

THESE

POUR LE DIPLOME D'ETAT DE DOCTEUR EN CHIRURGIE DENTAIRE

Présentée et soutenue publiquement par

Charlotte DARIES

Le 25 Janvier 2013

**RELEVÉ DE LA COULEUR AU CABINET
DENTAIRE : CONNAISSANCES ET MOYENS
D'OPTIMISATION ACTUELS**

Directeur de thèse : Docteur Laurent ELBEZE

JURY

Président
Assesseur
Assesseur
Assesseur

Professeur Cathy NABET
Docteur Jean CHAMPION
Monsieur Alain ABECASSIS
Docteur Laurent ELBEZE



THESE

POUR LE DIPLOME D'ETAT DE DOCTEUR EN CHIRURGIE DENTAIRE

Présentée et soutenue publiquement par

Charlotte DARIES

Le 25 Janvier 2013

RELEVÉ DE LA COULEUR AU CABINET DENTAIRE : CONNAISSANCES ET MOYENS D'OPTIMISATION ACTUELS

Directeur de thèse : Docteur Laurent ELBEZE

JURY

Président
Assesseur
Assesseur
Assesseur

Professeur Cathy NABET
Docteur Jean CHAMPION
Monsieur Alain ABECASSIS
Docteur Laurent ELBEZE



FACULTÉ DE CHIRURGIE DENTAIRE

➔ DIRECTION

DOYEN

Mr SIXOU Michel

ASSESSEURS DU DOYEN

• ENSEIGNANTS :

Mme GRÉGOIRE Geneviève
Mr CHAMPION Jean
Mr HAMEL Olivier
Mr POMAR Philippe

• PRÉSIDENTE DU COMITÉ SCIENTIFIQUE

Mme GRIMOUD Anne-Marie

• ÉTUDIANT :

Mr HAURET-CLOS Mathieu

CHARGÉS DE MISSION

Mr PALOUDIER Gérard
Mr AUTHER Alain

RESPONSABLE ADMINISTRATIF

Mme GRAPELOUP Claude

➔ HONORARIAT

DOYENS HONORAIRES

Mr LAGARRIGUE Jean +
Mr LODTER Jean-Philippe
Mr PALOUDIER Gérard
Mr SOULET Henri

➔ ÉMÉRITAT

Mr PALOUDIER Gérard

➔ PERSONNEL ENSEIGNANT

56.01 PÉDODONTIE

Chef de la sous-section :

Professeur d'Université :

Maîtres de Conférences :

Assistants :

Chargé d'Enseignement :

Mr VAYSSE

Mme BAILLEUL-FORESTIER

Mme NOIRRI-ESCLASSAN, Mr VAYSSE

Mr DOMINÉ, Mme GÖTTLE

Mme BACQUÉ, Mme PRINCE-AGBODJAN, Mr TOULOUSE

56.02 ORTHOPÉDIE DENTO-FACIALE

Chef de la sous-section :

Mr BARON

Maîtres de Conférences :

Assistants :

Chargés d'Enseignement :

Mr BARON, Mme LODTER, Mme MARCHAL-SIXOU, Mr ROTENBERG,

Mme ELICEGUI, Mme OBACH-DEJEAN, Mr PUJOL

Mr GARNAULT, Mme MECHRAOUI, Mr MIQUEL

56.03 PRÉVENTION, ÉPIDÉMIOLOGIE, ÉCONOMIE DE LA SANTÉ, ODONTOLOGIE LÉGALE

Chef de la sous-section :

Mr HAMEL

Professeur d'Université :

Maître de Conférences :

Assistant :

Chargés d'Enseignement :

Mme NABET, Mr PALOUDIER, Mr SIXOU

Mr HAMEL

Mr MONSARRAT

Mr DURAND, Mr PARAYRE, Mr VERGNES

57.01 PARODONTOLOGIE***Chef de la sous-section :*** **Mr BARTHET****Maîtres de Conférences :** Mr BARTHET**Assistants :** Mr MOURGUES, Mme VINEL**Chargés d'Enseignement :** Mr. CALVO, Mme DALICIEUX-LAURENCIN, Mr LAFFORGUE, Mr PIOTROWSKI, Mr SANCIER**57.02 CHIRURGIE BUCCALE, PATHOLOGIE ET THÉRAPEUTIQUE, ANESTHÉSIOLOGIE ET RÉANIMATION*****Chef de la sous-section :*** **Mr CAMPAN****Professeur d'Université :** Mr DURAN**Maîtres de Conférences :** Mr CAMPAN, Mr COURTOIS, Mme COUSTY**Assistants :** Mme BOULANGER, Mr FAUXPOINT, Mme FERNET-MAGNAVAL**Chargés d'Enseignement :** Mr GANTE, Mr L'HOMME, Mme LABADIE, Mr PLANCHAND, Mr SALEFRANQUE**57.03 SCIENCES BIOLOGIQUES (BIOCHIMIE, IMMUNOLOGIE, HISTOLOGIE, EMBRYOLOGIE, GÉNÉTIQUE, ANATOMIE PATHOLOGIQUE, BACTÉRIOLOGIE, PHARMACOLOGIE)*****Chef de la sous-section :*** **Mr KÉMOUN****Professeurs d'Université :** Mme DUFFAUT**Maîtres de Conférences :** Mme GRIMOUD, Mr KEMOUN, Mr POULET**Assistants :** Mr BLASCO-BAQUE, Mme GAROBY-SALOM, Mme SOUBIELLE, Mme VALERA**Chargés d'Enseignement :** Mr BARRÉ, Mme DJOUADI-ARAMA, Mr SIGNAT**58.01 ODONTOLOGIE CONSERVATRICE, ENDODONTIE*****Chef de la sous-section :*** **Mr GUIGNES****Maîtres de Conférences :** Mr DIEMER, Mr GUIGNES, Mme GURGEL-GEORGELIN, Mme MARET-COMTESSE**Assistants :** Mr ARCAUTE, Mlle DARDÉ, Mme DEDIEU, Mr ELBEZE, Mme FOURQUET, Mr MICHETTI**Chargés d'Enseignement :** Mr BALGUERIE, Mr BELAID, Mlle BORIES, Mr ELBEZE, Mr MALLET, Mlle PRATS, Mlle VALLAEYS**58.02 PROTHÈSES (PROTHÈSE CONJOINTE, PROTHÈSE ADJOINTE PARTIELLE, PROTHÈSE COMPLÈTE, PROTHÈSE MAXILLO-FACIALE)*****Chef de la sous-section :*** **Mr CHAMPION****Professeurs d'Université :** Mr ARMAND, Mr POMAR**Maîtres de Conférences :** Mr BLANDIN, Mr CHAMPION, Mr ESCCLASSAN**Assistants :** Mr DESTRUHAUT, Mr GALIBOURG, Mr LUCAS, Mr RAYNALDY, Mme SOULES**Chargés d'Enseignement :** Mr ABGRALL, Mr DEILHES, Mr FARRÉ, Mr FLORENTIN, Mr FOLCH, Mr GHRENASSIA, Mr KAHIL, Mme LACOSTE-FERRE, Mme LASMOLLES, Mr LUCAS, Mr MIR, Mr POGEANT, Mr RAYNALDY**58.03 SCIENCES ANATOMIQUES ET PHYSIOLOGIQUES, OCCLUSODONTIQUES, BIOMATÉRIAUX, BIOPHYSIQUE, RADIOLOGIE*****Chef de la sous-section :*** **Mme GRÉGOIRE****Professeur d'Université :** Mme GRÉGOIRE**Maîtres de Conférences :** Mme JONJOT, Mr NASR**Assistants :** Mr AHMED, Mr CANIVET, Mr DELANNÉE**Chargés d'Enseignement :** Mme BAYLE-DELANNÉE, Mme MAGNE, Mr MOUNET, Mr TREIL, Mr VERGÉ

L'université Paul Sabatier déclare n'être pas responsable des opinions émises par les candidats.
(Délibération en date du 12 Mai 1891).

Mise à jour au 1^{er} novembre 2012

MERCI,

Aux professeurs, aux équipes cliniques, au personnel, et à Mr Sauveur, pour ces années d'études si agréables.

A Mr Knafo Michel, pour les conseils et l'exemple qu'il m'a montrés. Ainsi que pour sa gentillesse.

A mes parents, pour la belle vie que vous m'avez construite, pour la joie de vivre que vous m'avez transmise, les fous-rires, pour votre patience, et pour vos re-lectures attentives !

A mes amies, Laetitia, Bénédicte, Cécilia, Johanna, Lalao, Alice et Marie pour le bonheur que c'est d'être votre amie, pour ce que vous m'apportez depuis toutes ces années, les rires, les joies, les folies partagées... du haut des stations enneigées, au fond des cocktails des plages ! Pour le soutien aussi. Même un peu éloignée, je vous aime mes copines.

A Alex et Bat', pour votre patience dans ce groupe de folles, les projets tous ensemble, et les mojitos !

A Alexandra et Alizée, mes amies que je ne vois plus assez à mon goût, et j'espère que ça va changer ! Je vous aime très fort.

A mes colocs, deux copines formidables que je suis heureuse de connaître de plus en plus, merci Anne-Laure pour tes bons gâteaux et Marie pour ta déco.

A Baptiste, pour le bonheur de tous les jours, pour notre amour, ... et ta patience !

A ma sœur Mayion, pour toutes les folies dans lesquelles on s'est embarquées. Pour m'avoir précédée sur le droit chemin... et fourni les fiches chaque année ! Pour ton soutien, nos bons rires toujours, nos trips hermétiques et pour tout tout tout ce que tu m'apportes.

A notre Présidente de Jury,

Professeur Cathy NABET,

- Professeur des Universités, Praticien hospitalier d'Odontologie,
- Docteur en Chirurgie Dentaire,
- Diplômée d'Etudes Approfondies de Santé Publique – Epidémiologie,
- Docteur de l'Université Paris XI,
- Habilitation à Diriger des Recherches (HDR),
- Lauréate de la Faculté de Médecine,
- Lauréate de l'Université Paul Sabatier.

Vous nous faites le grand honneur de présider notre jury.

Veillez recevoir par cet ouvrage l'expression de notre haute estime,

Pour vos valeurs, vos engagements et vos enseignements,

Enfin, Merci pour votre gentillesse.

A notre Jury,

Docteur Jean CHAMPION,

- Maître des Conférences des Universités, Praticien hospitalier d'Odontologie,
- Vice-doyen de la Faculté de Chirurgie Dentaire de Toulouse,
- Responsable de la sous-section Prothèses,
- Docteur en Chirurgie Dentaire,
- Docteur d'Etat en Odontologie,
- DU d'Implantologie de la faculté de Chirurgie dentaire de Marseille,
- Diplôme d'Implantologie Clinique de l'Institut Bränemark – Göteborg (Suède),
- Lauréat de l'Université Paul Sabatier,

Nous sommes très honorés par votre présence dans notre jury,

La grande qualité de vos enseignements, tant théorique que pratique,

Ainsi que votre personnalité et votre humour ont fait de nos études un réel plaisir,

Veuillez trouver par ce travail l'expression de notre profond respect.

A notre Jury,

Monsieur Alain ABECASSIS,

- Opticien Diplômé d'Etat,
- Maîtrise d'Optométrie, d'Optique Physiologique
et de Contactologie,
- Chargé d'enseignement à l'Université Paris Sud d'Orsay,
- Consultant en ergonomie visuelle,
- Formateur en Basse Vision.

Vous nous faites un grand honneur en acceptant de juger notre travail,

Vos connaissances ont été précieuses et nous ont beaucoup intéressée,

Merci pour votre disponibilité et pour la confiance que vous nous avez donnée,

Veuillez recevoir par ce travail, l'expression de notre sincère gratitude,

De notre estime et notre respect.

A notre Directeur de thèse,

Docteur Laurent ELBEZE,

- Assistant hospitalo-universitaire d'Odontologie,
- Docteur en Chirurgie Dentaire,
- Master 1 d'Anthropologie : L'évolution de l'Homme et ses mécanismes,
Ethnologie, Sociologie de la santé,
- Lauréat de l'Université Paul Sabatier,

Vous nous avez fait l'honneur de diriger cette thèse avec grand intérêt,

Merci pour votre aide précieuse,

*Nous tenons aussi à vous exprimer notre reconnaissance
pour vos conseils ainsi que la bonne humeur dont nous avons bénéficiés,
grâce à vous, au cours de notre apprentissage des soins.*

Table des matières

INTRODUCTION	13
1 L'aspect de la dent et son relevé	14
1.1 La couleur et la lumière	14
1.1.1 Définitions.....	14
1.1.2 Les trois dimensions de la couleur	16
1.1.3 Modélisations des couleurs et dimensions colorimétriques.....	18
1.1.4 Propriétés optiques du rayonnement lumineux.	22
1.2 Caractéristiques optiques des dents naturelles	26
1.2.1 Les dimensions classiques de la couleur des dents	26
1.2.2 Les dimensions complémentaires propres à la dent naturelle	30
1.3 Technique usuelle de prise de couleur : les teintiers.	36
1.3.1 Principe	36
1.3.2 Indications	36
1.3.3 Un peu d'histoire	14
1.3.4 Protocole conseillé	37
1.3.5 Avantages	40
1.3.6 En pratique : difficultés rencontrées, limites	40
1.3.7 Effet caméléon	49
2 Les solutions d'optimisation de la situation	51
2.1 La santé des yeux	51
2.1.1 Physiologie de l'œil	51
2.1.2 Variations	60
2.2 Les éclairages du cabinet	67
2.2.1 La température d'une couleur	67
2.2.2 L'indice de rendu des couleurs : IRC.....	68
2.2.3 Les illuminants ou éclairages normalisés par la CIE	69
2.2.4 Eclairage idéal du cabinet	69
2.3 Les couleurs du cabinet	73
2.3.1 Principe des 7 contrastes	73
2.3.2 Implications dans le cabinet dentaire	76
2.4 Préserver ses yeux	78
2.4.1 Position de l'ordinateur.....	78
2.4.2 Hygiène de vie	78
2.4.3 Sécheresse oculaire	78
2.4.4 L'assistante	79
2.4.5 Corriger les problèmes de vue	79

2.4.6	Loupes.....	80
2.4.7	Tester sa vision des couleurs.....	80
3	Les dispositifs d'aide.....	82
3.1	L'assistante.....	82
3.2	Lampes calibrées.....	82
3.3	Caméras intra-buccales.....	83
3.4	La photographie numérique	84
3.4.1	Fonctionnement et matériel	84
3.4.2	Intérêt concernant les données colorimétriques d'un cas.....	85
3.4.3	Protocoles.....	86
3.4.4	Les avantages de la photographie numérique	88
3.4.5	La photographie numérique présente aussi quelques limites et inconvenients	89
3.4.6	Conclusion	90
3.5	Spectrophotomètres.....	90
3.5.1	Principe	91
3.5.2	Systèmes existant sur le marché et leurs particularités propres	93
3.5.3	Une option à prendre avec précaution	94
3.5.4	Avantages	94
3.5.5	Limites.....	98
3.5.6	Conclusion	101
3.6	La communication directe patient-prothésiste	102
	CONCLUSION.....	104
4	Bibliographie	105
5	Annexes.....	110

Table des illustrations :

<i>Figure 1 : Expérience de Newton</i>	<i>15</i>
<i>Figure 2 : Synthèse additive.</i>	<i>15</i>
<i>Figure 3 : Synthèse soustractive.</i>	<i>15</i>
<i>Figure 4 : Espace colorimétrique de Munsell.....</i>	<i>19</i>
<i>Figure 5 : Plans du cornet de couleurs.</i>	<i>19</i>
<i>Figure 6 : Espace CIE L^*a^*b.</i>	<i>20</i>
<i>Figure 7 : Banane chromatique dans l'espace CIE-Lab</i>	<i>20</i>
<i>Figure 8 : Un disque de l'espace colorimétrique C.I.E.</i>	<i>22</i>
<i>Figure 9 : Réflexion de la lumière sur une surface lisse</i>	<i>25</i>
<i>Figure 10 : Diffusion de la lumière sur une surface rugueuse</i>	<i>25</i>

<i>Figure 11 : Coordonnées de la « banane » dans l'espace colorimétrique CIE.</i>	<i>27</i>
<i>Figure 12 : Modifications optiques dues à la déshydratation.</i>	<i>30</i>
<i>Figure 13 : Schémas des différents types d'opalescences.</i>	<i>32</i>
<i>Figure 14 : Deux exemples de teintiers : à gauche Chromascop® organisé par groupes de teintes, à droite Vitapan 3D-Master® organisé par groupes de luminosités.</i>	<i>37</i>
<i>Figure 15 : Répartition des échantillons du teintier Vitapan 3D Master® dans la banane chromatique.....</i>	<i>38</i>
<i>Figure 16 : Répartition des échantillons au sein d'un groupe de luminosité donnée.....</i>	<i>39</i>
<i>Figure 17 : Œil et rétine humaine.</i>	<i>51</i>
<i>Figure 18 : Cellules constituant les couches de la rétine</i>	<i>53</i>
<i>Figure 19 : Spectres d'absorption des trois pigments présents dans les cônes.....</i>	<i>55</i>
<i>Figure 20 : Le bassin aux Nymphéas, 1899.....</i>	<i>61</i>
<i>Figure 21 : Le bassin aux Nymphéas, 1923-1925</i>	<i>61</i>
<i>Figures 22 : Spectres des couleurs naturelles et de peinture, vus par un œil normal puis un œil cataracté.....</i>	<i>62</i>
<i>Figure 23 : Apparence de la perception du spectre pour différents systèmes.</i>	<i>63</i>
<i>Figure 24 : Représentation graphique de la température en fonction de la correspondance couleur - longueur d'onde.....</i>	<i>68</i>
<i>Figure 25 : Cercle chromatique de Johannes Itten</i>	<i>74</i>
<i>Figure 26 : Les rayures grises à gauche prennent un aspect froid et bleuâtre. A droite, ces mêmes rayures grises semblent plutôt rosâtres.....</i>	<i>75</i>
<i>Figure 27 : Exemple de planches d'Ishihara.</i>	<i>81</i>
<i>Figure 28 : Comparaison des spectres de la lumière du jour à midi, de la lumière émise par les LED de la lampe calibrée, et de la lumière émise par un illuminant normalisé D65.....</i>	<i>83</i>
<i>Figure 29 : Exemple d'analyse de sourire, ici avant un éclaircissement.....</i>	<i>96</i>
<i>Figure 30 : Variations de la couleur d'une dent après éclaircissement.....</i>	<i>98</i>
<i>Figure 31 : Exemple de relevé de couleur d'un praticien</i>	<i>102</i>
<i>Figure 32 : Exemple de relevé de couleur effectué par un prothésiste.....</i>	<i>103</i>

Introduction

De nos jours, le sourire est une préoccupation grandissante pour la majorité de nos patients. Le nombre de recherches portant sur son esthétique reflète particulièrement l'intérêt général qu'il soulève.

Il est vrai que parmi les parties de notre visage, la bouche lorsque l'on sourit tient le rôle esthétique le plus important, après les yeux et le regard. (72)

Le sourire est un atout pour séduire, mais aussi pour convaincre. Il amorce les relations humaines et sociales, les relations de confiance. Il participe à la convivialité, à la courtoisie. Il caractérise chacun d'entre nous et témoigne de traits de personnalité sans passer par la parole. Enfin, il est aujourd'hui fréquemment révélateur de la réussite sociale, autant que de l'hygiène de vie.

Pour nous chirurgiens-dentistes d'aujourd'hui, les soins à visée esthétique font indéniablement partie de la pratique : dans les dernières décennies, notre métier a évolué d'une dentisterie réparatrice, fonctionnelle, et éventuellement esthétique à une dentisterie certes toujours réparatrice mais résolument esthétique. Cet impératif lié à la demande de nos patients n'est plus un souhait mais une véritable exigence qui nous oblige à des changements dans nos pratiques cliniques et le choix de nos matériaux.

Dans cette thèse, nous traiterons de la problématique du relevé de la couleur des dents au cabinet dentaire. C'est en effet une étape cruciale dans les traitements intégrant l'esthétique. Il s'agit d'un véritable protocole qui requiert de vastes connaissances concernant la couleur et sa perception : de sa capture par l'œil jusqu'à l'interprétation par notre cerveau.

Nous aborderons aussi comment le praticien devra agencer son cabinet, organiser ses séances et peut être même s'équiper en nouvelles technologies afin d'éviter certaines erreurs et optimiser l'enregistrement de la couleur d'une dent.

1 L'ASPECT DE LA DENT ET SON RELEVÉ :

En odontologie, les critères principaux du succès esthétique d'une restauration sont le bon choix de la forme, de la couleur et de l'état de surface. Les exigences esthétiques grandissantes de la part de nos patients nous imposent le non-droit à l'erreur.

Reproduire de façon exacte les propriétés optiques d'une dent naturelle est impossible, le chirurgien-dentiste aura pour objectif de noyer le rendu esthétique de sa réhabilitation dans le sourire afin de la rendre invisible à distance sociale, dans son environnement quotidien.

Lorsqu'un travail doit être réalisé de manière indirecte par un technicien de laboratoire, la transmission des propriétés optiques de la dent en vue de l'obtention d'un photomimétisme le plus naturel possible devient un véritable challenge pour l'équipe soignante. Informer et communiquer efficacement entre cabinet dentaire et laboratoire de prothèse passe par une connaissance mutuelle des techniques mais également par l'emploi et la maîtrise d'une terminologie spécifique à la transmission des données. Le praticien doit donc se doter d'outils et de termes adaptés.

1.1 La couleur et la lumière

1.1.1 Définitions

L'étude de la couleur repose sur une connaissance pluridisciplinaire mêlant physique corpusculaire et ondulatoire, physiologie, psychologie, neuroscience.

Cette approche nous permettra d'appréhender les éléments essentiels à considérer lors de l'évaluation de la couleur d'une dent, dans un but de reproductibilité et de qualité optimale de notre résultat, et pour posséder le vocabulaire permettant de les décrire et communiquer correctement.

- La physique définira la couleur comme interaction entre lumière et matière (63, 22, 37). La lumière est un phénomène physique, une forme d'énergie rayonnante qui se propage dans le vide ou dans les milieux matériels transparents, dans toutes les directions. Cette énergie est décrite comme une radiation électromagnétique traduite soit par des vibrations (en Hertz), soit par des longueurs d'onde (en nm). On parle le plus souvent d'un ensemble d'ondes électromagnétiques. C'est l'aspect ondulatoire.

Elles sont visibles par l'œil humain lorsque leur longueur d'onde est comprise dans l'intervalle allant de 380nm (violet) à 760nm (rouge).

C'est au XVII^{ème} siècle que Newton observera ce spectre grâce à sa fameuse expérience : il fait passer un faisceau de lumière blanche à travers un prisme, et voit s'étaler sur un écran blanc les couleurs de l'arc en ciel.

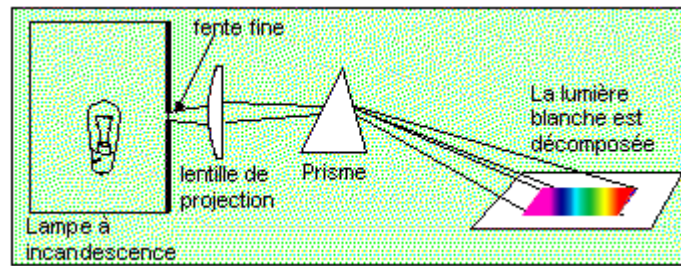


Figure 1 : Expérience de Newton (34)

Lorsque cette lumière, se déplaçant sous forme d'ondes de différentes longueurs d'onde, arrive au contact d'un objet, certains photons sont absorbés, d'autres réfléchis vers nos yeux. Ce rendu constitue la couleur de l'objet telle que nous la percevons.

Par son expérience, Newton démontra que la couleur est une propriété intrinsèque de la lumière : « sans lumière, pas de couleur ».

Chacune des couleurs observées est caractéristique d'une lumière ayant une longueur d'onde précise. Dans ce domaine ondulatoire, une couleur pourra être obtenue par synthèse additive: le mélange des trois couleurs fondamentales, ou couleurs primaires additives, permet de retrouver les différentes couleurs du spectre visible. C'est le mode Rouge-Vert-Bleu. Une couleur sera finalement une bande spectrale définie par un intervalle de longueurs d'onde. En odontologie, cette définition est à la base de la conception des appareils d'analyse de teinte, ou des appareils photographiques, dont les mécanismes sont inspirés du fonctionnement de l'œil.

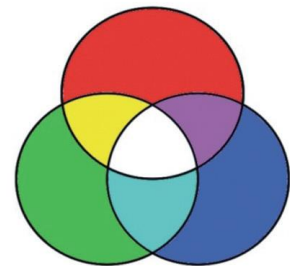


Figure 2 : Synthèse additive.

La « couleur matière », de son côté, fera référence à l'ensemble des pigments constituant la matière d'un objet et qui entrent en interaction avec les photons de la lumière en présence. La couleur de l'objet est définie par la longueur d'onde du rayonnement que sa matière réfléchit ainsi que la partie des photons du rayonnement qu'elle absorbe. C'est la synthèse soustractive. Les pigments définissent la tonalité chromatique d'une couleur, leur densité détermine la saturation de

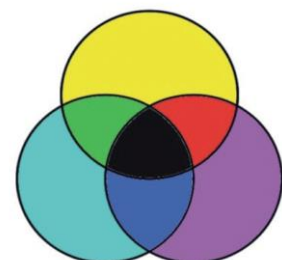


Figure 3 : Synthèse soustractive. (71)

cette couleur. Plus l'apport et les mélanges de pigments sont importants dans la matière, moins elle sera lumineuse, et plus la couleur sera saturée et assombrie.

En odontologie esthétique, la connaissance du principe des harmonies colorées soustractives c'est-à-dire la compréhension de la construction pigmentaire des couleurs a de nombreuses applications : montages de composites, de céramiques... Cette notion permet de mieux comprendre le travail du prothésiste, elle est donc à la base d'une communication correcte et efficace entre praticien et prothésiste.

- La physiologie prend en considération le fonctionnement du récepteur oculaire de l'observateur. La perception colorée dépend aussi du capteur de ces ondes lumineuses, qui sera souvent l'œil et sa physiopathologie ou encore l'appareil photographique calibré (et son capteur, CCD par exemple). Cette notion est à la base de la compréhension d'une organisation appropriée de la séance de relevé de la couleur, des choix de placement du praticien, du patient, d'agencement du cabinet, d'éclairage, de couleur du cabinet et de ses équipements.
- Puis la neuroscience s'intéresse à l'interprétation par le cerveau.
- Enfin, la couleur résultera aussi de phénomènes psychosensoriels, culturels et affectifs, on entre là dans le domaine de la psychologie. (63)

La recherche d'une analyse systématisée, reproductible de la couleur doit donc toujours considérer les trois systèmes intervenant dans la fabrication de cette 'sensation colorée' :

- La source lumineuse et sa distribution spectrale.
- Le matériau avec ses qualités de réflexion, transmission, absorption lumineuses.
- L'œil avec son capteur trichromatique, dont le cerveau analyse et enregistre les messages. Ou l'instrument détecteur, et ses réglages. (22, 38, 39)

En résumé, la couleur est une sensation produite à partir de la réflexion de la lumière sur des objets : c'est un phénomène physique, puis psychique. C'est un ressenti subjectif. La prise en compte de ce processus est capitale pour l'identification des multiples éléments intervenant lors de l'évaluation de la couleur d'une dent dont l'enjeu sera d'en optimiser la constance, la qualité et la reproductibilité.

1.1.2 Les trois dimensions de la couleur (22, 63, 23)

Dans la recherche, la science, l'industrie, ou beaucoup d'autres domaines nécessitant une précision importante, on va vouloir quantifier la couleur. L'odontologie fait aujourd'hui partie de ces domaines où l'exigence est particulièrement élevée. On confère alors à la couleur un caractère tridimensionnel entremêlant luminosité, saturation, et teinte.

- La luminosité correspond à l'intensité lumineuse réfléchie ou à la valeur de gris d'une couleur. Les termes de luminance, clarté, ou en anglais « brightness » ou « lightness » sont souvent utilisés comme synonymes. On trouvera aussi la valeur, « value » en anglais.

En faisant varier la luminosité, on joue sur le clair et le foncé d'une couleur.

Le blanc étant la couleur qui réfléchit le plus la lumière, il est la couleur la plus lumineuse.

La luminosité sera donc modifiée par la quantité de blanc que la couleur contient.

Son appréciation s'effectue mieux dans une ambiance lumineuse de faible intensité, où seuls les bâtonnets rétinien sont stimulés. Elle peut aussi être rendue visible par une représentation en noir et blanc qui fera abstraction de la teinte. En effet, la meilleure façon de l'étudier est l'analyse à partir de photographies en noir et blanc.

- La saturation, ou en anglais « chroma », décrit la quantité ou la pureté d'un ton de couleur. C'est la densité de teinte, la quantité de pigments purs contenus dans une couleur. Plus la teinte est saturée, pure (=100% de saturation), plus la couleur est vive. Au contraire, la couleur peut être désaturée par adjonction de blanc, elle sera éclaircie, pastel, ou par adjonction de noir, dans ce cas la couleur est ternie, elle est dite « rabattue ».

- La teinte, ou tonalité chromatique, en anglais « hue », correspond à la couleur visible de base. Elle est liée à la longueur d'onde de la lumière émise par un objet et interprétée par le cerveau. On peut aussi la définir comme l'interprétation physiologique et psychologique d'une somme de longueurs d'onde. Il en existe une infinité, mais notre œil est capable d'en différencier 150 à 200, du violet (380nm) au rouge (760nm).

La plupart des teintiers sont organisés par tonalités chromatiques.

L'étude de ces dimensions de la couleur dans la modélisation de la sphère chromatique, que nous décrirons dans le paragraphe suivant, conduit à délimiter un domaine, précis, qui concerne les dents naturelles humaines : une « banane chromatique » dont la situation a des conséquences cliniques et pratiques très intéressantes.

Lors de l'appréciation d'une couleur par l'œil humain, une erreur de luminosité aura plus de répercussions qu'une erreur de saturation ou de teinte. Malgré cela, la grande majorité des praticiens a plus souvent tendance à commencer par déterminer la teinte.

La photographie en noir et blanc est un bon outil pour l'évaluation de la luminosité, par exemple lors de la validation optique d'un biscuit de céramique.

La prise en compte des trois dimensions de la couleur et la maîtrise de leur définition sont primordiales pour le praticien :

- Il doit savoir les transmettre au laboratoire.
 - Elles sont à la base du protocole le plus récent et approuvé de relevé de couleur.
 - Chacune d'elle dépend soit de l'émail soit de la dentine, notion indispensable à appliquer pour tout procédé de stratification.
 - Leur étude mène aux nouveautés florissantes dans le domaine de la couleur en art dentaire : des teintiers aux appareils de mesure, en passant par la photographie...
 - De nombreux paramètres influencent leur perception, le dentiste doit les maîtriser.
- La suite de cet ouvrage illustre ces intérêts.

1.1.3 Modélisations des couleurs et dimensions colorimétriques

Depuis le début du XXème siècle, des systèmes permettant d'identifier de façon systématique toute couleur ont été recherchés. Ainsi, les représentations spatiales telles que le cylindre de Munsell ou la sphère chromatique permettent de définir une couleur selon des coordonnées. C'est la colorimétrie.

La colorimétrie est la science qui quantifie et décrit les principes de la vision humaine des couleurs à l'aide de modèles mathématiques. On peut dès lors communiquer de façon plus simple la couleur que l'on perçoit.

La science de la couleur vise aujourd'hui à relier les propriétés fondamentales de la lumière et la matière avec notre perception de la couleur ainsi que notre capacité à la capturer, la transmettre, la reproduire...

- Espace colorimétrique de Munsell : (22, 63, 68)

Au début du siècle dernier, Albert H. MUNSELL, peintre et professeur d'art, étudia le problème de l'identification des couleurs et mit en place une méthode systématique pour le résoudre. Il est le premier, en 1901, à décrire le caractère tridimensionnel de la couleur : il identifia la luminosité, la teinte et la saturation comme les trois variables définissant une couleur, et les ordonna sur des échelles numériques. A partir d'un cercle chromatique, toutes les couleurs sont placées dans un réseau cylindrique appelé «arbre de la couleur» et chacune peut être définie par ses coordonnées LST ou LCH en anglais (Luminosité, Saturation, Teinte / Lightness, Chroma, Hue).

L'axe vertical définit la luminosité, en dix grades. Le rayon du cylindre donne la saturation de la couleur, où la pureté maximale est en périphérie. Sur le pourtour, se déclinent toutes les couleurs.

Ce système sert de référence à la plupart des teintiers utilisés en odontologie.

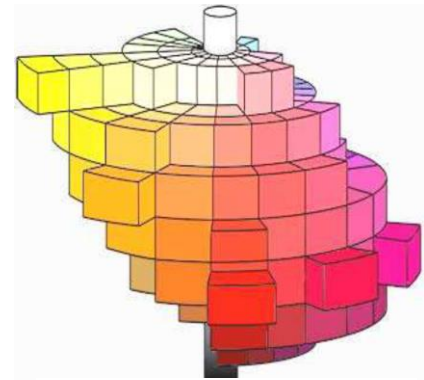


Figure 4 : Espace colorimétrique de Munsell (22)

- Espace colorimétrique de la CIE, 1931 : (22, 4, 68)

Cet espace est aussi appelé cornet des couleurs, ou tableau des couleurs normalisé. Il a été établi par la Commission Internationale de l'Eclairage (CIE), à partir des théories colorimétriques du début du XXème siècle, notamment celle de Munsell, mais aussi le triangle de Maxwell qui, par ses travaux, avait posé les bases de la synthèse additive des couleurs.

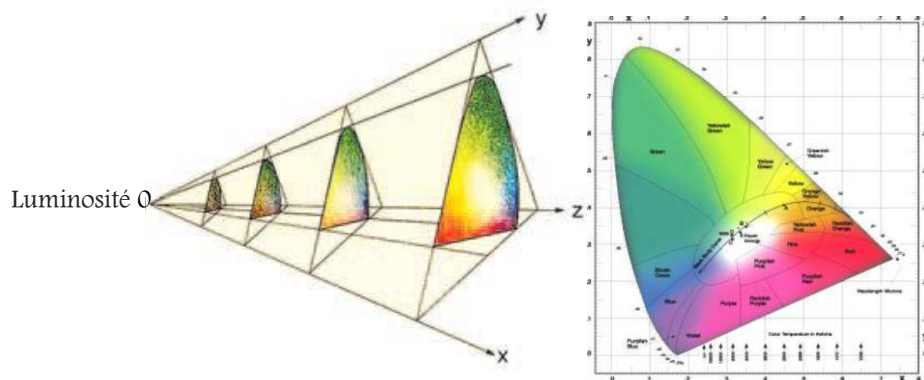


Figure 5 : Plans du cornet de couleurs.

Dans un plan du cornet, l'ensemble des couleurs forme un fer à cheval centré sur le point incolore, dont la luminosité dépend du plan de coupe observé. Chaque point représente une couleur, et les points situés sur une droite entre deux couleurs représentent les couleurs que l'on peut obtenir par mélange additif de ces deux couleurs. Remarquons par exemple qu'à partir d'une lumière jaune et d'une lumière bleue, on ne peut pas construire de couleur rouge.

Ce système a constitué un grand pas en avant pour les colorimétriciens, mais il a rapidement suscité une certaine désapprobation : il ne permet pas de mesurer un écart entre deux couleurs par la distance entre deux points, et la répartition des couleurs privilégiant largement le vert au détriment des rouges, bleus, magentas et jaunes a aussi été critiquée.

La CIE a donc été forcée de rechercher un nouveau système métrique qui permettrait de mesurer des écarts entre couleurs et créer des formules afin de calculer des différences.

- Système CIE $L^*a^*b^*$:

C'est la sphère chromatique. Elle adopte le système de représentation des couleurs $L^*a^*b^*$, établi par la Commission Internationale de l'Eclairage, chargée de concevoir un tableau des couleurs normalisé reposant sur un principe mathématique, capable de répondre à la quête de précision et d'objectivité. Ce système est une évolution du système précédent, établi afin de satisfaire à toutes les applications et exigences industrielles modernes.

L^* est l'axe vertical quantifiant la luminosité ; a^* et b^* sont les coordonnées chromatiques rectangulaires

où l'axe $(-a^*, +a^*)$ est l'axe vert-rouge, et l'axe $(-b^*, +b^*)$ est l'axe bleu-jaune.

Les dents naturelles humaines y occupent un espace de forme rhomboïde communément appelé « banane chromatique ». C'est une zone haut située dans la sphère chromatique,

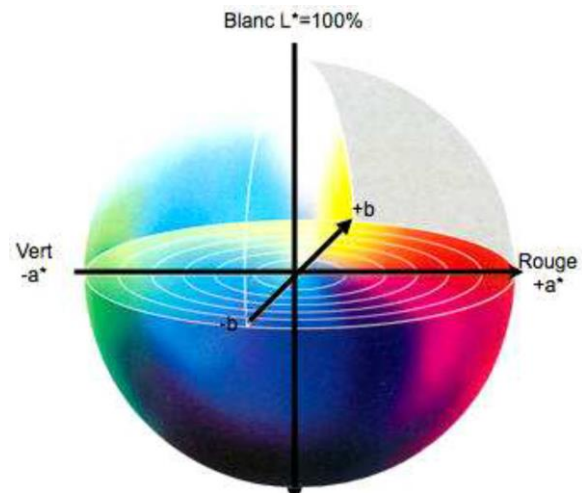


Figure 6 : Espace CIE $L^*a^*b^*$.



Figure 7 : Banane chromatique dans l'espace CIE-Lab. (4)

et assez proche de l'axe blanc-noir L^* . Ceci signifie que les dents naturelles sont très lumineuses et désaturées. De plus, elle est située dans le cadran entre l'axe $+a^*$ (rouge) et l'axe $+b^*$ (jaune) : la tonalité chromatique de toutes les dents naturelles est jaune-orangée. L'orientation oblique de haut en bas de la banane traduit le fait que les dents plus sombres sont aussi plus saturées en teinte. (22, 63)

Donc les dents naturelles ont une teinte commune, avec des nuances plus jaunes ou plus rouges. L'interprétation de la position de la banane chromatique démontre la primauté de la variable « luminosité » dans l'analyse esthétique des dents.

Outre cette démonstration, ce modèle présente un intérêt important : il permet d'exprimer aisément une différence de couleur entre deux objets, notée ΔE , elle correspond à la distance entre deux points de couleur dans la sphère et est calculée par la racine de la somme des carrés des différences entre variables :

$$\Delta E = [(L^*_1 - L^*_2)^2 + (a^*_1 - a^*_2)^2 + (b^*_1 - b^*_2)^2]^{1/2}$$

Dans un objectif clinique, des études ont permis d'établir des seuils de détectabilité et d'acceptabilité de différence de couleur, exprimés grâce à ΔE . Le seuil de détectabilité est défini comme la valeur de ΔE détectée par 50% des observateurs, il est de 1 ou 2 (en fonction des études) in vitro et dans des conditions très favorables. Dans des conditions cliniques, un ΔE entre 2,6 et 3,7 en moyenne est détectable. Le seuil d'acceptabilité correspond à une différence de couleur que 50% des observateurs admettent comme correcte, et pour laquelle 50% remplaceraient la restauration. Une différence de couleur correspondant à un ΔE entre 2,72 et 3,3 est considérée comme acceptable in vitro. Dans des conditions cliniques, des ΔE allant de 4 à 5,6 et jusqu'à 6,8 en fonction des études sont considérés comme acceptables par les observateurs. (70, 15, 58, 55)

- Système C.I.E. L*a*b : (22, 63, 4)

D'après les recommandations d'un colloque de notre profession sur la mesure de la couleur, datant de 2003, ce troisième système élaboré par la CIE serait le plus adapté à notre activité, et notamment à la recherche.

Le système est identique à l'espace de couleurs L^*a^*b , sauf que la position d'une couleur dans l'espace est décrite par ses coordonnées polaires, plutôt que par ses coordonnées angulaires.

De la même façon que dans l'espace L^*a^*b , la luminosité L^* est l'axe vertical et s'étend de zéro (noir) à cent (blanc), et la saturation c^* (chroma) est représentée par la distance entre l'emplacement de la couleur et l'axe neutre vertical.

La teinte h° (hue) est mesurée sur un angle s'étendant de 0° à 360° . Les angles qui s'étendent de 0° à 90° représentent les rouges, les oranges et les jaunes. De 90° à 180° , ils représentent les jaunes, les jaunes et verts et les verts. De 180° à 270° , ils représentent les verts, les cyans (bleu-vert) et les bleus. Enfin de 270° à 360° , ils représentent les bleus, les pourpres, les magentas, et reviennent ensuite aux rouges.

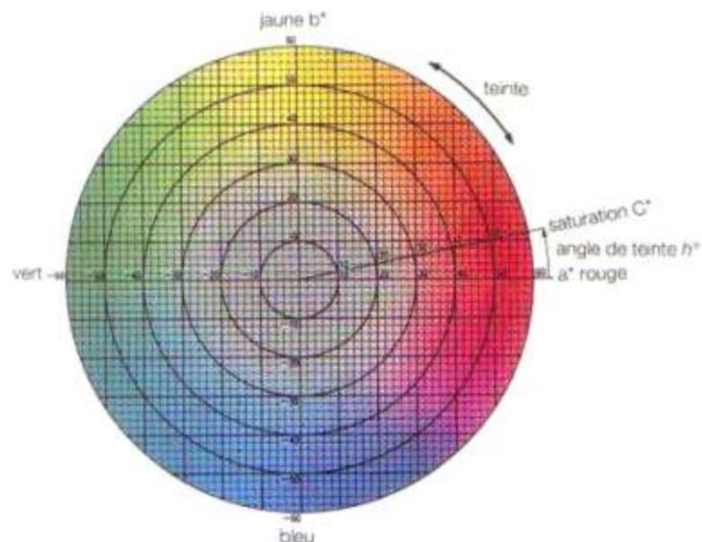


Figure 8 : Un disque de l'espace colorimétrique C.I.E. (22)

Grâce à ces connaissances le praticien :

- Comprendra mieux le protocole de relevé de couleur privilégiant la luminosité : sa variation est la plus large dans l'espace des couleurs des dents naturelles, et la mieux discernée.
- Comprendra mieux le langage des nouvelles techniques et instruments de mesure : les résultats sont exprimés avec ΔE .
- Communiquera mieux avec son prothésiste.

1.1.4 Propriétés optiques du rayonnement lumineux (22, 79, 78, 71)

La couleur apparente d'un objet, c'est-à-dire les caractéristiques colorées finalement perçues par l'observateur, dépendent d'une combinaison de facteurs : la lumière qui frappe l'objet, les caractéristiques réfléchissantes de l'objet lui-même, l'environnement et les facultés d'interprétation de l'observateur.

Lorsque la lumière frappe la matière, trois phénomènes peuvent se produire : l'énergie peut être réfléchi, transmise ou absorbée. La plupart du temps, deux ou trois de ces phénomènes se produisent simultanément, dans des proportions variant selon les caractéristiques des matériaux soumis aux rayonnements. Par exemple, une matière autorisant le passage de la lumière sera transparente, une matière qui transmet, absorbe, et réfléchit la lumière est translucide, et au contraire, une matière seulement capable d'absorber et réfléchir la lumière sera opaque.

La couleur est donc déterminée par la quantité de lumière incidente et les événements que celle-ci subit. Nous allons définir les phénomènes lumineux pour pouvoir ensuite comprendre ce qui se produit dans les tissus dentaires.

1.1.4.1 **Absorption :**

Lorsque la lumière tombe sur un matériau, une partie des radiations n'est ni réfléchie, ni transmise, mais absorbée. Elle se transforme alors en chaleur. Tout rayonnement absorbé est soustrait de la couleur perçue. Ce sont les rayons non absorbés qui détermineront la couleur de l'objet ainsi que ses propriétés complémentaires. Par exemple, un objet est considéré comme rouge lorsqu'il absorbe toutes les longueurs d'ondes violettes, bleues, vertes, oranges et jaunes, et ne réfléchit que les rouges. Un corps qui absorbe toutes les longueurs d'onde est perçu comme noir.

1.1.4.2 **Transmission :**

Les phénomènes de transmission du rayon incident regroupent les phénomènes de réfraction, de diffraction, et de diffusion.

Ces phénomènes dépendent du nombre de particules incluses dans l'objet et de leur taille. Ils déterminent la translucidité et a contrario l'opacité de l'objet. Un matériau n'autorisant aucune transmission est totalement opaque.

- La réfraction est le changement de direction d'une onde lumineuse lorsqu'elle passe d'un milieu à un autre. Ainsi, une lumière incidente frappant un matériau translucide verra une partie de ses rayons réfléchis, et d'autres pénétreront la matière en changeant de direction. Un matériau ne modifiant pas la direction des rayons le traversant est dit transparent.

En pratique : les objets placés derrière un matériau transparent apparaissent de manière claire, contrairement à un matériau translucide qui ne permet pas de voir distinctement les objets situés derrière.

L'indice de réfraction est proportionnel à la densité des corps. Voici l'indice de réfraction dans des milieux qui peuvent nous intéresser, d'après Mahiat (1998) : celui de l'air est de 1, celui de l'eau est de 1.330, celui de l'émail est de 1.650, et celui du Zircon est de 1.920. De plus, la qualité de la matrice environnant les particules fait aussi varier la translucidité d'un matériau : les indices de réfraction de diverses matrices ont une influence sur la réfraction de la lumière à travers les particules. Ceci permet de produire des matériaux ayant différents degrés d'opacité.

- La diffraction est le phénomène suivant lequel les ondes lumineuses peuvent contourner les obstacles de dimensions sensiblement égales à leurs longueurs d'ondes. Ce comportement particulier de la lumière se retrouve à travers l'émail dentaire naturel. Il conditionne sa translucidité.

C'est le même effet qui explique les variations de teintes du ciel en fonction des moments de la journée. Les ondes du rayon vont être déviées de différentes façons en fonction de leur fréquence ou longueur d'onde et nos yeux percevront plus du bleu, ou des couleurs plus rouges en fonction du moment de la journée et de notre localisation.

- La diffusion est la propagation des rayons lumineux d'un faisceau dans toutes les directions. On peut la considérer comme un type particulier de transmission, ou aussi de réflexion lumineuse. En effet, comme nous le verrons plus loin, il faut distinguer la diffusion de surface que l'on nomme également la réflexion diffuse et la diffusion interne qui s'apparente à la diffraction.

En résumé, à l'échelle particulière, ce sont ces phénomènes qui sont à l'origine de la couleur d'un objet, modulant sa translucidité et son opacité. Ils expliquent les différences de sensations colorées produites par l'émail et la dentine. Leur compréhension permet la création de matériaux de restauration dont les caractéristiques lumineuses sont maîtrisées.

Le praticien doit noter que la transmission autorise le passage des rayons lumineux, par conséquent la translucidité réduit la quantité de photons réémis vers les yeux : elle diminue la luminosité de l'objet.

1.1.4.3 **Réflexion :**

C'est le changement de direction d'une onde sur une surface. Elle ne pénètre pas le milieu. Cela se produit lorsque les particules d'un objet sont plus larges que la longueur d'onde de la lumière incidente, elles réfléchissent la lumière sur la majeure partie de sa surface. Quand toute la lumière est réfléchi, quand aucun processus d'absorption d'un composant du spectre lumineux n'a lieu, l'objet paraît blanc (sous une lumière blanche, bien évidemment).

Il existe plusieurs types de réflexions, responsables de divers aspects distingués par nos yeux, complémentaires à la couleur, tels que la brillance, la matité d'un objet par exemple. Nous décrirons la réflexion spéculaire, la réflexion diffuse, et la réflexion totale.

La réflexion spéculaire : elle permet à l'œil humain de distinguer la brillance de l'objet, ou plutôt sa luisance. Cette réflexion miroir par la «couche de surface» n'est pas influencée par les facultés réfléchissantes sélectives, c'est-à-dire par la couleur du matériau. Selon LEMIRE, dans tous les matériaux, la surface extérieure réfléchit 4% environ de la lumière incidente, sans aucune modification si ce n'est la direction. Cette réflexion est possible si la surface de séparation entre les deux milieux est optiquement

polie, c'est-à-dire si elle ne présente que des aspérités dont la taille est inférieure à la longueur d'onde du rayon incident. En d'autres termes, si la surface paraît lisse relativement à la longueur d'onde incidente.

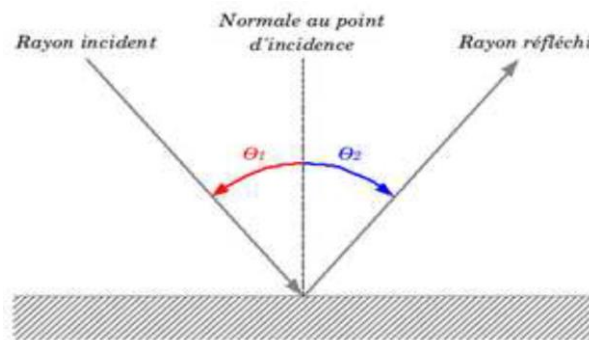


Figure 9 : Réflexion de la lumière sur une surface lisse. (22)

La réflexion diffuse : Si la surface n'est pas parfaitement polie, il se produit une diffusion. Elle donne un aspect de surface mate. Ceci est observé pour des surfaces rugueuses où la taille des imperfections est au moins égale à la longueur d'onde du rayon incident. En fait, la surface se conduit comme une infinité de minuscules surfaces dont les orientations varient, et qui, par conséquent, renvoient les rayons dans de multiples directions. Ces rayons possèdent le même spectre lumineux que la lumière incidente. La réflexion diffuse donne de la luminosité.

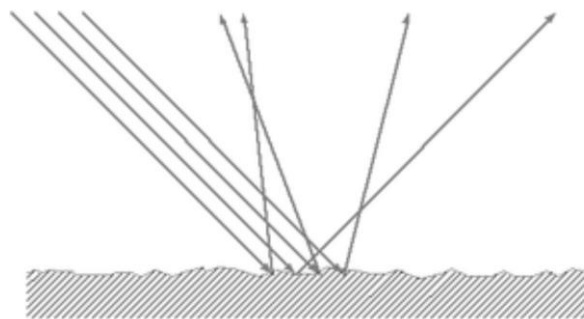


Figure 10 : Diffusion de la lumière sur une surface rugueuse. (22)

En bref, la réflexion spéculaire et la réflexion diffuse permettent à l'œil d'apprécier l'état de surface : brillant, mat, lisse, rugueux. Il faudra néanmoins réduire la réflexion miroir atteignant nos yeux, source d'erreur d'observation de la couleur, en éclairant la surface avec un angle de 45° et l'observateur face à la surface.

La réflexion totale : c'est lorsque le rayon incident est uniquement réfléchi. Aucun rayon n'est réfracté. Ceci se produit lorsque le rayon incident arrive à la surface de séparation de deux milieux de réfringences différentes. Par exemple, à la séparation entre verre (plus réfringent) et air (moins réfringent).

En ce qui nous concerne, ce phénomène est surtout rencontré au niveau des incisives maxillaires sous la forme d'une petite bande blanche à l'extrémité du bord incisif.

1.2 Caractéristiques optiques des dents naturelles :

La dent est un objet très complexe à analyser : son comportement optique est une combinaison de nombreux paramètres, à commencer par la couleur et ses trois dimensions fondamentales que sont la luminosité, la saturation et la tonalité chromatique, mais on doit aussi considérer des paramètres additionnels comme la transparence et la translucidité, l'opalescence, la fluorescence, la brillance de surface, les caractérisations.

Ces effets lumineux rendent la structure dentaire très difficile à cartographier, mais ce sont eux qui donnent le « naturel » à la dent. (1, 22, 38, 63, 80)

1.2.1 Les dimensions classiques de la couleur des dents :

Parmi tous les paramètres des dents qui font appel au sens de l'observation tels que l'âge, la forme, la position, ou le volume, la couleur n'est pas le principal élément, mais c'est sans doute le plus complexe à interpréter. On préfère le terme de couleur de la dent à celui de teinte, inapproprié puisque l'on note non seulement la teinte mais aussi la saturation et la luminosité.

1.2.1.1 *La banane chromatique :*

En ce qui concerne ces trois caractéristiques colorées de base, l'étude de la position de la « banane » dans la sphère chromatique, vue précédemment, mène à une conclusion clinique et pratique très intéressante : la luminosité est la première qui doit être analysée, car elle est la dimension colorée dont la variation est la plus perceptible. (1, 4, 8, 22, 39, 49) Black énonçait déjà ce fait dans ses travaux au début du XXème siècle. Des études plus récentes appuient en effet qu'un changement dans la teinte à proprement parler modifie la couleur globale de façon bien moins importante que la luminosité ou la saturation. En d'autres termes, l'œil est plus sensible à de subtiles variations de luminosité qu'à la saturation, et il est encore moins sensible à une modification de teinte.

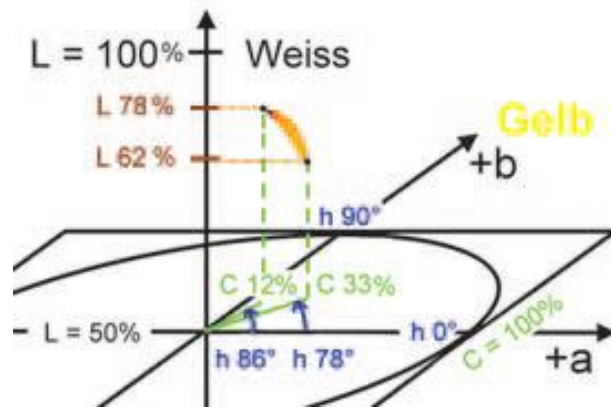


Figure 11 : Coordonnées de la « banane » dans l'espace colorimétrique CIE. (4)

Les valeurs des coordonnées colorimétriques des couleurs des dents sont très intéressantes à connaître : la pointe claire de la banane se situe au niveau de luminosité $L=78\%$, elle est peu saturée $C=12\%$ et, avec son angle $h=86^\circ$, elle est bien loin de l'axe du rouge $+a$, presque sur l'axe du jaune $+b$. La pointe foncée de la banane est bien en dessous sur l'axe de luminosité : $L=62\%$, elle est trois fois plus saturée $C=33\%$ et s'approche de l'axe du rouge $+a$ avec son angle $h=78^\circ$. Ces valeurs permettent de conclure que les dents claires sont moins saturées et présentent une proportion de jaune plus élevée, tandis que les dents foncées augmentent en saturation et en rouge.

1.2.1.2 Le rôle des tissus dentaires :

L'analyse de la dent naturelle montre que les tissus qui la constituent sont optiquement très différents et son aspect visuel est avant tout lié à sa nature stratifiée : l'arrangement des cristaux minéraux constituant l'émail et la dentine, leur densité, leur taille et la matrice qui les contient conditionnent les phénomènes optiques que produira la dent. Il s'agit des phénomènes d'absorption, de transmission, de réflexion du rayon lumineux incident, expliqués précédemment. (1, 22, 51, 63, 79)

- La dentine est une zone plus opaque, riche de plusieurs masses de teintes, généralement assez saturées. Il est classique de dire que le noyau dentinaire opaque donne la tonalité chromatique et la saturation. L'opacité de la dentine est due à l'orientation des tubuli qui la constituent, à leur nombre, leur densité et leur diamètre. L'arrangement global produit une réflexion et une absorption sélectives.

Cette opacité a pour effet une réflexion lumineuse : c'est à la dentine que la dent doit sa luminosité. Ce sera ensuite la couche amélaire qui viendra moduler cette luminosité.

La dentine renferme aussi des caractérisations éventuelles.

- En surface, l'émail, quant à lui, par sa translucidité, abaissera cette luminosité : en effet la lumière ne s'y réfléchit pas, elle est transmise. Plus une dent sera translucide, plus sa luminosité va baisser, car une grande partie de la lumière pénètre dans la dent. La luminosité tend à baisser à partir du centre de la dent.

C'est dans l'épaisseur d'émail principalement que se crée une diversité de caractères donnant le « naturel » à la dent. On dit souvent que la dentine donne la couleur de la dent, et que l'émail vient la modifier.

- Notons qu'avec l'âge ou d'autres processus (agressions, défenses...) les tissus dentaires subissent des modifications structurelles qui engendrent un changement complexe de la couleur des dents. Ceci illustre parfaitement les rôles respectifs des deux types de tissus constituant la couronne dentaire naturelle. (1, 22, 23, 27, 63, 67, 79)

La dentine qui vieillit s'opacifie, devient plus foncée principalement à cause de la dentine secondaire et de la dentine tertiaire, par leur composition et structure différentes. De plus, chez les patients âgés, la réduction du diamètre des tubuli dentinaires provoque la sclérose progressive de la dentine et augmente sa saturation.

On observe aussi que l'émail des dents jeunes est moins translucide que celui des dents plus âgées, ce qui donne plus de luminosité aux dents jeunes. Ces dernières tendent à un aspect plus laiteux et plus lumineux car elles sont généralement recouvertes d'un émail plus épais et moins translucide, atténuant la couleur de la dentine. À l'inverse, l'émail plus minéralisé et moins poreux des dents âgées devient plus translucide et a une luminosité réduite car toute matière translucide achromatique superposée à un objet le rend plus grisâtre : moins de lumière est réfléchiée, et l'objet s'allume moins. Par conséquent, l'émail translucide confère une couleur grisâtre à la dent, tandis que l'émail opaque apparaît plus blanc, plus réfléchissant et lumineux. Pour finir, globalement, il a été observé que les dents âgées sont d'un blanc plus rouge et jaune, et sont moins lumineuses.

- Bien que la couleur des dents soit très complexe et variable dans toutes les directions, il a été démontré qu'il existe une corrélation entre les couleurs des différentes régions de la surface dentaire vestibulaire. Cette étude, réalisée à l'aide de la photographie numérique, suggère que la couleur d'une partie manquante d'une dent peut être déterminée grâce à la couleur de parties présentes, elle justifie donc le choix de couleur par comparaison. La même équipe a aussi rapporté un lien entre les couleurs des

incisives maxillaires et des canines, qui intéresse le choix de couleur en cas de dent manquante.

D'autres nombreux auteurs ont aussi décrit la distribution de la couleur parmi les dents : de manière générale les dents antérieures maxillaires sont légèrement plus jaunes que les mandibulaires, et les incisives centrales maxillaires ont une luminosité supérieure aux latérales et aux canines. (14, 38) Il est aussi intéressant de noter que près de 80% des dents naturelles auraient une teinte correspondant à la Vita A. Ainsi, des auteurs ont conseillé, en cas de doute lors du choix de la famille de teinte de la couleur recherchée, de pencher pour la A, statistiquement plus représentée. (23)

La couleur finale de la dent est influencée par les couches profondes et superficielles de tissus durs qui la constituent : la dentine donne la teinte et la saturation, l'émail vient moduler la luminosité et possède des caractérisations. Ceci crée les différences aux trois tiers de la dent. Les restaurations s'inspirent de cette structure en strates.

La connaissance des statistiques concernant la couleur des dents permet au praticien de mieux orienter sa détermination colorée :

- Les dents claires sont en général moins saturées et plus jaunes, tandis que les dents foncées sont trois fois plus saturées et plutôt dans les rouges.
- Les dents jeunes plus blanches et lumineuses doivent être reconstruites avec une couche d'émail épaisse et moins translucide.
- Les dents âgées auront une couche d'émail moindre et plus translucide, et une dentine de couleur chaude et plus saturée.
- Les incisives centrales maxillaires sont plus lumineuses que les latérales, et que les canines.

1.2.1.3 *Déshydratation, luminosité et saturation :*

Notons pour finir que les propriétés optiques précédemment citées peuvent aussi être modifiées par la déshydratation de la dent. Il a été observé que les dents apparaissent plus lumineuses et moins saturées lorsque déshydratées. Ce sera un facteur très important à vérifier avant la détermination de la couleur, et ce quelle que soit la technique utilisée, visuelle ou instrumentale. (33, 38)

Au cours des soins, à cause de l'aspiration, il est fréquent que les surfaces dentaires s'assèchent et il a été mesuré que celles-ci retrouveraient leurs valeurs de base en environ 20 minutes. Il est donc conseillé d'évaluer la couleur en début de rendez-vous, avant tout acte. Ajoutons qu'une empreinte au polyvinylsiloxane produit le même effet sur les dents, qui nécessiteront dans ce cas une attente de 30 minutes avant de retrouver leur aspect coloré initial. Pour finir, l'éclaircissement dentaire induit toujours une

déshydratation, jusqu'à plusieurs semaines après traitement. On ne peut donc pas déterminer une couleur de dents adéquate directement après éclaircissement, celle-ci ne sera stabilisée qu'un mois après la procédure, environ. Il faut donc surveiller et attendre cette stabilisation de couleur pour pouvoir relever une couleur appropriée à l'objectif esthétique.

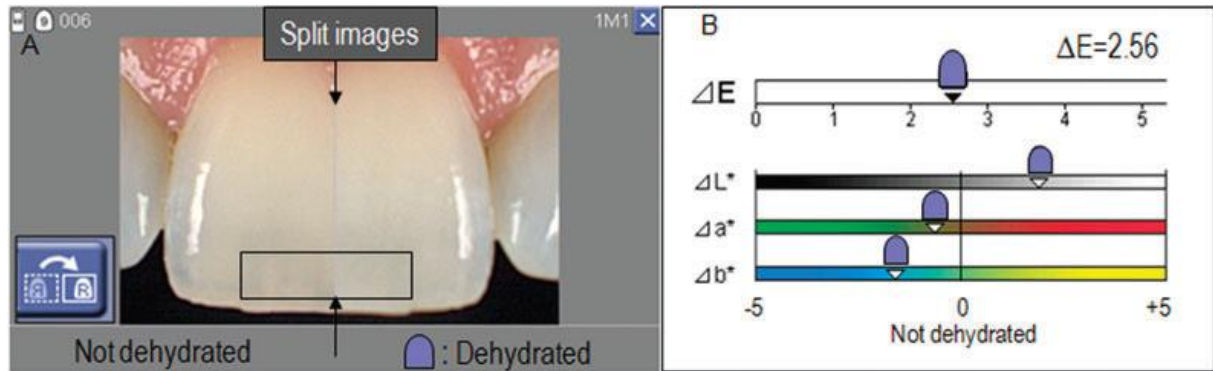


Figure 12 : Modifications optiques dues à la déshydratation.

A= comparaison entre dent non déshydratée et dent déshydratée. B= données numériques de cette différence, établies par spectrophotomètre. (ΔL^* : différence de luminosité ; Δa^* : différence de taux de rouge ; Δb^* : différence de taux de jaune.)(33)

La déshydratation modifie la couleur perçue. La détermination de teinte ne doit pas être effectuée à la fin d'une séance où l'aspiration a asséché la bouche, après une empreinte, ou de suite après un éclaircissement.

1.2.2 Les dimensions complémentaires propres à la dent naturelle :

Ces dimensions doivent être prises en compte au même titre que les dimensions précédemment exposées. L'aspect visuel complexe de la dent naturelle en dépend tout autant.

Les caractéristiques que nous allons voir sont en rapport étroit avec la couleur de la dent car elles influencent directement le flux lumineux réémis vers l'observateur. Elles sont interdépendantes, et leur rôle propre dans la couleur finale de la dent est souvent difficile à associer à une dimension unique.

1.2.2.1 « Double-layer effect »

La structure en couches de la dent est encore une fois mise en lumière : on parle en anglais de « double-layer effect » pour décrire l'effet de profondeur lié au fait que la couleur apparente de la dent est le résultat de la réflexion diffuse de la lumière par la couche interne de dentine, passant par la couche externe translucide, d'émail. Le même effet sera observable et recherché dans une couronne en céramique constituée d'une

couche interne opaque et d'une couche externe translucide, ou dans un composite réalisé par stratification. (23, 53, 60)

1.2.2.2 **Translucidité :**

La coque d'émail semi-translucide développe les effets de transparence, de translucidité de nos dents, ainsi que l'opalescence.

La translucidité de l'émail est de 70%, contre 40% pour la dentine. Elle serait liée à la charge minérale du tissu. Le dégradé cervical dévoilant progressivement la couleur dentinaire de fond correspond à l'affinement de la couche d'émail vers le collet. Cette épaisseur varie avec l'âge : l'émail s'affine, sa saturation augmente. Notons aussi que la translucidité de l'émail varie avec l'angle d'observation et d'incidence de la lumière, l'état de surface, la longueur d'onde, l'état d'hydratation. Ceci s'explique par le fait que ce sont les phénomènes de réfraction, diffusion, diffraction du rayon lumineux qui la conditionnent.

C'est principalement la translucidité des dents, par la multiplicité des trajets du rayonnement lumineux qu'elle implique, qui rend la détermination de la couleur particulièrement compliquée. (22, 63, 76)

1.2.2.3 **Opalescence :**

Nos dents ont aussi la capacité de créer des phénomènes regroupés sous le terme de photoluminescence. Ces phénomènes sont les capacités d'opalescence, de fluorescence notamment, mais encore de phosphorescence et de luminescence.

L'opalescence explique les effets bleutés et orangés souvent visibles sur les bords d'émail naturel d'une dent observée à la lumière du jour. Elle peut aussi être observée, par exemple, dans une très fine couche d'huile à la surface de l'eau.

Le terme est inspiré de la pierre d'Opale : il existe une similitude entre la fine taille cristalline des cristaux d'hydroxyapatite de calcium de l'émail et les cristaux de dioxyde de silicium dans la pierre d'Opale.

Le phénomène d'opalescence peut être décrit comme le fait qu'un matériau apparaît d'une certaine couleur lorsque la lumière y est réfléchi, et d'une couleur différente lorsque la lumière est transmise à travers celui-ci. C'est la translucidité de l'émail dentaire naturel et le comportement particulier de la lumière à travers celui-ci qui créent son opalescence. Les phénomènes produits sont la diffusion, la diffraction et une réflexion différenciées entre photons à longueurs d'ondes courtes et à longueurs d'ondes longues.

Dans les dents naturelles ce phénomène est lié aux cristaux d'hydroxyapatite de l'émail : leur forme ($0.16\mu\text{m}$ de long ; 0.02 à $0.04\mu\text{m}$ d'épaisseur) leur permet de différencier les longueurs d'ondes. L'effet varie en fonction de l'arrangement des cristaux. On pourra observer des reflets irisés à la surface de la dent selon sa situation, le rayonnement qui l'illumine, sa direction, la position de l'observateur.

Globalement, l'émail réfléchit prioritairement les longueurs d'onde courtes, ce qui produit un aspect bleuté en réflexion lumineuse. Tandis qu'en transmission lumineuse, l'émail produira un aspect rouge-orangé car il laisse passer les longues longueurs d'onde. Ceci implique que, même s'il est incolore, l'émail produira une sensation colorée.

L'opalescence se retrouve donc principalement dans la zone où l'épaisseur d'émail est la plus importante : entre la région incisive de l'émail et la limite incisive de la dentine, c'est-à-dire la région du bord libre. La translucidité y est marquée, ainsi que sur les bords proximaux de la dent. Ces zones afficheront une translucidité gris-bleutée rarement continue et uniforme, plus souvent variable selon la forme des mamelons de la dentine. Elle est surtout présente sur les dents jeunes, où l'émail n'a pas encore subi d'usure.

Les effets d'opalescence participent à l'aspect naturel d'une dent. (22, 23, 38, 39, 79)

Une classification établie par VANINI permet de simplifier la reconnaissance de cette zone et sa reproduction : (16)

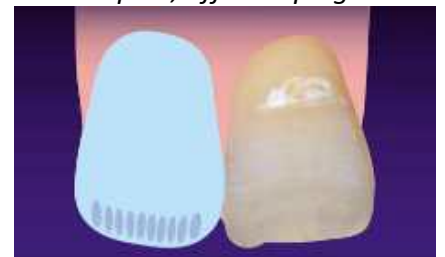
Type 1 :
mamelons à deux sillons :



Type 2 : mamelons à
trois ou quatre sillons :



Type 3 : sans distinction
marquée, effet de peigne :



Type 4 : sillon dense créant une sorte
de fenêtre au bord libre :



Type 5 : c'est le halo du café chez les personnes
âgées et sur les dents dont la dentine est sclérosée,
avec un émail et une dentine infiltrés :



Figure 13 : Schémas des différents types d'opalescences.

1.2.2.4 *Fluorescence :*

La fluorescence d'un matériau est le fait que celui-ci va absorber la lumière et émettre spontanément une lumière à longueur d'onde plus élevée.

Dans la dent, ce phénomène est dû à la dentine et sa constitution organique : le collagène dentinaire contient effectivement un pigment sensible aux ultraviolets. La composante ultraviolette de la lumière reçue est donc transformée en radiations visibles d'énergie moindre, et donc de plus grande longueur d'onde, c'est-à-dire, du blanc intense au bleu léger (Orthet et al., 2005).

La fluorescence des dents naturelles humaines est donc d'un blanc-bleuté net.

Là où la dentine est la plus épaisse, c'est-à-dire en cervical, la fluorescence est la plus importante. A contrario, elle est faible dans la région incisale. Le niveau de fluorescence varie aussi en fonction de la couleur de base de la dent. En vieillissant, l'hyperminéralisation de la dentine altère son rendu de fluorescence.

La fluorescence n'est observable que sous un rayonnement ultraviolet, mais celle-ci possède tout de même un rôle dans l'aspect coloré global de la dent : elle est inversement liée à la saturation. Des poudres fluorescentes sont additionnées dans les céramiques pour augmenter la quantité de lumière réémise vers l'œil, et diminuer la saturation.

(16, 22, 23, 63, 71)

1.2.2.5 *Caractéristiques de surface :*

La microgéographie de surface influence le pourcentage de flux lumineux réfléchi, par rapport au flux transmis ou absorbé par la matière dentaire. Ceci modifie significativement la perception colorée. (19, 26, 63, 77, 78)

Un phénomène important entrant en jeu est la réflexion spéculaire. Elle crée une brillance de surface. La compréhension de ces phénomènes est nécessaire pour améliorer la qualité de nos divers actes à visée esthétique comme la détermination de teinte mais aussi la reconstruction prothétique : la réflexion spéculaire doit être reproduite sur une couronne car elle apporte de la vitalité, du naturel. Elle doit aussi être retrouvée à la surface d'un composite : ceci est un rôle important du polissage.

Elle interfère avec une identification correcte de la couleur, c'est pourquoi on recommande une illumination diffuse, ou à 45°, pour prendre la teinte.

Les dents jeunes ont un aspect brillant. Les dents âgées ont plutôt un aspect lisse caractéristique dit « émoussé luisant » lié à l'usure abrasive et érosive de l'émail qui

devient de moins en moins rugueux, ce qui augmente la réflexion spéculaire à la surface vestibulaire de la dent. Cependant l'action de boissons sodées, de jus d'agrumes (notamment de citron), les problèmes de reflux gastro-œsophagien ou de consommation de drogue peuvent provoquer des altérations précoces de surface de l'émail.

D'autres déterminants, horizontaux et verticaux, peuvent marquer la surface vestibulaire :

- La composante horizontale est le résultat direct des lignes de croissance, appelées aussi stries de Retzius, qui laissent à la surface de l'émail de fines stries horizontales : les périchématies. Les dents jeunes principalement ont une surface riche en périchématies. Elles sont responsables de l'aspect lumineux des dents jeunes car elles induisent une réflexion diffuse des rayons lumineux.

- La composante verticale est définie par la segmentation de la dent en lobes bien distincts. La partie convexe des lobes, plus polie, crée une réflexion miroir, tandis que les concavités entre les lobes, ou des fossettes, plus rugueuses réfléchissent peu la lumière. Des composants horizontaux marqués feront paraître la dent plus large ou plus courte ; des composants verticaux marqués feront paraître la dent plus longue ou plus étroite.

Remarque : En dentisterie restauratrice, qu'il s'agisse de la finition d'un composite ou de céramique, la reproduction de ces détails nécessite une chronologie spéciale : les caractéristiques verticales doivent être réalisées en premier, les lignes de croissance horizontales ne sont reproduites qu'à la fin de la finition de surface.

Dans le cas de restauration indirecte le praticien doit transmettre l'état de surface au prothésiste. Dans le cas de restauration directe, le praticien doit invariablement polir sa création.

Dans tous les cas, le choix de construction des composants verticaux et horizontaux a un rôle esthétique sur l'aspect coloré, mais aussi sur la forme et la perspective perçues.

1.2.2.6 *Situation spatiale et lumière* : (63)

La situation spatiale de la dent influence l'aspect visuel de la dent : un objet situé plus près paraît plus grand et plus lumineux. Ces phénomènes sont observables sur les dents en malposition. Par exemple, une incisive centrale en retrait paraîtra plus sombre que sa voisine.

L'ombre de la bouche accentue l'illusion d'assombrissement de la couleur lié à la perspective. Ainsi, lors de l'évaluation de la teinte, il faut toujours mettre l'échantillon du teintier sur le même plan que la dent de référence. Et positionner la dent et l'échantillon bord à bord.

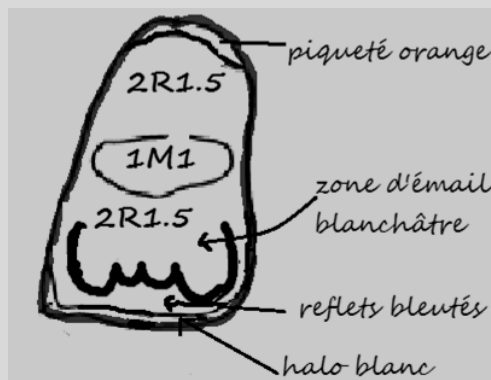
A l'inverse, il est intéressant d'avoir à l'esprit le principe des tons avancés et reculés : la couleur d'un objet peut influencer la perception de sa position spatiale. Ceci peut aussi être utilisé en prothèse dentaire, afin de minimiser l'effet inesthétique d'une malposition.

En résumé, c'est la complexité de la circulation de la lumière dans la dent, le jeu des réflexions, transmissions et diffusions, des rayons lumineux qui rendent la dent "vivante". A ceci il faudrait ajouter l'état de surface : « son état d'usure, de craquelure, de rugosité de surface fait varier ces paramètres » (Franck DECUP, Paris V).

Le praticien doit connaître toutes ces informations observables pour gérer sa stratification, ne pas négliger le polissage. Aujourd'hui de nouveaux coffrets de composites esthétiques sont créés, organisés exactement en fonction des multiples dimensions de l'aspect dentaire : couleur, translucidité, opalescence. Ils permettent de les produire plus aisément. (46)

Le praticien doit aussi connaître toutes ces composantes pour les transmettre au prothésiste.

Malheureusement, toutes ces qualités complémentaires restent difficilement quantifiables. Un exemple de cartographie montre le minimum d'éléments de base qui devraient être transmis...: (figure personnelle)



...et les lacunes que peut souvent présenter le mode de communication uniquement par schéma : variations d'opacité, de luminosité difficiles à représenter, impossibilité de communiquer la fluorescence, épaisseur des couches émail et dentine difficile à évaluer pour le prothésiste. Compléter aussi par l'état de surface.

La photographie sera très souvent d'une aide précieuse.

Notons aussi que l'âge du patient influence grandement les caractéristiques de surface, il est donc important de le communiquer au prothésiste. Notons enfin que des changements de translucidité de l'émail liés à l'illumination altèrent la couleur globale de la dent. Le praticien doit être attentif à l'éclairage et à la position du patient.

1.3 Technique usuelle de prise de couleur : les teintiers.

1.3.1 Principe :

Le principe est de comparer visuellement les barrettes-échantillons du teintier avec la dent naturelle à imiter jusqu'à trouver l'échantillon le plus proche.

De façon générale, l'utilisation des teintiers s'accompagne de la réalisation d'un schéma de teinte détaillé dans les trois zones cervicale, moyenne et incisale, assurant la communication avec le laboratoire de prothèse.

1.3.2 Indications :

La détermination et l'enregistrement des informations colorées d'une ou plusieurs dents interviennent à de nombreux moments de l'activité du chirurgien-dentiste : soins conservateurs, prothèse fixée, prothèse amovible, et particulièrement dans tous les traitements à visée esthétique. De plus, pour ces derniers, les possibilités thérapeutiques ne cessent de croître : éclaircissement des dents vitales et non vitales, remodelage amélaire, composites antérieurs et postérieurs, inlays/onlays en composite ou en céramique, facettes, couronnes et bridges céramo-céramiques, implants, bridges collés...). (44, 73)

1.3.3 Un peu d'histoire :

Divers teintiers existent aujourd'hui sur le marché. Leur nombre relativement important révèle une recherche d'amélioration constante qui démontre la difficulté à établir un teintier performant et satisfaisant quant à la reproductibilité et la précision de la prise de teinte. (4, 5, 8, 11, 17, 28, 38, 44, 49, 62)

Le dilemme a beaucoup reposé sur le nombre de teintes-échantillons du teintier. Plus il y en a, plus il y a de comparaisons à établir. A la longue, l'œil humain fatigue et les appréciations perdent de leur fiabilité. Toutefois, moins le teintier comporte de teintes-échantillons plus la prise de teinte est aléatoire, car entre quelques échantillons, il existe de grosses différences.

Plus tard, on s'est aussi intéressé à la répartition et l'ordre des échantillons de couleurs...

Le premier teintier a été introduit par Vita, en 1929. Ses échantillons avaient été choisis et ordonnés selon la teinte et une distribution épidémiologique constatée des couleurs de dents naturelles. Les différents teintiers créés par la suite sont restés établis en fonction de l'apparence plus que sur des bases scientifiques, jusqu'en 1998 où Vita introduit le

Vitapan-3D-Master® dont la distribution est basée sur le système L*a*b de la CIE. Il est donc fondé sur les standards scientifiques internationaux admis pour la mesure des couleurs.

On trouve donc aujourd'hui les teintiers les plus classiques organisés selon la teinte tels que le Chromascop® de chez Ivoclar, ou le Vita-Lumin-Vacuum® de chez Vita, mais aussi un teintier organisé par familles de luminosités : Vitapan-3D-Master® de chez Vita. Ce dernier a l'avantage de permettre une discrimination précise des trois caractéristiques chromatiques de base, en donnant la priorité à celle reconnue comme la plus importante dans le choix de la couleur : la luminosité. De plus, les couleurs des barrettes sont réparties à des distances toujours constantes dans l'espace de la CIE : les cinq groupes de luminosités sont répartis avec un $\Delta L=4$, puis dans chaque groupe les échantillons sont de luminosité identique et se différencient par leur saturation et leur teinte.

Il présente une gamme plus étendue d'échantillons que le teintier Classical® et permet un choix de la couleur rapide, simple, plus reproductible.

Le teintier Vitapan-3D-Master® a été mis à disposition des dentistes en 1998, il est le fruit de près d'un siècle de théories et d'évolutions concernant le choix de la couleur et semble être aujourd'hui le plus approprié à une décision scientifique, de qualité, de difficulté moindre et dans un temps réduit, concernant la couleur d'un élément à reconstruire.



Figure 14 : Deux exemples de teintiers : à gauche Chromascop® organisé par groupes de teintes, à droite Vitapan-3D-Master® organisé par groupes de luminosités. (44)

1.3.4 Protocole conseillé :

Quel que soit le teintier utilisé, la séquence admise comme la plus logique aujourd'hui commence par déterminer la luminosité de l'élément, puis la saturation et la teinte. Cependant peu de dentistes connaissent et exploitent réellement cette méthode visant à un résultat optimal. Nous allons donc décrire ce protocole. Ces étapes seront à reproduire pour chaque tiers de la/des dents à évaluer. Le protocole décrit se base sur l'utilisation du teintier Vitapan-3D-Master®. (4, 18, 49)

- On commence par choisir le groupe de **luminosité**. Le teintier est divisé en cinq groupes dont les échantillons sont d'égale luminosité. Le praticien prend l'échantillon du haut de chaque groupe, nommé M1, et choisit parmi ces cinq onglets, la luminosité de la dent. Ces onglets sont les plus appropriés pour ce choix car ils ont les taux de saturation et de teinte les plus bas, ce qui permet aux bâtonnets, cellules photoréceptrices de la rétine, de mieux différencier les luminosités sans saturer les cônes. En effet les bâtonnets sont plus sensibles aux gradations de noir et blanc que ne le sont les cônes aux couleurs. Pour les même raisons, un éclairage faible est plus approprié pour déterminer la luminosité.

Certains auteurs préfèrent évaluer la luminosité à l'aide des cinq échantillons M2, situés au centre de chaque groupe.

Le choix doit s'effectuer sans tergiverser, afin de ne pas saturer les photorécepteurs.

Observons aussi les pointes de la banane : les plans chromatiques des groupes de luminosité 1 et 5 du teintier Vitapan-3D-Master® sont relativement petits. Conformément au principe de l'équidistance, les ensembles de six dents ne trouvent plus leur place dans ces plans, c'est pourquoi ils n'y en a que deux/trois.

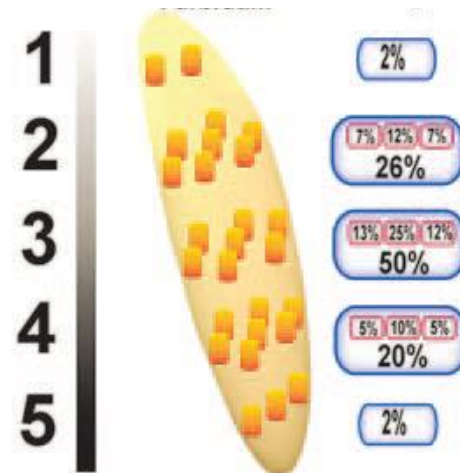


Figure 15 : Répartition des échantillons du teintier Vitapan-3D-Master® dans la banane chromatique. (4)

De plus, les dents appartenant aux groupes de luminosité 1 et 5 sont extrêmement rares. La moitié environ des dents humaines se situe au centre, c'est-à-dire dans le groupe de luminosité 3. Lorsque l'on commence par déterminer le groupe de luminosité, il est donc statistiquement conseillé de partir du milieu pour ensuite définir si la dent de référence est plus claire, plus foncée ou si elle fait bien partie du groupe 3.

- Lorsque le groupe de luminosité a été sélectionné, il est conseillé de retirer les groupes qui n'intéressent plus le choix. En effet, il a été remarqué, par expérience, que lorsque l'on recherche ensuite la saturation, on a tendance à douter de la luminosité choisie. Remarquons que ce phénomène problématique arrive aussi avec les autres teintiers, et gêne d'autant plus que l'on ne peut éliminer de « groupes de luminosité », n'existant pas dans les teintiers plus classiques.
- on choisit ensuite **la saturation** en descendant dans la colonne (M) de la luminosité précédemment choisie. Après la détermination de la luminosité, celle-ci est identique pour tous les échantillons du même groupe, qui varient seulement en teinte et saturation. La saturation croît en descendant la colonne centrale (M). La façon la plus performante de déterminer la saturation est : comparer la dent référence à l'échantillon M2 et dire si elle est plus ou moins saturée que M2.
- Ensuite on peut éliminer des échantillons du groupe : si la dent est moins saturée que l'onglet, on conserve les trois échantillons supérieurs ainsi que M2, et si la dent est plus saturée, on conserve les trois inférieurs ainsi que M2.
- on choisit ensuite la **teinte** soit en restant dans la colonne du milieu (M) jaune rouge, soit dans la colonne de droite (R) plus rouge, soit dans celle de gauche (L) plus jaune. Comme il est difficile de sélectionner la teinte, il est conseillé de la choisir à la canine, où la saturation de la teinte dominante de la dentition est la plus haute.

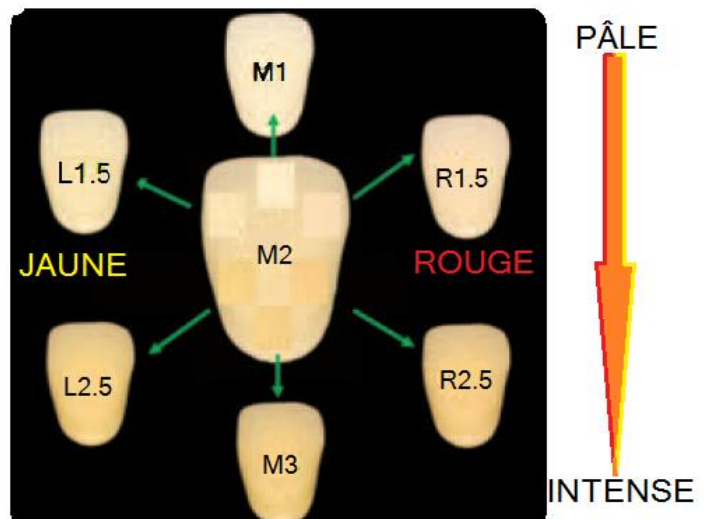


Figure 16 : Répartition des échantillons au sein d'un groupe de luminosité donnée. (4)

On obtient un onglet final dont la dénomination indique les caractéristiques colorées. Par exemple : 2L1,5 signifie que l'échantillon appartient au groupe 2 de luminosité ; 1,5 est la saturation qui varie de 1 à 3 dans chaque groupe ; enfin L signifie que la teinte est plutôt dans les jaunes.

Cette méthode visuelle par élimination semble constituer un protocole facilement assimilable, et apporter efficacité et fiabilité.

Elle est cependant difficile à mettre en place avec des teintiers différents du 3D-Master®.

1.3.5 Avantages : (8, 38)

- coût raisonnable.
- utilisation facile.
- temps nécessaire court.
- transportable.
- base de la communication avec le laboratoire de prothèse : référence commune qui facilite la description de la couleur de la dent.
- référence durable et constante permettant de noter dans le dossier-patient la couleur des restaurations déjà effectuées, et de s'en servir pour les futures restaurations similaires.

1.3.6 En pratique : difficultés rencontrées, limites :

La technique d'évaluation par teintier est aujourd'hui la plus utilisée afin de déterminer la couleur d'une restauration future, cependant elle est aussi jugée comme ayant une reproductibilité faible et des résultats inconstants. Des études statistiques montrent qu'il existe des différences importantes entre couleurs des dents naturelles et couleurs des dents prothétiques. (75)

Nous exposons dans ce paragraphe les différentes explications aux problèmes rencontrés lors de la mise en place de cette méthode de choix de couleur.

1.3.6.1 *Subjectivité de la perception des couleurs par le praticien :*

La couleur est une notion subjective créée dans le cerveau par des phénomènes psychosensoriels et neurophysiologiques suite à l'action de la lumière sur les récepteurs rétiniens. La perception colorée est donc le résultat complexe de phénomènes physiologiques, psychologiques et émotionnels. Elle est très personnelle, renvoyant aux expériences et apprentissages de l'observateur ou encore à la physiopathologie : déficience de la vision des couleurs, fatigue ou vieillissement de l'œil. Elle est ainsi subjective et très variable selon les individus.

- Variation intra-individuelle :

La perception varie selon le praticien, mais elle peut aussi varier individuellement, chez un même praticien :

- A cause de son humeur. De même, le stress, en plus d'affecter fréquemment le discernement, provoque une crispation interne qui modifie le fonctionnement des yeux et leurs muscles.
- A cause de fatigue oculaire, de médicaments, ou encore du contraste simultané et du contraste successif.
- La répétition de l'opération aussi est délétère. On sature les photorécepteurs rétiniens.
- Adaptation chromatique : ce phénomène oculaire physiologique explique les difficultés que nous rencontrons à distinguer des nuances de blancs plus ou moins jaunes, plus ou moins rouges. Nous l'expliquerons dans la description de la physiologie rétinienne.
- Avec l'âge, la vision des couleurs se modifie progressivement. L'altération progressive du cristallin diminue la perception du contraste et la perception des bleus. Les couleurs virent au jaune et l'acuité visuelle diminue. (15)

Face à ces difficultés, il est conseillé de demander l'avis d'un observateur supplémentaire, en général l'assistante, car en plus de l'argument de la fatigue oculaire, il a été démontré qu'un consensus entre observateurs amène à de meilleurs résultats de correspondance de couleur qu'une évaluation individuelle. Ajoutons qu'il faudra avoir formé son assistante au relevé de couleur, car il a été démontré dans une étude comparant divers groupes professionnels que les assistantes dentaires non habituées à ce relevé ont un taux de réussite faible, comme un individu lambda de la population. Remarquons aussi que la même étude a relevé que ceux qui ont le meilleur taux d'exactitude de correspondance des couleurs sont les prothésistes dentaires. Malheureusement, le prothésiste dentaire est rarement à proximité du cabinet du praticien. (11, 14)

Afin de limiter l'influence de la fatigue oculaire, prendre la couleur en début de rendez-vous et réquisitionner un second observateur seront donc déjà de bonnes habitudes à installer. (5, 57, 62) Il est aussi conseillé de reposer les yeux, toutes les dix secondes, en regardant un fond bleu ou gris neutre, pour retrouver la sensibilité à la vision des couleurs. (49)

- Exercice de l'œil :

Un autre paramètre dépendant du praticien est aussi son niveau de compétence : une étude publiée en 2010 par 'The Journal of Education' révèle que, notamment dans des cas complexes, l'éducation aux sciences de la couleur améliore la capacité à prendre correctement la couleur des dents.

Les dentistes expérimentés ont aussi des résultats plus reproductibles que les nouveaux dentistes. En fait, ce ne seront pas les années de pratique clinique qui auront une influence, mais plutôt l'entraînement au choix des couleurs. Ces deux facteurs sont bien souvent liés, mais cette nuance signifie qu'un praticien bien entraîné et connaissant mieux les théories de la couleur pourra avoir de très bons résultats, sans avoir forcément des années de pratique clinique. Par conséquent une éducation aux sciences des couleurs dans la formation initiale des dentistes, puis lors de la formation continue est recommandée. (11, 14, 35, 38, 41, 60)

- Paramètres environnementaux :

En plus des paramètres liés au praticien, les paramètres susceptibles d'influencer la détermination de couleur sont nombreux : (15, 46, 57)

- Conditions d'éclairement : lumière artificielle (intensité, température de couleur), rayons du soleil, heure du jour,...
- Couleurs : murs, sol, vêtements du patient et du praticien.
- Position du patient. La position adéquate sera un patient qui fait face à la source lumineuse pendant que l'observateur lui fait face, dos à la lumière.
- Angle de vision.

1.3.6.2 ***Expression d'une perception complexe :***

Un autre problème rencontré lors de l'évaluation visuelle est le manque de vocabulaire approprié à une description claire et précise de la couleur. Notre seul langage ne nous permet pas une communication pertinente avec le prothésiste. De plus, le résultat obtenu ne peut pas être traduit dans les coordonnées $L^*a^*b^*/L^*c^*h$ de la CIE. (38)

1.3.6.3 ***Métamérisme :***

On dit de deux corps qu'ils sont métamères quand ils peuvent apparaître avec une identité chromatique semblable sous une certaine lumière, et différente sous une autre lumière. Ces objets renvoient deux couleurs qui sont différentes du point de vue spectral

mais qui apparaissent identiques à la vision humaine. Sous un autre illuminant, leur couleur pourra être différente de façon observable cliniquement, voire inacceptable.

Il faut donc prendre en compte ce paramètre, fréquent en odontologie.

En effet, la distribution spectrale de la lumière sous laquelle on observe un objet diffère en fonction des illuminants installés, et modifie donc la lumière réfléchie ou transmise. Par exemple, la couleur d'un objet est souvent perçue plus rouge sous une lampe à incandescence qu'à la lumière du jour ou sous une lampe à fluorescence à haute température de couleur. Par conséquent, une restauration choisie à la lumière du jour pourra, sous d'autres éclairages, apparaître d'une couleur différente, et donc, potentiellement inacceptable. C'est seulement si les matériaux utilisés ont les mêmes capacités de réflexion et absorption lumineuses que les dents associées qu'ils seront perçus de même couleur quel que soit leur illuminant.

Des recherches ont mis en évidence que les couleurs des teintiers et des céramiques ou composites correspondants sont effectivement affectées par les variations d'illuminant. D'autres études ont aussi révélé que les composites et les céramiques ne sont pas affectés à un même degré par les différences d'illuminant : le métamérisme semble être plus important entre composites et céramique ou dent naturelle que entre céramique et dent naturelle.

Ces données prédisent le fait que même si le praticien parvient à déterminer l'échantillon correspondant le mieux à la dent sous les divers éclairages envisageables, il n'est pas certain que le matériau de reconstruction fera preuve d'une correspondance aussi adéquate puisque celui-ci n'a pas forcément le même comportement optique que son teintier. Effectivement, mis à part certains teintiers fournis dans les coffrets de composites à visée esthétique, la plupart des teintiers ne sont pas en composite, mais en céramique ou en résine, qui ont un comportement optique différent. (18, 21)

Les principales solutions face à ce problème de métamérisme seront de privilégier les matériaux ayant un spectre d'absorption proche de celui de la dent naturelle, utiliser des teintiers faits avec le même matériau que les pièces prothétiques du laboratoire, varier les conditions d'éclairage pendant le choix de la couleur, ou encore valider sa prise de couleur par un autre opérateur (assistante, prothésiste). (15, 18, 49)

1.3.6.4 *L'organisation des teintiers :*

Les échantillons de teinte dans les différents teintiers proposés ne sont, pour la plupart, pas dans un ordre logique, adéquat à une détermination efficace. Plutôt ordonnés en

fonction de la teinte puis secondairement en fonction de la saturation (comme le Chromascop® ou le Vita-Lumin-Vacuum®), et beaucoup moins en fonction de la luminosité.

- Même dans l'organisation par teinte on ne retrouve pas de logique claire. A titre d'exemple, dans le Vita Classical® on observe : dans l'espace des couleurs des dents, les groupes C et D sont situés entre les groupes A et B. C'est pourquoi, pour choisir la teinte, il a été suggéré, par Miller, de placer les A et les B aux deux extrémités du teintier et C et D au milieu. (23)

- De plus, la distribution des valeurs L^* , c^* , a^* et b^* de la CIE a été étudiée à l'intérieur des groupes de teinte, c'est-à-dire dans chaque groupe A, B, C, ou D du teintier Vita ou 100, 200, 300, 400 ou 500 du Chromascop®, et les résultats montrent un certain désordre : une saturation qui augmente avec l'augmentation du deuxième chiffre, c'est-à-dire par exemple de A1 à A4 ou de 110 à 140, mais pas dans le groupe des 300 du Chromascop® ; et des valeurs de teinte (a^* et b^* de la CIE) qui augmentent avec ce même chiffre pour certains groupes du Chromascop® mais sans tendance générale, et pour tous les groupes sauf le D chez Vita.

- En ce qui concerne la luminosité, à titre d'exemple, le teintier Vita disposé par ordre décroissant donne : B1, A1, B2, D2, A2, C1, C2, A3=D4, D3, B3, C3, A4, et enfin C4 (ordre proposé par le fabricant, pour un illuminant à la norme D65).

Cette disposition générale désordonnée rend la tâche très difficile au praticien, qui y mettra plus de temps, perdra en qualité à cause de la difficulté de comparaison mais aussi à cause de fatigue oculaire et saturation de ses récepteurs rétiniens.

Afin de suivre le protocole en trois étapes commençant par la luminosité, il est conseillé de réorganiser son teintier classique dans l'ordre de luminosités cité ci-dessus pour la première étape. (38) Cette réorganisation selon l'étape du protocole de détermination représente une perte de temps, ou alors il faudrait utiliser deux teintiers organisés chacun dans un ordre, ce qui n'est pas une solution très intéressante pour le praticien.

(5, 8, 28, 57, 62)

1.3.6.5 *Variations des teintiers.*

Les teintiers subissent une usure : à force de manipulation, d'un rangement non soigneux, plus encore à cause des produits de stérilisation, et notamment lorsqu'on le laisse désinfecter dans des produits à base de Chlore. (35, 61)

De plus, il est important d'être vigilants au problème observé : les couleurs des teintiers, même neufs et entre lots d'un même modèle, ne sont pas identiques. (14, 38, 45, 62)

1.3.6.6 *Non-correspondance des résines composites et teintiers :*

Diverses études ont démontré que la couleur choisie sur un teintier ne correspondait pas toujours à celle obtenue avec le composite choisi conformément à l'échantillon.

Il a été mesuré que les composites fabriqués pour avoir la même désignation de couleur, ne correspondent pas entre eux : des différences entre composites A2 de deux fabricants de $\Delta E=6,3$ et entre composites B2 de $\Delta E=8,1$ ont été mises en évidence.

Les tableaux placés en annexe 1 montrent les différences de couleur que l'on peut observer entre des cibles Vitapan® et les composites correspondants. L'analyse de toutes les moyennes de différences de couleur et de différences dans les coordonnées de couleur indique une tendance générale dans laquelle le changement de luminosité est positif, et la variation de saturation est négative. Par conséquent, les matériaux sont en général trop lumineux et manquent de saturation par rapport à leur référence Vita. L'ampleur globale de la variation de teinte, comparée aux deux autres coordonnées colorées, indique aussi que la teinte influence la couleur de façon moins importante que la luminosité et la saturation (*voir annexe 1*). (8, 59)

Rappelons que le seuil d'acceptabilité se situe entre 4.6 et 6 en moyenne selon les études.

On ne peut que remarquer, tout de même, que ces chiffres sont en contradiction avec l'expérience clinique générale. Des arguments peuvent être avancés dans ce sens, où les résultats semblent moins souvent inacceptables :

- L'ampleur des différences observées a été très probablement exagérée par la discordance existant entre différents teintiers.

- Les seuils de perceptibilité et d'acceptabilité retrouvés dans la littérature ont généralement été établis dans des conditions d'observation paramétrées et optimales. Les restaurations sont placées sous une lumière abondante, un éclairage paramétré et standardisé, et observées à une distance très rapprochée. Le contrôle de l'environnement est probablement la principale différence entre contexte clinique et contexte de laboratoire.

De plus, ces contextes sont tous les deux éloignés de l'environnement dans lequel les restaurations des patients peuvent être vues dans les activités de tous les jours : la lumière est bien abaissée, la distance est augmentée, et l'environnement global est beaucoup moins approprié.

- La translucidité des composites crée un effet caméléon, décrit plus loin, qui améliore l'adéquation de couleurs.
- Le montage par couches minimise aussi le problème.

Ces arguments nous permettent donc d'expliquer, pour partie, l'écart entre les standards établis et le sentiment des praticiens. Dans ce sens, des enquêteurs ont évalué que dans des conditions cliniques le niveau d'acceptabilité est de 6,8. Si 6,8 était utilisé comme une norme alternative, alors 24 % des spécimens seraient jugés acceptables. Cette estimation semble mieux correspondre à l'avis des praticiens, basé sur leur expérience clinique.

Cependant, selon l'expérience d'auteurs conduisant des essais cliniques sur des produits d'éclaircissement dentaire, un ΔE^*_{ab} de 6,8 est une nuance distinguée de façon évidente dans un cadre clinique. De ce point de vue, ceci est donc jugé comme une norme excessivement généreuse. Cette opinion s'appuie notamment sur le fait que l'ADA (American Dental Association) a établi qu'un ΔE^*_{ab} de 3 est une norme standard d'efficacité pour les produits d'éclaircissements mis à disposition sur le marché et un ΔE^*_{ab} de 4 pour ceux prescrits par le dentiste pour la technique ambulatoire. Comme l'intention de ces standards de l'ADA est de définir un seuil représentant un changement de couleur discernable, après éclaircissement, cela équivaut à l'établissement d'un standard représentant une nuance inacceptable.

Au vu de ces divergences, nous pouvons dire que des travaux supplémentaires sont encore nécessaires dans le but d'établir le seuil d'acceptabilité, mais que la discordance entre les composites et leur référence reste un fait ajoutant de la difficulté au choix de la couleur.

Certains praticiens ont tenté de minimiser cet inconvénient en fabriquant leur propre teintier avec les composites qu'ils utilisent, mais ceci est coûteux et prend du temps.

1.3.6.7 ***La gamme de couleurs références :***

La gamme des teintiers n'offre pas de correspondance pour la totalité des couleurs de dents naturelles rencontrées. Deux études indépendantes, réalisées à l'aide du spectrophotomètre Vita EasyShade®, rapportent environ les mêmes intervalles de valeurs des coordonnées de couleur des dents naturelles : $L^*=55,5-89,674$ et $L^*=58,7-88,775$; $a^*=4,2-7,374$ et $a^*=3,6-7,075$; $b^*=3,6-38,974$ et $b^*=3,7-37,375$. Les teintiers courants montrent un écart modéré à prononcé avec ces résultats. De plus, de nombreux teintiers sont composés d'échantillons qui ne figurent pas dans l'espace des couleurs des dents et compliquent inutilement la comparaison des teintes (*voir annexe 2*). (4, 14, 38)

Afin d'améliorer la qualité de prise de couleur, il a aussi été proposé d'utiliser deux teintiers différents mélangés : l'observateur dispose ainsi d'une gamme de nuances plus étendue, permettant d'augmenter les chances de se rapprocher de la teinte de la dent naturelle recherchée (54). Cette méthode montre une amélioration des résultats. En effet les erreurs de choix sont aussi souvent liées au fait que la dent naturelle peut ne correspondre à aucun des échantillons d'un teintier. Ceci étant, ce conseil augmente le nombre d'échantillons de couleur parmi lesquels faire sa sélection et rend l'étape de choix de la couleur plus longue et compliquée.

De plus la création du teintier 3D-Master® diminue encore l'intérêt de cette alternative puisque celui-ci mène à un choix de précision équivalente à celui émis avec utilisation du mélange de deux teintiers. Ainsi, l'utilisation du 3D-Master® améliore grandement la reproductibilité de l'évaluation chez de nombreux praticiens, par rapport aux teintiers précédents, et il est bien plus pratique qu'un mélange de teintiers. La constance supérieure dans les résultats de choix de teinte grâce au Vitapan-3D-Master® est surtout relevée parmi des praticiens généralistes. Parmi les praticiens spécialisés en prothèses, l'amélioration des résultats liée à l'utilisation du teintier Vitapan® par rapport aux autres teintiers n'est pas marquée. (5, 8, 28, 57, 62)

Ces derniers soucis concernent principalement les restaurations indirectes où l'on cherche à déterminer la couleur, pour la transmettre.

Les reconstitutions en composite en technique directe semblent obéir à d'autres règles, qui déstabilisent encore nos créateurs de teintiers : de nouvelles publications montrent que posséder une gamme étendue de matériaux n'est pas forcément le plus intéressant (79). Il faut effectuer un choix judicieux des couleurs en fonction des caractéristiques propres aux deux types de tissus dentaires naturels.

C'est le principe de la stratification.

Ainsi plusieurs études ont montré que le matériau idéal pour remplacer la dentine devrait présenter des propriétés telles qu'une teinte et une opacité uniformes, ainsi qu'un large panel de saturations. Pour la dentine, choisir la teinte entre les groupes A (de A1 à A4) et B (de B1 à B3), qui sont les teintes situées aux extrémités du domaine spectral attribué aux dents, suffit.

Selon la même étude, les valeurs colorimétriques et de contraste concernant l'émail varient en fonction de l'âge. Par conséquent, posséder un large choix de résines

composites « émail » pour remplacer les tissus dentaires est un plus. Pour ce qui est des dents jeunes, le choix du composite doit allier une translucidité basse et une teinte d'un blanc laiteux. En ce qui concerne l'émail d'adulte, le composite devrait être de couleur neutre et de translucidité moyenne. Enfin pour les dents plus âgées, on choisira plutôt du composite de translucidité élevée et de teinte jaune.

Remarquons ici encore l'intérêt d'une éducation poussée aux théories colorées et aux caractéristiques colorées et optiques des dents naturelles lors de la formation initiale ou continue du chirurgien-dentiste.

Après le choix de la résine appropriée, il est très important de considérer l'épaisseur de matériau car elle fera varier la couleur, la translucidité, l'opacité. La perception de saturation et d'opacité augmente avec l'épaisseur de matériau mise en place. La maîtrise de ces couches est cruciale dans le but d'obtenir l'aspect visuel désiré.

1.3.6.8 ***L'influence de la couleur de la structure sous-jacente :***

En ce qui concerne les composites en technique directe, le praticien corrige ce problème grâce au montage couche par couche. Pour ce qui est des couronnes à visée esthétique, en céramique, ce sujet est soumis à controverses.

D'après certains auteurs, la couleur finale d'une restauration en céramique est la somme de celle de l'infrastructure dentaire ou prothétique, de celle du matériau céramique, et du produit de collage. La couleur résultante ne peut donc pas correspondre à celle choisie sur le teintier, à moins que cette modification n'ait été prise en compte. Par conséquent, la couleur de l'infrastructure recevant la restauration doit être mesurée et transmise au prothésiste. Ainsi que la désignation du produit de collage. (14, 83)

Pour d'autres auteurs, une certaine épaisseur de matériau, dès 1,5mm selon certains, suffit à ce que l'infrastructure n'ait plus d'influence. Pour des couronnes céramo-céramiques, cela peut être envisageable, contrairement à des facettes collées par exemple. (77)

On considère quoi qu'il en soit que le résultat d'une restauration sera plus prédictible si l'on tient compte de l'infrastructure, et il faudra transmettre cette information au prothésiste. Le problème des teintiers est que l'on n'y retrouve pas fréquemment l'onglet de couleur correspondant à celle de la structure sous-jacente.

Concernant le matériau de collage, il existe des produits offrant une gamme de teinte intéressante, notamment lorsque l'on réalise des facettes ou des inlays-onlays. A titre d'illustration, voici la gamme proposée par Variolink II® : Bleach XL, Transparent, Blanc, Jaune, Brun et Blanc opaque. (19) Un teintier fourni par le fabricant permet de choisir la teinte.

1.3.7 Effet caméléon :

En ce qui concerne les composites, les différentes limites énumérées précédemment sont heureusement, dans la réalité clinique, nuancées par cet effet dit caméléon qui rapproche la couleur du composite mis en place de celle de la dent support. On peut trouver également le terme d'homochromie, ou encore, en anglais, « blending effect », qui donne une bonne image du concept. (8, 14, 59, 60, 66)

Dans le sens strict du terme, c'est une illusion d'optique, non-mesurable instrumentalement. Dans une définition plus large le terme comprend aussi le phénomène objectif et mesurable de changement de couleur lié à la translucidité. En fait, le matériau s'intègre car sa translucidité permet aux dents adjacentes de réfléchir leur lumière sur la restauration ou à l'infrastructure d'apparaître à travers la restauration.

Il a été démontré que l'effet caméléon est dépendant du matériau utilisé et de sa couleur, de même qu'il augmente lorsque la taille de la restauration diminue. Il est augmenté aussi lorsque la différence initiale de couleur est inférieure, et lorsque la translucidité est plus importante. Il serait aussi augmenté par le polissage.

La recherche s'intéresse à cet effet et de nouveaux matériaux créés possèdent un effet caméléon plus important.

Cependant, cet effet ne peut pas être espéré dans toutes les situations : lorsque la cavité est importante et qu'il n'y a pas de couche de dentine derrière, c'est-à-dire dans des restaurations de classe III ou IV. Sans un niveau approprié d'opacité dentinaire, même le matériau de couleur la mieux choisie apparaîtrait trop gris car un composite relativement translucide n'est pas capable de masquer l'arrière-plan sombre de la cavité buccale.

Pour finir, on notera que, dans le choix d'un composite, la translucidité joue un rôle important et doit être prise en considération au même titre que la couleur, puisque la translucidité peut modifier de façon cruciale la couleur du matériau.

Pour résumer,

La méthode d'évaluation par teintier présente des limites liées à des facteurs humains, environnementaux, ou encore aux moyens utilisés. Elle est néanmoins la technique la plus répandue, et peut rester fiable, si le chirurgien-dentiste a conscience des facteurs pouvant le léser.

Ainsi le praticien doit se fixer quelques règles à respecter lors du protocole de relevé de la couleur :

- Respecter le protocole en trois temps : luminosité, puis saturation, puis teinte, à l'aide d'un teintier organisé dans cet objectif.
- La luminosité s'observe de biais, sous éclairage diminué.
- Placer échantillon et dent bord à bord, sur le même plan.
- A réaliser en début de séance : on évite déshydratation de la dent et fatigue oculaire.
- Décider rapidement : évite l'adaptation chromatique.
- Maîtriser la translucidité et ses effets.

...Et autour du protocole :

- Ne pas négliger l'intérêt de la connaissance des mécanismes de la perception colorée : compréhension, analyse, communication améliorées.
- Connaître les statistiques : choix plus rapide car orienté.
- Avoir conscience du métamérisme.
- Vérifier régulièrement la qualité de son matériel.
- Surveiller sa vue.
- Maîtriser son éclairage et les couleurs en présence lors du relevé.

2 LES SOLUTIONS D'OPTIMISATION DE LA SITUATION :

Toute la science et les technologies de la couleur sont fondées sur l'étude du fonctionnement de l'être humain. Ainsi, pour optimiser notre perception de la couleur, et comprendre le fonctionnement de tous les appareils analysant la couleur, nous allons nous intéresser aux mécanismes qui permettent à l'être humain de percevoir les couleurs.

Cette analyse s'appuiera sur le fonctionnement des récepteurs oculaires pour déterminer quel doit être l'environnement, dans le cabinet dentaire, le plus adapté à l'enregistrement des couleurs.

2.1 La santé des yeux :

2.1.1 Physiologie de l'œil :

L'œil est l'organe permettant la transformation d'un signal lumineux optique en signal sensoriel, secondairement analysé par les processus cognitifs du cerveau qui interprète l'image tant sur les perspectives, ombres et reliefs, la texture et les transparences que sur les mouvements. Le système d'analyse des couleurs par l'œil humain est complexe. Il permet la distinction d'une centaine de couleurs spectrales.

Cet organe est comparable à un système photographique permettant l'accommodation, la focalisation de la lumière en un point précis ainsi que la régulation du flux lumineux entrant. Ainsi, après avoir traversé le cristallin, la lumière est focalisée sur la rétine où se trouvent les cellules sensorielles de la vision : les cônes et les bâtonnets. (48, 63)

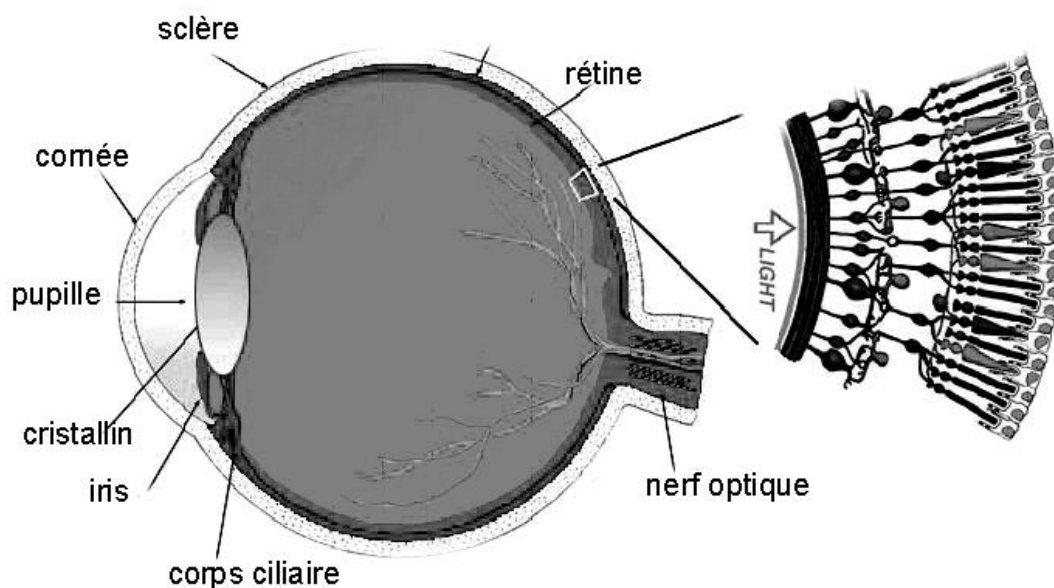


Figure 17 : Œil et rétine humaine. (47)

2.1.1.1 *Le cristallin :*

Il forme une lentille biconvexe transparente placée frontalement derrière la pupille et l'iris. Sa propriété essentielle est sa plasticité qui lui permet de modifier ses courbures et son indice de réfraction lors de l'accommodation. C'est un organe qui n'a ni nerfs, ni vaisseaux, tous ses échanges se faisant par diffusion à travers une capsule. Ceci explique que ses métabolismes soient fragiles, d'où la possibilité d'opacification ou cataracte.

C'est le cristallin qui nous empêche de percevoir les ultraviolets, car il n'est pas assez transparent pour laisser passer ces radiations.

En ce qui concerne les infrarouges, l'onde parvient bien jusqu'à nos photorécepteurs, mais ceux-ci ne possèdent pas de pigments visuels sensibles à ces longueurs d'onde.

En revanche dans le domaine du visible, l'œil peut faire la différence parmi plus d'une centaine de couleurs spectrales, ce qui montre la grande complexité du système d'analyse des couleurs. (22, 64)

Nous allons maintenant exposer les bases permettant d'approcher la compréhension des mécanismes menant à la perception des couleurs par l'être humain.

Le processus n'est que partiellement compris par les scientifiques.

2.1.1.2 *Anatomie cellulaire de la rétine :*

Bien que toutes les parties de l'œil soient importantes pour percevoir une bonne image, l'élément primordial pour la vision des couleurs est la rétine. La compréhension de l'organisation de la rétine a été le but de nombreux travaux scientifiques. Déjà en 1893 Ramón y Cajal donnèrent une description anatomique des types cellulaires constituant la rétine de nombreuses espèces de vertébrés ainsi qu'une interprétation fonctionnelle des connexions nerveuses. On sait grâce à ces travaux que l'organisation et la physiologie de la rétine chez les primates présentent des similarités qui permettent de la décrire pour tous les primates, et par conséquent pour les humains. (7, 50, 68)

De façon schématique, la rétine est composée de cellules neuronales et gliales disposées en trois couches de corps cellulaires et deux couches synaptiques : (7, 64, 68)

De la périphérie vers l'intérieur, la première couche de corps cellulaires est la couche nucléaire externe, monostatifiée, constituée des corps cellulaires des cellules photoréceptrices : ce sont les cônes, plus denses au centre, et les bâtonnets plus en périphérie.

Ces photorécepteurs sont apposés sur une couche de cellules plutôt noires : l'épithélium pigmentaire, qui absorbe la lumière non captée par les cônes et bâtonnets et réduit ainsi la quantité de lumière dispersée à l'intérieur de la rétine. Lors de la prise de teinte, la distribution non uniforme des cônes et bâtonnets permet à l'observateur de solliciter préférentiellement ses bâtonnets pour évaluer la luminosité en regardant la dent de façon excentrée. Ainsi il économise ses cônes pour l'évaluation de la saturation et de la teinte.

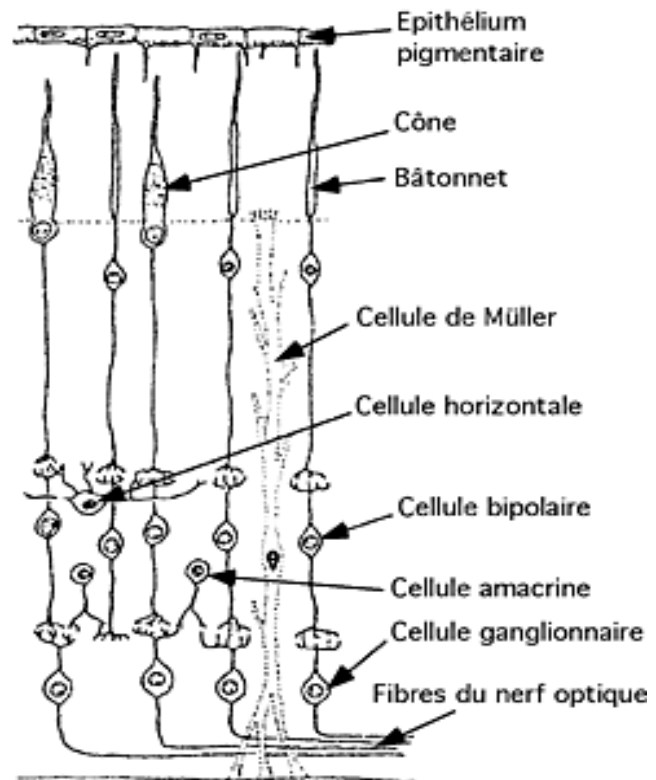


Figure 18 : Cellules constituant les couches de la rétine.
(64)

Ensuite, la couche nucléaire interne contient les corps cellulaires des cellules bipolaires, des cellules horizontales, des cellules amacrines, et des cellules gliales de Müller. Enfin, la couche la plus interne est composée des corps cellulaires des cellules ganglionnaires. Leurs millions d'axones se rejoignent de façon légèrement excentrée au milieu de la rétine pour donner le nerf optique. A cet endroit, il existe un vide en photorécepteurs, c'est une zone dite aveugle.

Entre ces couches de cellules s'intercalent les couches plexiformes externe et interne. Elles sont observables anatomiquement comme deux fines couches. La couche plexiforme externe renferme des connexions synaptiques très spécialisées entre les photorécepteurs et les cellules bipolaires et horizontales. La couche plexiforme interne est le lieu de contacts synaptiques entre les axones des cellules bipolaires et les dendrites des cellules ganglionnaires mais aussi avec les prolongements des cellules amacrines.

Enfin, la rétine contient aussi des cellules interplexiformes (Buser & Imbert, 1987) et des cellules gliales. (7, 47, 50)

2.1.1.3 *Le traitement de l'information électromagnétique colorée :*

L'organisation stratifiée de la rétine permet de distinguer deux voies de transmission de l'information : une voie verticale ou radiaire qui traverse toute l'épaisseur de la rétine, des photorécepteurs jusqu'aux cellules ganglionnaires, et deux voies transversales ou tangentielles, perpendiculaires à la première voie, qui sont les couches plexiformes (Boycott and Wassle, 1991 ; Kolb and Marshak, 2003). En d'autres termes, schématiquement, la rétine présente une double organisation architecturale construisant un réseau particulièrement complexe de traitement de l'information colorée reçue par nos pigments visuels. (7, 50)

Les fonctions des différents types cellulaires :

Les cellules de l'organe oculaire peuvent être partagées entre des cellules neuronales regroupant les photorécepteurs, les cellules bipolaires, horizontales et amacrines, les cellules interplexiformes, les cellules ganglionnaires, puis des cellules non neuronales que sont les cellules de l'épithélium pigmentaire et les cellules gliales.

Les photorécepteurs : cônes et bâtonnets (7, 34, 39, 47, 50, 63)

Ils transforment le signal lumineux : l'information portée par un photon est traduite en potentiel membranaire, puis en message chimique grâce au neurotransmetteur glutamate. La réponse dépend du nombre de photons captés. Ce codage de la lumière en potentiel membranaire est appelé fonction de transduction des photorécepteurs.

Chez l'être humain il y a environ 120 millions de bâtonnets, et 5 à 7 millions de cônes par rétine humaine.

Les bâtonnets, quinze fois plus nombreux que les cônes, perçoivent la luminosité et permettent la vision nocturne, ou scotopique. Ces cellules sont aussi associées à la détection des mouvements par le cortex. Leur nom est tiré de leur forme cylindrique.

Les cônes, quant à eux, sont spécialisés dans la vision diurne et colorée, ou vision photopique. Chaque type de cône a une bande passante limitée, dans des longueurs d'ondes correspondant à ce qui est perçu comme des couleurs, et l'Homme distingue trois couleurs de base, c'est une vision de type trichromie. Les reptiles et oiseaux, par exemple, disposent de quatre couleurs de base.

Chez l'Homme, il existe donc trois familles de cônes, selon leur courbe de sensibilité spectrale (Schnapf, Kraft, Nunn, & Baylor, 1988) : les cellules S (Short) perçoivent les longueurs

d'onde courtes, elles permettent de visualiser le bleu ; les cellules M (Medium) captent des longueurs d'onde correspondant au vert ; et les cellules L (Long) captent des longueurs d'onde correspondant au rouge.

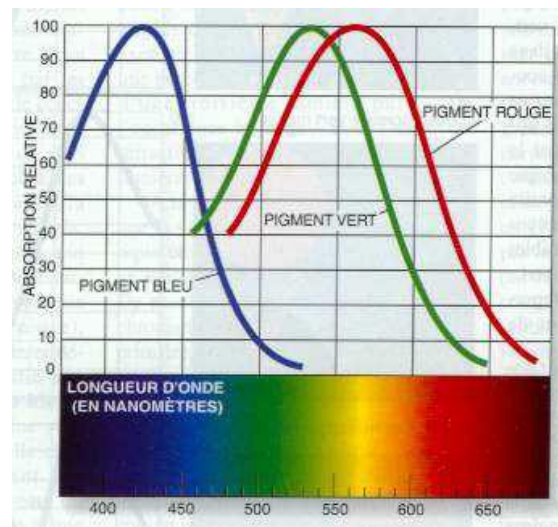


Figure 19 : Spectres d'absorption des trois pigments présents dans les cônes. (64)

Les couleurs Rouge, Vert et Bleu sont appelées couleurs psychologiques fondamentales. A partir des trois informations de quantité de rouge, de vert, de bleu fournies par les trois types de cônes et des informations de variation de luminosité fournies par les bâtonnets, le cerveau va synthétiser une impression colorée. (22)

Histologiquement, les photorécepteurs se présentent avec un péricaryon autour du noyau cellulaire dans lequel a lieu la synthèse des pigments visuels, stockés dans des replis membranaires pour les cônes, et dans des citernes pour les bâtonnets. Ces pigments sont composés d'une protéine porteuse qui détermine leur sensibilité spectrale, et qui est couplée à une molécule chromophore qui capte les photons. Au pôle inférieur des cellules, des évaginations cytoplasmiques définissent des terminaisons synaptiques avec les cellules horizontales et les cellules bipolaires. En regard, au sein du compartiment intracellulaire, des vésicules emplies de Glutamate s'accumulent densément au niveau présynaptique. (7, 50)

Chimiquement parlant, le mécanisme de la sensibilité spectrale évoqué dans le paragraphe précédent s'explique ainsi : un chromophore peut aussi être appelé « radical coloré » car c'est un groupe d'atomes pouvant se combiner chimiquement sans être modifié et entrer dans la constitution d'une molécule. Ce groupe chimique sera capable

d'absorption sélective lumineuse, et donc de détecter des rayonnements à longueur d'onde précise dans nos photorécepteurs.

C'est en fait la conformation structurale du groupement d'atomes qui donne au chromophore ses propriétés : il comporte une ou plusieurs double-liaisons qui formeront avec le reste de la molécule une séquence de doubles liaisons conjuguées, c'est-à-dire une alternance de doubles et simples liaisons. Le principe est le suivant : une séquence suffisamment longue de doubles liaisons conjuguées dans une molécule organique crée un nuage électronique délocalisé. Celui-ci pourra entrer en résonnance avec le rayon incident et ainsi l'absorber en partie, et réfléchir, diffuser ou transmettre d'autres rayons. C'est l'association du chromophore avec la protéine porteuse qui vient changer la fréquence d'absorption du chromophore en augmentant la délocalisation électronique. On obtient un pigment visuel réagissant à une longueur d'onde précise.

En ce qui concerne les bâtonnets, ceux-ci possèdent un seul type de pigment, la rhodopsine, constituée par une protéine: l'opsine, et le chromophore : 11-cis rétinol, aldéhyde de la vitamine A, dont la sensibilité maximale correspond à un rayonnement dont le pic est à 505nm. Etant donné que les bâtonnets ne possèdent qu'un seul type de photo-pigment, la rhodopsine, ceux-ci ne perçoivent pas de couleur : c'est pourquoi lorsque la lumière est faible, nous ne sommes pas capables de distinguer les différentes couleurs, et nous ne percevons que la variation d'intensité lumineuse.

Dans le cas des cônes, les pigments sont : cyanolabe pour les cônes S, chlorolabe pour les cônes M, et érythrolabe pour les cônes L, respectivement sensibles à la lumière de longueur d'onde : 437 nm soit une lumière bleu-violet, 533nm soit verte et 564 nm soit rouge. (7, 13, 34, 47, 50)

Leur constitution cellulaire permet donc à ces neurones de capter les signaux lumineux par l'intermédiaire de leurs pigments visuels inclus et ainsi, enclencher la chaîne de transmission de l'information colorée : l'absorption d'un photon incident par le chromophore entraîne des modifications moléculaires du pigment, puis ceci déclenche des phénomènes électrochimiques transitoires des photorécepteurs qui affectent leur polarité, ce qui provoque une libération des neurotransmetteurs par exocytose dans la fente synaptique (Chabre, 1985). C'est le point de départ de la transmission verticale du signal. (7, 47, 50)

Il est intéressant d'ajouter que les informations captées par les photorécepteurs ne permettent pas seulement de percevoir les différentes couleurs, mais grâce à la formation de chaînes associant deux types de cônes, ainsi que la complexité des synapses et arrangements cellulaires à l'intérieur du réseau rétinien, des informations de luminance, de brillance, de contraste sont aussi véhiculées à partir du recueil des photons lumineux.

Cônes et bâtonnets s'opposent quant aux propriétés de leurs pigments visuels: sensibilité forte pour les bâtonnets et faible pour les cônes, acuité forte pour les cônes et faible pour les bâtonnets, et enfin adaptation forte pour les bâtonnets et faible pour les cônes. (50)

La couche plexiforme externe :

Cette couche contient les prolongements cellulaires des photorécepteurs, des cellules horizontales et des cellules bipolaires : les dendrites des cellules bipolaires et horizontales s'imbriquent au niveau des pieds des cônes et bâtonnets. Ainsi, les photorécepteurs délivrent leur signal à la fois aux cellules horizontales et aux cellules bipolaires.

Cette couche synaptique est le premier niveau de transmission et de modulation de l'information nerveuse.

Les cellules horizontales :

Elles sont en contact avec les synapses entre les photorécepteurs et les cellules bipolaires. Elles interconnectent plusieurs photorécepteurs et sont connectées entre elles par l'intermédiaire de synapses électriques. Ces connexions établissent un champ récepteur de chaque cellule horizontale, bien plus large que celui d'un photorécepteur. Cette architecture permet ainsi un lissage de l'information transmise par les cônes : les cellules horizontales porteraient une information de luminance locale moyenne qui rentrerait en jeu dans l'adaptation, la modulation de la réponse du photorécepteur en fonction de la luminosité. (7, 47)

Les cellules bipolaires :

Celles qui sont en connexion avec les cônes transmettent l'influx nerveux sans phénomène important de sommation ou de concentration.

Celles qui sont en connexion avec les bâtonnets transmettent l'influx de multiples cellules (15 à 50) en le réduisant à une seule information globale. Ce mécanisme explique la faible capacité discriminative liée au fonctionnement des bâtonnets.

Ensuite, dans **la couche plexiforme interne**, les cellules bipolaires fournissent l'information aux cellules ganglionnaires, et cette information est modulée par environ une vingtaine de types de cellules amacrines. (7, 47, 64)

Les cellules interplexiformes :

Ces cellules ont été proposées comme modulateur de la transmission du signal entre les couches plexiformes externe et interne. (7)

Les cellules ganglionnaires :

Les cellules ganglionnaires sont les neurones de sortie de la rétine. L'information lumineuse a été prétraitée par les neurones des voies verticales et horizontales de transmission puis elle est enfin présentée aux cellules ganglionnaires, ultime maillon dans le transfert de l'information de la rétine vers les centres supérieurs de l'information visuelle. Les cellules ganglionnaires transmettent le signal nerveux sous forme de potentiels d'action, le long de leurs axones, vers l'encéphale. Ces axones formant le nerf optique transmettent donc l'information à de grandes distances de la rétine, d'où la nécessité de la génération de potentiels d'action.

En fait, les potentiels d'action sont générés de façon spontanée et c'est leur fréquence de décharge qui est amplifiée ou diminuée par l'apparition de lumière dans leur champ récepteur et qui constitue le message. (7, 47, 50, 81)

Les cellules de l'épithélium pigmentaire :

Ces cellules non neuronales forment la couche la plus externe de la rétine, séparant la rétine neurale de la choroïde (Newman, 1994). Ces cellules contiennent la mélanine, pigment grâce auquel elles peuvent absorber la lumière incidente qui n'a pas été captée par les photorécepteurs, ces cellules participeraient également à la régénération des segments externes des photorécepteurs. Elles aident au maintien d'un environnement ionique approprié pour la fonction des photorécepteurs en transportant des ions, métabolites et autres substances. (7, 47)

Les cellules gliales :

Trois grandes populations gliales ont été décrites au niveau de la rétine: les cellules de Müller, les astrocytes et les microglies. (7)

Les cellules gliales de Müller :

Ce sont les principales cellules gliales de la rétine. Elles ont été décrites pour la première fois par Müller en 1851.

Elles constituent un support architectural à travers l'épaisseur de la rétine et forment les limites de celle-ci au niveau de la limitante externe en réalisant des jonctions avec les segments externes des photorécepteurs et au niveau de la limitante interne par liaison de leurs propres pieds.

Elles protègent les neurones d'une exposition excessive aux neurotransmetteurs en régulant le milieu extracellulaire. Elles interviennent également dans le maintien de l'homéostasie rétinienne en régulant la concentration extracellulaire en potassium.

Les astrocytes : ils joueraient un rôle important dans la mise en place et le maintien de la barrière hémato-rétinienne (Chan-Ling et Stone, 1991). De plus, comme les cellules gliales de Müller, elles pourraient être impliquées dans l'homéostasie ionique en régulant la concentration de potassium extracellulaire et le métabolisme des neurotransmetteurs tels que le GABA.

Les microglies : elles sont retrouvées dans toutes les couches de la rétine.

2.1.1.4 ***Processus mentaux :***

A cette organisation rétinienne particulière s'ajoutent des processus mentaux qui aboutissent à un niveau de perception très élevé. Prenons pour exemple l'expérience suivante : si l'on observe côte à côte une lumière de type lumière du jour naturelle et une lumière incandescente, il paraît évident que la dernière est plus jaune. Cependant si l'on regarde un même papier blanc sous l'une ou l'autre des lumières, celui-ci apparaîtra blanc dans les deux cas.

Notre appareil visuel s'ajuste à l'illuminant.

Une part de l'explication tient du phénomène que l'on appelle adaptation chromatique : au niveau de la rétine, il y aurait une sorte de blanchiment de pigments visuels de cônes associé à des processus synaptiques de contrôle dans la chaîne de transduction du signal. Le phénomène serait aussi partiellement mental : pour des objets bien connus, même sous un illuminant différent, le cerveau va continuer de le percevoir dans sa couleur d'origine. De la même façon, nous sommes capable de discerner un objet blanc à l'ombre d'un objet gris placé à la lumière du soleil même si le stimulus venant du blanc et arrivant à l'œil est plus faible que celui venant de l'objet gris. (68)

Ainsi, notre système visuel permet la correction des écarts de température de couleur liés à l'illuminant, elle est accomplie automatiquement par le cerveau. Ceci n'est pas possible dans les instruments créés aujourd'hui : le manipulateur doit réaliser l'ajustement en fonction de l'éclairage ambiant.

Les procédés menant aux divers phénomènes de ce type sont très complexes et font du système visuel humain (œil et cerveau) un instrument de précision inégalée pour discerner les couleurs et caractéristiques colorées.

En résumé, la vision des couleurs dépend de deux constituants de l'œil :

- Le cristallin est traversé par la lumière, qu'il focalise sur la rétine.
- La rétine : ses bâtonnets captent la luminosité, ses cônes captent le rouge, le vert, le bleu.

Les bâtonnets sont en périphérie, les cônes au centre. Les bâtonnets sont plus sensibles que les cônes, tandis que ces derniers sont plus précis. Ces caractéristiques impliquent que la luminosité peut être déterminée en premier, en regardant de biais, sans saturer les cônes, qui détermineront teinte et saturation.

L'anatomie et le fonctionnement complexe de l'œil expliquent la précision inégalable de notre vision des couleurs et dimensions complémentaires des dents. Ils révèlent aussi la fragilité du système et les erreurs d'interprétation qu'il peut engendrer.

Des mécanismes mentaux viennent réadapter constamment notre perception, ils peuvent aussi générer des erreurs. C'est le problème de l'adaptation chromatique.

2.1.2 Variations :

La perception colorée est donc très précise et analyse avec acuité la grande variété des caractéristiques optiques d'un objet, grâce à l'interaction extrêmement complexe de facteurs nombreux et de nature variée. Malheureusement, ceux-ci la rendent aussi particulièrement variable, inter-individuellement, comme intra-individuellement.

Nous verrons dans ce paragraphe les différents facteurs physiopathologiques pouvant influencer la perception rétinienne.

2.1.2.1 La cataracte :

On admet que fréquemment la vision des couleurs se modifie progressivement avec l'âge car, généralement, vers 55 à 60 ans, apparaît une opacification chronique du cristallin : la cataracte, qui diminue la perception du contraste et la perception des bleus. Les couleurs virent au jaune et l'acuité visuelle diminue. (15)

Exemple : Claude Monet et sa cataracte (25).

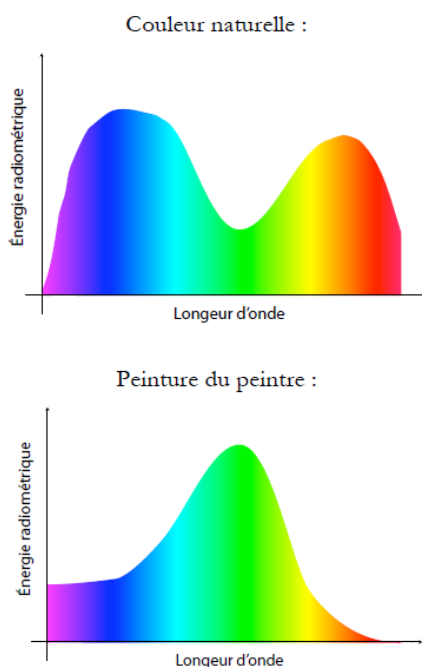


Figure 20 : Le bassin aux Nymphéas, 1899
Sans cataracte



Figure 21 : Le bassin aux Nymphéas, 1923-
Avec cataracte

On constate que Claude Monet a utilisé beaucoup de jaune pour reproduire ce qu'il percevait et que son acuité a profondément baissé. Une cataracte est une pathologie du cristallin qui s'opacifie et jaunit progressivement. La perception est faussée par ce filtre placé dans l'œil. Ici, le peintre voit tout en jaune.



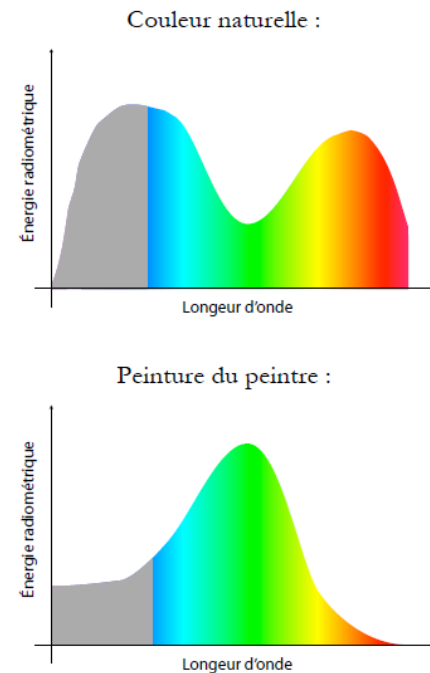
Ceci dit, il ne faut surtout pas penser que le peintre a utilisé plus de jaune parce qu'il voit plus en jaune. En effet, si la nature est plus jaune, la peinture sur la palette est aussi jaunie. On ne devrait pas percevoir de modification sur le tableau.

L'explication est plus complexe et tient au fait que la couleur naturelle de la scène n'a pas la même composition spectrale que la couleur recréée avec de la peinture par le peintre : la première est un mélange d'énergies lumineuses rouge et bleue qui donne une sensation verte tandis que la deuxième couleur est un mélange de teintes vertes.

En revanche, ces deux couleurs sont perçues d'une manière identique : elles sont métamères.

Ensuite, voici nos deux couleurs métamériques perçues par un œil cataracté : le cristallin bloque la transmission des longueurs d'onde bleues. Nos deux teintes sont affectées de la même manière. Cependant, la couleur naturelle est proportionnellement plus affectée que la teinte de la peinture : elle sera perçue plus rouge que la peinture. Le peintre rajoutera donc plus de teintes chaudes jaunes et rouges dans sa peinture.

Figures 22 : Spectres des couleurs naturelles et de peinture, vus par un œil normal puis un œil cataracté. (25)



Ainsi, avec l'âge, le dentiste doit être conscient de cette altération fréquente, et faire surveiller sa vue par un spécialiste.

2.1.2.2 Les dyschromatopsies :

Il existe d'autres pathologies de la vision des couleurs : environ 8% des hommes et 0,5% des femmes possèdent une sensibilité spectrale liée aux cônes rétiniens différente de la sensibilité spectrale dite « normale » décrite précédemment (*voir annexe 3*). Ils sont dits déficients visuels car ils distinguent les couleurs de façon moins précise. Ces déficiences sont rassemblées sous le terme de dyschromatopsies. (25, 50, 64, 80)

Les dyschromatopsies héréditaires sont plus connues sous le nom de Daltonisme.

Le sujet qui ne voit que deux couleurs est dit « dichromate ». Le cas de dichromatisme le plus répandu (1% des hommes et 0,02% des femmes) est le sujet protanope, qui a des difficultés à distinguer les teintes rouges des vertes. Ceci pourrait être lié à un manque en cônes L.

Un dichromate peut aussi être deutéranope : il ne distingue pas non plus les teintes rouges et vertes, mais on ne sait pas si cela serait lié à un manque en cônes M ou à une anomalie dans les chaînes de transmission des informations fournies par les cônes sensibles au rouge et au vert.

Ensuite, les monochromates ne distinguent pas les couleurs, ils voient en noir et blanc. Une des formes de monochromatie serait liée à des cônes non fonctionnels : le sujet voit comme dans la nuit. Une autre forme serait liée à une déficience dans les chaînes de transduction du message.

Le sujet qui perçoit une des trois couleurs de façon perturbée est dit trichromate anormal. Cette anomalie concerne environ 5,9% des hommes, et 0,4% des femmes. Des études en génétique moléculaire associeraient cette pathologie à une anomalie de substitution d'un acide aminé contenu dans le pigment des cônes M et L.

Les personnes dichromates ou monochromates ont conscience de leur déficience. En revanche, le praticien trichromate anormal peut ne pas être diagnostiqué, et avoir des difficultés dans son exercice. Bien que la qualification des couleurs soit utilisée de façon très régulière au cabinet, en prothèse et dans les codes couleurs des instruments, il n'existe pas de dépistage systématique pour les praticiens. Il faut consulter régulièrement, et réaliser un test d'Ishihara en cas de doutes. (15, 68)

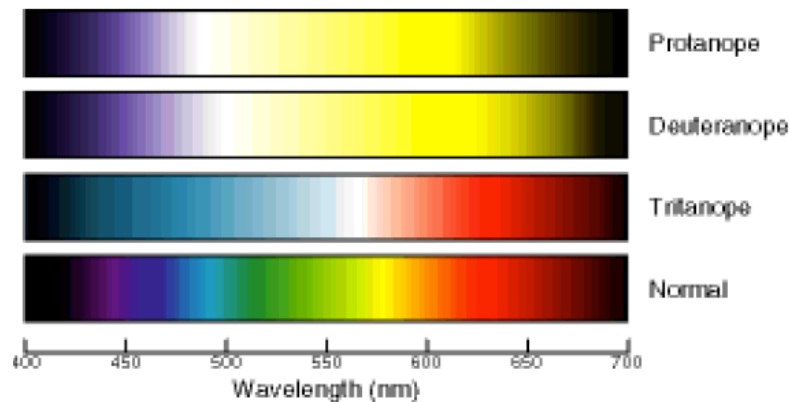


Figure 23 : Apparence de la perception du spectre pour différents systèmes. (25)

Les dyschromatopsies peuvent être d'origine génétique, acquises à cause de maladies ou liées à des médicaments.

Par exemple, la dyschromatopsie acquise liée au diabète se révèle être l'une des plus fréquentes anomalies acquises de la vision des couleurs. L'altération touche la vision jaune-bleu, elle est asymétrique, évolutive. Elle apparaît souvent avant tout autre signe clinique ou fonctionnel de rétinopathie dans le diabète.

Les autres causes d'acquisition de dyschromatopsie peuvent être le glaucome, un décollement rétinien, la DMLA (Dégénérescence Maculaire liée à l'Age). De même, des médicaments comme l'érythromycine (antibiotique), l'indométacine (anti-inflammatoire non stéroïdien), le triméthadione (anti épileptique), les dérivés de la chloroquine (anti paludéen), ou des dérivés de la Phénothiazine (insecticide), ou encore des antidiabétiques, anti tuberculose, l'alcool, la digitaline (insuffisance cardiaque), des contraceptifs oraux, le viagra® causent eux aussi des troubles de la vision des couleurs (voir annexe 4).

Ajoutons que ces médicaments peuvent aussi affecter l'accommodation et la vision binoculaire : ceci modifiera légèrement la vision des couleurs, mais surtout, c'est la vision des reliefs qui sera lésée. De plus, ils peuvent favoriser une sécheresse oculaire.

Contrairement aux dyschromatopsies héréditaires qui sont immuables, les anomalies acquises sont variables au décours de la maladie qui les a provoquées et peuvent être indirectement curables par le traitement de la maladie causale.

2.1.2.3 *Défauts de réfraction :*

En ce qui concerne les caractéristiques propres aux yeux telles que leur couleur, leur santé ou le port de lentilles correctrices, mais aussi le sexe et l'âge de l'observateur les études relatives à ces sujets se heurtent à des difficultés et la littérature en reste aujourd'hui peu garnie. (11, 15, 22)

Les problèmes de vue plus communément rencontrés que les dyschromatopsies, tels que la myopie, l'hypermétropie et l'astigmatisme sont liés à une réfraction anormale de la lumière. Lorsqu'ils sont corrigés, par des lunettes ou des lentilles de contact, l'influence de ces pathologies lors de l'observation de couleurs n'a pas été démontrée à ce jour, et si l'on en envisage une, elle semble négligeable. En revanche, si ces défauts de réfraction ne sont pas corrigés, ils sont soumis au problème suivant : chez le sujet normal, c'est le milieu du spectre, le jaune, qui se trouve dans le plan de la rétine, avec le bleu en avant et le rouge en arrière de celle-ci. Mais, dans les amétropies, il n'en va plus de même : le sujet myope, dont l'œil est « trop long » se trouve focalisé dans le rouge ; alors que le sujet hypermétrope, dont l'œil est « trop court », se trouve au contraire focalisé dans le bleu. Il en résulte que le myope voit plus net sur fond rouge et l'hypermétrope plus net sur fond bleu. Ceci permet d'avancer que des défauts de réfraction non corrigés peuvent causer une perte de qualité de distinction des couleurs. Des études supplémentaires à propos de ces problèmes seraient intéressantes. (11, 64)

Quoi qu'il en soit, ces problèmes de réfraction sont associés à un défaut de vision des reliefs. Le praticien aura des difficultés à observer les aspérités de surface dentaire.

2.1.2.4 *Couleur des yeux*

En ce qui concerne la couleur des yeux, il a été démontré que celle-ci n'influence pas la capacité à distinguer la couleur. (11)

2.1.2.5 **Genre :**

Notons que de nombreuses études ont tenté de trouver une différence de capacité de détermination de la couleur liée au sexe, sans résultat statistiquement significatif. L'unique inégalité relevée se trouve dans le pourcentage de déficients visuels : les hommes seraient plus touchés que les femmes. En revanche, la faculté de discriminer les couleurs est égale entre hommes et femmes dont la vue est normale, le sexe n'est donc pas un facteur de variation dans le relevé de couleur. (11, 41)

2.1.2.6 **Âge :**

Les opinions restent très controversées quant à l'influence de facteurs tels que l'âge du praticien car simultanément aux modifications liées à l'âge, le praticien acquiert l'expérience des années de restaurations pratiquées. De ce fait, il est très difficile d'apprécier les effets de chacun des facteurs isolés, d'autant plus que des variables telles que les changements physiologiques, la fatigue oculaire, les déficiences viennent s'entremêler. Les études concernant le rôle de l'âge sont donc compromises par des inconstances et des biais trop importants. (11)

2.1.2.7 **Adaptation chromatique :**

Des variations intra-individuelles peuvent aussi être liées à la physiologie rétinienne, c'est-à-dire à une modification non pathologique de la sensibilité rétinienne par stimulation ou saturation de ses photorécepteurs. Nous décrirons plus loin le principe des sept contrastes. Le dentiste qui cherche la couleur d'une dent ne doit pas fixer cette dernière pendant plus de cinq secondes, car les yeux s'accommodent au rouge et au jaune. (71)

Le phénomène d'adaptation chromatique entrerait ici en jeu : elle serait liée au fonctionnement rétinien, où les diverses connexions à travers le complexe synaptique modulent le signal initial précis envoyé par les cônes. (68)

2.1.2.8 **Fatigue oculaire :** (10, 65)

Enfin, abordons une perturbation très fréquente à laquelle le dentiste doit adapter sa pratique : la fatigue oculaire. Elle survient lors d'un travail quotidien exigeant, de haute précision, dans des conditions particulières assez difficiles comme celle de la cavité buccale. Elle est liée à des facteurs comme l'éclairage ambiant, l'intensité lumineuse éclairant l'objet de travail, les contrastes, la petite taille de notre objet de travail. Le praticien pourra bien sentir qu'il ne discerne plus correctement les légères différences de couleur, ou en être inconscient : c'est là que le risque d'erreur est important.

Définissons tout d'abord le problème : la fatigue oculaire est une gêne, un inconfort. Celle-ci serait un effet physiologique résultant de sollicitations excessives des muscles oculaires et de la rétine pour tenter de conserver une image nette par des ajustements inefficaces. Elle est réversible. En cas de travail aussi précis que celui du chirurgien-dentiste, dans des conditions médiocres de visibilité, les muscles des yeux sont en permanence en action pour régler la mise au point, le diamètre de la pupille. Comme tous les muscles, ils fatiguent après des efforts prolongés. De plus, le fonctionnement de la rétine, par des transformations chimiques dans les photorécepteurs selon les variations de la lumière reçue, implique la nécessité de temps d'adaptation et de récupération, certes très courts, mais indispensables.

Une sollicitation longue des yeux, sans pause, des variations fréquentes de l'intensité et des contrastes forts entraînent également une saturation ressentie comme une fatigue visuelle avec un temps augmenté de récupération.

La fatigue s'accompagne d'une réduction de la capacité à réaliser une tâche visuelle et d'une modification de la stratégie d'accomplissement de cette tâche. Elle constitue un signal d'alarme.

Elle va se traduire par des signes subjectifs ressentis par le sujet, mais aussi par une baisse de performance visuelle problématique : la vision peut se troubler facilement, une persistance anormale d'images consécutives peut apparaître. Les symptômes ressentis seront des picotements, une sensation de tension du globe oculaire, des yeux rouges, sécheresse de l'œil, une lourdeur des paupières, sensation de brûlure ou de démangeaison, une douleur à la pression, ou encore des maux de tête, nausées ou algies cervicales. Ces derniers symptômes surviennent pour une surcharge visuelle prolongée. Les étapes du début de surcharge sont difficiles à identifier autrement que par la gêne et la connaissance de l'effort requis pour focaliser.

Schématiquement, la vision des couleurs par l'œil humain dépend des photons qui atteignent les photorécepteurs rétiniens : les cônes permettent la vision trichromique tandis que les bâtonnets distinguent la luminosité.

En réalité, la rétine est un véritable complexe synaptique unique parmi toutes les synapses du système nerveux central, à la fois par sa complexité et sa spécialisation (Sterling, 1995).

Ceci explique la précision du système, mais aussi, malheureusement, les difficultés que nous avons à définir précisément chaque dimension de la couleur et les multiples variations qui pourront abaisser la qualité de distinction de la couleur par le praticien.

Le praticien doit comprendre les mécanismes visuels des couleurs afin d'organiser sa séance et son cabinet pour éviter des erreurs, optimiser l'étape de relevé de la couleur. La fatigue oculaire est une grande source d'erreurs.

Lors du travail prolongé sur une dent, s'aménager des temps de pause, en regardant au loin, reposera la vue.

Il faut aussi prendre conscience des variations pathologiques, et s'imposer un contrôle régulier de sa vision, chez un spécialiste.

2.2 Les éclairages du cabinet :

L'éclairage global du cabinet doit être optimisé, non seulement pour éviter une fatigue oculaire qui abaisserait les qualités visuelles du praticien, mais aussi et surtout pour assurer une observation de la totalité des multiples caractéristiques des dents, à commencer par la totalité des nuances colorées que celles-ci sont capables d'émettre vers nos yeux.

Une étude comparant la discrimination individuelle des couleurs en lumière naturelle et en lumière corrigée par des étudiants en chirurgie dentaire a été menée en 2006. Les résultats montrent que ceux-ci ont un potentiel de discrimination des couleurs en lumière corrigée significativement plus élevé qu'en lumière naturelle.

Une autre étude, menée en 2004, a comparé différents facteurs dont dépend la précision de la détermination exacte de la couleur, tels que le type de résine, son épaisseur, l'expérience du praticien. Il en ressort que le paramètre le plus influent est la qualité de la lumière. (71)

Pour se créer un environnement approprié à un choix correct de couleur de dent, le praticien doit comprendre le rôle des divers facteurs de « visibilité ».

Les deux caractéristiques principales qui permettent de bien choisir un éclairage sont sa température de lumière émise et son Indice de Rendu des Couleurs.

2.2.1 La température d'une couleur :

Elle est exprimée en degrés Kelvin.

C'est Lord Kelvin, au XIXème siècle, qui eut l'idée de comparer les variations de couleur de la lumière du jour avec celles d'un corps non coloré (corps noir) chauffé à haute température : il passe successivement du rouge, au jaune, puis blanc et enfin au bleu. Visualiser un tisonnier que l'on chauffe illustre très bien cette notion : avec l'augmentation de température, le métal change de couleur en passant par le rouge, le jaune, puis le blanc avec des reflets bleutés. (22, 30, 43)

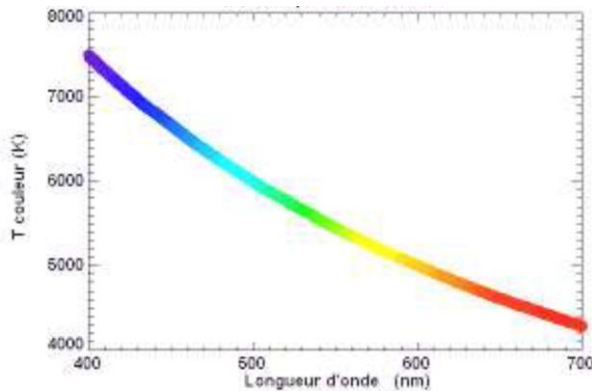


Figure 24 : Représentation graphique de la température en fonction de la correspondance couleur - longueur d'onde.

A chaque couleur visible par l'œil humain est associée une température : rouge = 4000°K ; jaune = 5000°K ; vert = 5700°K ; bleu = 6000°K ; violet = 7000°K.

Il propose ainsi une comparaison commode pour classer les illuminants naturels et artificiels. Cette notion permet de caractériser la dominante colorée qui varie en fonction de la lumière qui illumine l'objet. En effet nous avons vu que la couleur est intimement liée à la lumière.

Ceci est illustré au cours de la journée : les couleurs ont plutôt une dominante bleutée au milieu de la journée, et jaune-orangée au crépuscule.

La température de couleur est finalement l'indice de neutralité du blanc. C'est une notion très importante lorsque l'on manipule des images en couleur, car cela signifie que la référence que l'on nomme blanc peut prendre une teinte non neutre qui va influencer l'ensemble des couleurs.

A 5500°K, un corps noir émet à peu près la même quantité d'énergie dans toutes les longueurs d'onde. C'est à cette température que les couleurs nous semblent naturelles.

Généralement, on classe les sources lumineuses en fonction de leur température d'émission.

2.2.2 L'indice de rendu des couleurs : IRC.

Il correspond à la capacité d'un illuminant à restituer toutes les composantes du spectre visible, sans modification de couleur.

En fait, toutes les longueurs d'onde ne sont pas nécessaires pour produire une lumière blanche : il suffit d'additionner les trois couleurs primaires additives. Or la lumière ambiante naturelle est un mélange de lumières de longueurs d'ondes beaucoup plus variées. Un éclairage artificiel peut rendre une lumière blanche de température idéale (5500°K) sans posséder l'intégralité des diverses longueurs d'ondes existant dans la lumière du jour. Dans ce cas, l'objet observé ne reflètera que les lumières reçues, et peut donc guider vers une mauvaise correspondance.

L'indice de Rendu des Couleurs s'exprime en pourcentage, de 0% pour une source monochromatique à 100% pour une source restituant le même spectre que la lumière du jour de référence. On recherchera un IRC le plus élevé possible. Pour le choix de couleur des dents, il est recommandé que celui-ci soit supérieur à 90%. (71)

2.2.3 Les illuminants ou éclairages normalisés par la CIE : (15, 43, 45, 52, 62, 68)

- Illuminant standard A : il diffuse une lumière incandescente. Sa distribution spectrale est la même que celle émise par un corps noir à 2856°K. Il est fréquemment retrouvé dans les habitats des patients.

- Illuminant standard B : il recrée la lumière directe du soleil à midi, à 4874°K.

- Illuminant standard C : il recrée la lumière moyenne du jour, avec soleil et ciel bleu, à 6774°K.

- L'illuminant standard D : il produit une lumière du jour dans un ciel uniformément brumeux, c'est-à-dire sans soleil dégagé.

D65 correspond à la température de couleur de 6500°K. C'est la lumière du ciel sans celle du soleil. Il est caractérisé par une très légère dominante bleue.

L'éclairage normalisé D50 correspond à la lumière solaire avec une température de couleur de 5000°K (attention, tous les illuminants 5000°K ne sont pas D50 !). Il est caractérisé par une très légère dominante jaune. De même il existe des illuminants D55 ou D75 qui diffusent une lumière du jour dont les températures sont respectivement de 5500°K et 7500°K.

- Illuminant F : pour les lampes à fluorescence. Il n'existe pas de définition précise, chaque lampe a sa propre courbe d'énergie. F2 diffuse une lumière de température 4230°K. Il existe aussi F9 qui représente une lumière froide issue d'une lampe à fluorescence de 4150°K.

- Illuminant TL84 : il est fréquemment rencontré sur les lieux de travail, dans les bureaux, ou encore dans les magasins.

2.2.4 Eclairage idéal du cabinet :

La norme française EN 12464-1 indique précisément six conditions nécessitant chacune individuellement la mise en place d'un éclairage spécifique. Les contraintes du métier de dentiste réunissent cinq des six conditions énoncées par la norme, à savoir : travail très visuel, très haute précision du travail, contrastes des détails ou dimensions de la zone à observer faibles, tâches à effectuer sur une durée importante, erreurs coûteuses à

corriger. La sixième condition est une faiblesse de la capacité visuelle, condition remplie par toutes les personnes portant lunettes ou lentilles.

Le parfait éclairage de la salle de soins s'impose donc de façon incontournable dans l'exercice de l'art dentaire. (20)

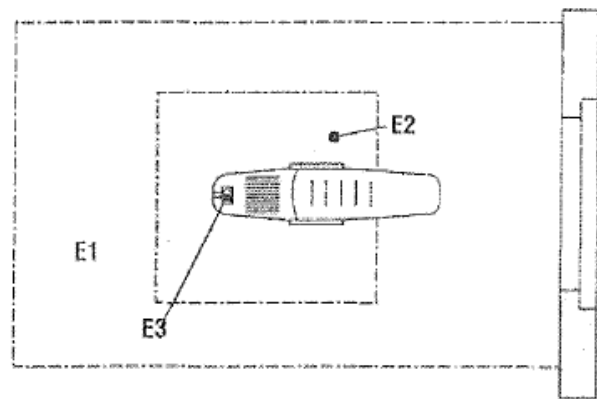
2.2.4.1 *Caractéristiques colorimétriques de l'illuminant :*

En ce qui concerne la reproduction de couleurs, classiquement il est conseillé de choisir la couleur de la dent à la lumière du jour au nord, par une journée moyennement ensoleillée. Malheureusement ces conditions ne sont pas toujours de mise. Il est donc préférable de standardiser le choix de la teinte sous une source lumineuse artificielle proche de la lumière du jour. Le praticien doit donc installer un éclairage approprié.

Il est recommandé d'utiliser un éclairage artificiel de type lumière du jour, avec un spectre blanc continu, diffusant aussi des ultraviolets.

L'indice de rendu des couleurs doit être au minimum de 90% dans les zones E1 et E2. Il pourra être de 85 dans E3 (Kubler, 2000).

Remarque : C'est la norme d'éclairement de la salle de soins DIN 67505 qui définit les différentes zones de travail : E1 zone de circulation, E2 zone de travail, E3 zone opératoire.



La température de lumière classiquement recommandée en odontologie est de 5500°K. D'autres auteurs préfèrent une lumière de température de 5000°K, qui présente une répartition spectrale plus équilibrée, d'autres encore recommandent 6500°K. De nombreuses études de recherche utilisent l'illuminant D65 comme standard.

On préférera un illuminant D50 ou D55 car ils offrent un contraste suffisant, et aplatissent beaucoup moins les couleurs qu'un illuminant à 6500°K, qui donne un contraste plus fort masquant les reliefs. (11, 15, 18, 39, 41, 43, 45, 68)

Ajoutons qu'il ne faudra pas se contenter de ces lumières du jour lors d'un choix de couleur. Il sera recommandé de disposer de divers éclairages dans le cabinet dentaire et tester la comparaison entre la dent et l'onglet du teintier sélectionné sous d'autres sources lumineuses, comme par exemple un illuminant de type A, afin de vérifier

visuellement que le métamérisme soit minime dans les divers environnements où se trouvera fréquemment le patient. Le dentiste peut ainsi prévoir le métamérisme et rechercher une couleur correspondant mieux à la totalité des différents illuminants. Il recherche une sorte de moyenne entre les différentes couleurs métamériques qu'il observe.

Cette organisation est fortement conseillée, même si, comme nous l'avons vu en fin de première partie, il existe un écart entre métamérisme observable entre échantillons de teintier et dent et métamérisme entre échantillons de teintier et matériau de restauration : cette différence de comportement optique fait persister un certain degré d'incertitude, mais celui-ci sera largement diminué par le respect des recommandations précédemment énoncées qui sont donc d'un grand intérêt. (18)

Précisons que la lampe du scialytique, à incandescence, n'est absolument pas appropriée pour la détermination de couleur : elle émet une lumière plutôt dans le spectre rouge-jaune, et plutôt basse dans les bleus, de température moyenne de 3800°K. Ainsi on peut observer que si l'on illumine, avec le scialytique, un échantillon opaque de rouge ou de jaune, ceux-ci ressortiront plutôt vifs, tandis qu'un échantillon de bleu paraîtra plus faible et plus difficile à voir. De plus, la translucidité de l'émail est plus importante pour des longueurs d'ondes plus grandes. Donc celui-ci sera plus translucide sous une lumière riche en jaunes et rouges, faisant plus apparaître la dentine et donc une dent plus rouge, à saturation plus élevée et luminosité plus faible par rapport à la réalité. De plus l'IRC moyen des lampes scialytiques est de 75%. (9, 23, 71)

En revanche, après le relevé de couleur, le praticien pourra vérifier l'absence de métamérisme sous la lampe du scialytique. Il pourra aussi observer plus aisément les caractéristiques et aspect de surface dentaire : en effet les reliefs sont mieux révélés sous les illuminants allant vers 3500°K que sous les illuminants à température plus élevée.

2.2.4.2 L'éclairement :

En ce qui concerne l'éclairement, exprimé en lux, sa valeur de choix dépend de la précision du travail. Les objectifs d'un choix approprié d'éclairement seront d'éviter fatigue oculaire, éblouissement. (9, 12, 44, 61, 71, 80)

Dans les zones ne nécessitant pas un travail très précis, il pourra être de 200 à 300 lux. Pour la zone E1, la norme DIN67505 préconise 500 lux ; 1000 lux en E2. Tandis que dans les zones de travail demandant une très haute précision, telle que E3, un éclairement de

1500 à 2000 lux est recommandé par la norme française NF35-103 ainsi qu'une étude INRS*. Le plafonnier doit donc être installé au-dessus et perpendiculairement au fauteuil à une hauteur permettant de diffuser une lumière d'intensité située entre 1500 et 2000 Lux.

La lumière doit être diffuse, au mieux. Ou, au moins, elle doit éclairer l'objet à 45° par rapport à la surface de celui-ci tandis que l'observateur se place avec un axe de vue à 0° par rapport à la perpendiculaire à la surface de la dent.

Les besoins en éclairage sont donc très variables en fonction de la zone du cabinet. En revanche, il faudra veiller à éviter des contrastes trop importants entre les différentes surfaces balayées par les yeux du praticien afin de conserver un confort visuel correct et réduire la pénibilité du travail des yeux. Ensuite, si l'intensité de la lumière incidente est trop forte, les bâtonnets fatiguent, ce qui provoque un éblouissement. Des contrastes de luminosité trop élevés peuvent aussi causer un éblouissement. Un éclairage à lumière indirecte, diffusant la lumière au lieu de la projeter, peut être la solution idéale pour équilibrer l'éclairage des différentes zones. (Kubler, 2000.)

L'éblouissement dépend aussi de l'indice de réflexion de l'objet éclairé. Ainsi, la norme DIN recommande que toutes les surfaces des zones E2 et E3 soient mates pour éviter d'éblouir praticien, assistante et patient.

Afin de prévenir la fatigue oculaire, le praticien devra surveiller la qualité de l'éclairage de tout le cabinet, en assurer la maintenance et le renouvellement.
Il faudra aussi éviter un contraste d'éclairage trop important entre zone de travail et environnement général, qui accélère la fatigue des muscles d'appoint oculaire.

*Remarque : L'INRS est l'Institut National de Recherche et de Sécurité pour la prévention des accidents du travail et des maladies professionnelles. Association loi 1901, sans but lucratif, organisme généraliste en santé et sécurité au travail, l'INRS intervient en lien avec les autres acteurs institutionnels de la prévention des risques professionnels.

2.2.4.3 **La gestion :**

Les contraintes principales de l'installation d'un éclairage approprié à un relevé de couleur seront la gestion de l'usure et du renouvellement des sources et son coût. Effectivement, les tubes fluorescents doivent être changés une fois par an car leur température de couleur se modifie avec le temps.

La gestion de l'éclairage du cabinet doit concerner tout praticien non seulement en vue d'une visualisation correcte des couleurs, mais aussi parce que des conditions défavorables de vision entraînent une fatigue inutile, une perte de concentration, une perturbation de l'humeur à long terme, la multiplication des erreurs, un travail de moindre qualité. (65)

Pour la vision colorée, température de couleur et indice de rendu des couleurs sont les caractéristiques à connaître. Les éclairages de type D50 ou D55 sont les plus adaptés à l'odontologie.

Pour prévenir la pénibilité du travail de l'œil, ce sera l'éclairement : son intensité, et les contrastes.

2.3 Les couleurs du cabinet :

2.3.1 Principe des sept contrastes :

Chaque couleur a une réalité propre : elle est définie par sa longueur d'onde et ses coordonnées trichromatiques. Mais ces couleurs 'physiquement définies' sont perçues de façon particulière en fonction de leur environnement immédiat, de la forme, de l'état de surface de l'objet concerné, et de la physiologie de l'œil.

L'environnement a une forte influence sur notre vision. Notre perception des couleurs est toujours faussée, parce que lorsque l'on regarde un objet, l'œil a tendance à mesurer, à comprendre, à évaluer sa couleur en fonction de la scène qui l'entoure : tout est affaire de contrastes.

Dans la pratique de l'odontologie, il est primordial de comprendre et de tenir compte des mécanismes des interactions qui modifient effectivement la perception des couleurs. Ceux-ci relèvent principalement de sept contrastes : (2, 23, 28, 46, 63, 64, 80)

- Le contraste de la couleur en soi : des couleurs différentes juxtaposées s'intensifient mutuellement, et plus celles-ci sont opposées, plus ceci est accentué.
- Le contraste clair/obscur ou de valeur : apprécié par les bâtonnets de la rétine, ce contraste repose sur les différences de luminosité ou de brillance entre des couleurs juxtaposées. Au niveau des dents, c'est ce type de contraste qui fait remarquer les dents dépulpées, moins lumineuses que les dents vitales, ou qui fait ressortir des caractérisations blanches opaques sur des bords incisifs translucides.
- Le contraste chaud/froid : on distingue des tons chauds et des tons froids. Les premiers regroupent les couleurs à longueurs d'onde longue (jaune, orange, rouge), les seconds les couleurs à longueurs d'onde courtes (jaune-vert, vert, bleu, violet). Lorsque

l'on rapproche des tons chauds et des tons froids, la brillance et la plénitude des couleurs sont accentuées. Ce contraste explique aussi le fait qu'un même jaune, par exemple, paraîtra plus froid s'il est entouré de couleurs chaudes, ou inversement. De plus, ces tons apportent une perspective : les tons chauds avancent, les tons froids reculent.

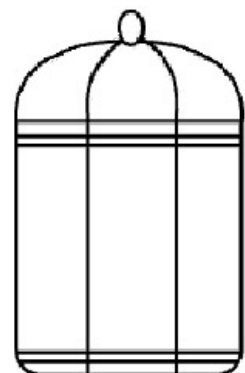
- Le contraste des complémentaires : la juxtaposition de deux couleurs parfaitement opposées dans le cercle de J. Itten (rouge et vert par exemple), qui additionnées donnent du gris, relève leur brillance et donne une sensation d'équilibre.



Figure 25 : Cercle chromatique de Johannes Itten.

Ceci est lié au fonctionnement de notre œil : face à un stimulus coloré donné, nos cônes rétinien s'activent simultanément la complémentaire biochimique, comme pour rechercher l'équilibre au gris. Un assemblage de couleurs paraîtra harmonieux lorsque leur mélange donne du gris neutre qui crée dans l'œil et le cerveau un état d'équilibre parfait. Ce phénomène est aussi responsable de l'illusion de persistance visuelle virtuelle de la couleur complémentaire après avoir visualisé une couleur vive, aussi appelé contraste successif :

Après avoir fixé l'œil de l'oiseau pendant une vingtaine de secondes, sa silhouette en rouge apparaît lorsqu'on fixe la cage. Les cônes verts couvrant la forme de l'oiseau sur la rétine subissent une désensibilisation progressive qui amène les autres cônes à prendre le dessus. Lorsqu'on regarde ensuite le fond blanc de la cage, un oiseau rouge se dessine parce que le blanc moins le vert donne une lumière rouge.



En fait, la persistance rétinienne peut être positive ou négative.

Ceci dépend de la durée d'observation de la première image. La persistance positive est la persistance de la même couleur d'image que la première, elle se produit lorsque l'œil a fixé la première image pendant une courte durée. La persistance négative crée une image

de couleur complémentaire à la première après une plus longue durée de fixation de la première image.

- Le contraste simultané : il peut perturber l'analyse de la couleur par le praticien. Par exemple, si une patiente porte un rouge à lèvres particulièrement vif, la blancheur de ses dents sera accentuée, et leur tonalité chromatique sera dérivée dans le sens de la complémentaire du rouge. En fait la couleur de la dent observée sera le résultat de la combinaison de la couleur réelle de la dent et de l'image rétinienne persistante liée à la zone adjacente. De même, face ou à côté d'une dent absente, les dents présentes peuvent paraître plus blanches à cause de l'effet de contraste lié à la cavité buccale sombre visible en contiguïté.

Le contraste simultané explique aussi qu'un gris, un blanc ou un noir nous semblent légèrement teintés de la couleur complémentaire à celle qui leur est voisine.



Figure 26 : Les rayures grises à gauche prennent un aspect froid et bleuâtre. A droite, ces mêmes rayures grises semblent plutôt rosâtres.

- Le contraste de saturation : se réfère à la pureté d'une couleur et à sa saturation en pigments purs. Par exemple, sur les dents, la désaturation par le blanc est le fait de l'épaississement de la coque d'émail vers le bord incisif. Autre exemple, les canines sont plus saturées que les incisives qui sont plus blanches.

- Le contraste de quantité : les « grains de beauté des dents », c'est-à-dire leurs caractérisations colorées, sont mises en valeur par leur propre finesse.

Avant d'aborder l'intérêt de ces connaissances en vue de l'agencement du cabinet dentaire, nous nous permettons d'insister sur le rôle de la maîtrise de l'ensemble des théories sur la couleur exposées dans cet ouvrage : l'application de la théorie des couleurs complémentaires permet aussi de masquer les dyschromies importantes.

En effet, l'idée est de « neutraliser » la coloration en appliquant une couche de matériau de couleur complémentaire : le orange est complété par le vert ; le marron est complété par le bleu ; le violet-bleuté est complété par le jaune ; le gris-rouge est complété par le

jaune et le vert. Il faut aussi tenir compte de la saturation, en fonction de la sévérité de l'atteinte.

Cette couche sera ensuite recouverte par du composite ou de la céramique, pour la structure et la couche émail translucide.

Ainsi, la correction de dyschromies prononcées, par facettes céramiques ou composites, est possible en appliquant la théorie des couleurs complémentaires : on applique un filtre à la lumière transmise, de la couleur complémentaire.

Par exemple, une dyschromie liée aux tétracyclines, marron, pourra être recouverte d'une facette contenant des pigments bleus.

2.3.2 Implications dans le cabinet dentaire :

Le choix de l'aménagement du cabinet devra viser à supprimer toutes les causes des différents contrastes. L'éclairage devra être pensé, ainsi que les couleurs de la tenue, de la totalité des éléments mobiliers, du fauteuil.

C'est dans la même logique que l'on demande aux patientes de venir sans rouge à lèvres ou fond de teint lors de la séance de choix de la couleur des dents.

En effet, il a été démontré que la modification de la couleur des lèvres, des gencives, mais aussi de la peau du visage, modifient la perception colorée des dents. Non seulement le praticien aura des difficultés à établir une correspondance fidèle à la couleur d'une dent référence, mais aussi, la modification de la couleur de la peau altère le jugement de l'intégration de la couleur des dents dans la globalité du visage. En effet, il a été observé que des dents plus jaunes vont être jugées totalement acceptables dans un visage au teint mat, bronzé, tandis qu'elles choqueront à l'intérieur d'un visage pâle. (28, 67)

L'arrière-plan devant lequel les dents sont observées aura une influence sur la couleur perçue. La luminosité du fond modifie la luminosité perçue, de même en ce qui concerne la teinte. Selon Gamain (2003), « le cabinet dentaire idéal est une pièce située au nord avec une fenêtre située juste en dehors de l'angle visuel du praticien au travail, mais pouvant y pénétrer sans effort. Une fois l'ergonomie de circulation de la pièce déterminée, l'œil du praticien au travail ne doit rencontrer que des surfaces sombres, sans complémentaires. Les murs situés en arrière de l'œil ainsi que le plafond devraient être clairs pour éviter une sensation de claustrophobie ». (80)

Ainsi, des couleurs d'ameublement ou murales trop vives ou trop lumineuses auront une influence sur les perceptions du praticien. Un environnement trop clair revient à travailler à contre-jour car le système visuel se règle sur la plus grande luminosité du champ visuel. Cela nuit à la visibilité de l'objet et accroît considérablement la fatigue. C'est pourquoi il est conseillé aujourd'hui d'éviter les murs blancs dans l'angle de vue du praticien lorsque celui-ci travaille. Ainsi, pour un praticien droitier par exemple, on évitera un mur blanc éblouissant à gauche, derrière la tête, et on préférera de même un sol neutre ou sombre. Cela dit, il faut éviter le bleu sombre ou le vert sombre afin de ne pas subir d'effet de voile complémentaire et de contraste simultané. Les conditions idéales sont obtenues par l'utilisation d'une teinte sans complémentaire absorbant environ 75 à 80% de la lumière reçue. La pièce ou au moins un de ses murs doit être dans une teinte neutre, mettant les cônes de l'œil au repos, telle que le gris ou le beige.

Pour ce qui est des autres murs, afin d'éviter une sensation d'oppression, afin « d'agrandir » la pièce, on peut choisir une teinte claire, et même blanche.

Ainsi le praticien doit s'entourer d'une couleur adéquate des différents murs, mais il devra aussi être prudent à propos de celle du fauteuil, ou encore des serviettes de protection qui doivent aussi prendre en compte les règles précédemment citées. Ces dernières permettront aussi de masquer les couleurs des vêtements du patient. (11, 43, 67)

Il existe aussi des arrière-plans à placer derrière les dents lors de l'évaluation, ou pour cacher les tissus environnants. Leur couleur doit être gris neutre : celui-ci n'a pas de couleur complémentaire, donc aucune image de persistance rétinienne n'est créée, et il est suffisamment lumineux pour limiter le contraste de valeur entre les dents et l'arrière-plan. (23)

Observer une plaque bleue peut permettre de reposer les yeux de l'observateur si des événements ont perturbé le fonctionnement rétinien, si celui-ci a trop longtemps fixé les dents. La rétine va pouvoir rétablir ses stocks de pigments visuels pour le jaune. (11, 67)

Le praticien doit donc :

- Privilégier des tons neutres pour son mobilier et ses murs.
- Eviter le blanc trop lumineux, pour les murs dans son champ de vision directe lorsqu'il travaille.
- Masquer les couleurs vives portées par le patient : vêtements, maquillage.
- Un cache gris neutre peut être placé en bouche afin de masquer l'arrière-plan trop sombre, ou des gencives très colorées.

2.4 Préserver ses yeux :

L'œil est un outil indispensable pour le dentiste. Nous allons rechercher dans cette partie quels sont les moyens de préserver sa santé.

L'éclairage et les couleurs du cabinet ont été évoqués précédemment, nous n'y reviendrons pas, mais rappelons qu'ils sont extrêmement importants.

D'autres éléments doivent attirer l'attention du praticien...

2.4.1 Position de l'ordinateur :

Positionner les écrans d'ordinateur perpendiculairement aux fenêtres et légèrement en contrebas par rapport à un axe visuel horizontal permettra d'éviter un éblouissement des yeux. (74)

2.4.2 Hygiène de vie :

Parmi les paramètres favorisant l'apparition de fatigue oculaire figurent l'insomnie, le tabac, l'alcool, certains médicaments, certaines maladies oculaires, les affections générales asthénisantes, les erreurs diététiques, l'état de santé de l'individu en général, des causes psychiques. (10) De plus, nombre de ces facteurs impliquent une sécheresse oculaire.

2.4.3 Sécheresse oculaire :

Le film formé par les larmes protège et lisse la surface de la cornée. S'il est affecté, la surface de l'œil n'est plus parfaitement polie, donc les rayons lumineux la traversent différemment. La déstructuration du film par évaporation provoque, outre des picotements, un défaut de vision des contrastes et atténue le rendu des couleurs, leur intensité. Elles paraissent plus blanches.

Le quotidien du chirurgien-dentiste cumule fréquemment plusieurs facteurs de sécheresse des yeux : pollution, médicaments, mais aussi la climatisation du cabinet, et le travail sur ordinateur. En effet, lorsque l'on regarde un écran, nos yeux clignent deux fois moins que normalement.

Des tests peuvent avérer le problème, et le spécialiste donnera des conseils simples au praticien : des gouttes de viscosité adaptée devront être mise en place (toutes les deux heures), et des gestes d'hygiène des paupières doivent être adoptés.

2.4.4 L'assistant(e) dentaire :

L'organisation du travail, plus ergonomique permet au praticien de reposer ses yeux lorsque le travail sur la dent est terminé, ou entre deux étapes. Le praticien n'ayant plus à chercher son matériel focalise ses yeux sur la zone de travail, ce qui demande moins d'efforts aux muscles accommodateurs.

2.4.5 Corriger les problèmes de vue :

Les défauts de l'œil tels que la myopie, l'hypermétropie, l'astigmatisme, et les troubles de la convergence, ainsi que la presbytie après 40 ans, sont très fréquents. Ils touchent autour de 35% de la population générale avant 40 ans, et s'approchent des 100% au-delà de 50 ans.

Ces défauts affectent notamment la vision des reliefs, rugosité de surface, puisqu'ils affectent la vision de près ou de loin. De plus, lorsqu'ils sont mal corrigés, ils rendent l'effort oculaire plus intense pour un résultat moins bon. Il en résulte une fatigue plus rapide des muscles qui répondent moins bien et donc une qualité visuelle qui se dégrade au fur et à mesure de l'effort. Le dentiste doit donc avoir une évaluation régulière de la qualité de ses yeux. (65)

Il est important d'avoir à l'esprit que l'ergonomie visuelle influence l'ergonomie générale, et réciproquement. En effet, un défaut musculaire oculaire va être compensé par un repositionnement cervical, entraînant une crispation musculaire qui par chaîne, atteint une crispation globale et notamment abdominale, qui implique un stress. Or on sait aujourd'hui qu'un état de stress influence l'activité des muscles oculomoteurs : il y a constriction. Ceci implique que la décontraction permettant la vision de loin devient plus longue. On a une « myopie fonctionnelle ». Ceci crée une boucle négative.

Le praticien doit surveiller sa vue afin d'analyser correctement l'aspect de surface dentaire.

Une bonne correction lui évitera aussi crispations musculaires cervicales, dorsales, ainsi que du stress.

Pour finir, réciproquement, limiter son stress permettra au praticien de limiter des problèmes de vue.

2.4.6 Loupes :

Bénéfiques ou délétères ? Les loupes facilitent grandement le travail de précision, le praticien n'a plus à s'approcher de la dent, il conserve une position ergonomique confortable, paramètre important, comme nous l'avons vu dans le paragraphe précédent. En revanche, les loupes peuvent cacher les problèmes, qui s'amplifieront : en adaptant les réglages de sa loupe, le praticien va suppléer d'éventuels problèmes de vue tels que des problèmes de convergence et de vision binoculaire. Une myopie pourra être masquée, mais lorsqu'il enlèvera les loupes, le praticien souffrira d'une accommodation de loin de plus en plus difficile. De plus, la dysharmonie entre l'accommodation et la convergence, c'est à dire l'aberration géométrique des optiques et le réglage incorrect de l'instrument pourront être causes de fatigue visuelle.

C'est pourquoi l'utilisation des loupes doit toujours être précédée d'un contrôle complet de la vue du praticien. (10)

2.4.7 Tester sa vision des couleurs :

L'examen de la vision des couleurs est un examen de routine pour l'entrée dans un certain nombre de professions, mais pas pour les chirurgiens-dentistes. Pourtant, sachant que près de 8% des hommes et 0,5% des femmes souffrent de dyschromatopsie, ceux-ci devraient tous procéder à une évaluation de la qualité de leur vision des couleurs (61), afin de connaître leurs éventuels désavantages, et d'organiser leur étape de détermination de couleur d'une future prothèse en fonction de la situation.

Un ophtalmologiste ou un optométriste réalisera un test d'Ishihara, ou un test des 100 Hue.

Dans le but de mettre en évidence la nécessité d'un dépistage, nous avons réalisé, en octobre 2012 à la faculté d'odontologie de Toulouse, le test d'Ishihara sur les étudiants d'une promotion. Un étudiant, non conscient de sa déficience, ainsi qu'un assistant, conscient de son défaut ont été dépistés. Il est donc effectivement important d'intégrer un dépistage des dyschromatopsies dans les débuts de la pratique de l'art dentaire (*voir annexe 5*).

De plus, les résultats obtenus au test de vision des couleurs d'Ishihara sont parfois corrélés avec des plaintes de fatigue visuelle. En effet, certains contrastes de couleur sont difficiles à percevoir chez les sujets présentant une déficience de la vision des couleurs ; cela peut donc accroître leur fatigue visuelle. (10)

Le test d'Ishihara : (64)

Il est un des tests de la vision les plus répandus. Il permet un dépistage.

Il s'agit d'une table pseudo-isochromatique. Il est constitué de planches recouvertes de disques imprimés de différentes couleurs, dont la mosaïque représente un chiffre ou un dessin que le sujet doit reconnaître. La teinte de ces figures est choisie de façon à rendre la lecture impossible ou modifiée à un œil souffrant d'une dyschromatopsie caractérisée par cette ligne de confusion.

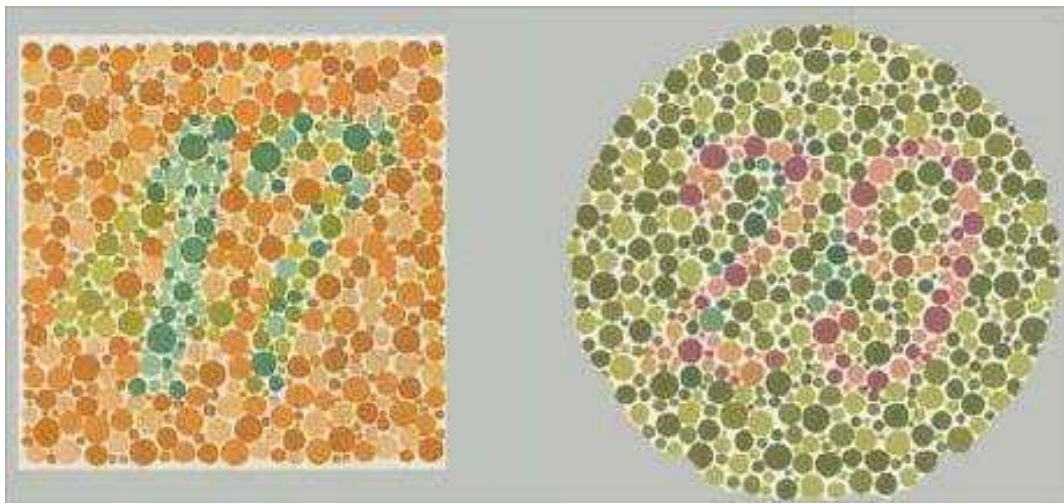


Figure 27 : Exemple de planches d'Ishihara.

Ce test devrait être réalisé en début de carrière, voire d'études, ainsi que s'il survient dans la vie du praticien un événement pouvant modifier sa vision des couleurs : diabète, médicaments...

Le test des 100 Hue :

Le Farnsworth 100 Hue est le plus complet des tests étudiant la vision colorée. Il se compose de 100 pastilles, réparties en 4 boîtes de 25, que le sujet doit classer. La progression des couleurs est très minime entre les pastilles successives, ce qui rend ce test difficile. Le recueil des résultats se fait en affectant à chaque pion un score, d'autant plus élevé que l'erreur est importante. Ceci, reporté sur un diagramme, permet à la fois de quantifier l'erreur de reconnaissance visuelle, et indique le type de la dyschromatopsie. (24, 59, 61, 64)

3 LES DISPOSITIFS D'AIDE :

3.1 L'assistant(e) dentaire :

En préambule à ce chapitre, nous avons jugé intéressant de traiter le rôle d'assistant dentaire dans l'amélioration de la décision esthétique. (78)

Un assistant dentaire compétent et bien impliqué dans le cabinet dentaire va avoir une influence, positive, sur la qualité du travail du chirurgien-dentiste :

- Par son rôle de gestion du secrétariat, de préparation de la salle de soin, de gestion des stocks, il allège le praticien de multiples contraintes de cette petite entreprise. Ainsi, celui-ci va se concentrer sur son rôle de professionnel de santé, avec moins de stress et de fatigue.
- Il assure souvent aussi un intermédiaire entre le cabinet dentaire et le laboratoire de prothèse.
- La formation et l'expérience acquises avec le praticien, ou par des formations complémentaires, peuvent lui donner les compétences pour apporter un réel soutien lors du jugement esthétique. Son point de vue différent pourra apporter des informations supplémentaires au praticien, mais aussi une communication améliorée avec le patient.

En résumé, l'assistant dentaire va jouer un rôle à trois niveau dans l'étape de relevé de la couleur : d'abord comme médiateur des rapports entre le cabinet et le laboratoire de prothèse, ensuite en assistant le praticien lors de décisions où la subjectivité reste un facteur déterminant, et où il est préférable de multiplier les avis, enfin comme interprète du praticien auprès du patient, quand la situation le nécessite.

Cette situation dépend en outre d'une réelle entente de l'équipe soignante. La relation praticien-prothésiste a tout à gagner d'une formation accrue des assistants dentaires.

3.2 Lampes calibrées

L'observation s'effectue à travers le cadre d'une lampe maintenue à faible distance de la bouche. En illuminant les dents avec une lumière de forte intensité, de spectre continu et d'une température de couleur située dans une fourchette de 5000 à 6500°K, ces lampes sont d'une aide très précieuse, en particulier quand les éclairages de cabinet sont défectueux. (44)

Ainsi les lampes calibrées ont pour avantage une indépendance vis-à-vis de l'éclairage ambiant, un coût raisonnable, une facilité d'utilisation. En revanche, l'analyse reste subjective, elle s'appuie sur un teintier. De plus, un travail à quatre mains est nécessaire.

Par exemple, décrivons le système *Optilume TrueShade*® : (71)

Il permet d'éclairer la bouche du patient avec une lumière à spectre blanc continu complet identique à celui de la lumière du jour à midi, avec une température de couleur de 5500°K. Il est constitué de deux diodes électroluminescentes (LED) disposées de chaque côté de l'emplacement réservé à l'observateur, et émettant leur lumière à 45° par rapport à la dent observée. La zone de travail est donc éclairée de façon optimale pour discerner la couleur de la dent et éviter la réflexion spéculaire. De plus, l'appareil dispose d'une option permettant de réduire l'intensité de la lumière tout en maintenant la même température de couleur, ce qui permet d'analyser la luminosité, mais aussi de mieux distinguer les caractérisations de surface et la microgéographie, les striations de l'émail.

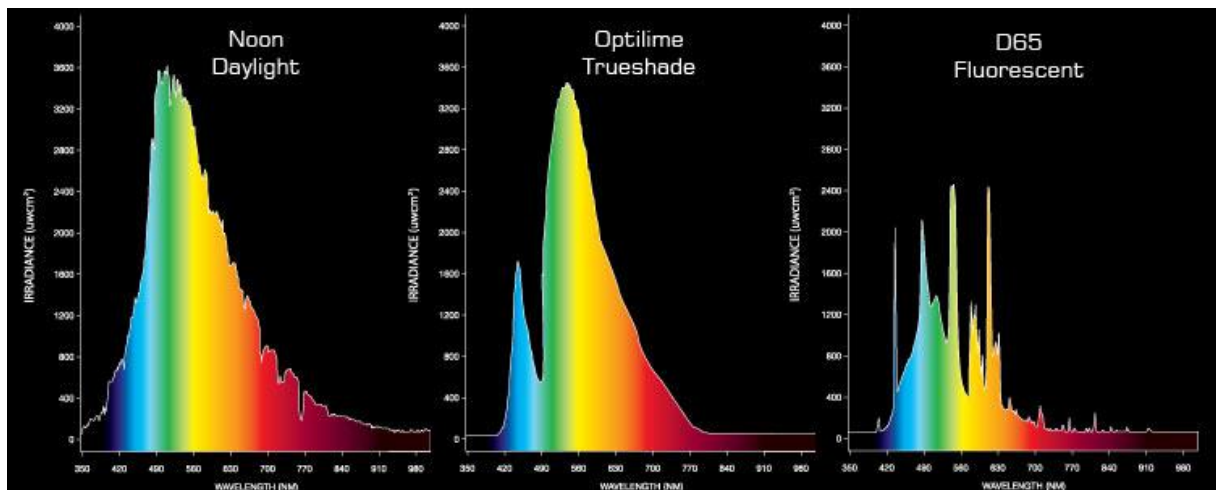


Figure 28 : Comparaison des spectres de la lumière du jour à midi, de la lumière émise par les LED de la lampe calibrée, et de la lumière émise par un illuminant normalisé D65. Issue de la brochure publicitaire d'*Optilume Trueshade*®.

3.3 Caméras intra-buccales

Une fonction « choix de teinte » permet la comparaison avec un échantillon de teintier. Le choix de la couleur de la dent reste visuel et comparatif aux échantillons des teintiers habituels, mais il est facilité car reporté sur un moniteur qui permet d'avoir une image fortement agrandie. Ce procédé original a l'avantage de ne plus dépendre de la lumière environnante du cabinet et de ne pas nécessiter d'étalonnage de la balance des blancs grâce à son système d'éclairage, par LED, intégré dans la tête de la caméra intra orale. Le choix, restant comparatif, n'est pas influencé par le vieillissement des LED. C'est notamment la société *Sopro* du groupe Acteon France qui a mis au point ce module sur la

caméra intra-orale. Le logiciel Sopro imagin® permet de réaliser une fiche de communication avec des images numérisées des dents de référence.

Il faut utiliser la caméra avec un teintier intégrant la luminosité plutôt qu'avec un teintier plus classique avec lequel elle donne de moins bons résultats. (15, 44)

Ce système a pour avantages : - indépendance vis à vis de l'éclairage ambiant,
 - conservation du teintier habituel,
 - simplicité,
 - agrandissement de la dent sur un moniteur,
 - logiciel de communication avec le laboratoire avec saisie de photographies numériques.

Il présente aussi quelques limites : - subjectivité par l'évaluation visuelle,
 - accessibilité mauvaise aux dents postérieures,
 - nécessite un moniteur TV ou un ordinateur,
 - affectée par la variabilité du teintier.
 - coût élevé.

3.4 La photographie numérique

L'appareil photographique représente le moyen le plus basique de prise de teinte électronique, il est aussi l'aide à la communication avec le laboratoire la plus utilisée. (56)

Etymologiquement, la photographie est « l'écriture de la lumière » : elle dépend de la lumière, et ceci implique les principes ainsi que les conseils que le praticien doit appliquer lorsqu'il utilise cette technique.

3.4.1 Fonctionnement et matériel : (15, 43)

Le principe de base est le suivant : la lumière vient frapper un récepteur photosensible, créant une image qui, suite à différents procédés, pourra être visualisée.

Les appareils photographiques numériques les plus répandus acquièrent les informations de l'image sous le mode rouge, vert, bleu. C'est par le modèle de la synthèse additive de couleur que l'image sera ensuite créée. Les lumières rouge, verte et bleue sont additionnées de différentes façons et permettent de produire sur l'écran un panel de couleurs étendu.

L'appareil donnant les meilleurs résultats dans notre domaine est de type reflex. Ce sont les boîtiers les plus sophistiqués, mais aussi les plus chers. Ils ont l'avantage d'être les

seuls à avoir un objectif interchangeable. Ceci est intéressant car on doit équiper le boîtier équipé d'un objectif de type macro. En effet, ce dernier permet de réaliser une photographie d'une dent avec un rapport 1/1, en conservant une distance importante entre l'objet et l'instrument, ce qui optimise l'action du flash.

Un flash macro est aussi nécessaire. Les flashes macro proposés par le marché sont de type bilatéral ou de type annulaire.

Le flash bilatéral produit des ombres, révèle l'état de surface, la forme et le contour des structures de façon optimale. Il se compose de plusieurs (de deux à quatre cellules) flash, déportés sur la périphérie de l'objectif.

Le flash annulaire produit une image plate sans ombre et sans relief. Les détails tels que l'état de surface et les lignes de transitions sont moins visibles.

L'absence d'ombre sur les clichés faits avec flash annulaire entraîne un aspect peu naturel et on préférera utiliser un flash macro latéral qui reproduit plus fidèlement la texture des tissus, les ombres et la profondeur.

3.4.2 Intérêt concernant les données colorimétriques d'un cas : (14, 15, 36, 76)

Le prothésiste étant rarement à proximité du clinicien, une photographie prise dans des conditions paramétrées s'avèrera être un outil très utile, une aide précieuse pour communiquer avec le laboratoire, notamment dans les cas esthétiques complexes. Nombreuses sont les études confirmant que la photographie présente un grand intérêt dans la gestion des informations colorées. Elle complètera la cartographie de la dent (en tiers, ou en dessin plus précis).

Précisons cependant que cette technique ne fournira pas à elle seule les données objectives scientifiques nécessaires à une interprétation optimale au laboratoire de prothèse en vue d'une restauration esthétique indirecte : elle doit être associée à une détermination de la couleur par une autre technique quelle qu'elle soit, visuelle directe ou instrumentale, car elle admet encore un certain degré de subjectivité dans l'évaluation de la couleur lié aux réglages de l'appareil, de l'ordinateur, du flash...

Soulignons pour finir le fait que les photographies en noir et blanc sont un excellent moyen de juger la luminosité.

3.4.3 Protocoles :

Diverses approches sont utilisées afin de transformer les données en informations utilisables en dentisterie. La meilleure façon d'utiliser les images numériques sera de les adjoindre à une autre technique de détermination. Les résultats obtenus peuvent alors être très satisfaisants et en font une méthode considérée comme objective. Dans ce cadre, il sera fortement conseillé de suivre un protocole systématique. (14, 33)

3.4.3.1 *Teintier - photographie*

L'approche la plus simple sera la méthode teintier + appareil photo : pour chaque tiers, on relève la couleur adaptée et on prend une photo avec l'échantillon sélectionné positionné accolé à la dent référence et dans l'orientation appropriée, c'est-à-dire parallèle en bout à bout à la dent utilisée comme référence. La détermination de teinte s'effectue cliniquement, au fauteuil. Dans cette méthode l'apport de l'image est intéressant pour le prothésiste, mais la subjectivité de l'analyse reste importante. (14)

La réciproque, soit déterminer la couleur à partir d'une photographie, est fortement déconseillée. On cumulerait en effet les facteurs d'erreur : variabilité liée à l'environnement lors de la manipulation, variabilité liée à la manipulation, liée aux réglages de l'appareil, de l'ordinateur, du format de l'image, liée au teintier numérique, pas de recherche du métamérisme. Selon une étude menée en 2012 par l'Université des sciences médicales de Téhéran, la détermination en vision directe est plus fidèle à la réalité que la détermination par correspondance sur images numériques (76). Des études cherchent ardemment aujourd'hui des procédés qui permettraient une analyse précise d'images informatisées et un établissement de correspondance de teinte par ordinateur. Les résultats semblent prometteurs, et les valeurs colorimétriques L^*a^*b établies par photographie numérique analysée par des logiciels et celles établies par spectrophotomètre peuvent être très rapprochées. Ceci tend à prouver que la photographie, dans des conditions d'éclairage standardisées optimales, pourrait être utilisée pour rechercher une teinte, et celle-ci pourrait être préférée au spectrophotomètre, car moins coûteuse. Cela dit, la mise en place réellement en cabinet de la procédure semble encore trop complexe, si l'on en espère des résultats tels que ceux obtenus dans des études de laboratoire. En effet il serait nécessaire de veiller à respecter des contraintes exigeantes telles qu'une distance objet-caméra constante, des paramétrages précis de l'appareil photographique, un éclairage normalisé, à orientation

définie (9, 36, 69). De plus, les études mettant en avant de bons résultats de choix de couleur par analyse de photographies portent sur la comparaison d'un échantillon de teintier avec une gamme complète d'un autre teintier, or nous savons qu'une dent naturelle présente des caractéristiques lumineuses particulièrement plus complexes qu'un échantillon de céramique, et difficiles à saisir par une image. Des études et des progrès paraissent encore nécessaires avant de pouvoir faire confiance à une détermination de couleur purement informatique. Cette voie de recherche possède néanmoins un potentiel fort intéressant, grâce aux progrès des appareils de photographie, et à leur coût inférieur aux nouveaux appareils de mesure de couleur tels que les spectrophotomètres et colorimètres, puisque les cabinets dentaires sont généralement déjà équipés d'ordinateurs et appareil photographique. (56)

Une approche existant sur le marché exploitant les photographies numériques est le logiciel Clearmatch® (Smart Technology) : c'est un logiciel similaire à ceux qui sont associés aux instruments de mesures décrits plus loin. Il utilise des images numériques de haute définition et compare les couleurs de toute la surface de la dent avec des couleurs d'une base de données se référant aux teintiers utilisés couramment (14). Cette méthode requiert aussi des réglages de l'appareil photo, du format des images, de l'éclairage, et une manipulation très délicats si l'on veut obtenir une analyse objective au maximum.

3.4.3.2 *Spectrophotomètre – photographie :*

La méthode utilisée dans la plupart des études modernes concernant la colorimétrie combine photographies numériques, analyse par spectrophotomètre et analyse des données par informatique, qui semble donc être la technique la plus fidèle. En effet ce type d'instrument a le potentiel pour réduire au maximum les facteurs de subjectivité lors du relevé de couleur. (14, 32, 33, 38, 83)

3.4.3.3 *Conseils pour tout protocole intégrant la photographie :* (15, 23, 56)

En ce qui concerne la manipulation et le protocole de capture de la photographie, le praticien voulant produire des clichés optimaux doit garder à l'esprit quelques conseils :

- La dent doit être sèche lors de la réalisation de clichés visant à observer la luminosité et la microgéographie de surface. On peut ensuite l'humidifier lors de la photographie de la saturation et de la teinte.
- Etalonner la balance des blancs : à l'aide d'une carte de référence, en général d'un gris à 18% (gris neutre, établi dans le système CIE L*a*b). Il existe aussi aujourd'hui

une possibilité de réglage automatique à faire correspondre à la source lumineuse utilisée. Il est nécessaire de réaliser ce réglage de balance des blancs personnalisé à chaque changement de conditions d'éclairage.

- Choisir un axe de 90° avec la surface étudiée pour les photographies de luminosité. Préférer un axe de 60° à 70° pour la saturation et la teinte, afin de réduire la réflexion du flash, qui rend la photographie inexploitable. De même, pour mettre en évidence la translucidité, une orientation en plongée à 60° est conseillée. Varier les angles est aussi très intéressant.
- Si possible, un flash bilatéral, orienté à 45° sera très adéquat.
- Placer un arrière-plan couleur gris neutre. Celui-ci doit être proche de la dent et des échantillons photographiés, afin de ne pas être assombri par l'ombre de la cavité buccale. Exception pour la translucidité : elle sera étudiée en préférant un arrière-plan noir, qui facilite sa visibilité.
- Utiliser les écarteurs afin d'obtenir un bon éclairage.
- Placer en regard de la dent, l'onglet correspondant à la teinte. Il est aussi proposé de placer de chaque côté de celui-ci un onglet de saturation de niveau supérieur, et de niveau inférieur de l'autre côté.
- Placer les échantillons de couleur à la même distance de l'appareil que la dent, autrement, ils apparaîtraient plus lumineux si plus proches.
- Utiliser autant d'échantillons, et donc prendre autant de clichés, qu'il y a de couleurs sur la dent.
- Accompagner les photos de schémas et explications, et du code correspondant à l'échantillon de couleur.
- Si la couronne réalisée n'est pas de couleur acceptable, réaliser un cliché avec cette couronne.

Remarquons ici encore l'intérêt du travail à quatre mains.

3.4.4 Les avantages de la photographie numérique : (14, 36, 38, 78)

- Les images sont immédiatement disponibles, et visualisables. Si nécessaire, le choix des images à tirer est simplifié.
- Traitement des fichiers images : paramètres d'exposition par un logiciel, recadrage.
- Fonctionnement intuitif, assisté, réglages de moins en moins difficiles.

- coût d'utilisation faible : pas de consommable, nombre de clichés illimité. L'impression est de moins en moins nécessaire.
- Communication avec le laboratoire : c'est un outil de base indispensable lors de cas esthétiques complexes. Il intervient lors du diagnostic et plan de traitement afin de discuter des solutions avec le prothésiste, puis plus précisément lors de la communication de la couleur relevée, mais aussi avant glaçage. La photographie apporte en effet un complément d'information pour la finition de la texture de surface et du glaçage, et elle permet de mieux illustrer les éventuelles rectifications à effectuer.
- La photographie permet aussi une vérification de la prothèse réalisée, au laboratoire. Ainsi, on évitera les pertes de temps au fauteuil liées à une couleur inadéquate.
- Analyse du travail effectué : en fin de traitement, les photographies réalisées permettent une valorisation du travail, mais elles permettent également d'enrichir la collaboration avec le laboratoire de prothèse, au cours de l'expérience des divers cas.
- Plusieurs études ont aussi établi que les systèmes d'imagerie numérique assurent la reproductibilité et la constance des mesures lors d'évaluation des changements de teinte au cours d'éclaircissements dentaires.

3.4.5 La photographie numérique présente aussi quelques limites et inconvénients :

Ces problèmes ne sont néanmoins pas incontournables, sous réserve de mettre en œuvre les techniques appropriées.

- Investissement, en temps, en formation et en argent : car il faut maîtriser l'informatique, notamment pour l'exploitation des images, mais aussi pour comprendre les réglages. De plus, il faut des équipements complémentaires pour les macrophotographies, telles qu'en odontologie.
- Nécessité de savoir réaliser des sauvegardes fiables et régulières.
- Risque d'excès de confiance : en réalité, la reproduction fidèle des couleurs est délicate. Les réglages de l'appareil sont particulièrement exigeants, dans l'objectif difficile d'avoir des images identiques au cabinet et au laboratoire. Le praticien doit veiller à une constance des réglages de l'appareil photo, de la lumière, du format des images : la mise en place d'un protocole précis de calibration des appareils est primordiale. La méthode associée au spectrophotomètre, utilisée au cabinet dentaire et au laboratoire minimise les problèmes liés à ces facteurs.

3.4.6 Conclusion

Pour conclure, la photographie numérique est un élément de communication additionnel non négligeable et même incontournable quand l'exigence esthétique augmente. Ainsi, le prothésiste peut observer, non seulement la couleur choisie, mais aussi les éléments souvent difficiles à communiquer verbalement ou même par dessin : la forme, la texture de surface, la translucidité, la présence de caractérisations. La communication grâce à la photographie apporte plus de précision, elle est plus complète, et elle est aussi plus rapide que la plupart des autres techniques.

En revanche, elles ne permettent pas à elles seules de réaliser une analyse scientifique de la couleur d'une dent.

La combinaison de photographies standardisées à une cartographie de la couleur de la dent assurera la transmission de données exploitables par le prothésiste et au final un résultat esthétique prédictible de la restauration. (14, 23, 33)

L'utilisation d'un instrument de mesure décrivant les données scientifiques des images est une alternative nouvelle.

Pour finir on peut dire que la combinaison teintier et images est un minimum incontournable aujourd'hui dans les cas de prothèses esthétiques. Elle est aujourd'hui la plus favorisée par les praticiens et prothésistes, car simple tout en restant relativement satisfaisante.

La méthode associée au spectrophotomètre donnera les résultats les plus fiables, mais elle sera plus complexe et coûteuse.

3.5 Spectrophotomètres

Les spectrophotomètres appartiennent à la catégorie des appareils d'évaluation objective de la teinte, représentée par les colorimètres et les spectrophotomètres.

Ils mesurent la couleur de la dent, soit sur sa surface complète pour donner une cartographie précise de la dent, soit par zones de la dent pour en donner une couleur moyenne.

Ils se révèlent être des outils utiles et pertinents pour la mesure et l'analyse de la couleur de la dent, ainsi que pour contrôler la qualité du résultat de la couleur. Ainsi, ils permettent aux praticiens d'améliorer leurs résultats esthétiques, et donc d'augmenter la satisfaction des patients ou encore d'éviter des pertes de temps au fauteuil lorsque les restaurations ne sont pas acceptables.

Cela dit, ils n'éliminent pas la méthode subjective visuelle : au contraire ils la complètent, et ce sera en associant autant que possible les deux types de méthodes que l'on approchera des résultats esthétiques prédictibles. (14)

3.5.1 Principe :

Colorimètre : (14, 33, 38)

Il mesure les trois fonctions colorimétriques définies dans l'espace CIE XYZ de 1931, appelées en anglais « tristimulus values », et permet de définir les courbes de sensibilité spectrale de trois détecteurs de lumière qui conduisent aux valeurs X, Y et Z en filtrant la lumière selon trois domaines du spectre visible : rouge, vert et bleu. Cette conception se rapproche du fonctionnement de l'œil humain : de façon très simplifiée, les coordonnées X, Y et Z correspondent aux réponses rouge, verte et bleue des cônes de la rétine.

Une image de la dent entière est donnée, en divisant le résultat en trois tiers : cervical, moyen et occlusal.

Les colorimètres sont moins précis que les spectrophotomètres, et ne mesurent pas la réflexion lumineuse. De plus l'exactitude des résultats peut encore être diminuée par l'usure des filtres. De nombreuses études ont démontré qu'ils offrent des mesures reproductibles et fidèles, et le colorimètre a été utilisé avec succès dans un grand nombre d'expérimentations évaluant des éclaircissements. En fait, il se révèle très fiable in vitro, mais présente des inconvénients plus importants in vivo : en clinique, ces appareils ne sont pas conçus pour des surfaces curvilignes comme celles de nos dents mais pour les surfaces planes dans l'industrie, ce qui crée des variations dans les mesures. Cette variabilité est amplifiée par les diverses caractérisations des dents, et leurs caractéristiques lumineuses secondaires.

Exemple de colorimètre, ShadeVision®(X-Rite) : son coût est inférieur au spectrophotomètre CrystalEye par exemple, mais il est du même ordre que le SpectroShade Micro, et supérieur à celui des spectrophotomètres EasyShade compact et Shade-X®, qui ne fournissent pas d'image directe et qui effectuent des mesures par spot.

Spectrophotomètre

Le spectrophotomètre est constitué d'une série d'obturateurs, de sources de lumière, d'un détecteur et d'un moyen de convertir la lumière obtenue en un signal qui peut être analysé. Nous allons décrire ces éléments. (3, 14, 22, 63, 70)

3.5.1.1 *Lampe source :*

La dent à évaluer est frappée par la lumière émise par le spectrophotomètre et complètement saturée de lumière. Il a sa propre source lumineuse, ce qui implique que la mesure ne sera pas influencée par les variations d'éclairage du cabinet.

Un étalonnage avant chaque mesure est nécessaire, sur un échantillon de céramique, pour compenser le vieillissement de la lampe source.

Cette source émet une lumière polychromatique visible. La géométrie de la lampe source contenue dans le dispositif devra être une considération importante : le choix le plus répandu est la géométrie 45/0. Cette appellation signifie que les angles respectifs de la lumière incidente émise et du détecteur sont de 45° et de 0° par rapport à la normale à la surface de l'objet. Ce choix est lié au principe vu précédemment : illuminer la dent avec un angle de 45° afin d'éviter la réflexion spéculaire.

3.5.1.2 *Détection :*

L'image de la dent ainsi colorée est capturée et mémorisée par la sonde dont est doté l'appareil : l'image est mise au point automatiquement et on lit, grâce à un système CCD (Charged Couplet Device), la tonalité de la couleur. La détermination de teinte se fait par mesure de l'intensité du rayonnement lumineux appartenant à différents intervalles de longueurs d'onde du spectre visible. Selon la précision de l'appareil, ces différentes tranches du spectre varient de 1 à 25nm. Ainsi, il analyse toute la composition spectrale du flux lumineux réfléchi par l'objet et transmis à travers le détecteur, c'est-à-dire que la mesure n'est pas limitée au rouge, vert ou bleu, comme les colorimètres.

Il faudra aussi prendre en compte le diamètre d'ouverture de la sonde, souvent entre 3 et 5mm.

3.5.1.3 *Analyse :*

Six millions de points sur la surface de la dent peuvent être analysés par l'ordinateur intégré dans l'appareil, puis confrontés à la base de données colorimétrique qu'il a en mémoire. C'est ce système qui rend la lecture possible ainsi que la codification de la couleur de l'échantillon-objet analysé. L'appareil calcule la discordance entre la couleur de la dent analysée et celle d'échantillons de teintiers dont les valeurs de référence sont connues et ainsi il détermine la référence qui se rapproche le plus de la dent.

Le système peut évaluer de façon objective les trois paramètres principaux de la couleur de l'échantillon : la luminosité, déterminée en se demandant si la couleur de la dent se rapproche plus du blanc ou du noir, la saturation ou chroma, et la tonalité représentée

par les longueurs d'onde spécifiques réfléchies par l'objet. Le résultat est exprimé dans les valeurs : ΔE , L^* , a^* et b^* .

Ces appareils sont plus précis que les colorimètres mais ils sont aussi plus coûteux.

3.5.2 Systèmes existant sur le marché et leurs particularités propres : (14)

- Crystaleye® (Olympus) combine les avantages du spectrophotomètre traditionnel avec la photographie numérique. Grâce au développement des technologies de l'optique et de l'imagerie, ce produit permet au praticien de rechercher la couleur de la dent plus précisément et simplement qu'avec un spectrophotomètre traditionnel. L'avantage significatif de ce système est que l'on peut comparer directement des échantillons virtuels de teintier de la base de données de l'ordinateur à l'image de la dent naturelle, en les superposant. L'image numérique produite par le Crystaleye® utilise une source lumineuse LED à sept bandes, qui permet de décortiquer la couleur de façon plus précise que les systèmes conventionnels des appareils photos numériques. De plus, l'image produite par le Crystaleye® est prise de l'intérieur de la cavité buccale et est par conséquent exempte de la lumière externe qui peut causer des interactions.

- Vita Easyshade Compact® (Vita Zahnfabrik) est sans fil, petit, portable, muni d'une batterie. Il fournit des informations de couleur suffisantes pour le chirurgien-dentiste, convertissant les données qu'il reçoit en code référence du teintier classique et du 3D-Master®. Des modes de mesure différents sont utilisables : le mode dent unitaire, le mode par tiers de dent, le mode vérification de couleur de restauration (inclut la luminosité, la saturation et la teinte) et le mode d'entraînement.

- Le Shade-X® (X-Rite) est aussi sans fil et compact, son diamètre de sonde est de 3mm et il contient dans sa base de données la majorité des teintiers populaires. Les échantillons virtuels comparatifs sont divisés en deux groupes : dentine, plus opaques, et email, plus translucides.

- Le SpectroShade Micro® (MHT Optic Research) combine spectrophotomètre à LED et appareil-photo numérique. Il possède un ordinateur interne et un logiciel analytique. Un écran tactile à cristaux liquides permet d'afficher un guide de positionnement de la dent lors de la prise de mesure. Les images et données spectrales peuvent être enregistrées sur la mémoire interne et transférées sur ordinateur.

CrystalEye®, ShadeVision® et SpectroShade Micro® fournissent une image de la dent entière, tandis que EasyShade Compact® mesure un spot de 5mm de diamètre et Shade-X® mesure un spot de 3mm de diamètre.

En ce qui concerne les prix, en 2010, ils variaient entre 1000\$ et 7500\$. Le spectrophotomètre CrystalEye® présente le coût le plus élevé. Ensuite le colorimètre ShadeVision® et le SpectroShade Micro® sont dans le même ordre de prix, supérieur à celui des spectrophotomètres EasyShade compact® et Shade-X®, qui ne fournissent pas d'image directe et qui effectuent des mesures par spot.

3.5.3 Une option à prendre avec précaution : (3)

Il peut être parfois proposé par les fabricants, en option à ajouter au spectrophotomètre, un filtre bloquant les ultraviolets émis par la source afin de réduire la quantité d'ultraviolets captés ensuite. Avant d'utiliser un tel filtre, il faut se rappeler que dans l'environnement général, que ce soit sous diverses lampes, ou à la lumière du jour, l'énergie ultraviolette est présente. Par conséquent, réduire ces ultraviolets pourrait fournir des mesures moins fidèles à la réalité de notre vision.

3.5.4 Avantages :

- Rapide. La détermination de teinte instrumentale est en effet plus rapidement obtenue que par méthode visuelle avec teintier. La prise de vue, d'image numérique est aussi plus rapide, plus aisée.
- Possibilité de déléguer le relevé de couleur. Mais le dentiste devra toujours vérifier la décision prise.
- Mesure objective : elle ne dépend plus de l'œil, de l'environnement, ni de l'éclairage. La mesure des coordonnées trichromatiques de la CIE permet aussi de se détacher de la comparaison à des échantillons de teinte, qui sont variables, se détériorent au cours du temps.

On obtient donc des données standardisées, avec des conditions de mesure reproductibles, qui permettent une analyse précise de l'élément dentaire d'intérêt pendant un éclaircissement ou en vue de restaurations.

La littérature a démontré dès les débuts de son utilisation que le spectrophotomètre représente un réel apport quant à la recherche d'un relevé correct des couleurs : (14, 29) Une expérimentation parue dans Journal of Endodontics en Décembre 1998 le compare à

la vision directe. Le but de cette étude était de comparer une méthode objective à une méthode subjective de l'évaluation de couleur de la dent : le spectrophotomètre SP78 et l'analyse visuelle humaine. La luminosité de vingt extraits de dents matures maxillaires humaines a été évaluée par le SP78 au 1er jour, puis à nouveau au 14^{ème} jour. En utilisant une méthode aveugle, cinq évaluateurs humains ont ensuite tenté de faire correspondre les échantillons de teinte d'un guide Vita expérimental à six teintes sur les mêmes dents aux jours 1 et 14. Les valeurs de L* évaluées par SP78 aux jours 1 et 14 ont été comparées. Les résultats de l'évaluation visuelle ont été comparés aussi entre jours 1 et 14, et entre les évaluateurs. Enfin, la capacité des évaluateurs humains à faire correspondre la teinte de la dent a été comparée avec les résultats obtenus avec le SP78. Les résultats de cette étude confirment que l'évaluation humaine de couleur des dents est peu fiable et que le spectrophotomètre SP78 peut fournir une méthode plus prévisible et plus précise d'évaluation in vitro. (29)

D'autres études similaires comparant méthode visuelle et techniques conventionnelles avec la technique par spectrophotomètre confirment une précision significativement augmentée ainsi que l'objectivité du résultat. On trouve par exemple dans le Journal of Dental Research en 2002, une précision accrue de 33% et un résultat objectif dans 93,3% des cas.

Cela dit, ces études comparatives entre techniques visuelle et instrumentale révèlent beaucoup de pour, mais aussi des contre. En effet, une étude de 2010 énonce le fait que l'on peut trouver un meilleur accord dans un groupe d'observateurs que entre des dispositifs différents, et que les instruments ne reflètent pas réellement la perception humaine. Leurs résultats sont reproductibles, mais pas toujours adéquats.

Une autre étude montre aussi que les résultats entre analyse visuelle et instrumentale se rapprochent beaucoup plus pour des dentistes expérimentés, comparé à un groupe d'étudiants en dentaire et d'observateurs non dentistes, et pour finir, les résultats d'un groupe d'observateurs sont pour la plupart acceptables. En réalité clinique, le problème persiste puisque le dentiste est souvent seul pour établir une correspondance de teinte. (14)

- Ces instruments sont nécessaires pour les personnes présentant une déficience visuelle.
- Possibilité, selon les appareils, d'analyse 3D et de cartographie de couleur. L'analyse peut comporter par exemple un découpage de la dent en tiers et teinte Vita de

chaque tiers et/ou une cartographie des teintes de l'élément, la translucidité, la luminosité, la comparaison d'histogrammes $L^*a^*b^*$, une cartographie de l'image par coordonnée colorimétrique. On peut aussi effectuer des chevauchements d'image. Ces analyses nécessitent les logiciels possédant les diverses applications permettant d'étudier les images relevées. (14, 33, 63)

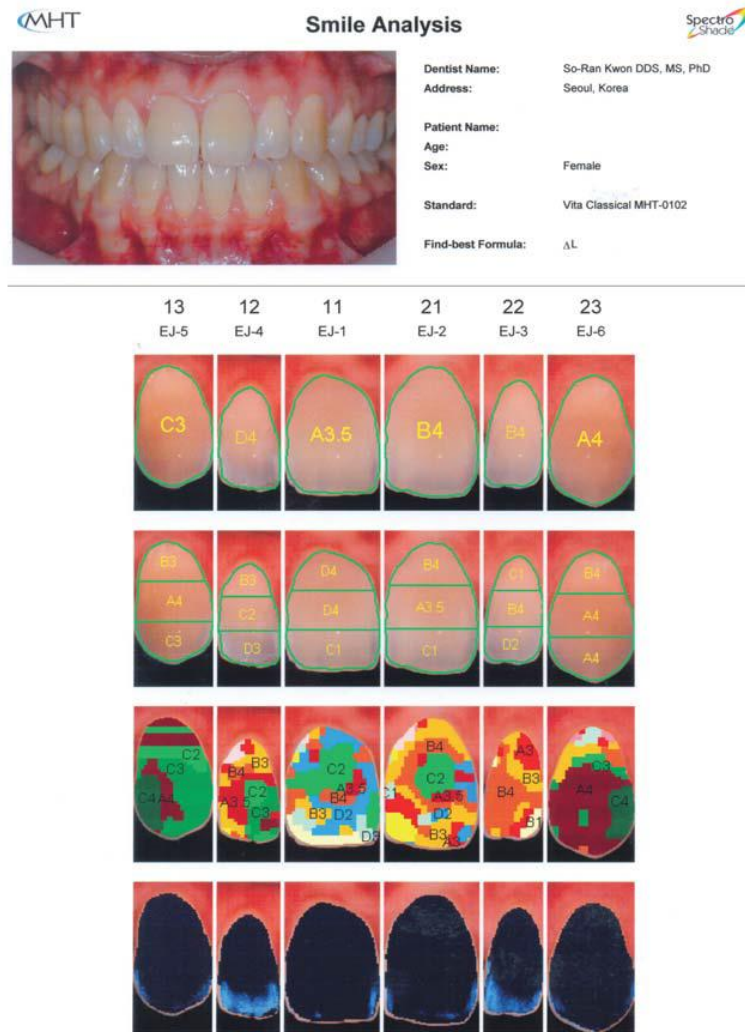


Figure 29 : Exemple d'analyse de sourire, ici avant un éclaircissement. (42)

Comparés aux autres méthodes de choix de couleur, les spectrophotomètres de dernière génération fournissant des images associées aux données d'analyse permettent, grâce aux nombreux outils d'imagerie informatique accessibles aujourd'hui, de s'approcher au maximum de la couleur de dent perçue par l'œil. Ces images donnent de meilleures informations pour déterminer ou transmettre la couleur au prothésiste que les instruments ne fournissant qu'une mesure par spot, ou qu'une moyenne globale de la couleur de la dent.

- La communication praticien-prothésiste et la vérification de la couleur au laboratoire : (14, 44) Les appareils les plus évolués sont équipés de logiciels très sophistiqués de communication avec le laboratoire. Et des contrôles sont possibles au laboratoire avec le même appareil. Ces contrôles sont même recommandés. L'avantage est que l'on ne s'appuie plus sur des onglets de teintiers, qui sont variables, comme nous l'avons vu plus tôt.

A travers un cas clinique, une étude mise en place en 2010 (83) montre la précision que peut acquérir le technicien de laboratoire grâce au spectrophotomètre. La construction d'une couronne tout céramique pour une incisive centrale, assistée, par étapes, par un spectrophotomètre, a abouti à un ΔE inférieur à 1,4. Les mesures très précises de l'appareil ont permis de guider le prothésiste vers les choix judicieux de matériaux plus jaunes, ou plus rouges, ou plus saturés pour les couches de céramique, et elles ont aussi orienté le choix du composite de collage en fonction de ses caractéristiques colorées afin de réajuster jusqu'à l'ultime couleur de la couronne. Cela dit, il est intéressant de noter que l'analyse par le spectrophotomètre au laboratoire a permis de vérifier les étapes mais que l'interprétation de ces résultats afin de faire les choix conséquents pour les couches suivantes dépendent fortement de l'expérience et du talent du prothésiste. N'oublions pas non plus que le facteur de réussite principal dont dépend cette technique reste les mesures initiales correctes et précises prises au fauteuil, et qu'un autre élément très important et problématique sera le contrôle des éclairages lors des mesures, qui sont rarement standardisés, que ce soit au cabinet ou au laboratoire de prothèse, et dont certains appareils, encore nombreux, subissent l'influence.

- L'expérience précédemment citée fait aussi état d'une réduction non négligeable du métamérisme, puisque l'on ne recherche plus seulement une couleur globale, mais plutôt une distribution spectrale proche de l'élément référence. Les spectrophotomètres permettent donc de réduire les risques d'échecs liés au métamérisme. Ceci est particulièrement intéressant car le métamérisme est un facteur fréquent de non-acceptation d'une restauration esthétique. (31, 83)

- Réduction des retours au prothésiste liés à une erreur de teinte, qui représentent tout de même plus de 50% des raisons de renvoi d'une couronne (33, 35, 76). On évite donc des rendez-vous inutiles, qui causent une perte de rentabilité du cabinet et un mécontentement possible du patient.

- Lors d'éclaircissements : les spectrophotomètres, et notamment ceux qui ont aussi la capacité de prendre des images, seront aussi très utiles. D'abord pour comparer les différentes étapes de façon objective, mais aussi pour évaluer la stabilisation de la couleur de la dent dans les semaines post-procédure. La reproductibilité à chaque mesure pourra être grandement améliorée par l'utilisation d'un guide de positionnement personnalisé, réalisé en silicone. On élimine ainsi la variabilité liée à un positionnement légèrement décalé. (33, 38)

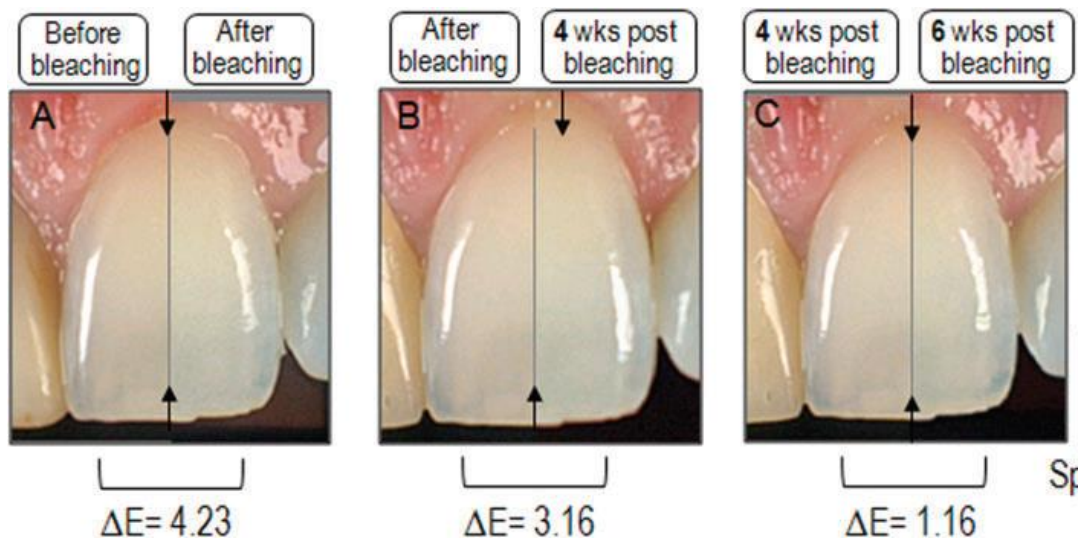


Figure 30 : Variations de la couleur d'une dent après éclaircissement. A : superposition de la situation avant et juste après l'acte. B : superposition de la dent juste après et 4 semaines après l'acte. C : superposition de la dent 4 et 8 semaines après l'acte. (33)

3.5.5 Limites :

- Le coût du matériel représente une des principales explications au fait que l'usage des spectrophotomètres soit aussi peu répandu. Les logiciels informatiques nécessaires doivent s'ajouter au budget.
- Apprentissage à la manipulation : la complexité de l'analyse rebute aussi nombre de praticiens. Une éducation aux bases de la colorimétrie est nécessaire, ainsi qu'une démonstration de la manipulation de l'appareil et des multiples options.
- Nécessité d'un élément comparatif. (14)
- Temps de chauffe : 10 minutes pour certains instruments.
- Nécessité d'étalonner. (70)
- Encombrement et accessibilité mauvaise aux dents postérieures. Cela dit, la précision d'informations fournie par le spectrophotomètre est plutôt désirée dans le secteur antérieur. De plus, les premiers appareils étaient très difficiles à manipuler in vivo,

aujourd'hui les dernières créations deviennent beaucoup plus ergonomiques et adaptées à l'utilisation dentaire.

- Mesure ponctuelle de la teinte de base en spot central pour certains appareils : la couleur d'une dent ne se résume pas à cela. Elle se développe en profondeur dans la stratification des tissus. L'opacité, la translucidité, l'opalescence, la fluorescence, la texture de surface et les caractérisations sont autant d'éléments qui interviennent dans le rendu final de la dent prothétique.

- Cartographie fournie en deux dimensions : ceci ne reproduit donc pas nécessairement correctement la forme, la texture, l'épaisseur de la restauration, le type de limite, l'infrastructure. Le praticien et le prothésiste doivent être conscients de ces facteurs importants, et les noter, les transmettre et les interpréter. L'observation clinique garde bel et bien une très grande importance. Les photographies, intégrées dans les spectrophotomètres modernes, améliorent grandement la qualité de la communication praticien-prothésiste. (14, 40)

- Influence de la géométrie de la zone visée et du positionnement de l'embout : de nombreuses études font état du fait que les mesures sont sensibles à la localisation exacte de la zone visée sur la dent. Ce désavantage est lié au fait que les colorimètres et spectrophotomètres utilisés sont conçus pour mesurer des surfaces planes tandis que nous travaillons sur les dents humaines aux propriétés optiques particulières par rapport aux autres domaines utilisant ces outils : elles sont petites, incurvées, stratifiées, translucides, montrent des changements de couleurs dans toutes les directions (de cervical à occlusal, mésial à distal, de vestibulaire à palatin) et de petites caractérisations. Par exemple, on observe parfois aux tiers incisif et cervical une mesure de luminosité inférieure à ce qu'elle est en réalité à cause de la courbure naturelle de la surface dentaire. Ceci représente une limite de ces instruments enregistrant principalement la lumière réfléchi par des surfaces perpendiculaires à eux.

Ces limites expliquent en quoi le repositionnement précis est une étape critique et une condition nécessaire lors de l'utilisation à plusieurs reprises de systèmes de mesure de la couleur, autant en recherche que dans des cas cliniques. Et c'est aussi pourquoi un léger changement de position de l'embout peut donner une mesure différente et une couleur référence différente. Cela dit, des guides de repositionnement pour spectrophotomètres peuvent être utilisés. Certains spectrophotomètres incluent aussi un système automatisé pour assurer un positionnement et une angulation appropriés de la sonde (8). De plus,

pour pallier le problème lié à la particularité de la surface de la dent, et notamment son bombé, les nouveaux spectrophotomètres sont équipés de plusieurs LED, à orientations angulées, à l'intérieur de la sonde.

- L'ouverture trop petite des instruments entraîne une perte de qualité de quotation moyenne, « edge-loss error » en anglais : les niveaux des trois coordonnées $L^*c^*h^*$ sont abaissés par la réduction de diamètre de la fenêtre-capteur de la sonde. En effet ce phénomène est lié au fait que des rayons épars, déviés par la surface, et transmis à travers le matériau translucide ne sont pas mesurés par l'instrument, alors que ceux-ci seraient perçus par l'œil d'un observateur. Comme nous l'avons vu précédemment, certains appareils mesurent un spot de 3 à 5mm de diamètre, d'autres prennent toute la surface de la dent. (5, 14, 23, 28, 45, 62, 76)

- On rencontre plusieurs études énonçant le fait que l'illuminant standard choisi fait varier la mesure par le spectrophotomètre. (45, 62) La lumière émise par l'illuminant contenu dans le dispositif peut, de plus, être diffusée, absorbée, transmise, reflétée, déviée dans diverses directions à causes des propriétés optiques translucides du tissu dentaire ou de la céramique dentaire ou du composite dentaire. Ceci altère le résultat donné (58). Ce problème semble avoir été résolu dans les nouveaux instruments : les sondes capteurs sont conçues pour pallier cet inconvénient par leur forme, leur taille et par le fait qu'elles sont équipées de plusieurs LED dont le nombre, les caractéristiques d'émission lumineuse et la disposition ont été grandement étudiés. (33)

- Les reproductions en céramique peuvent présenter des erreurs. La profondeur des tissus dentaires pose un premier problème lors de la mesure comme nous l'avons vu précédemment, mais elle crée aussi une source d'erreur supplémentaire possible même si l'identification de la couleur a été appropriée : l'épaisseur de céramique constituant la couronne est largement inférieure à l'épaisseur des tissus dentaires naturels. Ceci augmente la difficulté de reconstitution esthétique, car la prothèse doit donner le même effet de profondeur que la couche d'émail et la couche de dentine sous-jacente, tout en disposant d'une épaisseur pour chaque couche largement amoindrie. Ce problème persiste quelle que soit la méthode utilisée. Il dépend des qualités artistiques du prothésiste et de l'exhaustivité des informations fournies par le dentiste. (17)

3.5.6 Conclusion :

L'analyse instrumentale ou non de la couleur des dents a fait l'objet de nombreuses études durant ces dernières années. Beaucoup révèlent les nombreux avantages offerts par les nouvelles technologies, d'autres viennent aussi nuancer cette opinion. Nous avons vu précédemment que l'analyse visuelle de la couleur est sujette à une grande variété de facteurs, cependant, cette méthode n'est absolument pas inférieure, et ne doit pas être dépréciée. En réalité, la totalité des instruments de mesure « objective » de la couleur ont été mis au point en se référant à la réponse visuelle d'un « observateur standard », et ils ne sont de bonne qualité que s'ils se rapprochent de cette perception. De plus, la valeur numérique minimale de ΔE ne donne pas forcément la meilleure correspondance du fait que l'appareil n'a pas la même sensibilité que l'œil aux différences de luminosité, saturation et teinte, et l'appareil ne perçoit pas non plus les effets liés à la translucidité de l'émail. En fait, on peut dire que les spectrophotomètres sont très précis, permettent des mesures reproductibles et une communication aisée, mais ils ne sont pas toujours fidèles à la couleur réellement perçue de la dent. Par conséquent, à la question de savoir quelle méthode utiliser entre visuelle et instrumentale, en dentisterie, la réponse sera : aussi souvent que possible, utiliser les deux, car elles se complètent et conduisent conjointement au résultat esthétique le plus approprié. En effet, il a été observé que notre œil est très aiguisé lorsqu'il s'agit de discerner de très légères différences de couleur, en revanche, il a de plus grandes difficultés à faire correspondre deux objets. Les dispositifs de mesure de la couleur pourront donc être d'un grand intérêt, puis leur résultat devra être soumis au jugement de l'œil. L'œil reste aujourd'hui l'instrument le plus précis lorsqu'il s'agit de discerner de subtiles nuances de couleurs entre deux objets comparables, surtout lorsque la structure de ces objets est aussi complexe que celle d'une dent. (3, 14, 28, 31, 32, 38, 57, 58, 60, 68, 76, 82)

Enfin, que choisir ?

D'abord, un teintier adapté et l'utilisation d'images numériques paraissent incontournables.

Ensuite, en fonction de sa pratique, de sa personnalité, de sa connaissance de ses atouts et limites... le praticien pourra choisir des instruments d'aide :

- La lampe calibrée améliore la visibilité des caractéristiques colorées et complémentaires, elle peut pallier un problème d'éclairage. Son coût est faible. En revanche, elle reste subjective et nécessite la participation de l'assistante.

- La caméra intra-buccale peut posséder un module choix de teinte, elle présente de plus d'autres fonctions intéressantes. L'analyse reste comparative à un teintier. Elle permet de fournir des images au prothésiste.
- L'appareil photographique fournit des images numériques, éléments incontournables à communiquer dans les cas esthétiques exigeants. Les réglages sont difficiles, un protocole rigoureux doit être mis en place. Le coût est conséquent. Ce sera un instrument de communication plus précis que les précédents.
- Le spectrophotomètre est très précis, mais présente un coût élevé. La détermination peut être déléguée. Son résultat doit toujours être vérifié par l'œil du praticien. Ils doivent fournir des images.

3.6 La communication directe patient-prothésiste.

Le praticien cherchant à optimiser sa gestion du relevé de couleur doit envisager une dernière solution, non négligeable : envoyer le patient directement chez le prothésiste quand le cas esthétique est difficile. Ce dernier pourra effectuer un schéma très sophistiqué des informations colorées, d'état de surface, ainsi que de forme et des volumes. Même un dessin très appliqué d'un praticien n'atteindra pas le niveau de précision, de clarté de celui du céramiste qui, de plus, pourra utiliser son propre vocabulaire, ses propres images mentales, représentations personnelles pour noter les informations qui lui sont nécessaires.

Comparons à titre d'exemple, deux schémas que l'on peut rencontrer dans un cas clinique esthétique : (64)

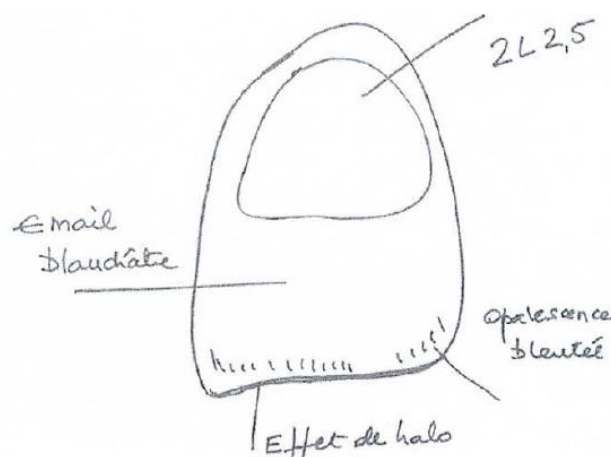


Figure 31 : Exemple de relevé de couleur d'un praticien, d'après Ortet, 2005.

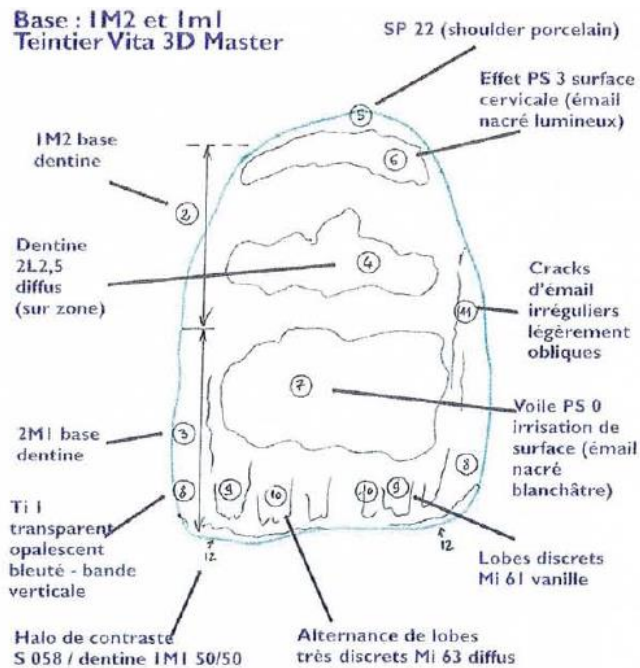


Figure 32 : Exemple de relevé de couleur effectué par un prothésiste, d'après JM Etienne, 2005.

Avec la cartographie simple fournie par le praticien, le prothésiste aura des difficultés à se représenter les divers caractères tels que les effets de transparence, de translucidité, d'opalescence, et à élaborer sa stratégie de stratification. Notons qu'à l'inverse, un praticien voulant être complet et donnant de nombreux détails et commentaires peut aussi fournir un excès d'informations, devenant peu claires, et même délétères à l'interprétation correcte par le prothésiste. Par exemple, une « zone d'émail proximale à reflets bleu-vert-gris » va être difficile à traduire.

Le praticien maîtrise rarement le langage et surtout les références céramiques. Il ne peut donc pas fournir des informations aussi efficaces que celles que relève le prothésiste lui-même directement bouche. Il ne doit pas non plus s'y aventurer, au risque de brouiller les informations, plutôt que d'en apporter.

La solution de l'observation directe par le prothésiste de l'élément à reconstituer est très favorable pour les constructions esthétiques indirectes. Mais elle est difficile à mettre en place. Elle relève de plus, du talent du prothésiste, ainsi que d'une réelle confiance au sein de l'équipe soignante.

Conclusion

La connaissance et la compréhension des théories concernant la lumière, les couleurs, les phénomènes optiques permettent au praticien d'améliorer sa pratique quotidienne, de clarifier sa communication avec le laboratoire de prothèses, de mieux comprendre le fonctionnement des divers instruments dont il dispose, mais aussi d'éviter des erreurs.

Il saura donc choisir un teintier adapté à son objectif clinique, l'utiliser dans un protocole efficace, élaboré en tenant compte de la luminosité, la saturation et la teinte, de la structure en strates minérales de la dent...

Il saura aussi préparer la dent, le patient, et se positionner.

Connaissant la physiologie de l'appareil visuel, le praticien comprend comment utiliser ses yeux de manière optimale et éviter la baisse de performance. Ceci implique de respecter des principes lors du protocole, une bonne gestion de la séance, mais aussi un aménagement bien pensé du cabinet.

De plus, le praticien aura été sensibilisé à la nécessité de prendre soin de ses yeux, de dépister et corriger d'éventuels problèmes. Des gestes simples d'hygiène, la gestion du stress doivent être adoptés. Conscient d'une déficience s'il y a, il réduira son risque d'erreur en trouvant des moyens palliatifs : aide de l'assistante, instruments, ou proximité du prothésiste.

Enfin, la description des différents instruments d'aide à la détermination de la couleur au cabinet donne au praticien, selon ses goûts et sa pratique, les éléments pour pouvoir choisir ce qui lui conviendra.

4 Bibliographie

- [1] *Principe de la stratification en composite HFO*. (2003, octobre). Consulté en novembre 2011, sur <http://www.dreamdirectdesign.com/dentisfuturis/modules/news/print.php?storyid=188>
- [2] *Voies Visuelles*. (2008, mars). Consulté le 12 novembre 2011, sur Le cerveau a tous les niveaux.
- [3] Bala, R. . Chapitre 5 : Device characterization. Dans *Digital color imaging handbook*. New-York: Xerox Imaging & Services Technology Center.
- [4] Baltzer, A., & Kaufmann-Jinoian, V. (2004). La définition des teintes de dent. *Quintessenz Zahntechnik*, 30, 726-740.
- [5] Bayindir, F., Kuo, S., Johnston, W. M., & Wee, A. G. (2007, septembre). Coverage error of three conceptually different shade guide systems to vital unrestored dentition. *The journal of prosthetic dentistry*, 98(3), 175-185.
- [6] Binhas, E., Jeanson, A., & Kubler, J.-M. . *Problèmes visuels et sonores au cabinet dentaire : solutions pour une vision et une acuité auditive optimales*.
- [7] Bordais, A. (2004, décembre). Organisation moléculaire des synapses photorécepteurs-neurones secondaires. Rôle des dystrophines. *These, Sciences du vivant*. Strasbourg, France.
- [8] Browning, W. B., Contreras-Bulnes, R., Brackett, M. G., & Brackett, W. W. (2009, mai). Color differences: Polymerized composite and corresponding Vitapan Classical Shade tab. *Journal of dentistry*, e34-e39.
- [9] Caglar, A., Yamanel, K., Gulsahi, K., Bagis, B., & Ozcan, M. (2010). Could digital imaging be an alternative for digital colorimeters? *Clin Oral Invest*, 14, 713-718.
- [10] Cail, F., & Salsi, S. -S. (1992, Mars). La fatigue visuelle. Dans I. N. Sécurité. France.
- [11] Capa, N., Malkondu, O., Kazazoglu, E., & Calikkocaoglu, S. (2010). Evaluating factors that affect the shade-matching of dentists, dental staff members, and laypeople. *Journal of the american dental association*, 141, 71-76.
- [12] Centre National d'Innovation et Formation des prothésistes dentaires. . *Installation de laboratoire de prothèses dentaires*. Consulté le 11 Novembre 2011.
- [13] *Chromophores*. Consulté en janvier 2012, sur medical dictionary: <http://medical-dictionary.thefreedictionary.com/Chromophores>
- [14] Chu, S. J., Trushkowsky, R. D., & Paravina, R. D. (2010, juillet). Dental color matching instruments and systems. *journal of dentistry*, 38, e2-e16.
- [15] Clinkemaillié, M. (2011). *La Photographie Numérique au cabinet dentaire : Principes, Applications, Recommandations*. Bordeaux.
- [16] Conti, M. (2010). *La stratification des résines composites sur dents antérieures*. Nancy.
- [17] Corciolani, G., Vichi, a., Goracci, C., & Ferrari, M. (2009). Colour correspondence of a ceramic system in two different shade guides. *Journal of dentistry*, 37, 98-101.
- [18] Corcodel, N., Helling, S., Rammelsberg, P., & Hassel, A. J. (2010). Metameric effect between natural teeth and the shade tabs of a shade guide. *European journal of oral sciences*, 118, 311-316.

- [19] Cuny, P. (2007, Juin). *Etude colorimétrique d'une résine composite de collage*. Nancy.
- [20] Degré K. . *La lumière et l'Homme*. Consulté en Novembre 2011, sur <http://www.degrek.com/savoir/la-lumiere-et-lhomme/comment-loeil-voit-la-lumiere/>
- [21] Durant De La Pastelliere, V. (2005, Novembre). *Les facettes esthétiques collées : protocoles cliniques*. Nantes, France.
- [22] Eichelberger, A. (2010). *Détermination des coefficients d'absorption de la lumière des couleurs dentines par une résine composite et une céramique dentaire*. Nancy.
- [23] Fondriest, J. (2003). Shade matching in restorative dentistry : the science and strategies. *The international journal of periodontics and restorative dentistry*, 23(5).
- [24] Gautier, V. (2008-2009). Tests de la vision des couleurs. St Etienne: Institut des sciences de la vision.
- [25] Gautier, V. (2009-2010). Vision anormale des couleurs. *cours, Institut des sciences de la vision*. St Etienne, France.
- [26] Ghinea, R., Ugarte-Alvan, L., Yebra, A., Pecho, O. E., Paravina, R. D., & Perez, M. d. (2011, Mai). Influence of surface roughness on the color of dental-resin composites. *Journal of Zhejiang University-SCIENCE B (Biomedicine & Biotechnology)*, 12(7), 552-562.
- [27] Gozalo Diaz, D., Johnston, W. M., & Wee, A. G. (2008, Aout). Estimating the color of maxillary central incisors based on age and gender. *Journal of prosthetic Dentistry*, 100, 93-98.
- [28] Hammad, I. A. (2003, january). Intrarater repeatability of shade selections with two shade guides. *The journal of prosthetic dentistry*, 89(1), 50-53.
- [29] Horn, D. J., Bulan-Brady, J., & Hicks, L. (1998). Sphere spectrophotometer versus human evaluation of tooth shade. *Journal of Endodontics*, 24(12), 786-790.
- [30] *Illuminants*. . Consulté le Décembre 2011, sur Profil-Couleur: <http://www.profil-couleur.com/lc/015-couleur-illuminant.php>
- [31] Imai, F. H. (2009). Reviewing state of art imaging modalities and its potential for biomedical applications. *Journal of dentistry, Elsevier*, 37s, e7-e14.
- [32] Ishikawa-Nagai, S., Ishibashi, K., Tsuruta, O., & Weber, H.-P. (2005, February). Reproducibility of tooth color gradation using a computer color-matching technique applied to ceramic restorations. *The journal of prosthetic dentistry*, 93, 129-137.
- [33] Ishikawa-Nagai, Yoshida, Silva, D., & Miller. (2010). Spectrophotometric Analysis of Tooth Color Reproduction on Anterior All-Ceramic Crowns: Part 1: Analysis and Interpretation of Tooth Color. *Journal of esthetic and restorative dentistry*, 22, 42-52.
- [34] IUFM. . Consulté le janvier 2012, sur (<http://physique.paris.iufm.fr:/lumiere/>)
- [35] Jaja, R. J., Nagai, S., Karimbux, N., & Da Silva, J. D. (2010, Septembre). Evaluating tooth color matching ability of dental students. *Journal of dental education*, 74(9), 1002-1010.
- [36] Jarad, F., Russell, M., & Moss, M. (2005, Juillet). The use of digital imaging for colour matching and communication in restorative dentistry. *The british dental journal*, 199(1), 43-49.
- [37] Johnson, T. (2004, Décembre). Color Management, Glossary of Terms. *International Color Consortium, White paper*(5), 1-25.

- [38] Joiner, A. (2004). tooth color : a review of the litterature. *journal of dentistry, Elsevier*.
- [39] Joiner, A., Hopkinson, I., Deng, Y., & Westland, S. (2008). A review of tooth color and whiteness. (Elsevier, Éd.) *Journal of dentistry, 36s*, s2-s7.
- [40] Kourtis, S. G., Tripodakis, A.-P., & Doukoudakis, A. A. (2004, Novembre). Spectrophotometric evaluation of the optical influence of different metal alloys and porcelains in the metal ceramic complex. *The journal of prosthetic Dentistry, 92*, 477-485.
- [41] Kurd, F. M., Jasinevicius, T., Graves, A., Cox, V., & Sadan, A. (2006, Décembre). Comparison of the shade matching ability of dental students using two light sources. *The journal of prosthetic dentistry, 96*(6), 391-396.
- [42] Kwon, S.-R. (2009). Tooth-whitening : a conservative approach. *Cosmetic dentistry, 1*, 8-11.
- [43] Lardeux, G. (2008). *Apport de la photographie dans la gestion de l'esthétique en prothèse fixée*. Nantes, France.
- [44] Lasserre, J.-F. (2008, Novembre). Le relevé de la couleur : Quelles sont les évolutions instrumentales? *Le fil dentaire, 37*, 30-32.
- [45] Lee, Y.-K., Yu, B., Lim, J.-I., & Lim, H.-N. (2011, February). Perceived color shift of a shade guide according to the change of illuminant. *The journal of prosthetic dentistry, 105*, 91-99.
- [46] Lere, A. (2008, Mars). *La stratification des composites*. Nantes, France.
- [47] Li, J. (2008, Mai). Traitements cognitifs mis en jeu dans la perception visuelle de scènes complexes et conséquences sur l'indexation automatique d'images. *These, spécialité : psychologie expérimentale*. Rennes, France.
- [48] *Lumière*. . Consulté en Mars 2012, sur cours en ligne, Université de Strasbourg: <http://coursenligne.u-strasbg.fr/pages.jsp?idRub=471&idsite=142>
- [49] Marcucci, B. (2003). A shade selection technique. *the journal of prosthetic dentistry, 89*(5), 518-521.
- [50] *Maxisciences*. . Consulté le Novembre 11, 2011, sur www.maxisciences.com/r%E9tine/tout-savoir.html#Quelques_zones_particuli.C3.A8res_de_la_r.C3.A9tine
- [51] Nait Lechguer, A. (2010, Octobre). Ingénierie de l'organe dentaire à partir de cellules dissociées : morphogénèse coronaire, vascularisation et innervation. Strasbourg, France.
- [52] *Normes d'éclairage*. . Consulté le 11 septembre, 2011, sur <http://www.profil-couleur.com/lc/017-normes-eclairage.php>
- [53] O'Brien, W. (1985, Octobre). Double layer effect and other optical phenomena related to esthetics. *Dent Clin North America, 29*(4), 667-672.
- [54] O'Brien, W., Boenke, K., & Groh, C. (1991). Coverage errors of two shade guides. *journal of prosthodontics, 4*(1), 45-50.
- [55] O'Brien, W., Groh, C., & Boenke, K. (1990, Novembre). A new, small color difference equation for dental shades. (SAGE, Éd.) *Journal of dental research, 69*(11), 1762-1764.
- [56] Oh, W.-S., Pogoncheff, J., & O'Brien, W. J. (2010, Juin). Digital computer matching of tooth color. *Materials, 3*, 3694-3699.

- [57] Okubo, S. R., Kanawati, A., Richards, M. W., & Childress, S. (1998, Décembre). Evaluation of visual and instrument shade matching. *The journal of prosthetic dentistry*, 80(6), 642-648.
- [58] Ozcelik, T. B., Yilmaz, B., Ozcan, I., & Kircelli, C. (2008, Mars). Colorimetric analysis of opaque porcelain fired to different base metal ceramic restoration. *Journal of prosthetic dentistry*, 99, 193-202.
- [59] Paravina, R. D., Westland, S., Imai, F. H., Kimura, M., & Powers, J. M. (2006). Evaluation of blending effect of composites related to restoration size. (Elsevier, Éd.) *Journal of materials*, 22, 299-307.
- [60] Paravina, R. D., Westland, S., Kimura, M., Powers, J. M., & Imai, F. H. (2006). Color interaction of dental materials: Blending effect of layered composites. *Dental materials. Elsevier*, 22, 903-908.
- [61] Paravina, R., Stankovic, D., Aleksov, L., Mladenovic, D., & Ristic, K. (1997). Problems in standard shade matching and reproduction procedure in dentistry : a review of the state of art. *Facta Universitatis, Yougoslavie*, 4(1), 12-16.
- [62] Park, J.-H., Lee, Y.-K., & Lim, B.-S. (2006, Décembre). Influence of illuminants on the color distribution of shade guides. *The journal of prosthetic dentistry*, 96(6), 402-411.
- [63] Pignoly, Aubut, Baixe, Barthelemy, Etienne, Girard, et al. (2010). Prise de teinte, des techniques conventionnelles aux techniques électroniques. *ADF*, (pp. 3-7). Paris.
- [64] Poupart, S. (2009). *Perception des couleurs et formes orales solides*. Nancy, France.
- [65] *Prévention : Vision et travail*. . Consulté le 2 mars, 2012, sur <http://www.ast74.fr/prevention/id-29-vision-et-travail>
- [66] Ryan, E.-A., Tam, L. E., & McComb, D. (2010). Comparative translucency of esthetic composite resin restorative materials. *J Can Dent Assoc*.
- [67] Sabherwal, Gonzales, & Naini. (2009, Juin). Assessing the Influence of Skin Color and Tooth Shade Value on Perceived Smile analysis. *Journal of the American dental association*, 140(6), 696-705.
- [68] Schanda, J. D. (2003). *Colorimetry*. USA: Dr Casimer DeCusatis, IBM.
- [69] Schropp, L. (2009). Shade matching assisted by digital photography and computer software. *The American college of prosthodontists*, 18, 235-241.
- [70] Sfreddo, M., & Mason, S. (2005, Septembre/Octobre). Evaluation du blanchiment dentaire par spectrophotométrie et sem. *Quintessence internationale*, pp. 55-76.
- [71] Sikri, V. K. (2010, Octobre-Décembre). Color: Implications in dentistry. *Journal of conservative dentistry*, 13, 249-255.
- [72] Sodagar, Rafatjoo, Borujeni, G., Noroozi, & Sarkhosh. (2010, Septembre). Software Design for Smile Analysis. *Journal of dentistry*, 7(4), pp. 170-178.
- [73] Tirlet, G. (2004, Septembre). La demande esthétique actuelle en odontologie. *L'information dentaire*, 86(31), pp. 1943-1948.
- [74] Tournette, & risques, G. é. (2010, Septembre). *Annecy Santé au travail*. Consulté le 9 Mai 2012, sur www.ast74.fr.

- [75] Ueda, T., Takagi, I., Ueda-Kodaira, Y., Sugiyama, T., Hirose, N., Ogami, K., et al. (2010). Color differences between Artificial and Natural teeth in removable partial denture wearers. *Bulletin of Tokyo Dental College*, 51(2), 65-68.
- [76] Vafai, Soltani, kakhodazadeh, Moshiri, & Khoshhal. (2012). Evaluation of color and contour matching accuracy with digital photography and direct vision. *Research journal of medical science*, 6(2), 46-50.
- [77] Valsesia, L. (2005). *Reconstruction du secteur antérieur par procédés céramo-céramiques : données actuelles*. Nancy.
- [78] Vanel, T. (2007). *Impact des facteurs humains dans l'intégration esthétique d'un élément céramique*. Nancy, France.
- [79] Villaroel, M., Fahl, N., De Sousa, A. M., & De Oliveira, O. B. (2011, février 25). Direct Esthetic Restorations Based on Translucency and Opacity of Composite Resins. (W. periodicals, Éd.) *Journal of esthetic and restorative dentistry*, 23, 77-88.
- [80] Wack, E. (2008). *Enregistrement de la teinte : les teintiers et les systèmes numériques*. Nancy, France.
- [81] Weiss, J. (1998, Octobre). *Television : Perception visuelle humaine* (Vol. 1).
- [82] White, J., & O'Brien, W. (1989, September). The colors of mixtures of dental opaque porcelains. (SagePublications, Éd.) *Journal of dental research*, 68(9), 1319-1322.
- [83] Yoshida, A., Miller, L., Da Silva, J. D., & Ishikawa-Nagai, S. (2010). Spectrophotometric analysis of tooth color reproduction on anterior all-ceramic crowns : part 2 : color reproduction and its transfer from in vitro to in vivo. *Journal of esthetic restorative dentistry*, 22(1), 53-65.

5 Annexes :

5.1 Annexe 1 :

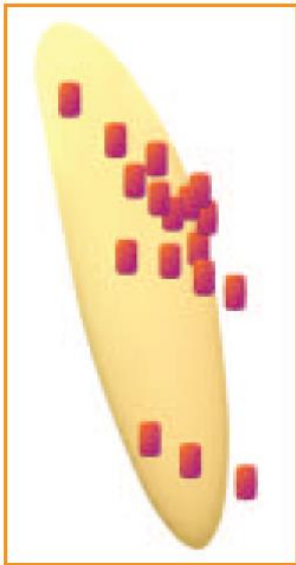
Tableau des abréviations utilisées dans le tableau suivant. (8)

Material ^a	Designation	Manufacturer	City	State
Esthet X1	EX	DENTSPLY Caulk	Milford	DE, USA
Filtek Supreme™	FS	3M ESPE Dental	St. Paul	MN, USA
Matrixx Anterior	MA	Discus Dental	Culver City	CA, USA
Point 4	PF	Kerr Corp.	Orange	CA, USA
Renamel™	RE	Cosmedent1	Chicago	IL, USA
^a Where there was a choice of dentin, body or enamel shades the dentin shade was used.				

Tableau des différences de couleurs ΔE et de coordonnées colorimétriques L , c et h entre la cible Vitapan Classical® et le composite, classées par matériau.

	$\Delta E'$	$\Delta L'$	$\Delta C'$	$\Delta h'$
<u>Vita Tab A3.5</u>				
EX	8.5 (0.3)	1.4 (0.3)	-8.4 (0.3)	-0.8 (0.2)
FS	5.6 (0.6)	5.2 (0.9)	-1.8 (0.5)	-0.6 (0.3)
MA	2.0 (0.7)	0.7 (0.4)	-1.9 (0.6)	-0.1 (0.3)
PF	10.4 (0.2)	10.1 (0.2)	-2.4 (0.2)	0.3 (0.2)
RE	7.2 (1.7)	2.1 (0.3)	-5.7 (0.3)	-2.1 (0.1)
Mean	6.7	4.2	-3.9	-0.6
<u>Vita Tab B2</u>				
EX	7.5 (0.5)	2.4 (0.5)	-7.1 (0.5)	-0.5 (0.2)
FS	7.2 (0.3)	6.5 (0.4)	-3.0 (0.2)	0.7 (0.1)
MA	4.4 (0.6)	3.7 (0.9)	-1.9 (1.3)	0.6 (0.4)
PF	6.0 (0.6)	5.1 (0.4)	-2.8 (0.9)	-1.3 (0.1)
RE	7.2 (0.5)	-0.5 (0.2)	-7.2 (0.5)	-0.5 (0.1)
Mean	6.5	3.4	-4.4	-0.2
<u>Vita Tab C1</u>				
EX	4.2 (0.6)	2.9 (0.7)	0.2 (0.9)	-2.9 (0.2)
FS	6.7 (0.4)	5.5 (0.4)	-3.8 (0.2)	0.2 (0.1)
MA	3.1 (0.9)	-1.8 (0.2)	-2.0 (1.3)	-1.3 (0.2)
PF	5.5 (0.2)	4.1 (0.3)	-2.1 (0.6)	-2.9 (0.3)
RE	7.6 (0.5)	-2.9 (0.5)	-6.6 (0.4)	-2.3 (0.1)
Mean	5.4	1.6	-2.9	-1.8
<u>Vita Tab C3</u>				
EX	4.2 (0.4)	1.8 (0.4)	1.7 (0.7)	-3.3 (0.2)
FS	13.8 (0.6)	13.7 (0.6)	1.2 (0.3)	0.0 (0.1)
MA	3.0 (0.7)	2.4 (0.8)	-0.3 (0.6)	-1.6 (0.2)
PF	6.8 (1.0)	6.2 (1.1)	-2.0 (0.4)	-1.7 (0.2)
RE	6.4 (0.7)	-0.6 (0.2)	-5.9 (0.7)	-2.3 (0.2)
Mean	6.8	4.7	-1.1	-1.8
<u>Vita Tab D2</u>				
EX	5.73 (0.2)	-3.9 (0.07)	-4.0 (0.3)	-1.3 (0.2)
FS	7.2 (0.1)	5.2 (0.25)	-4.9 (0.1)	0.7 (0.1)
MA	3.9 (2.9)	0.7 (2.40)	-3.3 (2.7)	-0.2 (0.6)
PF	4.9 (0.5)	2.6 (0.73)	-3.8 (0.3)	-1.6 (0.7)
RE	9.0 (0.8)	-4.4	-7.7	-1.1
Mean	6.1	0.0	-4.7	-0.7

5.2 Annexe 2 :



Répartition des échantillons de couleur d'un teintier classique au sein de l'espace de couleur des dents naturelles. (2)

5.3 Annexe 3 :

Vues d'une même image en fonction de la dyschromatopsie :



Normal

Protanope

Deuteranope

Source : <http://colorvisiontesting.com/what%20colorblind%20people%20see.htm>

5.4 Annexe 4 :

Médicaments pouvant causer des troubles de la vision des couleurs. (64)

Famille thérapeutique	Médicaments	Point d'impact	Signes chromatiques
AINS	Indométhacine Ibuprofen	Epithélium pigmentaire Nerf optique	Voisins de APS Dys. Rouge-vert II
Antinéoplasiques	Nilutamide Tamoxifen	Couches internes rétine	Dys. Bleu-jaune
Cardiologie	Digitaliques : digoxine, digitoxine Amiodarone	Photorécepteurs Nerf optique, gros axones	Dys. Rouge-vert I ou Bleu-jaune. Chromatopsies Low discrimination
Hormones	Contraceptifs oraux	Rétine	Dys. Bleu-jaune
Antiinfectieux Antituberculeux	Chloramphénicol Ethambutol Isoniazide	Nerf optique Nerf optique	Dys. Rouge-vert II Dys. Rouge-vert II, parfois Dys. Bleu-jaune.
Infection urinaire Antifongiques	Acide nalidixique Griséofulvine Nystatine	Nerf optique Rétine	Chromatopsies Chromatopsies
Antipaludéens	Quinine Chloroquine amodiaquine Hydroxychloroquine	Rétine	Dys. Bleu-jaune puis Rouge-vert
Infection intestinale	Dérivés de quinol	Nerf optique	Dys. Rouge-vert
Métabolisme Concurrents vitamine A	Cantaxanthine Isotrétinoïne	Rétine	Dys. Bleu-jaune
Anticomitiaux	Carbamazépine Phénytoïne	Rétine	Dys. Bleu-jaune
Psychiatrie	Phénothiazines (chlorpromazine) Butyrophénines (halopéridol) Benzodiazépine (diazepam) I.M.A.O.	Epithélium pigmentaire Rétine Nerf optique	Dys. Bleu-jaune, parfois Dys. Rouge-vert I Dys. Rouge-vert II
Chélateurs	Desferrioxamine	Rétine	Dys. Bleu-jaune

5.5 Annexe 5 : Etude menée en octobre 2012 :

Problématique : Le relevé de la couleur des dents est un acte courant pour le chirurgien-dentiste. Nous savons que 8,5% de la population générale sont atteints de dyschromatopsie. Certains n'en sont pas conscients. Le dentiste est aussi concerné. Un diagnostic précoce permettrait au praticien dyschromate de connaître son état et s'y adapter pour relever une couleur correcte.

Objectif : Déterminer par le test d'Ishihara la prévalence d'étudiants en troisième année d'études en odontologie à Toulouse souffrant de manière non consciente dyschromatopsie.

Matériel et Méthode :

Nous avons réalisé le test d'Ishihara sur 63 étudiants de la faculté d'odontologie à Toulouse. Critère d'inclusion : étudiants en troisième année, présents lors de l'évaluation.

Le questionnaire ci-après a été renseigné par chaque individu, puis le tableau suivant nous a permis d'interpréter les résultats du test.

Questionnaire :

Age = Promotion = D1 Sexe= F ☐ H ☐

Pb de vue ? oui ☐ non ☐ si oui, lequel ?.....

Diabète ? oui ☐ non ☐ Contraceptif oral ? oui ☐ non ☐

Médicaments ? ☐ Antidépresseurs, ☐ antiépileptiques, ☐ antituberculeux, ☐ digitaline,
☐ viagra, ☐ autre, lequel ?

Pensez-vous voir correctement les couleurs ? oui ☐ non ☐

Planche 3

Vision normale : 6

Protan-Deutan : 5

Tritan : 6

Achromate : rien

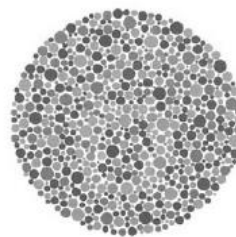
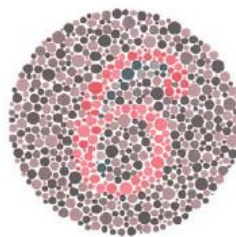


Planche 4

Vision normale : 29

Protan-Deutan : 70

Tritan : 29

Achromate : rien

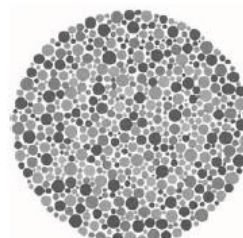
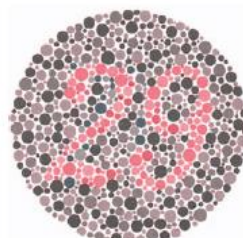
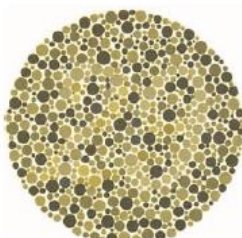
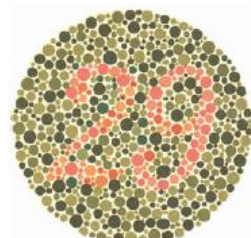


Planche 5

Vision normale : 57

Protan-Deutan : 35

Tritan : 57

Achromate : rien

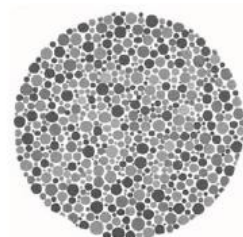


Tableau ayant permis l'interprétation :

	NORMAL	PROTAN	DEUTAN	TRITAN	ACHROMATE
1	12	12	12	12	12
2	8	3	?	?	?
3	6	5	6	Rien	
4	29	70	29	-	
5	57	35	57	-	
6	5	2	5	-	
7	3	5	3	-	
8	17	17	15	-	
9	74	21	71	-	
10	2	-	74 ?	-	
11	6	-	6	-	
12	97	-	97	-	
13	45	-	45	-	
14	5	-	5	-	
15	7	-	7	-	
16	16	-	16	-	
17	73	-	73	-	
18	-	5	-	-	
19	-	2	-	-	
20	-	45	-	-	
21	-	45	-	-	
		Protan (léger)	Deutan (léger)		
22	26	(2)6	2(6)	?	-
23	42	(4)2	4(2)	?	-
24	35	(3)5	3(5)	?	-
25	96	(9)6	9(6)	?	-
37	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok
38	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok

Résultats :

63 dentistes ou futurs dentistes	H	F	diabète	médicaments	Problèmes de vue	Dyschromatopsies
	28	35	0	0	38	2
	44.4%	55.6%	-	-	60.3%	3.2%

Nous avons décelé deux personnes atteintes de dyschromatopsie. Ce test révèle principalement les déficiences dans le rouge et le vert. Une de ces deux personnes avait répondu « oui » à la question « pensez-vous voir correctement les couleurs », la deuxième était déjà consciente de son désavantage.

Les deux personnes décelées sont de sexe masculin, ce qui représente un pourcentage de 7,1% des hommes. Une des deux personnes souffre de problème de vue.

La moyenne d'âge des personnes analysées est de 21 ans.

Discussion :

Cette étude a été menée sur un petit échantillon de personnes de la profession, élargir le panel permettrait d'obtenir des résultats plus significatifs qui mèneraient à une conclusion plus solide. De plus, elle pourrait probablement intégrer des statistiques sur les facteurs étiologiques des dyschromatopsies, tels que le diabète, des médicaments.

Le test d'Ishihara a été choisi car sa mise en place et son interprétation sont plus aisées que le test des 100 Hue. En revanche il est moins discriminatif que ce dernier. Il serait donc intéressant de pratiquer une étude du même type, utilisant le test des 100 Hue.

Ceci dit, si un dépistage de la totalité des étudiants en chirurgie dentaire devait être mis en place, la facilité et la rapidité de réalisation du test d'Ishihara, en font un test de premier choix.

Perspective :

Cette étude révèle, même sur un petit nombre d'étudiants, des personnes atteintes de défauts de vision des couleurs, qui représentent 3,2% des étudiants analysés, et encore 7,1% des étudiants de sexe masculin testés. Un d'eux ignorait sa faiblesse. Cet élément appuie l'idée qu'il est conseillé de mettre en place un dépistage systématique de défaut de la vision des couleurs, en début de pratique de l'art dentaire.

RELEVÉ DE LA COULEUR AU CABINET DENTAIRE : CONNAISSANCES ET MOYENS D'OPTIMISATION ACTUELS.

RESUME : Ce travail rassemble les connaissances nécessaires au Chirurgien-Dentiste pour comprendre le rendu global de la couleur d'une dent, dans toute sa complexité optique, liée à sa structure particulière, mais aussi pour comprendre le rôle de ses facultés visuelles, les sources d'erreur afin de les éviter, et le fonctionnement des multiples outils apparaissant sur le marché. Ainsi, le praticien soucieux d'optimiser la détermination de la couleur adéquate d'une future prothèse esthétique disposera des clés pour réussir cette étape cruciale et organiser sa pratique.

TITLE : Color matching in the dental office : actual knowledge et and optimization tools.

SUMMARY : This work delivers the necessary knowledge to the Dentist in order to understand the global aspect of a tooth color, with its whole optical complexity, due to its particular structure, but also in order to understand the impact of his proper visual functionality. He will also understand the origin of possible errors, so as to avoid them, and the operating of the various tools appearing in the market. Then, the practitioner who wants to optimize the color matching for an esthetic prosthesis, will own the keys to reach this crucial step and organize his way of working.

MOTS-CLÉS : couleur de la dent, mesure de la couleur, espace des couleurs, lumière, composite, techniques de relevé de la couleur, teintier, effet caméléon, protection des yeux, images numériques, spectrophotomètre.

DISCIPLINE ADMINISTRATIVE : Chirurgie Dentaire.

INTITULE ET ADRESSE DE L'UFR : Faculté de Chirurgie Dentaire.

3, Chemin des maraîchers, 31062 Toulouse Cedex 09.

DIRECTEUR DE THESE : Docteur Laurent ELBEZE.