



HAL
open science

Éclaircissement dentaire externe sur dent pulpée : trajet du peroxyde d'hydrogène à travers l'émail

Chlomy Toledano

► **To cite this version:**

Chlomy Toledano. Éclaircissement dentaire externe sur dent pulpée : trajet du peroxyde d'hydrogène à travers l'émail. Sciences du Vivant [q-bio]. 2024. dumas-04649236

HAL Id: dumas-04649236

<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-04649236v1>

Submitted on 16 Jul 2024

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Distributed under a Creative Commons Attribution - NonCommercial - NoDerivatives 4.0 International License

AVERTISSEMENT

Cette thèse d'exercice est le fruit d'un travail approuvé par le jury de soutenance et réalisé dans le but d'obtenir le diplôme d'État de docteur en chirurgie dentaire. Ce document est mis à disposition de l'ensemble de la communauté universitaire élargie.

Il est soumis à la propriété intellectuelle de l'auteur. Ceci implique une obligation de citation et de référencement lors de l'utilisation de ce document.

D'autre part, toute contrefaçon, plagiat, reproduction illicite encourt toute poursuite pénale.

Code de la Propriété Intellectuelle. Articles L 122.4

Code de la Propriété Intellectuelle. Articles L 335.2 - L 335.10



UNIVERSITÉ PARIS CITÉ

FACULTÉ DE SANTÉ

UFR D'ODONTOLOGIE

Année 2024

N° D031

THÈSE

POUR LE DIPLÔME D'ÉTAT DE DOCTEUR EN CHIRURGIE DENTAIRE

Présentée et soutenue publiquement le : 26 février 2024

Par

Chlomy TOLEDANO

**Éclaircissement dentaire externe sur dent pulpée : trajet du
peroxyde d'hydrogène à travers l'émail**

Dirigée M. le Docteur Jean-Pierre Attal

JURY

M. le Professeur Louis Maman
M. le Docteur Jean-Pierre Attal
M. le Docteur Roddy Kheng
M. le Docteur Philippe François

Président
Assesseur
Assesseur
Assesseur



L'auteur s'engage à respecter les droits des tiers, et notamment les droits de propriété intellectuelle. Dans l'hypothèse où la thèse d'exercice comporterait des éléments protégés par un droit quelconque, l'auteur doit solliciter les autorisations nécessaires à leur utilisation, leur reproduction et leur représentation, auprès du ou des titulaires des droits. Le droit de citations doit s'exercer avec rigueur et discernement. Certaines citations peuvent comporter un extrait textuel de la source. Cet extrait textuel doit être relativement court (une quinzaine de lignes tout au plus), mis entre guillemets ou clairement séparé du corps du texte et bien évidemment référencé en citation. En ce qui concerne la citation sans extrait textuel (mention d'idées ou concepts originaux, données chiffrées, figures, etc.), il faut également en citer la source. Toute figure, tableau, graphique reproduit doit également être accompagné de la citation de la source. L'auteur est responsable du contenu de sa thèse d'exercice. Il garantit l'Université contre tout recours. Elle ne pourra en aucun cas être tenue responsable de l'atteinte aux droits d'un tiers.

Chlomy TOLEDANO

Tableau des enseignants de l'UFR d'Odontologie

DÉPARTEMENTS	DISCIPLINES	PROFESSEURS DES UNIVERSITÉS	MAÎTRES DE CONFÉRENCES
1. DÉVELOPPEMENT, CROISSANCE ET PRÉVENTION	ODONTOLOGIE PÉDIATRIQUE	Mme M. Molla-AUJAY DE LA DURE Mme É. DURSUN Mme S. VITAL	M. P.-J. BERAT (MCU associé) Mme A.-L. BONNET M. F. COURSON Mme A. VANDERZWALM
	ORTHOPÉDIE DENTO-FACIALE	Mme E. LE NORCY	M. G. DOT M. C. DUNGLAS M. P. GARREC Mme A. KAMOOUN Mme B. VI-FANE
	PRÉVENTION, ÉPIDÉMIOLOGIE, ÉCONOMIE DE LA SANTÉ ET ODONTOLOGIE LÉGALE	Mme S. AZOGUI-LEVY M. P. PIRNAY	Mme A. GERMA Mme V. SMAÏL-FAUGERON Mme A. TENENBAUM
2. CHIRURGIE ORALE, PARODONTOLOGIE, BIOLOGIE ORALE	PARODONTOLOGIE	Mme F. ANAGNOSTOU M. M. BIOSSE DUPLAN Mme M. C. CARRA Mme M.-L. COLOMBIER Mme M. GOSSET	M. A. BRUN M. D. GUEZ M. S. KERNER
	CHIRURGIE ORALE	Mme G. LESCAILLE M. L. MAMAN Mme L. RADOÏ M. N. MOREAU	Mme V. BAAROUN M. B. COURRIER Mme A.-L. EJEIL M. F. FERRÉ M. F. GAULTIER M. T. NGUYEN Mme J. ROCHEFORT M. L. SICARD Mme I. TAÏHI M. H. TARRAGANO
	BIOLOGIE ORALE	Mme C. BARDET (PU) Mme A. BERDAL Mme C. CHAUSSAIN M. V. DESCROIX M. B. FOURNIER M. B. GOGLY Mme S. SÉGUIER	Mme C. ANDRIQUE (MCU associée) M. C.-D. ARRETO M. J. BOUCHET (MCF) Mme H. CHARDIN M. P. COLLIN Mme M.-H. COTTET Mme A. COUDERT (MCF) Mme C. GORIN Mme S. HOUARI-MEJRI Mme J. ISAAC (MCF) M. O. LE MAY M. G. LIGNON (MCU associé) M. A. NASSIF Mme N. NOWWAROTE (MCU associé) M. B. PAIVA DOS SANTOS (MCF)
3. RÉHABILITATION ORALE (DÉBUT)	DENTISTERIE RESTAURATRICE ENDODONTIE	Mme T. BOUKPESSI M. P. COLON Mme C. GAUCHER	Mme F. BERÈS Mme C. BESNAULT Mme A.-M. COLLIGNON M. F. DECUP Mme A. HARTMANN Mme K. JEDEON M. G. KUHN Mme C. MESGOUÉZ-MENEZ Mme C. MOCQUOT Mme N. PRADELLE PLASSE Mme M. ZANINI

DÉPARTEMENTS	DISCIPLINES	PROFESSEURS DES UNIVERSITÉS	MAÎTRES DE CONFÉRENCES
3. RÉHABILITATION ORALE (SUITE)	PROTHÈSES	Mme M.-V. BERTERETCHE Mme A. BRAUD M. O. FROMENTIN M. C. RIGNON-BRET M. B. TAVERNIER Mme C. WULFMAN	M. J.-M. CHEYLAN Mme H. CITTERIO Mme M.-J. CRENN M. M. DAAS M. D. DOT M. L. DUPAGNE (MCU associé) M. N. EID M. S. ESCURE Mme I. FOUILLOUX Mme L. FRIEDLANDER M. P. GATEAU M. D. MAURICE M. P. MOULIN M. P. RENAULT Mme É. SARFATI M. J.-E. SOFFER M. P. TRAMBA
	FONCTION-DYSFONCTION, IMAGERIE, BIOMATÉRIAUX	M. Y. BOUCHER Mme L. JORDAN M. J.-F. N'GUYEN M. B. SALMON	M. J.-P. ATTAL M. C. AZEVEDO Mme R. BENBELAÏD Mme A. BENOÎT A LA GUILLAUME (MCF) Mme J. BOSCO M. D. BOUTER M. M. CHERRUAU M. R. FELIZARDO M. P. FRANÇOIS Mme F. MANGIONE M. A. PORPORATI (MCU associé) Mme F. TILOTTA
PROFESSEURS ÉMÉRITES		M. P. BOUCHARD Mme M.-L. BOY-LEFÈVRE Mme M. FOLLIGUET Mme M. WOLIKOW M. R. GARCIA M. J.-J. LASFARGUES M. A. LAUTROU M. G. LEVY	M. B. PELLAT Mme A. POLIARD M. J.-L. SAFFAR

Liste mise à jour le 08 décembre 2023

Remerciements

À M. le Professeur Louis Maman ; Docteur en Chirurgie dentaire ; Spécialiste qualifié en Chirurgie orale ; Docteur en Sciences Odontologiques ; Habilité à Diriger des Recherches ; Professeur des Universités , UFR d'Odontologie – Université Paris Cité ; Praticien Hospitalier , Assistance Publique – Hôpitaux de Paris ; Doyen honoraire de l'université Paris Descartes ;

Pour vous remercier de l'honneur que vous nous faites en ayant accepté de présider le jury de ma thèse d'exercice. Pour vous remercier aussi de ces années de formations hospitalières, durant lesquelles vous nous avez toujours exprimé votre accompagnement et votre bienveillance. Aussi, merci pour votre constante gentillesse et joie de vivre que vous nous avez toujours communiquées.

À M. le Docteur Jean-Pierre Attal ; Docteur en Chirurgie dentaire ; Docteur de l'Université Paris Descartes ; Habilité à Diriger des Recherches ; Maître de Conférences des Universités , UFR d'Odontologie – Université Paris Cité ; Praticien Hospitalier , Assistance Publique – Hôpitaux de Paris ; Vice – Doyen de l'UFR d'Odontologie – Université Paris Cité ;

Pour le plaisir que vous me faites d'avoir accepté de diriger ma thèse d'exercice avec un si grand dévouement. Merci pour tous vos conseils prodigués, ainsi que pour le travail que nous avons fait ensemble. Merci aussi pour toutes ces années hospitalo-universitaires durant lesquelles vous avez toujours été d'une grande écoute pour l'ensemble des étudiants. Aussi, je vous remercie personnellement pour votre patience, ainsi que pour votre profond désir de partager vos connaissances.

À M. le Docteur Philippe François ; Docteur en Chirurgie Dentaire ; Docteur de l'Université Paris 13 ; Maître de Conférences des Universités , UFR d'Odontologie – Université Paris Cité ; Praticien Hospitalier , Assistance Publique – Hôpitaux de Paris ;

Je vous remercie d'avoir accepté de siéger à ce jury. Je vous remercie aussi pour le temps que vous avez consacré à la lecture de cette thèse, ainsi que pour votre disponibilité. Les quelques cours que j'ai eu avec vous durant mes premières années universitaires ne me laisseront que de bons souvenirs de votre bonne humeur et de votre volonté d'accompagner la jeunesse du métier.

À M. le Docteur Roddy Kheng ; Docteur en Chirurgie Dentaire ; Praticien Hospitalier , Assistance Publique – Hôpitaux de Paris ;

Mes remerciements pour avoir accepté de faire partie de mon jury. Je vous remercie aussi pour toutes ces années à Charles Foix durant lesquelles vous avez été d'une grande importance à notre formation. Votre rigueur, votre précision, votre douceur ainsi que votre grande écoute m'ont beaucoup aidé. Aussi, ces nombreuses visites de prévention que nous avons réalisées en écoles maternelles confirment la disponibilité et l'accessibilité que vous souhaitez instaurer avec tous les étudiants.

Résumé et indexation en français et anglais

Résumé :

L'éclaircissement dentaire par utilisation du peroxyde d'hydrogène est de nos jours un procédé largement utilisé. Cependant, de rares études se sont intéressées au trajet que le peroxyde d'hydrogène emprunte à travers l'émail. Ainsi, nous ne savons toujours pas aujourd'hui avec précision et certitude par où passe le produit. Nous allons donc ici étudier la structure précise de l'émail, ainsi que sa composition, afin de comprendre par où passe le peroxyde d'hydrogène. Notre étude va montrer que la structure de l'émail, notamment sa porosité créée par la présence d'espaces de vides inter et intraprismatiques, pourrait offrir un passage au peroxyde d'hydrogène. De même que sa composition en eau qui aiderait à la diffusion de la molécule.

Discipline ou spécialité :

Dentisterie esthétique

Mots clés français (fMeSH et Rameau) :

fMeSH : Émail dentaire ; Peroxyde d'hydrogène

Rameau : Odontostomatologie esthétique ; Blanchiment des dents

Forme ou Genre :

fMeSH : Dissertation universitaire

Rameau : Thèses et écrits académiques

Title : External tooth lightening on pulp teeth: hydrogen peroxide pathway through the enamel

Abstract :

Tooth whitening using hydrogen peroxide is a widely used process nowadays. However, few studies have focused on the path that hydrogen peroxide takes through the enamel. Thus, we still do not know precisely and with certainty the route taken by the product. In this regard, we will examine here the precise structure of the enamel as well as its composition to understand the path taken by hydrogen peroxide. Our study will show that the enamel structure, especially its porosity created by the presence of inter and intraprismatic void spaces, could provide a pathway for hydrogen peroxide. Similarly, its composition with water would aid in the molecule's diffusion

Branch or specialty :

Esthetic dentistry

English keywords (MeSH) :

Dental Enamel ; Hydrogen Peroxide,

Publication type (MeSH) :

Academic Dissertation

Liste des abréviations

- APT : Atom probe tomography
- PC : Peroxyde de carbamide
- PH : Peroxyde d'hydrogène

Table des matières

INTRODUCTION	2
1 : METHODE DE SELECTION DES ARTICLES	4
1.1 ÉQUATION DE RECHERCHE	4
1.2 TRI ET SELECTION DES ARTICLES	4
2 : L'ECLAIRCISSEMENT DENTAIRE AUJOURD'HUI	5
2.1 PROPRIETES OPTIQUES DE LA DENT	5
2.2 MECANISMES D' ACTIONS.....	5
2.2.1 <i>Oxydation des chromophores</i>	5
2.2.2 <i>Opacification de l'émail</i>	6
2.3 NOS CONNAISSANCES SUR LE PEROXYDE D'HYDROGENE	7
3 : STRUCTURE DE L'EMAIL ET INFLUENCE SUR LA TRAJECTOIRE DU PRODUIT D'ECLAIRCISSEMENT.	8
3.1 ÉCHELLE MICROSCOPIQUE.....	8
3.2 ÉCHELLE NANOSCOPIQUE.....	14
4 : COMPOSITION DE L'EMAIL ET INFLUENCE SUR LA TRAJECTOIRE DU PRODUIT D'ECLAIRCISSEMENT	20
4.1 PHASE MINERALE	20
4.2 PHASE ORGANIQUE	23
4.3 PHASE AQUEUSE	25
CONCLUSION	28
BIBLIOGRAPHIE	32
TABLE DES FIGURES	35

Introduction

Dans notre société actuelle, l'apparence physique tient un rôle important.

Un beau sourire est un atout esthétique majeur et cela passe notamment par la teinte et la clarté des dents.

Ainsi, de plus en plus de personnes souhaitent améliorer l'esthétique de leur sourire(1).

L'éclaircissement dentaire externe est aujourd'hui une pratique largement décrite et utilisée en dentisterie esthétique.

Cette option thérapeutique offre une solution simple et non invasive selon le gradient thérapeutique(2), afin de modifier l'apparence des dents.

Ce protocole ambulatoire a été présenté en 1989 par Haywood et Heymann(3).

L'agent éclaircissant est maintenu au contact des dents, via des gouttières en éthylène acétate de vinyle souples thermoformées sur l'empreinte des dents.

Aujourd'hui, pour cette technique, le peroxyde de carbamide est le plus souvent utilisé, à une concentration comprise entre 10 % et 16 %. Cependant nous nous intéresserons ici au peroxyde d'hydrogène car c'est la molécule qui constitue le principe actif du produit d'éclaircissement.

Le temps de contact entre la surface dentaire et le produit doit être au minimum de deux heures par jour. Habituellement, il convient de porter la gouttière durant le sommeil, toute la nuit, mais le gel est efficace dès lors que la gouttière a été portée pendant au moins deux heures. Le port se fait sous la surveillance du praticien, avec une durée de traitement allant de deux à six semaines, en fonction de la sévérité de la dyschromie.

Ce protocole est aujourd'hui largement décrit, avec assez de recul clinique, nous connaissons les indications et les contres-indications, nous connaissons aussi les modifications que cela apporte sur l'émail.

L'éclaircissement dentaire est l'une des options les plus courantes et les plus accessibles pour améliorer la couleur des dents. C'est une procédure non chirurgicale et généralement sans douleur.

Les résultats de l'éclaircissement dentaire peuvent varier d'une personne à l'autre en fonction de différents facteurs tels que la teinte d'origine des dents, la cause de la décoloration et la réponse individuelle au traitement.

En conclusion, l'éclaircissement dentaire externe occupe une place importante dans l'arsenal thérapeutique de la dentisterie esthétique en offrant une solution simple et efficace pour améliorer l'apparence des dents et obtenir un sourire plus esthétique. Cette procédure peut avoir un impact significatif sur l'estime de soi et la confiance en soi, contribuant ainsi à une meilleure qualité de vie.

Cependant, nous ne connaissons toujours pas l'itinéraire précis qu'emprunte le peroxyde d'hydrogène à travers l'émail. Le produit est généralement placé en vestibulaire, mais il a été montré qu'on pouvait le placer au niveau du bord libre voir même en lingual.

Nous allons donc ici essayer de définir le trajet du produit en nous limitant à l'émail.

L'intérêt de cette thèse est d'essayer de déterminer précisément par où passent les molécules de peroxyde d'hydrogène dans l'émail afin de mieux comprendre le mécanisme d'éclaircissement et ainsi pouvoir expliquer la raison de certains échecs ou bien proposer une nouvelle manière de réaliser l'éclaircissement dentaire externe.

Pour cela, nous allons dans un premier temps étudier et approfondir la structure précise de l'émail, en expliquant son nouveau paradigme, que ce soit à l'échelle microscopique et nanoscopique, et expliquer son influence sur la trajectoire du peroxyde d'hydrogène.

Dans un second temps, nous allons étudier la composition de l'émail et expliquer de quelle manière elle influence la trajectoire du peroxyde d'hydrogène.

En conclusion, nous proposerons une hypothèse sur le trajet précis de la molécule de peroxyde d'hydrogène à travers l'émail.

1 : Méthode de sélection des articles

1.1 Équation de recherche

Concernant les recherches bibliographiques réalisées pour la réalisation de cette thèse, l'équation de recherche majeure a été : (((dental bleaching) OR (hydrogen peroxide)) AND (enamel structure)) OR (enamel composition) AND (diffusion).

En effet, cette thèse traite entre autres de l'influence de la composition et de la structure de l'émail sur la diffusion et le trajet qu'emprunte le peroxyde d'hydrogène utilisé lors de l'éclaircissement dentaire externe.

Ainsi, cette équation de recherche semble être la plus adaptée.

1.2 Tri et sélection des articles

Sur PubMed, cette équation de recherche nous donne 180 résultats.

Ces articles s'étalent sur une période allant de 1978 à 2023.

Parmi ces 180 articles nous avons entre autres :

- 16 essais cliniques
- 13 essais contrôlés randomisés
- 11 revues de la littérature

Pour mes recherches, j'ai en majorité puisé mes informations dans des articles relativement récents, n'ayant en moyenne pas plus de 15 ans.

2 : L'éclaircissement dentaire aujourd'hui

Aujourd'hui, nous avons de nombreuses connaissances ainsi qu'assez de recul concernant l'éclaircissement dentaire.

Nous allons ici développer les données acquises concernant l'éclaircissement ainsi que son mécanisme d'action.

Mais avant de comprendre son mécanisme, nous avons d'abord besoin de comprendre le fonctionnement optique de la dent, ainsi que celui de ses différents tissus.

2.1 Propriétés optiques de la dent

Concernant les tissus minéralisés de la dent qui sont l'émail et la dentine, leurs caractéristiques optiques sont très différentes.

L'émail est qualifié de translucide(4), c'est-à-dire qu'il laisse en grande partie la lumière passer à travers sa masse, et ainsi n'influe pas grandement sur la couleur de la dent

La dentine est elle qualifiée d'opaque, c'est-à-dire que lorsque les rayons lumineux arrivent au niveau de la dentine, celle-ci les réfléchit.

Ainsi, la couleur de la dent est en majorité déterminée par celle de la dentine(5) puisque celle-ci nous renvoie à l'œil les rayons lumineux qui la rencontrent.

2.2 Mécanismes d'actions

L'éclaircissement dentaire repose sur 2 mécanismes d'actions majoritaires qui sont l'oxydation des chromophores ainsi que l'opacification de l'émail(6).

Nous allons ici expliquer ces deux mécanismes.

2.2.1 Oxydation des chromophores

Un chromophore est une molécule organique colorée que nous retrouvons au sein de la dent et qui est en partie responsable de sa teinte.

Lors de l'éclaircissement dentaire externe, l'oxydation de cette molécule par la molécule de peroxyde d'hydrogène va venir modifier sa structure, ce qui va entraîner une décoloration et une modification de la teinte du tissu dentaire.

Ainsi, le PH modifie la teinte de la dent par altération de la structure moléculaire des chromophores.

2.2.2 Opacification de l'émail

En plus de la modification de la couleur de la dent par l'oxydation des chromophores, la couleur de la dent est aussi modifiée par l'opacification de l'émail.

En effet, Selon l'étude de Ma et al(7), le peroxyde d'hydrogène entraînerait une opacification de l'émail par modification de sa structure et de sa composition.

Ainsi, l'émail deviendrait plus hétérogène, diminuant sa translucidité et augmentant ainsi sa réflexion et sa luminosité.

Cela entraîne ainsi le masquage de la dentine sous-jacente.

Ainsi, les rayons lumineux qui rencontrent la dent éclaircie vont venir se réfléchir sur l'émail, qui est devenu opaque, plus lumineux, et qui masque ainsi la dentine sous-jacente.

Cette étude permet d'affirmer que la nouvelle couleur de la dent éclaircie est en grande partie liée à celle de l'émail qui s'est opacifié.

2.3 Nos connaissances sur le peroxyde d'hydrogène

Aujourd'hui, nous avons beaucoup de connaissances concernant la diffusion du peroxyde d'hydrogène dans les tissus dentaires lors de l'éclaircissement.

Nous savons que le peroxyde d'hydrogène diffuse rapidement dans la dent. Il diffuse à travers l'émail et la dentine, jusqu'à arriver au niveau de la pulpe(8) (9).

Cela est possible car les tissus dentaires sont des tissus perméables comme nous le verrons par la suite. La pénétration est en partie influencée par le temps de contact et par la pression des fluides pulpaire. Plus le temps de contact est long, plus la pénétration du produit est importante(10) (11).

Nous avons aussi observé que lorsque nous plaçons le peroxyde d'hydrogène en linguale, nous pouvons retrouver le produit, après diffusion, en vestibulaire de la dent.

En effet, selon l'étude de Silva et al(12), le fait de réaliser un éclaircissement lingual, c'est-à-dire avec des gouttières dont les réservoirs sont placés en linguale des dents, entraîne un éclaircissement de la face vestibulaire des dents, bien que le résultat soit moins important qu'avec un éclaircissement vestibulaire.

Ce protocole peut par exemple servir à améliorer l'apparence de dents recouvertes de facettes céramiques en éclaircissant la dent sous la facette, et cela en passant par la face linguale(13).

De même, nous avons observé que la molécule diffuse même au niveau des dents adjacentes via les points de contacts de celles-ci.

Aussi, nous avons remarqué que sur une dent possédant une restauration composite, la molécule de peroxyde d'hydrogène contourne la restauration pour venir diffuser derrière celle-ci, et, lorsque la restauration n'est plus très étanche, cela favorise encore plus la diffusion du produit, en particulier au niveau du joint de la restauration.

En effet, des études prouvent l'efficacité de l'éclaircissement dentaire chez des patients en cours de traitement orthodontique, et montrent que le produit d'éclaircissement passe sous les brackets qui sont collés(14) (15) (16).

Ainsi, nous voyons bien que le peroxyde d'hydrogène diffuse dans toutes les directions, à travers les différents tissus dentaires, et même qu'il n'est pas freiné par les restaurations composites.

3 : Structure de l'émail et influence sur la trajectoire du produit d'éclaircissement

Dans cette partie nous allons nous intéresser à la structure précise de l'émail à l'échelle microscopique et nanoscopique, et en quoi celle-ci pourrait offrir passage au peroxyde d'hydrogène.

Nous connaissons bien la structure et l'architecture de l'émail grâce à de nombreuses études. Cependant, de très rares études se sont intéressées à l'architecture des interfaces de l'émail.

Ces interfaces correspondent aux zones de limites entre émail prismatique et interprismatique à l'échelle microscopique, et aux zones de limites entre les cristallites eux-mêmes à l'échelle nanoscopique.

Nous allons ici nous baser en partie sur la récente étude de Koldehoff et al. de 2020.

3.1 Échelle microscopique

Classiquement, la structure de l'émail est décrite comme prismatique.

C'est-à-dire qu'un ensemble de cristallites organisés dans la même direction forment un prisme d'émail, et que ce prisme d'en moyenne 4 à 8 μ m de diamètre traverse toute l'épaisseur de l'émail(17), de la jonction amélo-dentinaire à la surface de la dent.

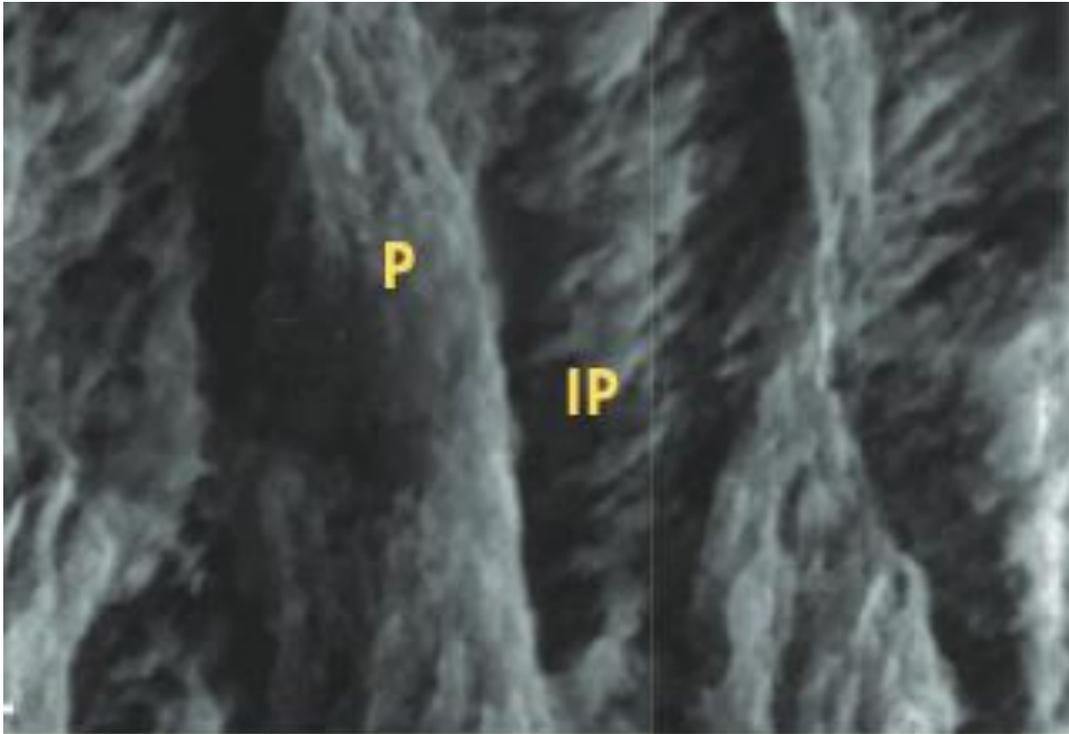
Nous trouvons au niveau de la jonction amélo-dentinaire la couche d'émail aprismatique interne, et à la surface de la dent la couche d'émail aprismatique externe(17).

Nous savons qu'au niveau du 1/3 externe de l'émail, les prismes sont plus ou moins rectilignes, parallèles entre eux et qu'ils sont perpendiculaire à la surface de la dent.

Au niveau des 2/3 internes, les prismes décussent, c'est-à-dire qu'ils se croisent entre eux, ce qui augmente la résistance de l'émail(18).

On trouve entre ces prismes l'émail aprismatique (cf. figure 1), dont la seule différence avec l'émail prismatique est l'orientation des cristallites qui est différente de celle des cristallites intraprismatiques avec un angle de 60°(18).

Figure 1 : Différence d'orientation des cristaux dans l'émail prismatique (P) et interprismatique (IP)

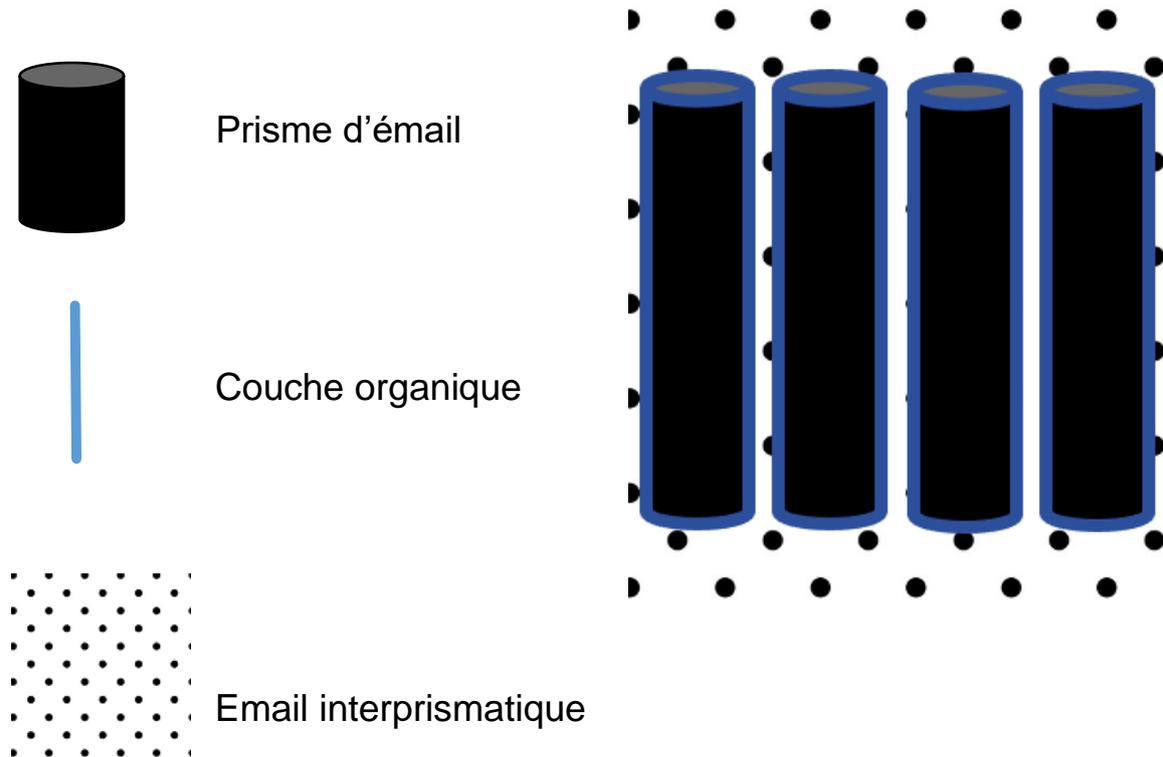


Source : Koldehoff et al., « The geometrical structure of interfaces in dental enamel », 2020.

Puis, selon certains, ces prismes seraient entourés d'une « organic sheath »(19), une couche de protéines et d'eau qui séparerait le prisme de l'émail interprismatique (cf. figure 2).

Cette couche organique formerait une sorte de gaine bien définie autour du prisme amélaire qui définirait précisément sa limite avec l'émail interprismatique, de telle sorte à ce qu'il y ait une réelle limite entre ces deux zones.

Figure 2 : Ancienne vision de l'organisation structurale de l'émail



Source : Auteur, 2023.

Cependant, la présence de cette couche organique est de plus en plus remise en question et certains pensent aujourd'hui qu'après maturation de l'émail, cette couche disparaîtrait pour ne laisser que des restes protéiques(20) (21).

C'est précisément à cette zone d'interface entre prisme et email interprismatique que notre étude s'intéresse.

Nous voyons dans cette étude que, contrairement à ce que certains auteurs pensent, cette interface n'est pas totalement une zone organique dépourvue de minéraux.

Cette étude utilise la technique APT (Atom Probe Tomography), qui permet d'analyser la structure et la composition de l'émail à l'échelle atomique.

Cette technique d'imagerie permet donc une analyse extrêmement précise de la structure de l'émail. Ainsi, elle permet de proposer une nouvelle approche microscopique et nanoscopique.

Avec cette technique, nous voyons que l'interface prisme-interprisme n'est pas clairement délimitée. Nous pouvons aussi observer que la couche organique n'est pas réellement présente, du moins pas comme on ne le pensait.

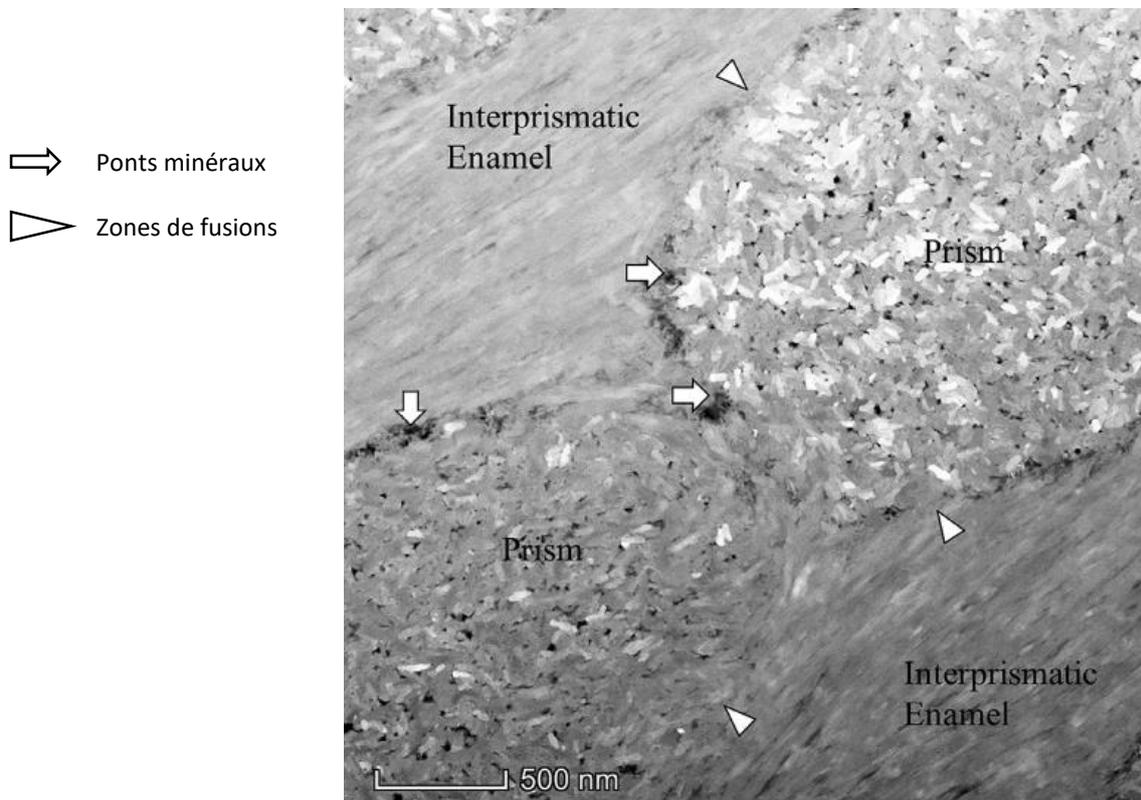
Nous voyons au contraire qu'il y a de nombreux contacts directs entre émail prismatique et interprismatique (cf. figure 3), ce qui nous montre que cette frontière n'est pas totalement et réellement définie.

Ces contacts directs sont de 2 types :

- Il y a soit fusion entre cristallites prismatiques et cristallites interprismatiques.
- Soit les cristallites intra et interprismatiques forment un pont au niveau des zones d'espacements qui sont présentes entre l'émail prismatique et l'émail interprismatique.

C'est ce que nous voyons sur cette coupe microscopique (cf. figure 3).

Figure 3 : Les limites prismatiques



Source : Koldehoff et al., « The geometrical structure of interfaces in dental enamel », 2020.

Nous voyons sur cette coupe de microscopie électronique à transmission ces deux types de contacts. Les **têtes de flèches** montrent les zones de fusions entre cristallites intra et interprismatiques. Les **flèches** nous montrent les ponts que forment les cristallites dans les **zones d'espacements**. La formation discontinue de l'interface prisme-interprisme montrée dans cette étude est en accord avec de précédentes études décrivant aussi la discontinuité de la gaine prismatique(22) (23).

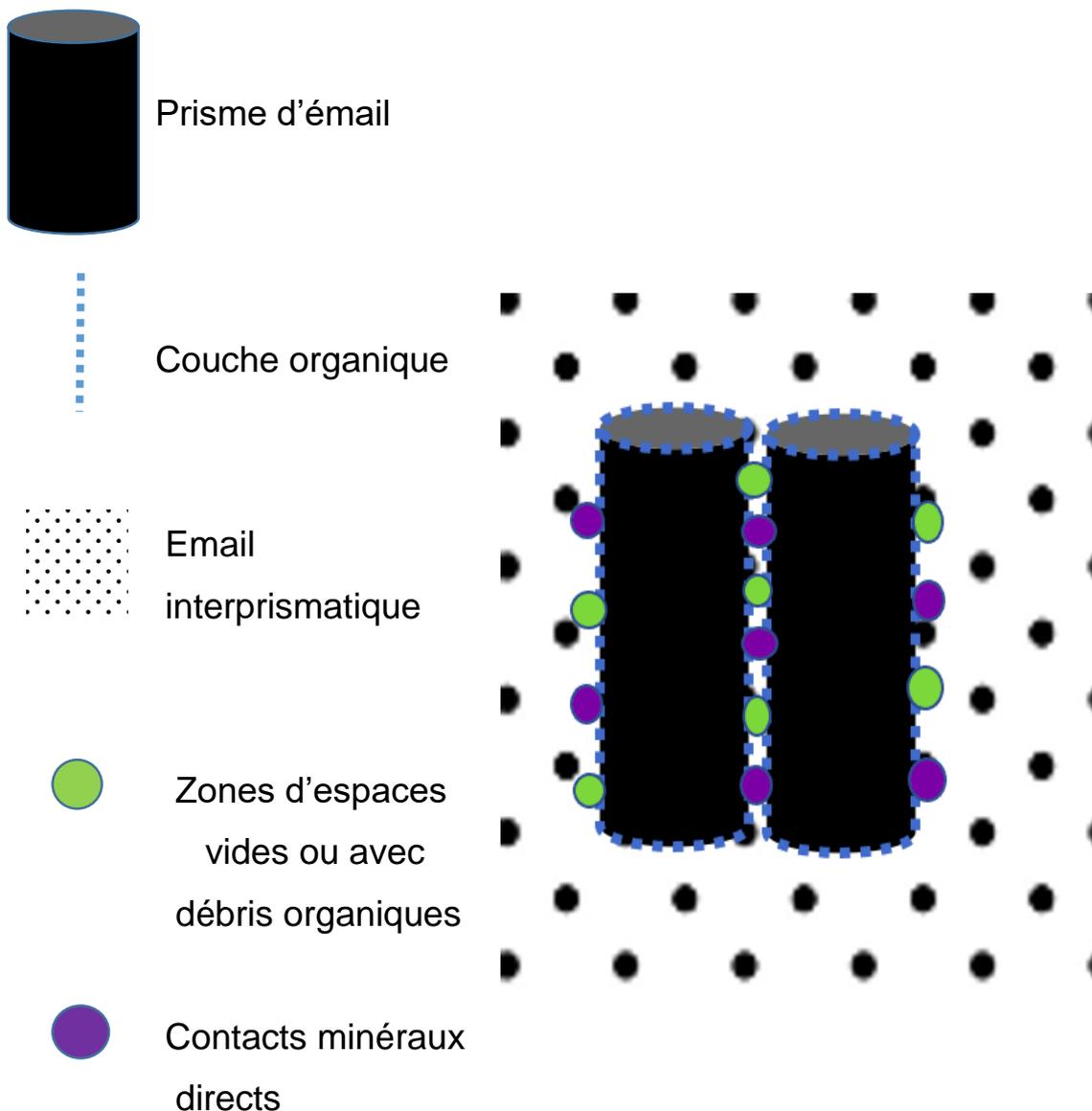
En dehors de ces zones de contacts directs, l'interface présente des **zones de « gaps »**, des espaces, dans lesquels nous ne savons pas encore s'ils contiennent des restes protéiques ou bien s'ils sont vides.

Nous comprenons donc que cette zone d'interface présente finalement une structure poreuse, composée d'une alternance de contacts minéraux directs (prisme-émail interprismatique) et de zones d'espacements (cf. figure 4).

Ces pores représentent **57 +/- 15 %** de la structure de l'interface, ce qui est largement représentatif(24).

Nous pouvons ainsi facilement imaginer que ces zones d'espaces microscopiques pourraient laisser passage au peroxyde d'hydrogène.

Figure 4 : Nouvelle vision de l'organisation structurale de l'émail

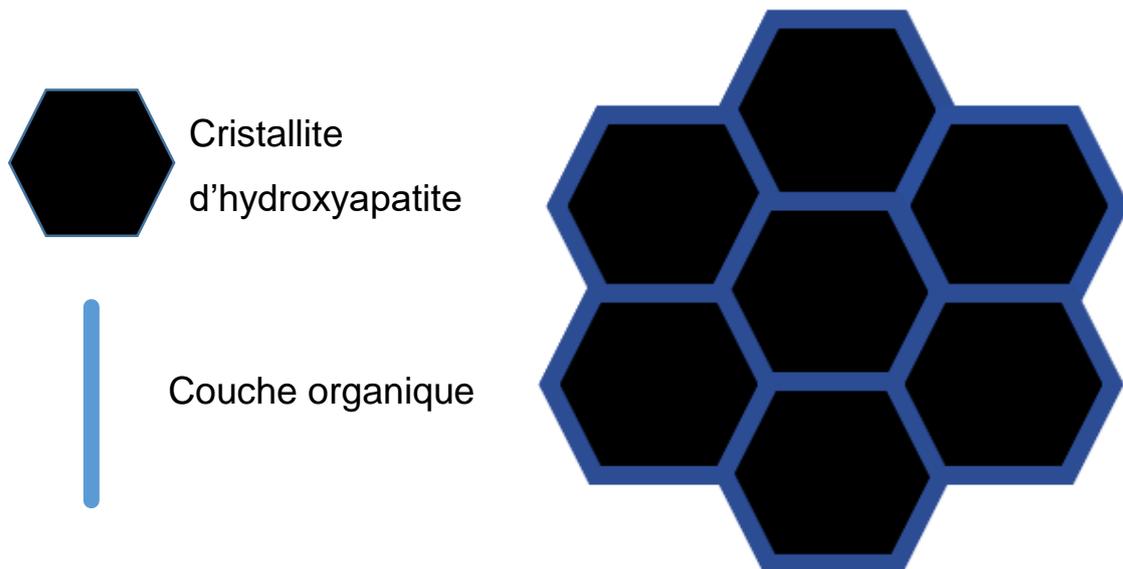


Source : Auteur, 2023.

3.2 Échelle nanoscopique

A l'échelle nanoscopique, la structure intraprismatique est classiquement décrite comme un agglomérat de cristallites associés les uns aux autres via une matrice protéique (cf. figure 5). C'est-à-dire que ces cristallites seraient comme englués les uns avec les autres à l'intérieur d'une matrice organique.

Figure 5 : Ancienne vision de l'organisation structurale des cristallites



Source : Auteur, 2023.

Pourtant, notre étude utilisant la technique APT (Atom Probe Tomography) ne montre pas clairement de matrice organique entourant les cristallites d'HAP.

À la place des protéines, une forte concentration de Magnésium a été trouvée à l'interface des cristallites.

Cela remet encore une fois en question la vision initiale de la structure de l'émail.

Des noyaux organiques ont uniquement été trouvés à la séparation entre 3 cristallites.

D'un point de vue structural, la microscopie électronique à transmission permet d'étudier la structure des cristallites intraprismatiques.

Nous pouvons observer que les cristallites sont souvent en contacts directs les uns avec les autres(25) (26), mais que certaines fois, nous trouvons des **espaces entre les cristallites** (cf. figure 6).

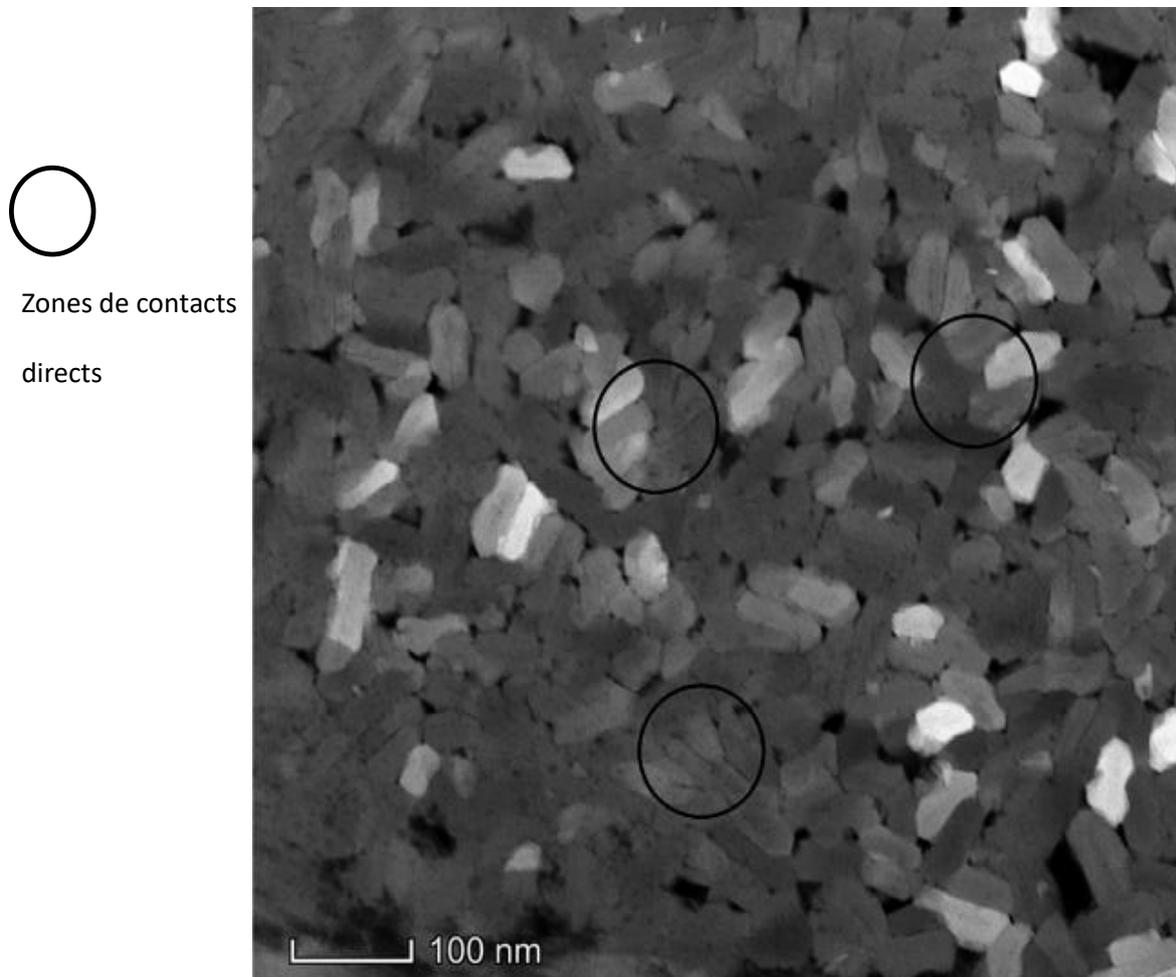
Nous ne savons pas encore si ces espaces sont vides ou s'ils présentent des protéines, mais ces espaces constituent une porosité nanoscopique intraprismatique, et cette porosité représente **2,5%** de la structure du prisme(24).

Nous observons aussi que ces espaces peuvent faire jusqu'à 20 nanomètres de diamètre(27).

Ainsi, ces nouvelles observations nous permettent de proposer une approche différente concernant la structure nanoscopique de l'émail.

C'est ce que nous allons voir avec les coupes microscopiques et les schémas suivants.

Figure 6 : Cristallites intraprismatiques

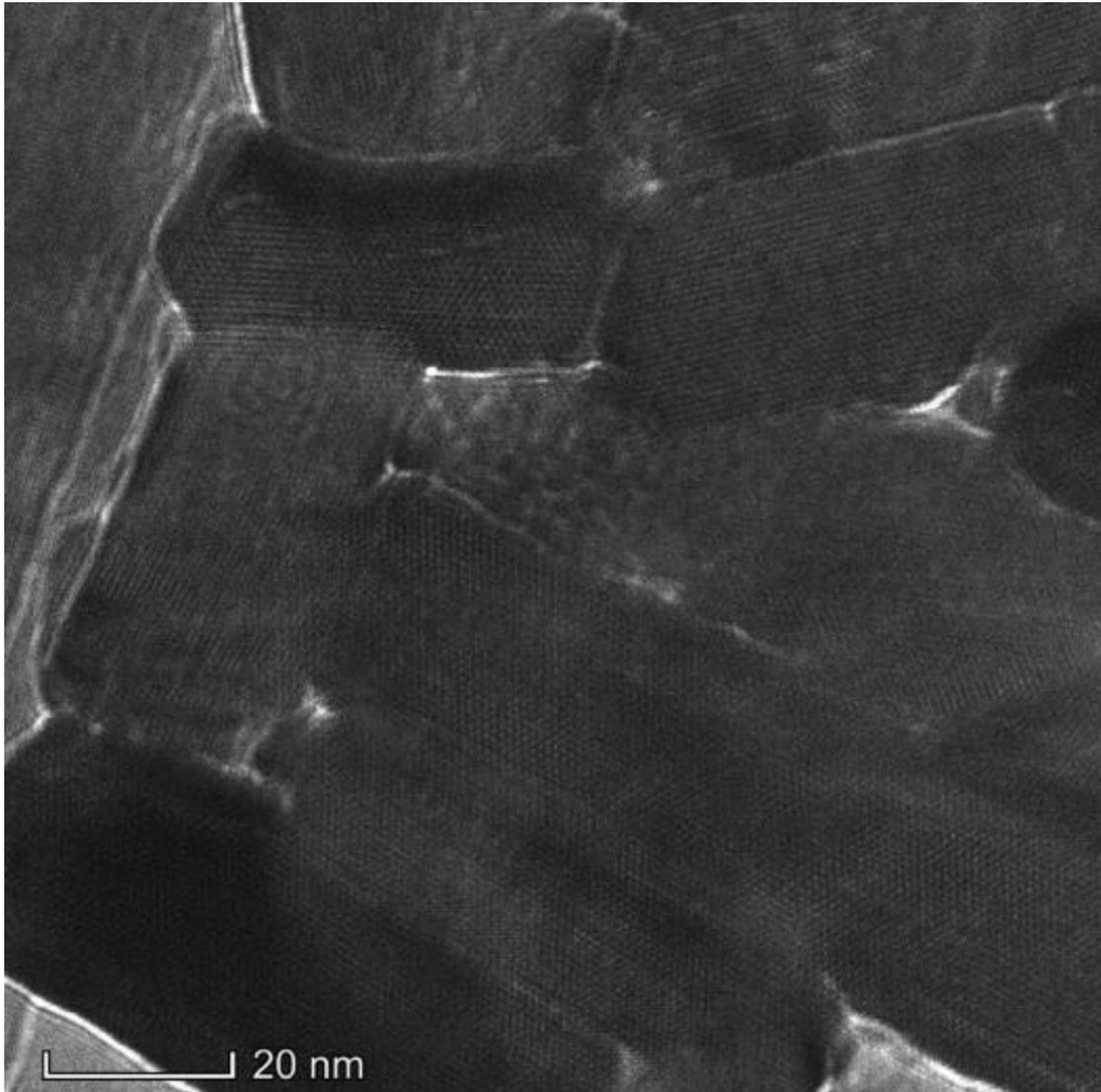


Source : Koldehoff et al., « The geometrical structure of interfaces in dental enamel », 2020.

Sur cette coupe (cf. Figure 6), nous voyons au niveau des **cercles** les **zones de contacts directs** entre les cristallites, qui sont imbriqués les uns avec les autres.

Nous observons aussi les espaces entre les cristallites représentés par les **zones noires**.

Figure 7 : Imbrication des cristallites intraprismatiques

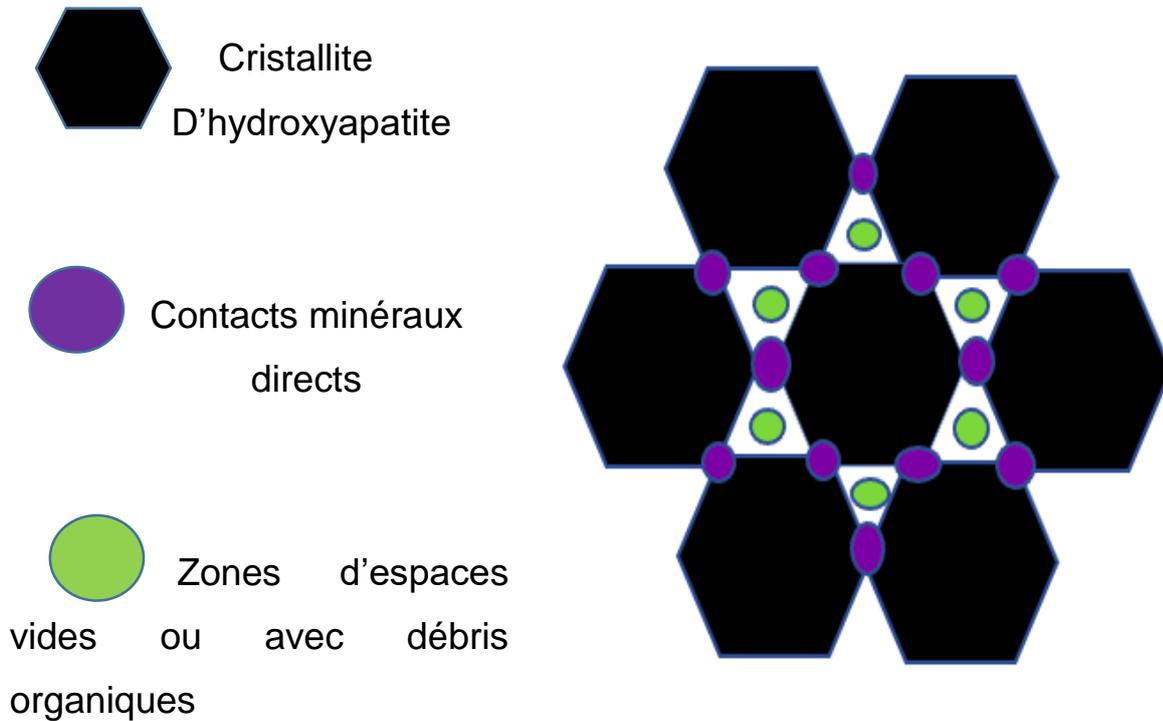


Source : Koldehoff et al., « The geometrical structure of interfaces in dental enamel », 2020.

Sur cette coupe (cf. figure 7), nous voyons que les cristallites intraprismatiques sont en contacts rapprochés les uns avec les autres et s'assemblent à la manière des pièces d'un puzzle.

Les **lignes blanches** autour des cristaux nous montrent **leurs limites**.

Figure 8 : Nouvelle vision de l'organisation structurale des cristallites



Source : Auteur, 2023.

Ainsi, à l'échelle nanoscopique, et de la même manière qu'à l'échelle microscopique, la structure intraprismatique de l'émail présente comme nous l'avons vu des zones de contacts minéraux directs, entre les cristallites eux-mêmes, en alternance avec des zones d'espaces vides ou avec débris protéiques (cf. figure 8).

En conclusion, nous voyons ici que l'émail possède une micro et une nanostructure de nature relativement poreuse.

Nous avons vu qu'à l'échelle microscopique ces espaces se situent au niveau des interfaces prismatiques et qu'à l'échelle nanoscopique ces espaces se situent entre les cristallites eux-mêmes.

Nous voyons qu'à l'échelle prismatique ces espaces font aux alentours des 100nm(28) et qu'au niveau des cristallites ces espaces peuvent faire jusqu'à 20nm(24).

Cependant, nous savons que le diamètre de la molécule de peroxyde d'hydrogène (H₂O₂) présente dans les produits d'éclaircissement dentaire est inférieur à 10nm.

Nous pouvons ainsi émettre l'hypothèse que les espaces décrits précédemment peuvent offrir un passage à cette molécule lors de l'éclaircissement dentaire externe.

4 : Composition de l'émail et influence sur la trajectoire du produit d'éclaircissement

Dans cette partie nous allons décrire la composition de l'émail et expliquer de quelle manière ses différents composants influent sur la trajectoire du peroxyde d'hydrogène.

Pour cela, nous nous pencherons sur les phases minérales, protéiques et aqueuses de l'émail.

L'émail mature est composé en poids de 97% de minéraux et de 3% de phase aqueuse, la quasi-totalité des protéines étant éliminée par les enzymes durant la maturation(29), cependant l'absence totale de protéines dans l'émail mature reste à prouver.

4.1 Phase minérale

La phase minérale de l'émail représente sa très grande majorité. En effet, les minéraux représentent 97% du poids de l'émail.

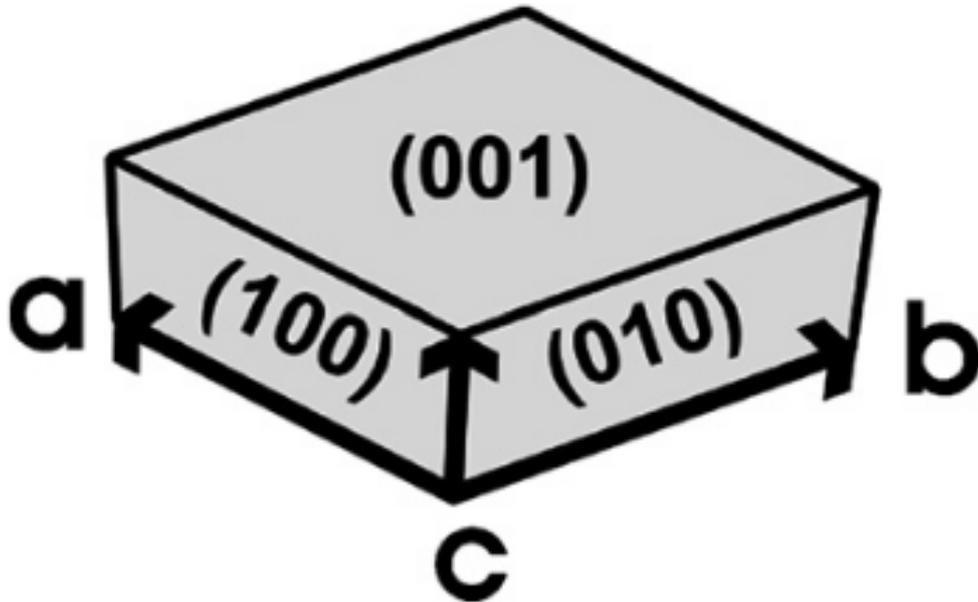
L'unité minérale élémentaire de l'émail est le cristal d'hydroxyapatite de formule chimique $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$, composé entre autres de calcium et de phosphate.

Le cristal fait en moyenne 100nm de longueur et entre 30 et 70nm de largeur(30) (31).

Ces cristaux s'agencent dans la même direction, selon leur axe C (cf. figure 9) pour former l'émail prismatique et ainsi le prisme amélaire(32).

Le prisme amélaire parcourt toute l'épaisseur de l'émail, de la jonction amélo-dentinaire à la surface de la dent, et son axe est globalement perpendiculaire à la dentine sous-jacente.

Figure 9 : Représentation schématique orthonormée indexée avec les axes a, b et c



Source : Raue et al., « New insights in prism orientation within human enamel », 2012.

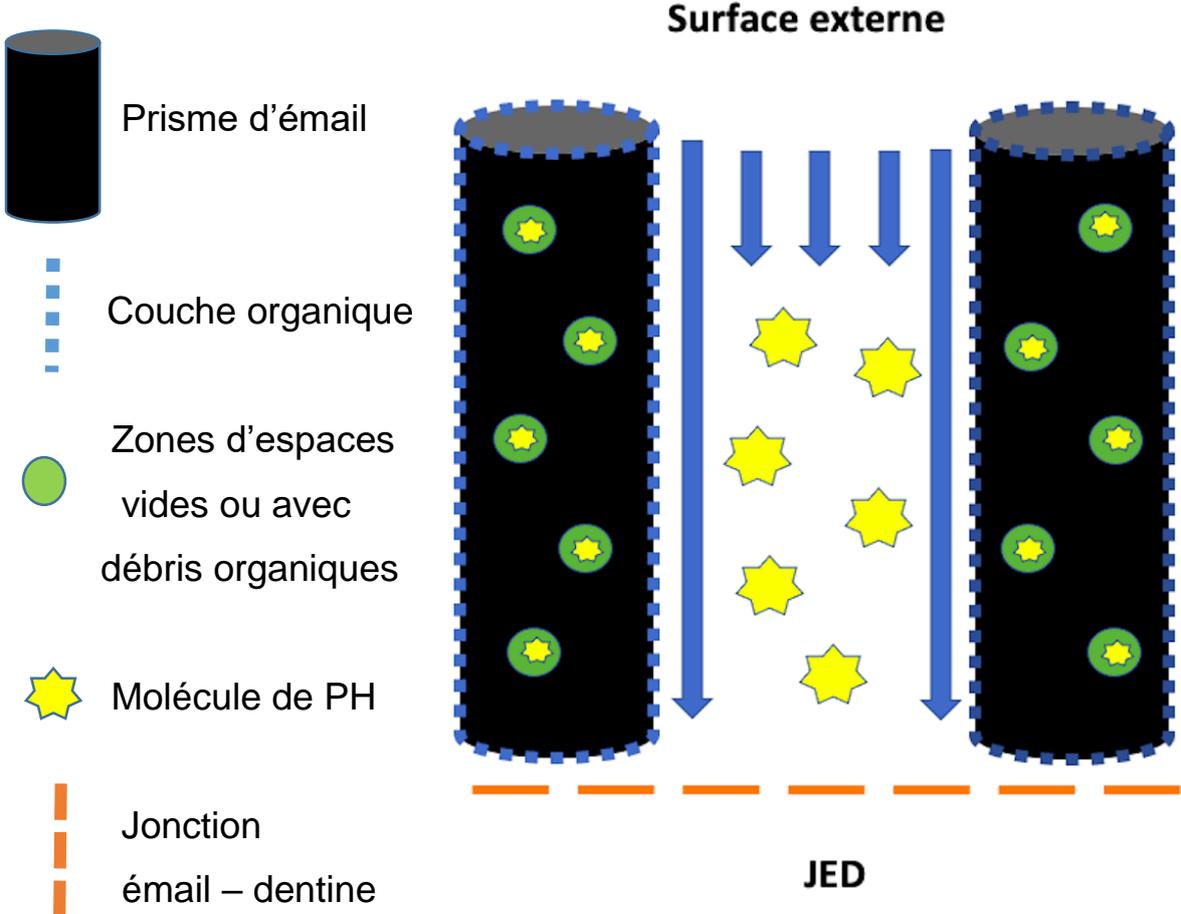
Ces cristaux empilés les uns sur les autres forment un matériau minéral, à priori imperméable et qui donc ne laisserait pas diffuser le peroxyde d'hydrogène (dont la formule est H_2O_2), mais qui sans le freiner non plus, le guiderait le long des prismes amélaire jusqu'à la jonction amélo-dentinaire.

Cependant, comme vu précédemment, l'étanchéité formée par les minéraux n'est pas totale car nous avons vu que la structure minérale de l'émail possède une certaine porosité que ce soit à l'échelle prismatique ou intraprismatique(24) et que ces espaces offriraient ainsi une certaine voie de diffusion pour le passage du peroxyde d'hydrogène(33).

Ainsi la phase minérale de l'émail qui représente la très grande majorité de sa composition est donc un matériau dense et qui ne laisserait à priori pas le peroxyde d'hydrogène diffuser directement à travers sa masse mais qui agit plutôt comme un guide pour la molécule (cf. figure 10), qui va de cette manière passer entre les prismes pour en quelque sorte les longer sur toute l'épaisseur de l'émail.

Cependant, comme vu précédemment, la phase minérale est aussi relativement poreuse ce qui offre finalement un deuxième moyen de passage à la molécule de peroxyde d'hydrogène.

Figure 10 : Couloir minéral et diffusion du peroxyde d'hydrogène



Source : Auteur, 2023.

4.2 Phase organique

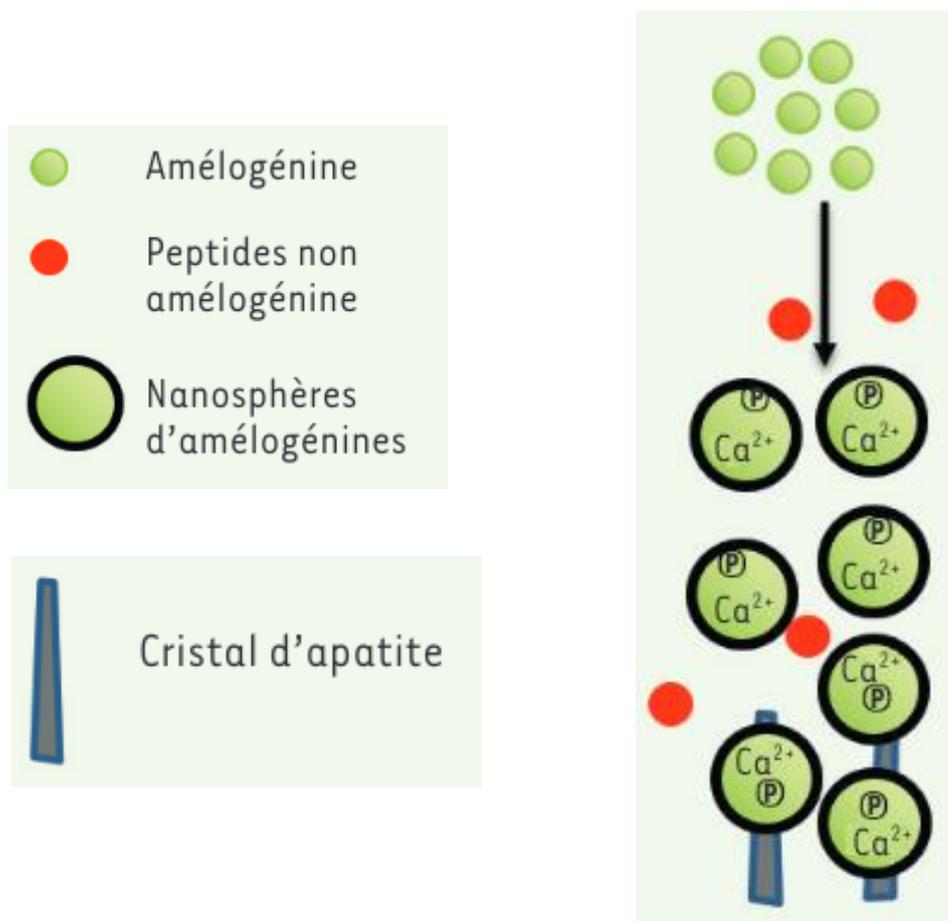
L'émail comporte 3 protéines majoritaires, qui sont en grande partie détruites par les enzymes lors de la maturation amélaire.

Ces protéines sont l'amélogénine, l'améloblastine et l'énameline.

L'amélogénine est la protéine majoritaire représentant 90% des protéines de l'émail, l'améloblastine 5% puis l'énameline entre 1 et 5%(34).

Lors de la formation de l'émail, les peptides amélaire déclenchent la nucléation des cristaux d'hydroxyapatites (cf. figure11), et se placent autour de ces derniers durant leur formation afin de permettre leur allongement mais aussi afin de les séparer les uns des autres(35).

Figure 11 : Nucléation des cristaux déclenchée par les protéines amélaire

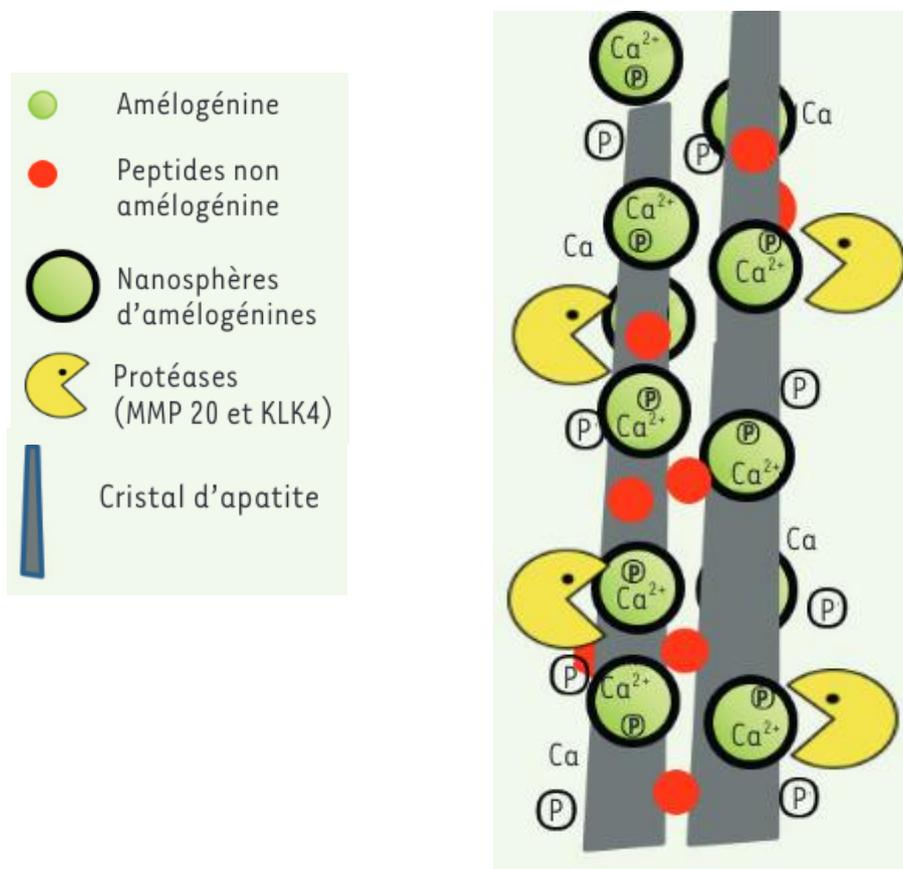


Source : Lignon et al., L'émail, « un autoassemblage unique dans le monde du minéral », 2015.

Puis, lors de la maturation, les enzymes MMP20 et KLK4 vont venir dégrader ces protéines de manière quasi-totale afin de permettre la croissance complète des cristaux (cf. figure12), c'est la dégradation enzymatique(34).

Ainsi, après maturation de l'émail, les protéines qui se trouvaient entre les prismes ainsi qu'entre les cristallites laissent donc des zones partiellement libres et non minéralisées.

Figure 12 : Croissance des cristaux via la dégradation enzymatique



Source : Lignon et al., « L'émail un autoassemblage unique dans le monde du minéral », 2015.

Ces espaces non minéralisés, que ce soit à l'échelle du prisme ou bien à l'échelle du cristallite, participent en grande partie à la perméabilité et à la diffusibilité de l'émail(33).

En effet ces espaces étant composés de vestiges protéiques et d'eau(36), créent donc une certaine perméabilité de l'émail à travers sa trame minérale, ce qui est en accord avec nos observations rapportées précédemment.

Ainsi, les espaces entre les cristaux remplis de vestiges organiques et d'eau créent **15% en volume d'espaces diffusibles**, qui permettent le passage de petites molécules, et notamment le peroxyde d'hydrogène(37) (38).

De plus, dans le cas du peroxyde de carbamide utilisé pour l'éclaircissement dentaire, celui-ci se décompose en urée et en peroxyde d'hydrogène.

L'urée étant un déprotéinisant, la molécule va venir dégrader les restes protéiques présents dans l'émail, ce qui va créer de l'espace supplémentaire au peroxyde d'hydrogène et ainsi favoriser encore plus sa diffusion(39).

Nous voyons donc ici que les protéines de l'émail favorisent indirectement la pénétration du peroxyde d'hydrogène à travers l'émail en laissant des espaces de diffusions disponibles entre les minéraux.

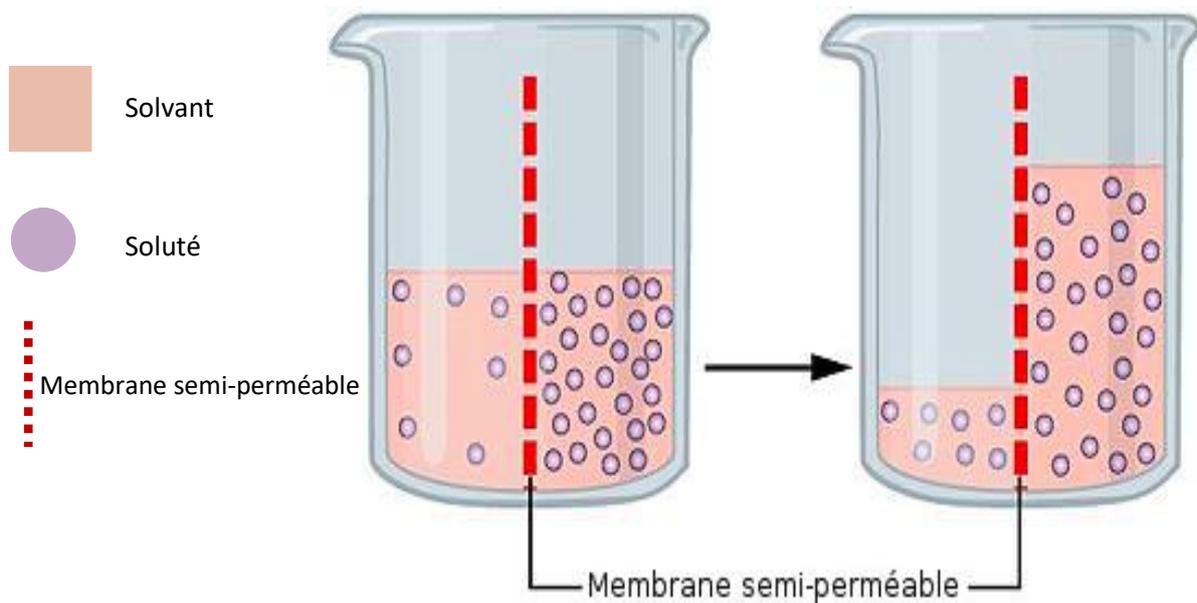
4.3 Phase aqueuse

La présence d'espaces inter-cristallins créés par la matrice organique et l'eau apparente l'émail à une membrane semi-perméable(18) (cf. figure 13).

En effet, nous savons (cf. figure 13) qu'une membrane semi-perméable sépare deux solutions de concentrations différentes, et que par pression osmotique, le solvant de la solution hypotonique traverse la membrane semi-perméable pour venir dissoudre la solution hypertonique, et cela afin d'obtenir deux solutions isotoniques.

De la même manière, l'eau contenue dans les pores non minéralisés de l'émail représente une phase de diffusion pour les molécules(33), entre le milieu buccal et le complexe dentino-pulpaire.

Figure 13 : Pression osmotique et membrane semi-perméable



Source : OpenStax, *Biology 2^e*, 2018.

La phase aqueuse de l'émail représente 3,4% du poids et 11% du volume de l'émail(40).

Cependant, la phase aqueuse de l'émail est en grande partie responsable de la propriété de perméabilité de l'émail(41).

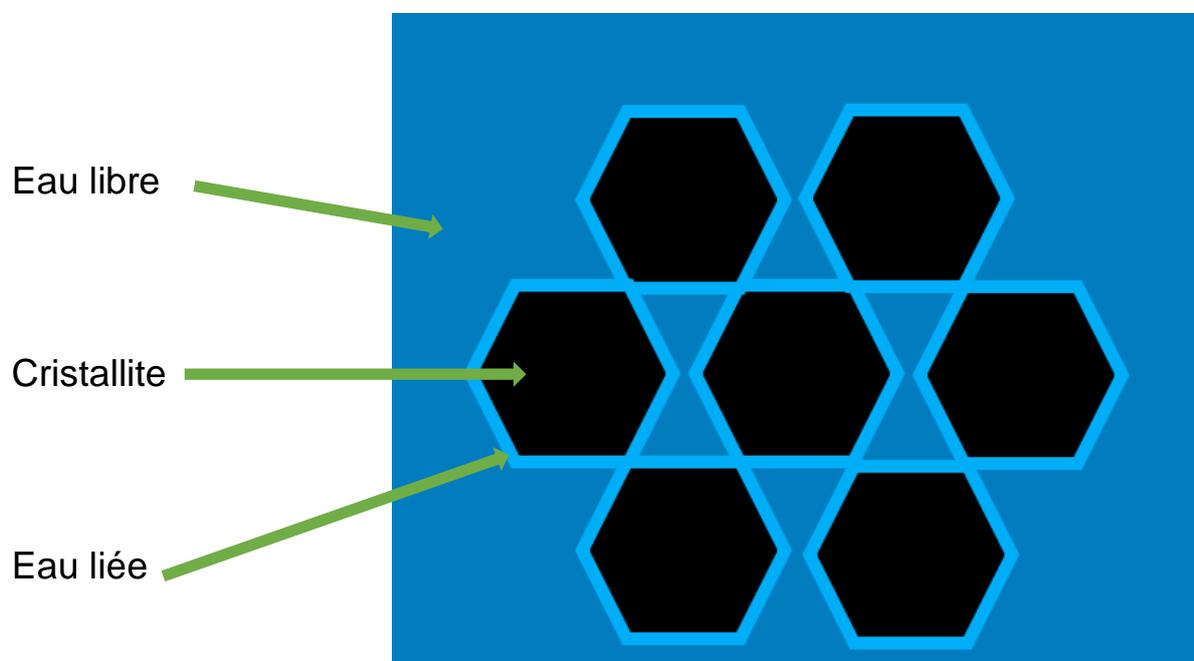
Les rôles de l'eau dans l'émail sont variés. L'eau permet notamment donc sa perméabilité mais aussi son élasticité et permet l'échange d'ions avec le milieu extérieur(18).

L'eau est présente dans l'émail sous deux états physiques différents qui sont liés et libres(33) (cf. figure 14).

L'eau faiblement liée ou libre représente 1% en poids et un peu plus de 3% en volume et est surtout présente au niveau des espaces inter-cristallins. Cette eau faiblement liée est donc liée de manière non covalente à la phase organique. Elle forme ainsi une zone hydratée autour du cristal qui permet des échanges avec le milieu buccal.

L'eau de réseau ou eau liée à la phase minérale, et tout particulièrement à la structure du cristal d'hydroxyapatite, représente 2,4% en poids soit environ 8% en volume(42).

Figure 14 : Eau libre et eau liée dans l'émail



Source : Auteur, 2023.

Ainsi, nous voyons que l'émail se comporte comme une membrane semi perméable permettant le passage d'eau et de molécules de petites tailles moléculaires à travers les pores, entre les cristaux.

Il a été montré que lors de la maturation de l'émail, les protéines de l'émail sont en grande partie dégradées pour être remplacées par l'eau en grande majorité et ainsi créer une phase organique constituée de débris protéiques et d'eau(37) (38).

Ainsi la porosité et la perméabilité de l'émail permises par la présence d'eau expliquent la traversée des molécules de peroxyde de carbamide ou de peroxyde d'hydrogène lors de l'éclaircissement dentaire.

Conclusion

En conclusion, nous pouvons émettre une hypothèse sur le trajet précis du peroxyde d'hydrogène à travers l'émail lors de l'éclaircissement dentaire externe.

Nous avons vu que la structure de l'émail possède une certaine porosité et qu'ainsi des zones de vides sont potentiellement présentes.

Les molécules de peroxyde d'hydrogène pénètrent ainsi en premier temps l'émail via ces zones de vides à l'échelle microscopique entre les prismes, puis dans un second temps à l'échelle nanoscopique entre les cristallites eux-mêmes.

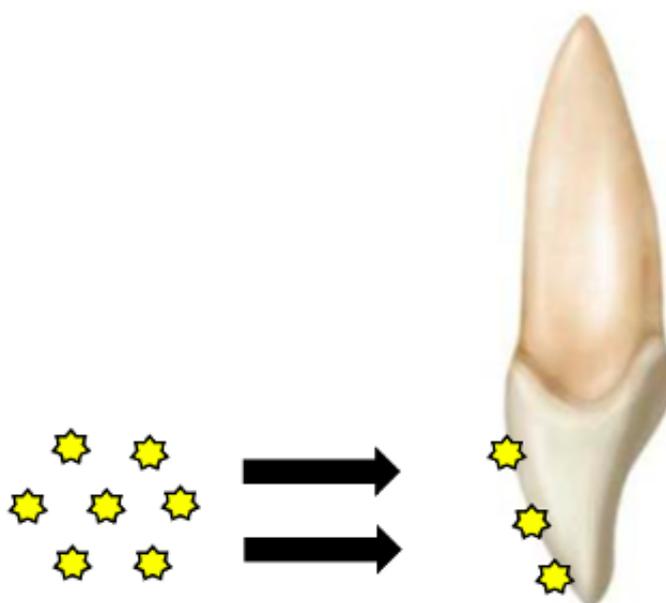
Ces zones de vides étant créées lors de la maturation de l'émail par la dégradation des protéines qui laissent ensuite leur place à l'eau en grande majorité.

En conséquence de cela, l'émail se comporte ensuite à la manière d'une membrane semi-perméable qui laisse passer les molécules de petites tailles comme les molécules de peroxyde d'hydrogène.

- 1) Dans un premier temps, les molécules de peroxyde d'hydrogène arrivent à la surface de l'émail (cf. figure 15).

Figure 15 : Contact du PH et de l'émail

★ Molécule de PH

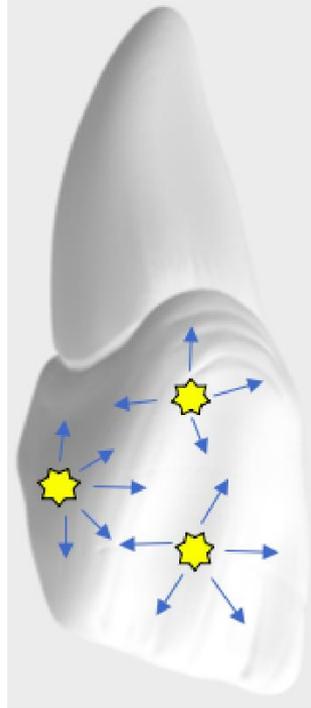


Source : Auteur d'après Studio Dentaire, « Anatomie dentaire », 2023.

- 2) Puis, les molécules de peroxyde d'hydrogène se dirigent dans toutes les directions à la surface de l'émail (cf. figure16).

Figure 16 : Dispersion du PH à la surface de l'émail

★ Molécule de PH

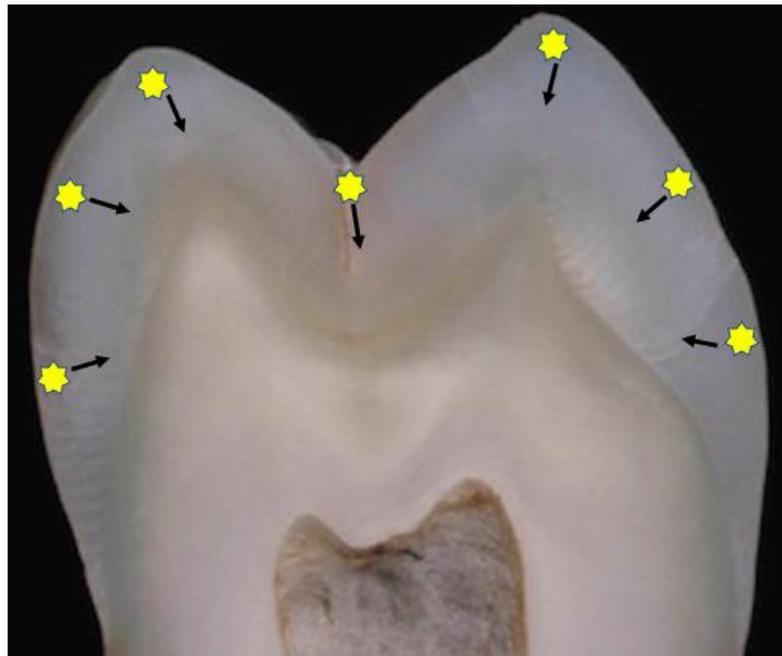


Source : Auteur d'après Cults3D, 2023.

- 3) Ensuite, les molécules pénètrent l'émail dans son épaisseur (cf. figure 17).

Figure 17 : Pénétration du PH dans l'épaisseur de l'émail

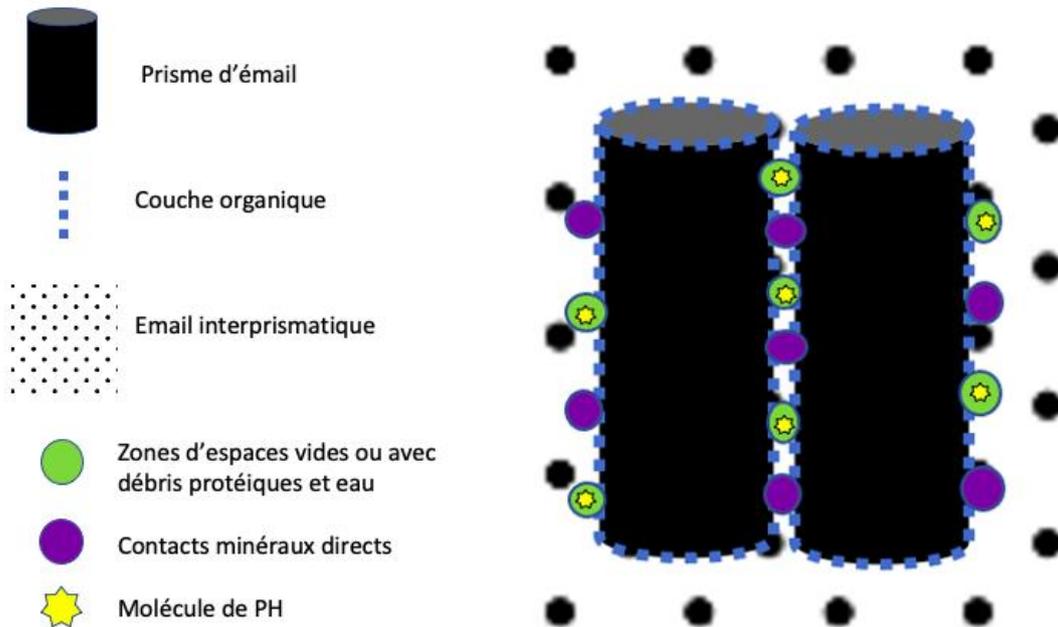
★ Molécule de PH



Source : Auteur d'après The dentist, « Précieux émail », 2023.

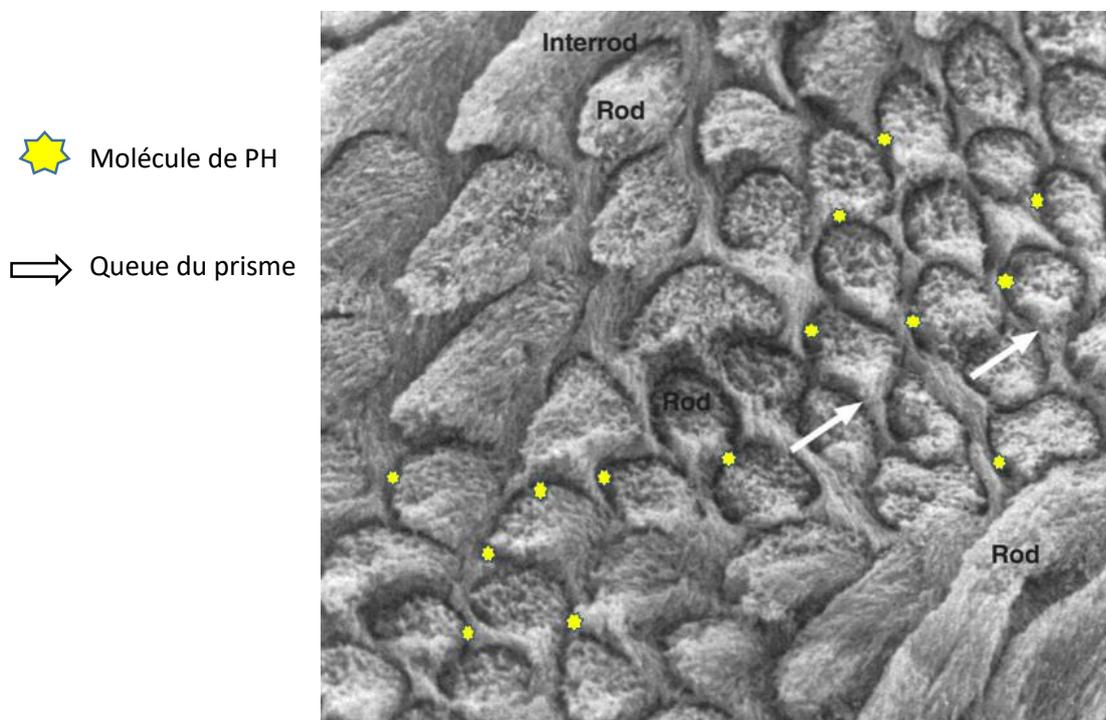
- 4) Puis, le peroxyde d'hydrogène pénètre à l'échelle microscopique au niveau des espaces et des zones de vides interprismatiques (cf. figures 18 ; 19).

Figure 18 : Pénétration du PH au niveau des espaces de vides interprismatiques



Source : Auteur, 2023.

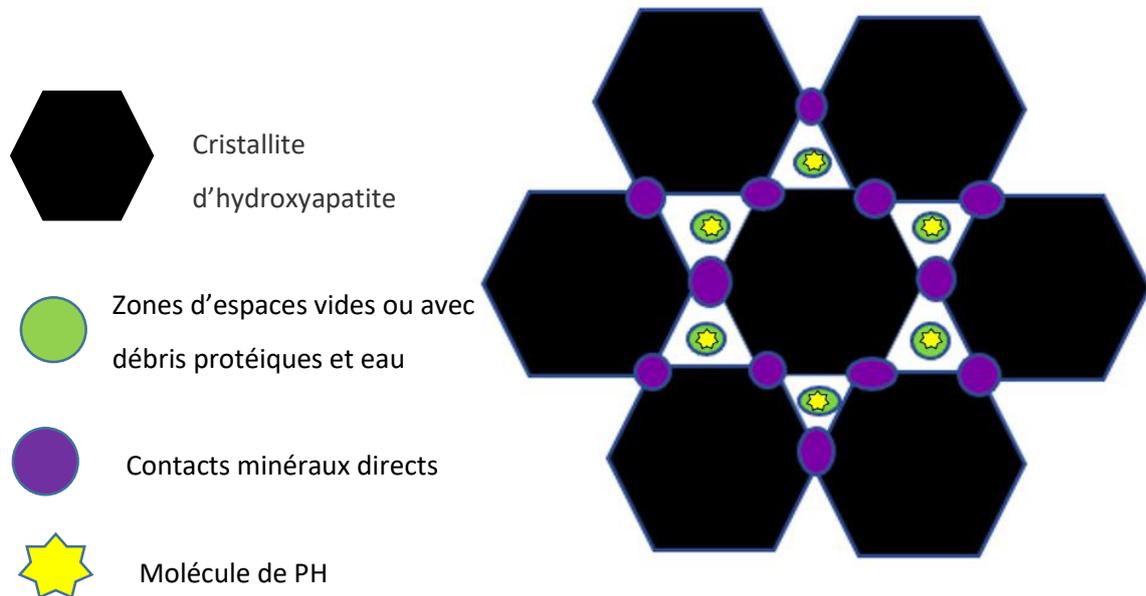
Figure 19 : Coupe microscopique et schématisation du PH dans les espaces interprismatiques



Source : Auteur d'après Warshawsky, *The teeth. In: Cell and tissue biology: a textbook of histology, 6th ed., 1988.*

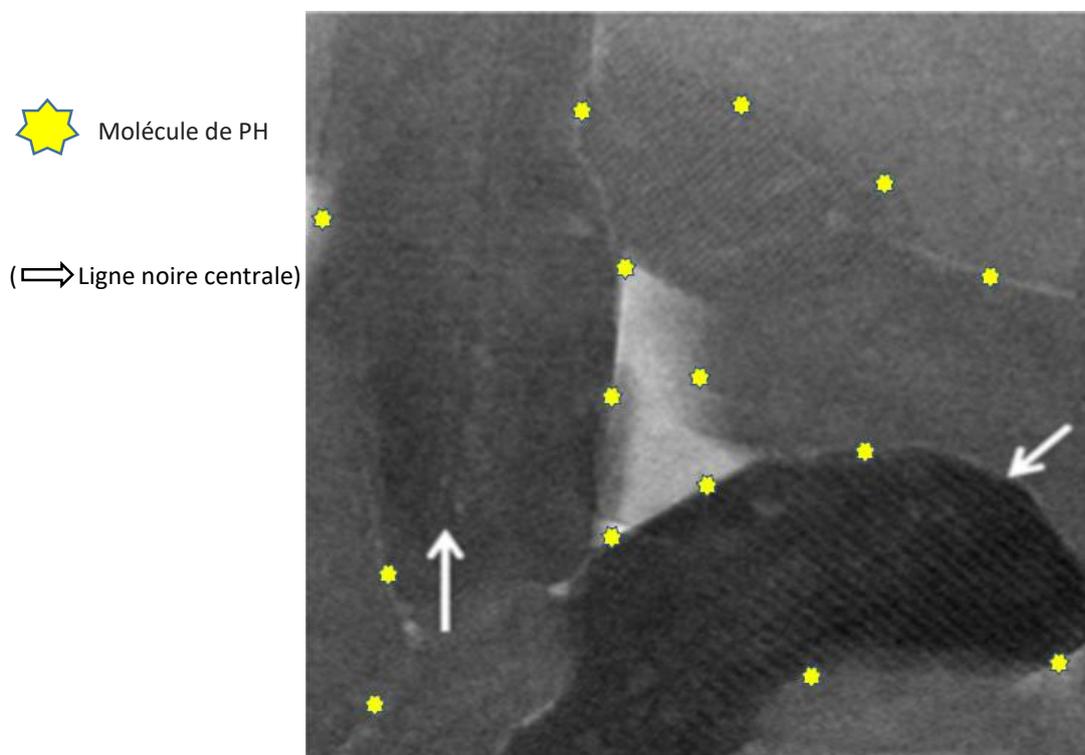
5) Enfin, à l'échelle nanoscopique, les molécules pénètrent au niveau des espaces de vides intraprismatiques, entre les cristallites eux-mêmes (cf. figures 20 ; 21).

Figure 20 : Pénétration du PH au niveau des espaces de vides intraprismatiques



Source : Auteur, 2023.

Figure 21 : Coupe nanoscopique et schématisation du PH dans les espaces intraprismatiques



Source : Auteur d'après Reyes-Gasga et Brès, « High resolution STEM images of the human tooth enamel crystals », 2021.

Bibliographie

1. Simon J, Tirlet G, et Attal JP. Evaluation de la demande esthétique. *Inf. Dent.* 2008;90(31):1677-1682.
2. Tirlet J, Attal JP. Le gradient thérapeutique : un concept médical pour les traitements esthétiques. *Inf. Dent.* 2009;91(41/42):2561-68
3. Haywood VB, Heymann HO. Nightguard vital bleaching. *Quintessence Int.* 1989;20(3):173-176.
4. Joiner A. Tooth colour: a review of the literature. *J. Dent.* 2004;32(1):3–12.
5. ten Bosch JJ, Coops JC. Tooth color and reflectance as related to light scattering and enamel hardness. *J. Dent. Res.* 1995;74(1):374–380.
6. Kwon SR, Wertz PW. Review of the mechanism of tooth whitening. *J. Esthet. Restor. Dent.* 2015;27(5):240–257.
7. Ma X, Li R, Sa Y, Liang S, Sun L, Jiang T, Wang Y. Separate contribution of enamel and dentine to overall tooth colour change in tooth bleaching. *J. Dent.* 2011;39(11):739–745.
8. Ubaldini AL, Baesso ML, Medina Neto A, Sato F, Bento AC, Pascotto RC. Hydrogen peroxide diffusion dynamics in dental tissues. *J. Dent. Res.* 2013;92(7):661–665.
9. Kwon SR, Wertz PW, Li Y, Chan DC. Penetration pattern of rhodamine dyes into enamel and dentin: confocal laser microscopy observation. *Int. J. Cosmet. Sci.* 2012;34(1):97–101.
10. Elfallah HM, Swain MV. A review of the effect of vital teeth bleaching on the mechanical properties of tooth enamel. *N. Z. Dent. J.* 2013;109(3):87–96.
11. Haywood VB. Frequently asked questions about bleaching. *Compend. Contin. Educ. Dent.* 2003;24(4A):324–338.
12. Silva LM, da Costa Lacerda ÁA, dos Santos DB, Herkrath FJ, da Silva KL, Loguercio AD, de Moura Martins L. Is the at-home bleaching treatment applied only on the lingual surface as effective as that on the buccal surface ? A randomized clinical trial. *Clin Oral Investig.* 2022;26(2):1551-60.
13. Haywood VB, Parker MH. Nightguard vital bleaching beneath existing porcelain veneers : a case report. *Quintessence Int.* 1999;30(11):743–747.
14. Jadad E, Montoya J, Arana G, Gordillo LA, Palo RM, Loguercio AD. Spectrophotometric evaluation of color alterations with a new dental bleaching product in patients wearing orthodontic appliances. *Am. J. Orthod. Dentofacial Orthop.* 2011;140(1):e43–e47.
15. Sundfeld RH, Machado LS, de Oliveira FG, Santos EA, Lugato IC, Sundfeld Neto D. Conservative reconstruction of the smile by orthodontic, bleaching, and restorative procedures. *Eur. J. Dent.* 2012;6(1):105–109.

16. Montenegro Arana A, Arana Gordillo LA, Farana D, Davila Sanchez A, Jadad E, Coelho U, Gomes O, Loguercio AD. Randomized double-blind clinical trial of bleaching products in patients wearing orthodontic devices. *Oper. Dent.* 2016;41(4):379–387.
17. Scott DB. The electron microscopy of enamel and dentin. *Ann. N. Y. Acad. Sci.* 1955;60(5):575–584.
18. Nanci A, Ten Cate AR. *Ten cate's oral histology : development structure and function* (6th ed.). St Louis: Mosby. 2003: XI-445 p..
19. Travis DF, Glimcher MJ. The structure and organization of, and the relationship between the organic matrix and the inorganic crystals of embryonic bovine enamel. *J. cell Biol.* 1964;23(3):447–497.
20. Frank RM, Sognaes RF. Electron microscopy of matrix formation and calcification in rat enamel. *Arch. oral Biol.* 1960; 1(4): 339-342
21. Warshawsky H. A light and electron microscopic study of the nearly mature enamel of rat incisors. *Anat. Rec.* 1971;169(3):559–583.
22. Xie Z, Kilpatrick NM, Swain MV, Munroe PR, Hoffman M. Transmission electron microscope characterisation of molar-incisor-hypomineralisation. *J. Mater. Sci.* 2008;19(10):3187–3192.
23. Dusevich V, Xu C, Wang Y, Walker MP, Gorski JP. Identification of a protein-containing enamel matrix layer which bridges with the dentine-enamel junction of adult human teeth. *Arch. oral Biol.* 2012;57(12):1585–1594.
24. Koldehoff J, Swain MV, Schneider GA. The geometrical structure of interfaces in dental enamel: A FIB-STEM investigation. *Acta Biomater.* 2020;104:17-27.
25. Selvig KA, Halse A. Crystal growth in rat incisor enamel. *Anat. Rec.* 1972;173(4):453–468.
26. Yanagisawa T, Miake Y. High-resolution electron microscopy of enamel-crystal demineralization and remineralization in carious lesions. *J. electron Microsc.* 2003;52(6):605–613.
27. Fincham AG, Moradian Oldak J, Diekwisch TG, Lyaruu DM, Wright JT, Bringas P Jr, Slavkin HC. Evidence for amelogenin « nanospheres » as functional components of secretory-stage enamel matrix. *J. Struc. Biol.* 1995;115(1):50–59.
28. van Casteren A, Crofts SB. *The materials of mastication : material science of the humble tooth.* *Integr Comp Biol.* 2019;ic2129.
29. Pugach MK, Gibson CW. Analysis of enamel development using murine model systems : approaches and limitations. *Front Physiol.* 2014;5:313.
30. Lucas PW, van Casteren A. The wear and tear of teeth. *Med Princ Pract.* 2015;24(1):3-13.
31. Yahyazadehfar M, Ivancik J, Majd H, An B, Zhang D, Arola D. On the mechanics of fatigue and fracture in teeth. *Appl Mech Rev.* 2014;66(3).
32. Poole DF, Brooks AW. The arrangement of crystallites in enamel prisms. *Arch Oral Biol.* 1961;5:14-26.

33. Houari S. L'email dentaire est-il poreux et hydraté ? *Biomatér. Clin.* 2023;8(1):30-33
34. Hu JC, Yamakoshi Y, Yamakoshi F, Krebsbach PH, Simmer JP. Proteomics and genetics of dental enamel. *Cells. Tissues Organs.* 2005;181(3-4):219–231.
35. Du C, Falini G, Fermani S, Abbott C, Moradian Oldak J. Supramolecular assembly of amelogenin nanospheres into birefringent microribbons. *Sci.* 2005;307(5714):1450–1454.
36. West NX, Joiner A. Enamel mineral loss. *J. Dent.* 2014;42:S2-11.
37. Featherstone JD. Prevention and reversal of dental caries : role of low level fluoride. *Community Dent. Oral Epidemiol.* 1999;27(1):31–40.
38. Joiner A, Thakker G. In vitro evaluation of a novel 6% hydrogen peroxide tooth whitening product. *J. Dent.* 2004;32(1):19–25.
39. Goldberg M, Arends J, Jongebloed WL, Schuthof J, Septier D. Action of urea solutions on human enamel surfaces. *Caries Res.* 1983;17(2):106–112.
40. Bonte E, Deschamps N, Goldberg M., Vernois V. Quantification of free water in human dental enamel. *J. Dent. Res.* 1988;67(5):880–882.
41. LeGeros RZ, Bonel G, Legros R. Types of « H₂O » in human enamel and in precipitated apatites. *Calcif. Tissue. Res.* 1978;26(2):111–118.
42. Goldberg M. *Histologie de l'émail.* Paris. Elsevier Masson. 2008; 98 p.

Table des figures

Figure 1 : Différence d'orientation des cristaux dans l'émail prismatique (P) et interprismatique (IP).	9
Figure 2 : Ancienne vision de l'organisation structurale de l'émail.	10
Figure 3 : Les limites prismatiques.	12
Figure 4 : Nouvelle vision de l'organisation structurale de l'émail.	13
Figure 5 : Ancienne vision de l'organisation structurale des cristallites.	14
Figure 6 : Cristallites intraprismatiques.....	16
Figure 7 : Imbrication des cristallites intraprismatiques.	17
Figure 8 : Nouvelle vision de l'organisation structurale des cristallites.	18
Figure 9 : Représentation schématique orthonormée indexée avec les axes a, b et c.....	21
Figure 10 : Couloir minéral et diffusion du peroxyde d'hydrogène.	22
Figure 11 : Nucléation des cristaux déclenchée par les protéines amélaire.	23
Figure 12 : Croissance des cristaux via la dégradation enzymatique.....	24
Figure 13 : Pression osmotique et membrane semi-perméable.....	26
Figure 14 : Eau libre et eau liée dans l'émail.....	27
Figure 15 : Contact du PH et de l'émail.	28
Figure 16 : Dispersion du PH à la surface de l'émail.	29
Figure 17 : Pénétration du PH dans l'épaisseur de l'émail.....	29
Figure 18 : Pénétration du PH au niveau des espaces de vides interprismatiques.....	30
Figure 19 : Coupe microscopique et schématisation du PH dans les espaces interprismatiques.	30
Figure 20 : Pénétration du PH au niveau des espaces de vides intraprismatiques.....	31
Figure 21 : Coupe nanoscopique et schématisation du PH dans les espaces intraprismatiques.....	31

Vu, le Directeur de thèse

Vu, le Doyen de l'UFR d'Odontologie

Docteur Jean Pierre ATTAL

Professeur Vianney DESCROIX

Vu, le Président d'Université Paris Cité

Professeur Édouard KAMINSKI

Pour le Président et par délégation,

Le Doyen Vianney DESCROIX

Éclaircissement dentaire externe sur dent pulpée : trajet du peroxyde d'hydrogène à travers l'émail

Chlomy Toledano. Éclaircissement dentaire externe sur dent pulpée : trajet du peroxyde d'hydrogène à travers l'émail. 2024. 35p.: ill., graph. Réf. bibliographiques p. 32-34.

Sous la direction de M. le Docteur Jean Pierre Attal.

Université Paris Cité
UFR d'Odontologie
1, rue Maurice Arnoux - 92120 Montrouge
5, rue Garancière - 75006 Paris