



<http://portaildoc.univ-lyon1.fr>

Creative commons : Attribution - Pas d'Utilisation Commerciale
- Pas de Modification 4.0 France (CC BY-NC-ND 4.0)



<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/deed.fr>

UNIVERSITE CLAUDE BERNARD LYON 1
U.F.R D'ODONTOLOGIE

Année 2026

Thèse n°2026 LYO1D 001

THÈSE
POUR LE DIPLÔME D'ÉTAT DE DOCTEUR EN CHIRURGIE
DENTAIRE

Présentée et soutenue publiquement le 07 janvier 2026

Par

Christophe WANG

Né le 16 mars 2001 à Paris 10^{ème} (75010)

Mise au point sur les systèmes adhésifs en 2025 et stratégies d'optimisation de l'adhésion

JURY

Monsieur le Professeur Christophe JEANNIN

Président

Madame la Docteure Marion LUCCHINI

Assesseure

Monsieur le Docteur Raphaël RICHERT

Assesseur

Madame la Docteure Julie SANTAMARIA

Assesseure

UNIVERSITÉ CLAUDE BERNARD LYON I

PRÉSIDENT DE L'UCBL

Bruno LINA

Directeur Général des Services

Séverine BATTIN

VICE-PRÉSIDENTS ET VICE-PRÉSIDENTES ÉLUS

Conseil d'Administration

Sandrine CHARLES

Commission de la Recherche du Conseil Académique

Arnaud BRIOUDE

Commission de la Formation et de la Vie Universitaire du
Conseil Académique

Julie-Anne CHEMELLE

En charge des Ressources Humaines

Fabien DE MARCHI

En charge de la Transition Écologique et de la Responsabilité
Sociétale

Gilles ESCARGUEL

En charge des Relations avec les Hospices Civils de Lyon
et les Partenaires Hospitaliers

Frédéric BERARD

SECTEUR SANTÉ

Président du Comité de Coordination des Études Médicales

Philippe PAPAREL

Doyen de l'UFR de Médecine Lyon-Est

Gilles RODE

Doyen de l'UFR de Médecine et de Maïeutique Lyon Sud –
Charles Mérieux

Philippe PAPAREL

Directeur de l'Institut des Sciences Pharmaceutiques et
Biologiques (ISPB)

Claude DUSSART

Doyen de l'UFR d'Odontologie

Jean-Christophe MAURIN

Directeur de l'Institut des Sciences & Techniques
de Réadaptation (ISTR)

Jacques LUAUTÉ

SECTEUR SCIENCES ET TECHNOLOGIE

Directrice de l'UFR Biosciences	Kathrin GIESELER
Directeur de l'UFR Faculté des Sciences	Olivier DEZELLUS
Directeur de l'UFR Sciences & Techniques des Activités Physiques et Sportives (STAPS)	Guillaume BODET
Directeur de Polytech Lyon	Jean-Baptiste POURET
Directeur de l'Institut Universitaire de Technologie Lyon 1 (IUT)	Michel MASSENZIO
Directeur de l'Institut des Science Financière & Assurances (ISFA)	Christian ROBERT
Directeur de l'Observatoire de Lyon	Emanuela MATTIOLI
Directeur de l'Institut National Supérieur du Professorat & de l'Éducation (INSPÉ)	Thierry TERRET
Directrice du Département-composante Génie Électrique & des Procédés (GEP)	Sophie CAVASSILA
Directrice du Département-composante Informatique	Saida BOUAZAK BRONDEL
Directeur du Département-composante Mécanique	Marc BUFFAT

FACULTE D'ODONTOLOGIE DE LYON

Doyen : Pr. Jean-Christophe MAURIN, Professeur des Universités-Praticien hospitalier

Vice-Doyens : Pr. Maxime DUCRET, Professeur des Universités - Praticien hospitalier
Pr. Brigitte GROSGOGEAT, Professeure des Universités - Praticien hospitalier
Pr. Cyril VILLAT, Professeur des Universités - Praticien hospitalier

SOUS-SECTION 56-01 : ODONTOLOGIE PEDIATRIQUE ET ORTHOPEDIE DENTO-FACIALE

Professeur Emérite des Universités-PH : M. Jean-Jacques MORRIER,
Professeure des Universités-PH : Mme Béatrice THIVICHON-PRINCE
Maîtres de Conférences-PH : Mme Sarah GEBEILE-CHAUTY, Mme Claire PERNIER
Mme Guillemette LIENHART

SOUS-SECTION 56-02 : PREVENTION – EPIDEMIOLOGIE ECONOMIE DE LA SANTE – ODONTOLOGIE LEGALE

Professeur des Universités-PH : M. Denis BOURGEOIS
Maître de Conférences-PH : M. Bruno COMTE
Maître de Conférences Associé : M. Laurent LAFOREST

SOUS-SECTION 57-01 : CHIRURGIE ORALE – PARODONTOLOGIE – BIOLOGIE ORALE

Professeurs des Universités-PH : M. Jean-Christophe FARGES, Mme Kerstin GRITSCH
M. Arnaud LAFON

Maîtres de Conférences-PH : Mme Doriane CHACUN, M. Thomas FORTIN
Mme Kadiatou SY, M. François VIRARD

SOUS-SECTION 58-01 : DENTISTERIE RESTAURATRICE, ENDODONTIE, PROTHESE, FONCTION-DYSFONCTION, IMAGERIE, BIOMATERIAUX

Professeure Émérite des Universités-PH : Mme Dominique SEUX

Professeurs des Universités-PH : M. Maxime DUCRET, M. Pierre FARGE,
Mme Brigitte GROSGOGEAT, M. Christophe JEANNIN
M. Jean-Christophe MAURIN, Mme Catherine MILLET
Mme Sarah MILLOT, M. Olivier ROBIN, M. Cyril VILLAT

Maîtres de Conférences-PH : Mme Marie-Agnès GASQUI DE SAINT-JOACHIM
Mme Marion LUCCHINI, M. Raphaël RICHERT,
M. Thierry SELLI, Mme Sophie VEYRE, M. Stéphane VIENNOT

Professeur Associé M. Hazem ABOUELLEIL-SAYED

Maîtres de Conférences Associés Mme Marjorie FAURE, Mme Ina SALIASI, Mme Marie TOHME

SECTION 87 : SCIENCES BIOLOGIQUES FONDAMENTALES ET CLINIQUES

Professeure des Universités : Mme Florence CARROUEL

REMERCIEMENTS

À notre Président du jury,

Monsieur le Professeur Christophe JEANNIN,

Professeur des Universités à l'UFR d'Odontologie de Lyon – Praticien Hospitalier

Docteur en Chirurgie Dentaire

Docteur de l'Institut National Polytechnique de Grenoble

Habilité à Diriger les Recherches

Je vous remercie sincèrement d'avoir accepté d'assurer la présidence de jury.

Vous avez occupé un rôle majeur depuis la troisième année jusqu'à la dernière année et vos enseignements ont été plus que précieux, par conséquent, c'est pour moi inestimable de vous avoir dans ce jury,

Je tiens à souligner l'immense pédagogie et la bienveillance dont vous avez fait preuves durant toute notre formation. Le savoir théorique et technique que vous m'avez apporté a façonné ma compréhension de la discipline, et pour tout cela, votre empreinte restera gravée à jamais.

Je vous renouvelle mes remerciements les plus sincères.

À notre jury et directrice de thèse,

Madame la Docteure Marion LUCCHINI,

Maître de conférences des Universités à l'UFR d'Odontologie – Praticien Hospitalier

Docteur en Chirurgie Dentaire

Docteur de l'Université Lyon 1

Je tiens à vous remercier sincèrement d'avoir accepté de diriger ce travail de thèse.

Je vous suis extrêmement reconnaissant de m'avoir fait confiance, de m'avoir guidé sur ce travail. Votre disponibilité, vos conseils ont été d'une aide précieuse tout au long de son écriture.

Vous m'avez accompagné dans mon parcours dès la 2^{ème} année en pré-clinique jusqu'à la clinique, mon cursus sera marqué à jamais par vos apprentissages durant toutes ces années. Votre bienveillance, votre attention et votre respect, tant à l'égard des patients qu'à l'égard des étudiants, m'ont profondément marqué. Il m'a donc semblé naturel de vous associer à ce travail de fin de cursus.

Je vous adresse de nouveau mes remerciements les plus chaleureux et ma profonde gratitude.

À notre jury de thèse,

Monsieur le Docteur Raphaël RICHERT,

Maître de conférences des Universités à l'UFR d'Odontologie – Praticien Hospitalier

Docteur en Chirurgie Dentaire

Docteur de l'Université Lyon 1

Je vous remercie d'avoir accepté de siéger dans ce jury de thèse.

Je tiens à vous exprimer toute ma reconnaissance pour la qualité de vos enseignements théoriques et techniques. Votre sérieux, votre bienveillance, et votre rigueur m'ont beaucoup appris durant ces 3 dernières années. Votre présence dans ce jury est précieuse à mes yeux.

Vous avez ma gratitude la plus sincère.

À notre jury de thèse,

Madame la Docteur Julie SANTAMARIA,

Praticien Hospitalier

Ancienne Assistante Hospitalo-Universitaire

Docteur en Chirurgie Dentaire

Je tiens à vous remercier d'avoir accepté de siéger dans ce jury de thèse.

Je tiens tout particulièrement à souligner l'importance de la considération que vous nous portez à tous en prenant le soin de retenir nos noms et nos caractères.

Votre enthousiasme, votre pédagogie, et votre bienveillance durant ces années de clinique, notamment la dernière année, m'ont énormément apporté tant sur le plan scolaire que le plan humain.

Vous avoir dans mon jury était fondamental, j'aimerais donc vous renouveler mes remerciements et ma reconnaissance.

TABLE DES MATIÈRES

INTRODUCTION	1
1. L'adhésion et les systèmes adhésifs	2
1.1. Principes de l'adhésion	2
1.1.1. Généralités.....	2
1.1.2. Adhésion à l'émail	3
1.1.3. Adhésion à la dentine.....	4
1.2. Classification des adhésifs	6
1.3. Cahier des charges requis	9
2. Comparaison des performances	11
2.1. Critères de comparaison et méthode d'évaluation	11
2.2. Résultats	13
2.2.1. Adhésion à l'émail	13
2.2.2. Adhésion à la dentine.....	13
2.2.2.1. Dentine saine	13
2.2.2.2. Dentine sur dent traitée endodontiquement.....	14
2.2.2.3. Dentine cariée/affectée.....	15
2.2.2.4. Dentine sclérotique	15
2.2.3. Adhésion au composite	16
2.2.4. Adhésion aux matériaux prothétiques : zircon, métaux et céramiques	16
3. Recommandations et optimisation des systèmes adhésifs	18
3.1. Recommandations cliniques	18
3.2. Stratégies thérapeutiques pour améliorer la qualité de l'adhésion	19
3.3. Perspectives	24
CONCLUSION	25
TABLE DES ILLUSTRATIONS	26
BIBLIOGRAPHIE	27

INTRODUCTION

La dentisterie restauratrice a considérablement évolué au cours des dernières décennies, portée par les progrès constants des matériaux et des techniques opératoires. Les restaurations adhésives constituent aujourd'hui un pilier incontournable des soins conservateurs, visant à restaurer la fonction et l'esthétique tout en préservant au maximum la structure dentaire résiduelle.

Ces avancées ont été rendues possibles grâce à l'avènement et au perfectionnement des systèmes adhésifs, qui assurent l'intégration intime et durable des matériaux restaurateurs avec les tissus dentaires. L'adhésion qui repose sur des mécanismes complexes impliquant à la fois l'émail et la dentine, est au cœur du succès des restaurations directes modernes.

Toutefois, malgré ces progrès, le praticien fait face aujourd'hui à une offre particulièrement vaste de systèmes adhésifs, chacun reposant sur des principes et des protocoles cliniques spécifiques. Cette diversité complexifie le choix thérapeutique et peut soulever des interrogations concernant le système le plus adapté aux différentes situations cliniques.

Dans ce contexte, il apparaît essentiel de réaliser une mise au point sur les systèmes adhésifs disponibles en 2025, en intégrant les connaissances actuelles et de dégager des recommandations cliniques visant à optimiser la durabilité, la fiabilité et la qualité des restaurations adhésives dans la pratique quotidienne.

1. L'adhésion et les systèmes adhésifs

1.1. Principes de l'adhésion

1.1.1. Généralités

L'adhésion est le processus par lequel deux surfaces sont maintenues ensemble. En dentisterie adhésive, les adhésifs amélo-dentaires sont des biomatériaux d'interfaces qui permettent la liaison entre les tissus durs dentaires, l'émail et la dentine, et les matériaux de restauration.

Une notion clé à considérer dans le processus d'adhésion est la mouillabilité qui se définit comme la capacité d'un liquide à s'étaler sur une surface, comme nous pouvons en voir une représentation schématique sur la figure 1. Elle dépend de la tension superficielle ou énergie de surface du substrat, et de la viscosité du matériau appliqué. Plus l'énergie de surface est élevée, plus le liquide aura tendance à s'étaler. Une bonne mouillabilité permettra la pénétration capillaire, recherchée lors de l'application de l'adhésif. En clinique, l'augmentation de la rugosité de surface par mordantage améliore la mouillabilité (1).

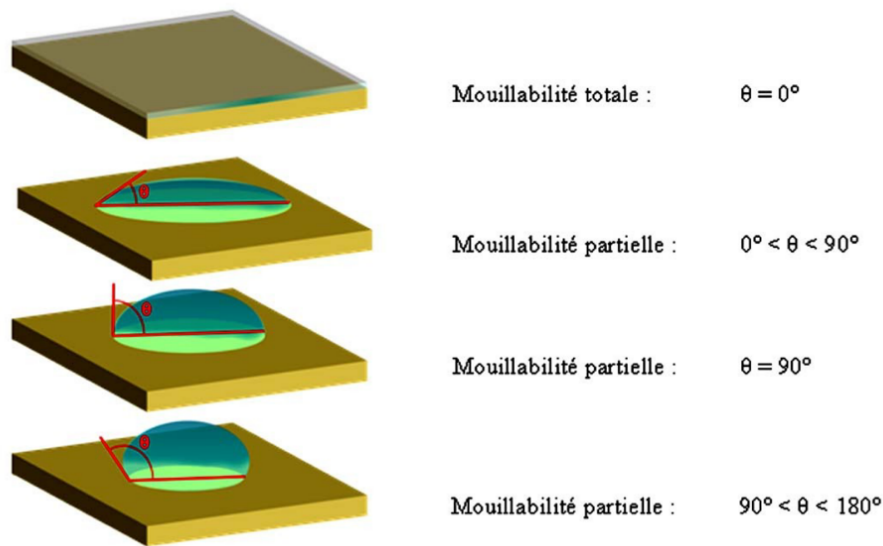


Figure 1 : Représentation schématique des différents comportements d'un liquide sur une surface solide (1)

1.1.2. Adhésion à l'émail

L'émail se compose à 97% de matière minérale, sous forme de cristaux d'hydroxyapatite. Il contient 1% de matière organique (protéines et lipides) et les 2% restants sont de l'eau. Le mordantage de l'émail par l'acide orthophosphorique à 37% permet de déminéraliser la partie minérale située à la surface de l'émail et rend ainsi cette surface plus rugueuse et irrégulière, comme illustré dans la figure 2. Cette attaque acide élimine environ 10 microns d'épaisseur de la couche superficielle de l'émail et crée des microporosités de 5 à 50 microns. L'adhésif étant hydrophobe, il pourra s'écouler par capillarité dans les microporosités créées. Après sa polymérisation, l'adhésif formera des tags résineux grâce à ces prolongements dans l'émail, formant une union micromécanique (2).

Le mordantage améliore la mouillabilité de l'adhésif, ce qui permet d'augmenter la surface de contact entre l'adhésif et l'émail.

L'adhésion à l'émail est d'une grande fiabilité et reproductibilité : l'émail est un excellent substrat d'adhésion.

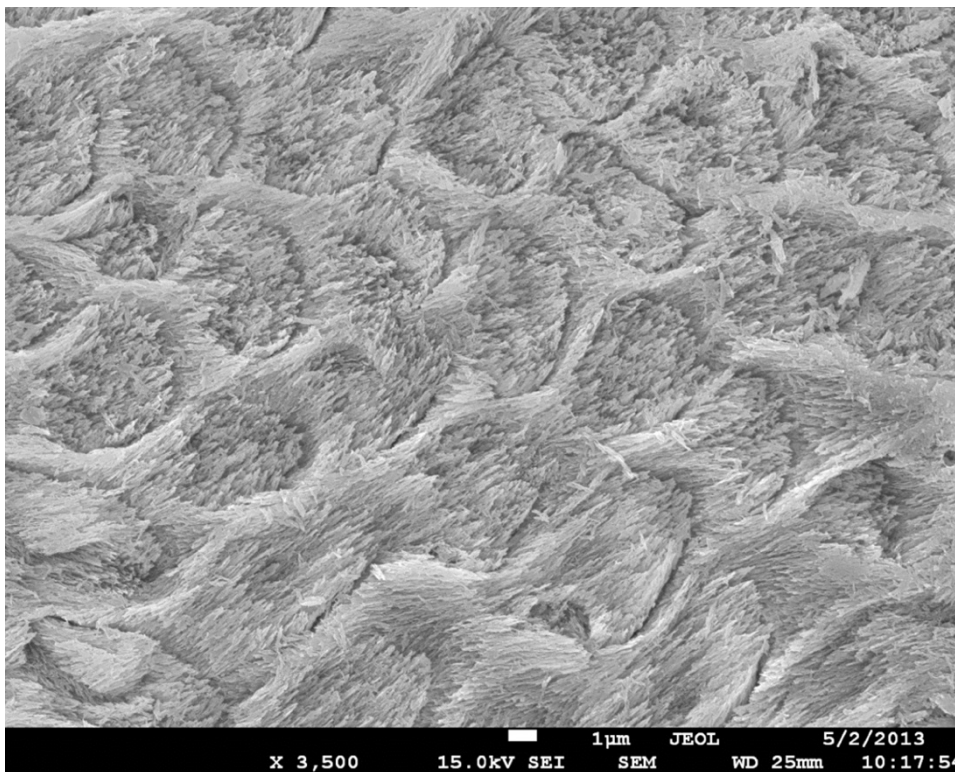


Figure 2 : Vue en microscopie électronique à balayage de l'émail après un mordantage à l'acide orthophosphorique pendant 30 secondes à un grossissement de 3500 fois (2)

1.1.3. Adhésion à la dentine

Pour la dentine, les résultats sont moins prévisibles pour plusieurs raisons. Elle est constituée de 70% de matière minérale (hydroxyapatite), 18% de matière organique, principalement du collagène de type I et 12% d'eau. Ses tubules sont remplis de liquide dentinaire, qui soumis à une pression constante vers l'extérieur, va maintenir la surface exposée de la dentine humide, conférant à ce substrat un caractère hydrophile. De plus, la densité des tubules et leur diamètre augmentent en se rapprochant de la pulpe, ce qui signifie qu'une dentine profonde sera davantage perméable et humide.

L'autre facteur qui influence l'adhésion à la dentine est la couche de débris organiques et inorganiques sur la surface fraisée, appelée boue dentinaire ou « smear layer ». Cette couche qui recouvre et obstrue la lumière des tubules réduit la perméabilité de 86%. Son élimination semble nécessaire pour obtenir une meilleure infiltration de l'adhésif dans les tubules dentinaires et ainsi une couche hybride de meilleure qualité. Nous observons sur la figure 3 que le mordantage suivi d'un rinçage abondant permettra d'éliminer la boue dentinaire et parallèlement de déminéraliser la dentine sur une profondeur d'environ 5 microns. Ainsi, la figure 4 montre que l'exposition du réseau de fibrilles de collagène qui en découle augmente la surface de contact disponible pour l'ancrage micromécanique de la couche hybride (2).

Cependant, la tension superficielle de la dentine diminue avec le mordantage, en raison de l'instabilité du réseau de fibres de collagène, ce qui peut compromettre la mouillabilité de l'adhésif. Afin d'y remédier, un primaire d'adhésion contenant des monomères hydrophiles et du solvant (eau, acétone, alcool) est appliqué sur la surface dentinaire pour permettre la réexpansion du réseau collagénique et augmenter la tension superficielle (3). Une fois appliqués, les monomères méthacrylés sont capables de copolymériser avec l'adhésif appliqué ultérieurement grâce à leur extrémité hydrophobe (4).

Pour pallier les effets d'une dentine trop perméable et humide et réduire les sensibilités post-opératoires, les systèmes adhésifs auto-mordants peuvent être une alternative. Ces procédures ne suppriment pas totalement la boue dentinaire, mais la modifient et l'incorporent dans la couche hybride. Cette approche permet une meilleure reproductibilité clinique pour l'opérateur car il n'est plus nécessaire de contrôler précisément l'humidité résiduelle après l'étape de mordantage.

Une adhésion chimique des monomères capables de se lier ioniquement au calcium de l'hydroxyapatite de la dentine est possible grâce à des monomères fonctionnels spécifiques tels que le 10-MDP ou le 4-META (3).

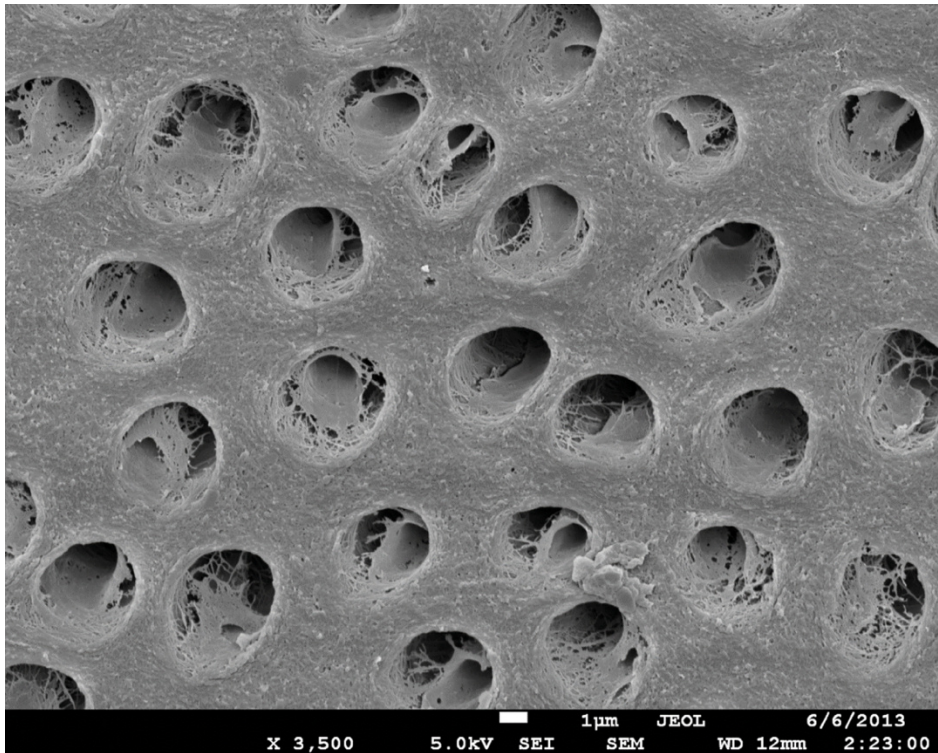


Figure 3: Vue en microscopie électronique à balayage de la dentine après un mordantage à l'acide orthophosphorique pendant 15 secondes à un grossissement de 3500 fois (2)

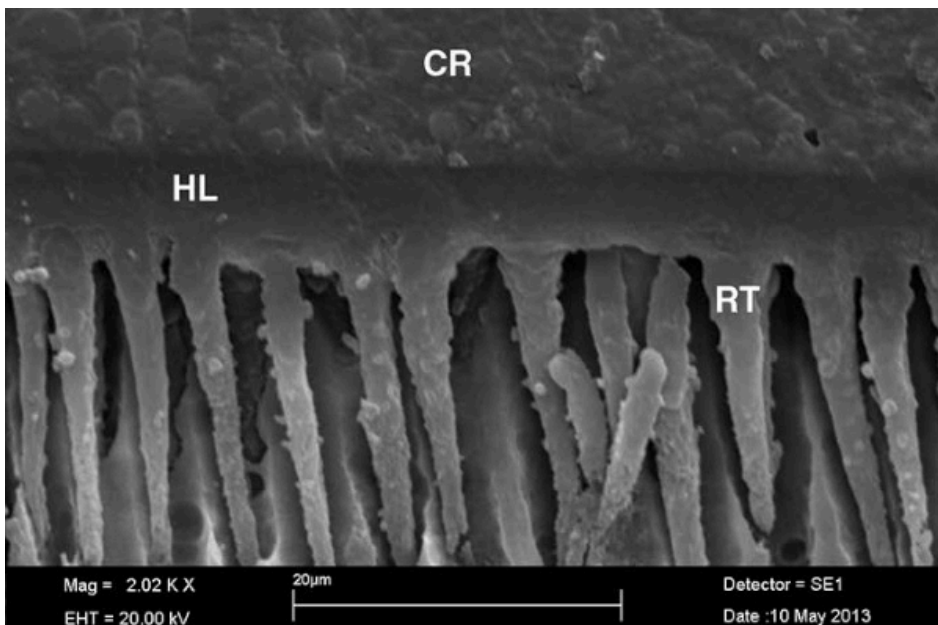


Figure 4: Vue en microscopie électronique à balayage de l'interface résine-dentine après formation d'une couche hybride (HL = Hybrid Layer, RT = Resin tags, CR = Composite Resin) (5)

1.2. Classification des adhésifs (6,8)

La classification des adhésifs peut se faire par génération en se basant principalement sur leur période d'apparition.

- 1ère génération ou période des pionniers (1952-1982)

L'histoire des adhésifs débute dans les années 1950. La recherche d'une adhésion efficace est essentielle car à cette époque, les résines acryliques sont proposées comme alternative aux ciments d'obturation à base de silicates pour les restaurations esthétiques. Cependant, ces résines n'ont aucun potentiel d'adhésion aux tissus durs dentaires et entraînent la percolation des fluides aux interfaces et la coloration des bords de la restauration.

Hagger dépose le premier brevet d'un adhésif à usage dentaire contenant comme monomère le GPDM (Diméthacrylate de l'acide glycérophosphorique). Les premiers tests réalisés par Buonocore en 1956 montrent des résultats décevants, avec une adhérence de 3MPa, qui conduisent à leur abandon.

- 2ème génération : les esters méthacryliques de l'acide phosphorique (1980-1985)

À la fin des années 1970, la 2ème génération utilise principalement des phosphates polymérisables ajoutés à un monomère dérivé du Bis GMA.

La valeur d'adhérence à la dentine reste faible, de l'ordre de 5 MPa et celle de l'émail atteint 15-20 MPa.

- 3ème génération : l'introduction de la notion de système adhésif (1985-1991)

Cette génération correspond au développement du concept de système adhésif. Il associe plusieurs produits, dont la résine adhésive, qui est couplée à une ou plusieurs solutions préalablement appliquées afin de stabiliser la boue dentinaire, ce qui facilite leur mouillabilité et leur infiltration sur les parois cavitaires.

L'adhérence à la dentine atteint une valeur moyenne de 8 à 12 MPa.

- 4ème génération : la reconnaissance du concept du mordantage total (MR3) (1990)

Cette génération est basée sur le concept du mordantage à la fois de l'émail et de la dentine. L'acide orthophosphorique à 37% permet d'éliminer l'essentiel de la boue dentinaire. Cette étape préalable permet la pénétration de l'adhésif à la fois dans les tubules et dans les espaces inter et péri tubulaires dans le réseau collagénique. C'est une avancée car précédemment, la boue dentinaire était conservée, considérée comme une barrière s'opposant à la pénétration des micro-organismes.

Ces systèmes dits MR3 mettent en jeu plusieurs étapes :

La première étape est le mordantage à l'acide orthophosphorique de la surface amélo-dentinaire, préconisant 30 secondes sur l'émail et 15 secondes sur la dentine.

La seconde étape consiste à appliquer un primaire composé de monomères hydrophiles, de solvants organiques et parfois d'un peu d'eau. Il va favoriser la mouillabilité et la pénétration de surface.

Enfin, la 3^{ème} étape repose sur l'application d'une résine adhésive hydrophobe qui doit copolymériser avec le composite.

- 5^{ème} génération (MR2) (1995)

La mise en œuvre des 3 étapes est perçue comme trop longue par les praticiens, ce qui a conduit à l'introduction sur le marché de systèmes adhésifs simplifiés. Cette génération est marquée par l'assemblage du primaire et de la résine adhésive dans un seul flacon, tout en conservant un mordantage préalable des surfaces amélo-dentaires à l'acide phosphorique.

La surface de la dentine doit conserver une humidité résiduelle pour être suffisamment perméable.

• 6^{ème} génération : le début des systèmes auto-mordants (SAM2) (1995)

Poursuivant le but de simplification des systèmes, une évolution parallèle apparaît avec les adhésifs auto-mordants. L'agent de mordantage et le primaire sont réunis dans un seul flacon. La première étape consiste à appliquer le primaire dit auto-mordant qui va à la fois déminéraliser et infiltrer les tissus dentaires calcifiés. Il n'y a pas de rinçage et la résine adhésive hydrophobe est appliquée dans un second temps : ce sont les systèmes auto-mordants à 2 étapes appelés SAM2.

- 7^{ème} génération : les adhésifs tout en un (SAM1) (2000)

Dans cette génération d'adhésifs, tous les produits nécessaires à l'adhésion vont se retrouver dans un seul flacon qui contient des monomères hydrophiles et également des monomères hydrophobes : ce sont les systèmes auto-mordants à 1 étape appelés SAM1. Leur protocole est très simplifié et moins praticien-dépendant, mais leur efficacité semble être la plus faible parmi tous les systèmes commercialisés.

- 8^{ème} génération : les adhésifs universels (2011)

Les adhésifs universels sont apparus sur le marché en 2011 et ils ne doivent pas être confondus avec les adhésifs de la 7^{ème} génération. Ils se doivent de présenter des indications bien plus larges que les précédents. En effet, ces systèmes sont polyvalents et peuvent être utilisés en mode M&R ou SAM. Ils sont indiqués pour les restaurations directes et indirectes, compatibles avec les résines photopolymérisables,

autopolymérisables et celles à prise dual. Ils doivent également avoir un potentiel d'adhésion aux métaux précieux et non précieux, à la zircone et aux céramiques en agissant comme un primaire.

Leur efficacité repose sur l'incorporation du 10-MDP (10-Méthacryloxydecyle DihydrogènePhosphate). En figure 5, on constate que ce monomère bifonctionnel possède une extrémité méthacrylate permettant une polymérisation avec les résines et une extrémité phosphate capable de se lier fortement aux tissus dentaires. L'acidité du 10-MDP va déminéraliser l'hydroxyapatite, libérant du calcium qui réagit avec le monomère pour former des sels de calcium-MDP. Ces liaisons covalentes fortes et stables avec l'hydroxyapatite permettent d'obtenir une adhésion à composante chimique (9,10).

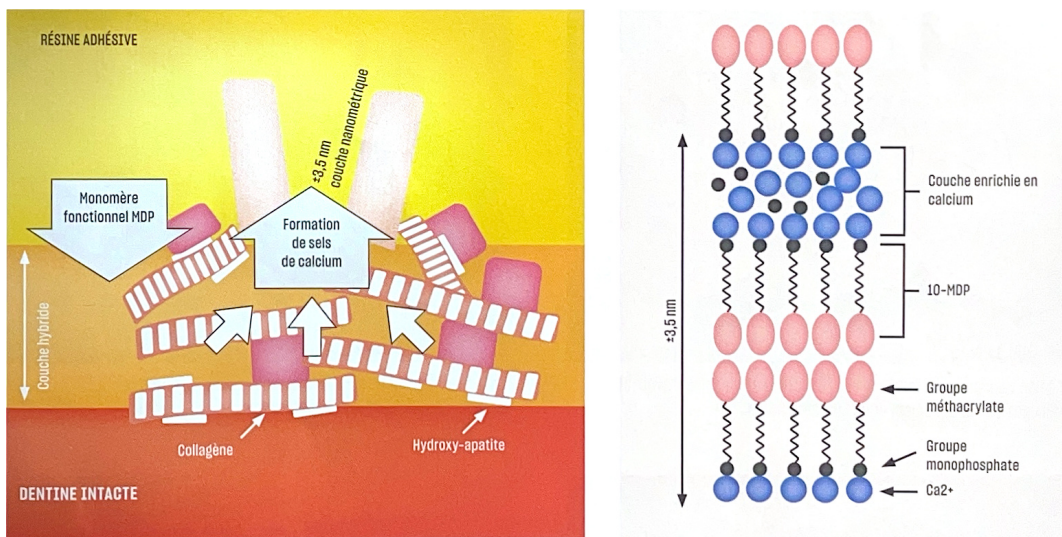


Figure 5 : Nano-assemblage des molécules de 10-MDP (10)

Aujourd'hui, les systèmes adhésifs sont davantage classés en 3 catégories, selon leur mode d'action : les MR, les SAM et les universels, plutôt que par la classification des générations successives.

1.3. Cahier des charges requis (6)

- Biocompatibilité

La biocompatibilité constitue un critère essentiel pour un adhésif. Idéalement, il ne doit induire aucune réaction délétère, tant pour le praticien que pour le patient, ce qui implique l'absence de toxicité, de potentiel allergisant et mutagène.

Les terminaisons des monomères responsables de leur polymérisation présentent un potentiel allergisant. Cette sensibilité semble plus retrouvée chez les praticiens, en raison de la perméabilité des gants en latex qui offre une protection limitée contre certains monomères.

Sur le plan clinique, bien que plusieurs études *in vitro* aient mis en avant un potentiel effet cytotoxique des adhésifs sur la pulpe dentaire, les observations *in vivo* suggèrent un effet plutôt favorable, sous 2 conditions essentielles : ne pas les utiliser en coiffage pulpaire direct et garantir une interface étanche, empêchant toute infiltration des fluides buccaux et des bactéries.

- Adhésion et étanchéité

L'adhésion à l'émail est aujourd'hui assez prévisible. C'est elle qui garantit l'étanchéité à long terme car elle protège la liaison résine-dentine plus vulnérable en raison de sa nature hétérogène (3). Les colorations marginales, les sensibilités post-opératoires et les lésions carieuses secondaires sont liées à un défaut d'étanchéité (4). La percolation bactérienne se produit avec des espaces d'environ 10 à 20 microns, ce phénomène est appelé « microleakage ».

De plus, la restauration est sollicitée immédiatement après sa réalisation et le joint doit offrir une résistance précoce suffisante, notamment lorsque la rétention mécanique est faible.

- Pérennité

L'adhésion et l'étanchéité de la restauration doivent être optimales dès sa mise en place et sur le long terme. La présence de colorations marginales, de sensibilités, de lésions carieuses secondaires ou encore la perte du biomatériau de restauration sont autant de facteurs qui vont dégrader l'interface adhésive (6).

La pérennité de la liaison résine-dentine réside essentiellement dans la qualité de la couche hybride (11).

- Simplicité de mise en œuvre

L'utilisation d'un système adhésif devrait garantir des résultats thérapeutiques fiables et reproductibles pour chaque praticien. Cependant, dans la pratique, l'adhésion est une procédure très dépendante de la manipulation du praticien. Minimiser l'influence du facteur opérateur est un enjeu majeur pour optimiser la performance des systèmes adhésifs.

- Viscosité

Une fluidité excessive peut compromettre le contrôle de l'application de l'adhésif et à l'inverse, une viscosité trop importante nuira à son étalement et à son infiltration dans les microrugosités de surface (11).

- Absence de sensibilités post-opératoires

Un bon adhésif ne devrait pas provoquer de sensibilités post-opératoires, à court ou long terme. Ces sensibilités post-opératoires apparaissent le plus souvent en cas de défaut d'étanchéité de l'interface adhésive, favorisant une micro-infiltration bactérienne. À l'inverse, une obturation étanche des tubules dentinaires par la couche hybride permet de limiter le mouvement du fluide dentinaire et donc l'apparition des sensibilités.

2. Comparaison des performances

2.1. Critères de comparaison et méthode d'évaluation

- Adaptation marginale

L'adaptation marginale correspond à la qualité du joint entre la restauration et la dent, en particulier à sa continuité et sa régularité. Une adaptation marginale optimale permet de limiter les micro-infiltrations, réduisant le risque de lésions carieuses secondaires et d'améliorer la longévité de la restauration.

La coloration marginale, quant à elle, est une altération visuelle du joint restauration-dent. Elle peut refléter un défaut dans la qualité du joint ou une dégradation progressive de l'interface adhésive.

In vitro, son évaluation repose sur l'utilisation de colorants tels que le bleu de méthylène ou le nitrate d'argent.

- Rétention / durabilité / longévité

La rétention et la durabilité font référence à la capacité de l'adhésif à maintenir la restauration dans le temps. Elle dépend fortement de l'interface adhésif-substrat. La méthode d'évaluation se fait soit *in vitro* par vieillissement accéléré ou lors d'études cliniques randomisées.

- Résistance à la microtraction : Microtensile bond strength = μ TBS (12)

Le collage est réalisé sur la dent, puis la dent est sectionnée en tranches à l'aide d'une scie diamantée à faible vitesse. Les surfaces obtenues sont polies pour avoir une surface standardisée. Les échantillons sont testés avec un appareil de microtraction, qui va réaliser une traction perpendiculaire à l'interface de collage sur l'échantillon jusqu'à la rupture.

- Résistance au cisaillement : Shear bond strength = SBS (13)

La dent est sectionnée de la même manière que dans le test précédent, mais la charge appliquée est parallèle à la surface de collage. L'échantillon subit une contrainte de cisaillement jusqu'à la rupture.

Dans les études *in vitro*, l'une de ces 2 méthodes est systématiquement utilisée pour évaluer la résistance adhésive.

- Vieillissement

Les dents sont conservées après collage dans de l'eau distillée pendant 24 heures à 37°. Dans certaines études, les échantillons sont maintenus dans l'eau distillée jusqu'au temps souhaité, permettant de simuler

l'hydrolyse chimique et enzymatique. Dans d'autres études, le processus est accéléré en réalisant des thermocyclages entre 5 et 55° pouvant aller jusque 10 000 cycles, mettant des contraintes thermomécaniques répétées susceptibles de causer des microfissures ou une dégradation de la liaison adhésive (14). Un protocole de vieillissement est présent dans la majorité des études analysées.

- L'analyse du mode de défaillance constitue un critère complémentaire essentiel à l'évaluation de l'adhésion. Elle permet de localiser la zone de rupture. 3 types de défaillances peuvent être observés :
 - Adhésive : rupture à l'interface entre l'adhésif et le substrat
 - Cohésive : rupture au sein du matériau ou du substrat
 - Mixte : association des 2

Il est généralement admis qu'il existe une corrélation entre le mode de défaillance et la force d'adhérence. Une rupture purement adhésive est souvent associée à une force d'adhérence plus faible, tandis qu'une rupture cohésive ou mixte reflète davantage une force d'adhérence plus élevée (15).

L'examen du mode de défaillance se fait à l'aide d'un microscope, comme illustré sur la figure 6.

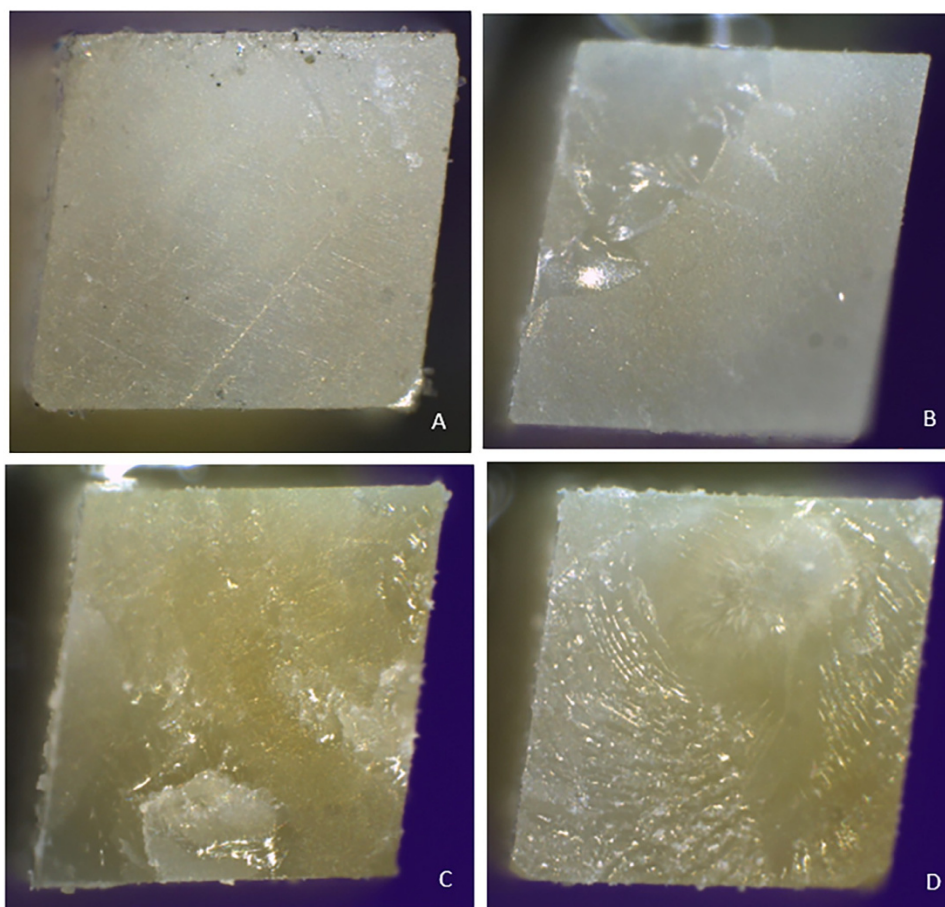


Figure 6: Mode de défaillance évalué par stéréomicroscopie. A : défaillance purement adhésive. B-D : défaillance mixte (15)

- Études cliniques randomisées

Ces études sont des essais comparatifs dans lesquels les patients sont répartis de manière aléatoire entre un ou plusieurs groupes de traitements. Cette randomisation vise à minimiser les biais de sélection et à garantir une comparabilité initiale entre les groupes. La rigueur méthodologique qu'elles exigent en fait une source de preuve essentielle en recherche clinique.

2.2. Résultats

2.2.1. Adhésion à l'émail

Le mordantage de l'émail avec l'acide orthophosphorique reste la technique de référence qui garantit une liaison plus durable avec l'émail et contribue également à protéger la liaison avec la dentine plus vulnérable à la dégradation. Dans des études *in vitro* récentes, les systèmes MR3 ou universels associés à un mordantage de l'émail présentent les meilleurs résultats en force de liaison et une meilleure stabilité après un vieillissement artificiel, comparés aux systèmes universels sans mordantage et aux SAM (12,13).

Cette tendance se retrouve dans des études cliniques randomisées : les systèmes MR3 et les universels avec mordantage montrent un taux de rétention des restaurations plus satisfaisant, une meilleure adaptation et moins de colorations marginales, limitant l'infiltration marginale bactérienne (16–18).

Le mode de défaillance retrouvé est plutôt mixte, peu importe le système utilisé.

Ainsi, les données disponibles à ce jour convergent vers un consensus en faveur du mordantage de l'émail.

2.2.2. Adhésion à la dentine

2.2.2.1. Dentine saine

Le mordantage de la dentine est une étape plus délicate que celui de l'émail. Des études *in vitro* montrent qu'il n'y a pas de différence statistique significative en termes de force d'adhérence entre les systèmes SAM ou universels sans mordantage de la dentine et les systèmes MR ou les universels avec mordantage préalable, que ce soit avant ou après vieillissement. Le mode de défaillance observé est principalement cohésif (14,19,20).

Cependant, ces mêmes études suggèrent que l'interface adhésif-dentine serait plus vulnérable à la biodégradation lorsqu'une stratégie MR est employée. En effet, elle est plus opérateur dépendante. Ainsi,

un mordantage prolongé peut surexposer le réseau de collagène ou un séchage excessif pourra entraîner son effondrement. Ces erreurs de manipulation conduisent à la présence de zones non infiltrées par l'adhésif, créant des vides à l'interface, qui pourront provoquer des sensibilités post-opératoires, favoriser l'hydrolyse à plus long terme par un phénomène de remontée d'eau de la dentine profonde par osmose.

De plus, les fibrilles de collagènes exposées non recouvertes par l'adhésif sont susceptibles d'être dégradées par les métalloprotéinases matricielles (MMPs) libérées et activées lors du mordantage, causant la dégradation progressive de la couche hybride. Il a été montré qu'une application de chlorhexidine à 2% après le mordantage permettrait d'inhiber ces enzymes et de limiter leur action (4,21).

À l'inverse, le mode SAM offre une meilleure stabilité dans le temps. La déminéralisation s'effectue uniquement dans la zone infiltrée par l'adhésif. Il n'y a pas d'étapes de rinçage/séchage, ce qui réduit le risque d'erreurs techniques et de dégradation enzymatique (19).

2.2.2.2. Dentine sur dent traitée endodontiquement

Sur une dent traitée endodontiquement, plusieurs modifications structurales sont observées, notamment au niveau de la dentine (22,23) :

- L'instrumentation mécanique entraîne la formation d'une couche de boue dentinaire ;
- Les irrigants tels que l'acide éthylènediaminetétraacétique (EDTA) et l'hypochlorite de sodium (NaOCL) dégradent respectivement la composante inorganique et organique ;
- L'ablation de la pulpe dentaire supprime le flux intratubulaire et cause une déshydratation partielle du tissu dentinaire ;
- En cas de collage intra-canalair, la présence de ciment et de résidus de gutta-percha obstrue les tubules dentinaires.

Les études *in vitro* ont montré qu'il n'existe pas de différence significative de force d'adhérence entre les systèmes avec et sans mordantage préalable (22,24). Le mode de défaillance observé est principalement adhésif, ce qui suggère une adhésion plus faible que sur une dentine saine. Cependant, les auteurs insistent sur le fait de ne pas surdéméraliser la dentine, car les irrigants du traitement endodontique (NaOCL et EDTA) induisent déjà une déminéralisation superficielle et l'élimination partielle de la boue dentinaire.

La présence d'eau est observée dans la couche hybride dans le protocole avec mordantage préalable, mais également dans le système universel utilisé en mode automordançant, notamment après un vieillissement d'1 an. L'humidité est toutefois mieux contrôlée dans les systèmes adhésifs universels contenant du 10-MDP, grâce à la liaison chimique stable avec l'hydroxyapatite qui contribue à une interface plus dense limitant les espaces vides propices à l'infiltration d'eau. De nombreuses études soulignent les effets

bénéfiques du 10-MDP, tant en termes de stabilité à l'interface adhésive à la dentine (saine/dépulpée) qu'à l'amélioration globale de la force d'adhésion (15,19,22,25).

2.2.2.3. Dentine cariée/affectée

Le collage sur la dentine cariée est contre-indiqué. En effet, avec une charge bactérienne résiduelle sur le plan biologique, la structure de la dentine infectée est molle et désorganisée et ne permet donc pas la formation d'une interface adhésive stable.

Il est donc nécessaire d'éliminer ce tissu dentinaire ramolli jusqu'à atteindre une dentine affectée. Sa structure est également modifiée et présente une déminéralisation partielle avec des tubules dentinaires ouverts. Au niveau de sa composition organique, le collagène est encore présent mais il est plus désorganisé et donc moins stable (26). Ces éléments vont impacter négativement la qualité de l'interface adhésive.

Des études *in vitro* mettent en évidence une force d'adhérence moins élevée sur la dentine affectée par μ TBS que sur la dentine saine, quel que soit le mode d'application de l'adhésif universel (auto-mordançant ou avec mordantage préalable). De plus, le mordantage d'une structure déjà déminéralisée ne semble pas idéal (25).

Le mode de défaillance observé est principalement adhésif ou mixte.

Ces résultats confirment que l'altération structurelle de la dentine constitue un facteur limitant de l'adhésion. À ce jour, aucun adhésif n'est spécialement indiqué pour la dentine affectée. Un adhésif qui présente les meilleurs résultats sur une dentine saine sera également la meilleure option clinique pour la dentine affectée (3).

2.2.2.4. Dentine sclérotique

La dentine sclérotique est généralement retrouvée dans les lésions carieuses à progression lente, lors du vieillissement physiologique de l'organe dentaire et en cas d'usure.

La dentine sclérotique est caractérisée par une structure hyperminéralisée et présente une surface lisse et dure. La lumière des tubules est obturée par une structure minérale appelée whitlockite (cristaux acido-résistants) qui va diminuer la pénétration des monomères, entraver la formation d'une couche hydride efficace et ainsi rendre l'adhésion très imprévisible (3,26).

Comme pour la dentine affectée, les forces d'adhérence sont diminuées par rapport à la dentine saine, de l'ordre de 25 à 40% (10). De plus, il n'y a pas de différence significative entre l'application d'un système

adhésif sans ou avec mordantage préalable (27). Cependant, l'utilisation d'un adhésif contenant du 10-MDP semble indispensable pour que l'adhésion chimique compense les forces d'adhérence faibles. Ainsi, au même titre que la dentine affectée, la meilleure option pour la dentine sclérotique sera l'adhésif qui présentera les meilleurs résultats sur une dentine saine (3).

2.2.3. Adhésion au composite

L'adhésion au composite est nécessaire dans diverses situations cliniques, notamment lors du collage de restaurations indirectes ou lors de la réparation d'un composite existant, en cas de fracture, d'amélioration esthétique, ou de lésions carieuses secondaires.

Dans ce contexte, les performances des systèmes adhésifs jouent également un rôle déterminant. Une étude menée en 2022 a montré que les systèmes adhésifs universels présentent les meilleurs résultats, surpassant les systèmes adhésifs MR et SAM, sans différence significative entre le mode opératoire avec ou sans mordantage préalable. Ces performances seraient liées à la présence du 10-MDP contenu dans les systèmes universels (28).

2.2.4. Adhésion aux matériaux prothétiques : zircone, métaux et céramiques

Les adhésifs universels offrent aujourd'hui la particularité de permettre une adhésion fiable aux matériaux. Sur la zircone, la préparation de la surface nécessite un sablage à l'alumine à 50 microns, suivi de l'application d'un primaire spécifique à la zircone contenant du 10-MDP qui permet une liaison chimique avec les oxydes des zirconiums. Les universels contenant du 10-MDP soulèvent la question de savoir s'il serait possible de supprimer l'application préalable du primaire. Plusieurs études montrent que les forces d'adhérence avec l'utilisation d'un adhésif universel sont comparables lorsqu'un primaire contenant du 10-MDP est appliqué au préalable ou non (29,30).

Concernant la liaison sur les alliages métalliques, le même prétraitement par sablage et application d'un primaire spécifique est recommandé. Cependant, l'utilisation de primaires spécifiques montre de meilleures performances que les adhésifs universels contenant du 10-MDP employés seuls (31).

Pour la liaison entre la céramique et l'adhésif, l'application préalable d'acide fluorhydrique et de silane est nécessaire afin d'avoir une adhésion chimique stable entre la céramique et la résine, le silane se liant

simultanément aux deux matériaux. Bien que certains adhésifs universels contiennent du silane, les données disponibles montrent que l'application du silane seul reste indispensable pour garantir une tenue à long terme de la restauration (32).

3. Recommandations et optimisation des systèmes adhésifs

3.1. Recommandations cliniques

Nous allons présenter les choix du système adhésif en fonction de la situation clinique.

Dans le secteur postérieur, sur dent saine ou usée, la proportion de dentine exposée est bien plus élevée que celle de l'émail. L'utilisation d'un système auto-mordançant, notamment le SAM2 réputé pour être le « gold standard » pour l'adhésion sur la dentine, peut se justifier. Toutefois, le mordantage de l'émail périphérique reste indispensable afin de protéger l'interface résine-dentine. Dans cette situation, un adhésif universel avec mordantage sélectif de l'émail apparaît comme l'option la plus appropriée, assurant une adhésion stable sur la dentine et une adhésion renforcée sur l'émail.

Dans le secteur antérieur, où la surface amélaire exposée est généralement plus importante, le système MR3 a longtemps été considéré comme le « gold standard » en raison de son excellente adhésion sur l'émail. Cependant, leur protocole étant long et très sensible à la technique opératoire, les adhésifs universels avec mordantage sélectif de l'émail représentent une meilleure alternative, leur protocole étant simplifié et leurs performances équivalentes.

Pour le collage intra-canalair après un traitement endodontique, la stratégie dépend des irrigants utilisés. Lorsque l'EDTA n'a pas été employé, un système avec mordantage peut être indiqué pour éliminer la boue dentinaire et améliorer l'infiltration de l'adhésif. En revanche, si l'EDTA a été utilisé, un système universel en mode auto-mordançant est préférable, afin d'éviter la surdéméralisation de la dentine intracanalair.

Pour l'assemblage d'une restauration indirecte, les systèmes adhésifs universels sont à privilégier car leur composition permet l'adhésion aux substrats non dentaires. Cependant, le prétraitement spécifique de chaque matériau reste essentiel car les systèmes universels peuvent présenter des variabilités de formulation en fonction des marques. Dans ce contexte, l'utilisation d'un primaire spécifique et du silane appliqué séparément en amont serait la stratégie la plus reproductible et fiable.

Tableau 1: Recommandations des systèmes adhésifs selon la situation clinique

Situation clinique	Système adhésif recommandé
Restaurations postérieures	Universel avec mordançage sélectif de l'émail
Restaurations antérieures	Universel avec mordançage sélectif de l'émail
Dentine sclérotique	Universel avec mordançage sélectif de l'émail
Lésions profondes juxta-pulpaire	Universel avec mordançage sélectif de l'émail
Composite existant	Universel avec ou sans mordançage
Collage intra-canalair post-endodontique	EDTA non utilisé : Universel avec mordançage dentinaire EDTA utilisé : Universel sans mordançage préalable
Restauration indirecte sur les matériaux prothétiques (zircone, métaux, céramiques)	Universel

3.2. Stratégies thérapeutiques pour améliorer la qualité de l'adhésion

Ces stratégies reposent sur l'isolation de la ou des dents à préparer, sur les préparations cavitaires et le strict respect des recommandations du fabricant concernant la manipulation de l'adhésif. Pour chaque système adhésif, des indications précises sont données concernant la durée de mordançage, de rinçage, le temps de frottement de l'adhésif ou encore la durée minimale de photopolymérisation.

Avant toute restauration, l'isolation du champ opératoire constitue une étape essentielle. En effet, le contrôle de l'humidité et la maîtrise de la contamination microbienne conditionnent directement la qualité du collage, ainsi que la pérennité de la restauration. Parmi les différentes méthodes disponibles, la référence reste la digue en caoutchouc. Elle permet ainsi d'optimiser les forces de liaison sur le substrat dentaire (33).

Plusieurs études cliniques ont montré que les restaurations réalisées sous digue présentent un taux de survie supérieur à celles effectuées avec des moyens d'isolation alternatifs (34).

Concernant la préparation de l'émail, le biseautage des marges qui augmente la surface amélaire permet de renforcer l'adhésion et favorise également l'intégration esthétique, en améliorant la transition optique entre la restauration et l'émail sain (35). Cette préparation pelliculaire n'est pas indiquée sur les faces occlusales où la fine épaisseur de matériau n'offrirait pas une résistance mécanique suffisante.

Le sablage à l'alumine 50µm peut également améliorer l'adhésion à l'émail (9).

Concernant la préparation de la dentine, elle exige une rigueur particulière en raison de sa composition et de sa sensibilité aux protocoles adhésifs. Dans un premier temps, il est recommandé de finir la préparation à l'aide d'une fraise diamantée à grains fins (bague rouge), afin d'affiner la couche de boue dentinaire. Une couche trop épaisse compromet la pénétration des monomères de l'adhésif (3).

Par la suite, le temps de mordantage ne doit pas excéder 15 secondes s'il est réalisé, afin d'éviter une surdéméralisation et une exposition trop importante du réseau collagénique (9).

Le séchage doit également être maîtrisé, un séchage excessif entraînera l'affaissement de la matrice collagénique déminéralisée, limitant la pénétration des monomères. Le maintien d'une humidité résiduelle à la surface de la dentine est donc nécessaire pour maintenir le volume du réseau de fibres de collagène. Un séchage doux, à l'aide de pellets de coton ou de mini-éponges constitue une approche adaptée (36,37).

L'application de chlorhexidine à 2% pendant 30 secondes sans rinçage, après le mordantage et avant l'adhésif, permet d'inhiber l'activité des métalloprotéinases matricielles (MMPs). Bien qu'elle n'augmente pas directement les valeurs d'adhésion, elle contribue à limiter la dégradation enzymatique de la couche hybride et à réduire la charge bactérienne résiduelle (9).

L'application de l'adhésif doit être active, c'est-à-dire par un frottement énergique de la surface, ce qui favorise sa pénétration au sein du réseau collagénique et améliore les forces d'adhérence (6).

Il est indispensable de réaliser un séchage à l'air doux avant de photopolymériser l'adhésif pour permettre l'évaporation des solvants, la pénétration et la répartition homogène de l'adhésif.

L'utilisation systématique d'un composite fluide d'une épaisseur de 0,5 à 1mm maximum par-dessus l'adhésif s'avère particulièrement pertinente. En raison de sa fluidité, le composite fluide permet de remplir les irrégularités et micro-espaces présents dans la cavité, assurant ainsi une meilleure étanchéité et limitant l'apparition de vides internes. Cette couche intermédiaire pourrait également agir comme un tampon de contraintes, ce qui réduit le stress transmis à la dentine sous-jacente et donc à la pulpe. Par conséquent,

l'application d'un composite fluide en fond de cavité optimise la qualité, la longévité de l'adhésion et diminue également le risque de sensibilités post-opératoires (38,39).

Certaines situations cliniques dans lesquelles les compositions minérales et organiques de l'émail et de la dentine sont perturbées imposent des précautions spécifiques. En présence de dentine sclérotique, hyperminéralisée et surtout une résistante à l'acide, le mordantage prolongé est inefficace et difficilement contrôlable. Une alternative consistera à réaliser une légère abrasion de la surface hyperminéralisée à l'aide d'une fraise diamantée à grains fins (bague rouge), permettant de l'affiner et de rendre plus prévisible la qualité de l'adhésion (10).

Dans le cas des dents atteintes de MIH (Hypominéralisation Incisives et Molaires), la présence d'un émail hypominéralisé altère significativement les forces d'adhésion. Une déprotéinisation à l'hypochlorite de sodium à 5% pendant 60 secondes, suivie d'un rinçage et séchage doux, est recommandée afin d'améliorer les performances de collage (9). Ce pré-traitement de l'émail est également efficace sur les dents atteintes de fluorose (40).

Dans le cas particulier des dents dépulpées après traitement endodontique, le sablage de la dentine camérale et intracanalair à l'alumine 50µm permet d'éliminer efficacement les résidus de ciment canalair et d'eugénol, défavorables à l'adhésion (9).

Concernant la photopolymérisation, il est recommandé de respecter la durée minimale indiquée par le fabricant. Toutefois, un facteur à prendre en compte est la distance entre la source lumineuse et la résine : plus cette distance augmente, plus l'efficacité de la polymérisation diminue, ce qui se traduit par une baisse des propriétés mécaniques et une diminution de l'étanchéité (41,42). Une étude *in vitro* confirme que l'augmentation de la distance de photopolymérisation entraîne une réduction de la résistance au cisaillement (43).

Plusieurs études ont également montré que le mode de photopolymérisation dit « soft-start » pourrait optimiser les performances en réduisant le stress de polymérisation (44,45).

Le « soft-start » consiste à augmenter progressivement l'intensité lumineuse et permet une formation des chaînes polymériques plus lentes et donc plus homogènes.

Ce protocole peut se réaliser de 2 manières :

- En modulant la puissance lumineuse
- En faisant varier la distance entre la source lumineuse et la résine : en commençant plus loin puis en se rapprochant progressivement. Cette seconde approche est privilégiée afin d'éviter de modifier la puissance en cours de photopolymérisation.

Afin de pouvoir réaliser le « soft-start » de manière efficace, il est donc conseillé d'allonger le temps de photopolymérisation, notamment pour les cavités proximales ou les restaurations adhésives post-endodontiques, où la distance entre la face occlusale et le fond de la cavité peut être importante.

Enfin, la polymérisation est inhibée par l'oxygène présent dans l'air, ce qui entraîne la formation d'une couche superficielle non polymérisée. Pour y remédier, l'application d'un gel de glycérine avant la polymérisation finale permet d'éliminer cette couche d'inhibition. Cette étape contribue également à améliorer l'adaptation marginale, renforçant ainsi la pérennité du joint (46).

Tableau 2: Récapitulatif des protocoles cliniques recommandés pour optimiser l'adhésion à l'émail et à la dentine

Objectif / situation		Procédure recommandée
Isolation		Utilisation d'une digue en caoutchouc
Émail		<ul style="list-style-type: none"> - Biseautage des bords d'émail sauf sur les faces occlusales - Sablage à l'alumine 50µm - Temps de mordantage à l'acide orthophosphorique à 37% durant 30 secondes
MIH / Fluorose		Pré-traitement avec application pendant 60 secondes d'hypochlorite de sodium à 5%
Dentine	Cas général	<ul style="list-style-type: none"> - Finition cavitaire avec grains diamantés fins (bague rouge) - Temps de mordantage à l'acide orthophosphorique à 37% ≤ 15 secondes - Application de chlorhexidine à 2% pendant 30 secondes sans rinçage avant l'adhésif - Séchage doux à l'aide de coton/mini-éponges - Frottement actif de l'adhésif avec une microbrush - Séchage à l'air doux avant photopolymérisation
	Collage intra-canalair post-endodontique	Sablage à l'alumine 50µm
	Dentine sclérotique	Fraisage doux sur la surface hyperminéralisée avec grains diamantés fins (bague rouge)
Fond de cavité		Application d'un composite fluide de 0,5 à 1mm d'épaisseur
Photopolymérisation		<ul style="list-style-type: none"> - Respecter la durée minimale indiquée par le fabricant - « Soft-start » : Photopolymériser en se rapprochant progressivement jusqu'à être au plus proche - Doubler le temps de photopolymérisation en cas de cavités profondes - Gel de glycérine lors de la photopolymérisation finale

3.3. Perspectives

De nombreuses recherches sont actuellement menées pour développer de nouveaux adhésifs dentaires. En effet, certaines limites leur sont reprochées, telles que la sensibilité opérateur-dépendante ou la faible résistance aux agressions du milieu buccal. Parmi ces pistes :

- Le développement d'adhésifs capables de relarguer du fluor : l'ajout de nanoparticules de NaF (Fluorure de sodium) et de monomères N,N-dodécylvinylimidazole (DCV) dans un adhésif pourrait permettre une libération prolongée de fluor (47).
- Des adhésifs possédant une activité antibactérienne. Par exemple, l'incorporation de méthacrylate diméthylaminohexadécyl et de nanoparticules de phosphate amorphe pourrait réduire la charge bactérienne (48).
- L'intégration d'agent bioactifs reminéralisants : un adhésif contenant des nanoparticules de phosphate de calcium amorphe (NACP) aurait la capacité à reminéraliser la dentine en neutralisant l'acidité (49,50).
- L'ajout de peptides bioactifs dans les adhésifs universels : comme le peptide dérivé de la copine-7 (CPNE7) qui a montré un potentiel pour réduire l'hypersensibilité post-opératoire (51).

Cependant, la réalisation d'études cliniques complémentaires qui permettront de confirmer leur efficacité et sécurité à long terme est nécessaire avant d'envisager leur utilisation.

CONCLUSION

La dentisterie adhésive représente aujourd'hui l'un des fondements majeurs de la dentisterie restauratrice moderne. Malgré la multitude de systèmes adhésifs présents sur le marché, il apparaît clairement que les systèmes adhésifs universels occupent une place centrale dans la pratique contemporaine. Selon les études récentes, leur utilisation avec un mordantage préalable sélectif de l'émail apparaît comme la stratégie la plus fiable. Cette approche permet à la fois d'optimiser l'adhésion sur l'émail tout en limitant le mordantage de la dentine. Avec des valeurs d'adhérence comparables, voire supérieures aux systèmes mordantage-rinçage ou auto-mordantants, ils présentent des avantages déterminants tels que la possibilité d'un mordantage sélectif ou total, la simplification des protocoles cliniques, la stabilité à long terme grâce à une adhésion chimique, la réduction des sensibilités post-opératoires et une meilleure reproductibilité des résultats.

Cependant, quel que soit le système utilisé, le succès d'une restauration adhésive repose sur des conditions essentielles qui sont le strict respect du protocole proposé par le fabricant, le contrôle rigoureux du champ opératoire et la maîtrise des interactions entre les systèmes adhésifs et les tissus dentaires, notamment la dentine.

La mise au point des systèmes adhésifs doit être envisagée comme une étape clé pour consolider les acquis scientifiques, guider le choix clinique et favoriser l'émergence de recommandations claires et fondées sur les preuves.

L'adhésion reste un champ de recherche en constante évolution : de nouvelles formulations sont toujours à l'étude et l'arrivée de nouveaux produits pourrait transformer notre pratique quotidienne.

TABLE DES ILLUSTRATIONS

Figure 1 : Représentation schématique des différents comportements d'un liquide sur une surface solide (1).....	2
Figure 2 : Vue en microscopie électronique à balayage de l'émail après un mordantage à l'acide orthophosphorique pendant 30 secondes à un grossissement de 3500 fois (2)	3
Figure 3: Vue en microscopie électronique à balayage de la dentine après un mordantage à l'acide orthophosphorique pendant 15 secondes à un grossissement de 3500 fois (2).....	5
Figure 4 : Vue en microscopie électronique à balayage de l'interface résine-dentine après formation d'une couche hybride (HL = Hybrid Layer, RT = Resin tags, CR = Composite Resin) (5).....	5
Figure 5 : Nano-assemblage des molécules de 10-MDP (10).....	8
Figure 6: Mode de défaillance évalué par stéréomicroscopie. A : défaillance purement adhésive. B-D : défaillance mixte (15)	12
Tableau 1: Recommandations des systèmes adhésifs selon la situation clinique	19
Tableau 2: Récapitulatif des protocoles cliniques recommandés pour optimiser l'adhésion à l'émail et à la dentine.....	23

BIBLIOGRAPHIE

1. Millet P, Weiss P. Propriétés physiques des matériaux dentaires. 2009/2010
2. France U. Préparation des tissus dentaires pour les procédures adhésives. [Internet]. [cité 20 janv 2025]. Disponible sur: <https://fr.ultradent.blog/préparation-des-tissus-dentaires-pour-les-procédures-adhésives>
3. Cardoso M, De Almeida Neves A, Mine A, Coutinho E, Van Landuyt K, De Munck J, et al. Current aspects on bonding effectiveness and stability in adhesive dentistry. Aust Dent J. juin 2011;56(s1):31-44.
4. Vaidyanathan TK, Vaidyanathan J. Recent advances in the theory and mechanism of adhesive resin bonding to dentin: A critical review. J Biomed Mater Res B Appl Biomater. févr 2009;88B(2):558-78.
5. Carvalho AO, Bacelar-Sá R, Wodevotzky O, Ambrosano GMB, Magne PC, Giannini M. Bond strength and micromorphology of resin-dentin interface of etch-and-rinse dentin bonding agents after 1-year of water storage. Appl Adhes Sci. déc 2016;4(1):16.
6. Degrange, Pourreyron. Les systèmes adhésifs amélo-dentaires. Société Francoph Biomatériaux Dent. 2010;
7. Kharouf N, Crestey JB, Toledano C. L'Information Dentaire. 2023 [cité 24 nov 2024]. Adhésif universel : effet de mode ou adhésif d'avenir ? Disponible sur: <https://www.information-dentaire.fr/formations/adhsif-universel-effet-de-mode-ou-adhsif-davenir/>
8. Mayou R. Systèmes adhésifs : évolution et efficacité. Rev Odont Stomat. 2018;(47):77-85.
9. RAUX F. Parlons ensemble d'adhésion. Inf Dent. 29 janv 2025;3/4(107):42-6.
10. DAHAN L. Lésions cervicales non carieuses : comment coller sur la dentine sclérotique. Inf Dent. 20 nov 2024;106(40):16-21.
11. You X, Chen L, Xu J, Li S, Zhang Z, Guo L. Effects of carbodiimide combined with ethanol-wet bonding pretreatment on dentin bonding properties: an *in vitro* study. PeerJ. 21 oct 2022;10:e14238.
12. Menon K, Vijayaraghavan S, Dhanyakumar NM. Comparative evaluation of the effect of 37% orthophosphoric acid pre-etching on the microtensile enamel bond strength using universal adhesive and two-step self-etch adhesive systems – An *in vitro* study. J Conserv Dent Endod. nov 2023;26(6):671-6.
13. Kim MJ, Kim J, Song JS, Chung SH, Hyun HK. Shear Bond Strength of Different MDP-Containing Adhesive Systems on Enamel and Dentin from Primary Teeth. J Clin Pediatr Dent. 1 juill 2021;45(3):186-92.

14. Chen H, Feng S, Jin Y, Hou Y, Zhu S. Comparison of bond strength of universal adhesives using different etching modes: A systematic review and meta-analysis. *Dent Mater J.* 25 janv 2022;41(1):1-10.
15. Santander-Rengifo F, Carreras-Presas CM, Aroste-Andía R, Hernández-Huamani E, Gavilán-Chávez P, Cervantes-Ganoza L, et al. Microtensile Bond Strength and Failure Mode of Different Universal Adhesives on Human Dentin. *Int Dent J.* déc 2024;74(6):1239-47.
16. Vinagre A, Ramos J, Marques F, Chambino A, Messias A, Mata A. Randomized clinical trial of five adhesive systems in occlusal restorations: One-year results. *Dent Mater J.* 27 mai 2020;39(3):397-406.
17. Follak AC, Ilha BD, Oling J, Savian T, Rocha RDO, Soares FZM. Clinical behavior of universal adhesives in non-cariou cervical lesions: A randomized clinical trial. *J Dent.* oct 2021;113:103747.
18. Hong X, Huang Z, Tong Z, Jiang H, Su M. Clinical effects of different etching modes for universal adhesives: a systematic review and meta-analysis. *Ann Palliat Med.* mai 2021;10(5):5462-73.
19. Yamauchi K, Tsujimoto A, Jurado CA, Shimatani Y, Nagura Y, Takamizawa T, et al. Etch-and-rinse vs self-etch mode for dentin bonding effectiveness of universal adhesives. *J Oral Sci.* 2019;61(4):549-53.
20. Cardoso GCD, Nakanishi L, Isolan CP, Jardim PDS, Moraes RRD. Bond Stability of Universal Adhesives Applied To Dentin Using Etch-And-Rinse or Self-Etch Strategies. *Braz Dent J.* oct 2019;30(5):467-75.
21. Moon PC, Weaver J, Brooks CN. Review of Matrix Metalloproteinases' Effect on the Hybrid Dentin Bond Layer Stability and Chlorhexidine Clinical Use to Prevent Bond Failure. *Open Dent J.* 20 juill 2010;4:147-52.
22. Giroto AC, Abuna G, Sanchez-Puetate C, Piccioni MA, Porto TS, Kuga MC. Effect of different adhesive strategies and storage time on bond strength of bi-functional monomers to simulated endodontically-treated dentin. *Dent Mater J.* 25 nov 2021;40(6):1410-7.
23. Alovisi M, Palopoli P, Comba A, Allais L, Roggia A, Baldi A, et al. Morphological Analysis and Bond Strength to Root Canal Dentin of Endodontically Treated and Retreated Teeth: An Ex Vivo Study. *J Adhes Dent.* 26:b5780319.
24. Bitter K, Gläser C, Neumann K, Blunck U, Frankenberger R. Analysis of Resin-Dentin Interface Morphology and Bond Strength Evaluation of Core Materials for One Stage Post-Endodontic Restorations. *PLoS ONE.* 28 févr 2014;9(2):e86294.
25. Follak A, Miotti L, Lenzi T, Rocha RO, Maxnuck Soares F. The impact of artificially caries-affected dentin on bond strength of multi-mode adhesives. *J Conserv Dent.* 2018;21(2):136.

26. Ceballos L, Fuentes MV, Tafalla H. Adhesion to caries affected dentin and sclerotic dentin. *Oper Dent.* 2004;28:480-8.
27. Karakaya S, Unlu N, Say EC, Özer F, Soyman M, Tagami J. Bond Strengths of Three Different Dentin Adhesive Systems to Sclerotic Dentin. *Dent Mater J.* 2008;27(3):471-9.
28. Yin H, Kwon S, Chung SH, Kim RJY. Performance of Universal Adhesives in Composite Resin Repair. *Feitosa V, éditeur. BioMed Res Int.* 9 mai 2022;2022:1-8.
29. Bonding Efficacy of Universal Resin Adhesives to Zirconia Substrates: Systematic Review and Meta-Analysis. *J Adhes Dent.* 6 févr 2023;25(1):51-62.
30. Li X, Liang S, Inokoshi M, Zhao S, Hong G, Yao C, et al. Different surface treatments and adhesive monomers for zirconia-resin bonds: A systematic review and network meta-analysis. *Jpn Dent Sci Rev.* déc 2024;60:175-89.
31. Dederichs M, Badr Z, Viebranz S, Schroeter S, Hennig CL, Schmelzer AS, et al. Effect of Different Primers on Shear Bond Strength of Base Metal Alloys and Zirconia Frameworks. *Polymers.* 20 févr 2024;16(5):572.
32. Alhomuod M, Phark J, Duarte S. Bond strength to different CAD / CAM lithium disilicate reinforced ceramics. *J Esthet Restor Dent.* janv 2023;35(1):129-37.
33. Miao C, Yang X, Wong MC, Zou J, Zhou X, Li C, et al. Rubber dam isolation for restorative treatment in dental patients. *Cochrane Database Syst Rev.* 17 mai 2021;2021(5):CD009858.
34. Falacho RI, Melo EA, Marques JA, Ramos JC, Guerra F, Blatz MB. Clinical in-situ evaluation of the effect of rubber dam isolation on bond strength to enamel. *J Esthet Restor Dent.* janv 2023;35(1):48-55.
35. Patanjali S, Arora A, Arya A, Grewal MS. An In Vitro Study of Effect of Beveling of Enamel on Microleakage and Shear Bond Strength of Adhesive Systems in Primary and Permanent Teeth. *Int J Clin Pediatr Dent.* 2019;12(3):205-10.
36. Jayaprakash T, Srinivasan MR, Indira R. Evaluation of the effect of surface moisture on dentinal tensile bond strength to dentine adhesive: An in vitro study. *J Conserv Dent JCD.* 2010;13(3):116-8.
37. Ismiyatin K. Tensile bond strength of hydroxyethyl methacrylate dentin bonding agent on dentin surface at various drying techniques. *Dent J Maj Kedokt Gigi.* 1 juin 2010;43(2):54.
38. Anatavara S, Sithiseripratip K, Senawongse P. Stress relieving behaviour of flowable composite liners: A finite element analysis. *Dent Mater J.* 2016;35(3):369-78.
39. Yannick T. L'Information Dentaire. 2021 [cité 4 mars 2025]. Dentisterie adhésive : rétrospective et perspectives. Disponible sur: <https://www.information-dentaire.fr/actualites/dentisterie-adhesive-retrospective-et-perspectives/>

40. Sun Z, You X, Xu J, Chen L, Li S, Zhang Z, et al. Effectiveness of sodium hypochlorite treatment on the bonding of four adhesive systems to fluorotic enamel. *Dent Mater J.* 25 sept 2022;41(5):660-7.
41. Barakah H. Effect of different curing times and distances on the microhardness of nanofilled resin-based composite restoration polymerized with high-intensity LED light curing units. *Saudi Dent J.* déc 2021;33(8):1035-41.
42. Xu X, Sandras DA, Burgess JO. Shear bond strength with increasing light-guide distance from dentin. *J Esthet Restor Dent Off Publ Am Acad Esthet Dent Al.* 2006;18(1):19-27; discussion 28.
43. Klarić E, Bosnić JV, Par M, Tarle Z, Marovic D. One-Year Evaluation of High-Power Rapid Curing on Dentin Bond Strength. *Materials.* 13 mai 2024;17(10):2297.
44. Bardocz-Veres Z, Miklós ML, Biró EK, Kántor ÉA, Kántor J, Dudás C, et al. New Perspectives in Overcoming Bulk-Fill Composite Polymerization Shrinkage: The Impact of Curing Mode and Layering. *Dent J.* 5 juin 2024;12(6):171.
45. Chandurkar AM, Metgud SS, Yakub SS, Kalburge VJ, Biradar BC. Comparative Evaluation of the Effects of Light Intensities and Curing Cycles of QTH, and LED Lights on Microleakage of Class V Composite Restorations. *J Clin Diagn Res JCDR.* mars 2014;8(3):221-4.
46. Lehmann N. L'Information Dentaire. 2023 [cité 24 nov 2024]. Dégradation du joint collé à l'interface adhésif/dent : données scientifiques et moyens de prévention. Disponible sur: <https://www.information-dentaire.fr/formations/dgradation-du-joint-coll-linterface-adhsif-dent-donnes-scientifiques-et-moyens-de-prvention/>
47. Zhang D, Li S, Zhao H, Li K, Zhang Y, Yu Y, et al. Improving antibacterial performance of dental resin adhesive via co-incorporating fluoride and quaternary ammonium. *J Dent.* juill 2022;122:104156.
48. Wang L, Xie X, Weir MD, Fouad AF, Zhao L, Xu HHK. Effect of bioactive dental adhesive on periodontal and endodontic pathogens. *J Mater Sci Mater Med.* nov 2016;27(11):168.
49. Tao S, He L, Xu HHK, Weir MD, Fan M, Yu Z, et al. Dentin remineralization via adhesive containing amorphous calcium phosphate nanoparticles in a biofilm-challenged environment. *J Dent.* oct 2019;89:103193.
50. Zhang K, Zhang N, Weir MD, Reynolds MA, Bai Y, Xu HHK. Bioactive dental composites and bonding agents having remineralizing and antibacterial characteristics. *Dent Clin North Am.* oct 2017;61(4):669-87.
51. Park EH, Na YK, Gug H, Lee DS, Park JC, Park SH, et al. Development of a new universal adhesive containing CPNE7-derived peptide and its potential role in reducing postoperative sensitivity. *Dent Mater J.* 25 juill 2023;42(4):501-8.

N° 2026 LYO1D 001

WANG Christophe

Mise au point sur les systèmes adhésifs en 2025 et stratégies d'optimisation de l'adhésion

Résumé :

L'adhésion dentaire est un élément essentiel de la dentisterie restauratrice moderne. La diversité des systèmes adhésifs disponibles en 2025 et la sensibilité opérateur-dépendante de leur mise en œuvre, rendent nécessaire une mise au point actualisée.

L'objectif de cette thèse est de comparer les différents systèmes adhésifs à partir d'une revue de la littérature scientifique et de proposer des recommandations cliniques fondées sur les données scientifiques actuelles afin d'optimiser l'adhésion.

Les performances seront analysées selon le substrat, en mettant en lumière le 10- MDP, molécule centrale qui a marqué un tournant dans le domaine des adhésifs. Puis seront présentées les stratégies cliniques permettant de maximiser le succès de l'adhésion.

Ces recommandations visent à guider le choix clinique et à renforcer la durabilité des restaurations adhésives.

Mots-clés :

Adhésif
Universels
Collage
Restauration

Jury :

Président : Monsieur le Professeur Christophe JEANNIN

Assesseurs : Madame la Docteure Marion LUCCHINI
Monsieur le Docteur Raphaël RICHERT
Madame la Docteure Julie SANTAMARIA

Adresse de l'auteur :

Christophe WANG
429 Cours Émile Zola
69100 Villeurbanne