

UNIVERSITÉ DE STRASBOURG

FACULTÉ DE CHIRURGIE DENTAIRE

Année 2020

N°76

THÈSE

Présentée pour le Diplôme d'État de Docteur en Chirurgie Dentaire
le 04/12/2020

par

HE Matthieu

Né le 20/10/1995 à COLMAR

ÉVALUATION NUMÉRIQUE DE L'ÉCLAIRCISSEMENT DENTAIRE : ÉTUDE *IN VIVO*

Président :

Professeur MINOUX Maryline

Assesseurs :

Professeur MEYER Florent

Docteur ETIENNE Olivier

Docteur REITZER François

Membre invité :

Docteur SALEHI Ali

FACULTE DE CHIRURGIE DENTAIRE DE STRASBOURG

Doyen : Professeur Corinne TADDEI-GROSS

Doyens honoraires : Professeur Robert FRANK

Professeur Maurice LEIZE

Professeur Youssef HAIKEL

Professeurs émérites : Professeur Henri TENENBAUM

Responsable des Services Administratifs : Mme Françoise DITZ-MOUGEL

Professeurs des Universités

Vincent BALL	Ingénierie Chimique, Energétique - Génie des Procédés
Agnès BLOCH-ZUPAN	Sciences Biologiques
François CLAUSS	Odontologie Pédiatrique
Jean-Louis DAVIDEAU	Parodontologie
Youssef HAÏKEL	Odontologie Conservatrice - Endodontie
Olivier HUCK	Parodontologie
Marie-Cécile MANIERE	Odontologie Pédiatrique
Florent MEYER	Sciences Biologiques
Maryline MINOUX	Odontologie Conservatrice - Endodontie
Anne-Marie MUSSET	Prévention - Epidémiologie - Economie de la Santé - Odontologie Légale
Corinne TADDEI-GROSS	Prothèses
Béatrice WALTER	Prothèses
Matthieu SCHMITTBUHL	Sciences Anatomiques et Physiologiques, Occlusodontiques - Biomatériaux - Biophysique - Radiologie
<i>Délégation (Juin 2024)</i>	

Maîtres de Conférences

Youri ARNTZ	Biophysique moléculaire
Sophie BAHU-GROSS	Chirurgie Buccale - Pathologie et Thérapeutique - Anesthésiologie et Réanimation
Yves BOLENDER	Orthopédie Dento-Faciale
Fabien BORNERT	Chirurgie Buccale - Pathologie et Thérapeutique - Anesthésiologie et Réanimation
Abdessahmad BOUKARI	Chirurgie Buccale - Pathologie et Thérapeutique - Anesthésiologie et Réanimation
Claire EHLINGER	Odontologie Conservatrice - Endodontie
Olivier ETIENNE	Prothèses
Florence FIORETTI	Odontologie Conservatrice - Endodontie
Catherine-Isabelle GROS	Sciences Anatomiques et Physiologiques - Biophysique - Radiologie
Sophie JUNG	Sciences Biologiques
Nadia LADHARI	Sciences Anatomiques et Physiologiques, Occlusodontiques - Biomatériaux - Biophysique
<i>Disponibilité (Nov. 2020)</i>	
Davide MANCINO	Odontologie Conservatrice - Endodontie
Damien OFFNER	Prévention - Epidémiologie - Economie de la Santé - Odontologie Légale
Catherine PETIT	Parodontologie
François REITZER	Odontologie Conservatrice - Endodontie
Martine SOELL	Parodontologie
Marion STRUB	Odontologie Pédiatrique
Xavier VAN BELLINGHEN	Prothèses
Delphine WAGNER	Orthopédie Dento-Faciale
<i>Délégation (Août 2021)</i>	
Etienne WALTMANN	Prothèses

Equipes de Recherche

Nadia JESSEL	INSERM / Directeur de Recherche/Directrice d'UMR
Philippe LAVALLE	INSERM / Directeur de Recherche
Pierre SCHAAF	UdS / Professeur des Universités / Directeur d'UMR
Bernard SENER	INSERM / Directeur de Recherche

A Madame le Professeur Maryline MINOUX - Présidente de thèse

Vous m'avez fait l'honneur d'accepter la présidence de cette thèse. Je vous remercie pour vos enseignements précieux en endodontie au sein de la faculté et du service de soins conservateurs.

A Monsieur le Professeur Florent MEYER – Jury de thèse

Je vous remercie d'avoir accepté de siéger à ce jury, et également pour la rigueur et les méthodes que vous m'avez transmis au cours de ces années.

A Monsieur le Docteur François REITZER – Jury de thèse

Je vous suis reconnaissant de siéger à ce jury. Merci pour votre patience, votre pédagogie et votre goût de la minutie que vous avez partagé au cours de ces années cliniques.

A Monsieur le Docteur Olivier ETIENNE – Co-directeur de thèse

Je vous remercie d'avoir codirigé ce travail. Je suis reconnaissant de votre implication, de votre aide précieuse dans l'étude des statistiques et de l'intérêt que vous avez porté à mon travail.

A Monsieur le Docteur Ali SALEHI – Co-directeur de thèse

Veuillez accepter ma gratitude pour avoir codirigé ce travail. Plus qu'un superviseur, vous avez été un véritable moteur et partenaire dans l'élaboration de cette thèse, vous avez su faire preuve de patience, de pédagogie et d'écoute. Votre rigueur et la qualité de vos travaux resteront des exemples à suivre.

A notre partenaire commercial SDI

Merci à Monsieur Sébastien HUSTACHE et à la société SDI pour le don des produits : Polanight, Soothe et plaques thermoformables.

A Kadour et aux étudiants volontaires

Merci d'avoir rendu mon étude possible.

A ma famille,

Merci d'être ma famille.

A mes amis,

Merci d'être mes amis.

UNIVERSITÉ DE STRASBOURG

FACULTÉ DE CHIRURGIE DENTAIRE

Année 2020

N°76

THÈSE

Présentée pour le Diplôme d'État de Docteur en Chirurgie Dentaire
le 04/12/2020

par

HE Matthieu

Né le 20/10/1995 à COLMAR

ÉVALUATION NUMÉRIQUE DE L'ÉCLAIRCISSEMENT DENTAIRE : ÉTUDE *IN VIVO*

Président :

Professeur MINOUX Maryline

Assesseurs :

Professeur MEYER Florent

Docteur ETIENNE Olivier

Docteur REITZER François

Membre invité :

Docteur SALEHI Ali

TABLE DES MATIÈRES

INTRODUCTION	3
CHAPITRE 1 : ÉTAT DES LIEUX DE L'ÉCLAIRCISSEMENT	5
I. La demande esthétique des patients	6
1. Principaux motifs d'insatisfaction du visage	6
2. Le gradient thérapeutique	6
II. Les éclaircissements externes sur dents vitales	8
1. Définition.....	8
2. Indications.....	11
3. Contre-indications.....	13
III. Les différentes techniques d'éclaircissement d'externe	15
1. Immédiate au fauteuil	15
2. Combinée	15
3. Techniques du commerce	16
4. Ambulatoire	16
5. Les différents temps de la technique ambulatoire	17
IV. Risques	21
1. Les effets systémiques	21
2. Les effets locaux	23
V. Longévité.....	25
CHAPITRE 2 : L'ANALYSE DE LA COULEUR DENTAIRE	27
I. Définition de la couleur dentaire	28
1. Les trois composantes fondamentales de la couleur	28
2. Les trois composantes optiques de la couleur	28
3. La couleur d'une dent	29
II. Les méthodes de prise de couleur actuelles	31
1. Teintiers.....	31
2. Techniques numériques	32
3. Caméras optiques.....	33
III. Analyse de la couleur sur une photographie numérique en utilisant le système CIE Lab	33
1. Méthode de relevé sur photographie numérique.....	33

2.	La photographie en odontologie	34
3.	Espace de couleur CIE Lab	40
4.	Paliers de perception.....	43
5.	Autres systèmes colorimétriques.....	44
6.	Avantages et comparaison avec les méthodes conventionnelles de relevé de la couleur	47
7.	Protocole clinique et mise en pratique	48
CHAPITRE 3		52
ETUDE CLINIQUE DU LE RELEVÉ DE LA COULEUR PAR PHOTOGRAPHIE DANS LE SUIVI D'UN ECLAIRCISSEMENT EXTERNE.....		52
I.	Résumé	53
1.	Objectifs	53
2.	Procédures d'autorisation des commissions.....	53
II.	Matériel et méthode	54
1.	Sujets et critères d'inclusion	54
2.	Choix de la méthode d'éclaircissement et du matériel.....	55
3.	Outils de suivi de la couleur	56
III.	Mise en œuvre.....	57
1.	Protocole opératoire	57
2.	Protocoles de collecte des données.....	59
3.	Post traitement des images et préparation à la lecture.....	61
4.	Relevé des données Lab	65
5.	Analyse statistique	66
IV.	Résultats	67
1.	Analyse des Deltas E cumulés	67
2.	Analyse des Deltas E par périodes non cumulés	70
3.	Analyse des valeurs de a, b et L.....	73
4.	Facteurs environnementaux et dosage	81
V.	Discussion.....	82
VI.	Conclusions de l'étude	84
CONCLUSION		85
ANNEXES		96

INTRODUCTION

Les dentistes ont observé un développement important de la demande et de l'exigence des patients dans le domaine esthétique. La préoccupation principale dans la sphère buccale concerne la couleur des dents. L'évolution des normes sociales en matière de beau fait que le praticien doit de plus en plus répondre à l'émergence du standard d'un sourire très large, lumineux, blanc, symétrique et régulier. La notion du beau est devenue un impératif dans la société contemporaine entretenue par une forte pression médiatique vectrice des codes sociaux du moment. La beauté physique est devenue synonyme de réussite, de jeunesse, de bonheur, de chance, d'opportunité et de bonne santé. Dans la même idée, le sourire étant une constituante majeure de l'apparence physique, l'esthétique dentaire est également indispensable à une intégration réussie au sein de la société.

L'éclaircissement externe, premier palier du gradient thérapeutique, est la solution de première intention dans la résolution des problématiques de couleur avant d'envisager des solutions plus invasives et complexes. (1) Ce traitement est efficace, mais dans certains cas la perception de l'évolution de la couleur peut être difficile à la fois pour le patient comme le praticien. La progression lente et un traitement ambulatoire sur une période de quelques semaines peut nécessiter de faire appel à un outil permettant une évaluation plus objective de la situation. Ainsi, avoir accès à un outil et une méthode facile permettant un relevé colorimétrique et son suivi est essentiel car cela permet d'objectiver l'efficacité du traitement, son évolution et le résultat.

Cette thèse a pour objectif principal de pallier les limites actuelles des différentes techniques d'évaluation subjective de la couleur dans le cadre du suivi d'un éclaircissement dentaire. Elle propose une méthode de relevé colorimétrique objective faisant appel à la photographie et aux outils numériques disponibles sur le marché. Pour cela, nous nous sommes inspirés du protocole eLAB, décrit en 2017. (2) La partie clinique de ce protocole efficace et simple dans sa mise en œuvre, semble pouvoir être adaptée pour l'évaluation des traitements d'éclaircissement dentaire.

En parallèle certaines informations utiles concernant les sensibilités, les habitudes de vie et la quantité de produit utilisée ont également été enregistrées afin d'étudier leurs impacts éventuels sur le résultat final.

L'essentiel de ce travail s'articule autour d'une étude clinique qui a pour but de valider l'utilisation de cette nouvelle méthodologie en s'appuyant sur les données déjà existantes à ce sujet dans la littérature.

CHAPITRE 1

ÉTAT DES LIEUX DE L'ÉCLAIRCISSEMENT

I. La demande esthétique des patients

1. Principaux motifs d'insatisfaction du visage

Une étude de 2012 menée en France dans le cadre de l'ADF a mis en évidence les principales raisons d'insatisfaction associées à la sphère buccale. (3)

- Des dents insuffisamment blanches (42%)
- Des dents mal alignées (29%)
- L'absence d'une ou plusieurs dents (16%)
- Des dents qui se chevauchent (15%)
- Des dents tachées (14%)
- Des amalgames trop visibles (13%)
- La peur d'une mauvaise haleine (12%)
- Des gencives rétractées (11%).

Cette étude indique donc que le principal motif d'insatisfaction concerne la couleur des dents. Il est suivi des problématiques de malpositions qui relèvent de l'orthodontie. En d'autres termes, la préoccupation majeure des patients est d'avoir un sourire harmonieux et esthétique. (4) La place de la couleur dans le rapport à l'esthétique en dentisterie résulte d'un conditionnement social et culturel. En effet, dans notre société actuelle, des dents claires sont le plus souvent perçues comme vecteur de jeunesse, de santé et de beauté.(5)

2. Le gradient thérapeutique

La notion de gradient thérapeutique est un concept essentiel dans le choix des traitements dentaires à visée esthétique. L'objectif d'une telle approche est d'allier un résultat esthétique final idéal tout en assurant une préservation tissulaire maximale. Le gradient classe et hiérarchise les thérapeutiques de la moins invasive à la plus mutilante en matière de tissus dentaires.

Il s'agit alors d'avancer dans le gradient en optant pour un traitement seulement si les thérapeutiques moins invasives sont inadaptées ou ne garantissent pas un résultat suffisant. Cette réflexion doit évidemment pouvoir concilier les contraintes esthétiques, fonctionnelles, mécaniques et biologiques propres à chaque situation clinique considérée.

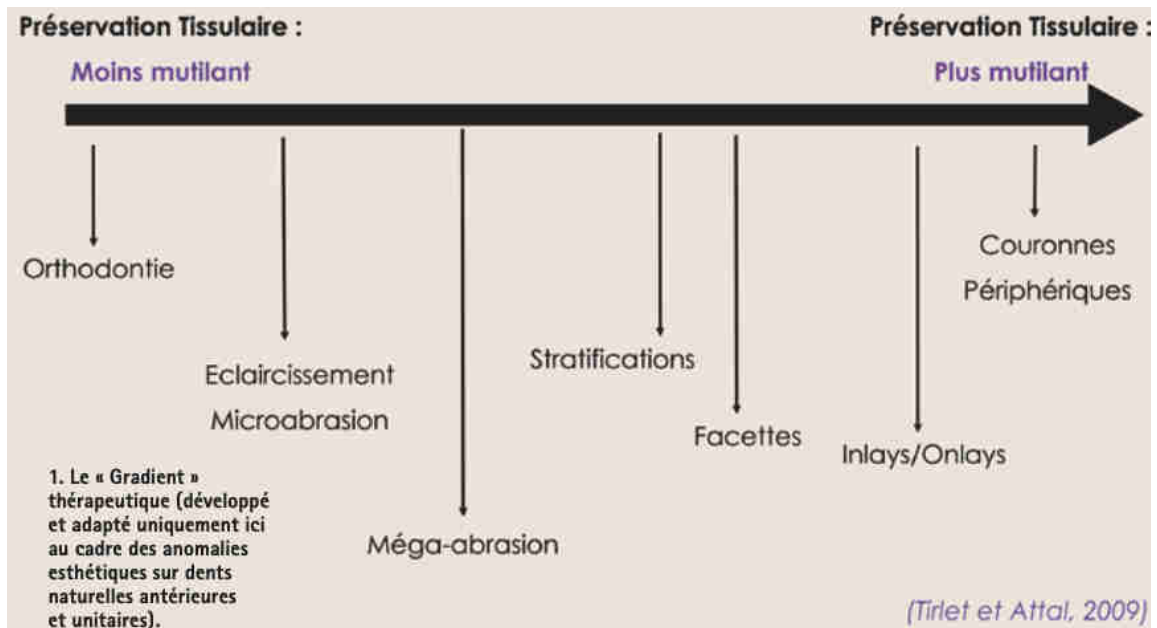


Figure 1 : Le gradient thérapeutique dans le cadre esthétique odontologique (1)

Dans le cadre de cette thèse, nous avons décidé de nous focaliser sur une des thérapeutiques de ce gradient : l'éclaircissement sur dents vitales. L'application des techniques d'éclaircissement interne spécifique aux dents devitalisées ne sera pas considérée dans ce travail. Conforme à l'esprit du gradient thérapeutique, l'éclaircissement externe présente un excellent rapport bénéfice risque, car il procure un résultat intéressant avec une perte tissulaire nulle. C'est pourquoi il se retrouve au début de ce gradient. Cette technique est la thérapeutique initiale à mener en première intention dans la gestion de problématiques de couleur, avant d'envisager le passage à d'autres thérapeutiques plus invasives.

II. Les éclaircissements externes sur dents vitales

1. Définition

a. Mode d'action

L'éclaircissement externe peut être pratiqué sur dents vitales ou non, en opposition à l'éclaircissement interne qui est réservé uniquement aux dents traitées endodontiquement. Ces thérapeutiques ont pour objectif d'améliorer la couleur de la dent vers des tons clairs avec un gain de luminosité. Les éclaircissements externes reposent sur l'application topique de produits actifs oxydants sur les surfaces dentaires. Ces produits vont intégrer la matrice organique amélo-dentinaire, induire une oxydation et une libération de radicaux libres, ceux-ci vont briser les doubles liaisons au sein des pigments à l'origine de la coloration intrinsèque. Dans cette réaction d'oxydo-réduction, le produit éclaircissant est l'agent oxydant qui libère des radicaux libres et des électrons non appariés, l'agent réducteur est constitué des pigments. (6–11)

Les produits n'étant actifs que sur les pigments organiques, leur action est négligeable sur les restaurations. Ces traitements sont considérés comme non invasifs car ils ne modifient que faiblement la structure de la dent.

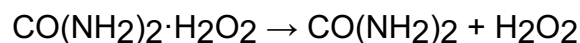
b. Principes actifs

Les principales molécules utilisées sont le peroxyde d'hydrogène, le peroxyde de carbamide et le perborate de sodium. Elles sont usuellement associées à des adjuvants désensibilisants, stabilisateurs, reminéralisants (potassium et fluor), activateurs ou gustatifs.

Le peroxyde d'hydrogène est le principe actif de base de l'éclaircissement. Il est instable et se décompose par réactions de photodissociation et de dissociation anionique. Ces réactions libèrent des ions O_2 et HO_2^- qui oxydent les composés colorants en altérant leur structure chromophore.

Le peroxyde de carbamide, appelé aussi peroxyde d'urée, est le plus couramment utilisé. La synthèse de ce composé se fait par une association par cristallisation de la molécule de peroxyde d'hydrogène et de la molécule d'urée. La molécule active au sein du produit reste le peroxyde d'hydrogène, qui compte pour 33% dans la composition du composé. Le produit est stabilisé grâce aux glycerols et carbapoles qui assurent une solubilité et une perméabilité adéquate du produit ainsi que sa libération progressive. Une fois activés par le contact salivaire et la température buccale, les cristaux se décomposent libérant le peroxyde d'hydrogène. Cinquante pour cent du peroxyde d'hydrogène est relargué durant les deux premières heures d'application, puis le composé reste actif jusqu'à 10 heures. Le peroxyde de carbamide étant plus stable et efficace que le peroxyde d'hydrogène pur, il est aujourd'hui préféré pour les traitements ambulatoires. (12)

Formule de décomposition du peroxyde de carbamide



Les concentrations de peroxyde de carbamide les plus utilisées au sein des produits sont de 10 ou 15%. Dans la littérature, aucune différence significative n'est mise en évidence en termes de résultats entre les deux concentrations. En revanche, les produits aux concentrations plus élevées donnent des résultats visibles légèrement plus rapidement, mais induisent également davantage de sensibilités. La concentration de 10% semble être la plus adaptée et efficace, car elle prodigue le meilleur compromis entre résultat et effets indésirables. (7,13–16)

c. Législation sur les produits d'éclaircissement

Cosmétique ou dispositif médical

Les directives du Conseil de l'Europe 76/768/CEE et 92/42/CEE définissent la nature cosmétique ou médicale d'un produit. Un produit cosmétique a pour objectif de parfumer, nettoyer ou protéger le corps, en modifiant éventuellement l'aspect. Son application et son interaction avec le corps humain est superficielle, avec une nocivité nulle en utilisation normale. Un dispositif médical a pour fonction la prévention, le diagnostic, le contrôle ou le traitement d'une maladie.

Les produits d'éclaircissement externe entrent dans la définition du produit cosmétique. Les muqueuses buccales sont considérées comme des tissus superficiels. L'objectif du traitement, se faisant sur des dents saines, est purement esthétique et les effets indésirables sont minimes voire quasi nuls. En 2013, l'ANSM précise que même dans le cadre d'une prise en charge de pathologie comme l'amélogénèse imparfaite, la classification en dispositif médical ne peut être envisagée. L'éclaircissement reste donc un produit cosmétique.

Régulation de la concentration

En 2011, la directive du Conseil 2011/84/UE du 20 septembre, l'AFSSAPS et le DGCCRF ont émis une réglementation sur les produits libérant du peroxyde d'hydrogène. La concentration en peroxyde d'hydrogène des produits considérés comme cosmétiques et accessibles à la consommation directe est fixée à une limite maximum de 0,1%. Toutefois, les chirurgiens-dentistes sont autorisés à utiliser des produits, toujours considérés comme cosmétiques, avec des concentrations entre 0,1 à 6%. La réglementation précise que cet usage peut se faire uniquement chez l'adulte.

d. Cinématique de l'éclaircissement dentaire

La durée d'un éclaircissement peut aller jusqu'à six semaines, selon le degré de coloration initial, la concentration du produit, l'efficacité du traitement et la technique mise en œuvre. Néanmoins une utilisation en dessous de quatre semaines est plus commune. Une fois l'ensemble des pigments chromophores oxydés, le point de saturation est atteint, il est alors opportun d'arrêter le traitement.(17)

Dans le cas d'un éclaircissement externe ambulatoire, il faut attendre une semaine avant de percevoir un changement de couleur notable. L'effet de l'éclaircissement est le plus important et donc le plus perceptible durant les premiers temps du traitement. Le traitement continue à porter son effet les semaines suivantes mais avec une amélioration de moins en moins perceptible. Une courbe d'action spécifique à la cinématique de ce traitement est bien décrite dans la littérature avec une première phase à ascension rapide correspondant au début du traitement.

Cette courbe va ensuite s'aplanir progressivement indiquant une progression qui continue mais à moindre vitesse dans la suite du traitement. Elle va ensuite atteindre son pic correspondant au point de saturation de la dent. Ce point de saturation, propre à chaque individu, correspond à l'éclaircissement maximum qu'il est possible d'obtenir.

Une fois le traitement terminé, cette courbe s'inverse et les valeurs chutent légèrement mettant ainsi en évidence un phénomène de récédive partielle dans les deux mois qui suivent jusqu'à atteindre un plateau de stabilisation qui correspond au résultat final obtenu. Cet effet rebond correspond au relargage d'oxygène accompagné d'une légère baisse de la luminosité. Une fois la couleur stabilisée, la courbe maintient un plateau avec une légère diminution du résultat dans le temps correspondant à la phase de récédive dont la rapidité dépendra d'un certain nombre de paramètres.(18)

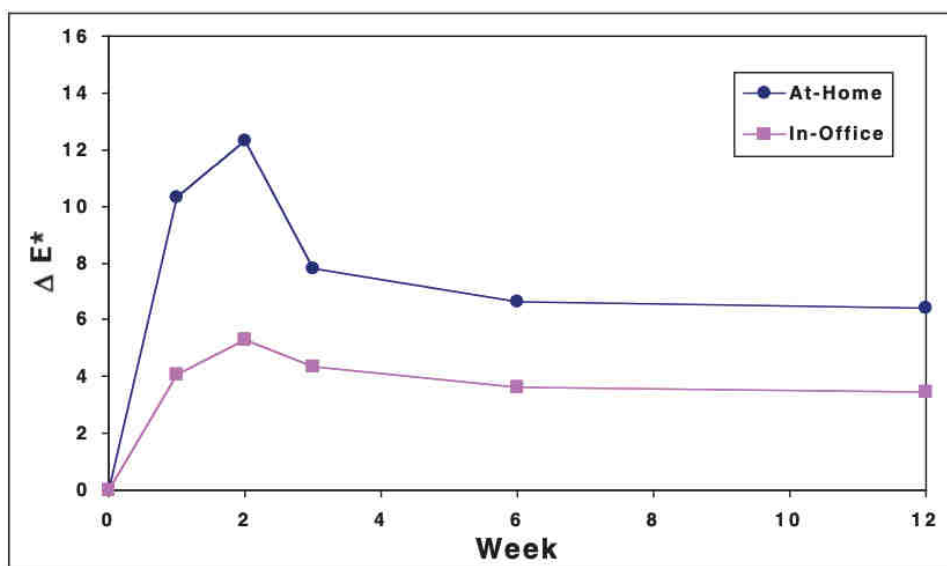


Figure 2 : Courbes de cinématiques des éclaircissements externes ambulatoire et immédiat au fauteuil (18)

2. Indications

L'éclaircissement externe est un traitement peu invasif qui peut être associé à d'autres techniques. C'est pourquoi il est à la base du gradient thérapeutique dans la prise en charge de problématiques esthétiques et peut très souvent être proposé en première intention.

Ainsi, les indications sont nombreuses dès qu'une problématique couleur est posée. Il peut donc être indiqué dans le cadre de colorations d'origine physiologique, environnementale ou pathologiques. Cette technique peut aussi être appliquée dans le cadre d'une restauration plus globale ou d'une demande purement cosmétique.(6)

Les colorations d'origine physiologiques sont les suivantes :

- Les colorations dues au vieillissement : ces colorations représentent l'indication idéale donnant les meilleurs résultats

Les colorations d'origine environnementale sont les suivantes :

- Colorations liées à la consommation de tabac et aliments pigmentaires : thé, café, vin rouge, sodas, etc.
- Les colorations par fluorose : un traitement d'éclaircissement peut être associé à une technique de micro-abrasion ou érosion/infiltration pour les colorations légères, sans altération grave de structure.
- Les colorations médicamenteuses par tétracyclines : d'après la classification de Jordan et Boksman, un traitement d'éclaircissement peut être effectué sur les stades 1 et 2 correspondants à des colorations uniformes et sans bandes. (19)

Les colorations d'origine pathologiques sont les suivantes :

- Les colorations post-traumatiques : avec conservation de la vitalité pulpaire
- Les colorations génétiques : l'altération de la structure amélaire ou dentinaire altérée induit des dents jaunes, marron ou grises

Dans le cadre de restaurations prothétiques :

En préopératoire : l'objectif est souvent d'obtenir d'abord une couleur plus satisfaisante pour le patient avant d'engager la ou les restauration(s) qui devront reproduire la même couleur que cette nouvelle référence pour un résultat final harmonieux.

Dans certain cas, l'éclaircissement préalable de dents spécifiques peut aider à la conservation. C'est le cas lors de préparations pour des facettes, l'amélioration de la couleur du substrat permettant de minimiser la nécessité d'une facette épaisse pour masquer un substrat trop foncé. Or la préparation d'une facette plus épaisse peut parfois être plus mutilante pour la dent.

En post opératoire : un contraste peut se créer au cours du temps entre pièces prothétiques et dents naturelles. L'éclaircissement sélectif des dents naturelles colorées peut permettre d'arranger ce contraste et éviter ainsi la reprise des restaurations prothétiques, qui hormis la couleur ne posaient pas d'autres problèmes. L'éclaircissement peut également être indiqué après un traitement orthodontique. Les zones postérieures plus sombres sont souvent plus visibles à la suite d'une augmentation de la largeur du sourire. En effet, selon une étude réalisée en 2008, l'éclaircissement a un impact positif sur la perception du traitement orthodontique. (20)

3. Contre-indications

Les contre-indications absolues sont peu nombreuses :

- Les femmes enceintes ou allaitant
- Les mineurs pour des raisons légales
- Les patients allergiques à un des différents composants des produits d'éclaircissement
- Certaines pathologies d'ordre général : porphyrie congénitale, érythroblastose foétale, ictère hémolytique
- Un manque de compliance de la part du patient ou des attentes déraisonnables
- La présence de sensibilité dentinaire initiale excessive
- La présence de blessures buccales
- Les dents présentant d'importantes altérations tissulaires : fractures et fêlures
- Les dyschromies induites par sels métalliques.

Les contre-indications relatives sont les suivantes :

- Les patients présentant des lésions carieuses : il faudra alors réaliser l'éviction carieuse avant le traitement et placer un ciment verre ionomère provisoire avant de réaliser la restauration composite deux semaines au minimum après la fin du traitement. Ce délai permet la dispersion totale d'oxygène et évite les problèmes d'un collage non performant avec les risques d'inhibition de la polymérisation du composite du fait de l'oxygène.
- Les patients en cours de traitement orthodontique
- Les dents antérieures porteuses de restaurations importantes : si le patient ne désire pas remplacer ses anciennes restaurations l'éclaircissement n'est pas indiqué faute de quoi le résultat final ne serait pas bon.
- Les dents aux racines exposées : l'éclaircissement ne fonctionne pas aussi rapidement sur les racines laissant parfois un contraste disgracieux avec la couronne. Si le patient n'est pas averti ou se refuse à cette idée, le traitement ne doit pas être entrepris.

La consommation de tabac ou de café ne constitue pas une contre-indication formelle. En peropératoire ces habitudes n'ont pas d'impact sur l'efficacité du traitement ou sur l'apparition de sensibilités. En revanche en postopératoire, la consommation de produits pigmentaires induit une récurrence plus rapide de la coloration. Il faut donc que le patient soit conscient que la tenue du résultat sera fonction de ses pratiques alimentaires. (21–24)

Dans le cas des érosions, il n'y a pas de contre-indication sauf en cas de sensibilité préalable trop importantes. L'éclaircissement n'a pas d'impact sur les surfaces dentaires ayant subi une perte de tissus. Le produit utilisé ayant un pH proche de 7 et étant non invasif, le seul risque est l'apparition de sensibilités exacerbées.

III. Les différentes techniques d'éclaircissement d'externe

1. Immédiate au fauteuil

Cette technique est pratiquée directement au fauteuil par le praticien. On parle de « in-office bleaching ». La concentration de peroxyde d'hydrogène utilisée est plus élevée, de l'ordre de 6% de peroxyde d'hydrogène pour un effet plus rapide. Étant donné le risque de brûlures en cas de contact avec les tissus mous, ces derniers sont protégés à l'aide d'une digue, en caoutchouc ou liquide. Le produit est ensuite directement appliqué sur les faces vestibulaires des dents. Le temps d'application est compris entre 30 et 40 minutes selon le produit et deux sessions sont souvent nécessaires. La technique est tout aussi efficace en termes de résultats que la méthode ambulatoire, mais on observe l'apparition de sensibilités plus fréquentes et plus intenses. (13,25–29)

2. Combinée

La technique combinée rassemble les deux méthodes : ambulatoire et immédiate. En associant les deux techniques, le protocole combiné a pour objectif de minimiser les inconvénients de chaque technique tout en gardant leurs avantages. Le protocole combiné débute par une séance unique d'application immédiate d'agents éclaircissants à forte concentration au fauteuil, puis une phase ambulatoire plus courte avec des produits de concentration plus faible.

Cette technique présente les avantages de la technique immédiate : un effet rapide et immédiatement visible ainsi qu'une réduction du temps de traitement. Elle tire également les bénéfices de la technique ambulatoire : une utilisation et une mise en œuvre plus simple et l'utilisation de produits moins concentrés induisant moins d'hypersensibilités. Toutefois les études ont tendance à montrer que la technique combinée induit plus de sensibilités que la technique ambulatoire seule. De plus il n'existe aucune différence significative sur le plan statistique dans l'efficacité et les résultats obtenus entre les deux techniques. (28)

3. Techniques du commerce

Il existe de nombreux produits disponibles dans le commerce, accessibles sans l'obligation de passer par le chirurgien-dentiste. Il s'agit des traitements « over the counter ». A titre d'exemple il existe des chewing-gums, des bains de bouche, du fil dentaire, du dentifrice, des brosses à dents, du vernis, des gouttières universelles et des strips éclaircissants.

L'ensemble des techniques du commerce sont régulées par la réglementation européenne de 2011 et la mise en application par l'ANSM en 2013. Ces techniques ne peuvent utiliser que des produits contenant une concentration de 0,1% de peroxyde d'hydrogène au maximum. Cette très faible concentration donne des résultats moins intéressants et moins durables comparés aux techniques professionnelles. D'autre part l'utilisation non encadrée et non contrôlée peut engendrer des effets iatrogènes. Par exemple la prolongation exagérée de la durée d'utilisation (liée à l'effet réduit de ces produits) peut induire une toxicité résultant de l'ingestion de peroxyde d'hydrogène.

4. Ambulatoire

Cette technique repose sur l'application en ambulatoire de peroxyde de carbamide de concentration modérée sur les surfaces dentaires. C'est au patient lui-même d'effectuer le traitement chez lui. Il est question de « at-home bleaching ». A cet effet, le praticien réalise dans un premier temps des gouttières thermoformées. Le produit éclaircissant conditionné en seringue sous forme de gel est déposé dans les gouttières qui seront insérées en bouche et portées tous les soirs entre deux heures à toute la nuit. L'appellation NGVB ou « night guard vital bleaching », est la désignation anglaise de la technique d'éclaircissement externe ambulatoire sur dents vitales en port nocturne. La durée d'un tel traitement peut aller de deux à six semaines.

La technique ambulatoire en port nocturne présente le meilleur rapport bénéfice risque, et semble être la technique de choix pour l'éclaircissement de dents vitales. Elle permet d'utiliser des concentrations plus faibles tout en obtenant des résultats

équivalents aux autres méthodes avec des sensibilités nettement moins fréquentes et moins intenses lorsqu'elles existent.

5. Les différents temps de la technique ambulatoire

a. Prise en charge préopératoire

Il est capital de réaliser un bilan complet afin d'optimiser le résultat du traitement. Une anamnèse exhaustive doit être réalisée afin de déceler toute contre-indication éventuelle et identifier les étiologies et facteurs de coloration.

Dans un premier temps il s'agira d'identifier la demande du patient via un entretien. Il est nécessaire d'identifier les origines de cette demande esthétique et son importance pour le patient. Il sera indispensable de discerner une demande classique réalisable d'une demande injustifiée, démesurée ou pathologique. (30)(31)

Dans un second temps, il faudra identifier les attentes et exigences du patient en termes de résultats. Le rôle du praticien est aussi de définir l'objectif et d'expliquer s'il sera atteignable. Dans un tel contexte il faudra absolument éviter de donner de faux espoirs au patient. C'est dans ce cadre que l'évaluation de la couleur est importante. Sa mesure au cours du traitement permettra également d'objectiver la progression du résultat. A cet effet, il existe plusieurs méthodes de prises de couleur permettant d'estimer un résultat d'éclaircissement et même la progression si un contrôle est réalisé régulièrement. Dans le cadre de cette thèse nous avons cherché à proposer et démontrer l'efficacité d'une nouvelle méthodologie (voir partie II et III du Chapitre 2).

Un examen clinique devra être réalisé afin de déterminer s'il y a de quelconques risques ou précautions à prendre avant d'entreprendre le traitement. On fera donc un bilan parodontal, un examen des lésions carieuses, des altérations structurelles dentaires, des restaurations, et des sensibilités. Un examen complémentaire radiologique peut être effectué. En cas de présence de tartre ou de colorants exogènes de surface, un détartrage et polissage devra être réalisé afin d'optimiser la prise de

couleur et l'éclaircissement. Le choix du traitement se fera après avoir identifié le type et le degré de la dyschromie.

Le patient devra être informé des risques et signer un consentement éclairé après explications exhaustives. Ces traitements ne sont pas pris en charge par la sécurité sociale, ils sont donc réalisés après acceptation par signature d'un devis.

b. Confection des gouttières

La première étape du protocole est la prise d'empreinte en vue de la réalisation de la gouttière thermoformée. La prise d'empreinte se fait classiquement avec un porte empreinte du commerce et de l'alginate en un temps. Elle doit enregistrer correctement les surfaces dentaires et les cinq premiers millimètres de tissus mous au-delà du collet de la dent.

Les empreintes sont décontaminées et les modèles sont coulés en plâtre dur. Les modèles sont ensuite préparés en éliminant tous défauts (bulles, petits manques) qui pourraient engendrer des problèmes de plaquage de la gouttière et une application non homogène du gel éclaircissant sur toute la surface de chaque dent considérée. Les modèles sont taillés en éliminant toutes les parties superflues (palais, fond du vestibule) afin d'optimiser l'aspiration lors de la réalisation des gouttières.

Des réservoirs peuvent être placés sur les faces vestibulaires des dents (jusqu'à la première molaire) hormis celles présentant des restaurations volumineuses ou des artifices prothétiques. Ces réservoirs ont pour objet d'espacer la gouttière au niveau de la face vestibulaire de chaque dent. Pour cela, il suffit d'appliquer une résine fluide photo polymérisable sur les faces vestibulaires des dents du modèle. L'objectif de ces réservoirs est d'emprisonner une quantité suffisante de produit sur ces zones d'application.

L'absence de réservoir et ainsi le plaquage complet de la gouttière sur toute la face vestibulaire de la dent va étaler le produit en un film fin. Cette différence pourrait laisser des doutes quant à l'efficacité du traitement en l'absence d'une quantité suffisante de gel. Toutefois les études montrent que la présence de réservoir n'apporte pas de

différence significative dans les résultats obtenus. De plus la présence de réservoirs peut induire davantage d'inflammation gingivale. L'intérêt des réservoirs, outre l'aspect pratique pour indiquer au patient où placer le produit, est donc limité. (32)(33)(34)(35) Les gouttières sont pressées en thermoformant des plaques de polyvinyle souple sur les modèles par aspiration. Ces feuilles de polyéthylène sont classiquement de 0,7 à 1,5 mm d'épaisseur. Une fois refroidies, elles sont découpées de manière rectiligne à 1 mm des collets et les limites sont polies. Il faut s'assurer de la bonne application des gouttières aux limites cervicales afin d'obtenir une bonne herméticité et éviter toute fusée excessive de produit.

c. Essayage et Explication

Dans un premier temps les gouttières doivent être essayées et examinées par le praticien. Il faut s'assurer de leur bonne adaptation au niveau dentaire et gingival. Par exemple une surpression au niveau de la papille rétro incisive maxillaire pourra induire une irritation lors du port. Puis il faudra s'assurer de l'herméticité aux limites des gouttières. Les corrections et réglages minimes pourront être réalisés par le praticien. Le traitement est ambulatoire donc réalisé par le patient lui-même, il est alors capital de fournir des explications d'utilisation et de précaution exhaustives. Les informations délivrées à l'oral sont accompagnées de démonstrations et de fiches explicatives.

- Zones d'application du produit : Le produit doit être appliqué dans l'intrados de la gouttière au centre des faces vestibulaires ou au centre des réservoirs s'ils sont présents. Usuellement les dents les plus postérieures ne sont pas traitées, on n'applique donc pas de produit au-delà de la première molaire.
- Quantité à déposer : déposer à l'aide de l'embout vissé sur la seringue l'équivalent d'une pointe de stylo bille de produit par dent.
- Manipulation de la gouttière : mise en place le soir et retrait le matin. Nettoyer la gouttière en rinçant à l'eau claire. Garder la gouttière en place sur le modèle.
- Stockage des seringues : le produit doit être conservé à l'abri de la lumière à une température comprise entre 2 et 25 °C.
- Hygiène buccodentaire : Brosser les dents correctement avant application du produit.
- Temps d'application nocturne : de 4 heures à toute la nuit.

- Conseils pour optimiser le résultat : éviter la consommation de produits pigmentaires comme le tabac, soda, café, thé ou vin rouge pendant le traitement.

Les études présentent des conclusions divergentes sur l'impact de la consommation de produit à potentiel chromogène en peropératoire. Le consensus global semble toutefois indiquer que ces habitudes durant le traitement n'ont pas d'influence néfaste sur l'efficacité ou les résultats. Toutefois d'autres études indiquent le contraire. Le contrôle de ces consommations n'étant pas excessivement contraignant, il peut être intéressant de respecter ce point par précaution dans le but d'optimiser le traitement. (36,37)

d. Contrôles peropératoires

En peropératoire, des contrôles hebdomadaires sont nécessaires afin de s'assurer du bon déroulement du traitement. Il s'agit de contrôler la bonne utilisation, les quantités utilisées, l'apparition d'éventuelles sensibilités et l'évolution de la couleur dentaire.

En cas de sensibilités il est recommandé de faire une nuit de pause et ne pas porter les gouttières. Ces hypersensibilités étant modérées et passagères, le traitement peut être repris la nuit suivante après disparition des symptômes. Les différents fabricants proposent souvent des produits à utiliser en relais en cas de sensibilités. Ces produits sont des gels fluorés à appliquer dans les gouttières à la place du produit éclaircissant et à porter de la même façon, mais sur des périodes plus courtes (de l'ordre de 30 minutes). Ils permettent de réduire efficacement les sensibilités sans impacter l'effet éclaircissant du traitement et son résultat (38). En cas de persistance des sensibilités, ce sera au praticien de juger si la reprise et la poursuite du traitement jusqu'à son terme est possible.

e. Post opératoire et suivi

En post-opératoire, l'application de gel fluoré sur 2 jours est préconisée afin d'éviter toute sensibilité post opératoire et de supprimer toute déminéralisation de surface éventuelle. Ce gel est appliqué de la même façon que l'agent éclaircissant à l'aide des mêmes gouttières durant 30 min.(39)

Des conseils de prévention de la récurrence doivent être délivrés afin d'optimiser la durée du résultat. Il s'agit d'éviter les habitudes génératrices de coloration : tabac, sodas, vin rouge, thé, café. Certaines études stipulent que l'impact en peropératoire de ces habitudes est nul, mais dans la phase postopératoire le consensus est plus global. Ces habitudes favorisent une récurrence plus rapide, et donc une recoloration et une perte de l'effet éclaircissant accélérée. (40)(41)(42). Le praticien doit également dispenser des conseils d'hygiène buccodentaire, car une prophylaxie dentaire et un brossage adéquat et régulier permettent de prévenir le dépôt du tartre et des éléments chromogènes.

IV. Risques

L'éclaircissement externe ambulatoire est non invasif et efficace. Cette technique présente donc un rapport bénéfice risque idéal. Il a toutefois été observé quelques risques et effets secondaires minimes, notamment l'hypersensibilité. Ces risques sont directement liés à l'utilisation du peroxyde d'hydrogène qui induit une diffusion de radicaux libres.

1. Les effets systémiques

Les effets secondaires systémiques sont liés à l'ingestion du produit. Une attention particulière doit donc être prêtée à l'herméticité de la gouttière afin de limiter la diffusion du produit. Cependant malgré une bonne conception et adaptation on observe que 50% du produit est ingéré lors de la première heure. Néanmoins, la quantité consommée est négligeable et ne permet donc pas de causer un effet nocif significatif.

En effet, l'ensemble des risques généraux sont dépendant de la technique réalisée, de la quantité et de la concentration de produits utilisés. Ces problèmes arrivent le plus souvent lorsque les choses sont faites sans aucun contrôle professionnel. Il est donc capital d'utiliser ces produits à base de peroxyde d'hydrogène avec précaution et sous la supervision et le contrôle du chirurgien-dentiste.

Il est aussi intéressant de préciser que la technique ambulatoire faisant appel à des concentrations tellement faibles de principe actif que les risques iatrogènes systémiques sont anecdotiques, ce qui est en faveur de cette approche.

a. Risque oncogène

Le risque oncogène est nul lors d'une utilisation normale en port nocturne. Il est à considérer lors de l'utilisation de très fortes doses de produits à des concentrations élevées et sur des durées non recommandées, ces situations sont très loin des utilisations cliniques qui sont faites en dentisterie.

Une étude a aussi mis en évidence un potentiel oncogène du peroxyde d'hydrogène sur les souris, en les exposant à une ingestion sur de longues périodes. Toutefois cette étude présente de nombreux biais et a été invalidée sur le fait qu'elle n'est pas généralisable à d'autres espèces. (43)

b. Risque toxique

Le risque d'empoisonnement n'est présent qu'à des doses extrêmes. Des cas d'empoisonnement ont été observés, mais que dans des conditions d'ingestion massive non contrôlée. Une étude rapporte le cas d'un garçon de 16 mois décédé après une ingestion importante d'eau oxygénée. Il avait bu une bouteille de 230g à 3%, soit 7g de peroxyde d'hydrogène. (44)

c. Risque mutagène

Dans le cadre des concentrations utilisées cliniquement, aucun risque mutagène n'a été identifié in vivo. Seul des tests in vitro ont suspecté un risque.

2. Les effets locaux

Les risques locaux sont liés au contact prolongé du produit avec les tissus. Le principal et souvent unique effet secondaire est l'hypersensibilité dentaire.

a. Sur les tissus pulpaire

Jusqu'à 65% des patients présentent des **hypersensibilités dentaires** lors d'un éclaircissement externe à 10%. C'est la doléance principale des patients en termes d'effets secondaires. (45)

Ces sensibilités sont liées à l'effet du produit sur les tubulis dentinaires induisant des mouvements du liquide intra-canaliculaire. Ces mouvements vont engendrer en périphérie pulpaire une distorsion des récepteurs nerveux, d'où le signal douloureux. Le glycérol qui est un agent stabilisateur des produits peut également potentialiser ce phénomène en induisant une déshydratation. Les nouveaux produits incluent dans leur composition des éléments permettant d'inhiber ces effets. Les fluorures sont utilisés comme agent minéralisant des tubulis dentinaires et les sels de potassium comme agents désensibilisant. (46)

La diffusion de peroxyde d'hydrogène peut induire une légère inflammation pulpaire réversible transitoire. Une étude en 2002 observait une inflammation sur 25% des dents traitées, mais celle-ci disparaissait en post-opératoire. Cette diffusion est d'autant plus importante en cas d'exposition dentinaire résultante d'abrasion, d'usure, de fêlures, de récessions ou de restauration non étanche.(47)

Toutefois le peroxyde de carbamide qui est préféré de nos jours au peroxyde d'hydrogène est moins propice à la diffusion dans les tissus. Les inflammations sont donc transitoires et contrôlées dans le cadre d'une utilisation normale cadrée.

b. Sur les tissus durs

Les effets sur le complexe amélo-dentinaire sont encore débattus. Certaines études n'ont identifié aucune modification de surface après utilisation de gel éclaircissant. Cependant d'autres études soulignent des altérations de microdureté amélaire, de résistance à l'abrasion, des faibles dépressions de surface, une déminéralisation, une augmentation de la porosité et une légère érosion. Ces effets sont équivalents à ceux causés par les consommations acides (sodas, jus de citron et autres). (48)

On peut tout de même observer que les risques morphologiques apparaissent surtout au-delà de 15% de concentration en peroxyde de carbamide et sur des durées d'application excessives. De plus les produits éclaircissants actuels ont un pH plus neutre et incluent des agents fluorés reminéralisants. Le risque sur les tissus durs est donc moindre dans le cas d'un protocole d'éclaircissement contrôlé à 10% de peroxyde de carbamide. (49)

c. Sur les tissus mous

Les études mettent en évidence l'apparition d'irritation ou d'inflammation gingivale. Ces effets secondaires sont transitoires (de l'ordre de quelques jours) et ne réapparaissent pas. Les cas de réelles lésions gingivales sont corrélés à une mauvaise adaptation des gouttières plutôt qu'au produit d'éclaircissement. Il n'y a donc pas de risque à long terme. (45)

Une altération de flore buccale a également été observée, induisant une hypertrophie papillaire linguale et une vulnérabilité au *Candida Albicans*. (50) De plus l'exposition à une pathologie parodontale, à une blessures buccale préexistante, à l'alcool et au tabac potentialise les effets nocifs liés à l'éclaircissement. Le chirurgien-dentiste a

alors le devoir de discerner les contre-indications et d'évaluer le rapport bénéfice risque et les prérequis nécessaires au traitement.

d. Sur les restaurations

Suite à un éclaircissement externe, on observe une diminution de l'adhérence aux matériaux d'obturation des surfaces traitées. Le produit induit une inclusion de bulles d'oxygène dans l'émail et une altération de la surface amélaire, diminuant ainsi le potentiel adhésif. En post opératoire il est donc recommandé d'attendre deux semaines avant d'entreprendre des restaurations, ceci afin de permettre le relargage d'oxygène et la reminéralisation superficielle.

D'autre part on remarque une altération structurelle des restaurations récentes exposées aux agents éclaircissants. Il est donc judicieux d'espacer chronologiquement les restaurations en amont et en aval de l'éclaircissement. (51)(52)

V. Longévité

La couleur définitive correspondant au niveau de stabilité est obtenue après une récurrence partielle de l'ordre de deux mois qui débute immédiatement après la fin de la phase opératoire. Le résultat pouvant être espéré est dépendant de la situation initiale et de l'étiologie de la coloration. Une fois le plateau de stabilisation atteint la coloration va récidiver mais de manière très lente.

La tenue dans le temps de l'éclaircissement, c'est-à-dire la durée avant laquelle un nouveau traitement est jugé nécessaire, est de l'ordre d'un à trois ans. Cette durée est variable selon les habitudes de vie de consommations pigmentaires du type café, thé, tabac, sodas et vin rouge, qui favorisent une récurrence. Parmi ces éléments, le vin rouge semble être le plus impactant sur la stabilité de la couleur. Le patient doit être donc prévenu de cette récurrence et de sa chronologie. (23,41,53,54)

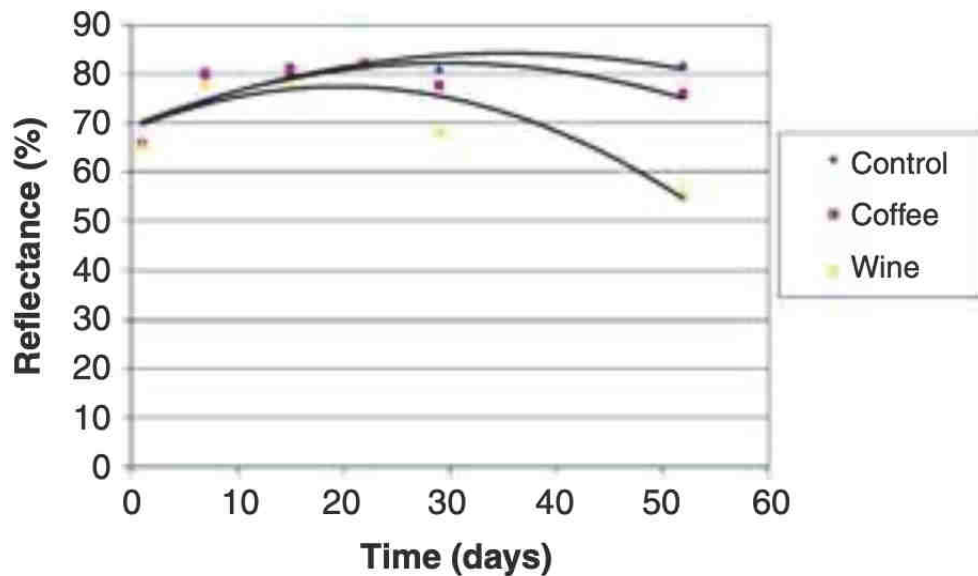


Figure 3 : Courbes d'évolution de la réflectance en fonction du temps, après un éclaircissement, selon l'exposition au café ou vin rouge (23)

Une bonne hygiène buccodentaire et un recours fréquent et régulier à une prophylaxie dentaire, comme le détartrage polissage, participent à optimiser la tenue du résultat dans le temps. En effet ces précautions permettent de limiter et d'éliminer le dépôt des pigments chromogènes.

Une maintenance peut être effectuée de manière annuelle sous la supervision du praticien, permettant de retrouver le niveau de stabilité. D'une durée réduite de quelques nuits (une nuit par semaine de traitement initial), la mise en œuvre de cette maintenance est identique au protocole opératoire initial. Dans le cas d'un recours à un nouveau traitement d'éclaircissement, celui-ci sera également plus court.

CHAPITRE 2

L'ANALYSE DE LA COULEUR DENTAIRE

I. Définition de la couleur dentaire

Selon le dictionnaire LAROUSSE : La couleur est la sensation résultant de l'impression produite sur l'œil par une lumière émise par une source et reçue directement (couleur d'une source : flammes, etc.) ou après avoir interagi avec un corps non lumineux (couleur d'un corps).

Dans notre cas, le corps non lumineux d'intérêt est la dent. La lumière est caractérisée par une longueur d'onde lui donnant sa couleur. Le domaine visible se situe entre 380 et 780 nm. Les plages d'absorption et de réflexion du corps définiront donc sa couleur.

1. Les trois composantes fondamentales de la couleur

- **La teinte**, appelée aussi tonalité chromatique, caractérise la couleur pure, la nature chromatique sans degré de luminosité (clair ou sombre).
- **La saturation** désigne l'intensité ou la densité de la teinte. Elle est traduite par la concentration de pigments, donnant un aspect vif ou terne/pâle.
- **La luminosité** est la variable qui détermine l'aspect sombre ou clair. On peut la définir comme le degré ou ratio de blanc ou noir inclus dans la teinte. Plus le blanc est présent et plus la lumière est réfléchiée et donc la couleur apparaît claire. A l'inverse quand la part de pigments blancs diminue, la lumière réfléchiée est moindre, on se rapproche alors du noir et donc du sombre. (8,55–62)

2. Les trois composantes optiques de la couleur

- **La translucidité** correspond au degré de transparence ou de perméabilité à la lumière. La part de lumière réfléchiée par le matériau détermine sa translucidité. Si toute la lumière passe à travers le matériau, on parle de transparence. Si toute la lumière est réfléchiée par le matériau, on parle d'opacité.
- **Fluorescence** désigne le phénomène de réémission d'un faisceau lumineux à une longueur d'onde différente de celle reçue. Par exemple, un rayonnement incident ultra-violet peut être réémit dans le champ du visible en bleu.

- **L'Opalescence** caractérise l'aspect laiteux, nacré, aux reflets irisés résultants de la variation de couleur selon la transmission ou la réflexion de la lumière. (8,55–62)

3. La couleur d'une dent

a. Rôles des tissus dentaires

L'émail, qui constitue la couche externe de la dent, lui donne ses caractéristiques de translucidité et d'opalescence. La structure amélaire présente une translucidité très élevée qui résulte du très fort degré de minéralisation du tissu. La lumière y est peu réfléchi mais principalement transmise au travers du tissu induisant une baisse de sa luminosité. Cette couche module donc également le degré de luminosité de la dent dans son ensemble. Plus l'émail sera minéralisé, plus il sera translucide et laissera passer les rayons lumineux dévoilant la dentine sous-jacente. De plus, la luminosité globale de la dent sera d'autant plus importante que l'épaisseur d'émail sera importante. Ceci explique, entre autres, pourquoi une dent jeune, présentant une forte épaisseur d'émail, est nettement plus lumineuse qu'une dent âgée qui a vu son volume d'émail diminuer avec le temps.

La dentine, située en couche intermédiaire entre la pulpe et l'émail, donne les caractéristiques de tonalité chromatique et de saturation. De par sa structure tubulaire et moins minéralisée que l'émail, la dentine est plus opaque et saturée (63,64), c'est-à-dire qu'elle laisse moins passer la lumière et a plutôt tendance à la réfléchir. Ainsi, l'agencement structurel du tissu induit à la fois une absorption sélective et aussi une réflexion, ce qui va lui donner sa teinte.

On peut distinguer les dentines primaires, secondaires et tertiaires. La dentine primaire est peu minéralisée et plus organique, elle est donc moins translucide, ainsi on observe une forte luminosité et opacité chez les jeunes populations. La dentine secondaire est plus minéralisée et donc plus translucide. L'apposition de dentine secondaire associée à la sclérose des tubulis ou canalicules permet de comprendre

l'aspect moins lumineux et plus saturé des dents des personnes âgées. La dentine tertiaire est la plus saturée, mais elle est concentrée sur les zones réactionnelles.

La pulpe est la partie organique vasculo-nerveuse centrale, de couleur rouge. Dans le cadre des dents vitales, on ne peut percevoir sa teinte rosée que lorsque la chambre camérale est très importante chez les sujets jeunes.(8,57,58,60,65)

b. Spatialisation

Dans l'espace buccal

Les différents groupes de dents possèdent des couleurs différentes selon leur nature chromatique ou leur positionnement dans la cavité buccale. De manière générale, le secteur antérieur maxillaire est plus jaune que le secteur mandibulaire. Les dents les plus saturées étant les canines maxillaires devant les incisives latérales et centrales (l'ordre étant inversé entre terme de luminosité).

D'autre part la position de la dent modifiera la perception de sa couleur. Des éléments proches de l'œil apparaîtront plus imposants et lumineux, alors que des éléments plus éloignés paraîtront plus sombres. De plus les dents postérieures seront plus concernées par la baisse de luminosité induite par l'ombrage des lèvres. (8,56,57,61)

Dans l'espace dentaire

Les couleurs, les structures et les surfaces ne sont pas uniformes au sein d'une dent. Cette complexité résulte de la composition, de la répartition des différents tissus dentaires, des formes, des états de surface et des différentes épaisseurs entre les tissus, le tout jouant ainsi sur les axes de réflexion. Des subtilités individuelles comme les périkymaties, les petites tâches ou spots, les défauts de structure (fêlures) peuvent aussi en modifier l'aspect.

On remarque de manière générale une saturation croissante et une baisse de la luminosité en direction cervicale. Cette opacité des deux tiers cervicaux résulte de la réflexion lumineuse du noyau dentinaire. Dans le tiers incisal, on observe une translucidité croissante en direction du bord libre, résultant de la transmission lumineuse de l'émail beaucoup plus épais. (8,56,57,61)

II. Les méthodes de prise de couleur actuelles

1. Teintiers

Cette technique est la plus ancienne et la plus répandue, elle repose sur la comparaison visuelle directe entre les dents du patient et les échantillons de couleurs étalons du teintier. On peut citer comme exemples les teintiers VITA Classical, Chromascop d'Ivoclar-Vivadent, Vita 3D master. Cette méthode présente comme avantage d'être peu onéreuse, simple d'utilisation et rapide. Toutefois cette méthode présente aussi de nombreuses limites.

La limite principale est la subjectivité liée à l'opérateur. L'expérience et l'expertise de l'opérateur influent sur l'analyse des structures internes, des variations de couleurs, des artefacts, et donc sur le résultat. De plus des facteurs comme l'humeur, le stress, la fatigue oculaire liés au contexte individuel du praticien peuvent altérer sa performance (66–68). On peut également évoquer le phénomène de métamérisme, où la vision humaine ne parvient pas à distinguer deux couleurs alors que leurs spectres physiques sont différents.

On remarque également une forte dépendance à l'environnement et aux conditions d'enregistrement. La lumière ambiante, les ombrages, les reflets et les variations périphériques de la couleur des lèvres ou de la peau peuvent altérer la perception de la couleur. Toutefois l'utilisation de modes d'éclairage spécifiques et de contrasteurs peuvent permettre d'améliorer la reproductibilité des conditions.

L'utilisation de teintiers physiques est aussi un facteur limitant dans l'analyse de la couleur. Ce sont des systèmes discontinus avec un nombre limité de références. Ils présentent une fourchette de couleurs limitée avec des précisions variables. L'ensemble des couleurs dentaires possibles ne sont donc pas couvertes. De plus les matériaux étalons peuvent être vulnérables à l'usure, ce qui implique une possible perte de justesse des étalons dans le temps.

Aux vues de ces facteurs, la méthode de relevé de la couleur conventionnelle par teintier semble présenter des limites non négligeables en termes de reproductibilité, de précision, d'objectivité et de possibilités. (56,58,60–62,66–69)

2. Techniques numériques

a. Colorimètre

Le colorimètre, appelé également colorimètre à stimuli, détermine une couleur par ses coordonnées trichromatiques. L'appareil mesure, au travers de filtres correspondants, la réflexion lumineuse bleue, verte et rouge de l'objet ciblé. Avant le relevé, un étalonnage du blanc est nécessaire. Ces données colorimétriques sont données en coordonnées CIE Lab.

b. Spectrophotomètre

Le spectrophotomètre, appelé également colorimètre spectral, émet sa propre source lumineuse et effectue une mesure spectrale (non limitée à la trichromie) de l'énergie lumineuse transmise ou réfléchi. On écarte ainsi l'influence de l'éclairage ambiant. Les mesures sont également converties en coordonnées CIE Lab. (56,58,60–62,70,71)

c. Avantages et limites

Des études ont montré que les systèmes numériques sont plus performants que la méthode visuelle conventionnelle, offrant des résultats plus fiables, précis et reproductibles. Le colorimètre présente l'avantage d'être modérément onéreux, faiblement encombrant et assez efficace. Le spectrophotomètre souvent considéré comme le gold standard reste le système le plus précis, avec une reproductibilité plus élevée, mais on observe tout de même des erreurs liées à la taille de la fenêtre d'enregistrement qui est réduite. On retrouve également des imprécisions liées aux courbures, à la proximité gingivale et à la translucidité des tissus dentaires. De plus le spectrophotomètre est un équipement au coût élevé. (58,69,71–75)

3. Caméras optiques

Les caméras optiques ou technologies CFAO se sont démocratisées dans les cabinets et la technologie est toujours en progrès. Toutefois la validité d'une fonction de relevé de la couleur intégrée à l'enregistrement de l'empreinte optique est encore discutée. La technologie est prometteuse mais présente peu de recul et de références, les premières données indiquant des résultats différents des spectrophotomètre. On observe une tendance à la surévaluation de la luminosité et des relevés opérateur-dépendants. La caméra optique ne semble donc n'être qu'une aide à l'analyse de la couleur mais qui nécessite malgré tout encore d'être associée à d'autres techniques. (56,58,60–62,76–78)

III. Analyse de la couleur sur une photographie numérique en utilisant le système CIE Lab

1. Méthode de relevé sur photographie numérique

L'idée générale consiste à relever la couleur à partir d'une photographie numérique préalablement calibrée grâce à un logiciel de traitement d'image. Des clichés intra-buccaux sont réalisés, avec un étalon placé sur le même plan et jouxtant le bord libre des dents cibles. Ces photographies numériques sont calibrées dans le logiciel de traitement d'image en prenant comme référence la carte étalon. Le relevé se fait ensuite directement sur la photo, en coordonnées CIE Lab, en utilisant un colorimètre numérique informatique.

La société Clarity Dental Corporation a développé le logiciel Clear Match permettant un relevé colorimétrique directement sur photographie sans calibration manuelle préalable. Toutefois ce logiciel reste imprécis et est de plus référencé sur les teintiers du commerce avec tous les travers et les limitations que nous avons déjà abordées. (62,69)

En 2017, une étude a décrit un protocole baptisé eLabor_aid. L'idée est venue en cherchant à améliorer la communication avec le prothésiste dans le relevé de couleur pour mieux l'aider à surmonter l'intégration de couleur d'éléments en céramique, comme une simple incisive centrale, dans un sourire. Arriver à une parfaite correspondance des couleurs fait partie d'une des plus grandes difficultés du prothésiste. Le procédé eLabor_aid avait pour objectif d'aider à une meilleure analyse de la couleur mais également à la réalisation d'une poudre de céramique adaptée garantissant une reproduction fidèle de la couleur de la dent modèle. Il a été donc décrit les modalités de mise en pratique de cette méthode, de la photographie jusqu'à la réalisation de la céramique en passant par le relevé de la couleur. C'est en s'inspirant de cette approche et plus spécifiquement de la méthodologie d'acquisition des photos et de relevé des couleurs, que nous avons monté cette étude clinique en appliquant la méthode à l'analyse des éclaircissements dentaires (2,79).

Cette nouvelle approche dans l'enregistrement et l'analyse de la couleur bien que prometteuse reste encore à être développée. Les études actuelles sont essentiellement in vitro, réalisées sur les teintiers conventionnels. En dehors de nombreux cas cliniques, à ce jour, cette méthode manque encore d'études cliniques in vivo suffisantes pour être scientifiquement validée. La photographie reste encore un complément, et non un outil fiable de relevé de couleur par elle-même. (2,58,61,62,69,80–85)

2. La photographie en odontologie

a. Apports de la photographie

L'appareil de photographie s'est démocratisé dans les cabinets et s'est imposé comme un outil de travail à part entière du dentiste contemporain. Ses applications sont multiples :

Sur le plan de la communication : les clichés permettent au praticien de mieux communiquer avec le patient que ce soit pour lui montrer des problématiques bucco-dentaires qui le concernent directement ou lui donner une idée des perspectives thérapeutiques qu'il pourrait envisager. La photographie permet également de montrer l'évolution d'un traitement en comparant une situation initiale et le résultat final obtenu. Expliquer les choses au patient uniquement avec des mots peut parfois être contraignant et chronophage. Une photo permet d'être plus précis et surtout efficace dans les explications avec le patient et faciliter ainsi sa compréhension. De plus on peut évoquer le Smile-design qui permet de pré visualiser un résultat en retouchant une photographie, permettant ainsi de se projeter et de mieux planifier un projet esthétique avec le patient.

Sur le plan juridique et médico-légal : L'esthétique étant subjectif, il est intéressant d'avoir des images archivées dans le dossier afin de garder une trace de la situation initiale du patient justifiant le plan de traitement. Des illustrations des différentes étapes de réalisation et la progression du travail aux différents stades du traitement peuvent également s'avérer précieux en cas de litige. Dans le cas d'un éclaircissement ambulatoire, le changement de couleur étant progressif, et les patients pouvant oublier la situation initiale, il est indispensable de garder une trace pour mettre en évidence l'efficacité du traitement en comparant les clichés avant et après afin de lever le moindre doute éventuel.

Sur le plan technique : Les photographies sont des documents complémentaires aux modèles d'études et aux clichés radiologiques permettant une collecte suffisante de données avant l'élaboration d'un plan de traitement. La photographie est souvent utilisée dans la relation dentiste prothésiste en complément des éléments usuels d'une fiche de laboratoire, là aussi pour améliorer la communication entre les deux partenaires et garantir ainsi le succès du traitement. Elle permet au prothésiste d'avoir une idée précise de la situation clinique sans avoir à voir véritablement le patient. La transmission parfois même de vidéo permet de communiquer des informations très précieuses (56,58,59,59–62,86).

b. Le matériel

Boitier

Il existe trois grandes familles de boitiers : les compacts, bridges et reflex. Compacts et bridges sont les plus simples et accessibles, mais ils sont peu adaptés à la pratique odontologique. Celle-ci nécessite une approche macro, des accessoires spécifiques, une précision optique élevée et une reproduction fidèle des formes et des couleurs. Les compacts et bridges sont limités en termes de performances, de fidélité, de finesse de paramétrage manuels possibles et d'associabilité avec des accessoires. Le boitier de choix en plan rapproché est donc l'appareil reflex numérique mono-objectif ou DSLR (Digital Single Lens Reflex). Celui-ci procure une maîtrise de l'éclairage, de la déformation (en évitant le problème de parallaxe) et de la précision.

Objectif

La photographie dentaire, faisant appel à la macrophotographie, exige l'utilisation d'un objectif, ou optique, adapté au boitier pour capturer des images de qualité à très fort grossissement. Pour cela il est nécessaire d'opter pour un objectif du type macro dont la focale fixe peut varier entre 85 et 105 mm. Une telle optique permet d'avoir une image rapprochée claire et nette mais surtout sans déformation avec une distance de travail correcte. Le choix de focale est important car elle définit la distance entre le photographe et le sujet et joue sur l'efficacité ou non du flash. Ainsi, une focale supérieure sera synonyme d'un plus grand éloignement et nécessitera un équipement lumineux différent pour s'assurer une bonne exposition. A l'inverse, une focale inférieure obligerait le photographe à être trop proche du patient rendant l'apport du flash moins intéressant, avec une photo dont l'exposition risque également d'être mauvaise. Le rapport de grossissement adapté à la pratique odontologique est compris entre 1:1 et 10 :1.

Flash

Le flash utilisé lors de la photographie est une source de lumière brève, homogène, dure (non diffuse) de température neutre. Son utilisation doit permettre de s'affranchir de l'influence de l'éclairage ambiant, de supprimer les ombrages et de mettre en évidence les états de surfaces.

Les flashes simples (intégrés ou externes) ne sont pas adaptés à notre pratique. Il faut s'orienter vers le flash annulaire, ou ring flash, ou bien le flash double latéral, ou twin flash. Chacun de ces flashes présente des avantages et des inconvénients et leur utilisation sera fonction de l'effet et du résultat recherché. En effet, le flash annulaire aura plus tendance à éviter toutes les ombres mais également à atténuer tous les reliefs et les états de surface. Les flashes latéraux ont pour avantage de donner du relief à la photo en faisant sortir les états de surface et les lignes de transition ce qui peut être très intéressant surtout pour une documentation à visée esthétique.

Filtres polarisants

Les filtres polarisants ne sont pas une systématique et ne font donc pas partie du minimum à avoir pour faire de la photographie dentaire. Il s'agira d'en faire usage selon la technique considérée en fonction des nécessités d'analyse et de diagnostic. Ils se positionnent sur les flashes et sur l'objectif avec une orientation différentielle de 90°. Cette double polarisation va ainsi permettre de supprimer les reflets spéculaires de l'émail. En effet, les filtres sur le flash vont filtrer la lumière incidente issue du flash et cette dernière sera filtrée une deuxième fois par le filtre présent sur l'objectif après avoir frappé la cible. On obtient ainsi la double polarisation permettant une analyse totalement différente comparée à une photographie classique. (2,86,87).



Figure 4 : Filtres polarisants montés sur différents objectifs et flashes (2)



Figure 5 : Photos intrabuccales comparant la prise sans filtres polarisants (sur la gauche) et avec (sur la droite). Courtoisie du docteur Ali SALEHI.

Étalon

Un étalon placé à côté de la dent lors de la prise de cliché permet d'avoir une référence de couleur. Cet étalon peut être issu d'un teintier si l'objectif est de comparer ou de faire correspondre les couleurs. Mais dans le contexte de notre étude, nous avons utilisé une carte de gris comme c'est le cas en photographie professionnelle. Cette carte permettra ensuite de calibrer la balance des blancs en post traitement de l'image. Ce point est important car le recours à une autre source lumineuse que la lumière ambiante lors d'une prise de photographie implique de prendre en compte ce réglage supplémentaire. Cette balance va impacter directement l'aspect plutôt froid ou chaud de la photo, l'objectif étant de rendre l'image telle qu'elle est perçue par l'œil dans la réalité. Cette carte sera donc la cible étalon faisant référence pour le blanc et dont les coordonnées du gris sont connues : Lab (79 ;0 ;0).

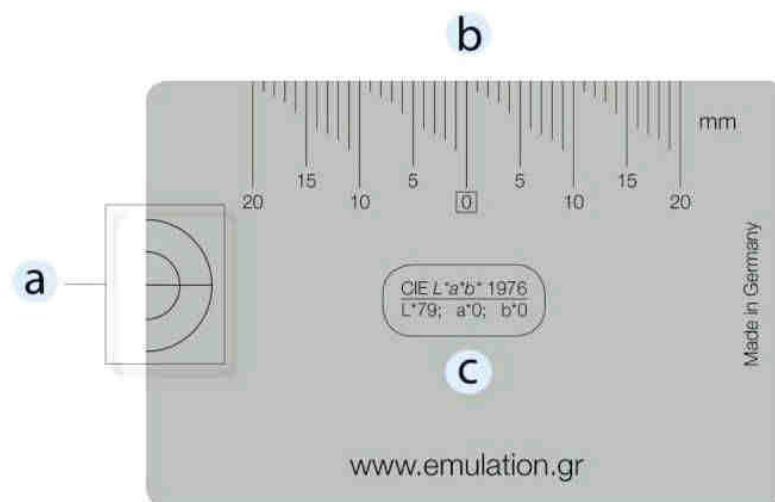


Figure 6 : Carte étalon des gris pour la photographie dentaire (2)

Écarteurs

Les écarteurs ont pour fonction de repousser les lèvres et les joues. Ils peuvent être simple ou double et sont souvent translucide afin de ne pas interférer avec la prise de vue. Ils assurent un meilleur accès à la lumière évitant les interférences et les ombrages liés aux lèvres. Pour les secteurs postérieurs ou des vues occlusales voire linguales, des miroirs intra-buccaux seront également nécessaires. Dans le cadre de notre étude nous avons utilisé des écarteurs noirs (Retrax – Emulatoin S. Hein) pour limiter un maximum toute réflexion autre que celle provenant des dents pour être le plus juste possible dans notre analyse.

c. Paramètres

Afin d'optimiser la capture et la standardisation, des réglages spécifiques doivent être appliqués en mode manuel. Il s'agit de calibrer l'exposition qui est la résultante des paramètres suivants :

- **La sensibilité ISO** est la sensibilité du capteur à la lumière. Elle est également liée à la qualité de la photo. Un ISO faible de 100 ou 200 va permettre une prise de vue avec un minimum de bruit ou grain. En contrepartie la source de lumière devra être suffisamment puissante.
- **L'ouverture** correspond au diamètre du diaphragme et se mesure en nombre f. Plus cette la valeur du chiffre est élevée et plus l'ouverture est petite. Ce paramètre va conditionner à la fois l'apport de lumière jusqu'au capteur et la profondeur de champ. Cette profondeur correspond à la zone de netteté en avant et en arrière de la zone de mise au point. Idéalement un paramétrage entre f22 à f25 va assurer une profondeur de champ idéale. Toutefois la petite ouverture va limiter grandement l'apport de lumière ce qui va encore nécessiter la contrepartie d'une source de lumière efficace. Ce paramétrage présente également l'avantage d'obtenir une photo sans aucune influence de la lumière ambiante mais uniquement de la source de lumière provenant du flash ce qui garantit une reproductibilité dans la calibration quel que soit le moment de la prise de vue.
- **La vitesse d'obturation**, appelé aussi temps d'exposition ou de pose, correspond à la durée d'exposition du capteur à la lumière après le déclenchement. Elle est exprimée en fraction de secondes et fait référence à la vitesse à laquelle l'obturateur s'ouvre et se referme. Plus cette vitesse est élevée plus la durée d'exposition est faible. Un paramétrage autour de 1/160s est un bon compromis entre apport de lumière et absence de flou lié au mouvement du praticien ou du patient au moment de la prise de vue. Ce temps étant très court, encore une fois la contrepartie d'une source de lumière efficace à déclenchement rapide est indispensable.

L'utilisation du flash en mode automatique ou TTL (Through the Lens) est possible, elle permet une adaptation autonome de l'intensité à la distance. Ce paramètre facilite les réglages du flash et permet une prise de vue suffisamment bonne. Dans le cadre de notre protocole l'utilisation de filtre de polarisation croisée a tendance à réduire grande l'apport final de lumière au capteur. Ainsi pour s'assurer une lumière suffisante et étant donné que la photo doit faire l'objet d'un post traitement, le flash est réglé en mode manuel à pleine puissance.

Le format numérique d'enregistrement à choisir est le format RAW et non JPEG afin de garder un maximum d'information avant le post traitement. En effet, le format RAW est le format brut non compressé, comportant l'ensemble des informations fournies par le capteur. Le format JPEG est compressé et figé avec une limitation des informations initiales. Faire du post traitement sur du JPEG remet en question la justesse d'une calibration reproductible ce qu'il faut absolument éviter dans le cadre de notre étude. (2,56,58–62)

3. Espace de couleur CIE Lab

a. Définition

CIE Lab est une approche physique, corrigée par les données de l'anatomie oculaire et de la psychométrie, de caractérisation chromatique des surfaces. Elle permet de définir une couleur, objectivement et non subjectivement, en se basant sur un étalon. (58–62,88–90). CIELAB ou L^*a^*b CIE est un espace de couleur développé en 1976 sur la base de CIE XYZ. CIE désigne la commission internationale de l'éclairage qui a développé ce système. Une couleur est caractérisée par ses coordonnées notées sous le format (L,a,b), celles-ci correspondent aux trois valeurs de mesures dans le système :

- L désigne la coordonnée de luminance ou clarté sur l'axe L ou noir- blanc sur une échelle de 0 à 100 (L=0 correspondant au noir et L=100 correspondant au blanc)

- a^* est la coordonnée au sein de l'espace chromatique sur l'axe $[-a^*, +a^*]$ ou vert-rouge sur une échelle allant de -127 à 128. Un a^* positif indique donc la quantité de rouge dans la couleur, alors qu'un a^* négatif reflètera la dose de vert.
- b^* est la coordonnée au sein de l'espace chromatique sur l'axe $[-b^*, +b^*]$ ou bleu-jaune sur une échelle allant de -127 à 128. Un b^* positif indique donc la quantité de jaune dans la couleur, alors qu'un b^* négatif reflètera la dose de bleu.

b. Représentation

Cet espace peut être représentée sous la forme d'une sphère chromatique à trois dimensions. L constituant l'axe vertical et les axes a^* et b^* les deux axes perpendiculaires horizontaux. Une couleur peut donc être placée en un point précis dans cet espace au travers de ses coordonnées.

L'ensemble des couleurs possibles des dents est contenu dans un espace délimité de cette sphère chromatique. Aux vues de sa forme allongée ou rhomboïde, elle est appelée banane chromatique. Cette zone est placée assez haut sur l'axe L et est assez étendue verticalement (donc sur l'axe L), illustrant ainsi le niveau important de luminosité et sa variabilité élevée (physiologique ou pathologique). Les dents ayant une couleur dé-saturée se situent dans une zone de la banane proche de l'axe L. Dans le sens transversal la banane est étroite car la variation de saturation dentaire est faible. Elle se situe entre $+a^*$ et $+b^*$, donc entre jaune et rouge, ce qui correspond bien aux teintes jaunâtres ou orangées des dents que l'on retrouve dans la population humaine. (58,60–62,88–90)

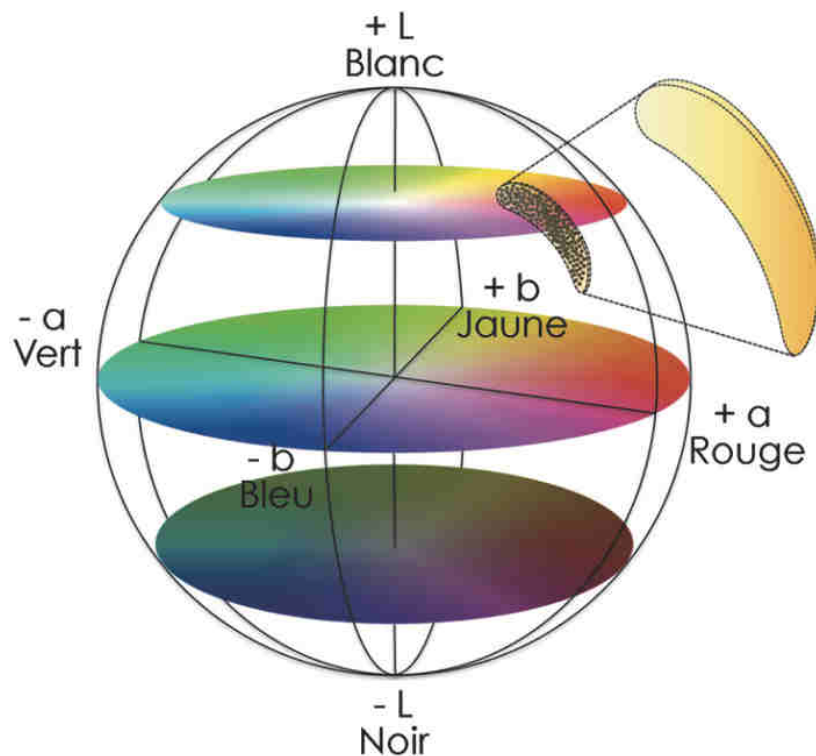


Figure 7 : Représentation de l'espace de couleur CIE Lab et de la banane chromatique dentaire en son sein (62)

c. Différence chromatique

Une couleur peut donc être placée en un point au sein de cet espace. La discrimination de deux couleurs, ou l'écart entre deux couleurs, peut être assimilée à la distance entre les deux points dans cet espace. On parle de **distance chromatique** ΔE . ΔE exprime donc la différence de deux couleurs en prenant en compte les différences entre elles pour chacun des paramètres de luminosité et de teinte. Elle se calcule selon la formule :

$$\Delta E = \sqrt{(\Delta L)^2 + (\Delta a)^2 + (\Delta b)^2}$$

Les deux couleurs à différencier sont nommés point 1 et point 2

- ΔE est la différence chromatique
- $\Delta L = L(\text{point1}) - L(\text{point2})$ correspondant à la différence de luminosité
- $\Delta a = a(\text{point1}) - a(\text{point2})$ correspondant à la différence chroma sur l'axe rouge
- $\Delta b = b(\text{point1}) - b(\text{point2})$ correspondant à la différence chroma sur l'axe jaune

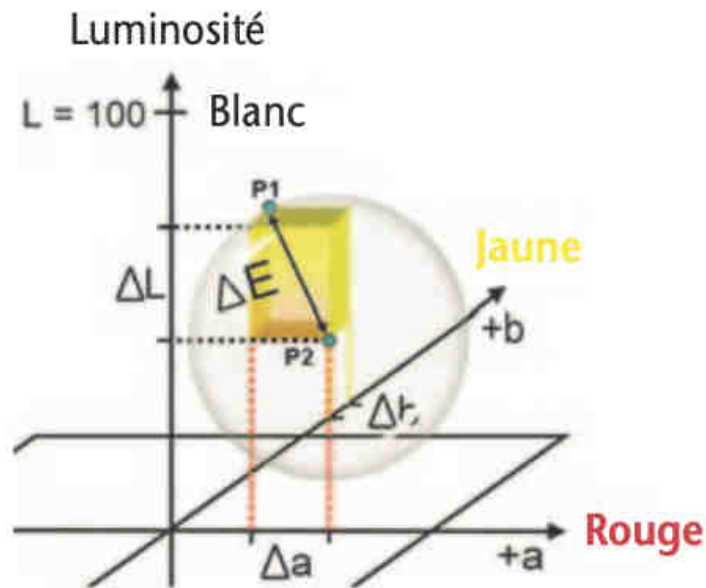


Figure 8 : Représentation graphique de la différence chromatique ΔE (88)

4. Paliers de perception

Il est important de définir des paliers de perception des variations de couleurs pour déterminer si la différence est perceptible, acceptable ou non tolérable à l'œil humain. Ces paliers sont définis par des valeurs limites de différences chromatiques ΔE . Dans le cadre de restaurations dentaires, la plage acceptable correspond aux situations où on pourrait accepter de garder la restauration en l'état. Une plage non tolérable correspondrait à une situation nécessitant de refaire absolument le soin pour des raisons d'échec d'intégration esthétique. Dans le cas d'un traitement par éclaircissement dentaire, il devient intéressant de pouvoir identifier, grâce à ces valeurs, un changement entre les situations préopératoire et postopératoire. Cet intérêt concerne surtout les situations de doute où la subjectivité peut remettre le résultat en question, la lecture d'un palier de perception permet de donner une réponse objective à l'effet du traitement.

La détermination des valeurs ΔE limites pour les seuils de perceptibilité, de tolérance et d'acceptabilité ont fait l'objet d'études multiples. On considère les seuils atteints quand 50% des observateurs perçoivent, acceptent ou ne tolèrent pas l'écart de couleur. La revue de littérature de Khashayar de 2014, établit le seuil minimal de perceptibilité à $\Delta E=1$ et à $\Delta E =3,7$ le seuil maximal d'acceptabilité de l'écart de couleur

(91). De manière générale on peut se baser sur les normes DIN 5033-1 de l'AFNOR qui définissent les valeurs paliers de ΔE dans le cadre de la vision humaine. (56,59,69,91–95) Ces seuils peuvent varier selon l'observateur. Par exemple un œil entraîné de chirurgien-dentiste sera plus discriminant que celui d'un patient. (96)

ΔE	Évaluation de la différence de couleur
0 à 0,5	Différence non perceptible
0,5 à 1,5	Différence presque non détectable
1,5 à 2	Différence faible
2 à 4	Différence notable
4 à 5	Différence non tolérable

DIN 5033-1, paragraphe 18

5. Autres systèmes colorimétriques

a. Systèmes bidimensionnels

De nombreux systèmes de caractérisation chromatique ont été proposés. Des systèmes à deux dimensions existent depuis le 17^{ème} siècle. On peut citer le cercle chromatique de Newton de 1671 basé sur le principe des couleurs additives et le triangle de Maxwell de 1857 basé sur la trichromie. Ces systèmes sont simples mais peu précis.

b. Les premiers systèmes tridimensionnels

Le Cylindre de Munssel de 1909 est l'une des premières représentations à trois dimensions. Ses coordonnées sont notées (L-C-H) en anglais correspondant à Lightness-Chroma-Hue, ou (L-S-T) en français correspondant à Luminosité-Saturation-Teinte ou pureté. La représentation de ce système est un cylindre dont l'axe central vertical caractérise le degré de luminosité. C'est donc l'axe blanc-noir sur lequel la coordonnée L est relevée. La coordonnée S correspond à la distance de l'axe L sur un rayon. La saturation ou pureté augmentant avec la distance. Enfin la coordonnée T

de teinte est relevée sur le cercle externe de la tranche sphérique choisie et définit la nature chromatique en choisissant le rayon.

c. Les systèmes tridimensionnels développés par la CIE

La CIE ou commission internationale de l'éclairage, a développé de nombreuses itérations et variantes de systèmes de représentation des couleurs.

(58,60–62,88,90,97)

En 1931, la CIE développe le système CIE XYZ, appelé aussi cornet de couleurs, sur lequel sera basé CIE Lab. Ce système est une reformulation des valeurs trichromatiques RGB de Maxwell, il se base sur la perception de la vision humaine. L'œil comporte trois types de cônes ou photorécepteurs (S, M et L), chacun étant sensible à un stimuli d'une plage spectrale différente. Les trois paramètres x, y et z correspondent aux valeurs des degré d'intensité de chacun des stimuli (principe additif des couleurs). La représentation de cet espace prend la forme d'un fer à cheval avec le point de blanc absolu en son centre. Ce diagramme empêche l'obtention simple des écarts chromatiques sous forme de distance, la répartition des couleurs n'étant pas homogène.

En 1976, le système CIE Luv a été développé en parallèle de CIE Lab. Ce sont des systèmes assez similaires bien que CIE Luv soit non sphérique et surtout indiqué pour caractériser des écrans.

En 1994, le système CIE LCH est proposé, il représente la même chose que CIE Lab mais dans des unités différentes. Son fonctionnement se rapproche de celui du cylindre de Munsell en utilisant des coordonnées cylindriques ou angulaires à la place des coordonnées rectangulaires. La conservation de la représentation de CIE Lab et de sa répartition des couleurs est donc possible mais le calcul de l'emplacement au sein de l'espace sera différent. La conversion entre LCh et Lab se fait en conservant la valeur de L mais le calcul de C (Chroma) et h (hue) se fera selon les formules suivantes sur la Figure 9.

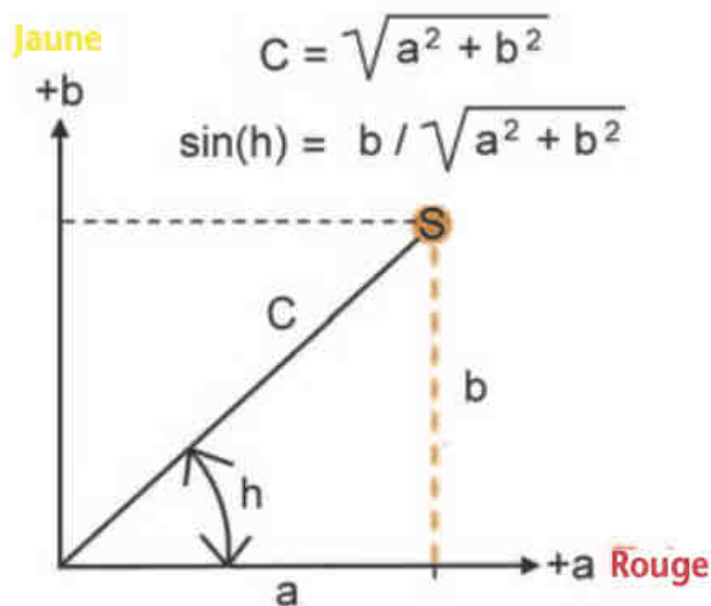


Figure 9 : Représentation graphique du système CIE LCh (88)

En 2001, un système plus sophistiqué CIEDE2000 a été développé. Ce système propose une nouvelle formule de calcul plus précise des différences de couleurs en corrigeant les défauts des systèmes précédents. Cette formule est plus complète (annexe1), car elle prend en compte l'importance relative des facteurs luminosité, saturation et teinte et introduit des coefficients de pondération liés au domaine d'application. (97–101)

d. Choix du système CIE Lab

Les représentations anciennes à deux dimensions sont limitées en termes de caractérisation de la luminosité et de concordance avec la perception de la vision humaine. Or le paramètre de luminosité est capital dans le domaine dentaire.

Les systèmes CIE XYZ et Luv sont peu adaptés à la pratique dentaire puisque la détermination simple de la différence chromatique n'est pas possible. Le système CIE LCH est proche du système CIE lab, le passage de l'un à l'autre pouvant se faire aisément via des formules de conversion. Ces systèmes sont donc soit des variantes de CIE Lab ou des itérations plus anciennes et moins précises. Le système CIDE2000 lui est plus performant et précis que CIE Lab, mais il est aussi plus complexe.

Parmi les systèmes CIE, CIE Lab semble donc rester celui combinant efficacité, précision, concordance anatomique et simplicité d'utilisation. De plus le système CIE Lab a déjà été largement adopté dans le domaine odontologique en tant que système de référence.

6. Avantages et comparaison avec les méthodes conventionnelles de relevé de la couleur

La prise de couleur directe par photographie via CIE Lab permet de s'affranchir des limites du teintier en écartant les facteurs de dépendance à l'opérateur, de condition de prise de couleur et du teintier lui-même. Les coordonnées sont des données numériques objectives chiffrées beaucoup plus précises et parlantes que des échelles subjectives de prise de couleur visuelle. De plus le système CIE Lab est continu, uniforme et sans limitation procurant une palette plus juste, précise et non restrictive en matière d'identification de la couleur. Des études in vitro ont déjà mis en évidence la supériorité de ce système sur la méthode conventionnelle de relevé visuel en termes de précision et de fiabilité. (85,102)

A défauts d'autres moyens numériques, qui demandent d'acquérir un équipement supplémentaire dédié uniquement à la prise de couleur et nécessitant souvent une utilisation combinée avec une autre méthode, la photographie dentaire pourra être utilisée comme méthode unique d'acquisition et d'analyse de la couleur.

Notre méthode s'appuie sur des outils simples : un appareil photographique, ses accessoires, un logiciel de traitement d'image et un colorimètre numérique (tous deux disponibles dans un ordinateur). L'idée qu'une bonne communication de la couleur avec le laboratoire de prothèse passe nécessairement par la photographie dentaire étant déjà bien admise, et les appareils photographiques faisant déjà partie de l'équipement courant d'un cabinet dentaire, cette nouvelle méthode d'acquisition et d'analyse de la couleur semble naturellement prendre tout son sens. Sans oublier le coût non négligeable d'un spectrophotomètre dont l'équipement implique un investissement supplémentaire.

Au niveau de l'analyse de la couleur, le colorimètre mesure la lumière réfléchie et ne possède pas de source lumineuse propre. Toute l'information provient donc exclusivement de l'élément étudié. Ceci peut induire une variabilité des résultats liée à la lumière environnante à moins de s'équiper avec des accessoires supplémentaires garantissant un calibrage reproductible de la lumière. Le spectrophotomètre émet une lumière propre, mais sa justesse peut être altérée dans les zones qui présentent des reflets, une translucidité importante ou des surfaces courbées. La technique de photographie avec des filtres de polarisation croisée élimine toute la réflexion spéculaire de l'émail et efface ainsi toute forme d'état de surface pouvant apporter des biais dans une analyse reproductible de la couleur. De plus, un montage tel qu'il est fait pour la photographie dentaire, faisant appel à des flashes, s'affranchit de l'influence de l'éclairage ambiant. Cela favorise d'autant plus la notion de reproductibilité des conditions de prise de photographies.

Le relevé de couleur par caméra optique permet d'optimiser le temps en intégrant le relevé à la prise d'empreinte, limitant par la même occasion les oublis. Ces données CFAO peuvent être ensuite directement envoyées au laboratoire. Toutefois cette technique présente encore peu de recul, et sa fiabilité comme outil de prise de couleur sans l'associer aux autres méthodes reste à prouver. Les caméras numériques se démocratisent progressivement au sein des cabinets, mais seul encore un faible pourcentage des praticiens en font usage aujourd'hui. (58,60–62,69,73,76–78)

7. Protocole clinique et mise en pratique

Prise du cliché photographique

La mise en pratique de ce protocole se décompose en plusieurs temps. La première étape du relevé de la couleur est la prise de clichés photographiques avec le boîtier, les accessoires (objectif, flashes, filtres polarisants et écarteurs), paramètres et méthodes recommandés. Il faut positionner le patient de face sous lumière naturelle (sans le scialytique). La dent et la carte étalon doivent être parallèles et équidistants de l'objectif, on appose donc la plaquette étalon sur le même plan que la dent cible. On positionne de manière centrée le bord comportant la marque de visée au contact du bord libre des dents cibles.

La photographie doit limiter son cadre sur environ 4 cm, soit quatre à six dents, ceci afin d'obtenir les détails morphologiques et chromatiques des surfaces. Le rapport de grossissement de l'objectif sera de 1 :1 (soit taille réelle), celui-ci est adapté à la prise rapprochée des dents alors qu'un rapport de 10 :1 sera réservé pour des clichés plus larges tel un visage.(59)

Post traitement de l'image

Le cliché numérique brut obtenu au format RAW/CR2 sera transféré sur un ordinateur et fera ensuite l'objet d'un post traitement ou calibration dans un logiciel de traitement d'image du type Photoshop. L'étalonnage sera obtenu depuis la carte étalon, dont les valeurs Lab (79 ;0 ;0) sont connues. L'objectif ici est d'obtenir une image correspondant au réel.

- Choix du profil : Les boîtiers possèdent des sensibilités spectrales différentes selon les modèles, il faut donc appliquer le profil adéquat pour compenser cette variabilité.
- Calibrage du blanc (valeur a et b) : Sélectionner l'outil ou pipette de balance des blancs et cliquer dans un des segments concentriques du marquage de ciblage de la carte, il s'agit de garder la même zone pour toutes les actions. Les valeurs de a et b sont alors mises à 0.
- Calibrage de l'exposition ou luminosité (valeur L) : Placer le pointeur sur ce même segment et on vient faire varier la valeur d'exposition et donc la valeur de L. Modifier jusqu'à obtenir la valeur L=79.
- Enregistrement de l'image : A ce moment les coordonnées mesurées dans le segment de la carte étalon sont donc bien (79 ;0 ;0) ce qui correspond à sa nature chromatique réelle. Une fois le post traitement terminé, l'image calibrée est enregistrée au format JPEG. (2)

Grille de zonage

Dans le cas de de l'éclaircissement, l'apposition d'une grille de zonage sur l'image après son post traitement est intéressant, car elle permet de cibler de manière reproductible une zone de la dent afin d'en suivre l'évolution. La zone incisale présente une translucidité accrue et donc une variabilité liée au fond derrière la dent. La zone cervicale présente une saturation plus élevée, sous l'influence notamment de la

dispersion de lumière de la gencive. La zone ou case centrale de la dent est la plus représentative de sa couleur, le relevé doit donc se faire ici. Au sein de cette zone il faut faire attention à éviter les plages colorées localisées. On peut citer comme exemple les taches blanches opaques et les reflets qui sont à éviter car il y a un risque de surévaluation de la valeur de luminosité.

Relevé des données colorimétriques

On ouvre l'image calibrée au format JPEG, puis à l'aide d'un logiciel de colorimètre numérique on relève directement les données chromatiques Lab sur la zone voulue. La valeur d'ouverture doit être réglée à la largeur maximale lors de ce relevé dans le but d'obtenir une moyenne couvrant une zone suffisamment large, ceci afin d'éviter une erreur due à une variation locale non représentative.

L'obtention de données numériques objectives permet au praticien et au patient de suivre précisément l'évolution du traitement. Ce sont les valeurs ΔE qui nous intéressent particulièrement car elles illustrent la différence de couleur en synthétisant les différences de luminosité, de saturation et de teinte. Il faut donc procéder aux calculs de ces deltas depuis les coordonnées à l'aide des formules. L'objectif ici n'étant pas la concordance des couleurs mais la mesure des variations dans le temps.

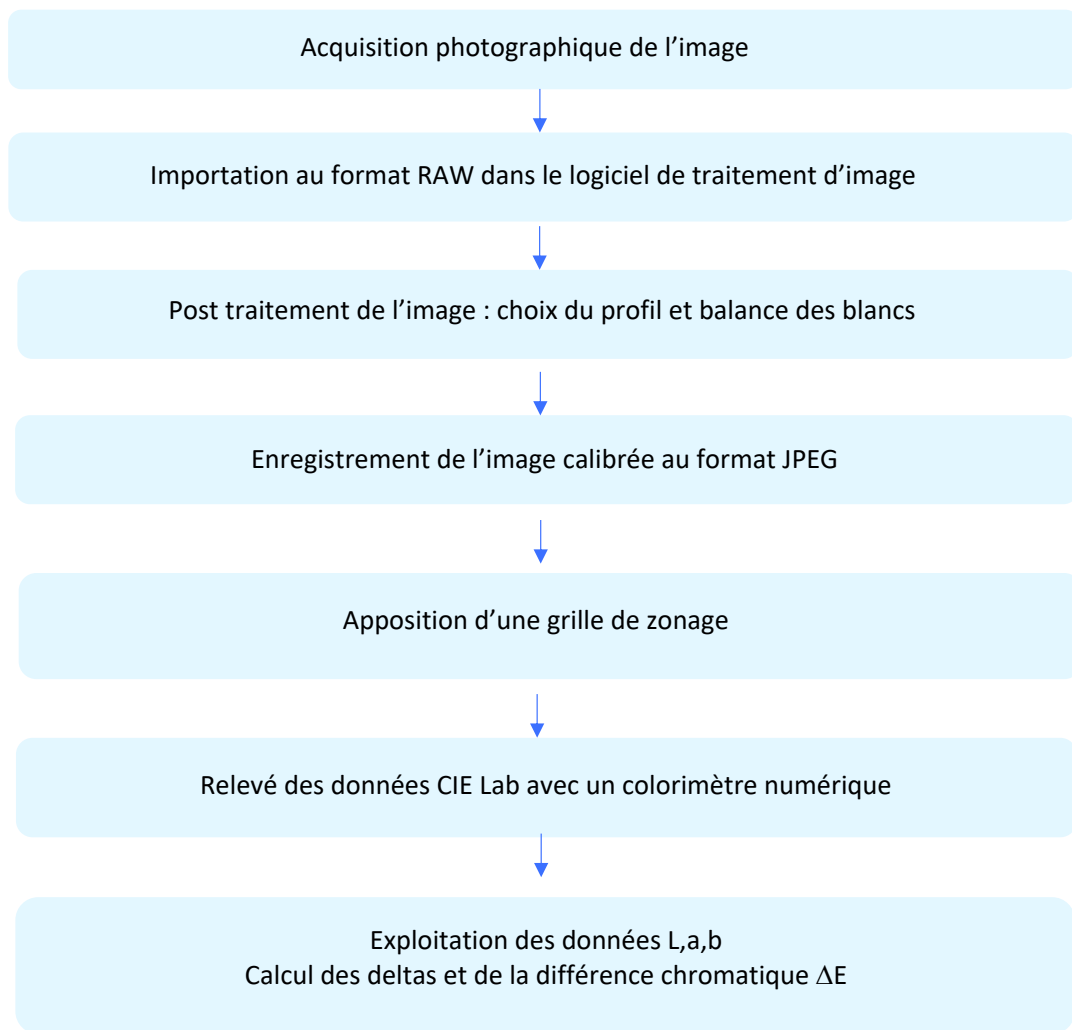


Figure 10 : Étapes du protocole de relevé de couleur par photographie inspiré de eLab appliqué à l'éclaircissement

CHAPITRE 3

ETUDE CLINIQUE DU LE RELEVÉ DE LA COULEUR PAR PHOTOGRAPHIE DANS LE SUIVI D'UN ECLAIRCISSEMENT EXTERNE

I. Résumé

1. Objectifs

L'objectif principal de cette étude est l'analyse de la cinématique et de l'efficacité d'un éclaircissement externe ambulatoire en port nocturne utilisant du peroxyde de carbamide à 10%. La méthode d'analyse et de suivi chromatique utilisée s'inspire du protocole eLab utilisant la photographie et les outils numériques. Selon ce procédé, l'analyse de la couleur utilise le système CIE L*a*b* pour une approche objective et efficace s'affranchissant des limites d'une évaluation subjective d'un éclaircissement dentaire. L'utilisation de cette méthodologie est déjà bien décrite pour une application dans le domaine prothétique, il s'agira ici d'en déterminer la pertinence et la validité dans le cadre du suivi de la couleur pour un traitement esthétique d'éclaircissement dentaire.

Les objectifs secondaires seront l'étude des rapports et liens de causalités entre la quantité de produit utilisée et le résultat obtenu, le temps de traitement et les sensibilités, ainsi que l'impact des habitudes de vie sur le résultat et sa longévité.

2. Procédures d'autorisation des commissions

Selon la loi JARDE et les autorités compétentes qui sont les CPP (comité de protection des personnes), une recherche de catégorie 3 est une étude dans laquelle tous les actes pratiqués et tous les produits utilisés le sont de manière habituelle, sans procédure supplémentaire ou inhabituelle de diagnostic, de traitement ou de surveillance. Une recherche non interventionnelle ne requiert pas obligatoirement l'avis du CPP et l'avis du comité d'éthique, cependant il est courant de demander un avis **consultatif**.

Notre étude entre dans ce cadre, car le protocole d'éclaircissement externe, les produits et les concentrations utilisés sont classiques. Le suivi par photographies relève également de la pratique courante dans ce type de traitement esthétique. De plus l'éclaircissement et les produits utilisés sont considérés comme cosmétiques et ne relevant pas de dispositifs médicaux.

Un dossier a donc été constitué et un avis consultatif a été demandé auprès du comité d'éthique des Facultés de Médecine, d'Odontologie, de Pharmacie, des Écoles d'Infirmières, de Kinésithérapie, de Maïeutique et des Hôpitaux Universitaires de Strasbourg. De plus lors de ce type de recherche une information individuelle des sujet et une déclaration de non-opposition sont impératifs. Nous avons donc appliqué ces prérequis individuellement par oral et écrit.

II. Matériel et méthode

1. Sujets et critères d'inclusion

Dans le cadre de notre étude, 63 sujets ($n=63$) ont été inclus initialement dans le protocole. Les sujets ne devaient présenter aucune des contre-indications absolues ou relatives à l'éclaircissement externe. L'ensemble des sujets étaient âgés de 20 à 24 ans et avaient un état parodontal et une hygiène bucco-dentaire satisfaisante. Les sujets devaient être demandeur d'une prise en charge cosmétique par éclaircissement. Un document de consentement éclairé a été donné pour lecture et signé par les sujets attestant de leur acceptation à prendre part à l'étude (annexe 2). Une compliance sur les différents temps du traitement et de l'étude, la possibilité d'être suivi de manière hebdomadaire et l'absence de traitement éclaircissant antérieur récent faisaient également partie des critères d'inclusion. Le relevé colorimétrique a été fait sur les incisives centrales antérieures, maxillaires et mandibulaires, qui devaient être non pathologiques, sans restaurations et sans traitement orthodontique en cours. Un autre critère d'exclusion était également l'obligation de devoir reprendre un soin ou une prothèse dans le secteur esthétique suite à l'étude alors que le patient n'avait pas du tout prévu de refaire un ancien travail.

L'échantillon initial était de $n=63$, mais seuls les résultats d'un échantillon de $n=52$ ont été exploités. Le retrait des 11 sujets de l'étude s'explique par la non-observance du suivi hebdomadaire menant à l'obtention de séries de données incomplètes et donc non utilisables comparativement aux autres.

2. Choix de la méthode d'éclaircissement et du matériel

La technique d'éclaircissement externe choisie est la technique ambulatoire en port nocturne. Cette méthode est la plus couramment pratiquée et présente le meilleur rapport bénéfice risque. Les gouttières ont été réalisées sans réservoirs, afin d'éviter tout biais relatif à une différence de volume des réservoirs d'une dent à l'autre et d'un sujet à l'autre. D'autant que, tel que décrit dans la littérature, la présence ou non de réservoir n'a pas d'impact sur le résultat final. L'idée ici était de faciliter la réalisation des gouttières d'un point de vue purement pratique et pouvoir également comparer des situations identiques.

Le principe actif choisi est le peroxyde de carbamide à 10% (Polanight – SDI). Ce produit est le plus couramment utilisé et présente un excellent rapport bénéfice risque. L'hypersensibilité passagère est le seul effet indésirable. Il a été préféré au 16% car celui-ci offre des résultats équivalents mais avec un taux de sensibilité plus élevé. Du gel fluoré à libération contrôlée a également été délivré en fin de traitement (Soothe – SDI).



Figure 11 : Peroxyde de carbamide Polanight – SDI et gel fluoré Soothe – SDI

La durée de traitement retenue est de 28 jours pour faire écho à ce qui est préconisé par le fabricant, mais aussi pour se retrouver dans les mêmes conditions que d'autres expériences ayant été menées sur le sujet. Les étapes de contrôle ont eu lieu en pré-opératoire (situation initiale), puis à la fin de chaque semaine de traitement et enfin à quatre mois post opératoire. Ces étapes ont été annotées en jour de traitement, depuis le contrôle pré opératoire (J0), sous la forme J0, J7, J14, J21, J28 et J148.

Pour réaliser les gouttières, une empreinte maxillaire et une mandibulaire ont été réalisées à l'alginate (Aromafine DF III – GC) pour chacun des participants. Les modèles ont ensuite été coulés en plâtre dur (Dentaire Comète 3 – Ultima) puis taillés. Les gouttières ont été pressées à partir de plaques thermoformables de chez SDI d'un millimètre d'épaisseur avec une machine de thermoformage par aspiration (PlastVac P7 – Bioart).

3. Outils de suivi de la couleur

L'ensemble des clichés photographiques ont été réalisés selon la méthode décrite dans le protocole eLab. Un appareil photo reflex numérique a été utilisé avec :

- Un boîtier Canon EOS 70D
- Une optique macro de 100mm de longueur focale
- Le système twin flashes latéraux MT24EX de chez Canon
- Le tout équipé de filtres de polarisation croisés (Polar_Eyes)

Les réglages manuels utilisés sont les suivants :

- Ouverture du diaphragme de f/22
- Vitesse d'obturation de 1/125
- ISO de 100



Figure 12 : Boîtier Canon EOS 70D, flash Canon MT24EX, filtres de polarisation Polar Eyes apposés sur une optique macro et paramètres de réglage manuel

Une carte étalon de référence des gris (White balance – Emulation S. Hein) et des écarteurs buccaux en « C » noirs (Retrax – Emulation S. Hein) ont été employés lors de la prise des clichés.



Figure 13 : Carte étalon des gris White balance – Emulation S. Hein (gauche) et écarteurs Retrax – Emulation S. Hein (droite)

Le traitement des images a été effectué à l'aide du logiciel Camera Raw intégré à Adobe Photoshop CC 2014. Le relevé des données L, a et b a été réalisé à l'aide du colorimètre numérique natif à Mac OS X nommé « Colorimètre Numérique.app ».

III. Mise en œuvre

1. Protocole opératoire

Le protocole s'est déroulé selon la chronologie suivante :

En préopératoire

- Explication et information individuelle orale et écrite sur le traitement, son déroulement et ses risques (annexe 3)
- Examen clinique préopératoire et procédure d'inclusion/exclusion
- Signature des consentements éclairés de non-opposition (annexe 2)
- Relevé préopératoire par questionnaire sur les sensibilités éventuelles et la fréquence des habitudes alimentaires chromogènes
- Prise des empreintes maxillaire et mandibulaire à l'alginat (Aromafine DF III – GC) avec des porte-empreintes métalliques perforés du commerce



Figure 14 : Ensemble des 126 modèles coulés en plâtre dur

Travail de laboratoire

- Coulée des modèles en plâtre dur (Comète 3 – Ultima)
- Taille et préparation des modèles
- Pressée des gouttières par aspiration avec des plaques thermoformables semi rigides de 1mm d'épaisseur de chez SDI à l'aide de la PlastVac P7 de Bioart
- Découpe des limites et finition des gouttières



Figure 15 : Modèles préparés avec les gouttières découpées et pressées

Début de la phase opératoire J0

- Prise des trois clichés de la situation initiale (J0)
- Essayage des gouttières, explications orales et fiches délivrées individuellement (annexe 3)
- Distribution de deux seringues de Polanight (SDI) avec des embouts d'application pour une semaine (une seringue par arcade par semaine)

Contrôles peropératoires hebdomadaires à J7, J14, J21, J28

- Correction éventuelle des gouttières
- Relevé de la sensibilité et localisation, du nombre de nuits effectuées
- Relevé de la quantité de produit utilisé à partir de photographie des seringues
- Prise des deux clichés polarisés antérieurs
- A J28 : Conseils post-opératoires délivrés pour limiter la récurrence, distribution de seringues de gel fluoré Soothe (SDI) avec embout et explication du mode d'emploi

Contrôle après stabilisation à J148

- Relevé des habitudes de vie depuis le traitement
- Relevé de la sensibilité post-opératoire
- Notation de la satisfaction individuelle de chacun du résultat sur une échelle de 0 à 5
- Prise des trois clichés de la couleur stabilisée comme pour la situation initiale.

2. Protocoles de collecte des données

a. Données chromatiques

La collecte des données sur l'évolution de la couleur des dents a été faite par photographie. Le matériel, le cadrage, les réglages, les accessoires et les méthodes de mise en application utilisés ont été ceux recommandés dans le cadre de la pratique odontologique.

Trois clichés ont été réalisés à J0 et J148 (situation initiale et finale) :

- Secteur antérieur de l'arcade maxillaire seule de face avec l'étalon de blanc (centre Figure 16).
- Secteur antérieur de l'arcade mandibulaire seule de face en protrusion avec l'étalon de blanc (gauche Figure 16).
- Arcades complètes bimaxillaire de face en bout à bout avec une légère ouverture buccale (droite Figure 16).

Lors des contrôles intermédiaires à J7, J14, J21 et J28, seuls les deux clichés polarisés des secteurs antérieurs ont été pris.



Figure 16 : Les trois types de clichés pris lors du protocole : secteurs antérieurs maxillaire et mandibulaire polarisés, vue globale bimaxillaire

Ces clichés ont été réalisés à chaque fois par la même personne (un praticien expérimenté en photographie), avec le même matériel, les mêmes réglages, la même distance de travail, les patients positionnés de la même façon, et au même endroit au sein de l'hôpital pour l'ensemble des sujets. Ceci afin de s'assurer d'une bonne reproductibilité des conditions et permettre ainsi une analyse comparative des résultats valable.



Figure 17 : Échantillon des photographies polarisées des secteurs antérieurs

b. Données d'hypersensibilités

Le niveau des hypersensibilités a été relevé à chaque étape du protocole grâce à un interrogatoire. Chaque semaine, les patients ont indiqué l'intensité des sensibilités sur une échelle de 0 (absence de sensibilités) à 10 (sensibilité maximale non supportable). Les dents ou secteurs concernés ont également été consignés.

En cas de sensibilités conséquentes, une nuit de pause dans le traitement a été préconisée. Le nombre de ces pauses éventuelles pour chaque patient a été également relevé.

c. Données de facteurs environnementaux

En préopératoire et en contrôle post opératoire (J148), les habitudes de consommations chromogènes ont également été relevées par un interrogatoire. Pour chaque produit, la consommation a été indiquée en occurrence moyenne par jour.

d. Données de dose consommée

Afin de permettre le relevé des doses de produit d'éclaircissement consommé, il a été demandé aux participants de photographier leurs deux seringues hebdomadaires une fois la dernière application effectuée. Les patients ont reçu la consigne de consommer une seringue après l'autre au cours d'une semaine et d'utiliser uniquement les seringues destinées à cette période. La quantité de produit restant dans les seringues chaque semaine a pu ainsi être évaluée en se basant sur ces photographies.

3. Post traitement des images et préparation à la lecture

a. Calibrer l'image

Cette étape a permis de normaliser et standardiser les paramètres afin de pouvoir comparer les photos entre elles. Les clichés exploités sont ceux des secteurs antérieurs associés à la carte étalon. Les étapes de calibration sont les suivantes :

- Ouvrir les fichiers au format CR2 des photographies maxillaire et mandibulaire avec Camera Raw – Adobe Photoshop CC

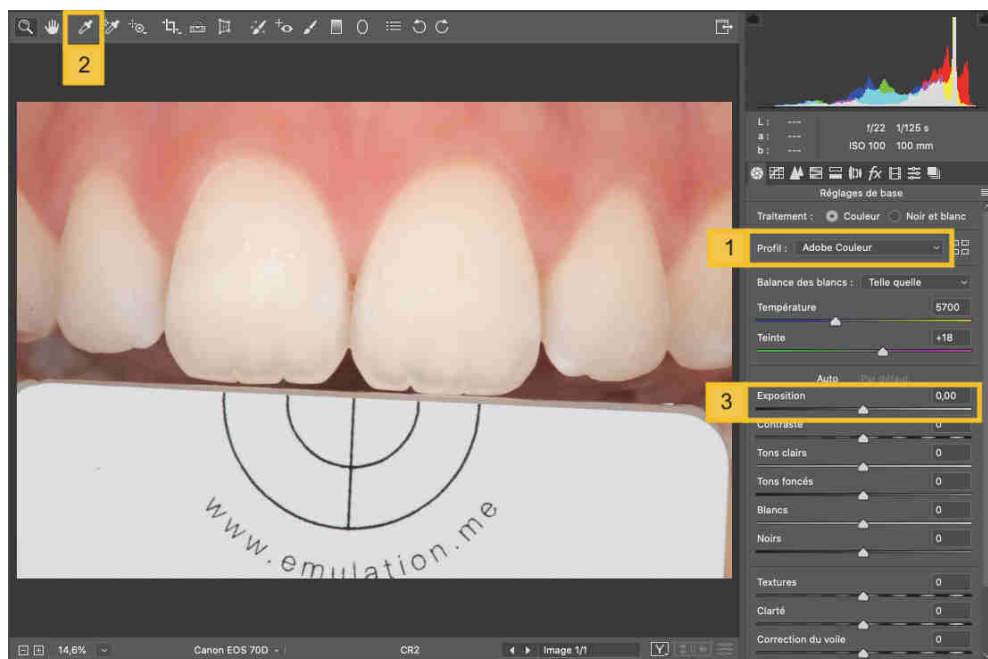


Figure 18 : Image non calibrée ouverte dans Camera Raw

- Calibrer le profil : choix de profil dans le menu déroulant correspondant à l'objectif, au boîtier et aux paramètres utilisés, dans notre cas Canon 70D 100mm ISO 100.

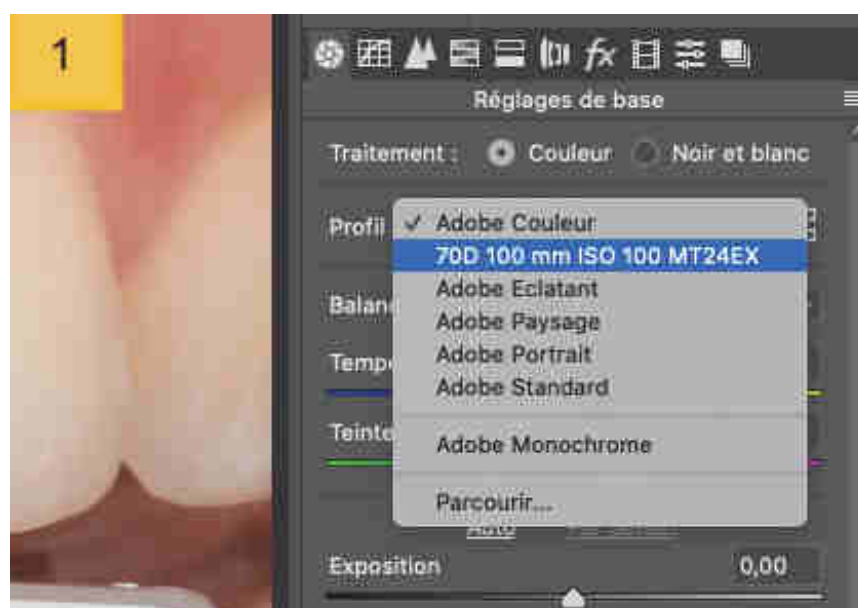


Figure 19 : Choix du profil dans Camera Raw

- Calibrer l'étalonnage du blanc : sélection de la pipette et prise de référence dans une zone qui sera toujours la même pour les différentes étapes de calibration, dans notre cas la zone du cercle large externe de la carte étalon. Cette action met a et b à 0.

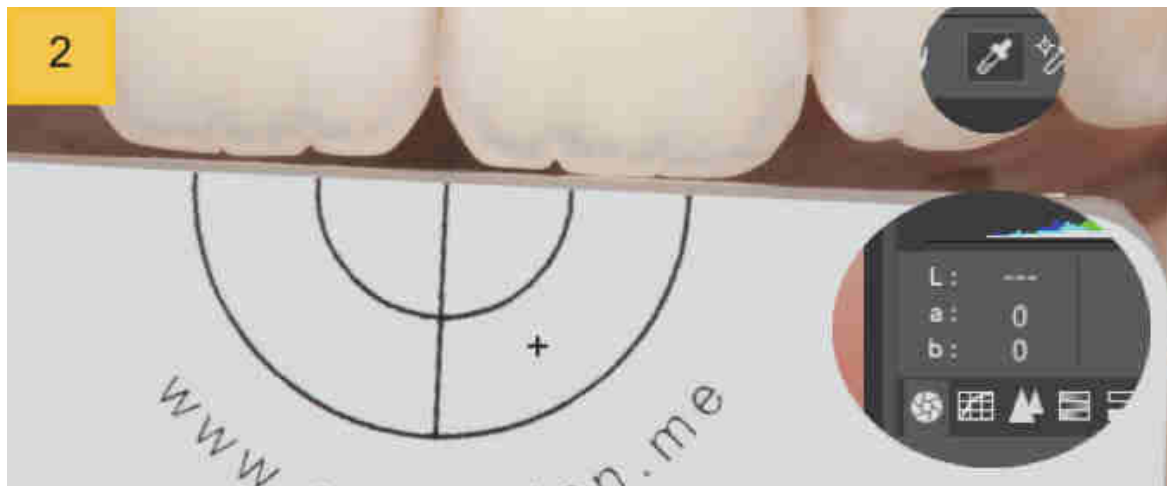


Figure 20 : Étalonnage du blanc dans Camera Raw

- Calibrer la valeur L : laisser le pointeur sur la zone de calibrage sur la carte et modifier la valeur d'exposition L jusqu'à obtenir la valeur L=79. Une fois cette opération réalisée, le lecteur doit afficher les valeurs intrinsèques de la carte étalon : L=79, a=0 et b=0.

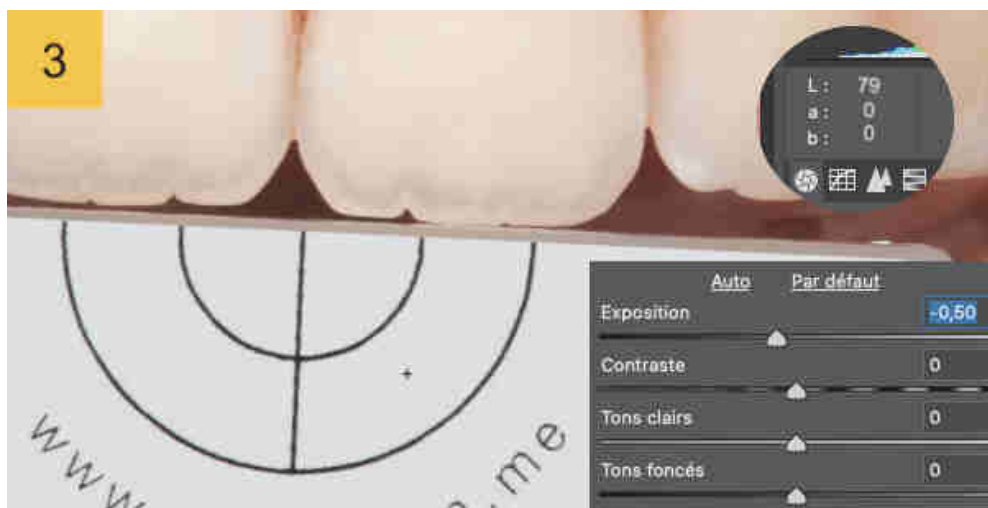


Figure 21 : Calibrage de l'exposition dans Camera Raw

- Enregistrement du fichier au format JPEG pour permettre la future analyse

b. Zonage

L'apposition de grilles sur les images permet plus de précision et une meilleure reproductibilité dans la zone de prélèvement des données sur la surface dentaire. Dans le cadre de l'étude, la même zone cible a systématiquement été utilisée.

Une grille régulière de 6x5 cases couvrant les deux incisives centrales a été apposée, soit trois colonnes et cinq lignes par dent. Ce format de grille permet une précision suffisante dans la désignation de la zone cible, tout en procurant une certaine marge de manœuvre afin d'éviter les éventuels artefacts optiques localisés.

Le choix d'une case cible centrale a été fait dans le but d'obtenir un relevé reproductible et représentatif de la couleur. Les zones incisales et cervicales qui peuvent fausser le relevé sont évités. Au maxillaire la case centrale a donc été choisie, alors qu'à la mandibule la case désignée est celle un cran plus incisale que la centrale (voir Figure 22).

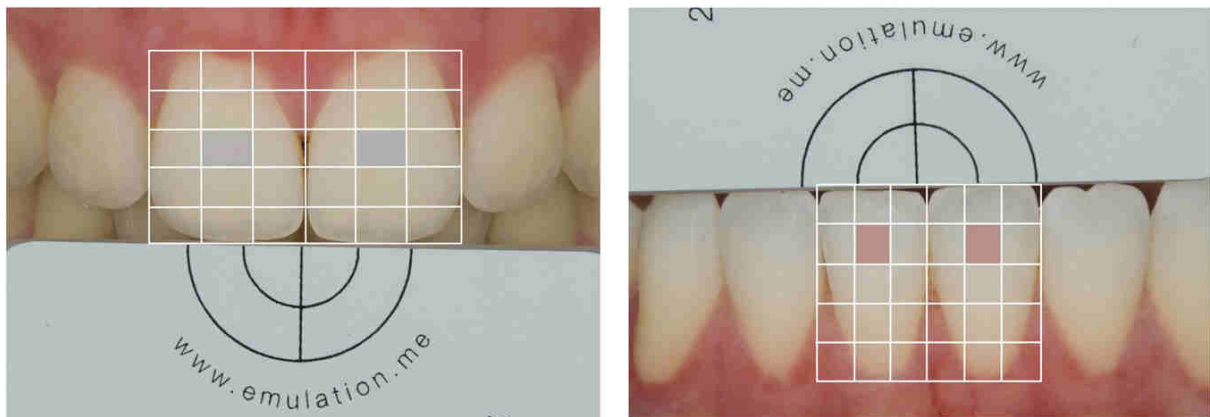


Figure 22 : Clichés maxillaire et mandibulaire calibrés avec une grille apposée, les zones cibles sont colorées respectivement en bleu et rouge

4. Relevé des données Lab

Ouvrir en aperçu les fichiers calibrés au format JPEG

- Ouvrir le colorimètre numérique.
- Ajuster la valeur d'ouverture de la cible ou fenêtre de lecture au maximum. Une fenêtre large permet de relever les données d'un ensemble de points sur une zone, et d'en obtenir une moyenne. Ceci permet d'éviter le risque d'erreur lié au relevé sur un point ponctuel, qui peut ne pas être représentatif de la couleur globale.
- Cibler le centre de la case cible de la grille.
- Éviter les reflets (risque de surévaluer L) et les spots de dyschromie.
- Relever les valeur L, a et b.

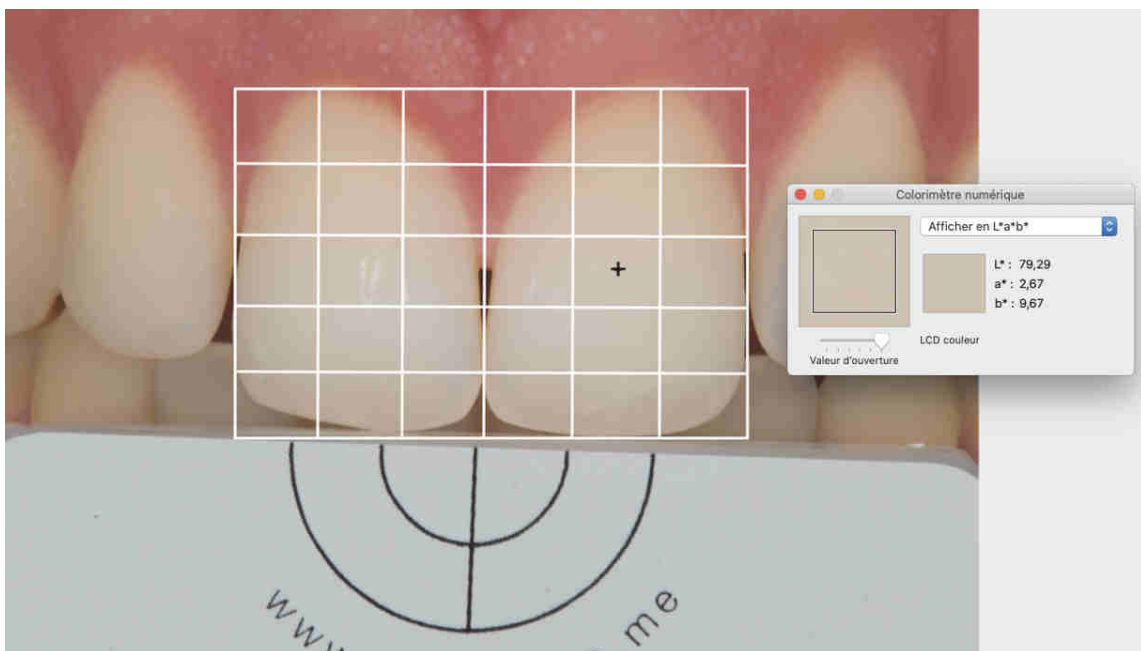


Figure 23 : Lecture des données Lab avec le colorimètre numérique

5. Analyse statistique

La saisie des données et les calculs des deltas ont été effectués avec le logiciel de calcul numérique Microsoft Excel 2019 version 16.30. Depuis les données relevées de L, a et b, les valeurs ΔL Δa Δb et la différence chromatique ΔE ont été calculés selon les formules suivantes :

$$\Delta E = \sqrt{(\Delta L)^2 + (\Delta a)^2 + (\Delta b)^2}$$

Où entre par exemple entre J7 et J14 :

$$\Delta L = L(J14) - L(J7)$$

$$\Delta a = a(J14) - a(J7)$$

$$\Delta b = b(J14) - b(J7)$$

La version 23 du logiciel SPSS Statistics de IBM a été utilisé pour analyser les données et réaliser les tests statistiques. Un seuil de significativité de $\alpha=0,05$ a été utilisé pour les analyses statistiques. L'effectif globale de la population soumise à l'étude est de $n=52$, et donc le degré de liberté df (égal à $n-1$) est de 51.

L'analyse statistique des différents deltas et valeurs a été réalisée par un **T test de Student apparié**. Ce test pour échantillons appariés est adapté à ce protocole expérimental dans lequel le sujet est son propre témoin. Dans cette étude, le protocole est du type avant / après, il y a un seul échantillon ou sujet, mais plusieurs séries de données correspondant à un suivi dans le temps. La différence hypothétisée (δ_0) est égale à 0. Les hypothèses du test sont les suivantes :

- Hypothèse nulle $H_0 : \mu_1 - \mu_2 = \delta_0$
La différence entre les moyennes des populations ($\mu_1 - \mu_2$) est égale à la différence nulle hypothétisée (δ_0).
- Hypothèse alternative $H_1 : \mu_1 - \mu_2 \neq \delta_0$
La différence entre les moyennes des populations ($\mu_1 - \mu_2$) n'est pas égale à la différence nulle hypothétisée (δ_0).

Dans le cadre cette étude si la différence est positive ($\mu_1 - \mu_2 > 0$), alors la moyenne de la variable étudiée est en baisse entre le temps 1 et 2. Au contraire si la différence est négative ($\mu_1 - \mu_2 < 0$), alors la moyenne de cette variable est en hausse entre le temps 1 et 2.

L'analyse des données de facteurs environnementaux ou des habitudes de vie a été réalisé via un **test de Tukey** dans le cadre de comparaisons multiples. Les mêmes paramètres que pour le T test de Student apparié ont été utilisés.

IV. Résultats

Les valeurs exploitées sont les données L, a et b. Les variations attendues dans le cadre d'un éclaircissement sont une hausse des valeurs de L et une baisse de a et b. Ces variations traduisent une hausse de la luminosité et une baisse de la saturation. Les calculs des deltas (ΔE , ΔL , Δa et Δb) sont effectués depuis ces valeurs, ceux-ci illustrant une différence de couleur générale ou de l'une de ses composantes entre deux périodes. Dans cette expérience, l'objectif du traitement d'éclaircissement est d'obtenir une différence de couleur. Les valeurs correspondent donc aux résultats obtenus ou, en d'autres termes, à l'action du traitement. Les résultats seront représentés ici en bleu pour le maxillaire et en rouge pour la mandibule.

1. Analyse des Deltas E cumulés

Représentation graphique des moyennes

Les ΔE cumulés en moyennes depuis J0 (contrôle préopératoire) sont représentés ci-dessous en fonction des différentes périodes de traitement, sous la forme d'un diagramme à bande.

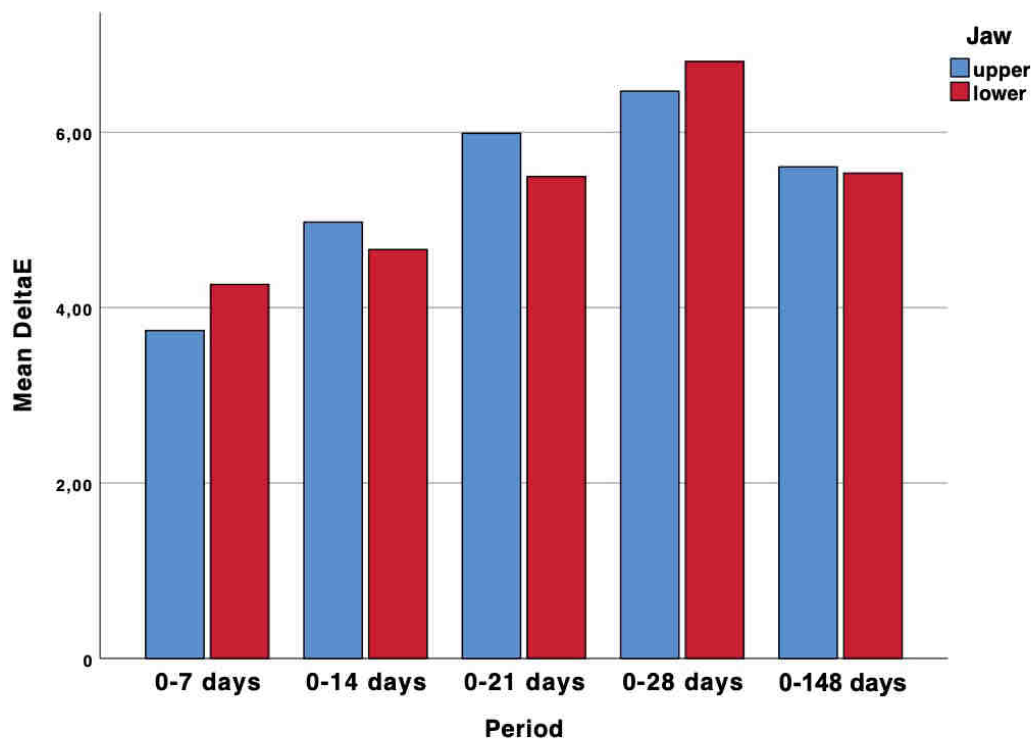


Figure 24 : Digramme à bande des ΔE moyens cumulés en fonction du temps

Le ΔE cumulé est croissant au niveau des deux arcades sur l'ensemble de la phase opératoire entre J0 à J28. Les valeurs moyennes à J7 sont de $\Delta E=3,74$ au maxillaire et $\Delta E=4,26$ à la mandibule, largement au-dessus du palier « cliniquement perceptible ». L'effet du traitement est donc observable dès J7. Un effet supérieur est observé à la mandibulaire à J7 et J28, alors qu'à J14 et J21 le ΔE est plus important au maxillaire. Lors de la phase de stabilisation, on retrouve la récidive sous la forme d'une baisse du ΔE cumulé à J148 par rapport au contrôle post opératoire de J28. A J148, Les valeurs moyennes de la couleur stabilisée des deux arcades sont équivalentes. Au maxillaire, $\Delta E=5,60$ et à la mandibule $\Delta E=5,52$ correspondent à une différence de couleur très importante. Le traitement est donc efficace et le résultat obtenu cliniquement visible et satisfaisant. On observe bien ici une évolution conforme à la cinématique classique attendue, décrite dans la littérature.

Représentation graphique des médianes

Les ΔE cumulés en médiane et la répartition des quartiles depuis J0 sont représentés ci-dessous en fonction de la période de traitement, sous la forme d'un whiskers box plot ou boîte à moustache.

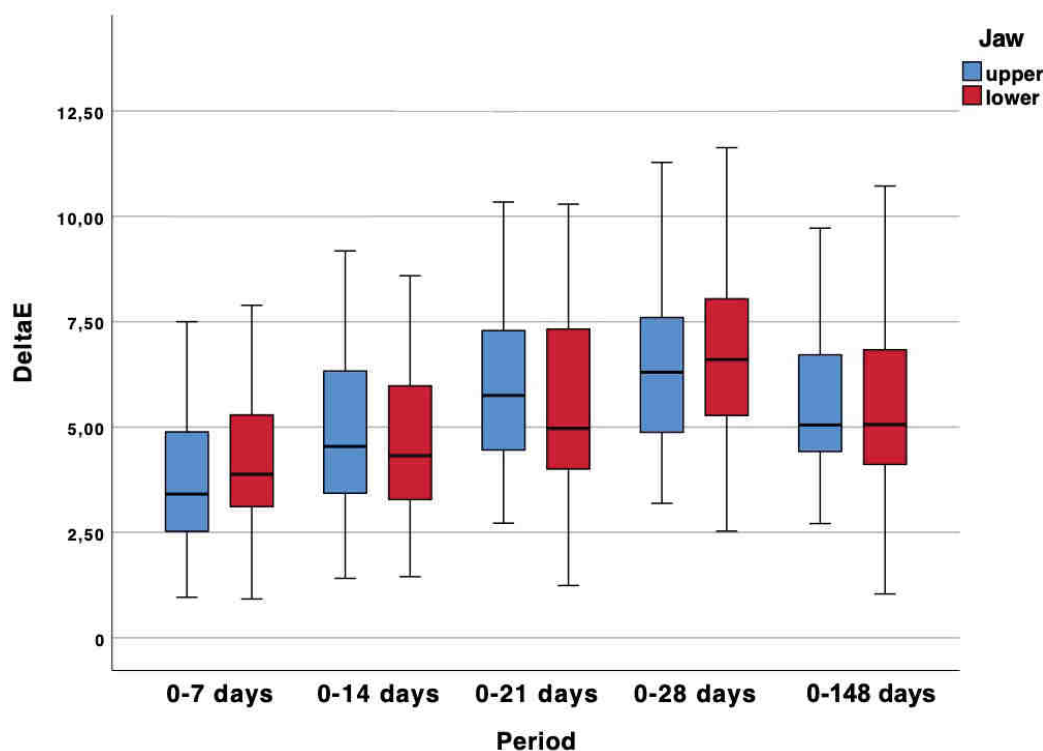


Figure 25 : Boîte à moustaches des ΔE médians cumulés en fonction du temps

Nous retrouvons ici les éléments décrits précédemment. La dynamique d'évolution des ΔE des deux arcades sur la phase opératoire et les niveaux de ΔE . Les mesures sont croissantes tout le long de la phase opératoire (J0 à J28) et faiblement décroissante sur la phase de stabilisation (J28 à J148). On observe tout de même une variabilité importante au niveau des deux arcades, qui illustre l'importance des différences interindividuelles.

Récapitulatif statistique des ΔE cumulés

Le tableau ci-dessous décrit et récapitule en chiffres les éléments statistiques derrière les représentations graphiques précédentes (Figures 24 et 25) des ΔE cumulés.

	Period (days)	Mean	Median	Std. Deviation	Range	Maximum	Minimum	Variance
Upper jaw	0-7	3,74	3,41	1,83	9,20	10,16	0,96	3,35
	0-14	4,98	4,54	2,06	10,15	11,56	1,41	4,24
	0-21	5,99	5,75	2,05	9,87	12,59	2,72	4,21
	0-28	6,47	6,30	2,18	10,45	13,64	3,19	4,75
	0-148	5,61	5,05	1,91	10,01	12,72	2,71	3,66
Lower jaw	0-7	4,26	3,88	1,90	9,87	10,79	0,92	3,61
	0-14	4,66	4,32	1,87	7,14	8,59	1,45	3,51
	0-21	5,49	4,97	2,18	9,05	10,29	1,24	4,74
	0-28	6,81	6,60	2,19	10,52	13,05	2,53	4,81
	0-148	5,53	5,06	2,24	9,91	10,95	1,04	5,02

Figure 26 : Tableau statistique des ΔE cumulés

2. Analyse des Deltas E par périodes non cumulés

Représentation graphique

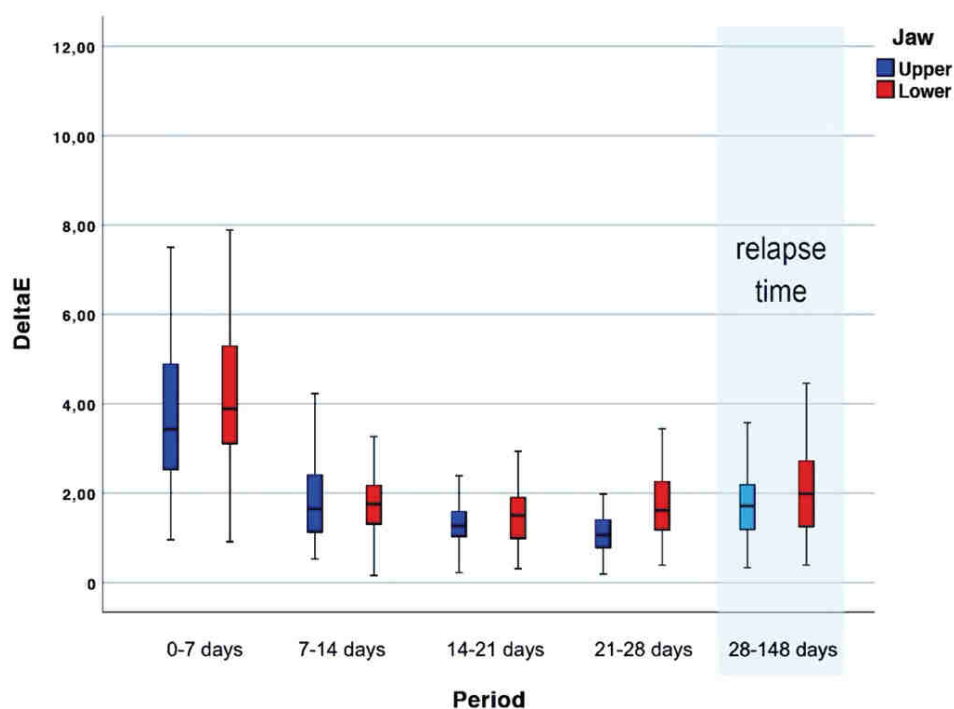


Figure 27 : Boite à moustaches des ΔE moyens non cumulés en fonction du temps

Un effet éclaircissant maximal entre J0 et J7 est observé, avec une médiane au maxillaire de $\Delta E=3,41$ et à la mandibule de $\Delta E=3,89$. L'effet est clairement perceptible sur cette période, car ces valeurs correspondent (selon les paliers de la norme DIN 5033-1) à une différence de couleur importante, notable, proche de la limite du non tolérable. Toutefois on remarque que les boites et moustaches sont particulièrement larges, ce qui illustre une variabilité interindividuelle importante.

Sur les semaines restantes de la phase opératoire à partir de J7, l'action est continue et stable mais plus lente. La tendance des ΔE par périodes est globalement décroissante, notamment au maxillaire où il y a une réduction avec le temps de la variabilité (boîtes et moustaches plus étroites). A partir de J7, les valeurs médianes hebdomadaires de ΔE se stabilisent et passent sous la barre de $\Delta E=2$, ce qui correspond à une différence chromatique difficilement détectable par l'œil.

Entre le contrôle post opératoire à J28 et le contrôle de couleur stabilisée à J148, les valeurs médianes de ΔE sont autour de $\Delta E=2$. Rappelons que le sens de variation de la couleur est ici opposé à celui de la phase opératoire, mais la valeur de ΔE est toujours positive peu importe si l'évolution est croissante ou décroissante, car elle représente des différences dans d'absolu. Le phénomène de récurrence partielle lors de cette phase de stabilisation (relapse) est donc observé, avec une différence de couleur faiblement perceptible mais bien présente entre J28 et J148.

Tableau statistique récapitulatif

Le tableau ci-dessous décrit et récapitule en chiffres les éléments statistiques derrière la représentation graphique précédente (Figure 27) des ΔE par périodes non cumulés.

	Period (days)	Mean	Median	Std. Deviation	Std. Error Mean
Upper jaw	0-7	3,74	3,41	1,83	,25
	7-14	1,80	1,63	,92	,13
	14-21	1,30	1,25	,52	,07
	21-28	1,10	1,04	,53	,07
	28-148	1,83	1,71	,84	,12
Lower jaw	0-7	4,26	3,89	1,90	,26
	7-14	1,84	1,73	,84	,12
	14-21	1,48	1,49	,62	,09
	21-28	1,78	1,63	,88	,12
	28-148	2,11	1,99	1,07	,15

Figure 28 : Tableau statistique des ΔE non cumulés

Analyse statistique des différences par périodes

Le tableau ci-dessous est la résultante d'un test T de Student apparié. Ce sont les différences en termes de ΔE d'une période à l'autre qui sont étudiées.

Pair DeltaE		Mean	Median	Std. Deviation	Std. Error Mean	95% Confidence Interval of the Difference		t	df	Sig. (2-tailed)
						Lower	Upper			
Upper Jaw	$\Delta E (J0-J7) - \Delta E (J7-J14)$	1,95	2,11	2,18	,30	1,34	2,55	6,45	51	,000
	$\Delta E (J7-J14) - \Delta E (J14-J21)$	,50	,50	1,03	,14	,21	,78	3,45	51	,001
	$\Delta E (J14-J21) - \Delta E (J21-J28)$	,21	,21	,81	,11	-,01	,43	1,88	51	,065
	$\Delta E (J21-J28) - \Delta E (J28-J148)$	-,74	-,73	,82	,11	-,97	-,51	-6,50	51	,000
Lower Jaw	$\Delta E (J0-J7) - \Delta E (J7-J14)$	2,46	2,17	2,09	,29	1,88	3,03	8,50	51	,000
	$\Delta E (J7-J14) - \Delta E (J14-J21)$	,36	0,24	1,14	,16	,05	,68	2,30	51	,025
	$\Delta E (J14-J21) - \Delta E (J21-J28)$	-,30	-0,15	,99	,14	-,58	-,03	-2,20	51	,033
	$\Delta E (J21-J28) - \Delta E (J28-J148)$	-,33	-0,36	1,26	,17	-,68	,02	-1,90	51	,063

Figure 29 : ΔE – Test T de différence apparié

La prépondérance de l'action de la première semaine (J0-J7) par rapport aux autres est claire pour les deux arcades. Les différences sont importantes entre J0-J7 et J7-J14 (2,11 au maxillaire et 2,17 à la mandibule), alors qu'entre J7 et J28 les différences entre semaines sont réduites et homogènes (de l'ordre du dixième). L'apport et donc les ΔE des secondes, troisièmes et quatrièmes semaines sont similaires.

Sur la phase opératoire les différences sont presque toutes positives, ceci indique une tendance à la réduction de l'apport de chaque période avec le temps. A la mandibule il y a une différence négative entre J14-21 et J21-J28. Mais les différences étant minimales après la première semaine, il est difficile d'y voir un réellement le signe d'un apport supérieur la quatrième semaine de traitement par rapport à la troisième.

Entre la dernière période de traitement (J21-J28) et la phase post opératoire de stabilisation on observe une différence qui passe en négatif pour les deux arcades. La récédive est donc plus importante que le gain obtenu sur la quatrième semaine. Toutefois la différence reste réduite (inférieur à 1), l'importance de la récédive est donc assimilable à celle de l'une des dernières semaines de traitement.

La différence est non significative ($p>0,05$) entre la seconde et la troisième semaine au maxillaire ($p=0,65$), mais aussi entre la quatrième semaine et la phase de stabilisation à la mandibule ($p=0,63$). Il n'est donc pas possible de confirmer ni l'existence d'une différence entre ces périodes, ni l'absence de différence. Néanmoins l'hypothèse nulle H_0 , qui implique qu'il n'y a pas de d'écart réel en termes de ΔE ou d'action entre ces périodes, fait partie des possibles. Sur l'ensemble des autres paires les différences sont significatives ($p<0,05$), on peut donc rejeter l'hypothèse nulle H_0 , conclure qu'il y a effectivement des différences entre ces périodes en termes de ΔE (hypothèse H_1) et que le sens de variation peut être identifié via le signe.

3. Analyse des valeurs de a, b et L

a. Étude des valeurs a

Représentation graphique

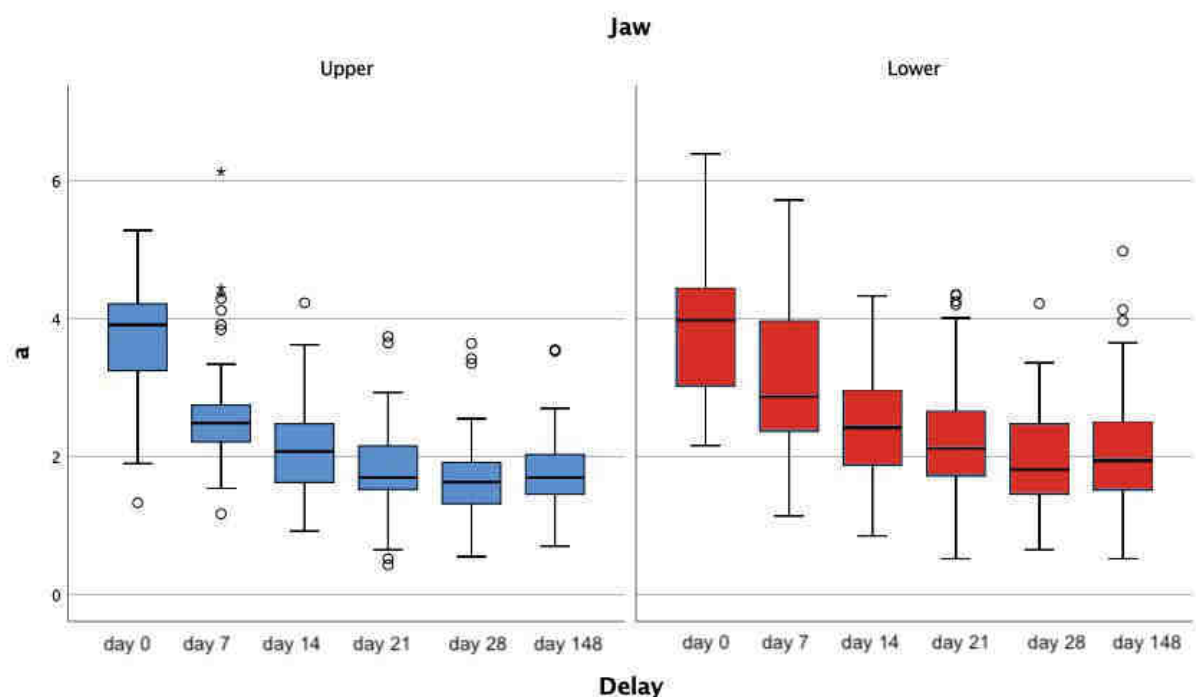


Figure 30 : Boite à moustaches des valeurs a en fonction du temps

Une diminution de la valeur de a sur toute la phase opératoire de J0 à J28 est observée pour les deux arcades. La baisse des valeurs est la plus importante entre J0 et J7, mais elle présente une variabilité majeure. Sur les semaines suivantes la baisse se poursuit mais de façon moindre, avec une tendance à la réduction des écarts de valeurs entre deux semaines. L'évolution des valeurs semblent tendre vers une limite minimum.

Dans la phase de stabilisation post opératoire, entre J28 et J148, les valeurs remontent mais très faiblement. La récurrence est donc bien présente pour la valeur de a , mais presque négligeable.

Tableau statistique récapitulatif

Le tableau ci-dessous décrit et récapitule en chiffres les éléments statistiques derrière la représentation graphique des valeurs a en fonction du temps (Figure 30).

	Period (days)	Mean	Median	Std. Deviation	Std. Error Mean
Upper jaw	J0	3,73	3,91	,87	,12
	J7	2,66	2,49	,87	,12
	J14	2,10	2,08	,65	,09
	J21	1,77	1,70	,70	,10
	J28	1,66	1,63	,67	,09
	J148	1,76	1,70	,63	,09
Lower jaw	J0	3,90	3,98	,94	,13
	J7	3,13	2,78	1,08	,15
	J14	2,50	2,42	,90	,12
	J21	2,32	2,11	,88	,12
	J28	1,97	1,81	,74	,10
	J148	2,11	1,94	,90	,13

Figure 31 : Tableau statistique des valeurs a

Analyse statistique des différences entre deux temps

Le tableau ci-dessous est la résultante d'un test T de Student apparié. Ce sont les différences en termes de valeur a entre deux temps qui sont étudiées.

	Pair a value	Mean	Std. Deviation	Std. Error Mean	95% Confidence Interval of the Difference		t	df	Sig. (2-tailed)
					Lower	Upper			
Upper Jaw	a(J0) – a(J7)	1,07	,81	,11	,84	1,30	9,49	51	,00
	a(J7) – a(J14)	,56	,54	,075	,41	,71	7,40	51	,00
	a(J14) – a(J21)	,34	,52	,072	,19	,48	4,70	51	,00
	a(21) – a(J28)	,10	,56	,078	-,052	,26	1,33	51	,19
	a(J28) – a(J148)	-,10	,48	,067	-,23	,04	-1,46	51	,15
Lower Jaw	a(J0) – a(J7)	,77	,81	,11	,55	,10	6,86	51	,00
	a(J7) – a(J14)	,62	,51	,071	,48	,77	8,76	51	,00
	a(J14) – a(J21)	,18	,51	,071	,04	,32	2,58	51	,013
	a(21) – a(J28)	,35	,56	,08	,19	,51	4,50	51	,00
	a(J28) – a(J148)	-,14	,56	,08	-,30	,01	-1,84	51	,07

Figure 32 : Valeurs a - Test T de différence apparié

Pour les deux arcades, les différences d'une semaine à l'autre sont toutes positives sur l'ensemble de la phase opératoire (J0 à J28), et la tendance globale est une réduction de celles-ci avec le temps. Il est possible alors de conclure que la baisse de la valeur a est maximale entre J0 et J7, elle se poursuit sur toute la phase opératoire mais est de plus en plus réduite.

En fin de traitement on observe des différences très faibles qui semblent tendre vers zéro. Or une différence nulle signifie l'arrêt de la progression de la valeur a, et donc l'obtention du point de saturation pour cette composante de la couleur. Entre J21 et J28 la différence reste positive et non nulle, le point de saturation n'est donc pas encore atteint en quatre semaines de traitement.

Les différences deviennent négatives entre J28 et J148, cela correspond à la phase de récidence où la valeur a remonte. Toutefois ces différences sont minimales (-0,10 au maxillaire et -0,14 à la mandibule. La récidence en termes de a est donc présente mais presque négligeable.

La différence selon le T test de Student apparié est non significative au maxillaire ($p > 0,05$) entre J21 et J28 ($p = 0,19$), ainsi qu'entre J28 et J148 ($p = 0,15$). Il n'est donc pas possible de confirmer ni l'existence d'une différence entre ces temps, ni l'absence de différence. Néanmoins l'hypothèse nulle, qui implique qu'il n'y a pas de baisse réelle de la valeur a entre ces temps, fait partie des possibles. Sur l'ensemble des autres paires les différences sont significatives ($p < 0,05$), on peut donc rejeter l'hypothèse

nulle, conclure qu'il y a effectivement des écarts de valeur moyenne entre les deux temps. La progression est donc bien présente et son sens peut être identifié par le signe.

b. Étude des valeurs b

Représentation graphique

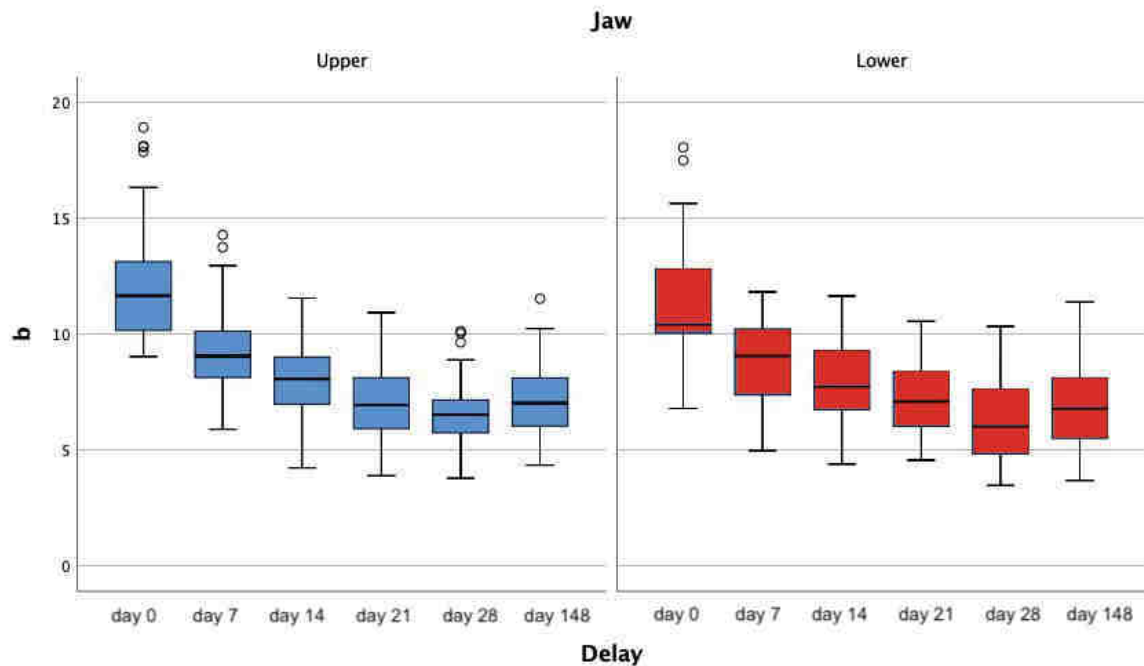


Figure 33 : Boîte à moustaches des valeurs b en fonction du temps

En ce qui concerne les valeurs de b des deux arcades, les mêmes conclusions que pour les valeurs de a peuvent être retenues. La cinématique se compose d'une baisse importante sur le début de la phase opératoire, d'un ralentissement puis d'une remontée très faible en phase de récidive. Les écarts de valeurs d'une semaine à l'autre sont comparables lors des deuxièmes, troisièmes et quatrièmes semaines.

Dans la situation initiale à J0, les valeurs de b, qui correspondent à la teneur en jaune, sont sensiblement supérieures au maxillaire (b médian de 11,65) par rapport à la mandibule (b médian de 10,38). Cela est conforme aux données de littératures qui indiquent que de manière générale le secteur antérieur maxillaire est plus jaune que le secteur mandibulaire.

Tableau statistique récapitulatif

Le tableau ci-dessous décrit et récapitule en chiffres les éléments statistiques derrière la représentation graphique des valeurs a en fonction du temps (Figure 33)

	Period (days)	Mean	Median	Std. Deviation	Std. Error Mean
Upper jaw	J0	12,07	11,65	2,52	,35
	J7	9,19	9,04	1,78	,25
	J14	7,94	8,06	1,62	,22
	J21	7,01	6,93	1,57	,22
	J28	6,53	6,52	1,44	,20
	J148	7,09	7,01	1,59	,22
Lower jaw	J0	11,29	10,38	2,24	,31
	J7	8,91	9,05	1,70	,24
	J14	7,79	7,68	1,69	,23
	J21	7,18	7,08	1,65	,23
	J28	6,38	5,99	1,80	,25
	J148	6,89	6,76	1,98	,27

Figure 34 : Tableau statistique récapitulatif des valeurs b

Analyse statistique des différences entre deux temps

Le tableau ci-dessous est la résultante d'un test T de Student apparié. Ce sont les différences en termes de valeur b entre deux temps qui sont étudiées.

Pair b value		Mean	Std. Deviation	Std. Error Mean	95% Confidence Interval of the Difference		t	df	Sig. (2-tailed)
					Lower	Upper			
Upper Jaw	b(J0) – b(J7)	2,89	1,87	,26	2,37	3,41	11,14	51	,00
	b(J7) – b(J14)	1,25	,93	,13	,99	1,51	9,63	51	,00
	b(J14) – b(J21)	,93	,54	,08	,78	1,08	12,32	51	,00
	b(21) – b(J28)	,49	,65	,09	,31	,67	5,43	51	,00
	b(J28) – b(J148)	-,56	,86	,12	-,80	-,32	-4,69	51	,00
Lower Jaw	b(J0) – b(J7)	2,38	1,70	,24	1,91	2,86	10,12	51	,00
	b(J7) – b(J14)	1,12	,70	,10	,92	1,31	11,57	51	,00
	b(J14) – b(J21)	,61	,66	,09	,42	,79	6,64	51	,00
	b(21) – b(J28)	,80	,63	,09	,63	,98	9,13	51	,00
	b(J28) – b(J148)	-,51	,88	,12	-,76	-,27	-4,22	51	,00

Figure 35 : Valeurs b - Test T de différence apparié

Pour l'étude des valeurs b, les mêmes observations et interprétations que pour les valeurs a peuvent être retenues. Les différences sont maximales en début de traitement, puis elle se réduisent au cours du temps. Elles sont positives sur la phase opératoire et négatives en post opératoire sur la phase de récidive. Toutefois cette récidive est presque négligeable car l'écart entre J28 et J148 est très faible (-0,56 au maxillaire, -0,51 à la mandibule).

Toutes les différences sont significatives ici ($p < 0,05$). L'hypothèse H_1 peut donc être retenue. La variable qui est ici la moyenne des valeurs b est donc bien différente entre les différents temps.

Il est possible alors de conclure que la baisse des valeurs de a et b est maximale entre J0 et J7, elle continue sur toute la phase opératoire mais est de plus en plus lente au cours du temps. La récidive est faible voire négligeable pour ces deux composantes de la couleur.

c. Étude des valeurs L

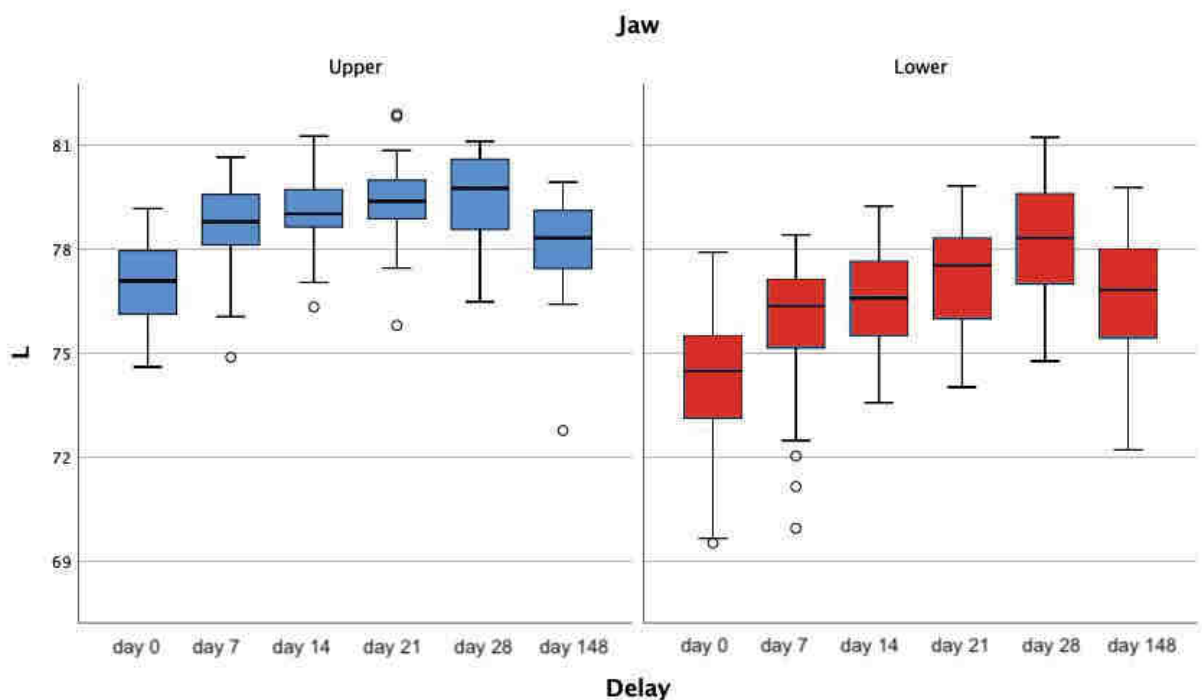


Figure 36 : Boite à moustaches des valeurs L en fonction du temps

Les valeurs de L sont en hausse sur toute la phase opératoire, le gain est très important surtout la première semaine. De J7 à J28 la progression est très faible (notamment au maxillaire) et stable, c'est-à-dire que les écarts des valeurs d'une semaine à l'autre sont du même ordre. La valeur médiane de L semble tendre vers une limite maximum.

Entre J28 et J148, la valeur de L diminue fortement, on retombe en dessous des valeurs obtenues à J7 au maxillaire et à J21 à la mandibule. La récidive de L est donc très importante alors que celles de a et b qui étaient négligeables.

Dans la situation initiale à J0, les valeurs de L, qui correspondent à la luminosité, sont supérieures au maxillaire (L médian de 77,09) par rapport à la mandibule (L médian de 74,48). Ceci indique que de manière générale le secteur antérieur maxillaire est plus lumineux que le secteur mandibulaire.

Tableau statistique récapitulatif

Le tableau ci-dessous décrit et récapitule en chiffres les éléments statistiques derrière la représentation graphique des valeurs a en fonction du temps (Figure 36)

	Period (days)	Mean	Median	Std. Deviation	Std. Error Mean
Upper jaw	J0	77,09	77,08	1,14	,16
	J7	78,63	78,79	1,18	,16
	J14	79,08	79,02	1,02	,14
	J21	79,36	79,38	1,12	,16
	J28	79,49	79,76	1,17	,16
	J148	78,13	78,32	1,25	,17
Lower jaw	J0	74,16	74,48	1,95	,27
	J7	75,91	76,36	1,88	,26
	J14	76,55	76,58	1,45	,20
	J21	77,15	77,53	1,52	,21
	J28	78,22	78,32	1,53	,21
	J148	76,56	76,82	1,85	,26

Figure 37 : Tableau statistique récapitulatif des valeurs L

Analyse statistique des différences entre deux temps

Le tableau ci-dessous est la résultante d'un test T de Student apparié. Ce sont les différences en termes de valeur L entre deux temps qui sont étudiées.

	Pair L value	Mean	Std. Deviation	Std. Error Mean	95% Confidence Interval of the Difference		t	df	Sig. (2-tailed)
					Lower	Upper			
Upper Jaw	L(J0) – L(J7)	-1,54	1,08	,15	-1,84	-1,24	-10,30	51	,000
	L(J7) – L(J14)	-,44	,96	,13	-,71	-,18	-3,34	51	,002
	L(J14) – L(J21)	-,29	,61	,08	-,46	-,12	-3,40	51	,001
	L(21) – L(J28)	-,13	,71	,10	-,32	,072	-1,28	51	,208
	L(J28) – L(J148)	1,36	,95	,13	1,10	1,63	10,33	51	,000
Lower Jaw	L(J0) – L(J7)	-1,75	1,45	,20	-2,15	-1,35	-8,72	51	,000
	L(J7) – L(J14)	-,64	1,14	,16	-,96	-,32	-4,07	51	,000
	L(J14) – L(J21)	-,59	1,06	,15	-,89	-,30	-4,02	51	,000
	L(21) – L(J28)	-1,07	1,07	,15	-1,37	-,77	-7,21	51	,000
	L(J28) – L(J148)	1,66	1,24	,17	1,32	2,01	9,67	51	,000

Figure 38 : Valeurs L - Test T de différence apparié

Au cours du traitement d'éclaircissement la luminosité L est en hausse alors que les coordonnées a et b (de teinte et de saturation) sont en diminution. Contrairement à celles des valeurs a et b, les différences pour la valeur L sont donc négatives sur la phase opératoire et positives sur la phase de récidive.

Une tendance similaire que pour les valeurs a et b peut être observée de J0 à J28. Les différences sont les plus importantes en début de traitement (J0-J7), puis elles diminuent et tendent vers zéro.

En revanche, les différences entre J28 et J148 sont élevées pour la valeur L (1,36 au maxillaire et 1,66 à la mandibule), alors que pour les valeurs a et b elles étaient faibles. L'importance des différences sur cette phase de récidive est du même ordre de grandeur que celles de la première semaine (J0-J7). Il est possible alors de conclure que la récidive est importante pour la composante de luminosité L de la couleur, alors qu'elle est faible voire négligeable pour les composantes a et b.

La différence est non significative ($p > 0,05$) entre J21 et J28 au maxillaire ($p = 0,208$). Il n'est donc pas possible de confirmer ni l'existence d'une différence entre ces deux temps, ni l'absence de différence. Néanmoins l'hypothèse nulle H_0 , qui implique qu'il n'y a pas de progression réelle de la valeur L entre J21 et J28, fait partie des possibles. Sur l'ensemble des autres paires les différences sont significatives ($p < 0,05$). Pour les autres périodes l'hypothèse alternative H_1 est retenue, les signes des différences indiquant une progression des valeurs L contraire à celle des valeurs a et b.

4. Facteurs environnementaux et dosage

Dans le cadre de notre étude, les résultats obtenus sur l'impact de la consommation de produits chromogènes sur l'efficacité du traitement éclaircissant ou sur la récidence à 148 jours sont non significatifs (voir les tests statistiques de Tuckey en annexe 4). L'ensemble des valeurs de significativité sont supérieures à 5% ($p > 0,05$). On ne peut donc pas conclure qu'une consommation plus importante de ces différents types de produits (thé, sodas, café, tabac) implique nécessairement un résultat moindre ou une récidence plus importante.

De même une corrélation entre dose utilisée, apparition de sensibilités et efficacité n'a pu être objectivée de manière claire et significative.

Les sensibilités constatées lors de la phase peropératoire étaient toutes passagères, d'une intensité faible en majorité et au maximum modérées (6 sur 10) dans quelques cas. Aucun arrêt définitif du traitement n'a été nécessaire, le traitement a pu être repris dans tous les cas après une nuit de pause avec la disparition de la sensibilité. Aucune sensibilité résiduelle n'a été relevée en phase post-opératoire.

V. Discussion

Les résultats obtenus lors de notre étude sur la cinématique de l'éclaircissement viennent corroborer ceux de la littérature. En effet l'action du traitement est très importante durant la première semaine avant de ralentir avec le temps. La réduction progressive du ΔE peut être expliquée par l'idée que l'on se rapproche du point de saturation et qu'il y a de moins en moins de pigments organiques, à l'origine de la coloration en profondeur des dents, à éliminer. La question de la pertinence de la poursuite du traitement pour une quatrième semaine peut alors être posée, l'apport en termes de résultat étant faible et peu perceptible. Or un des avantages principaux de la technique ambulatoire est qu'elle est peu contraignante, il s'agit alors de faire un arbitrage entre le gain et la contrainte.

Lors du traitement, la progression entre J0 et J28 des valeurs L, a et b ralentit avec le temps. En projetant la suite de la courbe de progression qui semble tendre vers une réduction jusqu'à l'arrêt, il semblerait possible de supposer approximativement les valeurs maximales atteignables et donc la durée de traitement nécessaire. Ainsi, hypothétiquement, le point de saturation peut être déterminé une fois que la courbe de tendance aura atteint un plateau.

Les valeurs de L, a et b sont en progression tout au long du traitement, mais les écarts de valeurs d'une semaine à l'autre sont réduits et comparables lors des deuxièmes, troisièmes et quatrièmes semaines. Ceci est conforté par le fait que les ΔE par périodes sont similaires pour ces trois semaines (légèrement en dessous du palier de perception de $\Delta E=2$). L'apport en termes de résultat et donc l'intérêt des semaines deux, trois et quatre semble donc du même ordre. La progression entre J7 et J28 tend pas vers un ralentissement, mais le ΔE lors de la quatrième semaine n'est pas encore négligeable, le point de saturation n'est donc pas encore atteint à J28. L'entreprise d'un traitement d'éclaircissement sur quatre semaines et même sa poursuite au-delà peut donc être pertinent. Il a été décrit dans la littérature qu'un traitement pouvant aller jusqu'à 6 semaines peut être nécessaire à la satisfaction du patient.(103) Il faut toutefois mettre en balance le gain d'un traitement plus long avec le confort, l'acceptation et la motivation du patient.

Une récidence partielle de la couleur est bien présente après la phase de stabilisation (J148). Toutefois, seule la luminosité récidive de manière notable. Les valeurs de a et b restent plutôt stables, il n'y a donc presque pas de récidence de saturation ou de teinte. Cette disparité peut être expliquée par la notion de fenêtre chromatique dentaire ou banane chromatique. Cette fenêtre chromatique couvre l'ensemble des couleurs possibles de la dent naturelle. Or la nature étroite horizontalement de la banane chromatique, implique une possibilité de variation des valeurs a et b restreinte. À contrario cette banane chromatique est étendue dans le sens vertical, la variation de la luminosité L peut donc être plus importante. La réhydratation des tissus dentaires peut être une autre explication. En effet, lors du traitement d'éclaircissement la déshydratation des tissus dentaires induit une hausse de la luminosité. En post opératoire, la réhydratation contribue donc à la récidence élevée de la luminosité.

La variabilité interindividuelle est importante en début de traitement, puis elle se réduit et les résultats sont plus homogènes. Ceci coïncide avec l'idée d'un gain important en première semaine puis plus faible par la suite. Ces variations sont la résultante des différences entre les situations initiales et l'étiologies de coloration pour chaque individu.

En ce qui concerne l'étude de l'impact des habitudes de consommation sur le résultat immédiat du traitement et la récidence, nos résultats sont non conclusifs car ce type d'analyse sera à entreprendre sur le plus long terme. Dans la littérature actuelle, l'influence de ces facteurs en phase peropératoire n'est pas clairement établie, mais en post opératoire sur une durée importante, une corrélation entre ces habitudes et la récidence a bien été mise en évidence.

L'étude de l'impact de la dose utilisée sur le résultat et l'induction de sensibilités est également non concluante. Des gouttières sans réservoirs ont été réalisées pour cette étude, ceci dans le but de limiter les disparités de quantité de produit et d'optimiser la reproductibilité. En l'absence de réservoirs le produit s'étale en un film fin à la surface de la dent, il semble donc que peu importe la quantité de produit appliquée initialement par le patient, tout excédent sera chassé. L'ensemble des sujets a donc sûrement eu des quantités similaires de produit en contact avec les surfaces dentaires. Pour

comparer l'impact de la dose, la comparaison entre gouttières avec et sans réservoirs semble plus pertinente, or ce type de travaux a déjà été mené dans la littérature. Pour mener ce travail à bien d'autres facteurs complémentaires sont également à prendre en compte : le nombre de nuits effectuées (certains ayant fait des nuits de pause dues aux sensibilités) et la différence de taille des surfaces vestibulaires.

VI. Conclusions de l'étude

Nous pouvons conclure à la lumière de nos résultats et dans le cadre des limites de notre étude que :

- La nouvelle technique proposée, s'inspirant du procédé eLAB, de relevé de couleur par photographie et analyse numérique, est valable dans le cadre du suivi d'un éclaircissement dentaire.
- L'éclaircissement externe ambulatoire avec du peroxyde de carbamide à 10% permet l'obtention d'un résultat rapide et visible dès sept jours.
- Les sensibilités sont passagères, uniquement présentes sur la phase peropératoire et d'intensité modérée ou faible.
- Le traitement est très effectif sur la première semaine, la progression se poursuit sur les semaines suivantes mais de manière plus réduite et moins visible.
- Le traitement sur une période de quatre semaines est pertinent, il peut même être poursuivi sur une période plus longue (selon l'acceptation et la motivation du patient).
- Les trois composantes L, a et b présentent toutes une récurrence, mais elle est surtout significative pour L. Il semble donc qu'il faut surtout anticiper une récurrence importante de la luminosité et dans une moindre mesure de la teinte.
- Il existe bien une récurrence globale après stabilisation de la couleur (J148) mais elle est faible et difficilement perceptible à l'œil.
- La variabilité entre les individus est plus importante en début de traitement. Avec le temps les résultats deviennent plus homogènes.
- Au vu de nos résultats, les moments clés du suivi d'un éclaircissement devraient se faire au bout d'une semaine, à la fin du traitement et enfin au bout de deux

mois, après stabilisation. Les autres contrôles hebdomadaires ne sont pas forcément nécessaires, car l'évolution sera minime et donc difficilement observable.

CONCLUSION

Dans la pratique dentaire le relevé de la couleur est un élément essentiel. Il doit être juste, précis, objectif, simple à réaliser et ergonomique. Plusieurs méthodes et outils existent : teintiers, spectrophotomètres, colorimètres, caméras optiques. Toutefois ils semblent tous présenter certaines limites. Notre étude vise donc à proposer une nouvelle méthode simple d'utilisation et faisant appel à du matériel déjà disponible dans un cabinet dentaire surtout s'il est spécialisé en esthétique.

Les résultats obtenus (données chromatiques Lab et deltas) au cours de nos travaux sont en adéquation avec la cinématique et les valeurs attendues d'un éclaircissement, tel que décrit dans la littérature.

Nos conclusions sont les suivantes :

La progression est importante et très visible lors de la première semaine de traitement, elle se poursuit sur les semaines suivantes mais de manière plus réduite et moins observable. La présence d'une récurrence partielle en phase de stabilisation post-opératoire a également été mise en évidence, avec une faible récurrence de la couleur (valeurs a et b) une récurrence plus importante de la luminosité (valeur L). La récurrence est minimum, faiblement voire non perceptible. Ces données facilitent la gestion et l'anticipation des attentes et de la chronologie pour le patient et le praticien.

L'utilisation des appareils de photographie et leurs accessoires, les ordinateurs et les logiciels de traitement d'image se sont déjà démocratisés dans nos pratiques. La prise de clichés intra-buccaux, notamment dans un cadre esthétique, relève de la pratique courante. En termes d'ergonomie, notre protocole permettra d'éviter les oublis et de gagner du temps en intégrant l'acte d'enregistrement de la couleur à la prise de

photographie. De plus les valeurs chiffrées et les photographies sont des éléments intéressants en termes de communication pour objectiver et mettre en évidence l'évolution, l'efficacité et les résultats du traitement.

À la lumière des résultats de notre étude clinique, cette nouvelle méthode inspirée du protocole eLab, basée sur la photographie et une analyse numérique, semble pertinente. Elle est efficace et fiable dans l'analyse et le suivi de la couleur au cours d'un éclaircissement en s'affranchissant des limites des outils conventionnels.

Cette méthode avait déjà été appliquée avec succès dans le domaine prothétique pour faire du color matching. Notre étude démontre sa validité dans le monitoring de la couleur dans le domaine esthétique. Néanmoins, son utilisation peut potentiellement s'étendre, comme il est déjà fait référence dans la littérature, dans d'autres champs d'application comme par exemple la parodontologie et la dermatologie buccale, à des fins diagnostiques.

SIGNATURE DES CONCLUSIONS

Thèse en vue du Diplôme d'Etat de Docteur en Chirurgie Dentaire

Nom - prénom de l'impétrant : HE Matthieu

Titre de la thèse : Evaluation numérique de l'éclaircissement dentaire: étude in vivo

Directeurs de thèse : Docteurs Olivier ETIENNE et Ali SALEHI

VU

Strasbourg, le : 15/11/2020

Le Président du Jury,

Professeur M. MINOUX

VU

Strasbourg, le : 18 NOV. 2020

Le Doyen de la Faculté
de Chirurgie Dentaire de Strasbourg,

Professeur C. TADDEI-GROSS

1. Tirlet, Attal. Le gradient thérapeutique un concept médical pour les traitements esthétiques. *L'information dentaire*. 2009 Nov 25;(41/42):2561–8.
2. Hein S, Tapia J, Bazos P. eLABor_aid: a new approach to digital shade management. *Int J Esthet Dent*. 2017;12(2):186–202.
3. Opinion Way. Sourire et santé bucco dentaire. ADF presse-papiers. 2012;
4. Simon, Tirlet, Attal. Evaluation de la demande esthétique. *Information Dentaire*. 2008;
5. Adam S, Joubert S, Missotten P. L'âgisme et le jeunisme : conséquences trop méconnues par les cliniciens et chercheurs ! *Revue de neuropsychologie*. 2013 May 28;Volume 5(1):4–8.
6. Epple M, Meyer F, Enax J. A Critical Review of Modern Concepts for Teeth Whitening. *Dentistry Journal*. 2019 Sep;7(3):79.
7. Sulieman MAM. An overview of tooth-bleaching techniques: chemistry, safety and efficacy. *Periodontology 2000*. 2008;48(1):148–69.
8. Kwon SR, Wertz PW. Review of the Mechanism of Tooth Whitening. *J Esthet Restor Dent*. 2015 Oct;27(5):240–57.
9. Minoux M, Serfaty R. Vital tooth bleaching: biologic adverse effects-a review. *Quintessence Int*. 2008 Sep;39(8):645–59.
10. Fiorillo L, Laino L, De Stefano R, D'Amico C, Bocchieri S, Amoroso G, et al. Dental Whitening Gels: Strengths and Weaknesses of an Increasingly Used Method. *Gels*. 2019 Sep;5(3):35.
11. Sulieman. An overview of bleaching techniques: I. History, chemistry, safety and legal aspects. *Dental Update*. 2004;
12. Luque-Martinez I, Reis A, Schroeder M, Muñoz MA, Loguercio AD, Masterson D, et al. Comparison of efficacy of tray-delivered carbamide and hydrogen peroxide for at-home bleaching: a systematic review and meta-analysis. *Clin Oral Investig*. 2016 Sep;20(7):1419–33.
13. de Geus JL, Wambier LM, Boing TF, Loguercio AD, Reis A. At-home Bleaching With 10% vs More Concentrated Carbamide Peroxide Gels: A Systematic Review and Meta-analysis. *Oper Dent*. 2018 Aug;43(4):E210–22.
14. Meireles SS, Heckmann SS, Leida FL, dos Santos I da S, Della Bona A, Demarco FF. Efficacy and safety of 10% and 16% carbamide peroxide tooth-whitening gels: a randomized clinical trial. *Oper Dent*. 2008 Dec;33(6):606–12.

15. Navarra CO, Reda B, Diolosà M, Casula I, Di Lenarda R, Breschi L, et al. The effects of two 10% carbamide peroxide nightguard bleaching agents, with and without desensitizer, on enamel and sensitivity: an in vivo study. *Int J Dent Hyg*. 2014 May;12(2):115–20.
16. Mushashe A-M, Coelho B-S, Garcia P-P, Rechia B-CN, da Cunha L-F, Correr G-M, et al. Effect of different bleaching protocols on whitening efficiency and enamel superficial microhardness. *J Clin Exp Dent*. 2018 Aug 1;10(8):e772–5.
17. L. Darriba I, Cabirita Melón P, García Sartal A, Ríos Sousa I, Alonso de la Peña V. Influence of treatment duration on the efficacy of at-home bleaching with daytime application: a randomized clinical trial. *Clin Oral Invest*. 2019 Aug 1;23(8):3229–37.
18. Zekonis R, Cochran M. Clinical Evaluation of In-Office and At-Home Bleaching Treatments. *Operative Dentistry*. 2003;9.
19. Kwon SR, Chan DC, Patil S. Tooth Whitening of Tetracycline-Stained Teeth. *World Journal of Dentistry*. 2012;
20. Ay K, C G. Changes in patient evaluation of completed orthodontic esthetics after dental bleaching. Vol. 20, *Journal of esthetic and restorative dentistry : official publication of the American Academy of Esthetic Dentistry ... [et al.]*. J Esthet Restor Dent; 2008.
21. Rezende M, Loguercio AD, Reis A, Kossatz A. Clinical Effects of Exposure to Coffee During At-home Vital Bleaching. *Operative Dentistry*. 2013;
22. Pirolo R, Mondelli RFL, Correr GM, Gonzaga CC, Furuse AY. Effect of coffee and a cola-based soft drink on the color stability of bleached bovine incisors considering the time elapsed after bleaching. *Journal of Applied Oral Science*. 2014 Dec;22(6):534.
23. Côrtes G. Influence of coffee and red wine on tooth color during and after bleaching. *Acta Odontologica Scandinavica*. 2013;
24. Karadas M, Seven N. The effect of different drinks on tooth color after home bleaching. *European Journal of Dentistry*. 2014 Jun;8(2):249.
25. de Geus JL, Wambier LM, Kossatz S, Loguercio AD, Reis A. At-home vs In-office Bleaching: A Systematic Review and Meta-analysis. *Oper Dent*. 2016 Aug;41(4):341–56.
26. Mounika A, Mandava J, Roopesh B, Karri G. Clinical evaluation of color change and tooth sensitivity with in-office and home bleaching treatments. *Indian Journal of Dental Research*. 2018 Jan 7;29(4):423.

27. Dahl JE, Pallesen U. Tooth bleaching-a critical review of the biological aspects. *Crit Rev Oral Biol Med*. 2003;14(4):292–304.
28. Dourado Pinto AV, Carlos NR, Amaral FLB do, França FMG, Turssi CP, Basting RT. At-home, in-office and combined dental bleaching techniques using hydrogen peroxide: Randomized clinical trial evaluation of effectiveness, clinical parameters and enamel mineral content. *Am J Dent*. 2019 Jun;32(3):124–32.
29. Pignoly C. Eclaircissement des dents pulpées : pourquoi la technique au fauteuil est-elle toujours d'actualité ? In: 10 points clefs sur la dyschromie dentaire. SDI. 2012.
30. Naini FB, Gill DS. Body dysmorphic disorder: a growing problem? *Prim Dent Care*. 2008 Apr;15(2):62–4.
31. Phillips KA. Body dysmorphic disorder: recognizing and treating imagined ugliness. *World Psychiatry*. 2004 Feb;3(1):12–7.
32. Martini EC, Parreiras SO, Acuña ED, Loguercio AD, Reis A. Does the Use of Reservoirs Have Any Impact on the Efficacy of At-Home Bleaching? A Systematic Review. *Braz Dent J*. 2019 Jun;30(3):285–94.
33. Kirsten GA, Freire A, de Lima AAS, Ignácio SA, Souza EM. Effect of reservoirs on gingival inflammation after home dental bleaching. *Quintessence Int*. 2009 Mar;40(3):195–202.
34. Javaheri DS, Janis JN. The efficacy of reservoirs in bleaching trays. *Oper Dent*. 2000 Jun;25(3):149–51.
35. Geisinger S, Kwon SR, Qian F. Employment of Reservoirs in At-Home Whitening Trays: Efficacy and Efficiency in Tooth Whitening. *J Contemp Dent Pract*. 2015 01;16(5):383–8.
36. Matis BA, Wang G, Matis JI, NB Cook. White Diet: Is It Necessary During Tooth Whitening? *Operative Dentistry*. 2015;
37. Carlos N, Pinto A, Amaral F do, França F, Turssi C, Basting R. Influence of Staining Solutions on Color Change and Enamel Surface Properties During At-home and In-office Dental Bleaching: An In Situ Study. *Operative Dentistry*. 2019 Apr 29;
38. Armênio RV, Fitarelli F, Armênio MF, Demarco FF, Reis A, Loguercio AD. The effect of fluoride gel use on bleaching sensitivity: a double-blind randomized controlled clinical trial. *J Am Dent Assoc*. 2008 May;139(5):592–7; quiz 626–7.
39. Martin JMH, de Almeida JB, Rosa EAR, Soares P, Torno V, Rached RN, et al. Effect of fluoride therapies on the surface roughness of human enamel exposed to bleaching agents. *Quintessence Int*. 2010 Jan;41(1):71–8.

40. de Geus JL, Fernández E, Kossatz S, Loguercio AD, Reis A. Effects of At-home Bleaching in Smokers: 30-month Follow-up. *Oper Dent*. 2017 Dec;42(6):572–80.
41. Karadas M, Seven N. The effect of different drinks on tooth color after home bleaching. *Eur J Dent*. 2014;8(2):249–53.
42. Liporoni PCS, Souto CMC, Pazinato RB, Cesar ICR, de Rego MA, Mathias P, et al. Enamel susceptibility to coffee and red wine staining at different intervals elapsed from bleaching: a photoreflectance spectrophotometry analysis. *Photomed Laser Surg*. 2010 Oct;28 Suppl 2:S105-109.
43. Ito A, Naito M, Naito Y, Watanabe H. Induction and characterization of gastro-duodenal lesions in mice given continuous oral administration of hydrogen peroxide. *Gan*. 1982 Apr;73(2):315–22.
44. Cina SJ, Downs JC, Conradi SE. Hydrogen peroxide: a source of lethal oxygen embolism. Case report and review of the literature. *Am J Forensic Med Pathol*. 1994 Mar;15(1):44–50.
45. Haywood VB, Leonard RH, Nelson CF, Brunson WD. Effectiveness, side effects and long-term status of nightguard vital bleaching. *J Am Dent Assoc*. 1994 Sep;125(9):1219–26.
46. Wang Y, Gao J, Jiang T, Liang S, Zhou Y, Matis BA. Evaluation of the efficacy of potassium nitrate and sodium fluoride as desensitizing agents during tooth bleaching treatment—A systematic review and meta-analysis. *J Dent*. 2015 Aug;43(8):913–23.
47. Dahl JE, Pallesen U. Tooth bleaching--a critical review of the biological aspects. *Crit Rev Oral Biol Med*. 2003;14(4):292–304.
48. de Oliveira R, Basting RT, Rodrigues JA, Rodrigues AL, Serra MC. Effects of a carbamide peroxide agent and desensitizing dentifrices on enamel microhardness. *Am J Dent*. 2003 Feb;16(1):42–6.
49. Vilhena KFB, Nogueira BCL, Fagundes NCF, Loretto SC, Angelica RS, Lima RR, et al. Dental enamel bleached for a prolonged and excessive time: Morphological changes. *PLoS One*. 2019 Apr 5;14(4).
50. Berry JH. What about whiteners? Safety concerns explored. *J Am Dent Assoc*. 1990 Aug;121(2):222–5.
51. Rotstein I, Mor C, Arwaz JR. Changes in surface levels of mercury, silver, tin, and copper of dental amalgam treated with carbamide peroxide and hydrogen peroxide in vitro. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod*. 1997 Apr;83(4):506–9.

52. Da Silva Machado J, Cândido MSM, Sundfeld RH, De Alexandre RS, Cardoso JD, Sundfeld MLMM. The influence of time interval between bleaching and enamel bonding. *J Esthet Restor Dent*. 2007;19(2):111–8; discussion 119.
53. de Geus JL, de Lara MB, Hanzen TA, Fernández E, Loguercio AD, Kossatz S, et al. One-year follow-up of at-home bleaching in smokers before and after dental prophylaxis. *J Dent*. 2015 Nov;43(11):1346–51.
54. Burrows S. A review of the efficacy of tooth bleaching. *Dental Update*. 2009;Prosthodontics:537–51.
55. Max Schmeling DDS MS. Color Selection and Reproduction in Dentistry. Part 1: Fundamentals of Color. 1. 2016 Mar 17;18(1):23–32.
56. Vincent HAMPE KAUTZ. Le relevé de la couleur : évaluation clinique et comparative des méthodes visuelles et électroniques. Strasbourg; 2019.
57. Joiner A. Tooth colour: a review of the literature. *J Dent*. 2004;32 Suppl 1:3–12.
58. Fabien GIAU. Différentes techniques d'enregistrement de teinte en prothèse fixée. Nantes; 2012.
59. Mina ZAGZOULE FERRAND. Données actuelles sur la photographie au cabinet. Toulouse; 2016.
60. Charlotte DARIES. Relevé de la couleur au cabinet dentaire : connaissances et moyens d'optimisation actuels. Toulouse; 2013.
61. Pignoly C, Aubut V, Baixe S, Barthelemy H, Etienne O, Girard JL, et al. Prise de teintes des techniques conventionnelles aux techniques électroniques. 2010. 71 p. (ADF; vol. Prise de teintes).
62. D'Incau E., Pia J, Pivet J. Couleur et choix de la teinte en Odontologie. In: Esthétique en odontologie. JPIO. 2014. p. 25–39. (JPIO).
63. Brodbelt RH, O'Brien WJ, Fan PL, Frazer-Dib JG, Yu R. Translucency of human dental enamel. *J Dent Res*. 1981 Oct;60(10):1749–53.
64. Yu B, Ahn J-S, Lee Y-K. Measurement of translucency of tooth enamel and dentin. *Acta Odontol Scand*. 2009;67(1):57–64.
65. Gómez-Polo C, Montero J, Gómez-Polo M, Parga JAMV de, Celemin-Viñuela A. Natural Tooth Color Estimation Based on Age and Gender. *Journal of Prosthodontics*. 2017;26(2):107–14.
66. Capa N, Malkondu O, Kazazoglu E, Calikkocaoglu S. Effects of individual factors and the training process of the shade-matching ability of dental students. *Journal of Dental Sciences*. 2011 Sep 1;6(3):147–52.

67. Pohlen B, Hawlina M, Šober K, Kopač I. Tooth Shade-Matching Ability Between Groups of Students with Different Color Knowledge. *Int J Prosthodont*. 2016 Oct;29(5):487–92.
68. Haralur SB, Al-Shehri KS, Assiri HM, Al-Qahtani MA. Influence of personality on tooth shade selection. *The International Journal of Esthetic Dentistry*. 2016;11(1):126–37.
69. Chu SJ, Trushkowsky RD, Paravina RD. Dental color matching instruments and systems. Review of clinical and research aspects. *Journal of Dentistry*. 2010 Jan 1;38:e2–16.
70. Chu SJ. Use of a reflectance spectrophotometer in evaluating shade change resulting from tooth-whitening products. *J Esthet Restor Dent*. 2003;15 Suppl 1:S42-48.
71. Da Silva JD, Park SE, Weber H-P, Ishikawa-Nagai S. Clinical performance of a newly developed spectrophotometric system on tooth color reproduction. *J Prosthet Dent*. 2008 May;99(5):361–8.
72. Tung FF, Goldstein GR, Jang S, Hittelman E. The repeatability of an intraoral dental colorimeter. *J Prosthet Dent*. 2002 Dec;88(6):585–90.
73. Igiel C, Lehmann KM, Ghinea R, Weyhrauch M, Hangx Y, Scheller H, et al. Reliability of visual and instrumental color matching. *Journal of Esthetic and Restorative Dentistry*. 2017;29(5):303–8.
74. Bolt RA, Bosch JJ, Coops JC. Influence of window size in small-window colour measurement, particularly of teeth. *Phys Med Biol*. 1994 Jul;39(7):1133–42.
75. Parameswaran V, Anilkumar S, Lylajam S, Rajesh C, Narayan V. Comparison of accuracies of an intraoral spectrophotometer and conventional visual method for shade matching using two shade guide systems. *J Indian Prosthodont Soc*. 2016 Dec;16(4):352–8.
76. Culic C, Varvara M, Tatar G, Simu MR, Rica R, Mesaros A, et al. In Vivo Evaluation of Teeth Shade Match Capabilities of a Dental Intraoral Scanner. *Current Health Sciences Journal*. 2018 Dec;44(4):337.
77. Rutkūnas V, Dirsė J, Bilius V. Accuracy of an intraoral digital scanner in tooth color determination. *The Journal of Prosthetic Dentistry*. 2019 Jun 18;
78. Reyes J, Acosta P, Ventura D. Repeatability of the human eye compared to an intraoral scanner in dental shade matching. *Heliyon*. 2019 Jul;5(7).

79. Salehi A, Etienne O, Watzki D, Ibraimi D. eLab : un nouveau système d'analyse et de contrôle chromatique. *Réalités Cliniques*. 2019;30(3):206–14.
80. Oh W, Pogoncheff J, O'Brien WJ. Digital Computer Matching of Tooth Color. *Materials*. 2010 Jun;3(6):3694–9.
81. Mayer Y, Ginesin O, Machtei EE. Photometric CIELAB Analysis of the Gingiva: A Novel Approach to Assess Response to Periodontal Therapy. *Journal of Periodontology*. 2017;88(9):854–9.
82. Fondriest J. Shade matching in restorative dentistry: the science and strategies. *Int J Periodontics Restorative Dent*. 2003 Oct;23(5):467–79.
83. Luo W, Naeeni M, Platten S, Wang J, Sun JN, Westland S, et al. The in vitro and in vivo reproducibility of a video-based digital imaging system for tooth colour measurement. *Journal of Dentistry*. 2017 Dec 1;67:S15–9.
84. Smith RN, Collins LZ, Naeeni M, Joiner A, Philpotts CJ, Hopkinson I, et al. The in vitro and in vivo validation of a mobile non-contact camera-based digital imaging system for tooth colour measurement. *J Dent*. 2008;36 Suppl 1:S15-20.
85. Jarad FD, Russell MD, Moss BW. The use of digital imaging for colour matching and communication in restorative dentistry. *Br Dent J*. 2005 Jul 9;199(1):43–9; discussion 33.
86. Villavicencio-Espinoza CA, Narimatsu MH, Furuse AY. Using Cross-Polarized Photography as a Guide for Selecting Resin Composite Shade. *Oper Dent*. 2018 Apr;43(2):113–20.
87. Lazar R, Culic B, Gasparik C, Lazar C, Dudea D. The accuracy of dental shade matching using cross-polarization photography. *Int J Comput Dent*. 2019;22(4):343–51.
88. A Baltzer, V Kauffmann. La définition des teintes de dent. *Quintessenz Zahntechnik*. 2004;30.
89. JF Lasserre. Les sept dimensions de la couleur des dents naturelles. *Clinic*. 2007;28.
90. Adrien BOUCHER. Mesure in vivo du changement de couleur des dents naturelles sous l'effet de la déshydratation : étude d'un groupe de patients de moins de trente ans. Bordeaux; 2015.
91. Khashayar G, Bain PA, Salari S, Dozic A, Kleverlaan CJ, Feilzer AJ. Perceptibility and acceptability thresholds for colour differences in dentistry. *Journal of Dentistry*. 2014 Jun 1;42(6):637–44.

92. Ramesh AS, Sharma A, Rijesh K, Prakash R, Devi L, Raja E. Assessment of perceptibility and acceptability of color variations between matched teeth among trainee dentist and lay person. *J Pharm Bioallied Sci.* 2015 Aug;7(Suppl 2):S632–5.
93. Ishikawa-Nagai S, Yoshida A, Sakai M, Kristiansen J, Da Silva JD. Clinical evaluation of perceptibility of color differences between natural teeth and all-ceramic crowns. *Journal of Dentistry.* 2009 Jan 1;37:e57–63.
94. Paravina RD, Ghinea R, Herrera LJ, Bona AD, Igiel C, Linninger M, et al. Color Difference Thresholds in Dentistry. *Journal of Esthetic and Restorative Dentistry.* 2015;27(S1):S1–9.
95. Douglas RD, Steinhauer TJ, Wee AG. Intraoral determination of the tolerance of dentists for perceptibility and acceptability of shade mismatch. *J Prosthet Dent.* 2007 Apr;97(4):200–8.
96. Ragain JC, Johnston WM. Color acceptance of direct dental restorative materials by human observers. *Color Research & Application.* 2000;25(4):278–85.
97. C Gomez Polo et al. Comparison of the CIELab and CIEDE2000 color difference formulas. *The Journal of Prosthetic Dentistry.* 2016;115.
98. Pecho OE, Ghinea R, Alessandretti R, Pérez MM, Della Bona A. Visual and instrumental shade matching using CIELAB and CIEDE2000 color difference formulas. *Dental Materials.* 2016 Jan 1;32(1):82–92.
99. Pérez M del M, Saleh A, Yebra A, Pulgar R. Study of the variation between CIELAB ΔE^* and CIEDE2000 color-differences of resin composites. *Dent Mater J.* 2007 Jan;26(1):21–8.
100. Sharma G, Wu W, Dalal EN. The CIEDE2000 color-difference formula: Implementation notes, supplementary test data, and mathematical observations. *Color Research & Application.* 2005;30(1):21–30.
101. Lee Y-K. Comparison of CIELAB ΔE^* and CIEDE2000 color-differences after polymerization and thermocycling of resin composites. *Dental Materials.* 2005 Jul 1;21(7):678–82.
102. Schropp L. Shade matching assisted by digital photography and computer software. *J Prosthodont.* 2009 Apr;18(3):235–41.
103. Bernardon JK, Ferrari P, Baratieri LN, Rauber GB. Comparison of treatment time versus patient satisfaction in at-home and in-office tooth bleaching therapy. *The Journal of Prosthetic Dentistry.* 2015 Dec 1;114(6):826–30.

ANNEXES

Annexe 1 : Formules du calcul complet de CIEDE2000

$$\Delta L' = L_2^* - L_1^*$$

$$\bar{L} = \frac{L_1^* + L_2^*}{2}$$

$$\bar{C} = \frac{C_1^* + C_2^*}{2}$$

$$a_1' = a_1^* + \frac{a_1^*}{2} \left(1 - \sqrt{\frac{\bar{C}^7}{\bar{C}^7 + 25^7}} \right) \quad a_2' = a_2^* + \frac{a_2^*}{2} \left(1 - \sqrt{\frac{\bar{C}^7}{\bar{C}^7 + 25^7}} \right)$$

$$\bar{C}' = \frac{C_1' + C_2'}{2}$$

$$\Delta C' = C_2' - C_1'$$

$$C_1' = \sqrt{a_1'^2 + b_1'^2}$$

$$C_2' = \sqrt{a_2'^2 + b_2'^2}$$

$$\Delta h_1' = \text{atan } 2(b_1', a_1') \bmod 360^\circ$$

$$\Delta h_2' = \text{atan } 2(b_2', a_2') \bmod 360^\circ$$

$$\Delta h' = \begin{cases} h_2' - h_1' & |h_1' - h_2'| \leq 180^\circ \\ h_2' - h_1' + 360^\circ & |h_1' - h_2'| > 180^\circ, h_2' \leq h_1' \\ h_2' - h_1' - 360^\circ & |h_1' - h_2'| > 180^\circ, h_2' > h_1' \end{cases}$$

$$\Delta H' = 2\sqrt{C_1' C_2'} \sin(\Delta h' / 2)$$

$$H' = \begin{cases} (h_1' + h_2' + 360^\circ)/2 & |h_1' - h_2'| > 180^\circ \\ (h_1' + h_2')/2 & |h_1' - h_2'| \leq 180^\circ \end{cases}$$

$$T = 1 - 0.17 \cos(\bar{H}' - 30^\circ) + 0.24 \cos(2\bar{H}') + 0.32 \cos(3\bar{H}' + 6^\circ) - 0.20 \cos(4\bar{H}' - 63^\circ)$$

$$S_L = \frac{1 + 0.015(\bar{L} - 50)^2}{\sqrt{20 + (\bar{L} - 50)^2}}$$

$$S_C = 1 + 0.045\bar{C}'$$

$$S_H = 1 + 0.015\bar{C}'T$$

$$R_T = -2 \sqrt{\frac{\bar{C}^7}{\bar{C}^7 + 25^7}} \sin \left[60^\circ \cdot \exp \left(- \left[\frac{\bar{H} - 275^\circ}{25^\circ} \right]^2 \right) \right]$$

$$\Delta E = \sqrt{\left(\frac{\Delta L'}{k_L S_L} \right)^2 + \left(\frac{\Delta C'}{k_C S_C} \right)^2 + \left(\frac{\Delta H'}{k_H S_H} \right)^2} + R_T \left(\frac{\Delta C'}{k_C S_C} \right) \left(\frac{\Delta H'}{k_H S_H} \right)$$

Annexe 2 : Modèle de fiche de consentement éclairé

Nom du Patient :

Date de naissance :

Je consens à intégrer une étude en rapport avec l'éclaircissement dentaire pour laquelle je devrai respecter strictement le protocole demandé sous peine d'être exclus de l'étude. Le protocole consiste en l'application d'une gouttière chargée par mes soins en peroxyde de carbamide à 10%, à porter toute la nuit pendant une durée minimum de 15 nuits et pouvant aller jusqu'à un mois selon le besoin et les critères d'évaluation.

Je consens que mes photographies puissent être utilisées à n'importe quel moment et indéfiniment dans le cadre d'une thèse ou tout autre support pédagogique à venir, pour lesquelles je comprends et j'ai conscience qu'il ne me sera plus possible par la suite de revenir sur ma décision et de me rétracter.

Je comprends que je ne détiens aucun "droit d'auteur" (copyright) ni aucun autre droit dans la prise de ces photos et que je ne suis dans l'attente d'aucune compensation, financière ou autre, pour leur utilisation. Néanmoins le traitement d'éclaircissement dont je ferai l'objet me sera gracieusement offert.

Je comprends que mon nom et tout autre information d'identification (excepté l'image complète) resteront strictement confidentiels.

Signature		Date
------------------	--	-------------

Annexe 3 : Modèle de fiche d'information et de conseil sur le traitement

CONSEILS PER ET POST OPERATOIRE POUR L'ECLAIRCISSEMENT EXTERNE

Fiche réalisée dans le cadre de la thèse « évaluation numérique des éclaircissements dentaires » - HE/SALEHI 2019

MATERIEL

Une gouttière sans réservoir est fournie pour chaque arcade.

Une seringue (2,5 g environ) de peroxyde de carbamide à 10 % (contenant des agents désensibilisants) est fournie au patient par arcade et par semaine de traitement.

PROTOCOLE D'UTILISATION

- Brosser les dents avant l'application
- Apposer à l'aide de la seringue une goutte de produit dans l'intrados des gouttières au niveau du centre de la face vestibulaire des dents concernées
- Après insertion des gouttières, éliminer les excès à l'aide d'une brosse à dent
- Garder la gouttière pendant la nuit (6 à 8 heures).
- A la fin de chaque application, rincer les gouttières à l'eau froide pour les débarrasser du gel éclaircissant résiduel

OPTIMISER L'ACTION DU TRAITEMENT

- Pendant la durée du traitement, éviter de consommer du café, du thé, ou tout autre aliment très pigmenté.
- Éviter de fumer
- Éviter d'utiliser les dentifrices désensibilisants qui ont pour principe d'obturer les canalicules

GESTION DES SENSIBILITES

- Alimentation et boisson tempérée
- En cas de forte sensibilité faire une pause d'une nuit sans traitement, utiliser seulement le gel fluoré, puis reprendre le traitement la nuit suivante.
- A la fin du traitement d'éclaircissement, appliquer gel fluoré (type Fluogel) pendant 3 minutes à l'aide de la gouttière pendant 3 jours consécutifs.

Annexe 4 : Tableaux statistiques des tests de Tukey concernant les consommations pigmentaires (thé, sodas, café et tabac)

Multiple Comparisons - Tukey HSD

Based on observed means
The error term in Mean Square (Error) = ,627

(I) Tea	(J) Tea	Mean Difference (I-J)	Std. Error	Sig.	95% Confidence Interval	
					Lower Bound	Upper Bound
No	>=1/day	,1276	,23631	,852	-,4583	,7135
	2	,2868	,57641	,873	-1,1424	1,7160
>=1/day	No	-,1276	,23631	,852	-,7135	,4583
	2	,1592	,59171	,961	-1,3079	1,6263
2	No	-,2868	,57641	,873	-1,7160	1,1424
	>=1/day	-,1592	,59171	,961	-1,6263	1,3079

(I) Sodas	(J) Sodas	Mean Difference (I-J)	Std. Error	Sig.	95% ...	
					Lower Bound	Upper Bound
No	>=1glass/day	,2449	,22406	,526	-,3106	,8004
	2	,1261	,58083	,974	-1,3140	1,5662
>=1glass/day	No	-,2449	,22406	,526	-,8004	,3106
	2	-,1188	,58256	,977	-1,5632	1,3256
2	No	-,1261	,58083	,974	-1,5662	1,3140
	>=1glass/day	,1188	,58256	,977	-1,3256	1,5632

(I) Coffee	(J) Coffee	Mean Difference (I-J)	Std. Error	Sig.	95% Confidence Interval	
					Lower Bound	Upper Bound
No	1/day	-,1312	,23913	,848	-,7241	,4617
	>2 /day	,0176	,35609	,999	-,8653	,9005
1/day	No	,1312	,23913	,848	-,4617	,7241
	>2 /day	,1488	,37313	,916	-,7764	1,0740
>2 /day	No	-,0176	,35609	,999	-,9005	,8653
	1/day	-,1488	,37313	,916	-1,0740	,7764

(I) Smoking	(J) Smoking	Mean Difference (I-J)	Std. Error	Sig.	95% Confidence Interval	
					Lower Bound	Upper Bound
No	>=5/day	,1087	,29499	,983	-,6986	,9159
	>=10/day	,2277	,37777	,930	-,8061	1,2614
	>=15/day	,3837	,57504	,908	-1,1900	1,9573
>=5/day	No	-,1087	,29499	,983	-,9159	,6986
	>=10/day	,1190	,44150	,993	-1,0892	1,3272
	>=15/day	,2750	,61877	,970	-1,4183	1,9683
>=10/day	No	-,2277	,37777	,930	-1,2614	,8061
	>=5/day	-,1190	,44150	,993	-1,3272	1,0892
	>=15/day	,1560	,66225	,995	-1,6563	1,9683
>=15/day	No	-,3837	,57504	,908	-1,9573	1,1900
	>=5/day	-,2750	,61877	,970	-1,9683	1,4183
	>=10/day	-,1560	,66225	,995	-1,9683	1,6563

HE Matthieu – Évaluation numérique de l'éclaircissement dentaire : étude *in vivo*
(Thèse 3^{ème} cycle Sci. odontol. Strasbourg : 2020 ; N°76)
N°43.22.20.76

Résumé :

La population de la société contemporaine accorde une importance croissante à l'apparence, à l'esthétique et donc à leur sourire. L'éclaircissement externe est la première étape du gradient thérapeutique face à des problématiques de couleur dentaire avant d'envisager des solutions plus invasives et complexes.

La thèse a pour objectif principal de pallier les limites d'une évaluation subjective d'un éclaircissement dentaire en proposant une méthode d'analyse objective faisant appel à la photographie et aux outils numériques disponibles sur le marché. Pour cela, nous nous appuyons sur le protocole eLab qui exploite le système CIE L*a*b* développé par la Commission Internationale de l'Éclairage (CIE).

Afin d'atteindre notre objectif, ce projet s'articulera autour d'une étude clinique : un éclaircissement externe en technique ambulatoire conventionnelle effectué sur un panel de 63 étudiants volontaires. Le relevé hebdomadaire des couleurs a été fait selon le protocole eLab. Ce travail de thèse est également étayé par une revue la plus exhaustive possible de la littérature disponible sur le sujet pour nous aider à poser puis répondre aux différentes hypothèses posées dans le cadre de cette étude clinique.

Rubrique de classement : ESTHÉTIQUE

Mots clefs : Éclaircissement, couleur, CIE L*a*b, photographie, polarisation

Me SH : Tooth bleaching, color, CIE L*a*b, photography, polarization

Jury :

Président :	Professeur MINOUX Maryline
Assesseurs :	Professeur MEYER Florent
	Docteur REITZER François
	<u>Docteur ETIENNE Olivier</u>
Membre invité :	<u>Docteur SALEHI Ali</u>

<u>Coordonnées de l'auteur</u> :	HE Matthieu
Adresse postale :	3 rue du Jura, 68280 Andolsheim
Adresse électronique :	docteur.he@gmail.com