resin pulp capping techniques on short term response of mechanically exposed pulps. *J Dent* 1999;**27**:257-263.



- LAMBRECHTS P., VAN MEERBEEK B., PERDIGAO J., VANHERLE G.
Le collage : ce qu'on doit faire, ce qu'on ne doit pas faire. In Collage et adhésion : la révolution silencieuse. Ed: *Quintess Inter* Paris, 2000. (Cat.3)
- LASFARGUES J.J., KALEKA R., LOUIS J.J.
Dentisterie restauratrice prophylactique et adhésive : le concept Si/Sta. In Collage et adhésion : la révolution silencieuse. Ed: *Quintess Inter* Paris, 2000. (Cat.3)
- LEHMANN N., BESNAULT C., LE GOFF S., DEGRANGE M.
Les lampes à photopolymériser : Halogènes ou diodes électroluminescentes. *Réal clin* 2005;16(4):365-376. (Cat.3)
- LEVIN L.G.
Pulpal irritants. *Endo top* 2003;5:2-11. (Cat.3)
- LEINFELDER KF., FREEDMAN G., PAKROO JS.
Posoperative sensitivity: bonded cavity liners revisited. *Dent Today* 2001;20:82-87. (Cat.3)
- LOPES G.C., BARATIERI L.N., CALDIERA DE ANDRADA M.A., VIEIRA L.C.C.
Dental adhesion: present state of the art and future perspectives. *Quintess Int* 2002;33:231-224. (Cat.3)
- MESSER H.H.
Permanent restorations and the dental pulp. In Seltzer and Bender's dental pulp. Ed: *Carol Stream Quintess Inter* Paris, 2002. (Cat.3)
- MITSIADIS T. A., RAHIOTIS C.
Parallels between tooth development and repair: conserved molecular mechanisms following carious and dental injury. *J dent Res* 2004;83(12):896-902.
- MJÖR I.A.
Pulp-dentin biology in restorative dentistry. Part 1: Normal structure and physiology. *Quintess Int* 2001;32:427-446. (Cat.3)
- MJÖR I.A., FERRARI M.
Pulp-dentin biology in restorative dentistry. Part 6: Reactions to restorative materials, tooth-restoration interfaces, and adhesive techniques. *Quintess Int* 2002; 33:35-63. (Cat.3)
- MJÖR I.A., NORDAHL I.
The density and branching of dentinal tubules in human teeth. *Arch Oral Biol* 1996;41:401-412. (Cat.2)
- MOUNT G.J., BRYANT R.W.
Les matériaux en verres ionomères. In Préservation et restauration de la structure dentaire. Ed: *De Boeck Univer* Bruxelles, 2002. (Cat.3)
- MURRAY PE, ABOUT I, LUMLEY PJ, SMITH G., FRANQUIN JC, SMITH AJ.
Postoperative pulpal and repair responses. *J Amer dent Ass* 2000;131:321-329. (Cat.3)
- MURRAY P.E., LUMLEY P.J., SMITH A.J.
Preserving the vital pulp in operative dentistry: 2. Guidelines for successful restoration of unexposed dentinal lesions. *Dent Update* (2002 a);29:127-134. (Cat.3)
- MURRAY P.E., LUMLEY P.J., SMITH A.J.
Preserving the vital pulp in operative dentistry: 3. Thickness of remaining cavity dentine as a key mediator of pulpal injury and repair responses. *Dent Update* (2002b);29:172-178. (Cat.1)
- MURRAY P.E., SMITH A.J., GARCIA-GODOY F., LUMLEY P.J.
Comparison of operative procedure variables on pulpal viability in an ex vivo model. *Inter Endo J* 2008;41:389-400. (Cat.2)
- MURRAY PE, SMITH A.J., WINDSOR L.J., MJOR M.
Remaining dentin thickness and pulpal responses. *Inter Endo J* 2003;36:33-43. (Cat.1)
- NAKABAYASHI N., KOJIMA K., MASUHARA E. (Cat.2)
The promotion of adhesion by infiltration of monomers into tooth structures. *J Biomed Mater Res* 1982;16:265-273. (Cat.2)
- OLMEZ A., OZTAS N., BASAK F., SABUNCUOGLU B.
A histopathologic study of direct pulp-capping with adhesive resins. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radio Endo* 1998;86:98-103. (Cat.2)
- OLSSON H., PETERSSON K., ROHLIN M.
Formation of a hard tissue barrier after pulp capping in humans. A systematic review. *Inter Endo J* 2006;39(6):429-442. (Cat.1)
- PAMEIJER C.H., STANLEY HR., ECKER G.
Biocompatibility of a glass-ionomer luting agent. Part II: Crown cementation. *Amer J Dent* 1991;4:134-141. (Cat.2)
- PASHLEY D.H., TAY F.R.
Smear layer : physiological considerations. *Oper Dent Sup* 1984;3:13-29. (Cat.2)
- PITT FORD T.R.
Pulpal response to a calcium hydroxide material for capping exposures. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radio* 1985;59:194-197. (Cat.2)
- RITTER A.V., SWIFT E.J.
Current restorative concepts of pulp protection. *Endo top* 2003;5:41-48. (Cat.3)
- ROY E., ARMENGOL V., FRAYSSE C., JEAN A.
Le laser doppler en odontologie. *Rev Franco Odonto Pédiat (RFOP)* 2006;01(04):188-195 (Cat.1)
- SCHELDLE A., FRANZ A., RAUSCH-FAN X., SPITTLER A., LUCAS T., SAMORAPOOMPICHIT P.
Cytotoxic effects of dental composites, adhesive substances, compomers and cements. *Dent Mater* 1998;14:429-440. (Cat.3)
- SIMON S., COOPER P., BERDAL A., MACHTOU P., SMITH A. J.
Biologie pulpaire : comprendre pour appliquer au quotidien. *Rev Odont Stomat* 2008;37:209-235. (Cat.3)
- SMITH A.J., MURRAY P.E., LUMLEY P.J.
Preserving the vital pulp in operative dentistry: I. A biological approach. *Dent Update* 2002;29:64-69. (Cat.3)





SMITH AJ., LUMLEY PJ., TOMSON PL., COOPER PR.
Dental regeneration and materials - a partnership. *Clin Oral Invest* 2008;**12**:103-108. (Cat.3)

STANLEY H.
Calcium hydroxyde and vital pulp therapy .In Seltzer and Bender's Dental Pulp. Ed: *Carol Stream Quintess Inter Paris*, 2002:309-323. (Cat.3)

STANGEL I., ELLIS TH. SACHER E.
Adhesion to thooth structure mediated by contemporary bonding systems. *Dent clin Amer* 2007;**51**:677-694. (Cat.3)

TORSTENSON B., BRÄNNSTRÖM M.
Pulpal response to restoration of deep cavities with high-copper amalgam. *Swed Dent J* 1992;**16**:93-99. (Cat.2)

TZIAFAS D., VEIS A., ALVANO A.
Inability of calcium hydroxide to induce reparative dentinogenesis at non-peipheral sites of dog dental pulp. *Eur J Oral Sci* 1996;**104**:623-626.

TZIAFAS D., KOLINIOTOU-KOUMPIA E, TZIAFAS C, PAPANIMITRIOU S.
Effects of a new antibacterial adhesive on the repair capacity of the pulp-dentine complex in infected teeth. *Inter Endo J* 2007;**40**:58-66. (Cat.1)

UNEMORI M., MATSUYA Y., AKASHI A., GOTO., AKAMINE A.
Composite resin restoration and postoperative sensitivity: clinical folow-up in a undergraduate program. *J Dent* 2001;**29**:7-13. (Cat.1)

VAN MEERBEEK B., DE MUNK J., YOSHIDA Y., INOUE S., VARGAS M.
Buonocore memorial lecture. Adhesion to enamel and dentin: current statuts and future chalengers. *Oper Dent* 2003;**28**:215-235. (Cat.3)

VAN MEERBEEK B., LAMBRECHTS P, VANHERLE G.
Facteurs cliniques influençant la réussite de l'adhésion à l'émail et à la dentine. *Réal clin* 1999;**10**(2):175-195. (Cat.3)

WISITHPHROM K., MURRAY P. E., ABOUT I., WINDSOR L. J.
Interactions Between Cavity Preparation and Restoration Events and Their Effects on Pulp Vitality. *Int J Perio Resto Dent* 2006;**26**:596-605. (Cat.1)

YNGCUK K., TROWBRIDGE H.O.
Pulpal reaction to caries and dental procedures. In Pathways of the pulp. Ed : *CV Mosby St Louis, 1998*. (Cat.3)

ZACH L., COHEN G.
Pulpal response to externally applied heat. *Oral Surg Oral Med Oral Path* 1965;**19**:515-530. (Cat.2)