

# Vitrodent - Des vitrocéramiques à l'émail dentaire : élaboration d'une vitrocéramique à gradient de propriétés mécaniques pour traiter l'érosion dentaire

**Discipline(s) impliquée(s)** : Sciences des matériaux, mécanique, odontologie

**Mots clés** : vitrocéramique, prothèse dentaire, élaboration, gradient fonctionnel, overlay, impression 3D, caractérisation mécanique

**Laboratoire** : URB2i-URP4462, Université Sorbonne Paris Nord

**Directeur de thèse** : Laurent Tapie, MCF-HDR, laurent.tapie@univ-paris13.fr

**Co-encadrante de thèse** : Aurélie Benoit, MCF

**Partenaires du projet** : Jean-Pierre Attal, MCU-PH, URB2i - Daniel Neuville, DR, IPGP, UMR7154

## 1. Positionnement des travaux

---

Pour faire face à l'érosion dentaire, qui touche aussi bien les jeunes adultes ( $\approx 30\%$  des 18 à 35 ans en Europe, (Bartlett et al., 2013)) que les personnes âgées, et aux hypo-minéralisations amélaire<sup>2</sup> ( $\approx 15\%$  de la population en France, Kassebaum et al., 2015)), l'overlay est le traitement de choix. Cette nouvelle thérapeutique de restauration dentaire peu invasive permet la reconstruction des surfaces occlusales de la dent (surfaces en contact lors de l'occlusion et de la mastication) grâce à une prothèse de faible épaisseur (inférieure à 2 mm) collée sur les tissus dentaires sains (Figure 1). Cependant, dans la pratique clinique actuelle, aucun matériau prothétique ne permet de réaliser des overlays durables de faible épaisseur (Morimoto et al., 2016, Kassebaum et al., 2017). Les dentistes sont alors amenés à préparer la dent en augmentant l'espace prothétique pour permettre le collage d'un biomatériau de restauration. Ces overlays sont réalisés avec des biomatériaux aux propriétés mécaniques homogènes et isotropes qui ne reflètent pas les propriétés mécaniques des tissus remplacés de la dent naturelle (Figure 1), les biomatériaux de restauration étant le plus souvent des résines composites, des céramiques ou des vitrocéramiques.

La dent naturelle, subissant des millions de sollicitations mécaniques cycliques tout au long de sa présence sur l'arcade dentaire, présente une résistance à la fracture exceptionnelle (Chai et al., 2009). La dent est majoritairement constituée de deux tissus aux propriétés mécaniques différentes : l'émail (module d'Young  $\sim 40$  à  $80$  GPa, résistance mécanique  $\sim 100$  à  $400$  MPa, ténacité  $\sim 0.7$  à  $1.3$  MPa.m<sup>1/2</sup>, dureté  $\sim 3$  à  $4.5$  GPa) et la dentine (module d'Young  $\sim 20$  GPa, résistance mécanique  $\sim 170$  à  $450$  MPa, ténacité  $\sim 1$  à  $2$  MPa.m<sup>1/2</sup>, dureté  $0.35$  à  $0.5$  GPa) (Figure 1) (Imbeni et al., 2005). Ces deux tissus sont associés l'un à l'autre par la jonction amélo-dentinaire (JAD) qui présente une microstructure complexe lui conférant des propriétés mécaniques particulières. On observe notamment un fort gradient de module d'élasticité de la JAD sur quelques dizaines de microns (Wang et al., 2017), assurant ainsi la liaison entre les propriétés élastiques de l'émail et de la dentine. De plus, aucun décollement de cette jonction n'est constaté lors d'une propagation de fissure de l'émail vers la dentine.

Les fissures provenant de l'émail s'arrêtent spontanément dans une zone proche de la JAD, notamment grâce au gradient de module d'élasticité entre de l'émail, la JAD et la dentine.

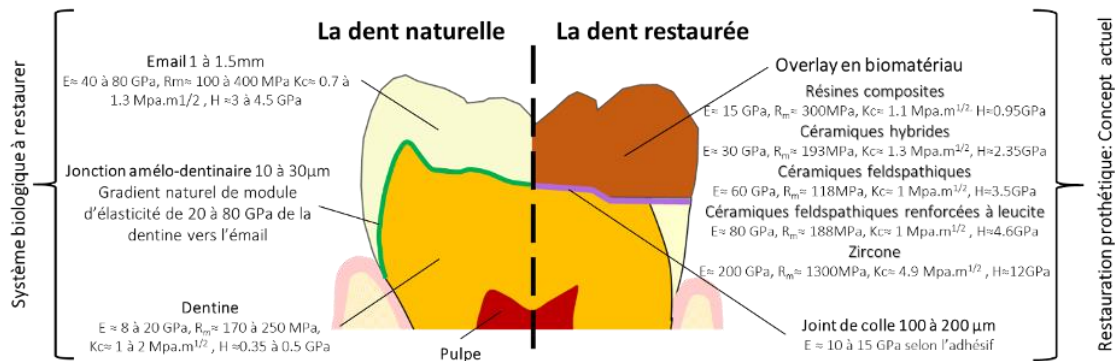


Figure 1. Comparaison des propriétés mécaniques des tissus dentaires avec les biomatériaux de restaurations actuels.

## 2. Hypothèse de recherche, problématiques et état actuel des travaux

L'hypothèse de recherche principale est de s'inspirer du comportement de la dent naturelle à l'échelle macroscopique en s'inspirant des propriétés mécaniques de l'émail, de la dentine et de la JAD. La mise en forme d'un overlay bio-inspiré multicouche, à l'image de la dent, est la piste envisagée pour réaliser des restaurations durables de faible épaisseur. Une prothèse composée d'une couche de biomatériau aux propriétés mécaniques inspirées de l'émail en surface et, d'une couche de biomatériau aux propriétés mécaniques inspirées de la dentine et de la JAD (gradients d'élasticité, de limite à la rupture, de ténacité), semble être un concept prometteur pour réduire les contraintes observées à la base des restaurations et ainsi réaliser des restaurations plus durables indépendamment de l'épaisseur de celles-ci.

La réalisation de cette prothèse multicouche bioinspirée soulève alors deux problématiques : (1) l'élaboration d'un biomatériau à gradient de module d'élasticité restituant le comportement mécanique de la dent, notamment sa ténacité, tout en assurant les propriétés tribologiques à la surface de la prothèse (dureté de l'émail en surface) ; (2) la mise en forme d'un biomatériau pour réaliser une prothèse d'architecture volumique complexe (réalisation d'un volume multicouche en 3 dimensions).

Des simulations numériques, conduites par l'URB2i (Fouquet et al., 2020) et d'autres équipes (Du et al., 2007 ; Huang et al., 2013) ont montré que l'utilisation d'un matériau à gradient de module d'élasticité (MGME), inspiré de la dent naturelle, permettait une baisse jusqu'à 40% des contraintes principales à l'origine des échecs prothétiques d'overlays par décollement ou rupture (Morimoto et al., 2016 ; Scherrer et al., 2006 ; Dhima et al., 2014). Nos travaux préliminaires ont permis de préciser certains paramètres du MGME : gamme de module d'élasticité, nombre de couches sur lesquelles le gradient est discrétisé, fonction de discrétisation, épaisseur du MGME et protocole de collage. Pour une restauration collée sur la dentine, cette étude montre une réduction maximale des contraintes dans la prothèse pour une épaisseur de MGME de 50 % de la restauration totale et un gradient de module linéaire entre 40 et 80 GPa. Avec un nombre de couches égal à 5, raisonnable compte tenu des contraintes de fabrication, il est observé une diminution de 40 % des contraintes mécaniques

à la base de la restauration, ce qui est particulièrement intéressant pour les restaurations de faible épaisseur (-50 MPa pour 1 mm).

Des travaux préliminaires ont permis de caractériser chimiquement et mécaniquement les vitrocéramiques dentaires actuellement sur le marché et de développer de nouvelles formulations à partir de ces matériaux. Des éprouvettes bicouche ont été fabriquées et montrent la faisabilité de cofritter deux vitrocéramiques de composition différente. L'URB2i a fait l'acquisition d'une machine d'impression 3D de céramique afin de tester les formulations dont les propriétés mécaniques ont été validées. Les premiers barreaux de céramiques imprimés en 3D ont montré une importante porosité qui diminue fortement leur résistance mécanique. Avant d'optimiser les paramètres du procédé additif, il convient d'utiliser, dans un premier temps, un procédé de fabrication classique de type coulage en bande puis pressée pour mettre au point un matériau multicouche aux propriétés mécaniques optimales.

### **3. Projet doctoral et profil du candidat**

---

Le développement d'un matériau optimal à gradient de modules d'Young présente deux verrous. Le premier consiste à obtenir des matériaux céramiques possédant un module d'élasticité variant de 40 à 80 GPa et conservant les caractéristiques mécaniques naturelles de la dent (ténacité et limite à la rupture).

Le second verrou consiste à formuler ces matériaux pour pouvoir être mis en forme par impression 3D. La formulation des matériaux devra donc présenter une rhéologie compatible avec un procédé d'impression 3D ainsi que des propriétés minimisant les déformations, retrait et défauts à cœur après traitements thermiques post-impression.

Le projet doctoral s'inscrit donc dans cette problématique de formulation d'une gamme de matériaux à gradient de propriétés mécaniques pouvant être mis en forme par impression 3D. Dans ce contexte le doctorant sera impliqué dans un partenariat académique interdisciplinaire entre l'URB2i et l'IPGP. L'URB2i apportera notamment son expertise dans l'étude des propriétés mécaniques macroscopiques du matériau (flexion biaxiale, usure par mastication simulée), l'utilisation de procédés additifs pour la fabrication de prothèses dentaires et fera le lien avec les professionnels de santé. L'Institut de physique du globe de Paris interviendra dans la caractérisation par spectrométrie Raman, analyse thermique et la formulation de la gamme de matériau nécessaire pour la fabrication du matériau à gradient de propriétés mécaniques. Le doctorant devra posséder une culture des sciences et génie des matériaux avec des compétences en physico-chimie et mécanique.

### **4. Références**

---

- Babu P et al. Dental ceramics: Part I—An overview of composition, structure and properties. *Am J Mater Eng Technol.* 2015;3(1):13-18.
- Bartlett, D. W. et al. Prevalence of tooth wear on buccal and lingual surfaces and possible risk factors in young European adults. *Journal of Dentistry* 41, 1007–1013 (2013).
- Chai H et al. Remarkable resilience of teeth. *Proc Natl Acad Sci.* 2009;106(18):7289–93.
- De Ligny D. et Neuville D.R. (2017) Raman spectroscopy: a nice tools to understand nucleation and growth mechanism. In "From glass to crystal: nucleation, growth and phase separation, from research to applications " edt Neuville D.R., Cormier L., Caurant D. et Montagne L, EDP-Sciences.

Di Genova D., Kolzenburg S., Wiesmaier S., Dallanave E., Neuville D.R., Hess K.U., Dingwell D.B. (2017) A subtle chemical tipping point governing mobilization and eruption style of rhyolitic magma. *Nature*. 552, 235-238. doi:10.1038/nature24488

Du J et al. Bio-inspired dental multilayers: Effects of layer architecture on the contact-induced deformation. *Acta Biomaterialia*. 2013;9(2):5273-9.

Eldafrawy M et al. A Functionally Graded PICN Material for Biomimetic CAD-CAM Blocks. *J Dent Res*. 2018;97(12):1324-1330.

Fouquet, V., Tapie, L., Attal, J. P. & Benoit, A. Design optimization of a functionally graded overlay using FEA. *Comp Meth Biomech Biomed Eng* 23, S110–S112 (2020).

Helvey G. Classifying dental ceramics: numerous materials and formulations available for indirect restorations. *Compend Contin Educ Dent*. 2014;35(1):38-43.

Huang M et al. Bioinspired design of dental multilayers. *J Mater Sci Mater Med*. 2007;18(1):57-64.

Imbeni V et al. The dentin–enamel junction and the fracture of human teeth. *Nat Mater*. 2005;4(3):229-35.

Kassebaum, N J et al. Global Burden of Untreated Caries: A Systematic Review and Metaregression. *J Dent Res* 94, 650–658 (2015).

Kassebaum, N et al. Global, regional, and national prevalence, incidence, and disability-adjusted life years for oral conditions for 195 countries, 1990–2015: a systematic analysis for the global burden of diseases, injuries, and risk factors. *J Dent Res* 96, 380–387 (2017).

Le Losq C, Neuville D.R., Florian P., Massiot D., Zhou Z., Chen W., Greaves N. (2017) Percolation channels: a universal idea to describe the atomic structure of glasses and melts. *Scientific Reports*, 7, Article number: 16490, doi:10.1038/s41598-017-16741-3

Marie J et al. Micro extrusion of innovative alumina pastes based on aqueous solvent and natural eco-friendly binder *J Eur Ceram Soc*;2018;38(7):2802-2807.

Morimoto, S., et al. Survival Rate of Resin and Ceramic Inlays, Onlays, and Overlays: A Systematic Review and Meta-analysis. *J Dent Res* 95, 985–994 (2016).

Wang Z et al. Mapping the mechanical gradient of human dentin-enamel-junction at different intratooth locations. *Dent Mater*. 2017;34(3):376-88.

Zhang Y et al. Graded structures for damage resistant and aesthetic all-ceramic restorations. *Dent Mater*. 2009;25(6):781- 90.