



HAL
open science

La transmission de la couleur dentaire et ses évolutions : de la méthode conventionnelle au protocole eLAB®

Camille Poulain-Ferarios

► To cite this version:

Camille Poulain-Ferarios. La transmission de la couleur dentaire et ses évolutions : de la méthode conventionnelle au protocole eLAB®. Sciences du Vivant [q-bio]. 2020. dumas-03187038

HAL Id: dumas-03187038

<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-03187038v1>

Submitted on 31 Mar 2021

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

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



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

AVERTISSEMENT

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

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

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

UNIVERSITÉ DE PARIS

UFR D'ODONTOLOGIE - MONTROUGE

Année 2020

N° M064

THÈSE

POUR LE DIPLÔME D'ÉTAT DE DOCTEUR EN CHIRURGIE DENTAIRE

Présentée et soutenue publiquement le : 16 juillet 2020

Par

Camille POULAIN-FERARIOS

**La transmission de la couleur dentaire et ses évolutions : de la
méthode conventionnelle au protocole eLAB®**

Dirigée par M. le Docteur Thibault Drouhet

JURY

M. le Professeur Louis Maman

Président

M. le Docteur Jean-Pierre Attal

Assesseur

M. le Docteur Daniel Dot

Assesseur

M. le Docteur Thibault Drouhet

Assesseur

M. le Docteur Jean-Baptiste Souron

Invité



Tableau des enseignants de l'UFR

DÉPARTEMENTS	DISCIPLINES	PROFESSEURS DES UNIVERSITÉS	MÂÎTRES DE CONFÉRENCES
1. DÉVELOPPEMENT, CROISSANCE ET PRÉVENTION	ODONTOLOGIE PÉDIATRIQUE	Mme DAVIT-BÉAL Mme DURSUN Mme VITAL	M. COURSON Mme JEGAT Mme SMAIL-FAUGERON Mme VANDERZWALM
	ORTHOPÉDIE DENTO-FACIALE		Mme BENAHMED M. DUNGLAS Mme KAMOUN Mme LE NORCY
	PRÉVENTION, ÉPIDÉMIOLOGIE, ÉCONOMIE DE LA SANTÉ ET ODONTOLOGIE LÉGALE	Mme FOLLIGUET M. PIRNAY	Mme GERMA M. TAVERNIER
2. CHIRURGIE ORALE, PARODONTOLOGIE, BIOLOGIE ORALE	PARODONTOLOGIE	Mme COLOMBIER Mme GOSSET	M. BIOSSE DUPLAN M. GUEZ
	CHIRURGIE ORALE	M. MAMAN Mme RADOI	Mme EJEIL M. GAULTIER M. HADIDA M. MOREAU M. NGUYEN Mme TAÏHI
	BIOLOGIE ORALE	Mme CHAUSSAIN M. GOGLY Mme SÉGUIER Mme POLIARD	M. ARRETO Mme BARDET (MCF) Mme CHARDIN M. FERRE M. LE MAY
3. RÉHABILITATION ORALE	DENTISTERIE RESTAURATRICE ENDODONTIE	Mme BOUKPESSI Mme CHEMLA	Mme BERÈS Mme BESNAULT M. BONTE Mme COLLIGNON M. DECUP Mme GAUCHER
	PROTHÈSES	Mme WULFMAN	M. CHEYLAN M. DAAS M. DOT M. EID Mme FOUILLOUX-PATEY Mme GORIN M. RENAULT M. RIGNON-BRET M. TRAMBA
	FONCTION-DYSFONCTION, IMAGERIE, BIOMATÉRIAUX	M. SALMON	M. ATTAL Mme BENBELAID Mme BENOÎT A LA GUILLAUME (MCF) M. BOUTER M. CHARRIER M. CHERRUAU M. FLEITER Mme FRON CHABOUIS Mme MANGIONE Mme TILOTTA
	PROFESSEURS ÉMÉRITES	M. BÉRENHOLC Mme BRION M. LASFARGUES M. LAUTROU M. LEVY	M. PELLAT M. PIERRISNARD M. SAFFAR Mme WOLIKOW

Liste mise à jour le 04 novembre 2019

Remerciements

À M. le Professeur Louis Maman

Docteur en Chirurgie dentaire

Spécialiste qualifié en Chirurgie orale

Docteur en Sciences odontologiques

Habilité à Diriger des Recherches

Professeur des Universités, UFR d'Odontologie - Montrouge

Praticien Hospitalier, Assistance Publique - Hôpitaux de Paris

Doyen de l'UFR d'Odontologie - Montrouge

Qui me fait l'honneur de présider ce jury de thèse d'exercice. J'ai été accueillie à bras ouverts à l'UFR de Montrouge par un Doyen bienveillant et très sympathique, qui a toujours eu à cœur de me permettre de concilier au mieux sport et études. Veuillez trouver en cette réalisation l'expression de ma sincère reconnaissance et de mes profonds remerciements.

À M. le Docteur Jean-Pierre Attal

Docteur en Chirurgie dentaire

Docteur de l'Université Paris Descartes

Habilité à Diriger des Recherches

Maître de Conférences des Universités, UFR d'Odontologie - Montrouge

Praticien Hospitalier, Assistance Publique - Hôpitaux de Paris

Vice-Doyen de l'UFR d'Odontologie - Montrouge

Qui me fait l'honneur de prendre part à ce jury de thèse. Je vous remercie pour votre grand sens de la pédagogie et pour l'attention que vous portez au bien-être des étudiants. Vous avez suscité en moi cette envie sans limite d'apprendre et de comprendre toujours plus. Que ce travail soit l'occasion de vous témoigner ma sincère gratitude et mon profond respect.

À M. le Docteur Daniel Dot

Docteur en Chirurgie dentaire

Docteur de l'Université Paris Descartes

Maître de Conférences des Universités, UFR d'Odontologie - Montrouge

Praticien Hospitalier, Assistance Publique - Hôpitaux de Paris

Qui me fait l'honneur de prendre part à ce jury de thèse. J'ai appris à vous connaître à travers un écran par le biais du CES de prothèse conjointe et j'ai découvert en vous une extrême bienveillance. Je tiens à vous remercier pour la disponibilité et la gentillesse dont vous faites preuve ainsi que pour cet important sens critique et cette ouverture d'esprit que vous nous transmettez. Veuillez croire, Docteur, en mon profond respect.

À M. le Docteur Thibault Drouhet

Docteur en Chirurgie dentaire

Assistant Hospitalo-universitaire, UFR d'Odontologie - Montrouge

Qui m'a fait l'honneur et le plaisir de diriger ce travail. Pour votre patience, votre gentillesse, votre généreuse envie de partager et votre accessibilité qui font de vous un enseignant si apprécié. Vous avez été et continuerez d'être pour moi un exemple. L'écriture de cette thèse a connu quelques rebondissements, ainsi que des périodes bien plus intenses que d'autres, au cours desquelles vous m'avez toujours soutenue et accompagnée. Veuillez recevoir l'expression de ma gratitude et de mes remerciements les plus profonds.

À M. le Docteur Jean-Baptiste Souron

Docteur en Chirurgie dentaire

Praticien Attaché, Assistance Publique - Hôpitaux de Paris

Qui me fait l'honneur d'être l'invité de mon jury de thèse. Merci pour votre grande patience et pour la précieuse aide que vous m'apportez chaque semaine. Votre gentillesse est salubre et j'espère avoir la chance d'apprendre à vos côtés pendant encore de nombreuses années. Veuillez recevoir l'expression de mon immense reconnaissance et mes chaleureux remerciements.

À ma famille,

À mes parents, pour leur soutien inconditionnel depuis le premier jour et l'amour avec lequel j'ai grandi. Pour les milliers d'aller-retours en voiture qui m'ont permis de marier au mieux sport et études de l'école primaire jusqu'à l'université. Rien de tout ça n'aurait été possible sans votre aide et votre dévouement. Merci pour tout, je vous aime.

À mes grands-mères dont la fierté m'a toujours poussée à me surpasser. Merci pour votre amour, j'ai tant plaisir à vous avoir dans ma vie. Et à mes grands-pères qui continuent de veiller sur moi.

À Camille, merci pour ton énorme soutien au quotidien et ta gentillesse. Merci pour tous ces bons moments et les nombreux autres à venir. Et merci d'avoir corrigé mes fautes d'orthographe (s'il en reste c'est de sa faute...)

À mon chat (oui oui), Gipy, merci pour toutes les heures de révisions passées à mes côtés !

À mes amis, merci à vous pour votre bonne humeur, votre écoute, votre présence, et votre soutien.

Merci à toi Léna d'avoir été la meilleure des binômes et de m'avoir supportée avec patience dans les moments où tu avais probablement envie de m'arracher les cheveux ! Merci pour ta passion communicative et cette amitié qui m'est si chère.

Merci à toi Elodie pour ton écoute, pour toutes ces discussions libératrices, pour ta folie après ingestion de sucre et ton soutien vraiment appréciable tout au long de mon parcours.

Merci à toi Anne-Claire pour ta lucidité, ta simplicité, tes retards qui rendaient les miens acceptables et pour tes bons petits plats que je n'arrive toujours pas à égaler.

Merci à toi Hanna, tu resteras à vie ma valeur sûre pour les concerts ! Merci à toi Mathilde d'avoir été un rayon de soleil dans les couloirs parfois sombres de l'hôpital. Merci à toi Lucie, pour tous nos bons moments de vacances et nos heures passées sur le dancefloor. Merci à vous Sixtine, Eléonore, Justine, Nadir, Bettina, Théo, Fred, Sophie, Anne-So... et à toute la team d'Ivry (amis, tuteurs, attachés, enseignants, aide-soignants, ...) merci pour tous ces bons souvenirs.

À Clara, Manon et Emma, pour leur amitié intemporelle.

À Margaux, merci de m'avoir accompagnée et guidée dans mes premiers pas de bébé dentiste. J'ai apprécié travailler à vos côtés et vous en suis très reconnaissante.

Et enfin, au ski nautique et au monde qui l'entoure, merci pour tout. Merci d'avoir été la meilleure école de la vie. Merci pour tous ces moments de joie mais aussi pour tous ces moments de grande déception qui m'ont au final tant appris. Merci de m'avoir permis de trouver un équilibre et un bien-être tout au long de ces années.

Table des matières

INTRODUCTION	3
1 : LA COULEUR	5
1.1 GENERALITES SUR LA COULEUR	5
1.1.1 Notions élémentaires d'optique	5
1.1.2 Création de la couleur.....	9
1.1.3 Description des couleurs.....	11
1.2 LA COULEUR DES DENTS NATURELLES	13
1.2.1. Espace chromatique des dents naturelles	13
1.2.2 Autres caractéristiques des dents naturelles.....	16
2 : DETERMINATION ET TRANSMISSION DE LA COULEUR PAR TECHNIQUE CONVENTIONNELLE	21
2.1 DESCRIPTION DE LA METHODE CONVENTIONNELLE	21
2.1.1 Principe de fonctionnement et conseils d'utilisation	21
2.1.2 Les principaux teintiers céramiques.....	22
2.2 INCONVENIENTS ET ERREURS POSSIBLES PAR METHODE CONVENTIONNELLE.....	26
2.2.1 Sources d'erreurs liées au matériel.....	26
2.2.2 Sources d'erreurs et subjectivité liées à l'observateur.....	28
2.2.3 Sources d'erreurs liées à l'environnement	30
3 : DISPOSITIFS D'OPTIMISATION DU RELEVÉ VISUEL ET DE LA TRANSMISSION DE LA COULEUR	32
3.1 OPTIMISATION DE L'ECLAIRAGE.....	32
3.1.1 Lumière idéale pour le relevé visuel.....	32
3.1.2 Lampes calibrées	33
3.2 OPTIMISATION DE LA COMMUNICATION A L'AIDE DE LA PHOTOGRAPHIE NUMERIQUE.....	34
3.2.1 Principe de fonctionnement de la photographie numérique	34
3.2.2 Matériel et cliché nécessaires.....	36
3.2.3 Accessoires et clichés additionnels	38
3.3. OPTIMISATION DU RELEVÉ DE LA COULEUR A L'AIDE D'UN SPECTROPHOTOMETRE	42
3.3.1. Généralité sur les spectrophotomètres.....	42
3.3.2 Fonctionnement du spectrophotomètre VITA Easyshade® V	42
3.3.3. Inconvénients des spectrophotomètres.....	44
4 : LE PROTOCOLE ELAB®	46
4.1 PROTOCOLE POUR LA PRISE DU CLICHE PHOTOGRAPHIQUE	46

4.1.1 Matériel de photographie nécessaire	46
4.1.2 Prise du cliché photographique	49
4.2 UTILISATION DES LOGICIELS	50
4.2.1 Utilisation d'Adobe Lightroom® et d'eLAB-pilot®	50
4.2.2. Utilisation du logiciel eLAB_prime®	52
4.3 INTERETS ET LIMITES DU PROTOCOLE eLAB®	54
4.3.1 Intérêts de la technique eLAB®	54
4.3.2 Limites et inconvénients du protocole eLAB®	57
4.4 ÉTUDES IN VIVO AUTOUR DES VALEURS COLORIMÉTRIQUES L*A*B*	58
4.4.1 Étude comparative de la répétabilité des valeurs colorimétriques déterminées par le spectrophotomètre VITA Easyshade® V et par le protocole eLAB®	58
4.4.2 Étude in vivo de l'évolution de la couleur d'une incisive centrale au cours de 60 minutes de déshydratation à l'aide du protocole eLAB®	61
CONCLUSION	64
BIBLIOGRAPHIE	66
TABLE DES FIGURES	70
TABLE DES TABLEAUX.....	72
ANNEXES	73
Annexe 1 : Calcul de la tolérance ΔE_{00} — Page 16	73
Annexe 2 : Calibration de la balance des blancs sur le logiciel Lightroom® — Page 50	74

Introduction

Les restaurations dentaires par technique directe ou indirecte représentent une part importante dans l'exercice d'un chirurgien-dentiste. Leur réussite passe avant tout par une bonne reproduction de la forme et de la fonction mais aussi par une imitation de la couleur des dents naturelles. Analyser, relever et communiquer la couleur dentaire afin d'en faire la meilleure représentation possible constitue donc une étape clé du succès esthétique.

Malgré d'importants progrès dans les matériaux et les techniques de fabrication utilisés, reproduire la juste couleur d'une dent naturelle continue d'être de nos jours une difficulté.¹

De manière générale, une couleur peut être caractérisée selon différents systèmes colorimétriques tels que le système LST ou HVC de Munsell (en français « Luminosité Saturation Teinte » et en anglais « Hue Value Chroma ») ou le système « CIE L*a*b* » de la Commission Internationale de l'Eclairage / International Commission on Illumination (CIE/ICI). Cependant, en dentisterie, déterminer une couleur se fait conventionnellement en comparant les échantillons d'un teintier aux dents naturelles. Cette technique, rapide et peu onéreuse, présente l'inconvénient d'être subjective et « opérateur-dépendante ». Un grand nombre de facteurs extérieurs ou propres au praticien peuvent en effet être sources d'erreurs et peuvent donc fausser la ou les couleurs choisies. Bien que des aides existent pour améliorer ce relevé, les teintiers sur le marché ne permettent qu'une approximation de la juste couleur de la dent observée en choisissant la référence qui s'en approche le plus. Un écart de couleur entre la restauration et les dents naturelles peut alors apparaître. Cette différence de couleur, qui peut être qualifiée de perceptible, cliniquement acceptable ou inacceptable, peut être calculée et est représentée par la valeur ΔE .

Afin de limiter un maximum cet écart, la couleur peut également être relevée directement de manière instrumentale, et donc objective, en utilisant, par exemple, un spectrophotomètre. En émettant un flash de lumière blanche polychromatique, l'appareil mesure le spectre réfléchi par la dent. La couleur est ainsi quantifiée et des valeurs colorimétriques L*a*b* précises lui sont attribuées.

La photographie numérique est, quant à elle, un bon outil de communication avec le prothésiste puisqu'elle permet, entre autres, de transmettre des informations sur la translucidité, l'opalescence, la texture et la caractérisation des dents. Un cliché faisant apparaître l'échantillon du teintier choisi par le praticien en regard des dents du patient est également une aide pour le prothésiste. Néanmoins, sans calibration, la photographie numérique ne permet pas de déterminer la couleur des dents.

¹ Li, Yu, et Wang, « In vivo spectroradiometric evaluation of colour matching errors among five shade guides ».

Récemment, eLAB[®], un système faisant intervenir la macrophotographie, a vu le jour. Ce protocole a pour but d'améliorer la fiabilité du relevé de la couleur des dents et d'en faciliter la reproduction au fauteuil ou au laboratoire. De manière indirecte, par l'intermédiaire d'une photo avec une carte de balance des blancs et d'une calibration numérique faite par un logiciel tel que Lightroom[®] ou eLAB_prime[®], ce système permet lui aussi d'obtenir les valeurs colorimétriques L*a*b* de la dent que l'on cherche à étudier. Il rend également possible la réalisation d'essais virtuels par le prothésiste. Ces derniers permettent de tester, à tout moment, la couleur de la pièce prothétique et d'analyser le ΔE , autrement dit l'écart entre la couleur de la restauration et la couleur des dents naturelles. Ces essais virtuels permettent de faire les corrections éventuellement nécessaires avant le véritable essai en bouche par le praticien et limitent ainsi le nombre d'aller-retours avec le laboratoire. Tout comme le spectrophotomètre, il permettrait de suivre un éclaircissement dentaire et pourrait également être un outil intéressant pour la recherche.

Au cours de ce travail, les notions fondamentales de la couleur ainsi que les caractéristiques visuelles des dents naturelles sont abordées, avant de décrire, en 2^e partie, le relevé visuel de la couleur dentaire par technique conventionnelle. Une troisième partie permet de s'intéresser à la détermination de la couleur par technique instrumentale. Enfin, une quatrième et dernière partie est consacrée au protocole photographique eLAB[®], agrémentée de deux études in vivo : une, visant à comparer la répétabilité du protocole eLAB[®] et du spectrophotomètre VITA Easyshade[®] V, et l'autre portant sur l'évolution des données colorimétriques L*a*b* au cours de 60 minutes de déshydratation.

Pour l'analyse de ces données, il est avant tout primordial de pouvoir décrire une couleur.

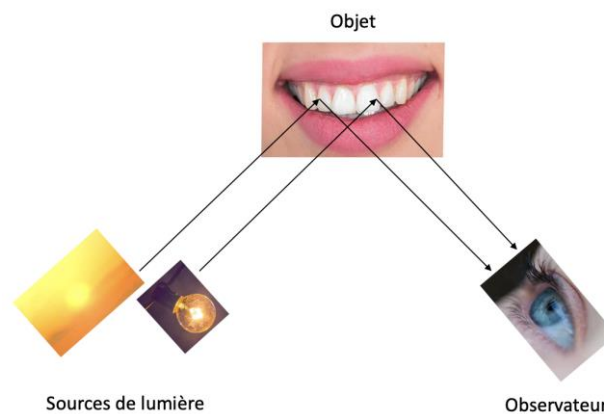
1 : La couleur

1.1 Généralités sur la couleur

1.1.1 Notions élémentaires d'optique

Selon sa définition, la couleur est une perception visuelle de la répartition spectrale de la lumière visible. Pour qu'une couleur existe, il faut une interaction entre les 3 éléments suivants : la lumière, l'objet et l'observateur.

Figure 1 : Éléments nécessaires à la perception d'une couleur



Source : Auteur, 2020.

1.1.1.1 La lumière

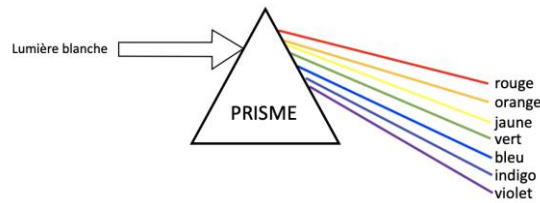
En 1666, Newton fait une expérience avec un prisme traversé par la lumière du soleil, en apparence blanche, et met en évidence 7 faisceaux lumineux de couleurs différentes : le rouge, l'orange, le jaune, le vert, le bleu, l'indigo et le violet. ² Il observe également qu'en faisant traverser ces 7 faisceaux lumineux dans un deuxième prisme, il réobtient la lumière blanche.

La lumière blanche du soleil est donc polychromatique et est constituée d'ondes électromagnétiques dont la partie visible par l'œil humain s'étend entre 380 nm (violet) et 780 nm (rouge).

La lumière est ainsi composée d'un ensemble de rayons colorés. La couleur n'est pas dans l'objet observé mais dans la lumière qu'il reçoit.

² Paty, « Newton, Isaac (1642-1727) ».

Figure 2 : Schéma représentant l'expérience du prisme de Newton

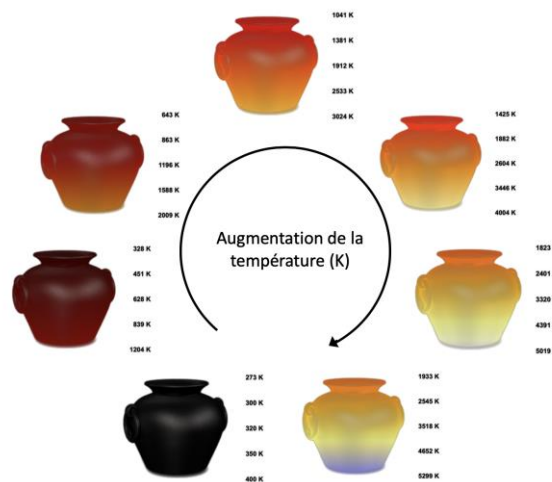


Source : Auteur, 2020.

Young fait ensuite la découverte qu'une lumière blanche peut également être obtenue par le mélange des trois couleurs primaires (rouge, vert, bleu) ou par le mélange des trois couleurs secondaires (jaune, magenta, cyan) en proportions égales. Ceci est la base de la synthèse additive.³

La température de couleur d'une source lumineuse, liée au modèle théorique du corps noir, est également à prendre en considération. Elle représente la température à laquelle il faut chauffer un corps noir (ex : un métal) pour obtenir la couleur en question. Elle s'exprime en Kelvin.

Figure 3 : Changement de couleur d'un corps noir selon la température



Source : Auteur, d'après Color ID, « Température de lumière », 2002.

Selon la source, la lumière blanche peut être plus ou moins « chaude » pour des valeurs inférieures à 3000 K, ou « froide » pour des valeurs supérieures à 5000 K. La température, la « chaleur », de la lumière du jour, varie également selon le moment de la journée. Elle est estimée aux alentours de 5500 K lorsque le soleil est au zénith.

³ Young, « The Bakerian lecture : on the theory of light and colours ».

Figure 4 : Températures des couleurs



Source : Viallet, « Température des couleurs », 2011.

Quelle que soit la température de couleur de la lumière ambiante, notre cerveau est capable de faire automatiquement une correction afin de voir un vrai blanc. Ainsi, nous percevons blanc, un mur blanc éclairé par une ampoule incandescente, alors qu'il sera perçu plutôt jaune par un instrument de mesure de la lumière. Un instrument de mesure ou un appareil photo n'est pas capable de faire cette correction, une balance des blancs est donc nécessaire.

1.1.1.2 L'objet

Lorsque la lumière entre en contact avec un objet, ses rayons peuvent être absorbés, réfléchis ou même transmis à travers l'objet si celui-ci n'est pas opaque.

La couleur d'un objet dépend de sa capacité à laisser passer, à absorber ou à réfléchir tout ou partie de la lumière qu'il reçoit. Cette capacité dépendra du caractère opaque ou translucide de l'objet.

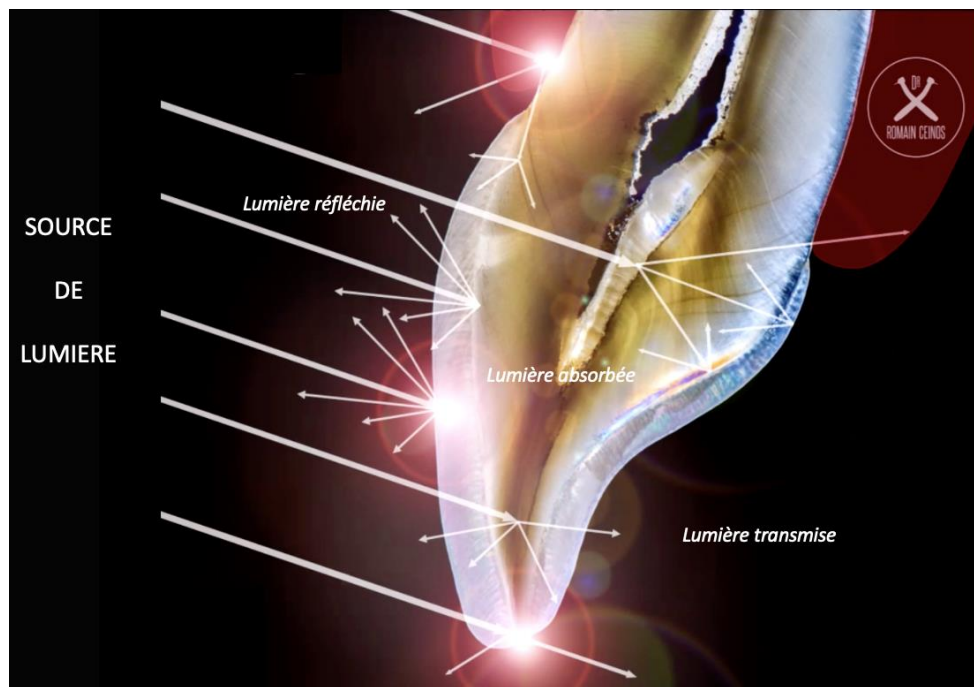
Un objet complètement translucide, soit transparent, est traversé par toute la lumière. La lumière transmise apparaît alors blanche.

Un objet complètement opaque absorbe toute la lumière et la couleur noire est alors perçue.

Le plus souvent, une partie de la lumière est absorbée par l'objet tandis que l'autre partie est réfléchie ou transmise selon la structure moléculaire et la densité de l'objet. La couleur perçue correspond alors à la couleur de la longueur d'onde qui est réfléchie (exemple : une cerise éclairée en lumière polychromatique blanche apparaît rouge parce qu'elle absorbe toutes les longueurs d'ondes sauf le rouge).⁴

⁴ Lasserre et Pineau, « Les fondamentaux de la couleur ».

Figure 5 : Interactions entre la lumière et une dent naturelle



Source : Auteur, d'après Dr Ceinos, 2020.

1.1.1.3 L'observateur

La perception de la couleur dépend du spectre émis par la source lumineuse et du spectre absorbé par l'objet. Cette perception des couleurs est possible grâce à la stimulation de photorécepteurs spécialisés situés dans la rétine : les cônes et les bâtonnets. Ces cellules transmettent ensuite l'information au cerveau par l'intermédiaire du nerf optique.

Les cônes sont responsables de la vision des couleurs. Ils sont de trois types : Short, Medium et Long et perçoivent respectivement des longueurs d'ondes permettant de visualiser majoritairement le bleu, le vert et le rouge.⁵ En raison du passé arboricole de l'espace humaine, notre œil est plus sensible aux verts qu'aux bleus et aux rouges et discerne donc mieux les nuances de vert. Grâce à l'effet conjugué des différentes longueurs d'ondes, l'œil humain est capable de discerner jusqu'à 200 tonalités pures de couleurs avec différents niveaux de saturation, soit un total d'environ 1500 nuances colorées.

Les bâtonnets perçoivent quant à eux la luminosité et permettent la vision crépusculaire ou scotopique.

La vision de la couleur dépend donc de sa chromaticité codée par les cônes et de son intensité relayée par les bâtonnets.

⁵ Helmholtz, *Optique physiologique*.

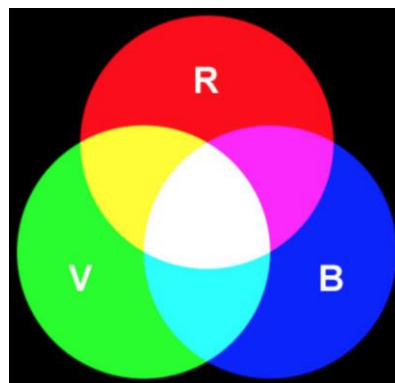
1.1.2 Création de la couleur

La construction des couleurs repose sur un modèle tridimensionnel défini par trois couleurs fondamentales, encore appelées couleurs primaires, à partir desquelles nous pouvons reconstituer toutes les autres couleurs. Il est important de distinguer les couleurs primaires additives (rouge, vert, bleu = RVB) des couleurs primaires soustractives (jaune, rouge, bleu ou cyan, magenta, jaune, noir).

1.1.2.1 Synthèse additive

Comme évoqué précédemment, les couleurs primaires additives (rouge, vert, bleu) permettent de reproduire toutes les autres couleurs. La synthèse additive permet donc de recomposer les couleurs spectrales monochromatiques par le mélange de rayons lumineux. Ce principe sert notamment à la création des couleurs sur les écrans d'ordinateur ou de télévision et en photographie numérique.

Figure 6 : Couleurs de la synthèse additive



Source : Opéra Print , «Les modes colorimétriques », 2013.

En dentisterie, la couleur des dents artificielles n'est cependant pas obtenue par le mélange de rayons lumineux. Une dent en céramique comprend des pigments colorés (oxydes métalliques) et sa couleur dépend des phénomènes d'absorption et de réflexion lumineuse présents à sa surface. Elle obéit aux principes de la synthèse soustractive.⁶

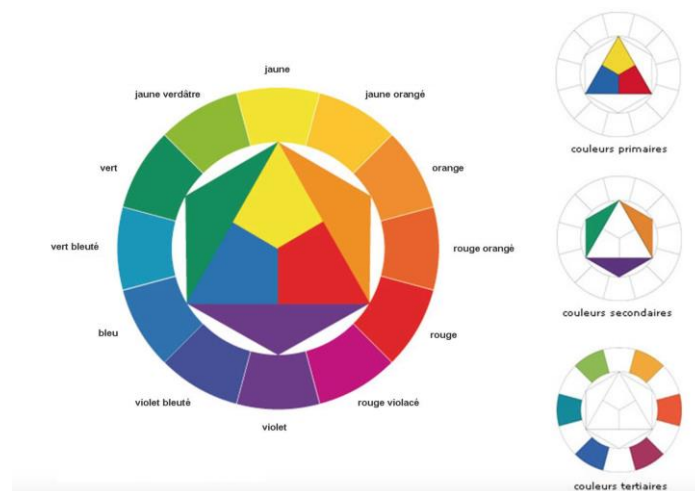
⁶ Lasserre, « Les sept dimensions de la couleur des dents naturelles ».

1.1.2.1 Synthèse soustractive

La synthèse soustractive est basée sur la réflexion lumineuse sur des supports colorés et sur la transmission lumineuse au travers d'objets colorés.

Le cercle chromatique d'Itten, créé en 1961, permet d'ordonner et de comprendre la classification pigmentaire des couleurs.

Figure 7 : Cercle chromatique d'Itten Johannes en 12 parties



Source : Itten, « Farbkreis », 1961.

Un mélange de deux couleurs primaires soustractives en proportions égales permet d'obtenir les couleurs secondaires soustractives. Enfin, le mélange d'une couleur secondaire avec la couleur primaire la plus proche permet de compléter les douze couleurs du cercle périphérique. Les couleurs en face à face sont dites complémentaires car leur mélange donne un gris noir de ton neutre. De la même manière, le mélange des trois couleurs primaires soustractives ou des trois couleurs secondaires soustractives dans les bonnes proportions donne l'absence de couleur, c'est-à-dire ce ton gris noir neutre.

En dentisterie, ces principes permettent, par exemple, de changer la luminosité d'une restauration : s'il faut diminuer la luminosité d'une dent prothétique contenant une teinte orange, le fait d'ajouter des pigments bleus fera baisser sa luminosité.⁷ Plus l'apport et les pigments sont importants, moins la dent est lumineuse, et plus la couleur se sature et s'assombrit.⁸

⁷ Chu, Devigus, et Mielezsko, *Fundamentals of color : shade matching and communication in esthetic dentistry*, 2004.

⁸ Lasserre et Pineau, « Les fondamentaux de la couleur ».

1.1.3 Description des couleurs

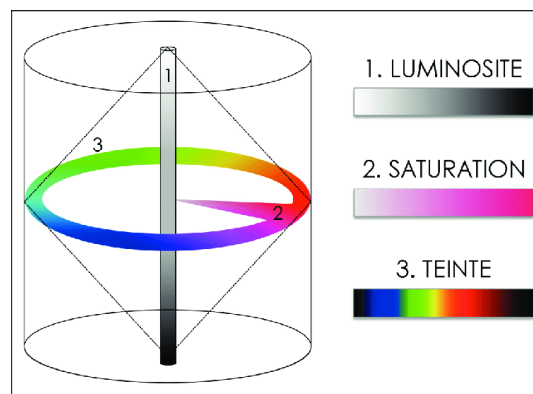
Les scientifiques et les industriels ont élaboré différents systèmes ou espaces colorimétriques afin de pouvoir organiser et coder numériquement les couleurs. En dentisterie, les deux systèmes les plus utilisés pour décrire les couleurs sont le système LST/HVC de Munsell et les systèmes de la CIE/ICI.

1.1.3.1 Espace chromatique de Munsell

En 1905, Munsell élabore un cylindre permettant pour la première fois de classer les couleurs selon leur trois dimensions fondamentales : la luminosité (L), la saturation (S) et la teinte (T).

Chaque couleur peut être définie par ses coordonnées LST/HVC en rapport avec l'axe vertical, l'axe horizontal et la périphérie.⁹

Figure 8 : Espace chromatique tridimensionnel de Munsell



Source : Incau, « Couleur et choix de la teinte en odontologie », 2014.

- La luminosité (axe 1) correspond à la quantité de blanc ajoutée à une teinte de base ou encore à la quantité de lumière qu'elle réfléchit. Plus la lumière est réfléchi, plus la luminosité est importante. Elle s'étend de 0 (= noir pur) à 10 (= blanc pur).

Les bâtonnets sont responsables de cette vision. Etant très sensibles, ce critère est primordial pour réussir la couleur d'une restauration.

- La saturation (axe 2) correspond à la densité ou intensité d'une couleur, elle représente la quantité de pigment pur que la couleur contient. Plus on se rapproche du périmètre du cercle, plus la couleur est saturée (la couleur est pure à 100 % lorsqu'elle le touche).

⁹ Munsell, « Munsell color and science ».

- La teinte (périmètre 3) correspond à la tonalité chromatique, à la longueur d'onde qui est majoritairement réfléchi par l'objet. Il s'agit donc de la sensation colorée d'une couleur : rouge, bleu, jaune, vert, etc.

Par ordre d'importance, pour bien réussir le choix de la couleur d'une dent, il y a donc :

Luminosité → Saturation → Teinte.¹⁰

1.1.3.2 Espaces chromatiques $L^*a^*b^*$ et $L^*C^*h^\circ$

En 1931, la CIE crée l'espace CIE XYZ, qui a cependant pour défaut de ne pas représenter l'écart de couleur perçu par l'œil humain de manière satisfaisante.

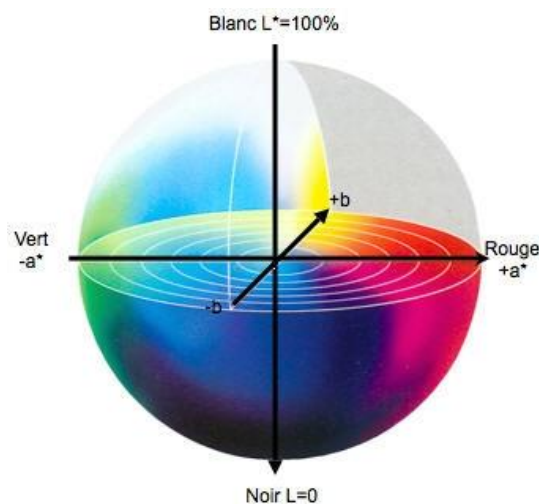
En 1976, la CIE crée donc l'espace chromatique $L^*a^*b^*$, également appelé « CIE LAB », représentant plus justement les écarts de couleurs perçus par l'œil à l'aide de coordonnées rectangulaires.

Cet espace comprend 3 axes formant une sphère¹¹ :

- Axe vertical L^* : correspond à la luminosité allant de 0 = noir à 100 = blanc
- Axe horizontal a^* : correspond au caractère coloré allant du vert (valeurs négatives, à partir de -128) au rouge (valeurs positives, allant jusqu'à +127)
- Axe horizontal b^* : correspond au caractère coloré allant du bleu (valeurs négatives, à partir de -128) au jaune (valeurs positives, allant jusqu'à +127)

Il s'agit de l'espace qui se rapproche le plus de la sensibilité de l'œil humain (sans parvenir pour autant à représenter sa sensibilité réelle).

Figure 9 : Sphère chromatique CIE $L^*a^*b^*$



Source : Norma Print « Modéliser la couleur », 2012.

¹⁰ Lasserre et Pineau, « Les fondamentaux de la couleur ».

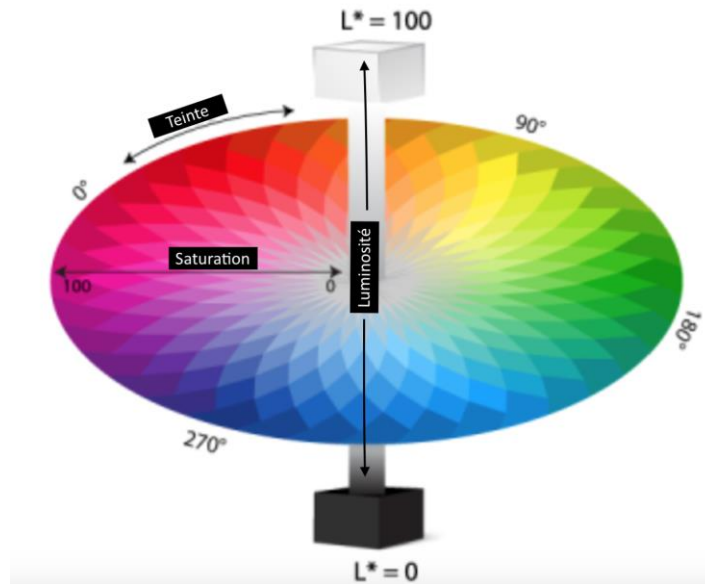
¹¹ Ayash et al., « Visual versus instrumental shade selection techniques ».

Un autre mode de représentation de ce système est l'espace CIE $L^*C^*h^\circ$ qui utilise des coordonnées cylindriques.

Comme dans l'espace chromatique de Munsell, C (de Chroma) correspond à la saturation et H (de Hue) à la teinte.

La saturation et la luminosité sont exprimées de 0 à 100 tandis que la teinte possède une valeur d'angle allant de 0° à 360° .

Figure 10 : Sphère chromatique CIE $L^* C^*h^\circ$



Source : Auteur, d'après The Land of Color Enterprises, « Camp Chroma », 2020.

1.2 La couleur des dents naturelles

1.2.1. Espace chromatique des dents naturelles

1.2.1.1 La banane chromatique

A partir du système $L^*a^*b^*$, beaucoup d'auteurs se sont intéressés à l'espace chromatique des dents naturelles. En 2011, Haddad et son équipe décrivent cet espace comme une forme ovale allongée communément appelée « banane chromatique ». ¹² Cette banane s'étend en longueur le long de la partie supérieure de l'axe L^* , ce qui signifie que les dents naturelles sont globalement lumineuses, tout

¹² Haddad et al., « Allocation of color space for different age groups using three-dimensional shade guide systems ».

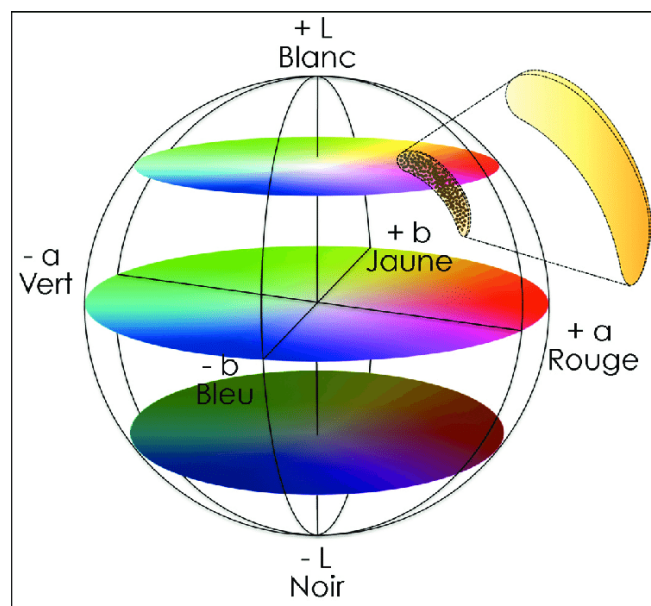
en présentant des variations importantes de luminosité : les dents jeunes sont plutôt vers le haut de l'axe L^* tandis que les dents plus âgées sont plus basses sur l'axe.

Dans le sens transversal, la banane est étroite, les variations de saturation sont donc faibles.

Dans le sens horizontal, l'espace est compris entre l'axe $+a^*$ (rouge) et $+b^*$ (jaune) tout en étant plus proche de l'axe des jaunes. La tonalité chromatique des dents naturelles est donc jaune/orangé.

Enfin, la banane présente une orientation oblique signifiant que les dents lumineuses sont moins saturées que les dents sombres.^{13 14}

Figure 11 : Banane chromatique au sein de l'espace chromatique CIE $L^*a^*b^*$



Source : Incau, « Couleur et choix de la teinte en odontologie », 2014.

1.2.1.2 Tolérance entre 2 couleurs

Les coordonnées triaxiales $L^*a^*b^*$ de la couleur d'une dent au sein de cet espace permettent donc de quantifier arithmétiquement la différence entre deux couleurs, en passant par le calcul d'une valeur appelée ΔE_{ab} . Cela permet, par exemple, de calculer la différence de couleur entre les dents naturelles que l'on cherche à imiter et une restauration artificielle. ΔE_{ab} correspond à l'ordre de grandeur de différence entre 2 couleurs.

¹³ Lasserre et Pineau, « Les fondamentaux de la couleur ».

¹⁴ Joiner et al., « A review of tooth colour and whiteness ».

La formule est la suivante :

Figure 12 : Calcul de la tolérance ΔE_{ab}

$$\Delta E_{ab}^* = \sqrt{(L_2^* - L_1^*)^2 + (a_2^* - a_1^*)^2 + (b_2^* - b_1^*)^2}$$

Source : Commission internationale de l'éclairage, 1976.

De nombreuses études ont été entreprises en dentisterie afin de déterminer les tolérances, autrement dit le seuil de perceptibilité par l'œil humain et le seuil d'acceptabilité de la couleur d'une restauration. Un consensus entre les auteurs semble cependant difficile à trouver.

Le seuil de perceptibilité « 50:50 % » correspond au ΔE_{ab} pour lequel une différence de couleur entre la dent artificielle et la dent naturelle est discernable par 50 % des observateurs (tandis que 50 % ne perçoivent pas de différence). En dentisterie, le seuil d'acceptabilité « 50:50 % » correspond quant à lui à la valeur ΔE_{ab} pour laquelle 50 % des observateurs jugent la couleur d'une restauration trop différente de la couleur voulue et décident de refaire cette restauration (tandis que les autres 50 % la jugent acceptable).¹⁵

Toutes les études dentaires qui évaluent la couleur impliquent que l'auteur sélectionne un seuil de perceptibilité et/ou d'acceptabilité avec lequel comparer les résultats. La majorité des études étudie donc le ΔE_{ab} pour des seuils « 50:50 % », certaines utilisent quant à elles des seuils supérieurs, à savoir : 90 % ou 100 %.

Il est à noter que ces tolérances sont influencées par de nombreux facteurs tels que : les conditions opératoires, l'expérience de l'observateur, la nature des matériaux, etc.¹⁶

L'étude de Paravina et al., publiée en 2019, proposent les valeurs ΔE_{ab} et les seuils suivants :

Figure 13 : Seuils de tolérance ΔE_{ab} pour les dents ou matériaux dentaires

	1,2	2,7	5,4	8,1	
Excellent	Acceptable	Moyennement inacceptable	Largement inacceptable	Extrêmement inacceptable	
	<i>Seuil de perceptibilité</i>	<i>Seuil d'acceptabilité</i>			

Source : Auteur, d'après Paravina, Pérez, et Ghinea, « Acceptability and perceptibility thresholds in dentistry », 2019.

¹⁵ Paravina et Swift junior, « Color in dentistry : match me, match me not ».

¹⁶ Khashayar et al., « Perceptibility and acceptability thresholds for colour differences in dentistry ».

Depuis 2013, la CIE/ICI recommande d'exprimer les tolérances en ΔE_{ab} mais aussi avec son extension créée en 2000, le ΔE_{00} . Ce dernier se veut « perceptuellement plus uniforme ». Le ΔE_{00} est plus précis mais plus complexe à calculer que le ΔE_{ab} (cf. annexe 1).

Paravina propose donc également des seuils de tolérance avec ΔE_{00} .

Figure 14 : Seuils de tolérance ΔE_{00} pour les dents ou matériaux dentaires

	0,8	1,8	3,6	5,4	
Excellent	Acceptable	Moyennement inacceptable	Largement inacceptable	Extrêmement inacceptable	
	<i>Seuil de perceptibilité</i>	<i>Seuil d'acceptabilité</i>			

Source : Auteur, d'après Paravina, Pérez, et Ghinea, « Acceptability and perceptibility thresholds in dentistry », 2019.

1.2.2 Autres caractéristiques des dents naturelles

1.2.2.1 La triade optique

Dans une même dentition, la couleur varie d'une dent à l'autre. Les canines, par exemple, sont généralement plus saturées. Comme évoqué précédemment, les dents perdent également en luminosité au cours du temps et deviennent plus saturées avec l'âge.¹⁷

Enfin, au sein d'une même dent, la couleur n'est également pas homogène depuis le collet vers le bord libre. Une dent n'est pas uniforme ni en surface ni en couleur.

Cependant, pour réussir l'intégration esthétique d'une restauration, la luminosité, la saturation et la teinte ne suffisent pas.¹⁸

Trois autres paramètres formant la triade optique sont en effet à prendre en considération :

- La translucidité : les dents naturelles sont caractérisées par une coque d'émail semi-translucide transmettant de la lumière à la dentine qui réfléchit la lumière et donne la tonalité chromatique de la dent.

La translucidité de la dentine est de 40 % alors que celle de l'émail est de 70 %.¹⁹

¹⁷ Haddad et al., « Allocation of color space for different age groups using three-dimensional shade guide systems ».

¹⁸ Lasserre et Pineau, « Les fondamentaux de la couleur ».

¹⁹ Lasserre, « Les sept dimensions de la couleur des dents naturelles ».

L'opacité plus marquée de la dentine s'explique par un nombre de protéines 15 fois supérieur à celui de l'émail, ce qui lui confère également sa teinte jaune. ²⁰

Au sein d'une même dent, la variation de la couleur entre le bord libre et la région cervicale correspond à l'affinement de la couche émail vers le collet. La couleur sous-jacente de la dentine cervicale est donc plus perceptible. Au niveau du bord libre, l'émail étant moins soutenu par la masse dentinaire, la translucidité augmente. ²¹

Plus une dent est translucide, plus la lumière peut la traverser. Le fond de la cavité buccale étant noir, plus la translucidité d'une dent augmente et plus sa luminosité baisse, la dent apparaît donc grise et sombre. ²²

La différence entre 2 couleurs par le calcul du ΔE_{ab} ou du ΔE_{00} ne prend pas en compte la translucidité. Celle-ci est pourtant très importante dans notre domaine et est un facteur primordial dans la réussite de l'intégration esthétique d'une restauration.

La translucidité des matériaux dentaires peut être évaluée par le paramètre de translucidité (TP). Il provient de la comparaison des variables, comprises dans le calcul du ΔE_{ab} ou du ΔE_{00} , contre un support noir et un support blanc. ²³

Conscient de son importance, Salas a publié en 2018, une étude sur les seuils de translucidité acceptable et perceptible à partir de résines composites. ²⁴ Ces valeurs ont ensuite été reprises dans la publication de Paravina en 2019. ²⁵

²⁰ Gnanguenon, « L'apport du spectrophotomètre dans la thérapeutique d'éclaircissement dentaire : évaluation quantitative des grandeurs colorimétriques de la dent par spectrophotométrie ».

²¹ Incau, Pia, et Pivet, « Couleur et choix de la teinte en odontologie ».

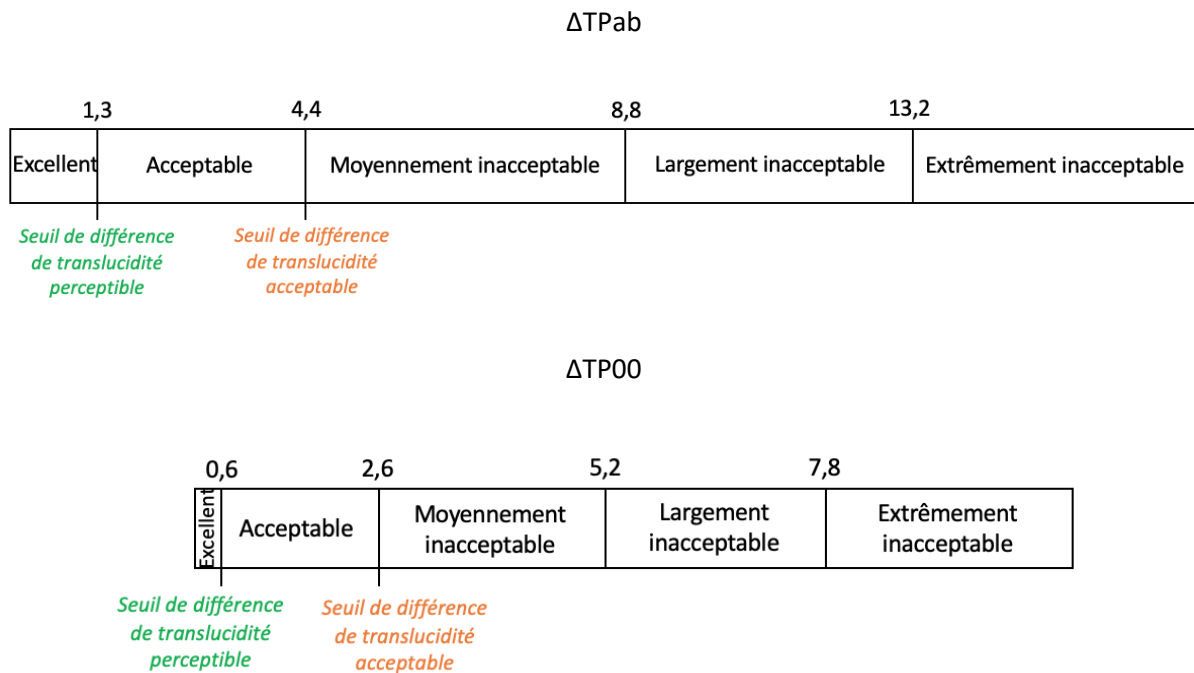
²² Lasserre et Pineau, « Les fondamentaux de la couleur ».

²³ Al-Juaila et al., « Comparison of translucency for different thicknesses of recent types of esthetic zirconia ceramics versus conventional ceramics ... (in vitro study) ».

²⁴ Salas, « Translucency thresholds for dental materials ».

²⁵ Paravina, Pérez, et Ghinea, « Acceptability and perceptibility thresholds in dentistry : a comprehensive review of clinical and research applications ».

Figure 15 : Seuils de tolérance de translucidité pour les dents ou matériaux dentaires



Source : Auteur, d'après Paravina, Pérez, et Ghinea, « Acceptability and perceptibility thresholds in dentistry », 2019.

- L'opalescence : l'émail est composé de cristaux d'hydroxyapatite qui, par leur taille cristalline très fine, présentent un comportement optique proche de la pierre opale. Cette pierre, tout comme l'émail, réfléchit les longueurs d'ondes courtes (aspect bleuté) et laisse passer les longueurs d'ondes rouge-orangées donnant au final une teinte laiteuse aux reflets irisés. De ce fait, des effets bleutés et orangés sont souvent visibles sur les bords d'émail des dents jeunes. Certaines poudres de céramique proposent des effets d'opalescence pour avoir un aspect le plus naturel possible.

- La fluorescence : la dentine est principalement responsable de cette capacité à absorber de l'énergie lumineuse dans le domaine de l'ultraviolet et à la restituer rapidement sous forme de rayonnement visible de courte longueur d'onde. Cela donne un aspect blanc-bleuté à la dent qui s'estompe avec le temps. Plus la dent vieillit, plus elle perd son caractère fluorescent du fait de son hyperminéralisation. La lumière solaire étant riche en UV, une dent prothétique manquant de fluorescence paraîtra donc plus grise à la lumière du soleil qu'à la lumière artificielle.²⁶

²⁶ Lasserre, « Les sept dimensions de la couleur des dents naturelles ».

Là aussi certaines poudres de céramique contiennent un ajout de terres rares afin de reproduire cet effet.

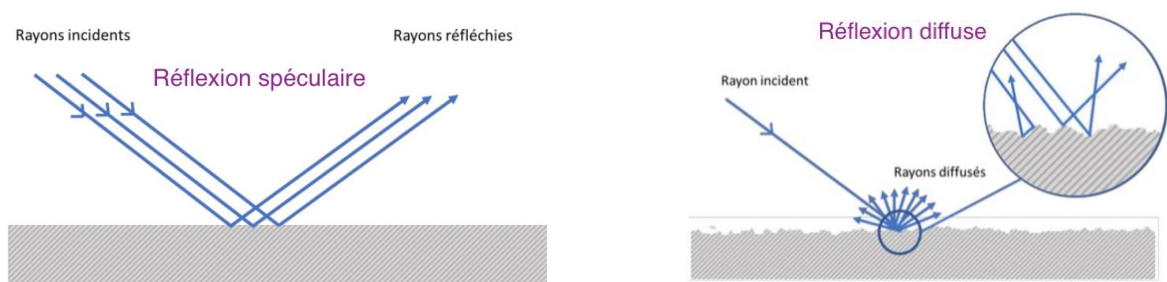
L'opalescence et la fluorescence permettent de rendre la dent plus translucide avec un aspect plus naturel.

1.2.2.2 Texture de surface et caractérisations

Une dent est caractérisée par sa macrogéographie (lobes, concavités, convexités, lignes de transition, etc.) et par sa texture de surface, aussi appelée microgéographie. La macro et la microgéographie vont conditionner la lumière que la dent absorbe et réfléchit et donc moduler sa perception visuelle. La surface d'une dent naturelle n'est pas plane et présente des formes axiales convexes et concaves modifiant les axes de réflexion de la lumière par rapport à ceux de surface plane.²⁷

La microgéographie des dents va donc grandement impacter la réflexion et la transmission lumineuse, changeant ainsi leur perception visuelle. Plus la dent est jeune et peu usée avec une surface rugueuse, riche en fossettes et périchématies, plus la lumière est réfléchi de manière désordonnée dans un grand nombre de directions (réflexion diffuse). Cela donne un état de surface brillant (éclatant) et lumineux même après séchage. Avec l'âge, l'usure érosive et abrasive, la dent perd ses irrégularités et devient lisse et luisante. La réflexion de la lumière se fait alors plutôt de manière ordonnée avec des rayons réfléchis parallèles caractéristiques d'une réflexion spéculaire.

Figure 16 : Réflexion spéculaire et réflexion diffuse



Source : Gnanguenon, « L'apport du spectrophotomètre dans la thérapeutique d'éclaircissement dentaire : évaluation quantitative des grandeurs colorimétriques de la dent par spectrophotométrie », 2019.

²⁷ Lasserre et Pineau, « Les fondamentaux de la couleur ».

Enfin, les caractérisations sont des aspects particuliers et ponctuels pouvant être retrouvés sur certaines dents telles que les taches blanches et opaques de déminéralisation, de fluorose, les fissures de l'émail infiltrées ou non, ou les colorations extrinsèques.

Tous ces facteurs rendent complexe la communication de l'aspect visuel d'une dent au prothésiste.

2 : Détermination et transmission de la couleur par technique conventionnelle

2.1 Description de la méthode conventionnelle

2.1.1 Principe de fonctionnement et conseils d'utilisation

Le relevé visuel consiste, de manière générale, à comparer la couleur d'une dent, adjacente à la dent préparée allant recevoir une restauration, aux couleurs présentes sur un teintier afin de trouver la couleur la plus similaire. Cette technique conventionnelle de relevé de couleur, rapide et peu onéreuse, continue d'être la technique la plus utilisée actuellement par les praticiens.²⁸

Au-delà du respect des étapes propres au teintier utilisé, des règles doivent être respectées.

Il faut tout d'abord s'assurer que les dents ne se déshydratent pas. Les premiers effets de la déshydratation apparaissent en effet après seulement 1 minute au contact de l'air. Elle entraîne une opacité de l'émail rendant les dents plus lumineuses, et modifie donc leur couleur. Il a été déterminé qu'il fallait plus de 15 minutes de réhydratation pour que les dents retrouvent ensuite leur couleur d'origine.²⁹ La prise de « teinte » doit donc être effectuée en début de séance, sur des dents humides. Au moment du relevé, l'échantillon du teintier doit être positionné dans le même plan que la dent afin que la lumière arrive de la même manière sur la dent et sur l'échantillon.

Enfin, la lumière du jour aux alentours de 10 h ou 14 h est à préconiser.³⁰ D'autres facteurs, tels que le port de maquillage, peuvent biaiser le relevé et devront être limités. Les sources d'erreurs lors du relevé visuel seront détaillées ultérieurement.

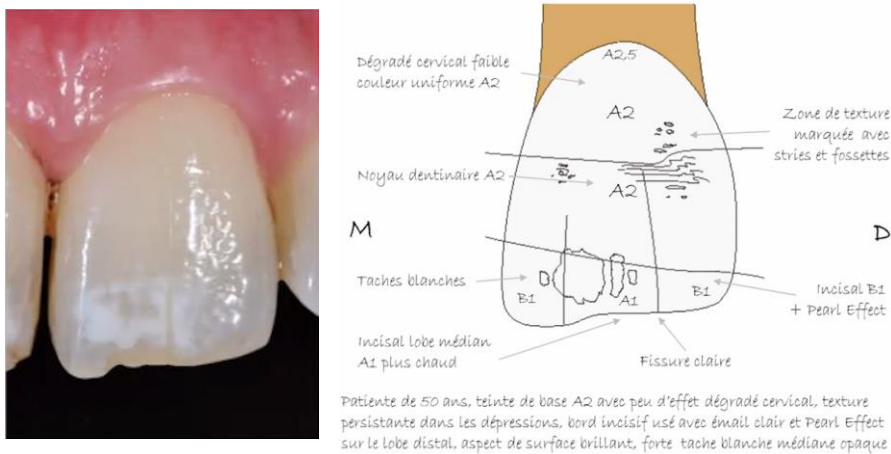
De plus, comme vu précédemment, une dent présente des variations de couleur depuis le collet vers le bord libre. Pour éviter de reproduire une dent uniforme au rendu peu naturel, il est recommandé de communiquer au prothésiste une référence pour le tiers cervical, le tiers médian et le tiers incisal de la dent. Un schéma complet et détaillé représentant la dent, avec les références de teintier choisies ainsi que les éléments marquants des différents secteurs de la dent (translucidité, caractérisations, fissures, etc.) peut également être communiqué au prothésiste.

²⁸ Jain et al., « Dental students' tooth shade selection ability in relation to years of dental education ».

²⁹ Suliman et al., « Effect of time on tooth dehydration and rehydration ».

³⁰ Chu, Devigus, et Mieleszko, *Fundamentals of color : shade matching and communication in esthetic dentistry*, 2004.

Figure 17 : Schéma de Lasserre au sujet de la couleur d'une 21



Source : Dr Lasserre, 2020.

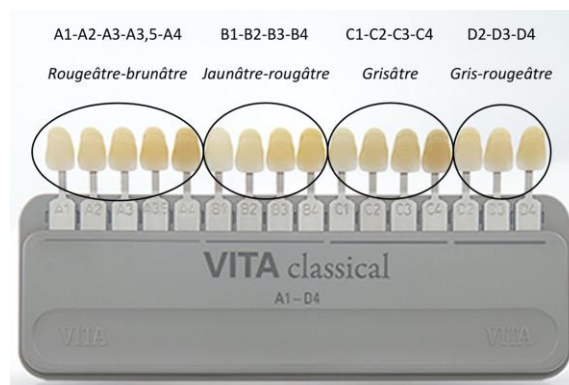
2.1.2 Les principaux teintiers céramiques

Plusieurs marques de teintiers existent aujourd’hui sur le marché. En dentisterie, le premier teintier fut créé par Clarck en 1933 et proposait 60 échantillons de couleurs en céramique.

Des teintiers ont ensuite été créés en diminuant le nombre d’échantillons et en les classant par groupes de teintes tels que le VITA Classical® en 1956 (initialement appelé Lumin Vacuum®). Selon Incau, en 2014, il s’agissait du teintier le plus utilisé par les praticiens pour les travaux de céramique dentaire.³¹

Ce teintier présente 16 couleurs, réparties en 4 groupes de teintes (A, B, C et D) au sein desquels sont disposés 4 échantillons par ordre croissant de saturation. Il convient donc de sélectionner le bon groupe de teinte pour ensuite choisir la saturation la plus proche de la dent observée.

Figure 18 : Teintier VITA Classical®



Source : Auteur, d’après VITA Zahnfabrik, « Teintiers VITA », 2020.

³¹ Incau, Pia, et Pivet, « Couleur et choix de la teinte en odontologie ».

Au sein de chaque groupe, les luminosités varient. L'inconvénient étant qu'en cas d'association de teintes pour une même dent, la luminosité entre deux échantillons peut être différente. Il est alors compliqué pour le céramiste d'obtenir une moyenne de ces luminosités.

En 1998, le teintier VITA Toothguide 3D-MASTER® voit le jour. Il propose un relevé selon les 3 notions fondamentales de l'espace chromatique de Munsell, avec par ordre d'importance :

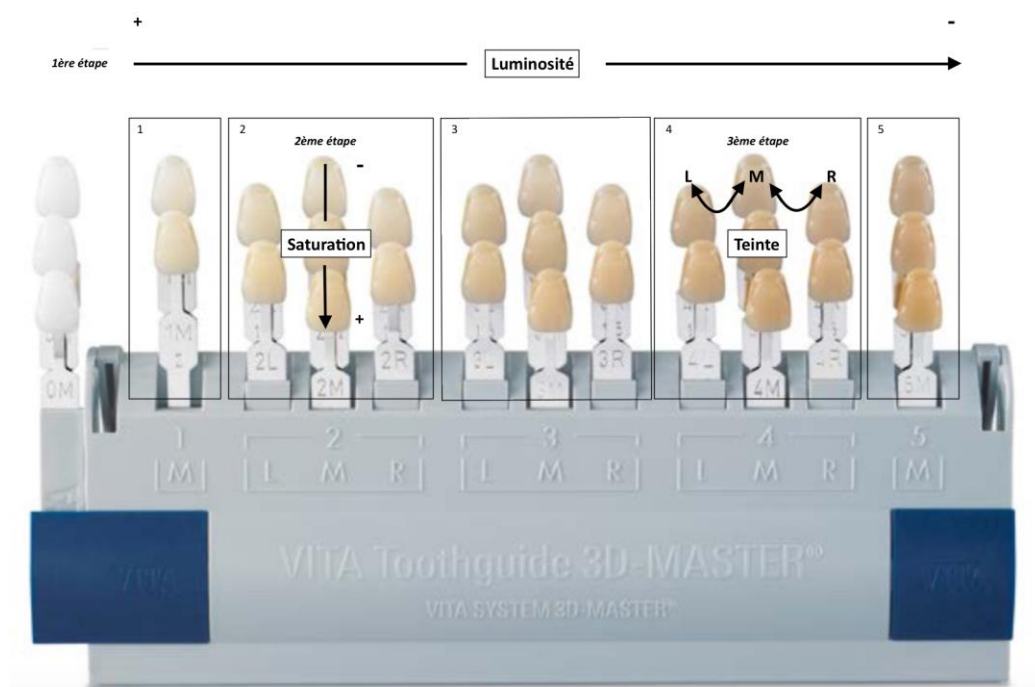
1- Luminosité → 2- Saturation → 3- Teinte.

Il comporte 26 échantillons de couleur (+ 3 pour les dents éclaircies). La répartition des échantillons se veut régulière au sein de l'espace chromatique afin d'éviter les zones d'entassement et les zones sans échantillon qui peuvent être observées avec d'autres marques de teintier.

Au sein d'un groupe de même luminosité, la saturation grandit du haut vers le bas, et la teinte varie de gauche à droite : L (dominante jaune), M (équilibrée) et R (dominante rouge).

Il est le teintier actuel avec le plus d'échantillons et avec la répartition la plus large.³²

Figure 19 : Teintier Toothguide 3D-MASTER®



Source : Auteur, d'après VITA Zahnfabrik, « Teintiers VITA », 2020.

³² Etienne et al., « Enregistrer et transmettre les informations chromatiques ».

Ce teintier présente l'avantage de pouvoir utiliser des « teintes intermédiaires ». Ainsi, si la luminosité de la dent observée est comprise entre 2 et 3, le praticien pourra prendre la liberté de l'évaluer à 2,5. La même démarche pourra être appliquée à la saturation en ajoutant ou en enlevant 0,5 à la référence de l'échantillon communiquée au prothésiste.³³ Cette technique permet d'ajouter un grand nombre de possibilités aux 29 (26 + 3) échantillons déjà présents physiquement sur le teintier tout en gardant une organisation claire et un nombre raisonnable d'échantillons.

Tableau 1 : Références possibles avec le teintier VITA 3D-MASTER®

COULEURS M										
0M1	0,5M1	1M1	1,5M1	2M1	2,5M1	3M1	3,5M1	4M1	4,5M1	5M1
0M1,5	0,5M1,5	1M1,5	1,5M1,5	2M1,5	2,5M1,5	3M1,5	3,5M1,5	4M1,5	4,5M1,5	5M1,5
0M2	0,5M2	1M2	1,5M2	2M2	2,5M2	3M2	3,5M2	4M2	4,5M2	5M2
0M2,5	0,5M2,5		1,5M2,5	2M2,5	2,5M2,5	3M2,5	3,5M2,5	4M2,5	4,5M2,5	5M2,5
0M3				2M3	2,5M3	3M3	3,5M3	4M3	4,5M3	5M3
COULEURS R										
				2R1,5	2,5R1,5	3R1,5	3,5R1,5	4R1,5		
				2R2	2,5R2	3R2	3,5R2	4R2		
				2R2,5	2,5R2,5	3R2,5	3,5R2,5	4R2,5		
COULEURS L										
				2L1,5	2,5L1,5	3L1,5	3,5L1,5	4L1,5		
				2L2	2,5L2	3L2	3,5L2	4L2		
				2L2,5	2,5L2,5	3L2,5	3,5L2,5	4L2,5		

Source : Auteur, d'après VITA Zahnfabrik, « La définition des teintes de dent », 2004.

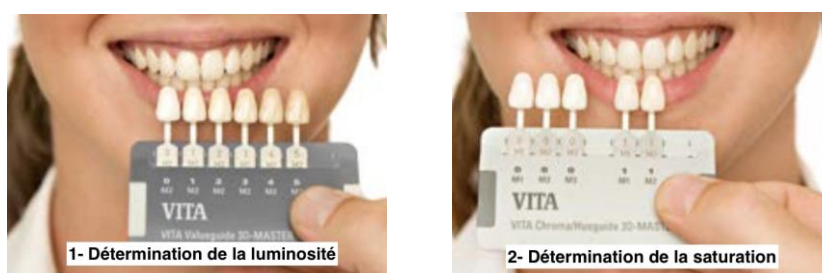
Une version en deux étapes de ce même teintier existe désormais : VITA Linearguide 3D-MASTER®. Elle est composée des mêmes échantillons. Le premier choix se fait parmi 6 groupes de luminosité. Une palette correspondant au groupe de luminosité choisi permet ensuite de déterminer la bonne saturation. Ce teintier permettrait un relevé plus rapide et plus qualitatif que le VITA Classical® et VITA Toothguide 3D-MASTER®.³⁴ Dans la plupart des cas, si la luminosité et la saturation sont correctes, le résultat sera acceptable malgré une teinte légèrement différente.³⁵

³³ Haddad et al., « Allocation of color space for different age groups using three-dimensional shade guide systems ».

³⁴ Paravina, « Performance assessment of dental shade guides ».

³⁵ Chu, Devigus, et Mielezsko, *Fundamentals of color : shade matching and communication in esthetic dentistry*, 2004.

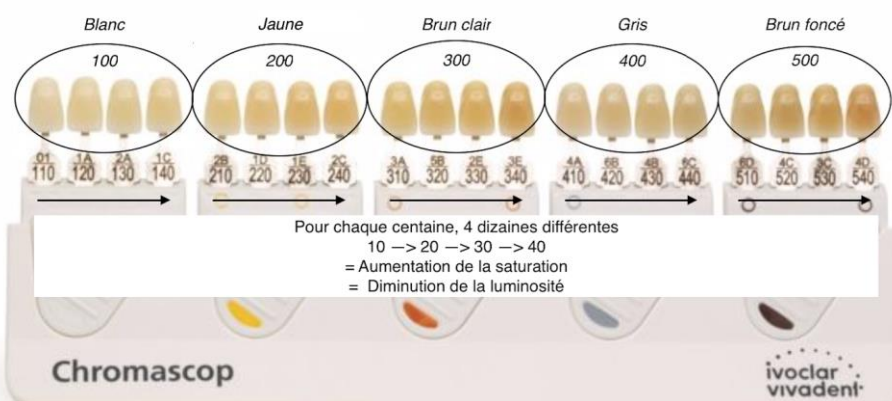
Figure 20 : Teintier VITA Linearguide 3D-MASTER®



Source : Auteur, d'après VITA Zahnfabrik, « Teintiers VITA », 2020.

La société Ivoclar-Vivadent possède également son teintier (Ivoclar Chromascop®) qui sert de référence pour l'ensemble de ses produits. Celui-ci est, comme le teintier VITA Classical®, organisé par groupes de teintes et possède un total de 20 échantillons.

Figure 21 : Teintier Ivoclar Chromascop®



Source : Auteur, d'après Ivoclar-vivadent, « Carte de forme », 2012.

Tableau 2 : Correspondance entre les teintiers Chromascop®, Classical® et 3D-Master®

	BLANC				JAUNE				BRUN CLAIR				GRIS				BRUN FONCE			
IVOCLAR Chromascop®	110	120	130	140	210	220	230	240	310	320	330	340	410	420	430	440	510	520	530	540
VITA Classical®	A1 B1	C1	B2	A2	A3	-	A3.5	-	B3	B4	-	A4	D3	-	C2 C3	D4	C3	C4	A4	-
VITA 3D-MASTER®	1M1 1M2	2M1	2L1.5	2M2	3M2	-	3R2.5	-	3L2.5	3M3	4R2.5	3R1.5	-	3L1.5 4L1.5	-	4L1.5	5M2	4R2.5	-	-

Source : Auteur, d'après Académie du Sourire, 2013.

Bien que certains systèmes de céramique proposent des poudres se référant au teintier VITA Classical®, peu de systèmes se réfèrent au teintier 3D-MASTER®.

Nota bene : plusieurs marques proposent également des teintiers de moignon. Ils permettent de communiquer la couleur de la dentine sous-jacente qui est parfois fortement dyschromiée et influence le rendu final d'une restauration céramo-céramique. Le relevé s'effectue cette fois sur la dent préparée qui recevra la restauration.³⁶

Au laboratoire, des teintiers, plus complets et spécifiques aux poudres de céramique utilisées par le prothésiste, existent. Le relevé de couleur commence généralement par un relevé à l'aide d'un teintier classique, puis est affiné à l'aide d'un teintier spécifique permettant notamment d'analyser les masses dentinaires, la translucidité et l'opalescence du bord libre. Cette méthode, bien maîtrisée par les céramistes, peut être appliquée directement au laboratoire en adressant le patient pour les cas les plus complexes.

En conclusion, les teintiers présentent l'avantage d'être peu onéreux, rapides d'utilisation et connus des praticiens depuis des décennies. Ils font cependant appel à un relevé visuel qui présente de nombreux inconvénients.

2.2 Inconvénients et erreurs possibles par méthode conventionnelle

Le relevé visuel constitue une étape clé dans l'élaboration d'une restauration représentant au mieux les caractéristiques de la dent visibles en bouche. Il est donc primordial que les bonnes informations soient transmises au laboratoire. Bien que largement utilisée dans les cabinets, la subjectivité de cette technique est indéniable. De nombreux facteurs sont sources d'erreurs et rendent la technique conventionnelle peu fiable et peu réitérative.³⁷ Des erreurs, liées au matériel, à l'observateur ou à l'environnement sont possibles.

2.2.1 Sources d'erreurs liées au matériel

2.2.1.1 Répartition des échantillons

La plupart des teintiers commercialisés ne couvrent pas l'intégralité du spectre de couleurs observées pour les dents naturelles. Une différence entre la « banane chromatique » des dents naturelles et la banane chromatique des teintiers est donc observée. En 2011, une étude d'Haddad et al. montre une répartition dans l'espace chromatique CIEL*a*b* plus large pour les dents naturelles que pour les échantillons proposés par le teintier VITA 3D-MASTER®. La couleur des dents est alors déterminée en

³⁶ Alomari et Chadwick, « Factors influencing the shade matching performance of dentists and dental technicians when using two different shade guides ».

³⁷ Okubo et al., « Evaluation of visual and instrument shade matching ».

tendant de trouver l'échantillon du teintier qui s'en rapproche le plus. De plus, l'écart moyen entre la couleur des dents naturelles et leur échantillon respectif le plus proche (intermédiaires compris) est cliniquement non acceptable ($\Delta E_{ab}=6,02$). Cet écart est d'ailleurs plus important pour des dents âgées. Les changements de couleur d'une dent au cours du temps rendent donc son analyse plus complexe.³⁸

Il semble ainsi compliqué de pouvoir trouver à coup sûr un échantillon suffisamment proche de la dent observée, y compris avec le teintier 3D-MASTER®.

2.2.1.2 Fabrication

Pour un modèle de teintier provenant d'un même fabricant, une différence existe entre les différents lots.³⁹ L'échantillon 2M2 du teintier 3D-MASTER® du praticien n'aura ainsi pas forcément la même couleur que l'échantillon 2M2 d'un autre praticien ou du laboratoire de prothèse.⁴⁰

2.2.1.3 Teintiers céramiques de laboratoire

Il semblerait également que les teintiers spécifiques à un système céramique ne proposent pas la même couleur pour une même référence. Ainsi, pour une même référence VITA Classical® (ex : B1), les teintiers IPS e.max Ceram®, IPS d.SIGN, Initia ZI®, et Creation CC®, étudiés par Sampaio et al. en 2018 présentaient des différences significatives en termes de luminosité, saturation et teinte entre eux mais aussi vis-à-vis de la référence VITA Classical®. L'utilisation directe du teintier spécifique au système de céramique utilisé par le prothésiste permet de contourner ce problème.

2.2.1.4 Désinfection

Enfin, la désinfection des teintiers après leur utilisation peut également entraîner un changement de la couleur des échantillons au long terme. Une étude publiée en 2014 a montré que l'utilisation de certains désinfectants, tels que le Cavicide®, sur une période de 2 ans, entraînait un changement de couleur des échantillons.⁴¹

Bien que la différence soit légère et cliniquement non significative, cela ajoute de l'imprécision au relevé visuel. La détermination d'une couleur en se basant sur les teintiers présentés ci-dessus, y compris le 3D-MASTER®, est ainsi jugée peu fiable et peu réitérative.⁴²

³⁸ Haddad et al., « Allocation of color space for different age groups using three-dimensional shade guide systems ».

³⁹ Sampaio et al., « Dental shade guide variability for hues B, C, and D using cross-polarized photography ».

⁴⁰ Todorović et al., « Reliability of conventional shade guides in teeth color determination ».

⁴¹ Huang et al., « The effect of various disinfectants on dental shade guides ».

⁴² Li, Yu, et Wang, « In vivo spectroradiometric evaluation of colour matching errors among five shade guides ».

2.2.2 Sources d'erreurs et subjectivité liées à l'observateur

Chaque être humain a une habilité individuelle à percevoir la couleur. Le relevé visuel est donc « opérateur-dépendant » et subjectif. Des facteurs individuels peuvent également perturber la vision des couleurs.

2.2.2.1 Fatigue oculaire

La fatigue oculaire peut survenir facilement dans le quotidien d'un chirurgien-dentiste, dans lequel la vision est concentrée sur des éléments de petites tailles avec des variations fréquentes en termes d'intensité lumineuse et parfois même de grossissement. En cas de fatigue oculaire, la vision peut se troubler légèrement et une incapacité à distinguer les différences de saturation et de teinte peut également survenir. La fatigue est la cause la plus courante d'erreurs dans le relevé visuel.⁴³

2.2.2.2 Vision binoculaire et adaptation chromatique

Il existe une différence de perception entre l'œil gauche, l'œil droit et leur voie neurale respective. Afin d'éviter les erreurs, il est important de placer le teintier au-dessus ou en dessous de la dent à étudier et non à côté.

De plus, si le praticien fixe une dent pendant plus de 5 secondes, ses yeux s'accommodent aux couleurs rouge et jaune.⁴⁴ Par adaptation chromatique, il devient alors compliqué de discerner correctement les subtilités dans la couleur de cette dent.

2.2.2.3 Les dyschromatopsies

Un relevé visuel fiable nécessite une vision correcte des couleurs. Les dyschromatopsies représentent une anomalie de la vision des couleurs. Elles peuvent être acquises ou héréditaires.

Les dyschromatopsies héréditaires, plus connues sous le nom de daltonisme, peuvent se traduire par l'altération de la vision d'un pigment coloré, d'une des trois couleurs primaires additives ou bien même de toute perception colorée. Elles concernent 9 % des hommes et 0,5 % des femmes.⁴⁵

Les dyschromatopsies acquises sont, quant à elles, secondaires à une pathologie oculaire (DLMA, glaucome, etc.) ou général (diabète, HTA, etc.). Elles sont évolutives dans le temps et touchent autant les femmes que les hommes.

⁴³ Chu, Devigus, et Mielezko, *Fundamentals of color : shade matching and communication in esthetic dentistry*, 2004.

⁴⁴ Boksman, « Shade selection : accuracy and reproducibility ».

⁴⁵ Marechal et al., « Dyschromatopsies héréditaires : physiologie, classification, diagnostic et application à l'aéronautique ».

Un praticien souffrant de dyschromatopsies peut donc éprouver des difficultés avec la technique conventionnelle. Les praticiens n'ont pas toujours connaissance et conscience de leur pathologie.

Un défaut dans la vision des couleurs réduit de manière évidente la capacité à faire correspondre des couleurs, avec cependant un impact différent sur la luminosité, la saturation et la teinte.⁴⁶

2.2.2.4 Expérience

Les praticiens expérimentés présentent une meilleure aptitude au relevé visuel que les praticiens inexpérimentés.⁴⁷ De la même manière, la capacité des étudiants à correctement analyser la couleur d'une dent s'améliore au cours de leurs études.⁴⁸

2.2.2.5 Age et sexe

L'âge est préjudiciable pour la cornée et le cristallin de l'œil qui deviennent plus jaunes au cours du temps. Par conséquent, la différenciation entre le blanc et le jaune devient plus difficile. Ce processus débute à l'âge de 30 ans et deviendrait cliniquement significatif à partir de 60 ans.⁴⁹

Selon les études, les femmes présenteraient une aptitude à la perception des couleurs légèrement meilleure que celle des hommes. Cette différence entre les hommes et les femmes est considérée comme significative dans l'étude d'Haddad en 2009.⁵⁰

2.2.2.6 Alcool, drogue, médicaments, caféine, émotions...

Les émotions et la drogue affectent le diamètre pupillaire en causant sa dilatation ou sa constriction, ce qui peut avoir un impact sur la discrimination des couleurs.

La consommation d'alcool ou de caféine de manière excessive peut elle aussi impacter la perception des couleurs. De la même manière, un grand nombre de médicaments présentent des effets secondaires pouvant toucher la vision avec une manifestation plus ou moins importante selon les individus. Ces effets ne sont de plus pas toujours identifiables par le consommateur.

Un nombre important de facteurs interindividuels et intra-individuels peuvent donc venir perturber le relevé visuel, d'où son importante subjectivité.

⁴⁶ Davison et Myslinski, « Shade selection by color vision-defective dental personnel Δ ».

⁴⁷ Kröger et al., « In vitro comparison of instrumental and visual tooth shade determination under different illuminants ».

⁴⁸ Jain et al., « Dental students' tooth shade selection ability in relation to years of dental education ».

⁴⁹ Chu, Devigus, et Mielezsko, *Fundamentals of color : shade matching and communication in esthetic dentistry*, 2004.


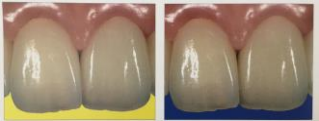


⁵⁰ Haddad et al., « Does gender and experience influence shade matching quality ? »

2.2.3 Sources d'erreurs liées à l'environnement

2.2.3.1 Les effets de contraste

Des effets de contraste liés à l'environnement de la dent à analyser peuvent perturber la perception de sa véritable couleur. Un résumé de ces effets est présenté dans le tableau ci-dessous.

Tableau 3 : Effets de contraste

Contrastes simultanés	<p>Luminosité (clair/obscur)</p> <p>Modification de la perception des couleurs provenant de la différence de luminosité entre les couleurs juxtaposées.</p> <p>Un fond ou un environnement sombre rend une dent plus lumineuse et inversement.</p>	<p><i>NB : Un contrasteur photographique blanc permettra de mieux discerner les erreurs de reproduction de la couleur d'une dent céramique.</i></p> <p><i>Un contrasteur habituel noir rend les dents plus lumineuses et atténue leurs différences.</i></p> 
	<p>Teinte</p> <p>Modification de la perception des couleurs provenant de la différence de teinte entre les couleurs juxtaposées.</p> <p>La couleur complémentaire à la couleur de fond ou de l'environnement est plus apparente dans la dent.</p>	<p><i>Les facettes de gauches prennent une teinte légèrement violette contrairement à celles de droite qui apparaissent un peu plus orangées.</i></p>  <p><i>De la même manière, la couleur complémentaire (vert/jaune) à un rouge à lèvres vif (rouge/violet) aura tendance à être accentuée au niveau des dents.</i></p>
	<p>Saturation</p> <p>Modification de la perception des couleurs provenant de la différence de saturation entre les couleurs juxtaposées.</p>	<p><i>La couleur d'une dent paraît plus intense lorsque la couleur de fond est faiblement saturée (noir, gris...). La dent est moins visible sur un fond d'une saturation proche de celle de la dent.</i></p> 
Effet dimensionnel	<p>La taille d'un objet peut également influencer sa perception.</p> <p>Un objet large apparaîtra plus lumineux qu'un objet étroit de la même couleur.</p> <p>De la même manière, un objet lumineux apparaîtra plus large qu'un objet sombre.</p>	
Effet spatial	<p>La position de l'objet peut également influencer sa perception.</p> <p>Un objet proche de l'observateur paraîtra plus large et lumineux qu'un objet éloigné de la même couleur.</p>	<p><i>Une dent en retrait paraît plus sombre que les dents en vestibulo-position (exemple de la dent 23 ici).</i></p> 
Contraste successif	<p>Le fait de fixer une couleur pendant un temps relativement long rend par la suite l'œil plus sensible à sa couleur complémentaire. Cette sensation dure approximativement le temps que le praticien a passé à fixer la couleur et peut venir perturber une prise de teinte si la durée fut longue.</p> <p>A l'inverse, une deuxième couleur fixée après avoir regardé une première couleur pendant un temps relativement court aura les caractéristiques de la première couleur.</p>	

Source : Auteur, d'après Chu, Devigus, et Mieleszko, *Fundamentals of color : shade matching and communication in esthetic dentistry*, 2004 ; Association dentaire française , *Prise de teintes : des techniques conventionnelles aux techniques électroniques*, 2010.

De nombreux facteurs tels que la couleur des murs, le maquillage, les habits du patient, la forme et la position des dents les unes par rapport aux autres peuvent donc perturber la bonne perception des couleurs.

2.2.3.2 L'éclairage

Comme évoqué dans la première partie, la lumière est l'un des 3 facteurs nécessaires à la vision d'une couleur.

L'intensité lumineuse a un impact sur le diamètre pupillaire et donc sur la perception des couleurs.

De plus, selon l'éclairage utilisé, la couleur perçue peut être différente. En fonction de la lumière, la perception de la couleur des échantillons d'un teintier varie. Ce phénomène pourrait être sans conséquence si le changement de couleur perçu était le même au niveau des dents qu'au niveau du teintier mais ce n'est malheureusement pas le cas.⁵¹

De plus, si la source lumineuse utilisée ne contient pas toutes les longueurs d'ondes du spectre visible, la couleur de la dent ou du teintier n'est pas justement perçue.⁵² Un éclairage de mauvaise qualité peut donc également induire en erreur.

L'éclairage est difficile à contrôler puisque plusieurs sources lumineuses peuvent entrer en conflit au sein d'un cabinet dentaire.

2.2.3.3 Le métamérisme

Lorsque deux couleurs sont semblables sous un certain éclairage (exemple : lumière du jour) mais différente sous un autre éclairage (exemple : lampe halogène), elles sont métamères. Compte tenu du nombre de sources lumineuses différentes que rencontre un patient au cours de sa journée, ce phénomène est quasiment inévitable. Pour minimiser le métamérisme, il faudrait idéalement procéder au relevé visuel en utilisant différentes sources de lumière.

Un grand nombre de facteurs environnementaux, qui sont par ailleurs difficilement contrôlables, peuvent rapidement engendrer des erreurs de perception et fausser le relevé de couleur par technique conventionnelle.

⁵¹ Lee et al., « Perceived color shift of a shade guide according to the change of illuminant ».

⁵² Wee et al., « Lighting conditions used during visual shade matching in private dental offices ».

3 : Dispositifs d'optimisation du relevé visuel et de la transmission de la couleur

3.1 Optimisation de l'éclairage

Des outils d'assistance, tels qu'une lampe calibrée, un appareil photo, ou un instrument de mesure de la couleur peuvent être utilisés par le praticien pour améliorer l'évaluation et la transmission de la couleur au prothésiste.

3.1.1 Lumière idéale pour le relevé visuel

Comme évoqué précédemment, la couleur ne peut pas être correctement perçue ni correctement évaluée sans un éclairage convenable.

L'intensité lumineuse a une influence sur le diamètre de la pupille qui est crucial pour faire un relevé de couleur fiable. La pupille doit être suffisamment ouverte pour exposer pleinement les cônes au centre de la fovéa et très peu exposer les bâtonnets. Un éclairage trop fort ou trop faible mène à une erreur de précision. Il est recommandé que les praticiens réalisent leur prise de couleur à une intensité comprise entre 1500 et 2500 lux afin que les cônes de l'œil fonctionnent correctement.⁵³ Pour information, l'intensité de la lumière du soleil peut aller jusqu'à plus de 200 000 lux.

L'indice de rendu de couleur (IRC) permet d'évaluer l'aptitude d'une source lumineuse à restituer les couleurs d'un objet par rapport à une référence de même température de couleur. Cet indice s'étend de 0 à 100 (100 correspondant à la lumière du soleil standardisée). Pour une bonne perception des couleurs lors du relevé visuel, il est recommandé d'avoir un IRC supérieur à 90.

La température de couleur doit également être adéquate et doit correspondre à un ciel légèrement couvert à 12 h, soit 5500 K. La lumière du jour présente d'importantes variations en fonction de l'heure, de la saison et des nuages dans le ciel avec des températures de couleur pouvant aller de 1 000 à 20 000 K.⁵⁴

Beaucoup d'études utilisent l'illuminant D65, normalisé par la CIE/ICI, correspondant entre autres à une température de 6500K. Il inclue des ultraviolets permettant une meilleure évaluation de la

⁵³ Carsten, « Successful shade matching : what does it take ? »

⁵⁴ Wee et al., « Lighting conditions used during visual shade matching in private dental offices ».

fluorescence.⁵⁵ Il est toutefois préférable d'utiliser l'illuminant D50 ou D55 (5500 K) car le contraste est suffisant et ces derniers aplatissent moins les couleurs et masquent moins les reliefs comparés à l'illuminant D65.⁵⁶

3.1.2 Lampes calibrées

Des plafonniers diffusants une lumière de 5500 K ou 6500 K existent, afin que la lumière ambiante du cabinet se rapproche le plus possible de la lumière du jour. Il est aussi possible de s'aider lors du relevé visuel d'une lampe calibrée. Il s'agit d'un éclairage portatif produisant une lumière « idéale » de manière continue et calibrée. Cette lumière est produite par des diodes électroluminescentes (LED) qui sont disposées autour de l'espace ménagé pour l'observation des dents.

Plusieurs modèles existent tels que le Smile Lite[®], qui fournit une lumière de température de couleur égale à 5500 K. Un filtre polarisant peut également être placé sur ce modèle. L'intérêt de ce dernier sera évoqué par la suite.

Figure 22 : Lampe calibrée Smile Lite[®]



Source : Smile Line SA, « Smile Lite », 2020.

⁵⁵ Chu, Devigus, et Mieleszko, *Fundamentals of color : shade matching and communication in esthetic dentistry*, 2004.

⁵⁶ Daries, « Relevé de la couleur au cabinet dentaire : connaissances et moyens d'optimisation actuels ».

Les lampes calibrées fournissent une lumière idéale. Elles permettent une meilleure perception des couleurs qu'avec une source de lumière naturelle.⁵⁷

Il s'agit cependant toujours d'un relevé visuel, qui reste donc subjectif. Cette aide n'élimine pas toutes les sources d'erreurs et ne permet de contrôler que le facteur lumière. De plus, la source lumineuse est unique et le risque de métamérisme persiste également.

3.2 Optimisation de la communication à l'aide de la photographie numérique

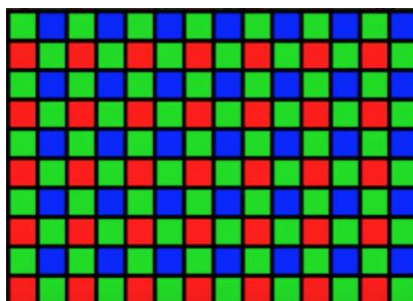
L'utilisation de la photographie numérique en plus du teintier dans la communication entre le dentiste et le prothésiste est un élément essentiel pour l'optimisation du résultat final.⁵⁸

3.2.1 Principe de fonctionnement de la photographie numérique

La technique de fonctionnement la plus répandue est présentée dans ce paragraphe. Le principe est le suivant : la dent reçoit de la lumière, en l'occurrence provenant du flash, et une partie de cette lumière est réfléchie. La lumière réfléchie traverse alors l'objectif de l'appareil photo jusqu'au boîtier, où se trouve un capteur composé d'un ensemble de pixels sensibles à la lumière. Pour se rapprocher du fonctionnement de l'œil humain, chaque pixel est recouvert d'un filtre rouge, vert ou bleu captant respectivement la composante rouge, verte ou bleue. Il s'agit d'un filtre de Bayer. Ces trois couleurs primaires permettent de reconstituer toutes les couleurs. À une valeur RVB correspond donc une couleur (exemple : valeurs RVB de l'orange = 237, 127, 16).

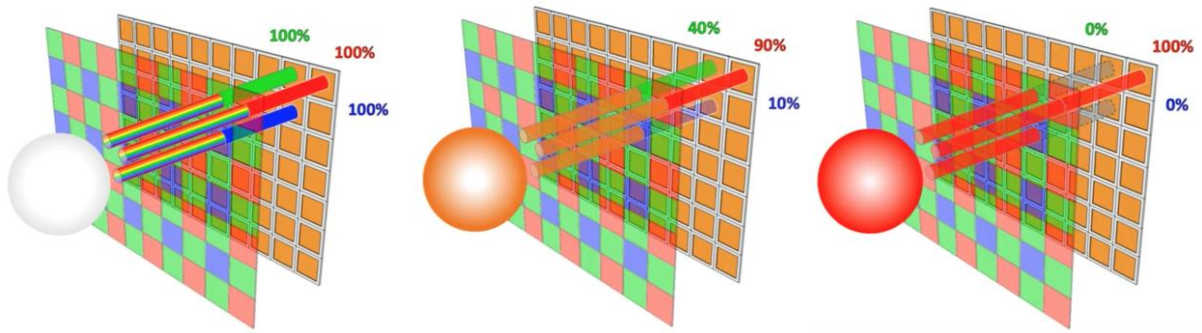
Notons qu'il y a deux fois plus de filtres verts que bleus ou rouges puisque l'œil est plus sensible aux couleurs vertes.

Figure 23 : Fonctionnement du filtre de Bayer recouvrant le capteur photosensible



⁵⁷ Boksman, « Shade selection : accuracy and reproducibility ».

⁵⁸ Gurrea et al., « Evaluation of dental shade guide variability using cross-polarized photography ».



Source : Monsieur Techno, 2020.

L'énergie lumineuse parvenant jusqu'au capteur est ensuite transformée en courants électriques qui sont numérisés sous forme de code binaire. Il s'agit du fichier brut du capteur appelé fichier RAW.

Il existe 2 formats principaux d'enregistrement des données numérisées :

- le format RAW qui comprend la totalité des informations acquises par le capteur telles que des données d'intensité lumineuse, des données propres à l'équipement et aux réglages au moment du cliché, ainsi qu'une miniature JPEG. Il n'y a donc pas de données de couleur et pas d'image. Ce format est lourd et inexploitable sans logiciel de développement. Pour information, seuls les fichiers RAW ont une valeur médico-légale incontestable.⁵⁹

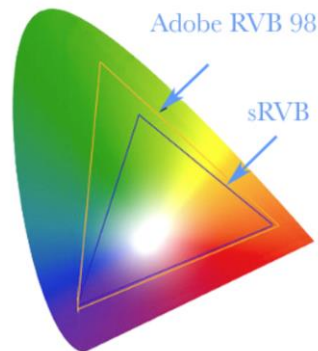
- le format JPEG qui comprend des données de couleur sous format RVB. Le format JPEG est un format standard directement exploitable. Le fichier est cependant compressé et a donc perdu des informations redondantes. Il est moins lourd et permet de stocker un plus grand nombre de photos sur la carte mémoire.

Au moment de la prise d'une photo enregistrée au format JPEG, un choix de l'espace couleur est nécessaire. Il correspond au domaine de couleurs qui pourront être reproduites à partir du diagramme de chromacité. Le format standard est le sRVB. Un autre format, plus large, fréquemment proposé sur les appareils de bonne qualité est le format Adobe RVB 1998. Ce dernier propose un panel de couleurs plus étendu, il est donc à privilégier.

En revanche, au moment de la prise d'une photo enregistrée au format RAW, aucun espace de couleur n'est sélectionné, celui-ci sera choisi au moment de l'ouverture de la photo sur le logiciel de traitement tel que Lightroom® ou Photoshop®.

⁵⁹ Loiacono et Pascoletti, *La photographie en odontologie : théorie et pratique pour une documentation moderne*.

Figure 24 : Diagramme de chromacité et espace sRVB et Adobe RVB 98



Source : Frich, « Les espaces couleurs en photo et en vidéo », 2015.

3.2.2 Matériel et cliché nécessaires

Afin de garantir la qualité de l'image, l'utilisation d'un boîtier Reflex est conseillé.

Il est également nécessaire d'adjoindre au boîtier un objectif macro permettant de prendre des photographies de près sans distorsions perspectives.

Pour éviter les zones d'ombre, être équipé d'un flash envoyant une lumière à répartition homogène de part et d'autre du centre optique de l'objectif est préférable. Il faudra donc idéalement opter pour un flash macro de type annulaire ou bilatéral.

Figure 25 : Matériel de macrophotographie



Source : Auteur, 2020.

Compte-tenu de l'importance de la source lumineuse, les flashes macro disponibles sur le marché tel que le Metz 15MS-1 projettent une lumière de température adéquate (environ 5600 K).

Les écarteurs permettent par ailleurs de récliner les tissus mous afin de permettre un accès et un éclairage satisfaisant des arcades dentaires.

Figure 26 : Différents types d'écarteurs



Source : Nichrominox®, « Écarteurs et ouvre bouches », 2020.

Un simple cliché photographique ne permet pas de déterminer la couleur exacte des dents puisque des différences de couleur existent d'un équipement à l'autre, il permet en revanche au prothésiste une analyse plus complète des caractéristiques de la dent.

Le cliché envoyé au prothésiste doit au minimum faire apparaître la dent préparée, les dents adjacentes ainsi que l'échantillon de référence correctement positionné en regard de la dent et dans le même plan.

Figure 27 : Cliché photographique montrant l'échantillon sélectionné et sa référence



Source : Auteur, 2020.

Un cliché en noir et blanc permet une meilleure analyse de la luminosité des dents.

Figure 28 : Appréciation de la luminosité sur un cliché photographique en noir et blanc



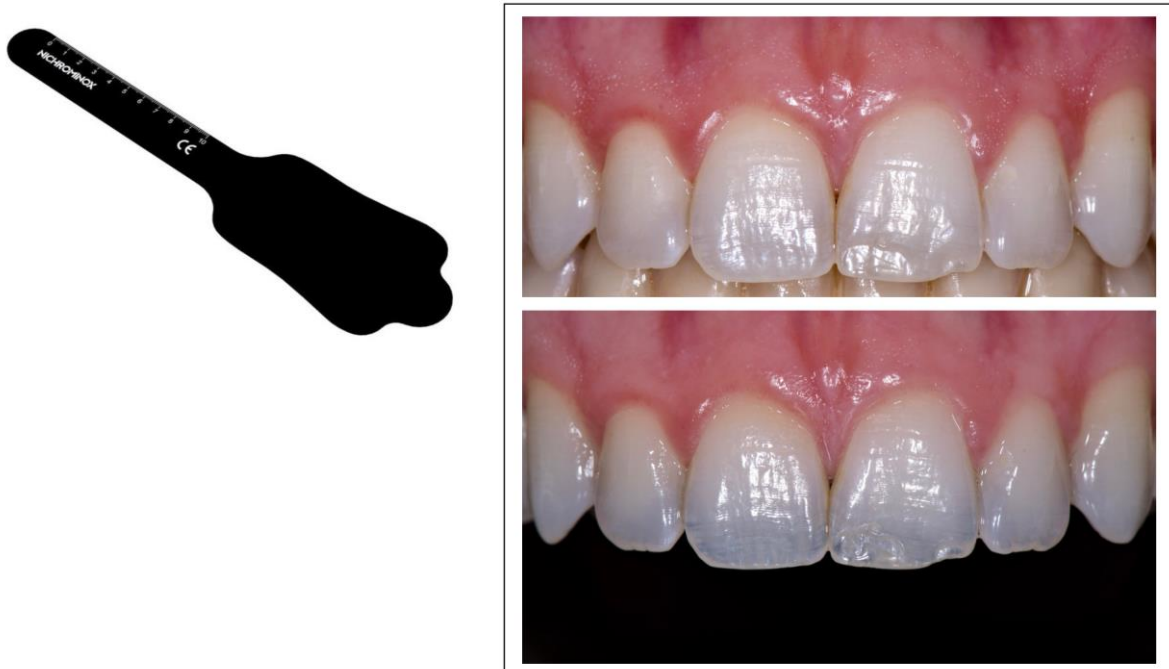
Source : Incau, « Couleur et choix de la teinte en odontologie », 2014.

3.2.3 Accessoires et clichés additionnels

3.2.3.1 Cliché avec un contrasteur noir

L'utilisation d'un contrasteur crée un arrière-plan uniforme derrière les dents et améliore le contraste. Il permet de mieux visualiser l'opacité et la translucidité des dents.

Figure 29 : Contrasteur Nichrominox® et cliché photographique avec et sans contrasteur



Source : Auteur, 2020.

3.2.3.2 Cliché en double polarisation croisée

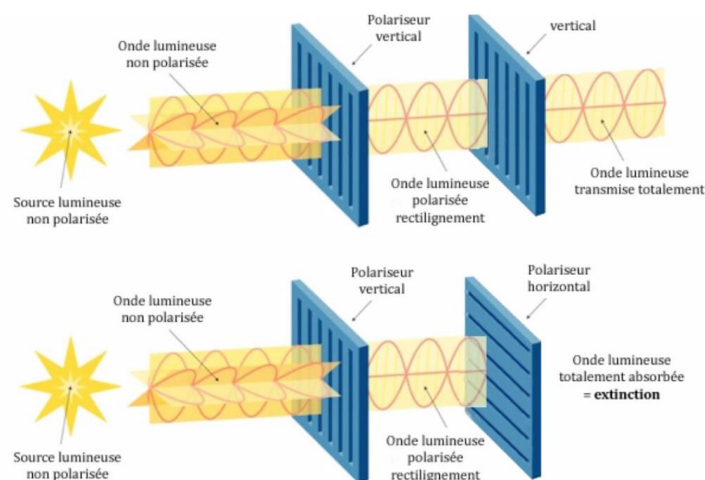
L'utilisation d'un filtre polarisant de type polar_eyes® permettant d'éliminer la réflexion spéculaire de la lumière peut être intéressante dans la communication avec le prothésiste.

Figure 30 : Flash annulaire Metz® et polar_eyes®



Source : DentalPhotoMaster, « Polar-eyes® Metz », 2017.

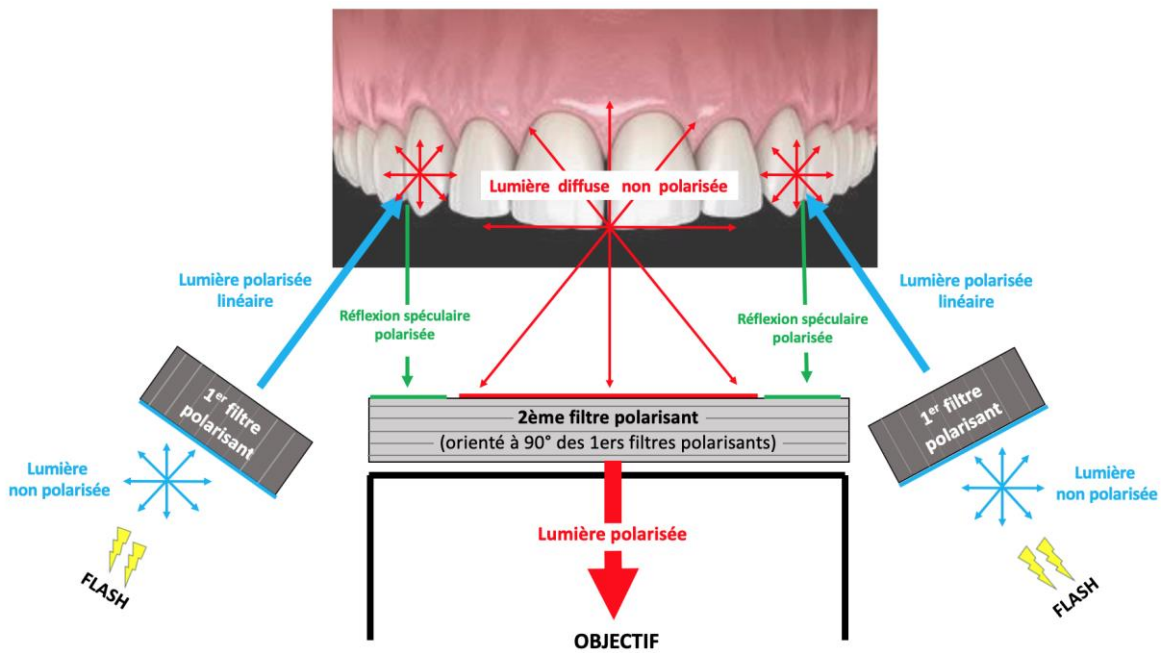
Figure 31 : Schéma du principe de polarisation de la lumière



Source : Perrot, « TP : polarisation », 2016.

Un premier filtre polarisant, permettant de donner une unique direction aux longueurs d'ondes de la lumière du flash, est placé entre ce dernier et la dent. Au contact de la dent, une partie de la lumière est réfléchi de manières spéculaire et diffuse. La réflexion spéculaire de la lumière du flash reste polarisée et conserve son unique direction, tandis que la réflexion diffuse perd sa polarisation. Un deuxième filtre polarisant, orienté à 90° du premier filtre, est placé en regard de l'objectif. Il permet ainsi d'arrêter la réflexion spéculaire et donne une unique direction à la réflexion diffuse.

Figure 32 : Concept de la double polarisation croisée en macrophotographie



Source : Auteur, 2020.

La double polarisation croisée propose une meilleure appréciation des détails fins des structures dentaires. Une vision sans relief et sans reflet, mettant en avant la couleur des couches de tissu sous-jacentes, est ainsi obtenue.⁶⁰

Figure 33 : Cliché photographique avec et sans polar-eyes®



Source : Auteur, 2020.

⁶⁰ Gnanguenon, « L'apport du spectrophotomètre dans la thérapeutique d'éclaircissement dentaire : évaluation quantitative des grandeurs colorimétriques de la dent par spectrophotométrie ».

3.2.3.3 Cliché en transillumination

Ce cliché est obtenu en plaçant le flash à l'entrée de la bouche, juste en dessous du contrasteur. Cette technique permet à la lumière d'être réfléchiée par les tissus du fond de la cavité buccale de manière à traverser les dents en sens inverse. Elle permet une bonne observation de la translucidité.

Figure 34 : Cliché photographique en transillumination



Source : Dr Camaleonte, 2020.

3.2.3.4 Cliché lors de l'essai de la pièce prothétique

Enfin, en cas d'échec esthétique au moment de l'essai de la pièce prothétique, la prise d'un cliché photographique permet également de faciliter la communication avec le prothésiste sur les modifications à apporter. Comme évoqué en partie 2, l'utilisation d'un contrasteur blanc permet dans cette situation de mieux discerner les erreurs de reproduction de la couleur.

La photographie numérique permet donc de transmettre de nombreuses informations en plus de la référence de l'échantillon du teintier. Elle est un outil quasiment indispensable pour accompagner le relevé visuel. Des difficultés dans la reproduction exacte des couleurs sont cependant rencontrées avec la photographie numérique. Des étapes de calibrage pourraient permettre de solutionner ce problème et seront abordées lors de la quatrième partie consacrée au protocole eLAB®.

Il est à noter qu'un smartphone, bien que moins adapté pour la photographie dentaire, permet tout de même de transmettre plus d'informations que le simple relevé visuel. Il peut, de plus, être associé à un système d'éclairage calibré tel que le Smile Lite® pour améliorer la qualité des clichés.

3.3. Optimisation du relevé de la couleur à l'aide d'un spectrophotomètre

Le relevé colorimétrique, à l'aide d'un spectrophotomètre, présente l'avantage d'être une méthode objective fournissant des données quantifiables.⁶¹

3.3.1. Généralité sur les spectrophotomètres

Les spectrophotomètres effectuent une mesure spectrale du flux lumineux réfléchi par la dent pour différentes longueurs d'ondes. Les spectrophotomètres présentent l'avantage de produire leur propre source lumineuse qui est une lumière incidente polychromatique visible.⁶²

Plusieurs modèles sont disponibles tels que le Spectro Shade Micro[®] et le Crystaleye[®] (qui sont combinés à un appareil photo numérique) le Rayplicker[®] ou le VITA Easy Shade[®] V.

Une étude de Kim-Pusateri en 2009 a démontré que le spectrophotomètre VITA Easy Shade[®] était le seul instrument de mesure de la couleur parmi les dispositifs testés (SpectroShade[®], ShadeVision[®], VITA Easyshade[®] et ShadeScan[®]) qui avait à la fois une justesse (92,6 %) et une fidélité (96,4 %) supérieures à 90 %.⁶³ La fidélité représente la répétabilité, la capacité d'un outil à répéter son application en obtenant des valeurs proches les unes des autres. La justesse représente la capacité d'un outil à fournir une valeur proche de la valeur vraie.⁶⁴

Le spectrophotomètre VITA EasyShade[®] V est utilisé pour l'étude comparative située en fin de quatrième partie. Son fonctionnement est donc détaillé ci-dessous.

3.3.2 Fonctionnement du spectrophotomètre VITA Easyshade[®] V

Ce spectrophotomètre émet une lumière blanche polychromatique de 6500 K qui nécessite d'être calibrée sur sa borne par une balance des blancs avant chaque utilisation. Ceci, afin de compenser le vieillissement de la source lumineuse. Le spectre de lumière réfléchi est mesuré sur les deux premiers millimètres de profondeur de la dent grâce à une sonde qui permet de mesurer une zone de 5mm de diamètre. Plusieurs capteurs possédant un filtre sont intégrés dans ce spectrophotomètre. Les filtres découpent le spectre visible réfléchi en 30 bandes de 10 nm. Chaque filtre laisse ainsi passer les longueurs d'ondes supérieures à sa valeur en nm et absorbe toutes les longueurs d'ondes inférieures.

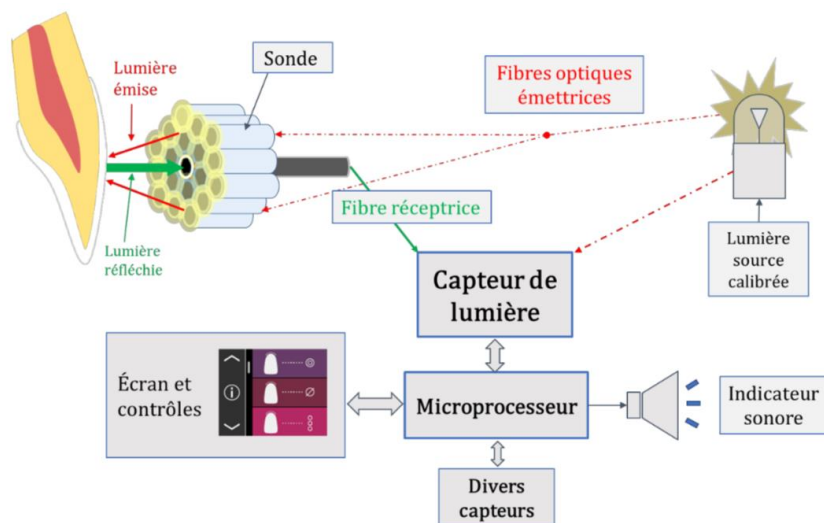
⁶¹ Todorović et al., « Reliability of conventional shade guides in teeth color determination ».

⁶² Pignoly, Aubut, et Girard, « Intérêt des nouvelles technologies dans la prise de teinte ».

⁶³ Kim-Pusateri et al., « Reliability and accuracy of four dental shade-matching devices ».

⁶⁴ Incau, Pia, et Pivet, « Couleur et choix de la teinte en odontologie ».

Figure 35 : Principe de fonctionnement du VITA Easyshade® V



Source : Gnanguenon, « L'apport du spectrophotomètre dans la thérapeutique d'éclaircissement dentaire : évaluation quantitative des grandeurs colorimétriques de la dent par spectrophotométrie », 2019.

Ce spectrophotomètre permet ainsi d'obtenir les valeurs colorimétriques $L^*a^*b^*$ ou $L^*c^*h^°$ ainsi que la référence du teintier VITA Classical® et VITA 3D-MASTER® (références intermédiaires comprises) la plus proche de la dent mesurée. La différence entre la référence proposée par le spectrophotomètre (exemple : 3M2) et la couleur de la dent naturelle est analysée directement par le spectrophotomètre à l'aide d'un code couleur : vert (différence sous le seuil de perceptibilité), jaune (différence perceptible mais acceptable) ou rouge (différence cliniquement non acceptable). Il est important de noter que cet outil est un moyen d'aide et d'optimisation du relevé visuel. Une vérification visuelle à l'aide d'un teintier est donc fortement conseillée.

Ce spectrophotomètre permet d'obtenir des valeurs pour une zone ponctuelle, pour trois zones (cervicale, centrale et incisale) ou bien pour l'ensemble de la dent, en réalisant entre 4 et 30 mesures.

L'obtention de valeurs colorimétriques concrètes présente un intérêt pour le suivi et le pronostic dans la thérapeutique d'éclaircissement.⁶⁵

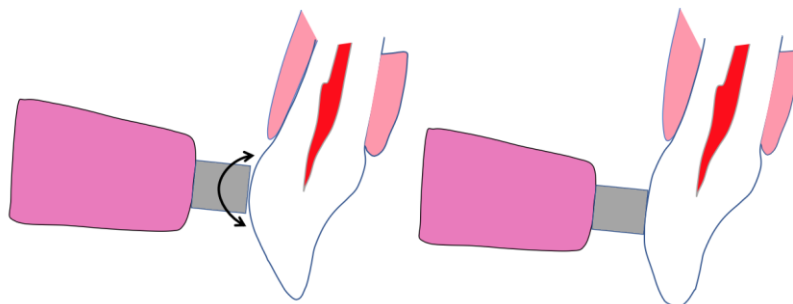
⁶⁵ Gnanguenon, « L'apport du spectrophotomètre dans la thérapeutique d'éclaircissement dentaire : évaluation quantitative des grandeurs colorimétriques de la dent par spectrophotométrie ».

3.3.3. Inconvénients des spectrophotomètres

Le phénomène d'« edge-loss » se produit dans un instrument lorsque l'éclairage et la mesure sont faites au niveau d'une même petite fenêtre. ⁶⁶ Sur des tissus translucides, ce qui est le cas des dents naturelles, une portion importante de la lumière est transmise ou absorbée mais jamais réfléchi jusqu'au capteur de l'instrument. L'intégralité de la lumière envoyée par le spectrophotomètre ne revient donc pas jusqu'au capteur. Les mesures de couleurs en sont alors affectées. Ce phénomène affecte de manière plus importante les grandes longueurs d'ondes telles que le jaune et le rouge, entraînant ainsi une diminution globale des valeurs $L^*a^*b^*$. L'« edge-loss » est d'autant plus important que le diamètre de la sonde est petit. ⁶⁷ Les instruments faisant une mesure sur l'ensemble de la dent sont donc moins sujets à ce phénomène. Ils restent cependant onéreux et ne représentent qu'une aide au relevé de la couleur de la dent.

De plus, le spectrophotomètre réalise une mesure sur les deux premiers millimètres de la surface dentaire, et réalise donc une mesure de couleur en épaisseur. En cas de taches blanches en surface de la dent, la lumière envoyée par le spectrophotomètre va donc traverser la tache, mesurer également la couleur qu'il y a derrière cette tache, un peu plus en profondeur, et revenir jusqu'au spectrophotomètre. Dans ce type de cas, les valeurs colorimétriques obtenues avec le spectrophotomètre peuvent ainsi correspondre à la couleur de la dent derrière cette tache et différer de la couleur réelle perçue en surface. Enfin, la sonde étant plate et les dents plus ou moins convexes, il est parfois difficile de positionner l'embout en étant parfaitement perpendiculaire à la surface de la dent. Les valeurs peuvent alors varier selon l'inclinaison donnée à l'embout du spectrophotomètre.

Figure 36 : Orientation de la sonde selon la convexité de la surface de la dent



Source : Auteur, 2020.

⁶⁶ Duane Douglas, Steinhauer, et Wee, « Intraoral determination of the tolerance of dentists for perceptibility and acceptability of shade mismatch ».

⁶⁷ Bolt, Bosch, et Coops, « Influence of window size in small-window colour measurement, particularly of teeth ».

Le relevé visuel par méthode traditionnelle, la photographie numérique et les instruments de mesure colorimétrique ne permettent pas, individuellement, de transmettre de manière efficace tous les paramètres de la couleur de la dent. Ils sont complémentaires et doivent autant que possible être utilisés de pair afin d'obtenir des résultats prédictibles et fiables. ⁶⁸

La photographie numérique représente un élément indispensable dans la communication avec le prothésiste. Elle ne permet cependant pas, sans étape de calibrage, de quantifier la couleur des dents. La technique eLAB[®] décrite dans la partie suivante, est un protocole photographique qui permettrait, par la simple utilisation d'un matériel de photographie adapté, de s'affranchir des teintiers et des instruments de mesure et d'obtenir des données colorimétriques fiables.

⁶⁸ Chu, Devigus, et Mielezsko, *Fundamentals of color : shade matching and communication in esthetic dentistry*, 2004.

4 : Le protocole eLAB®

Ce protocole, mis au point par le prothésiste Sascha Hein et son équipe, a vu le jour en 2016. Il a pour but d'améliorer la fiabilité du relevé de la couleur d'une dent et d'en faciliter la reproduction.

Il consiste dans un premier temps à prendre un cliché photographique du secteur dentaire concerné en présence d'une carte de balance des blancs. Celle-ci présente une couleur d'apparence grise aux coordonnées L*a*b connues et reproductibles permettant, une fois sur le logiciel, une calibration numérique du cliché photographique. Une fois cette calibration faite, l'obtention numérique des coordonnées colorimétriques est effectuée pour les dents se trouvant en regard de la carte, à condition d'avoir bien respecté le protocole.

eLAB® présente notamment un grand intérêt pour le duo praticien-prothésiste lors de la réalisation de prothèse en secteur antérieur. En effet, un prothésiste, également muni de la carte et d'un appareil-photo, peut réaliser des essais esthétiques digitaux sur le logiciel à tout moment de la confection de la prothèse afin de contrôler son intégration colorimétrique. Pour la réalisation d'une prothèse en céramique, le logiciel peut également proposer au prothésiste une recette de poudres de céramique adéquates à utiliser pour la restauration en fonction des valeurs L*a*b des dents adjacentes.

4.1 Protocole pour la prise du cliché photographique

4.1.1 Matériel de photographie nécessaire

4.1.1.1 Matériel usuel : appareil photo, objectif, flash, polar_eyes® et écarteurs

Le matériel photographique détaillé précédemment est ici primordial pour mener à bien le protocole photographique.

Il est donc important de disposer d'un boîtier Reflex, d'un objectif macro et d'un flash macro annulaire ou bilatéral. Pour information, les flashes bilatéraux permettent un meilleur enregistrement de la caractérisation, de la texture et de la translucidité des dents antérieures en comparaison aux flashes annulaires qui délivrent un flux lumineux uniforme et donnent des images moins détaillées et moins naturelles.⁶⁹

⁶⁹ Zagzoule Ferrand, « Données actuelles sur la photographie au cabinet dentaire ».

L'utilisation d'écarteurs noirs mats est à privilégier puisqu'ils présentent une forte absorbance de la lumière et une faible réflexion de surface. Ils permettent ainsi d'éviter d'éventuels reflets au niveau des dents pour une meilleure fiabilité des mesures colorimétriques.

L'élimination de la réflexion spéculaire de la lumière à l'aide d'un polar-eyes® est ici indispensable.

4.1.1.2 Carte de référence : white_balance®

Comme évoqué précédemment, aucun système de prise de vue ne photographie les mêmes couleurs et aucun ne permet par défaut de photographier les véritables couleurs.⁷⁰

Figure 37 : Les différences de couleurs selon le système photographique utilisé



Source : Incau, *Manuel de photographie dentaire*, 2016.

Il est donc nécessaire d'intégrer dans notre photographie une carte de référence des gris permettant d'étalonner les couleurs, il s'agit dans ce protocole de la carte white_balance®.

Celle-ci a été créée spécialement pour la photographie dentaire, elle est donc étroite et se stérilise sans que sa surface soit endommagée.

⁷⁰ Incau, *Manuel de photographie dentaire*.

Figure 38 : Carte white_balance®



Source : Hein, Emulation, «white_balance® gray reference card for dental photography», 2020.

En haut, se trouvent deux demi-cercles avec une ligne au centre. Cette ligne doit se trouver au centre de l'image et doit être alignée avec le milieu inter-incisif si l'on travaille sur une incisive centrale.

Les demi-cercles correspondent à la cible que l'on retrouve dans le viseur pour la plupart des appareils photos (petit cercle pour un plein format et grand cercle pour un APS), la cible de la carte et du viseur sont donc superposables.

La largeur de la carte est de 36 mm, ce qui correspond à la moyenne de la distance inter-canine pour une population d'adultes caucasiens. Lors de la prise du cliché de canine à canine, la carte occupe donc toute la largeur de l'image.

La règle incorporée à la carte présente un intérêt lors d'un « Digital Smile Design », en permettant de calibrer directement la règle du logiciel de DSD.

La carte est d'un gris uniforme et possède des coordonnées $L^*a^*b^*$ définies, à savoir une luminosité de 79 et une valeur nulle pour a^* et b^* . Le ΔE de fabrication entre 2 cartes est de $\pm 0,5$ (sur 100), ce qui est faible comparé à la constante de fabrication des teintiers qui était en moyenne de 1,56 dans l'étude de Todorovic en 2013.^{71 72}

⁷¹ Congrès eLAB®, Marseille, 2019

⁷² Todorović et al., « Reliability of conventional shade guides in teeth color determination ».

4.1.2 Prise du cliché photographique

4.1.2.1 Réglages de l'appareil photo et du flash

Afin d'assurer une reproductibilité dans les valeurs colorimétriques obtenues, un réglage au niveau de l'appareil photo et du flash est à respecter, à savoir :

- Ouverture de la focale : f22
- Temps d'exposition : 1/125
- ISO : 100 (peut être adapté en montant jusqu'à 200 ou 400 selon l'appareil photo)
- Format d'enregistrement de l'image : RAW, afin d'avoir une image brute qui sera ensuite calibrée
- Intensité du flash : 1/4, mode manuel ou E-TTL activé sans le polar_eyes®
- Intensité du flash : 1/1 ou 1/2, mode manuel et E-TTL désactivé avec le polar_eyes®

Un cliché sans polar_eyes® permet notamment de transmettre au laboratoire des informations utiles sur l'état de surface et le brillant de la dent. ⁷³

4.1.2.1 Protocole photographique

Comme évoqué en partie 2, il faut premièrement veiller à ce que les dents ne soient pas déshydratées, donc le protocole photographique doit être réalisé rapidement.

Les écarteurs sont tout d'abord placés en bouche et le patient peut aider le praticien en les tenant.

Dans le cas d'un travail sur une incisive centrale maxillaire, le patient doit quasiment être en bout-à-bout incisif afin de placer la carte white_balance® contre les incisives mandibulaires. La carte doit être centrée, située dans le prolongement et au contact des dents étudiées.

Afin d'éviter une incidence différente de la lumière entre la carte et les dents, l'axe de l'objectif doit être perpendiculaire à la surface de la carte. Dans le cas contraire, il peut y avoir une variation dans le relevé colorimétrique pouvant aller jusqu'à un ΔE_{ab} de 4,24. De plus, si la carte n'est pas au contact du bord incisal comme préconisé et qu'un espace existe, les valeurs L^*a^*b pourront varier pouvant aller jusqu'à un ΔE_{ab} de 2,45. ⁷⁴

Une distance de travail de 25 cm (+/- 3cm) doit être respectée dans la plupart des cas pour que la carte occupe toute la largeur de l'image.

Une fois s'être assuré que tous les paramètres sont respectés, le cliché photographique peut être pris.

⁷³ Emulation Sascha Hein, « eLAB® photographic protocol : shooting for amazing shade matches ».

⁷⁴ Congrès eLAB, Marseille, 2019

Figure 39 : Bon et mauvais positionnement de la carte white_balance®



Source : Auteur, 2020.

4.2 Utilisation des logiciels

4.2.1 Utilisation d'Adobe Lightroom® et d'eLAB-pilot®

4.2.1.1 Calibration de la température des couleurs (cf. annexe 2)

Initialement, le logiciel préconisé par eLAB® pour la calibration était Lightroom®, disponible sur Mac OS et sur PC Windows.

Après avoir importé la photo sur Lightroom®, la calibration de la photo s'effectue grâce à la carte white_balance® présente sur le cliché. Cette calibration permet de réaliser la balance des blancs et d'indiquer au logiciel que la carte correspond à des valeurs a^* et b^* nulles (si les valeurs de a^* et b^* ne sont pas égales à 0, alors la photo n'est donc pas encore calibrée. Une fois la carte de balance des blancs prise en compte par le logiciel, a^* et b^* passent à 0.)

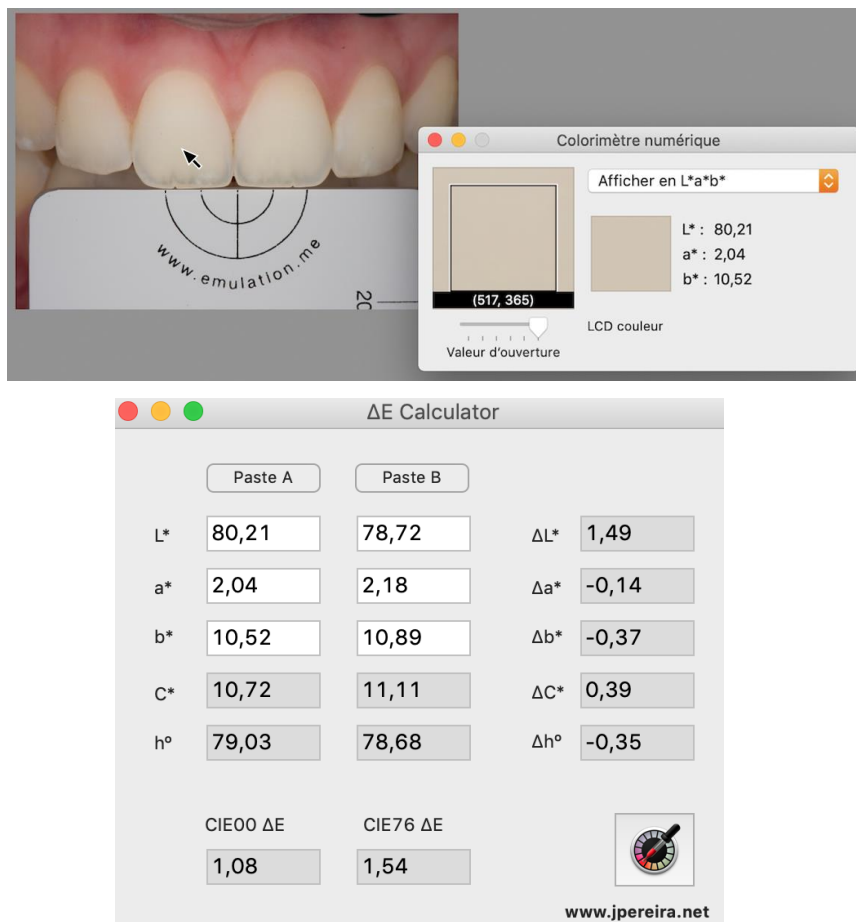
Seule la luminosité reste alors à régler par l'intermédiaire de l'exposition afin d'obtenir une valeur L^* de 79 (+/- 0,5) (cf. annexe 2).

Une fois que les valeurs L^*a^*b sur le logiciel Lightroom® correspondent à celles de la carte : 79, 0 et 0, la température de couleur de la photo est calibrée.

4.2.1.2 Analyse des couleurs

Le biais du logiciel Lightroom®, pour l'analyse de la couleur, est que l'outil sélecteur de couleur ne mesure les valeurs $L^*a^*b^*$ que de quelques pixels, ce qui n'est pas forcément représentatif des réelles valeurs dans cette zone de la dent. Sur Mac OS, il existe un logiciel, intégré dans les utilitaires, nommé « Colorimètre numérique » qui fournit également les valeurs $L^*a^*b^*$. L'avantage de ce dernier est qu'il permet de choisir la taille de la zone à analyser et propose une moyenne pour L^* , a^* et b^* . Pour les utilisateurs de PC Windows, des équivalents existent en téléchargement. En complément, il est possible de télécharger le logiciel « Delta E Calculator » pour étudier la différence entre 2 couleurs. Comme son nom l'indique, il permet de calculer le ΔE_{ab} (CIE 76) et le ΔE_{00} (CIE 00) à partir de 2 zones sélectionnées avec le colorimètre numérique.

Figure 40 : Analyse avec le colorimètre numérique et le Delta E Calculator



Source : Auteur, 2020.

En 2018, le logiciel eLAB_pilot® a vu le jour. Ce dernier remplace le « colorimètre numérique » puisqu'il permet, entre autres, d'obtenir lui aussi une moyenne des valeurs $L^*a^*b^*$ de la zone sélectionnée.

4.2.1.3 Recette et essais esthétiques digitaux au laboratoire

eLAB_pilot® présente principalement un intérêt pour les prothésistes puisqu'il fournit une recette de céramique faisant intervenir des doses de poudres en quantités plus ou moins importantes selon la couleur de la dent. La recette comprend un mélange de doses de 3 types de poudres colorées émail à savoir anthracite, rouge et jaune, ainsi qu'une teinte de poudre dentine afin de créer une céramique semblable à la dent sélectionnée.

De plus, si le prothésiste est équipé du matériel de photographie adéquat et de la carte white_balance®, le même protocole de calibration peut être réalisé pour une photo prise en dehors de la bouche. Un prothésiste devant par exemple réaliser une prothèse sur une incisive centrale, peut appliquer le protocole photographique eLAB® avec la prothèse positionnée sur le modèle en plâtre. Une fois le cliché calibré sur Lightroom®, il peut intégrer l'image de la prothèse sur la préparation de la photographie prise en bouche par le praticien. Il réalise alors un essai esthétique digital, qui lui permet de comparer les valeurs L*a*b de la prothèse avec celles de l'incisive centrale à imiter. L'intégration esthétique peut ainsi être testée virtuellement en l'absence du patient et les modifications nécessaires pour se rapprocher au plus de la couleur, de la texture et de la caractérisation de la dent adjacente peuvent être effectuées. Cela permet de réduire le risque d'échec lors de l'essai en bouche.

L'essai esthétique digital peut être réalisé à n'importe quel stade de la confection d'une prothèse en céramique, y compris avant sa cuisson grâce au liquide visual_eyes® qui permet de révéler, pré-cuisson, la vraie couleur de la céramique.

4.2.2. Utilisation du logiciel eLAB_prime®

En octobre 2019, lors du 2^e symposium eLAB® se déroulant à Marseille, un nouveau logiciel a été présenté : eLAB_prime®. Ce logiciel a pour but de simplifier les nombreuses manipulations initialement nécessaires avec Lightroom®, le colorimètre numérique ou eLAB_pilot®. Les différentes utilisations sont regroupées sous un unique logiciel rendant le processus plus rapide, plus simple et plus reproductible.

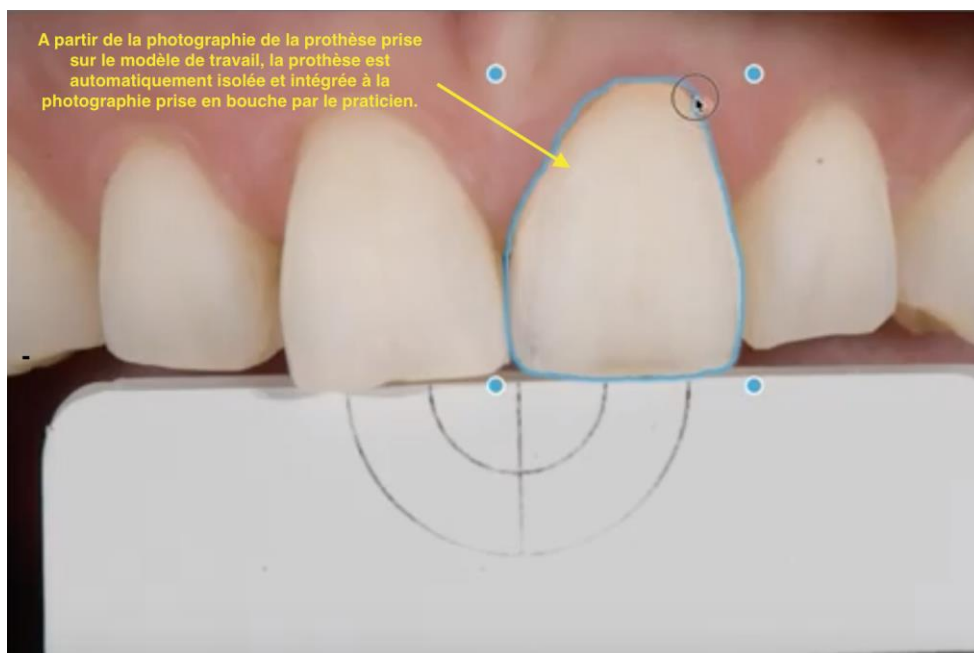
En important la photographie sur eLAB_prime®, un algorithme permet de calibrer automatiquement le cliché. Une fois la calibration effectuée, le logiciel informe l'utilisateur de sa bonne réalisation ou de l'existence d'un problème, comme par exemple : image pas au format RAW, carte mal positionnée, mauvais réglages de l'appareil photo, etc.

Une section nommée « mesures » permet d'obtenir de manière automatique les valeurs L^* , a^* et b^* de la partie incisale et de la partie cervicale de la dent. Sur le logiciel, la partie incisale et la partie cervicale sont supposées représenter respectivement l'émail et la dentine. A la différence des logiciels précédents de mesure de couleur, qui analysaient quelques pixels ou établissaient une moyenne sur la zone sélectionnée, eLAB_prime® fournit la valeur L^* , a^* et b^* la plus commune, la plus retrouvée dans la zone, afin de fournir des valeurs plus précises. Un mode manuel est également disponible pour pouvoir sélectionner une zone spécifique de la dent.

La recette de mélange de poudres pour réaliser une couleur semblable à la dent sélectionnée est également fournie dans cette section avec un choix parmi de nombreux systèmes céramiques. La recette est donnée en fonction de l'épaisseur de la dentine (0,5, 1 ou 1,5mm) et de la couleur du substrat.

Une section nommée « essai » permet de réaliser l'essai esthétique digital. Il suffit d'avoir préalablement importé le cliché pris sur le modèle. La calibration de ce cliché aura été faite automatiquement au moment de l'importation et en cliquant sur « essai » le logiciel va automatiquement proposer l'essai virtuel.

Figure 41 : Essai esthétique digital sur eLAB_prime®

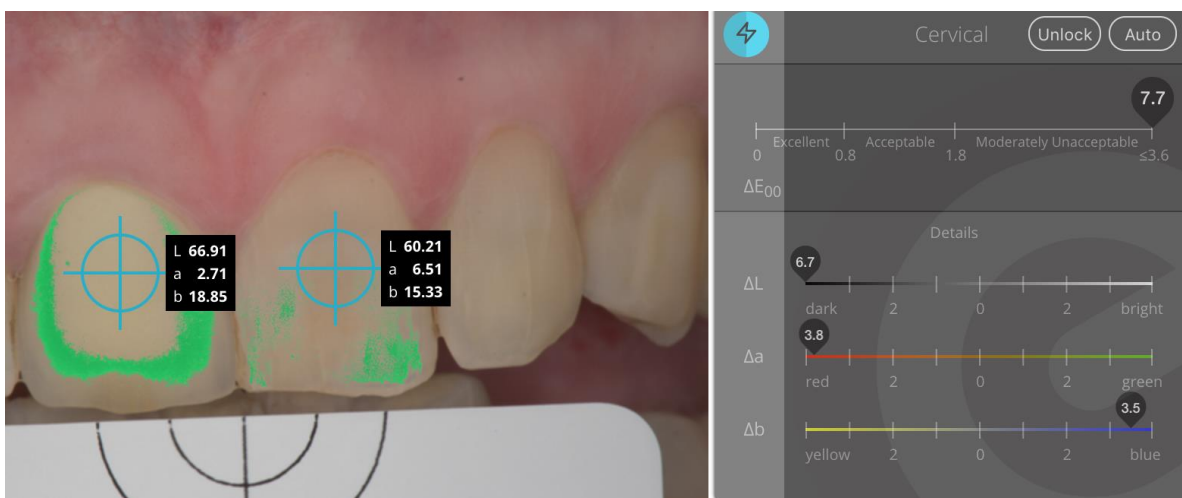


Source : Elabprime, « Tutorials », 2020

La limite bleue peut être modifiée, et la position, la taille ainsi que l'orientation de la prothèse peuvent être ajustées pour améliorer l'essai esthétique digital proposé par le logiciel.

En cliquant sur l'onglet « mesure » sur la page de cet essai esthétique digital, la couleur de la dent à imiter et de la prothèse peuvent être comparées. Le logiciel fournit alors le ΔE_{00} , ainsi que le ΔL^* , Δa^* et le Δb^* . En cas de ΔE_{00} trop important, le prothésiste peut alors analyser l'écart pour chaque valeur et apporter les corrections nécessaires. a^* et b^* sont facilement modifiables en ajoutant plus ou moins de poudre rouge ou jaune ; la luminosité quant à elle est plus difficilement corrigeable. De la même façon que lors d'un essai virtuel, la section « comparaison » permet de comparer directement 2 éléments d'une même image, tels qu'une dent prothétique et une dent naturelle.

Figure 42 : Comparaison de la couleur d'une 21 naturelle et d'une 11 prothétique



Source : Auteur, d'après Hein, Emulation, eLAB_prime®, 2020.

4.3 Intérêts et limites du protocole eLAB®

4.3.1 Intérêts de la technique eLAB®

L'obtention des valeurs $L^*a^*b^*$ permet d'obtenir des données colorimétriques objectives aux intérêts multiples.

4.3.1.1 Communication simplifiée

L'intérêt premier d'eLAB® est qu'une simple photographie permet de communiquer avec son prothésiste afin de lui fournir l'intégralité des informations nécessaires à la reproduction de la couleur. L'utilisation des teintiers et de la technique conventionnelle par relevé visuel, aux nombreux défauts préalablement décrits, n'est donc plus nécessaire.

4.3.1.2 Suivi et pronostic dans la thérapeutique d'éclaircissement

Tout comme le spectrophotomètre, eLAB® peut permettre de suivre l'évolution colorimétrique des dents au cours d'un éclaircissement. En prenant des clichés avant, pendant et après le traitement, des informations sur le gain de luminosité et la modification des valeurs a^* et b^* sont obtenues. En début de traitement, un pronostic peut également être établi en fonction des coordonnées colorimétriques.⁷⁵

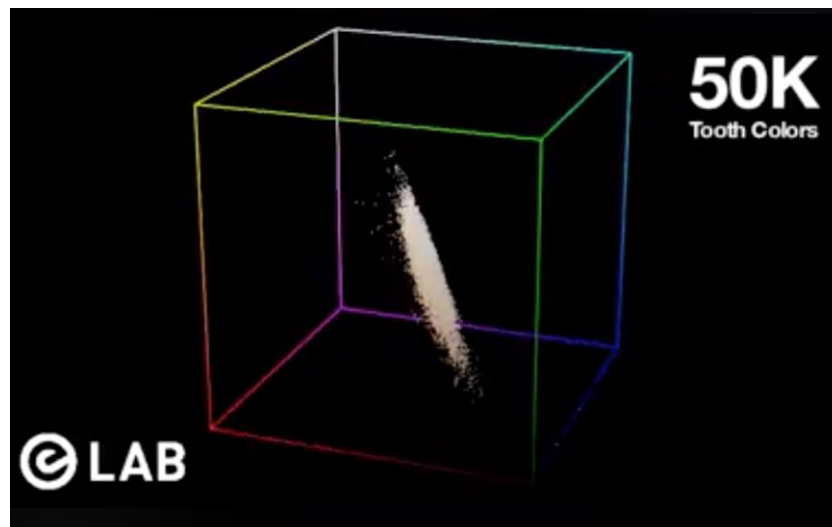
Pour un praticien possédant déjà du matériel de photographie dentaire, cette solution peut s'avérer moins onéreuse que l'achat d'un spectrophotomètre.

4.3.1.2 Nouvelle banane chromatique

Les teintiers basés sur la répartition des dents à l'intérieur de la banane chromatique ne permettent pas de couvrir l'intégralité des couleurs de dents actuelles.

Le créateur d'eLAB®, Sascha Hein, et son équipe s'intéressent actuellement à la répartition des dents naturelles au sein de l'espace colorimétrique CIELAB en utilisant le protocole eLAB®.

Figure 43 : Répartition de 50 000 dents naturelles au sein de l'espace colorimétrique CIELAB à l'aide du protocole eLAB®



Source : Hein, « 50K natural tooth colors », 2019.

Obtenir une nouvelle « banane chromatique » pourrait permettre de réaliser un teintier aux échantillons plus proches de la couleur des dents naturelles et faciliter le relevé de couleur des praticiens non équipés de matériel photographique.

⁷⁵ Gnanguenon, « L'apport du spectrophotomètre dans la thérapeutique d'éclaircissement dentaire : évaluation quantitative des grandeurs colorimétriques de la dent par spectrophotométrie ».

4.3.1.3 Prothésiste non équipé du système eLAB®

Il est possible pour le praticien de photographier son teintier afin d'obtenir les valeurs $L^*a^*b^*$ de chacun des échantillons et de les répertorier dans un tableau.

Au moment du choix d'une couleur, la teinte présentant les valeurs $L^*a^*b^*$ les plus proches de celles de la dent naturelle pourra être sélectionnée et communiquée au prothésiste. Plusieurs mesures peuvent également être réalisées sur la photographie des dents naturelles afin de lui fournir une teinte cervicale et une teinte incisale. La méthode traditionnelle pour le relevé colorimétrique étant très subjective, eLAB® permet de d'aider le choix du praticien. Cette solution ne permet cependant pas d'éliminer les défauts liés aux teintiers.

4.3.1.4 Technique de stratification au composite directe

En se basant sur le principe d'un teintier personnalisé, qui permet d'obtenir le rendu visuel des combinaisons de résines composites utilisées par le dentiste, le même processus, afin d'obtenir les valeurs $L^*a^*b^*$ des différentes combinaisons, est ainsi possible. Les valeurs $L^*a^*b^*$ de la dent à restaurer peuvent ainsi être comparées à celle des différentes combinaisons possibles en composite afin de sécuriser et faciliter le choix du composite.

Cette technique est particulièrement intéressante dans les cas de stratification sur dents antérieures et permet dans certains cas de se passer d'un échantillon physique et de la technique du bouton de composite.⁷⁶

La détermination des valeurs $L^*a^*b^*$ des différents systèmes de résine composite est actuellement en cours d'étude afin de savoir directement la résine à choisir.

4.3.1.5 Technique indirecte

Comme évoqué précédemment, lorsque le prothésiste est également équipé du système eLAB®, la communication praticien/prothésiste est aisée, a priori fiable et permet d'éviter au praticien d'utiliser un teintier. La communication d'une photo au prothésiste est recommandée notamment dans les cas de restaurations antérieures. Ici, le prothésiste possède une image des dents naturelles afin d'en observer la texture, la caractérisation, etc. Il peut également travailler à partir de valeurs $L^*a^*b^*$ et s'aider des recettes proposées par eLAB® pour réaliser la céramique.

⁷⁶ Richard, « Faciliter la prise de teinte pour les composites antérieurs à l'aide du protocole eLAB® ».

Des essais virtuels peuvent être réalisés au cours de la réalisation de la prothèse pour contrôler et ajuster sa couleur. Ceci permet de limiter les aller-retours entre le cabinet et le laboratoire pour cause de couleur non satisfaisante au moment de l'essai en bouche.

Le 2^e symposium eLAB[®], en octobre 2019 à Marseille, a permis de mettre en évidence la fiabilité et la reproductibilité du protocole entre les mains de différents dentistes et prothésistes.

4.3.2 Limites et inconvénients du protocole eLAB[®]

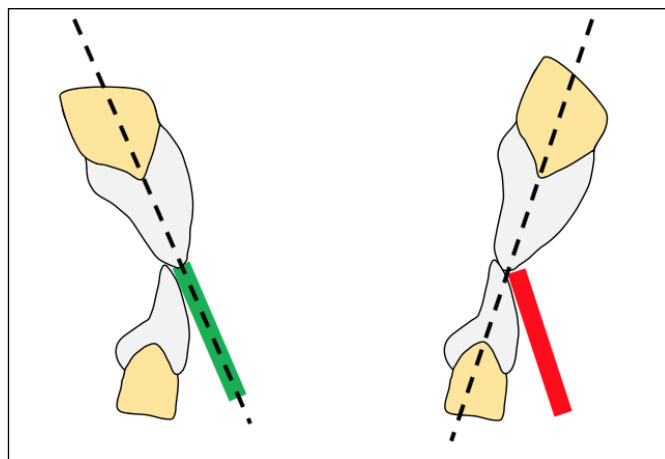
Contrairement au spectrophotomètre qui analyse directement la couleur d'une dent dans sa profondeur, l'analyse d'eLAB[®] est indirecte et est basée sur un cliché photographique.

Il est à noter qu'eLAB_prime[®] nécessite une connexion internet.

De plus, tous les praticiens ne possèdent pas nécessairement le matériel de photographie adapté et l'achat d'un polar_eyes[®] et de la carte white_balance[®] représente tout de même quatre fois le prix d'un teintier VITA[®].

Enfin, en cas de malposition dentaire, le positionnement correct de la carte white_balance[®] est compliqué voire impossible à obtenir. La carte et les dents ne sont alors pas dans le même plan et les valeurs colorimétriques peuvent ainsi être erronées.

Figure 44 : Positionnement de la carte dans l'alignement des incisives maxillaires selon leur orientation



Source : Auteur, 2020.

4.4 Études in vivo autour des valeurs colorimétriques L*a*b*

Le spectrophotomètre VITA Easyshade® V et le protocole eLAB® donnent tous deux des valeurs colorimétriques L*a*b*. Cependant, pour pouvoir comparer des valeurs colorimétriques entre elles, il est essentiel de s'assurer que les conditions de mesures sont les mêmes. Ainsi, les données doivent être recueillies en utilisant un illuminant, une géométrie d'illumination et une géométrie de mesure identiques. Si ce n'est pas le cas, aucune comparaison significative ne peut être faite.⁷⁷

La méthode de mesure entre les deux techniques étant donc différente, il n'est pas possible ici de comparer les valeurs obtenues avec ces deux outils sur un même support, ni de chercher à déterminer lequel des deux propose les valeurs colorimétriques les plus justes.

Dans cette première étude, la répétabilité des deux techniques de mesure, à savoir leur capacité à donner de manière répétée des valeurs très proches les unes des autres, a été étudiée.

4.4.1 Étude comparative de la répétabilité des valeurs colorimétriques déterminées par le spectrophotomètre VITA Easyshade® V et par le protocole eLAB®

4.4.1.1 Matériel et méthodes

Une série de 30 mesures a été réalisée sur l'incisive centrale d'un même sujet avec le spectrophotomètre VITA Easyshade® V puis le protocole eLAB®.

Les conseils d'utilisation du spectrophotomètre ont été respectés avec un étalonnage sur la base avant prise de mesure. Les mesures ont été prises en pleine face de la dent naturelle n°11 d'une patiente âgée de 29 ans. Une attention particulière a également été portée à l'orientation perpendiculaire de la sonde sur la surface de cette dent au moment des mesures successives.

Concernant le protocole photographique eLAB®, le matériel adéquat a été utilisé, à savoir : un appareil photo Nikon® 7200, un objectif macro, un flash Metz®, un polar_eyes®, la carte white_balance® ainsi que les écarteurs noirs mats. Les réglages de l'appareil photo ainsi que la bonne orientation de la carte white_balance® dans le prolongement des incisives centrales au moment de la prise du cliché ont également été respectés. Les données colorimétriques ont ensuite été obtenues dans la région souhaitée grâce au logiciel eLAB_prime®.

Afin d'éviter la déshydratation des dents, un laps de temps d'environ une minute a été maintenu entre les mesures. La prise du cliché photographique ainsi que la mesure avec le spectrophotomètre prenant

⁷⁷ Hunt, *Measuring colour*.

entre cinq et dix secondes, ce laps de temps permettait au sujet d'avoir majoritairement la bouche fermée et les dents hydratées. Ceci a également permis d'éviter que le flash envoyé par le spectrophotomètre ainsi que le flash Metz® ne perdent en intensité lumineuse au cours des mesures successives.

Une fois les 30 mesures réalisées avec le spectrophotomètre et avec le protocole eLAB®, 90 valeurs ont respectivement été obtenues : 30 valeurs L* (Luminosité), 30 valeurs a* (axe vert-rouge) et 30 valeurs b* (axe bleu-jaune). L'ensemble des données des 30 mesures a alors été exporté et traité sur Excel®.

4.4.1.2 Résultats et discussion

Les 90 valeurs ont donc entre autres permis de calculer la moyenne, l'écart-type, la valeur minimum et maximum ainsi que le niveau de confiance. Les résultats sont présentés dans les tableaux ci-dessous.

Tableau 4 : Résultats de l'analyse des valeurs obtenues par spectrophotomètre

Spectrophotomètre VITA Easyshade® V			
	L	a	b
Nombre d'échantillon	30	30	30
Moyenne	91,62	-3,72	10,90
Maximum	93,5	-3,3	12,4
Minimum	89,1	-4,1	9,6
Ecart-type	1,05	0,21	0,88

Source : Auteur, 2020.

Tableau 5 : Résultats de l'analyse des valeurs obtenues par photographie numérique calibrée

Protocole eLAB®			
	L	a	b
Nombre d'échantillon	30	30	30
Moyenne	81	2,56	10,34
Maximum	81,8	3,1	11,2
Minimum	79,8	1,2	8,7
Ecart-type	0,57	0,49	0,63

Source : Auteur, 2020.

Plus l'écart-type est grand et plus les mesures sont dispersées autour de la moyenne. Un instrument de mesure fidèle aura donc un écart-type petit.

Ici, le protocole eLAB® et le spectrophotomètre possèdent tous deux une bonne répétabilité. La répétabilité pour les valeurs L* et b* est supérieure avec le protocole eLAB® tandis que le spectrophotomètre présente une meilleure répétabilité pour la valeur a*.

Le niveau de confiance à 95 % est particulièrement intéressant à calculer dans cette comparaison de répétabilité puisqu'il permet de déterminer l'intervalle comportant la valeur réelle. Autrement dit, la marge d'erreur.

Tableau 6 : Comparaison du niveau de confiance à 95 % obtenu avec le spectrophotomètre VITA Easyshade® V et le protocole eLAB®

	VITA Easyshade® V	eLAB®
L*	0,39	0,21
a*	0,08	0,18
b*	0,33	0,24

Source : Auteur, 2020.

Un niveau de confiance de 0,21 obtenu ici pour la valeur L* avec le protocole eLAB® signifie qu'il y a 95 % de chance que sur x échantillons, la vraie valeur de la moyenne L* (calculée à 81) se trouve dans l'intervalle {80,79 ; 81,21}. Plus l'intervalle de confiance est étroit et plus l'instrument possède une bonne répétabilité. Bien que les moyennes respectives pour L*, a* et b* soient différentes et non comparables entre ces deux techniques, elles présentent toutes deux des intervalles de confiance étroits, signes d'une bonne répétabilité.

Dans l'analyse de ces résultats, il est important de garder à l'esprit les éventuelles sources d'erreurs propres à chaque technique et de prendre en compte la réalité clinique. En effet, d'une mesure à l'autre, il n'y a ici pas de garantie d'un positionnement parfaitement similaire de la carte white_balance® et plus particulièrement de la sonde du spectrophotomètre au contact de la dent. La zone de couleur enregistrée peut donc légèrement varier et biaiser nos résultats.

D'autres études avec un nombre de sujets et d'échantillons plus importants pourraient permettre de préciser ces résultats.

4.4.2 Étude in vivo de l'évolution de la couleur d'une incisive centrale au cours de 60 minutes de déshydratation à l'aide du protocole eLAB®

L'émail de la dent contient de l'eau qui s'évapore et est remplacée par de l'air lorsque la dent se déshydrate.

L'indice de réfraction entre l'eau et l'air étant différents, la lumière est alors dispersée différemment au sein de l'émail qui apparaît donc plus opaque. Cette opacité entraînerait alors une augmentation de la luminosité.⁷⁸

4.4.2.1 Matériel et méthodes

Un manque de répétabilité dans les mesures ne permettrait pas de suivre correctement les changements de couleur au sein de la dent en cours de déshydratation. L'étude précédente ayant montré une très bonne répétabilité des valeurs obtenues avec le protocole eLAB® et une moindre difficulté à analyser numériquement une zone parfaitement identique de la dent, nous avons naturellement souhaité suivre cette évolution de couleur à l'aide du protocole eLAB®.

Pour ce faire, le même matériel photographique que celui de l'étude précédente a été utilisé.

L'étude portait cette fois sur la dent naturelle n° 21 d'un patient âgé de 57 ans.

La dent est ainsi restée au contact de l'air pendant 60 minutes avec des phases intermittentes de séchage afin de mimer les séchages répétitifs réalisés au cours d'un soin sous champ opératoire.

Un cliché photographique selon le protocole eLAB® a été pris toutes les 2 minutes pendant 1 heure.

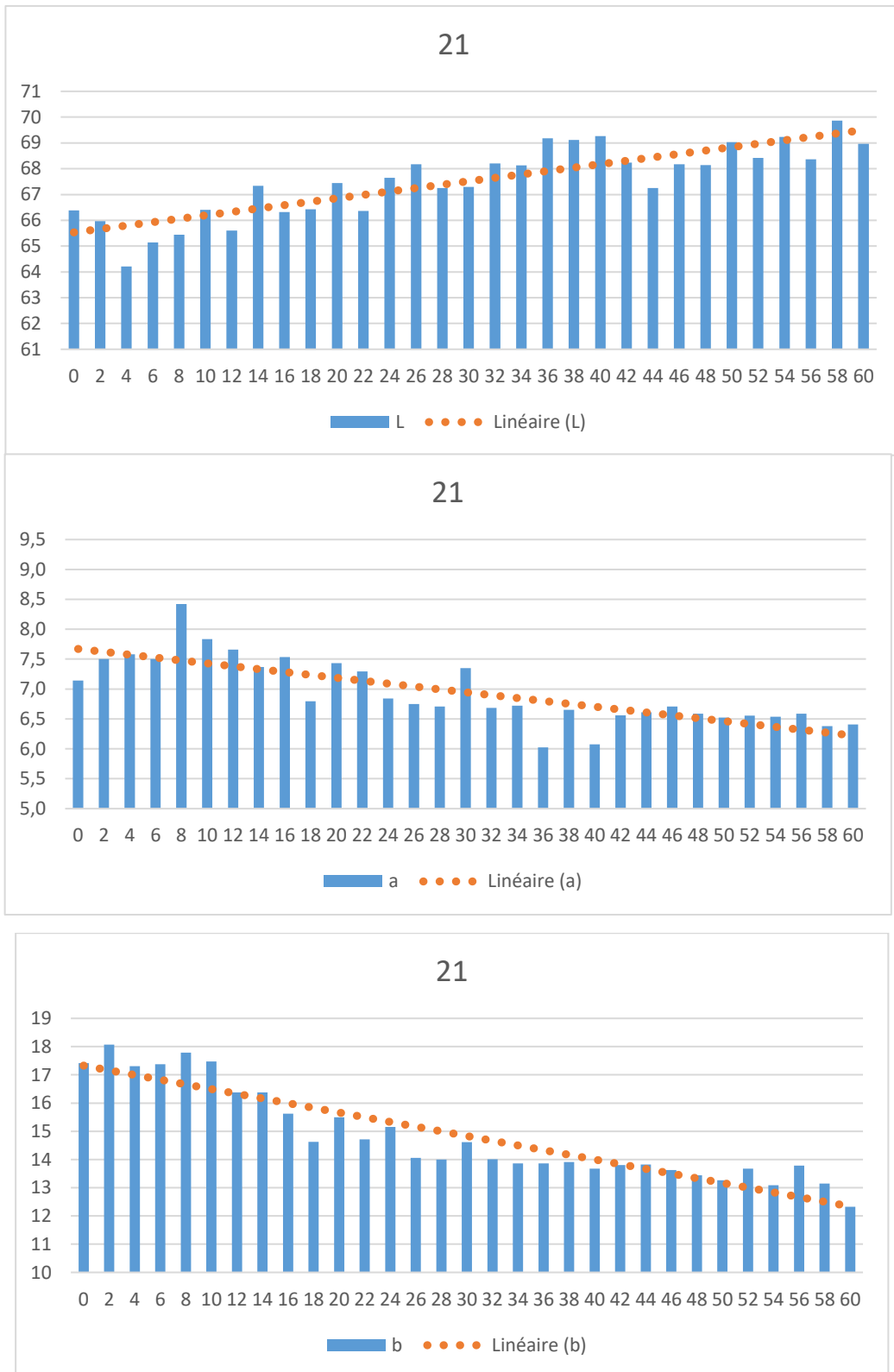
Les clichés photographiques ont ensuite été importés sur eLAB_prime® et les données colorimétriques du secteur « cervical » de la 21 ont automatiquement été exportées sur le logiciel Excel®.

4.4.2.2 Résultats et Discussion

Afin de faciliter la lecture des résultats, l'évolution respective des valeurs L*a*b* au cours de la déshydratation de la dent est présentée ci-après sous forme de graphiques.

⁷⁸ Suliman et al., « Effect of time on tooth dehydration and rehydration ».

Figure 45 : Suivi par le protocole eLAB® de l'évolution des valeurs L*a*b* de 21 au cours de 60 minutes de déshydratation



Source : Auteur, 2020.

Au cours des 60 minutes de déshydratation, la tendance linéaire de l'évolution des valeurs $L^*a^*b^*$ est la suivante :

- La luminosité L^* augmente avec un passage d'environ 65,5 à 69,5. Comme évoqué par de nombreux auteurs, la dent devient donc effectivement plus lumineuse, plus « blanche ».
- La valeur a^* diminue légèrement en passant de 7,7 à 6,2, la quantité de rouge diminue.
- La valeur b^* diminue de manière plus importante que la valeur a^* avec un passage d'environ 17,3 à 12,2. La quantité de jaune diminue donc également et de manière plus importante que la quantité de rouge.

L'écart de couleur entre la couleur moyenne des 4 premières minutes et celles des 4 dernières minutes de déshydratation est de $\Delta E_{ab}=7,14$ et $\Delta E_{00}= 5,36$, ce qui représente un écart de couleur largement au-dessus des seuils de perceptibilité et d'acceptabilité (cf. partie 1).

Comme vu lors de la première étude, cet écart de couleur est largement supérieur à l'écart de mesure pouvant être obtenu entre deux mesures avec le protocole eLAB®. Avec un ΔE_{ab} de 7,14 entre la couleur d'une dent hydratée et d'une dent déshydratée pendant près d'une heure, le changement de couleur semble donc cliniquement visible et significatif.

La valeur a^* , soit la quantité de rouge, est la donnée colorimétrique qui subit le moins de changement au cours du temps de déshydratation tandis que la luminosité L^* augmente et la quantité de jaune diminue. La dent devient donc plus lumineuse et perd en saturation.

L'épidémie de COVID-19 ne nous a pas permis de mener les études initialement prévues au sein du Service de médecine bucco-dentaire de l'hôpital Charles-Foix sur un panel de patients plus conséquent. Bien que les résultats ci-dessus permettent de donner quelques informations intéressantes, des études in vivo et in vitro, sur un plus grand nombre d'échantillons sont à entreprendre afin d'obtenir des données statistiques rigoureusement analysables. Le protocole eLAB® semble toutefois être un outil très prometteur tant en clinique qu'en recherche.

Conclusion

Lors de la restauration d'une dent naturelle, la couleur comporte de multiples caractéristiques qu'il est important de savoir analyser pour parfaire son rendu esthétique. Pour ce faire, une compréhension de l'interaction entre la lumière, la dent et l'œil est nécessaire, ainsi qu'une connaissance des différents tissus formant la dent et de leurs données colorimétriques.

Relever la couleur par méthode conventionnelle, c'est-à-dire de manière visuelle à l'aide d'un teintier et éventuellement d'un schéma, est encore de nos jours très largement pratiqué malgré ses multiples imperfections. Si cette technique s'avère rapide et satisfaisante pour un grand nombre de restaurations, lorsque la demande esthétique est importante ou que le cas est complexe, elle présente ses limites. Compléter son analyse visuelle par une analyse instrumentale est alors fortement recommandé. Le relevé instrumental tel que celui obtenu par l'intermédiaire d'un spectrophotomètre permet ainsi d'obtenir des valeurs colorimétriques ($L^*a^*b^*$ ou $L^*C^*h^\circ$) objectives venant réconforter l'analyse visuelle subjective faite par le praticien.

La photographie numérique permet pour sa part de transmettre des informations plus complètes, avec un grand nombre de détails pouvant aider le prothésiste lors de restaurations indirectes. Elle est un atout qui devient de plus en plus indispensable dans l'exercice d'un chirurgien-dentiste.

Le protocole photographique eLAB[®], récemment créé par Sascha Hein et son équipe, permet de joindre l'intérêt visuel de la photographie aux valeurs colorimétriques objectives du relevé instrumental. La carte white_balance[®] permet désormais de se passer de l'utilisation de teintiers aux défauts d'ores-et-déjà démontrés. La communication avec le prothésiste est considérablement simplifiée avec une nette diminution du risque d'erreur au moment de la transmission de la couleur dentaire ainsi qu'au moment de sa reproduction.

L'intérêt des spectrophotomètres et plus particulièrement du VITA Easyshade[®] V ayant déjà été démontré, l'étude comparative portant sur la répétabilité des mesures du protocole eLAB[®] présentée dans cette thèse est encourageante. Dans les limites de l'étude, le système semble répétable.

De son côté, le suivi des valeurs colorimétriques lors de la déshydratation in vivo des dents a pu montrer une augmentation de la luminosité et une baisse de la saturation des dents au cours de leur déshydratation. Une attention particulière est donc nécessaire pour veiller à ce que le relevé de couleur, quel qu'il soit, se fasse sur des dents hydratées.

Des études in vivo plus poussées portant par exemple sur le suivi des données colorimétriques au cours d'un éclaircissement seraient intéressantes. Elles nécessiteraient également de porter sur un panel de patients plus important afin d'obtenir des résultats aux données statistiques analysables afin d'en tirer des conclusions scientifiquement validées.

De plus, une étude in vitro visant à reproduire des conditions de fonctionnement similaires entre le matériel photographique nécessaire au protocole eLAB® et un instrument de mesure de la couleur ayant déjà fait ses preuves pourrait permettre de statuer sur la justesse des mesures proposées par ce nouveau système. La validation de sa répétabilité et de sa justesse en ferait alors un instrument proposant des valeurs exactes et donc indéniablement intéressantes pour la recherche et la clinique.

Enfin, pour statuer sur l'intérêt du protocole eLAB® en technique indirecte, il serait pertinent de comparer l'intégration esthétique en bouche d'une restauration réalisée des 2 manières suivantes sur une même dent :

- une première fois en utilisant le protocole eLAB® avec un prothésiste habitué à cette technique
- une seconde fois, sans utiliser le protocole eLAB®, avec le même prothésiste ayant préalablement reçu le patient dans son laboratoire et effectué un relevé de couleur détaillé.

De manière plus générale, avec la rapidité actuelle du développement des nouvelles technologies, la dentisterie de demain semble avoir un avenir prometteur et devrait permettre aux praticiens d'être de plus en plus aidés dans les soins prodigués aux patients.

Bibliographie

- Al-Juaila, E., E. Osman, L. Segaan, M. Shrebaty, et E. A. Farghaly. « Comparison of translucency for different thicknesses of recent types of esthetic zirconia ceramics versus conventional ceramics ... (in vitro study) ». *Future dental journal* 4, n° 2 (2018): 297-301. <https://doi.org/10.1016/j.fdj.2018.05.003>.
- Alomari, M., et R. G. Chadwick. « Factors influencing the shade matching performance of dentists and dental technicians when using two different shade guides ». *British dental journal* 211, n° 11 (2011): E23. <https://doi.org/10.1038/sj.bdj.2011.1006>.
- Ayash, G. M., E. Osman, L. Segaan, et M. M. Rayyan. « Visual versus instrumental shade selection techniques ». *Egyptian dental journal* 61, n° 2 (2015).
- Boksman, L. « Shade selection : accuracy and reproducibility ». *Ontario dentist* 84, n° 4 (2007): 24-28.
- Bolt, R. A., J. J. Bosch, et J. C. Coops. « Influence of window size in small-window colour measurement, particularly of teeth ». *Physics in medicine & biology* 39, n° 7 (1994): 1133-42. <https://doi.org/10.1088/0031-9155/39/7/006>.
- Carsten, D. L. « Successful shade matching : what does it take ? » *The Compendium of continuing education in dentistry* 24, n° 3 (2003): 175-86.
- Chu, S. J., A. Devigus, et A. Mieleszko. *Fundamentals of color : shade matching and communication in esthetic dentistry*. Chicago : Quintessence Publishing Co, 2004.
- . *Fundamentals of color : shade matching and communication in esthetic dentistry*. Chicago : Quintessence Publishing Co, 2004.
- Daries, C. « Relevé de la couleur au cabinet dentaire : connaissances et moyens d'optimisation actuels ». Thèse d'exercice, Université Paul Sabatier, 2013. <http://thesesante.upstlse.fr/40/1/2013TOU33009.pdf>.
- Davison, S. P., et N. R. Myslinski. « Shade selection by color vision-defective dental personnel Δ ». *The journal of prosthetic dentistry* 63, n° 1 (1990): 97-101. [https://doi.org/10.1016/0022-3913\(90\)90276-l](https://doi.org/10.1016/0022-3913(90)90276-l).
- Duane Douglas, R., T. J. Steinhauer, et A. G. Wee. « Intraoral determination of the tolerance of dentists for perceptibility and acceptability of shade mismatch ». *The journal of prosthetic dentistry* 97, n° 4 (2007): 200-208. <https://doi.org/10.1016/j.prosdent.2007.02.012>.
- Emulation Sascha Hein. « eLAB® photographic protocol : shooting for amazing shade matches ». Emulation me, 2019. <https://www.4pointsdental.com/s/4pts-resources-photographic-protocol.pdf>.

Etienne, O., S. Baixe, H. Barthelemy, et F. F. Dal Gobbo. « Enregistrer et transmettre les informations chromatiques ». In *Prise de teintes : des techniques conventionnelles aux techniques électroniques*, par Association dentaire française, 31-61. Paris : Association dentaire française, 2010.

Gnanguenon, K. « L'apport du spectrophotomètre dans la thérapeutique d'éclaircissement dentaire : évaluation quantitative des grandeurs colorimétriques de la dent par spectrophotométrie ». Thèse d'exercice, Université Paris Descartes, 2019. <https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-02441443>.

Gurrea, J., M. Gurrea, A. Bruguera, C. Sampaio, M. Janal, E. Bonfante, P. Coelho, et R. Hirata. « Evaluation of dental shade guide variability using cross-polarized photography ». *The international journal of periodontics & restorative dentistry* 36, n° 5 (2016): e76-81. <https://doi.org/10.11607/prd.2700>.

Haddad, H. J., H. A. Jakstat, G. Arnetzl, J. Borbely, A. Vichi, H. Dumfahrt, P. Renault, et al. « Does gender and experience influence shade matching quality ? » *Journal of dentistry* 37, n° Suppl. 1 (2009): 40-44. <https://doi.org/10.1016/j.jdent.2009.05.012>.

Haddad, H. J., Z. Salameh, W. Sadig, M. Aboushelib, et H. A. Jakstat. « Allocation of color space for different age groups using three-dimensional shade guide systems ». *The european journal of esthetic dentistry* 6, n° 1 (2011): 94-102. <https://doi.org/10.1111/j.1708-8240.2009.00262.x>.

Helmholtz, H. v. *Optique physiologique*. Paris: V. Masson et fils, 1867. <https://iris.univ-lille.fr/handle/1908/3090>.

Huang, P. Y., R. Masri, E. Romberg, et C. F. Driscoll. « The effect of various disinfectants on dental shade guides ». *The journal of prosthetic dentistry* 112, n° 3 (2014): 613-17. <https://doi.org/10.1016/j.prosdent.2014.04.006>.

Hunt, R. W. G. *Measuring colour*. 4th edition. Chichester : Wiley, 2011. <http://sirius.parisdescartes.fr/login?url=http://univ.scholarvox.com/catalog/book/docid/88808448>.

Incau, E. d. *Manuel de photographie dentaire*. Bordeaux : Université de Bordeaux, 2016.

Incau, E. d., J.-P. Pia, et J. Pivet. « Couleur et choix de la teinte en odontologie ». In *Esthétique en odontologie*, par M.-V. Berteretche, 23-37. Malakoff : Editions CdP, 2014.

Jain, M., V. Jain, N. Yadav, S. Jain, S. Singh, P. Raghav, J. Kohli, et A. Sharma. « Dental students' tooth shade selection ability in relation to years of dental education ». *Journal of family medicine and primary care* 8, n° 12 (2019): 4010-14. https://doi.org/10.4103/jfmpc.jfmpc_803_19.

Joiner, A., I. Hopkinson, Y. Deng, et S. Westland. « A review of tooth colour and whiteness ». *Journal of dentistry* 36, n° Suppl. 1 (2008): 2-7. <https://doi.org/10.1016/j.jdent.2008.02.001>.

Khashayar, G., P. A. Bain, S. Salari, A. Dozic, C. J. Kleverlaan, et A. J. Feilzer. « Perceptibility and acceptability thresholds for colour differences in dentistry ». *Journal of dentistry* 42, n° 6 (2014): 637-44. <https://doi.org/10.1016/j.jdent.2013.11.017>.

Kim-Pusateri, S., J. D. Brewer, E. L. Davis, et A. G. Wee. « Reliability and accuracy of four dental shade-matching devices ». *The journal of prosthetic dentistry* 101, n° 3 (2009): 193-99. [https://doi.org/10.1016/S0022-3913\(09\)60028-7](https://doi.org/10.1016/S0022-3913(09)60028-7).

Kröger, E., S. Matz, M. Dekiff, B. L. Tran, L. Figgenger, et D. Dirksen. « In vitro comparison of instrumental and visual tooth shade determination under different illuminants ». *The journal of prosthetic dentistry* 114, n° 6 (2015): 848-55. <https://doi.org/10.1016/j.prosdent.2015.06.004>.

Lasserre, J.-F. « Les sept dimensions de la couleur des dents naturelles ». *Clinic* 28 (2007): 417-30.

Lasserre, J.-F., et S. Pineau. « Les fondamentaux de la couleur ». In *Prise de teintes : des techniques conventionnelles aux techniques électroniques*, par Association dentaire française, 5-30. Paris : Association dentaire française, 2010.

Lee, Y.-K., B. Yu, J. I. Lim, et H.-N. Lim. « Perceived color shift of a shade guide according to the change of illuminant ». *The journal of prosthetic dentistry* 105, n° 2 (2011): 91-99. [https://doi.org/10.1016/S0022-3913\(11\)60006-1](https://doi.org/10.1016/S0022-3913(11)60006-1).

Li, Q., H. Yu, et Y. N. Wang. « In vivo spectroradiometric evaluation of colour matching errors among five shade guides ». *Journal of oral rehabilitation* 36, n° 1 (2009): 65-70. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2842.2008.01894.x>.

Loiacono, P., et L. Pascoletti. *La photographie en odontologie : théorie et pratique pour une documentation moderne*. Paris: Quintessence International, 2011.

Marechal, M., M. Delbarre, M. Berguiga, D. Benisty, et F. Froussart-Maille. « Dyschromatopsies héréditaires : physiologie, classification, diagnostic et application à l'aéronautique ». *Journal français d'ophtalmologie* 42, n° 2 (2019): 177-88. <https://doi.org/10.1016/j.jfo.2018.05.018>.

Munsell, A. « Munsell color and science ». Munsell Color System, 27 septembre 2011. <https://munsell.com/color-blog/munsell-color-and-science/>.

Okubo, S. R., A. Kanawati, M. W. Richards, et S. Childress. « Evaluation of visual and instrument shade matching ». *The journal of prosthetic dentistry* 80, n° 6 (1998): 642-48. [https://doi.org/10.1016/s0022-3913\(98\)70049-6](https://doi.org/10.1016/s0022-3913(98)70049-6).

Paravina, R. D. « Performance assessment of dental shade guides ». *Journal of dentistry* 37 (2009): 15-20. <https://doi.org/10.1016/j.jdent.2009.02.005>.

Paravina, R. D., M. M. Pérez, et R. Ghinea. « Acceptability and perceptibility thresholds in dentistry : a comprehensive review of clinical and research applications ». *Journal of esthetic and restorative dentistry* 31, n° 2 (2019): 103-12. <https://doi.org/10.1111/jerd.12465>.

Paravina, R. D., et E. J. Swift junior. « Color in dentistry : match me, match me not ». *Journal of esthetic and restorative dentistry* 21, n° 3 (2009): 202-8. <https://doi.org/10.1111/j.1708-8240.2009.00255.x>.

Paty, M. « Newton, Isaac (1642-1727) ». In *Encyclopaedia universalis*, 12:642-50. Britannica, 1995. <https://halshs.archives-ouvertes.fr/halshs-00004282>.

Pignoly, C., V. Aubut, et J.-L. Girard. « Intérêt des nouvelles technologies dans la prise de teinte ». In *Prise de teintes : des techniques conventionnelles aux techniques électroniques*, par Association dentaire française, 62-71. Paris : Association dentaire française, 2010.

Richard, A. « Faciliter la prise de teinte pour les composites antérieurs à l'aide du protocole eLAB® ». *Quintessence dentisterie restauratrice et prothèse* 12, n° 4 (2018): 325-33.

Salas, M. « Translucency thresholds for dental materials ». *Dental materials* 34, n° 8 (2018): 1168-74. <https://doi.org/10.1016/j.dental.2018.05.001>.

Sampaio, C., J. Gurrea, M. Gurrea, A. Bruguera, P. Atria, M. Janal, E. Bonfante, P. Coelho, et R. Hirata. « Dental shade guide variability for hues B, C, and D using cross-polarized photography ». *The international journal of periodontics & restorative dentistry* 38, n° Suppl. 2018 (2018): s113-18. <https://doi.org/10.11607/prd.3270>.

Suliman, S., T. A. Sulaiman, V. G. Olafsson, A. J. Delgado, T. E. Donovan, et H. O. Heymann. « Effect of time on tooth dehydration and rehydration ». *Journal of esthetic and restorative dentistry* 31, n° 2 (2019): 118-23. <https://doi.org/10.1111/jerd.12461>.

Todorović, A., A. Todorović, A. Špadijer-Gostović, V. Lazić, B. Miličić, et S. Đurišić. « Reliability of conventional shade guides in teeth color determination ». *Vojnosanitetski pregled* 70, n° 10 (2013): 929-34. <https://doi.org/10.2298/VSP110513019T>.

Wee, A., A. Meyer, W. Wu BA, et C. S. Wichman. « Lighting conditions used during visual shade matching in private dental offices ». *The journal of prosthetic dentistry* 115, n° 4 (2016): 469-74. <https://doi.org/10.1016/j.prosdent.2015.09.020>.

Young, T. « The Bakerian lecture : on the theory of light and colours ». *Philosophical transactions of the Royal society of London*, 1802, 12-48. <https://doi.org/10.1098/rstl.1802.0004>.

Zagzoule Ferrand, M. « Données actuelles sur la photographie au cabinet dentaire ». Thèse d'exercice, Université Paul Sabatier, 2016. <http://thesesante.ups-tlse.fr/1264/>.

Table des figures

Figure 1 : Éléments nécessaires à la perception d'une couleur	5
Figure 2 : Schéma représentant l'expérience du prisme de Newton.....	6
Figure 3 : Changement de couleur d'un corps noir selon la température	6
Figure 4 : Températures des couleurs	7
Figure 5 : Interactions entre la lumière et une dent naturelle.....	8
Figure 6 : Couleurs de la synthèse additive.....	9
Figure 7 : Cercle chromatique d'Itten Johannes en 12 parties	10
Figure 8 : Espace chromatique tridimensionnel de Munsell.....	11
Figure 9 : Sphère chromatique CIE L*a*b*	12
Figure 10 : Sphère chromatique CIE L* C*h°	13
Figure 11 : Banane chromatique au sein de l'espace chromatique CIE L*a*b*.....	14
Figure 12 : Calcul de la tolérance ΔE_{ab}	15
Figure 13 : Seuils de tolérance ΔE_{ab} pour les dents ou matériaux dentaires.....	15
Figure 14 : Seuils de tolérance ΔE_{00} pour les dents ou matériaux dentaires	16
Figure 15 : Seuils de tolérance de translucidité pour les dents ou matériaux dentaires.....	18
Figure 16 : Réflexion spéculaire et réflexion diffuse	19
Figure 17 : Schéma de Lasserre au sujet de la couleur d'une 21	22
Figure 18 : Teintier VITA Classical®	22
Figure 19 : Teintier Toothguide 3D-MASTER®	23
Figure 20 : Teintier VITA Linearguide 3D-MASTER®	25
Figure 21 : Teintier Ivoclar Chromascop®	25
Figure 22 : Lampe calibrée Smile Lite®	33
Figure 23 : Fonctionnement du filtre de Bayer recouvrant le capteur photosensible.....	34
Figure 24 : Diagramme de chromacité et espace sRGB et Adobe RGB 98.....	36
Figure 25 : Matériel de macrophotographie	36
Figure 26 : Différents types d'écarteurs.....	37
Figure 27 : Cliché photographique montrant l'échantillon sélectionné et sa référence	37
Figure 28 : Appréciation de la luminosité sur un cliché photographique en noir et blanc	38
Figure 29 : Contrasteur Nichrominox® et cliché photographique avec et sans contrasteur	38
Figure 30 : Flash annulaire Metz® et polar_eyes®	39
Figure 31 : Schéma du principe de polarisation de la lumière	39

Figure 32 : Concept de la double polarisation croisée en macrophotographie	40
Figure 33 : Cliché photographique avec et sans polar-eyes®	40
Figure 34 : Cliché photographique en transillumination.....	41
Figure 35 : Principe de fonctionnement du VITA Easyshade® V	43
Figure 36 : Orientation de la sonde selon la convexité de la surface de la dent	44
Figure 37 : Les différences de couleurs selon le système photographique utilisé.....	47
Figure 38 : Carte white_balance®	48
Figure 39 : Bon et mauvais positionnement de la carte white_balance®	50
Figure 40 : Analyse avec le colorimètre numérique et le Delta E Calculator	51
Figure 41 : Essai esthétique digital sur eLAB_prime®	53
Figure 42 : Comparaison de la couleur d'une 21 naturelle et d'une 11 prothétique	54
Figure 43 : Répartition de 50 000 dents naturelles au sein de l'espace colorimétrique CIELAB à l'aide du protocole eLAB®	55
Figure 44 : Positionnement de la carte dans l'alignement des incisives maxillaires selon leur orientation	57
Figure 45 : Suivi par le protocole eLAB® de l'évolution des valeurs L*a*b* de 21 au cours de 60 minutes de déshydratation	62

Table des tableaux

Tableau 1 : Références possibles avec le teintier VITA 3D-MASTER®	24
Tableau 2 : Correspondance entre les teintiers Chromascop®, Classical® et 3D-Master®	25
Tableau 3 : Effets de contraste.....	30
Tableau 4 : Résultats de l'analyse des valeurs obtenues par spectrophotomètre	59
Tableau 5 : Résultats de l'analyse des valeurs obtenues par photographie numérique calibrée	59
Tableau 6 : Comparaison du niveau de confiance à 95 % obtenu avec le spectrophotomètre VITA Easyshade® V et le protocole eLAB®	60

Annexes

Annexe 1 : Calcul de la tolérance ΔE_{00} — Page 16

$$\Delta E_{00}^* = \sqrt{\left(\frac{\Delta L'}{k_L S_L}\right)^2 + \left(\frac{\Delta C'}{k_C S_C}\right)^2 + \left(\frac{\Delta H'}{k_H S_H}\right)^2} + R_T \frac{\Delta C'}{k_C S_C} \frac{\Delta H'}{k_H S_H}$$

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

$$\bar{L} = \frac{L_1^* + L_2^*}{2} \quad \bar{C} = \frac{C_1^* + C_2^*}{2}$$

$$a'_1 = a_1^* + \frac{a_1^*}{2} \left(1 - \sqrt{\frac{\bar{C}^7}{\bar{C}^7 + 25^7}}\right) \quad a'_2 = a_2^* + \frac{a_2^*}{2} \left(1 - \sqrt{\frac{\bar{C}^7}{\bar{C}^7 + 25^7}}\right)$$

$$\bar{C}' = \frac{C'_1 + C'_2}{2} \quad \text{and} \quad \Delta C' = C'_2 - C'_1 \quad \text{where} \quad C'_1 = \sqrt{a_1'^2 + b_1^{*2}} \quad C'_2 = \sqrt{a_2'^2 + b_2^{*2}}$$

$$h'_1 = \text{atan2}(b_1^*, a'_1) \pmod{360^\circ}, \quad h'_2 = \text{atan2}(b_2^*, a'_2) \pmod{360^\circ}$$

$$\Delta h' = \begin{cases} h'_2 - h'_1 & |h'_1 - h'_2| \leq 180^\circ \\ h'_2 - h'_1 + 360^\circ & |h'_1 - h'_2| > 180^\circ, h'_2 \leq h'_1 \\ h'_2 - h'_1 - 360^\circ & |h'_1 - h'_2| > 180^\circ, h'_2 > h'_1 \end{cases}$$

$$\Delta H' = 2\sqrt{C'_1 C'_2} \sin(\Delta h'/2), \quad \bar{H}' = \begin{cases} (h'_1 + h'_2 + 360^\circ)/2 & |h'_1 - h'_2| > 180^\circ \\ (h'_1 + h'_2)/2 & |h'_1 - h'_2| \leq 180^\circ \end{cases}$$

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

$$S_L = 1 + \frac{0.015(\bar{L} - 50)^2}{\sqrt{20 + (\bar{L} - 50)^2}} \quad S_C = 1 + 0.045\bar{C}' \quad S_H = 1 + 0.015\bar{C}' T$$

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

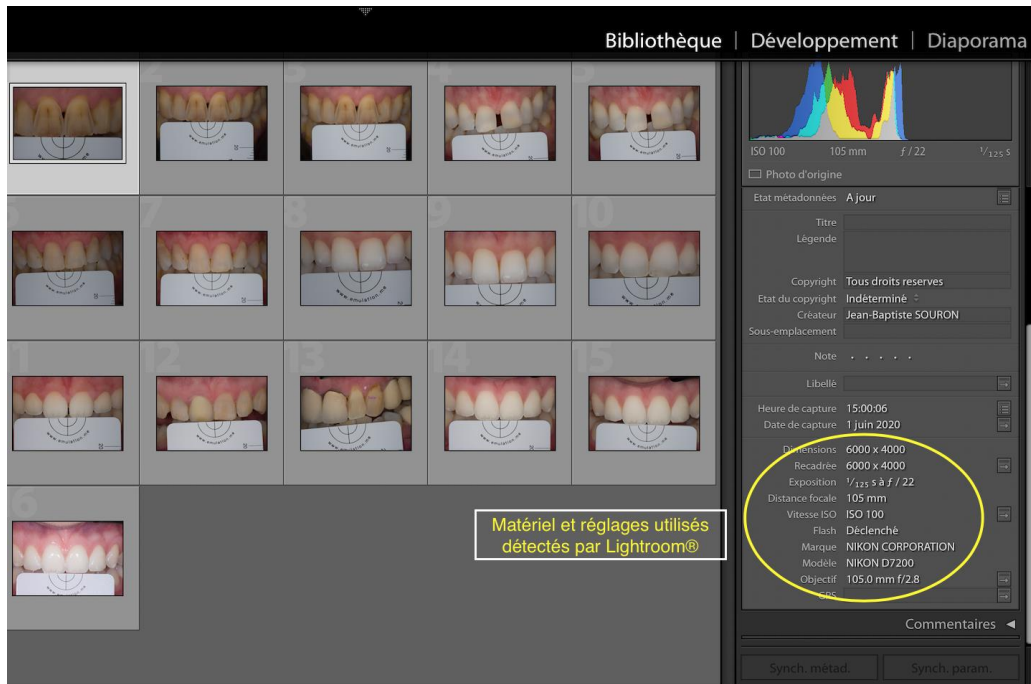
Source : CIE, 2001.

Annexe 2 : Calibration de la balance des blancs sur le logiciel Lightroom® — Page 50

1- Importer le fichier RAW

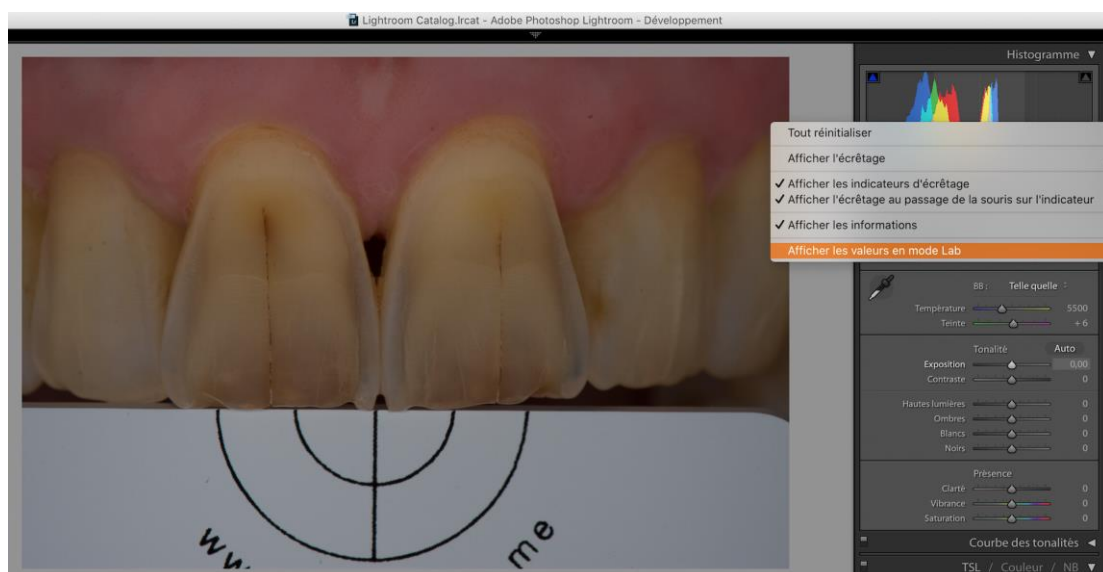
Le matériel utilisé pour la prise des clichés venant d'être importés est reconnu automatiquement par le logiciel.


Lightroom® possède une large base de données de modèles d'appareil photo permettant de prendre en compte le profil ICC de notre matériel (cf. partie 3). En résumé, les défauts de notre modèle d'appareil photo sont pris en compte afin d'afficher les couleurs du mieux possible.



2- Aller sur l'onglet développement.

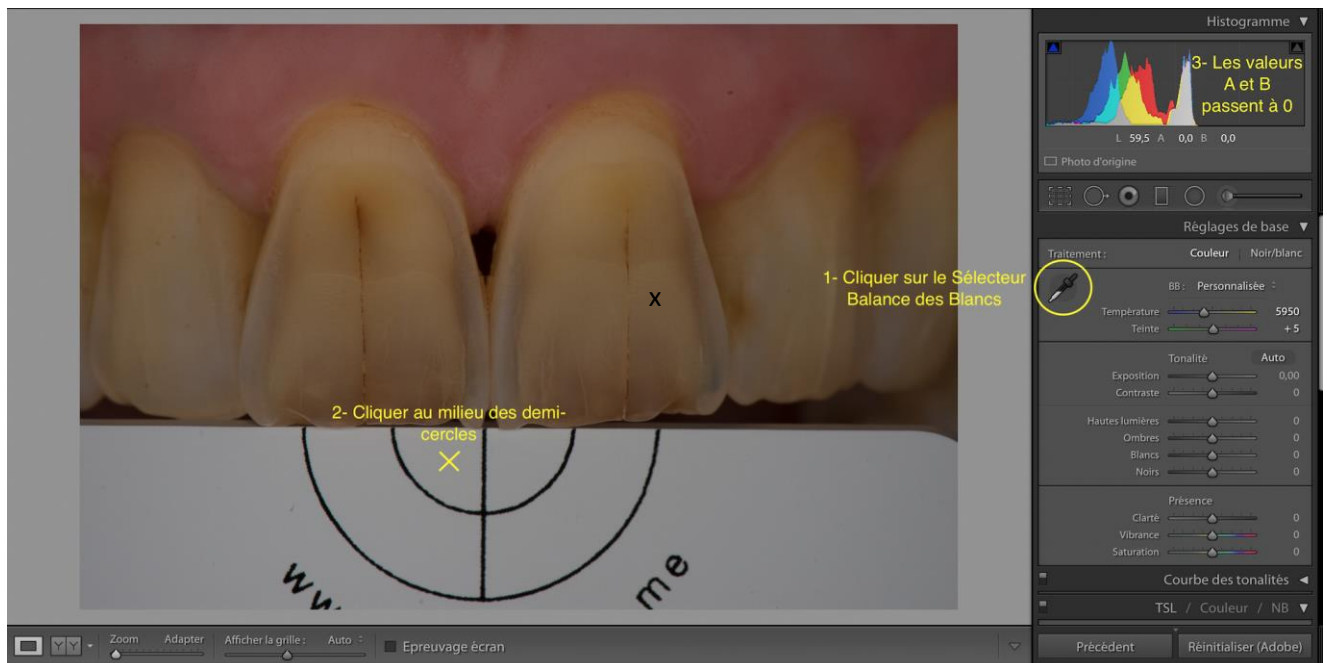
3- Activer « l'affichage des valeurs en Lab » sur l'histogramme du logiciel en haut à droite.



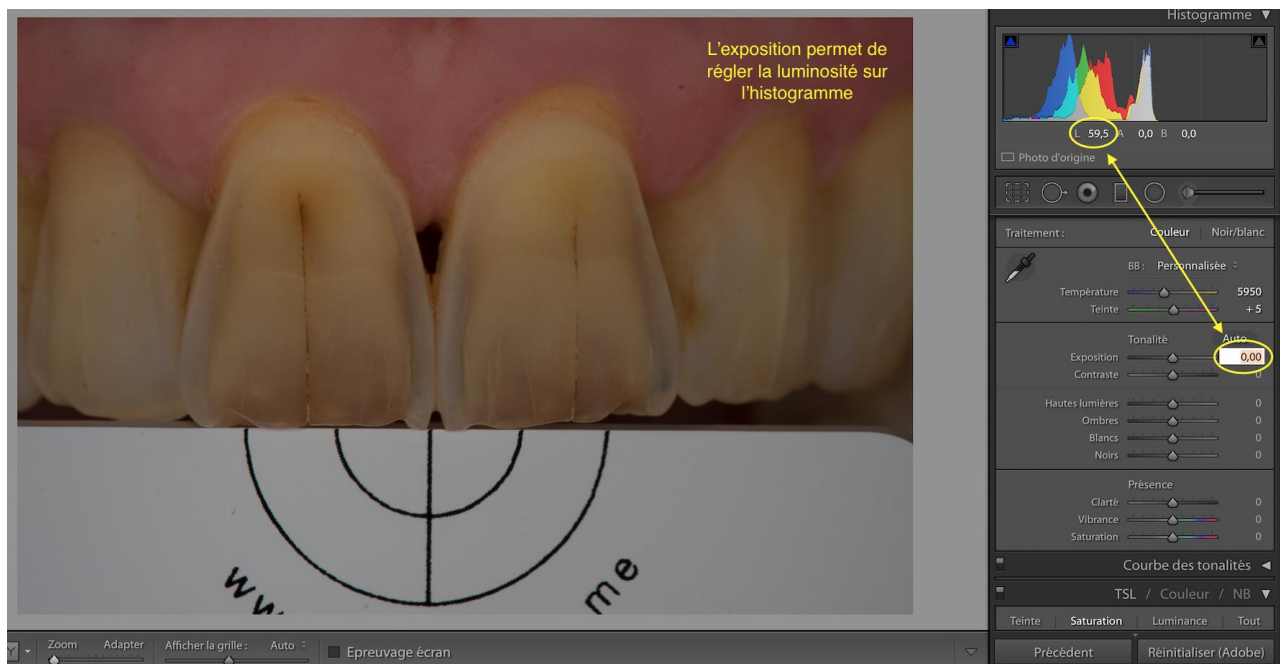
4- **Sélectionner** le « Sélecteur Balance des Blancs » :  situé sur la droite de l'espace de travail et **cliquer** sur le gris situé au milieu des demi-cercles noirs de la carte white_balance® pour pouvoir calibrer l'image.

Avant la calibration, lorsque l'on se place sur le gris de la carte, les valeurs a* et b* sont généralement proches de 0 avec tout de même un faible écart (qui est d'ailleurs plus marqué pour les photos polarisées).

A la fin de cette étape a* et b* passent à 0.



5- Calibrer la luminosité en faisant progressivement diminuer l'exposition sur la droite de l'espace de travail afin d'obtenir une valeur L* de 79 (+/- 0,5).



Les valeurs $L^*a^*b^*$ correspondent maintenant à celle de la carte white_balance® et la température de couleur est désormais calibrée.

Source : Auteur, 2020.

Vu, le Directeur de thèse

Vu, le Doyen de l'UFR d'Odontologie - Montrouge

Docteur Thibault DROUHET

Professeur Louis MAMAN

Vu, le Président d'Université de Paris

Professeur Christine CLERICI

Pour le Président et par délégation,

Le Doyen Louis MAMAN

La transmission de la couleur dentaire et ses évolutions : de la méthode conventionnelle au protocole eLAB®

Résumé :

Le relevé de la couleur d'une dent, particulièrement dans le secteur antérieur, est une étape cruciale pour la réussite de l'intégration esthétique d'une restauration. La couleur dentaire se caractérise par sa luminosité, sa saturation, sa teinte mais aussi par des caractéristiques plus spécifiques qu'il est important de reproduire pour avoir un rendu visuel naturel. Le relevé par méthode traditionnelle avec analyse visuelle à l'aide d'un teintier est aujourd'hui la technique la plus répandue mais présente certaines limites. L'ajout d'une aide instrumentale telle que celle d'un spectrophotomètre ou de la photographie numérique est ainsi recommandé afin de limiter le risque d'erreurs dans le relevé de la couleur effectué par le praticien. Le protocole eLAB®, créé en 2016, a pour but d'améliorer la fiabilité du relevé de la couleur dentaire et d'en faciliter la reproduction. Il permet de joindre l'intérêt visuel de la photographie aux valeurs colorimétriques objectives obtenues par relevé instrumental. Par l'intermédiaire d'une photographie et d'une calibration numérique, ce système permet d'obtenir les valeurs L*, a* et b*, selon le système de la CIE, de la couleur de la dent que l'on cherche à reproduire. Peu d'études existent aujourd'hui sur cet outil qui semble pourtant très prometteur.

Discipline :

Dentisterie esthétique

Mots clés français (fMeSH et Rameau) :

Flux de travaux -- Dissertation universitaire ; Photographie dentaire -- Dissertation universitaire ; Couleur en odontostomatologie -- Thèses et écrits académiques ; Analyse colorimétrique -- Thèses et écrits académiques

English keywords (MeSH) :

Workflow -- Academic Dissertation ; Photography, Dental -- Academic Dissertation

Université de Paris
UFR d'Odontologie - Montrouge
1, rue Maurice Arnoux
92120 Montrouge