



AVERTISSEMENT

Ce document est le fruit d'un long travail approuvé par le jury de soutenance et mis à disposition de l'ensemble de la communauté universitaire élargie.

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

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

Contact : ddoc-theses-contact@univ-lorraine.fr

LIENS

Code de la Propriété Intellectuelle. articles L 122. 4

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

http://www.cfcopies.com/V2/leg/leg_droi.php

<http://www.culture.gouv.fr/culture/infos-pratiques/droits/protection.htm>

UNIVERSITE HENRI POINCARÉ – NANCY

2009

FACULTE DE PHARMACIE

**PERCEPTION DES COULEURS ET FORMES
ORALES SOLIDES**

THESE

Présentée et soutenue publiquement

Le 10 mars 2009

pour obtenir

le Diplôme d'Etat de Docteur en Pharmacie

par **Ségolène POUPART**
née le 18 décembre 1983 à Bar-le-Duc (55)

Membres du Jury

Président :	Monsieur Luc FERRARI,	Maître de Conférences, Faculté de Pharmacie de Nancy.
Juges :	Monsieur Jacques MANEL,	Docteur en Médecine, Chef de Service CAP-TV, Hôpital Central, Nancy.
	Monsieur Florent CHASPOUL,	Docteur en Pharmacie, Saint-Nicolas-de-Port.

UNIVERSITE Henri Poincaré - Nancy 1
FACULTE DE PHARMACIE

DOYEN

Chantal FINANCE

Vice-Doyen

Francine PAULUS

Président du Conseil de la Pédagogie

Pierre LABRUDE

Responsable de la Commission de la Recherche

Jean-Claude BLOCK

Directeur des Etudes

Gérald CATAU

Responsable de la Commission des Relations Internationales

Janine SCHWARTZBROD

Responsable de la Communication

Francine KEDZIEREWICZ

Responsable de la Commission Hygiène Sécurité

Laurent DIEZ

Responsable de la filière Officine :

Gérald CATAU

Responsables de la filière Industrie :

Isabelle LARTAUD

Jean-Bernard REGNOUF de VAINS

Responsable du CEPH :

(Collège d'Enseignement Pharmaceutique Hospitalier)

Jean-Michel SIMON

Doyen Honoraire : Claude VIGNERON

Professeur Emérite : Gérard SIEST

Professeurs Honoraires

Thérèse GIRARD

Michel JACQUE

Lucien LALLOZ

Pierre LECTARD

Vincent LOPPINET

Marcel MIRJOLET

François MORTIER

Maurice PIERFITTE

Louis SCHWARTZBROD

Maîtres de Conférences Honoraires

Marie-Claude FUZELLIER

Françoise HINZELIN

Marie-Andrée IMBS

Marie-Hélène LIVERTOUX

Jean-Louis MONAL

Marie-France POCHON

Anne ROVEL

Maria WELLMAN-ROUSSEAU

Assistante Honoraire

Marie-Catherine BERTHE

ENSEIGNANTS

PROFESSEURS

Gilles AULAGNER	Pharmacie clinique
Alain BAGREL	Biochimie
Jean-Claude BLOCK	Santé publique
Christine CAPDEVILLE-ATKINSON	Pharmacologie cardiovasculaire
Chantal FINANCE	Virologie, Immunologie
Pascale FRIANT-MICHEL	Mathématiques, Physique, Audioprothèse
Marie-Madeleine GALTEAU.....	Biochimie clinique
Christophe GANTZER	Microbiologie environnementale
Max HENRY	Botanique, Mycologie
Jean-Yves JOUZEAU	Bioanalyse du médicament
Pierre LABRUDE	Physiologie, Orthopédie, Maintien à domicile
Dominique LAURAIN-MATTAR.....	Pharmacognosie
Isabelle LARTAUD.....	Pharmacologie
Pierre LEROY.....	Chimie physique générale
Philippe MAINCENT.....	Pharmacie galénique
Alain MARSURA.....	Chimie thérapeutique
Patrick MENU.....	Physiologie et physiopathologie humaine
Jean-Louis MERLIN.....	Biologie cellulaire oncologique
Alain NICOLAS.....	Chimie analytique
Jean-Bernard REGNOUF de VAINS.....	Chimie thérapeutique
Bertrand RIHN.....	Biochimie, Biologie moléculaire
Janine SCHWARTZBROD	Bactériologie, Parasitologie
Jean-Michel SIMON.....	Economie de la santé, Législation pharmaceutique
Claude VIGNERON.....	Hématologie, Physiologie

MAITRES DE CONFERENCES

Monique ALBERT.....	Bactériologie, Virologie
Sandrine BANAS.....	Parasitologie
Mariette BEAUD.....	Biologie cellulaire
Emmanuelle BENOIT.....	Communication et Santé
Michel BOISBRUN.....	Chimie thérapeutique
Catherine BOITEUX.....	Biophysique, Audioprothèse
François BONNEAUX.....	Chimie thérapeutique
Cédric BOURA.....	Physiologie
Gérald CATAU.....	Pharmacologie
Jean-Claude CHEVIN.....	Chimie générale et minérale
Igor CLAROT.....	Chimie analytique
Jocelyne COLLOMB.....	Parasitologie, Organisation animale
Joël COULON.....	Biochimie
Sébastien DADE.....	Bio-informatique
Dominique DECOLIN.....	Chimie analytique
Béatrice DEMORE.....	Pharmacie clinique
Joël DUCOURNEAU.....	Biophysique, Audioprothèse, Acoustique
Florence DUMARCAY.....	Chimie thérapeutique
François DUPUIS.....	Pharmacologie
Raphaël DUVAL.....	Microbiologie clinique

Béatrice FAIVRE.....	Hématologie
Adel FAIZ.....	Biophysique-accoustique
Luc FERRARI.....	Toxicologie
Stéphane GIBAUD.....	Pharmacie clinique
Françoise HINZELIN.....	Mycologie, Botanique
Thierry HUMBERT.....	Chimie organique
Frédéric JORAND.....	Santé et Environnement
Francine KEDZIEREWICZ.....	Pharmacie galénique
Alexandrine LAMBERT.....	Informatique, Biostatistiques
Brigitte LEININGER-MULLER.....	Biochimie
Faten MEHRI-SOUSSI.....	Hématologie biologique
Christophe MERLIN.....	Microbiologie environnementale et moléculaire
Blandine MOREAU.....	Pharmacognosie
Maxime MOURER.....	Pharmacochimie supramoléculaire
Dominique NOTTER.....	Biologie cellulaire
Francine PAULUS.....	Informatique
Christine PERDICAKIS.....	Chimie organique
Caroline PERRIN-SARRADO.....	Pharmacologie
Virginie PICHON.....	Biophysique
Anne SAPIN.....	Pharmacie galénique
Marie-Paule SAUDER.....	Mycologie, Botanique
Nathalie THILLY.....	Santé publique
Gabriel TROCKLE.....	Pharmacologie
Noëlle VAULTIER.....	Biodiversité végétale et fongique
Mohamed ZAIYOU.....	Biochimie et Biologie moléculaire
Colette ZINUTTI.....	Pharmacie galénique

PROFESSEUR ASSOCIE

Anne MAHEUT-BOSSER..... Sémiologie

PROFESSEUR AGREGE

Christophe COCHAUD..... Anglais

ASSISTANT

Annie PAVIS..... Bactériologie

SERVICE COMMUN DE DOCUMENTATION DE L'UNIVERSITE (SCD)

Anne-Pascale PARRET..... Directeur
 Jeannine GOLEC..... Responsable de la section Pharmacie-
 Odontologie

SERMENT DES APOTHICAIRES



Je jure, en présence des maîtres de la Faculté, des conseillers de l'ordre des pharmaciens et de mes condisciples :

D'honorer ceux qui m'ont instruit dans les préceptes de mon art et de leur témoigner ma reconnaissance en restant fidèle à leur enseignement.

D'exercer, dans l'intérêt de la santé publique, ma profession avec conscience et de respecter non seulement la législation en vigueur, mais aussi les règles de l'honneur, de la probité et du désintéressement.

De ne jamais oublier ma responsabilité et mes devoirs envers le malade et sa dignité humaine ; en aucun cas, je ne consentirai à utiliser mes connaissances et mon état pour corrompre les mœurs et favoriser des actes criminels.

Que les hommes m'accordent leur estime si je suis fidèle à mes promesses.

Que je sois couvert d'opprobre et méprisé de mes confrères si j'y manque.



« LA FACULTE N'ENTEND DONNER AUCUNE APPROBATION, NI IMPROBATION AUX OPINIONS EMISES DANS LES THESES, CES OPINIONS DOIVENT ETRE CONSIDEREES COMME PROPRES A LEUR AUTEUR ».

Remerciements

A notre Président du jury et Directeur de Thèse,

Monsieur Luc FERRARI,

Maître de conférences à la Faculté de Pharmacie de Nancy,
Laboratoire de Toxicologie.

Vous nous avez fait l'honneur d'accepter la direction de notre thèse ainsi que la Présidence de notre jury.

Nous vous remercions pour vos conseils et votre écoute.

Veillez trouver ici l'expression de notre respectueuse gratitude.

A nos juges,

Monsieur Jacques MANEL,

Docteur en Médecine,
Chef de Service du Centre Antipoison-Toxicovigilance du Centre Hospitalier
Universitaire de Nancy.

*Pour avoir accepté de juger cette thèse, nous vous prions de trouver ici notre
profonde reconnaissance.*

Monsieur Florent CHASPOUL,

Docteur en Pharmacie, Saint-Nicolas-de-Port.

*Nous vous adressons nos plus sincères remerciements pour avoir bien voulu
juger ce travail.*

A mes parents,

Pour votre soutien et votre amour. Pour m'avoir donné l'envie de faire ce métier.
Vous m'avez permis de poursuivre mes études dans les meilleures conditions.

A ma sœur Alice,

Pour les heureux moments passés ensemble et ceux à venir.

A mes grands-parents,

Pour votre gentillesse et vos encouragements.

A toute ma famille.

A mes chères amies et consoeurs,

Amé, Anne-Gaëlle, Anne-Lorraine, Audrey, Manue, Mélou, Nadège, Pauline, Sophie,
Valérianne,

Pour votre amitié et votre bonne humeur, dans nos aventures passées et futures.

A mes chers amis et confrères,

Alex, Bruno, Charles, Edouard, Florent, Franck, Guillaume, Jean-Baptiste, Jef, Manu,
Marc, Simon, Thiébaud,

Pour les bons moments passés en votre compagnie : je les espère encore nombreux.

A mes amies de longue date,

Anne-Laure, Anne-Virginie, Charlotte, Erwane et Marion.

A Solène,

Pour ton aide précieuse.

A mes maîtres de stage,

Madame Claudel et Monsieur Marsat,

Madame Delatte,

Madame Jully, Monsieur Bisch et Monsieur Rimmel,

Ainsi qu'à vos équipes, pour votre gentillesse et votre enseignement.

Table des matières

Introduction	9
Partie I : Anatomie et physiologie de l'œil	10
A. Le système visuel : anatomie et physiologie	11
1. L'œil	11
1.1 Membranes de l'œil	12
1.1.1. La coque cornéo-sclérale ou tunique fibreuse	12
1.1.1.1. La cornée	12
1.1.1.2. La sclérotique	13
1.1.1.3. Le limbe cornéo-scléral	13
1.1.2. L'uvée ou tunique vasculaire	13
1.1.2.1. L'iris	14
1.1.2.2. Le corps ciliaire	14
1.1.2.3. La choroïde	15
1.1.3. La rétine	15
1.1.3.1. L'épithélium pigmentaire rétinien	15
1.1.3.2. Le neuro-épithélium rétinien	16
1.1.3.3. Vascularisation de la rétine	18
1.1.3.4. Aspect du fond d'œil	19
1.2. Milieux transparents	20
1.2.1. L'humeur aqueuse, la chambre antérieure, l'angle irido-cornéen, la chambre postérieure, la pression intraoculaire	20
1.2.1.1. Les espaces	20
1.2.1.2. L'humeur aqueuse et la pression intraoculaire	21
1.2.2. Le vitré ou corps vitré	22
1.2.3. Le cristallin	22
1.2.3.1. Structure	23
1.2.3.2. Métabolisme et transparence	23

1.2.3.3. Rôle optique	23
2. Les annexes	24
2.1. L'orbite.....	25
2.1.1. Constitution	25
2.1.2. Lieu de communication et de proximité.....	25
2.2. Les muscles oculomoteurs	25
2.3. La conjonctive	26
2.4. Les paupières.....	26
2.4.1. La paupière supérieure	26
2.4.2. La paupière inférieure	27
2.4.3. Structure	27
2.5. Le système lacrymal et le film lacrymal	28
3. Les voies visuelles.....	29
3.1 Anatomie des voies visuelles	30
3.1.1. Le nerf optique	30
3.1.2. Le chiasma optique.....	30
3.1.3. Les bandelettes optiques.....	30
3.1.4. Corps genouillé latéral	31
3.1.5. Radiations optiques	31
3.1.6. Cortex visuel	31
3.2. Systématisation des voies visuelles.....	32
4. En résumé.....	33
B. La vision	35
1. Système optique de la vision.....	35
1.1 Principes physiques d'optique.....	35
1.1.1. Réfraction de la lumière	35
1.1.2. Application aux lentilles des principes de réfraction	35
1.1.3. Distances focales d'une lentille.....	36
1.1.4. Formation d'une image par une lentille convexe.....	36
1.1.5. Mesure du pouvoir de réfraction d'une lentille – la dioptrie.....	37
1.2. Système optique de l'œil	37

1.2.1. Formation des images.....	37
1.2.1.1. Réfraction des rayons lumineux.....	37
1.2.1.2. Accommodation et punctum proximum.....	38
1.2.1.3. Contraction de la pupille.....	39
1.2.2. Convergence.....	39
2. Fonctions réceptrices de la rétine – Photochimie de la vision.....	39
2.1. Photorécepteurs et photopigments.....	40
2.2. Libération du neurotransmetteur par les photorécepteurs.....	41
2.3. Vision scotopique et photopique.....	42
3. Neurophysiologie centrale de la vision.....	43
3.1. Les voies visuelles.....	43
3.2. Organisation et fonction du cortex visuel.....	44
C. La vision normale des couleurs.....	46
1. Historique.....	46
1.1. La préhistoire.....	46
1.2. L'Antiquité.....	46
1.3. Du Moyen-Age au XVIII ^{ème} siècle.....	47
1.4. Newton, Young, Helmholtz, Maxwell, Hering.....	48
2. La nature de la lumière.....	49
3. Les pigments.....	50
4. De l'organisation du système visuel à la vision des couleurs.....	51
4.1. La vision des couleurs et les différents types de cônes.....	51
4.2. La transduction de la lumière par les cônes.....	53
4.3. Le trichromatisme rétinien.....	53
4.4. Les mécanismes nerveux.....	54
5. Conditions de perception.....	54
5.1. Contraste de luminosité.....	54
5.2. Contraste de saturation.....	55
5.3. Contraste de teinte.....	55

5.4. Contraste simultané	56
5.5. Différence d'observateur	57
5.6. Différence de taille	57
6. Variations physiologiques dans la vision des couleurs	57
7. La perception des couleurs par les animaux.....	58
D. Pathologies de la vision des couleurs	60
1. Analyse de la vision colorée.....	61
1.1. Les tables pseudo-isochromatiques	61
1.2. Les tests de Farnsworth	61
1.3. Les anomaloscopes.....	62
1.4. L'électro-rétinogramme	62
2. Les pathologies de la vision colorée	63
2.1. Les pathologies rétiniennes	63
2.1.1. Les dyschromatopsies congénitales	63
2.1.1.1. Description	63
2.1.1.2. Vision du daltonien	65
2.1.1.3. Génétique du daltonisme.....	65
2.1.2. Les dégénérescences tapéto-rétiniennes.....	66
2.2. La dyschromatopsie du diabétique.....	67
2.3. La dyschromatopsie dans le glaucome.....	67
2.4. Les neuropathies optiques	68
2.4.1. Les neuropathies ischémiques.....	68
2.4.2. Les neuropathies inflammatoires et infectieuses.....	69
2.4.3. Les neuropathies toxiques	69
2.4.4. Les neuropathies dégénératives.....	71
2.5. Les syndromes déficitaires	72
2.5.1. La cécité corticale.....	72
2.5.2. Les agnosies visuelles	72
2.5.3. Les syndromes de dysconnexion.....	73

Partie II : La couleur	75
A. Comprendre la couleur	76
1. La couleur comme phénomène physique	77
1.1. Les ondes électromagnétiques	77
1.2. Composition spectrale de la lumière	77
1.3. Les sources de lumière	78
1.4. Température de couleur	78
1.5. Interaction de la lumière et de la matière	79
1.6. Couleur des objets	80
2. La couleur comme phénomène psychologique	81
B. Perception et mesure des couleurs	83
1. La perception des couleurs	83
1.1. Influence du cadre environnant	83
1.2. Le rendu des couleurs	84
1.3. Synthèse additive et soustractive des couleurs	85
1.3.1. La synthèse additive	85
1.3.2. La synthèse soustractive	86
1.4. Couleurs primaires, secondaires et complémentaires	86
1.5. L'harmonie des couleurs	88
1.5.1. L'harmonie subjective	88
1.5.2. L'harmonie objective	89
2. Mesure de la couleur	90
2.1. La colorimétrie	90
2.2. La psychométrie	91
3. Les nuanciers de couleurs	93
3.1. Le système Pantone®	93
3.2. Le système RAL	95
3.3. Le système Munsell	96
3.4. Le système ISCC-NBS	98

3.5. Le système NCS	98
3.6. Le système Ostwald	100
C. Fabriquer les couleurs	101
1. Les pigments	101
1.1. Définition	101
1.2. Quelques pigments issus des terres	102
1.3. Quelques pigments issus des minéraux	102
1.4. Quelques pigments végétaux.....	103
1.5. Quelques pigments d'origine animale.....	104
1.6. Les pigments synthétiques	105
2. Les colorants	105
2.1. Définitions et historique	105
2.2. Lien entre la structure moléculaire et la couleur	109
2.3. Les colorants des médicaments	110
2.3.1. Intérêt de la coloration.....	110
2.3.2. Recommandations	111
2.3.3. Choix des colorants	111
2.3.3.1. Critères de choix.....	111
2.3.3.2. La coloration des formes orales solides	112
 Partie III : Identification des couleurs des formes orales solides.....	 113
 A. Le fichier national d'identification des formes orales solides médicamenteuses	 114
1. Généralités.....	114
2. La base de données.....	114
3. Démarche générale d'une identification au Centre Antipoison	115
3.1. Les critères d'identification.....	115

3.2. En pratique	116
4. Bilan 2007	116
5. Identification de la couleur externe d'une forme orale solide.....	116
B. Facteurs influençant le choix des couleurs	117
1. L'observateur	117
2. L'éclairage.....	117
3. La coloration de l'environnement	118
4. Reproductibilité.....	118
C. Gestion de la couleur	119
D. Outils permettant l'identification des couleurs	121
1. Le nuancier	121
1.1. Critères de choix.....	122
1.2. Création d'un nuancier	122
1.3. Utilisation d'un nuancier existant	124
2. Les autres méthodes	125
E. Création d'un nuancier d'identification des couleurs des formes orales solides.....	125
 Conclusion	 127
 Annexes	 129
 Références bibliographiques	 143

Table des illustrations

➤ **Figures:**

Figure 1 : Anatomie de l'oeil	11
Figure 2 : Morphologie des cônes et bâtonnets.....	16
Figure 3 : Les voies visuelles	29
Figure 4 : Nerf optique, schéma de son parcours.....	43
Figure 5 : Le spectre électromagnétique	50
Figure 6 : Spectres d'absorption des trois pigments présents dans les cônes.	51
Figure 7 : Exemple de tables d'Ishihara.....	61
Figure 8 : La synthèse additive des couleurs.....	85
Figure 9 : La synthèse soustractive des couleurs	86
Figure 10 : Le cercle chromatique.....	88

➤ **Tableaux :**

Tableau 1 : Médicaments pouvant provoquer des troubles de la vision	70
Tableau 2 : Produits industriels pouvant provoquer des troubles de la vision.....	71
Tableau 3 : Relation psychophysique.....	92
Tableau 4 : Liste des colorants destinés à la coloration des médicaments.....	107

Introduction

La perception physique de la couleur est complexe. Il s'agit de la sensation que produisent sur l'œil les radiations de la lumière et de la manière dont la personne les interprétera.

Le processus de cette interprétation n'est que partiellement compris par les scientifiques. Nous savons que les cônes et les bâtonnets qui composent notre rétine réagissent aux signaux et à la lumière.

Ces informations sont, à leur tour, transmises au cerveau qui traduit en couleurs le jeu de lumière sur un objet.

Ce processus est aussi compliqué qu'il en a l'air. Chaque individu est différent. De ce fait, la perception finale de la couleur risque de l'être également. Cela signifie que la couleur est généralement subjective.

Ce travail rassemble les différentes données concernant la perception colorée et s'articule en trois parties.

Dans la première partie de cette thèse, grâce à un rappel sur l'anatomie de l'œil, nous découvrirons comment l'œil voit les couleurs. Nous aborderons également les différentes pathologies congénitales ou acquises qui altèrent la vision colorée.

Dans un deuxième temps, nous verrons comment définir les différents aspects de la couleur : sa perception physique et psychologique, sa mesure et sa fabrication.

La dernière partie sera consacrée à l'identification des couleurs des formes orales solides, à travers une présentation du Fichier National d'Identification des Formes Orales Solides Médicamenteuses du Centre Antipoison de Nancy. Nous proposerons un nuancier de couleurs afin d'améliorer l'identification d'une couleur d'une forme orale solide médicamenteuse.

Partie I : Anatomie et physiologie de l'œil

A. Le système visuel : anatomie et physiologie

La vision est l'une des fonctions sensorielles fondamentales qui renseigne sur la forme, sur la couleur, sur la mobilité de l'environnement.

Assurée par le système visuel, la vision comporte deux phases d'élaboration successives :

- des phénomènes optiques qui transforment la lumière en une image rétinienne. Ils sont intégralement assurés par le système réfractif de l'œil.
- des phénomènes nerveux qui débutent au niveau de la rétine par le traitement de l'image optique en un message nerveux organisé, se poursuivent dans les voies visuelles par le transport de cet influx, et se terminent dans le cortex visuel occipital par la reconstitution d'une image intégrée à l'ensemble des autres informations sensorielles et sensibles.

1. L'œil

Organe pair, sphérique, frontal et symétrique de 23 à 24 mm de diamètre, l'œil est constitué des membranes et de milieux transparents.

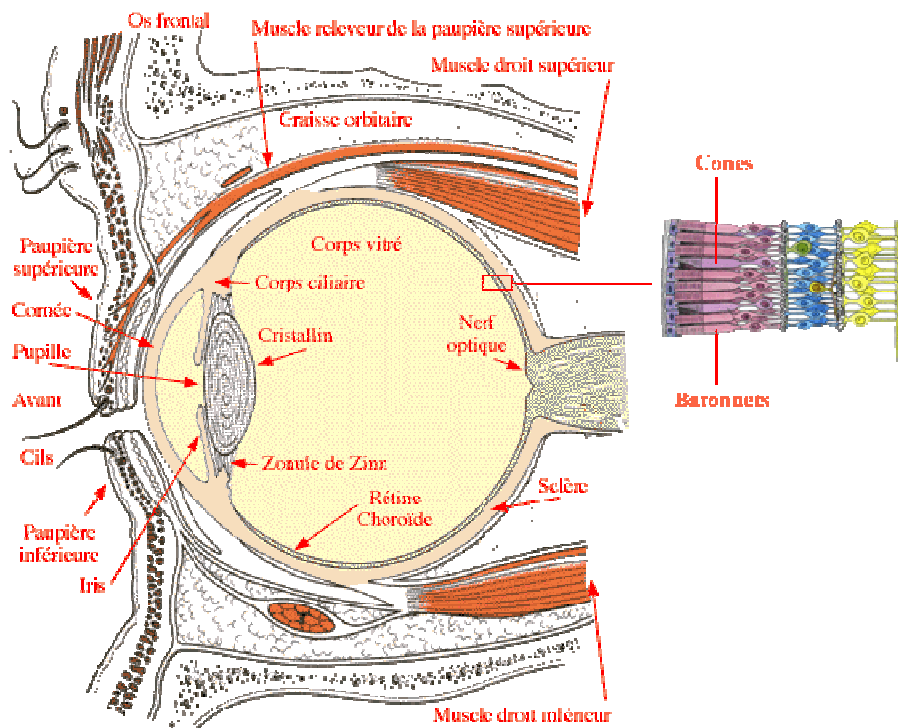


Figure 1 : Anatomie de l'œil

1.1 Membranes de l'œil

Encore dénommées « tuniques », elles sont au nombre de trois et sont superposées les unes sur les autres. On décrit de l'extérieur vers l'intérieur :

- la coque cornéo-sclérale ou tunique fibreuse
- l'uvée ou tunique vasculaire
- la rétine

1.1.1. La coque cornéo-sclérale ou tunique fibreuse ⁽³⁾⁽¹⁷⁾

Elle forme la paroi de l'œil et lui donne sa rigidité, son élasticité et sa résistance. Elle comporte la cornée en avant, la sclérotique en arrière.

1.1.1.1. La cornée

Segment de sphère de 11 à 12 mm de diamètre, elle forme une coupole transparente qui joue le rôle optique d'un dioptré convergent de 40 dioptries de puissance.

Elle est composée de trois tissus superposés :

- l'épithélium antérieur stratifié non kératinisé avec sa membrane basale surmontant la membrane de Bowman très adhérente au parenchyme ;
- le stroma ou parenchyme, tissu collagène paucicellulaire ;
- l'endothélium postérieur unicellulaire, limité vers le parenchyme par la membrane de Descemet.

La transparence de la cornée correspond à un état de déturgescence entretenu par l'activité de l'endothélium, véritable pompe à eau assurant la permanence des mouvements moléculaires et ioniques. Toute atteinte de l'endothélium, toute atteinte de l'intégrité anatomique des différents tissus cornéens conduisent à une hydratation et à une perte de transparence.

La cornée est avasculaire et tire son énergie métabolique du film lacrymal par l'épithélium, de la conjonctive par le limbe, de l'humeur aqueuse par l'endothélium.

Sa sensibilité au contact est extrême. Elle est l'expression d'une riche innervation par les filets terminaux des nerfs ciliaires issus du nerf naso-ciliaire, l'une des trois branches du nerf

optique de Willis du nerf trijumeau. Elle est mise en jeu dès qu'apparaît un état cornéen anormal (atteinte de la surface, inflammation). Elle est à l'origine du réflexe de clignement.

1.1.1.2. La sclérotique ^{(17) (48)}

Plus communément dénommée « sclère » en langage clinique, elle est très résistante. Constituée d'un tissu conjonctif dense très peu vascularisé, elle assure le passage de nombreux éléments vasculo-nerveux. Elle donne insertion aux muscles oculomoteurs.

Beaucoup plus étendue que la cornée, la sclérotique recouvre les 4/5 postérieurs du globe oculaire. Sa partie antérieure correspond au « blanc de l'œil ». Le plan équatorial frontal, qui correspond à celui de son plus grand diamètre, permet de décrire deux segments oculaires :

- le segment pré-équatorial ou segment antérieur formé par la cornée et la partie antérieure de la sclérotique, qui contient l'iris, le corps ciliaire, le cristallin, la chambre antérieure, la chambre postérieure et l'humeur aqueuse.
- Le segment rétro-équatorial ou segment postérieur formé par la partie postérieure de la sclérotique, qui contient la choroïde, la rétine, la papille optique et le vitré.

1.1.1.3. Le limbe cornéo-scléral

Il correspond à la jonction cornéo-sclérale et constitue un repère anatomique, clinique et chirurgical très important.

La transition qui se produit à son niveau entre la cornée transparente et la sclérotique blanche est renforcée par la limite périphérique de l'iris, membrane pigmentaire parfaitement visible à travers la cornée.

1.1.2. L'uvée ou tunique vasculaire

Située à la face interne de la sclérotique, cette tunique est de nature pigmentaire, conjonctive et vasculaire. Elle comprend trois parties bien distinctes :

- l'iris en avant ;
- la choroïde en arrière ;
- le corps ciliaire intermédiaire entre les deux.

La richesse de la vascularisation, de son innervation végétative et de ses composants lymphoïdes la conduise à participer à de nombreux processus pathologiques, en particulier immunitaires.

1.1.2.1. L'iris

Il forme un diaphragme musculo-pigmentaire tendu frontalement à la jonction cornéo-sclérale. Il est perforé d'un orifice central, la pupille.

Le diaphragme irien : sa couleur varie du bleu au brun foncé en fonction de son degré de pigmentation ; elle n'est définitivement acquise qu'après la première enfance. Il constitue un écran infranchissable par la lumière. Il comporte un système musculaire antagoniste :

- le sphincter de l'iris cerne la pupille et assure le rétrécissement de son diamètre (myosis). Il est sous la dépendance des filets parasympathiques du III (nerf moteur oculaire commun) véhiculé par les nerfs ciliaires.
- Le dilatateur de l'iris de disposition radiaire, qui assure la dilatation pupillaire (mydriase). Sa commande nerveuse sympathique provient du plexus sympathique cervical.

La pupille et les réflexes pupillaires : orifice central de l'iris, il permet le passage de la lumière vers le segment postérieur de l'œil et réduit l'incidence lumineuse à un étroit faisceau dépourvu d'aberrations.

Les réflexes pupillaires photomoteurs ajustent en permanence le diamètre de la pupille à l'intensité de la lumière incidente de manière à éviter les trop grandes variations d'illumination de la rétine. Ils sont sous la dépendance du sphincter de l'iris.

1.1.2.2. Le corps ciliaire ⁽¹⁷⁾ (48)

Formation uvéale située en arrière de l'iris et en avant de la choroïde, il s'étend de l'ora serrata, le bord antérieur dentelé de la rétine, jusqu'à un point situé à l'arrière de la jonction entre la sclère et la cornée. Le corps ciliaire assure une triple fonction en physiologie oculaire :

- il participe au phénomène de l'accommodation par le muscle ciliaire, sphincter capable par sa contraction de réduire les phénomènes de tension s'exerçant sur le cristallin ;
- Il donne insertion à la zonule, ligament suspenseur du cristallin ;
- Il sécrète l'humeur aqueuse par ses procès ciliaires et contribue à la régulation de la pression intraoculaire.

1.1.2.3. La choroïde ⁽³⁾ ⁽¹⁷⁾ ⁽⁴⁸⁾

La choroïde est la partie postérieure de l'uvée. Véritable éponge vasculaire, elle tapisse la face interne de la sclérotique. La densité de sa circulation en fait la membrane au plus haut débit sanguin de l'organisme. Ses capillaires fenêtrés forment la chorio-capillaire organisée en lobules anastomotiques.

La choroïde assure le métabolisme de la rétine en transportant les éléments nutritifs et en assurant l'évacuation des déchets. Elle est aussi l'élément clé de la constance de la température intraoculaire. Sa richesse en cellules pigmentées lui donne un rôle d'écran à la lumière.

1.1.3. La rétine ⁽¹⁷⁾

Membrane la plus interne de l'œil, elle est aussi celle qui en assure la sensorialité. Elle transforme la lumière en signaux nerveux. Elle nous permet de voir dans des conditions très variables, en plein soleil comme à la lueur des étoiles, et de distinguer les longueurs d'ondes des rayonnements, c'est-à-dire les couleurs des objets.

Elle tapisse la face interne de la choroïde et se compose de deux parties complémentaires et très distinctes l'une de l'autre : l'épithélium pigmentaire de la rétine (EPR) et le neuro-épithélium rétinien (NER). L'un et l'autre sont en contact, mais néanmoins séparés par une cavité virtuelle.

1.1.3.1. L'épithélium pigmentaire rétinien

Il est l'élément le plus externe de la rétine, directement en contact avec la chorio-capillaire de la choroïde par l'intermédiaire de la membrane de Bruch constituée des membranes basales de l'EPR et des capillaires choroïdiens et d'éléments conjonctivo-élastiques. Par la couche unique de ses cellules épithéliales remplies de mélanosomes, l'EPR n'est pas de nature nerveuse, mais contribue de manière fondamentale au fonctionnement du NER :

- rôle d'écran : par sa pigmentation, il est totalement opaque à la lumière. Il arrête en conséquence la propagation transrétinienne de la lumière et transforme la cavité oculaire en un espace noir ;

- rôle de barrière : par la cohérence de ses jonctions intercellulaires, il assure une perméabilité sélective des métabolites vers le NER. Il constitue la barrière hémato-rétinienne externe ;
- rôle d'élimination : par les extrémités apicales de ses cellules, il assure l'élimination permanente des disques usagés des articles externes des cellules sensorielles du NER et permet ainsi un fonctionnement continu des phénomènes de la photochimie qui assurent la transformation de l'énergie photonique de la lumière incidente en influx nerveux. La diminution de cette fonction d'épuration corrélée au vieillissement en fait le lit de la dégénérescence maculaire liée à l'âge.

Les cellules pigmentaires sont nombreuses à la macula, leur nombre étant proportionnel à celui des photorécepteurs ; elles sont plus rares à la périphérie rétinienne. De même, la densité des pigments est plus importante au niveau de la région maculaire. ⁽⁴⁸⁾

1.1.3.2. Le neuro-épithélium rétinien

Il est la membrane sensorielle de l'œil par l'organisation étagée de ses multiples cellules nerveuses disposées en couches superposées. On peut le diviser en rétine sensorielle comprenant les cellules à cônes et à bâtonnets, et en rétine cérébrale qui groupe les cellules bipolaires et les cellules ganglionnaires. ⁽⁴⁸⁾

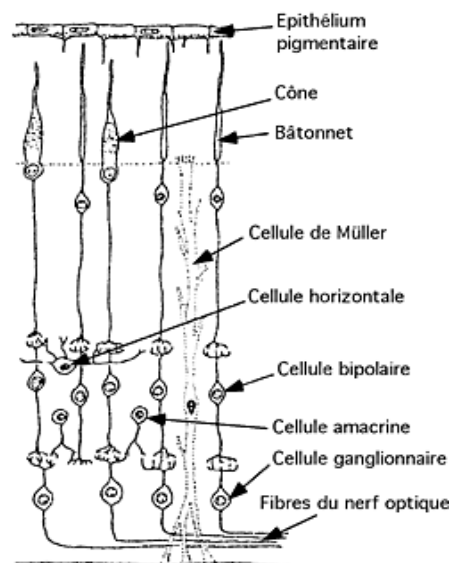


Figure 2 : Morphologie des cônes et bâtonnets

Les cellules visuelles ou photorécepteurs : les cônes et les bâtonnets

Elles forment la couche la plus externe du NER et sont, par leurs articles externes, directement en contact avec l'EPR.

Les cônes : au nombre de 4 à 6 millions, ils sont spécialisés dans la réception de trois types de longueurs d'ondes bien définies (S, short : zone bleue ; M, middle : zone verte ; L, long : zone rouge du spectre).

Capables de réagir aux intensités lumineuses élevées, ils assurent par leur densité et par leurs connexions une transmission « point par point » de l'image rétinienne en lumière diurne (vision photopique).

Les cônes sont concentrés au niveau de la macula lutea (tâche jaune). Située au fond de l'œil, dans l'axe de la pupille, elle est le siège de l'acuité visuelle et du sens coloré. La macula contient en son centre une petite dépression, la fovéa : entièrement composée de cônes serrés les uns contre les autres, celle-ci est la zone d'acuité maximale de l'œil.

Les bâtonnets : beaucoup plus nombreux (100 millions), ils sont disséminés dans toute la rétine sur une surface de 42 mm de diamètre. Sensibles aux faibles intensités lumineuses, ils permettent la vision mésopique (crépusculaire) et la vision scotopique (nocturne).

En raison de leur grand nombre, ils subissent au niveau des cellules bipolaires beaucoup moins nombreuses un phénomène de sommation de l'information nerveuse. Ils n'assurent en conséquence qu'une vision imprécise (inférieure à $1/10^6$) sur toute l'étendue du champ visuel.

Les cellules bipolaires : si les cellules visuelles sont les récepteurs de la lumière, les cellules bipolaires sont le premier neurone, entièrement intrarétinien, des voies visuelles.

Celles en connexion avec les cônes transmettent l'influx nerveux sans phénomène important de sommation ou de concentration. Certaines bipolaires connectées aux cônes sont excitées par la lumière (voie ON), d'autres sont inhibées par la lumière (voie OFF).

Celles 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.

Les cellules ganglionnaires : on trouve à leur niveau une différenciation fonctionnelle encore plus spécialisée :

- la voie magnocellulaire (cellule ganglionnaire de grande taille = cellules α = cellules M) possède des champs rétinien étendus, elle est activée par des stimuli de très faible contraste et comporte une faible sensibilité spectrale. Elle est assurée par 10% des cellules ganglionnaires ;
- la voie parvocellulaire (cellules ganglionnaires de petite taille = cellules β = cellules P) correspond à des champs rétinien réduits et à une sensibilité spectrale élevée. Elle concerne 98% de la population des cellules ganglionnaires et code une seule ou un nombre réduit de cellules bipolaires connectées aux cônes.

Les cellules ganglionnaires, deuxièmes neurones des voies visuelles, sont rétino-cérébrales et forment, par leurs axones, la couche des fibres optiques, la plus interne du NER, qui se concentrent au niveau de la papille optique pour former le nerf optique, puis le chiasma optique et les bandelettes optiques avant de faire relais dans le noyau géniculé latéral.

Les autres cellules du NER : elles correspondent :

- à des cellules nerveuses d'association connectant cellules visuelles, cellules bipolaires et cellules ganglionnaires les unes aux autres : cellules horizontales, cellules amacrines. Leur rôle d'interconnexion horizontale est surtout d'établir des champs rétinien susceptibles d'être activés autour des photorécepteurs excités ;
- à des cellules de soutien, et en particulier aux cellules de Muller qui occupent toute l'épaisseur du NER et jouent le rôle de piliers maintenant la cohérence et le contact des différentes couches de la rétine entre elles.

1.1.3.3. Vascularisation de la rétine

Les artères : elles sont sous la dépendance d'une double alimentation :

- l'EPR et la couche des cellules visuelles du NER tirent leur vascularisation de la choroïde au moyen des échanges entretenus par la chorio-capillaire ;
- les couches les plus internes du NER sont vascularisées par la circulation rétinienne.

Les artères rétinienne se distribuent par division à partir de l'artère centrale de la rétine, branche terminale de l'artère ophtalmique, qui aborde l'œil par la papille optique. Cette circulation artérielle est de type terminal, non anastomotique et se résout en une maille capillaire très dense qui épargne la fovéola avasculaire. Les capillaires rétinien possèdent une sélectivité très élevée vis-à-vis de la diffusion des produits circulants en raison de la force des

connexions intercellulaires de leur endothélium ; c'est à leur niveau qu'est située la barrière hémato-rétinienne interne grâce à laquelle le NER n'est pas altéré par un œdème extracellulaire.

Les veines : elles suivent le même trajet et la même distribution que les artères. Les croisements artério-veineux sont fréquents et typiques. Elles sont collectées par la veine centrale de la rétine qui quitte l'œil par le centre de la papille optique.

1.1.3.4. Aspect du fond d'œil

L'observation clinique du fond d'œil ne peut être que macroscopique. Elle est réalisée à l'aide d'un ophtalmoscope portatif ou de la lampe à fente après interposition d'un verre de contact ou d'une lentille d'observation. L'aspect du fond d'œil est typique et permet de reconnaître :

- la papille optique, encore appelée disque du nerf optique ou tache aveugle est le point où le nerf optique sort du globe oculaire et est située légèrement dans le secteur nasal par rapport au centre. Il s'agit d'une plage circulaire jaune orangée centrée par les vaisseaux rétiniens et leurs divisions (artère centrale de la rétine, veine centrale de la rétine). Il ne contient ni cônes, ni bâtonnets et ne peut capter les images qui l'atteignent ; ⁽⁵²⁾
- la macula, qui centre le fond d'œil, est aussi appelée macula lutea ou tache jaune. Elle est située au centre de la rétine, dans l'axe visuel. La fossette centrale, ou fovea centralis, une petite dépression creusée au centre de la macula, contient seulement des cônes. Ces cônes ne sont pas recouverts par les couches de neurones bipolaires et de cellules ganglionnaires, qui diffusent quelque peu la lumière. Par conséquent, la fossette centrale est le point où l'acuité visuelle, ou résolution, atteint son maximum. Les bâtonnets sont absents de la fossette centrale mais très abondants en périphérie de la rétine; ⁽⁵²⁾
- les vaisseaux rétiniens au trajet radiaire, aux divisions symétriques, au parcours artério-veineux entrecroisé. La maille capillaire n'est pas visible ;
- le fond uniformément coloré en orangé plus ou moins assombri d'une teinte brune selon l'intensité de la pigmentation de l'EPR et de la choroïde ;

- en périphérie, dans certaines conditions d'examen, l'ora serrata qui correspond au bord antérieur de la rétine en arrière du corps ciliaire.

Cette description implique la transparence du NER qui permet à la lumière de la traverser et d'être arrêtée par l'écran de l'EPR pour enclencher le mécanisme de la vision en initiant les réactions photochimiques. Cette transparence est la conséquence d'une certaine déshydratation entretenue par les mouvements hydriques qui parcourent le vitré et la choroïde à travers la rétine. Ces échanges d'eau expliquent également le caractère virtuel de l'espace entre EPR et NER par le maintien, à son niveau, d'une pression négative et d'une force de capillarité.

1.2. Milieux transparents

Ils remplissent la cavité oculaire et assurent la transmission de la lumière depuis la cornée jusqu'à la rétine.

L'un est liquide : l'humeur aqueuse ; l'autre est un gel : le vitré ; le troisième est solide : le cristallin. Ils occupent chacun des espaces bien définis qui compartimentent l'œil.

1.2.1. L'humeur aqueuse, la chambre antérieure, l'angle irido-cornéen, la chambre postérieure, la pression intraoculaire

1.2.1.1. Les espaces

La chambre antérieure et l'angle irido-cornéen : la chambre antérieure est l'espace situé entre la cornée en avant et l'iris en arrière. Sa profondeur revêt une importance particulière en séméiologie dans la mesure où elle est corrélée au degré d'ouverture de l'angle irido-cornéen . Celui-ci est formé par le carrefour cornéo-irido-scléral qui réunit la périphérie de la cornée, la périphérie de l'iris et le bord antérieur de la sclérotique. Son repère superficiel est le limbe scléro-cornéen.

L'angle irido-cornéen est le lieu de l'évacuation de l'humeur aqueuse qui rejoint, au travers du trabéculum, le canal de Schlemm avant d'être intégré au courant veineux orbitaire. Le trabéculum peut être comparé à un filtre conjonctivo-endothélial constitué de lamelles superposées aux multiples perforations disposées en quinconce.

La chambre postérieure : elle correspond à un espace étroit situé entre l'iris en avant et le plan formé en arrière par le corps ciliaire, la zonule et le cristallin.

1.2.1.2. L'humeur aqueuse et la pression intraoculaire

Liquide limpide proche du sérum mais pauvre en protéines et riche en acide ascorbique, elle remplit la chambre postérieure et la chambre antérieure qui communiquent par la pupille.

L'humeur aqueuse circule en suivant un parcours bien déterminé :

- elle est produite par les procès ciliaires du corps ciliaire et correspond au résultat d'un double mécanisme de filtration sélective du sang circulant et de sécrétion au niveau de l'épithélium ciliaire (barrière hémato-aqueuse). De nombreux mécanismes interviennent dans cette sécrétion : les uns sont de nature enzymatique comme l'anhydrase carbonique ; les autres sont de nature ionique comme la pompe à sodium ; les dernières sont de nature nerveuse comme les récepteurs cholinergiques et les récepteurs adrénergiques ;
- elle remplit la chambre postérieure, puis la chambre antérieure en passant par la pupille. Dans l'œil normal, le contact entre l'iris et le cristallin n'oppose à ce courant aucune résistance significative ;
- elle est évacuée par l'angle irido-cornéen au moyen d'une filtration partiellement active qui génère une résistance à l'écoulement de l'humeur aqueuse. La régulation de cette excrétion est sous la dépendance du système nerveux autonome et en particulier des récepteurs cholinergiques et β -adrénergiques. Environ 25 à 30 % du volume de l'humeur aqueuse est évacué par la voie uvéo-sclérale à partir du fond de l'angle irido-cornéen.

Il résulte de cette circulation de l'humeur aqueuse, active tant au niveau de sa sécrétion que de son déplacement et de son évacuation, une pression intraoculaire dont la valeur statistiquement normale est de 15 mm Hg \pm 6. On conçoit bien qu'elle puisse être augmentée dans deux circonstances particulières :

- un contact anormalement étroit entre l'iris et le cristallin, qui constitue alors un blocage pupillaire au passage transcaméculaire de l'humeur aqueuse ;

- une accentuation de la résistance à l'écoulement de l'humeur aqueuse par une altération du filtre trabéculaire ou par la fermeture de l'angle irido-cornéen.

1.2.2. Le vitré ou corps vitré

Il remplit la chambre vitrée en arrière du cristallin et occupe, par son volume, les 4/5 de l'oeil. Le vitré est un gel transparent composé d'une trame collagène remplie d'une phase liquidienne ; l'acide hyaluronique est présent en grande quantité et assure la cohérence globale. Les médiateurs chimiques sont nombreux et expliquent la réactivité fréquente du vitré aux processus inflammatoires, et en particulier immunologiques.

Le vitré contracte des adhérences anatomiques particulières avec les éléments tissulaires environnants :

- avec la face postérieure du cristallin en avant ;
- avec le corps ciliaire et l'ora serrata en périphérie en constituant la base du vitré ;
- avec la macula et le pourtour de la papille optique en arrière ;
- avec les vaisseaux à la surface rétinienne.

Ces adhérences s'estompent avec l'âge. Elles participent au mécanisme du décollement rhéomatogène de la rétine.

Le corps vitré est donc une substance gélatineuse qui engendre une partie de la pression intra oculaire et retient la rétine contre la choroïde ; la rétine constitue ainsi une surface lisse propice à la clarté des images.

Contrairement à l'humeur aqueuse, le vitré ne se renouvelle pas ; il se forme une fois pour toutes pendant le développement embryonnaire. Le corps vitré contient des phagocytes qui éliminent les débris afin que rien n'obstrue la vision.

1.2.3. Le cristallin

Il forme une lentille biconvexe transparente placée frontalement derrière la pupille et l'iris. Il est maintenu en position par son ligament suspenseur, la zonule, qui relie son équateur aux procès ciliaires. 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 possibilité d'opacification ou cataracte.

1.2.3.1. Structure

Le cristallin est un organe très particulier.

De nature épithéliale, il possède un épithélium antérieur qui prend, à l'équateur, les caractères d'un épithélium germinatif qui produit, durant toute la vie de l'individu, des cellules : les fibres cristalliniennes.

Cet épithélium antérieur tapisse la face postérieure de la capsule du cristallin, enveloppe périphérique du cristallin qui n'est autre que la membrane basale de l'épithélium. La capsule, structure élastique et résistante, est à la base de la chirurgie moderne du cristallin.

Les fibres cristalliniennes, dont le cytoplasme est constitué par un empilement très ordonné de grosses molécules protéiques, sont des cellules très allongées étendues d'une face à l'autre du cristallin. Au fur et à mesure de la formation de nouvelles fibres par l'épithélium, le cortex du cristallin se constitue tandis que les fibres les plus anciennes sont refoulées vers le centre du cristallin où, par leur tassement, elles vont peu à peu former le noyau du cristallin.

1.2.3.2. Métabolisme et transparence

Le cristallin est un organe avasculaire dont le métabolisme est entièrement dépendant des milieux environnants et en particulier de l'humeur aqueuse.

Les échanges transcapsulaires sont très intenses pour les petites molécules, parmi lesquelles il est important de retenir la place privilégiée des sucres, des vitamines et des ions.

Les grosses molécules, et en particulier celles issues du vieillissement des fibres cristalliniennes et de leur catabolisme, restent enfouies dans la profondeur du cristallin.

1.2.3.3. Rôle optique

Place du cristallin dans la réfraction oculaire : le cristallin est l'équivalent, à l'état de repos, d'une lentille convergente de 20 dioptries. Il participe en conséquence pour un tiers à la puissance réfractive globale de l'œil.

Phénomène de l'accommodation : le cristallin est un organe solide doué de plasticité et d'élasticité. Livré à lui-même, il prend une forme globuleuse et possède en conséquence une

puissance de convergence bien supérieure à celle qui le caractérise lorsqu'il est en position anatomique étiré au niveau équatorial par la tension de son ligament suspenseur.

L'accommodation est le mécanisme physiologique qui permet d'ajuster la puissance réfractive de l'œil à la distance de l'objet observé, de manière à maintenir constante la focalisation rétinienne de la lumière incidente et, par conséquent, la netteté de l'image. ⁽²³⁾

Trois éléments anatomiques sont mis en action durant ce phénomène :

- le cristallin dont les courbures sont modifiées selon l'importance des tractions exercées sur son équateur par la zonule ;
- la zonule, courroie de transmission ;
- le muscle ciliaire du corps ciliaire, qui est un sphincter.

Lors de la vision à distance, l'œil est au repos. Le muscle ciliaire n'est pas contracté ; la zonule est sous tension ; l'équateur du cristallin est étiré, ses courbures sont peu marquées ; son pouvoir réfractif est de 20 dioptries.

Lors de la vision rapprochée, l'œil est en état d'accommodation. Le muscle ciliaire est contracté ; la zonule est détendue. Le cristallin devient globuleux, ses courbures s'accroissent, son pouvoir réfractif augmente.

L'arc réflexe de l'accommodation emprunte le nerf optique par la voie afférente (image floue), fait relais dans le mésencéphale au niveau du noyau du III, parcourt le III pour la voie afférente jusqu'au muscle ciliaire.

2. Les annexes

L'œil est intégré dans un ensemble anatomique pluritissulaire destiné à assurer sa protection et à réunir les conditions de son fonctionnement optimal : ce sont les annexes oculaires parmi lesquelles sont différenciées :

- l'orbite
- les muscles oculomoteurs
- la conjonctive
- les paupières
- le système lacrymal

2.1. L'orbite ⁽¹⁷⁾

2.1.1. Constitution

De nature osseuse, elle correspond à une loge frontale située à la jonction crânio-faciale et emprunte des éléments de nombreuses pièces osseuses :

- plafond : os frontal, petite aile de l'os sphénoïde ;
- paroi latérale : os frontal, os zygomatique, grande aile de l'os sphénoïde ;
- paroi médiale : os maxillaire supérieur, unguis, ethmoïde, corps de l'os sphénoïde ;
- paroi inférieure : os maxillaire supérieur, os zygomatique, os sphénoïde, os palatin.

2.1.2. Lieu de communication et de proximité

Ses nombreux orifices livrent passage à des éléments vasculo-nerveux essentiels à la vitalité et au fonctionnement de l'œil. Il convient d'en distinguer :

- la fente sphénoïdale en arrière, en dehors et en haut pour : la veine orbitaire supérieure, le III, le IV, le V, le VI, le sympathique. Les sinus caverneux et le siphon carotidien sont très proches ;
- le canal optique en arrière, en dedans et en haut pour le passage du nerf optique et de l'artère ophtalmique. Il débouche en arrière sur le chiasma optique et l'hypophyse.

L'orbite est entourée de nombreuses cavités aériennes qui expliquent la proximité de la pathologie orbitaire par rapport à certains processus de la sphère ORL : sinus frontal, sinus sphénoïde, cellules ethmoïdales, sinus maxillaire. ⁽⁹⁾

2.2. Les muscles oculomoteurs ^{(17) (48)}

Dans la cavité osseuse de l'orbite, ils assurent la motilité oculaire extrinsèque binoculaire par six couples musculaires qui fonctionnent simultanément de manière coordonnée pour permettre aux yeux de se mouvoir à la manière d'une rotule.

Les muscles droits sont au nombre de quatre : médial, latéral, supérieur, inférieur.

Les muscles obliques sont au nombre de deux : supérieur, inférieur.

Ces muscles striés sont insérés sur la sclérotique en avant, au pourtour de la partie interne de la fente sphénoïdale en arrière. Dans l'espace orbitaire rétrobulbaire, ils sont solidarisés entre eux par des aponévroses pour former un cône musculo-aponévrotique dans lequel cheminent

le nerf optique, les vaisseaux et les nerfs ciliaires destinés à la choroïde et le ganglion ciliaire à l'origine de l'innervation sensitive et neurovégétative intraoculaire.

2.3. La conjonctive ⁽¹⁷⁾ ⁽⁴⁸⁾

Muqueuse de recouvrement de la face profonde des paupières et de la face antérieure du globe, la conjonctive est étendue depuis le limbe cornéo-scléral jusqu'au bord libre de la paupière en formant un cul-de-sac conjonctival ou fornix propice aux mouvements oculaires.

La cavité conjonctivale qui sépare la conjonctive palpébrale de la conjonctive bulbaire peut être facilement objectivée en décollant la paupière de la surface oculaire.

L'épithélium conjonctival et son chorion comportent de nombreux éléments glandulaires : les glandes salivaires accessoires séreuses et muqueuses.

La vascularisation est clairsemée et n'influence pas la transparence conjonctivale à travers laquelle le blanc scléral est bien perceptible.

A l'extrémité interne du cul-de-sac conjonctival sont situés deux reliefs : le repli semi-lunaire, vestige cutané de la troisième paupière des oiseaux qui limite la conjonctive bulbaire nasale, et la caroncule, formation cutanée munie de poils.

2.4. Les paupières

De nature musculo-aponévrotique et en continuité avec les téguments de la face, elles forment le plan protecteur de l'œil vis-à-vis des agents extérieurs : lumière, chaud, froid, poussières. L'espace qui sépare la paupière supérieure et la paupière inférieure et qui laisse apparaître le globe oculaire est appelé fente palpébrale. ⁽¹⁷⁾ Par leurs mouvements incessants, elles assurent une constante hydratation des couches antérieures de la cornée en étalant le liquide sécrété par les glandes lacrymales sur le globe oculaire. ⁽⁴⁸⁾ ⁽⁵²⁾

2.4.1. La paupière supérieure

Elle est très mobile et assure l'ouverture et la fermeture de la fente palpébrale. Son bord libre recouvre, lors de l'ouverture palpébrale et du regard droit devant, le quart supérieur de la cornée.

Le muscle releveur de la paupière supérieure s'insère sur le bord supérieur du tarse et commande l'ouverture de la fente palpébrale. Il est mis en action par le nerf moteur oculaire commun (III), qui innerve également le muscle droit inférieur. Cette innervation conjointe explique la synergie de l'abaissement de la paupière supérieure observée au cours du mouvement d'infraduction de l'œil.

2.4.2. La paupière inférieure

Elle est peu mobile. Son bord libre est tangent à l'arrondi inférieur du limbe scléro-cornéen.

2.4.3. Structure

Chacune des deux paupières possède :

- épiderme, derme, tissu sous cutané ;
- un muscle orbiculaire (commun aux deux) qui cerne la fente palpébrale et assure l'occlusion palpébrale sous la commande nerveuse de la branche supérieure du nerf facial (VII). Il existe une synergie avec l'élévation de l'œil qui conduit celui-ci à être en position de supraduction lors de l'occlusion palpébrale ;
- un système fibreux, le tarse, qui arme la portion proximale de chaque paupière en la rigidifiant. Le tarse contient de nombreux éléments glandulaires : les glandes tarsales ou glandes de Meibomius, qui s'ouvrent par leurs canaux excréteurs sur le bord libre et participent, par leur sécrétion lipidique, à la formation du film lacrymal et empêchent ainsi les paupières d'adhérer l'une à l'autre. ⁽¹⁷⁾ Les deux tarses sont réunis par les ligaments palpébraux et épousent la convexité du globe oculaire ; ⁽⁴⁸⁾
- des cils implantés sur le bord libre, sur trois ou quatre rangs, qui participent à la protection oculaire au cours du clignement. Ils sont concaves en haut pour les cils de la paupière supérieure et concaves en bas pour les cils de la paupière inférieure, ce qui leur évite de se mêler à la fermeture complète des paupières. ⁽⁴⁸⁾ Des glandes sébacées situées à la base des follicules des cils, les glandes ciliaires ou glandes de Zeis, y libèrent une substance lubrifiante. L'infection de ces glandes entraîne la formation d'un orgelet. ⁽⁵²⁾

La fente palpébrale forme deux angles : l'angle latéral de l'œil, près de l'os temporal, et l'angle médial de l'œil, plus ouvert, près de l'os du nez. L'angle médial de l'œil porte une petite éminence rougeâtre, la caroncule lacrymale, qui contient des glandes sébacées et sudoripares. ⁽⁵⁰⁾

2.5. Le système lacrymal et le film lacrymal ^{(3) (17)}

La surface oculaire est constamment lubrifiée par un film lacrymal qui :

- assure la protection vis-à-vis du milieu extérieur et en particulier de l'air ambiant et de tous les micro-organismes et microcorps étrangers qu'il contient ;
- permet le glissement sans frottement mécanique irritant du bord libre de la paupière supérieure sur la cornée et la conjonctive lors du clignement ;
- évite la dessiccation de la surface cornéenne.

La sécrétion lacrymale est une solution aqueuse contenant des sels, un peu de mucus et du lysozyme, une enzyme bactéricide. Chaque glande lacrymale sécrète environ 1 ml de larmes chaque jour. ⁽⁵²⁾

Le film lacrymal ne peut répondre à ces objectifs que s'il est quantitativement et qualitativement normal.

Quantitativement, il doit être étalé en couche mince sur toute la surface oculaire. Qualitativement, il comporte une structure qui s'oppose à son évaporation trop rapide tout en facilitant sa fluidité et son écoulement. Il est le résultat du mélange des différentes sécrétions lacrymales à l'origine de ses trois constituants lipidique, aqueux et muqueux.

Ce film lacrymal de base permanent ne doit pas être confondu avec les larmes du pleuré, produit aqueux d'une réaction réflexe induite par une irritation de la surface oculaire ou de l'œil, par une stimulation particulière de la glande lacrymale ou par une émotion.

Sécrétion et excrétion lacrymale :

Elle est continue et entretient le film lacrymal de base. Les larmes sont sécrétées par la glande lacrymale, qui a la taille et la forme d'une amande. Elles s'écoulent dans 6 à 12 ductules excréteurs de la glande lacrymale, qui s'ouvrent sur la partie supérieure de la conjonctive.

De là, les larmes traversent en diagonale la face antérieure du globe oculaire et pénètrent dans deux petits orifices appelés points lacrymaux.

Les larmes passent ensuite dans les canalicules lacrymaux, qui débouchent dans le sac lacrymal, et elles entrent dans le conduit lacrymo-nasal. Ce conduit déverse les larmes dans la cavité nasale, juste au-dessous du cornet nasal inférieur. ⁽⁵²⁾

3. Les voies visuelles ⁽³⁷⁾ ⁽³⁹⁾

L'œil est certes l'organe de la vision, mais n'y suffit pas. Capable de capter la lumière incidente, de la réfracter en une image rétinienne puis de transformer celle-ci en un message nerveux codé, il doit encore transmettre celui-ci au cerveau pour que cette information nerveuse soit interprétée et intégrée à l'ensemble des autres afférences sensorielles et sensibles.

Cette transmission et cette interprétation sont assurées par les voies visuelles.

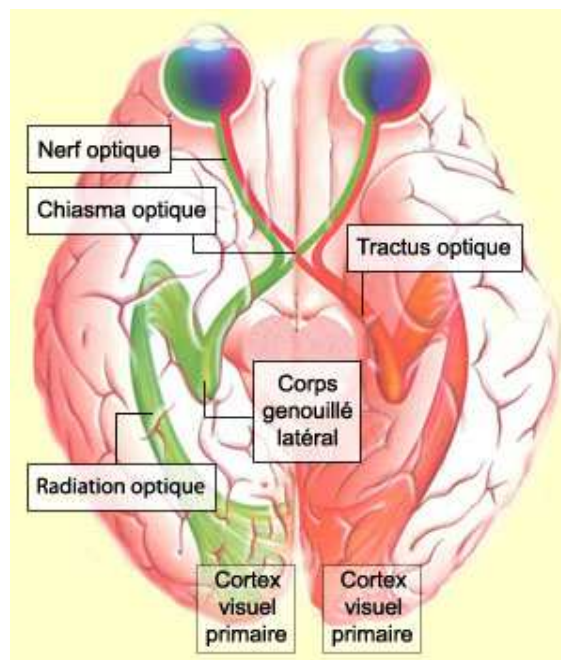


Figure 3 : Les voies visuelles

3.1 Anatomie des voies visuelles

Depuis l'œil jusqu'au cortex occipital, elles comprennent les segments suivants :

3.1.1. Le nerf optique

Le nerf optique dont l'extrémité distale des fibres constitue la papille optique qui occupe le canal scléral postérieur. Elle est formée par les axones des cellules ganglionnaires organisés en faisceaux par les orifices de la lame criblée de l'orifice scléral. Au nombre de 1 200 000 à la naissance, les fibres du nerf optique ne dépassent pas chez l'adulte une population de 400 000 après avoir subi un phénomène d'apoptose, ou mort cellulaire contrôlée. ⁽¹⁷⁾

Le nerf optique parcourt l'espace rétrobulbaire de l'orbite, traverse le canal optique et pénètre dans l'étage moyen de la base du crâne pour former, avec le nerf optique opposé, le chiasma optique. Le nerf optique s'étend donc de la lame criblée au chiasma optique.

En fait, ce n'est pas un nerf mais une partie du système nerveux central, et il affecte la disposition de la substance blanche. En effet, les fibres y sont myélinisées sans gaines de Schwann et il est recouvert d'une enveloppe méningée. ⁽⁴⁸⁾

3.1.2. Le chiasma optique

Le chiasma optique correspond à la fusion des deux nerfs optiques de laquelle vont se détacher deux bandelettes optiques.

Le chiasma repose sur la partie antérieure de la tente de l'hypophyse, il est surplombé par la base du cerveau et baigne dans les espaces sous-arachnoïdiens. ⁽⁴⁸⁾

Il est le lieu de l'hémidécussation des fibres optiques : celles issues de la moitié temporale de la rétine traversent le chiasma en restant du même côté ; celles issues de la moitié nasale de la rétine se croisent et quittent le chiasma par la bandelette optique controlatérale.

3.1.3. Les bandelettes optiques

Les bandelettes optiques relient le chiasma optique au corps genouillé latéral où les axones des cellules rétinienne ganglionnaires font relais avec le troisième neurone géniculocortical des voies visuelles qui rejoint le cortex occipital par les radiations optiques. ⁽¹⁷⁾

Chaque bandelette contient le contingent de fibres optiques correspondant à un hémichamp rétinien homonyme :

- la bandelette droite contient les fibres visuelles issues de l'hémirétine temporale droite et de l'hémirétine nasale gauche. La bandelette droite véhicule les fibres de la moitié gauche du champ visuel de chaque œil ;
- l'inverse est vrai pour la bandelette gauche.

3.1.4. Corps genouillé latéral (CGL)

C'est à son niveau que s'effectue le relais entre les axones des cellules ganglionnaires et le troisième neurone thalamo-cortical des voies visuelles.

Le CGL, grâce à sa structure laminaire, assure la ségrégation des voies parvo- et magnocellulaire. La voie parvocellulaire reçoit les cellules ganglionnaires β et relaie l'information rapportant les couleurs et la finesse des détails. La voie magnocellulaire reçoit les cellules ganglionnaires α et relaie l'information rapportant l'ambiance lumineuse et le mouvement.

En dehors du relais de la voie visuelle, le CGL reçoit également de très nombreux neurones en provenance de l'aire corticale visuelle principale. Le mécanisme de feedback qui en découle contribue vraisemblablement à maintenir la ségrégation du neurone thalamo- cortical.

3.1.5. Radiations optiques

Étalées en ruban, elles gagnent le lobe occipital du cerveau en un trajet rayonnant qui se termine dans le cortex visuel situé de part et d'autre de la scissure calcarine de la face interhémisphérique du cerveau.

3.1.6. Cortex visuel

Le cortex visuel comprend l'aire striée (aire 17 ou aire de Brodmann) où se terminent les radiations optiques, entourées des aires péri et parastriées (aires 18 et 19) qui servent à intégrer les sensations visuelles et servent à la réponse motrice.

L'aire visuelle principale ainsi que les aires péri et parastriées siègent au niveau du lobe occipital.

L'aire striée qui reproduit la représentation rétinotopique du champ visuel, est le lieu de projection et de réception des sensations visuelles, mais avant que celles-ci passent à l'état de perception et atteignent notre conscience, elles doivent être remaniées.

Elles seront élaborées intriquées avec d'autres sensations proprioceptives, en particulier les impressions recueillies par les muscles des yeux, du cou et du tronc, avec des concepts intellectuels et le résultat d'expériences antérieures, enfin avec des concepts héréditaires.

De ce travail résultera l'élimination de certaines sensations, l'addition d'autres nécessaires pour compléter un ensemble. Ce travail est indispensable pour nous donner une idée utilisable de l'espace et permettre la réaction motrice adéquate.

Sur le plan physiologique, en effet, le but ultime des sensations visuelles n'est pas la conscience du phénomène mais la réponse motrice. ⁽⁴⁸⁾

La complexité de la systématisation du cortex visuel va bien au-delà de la simple description de neurones spécialisés sensibles à l'orientation, à la forme, à la couleur, au mouvement, à la profondeur, à la texture d'un objet..., et organisés en aires corticales spécifiquement dédiées à l'analyse de ces différentes propriétés de l'image.

La partie du cortex cérébral dévolue à la vision correspond à plus de 15% de sa surface totale. Les mécanismes exacts qui conduisent à la reconnaissance visuelle consciente sont encore très imparfaitement connus et compris malgré la valeur et la richesse d'une recherche très soutenue. ⁽¹⁷⁾

3.2. Systématisation des voies visuelles

Le message nerveux codé élaboré par la transduction rétinienne parcourt les voies visuelles en obéissant à quelques principes qui définissent sa systématisation :

- symétrie : elle est réalisée par rapport au plan sagittal céphalique et à l'hémidécussation chiasmatisée. L'hémirétine temporale se projette sur l'hémisphère cérébral homolatéral ; l'hémirétine nasale sur l'hémisphère controlatéral ;
- fasciculation et autonomie quadrantale : les fibres issues des différents quadrants rétiniens forment des faisceaux qui restent groupés tout au long des voies visuelles ;

- ségrégation monoculaire : les fibres issues d'un œil restent groupées jusqu'au cortex sans se mélanger à celles issues de l'autre œil, même après le chiasma ;
- homologie altitudinale, concentrique et radiaire : les fibres gardent la même typographie et les mêmes rapports jusqu'au cortex (les supérieurs restent supérieurs, les périphériques en dehors des centrales...) malgré une torsion au niveau du corps genouillé latéral redressée par une contre-torsion au niveau des radiations optiques ;
- convergence et coefficient de grandissement : le compactage rétinien beaucoup plus marqué pour les bâtonnets que pour les cônes provoque un surdimensionnement de la représentation corticale de la macula. C'est ainsi que le 1/60^e central du champ visuel (qui correspond à la macula) occupe 50% de l'aire visuelle principale du cortex occipital ;
- rétinotopie : chaque point rétinien se projette de manière coordonnée sur le cortex visuel et permet la reconstruction topographique exacte de l'image rétinienne.

4. En résumé

Il est habituel de comparer l'œil à un appareil photographique ; il est plus exact de le rapprocher du fonctionnement d'une batterie de caméras.

L'œil est une chambre noire (EPR) munie d'un double objectif (cornée, cristallin) avec mise au point automatique (accommodation) et diaphragme automatique (pupille).

Son film (rétine) est numérisé (transduction), sensible aussi bien à l'ambiance « lumière du jour » (système photopique des cônes) qu'à l'ambiance crépusculaire ou nocturne (système mésopique et scotopique des bâtonnets). Il est sensible aux différentes longueurs d'onde (sensibilité trichromatique des cônes) et aux variations de luminosité (système ON/OFF des cellules bipolaires).

L'œil est aussi une caméra qui filme l'environnement et le mouvement en continu (fonctionnement en boucle de la photochimie de la rétine) et qui transmet son enregistrement

en direct en triant les images précises et colorées (voie parvocellulaire) des prises de vue globale (voie magnocellulaire).

La vision binoculaire est fondée sur la fusion cérébrale des deux enregistrements simultanés (les deux yeux). Il en résulte une image en relief (sens stéréoscopique) et un balayage panoramique coordonné (oculomotricité).

La vision est le résultat de l'accession à la conscience du décodage (cortex visuel) de l'enregistrement oculaire transmis par un câble capable d'en moduler la numérisation (voies visuelles) en l'enrichissant des informations parvenues d'autres capteurs d'enregistrement (sensibilité, motricité, autres sensorialités) et des précédents enregistrements (mémorisation).

B. La vision ⁽²²⁾ ⁽²⁴⁾

1. Système optique de la vision

1.1 Principes physiques d'optique

Pour comprendre le système optique de l'œil, nous devons revoir les principes physiques fondamentaux de l'optique comprenant la physique de la réfraction, de la convergence, de la profondeur focale, etc...

1.1.1. Réfraction de la lumière

L'indice de réfraction d'une substance transparente : les rayons lumineux se propagent dans l'air à une vitesse approximative de 300 000 km/s, mais ils se propagent beaucoup plus lentement dans les liquides et solides transparents. L'indice de réfraction d'une substance transparente est le rapport entre la vitesse de la lumière dans l'air et celle dans cette substance. L'indice de réfraction de l'air est donc de 1,00.

Quand les ondes lumineuses se propagent en faisceau et rencontrent une interface perpendiculaire au faisceau, elles pénètrent dans un deuxième milieu de réfraction sans subir de déviation. Le seul effet qui se produit est une diminution de la vitesse de transmission avec un raccourcissement de la longueur d'onde.

Par contre, quand les ondes lumineuses rencontrent une interface oblique, elles se réfractent si les indices de réfraction des deux milieux sont différents. Cette déviation des rayons lumineux lorsqu'ils traversent une interface oblique est appelée *réfraction*. On notera en particulier que le degré de réfraction augmente en fonction du rapport des indices de réfraction des deux milieux transparents, et du degré de l'angle formé entre l'interface et le front de l'onde qui pénètre. ⁽²⁾

1.1.2. Application aux lentilles des principes de réfraction

Les lentilles convexes - convergence des rayons lumineux : les rayons lumineux parallèles traversant le centre de la lentille la traversent sans réfraction. Vers le bord de la lentille : les

rayons les plus externes subissent une déviation de plus en plus importante vers le centre, appelée *convergence* des rayons. Si la lentille a la courbure adéquate, les rayons lumineux parallèles pénétrant dans la lentille par des points différents s'infléchissent et convergent en un seul point dit *point focal*.

Les lentilles concaves : les rayons qui pénètrent au centre de la lentille ne se réfractent pas. C'est l'effet opposé à celui qui se voit dans la lentille convexe, une *divergence* des rayons lumineux périphériques par rapport à ceux qui traversent le centre de la lentille.

La lentille concave fait donc diverger les rayons lumineux et la lentille convexe les fait converger.

1.1.3. Distances focales d'une lentille

La distance d'une lentille convexe à un point focal commun où convergent les rayons parallèles s'appelle la distance focale de la lentille.

Quand les rayons lumineux divergents pénètrent dans une lentille convexe, le point focal situé de l'autre côté de la lentille est plus éloigné de celle-ci que pour les rayons parallèles.

Le rapport de la distance focale de la lentille, de la distance de la source lumineuse et de la distance du point de convergence s'exprime par la formule suivante :

$$1/f = (1/a) + (1/b)$$

dans laquelle f représente la distance focale de la lentille, a la distance de la source lumineuse à la lentille et b la distance du point de convergence de l'autre côté de la lentille.

1.1.4. Formation d'une image par une lentille convexe

Chaque source ponctuelle de lumière dans l'objet arrive à un point de convergence qui se trouve de l'autre côté de la lentille aligné avec le centre même de la lentille. Cependant, l'image formée est inversée et renversée par rapport à l'original. C'est le procédé par lequel la lentille d'un appareil photo fait converger les rayons lumineux sur la pellicule.

1.1.5. Mesure du pouvoir de réfraction d'une lentille – la dioptrie

Plus une lentille fait converger les rayons lumineux, plus son « pouvoir de réfraction » est grand. Ce pouvoir de réfraction se mesure en termes de dioptries.

Le pouvoir de réfraction d'une lentille convexe est égal à 1 mètre divisé par sa distance focale.

1.2. Système optique de l'œil

1.2.1. Formation des images ⁽⁵²⁾

A certains égards, l'œil est semblable à un appareil photo. Ses éléments optiques focalisent l'image d'un objet sur une « pellicule » photosensible (la rétine) tout en assurant une « exposition » appropriée (en ne laissant pénétrer que la juste quantité de lumière). Pour comprendre la manière dont l'œil forme des images claires sur la rétine, il faut étudier trois processus : 1) la réfraction, ou déviation, de la lumière par le cristallin et la cornée, 2) l'accommodation, c'est-à-dire le changement de forme du cristallin, et 3) la contraction de la pupille.

1.2.1.1. Réfraction des rayons lumineux

Les rayons lumineux qui passent d'un milieu transparent (comme l'air) à un autre milieu transparent de densité différente (comme l'eau) dévient à la surface de séparation des deux. Cette déviation est appelée réfraction. Les rayons lumineux qui pénètrent dans l'œil dévient sur les deux faces de la cornée puis les deux faces du cristallin de sorte qu'ils se focalisent précisément sur la rétine.

Les images qui se forment sur la rétine sont inversées de bas en haut et de gauche à droite ; autrement dit, la lumière provenant du côté droit d'un objet atteint le côté gauche de la rétine et vice-versa. Si nous ne voyons pas le monde sens dessus dessous, c'est que notre cerveau « apprend » dès les premiers mois de la vie à faire la conversion. Quand nous commençons à tendre les mains vers les objets pour les saisir, il enregistre les images captées et les associe à la véritable orientation des objets.

La cornée assure environ 75% de la réfraction dans l'œil. Le cristallin s'occupe du reste et ajuste le foyer à la vision rapprochée ou éloignée. Les rayons réfléchis par un objet situé à plus de 6 mètres de l'observateur sont presque parallèles. Ils doivent dévier un peu pour se focaliser précisément sur la fossette centrale, là où la vision est la plus nette. Par ailleurs, les rayons réfléchis par les objets situés à moins de 6 mètres de l'observateur sont divergents : ils doivent donc dévier considérablement pour se focaliser sur la rétine. C'est le processus appelé accommodation qui assure cette réfraction supplémentaire.

1.2.1.2. Accommodation et punctum proximum

Une surface qui, comme celle d'une balle, est arrondie vers l'extérieur est qualifiée de *convexe*. Une lentille convexe fait dévier les rayons lumineux qui l'atteignent les uns vers les autres, de sorte qu'ils finissent par se croiser. A l'inverse, une surface qui est arrondie vers l'intérieur, comme le dedans d'une balle creuse, est dite *concave*. Une lentille concave fait diverger les rayons lumineux.

Le cristallin possède deux faces convexes (faces antérieure et postérieure), et son pouvoir de réfraction augmente proportionnellement à sa courbure. Lorsque l'œil fixe un objet rapproché, le cristallin bombe et son pouvoir de réfraction augmente. L'augmentation de la courbure du cristallin associée à la vision rapprochée est appelée accommodation.

Comment se déroule l'accommodation ? Lorsque l'on regarde un objet éloigné, le muscle ciliaire est relâché et le cristallin est relativement plat parce qu'il est étiré dans tous les sens par le ligament suspenseur tendu. Lorsque l'on regarde un objet rapproché, au contraire, le muscle ciliaire se contracte, ce qui tire les procès ciliaires et la choroïde en direction du cristallin. Ce mouvement relâche la tension exercée sur le cristallin et le ligament suspenseur. Le cristallin s'arrondit (devient plus convexe) puisqu'il est élastique ; son pouvoir de réfraction augmente et les rayons lumineux convergent davantage.

Le punctum proximum est le point le plus rapproché que l'œil peut distinguer nettement au prix d'un effort maximal. Il est situé à environ 10 centimètres chez le jeune adulte. Avec le temps, le cristallin perd de son élasticité, et donc sa capacité d'accommodation. Cette anomalie est appelée presbytie.

1.2.1.3. Contraction de la pupille

Le muscle ciliaire de l'iris a aussi un rôle à jouer dans la formation d'images claires sur la rétine. Le mécanisme d'accommodation consiste pour une part en une contraction de la pupille, c'est-à-dire en une diminution du diamètre de l'orifice à travers lequel la lumière entre dans l'œil. Il s'agit d'un réflexe autonome qui empêche les rayons lumineux de pénétrer dans l'œil par la périphérie du cristallin. Sans ce réflexe, les rayons ne se focaliseraient pas sur la rétine et produiraient des images floues.

Aussi, la fonction principale de l'iris est d'accroître la quantité de lumière qui pénètre dans l'œil durant l'obscurité et de diminuer la quantité de lumière qui pénètre dans l'œil en pleine lumière.

1.2.2. Convergence

Chez l'être humain, les deux yeux sont dirigés vers un seul ensemble d'objets, caractéristique appelée vision binoculaire. Cet attribut permet la vision du relief, ou vision stéréoscopique.

Dans la vision binoculaire, les rayons lumineux provenant d'un objet atteignent des points correspondants sur les deux rétines. Lorsque nous regardons un objet éloigné situé droit devant nous, les rayons lumineux parviennent directement aux deux pupilles et dévient vers des points équivalents des deux rétines. Si nous nous approchons de l'objet, nos yeux doivent se tourner vers l'intérieur pour que les rayons lumineux atteignent des points correspondants sur les deux rétines. Le mouvement vers l'intérieur qui permet aux deux globes oculaires de se fixer sur l'objet est appelé convergence et il est produit par les muscles extrinsèques du globe oculaire. Plus l'objet est proche, plus le degré de convergence doit augmenter pour maintenir la vision binoculaire.

2. Fonctions réceptrices de la rétine – Photochimie de la vision

La rétine est la partie de l'œil sensible à la lumière ; elle comprend des cônes, qui sont essentiellement responsables de la vision des couleurs ; et des bâtonnets, responsables de la vision dans l'obscurité. Lorsque les cônes et les bâtonnets sont stimulés, les signaux sont transmis le long des neurones à travers la rétine, dans les fibres du nerf optique et au cortex cérébral.

2.1. Photorécepteurs et photopigments

Les photorécepteurs ont reçu les appellations de « bâtonnets » et de « cônes » à cause de l'apparence de leur segment externe respectif, c'est-à-dire leur extrémité distale voisine de la partie pigmentaire de la rétine. C'est dans la membrane plasmique du segment externe que se produit la transduction de l'énergie lumineuse en potentiel récepteur.⁽³²⁾

Les photopigments sont des protéines intrinsèques colorées situées dans la membrane plasmique du segment externe. Tous les photopigments associés à la vision comprennent deux parties : un dérivé de la vitamine A appelé rétinal et une glycoprotéine appelée opsine. Le rétinal est la partie qui absorbe la lumière dans tous les photopigments. Comme les autres dérivés de la vitamine A, il se forme à partir des caroténoïdes, des pigments végétaux. Telle est la raison pour laquelle un apport adéquat de légumes riches en caroténoïdes, comme les carottes, les épinards, les brocolis, ou encore d'aliments riches en vitamine A, comme le foie, est essentiel à une bonne vision. Une carence prolongée en vitamine A empêche la synthèse d'une quantité suffisante de photopigment dans les bâtonnets et peut entraîner une cécité nocturne, soit l'incapacité de voir dans la pénombre.

Il existe quatre types d'opsine dans la rétine humaine.

L'opsine présente dans les bâtonnets est appelée rhodopsine (rhodeon = rose ; opsis = vision). Les trois autres types sont présentes dans les cônes et en déterminent le type. De légères variations dans la séquence des acides aminés des diverses opsines permettent aux bâtonnets et aux cônes d'absorber différentes couleurs (longueurs d'onde) de la lumière.

La phototransduction commence lorsqu'un photopigment absorbe la lumière. Le photopigment subit alors des changements structuraux, ce qui déclenche la série d'évènements suivante et aboutit à la production d'un potentiel récepteur :

- 1) Dans l'obscurité, le rétinal a une forme pliée appelée cis-rétinal qui s'imbrique dans l'opsine du photopigment. Quand le cis-rétinal absorbe un photon, il se déplie et devient du trans-rétinal. Appelée isomérisation, cette conversion est la première étape de la phototransduction. Ensuite, plusieurs intermédiaires chimiques instables se forment et disparaissent. Ces changements chimiques aboutissent à la production d'un potentiel récepteur.
- 2) Le trans-rétinal se sépare complètement de l'opsine en une minute environ. Le produit final étant incolore, cette partie du cycle est appelée décoloration du photopigment.

- 3) Une enzyme appelée rétinol isomérase reconvertit le trans-rétinal en cis-rétinal
- 4) Le cis-rétinal peut alors se lier à l'opsine pour reformer un pigment. La nouvelle synthèse du photopigment est appelée régénération.

2.2. Libération du neurotransmetteur par les photorécepteurs

L'absorption de la lumière et l'isomérisation du rétinol déclenchent dans les segments externes des photorécepteurs des changements chimiques qui mènent la production d'un potentiel récepteur.

Dans l'obscurité, les ions sodium Na^+ pénètrent dans le segment externe des photorécepteurs Na^+ ligand-dépendants. Le ligand qui maintient ces canaux ouverts est le guanosine monophosphate cyclique (GMPc). L'afflux de Na^+ , appelé courant d'obscurité, dépolarise partiellement le photorécepteur. Le potentiel de membrane du photorécepteur s'établit alors à -30 mV , soit beaucoup plus près de zéro que le potentiel de membrane typique du neurone (-70 mV). Cette dépolarisation partielle déclenche une libération continue de neurotransmetteur des boutons terminaux.

Le neurotransmetteur présent dans les bâtonnets (et peut-être aussi dans les cônes) est le glutamate, un acide aminé. Le glutamate est inhibiteur dans les synapses entre les bâtonnets et certains neurones bipolaires ; il y déclenche des potentiels post-synaptiques inhibiteurs (PPSI) qui hyperpolarisent les neurones bipolaires et les empêchent d'envoyer des signaux aux cellules ganglionnaires.

Lorsque la lumière atteint la rétine et que le cis-rétinal subit une isomérisation, des enzymes s'activent et se mettent à dégrader le GMPc. Par conséquent, certains canaux à Na^+ GMPc-dépendants se ferment, l'entrée de Na^+ diminue et le potentiel de membrane devient plus négatif, approchant les -70 mV . Cette série d'événements produit un potentiel récepteur hyperpolarisant qui freine la libération de glutamate.

La lumière faible engendre des potentiels récepteurs faibles et brefs qui diminuent la libération de glutamate ; la lumière intense, au contraire, produit des potentiels récepteurs forts et prolongés qui mettent fin à la libération de glutamate.

Autrement dit, la lumière stimule les neurones bipolaires qui font synapse avec les bâtonnets en stoppant la libération d'un neurotransmetteur inhibiteur.

2.3. Vision scotopique et photopique

Les cônes sont les photorécepteurs principaux utilisés dans la journée quand les niveaux de lumière ambiante sont élevés. Ceci s'appelle la vision photopique. Dans des conditions photopiques, l'acuité visuelle (ou capacité de l'œil à déterminer les détails d'un objet) est élevée et la vision des couleurs est possible.

Pendant la nuit, quand les niveaux de lumière sont faibles, les bâtonnets sont les principaux photorécepteurs. Ceci est connu sous le nom de vision scotopique et est caractérisée par une forte sensibilité mais une faible acuité et une mauvaise vision des couleurs.

Pendant le crépuscule, les cônes et les bâtonnets sont utilisés et cela s'appelle la vision mésopique. ⁽⁴⁴⁾

Adaptation à la lumière et à l'obscurité :

L'adaptation à la lumière se produit lorsque nous passons de l'obscurité à la clarté, lorsque nous sortons d'un tunnel par exemple. En quelques secondes, notre système visuel s'adapte à la clarté en réduisant sa sensibilité.

L'adaptation à l'obscurité, d'un autre côté, se produit lorsque nous passons d'un milieu bien éclairé à un milieu sombre. La sensibilité de notre système visuel augmente alors lentement.

Les variations de la sensibilité pendant l'adaptation à la lumière et à l'obscurité dépendent en grande partie (mais pas seulement) de la décoloration et de la régénération des photopigments. La décoloration du photopigment augmente au fur et à mesure que la lumière s'intensifie. Des molécules de photopigments se régénèrent pendant que d'autres se décolorent.

En pleine lumière, cependant, la régénération de la rhodopsine, qui dure de 30 à 40 minutes, ne parvient pas à compenser la décoloration, de sorte que les bâtonnets ne contribuent pas beaucoup à la vision diurne.

Les pigments des cônes, par contre, se régénèrent assez rapidement (la moitié se régénère en 90 secondes) pour qu'il subsiste toujours un peu de leur forme cis, même sous un éclairage très intense.

3. Neurophysiologie centrale de la vision ^{(19) (24) (54)}

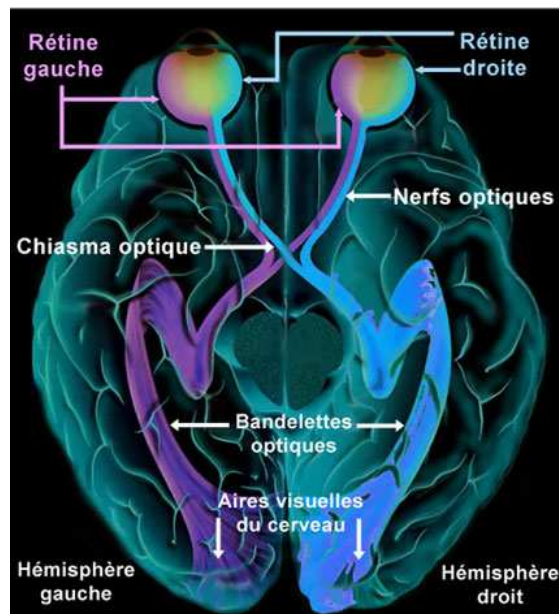


Figure 4 : Nerf optique, schéma de son parcours

3.1. Les voies visuelles

Les différentes caractéristiques de l'image visuelle sont transmises par le système visuel le long de multiples voies nerveuses parallèles.

Les voies nerveuses débutent par les cônes et les bâtonnets. Ces photorécepteurs font synapse les uns avec les autres et avec des neurones de deuxième ordre : les cellules bipolaires.

Les cellules bipolaires font synapse avec des neurones qui transmettent l'information horizontalement (les cellules horizontales), ainsi qu'avec les cellules ganglionnaires.

Les cellules horizontales établissent des connexions latérales entre les cônes et les bâtonnets, mais aussi avec les dendrites des cellules bipolaires. Les signaux de sortie de ces cellules sont toujours inhibiteurs : elles assurent la transmission au système nerveux central d'un message visuel correctement contrasté.

Les signaux de sortie des cellules bipolaires passent soit directement, soit par l'intermédiaire des cellules amacrines aux cellules ganglionnaires.

Il y a deux types distincts de cellules ganglionnaires dans la rétine :

- les grandes cellules M (ou magno), qui additionnent les réponses de différents types de cônes et qui sont reliés au mouvement et à la stéréoscopie (relatif au relief). Elles se projettent sur la portion magnocellulaire du corps genouillé latéral ;
- les petites cellules P ou parvo, qui soustraient les influx d'un type de cônes de ceux d'un autre type et qui sont responsables de la couleur, de la texture et de la forme. Elles se projettent sur la portion parvocellulaire du corps genouillé latéral. ⁽⁵⁴⁾

Ensemble, les axones des cellules ganglionnaires constituent la voie de sortie de la rétine et forment le nerf optique.

Les deux nerfs optiques se rejoignent pour former le chiasma optique. A ce niveau, les fibres nerveuses optiques issues de la moitié nasale de chaque rétine se croisent et rejoignent les fibres temporales de la rétine du côté opposé pour former les bandelettes optiques.

Les fibres de chaque bandelette optique font synapse dans le corps genouillé latéral du thalamus d'où naissent les radiations optiques qui se dirigent vers le cortex visuel, dans la région calcarine du lobe occipital.

A partir du corps genouillé latéral, la projection au cortex visuel se fait par voie magnocellulaire et voie parvocellulaire :

- la voie magnocellulaire transporte des signaux concernant le mouvement, la profondeur et le clignotement ;
- la voie parvocellulaire transporte des signaux relatifs à la vision des couleurs, la texture, la forme et les détails fins.

Notons qu'il existe une voie K ou koniocellulaire qui est la voie de l'antagonisme bleu/jaune.

3.2. Organisation et fonction du cortex visuel

Le cortex visuel est localisé au niveau des lobes occipitaux. Il se divise en cortex visuel primaire et en cortex visuel secondaire :

- le cortex visuel primaire est situé dans l'aire de la scissure calcarine. Cette aire est le point d'arrivée de la plupart des signaux visuels directs provenant des yeux. Le cortex

primaire coïncide dans son étendue avec l'aire corticale 17 de Brodman, elle est également appelée aire visuelle I ou cortex strié ;

- les aires visuelles secondaires, encore appelées aires d'association visuelle, se trouvent situées tout autour du cortex strié. Les signaux secondaires sont transmis à ces aires pour l'analyse de la signification visuelle : la position tridimensionnelle, de la forme, du mouvement, du détail visuel et de la couleur des objets.

Ainsi, l'information visuelle est transmise par exemple au noyau suprachiasmatique, qui surplombe immédiatement le chiasma optique et intervient dans le fonctionnement de « l'horloge biologique » en renseignant sur l'intensité lumineuse.

Une autre information est transmise au tronc cérébral et au cervelet, où elle est utilisée dans la coordination des mouvements des yeux et de la tête, la fixation du regard et les modifications de la taille pupillaire. ⁽⁹⁾

C. La vision normale des couleurs

Dans l'œil et le cerveau, un circuit complexe détecte les différences de longueur d'onde des lumières émises par les objets que nous regardons.

La perception des couleurs et la vision nocturne semblent être deux capacités incompatibles : les animaux nocturnes, dont la vision est adaptée à des intensités lumineuses très faibles, voient rarement les couleurs.

La théorie la plus importante de la vision des couleurs fut celle de Young, théorie reprise ultérieurement par Helmholtz. Selon cette théorie, il existe trois types de cônes, chacun donnant une réponse maximale pour une couleur différente.

1. Historique ⁽²¹⁾ ⁽⁵¹⁾

L'homme a mis très longtemps pour commencer à comprendre les phénomènes visuels dont il se sert pourtant quotidiennement. Il est vrai que ce sens, primordial dans notre espèce, est assez complexe. Il conduit en effet à étudier les interactions entre les phénomènes physiques (lumière dite "visible" appartenant au domaine des ondes électromagnétiques) et les phénomènes physiologiques qui, à partir d'un flux de photons, produisent des sensations interprétables par le cerveau pour mieux définir notre environnement et y situer nos actions.

1.1. La préhistoire

On ne sait évidemment pas si un homme de Cro-Magnon ou un Néandertalien ont songé à chercher une explication aux sensations colorées qu'ils percevaient. Ce qui est sûr, c'est qu'ils savaient se servir des différents pigments à leur disposition avec un sens artistique étonnant et que nous pouvons encore être admiratifs devant les représentations rupestres que nous avons découvertes plus ou moins récemment.

1.2. L'Antiquité

C'est Aristote dont les conceptions ont dominé tout le monde Antique et le Moyen-Age qui a fourni une première série d'explications aux sensations colorées que nous connaissons. Pour lui, toute couleur vient d'un équilibre subtil entre blanc et noir, non pas en termes de simple

mélange (il connaissait fort bien la gamme des gris ainsi obtenue) mais par une dégradation progressive de la "qualité" de la lumière blanche. Cette dernière est la seule vraiment « pure car elle procède des sphères célestes baignées par l'éther ». Les éléments terrestres (air, eau, poussières, etc...) la transforment en l'obscurcissant et font apparaître les couleurs liées au "monde de la génération et de la corruption". On retrouve des échos de cette pensée jusque chez Goethe (1810) avec bien sûr des arrière-pensées philosophiques sur l'assimilation de la dualité " lumière-ténèbres " avec le combat " bien-mal ".

Simultanément, la notion de lumière pénétrant dans l'œil comme source du phénomène visuel n'était nullement établie. De nombreuses théories proposaient au contraire que ce soit l'œil qui envoie des rayons "tâter" les objets environnants pour en déduire leur forme et éventuellement leur couleur, liée à la matière les constituant. Il faut d'ailleurs reconnaître qu'on trouve dans les écrits d'Aristote la distinction entre "couleur-lumière" et "couleur-matière", précurseurs de nos mélanges additifs et soustractifs et qui montre une rare finesse d'analyse pour l'époque.

1.3. Du Moyen-Age au XVIII^{ème} siècle

De nombreuses théories, dont certaines nous paraissent aujourd'hui particulièrement farfelues, tentent d'expliquer le phénomène visuel. On pense à la suite d'Al-Hazen (965-1039) et de Roger Bacon (1220-1292) que l'image du monde extérieur se forme au niveau du cristallin ou de la pupille (d'où l'origine de ce dernier nom : "pupilla" = petite poupée, exprimant la réduction des objets extérieurs vus en réalité par réflexion sur le miroir convexe constitué par la cornée...). Les couleurs seraient ensuite transmises à l'intérieur de la tête par le nerf optique (ceci n'était pas mal vu !). On découvre l'inversion de l'image rétinienne, ce qui ne manque pas de troubler profondément Léonard de Vinci, qui imagine des trajets complexes des rayons lumineux pour supprimer ce phénomène gênant.

Cependant des idées nouvelles apparaissent venant de Galilée (1564-1642) et de ses successeurs qui travaillent sur le principe selon lequel le monde est composé de particules (aspect "objectif") et que les interactions de ces particules avec nos organes des sens produisent les sensations (aspect "subjectif"). Ces dernières naissent avant tout des dispositions particulières de l'organisme humain. Les couleurs appartiennent à ce second ordre, bien qu'ayant leur origine physique dans le premier. Ce progrès décisif dans la pensée scientifique se retrouve exposé chez Descartes et aussi chez John Locke (1632-1704).

1.4. Newton, Young, Helmholtz, Maxwell, Hering

Ces cinq noms prestigieux résument l'entrée de l'étude des phénomènes visuels et notamment de la perception colorée dans l'ère scientifique moderne.

Nous n'insisterons pas sur le génie universel de Newton (1642-1727) et sa célèbre expérience de la dispersion de la lumière blanche par le prisme qui établit sans conteste la nature complexe de ce qu'on considérait jusque là comme le symbole de la pureté absolue. Par contre, Newton croyait à l'existence dans la rétine d'un grand nombre de "résonateurs" entrant en fonction chacun pour une nuance colorée particulière.

C'est l'immense mérite de Thomas Young (1773-1829) que d'écrire en 1802 :

« Il est à peu près impossible d'attribuer à chaque point de la rétine un nombre infini de particules dont chacune vibrerait à l'unisson avec chaque ondulation possible de la lumière. Il devient donc nécessaire d'en supposer le nombre limité, à trois par exemple... ». Sur la valeur de ces trois couleurs, Young a varié : après avoir proposé comme exemple rouge, jaune et bleu (les fondamentales des peintres), il s'est rallié, après réflexion et quelques expériences supplémentaires, au trio rouge, vert et violet qui lui apparaît plus physiologique.

Cette remarquable intuition devait être amplement confirmée... près de 150 ans après par les travaux en électrophysiologie et en micro spectrophotométrie des années 1960 à 1980. Ajoutons, sans que cela diminue ses mérites, que Young avait concrétisé et admirablement exprimé un certain nombre d'idées exposées de façon plus confuse par ses contemporains, notamment G. Von Gentilly et Venturi.

Hermann Von Helmholtz (1821-1894) devait largement confirmer le bien fondé de cette théorie du trichromatisme dans son monumental ouvrage sur "l'Optique Physiologique" (1852). Enfin, James Clerk Maxwell (1831-1879) à partir d'expériences de mélanges de couleurs et d'égalisations, jetait les bases de la colorimétrie dont il écrivait les premières équations fondamentales.

Cependant, un physiologiste autrichien, Ewald Hering (1834-1918) faisait remarquer que dans l'étude des phénomènes subjectifs de la vision des couleurs, apparaissaient toujours deux

couples bien individualisés, rouge-vert et bleu-jaune, combinés au couple blanc-noir rendant compte de l'appréciation de la luminance.

Cette théorie extrêmement pertinente ne cadrerait pas avec le trichromatisme où le jaune est un mélange de rouge et de vert alors que spontanément, il nous apparaît comme une couleur pure et non comme un rouge-verdâtre... On retrouve d'ailleurs, dans les six couleurs constituant les 3 couples antagonistes de Hering, les "couleurs simples" proposées comme telles par Léonard de Vinci dans son traité de la peinture !

La conciliation de ces théories devait avoir lieu bien plus tardivement, à la fin du XXème siècle, lorsque les études électrophysiologiques ont mis en évidence les trois types de cônes correspondant à la théorie trichromatique, ainsi que les réponses antagonistes des ganglionnaires, répondant aux couples opposés de Hering.

Enfin, bien qu'un peu à part des recherches proprement dites sur la vision des couleurs, il ne faut pas oublier John Dalton, célèbre chimiste (1766-1844) peut-être plus connu par l'auto-étude de sa dyschromatopsie qui devint le "daltonisme" et dont un remarquable travail sur ses rétines, conservées après sa mort, a déterminé la nature exacte seulement dans les dernières années du XX^{ème} siècle !

2. La nature de la lumière

La lumière est constituée de particules nommées photons, c'est-à-dire des paquets d'ondes électromagnétiques. La lumière visible se distingue des autres faisceaux d'ondes électromagnétiques, comme les ondes radio ou les rayons X, par sa longueur d'onde (la distance qui sépare deux intensités maximales successives de l'onde), qui est voisine de $5 \cdot 10^{-7}$ mètre. La lumière visible est celle que nous pouvons voir : notre œil détecte l'énergie électromagnétique des longueurs d'onde comprises entre 400 et 700 nanomètres.

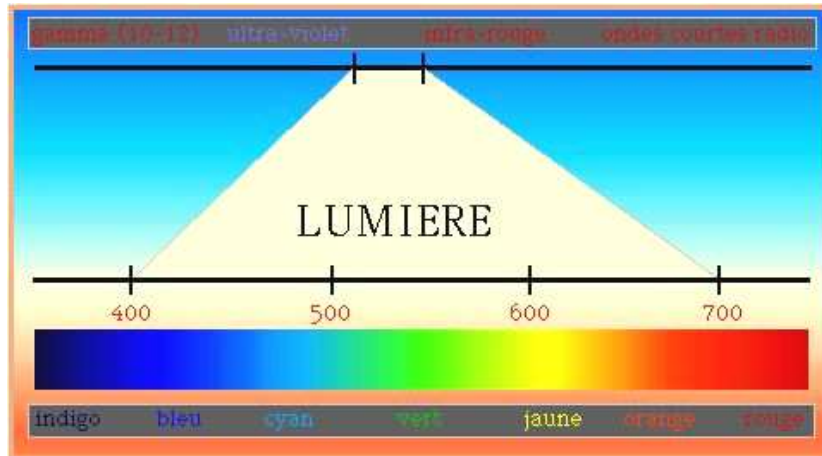


Figure 5 : Le spectre électromagnétique

La lumière qui atteint nos yeux est généralement un mélange assez équilibré de rayonnements énergétiques de toutes les longueurs d'onde visibles : c'est la lumière blanche.

L'énergie de la lumière émise par le soleil est analogue à une courbe large et régulière, sans brusques variations, avec un léger maximum vers 600 nanomètres. Lorsque nous filtrons la lumière blanche pour ne conserver qu'une étroite bande de longueurs d'onde, nous obtenons une lumière monochromatique.

3. Les pigments

Lorsque la lumière frappe un objet, trois scénarios sont possibles :

- elle peut être absorbée par cet objet et son énergie se transforme en chaleur (c'est ainsi que le soleil chauffe un matériau) ;
- elle peut traverser l'objet (l'eau ou le verre par exemple) ;
- elle peut être réfléchi par l'objet (lorsque celui-ci est un miroir ou tout autre objet de couleur claire comme la craie).

Il arrive souvent que plusieurs de ces phénomènes soient simultanés ; par exemple, un objet peut absorber une partie de la lumière et en réfléchir une autre ; les quantités relatives de lumière absorbée et réfléchi dépendent souvent de la longueur d'onde lumineuse. Ainsi les feuilles vertes des plantes absorbent les longueurs d'onde les plus longues et les plus courtes du spectre visible, et elles en réfléchissent les longueurs d'onde centrales : lorsque le soleil éclaire une feuille, le spectre de la lumière forme un pic large et assez prononcé vers les longueurs d'onde centrales, c'est-à-dire dans la région verte du spectre. De façon analogue, un

objet rouge réfléchit une lumière qui présente un pic assez large dans la partie droite du spectre.

Tout objet qui absorbe une partie de la lumière incidente et qui réfléchit le reste est un *pigment* ; lorsque certaines longueurs du spectre visible sont davantage absorbées que d'autres, les pigments nous semblent colorés. Cependant, la couleur que nous percevons ne dépend pas seulement des longueurs d'onde réfléchies, mais aussi des propriétés de notre système visuel : elle relève à la fois de la physique et de la biologie.

Les couleurs de ces pigments sont le bleu verdâtre (techniquement appelé cyan) qui absorbe la lumière rouge, le rouge bleuâtre (magenta) qui absorbe le vert, et le jaune qui absorbe le pourpre. Ces couleurs sont dites les couleurs primaires soustractives. ⁽¹⁶⁾

La lumière perçue comme blanche est un mélange de toutes les longueurs d'onde et le noir est l'absence de toute lumière.

Exemple : un objet apparaît rouge parce qu'il absorbe les ondes les plus courtes qui nous apparaissent bleues, alors qu'il réfléchit les ondes les plus longues, qui nous apparaissent rouges, ces ondes pouvant alors exciter le photopigment de la rétine la plus sensible au rouge.

En résumé, les couleurs que nous percevons dépendent des longueurs d'onde de la lumière qui est réfléchi, absorbée ou transmise par les pigments des objets qui nous entourent.

4. De l'organisation du système visuel à la vision des couleurs ⁽⁶⁾

4.1. La vision des couleurs et les différents types de cônes

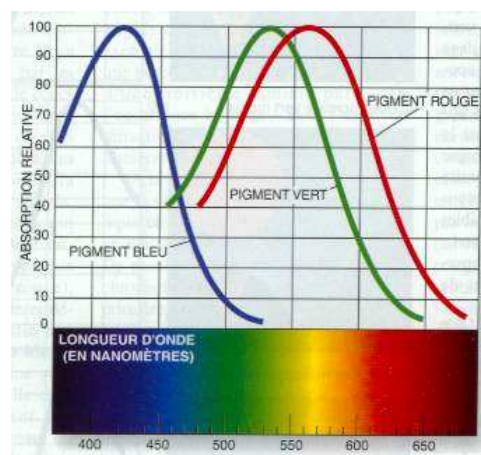


Figure 6 : Spectres d'absorption des trois pigments présents dans les cônes.

La perception de l'espace visuel en couleurs semble naturelle en lumière du jour. Or l'espace qui nous entoure n'est pas, en lui-même, coloré. Il est composé d'objets qui renvoient tout ou partie de la lumière du jour qui les éclaire, la lumière du jour contenant une gamme de longueurs d'onde comprises entre 400 et 700 nm. Seule l'interaction entre les cônes rétiens et la partie des rayonnements réfléchis ou transmis par un objet vers notre œil permet une perception colorée si le niveau lumineux est suffisant, c'est-à-dire photopique.

La dénomination des couleurs résulte d'un apprentissage culturel. Il consiste à relier une sensation, différente selon les longueurs d'onde initiales, à un mot, caractéristique de la tonalité.

En Occident, il est convenu de nommer bleu ou bleu-vert une lumière de niveau lumineux photopique contenant majoritairement des courtes longueurs d'onde (comprises environ entre 400 et 500 nm). Elle est dite verte, jaune ou orangée si elle contient essentiellement des moyennes longueurs d'onde (environ entre 500 et 600 nm), et rouge si elle compte surtout des grandes longueurs d'onde (entre 600 et 700 nm).

Lorsque toutes les longueurs d'onde de niveau lumineux photopique, comprises entre 400 et 700 nm, sont présentes dans une lumière visible et mélangées en proportions convenables, la sensation résultante est dite blanche. C'est le cas de la lumière du jour (lumière solaire). Si, dans ce mélange aboutissant à la lumière blanche, une longueur d'onde est présente en proportion plus importante, elle donne sa tonalité à la sensation résultante. La proportion entre la longueur d'onde donnant la tonalité et les autres longueurs d'onde du mélange correspond à une sensation de saturation. Si cette proportion est réduite, la saturation est faible et la couleur paraît délavée. Par contre, si elle domine le mélange, la saturation est forte et la couleur paraît plus pure.

Il existe environ 4,5 millions de cônes de trois types qui se différencient principalement par la nature et les propriétés des photopigments contenus dans leurs articles externes :

- les cônes « S », ou cyanolabes, qui contiennent en majorité le pigment sensible au bleu. L'absorption est maximum vers 420 nm ;
- les cônes « M », ou chlorolabes, qui présentent une concentration plus importante en pigments sensibles au vert. Le maximum d'absorption se situe vers 530 nm ;
- et enfin les cônes « L », ou érythrolabes, porteurs du pigment sensible au rouge. L'absorption est maximum pour une longueur d'onde de 560 nm.

4.2. La transduction de la lumière par les cônes

La quantité de photons absorbée par tel ou tel photopigment de cônes varie selon la longueur d'onde. Elle conditionne le degré d'hyperpolarisation des trois types de cônes et la valeur de leur amplitude maximale d'hyperpolarisation.

Une lumière, à n'importe quelle longueur d'onde du spectre visible va donc exciter plus ou moins certains types de cônes. Notre perception des couleurs dépend donc de cette combinaison. C'est là la base de la vision des couleurs et son aspect trichromatique.

4.3. Le trichromatisme rétinien

Chaque longueur d'onde de niveau lumineux photopique peut ainsi être absorbée avec une probabilité différente par les trois photopigments de cônes. Schématiquement, les longueurs d'onde comprises entre 400 et 565 nm environ seront absorbées par les trois types de photopigments S, M et L, alors que les longueurs d'onde supérieures à 565 nm environ ne le seront pratiquement que par les deux photopigments M et L.

L'absorption par le photopigment d'un cône d'une énergie de longueur d'onde donnée est à l'origine d'un degré défini d'hyperpolarisation. Cependant, les courbes d'absorption étant pratiquement symétriques, une même valeur d'hyperpolarisation d'un cône de type déterminé peut être induite par deux longueurs d'onde différentes. La distinction entre les différentes longueurs d'onde nécessite donc la présence de deux ou trois photopigments capables de capter des photons d'une longueur d'onde donnée, avec une probabilité différente. Il en résulte, pour les trois catégories de cônes stimulés (ou les deux majoritairement stimulés), une combinaison de degrés d'hyperpolarisation précis, caractéristiques de la longueur d'onde donnée. Ceci permet un échantillonnage du spectre visible dit trichromatisme rétinien qui aboutit à la vision des couleurs.

Exemple : on peut voir qu'une lumière monochromatique rouge avec une longueur d'onde de 610 nm entraîne une stimulation des cônes rouges à une valeur de 0,75 environ (75% du pic de stimulation pour une longueur d'onde optimale), tandis qu'elle entraîne une stimulation des cônes verts à 0,13 et aucune stimulation des cônes bleus. Ainsi les rapports de stimulation

de ces trois types différents de cônes dans cet exemple sont 75-13-0. Le système nerveux interprète cet ensemble comme la sensation de rouge. ⁽²⁵⁾

4.4. Les mécanismes nerveux

La sensation de couleur dépend des cellules ganglionnaires qui soustraient ou additionnent les influx nerveux d'un type de cône à ceux d'un autre type. Le traitement subséquent dans les cellules ganglionnaires et dans le corps genouillé latéral donne naissance à trois voies nerveuses vers le cortex visuel :

- une voie rouge-verte qui signale les différences entre les réponses des cônes L et des cônes M ;
- une voie bleu-jaune qui signale les différences entre les réponses des cônes S et la somme des réponses des cônes L et M ;
- et une voie de luminosité qui transmet la somme des réponses des cônes L et M.

Ces voies se rendent au cortex visuel primaire. De là, l'information sur la couleur est projetée aux autres parties du cortex (notamment l'aire 18). ⁽¹⁹⁾

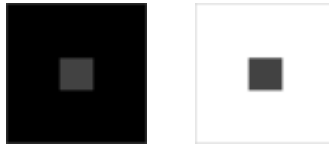
5. Conditions de perception

Contrairement à ce que l'on pourrait penser, notre œil ne voit pas la même couleur toujours de la même manière. L'environnement a une forte influence sur notre vision. Notre perception des couleurs est toujours faussée, parce que lorsqu'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.

On parle de contrastes lorsque l'on peut constater, entre deux effets de couleurs qu'il faut comparer, des différences ou des intervalles sensibles. ⁽²⁸⁾

5.1. Contraste de luminosité

Le contraste des luminosités est probablement l'élément le plus perturbant pour la « lecture » des couleurs. Ainsi, la même couleur sera perçue plus foncée et plus terne sur un fond clair que sur un fond sombre.



Exemple : le carré central semble plus foncé à droite qu'à gauche.

De même, les différentes sources de lumière (soleil, lampe électrique, lampe au tungstène...) rendent la couleur d'un objet différente en apparence.

Le phénomène où deux couleurs semblent identiques sous une lumière et différentes sous une autre est appelé métamérisme : quand on compare deux objets métamères, les caractéristiques de la lumière réfléchie sont différentes, mais les « valeurs » des trois couleurs primaires perçues par l'œil peuvent être identiques sous une source lumineuse, et différentes sous une autre, selon la composition de cette lumière incidente.

5.2. Contraste de saturation

Par une action d'opposition, nous évaluons la vivacité d'une couleur en fonction de la scène environnante. Une même couleur peut sembler plus pâle si elle est entourée de couleurs soutenues que si elle est isolée dans un ensemble globalement fade.



Exemple : le carré central paraît être d'un vert plus vif à droite qu'à gauche.

5.3. Contraste de teinte

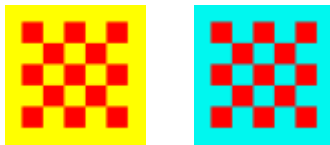
Toujours par opposition, nous estimons la teinte d'une couleur en fonction des teintes environnantes. Un même jaune paraîtra froid s'il est entouré de couleurs chaudes, et vice-versa.



Exemple : le « V » de gauche paraît bleu car entouré par du vert, mais à droite, plutôt vert car entouré de bleu.

5.4. Contraste simultané

Jouant également sur notre perception des couleurs, ce phénomène fait intervenir les couleurs complémentaires. Si nous regardons une teinte, notre œil "exige simultanément" sa couleur complémentaire. De fait, deux couleurs complémentaires juxtaposées vont se renforcer l'une l'autre.



Exemple : le damier rouge ressort plus à droite (sur le cyan, sa complémentaire), qu'à gauche.

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.



Exemple : Les rayures grises à gauche semblent froides, bleuâtres, car elles côtoient des rayures rouges (chaudes). Le gris semble être teinté de la couleur complémentaire du rouge: le cyan. A droite, ces mêmes rayures grises paraissent rosâtres car cette fois-ci, elles sont accolées à des rayures bleues (froides).

5.5. Différence d'observateur

La sensibilité visuelle de chaque individu est légèrement différente. Même chez les individus qui ont une vision des couleurs « normale », il peut y avoir un penchant pour le rouge ou le bleu. La vue d'un individu change aussi avec la fatigue, et avec l'âge.

Ainsi, la couleur appelée « turquoise » peut être vue plus bleue ou plus verte selon l'observateur.

5.6. Différence de taille

Les couleurs qui couvrent de larges surfaces peuvent sembler plus vives et plus criardes que ces mêmes couleurs sur de petites surfaces. C'est ce qu'on appelle *l'effet de surface*.

6. Variations physiologiques dans la vision des couleurs ⁽³³⁾

Le champ visuel : la vision des couleurs est essentiellement une fonction de la rétine centrale, ce qui tient simplement à la plus grande densité des cônes à ce niveau ; par suite la vision colorée est de moins en moins bonne vers la périphérie du champ, et on peut dire que si le centre de la rétine est véritablement trichromatique, il est entouré en périphérie par un anneau dichromatique, lui-même entouré plus en périphérie par un anneau monochromatique.

Couleurs pures : si on demande à un sujet de désigner dans le spectre une teinte qui lui paraît correspondre à la couleur « pure », c'est-à-dire une couleur non contaminée par les voisines (par exemple, un vert pur, ne tirant ni sur le jaune, ni sur le bleu), il donne en général une réponse précise, en indiquant, à peu de choses près, la même longueur d'onde à des essais répétés. Mais si on compare entre elles les réponses de plusieurs sujets, on constate qu'elles s'échelonnent sur une étendue variable de longueurs d'onde.

Aberration chromatique : les différentes longueurs d'onde sont réfractées différemment dans l'œil : les courtes longueurs d'ondes le sont davantage que les grandes, comme dans un prisme. Chez le sujet normal emmétrope, 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 d'elle. 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.

Age : parmi tous les facteurs physiologiques, l'âge est sûrement celui qui joue le plus grand rôle dans les variations inter-individuelles dans la vision des couleurs. La vision colorée existe déjà chez le nourrisson ; cependant, la discrimination des teintes n'est pas parfaite d'emblée et s'améliore peu à peu : ce n'est que vers 25 ou 30 ans qu'elle atteint sa meilleure capacité discriminative. La vision colorée se dégrade peu à peu et surtout à partir de 60 ans, du fait de l'augmentation de densité du cristallin.

Performances colorées : les variations physiologiques précédentes sous-entendent qu'il existe, parmi les sujets dits « normaux », des sujets plus ou moins doués pour les discriminations chromatiques. Ceci a une importance dans les métiers où la vision des couleurs a un rôle essentiel, et il est donc souhaitable de détecter non seulement les sujets déficients, comme on le fait d'ordinaire, mais aussi les sujets particulièrement doués au point de vue chromatique. On utilise pour cela des tests de performance très difficile aboutissant à un score quantifié.

7. La perception des couleurs par les animaux

La perception des couleurs est liée à la présence dans la rétine de cônes sensibles au vert, au bleu et au jaune. L'étude de la vision des couleurs par l'animal fait appel à des techniques de modification comportementale et à des analyses spectrométriques de rayonnement absorbé par la rétine.

Sans pouvoir dire que l'unanimité soit faite, il semblerait qu'une majorité d'auteurs admettent les éléments suivants :

On ne sait pratiquement rien sur la vision des couleurs par les cyclostomes (lamproies).

La rétine des téléostéens, c'est-à-dire la majorité des poissons actuels tels que : sardine, brochet, truite, thon..., perçoit la couleur : rouge, jaune, vert, bleu, violet et ultra-violet jusqu'à 365 nm.

Les amphibiens ont une bonne vision des couleurs, avec un maximum de perception pour le jaune en photopique et pour le vert en scotopique.

Chez les reptiles : la tortue différencie le bleu, le vert et l'orange ; le lézard différencie le jaune, le rouge, le vert et le bleu.

Les oiseaux ont un sens de la couleur très développé ; cela paraît logique eu égard à la richesse des coloris de leur plumage, laquelle n'a d'égal que la diversité chromatique des poissons. L'oiseau règle son comportement sur la couleur beaucoup plus que sur la luminosité ou sur la forme.

La vision des couleurs par les mammifères est très discutée. Elle est certes associée au caractère diurne de l'animal. On admet que la musaraigne, l'écureuil sont parfaitement trichromates. Il semblerait que les bovins ne les distingueraient pas, ce qui ferait douter de l'efficacité de la muleta rouge au cours des corridas. Sur la capacité du chien, les avis sont très partagés ; quant au chat, on sait aujourd'hui qu'il est dichromate : l'étude histologique de sa rétine a montré qu'elle renfermait deux sortes de cônes, les uns sensibles au bleu indigo 450 nm, les autres à jaune-vert 556 nm. Il lui est impossible de distinguer le rouge. ⁽²⁹⁾

D. Pathologies de la vision des couleurs

L'examen de la vision colorée est un examen de routine pour l'entrée dans un certain nombre de professions.

Le sujet normal réalise la synthèse des multiples couleurs qu'il perçoit à partir des trois fondamentales : rouge, verte et bleue, mêlées en proportion variable. Chacune de ces fondamentales correspond à un type d'organe récepteur et à un médiateur photochimique particulier. Le déficit d'un de ces systèmes entraîne une altération du sens coloré.

Le plus grand nombre de ces anomalies du sens coloré est d'origine héréditaire.

On distingue :

- les achromatopsies (déficit des trois fondamentales)
- les systèmes chromatiques à deux fondamentales :
 - deutéranopie (disparition de la fondamentale verte) ou anomalie type Nagel ;
 - protanopie (disparition de la fondamentale rouge) ou anomalie type Dalton ;
 - tritanopie (disparition de la fondamentale bleue).
- les systèmes trichromatiques anormaux, où il existe les trois fondamentales, mais où l'une d'elles n'est que partiellement active. ⁽⁴⁹⁾

Lorsqu'une maladie de la rétine ou du nerf optique entraîne une baisse de l'acuité visuelle, l'étude de la vision colorée permet d'en attester l'authenticité et d'en préciser le siège. On observe ainsi :

- soit une amblyopie chromatique (confusion de toutes les couleurs)
- soit une dyschromatopsie d'axe rouge-vert, témoin d'une atteinte du nerf optique (névrite optique)
- soit une dyschromatopsie d'axe bleu-jaune qui témoigne d'une atteinte rétinienne.

1. Analyse de la vision colorée ⁽³⁰⁾ ⁽³⁵⁾

L'analyse de la vision colorée est fondée sur trois types de tests différents :

1.1. Les tables pseudo-isochromatiques

Il s'agit de planches recouvertes de disques imprimés de différentes couleurs, dont certains représentent un chiffre, ou un dessin. La teinte de ces figures est située sur la même ligne de confusion que le fond sur lequel elles se détachent : cette caractéristique en rend la lecture impossible à un œil souffrant d'une dyschromatopsie caractérisée par cette ligne de confusion. Ces tables ne seront donc lues que par un œil normal. La table d'Ishihara, la plus utilisée, est particulièrement sensible aux dyschromatopsies congénitales, et aux dyschromatopsies acquises de type rouge-vert. Les dyschromatopsies bleu-jaune échappent par contre à cette exploration.

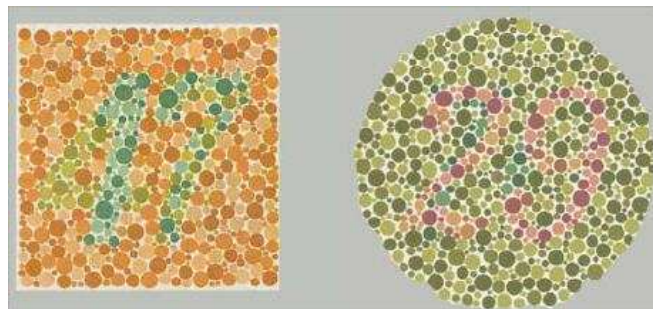


Figure 7 : Exemple de tables d'Ishihara

1.2. Les tests de Farnsworth

Il s'agit d'une succession de pastilles, qui ne diffèrent les unes des autres que par leur tonalité. L'épreuve consiste dans le classement de ces pastilles, à partir d'une couleur de référence. Il existe, selon le nombre des pastilles proposées, plusieurs variétés du test de Farnsworth : le 15 Hue et le 15 Hue désaturé comportent 15 pastilles.

La désaturation, dans la version modifiée, accroît la sensibilité de l'épreuve. Le 28 Hue comporte 28 pastilles et constitue une version raccourcie du test suivant.

Pour le 15 comme le 28 Hue, le recueil des résultats est assuré sur un schéma circulaire, où figure la place théorique de chacune des pastilles. En reproduisant l'ordre observé des pastilles, on fait apparaître des lignes diagonales qui peuvent définir des directions de confusion.

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, et réclame en particulier une très grande attention du sujet testé. Plus encore que pour les tests précédents, la conservation d'une bonne acuité visuelle est ici indispensable.

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 d'en définir l'axe, qui indique le type de la dyschromatopsie.

1.3. Les anomaloscopes

Il s'agit de dispositifs dans lesquels le sujet étudié doit égaliser une couleur proposée, à partir de lampes de couleurs complémentaires.

L'anomalomètre de Nagel est un instrument circulaire séparé par une ligne horizontale en demi-cercle. Le demi-cercle supérieur peut être éclairé par un mélange de rouge et de vert, dont les proportions sont définies par l'examineur. La moitié inférieure offre une luminance jaune. L'épreuve consiste à égaliser la couleur des deux surfaces, et ne comporte qu'une seule réponse correcte. Les trichromates anormaux utilisent une proportion de rouge et de vert anormale ; les dichromates acceptent plusieurs réponses.

1.4. L'électro-rétinogramme

L'ERG est la réponse des couches externes de la rétine à des stimulations lumineuses brèves et répétées. La stimulation est faite par des éclairs, successivement en lumière blanche, en lumière rouge (ne stimulant que les cônes) et en lumière bleue (ne stimulant que les bâtonnets).

L'électrode est incluse dans un verre scléral, deux électrodes référentielles étant installées l'une sur le lobe de l'oreille, l'autre au niveau du front. Le stimulus lumineux est projeté de manière itérative, et la réponse de la rétine moyennée.

L'ERG s'effectue d'abord de manière statique, avec chacun des trois types de lumière. En lumière blanche, le tracé comporte une onde *a*, négative, survenant à 20 ms et de 100 µV d'amplitude ; une onde *b*, positive, la suit immédiatement. Son amplitude est de 100 à 300 µV. Sa portion ascendante peut être marquée de petites oscillations, dénommées « potentiel oscillatoire ». A la fin de l'onde *b*, le tracé se négative, avant de revenir à la ligne de base. On admet que l'onde *a* correspond à la réponse des photorécepteurs, et l'onde *b* à celles des cellules bipolaires et des cellules de Müller.

En lumière rouge, on retrouve ces deux ondes, mais leur amplitude est nettement moins grande. En lumière bleue, seule persiste l'onde *b*, qui prend un aspect en dôme.

L'ERG dynamique analyse l'évolution de la réponse dans le temps, après éblouissement de trois minutes. Le recueil se fait alors de deux minutes en deux minutes, avec une stimulation orange, active sur l'ensemble des photorécepteurs.

Cette méthode fait apparaître, dès la deuxième minute, un dédoublement de l'onde *b*, dont les deux pôles correspondent, le premier à la réponse photopique des cônes, le second à celle, scotopique, des bâtonnets. Dans tous les cas, l'ERG met en évidence des réponses locales, qui ne sont pas destinées à être transmises vers les voies optiques et le cerveau.

2. Les pathologies de la vision colorée ⁽³⁵⁾

2.1. Les pathologies rétiniennes

2.1.1. Les dyschromatopsies congénitales ^{(33) (35)}

2.1.1.1. Description

Les anomalies héréditaires de la vision des couleurs ont été décrites par le fameux chimiste John DALTON en 1794, dans une auto-observation historique.

Il s'agit, notamment au stade mineur, d'anomalies fréquentes, touchant 9 % des hommes, et 0,5 % des femmes. Leur aspect clinique découle directement de l'organisation trichromatique de la macula. Elles consistent dans le dysfonctionnement, plus ou moins sévère, d'une ou plusieurs populations de cônes. Le test d'Ishihara est particulièrement adapté au dépistage de ces anomalies, dont les caractères seront précisés par le test de Farnsworth. S'agissant d'une anomalie histologique, la dyschromatopsie ne s'exprime, en tant que telle, que sur le plan fonctionnel : le fond d'œil, en particulier, est constamment normal.

L'achromatopsie : ou achromatisme. Dans sa forme typique la plus sévère, le monde n'est vu qu'en noir et blanc. Cette forme est exceptionnelle. Elle s'associe à une amblyopie profonde avec photophobie et nystagmus. Le test de Farnsworth est totalement anarchique.

Le monochromatisme : il manque deux sortes de pigments ; la vision des couleurs se fait alors au moyen d'un seul cône. En fait, pour que la vision semble colorée, il faut que le cerveau reçoive deux sortes d'informations de cônes différents ; par conséquent, il n'y a pas ici de vision colorée à proprement parler, et le sujet est achromate.

Les dichromates représentent 25 % des dyschromatopsies congénitales. Ici, l'une des populations de cônes est absente, et la vision colorée ne repose donc que sur les deux populations restantes. On observera, de ce fait, une confusion très caractéristique de la vision colorée, avec une répartition des réponses le long des lignes de confusion.

- Lorsque manquent les cônes rouges, on parle de *protanopie*, ou d'anomalie type Dalton. La protanopie représente 2,5 % des dichromates.
- Un peu plus nombreux (3,5 % des dichromates), les *deutéranopes* ont un déficit du récepteur vert. Cette anomalie est aussi dénommée anomalie type Nagel.
- L'absence de récepteur bleu, responsable de la *tritanopie*, est quant à elle exceptionnelle.

Les trichromates anormaux constituent l'essentiel des dyschromates, dont ils représentent 70 %. Les trois systèmes de perception sont présents, mais l'un d'entre eux fonctionne mal. Suivant le récepteur incriminé, on parle de protanomalie pour les L-cônes, deutéranomalie pour les M-cônes, ou de tritanomalie pour les S-cônes.

Ces trois anomalies représentent respectivement 14 %, 85 % et moins de 1 % des trichromates anormaux. Les anomalies observées sont de même type que chez les dichromates, mais les axes dégagés sont beaucoup moins marqués. Souvent, la lecture des planches d'Ishihara est possible, quoi que hésitante, et il n'est pas rare de voir les sujets répondre correctement au Farnsworth 15 Hue. Le Farnsworth 100 Hue et l'anomaloscope précisent par contre l'anomalie.

2.1.1.2. Vision du daltonien

Le type de vision colorée du sujet daltonien dépend à la fois du type de déficit (c'est-à-dire du cône pathologique) et de la gravité qu'il présente.

Le sujet trichromate anormal voit à peu près les mêmes teintes que le sujet normal, avec seulement une discrimination très nettement inférieure entre les teintes. Ce qui le caractérise, c'est qu'il n'utilise pas, dans ses mélanges colorés, les mêmes proportions de composantes qu'un sujet normal ; il tend à rajouter, en quelque sorte, une quantité de la couleur qu'il perçoit le moins bien. Donc, le sujet protanomal rajoute du rouge dans le mélange ; un deutéranomal rajoute du vert ; et un tritanomal rajoute du violet.

Le sujet dichromate est caractérisé par l'existence dans son spectre d'une zone achromatique, dite zone neutre, qui se trouve à la place de la teinte déficiente. De plus, la couleur complémentaire est également perçue comme achromatique.

On voit donc que quand on déclare que le daltonien confond le rouge et le vert, cela ne veut pas dire qu'il voit le rouge comme vert et le vert comme rouge ; cela veut dire qu'il voit le rouge comme achromatique (soit gris, soit blanc) et qu'il voit également le bleu-vert comme achromatique : il est donc incapable de les différencier.

Les dichromates n'ont donc à leur disposition que trois aspects dans le spectre : deux teintes chromatiques et du blanc ou du gris.

Le sujet monochromate, ou achromate, est caractérisé par l'absence totale de vision colorée ; il ne peut en fait différencier que les clartés, et le monde lui apparaît comme un film en noir et blanc.

2.1.1.3. Génétique du daltonisme

Les gènes de la vision des couleurs et, corrélativement, du daltonisme, sont portés par le quatrième bras du chromosome X. Le gène normal de X domine le gène pathologique Xd. La transmission est donc récessive, liée au sexe pour les formes les plus communes.

Par contre, le type triptan est dominant, porté par le chromosome 7 ; l'achromatopsie totale est en général récessive, non liée au sexe.

Enfin, la dominance du gène normal sur le gène pathologique chez les femmes vectrices n'est pas toujours complète ; il en résulte que ces femmes présentent souvent de petits troubles mineurs de la vision des couleurs.

2.1.2. Les dégénérescences tapéto-rétiniennes ^{(35) (36)}

Il s'agit d'affections dégénératives de la rétine, souvent héréditaires. Elles affectent la rétine périphérique, la rétine centrale ou les deux à la fois.

La rétinite pigmentaire est une dégénérescence progressive de la rétine périphérique, dont la transmission est autosomique récessive.

Cette dégénérescence débute au niveau des photorécepteurs et de l'épithélium pigmentaire. Elle se manifeste au début par une héméralopie (ou cécité nocturne), contrastant avec la bonne conservation de l'acuité photopique.

L'élément caractéristique est l'aspect ophtalmoscopique, qui associe précocement, une atrophie optique, souvent jaunâtre, avec des vaisseaux grêles et une pigmentation anormale de l'ensemble de la rétine périphérique, faite d'amas étoilés, plus ou moins confluent. Ils apparaissent à l'équateur et envahissent progressivement le pôle postérieur. La périmétrie photophobique montre un scotome annulaire, qui débute à la partie moyenne du champ et s'étend à la fois vers le centre et la périphérie.

La vision colorée est déficitaire, avec un axe bleu-jaune, puis une achromatopsie. L'évolution est très grave, se faisant vers une vision tubulaire, et évolue parfois vers la cécité complète.

La maladie de Stargardt est la plus fréquente des dégénérescences centrales. C'est une dystrophie maculaire à transmission autosomique récessive.

L'âge de début se situe autour de 10 ans : la maladie se manifeste par une baisse de l'acuité visuelle, se stabilisant au dessous de 1/10^e. La vision périphérique reste normale, et le déficit se limite à un scotome central de 40°, à pente douce. La vision nocturne est normale, et le malade est beaucoup plus à l'aise dans la pénombre qu'en plein jour. L'ERG est normal, alors qu'il existe une dyschromatopsie d'axe rouge-vert, puis une achromatopsie.

Au fond d'œil, le signe précoce est un œdème de la macula, associé à une irrégularité de la pigmentation, l'ensemble évoluant vers un aspect hétérogène, avec des amas pigmentaires et des taches brunes.

La dégénérescence des cônes, de transmission héréditaire, se manifeste par une diminution importante de l'acuité visuelle dès la première ou deuxième décennie de vie ; l'ERG montre l'absence de réponse photopique.

Le déficit de la vision des couleurs est précoce. Il s'aggrave progressivement jusqu'à l'achromatopsie totale.

On observe également des dyschromatopsies dans les pathologies rétiniennes telles que :

- le décollement de rétine ;
- la dégénérescence maculaire liée à l'âge ;
- traumatismes oculaires (traumatismes crâniens, oedèmes maculaires, phototraumatismes, barotraumatismes, plaies du globe...) ;
- affections vasculaires rétiniennes ;
- lésions tumorales

2.2. La dyschromatopsie du diabétique

Elle se révèle être l'une des plus importantes anomalies acquises de la vision des couleurs.

La dyschromatopsie est d'axe jaune-bleu, asymétrique, évolutive et consciente. Elle apparaît souvent avant tout autre signe clinique ou fonctionnel de rétinopathie dans le diabète.

Dans le diabète de type I, la dyschromatopsie apparaît le plus souvent au bout de 5 à 7 ans d'évolution, puis progresse constamment par la suite.

Chez le diabétique de type II, la fréquence de la dyschromatopsie est d'emblée plus importante, en raison probablement d'une découverte tardive de la maladie diabétique intervenant alors sur un système vasculaire déjà altéré par l'âge.

2.3. La dyschromatopsie dans le glaucome

Le glaucome est une maladie du nerf optique qui va perdre progressivement ses fibres qui le composent. Il s'en suit une atteinte progressive du champ de vision. La vision disparaît sur les côtés mais la vision au centre est longtemps conservée.

Il peut exister une dyschromatopsie d'abord périphérique puis centrale, d'axe bleu-jaune.

2.4. Les neuropathies optiques

2.4.1. Les neuropathies ischémiques

En cas d'atteinte du faisceau maculaire, on montre un trouble de la vision colorée.

L'ischémie papillaire chronique : c'est la complication majeure du glaucome chronique à angle ouvert : l'augmentation pathologique de la tension endoculaire entraîne l'occlusion progressive des vaisseaux de la papille. L'ischémie papillaire évolue pendant plusieurs années, affectant de manière progressivement croissante la fonction visuelle.

Au début, l'acuité visuelle est conservée, réduisant d'autant la symptomatologie fonctionnelle, et donc la fréquence de consultation. La vision colorée est par contre précocement atteinte, avec un aspect de dyschromatopsie bleu-jaune (ce qui constitue l'exception à la règle selon laquelle les atteintes rétiniennes ont un aspect bleu-jaune, et les atteintes neurologiques rouge-vert). L'altération du champ visuel, précoce également, prend la forme d'un scotome arciforme, supérieur et/ou inférieur, partant de la tache de Mariotte. A un stade plus tardif, le scotome affecte la vision centrale.

Du point de vue ophtalmologique, l'aspect caractéristique est celui d'une atrophie optique, accompagnée d'une excavation papillaire en chaudron, très profonde.

Une fois installées, les lésions sont irréversibles, et dans certains cas, le traitement du glaucome ne permet pas d'enrayer totalement l'aggravation. A noter, le rôle aggravant de la diminution de la tension artérielle, ce qui augmente le rapport pathologique tension oculaire/tension artérielle, responsable de l'ischémie.

Dans un petit nombre de cas, l'ischémie papillaire chronique évolue chez des patients dont le tonus oculaire reste normal. Ce tableau de glaucome sans tension, aussi nommé maladie de Von Graefe, reste inexpliqué et la thérapeutique en est très aléatoire.

2.4.2. Les neuropathies inflammatoires et infectieuses

On assiste à un effondrement de l'acuité visuelle dans plus de 90 % des cas. La vision colorée est le plus souvent instable du fait de l'amblyopie. Lorsqu'elle peut être appréciée, elle est très déficitaire : pendant quelques heures, au tout début, la confusion est bleu-jaune, puis s'installe le tableau typique rouge-vert. Bien souvent, on trouve en fait une dyschromatopsie sévère, sans axe. Il existe également un déficit du champ visuel.

L'évolution est le plus souvent favorable (variable selon l'agent en cause) : les signes inflammatoires disparaissent et la fonction visuelle se rétablit. Dans le cas de la vision des couleurs, il peut persister une dyschromatopsie d'axe rouge-vert.

2.4.3. Les neuropathies toxiques

L'intoxication est une cause fréquente de neuropathie optique. Leur mode d'installation est différent suivant la nature du toxique, allant de quelques heures à plusieurs semaines. L'étude de la vision des couleurs, recherchant une dyschromatopsie rouge-vert, et les potentiels évoqués visuels sont déterminants.

- **intoxication éthylo-tabagique** : cette neuropathie est de bon pronostic, le retour d'une fonction visuelle normale étant habituel, après arrêt de l'intoxication, éventuellement renforcé par l'administration de vitamines B1, B6, B12 et de zinc.

- **Médicaments** : ⁽⁴²⁾
 - Antimitotiques ;
 - AINS dont l'indométacine ;
 - Digitaliques et amiodarone ;
 - Antituberculeux : l'isoniazide affecte peu la vision colorée, contrairement à l'éthambutol avec lequel on observe une dyschromatopsie initialement bleu-jaune (signant l'atteinte rétinienne associée ?), puis rouge-vert, en cas de traitement prolongé avec une fonction rénale déficitaire.

L'arrêt du traitement s'accompagne de la régression du déficit visuel, mais celui-ci sera définitif si l'intoxication est poursuivie ;

- Les antiseptiques intestinaux : la part respective de l'infection intestinale et de l'absorption du médicament est encore discutée, mais le tableau clinique régresse à l'arrêt du traitement ;
- Les antiparasitaires dont les antipaludéens de synthèse ;
- Les contraceptifs oraux ;
- Plus rare : le chloramphénicol, les vitamines A et D...

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

Tableau 1 : Médicaments pouvant provoquer des troubles de la vision

AINS : anti-inflammatoires non stéroïdiens

APS : anti-paludéens de synthèse

Dys : dyschromatopsie

- **Les intoxications professionnelles** : métaux (plomb, mercure, thallium, étain), solvants organique, insecticides organo-phosphorés, sulfure de carbone...

Noms des substances	Exemples	Usages industriels	Signes chromatiques
Benzène, dérivés	Vapeurs de benzène Dinitrobenzène Dinitrochlorobenzène	Industries diverses Explosifs	Dys. Rouge-vert II
Carbone, dérivés	Anhydride carbonique Oxyde de carbone Sulfure de carbone Tétrachlorure de carbone	Résidus industriels Textiles, viscose Teintures	Chromatopsie Achromatopsie cérébrale Dys. Rouge-vert II
Halogènes, dérivés	Méthylbromide Méthylchloride Méthylodide	Extincteurs	Chromatopsies Dys. Rouge-vert II
Métaux, dérivés	Mercure Plomb Thallium	Peintures, carburants Raticide	Douteux Chromatopsies, Dys. Rouge-vert II
Plastiques	Styrène Polystyrène	Industries diverses	Dys. Bleu-jaune
Solvants organiques	Hexane	Automobile, textiles	Dys. Bleu-jaune
Insecticides	DDT Trichloréthylène	Antimites, insecticides	Dys. Rouge-vert II

Tableau 2 : Produits industriels pouvant provoquer des troubles de la vision.

2.4.4. Les neuropathies dégénératives

Les neuropathies optiques isolées :

- La maladie de Leber est la plus fréquente. Le caractère familial de cette maladie est certain, mais son mode de transmission échappe aux règles habituelles ; il semble que seules les femmes transmettent la maladie, celle-ci s'exprimant essentiellement chez les hommes, qui sont touchés huit fois plus que les femmes.

La maladie s'exprime dans la seconde décennie, de manière habituellement unilatérale. L'atteinte de l'œil adelphe suit rapidement.

La baisse de l'acuité visuelle est le symptôme dominant, survenant de manière brutale et se stabilisant autour de 1/10. Le déficit campimétrique a la forme d'un scotome central à pente raide. La dyschromatopsie de type rouge-vert est difficile à mettre en évidence sur l'œil atteint si le déficit est trop important. Elle est facilement retrouvée sur l'œil encore sain.

Une fois installé, le déficit fonctionnel est définitif, mais on signale des améliorations spontanées, avec stabilisation de l'acuité autour de 3/10.

- L'atrophie optique dominante : elle est identifiée dans la première décennie, et s'exprime par un déficit visuel modéré, lié à un scotome central incomplet. La dyschromatopsie est de type bleu-jaune. La papille est d'emblée atrophique. Le processus pathologique est bilatéral, et peu évolutif, n'évoluant jamais vers la cécité.
- Neuropathie optique de la sclérose en plaque : une neuropathie optique doit toujours être soupçonnée dans la sclérose en plaque, ce qui, chez ces malades, nécessite un examen comportant acuité visuelle, champ visuel, vision des couleurs...⁽³⁶⁾

2.5. Les syndromes déficitaires

2.5.1. La cécité corticale

La cécité corticale est un syndrome rare, relevant de l'atteinte des deux aires striées. La symptomatologie clinique associe une cécité totale, classiquement absolue, bilatérale, dans laquelle le malade ne distingue ni les couleurs, ni les formes. Les réflexes du clignement à la menace ou à l'illumination sont abolis. Il existe, par ailleurs, une anosognosie visuelle très caractéristique : le malade ignore sa cécité et refuse de la reconnaître. Son comportement moteur est souvent étonnamment conservé, au vu de la cécité, ce qui confère à ce tableau un aspect très déroutant : la préservation des processus de perception sous-corticale explique sans doute cette dissociation. Les hallucinations visuelles sont fréquentes.

L'étiologie la plus courante des cécités corticales est l'occlusion des artères cérébrales postérieures.

La cécité corticale peut n'être qu'un signe paroxystique lors de symptomatologies épileptique ou migraineuse. Elle peut être un signe transitoire lors d'accidents vasculaires ou lors de traumatismes crâniens, la récupération se faisant dans ces cas de manière progressive, par une série d'étapes plus ou moins bien systématisées : perception de la lumière, puis du mouvement, des formes, enfin de la couleur.

2.5.2. Les agnosies visuelles

L'agnosie des couleurs : elle est généralement définie comme un trouble de l'identification des couleurs qui ne relève ni d'une difficulté de la discrimination (dyschromatopsie), ni d'une

aphasie, ni d'une dégradation intellectuelle. Cette agnosie des couleurs se traduit cliniquement, par l'impossibilité de sélectionner toutes les couleurs appartenant à une même gamme (par exemple, regrouper toutes les nuances de « bleu »), de désigner les couleurs sur ordre, de nommer les couleurs en présentation visuelle, d'évoquer la couleur d'objets spécifiques (de quelle couleur est l'herbe ?). L'agnosie des couleurs est le plus souvent due à une atteinte occipitale gauche.

2.5.3. Les syndromes de dysconnexion ^{(34) (35)}

Ces syndromes s'associent le plus souvent à une hémianopsie droite et relèvent d'une atteinte de l'hémisphère gauche.

L'anomie des couleurs (à laquelle est parfois associée l'alexie pure) correspond à l'incapacité de nommer la couleur d'objets parfaitement reconnus et identifiés par le malade. Par contre, il peut donner, de mémoire, la couleur habituelle des objets et des choses et il réussit parfaitement les épreuves d'appariement et de classement des couleurs. Il s'agit donc bien d'une anomie, et non d'une agnosie.

Les photismes colorés : ce sont des hallucinations élémentaires mobiles ou fixes représentant des tâches, des cercles ou des triangles. Dans un petit nombre de cas, les photismes sont colorés. Le phénomène peut envahir la totalité du champ visuel ; les couleurs ne sont pas collées sur les objets comme les couleurs ordinaires. Ils seraient dus à des lésions du tractus visuel ou des lobes occipitaux, en particulier du cortex strié. Ils se produisent durant les crises d'épilepsie ou durant les migraines ophtalmiques.

Les hallucinoses colorées : une hallucination est la perception par un sujet éveillé d'un phénomène actuel, extérieur à lui, et qui n'existe pas en réalité. Si ce phénomène est reconnu par le sujet comme étant anormal, il s'agit d'une hallucinose. Autrement dit, le sujet n'adhère pas à sa perception.

Les hallucinoses visuelles peuvent prendre l'aspect de perceptions élémentaires ou complexes et peuvent avoir une apparence colorée.

Les hallucinoses colorées ne sont pas rares, surtout chez les personnes âgées mais sont souvent méconnues soit pour être mal interprétées par les praticiens, soit pour être cachées volontairement par les patients.

Classiquement, les hallucinoses colorées sont d'origine pédonculaire (le plus souvent d'étiologie vasculaire). Leur apparition mérite d'être considérée comme l'équivalent d'un accident vasculaire ischémique transitoire.

Les hallucinations colorées sont par contre exceptionnelles et ont pour origine des tumeurs cérébrales, ou plus souvent des intoxications (alcool, LSD, champignons).

Partie II : La couleur

Les objets ont-ils une couleur lorsque personne ne les regarde ? A cette question complexe, qui pose brutalement tous les problèmes de la couleur, les sociétés qui nous ont précédées ont apporté des réponses diverses selon qu'elles définissaient la couleur comme une substance (véritable enveloppe habillant les corps), comme une fraction de la lumière, ou bien comme une sensation : la sensation d'un élément éclairé par une lumière spécifique, reçue par l'œil et transmise au cerveau. Aujourd'hui, c'est généralement cette troisième définition qui est retenue par la science occidentale.

La couleur est un phénomène perceptif ; pour qu'il existe, il faut qu'il y ait trois éléments : non seulement une source lumineuse et un objet qu'elle éclaire, mais aussi un être vivant doté de ce récepteur complexe que constitue le couple œil-cerveau, c'est-à-dire un récepteur mettant en jeu la culture, la mémoire, l'imagination, la sensibilité. ⁽¹¹⁾

A. Comprendre la couleur ⁽¹³⁾

En effet, la couleur particulière d'un objet est essentiellement une sensation. Elle n'est ni une réalité physique, ni une chose matérielle. La couleur n'existe donc pas par elle-même : elle est un « effet » produit par la réunion de trois composantes :

- l'existence d'un objet, support de la couleur ;
- la disponibilité d'une lumière assurant un éclairage suffisant de l'objet ;
- la présence de l'œil pour capter le message transmis par l'objet et le communiquer au cerveau en vue d'une interprétation.

Ces trois éléments nécessaires pour que la couleur existe et soit perçue ne sont pas fixes mais varient en fonction de multiples facteurs, dont la nature de l'objet, le type d'éclairage, les défauts éventuels de la vision humaine, etc.

Cette triple dépendance de la couleur (objet, lumière, œil) est impérative. Il s'ensuit que nous nous trouvons en présence de deux classes de phénomènes bien distincts : les premiers, matériels, liés aux effets physiologiques des origines physiques de la lumière ; les autres résultant de l'action psychologique de ces effets, de leur influence sur notre esprit, notre comportement, nos sentiments.

Le problème de la couleur recouvre ainsi un vaste domaine de préoccupations dont nous aborderons ci-après, les aspects physique et psychologique ; l'aspect physiologique ayant été traité dans le chapitre précédent.

1. La couleur comme phénomène physique

1.1. Les ondes électromagnétiques

La lumière visible qui nous vient du soleil est dite blanche et est composée de l'ensemble des couleurs que nous pouvons percevoir (rouge, orange, jaune, vert, bleu, violet). En plus de ces couleurs visibles, il y a en plus deux autres « couleurs » en provenance du soleil que notre œil ne peut pas voir : avant le rouge, il y a l'infrarouge et après le violet, il y a l'ultraviolet. Ces rayons lumineux peuvent être représentés par une série d'ondes qui se suivent. Selon la longueur d'onde, c'est-à-dire la distance entre deux « vagues », le rayon sera rouge, bleu, vert... ou invisible si cette distance est trop grande ou trop petite pour être perceptible par l'œil.

La plupart de ces ondes électromagnétiques sont invisibles à l'œil. Seule une petite zone comprise entre 380 et 780 nm peut être captée par l'œil : c'est la lumière visible.

1.2. Composition spectrale de la lumière

L'importance de la lumière comme source de toutes les couleurs a été démontrée expérimentalement par le physicien Isaac Newton en 1676. Ce dernier fit passer un faisceau de lumière solaire sur un prisme de verre et observa que la lumière se décomposait en une bande multicolore reproduisant exactement la répartition de l'arc-en-ciel. Il essaya ensuite de décomposer, suivant le même principe, une partie de cette bande multicolore, sans succès. Chacune des couleurs de cette bande est donc indivisible et peut être considérée comme une couleur de base. ⁽¹⁵⁾

L'éventail des couleurs ainsi obtenues s'étend d'une manière continue, c'est-à-dire sans interruption, du rouge au violet en passant par l'orange, le jaune, le vert et le bleu. C'est ce que l'on appelle le spectre visible. Chaque couleur du spectre possède une longueur d'onde qui lui est propre :

- le rouge : 660-780 nm ;
- l'orange : 610-660 nm ;
- le jaune : 560-610 nm ;
- le vert : 510-560 nm ;
- le bleu : 440-510 nm ;
- le violet : 380-440 nm.

Un rayonnement est dit monochromatique s'il est caractérisé par une seule fréquence. Pratiquement, il n'existe pas de rayonnement monochromatique pur. Cette appellation trouve sa signification dans le fait qu'une bande étroite du spectre, dans le domaine visible, donne, dans les conditions normales de vision, l'impression d'une couleur bien définie.

1.3. Les sources de lumière

A part quelques rares exceptions, il n'est pas possible d'avoir une émission de lumière sans qu'il y ait source de lumière. La première et plus importante source est évidemment le soleil qui constitue la « lumière du jour ». Comme autres sources habituellement utilisées, on trouve les différentes sortes de lampes telles que les lampes à incandescence, halogènes... Parmi toutes les sources de lumière ainsi disponibles, il convient de faire les distinctions suivantes :

- source primaire : source qui émet elle-même sa lumière. Ex : soleil, lampe, feu...
- source secondaire : source qui se limite à renvoyer une partie de la lumière qu'elle reçoit. Ex : lune, ciel bleu, feuille de papier éclairée...
- source ponctuelle : source comparable à un point lumineux.
- source étendue : toute source qui n'est pas ponctuelle.

En mesurant l'énergie des différentes radiations émises par une source lumineuse, en fonction de leur longueur d'onde, on obtient le « spectre d'émission » de la source concernée.

1.4. Température de couleur

Elle sert à étalonner la lumière. Ainsi, dans le cas de la lumière blanche, par exemple, on constate qu'elle n'a pas la même couleur à midi (couleur normale) qu'au coucher du soleil (couleur rougeâtre). De même qu'en hiver, elle est plus jaune qu'en été. Ce type de lumière

change donc suivant la saison, l'heure, la latitude... Face à ces différentes variations, il était important de fixer un point de repère : c'est la température de couleur. Elle est exprimée en kelvins (K) et la valeur moyenne de la lumière du jour a été fixée à 5000 K.

(Exemples : lampe halogène = 3400 K, flamme de bougie = 1500 K). Plus la température de couleur est réduite, plus elle approche du rouge ; plus la température de couleur est élevée, plus elle approche du bleu.

Ceci explique pourquoi le même vêtement rouge semble différent à l'extérieur que sous une lampe fluorescente intérieure.

1.5. Interaction de la lumière et de la matière

Lorsque la lumière frappe la surface d'un objet, certaines couleurs peuvent se trouver absorbées ; dans ce cas, les seules couleurs que nous percevons sont celles que la surface réfléchit. Par exemple, un objet nous apparaît vert parce qu'il est capable de renvoyer les radiations vertes en absorbant les autres.

Si cette explication de la couleur d'un objet est correcte, on peut néanmoins difficilement s'en contenter. Il importe en effet de comprendre aussi comment la matière modifie la composition de la lumière qu'elle transmet ou qu'elle réfléchit.

Si la théorie ondulatoire interprète bien la propagation de l'énergie rayonnante et de la lumière en particulier, elle est insuffisante pour expliquer correctement l'interaction de la lumière et de la matière. Cette problématique a été au centre des préoccupations de la physique du XX^e siècle, et il n'est donc pas surprenant que l'explication de la couleur fasse appel à plusieurs théories fondamentales de la physique. Dans cette optique, le développement de la théorie corpusculaire du rayonnement par le physicien Planck en 1905 constitue un apport important à l'explication du phénomène en question.

Selon ce dernier, la lumière est constituée d'une multitude de particules, ou grains d'énergie, appelés photons. Les différents objets qui meublent notre environnement effectuent un tri parmi les photons lumineux qui les atteignent. Certains de ces photons seront absorbés par chacun de ces objets, les autres seront réfléchis vers l'œil de l'observateur. Ainsi, par exemple, la chlorophylle d'une feuille s'empare des photons des ondes lumineuses de la gamme des rouges et renvoie ceux des ondes lumineuses de la gamme des verts ; ces photons renvoyés donnent à la feuille sa couleur verte. Les propriétés de la lumière en tant que source

de couleur dépendent ainsi de son double comportement de phénomène ondulatoire et d'ensemble de particules matérielles (photons).

Dans cette optique, il s'avère que les causes premières de la couleur sont très diverses :

- transitions électroniques dans les atomes et dans les ions, transitions de vibrations dans les molécules (excitations électroniques, vibrations) ;
- couleurs dues au champ cristallin (composés ou impuretés de métaux de transition, centres colorés)
- transitions entre orbitales moléculaires (transferts de charges, liaisons conjuguées)
- transitions dans les matériaux ayant des bandes d'énergie (conducteurs métalliques, semi-conducteurs purs ou dopés)
- optique géométrique et physique (réfraction dispersive, diffusion, interférences, réseau de diffraction)

La plupart de ces mécanismes ainsi décrits ont pour cause une modification de l'état des électrons dans la matière, sous l'action de la lumière.

Les phénomènes les plus familiers sont principalement issus de la cinquième catégorie des causes de la couleur.

1.6. Couleur des objets

Un objet transparent est dit « incolore » quand il transmet de manière égale toutes les radiations visibles.

Un corps diffusant est dit parfaitement « blanc » lorsqu'il diffuse de manière égale dans toutes les directions et sans absorption, toutes les radiations visibles qu'il reçoit.

Un corps est parfaitement « noir » lorsqu'il absorbe intégralement toutes les radiations qu'il reçoit.

Les corps parfaitement « gris » ou « neutres » sont ceux qui diffusent ou qui transmettent également, mais partiellement, les diverses radiations visibles qu'ils reçoivent.

Enfin, tout corps qui n'est pas blanc, gris ou noir est dit « coloré ».

2. La couleur comme phénomène psychologique ⁽⁵⁾ (37)

Outre son aspect physique et physiologique, la couleur revêt également une dimension psychologique. Celle-ci intervient autant au niveau de la perception des couleurs par chaque individu, qu'au niveau du rôle psychique de la couleur sur ce dernier. Dans cette optique, il est bien reconnu que les couleurs peuvent jouer un rôle considérable dans la vie de chacun de nous. Elles nous entourent et agissent sur notre esprit, notre état d'âme et même notre santé. Le langage courant emprunte ainsi aux couleurs de nombreuses images : voir la vie en rose... ou en noir, rire jaune, voir rouge, broyer du noir, etc. Chacune de nos sensations (joie, plaisir, tristesse, déception, colère, etc.) a pour ainsi dire sa couleur.

Lorsqu'on aborde les effets psychologiques des couleurs, il importe de savoir que toutes les sociétés n'ont pas la même perception de ces effets sur les émotions. Ce que nous tenons pour une observation « objective » à propos d'une couleur n'est parfois que le reflet de notre appartenance à un groupe culturel qui attribue des propriétés à cette couleur depuis nombre de générations.

Les aspects symboliques sont définitivement culturels mais, souvent à notre insu, ils influencent notre perception et nos émotions face aux couleurs.

D'une manière générale et simplifiée, nous pouvons retenir ci-après les caractères marquants de chacune des couleurs :

- Le Rouge : Couleur de la force, de l'enthousiasme et de la joie de vivre, c'est une couleur chaude et saillante par excellence. Le rouge est excitant, aphrodisiaque et peut inciter à la violence. Il peut aussi signifier le danger et l'interdit. Difficile à manier, il convient pour aménager un cadre que l'on souhaite chaud et accueillant.
- L'Orange : Couleur chaude, intime et accueillante, l'orange est doté d'un pouvoir stimulant. Il associe la gaieté du jaune et l'action du rouge. Il évoque le feu, le soleil, la lumière, la chaleur, etc.
- Le Jaune : Couleur du soleil et de l'or, son caractère lumineux l'apparente à l'intelligence et à la sagesse. Couleur de la gaieté, de la jeunesse, le jaune crée une ambiance tonique qui revitalise et constitue un véritable remède contre la tristesse.
- Le Vert : Couleur de l'apaisement, il contribue à créer les conditions de détente et de repos. Couleur du printemps et de la jeunesse, le vert est associé à toute idée de

renouvellement. Au niveau santé, le vert semble aider à équilibrer certaines fonctions physiologiques, notamment, celles du cœur, des poumons et du système circulatoire. Selon certaines études, il favorise aussi une respiration lente et profonde.

- Le Bleu : Couleur reposante mais froide, il donne une impression de calme et de fraîcheur. Il évoque le ciel, la mer et l'espace. Il crée une ambiance propice à la détente et au développement de la vie spirituelle. Dans la thérapie par la couleur, on utilise le bleu pour activer la guérison, soulager la douleur et même abaisser la pression artérielle.
- Le Violet : Couleur de la rêverie, de l'utopie, du mysticisme. Comme le bleu, il exprime la spiritualité mais avec une nuance de mélancolie. Il peut être nocif à forte dose dans notre environnement.
- Le Blanc et le Noir : Couleur de la mort et du désespoir, le noir caractérise l'absence de couleur. A l'opposé, le blanc, synthèse des couleurs, symbolise la lumière, la pureté, la sagesse et la connaissance.

Psychologie de la perception des couleurs ou effet de la couleur des médicaments :

(De Craen et al. : Effects of colour of drugs : systematic review of perceived effect of drugs and of their effectiveness)

Des scientifiques néerlandais se sont penchés sur la question de l'effet de la couleur des médicaments. Sur douze de leurs études, six étudient l'action perçue des médicaments colorés ; et les six autres, l'influence de la couleur des médicaments sur leur efficacité.

Ils rappellent que la plupart des couleurs ont des significations universelles dans la majorité des cultures : le rouge est généralement considéré comme fort et actif ; le bleu et le vert, comme apaisants.

Les résultats de leurs études montrent que l'action perçue par des médicaments rouge, jaune ou orange est associée à un effet stimulant. Le rouge est particulièrement associé aux pathologies cardiovasculaires.

Le bleu et le vert sont associés à un effet tranquillisant.

Le blanc semble être associé à différents effets (analgésique, stimulant, antidépresseur...)

Ils semblent également montrer que la couleur a un impact sur l'efficacité des traitements : une étude montrent que les patients traités pour anxiété répondent mieux avec des médicaments verts, alors que les dépressifs répondent mieux à des médicaments jaunes.

Aussi, une expérience avec deux placebos différents : un bleu et un rose, montre que les sujets ayant pris le médicament bleu se sentaient moins alertes que les personnes ayant pris le rose.

D'autres études montrent cependant des effets inconstants.

D'après cette étude, on peut donc conclure que les couleurs des médicaments peuvent avoir un effet sur la perception des traitements, ainsi que sur leur efficacité.

B. Perception et mesure des couleurs

1. La perception des couleurs

La perception des couleurs concerne principalement les sensations colorées qui résultent des stimuli (messages) transmis par l'œil au cerveau (et à la conscience). Pour juger de l'apparence des couleurs, on ne considère donc pas, en général, leur origine physique, mais leurs effets visuels qui dépendent dans une mesure importante des conditions d'observation.

La réalité des couleurs désigne le pigment de la couleur (c'est-à-dire la matière colorante), tel qu'il est défini et analysé par la physique et la chimie. Elle reçoit son contenu et son sens humain par la perception de la couleur transmise par l'œil au cerveau. Mais l'œil et le cerveau ne parviennent à des perceptions claires que par comparaisons et contrastes. ⁽²⁸⁾

1.1. Influence du cadre environnant

L'apparence des couleurs est considérablement influencé par les caractéristiques du cadre environnant l'objet ou la scène observée. Ainsi, un paysage, par exemple, change constamment d'aspect en fonction de l'heure du jour (hauteur du soleil) et de l'état de l'atmosphère (phénomène de diffusion). De même, l'aspect d'un objet éclairé en lumière artificielle peut être très différent selon la nature de la source. Ainsi, un objet bleu éclairé avec une lumière orangée paraîtra noir, parce que l'orange ne contient aucun rayon bleu susceptible d'être réfléchi.

De manière générale, l'apparence des couleurs dépend :

- de la couleur de l'objet ;
- de la couleur de l'éclairage ;
- de la quantité de lumière ;
- de la couleur des objets environnants (effet de contraste).

Il arrive également que certaines couleurs aient des apparences identiques dans des conditions d'observation déterminées, tout en ayant des origines physiques différentes : ce sont les couleurs métamères.

1.2. Le rendu des couleurs

Les couleurs que nous percevons dépendent entre autres de la composition de la lumière. L'aptitude de la lumière à restituer les couleurs s'appelle le « rendu des couleurs ».

D'une manière plus précise, le rendu des couleurs est une expression générale qui désigne l'effet d'une source de lumière sur l'aspect coloré des objets qu'elle éclaire, cet aspect étant comparé consciemment ou non à celui des mêmes objets éclairés par une source de référence.

Pendant de nombreux siècles, on s'est accoutumés à voir les personnes et les objets avec un « aspect de jour » donné par les rayonnements conjoints du soleil et du ciel, et avec un « aspect de nuit » produit par le rayonnement de sources dont l'émission était limitée aux radiations des couleurs orangé et rouge.

Avec l'apparition des sources de lumières modernes, on assiste à des rendus de couleurs très différents. Ces lumières sont ainsi capables de conférer aux objets des « aspects » très variés. Pour évaluer ces effets, la Commission Internationale de l'Eclairage (CIE) a normalisé une méthode qui permet de qualifier une source de lumière par un « indice de rendu des couleurs » (IRC ou Ra). L'indice maximum (IRC = 100) correspond à une lumière blanche avec un spectre complet et continu de longueurs d'onde qui restitue donc toutes les nuances de couleurs.

1.3. Synthèse additive et soustractive des couleurs

Il existe deux méthodes fondamentales permettant la création de couleurs :

1.3.1. La synthèse additive ⁽¹³⁾(14)

Les couleurs créées par la lumière naturelle et perçues par nos yeux ou l'objectif d'un appareil sont dites additives. On parle de synthèse additive des couleurs parce que le mélange en quantités égales de trois lumières colorées, les primaires additives (rouge, bleu, vert), produit une lumière blanche.

A condition d'adopter des proportions variées, on peut, à partir de ces trois lumières, obtenir pratiquement toutes les couleurs.

Newton a découvert qu'un rayon de lumière blanche réfracté par un prisme de verre produisait un spectre de couleurs : rouge, orange, jaune, vert, bleu, indigo et violet.

En l'absence de toute lumière, il ne peut y avoir de couleur, sinon du noir qui n'est en réalité pas une couleur, mais effectivement l'absence de lumière.

Ce principe de synthèse additive est utilisé pour la reconstitution des images couleur en télévision ou sur un écran d'ordinateur.

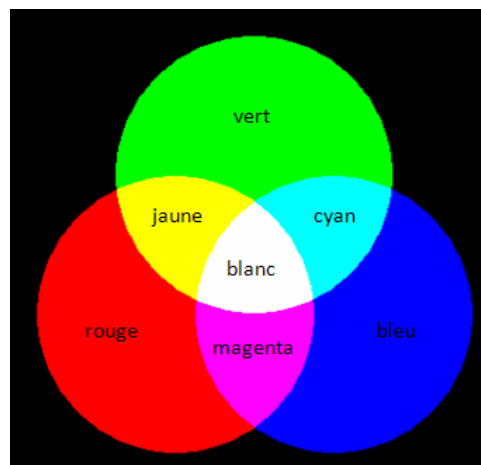


Figure 8 : La synthèse additive des couleurs

1.3.2. La synthèse soustractive

Cette méthode part de la lumière blanche, qui contient toutes les couleurs et, par suppression de certaines couleurs, permet d'obtenir la couleur désirée. Dans cette méthode, les couleurs de base sont en réalité des pigments, ou colorants, qui absorbent les ondes rouges, vertes ou bleues, en les soustrayant au mélange composant la lumière blanche.

Les couleurs de ces colorants sont respectivement le cyan, le magenta et le jaune, qui sont d'ailleurs les couleurs complémentaires des trois couleurs de base de la synthèse additive.

Lorsque les trois couleurs sont présentes à 100 %, leur mélange donne du noir. Ce qui signifie que toutes les couleurs de la lumière blanche sont absorbées. Ce principe de synthèse soustractive est utilisé par exemple dans l'imprimerie offset et dans l'impression sur imprimante.

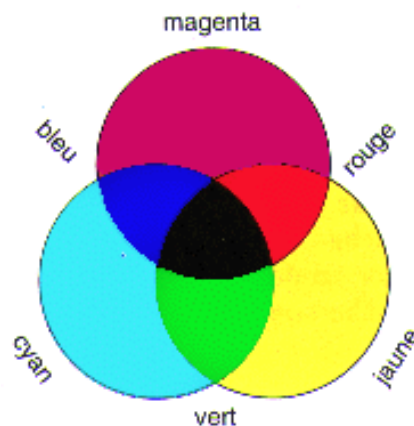


Figure 9 : La synthèse soustractive des couleurs

1.4. Couleurs primaires, secondaires et complémentaires

Les couleurs primaires sont celles qui ne peuvent pas être obtenues par le mélange d'autres couleurs. Elles sont au nombre de trois : le jaune, le bleu et le rouge.

Les couleurs secondaires sont obtenues à l'aide du mélange égal des couleurs primaires entre elles :

- vert = jaune + bleu
- violet = bleu + rouge
- orange = rouge + jaune

Les couleurs primaires et secondaires forment la base des couleurs vives, ou couleurs pures.

Le cercle chromatique de base est un cercle divisé en douze parties à partir des trois couleurs primaires (jaune, rouge et bleu) placées au sommet d'un triangle équilatéral inscrit au cercle. En complétant ce triangle par un hexagone, on obtient, aux sommets restants, les couleurs secondaires (orange, vert, violet).

Les six places restantes du cercle sont occupées par les couleurs tertiaires. Celles-ci sont obtenues par le mélange des couleurs voisines sur le cercle chromatique. Les couleurs suivantes sont ainsi obtenues :

- jaune + orange = jaune-orangé
- orange + rouge = rouge-orange
- rouge + violet = rouge-violet
- violet + bleu = bleu-violet
- bleu + vert = bleu-vert
- vert + jaune = jaune-vert

Nous obtenons de cette façon un cercle de douze couleurs équidistantes dans lequel chaque couleur occupe une place non interchangeable. Les couleurs se succèdent dans l'ordre des couleurs spectrales ou des couleurs de l'arc-en-ciel.

Les couleurs complémentaires sont celles qui sont diamétralement opposées sur le cercle chromatique. Le rouge est, par exemple, complémentaire du vert, de même que le violet est complémentaire du jaune. Chacune des trois couleurs primaires a pour couleur complémentaire le mélange des deux autres en quantités égales.

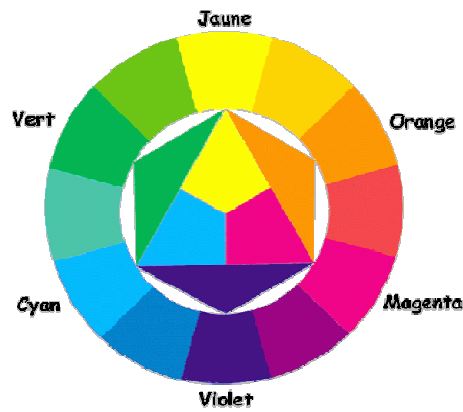


Figure 10 : le cercle chromatique

Il convient de faire la distinction entre la complémentarité additive, qui concerne le mélange de lumières colorées complémentaires et dont le résultat est la reconstitution de la lumière blanche, et la complémentarité soustractive, qui concerne le mélange de matières colorées complémentaires et dont le résultat est un gris neutre.

Le cercle chromatique présenté à la figure 10 concerne ainsi le mélange de matières colorées et les couleurs complémentaires qui y figurent sont donc soustractives.

1.5. L'harmonie des couleurs

L'harmonie est obtenue lorsque l'esprit est satisfait, ce qui se produit le plus souvent lorsqu'il existe une cohérence d'ensemble au niveau des éléments observés. Il est important à ce niveau de faire la distinction entre l'harmonie subjective et objective.

1.5.1. L'harmonie subjective

Elle concerne l'appréciation individuelle au sujet de la combinaison de deux ou plusieurs couleurs. Il s'agit dans ce cas de jugements du type : agréable-désagréable, sympathique-antipathique, beau-laid, etc.

1.5.2. L'harmonie objective

Elle s'appuie sur deux phénomènes physiologiques propres à l'adaptation visuelle de l'observateur :

- *le contraste successif* : ce phénomène peut s'illustrer par l'exemple suivant : après avoir contempler pendant quelques instants un carré vert par exemple, on voit apparaître par la suite, en fermant les yeux, un carré rouge qui disparaît rapidement. Cette image résiduaire (le rouge) est la couleur complémentaire du vert. Il s'agit d'un effet d'adaptation de l'œil qui s'est rééquilibré en fabriquant lui-même, dans le cas présent, le carré rouge. Ce phénomène est bien sûr valable pour toutes les couleurs.
- *le contraste simultané* : c'est le phénomène qui fait que notre œil, pour une couleur donnée, exige en même temps, c'est-à-dire simultanément, la couleur complémentaire et le produit lui-même si elle ne lui est pas donnée. La couleur complémentaire engendrée simultanément dans l'œil du spectateur est une impression colorée et n'existe pas réellement. ⁽²⁸⁾ Ce phénomène consiste à placer un carré gris-clair sur une surface colorée en jaune, rouge ou vert, par exemple. On constate que pour chaque couleur de la surface, le gris se teinte de la couleur complémentaire. Ainsi il apparaît rougeâtre sur le vert, verdâtre sur le rouge et violacé sur le jaune.

Ces deux phénomènes démontrent que l'œil a besoin d'équilibre, et qu'il y parvient en produisant la couleur complémentaire. On peut donc considérer que deux ou plusieurs couleurs sont harmonieuses lorsque leur mélange donne un gris neutre.

La meilleure manière d'arriver à l'harmonie colorée est d'utiliser toutes les possibilités du cercle chromatique. Ainsi, une première possibilité consiste à réaliser des accords colorés à 2, 3, 4 ou 6 couleurs :

- deux couleurs : choisir deux couleurs diamétralement opposées (ex : rouge-vert)
- trois couleurs : choisir trois couleurs formant un triangle équilatéral (ex : jaune-bleu-rouge)
- quatre couleurs : choisir quatre couleurs formant un carré (ex : jaune-rouge/orange-violet-bleu/vert)

- six couleurs : choisir six couleurs formant un hexagone (ex : jaune-orange-rouge-violet-bleu-vert).

Une seconde possibilité consiste à utiliser les contrastes de couleurs comme le contraste chaud-froid par exemple.

2. Mesure de la couleur

La couleur étant un des aspects importants de notre existence et des activités humaines en général, il est essentiel de pouvoir la mesurer et la classer.

La perception de la couleur repose sur une dualité : son origine physique et l'interprétation de sa perception sous la forme d'une sensation visuelle. La mesure de la couleur est donc de nature complexe et oblige à faire appel à deux systèmes de mesure différents : l'un fondé sur l'analyse physique de l'énergie rayonnante et l'autre sur l'évaluation visuelle de l'apparence des sensations colorées.

Dans le premier cas, il s'agit de la colorimétrie et, dans le deuxième cas, de la psychométrie, encore appelée « mesure psychométrique » ou « colorimétrie supérieure ».

Si la mesure colorimétrique est essentiellement quantitative, la mesure psychométrique est également qualitative. De même, si le premier système convient parfaitement au physicien et au scientifique en général, le second fait le bonheur de l'artiste ou du coloriste pour qui le qualitatif prime sur le quantitatif.

2.1. La colorimétrie

Dans son ouvrage sur l'optique physiologique, Yves Le Grand définit la colorimétrie comme une science dont le but est de fournir une spécification visuelle simple et précise de la couleur des sources lumineuses et/ou des « matériaux » transparents ou diffusants.

La colorimétrie ignore les sensations visuelles et fait appel à un « observateur de référence » qui peut être considéré comme un personnage fictif dont le rôle est de représenter la moyenne des sujets normaux dans des conditions déterminées. L'œil de cet « observateur de référence » ne sert que d'appareil « zéro » pour apprécier l'identité visuelle.

La colorimétrie est essentiellement objective et constitue un langage chromatique précis qui s'oppose à l'approximation très grossière des termes du langage courant.

Si la colorimétrie n'intéresse que médiocrement l'artiste, elle constitue pour les techniciens le seul moyen d'assurer un langage commun et sûr, entre eux.

La spécification d'une couleur en colorimétrie requiert trois valeurs numériques qui permettent de chiffrer et de fixer celle-ci sans ambiguïté. Il s'agit de :

- *La longueur d'onde dominante* (λ_d) : elle correspond à la longueur de la couleur pure dont la couleur se rapproche le plus. Elle correspond aux termes « teinte » du langage courant et « tonalité » du langage psychométrique.
Elle s'exprime en nanomètres.
- *La pureté d'excitation* (pe) : elle exprime la vivacité d'une teinte, c'est-à-dire comment la couleur considérée se rapproche plus ou moins de la couleur pure correspondante. Elle correspond aux termes « pureté » du langage courant et « saturation » en psychométrie.
Elle s'exprime en pourcentage. La radiation pure = 100, le neutre = 0.
- *Le facteur de luminance* (β) : il correspond à l'énergie globale réfléchiée par une surface colorée ou non. Il correspond aux termes « luminosité » (langage courant) et « clarté » (psychométrie). Il s'exprime en pourcentage et est comparé à un blanc de référence.

Exemple : pour le jaune ocre, on a les valeurs suivantes :

$\lambda_d = 578 \text{ nm}$, $pe = 71\%$ et $\beta = 44\%$.

2.2. La psychométrie

Comme nous l'avons déjà souligné au début de ce paragraphe, la mesure scientifique des couleurs via la colorimétrie ne peut satisfaire pleinement l'artiste ou le coloriste dont les préoccupations sont plus orientées vers les aspects qualitatifs et sensibles des couleurs, plus proches de la perception naturelle.

L'objectif de la psychométrie est ainsi d'étendre la mesure colorimétrique au domaine du sensible. Elle porte sur l'étude des sensations colorées et donc de la perception des couleurs.

Au point de vue psychologique, la couleur est décrite au moyen de ce qu'on appelle les trois attributs psychologiques de la sensation colorée ; ce sont :

- La *tonalité* (ou teinte) qui s'exprime par des termes spécifiques comme « bleu », « vert », « jaune », « rouge ». Elle correspond à la couleur, au sens courant d'un objet.
(⁸) La tonalité est une donnée sensorielle immédiate et ne requiert pas d'explication ;
- La *luminosité*, qui décrit une couleur comme sombre ou claire, quand il s'agit d'une source produisant la lumière. Pour les couleurs de surface, il faut parler de clarté ;
- La *saturation*, qui décrit le niveau de coloration depuis les couleurs ternes (proches du gris), pâles (proches du blanc), ou rabattues (proches du noir), jusque aux couleurs vives et pures.

Il existe une relation entre les paramètres physiques qui décrivent le stimulus de couleur et chacun des attributs sensoriels. Les variations physiques entraînent des variations corrélatives des attributs sensoriels ; par exemple, la variation de longueur d'onde fait varier la tonalité perçue, et cette relation dite psychophysique permet une spécification rigoureuse de la couleur, objet de la colorimétrie. (³⁴)

Relation psychophysique		
PHYSIQUE	COLORIMETRIE	PSYCHOLOGIE
Longueur d'onde	Longueur d'onde dominante	Tonalité
Intensité énergétique	Luminance lumineuse	Luminosité (clarté)
Répartition spectrale	Pureté	Saturation

Tableau 3 : Relation psychophysique

Remarques :

- D'une manière générale, l'aspect coloré d'une lumière ou d'une surface est le résultat de sa tonalité et de sa saturation. On groupe donc souvent ces deux caractéristiques en une seule propriété d'apparence, appelée la *chromacité*.
- On exprime souvent des ordres de grandeur de la clarté et de la saturation à l'aide d'un seul objectif. Ce qui nous donne, par exemple :
 - claire + saturée = vive
 - claire + lavée = pâle
 - foncée + saturée = profonde
 - foncée + lavée = rabattue

3. Les nuanciers de couleurs ⁽¹³⁾ (50)

En se contentant des noms communs pour désigner une couleur, on ne peut pas être très précis: le langage reste trop pauvre et trop imprécis face à la multitude de couleurs de notre monde.

Pour résoudre ce problème, on utilise donc des nuanciers. Ce sont des catalogues définissant visuellement un ensemble limité de couleurs. Chacune est reproduite sur un support papier, accompagnée d'un code, un "identifiant" unique.

Armé de ce nuancier, il est alors possible de trouver visuellement la couleur désirée, puis de s'y référer en utilisant son code, et enfin, en communiquant ce code à un tiers, d'en obtenir une reproduction fidèle.

3.1. Le système Pantone®

Le système américain Pantone de sélection des couleurs est largement utilisé dans l'imprimerie, l'industrie textile et plastique et dans les arts graphiques.

De nombreux produits Pantone sont disponibles sur le marché, parmi lesquels le fameux "PMS" (Pantone Matching System), un nuancier qui se présente sous forme de feuillets regroupés en éventail. Chaque feuillet définit une demi-douzaine de couleurs en présentant l'échantillon et le nom Pantone.

Le principal avantage du nuancier Pantone réside dans le fait que les couleurs sont préfabriquées et standardisées, ce qui évite les surprises causées par une mauvaise dénomination des couleurs souhaitées.

Chaque couleur est identifiée de manière unique par un nom du type "P" + numéro. Certaines portent en plus un nom anglais "en clair" (warm gray, rubine red, process cyan, reflex blue...).

Les couleurs de ce nuancier sont en fait créées à partir de 11 couleurs fondamentales:

Black
Transparent white
Yellow
Warm red
Rubine red
Rhodamine red
Purple
Violet
Reflex blue
Process blue
Green

Ainsi, le P493 (sorte de vieux rose) est composé de 20.3% de "Warm red", de 4.7% de "Process blue" et de 75% de "Transparent white". Les numéros ne répondent pas à une logique particulière.

En résumé :

Nom	Pantone Matching System (PMS) pour papier couché (Coated), non couché (Uncoated), ou mat couché (Matte coated)
Type	Nuancier "éventail" ou livre à nombre d'échantillons fixe
Dimension	1114 couleurs (Pantone formula guides)
Domaine(s)	Industrie, peinture
Codage	"P" + numéro + éventuellement une lettre (U,C,M)
Exemple	P413C (blanc pour papier couché), P137 (orange)
Autres systèmes	Pantone Process Color System, Pantone Hexachrome Color System

3.2. Le système RAL

Un des concurrents de Pantone est le système RAL, créé en Allemagne en 1927. Il est utilisé en Europe, notamment dans le secteur industriel. Il se présente sous forme d'un ensemble de cartes, une par couleur, avec l'échantillon de la couleur et le code RAL associé (RAL classic). Un système plus récent reprend la présentation de Pantone, sous forme d'éventail: le système RAL design.

RAL Classic :

Composé d'environ 200 couleurs, un code unique sur 4 chiffres est attribué à chaque couleur. Le premier chiffre désigne la teinte, le deuxième chiffre est toujours zéro et les deux derniers forment un numéro arbitraire. Ce système RAL n'est donc classé que par la teinte principale donnée par le premier chiffre, comme suit:

Plage	Catégorie
RAL 1001 à 1099	jaunes
RAL 2001 à 2099	oranges
RAL 3001 à 3099	rouges

RAL 4001 à 4099	roses / violets
RAL 5001 à 5099	bleus
RAL 6001 à 6099	verts
RAL 7001 à 7099	gris
RAL 8001 à 8099	bruns
RAL 9001 à 9099	blancs & noirs

RAL Design :

Il a été mis en place notamment pour organiser les couleurs par teintes plus précises. Il définit plus de 1600 couleurs, en leur attribuant un code sur 7 chiffres. Les 3 premiers désignent la teinte (001 à 360), les deux suivants la luminosité, et les deux derniers la saturation. L'utilisation d'un tel système simplifie la recherche de nuances, dans la mesure où l'on peut, en lisant un code, se faire une idée de la couleur (telle teinte, plutôt saturée ou non, plutôt sombre ou lumineuse).

En résumé :

Nom	RAL Classic	RAL Design System
Type	Nuancier "éventail" à nombre d'échantillons fixe	Livre ou éventail à nombre d'échantillons fixe (RAL 840-HR en mat, RAL 841-GL en brillant)
Dimension	200 couleurs	1600 couleurs
Domaine(s)	Industrie, peinture	
Codage	"RAL" + 4 chiffres	"RAL" + 7 chiffres
Exemples	RAL 9010 (blanc)	RAL 2106030

3.3. Le système Munsell ⁽³¹⁾

Ce système, surtout utilisé aux États-Unis, a été inventé par Albert Munsell en 1909. Les couleurs y sont classées selon leur teinte, leur valeur et leur chroma, dans un solide du type

"toupie". Le "Munsell Book of Color" définit plus de 1500 couleurs au travers de 40 pages (teintes). Une couleur est codée ainsi:

- La teinte ou *Hue* est la qualité de la couleur, qui distingue : le rouge, le jaune, le bleu... Dans le système de notation de la couleur selon Munsell, les teintes sont arrangées sur la circonférence d'un cercle.
Munsell définit 5 teintes de base, et 5 teintes secondaires: R (rouge), Y (jaune), G (vert), B (bleu-cyan), P (violet) et YR (orange), GY (vert-jaune), BG (cyan foncé), PB (bleu violacé), RP (magenta foncé, pourpre).
- La valeur ou *value* est un nombre entre 0 (noir) et 10 (blanc) décrivant le degré de luminosité de la couleur.
- La saturation ou *chroma* commence à 0 (gris) et n'a pas de limite. Elle indique la pureté ou l'intensité de la couleur. Les couleurs "normales" ont une chroma pouvant aller jusqu'à 20, mais le système Munsell peut attribuer une chroma de 30 pour des couleurs « fluorescentes ».

Ainsi, une couleur se voit attribuer un code du type "T V/C".

Par exemple, un rouge corail aura comme notation Munsell "10R 6/14", "10R" désignant la teinte rouge orangée, "6" la valeur (lumineuse à 60%) et "14" la chroma (vif).

Avec le système de notation de la couleur de Munsell, toute couleur peut être identifiée facilement et précisément. C'est pourquoi ce système est accepté universellement ;

En résumé :

Nom	Munsell
Type	Livre "Munsell Book of Color" de 40 nuanciers.
Dimension	1500 couleurs
Domaine(s)	Peinture, géologie, biologie
Codage	"T V/C"

3.4. Le système ISCC-NBS

Pour simplifier la description d'une couleur, l'ISCC-NBS a standardisé le nom de 267 couleurs du nuancier de Munsell. Chaque nom a donc une correspondance exacte avec une couleur bien déterminée du système de Munsell.

Pour ce faire, les 10 termes de base suivants ont été retenus: pink, red, orange, brown, yellow, olive, green, blue, violet, purple. Puis 28 noms ont été créés à partir de ces termes, par combinaison en paire: reddish orange (orange tirant sur le rouge), bluish green (vert tirant sur le bleu), etc..., auxquels il faut ajouter les 3 noms "white", "gray" et "black" (respectivement blanc, gris et noir). Enfin, une liste de 8 adjectifs (plus le superlatif "very"), sont choisis pour traduire les nuances d'une teinte donnée.

La combinaison d'une des ces teintes et d'un de ces adjectifs a permis de constituer les 267 noms de couleurs. On combine donc un adjectif, éventuellement précédé de "very", plus un des 31 noms (28+3). Peut également apparaître le terme "grayish" ou "blackish".

Ces 267 noms sont appelés "centroïdes" car, s'ils désignent une couleur Munsell bien définie, on peut visuellement associer les nuances voisines au même terme.

En résumé :

Nom	Système ISCC-NBS
Type	Nomenclature de couleurs Munsell
Dimension	267 couleurs
Codage	Noms anglais et notation abrégée
Exemples	p.Y (Pale Yellow), d.gy.rB (Dark Grayish Reddish Brown), m.gr.B (Moderate Greenish Blue)

3.5. Le système NCS

Le système NCS - Natural Color System®© a été créé en Suède en 1920 par le Centre Suédois de la Recherche sur la Couleur. C'est un standard national en Suède, en Norvège, en Espagne et en Afrique du Sud, et il possède des antennes nationales implantées dans 21 pays.

On utilise ce standard dans de nombreuses branches de l'industrie: textile, cuir, peinture, plastique, arts graphiques, cosmétiques, agro-alimentaire, céramique, verre...

Ce système s'appuie sur le fait que l'homme discernerait 6 couleurs fondamentales: le rouge, le jaune, le vert et le bleu, le blanc et le noir. Toutes les autres couleurs résultent du mélange de 2, 3 ou 4 des couleurs fondamentales. Un nuancier nommé "NCS Atlas" référence 1950 couleurs, placées dans une "toupie". Le rouge, le jaune, le vert, le bleu sont placés sur le diamètre, le blanc et le noir aux pointes.

Cette toupie est alors présentée "en tranches" triangulaires, chacune d'entre elles présentant les variations d'une même teinte (produits "NCS Atlas").

Dans ce système, une couleur est codée comme suit:

- La tonalité (teinte) est un code représentant un pourcentage de mélange entre 2 couleurs fondamentales parmi R (rouge), Y (jaune), G (vert) et B (bleu): B80G désigne un mélange de B (20%) et de G (80%). Le nombre représente la proportion de la deuxième couleur fondamentale. Seules les combinaisons suivantes sont autorisées: YxxR, GxxY, BxxG, RxxB.
- La teneur en noir (de 0 à 100 par pas de 10): plus la valeur est élevée, plus la couleur est sombre.
- La teneur chromatique (qui doit être similaire à ce qu'on appelle ailleurs la saturation) entre 0 et 100: plus la valeur est élevée, plus la couleur est forte.

Les produits NCS se présentent classiquement sous forme d'éventails, livres (triangles du solide NCS), échantillons.

Contrairement à beaucoup de ses concurrents, et bien que initialement limité à un nuancier standard de 1950 entrées, le système NCS®© permet, grâce à sa notation numérique, de caractériser toute couleur visible par une référence précise.

En résumé :

Nom	NCS - Natural Color System ®©)
Type	Tonalité / degré de noir / teneur chromatique
Dimension	.1950 références standards dans le nuancier NCS Atlas, .environ 4 millions de couleurs représentables en notation "libre"
Codage	("S ") + % noir + % chroma + "-" + L1 + % teinte + L2 L1 et L2 désignant l'une des 4 couleurs (Y, R, G, B)
Exemple	S 1070-Y10R (jaune chaud) S 4550-R80B (bleu outremer)

3.6. Le système Ostwald

Ce système, datant de 1914, classe les couleurs selon leur teinte, leur degré de blancheur ou noirceur (luminosité) et leur pureté (saturation, chroma). A partir de 24 teintes, le nuancier définit 680 couleurs.

Ce système part du principe qu'une couleur s'obtient à partir d'une couleur dite "pleine" et d'une certaine quantité de blanc et de noir. Une couleur est donc définie comme suit:

- La teinte est un nombre entre 1 et 24. Elle s'appuie sur 4 teintes de base: gelb (jaune, 2), rot (rouge, 8), u-blau (bleu outremer, 14) et seegrün (vert marin, 20). Quatre couleurs intermédiaires sont ajoutées: kress (rouge-orange, 5), veil (violet, 11), eisblau (bleu glacier, 17) et laubgrün (vert feuille, 23). Enfin, ces 8 couleurs donnent chacune 3 variantes, pour un total de 24 teintes. Une autre notation numérote ces 24 teintes entre 0 et 99, pour permettre la définition de teintes intermédiaires: le jaune (gelb) porte alors le numéro 4, le rouge-orange, le numéro 17... le vert feuille, 92. Une échelle de 8 niveaux de gris neutres est ajoutée à ces 24 teintes.
- La quantité de blanc et de noir, qui est une "dilution" de la couleur, est notée sous forme d'une paire de lettres, la première représentant le pourcentage de blanc, la

seconde, le pourcentage de noir. Sont définies à la base 8 valeurs possible notées a, c, e, g, i, l, n et p.

En résumé :

Nom	Ostwald Color System
Type	Livre "Die Farbenfibel" (The Color Primer).
Dimension	680 couleurs de base
Codage	"TWB" (teinte, quantité de blanc, quantité de noir)
Exemples	25ng

C. Fabriquer les couleurs

1. Les pigments ⁽⁵³⁾

1.1. Définition

Les pigments sont des molécules particulières capables d'absorber une partie du spectre de la lumière mais aussi de réémettre une partie du spectre qui correspondra à la couleur perçue par notre œil.

Les pigments sont d'origine géologique, organique (végétale et animale) et actuellement synthétique.

Les premiers pigments utilisés ont été des pigments d'origine minéralogique. Ces pigments sont un mélange d'oxyde et d'argile (ocres). Le métal oxydé est variable : fer, manganèse, cuivre.

Ils peuvent aussi être des sulfures de mercure, de zinc de cadmium ou de plomb noir (galène), de carbonates de calcium (calcite, aragonite).

Les pigments organiques sont essentiellement des molécules aromatiques possédant des groupements chromophores. Ces groupements d'atomes sont capables d'être excités et de transférer leur énergie au métal qui se trouve au centre du groupement chromophore. Ces métaux de transition possèdent deux ou plusieurs degrés d'oxydation différents.

Ils offrent une gamme de couleurs qui sera la conséquence du degré d'oxydation du métal et de la nature du liant qui sera utilisé lors de la fabrication de la couleur.

1.2. Quelques pigments issus des terres

Les premiers hominidés ont laissé leur empreinte sur les parois de nombreuses grottes de France ou d'Espagne. Les plus connues comme la grotte de Lascaux ou la grotte de Chauvet, montrent que les hommes possédaient déjà une très grande technique de l'utilisation des ressources naturelles que la nature avait mises à leur disposition.

Les pigments étaient issus des terres colorées, de l'ocre et de la bauxite. Les sables ocreux sont les plus connus. Ils ont fait la richesse de la région de Roussillon dans le Vaucluse (le plus grand gisement en France encore exploité actuellement). Ces sables issus de dépôts marins, sont composés de sables de quartz d'argile, la kaolinite et d'oxyde de fer.

On distingue plusieurs ocres : les ocres jaunes (la goethite), les ocres rouges (l'hématite). Entre ces deux teintes, il existe une multitude de teintes qui peuvent aller du jaune à l'orangé et au rouge.

Par différents procédés de chauffage, il est possible de transformer la goethite en hématite. Il y a 40 000 ans, au paléolithique moyen, la technique de chauffage de l'ocre était connue.

Il existe des terres tels que les terres de Sienne et d'ombre (Nord de l'Italie), qui sont des sables ocreux, où de faibles quantités d'oxydes de manganèse mêlés à la goethite vont donner des pigments bruns.

Certaines terres noires sont caractérisées par une dominance de l'oxyde de manganèse. Elles sont très présentes dans les vallées de la Dordogne et du Lot.

Ces pigments ocreux sont bien connus et sont à la base des grands fonds monochromes. Ils sont issus de l'extraction de la partie argileuse oxydée de la partie sableuse.

D'autres terres comme les terres vertes sont très abondantes, ce sont des protoxydes de fer. Ces terres vertes (glauconies, céladonite ou chlorite) se sont formées au sein des sédiments des mers froides. Les gisements renommés sont ceux de Chypre et de Monte Balo, près de Verone.

1.3. Quelques pigments issus des minéraux

Le cinabre, le lapis-lazuli, la malachite, l'azurite, la pyrite, l'antimoine, l'orpiment, sont des minéraux peu abondants considérés comme des pierres semi-précieuses. Ils sont utilisés après broyage et associés avec des liants adéquats.

Le lapis-lazuli (lapis = pierre en latin ; lavégard = bleu en persan) fut le premier minéral à être utilisé pour produire un bleu profond. La pierre était broyée et lavée. Son utilisation s'est complexifiée à partir du XII^e siècle. Les gisements de lapis-lazuli sont essentiellement en Afghanistan.

Le vert de malachite et l'azurite sont deux pierres semi-précieuses. On peut trouver sur un même fragment de roche les deux minéraux. Le vert de malachite fixe la lumière mais est instable dans le mélange. L'azurite est connue depuis l'Antiquité sous le nom de pierre d'Arménie, correspondant à un bleu qui, suivant la finesse du broyage, est plus ou moins intense.

L'orpiment, sulfure d'arsenic, était très utilisé par les Egyptiens. Sa couleur jaune d'or complète les différents pigments ocreux connus.

Le cinabre est une pierre semi-précieuse. On en trouve encore dans les carrières d'Italie ou dans les mines d'Almaden en Espagne. Cette pierre broyée donnera le rouge vermillon. Cette pierre a toujours été chère et ne fut utilisée que dans les demeures de grande classe.

D'autres minéraux sont utilisés comme l'antimoine ou les acétates de cuivre qui font les vert-gris des enluminures. Des roches telles que l'ardoise, la calcite, le gypse interviennent dans la préparation des pigments.

1.4. Quelques pigments végétaux

On divise les couleurs obtenues par les plantes en deux :

- la série xanthique comprenant l'orange et le jaune ;
- la série cyanique comprenant le violet et le bleu.

Entre les deux séries se trouve le vert servant d'intermédiaire à l'orange et au violet. ⁽²⁾

Le bleu pastel est issu d'une plante, l'Isatis tinctoria. La région de Toulouse était très célèbre pour cette production. Le cycle de la fabrication du Pastel est très long (environ deux ans) et sa préparation complexe.

Le Pastel fut détrôné par un autre pigment, l'indigo, tiré de l'indigotier (*Indigofera tinctoria*). Cette plante provient de l'Inde. Son coût peu important provoqua la mort de l'industrie du Pastel en 1562.

L'indigo n'existe pas préformé dans les Indigofera, il se produit au cours de sa préparation un phénomène d'oxydation dû à la transformation de l'indican en indigotine. ⁽²⁾

La garance est issue d'une plante herbacée (*Rubra tinctorium*) des régions chaudes et tempérées. Le colorant rouge vif issu de cette plante provient de la racine. Cette racine est séchée, écrasée et blutée, on dit que la garance est robée. C'est sous cette forme : la *garacine* que ce colorant fut vendu.

Le jaune du genêt, de la sarrette, va enrichir la palette des pigments.

Le tournesol correspond au deuxième grand bleu végétal. On extrait ce colorant des graines. Ce colorant est connu en chimie comme indicateur coloré.

Le noir de vigne ou le noir de fumée : le noir de cep de vigne carbonisé est surtout apprécié en raison des gris-bleu très froids qu'il permet d'obtenir ; il n'est cependant pas considéré comme un bon pigment pour la peinture.

1.5. Quelques pigments d'origine animale

Le kermès est un insecte, qui donne un rouge écarlate, réside sur les chênes kermès (*Quercus coccifera*) et sur les chênes lièges (*Quercus ilex*). Ce parasite des chênes forme au niveau des rameaux des gales. Ces gales sont broyées et la poudre obtenue est soluble dans l'eau. On obtient un rouge vermillon en le mélangeant avec du vinaigre et du citron.

La cochenille du Nopal est un insecte qui se développe sur les figuiers de Barbarie. Ce sont les femelles qui sont à l'origine du rouge carmin.

L'encre de seiche sert pour les couleurs sépia.

Le pourpre est issu d'un liquide jaune fermenté provenant d'une glande extraite d'un mollusque : le Murex. C'est un colorant noble dont l'invention est attribuée aux Hébreux.

1.6. Les pigments synthétiques

Le premier pigment synthétique fut mis au point par les Egyptiens. Ce pigment fut obtenu par la cuisson d'un mélange de silice, de produits calcaires, de cuivre et d'un fondant, à l'époque le natron (sesquicarbonate de sodium naturel). On obtient un silicate double de sodium et de cuivre.

Les pigments synthétiques prennent leur essor en 1856 avec la découverte par un jeune chimiste, William Henry Perkins, de la mauvéine, un dérivé de l'aniline. Ce colorant fut mis à la mode grâce à la Reine Eugénie qui trouvait que le mauve s'accordait bien avec ses yeux. Cela devint la couleur favorite de l'époque Napoléon III.

Les chimistes allemands découvrirent l'alizarine qui concurrença la garance. L'indigo fut synthétisé, supplanta l'indigo naturel et ruina la filière.

Certains colorants possèdent des propriétés bactéricides, qui furent découvertes un peu par hasard et qui sont à l'origine de la découverte des sulfamides des médicaments, utilisés notamment pour la lutte contre les infections.

2. Les colorants

2.1. Définitions et historique

Les colorants alimentaires sont des additifs.

Les additifs, d'après la définition de l'OMS, « sont des substances ajoutées intentionnellement, généralement en petites quantités, pour modifier leur goût, leur apparence, leur consistance ou pour prolonger leur période de conservation ».

La réglementation française les définit comme « toute substance chimique (soit non nutritive, soit fabriquée par synthèse, soit isolée par extraction) dont l'apport ne peut et de ne doit être qu'exceptionnel sous l'emprise de nécessité et sous réserve d'une autorisation administrative, prise sur avis des assemblées d'hygiène et de médecine dans les conditions fixées par la dite autorisation ».

Parmi les colorants, on oppose les colorants naturels et les colorants synthétiques appartenant à des familles chimiques.

Jusqu'en 1850, les colorants alimentaires ont été d'origine naturelle. Pour la plupart organiques, ils provenaient :

- de végétaux comestibles (carotte, betterave, peau de raisin noir...);
- d'extraits d'origine animale ou végétale non habituellement consommés (rouge cochenille provenant d'un insecte d'Amérique du Nord, *Coccus cacti*; stigmate de crocus ou safran...);
- du résultat de la transformation de substances naturelles (caramel...).

Ensuite, à partir de 1856, sont apparus les colorants synthétiques. Ils sont créés industriellement par l'homme et soit ils sont des copies conformes des colorants naturels, soit ils n'existent pas dans la nature. Ils ont pris une place de plus en plus importante et ont fini par supplanter les colorants naturels (dont la plupart sont encore utilisés aujourd'hui).

Ces derniers sont sensibles à la lumière, à l'oxygène ou à l'action des bactéries : c'est-à-dire qu'ils ne sont pas stables.

Ainsi, les colorants de synthèse, plus stables, ont une durée de vie plus longue et une coloration plus forte, ce qui permet de réduire leur utilisation à de petites quantités.

Un autre avantage : ils sont moins coûteux et peuvent être fabriqués en grande quantité.

Les colorants pharmaceutiques destinés à colorer les médicaments sont des colorants alimentaires. Ils sont classés en trois groupes :

- les matières colorantes minérales : le carbonate de calcium, l'oxyde de fer... ;
- les matières colorantes végétales ;
- les matières colorantes organiques de synthèse. ⁽⁴⁾

La Pharmacopée Française ⁽¹²⁾ (IV.2. Colorants autorisés pour les médicaments) a défini une liste des colorants alimentaires autorisés à être incorporés dans les médicaments :

Dénomination CEE	Dénomination commune
E 100	Curcumine
E 101	Vitamine B12 phosphate
E 102	Tartrazine
E 103	Chrysoïne S
E 104	Jaune de quinoléine
E 110	Jaune orangé S
E 120	Cochenille
E 122	Azorubine
E 123	Amarante
E 124	Coccine
E 127	Erythrosine
E 129	Curry red
E 131	Bleu patenté V
E 132	Carmin d'indigo
E 133	Bleu brillant
E 140	Chlorophylle
E 141	Chlorophylline cuivrique hydrosoluble
E 142	Vert lissamine
E 150 A	Caramel
E 151	Noir brillant bn
E 152	C-schartz 7
E 153	Charbon végétal
E 160	Caroténoïde
E 160 A	Bétacarotène
E 160 B	Annato
E 160 C	Capsanteïne
E 160 D	Lycopène
E 160 E	Apocaroténal
E 160 F	Ethyle apocaroténoate
E 161	Xanthophylles
E 161 A	Flavoxanthine
E 161 B	Xantofyl
E 161 C	Kryptoxanthine
E 161 D	Rubixanthine
E 161 E	Violaxanthine
E 161 F	Rhodoxanthine
E 161 G	Canthaxanthine
E 162	Bétanine
E 163	Anthocyane
E 170	Calcium carbonate
E 171	Titane dioxyde
E 172	Fer brun oxyde
E 173	Aluminium
E 174	Argent
E 175	Or
E 180	Pigment rubis
E 181	Terre d'ombre brûlée
E 516	Calcium sulfate

Tableau 4 : Liste des colorants destinés à la coloration des médicaments ⁽³⁹⁾

Légende :

	Colorants naturels
	Colorants minéraux
	Colorants de synthèse

Les colorants énumérés ci-dessus peuvent être utilisés sous forme d'acides, ainsi que combinés avec le sodium, le calcium, le potassium, et l'aluminium.

Les Directives 94/36/CEE (régissant les colorants entrant dans la composition des produits alimentaires) et 95/45/CEE (critères de puretés spécifiques pour les colorants) sont applicables aux colorants utilisés dans les médicaments par le biais de la Directive 78/25/CEE du 12/12/1977 sur les colorants pouvant être utilisés dans les médicaments.⁽¹²⁾

Dans les pays de l'Union Européenne, les additifs sont désignés par la lettre E (Europe), suivi d'un numéro d'identification à trois chiffres :

- le premier correspond à la catégorie ;
- le deuxième au groupe ;
- le troisième à l'additif dans son groupe.

- ✓ E 10 : jaune
- ✓ E 11 : orange
- ✓ E 12 : rouge
- ✓ E 13 : bleu
- ✓ E 14 : vert
- ✓ E 15 : brun-noir.⁽⁴⁵⁾

NB : En France, par arrêté du 28 août 1976, l'Académie des Sciences et le Conseil Supérieur d'Hygiène Publique ont recommandé de ne plus utiliser la tartrazine (E 102) dans l'alimentation humaine. Il en est de même dans le domaine pharmaceutique où l'on conseille de supprimer ce colorant dans les très nombreuses spécialités où il est incorporé.⁽⁴⁾

2.2. Lien entre la structure moléculaire et la couleur

C'est le chimiste allemand Witt qui a introduit la théorie du pouvoir colorant. En faisant réagir des composés colorés avec de l'hydrogène, on constate une décoloration du composé.

Witt en a déduit que toute molécule colorée renferme des groupes d'atomes insaturés (l'hydrogénation n'ayant lieu que dans les zones présentant des liaisons multiples). Ces groupes d'atomes responsables de la couleur des colorants sont appelés groupes *chromophores*. Les doubles liaisons doivent être nombreuses pour que le corps soit coloré.

On peut classer les colorants en fonction de la nature de leur groupe chromophore, on distingue ainsi plusieurs familles de colorants :

- les nitrosés ;
- les nitrés, de couleur jaune ou orange ;
- les stilbéniques, jaunes ou orangés ;
- les azoïques, qui constituent la plus importante famille des colorants de synthèse. Ils forment une gamme étendue de nuances (jaune, bleu, vert et noir)
- les quinoléines, de couleur jaune ;
- les indophénoliques ;
- les thiaziniques, qui vont du jaune au rouge ;
- etc...

Influence du milieu : on constate que la température ne fait pas varier la couleur alors que, en faisant varier le pH, le colorant prend de nombreuses colorations différentes. Ces différences de couleur s'expliquent par une modification de la structure moléculaire des colorants lorsque le pH change.

Exemple : pour un pH acide, l'anthocyane, ou colorant du chou rouge, est rouge. Pour un pH neutre, il est bleu et pour un pH neutre, il est jaune.

Cette propriété des colorants de changer de couleur selon le pH est utilisée pour étudier le pH d'une solution : on les emploie en tant qu'indicateurs colorés.

On peut aussi obtenir de nouvelles couleurs en mélangeant les colorants. Par exemple, on peut montrer par chromatographie qu'un colorant artificiel pâtisseries vert est en fait formé de tartrazine de couleur jaune et de bleu patenté V.

2.3. Les colorants des médicaments ⁽²⁰⁾

Pour qu'un médicament soit bien accepté par le malade, il doit présenter un aspect attrayant en même temps qu'une saveur et odeur agréable s'il est destiné à la voie orale. Aussi, depuis longtemps colore-t-on les médicaments.

2.3.1. Intérêt de la coloration

L'utilisation de colorants dans les médicaments permet une sécurité de fabrication en évitant les confusions lors des manipulations des produits.

Aussi, lors de la fabrication de comprimés à double noyau, la coloration différentielle des couches internes et externes permet de vérifier la présence et le centrage du noyau.

Au niveau de la sécurité d'emploi, l'identification visuelle est un important facteur de sécurité : la coloration permet d'éviter l'erreur d'administration par confusion entre plusieurs médicaments prescrits. L'identification visuelle est particulièrement importante car les médicaments sont destinés à des personnes malades recevant souvent des polyprescriptions. La coloration, mieux que la gravure ou l'impression (surtout pour les personnes âgées) est un élément essentiel du suivi du médicament déconditionné.

De même, la coloration permet l'identification d'un médicament responsable d'une intoxication aiguë. Ce n'est évidemment pas dans ce but que les médicaments sont colorés mais la coloration peut être mise à profit pour identifier le toxique ingéré, donc pour mettre en place un traitement spécifique adapté. Nous reviendrons sur ce sujet dans la troisième partie de cette thèse.

La coloration permet également de montrer dans certains cas une altération du médicament due à de mauvaises conditions de conservation.

Comme nous l'avons vu dans le chapitre sur le phénomène psychologique de la couleur, la couleur peut renforcer psychologiquement l'effet du médicament, ou en augmenter l'attrait et faciliter son administration.

2.3.2. Recommandations

Limitation d'ordre qualitatif : les colorants, sauf cas particuliers, ne devraient être utilisés que pour les préparations pharmaceutiques destinées aux voies orale, rectale ou vaginale.

Limitation d'ordre quantitatif : il est recommandé d'utiliser des quantités minimales de colorants permettant d'obtenir l'effet recherché.

Pour certains colorants, des limites maximales ont été déterminées.

Toute addition de colorants devrait être mentionnée avec, si possible, la teneur par unité de prise ou par unité de volume.

2.3.3. Choix des colorants

2.3.3.1. Critères de choix

Critères d'ordre physicochimique :

Certaines propriétés des colorants devront être considérés :

- leurs caractères de solubilité déterminant leur facilité d'incorporation à la préparation ;
- leur stabilité à la chaleur et à la lumière.

En outre, le comportement du colorant en présence des autres constituants de la formule devra être étudiée :

- stabilité selon le pH et stabilité en présence d'oxydants et de réducteurs ;
- étude globale de compatibilité vis-à-vis des produits chimiques usuels, excipients ou principes actifs.

Critères d'ordre psychologique : le consommateur de médicaments réagit d'une manière qui lui est propre aux formes et aux couleurs. La place donnée à un médicament dépend beaucoup des espérances que le consommateur attribue à une préparation. L'aspect extérieur d'une préparation est le principal générateur de l'espérance ; et c'est l'aspect couleur et forme qui décide :

- si le patient prend volontiers et régulièrement ses médicaments ;
- avec quelle confiance et quelle répulsion il les prend ;
- s'il peut facilement les identifier.

2.3.3.2. La coloration des formes orales solides

Les comprimés :

- Coloration dans la masse du comprimé : l'incorporation peut s'effectuer à différents stades de la fabrication des comprimés. Lorsque les comprimés sont préparés par compression directe (sans passer par la granulation), le colorant peut être mélangé à sec à la poudre. Les comprimés obtenus présentent un aspect moucheté.

Afin de permettre une meilleure imprégnation des excipients par le colorant, une méthode de granulation par voie humide est utilisée. Le mélange de poudre est mouillé par une solution de colorant. Puis la pâte est transformée en granules.

- Coloration de l'enrobage :
 - Le pelliculage : cette technique consiste à appliquer une couche mince de polymère sur le comprimé. Les agents filmogènes et le colorant sont en solution dans un solvant organique sur les noyaux et que l'on sèche ;
 - La dragéification : c'est un procédé qui consiste à appliquer sur la forme à enrober en rotation dans une turbine à dragéifier un grand nombre de couches enrobantes constituées de sucre et de colorant.

Les gélules et capsules :

Les gélules sont obtenues à partir d'un mélange d'eau et de gélatine, mélange auquel certains fabricants ajoutent des conservateurs.

Pour colorer les gélules, deux méthodes sont possibles :

- soit dissoudre un colorant soluble dans l'eau qui sert à gonfler la gélatine ;
- soit, et c'est la meilleure méthode, utiliser une laque.

Partie III : Identification des couleurs des formes orales solides

A. Le fichier national d'identification des formes orales solides médicamenteuses ⁽¹⁾

1. Généralités

Le Centre Antipoison du CHU de Nancy, en plus de son activité classique d'information toxicologique, dispose du fichier national d'identification des formes orales solides médicamenteuses, qui réunit l'ensemble des spécialités pharmaceutiques françaises de formes orales et solides.

Ce fichier, unique en France, a été mis en place en 1970 par l'internat en pharmacie, l'équipe d'informatique médicale et le Centre Antipoison du CHU de Nancy. Informatisé depuis 1977, il s'appuie aujourd'hui sur une base de données associée à une « pharmacothèque » qui rassemble les caractères organoleptiques de toutes les formes solides médicamenteuses.

L'objectif de ce fichier est de pouvoir retrouver le nom, et donc la composition, de tout médicament oral solide qui est découvert hors de son emballage dans divers contextes : tentative de suicide avec des médicaments, perquisition par les forces de police, ingestion accidentelle, contexte de toxicomanie ou d'usage abusif.

Ce service, gratuit, est accessible 24 heures sur 24 grâce à un interne en pharmacie en poste au Centre Antipoison et des astreintes assurées par les internes en pharmacie du CHU de Nancy.

2. La base de données

Le système comporte une base de données informatique comprenant d'une part, les informations sur les spécialités orales solides médicamenteuses autorisées en France et d'autre part, un outil de recherche multicritères.

En 2008, la base de données regroupe environ 8500 comprimés et 2500 gélules et capsules.

Pour approvisionner la pharmacothèque, les médicaments sont demandés auprès des laboratoires pharmaceutiques sous forme d'échantillons gratuits, après que leur mise sur le marché ait été renseignée.

Pour les spécialités psychotropes et stupéfiantes, une demande d'autorisation nominative auprès de l'Afssaps est nécessaire pour l'obtention de ces échantillons.

Un système de dépôt légal au Centre Antipoison de tout médicament mis sur le marché serait idéal.

3. Démarche générale d'une identification au Centre Antipoison

L'identification d'une forme orale solide médicamenteuse consiste en un recueil des caractéristiques spécifiques de la forme à identifier à l'aide d'une fiche descriptive type [annexe 1]. Le demandeur est dirigé vers un pharmacien/médecin du Centre Antipoison qui oriente les questions de manière pertinente et vérifie la cohérence des informations recueillies.

3.1. Les critères d'identification

- la forme pharmaceutique : comprimé, gélule, capsule, cachet, pilule, granule
- la forme géométrique vue du dessus ou vue de profil
- l'aspect des bords et des arêtes
- les dimensions : diamètre, hauteur, largeur
- les inscriptions (cette caractéristique doit être utilisée en priorité)
- la couleur : interne, externe
- la sécabilité
- l'aspect du médicament : uni, tacheté, marbré
- l'enrobage
- l'odeur

Pour les gélules et capsules spécifiquement :

- les parois : opaques, transparentes ou mixtes
- le contenu : poudre, pâte, liquide, comprimé, granules

Critères particuliers :

- l'effervescence
- le double noyau

3.2. En pratique

Les informations recueillies sont renseignées dans le logiciel « identification des formes solides » [annexe 2]. Les critères sont saisis un par un jusqu'à obtenir un nombre d'occurrences faible. Une fois les réponses obtenues, les échantillons correspondants sont sortis de la « pharmacothèque » afin de vérifier la cohérence des données.

La réponse est aussitôt communiquée au demandeur. Le délai entre l'appel et la communication des réponses nécessite en moyenne moins de 15 minutes. Il s'agit toutefois d'une identification de présomption qui doit être confirmée par l'analyse toxicologique.

4. Bilan 2007 [annexe 3]

En 2007, le nombre d'appels au Centre Antipoison de Nancy pour une identification d'une forme orale solide médicamenteuse s'élevait à 798 : 720 appels relevaient d'une situation non urgente.

Au niveau de la nature de la forme médicamenteuse, 634 appels concernaient l'identification d'un comprimé, 156 d'une gélule, 4 d'une capsule.

L'hôpital est le principal demandeur d'identification, suivi des pharmacies d'officine.

Les appels proviennent de toute la France, même si l'Ile-de-France et la Bretagne-Normandie se retrouvent en tête du nombre des appels.

Sur les 798 appels, 656 ont conduit à une seule occurrence.

5. Identification de la couleur externe d'une forme orale solide

La description téléphonique d'une couleur ou d'une nuance est souvent très subjective. Certaines nuances intermédiaires peuvent être perçues différemment selon les individus. Le choix de la couleur se fait aujourd'hui parmi une liste basique de 12 couleurs (blanc, noir, incolore, jaune, vert, bleu, rouge, rose, brun, orange, violet, gris) et n'inclut pas les nuances.

Il est tout de même possible d'associer deux couleurs lorsque celle-ci est mal définie, grâce aux « et » et « ou » proposés par le logiciel.

Or, la couleur est un critère important dans l'identification d'une forme orale. Nous proposerons plus loin un projet pour affiner cette identification de la couleur.

B. Facteurs influençant le choix des couleurs

1. L'observateur

Toutes les personnes appelées à participer à l'identification de la couleur d'un médicament devraient avoir subi, au préalable, un examen permettant de détecter d'éventuelles anomalies dans la perception des couleurs. A noter également que la perception des couleurs se dégrade avec l'âge, en particulier après 60 ans. Ceci est dû à l'augmentation de la densité du cristallin.

Ensuite, le choix de la couleur doit s'effectuer rapidement à cause de la fatigue visuelle qui est due :

- aux sources d'éclairage des locaux et notamment aux tubes fluorescents ;
- à la fluctuation de lumière, même non perçue, due au courant alternatif domestique. Cette alternance fatigue l'œil car elle induit un effet stroboscopique. Les luminaires fluorescents modernes sont équipés de dispositifs augmentant la fréquence du courant et suppriment totalement cette fatigue ;
- à la réflexion de la lumière sur les surfaces du mobilier et des murs placés dans le champ visuel de l'observateur.

La couleur étant une perception psychosensorielle, elle est fortement affectée par le vécu de l'individu, et il semblerai donc que le choix de la teinte soit un exercice qui demande un entraînement et donc une éducation.

2. L'éclairage

C'est un réel problème du fait du métamérisme. Le métamérisme est souvent présenté comme le phénomène par lequel deux surfaces, paraissant de même couleur sous un certain éclairage, peuvent paraître de couleur différentes sous une autre source de lumière. Il s'agit en fait d'une conséquence de la vision humaine des couleurs.

Le meilleur éclairage est la lumière du jour, de 11 à 15 heures, par un temps clair et peu ensoleillé (fenêtre située au nord), la lumière solaire ayant un spectre qui varie au cours de la journée.

Cependant, il existe des lumières artificielles dites de « lumière du jour », c'est-à-dire avec un fort IRC (indice de rendu des couleurs), comme par exemple le système GAMAIN, ou TRUE LITE, avec une température de couleur de 6 500 K et une intensité lumineuse de 1 200 à 1 500 lux. ⁽³⁸⁾

Ces appareils sont notamment utilisés dans les cabinets dentaires où cette lumière permet une bonne visualisation des teintes dentaires.

Il existe diverses versions de ces luminaires qui se distinguent par le niveau de confort prodigué :

- réglage de l'intensité, en fonction de la lumière extérieure ou non ;
- facilité de nettoyage ou étanchéité à la poussière.

3. La coloration de l'environnement

L'environnement doit être de couleur neutre, de préférence dans les gris. Les couleurs des vêtements de l'observateur doivent également être neutres.

La surface sous le médicament doit également être de couleur neutre, et de surcroît, être toujours de la même couleur.

Il faut donc éviter les couleurs vives ou sombres, car le fond contre lequel la couleur est aperçue a un effet important sur l'impression laissée par la couleur. Ainsi, un fond sombre fera apparaître une couleur plus claire que si elle était sur un fond lumineux. ⁽¹⁸⁾

4. Reproductibilité

Pour avoir des identifications les plus sûres possibles, il faut reproduire les mêmes conditions à chaque choix de teinte.

Dans la mesure du possible, il faut avoir :

- le même observateur, sans anomalie de la perception colorée et dans la même forme physique ;
- les mêmes couleurs au niveau des locaux, des vêtements de travail ;
- la même couleur de surface où est identifiée la couleur du médicament ;
- le même éclairage.

C. Gestion de la couleur ⁽⁸⁾ ⁽¹³⁾

Quand on veut identifier des couleurs et travailler sur informatique, il faut se poser la question du calibrage des écrans d'ordinateurs. Ce dernier permet d'avoir un rendu des couleurs aussi proche que possible de la réalité. De même, le passage de l'écran au papier doit être calibré.

En effet, tous les écrans ne se ressemblent pas et le rendu des couleurs est rarement le même. La solution est de calibrer son moniteur : c'est-à-dire corriger le rendu des couleurs, au moyen des réglages intégrés ou d'un logiciel, de façon à ce que les documents à l'écran soient aussi fidèles que possibles aux originaux.

Calibrer son écran permet également d'assurer une certaine similitude, dans le rendu des couleurs, entre différents ordinateurs.

Ces différences proviennent des quelques constatations suivantes : ⁽¹³⁾

- les différents périphériques (scanner, moniteur, imprimante) utilisés dans la chaîne graphique fonctionnent selon des principes différents, même s'ils prennent en compte la même image ;
- deux moniteurs de la même marque et du même modèle produiront souvent des couleurs légèrement différentes parce que chaque matériel possède sa propre gamme de couleurs reproductibles ;
- sur une même imprimante, une même image sera imprimée de façon différente en fonction des consommables et des conditions environnementales ;
- il arrive également que les couleurs des murs environnants et des vêtements que l'on porte lorsque nous sommes assis devant un écran d'ordinateur modifient les couleurs que l'on perçoit à l'écran.

L'objectif de la gestion de la couleur est ainsi d'assurer la conservation et la reproduction la plus fidèle possible de l'information couleur.

Selon l'International Color Consortium, organisme fondé en 1993, la gestion de la couleur devrait s'effectuer en trois étapes principales et consécutives :

- la *calibration* (ou étalonnage) : consiste à maintenir le périphérique dans un bon état de fonctionnement et à le régler de telle façon qu'il produise un résultat conforme aux normes du constructeur ou à ses propres normes en fonction de son environnement de

travail. L'essentiel est de garantir une stabilité dans le temps. Dans le cas d'un écran, on utilise habituellement un colorimètre qui mesure la lumière émise par le tube et un logiciel qui corrige les valeurs au niveau de la carte graphique ;

- la *caractérisation* : consiste à mesurer un ensemble d'informations colorimétriques issues d'un périphérique et à les comparer à des valeurs de référence. Cette étape permet d'avoir une description précise de la capacité de ce matériel à lire (ex. : scanner) ou à reproduire (ex. : écran, imprimante) un ensemble de couleurs. La caractérisation s'effectue à l'aide de chartes de couleurs normalisées et d'un colorimètre ou d'un spectrophotomètre ;
- la *conversion* (ou mise en correspondance des couleurs) : consiste à établir les correspondances colorimétriques entre les différents périphériques et à harmoniser le rendu des couleurs sur l'ensemble de la chaîne graphique.

Or, tout le monde n'a pas accès à des outils comme le colorimètre ou le spectrophotomètre.

Il existe d'autres méthodes de calibration plus simples, certes beaucoup moins efficaces mais elles restent fiables. Le site internet www.pourpre.com en propose une assez sûre mais ne saurait remplacer un logiciel dédié à cette tâche.

En effet, il existe dans le commerce des utilitaires performants permettant d'effectuer cette calibration.

Certains sont fournis gracieusement avec une imprimante, mais n'assurent généralement qu'une correspondance de l'imprimante avec l'écran, sans se soucier du réglage de ce dernier.

Il existe également sur internet des liens vers des outils de calibration.

Il faut donc bien penser, lors de l'identification de la couleur d'un comprimé ou d'une gélule, à utiliser le nuancier sous sa forme papier et non grâce à sa forme informatisée car la couleur sur écran, même avec une calibration optimale, ne rendra jamais la couleur exacte vue par l'œil.

Il existe également le problème de l'impression. En effet, si l'on veut imprimer un nuancier ou tout simplement un rapport sur l'identification d'une couleur d'un médicament, le rendu de la couleur peut différer à la fois de ce que l'on observe à l'écran et de la couleur réelle du médicament que l'on a sous les yeux.

En effet, il existe déjà une différence de rendu de couleur entre l'écran et la couleur perçue par l'œil. De plus, le passage de l'écran à l'impression nécessite la plupart du temps une transformation de format qui permet l'impression. Cette transformation est due au passage du mode colorimétrique RVB au mode CMJN. Bien que cette transformation soit indispensable pour le meilleur rendu des couleurs possibles, il existe toujours une légère différence de couleur.

Sans rentrer dans les détails techniques, le RVB (Rouge, Vert, Bleu) est utilisé pour l'affichage des écrans. Sa fonction principale est de rassembler et de régler les couleurs numériques propres à l'écran. ⁽²⁶⁾

Le CMJN (Cyan, Magenta, Jaune, Noir) appelé plus techniquement quadrichromie est un standard colorimétrique pour l'imprimerie : il assure une reproduction fidèle des couleurs basées sur la synthèse soustractive. ⁽⁵⁵⁾ Ces couleurs sont créées en mélangeant trois encres de base : le cyan, le magenta et le jaune auxquelles on ajoute le noir.

En outre, pour l'impression de couleurs, il faut se poser la question de l'encre et du papier. En effet, ils devront contenir le minimum d'impuretés possibles afin de ne pas altérer le rendu des couleurs.

Le papier, avec le mode CMJN, devra être blanc.

D. Outils permettant l'identification des couleurs

1. Le nuancier

Le rôle d'un système de classement des couleurs est de créer une représentation physique logique et organisée, avec une notation précise d'un ensemble de couleurs, afin d'obtenir un outil de communication visuel simple et objectif.

Précédemment, nous avons vu les principaux nuanciers existants dans le commerce.

1.1. Critères de choix

Afin d'utiliser au mieux un nuancier, il faut qu'il réponde à plusieurs critères.

Tout d'abord, il doit être simple d'utilisation : sous forme de pages reliées, plus communément appelées atlas ; sous forme d'éventail ou de disque. Les couleurs doivent être réunies selon la même teinte. Les codes ou noms associés aux couleurs doivent être assez simples.

Le nuancier choisi devrait être le plus complet possible : à la multitude de couleurs « simples », il faudrait y associer les couleurs métalliques, les pastels ainsi que les couleurs « fluorescentes ».

Il doit également être imprimé sur un papier de qualité pour éviter une dégradation trop rapide en raison des différentes manipulations et de l'altération due à la lumière.

Il faudra alors penser à renouveler le nuancier pour éviter les erreurs d'identification qui pourront être dues à ces dégradations.

Le nuancier doit pouvoir se créer ou s'obtenir facilement. Son coût doit être raisonnable.

1.2. Création d'un nuancier

Il est tout à fait possible de créer un nuancier soi-même grâce à des logiciels dédiés à cette tâche. De même, la plupart des logiciels pour retoucher les photos, comme par exemple Photoshop®, contiennent cette application.

Le principe est de commencer par éditer une nuance à l'aide des pourcentages CMJN (Cyan, Magenta, Jaune, Noir) si on souhaite utiliser ce modèle colorimétrique. Il existe d'autres modes colorimétriques, mais comme le CMJN est le format d'impression, il est préférable de l'utiliser de suite.

Une fois la nuance voulue obtenue, on l'enregistre et on la nomme.

Les nuances fabriquées sont ensuite classées par ordre alphabétique, sauf si on les a nommés selon les pourcentages de CMJN : les couleurs seront donc classées par teinte.

Dans notre cas présent, pour l'identification de la couleur des formes orales solides, il existe plusieurs avantages à l'utilisation d'un nuancier créé pour ce cas précis :

- chaque forme orale solide présente dans la bibliothèque peut avoir sa couleur répertoriée dans un fichier informatique : on peut créer la couleur grâce au logiciel et nommer le fichier du nom du médicament ;
- on choisit le nombre de couleurs que l'on veut : ainsi, un nuancier simple, prenant peu de place peut être créé ;
- le coût est relativement faible, si l'on ne considère pas le matériel informatique dans le budget.

Malheureusement, il existe également des inconvénients :

- la création d'un nuancier est un travail long et fastidieux ;
- les périphériques informatiques doivent être calibrés rigoureusement afin que les couleurs vues à l'écran, sur le papier et dans la réalité soient les mêmes.

Projet : création d'un nuancier pour les pharmacies d'officine.

Les pharmacies d'officine étant faciles d'accès, le conseil étant gratuit, elles sont souvent sollicitées pour reconnaître un médicament hors de son emballage initial.

Or, il existe des dizaines de milliers de spécialités pharmaceutiques sur le marché. Ainsi, le correspondant direct du pharmacien confronté à ce problème est le Centre Anti-Poison. Outre la taille, la forme, les gravures et inscriptions, il faut identifier la couleur. Or, comme nous l'avons vu, la perception de la couleur dépend de nombreux facteurs.

L'idée serait de créer un nuancier simple, relativement petit, par exemple de la forme d'un CD-Rom, ou d'un petit atlas, de faible coût, où chaque teinte de couleur possède un code ou un nom.

Ainsi, chaque pharmacie d'officine pourrait détenir ce nuancier et, lorsqu'elle contacte le CAP de sa région, qui lui-même possède ce nuancier, il sera alors facile de nommer la couleur qu'elle voit.

Bien entendu, la mise en place de ce nuancier devra faire l'objet d'une éducation quant à la façon d'identifier la couleur.

Ce dispositif pourrait également être élargi aux services d'urgences des hôpitaux, aux médecins de ville et aux sapeurs-pompiers.

1.3. Utilisation d'un nuancier existant

Nous avons vu les principaux nuanciers existants. L'avantage d'un nuancier existant est qu'il permet de supprimer la charge de travail qu'il faudrait pour créer soi-même un nuancier. De plus, ces nuanciers sont très complets : ils classent des centaines voire des milliers de couleurs différentes, sous forme d'atlas ou d'éventails. Ces nuanciers sont imprimés sur du papier de qualité, ce qui limite une dégradation rapide. Aussi, les codes ou noms de chaque couleur sont déjà créés et on peut se les procurer facilement dans le commerce.

Par contre, la plupart de ces nuanciers sont assez onéreux et encombrants.

Exemple d'un nuancier : Pantone®

Les produits Pantone® sont largement distribués au niveau international, et utilisés dans de nombreux métiers.

En effet, ces nuanciers sont très complets, faciles à utiliser.

Il existe des kits complets qui regroupent les nuanciers classiques, les couleurs pastelles, métalliques et fluorescentes. Il existe également différents nuanciers selon les papiers mat ou brillant.

Mais ces nuanciers sont assez onéreux et encombrants, on ne peut donc pas les distribuer dans les 23 000 officines de France ; encore moins si on veut que les services médicaux et paramédicaux en aient aussi.

Par contre, pour un usage professionnel, ces nuanciers sont très utiles et les Centres Anti-Poison pourraient s'en servir.

La solution serait de partir d'un nuancier complet de type Pantone® dans chaque Centre Anti-Poison. Chaque forme orale solide aurait alors un code de type « P+numéro » définissant sa couleur.

A partir de ce nuancier, il faudrait en recréer un, plus simple donc avec moins de teintes. Chaque teinte sera imprimée sur une petite surface afin que ce nuancier, de taille relativement petite, puisse contenir le maximum de teintes possibles.

Sachant que ce nuancier aura moins de teintes que le nuancier Pantone®, quand l'observateur choisira une couleur, il faudra que le CAP ait défini une marge de teintes Pantone® correspondant à cette couleur.

L'avantage de se servir d'un nuancier existant, est qu'il peut également être utilisé par d'autres professionnels. Ainsi, à terme, il serait intéressant que les industries pharmaceutiques se servent de ce nuancier à chaque mise sur le marché d'une nouvelle spécialité. La couleur de la forme orale serait donc définie dès le départ par un code universel.

Ceci ne serait bien entendu valable que si la couleur reste stable dans le temps.

2. Les autres méthodes

Afin d'éviter les fluctuations de résultat dues à l'observateur, à l'éclairage, à l'environnement, il serait judicieux d'utiliser un moyen électronique.

En effet, il existe sur le marché des colorimètres et spectrophotomètres qui sont conçus pour identifier une couleur de n'importe quelle surface.

A la base créés pour identifier une couleur sur une surface plane, ils servent aujourd'hui à calibrer des écrans d'ordinateurs par exemple.

De plus, il existe des spectrophotomètres portatifs pour identifier des surfaces de n'importe quelles taille et forme.

Ainsi, les résultats seraient reproductibles, à conditions que la machine soit bien réglée et bien utilisée.

Malheureusement, le coût de ses machines est prohibitif et elles doivent être utilisées par un personnel qualifié.

E. Création d'un nuancier d'identification des couleurs des formes orales solides

Comme nous l'avons proposé précédemment, il serait donc judicieux de fournir les pharmacies d'officines, les services d'urgences des hôpitaux, les sapeurs-pompiers, les médecins de ville d'un nuancier. Ce dernier ayant pour but de définir la couleur d'un comprimé ou d'un gélule se trouvant hors de son emballage d'origine, afin d'aiguiller le centre anti-poison sur le nom exact de ce médicament.

Nous sommes donc partis d'une feuille blanche, sous le logiciel Word de Microsoft. Après avoir défini le nombre de couleurs voulu, en l'occurrence 200, et tracé 4 tableaux, il a fallu apposer une couleur par case en utilisant la fenêtre de personnalisation de couleurs.

Grâce au mode RVB, on définit une par une les couleurs selon leur proportion de rouge, de vert et de bleu.

Après avoir composé les dégradés de couleurs, écrit la page de présentation et celle du mode d'utilisation, il a été facile de faire la mise en page afin que ce nuancier prenne la forme d'un petit atlas, prenant peu de place dans un tiroir d'officine ou dans la poche de la blouse d'un médecin urgentiste.

Chaque couleur comporte une case jointe où le code Pantone correspondant à la couleur est imprimé.

Nous l'avons ensuite imprimé sur du papier photo de qualité supérieure, la cartouche d'impression étant neuve [annexe 4].

Bien entendu, ce nuancier est « artisanal », c'est-à-dire qu'il ne respecte pas scrupuleusement toutes les obligations d'un travail sur les couleurs.

En effet, l'ordinateur et l'imprimante utilisés n'ont pas été calibrés par un professionnel ; la correspondance entre la couleur perçue et le code Pantone apposé a été faite visuellement ; l'imprimante utilisée est beaucoup moins précise qu'une imprimante industrielle.

Ainsi, pour la mise en place de ce projet, il faudra bien sûr se tourner vers des professionnels. Le coût en sera bien sûr augmenté mais on pourrait prévoir un financement par les pouvoirs publics, dans le budget hospitalier ou lors d'une campagne d'information par exemple, ou bien par un laboratoire pharmaceutique qui, moyennant une publicité sur le nuancier, pourrait sponsoriser la fabrication et s'occuper de la distribution.

Il serait également judicieux de se rapprocher de la littérature médicale : une intégration du nuancier au Dictionnaire Vidal® par exemple, permettrait aux médecins et pharmaciens d'avoir le nuancier à portée de main.

Conclusion

La perception colorée est un phénomène complexe. Il s'agit tout d'abord de la réaction des cônes et bâtonnets composant la rétine à des stimuli lumineux. Cette réaction engendre une cascade de signaux qui seront transmis au cerveau.

Les informations décodées par le cerveau sont interprétées différemment selon les individus, d'autant plus si ceux-ci sont atteints de troubles pathologiques de la vision des couleurs. L'âge du sujet, son vécu, l'environnement dans lequel il se trouve au moment de la perception ainsi que la lumière ambiante sont également des facteurs importants, influençant la vision colorée.

Un objet coloré, lorsqu'il est frappé de rayons lumineux, absorbe certaines radiations du spectre et en renvoie d'autres : ce sont ces radiations réfléchies qui sont interprétées par l'œil comme étant la couleur de l'objet.

Une couleur peut être définie grâce à trois critères, nommés différemment selon les systèmes de mesures : longueur d'onde (ou teinte, tonalité), pureté d'excitation (ou saturation) et facteur de luminance (ou luminosité, clarté).

La couleur est une notion particulièrement intéressante dans le monde pharmaceutique. En effet, la coloration des médicaments permet à la fois d'éviter les confusions lors de manipulations de médicaments, de visualiser une altération du produit, mais aussi d'identifier un médicament responsable d'une intoxication aigue.

La couleur d'un médicament est donc choisie comme un des principaux critères d'identification par le Centre Antipoison de Nancy.

Le Fichier National d'Identification des Formes Orales Solides Médicamenteuses regroupe environ 11 500 spécialités médicamenteuses. Un logiciel d'identification permet de retrouver un médicament grâce à différents critères. Or, on ne peut choisir que 12 nuances de couleurs alors qu'il existe des milliers de couleurs différentes. Il serait donc judicieux de travailler avec

un nuancier disponible à la fois dans les Centres Antipoison, les pharmacies d'officine, les services d'urgences des hôpitaux...

Ce nuancier, comportant un code pour chaque nuance de couleur, pourrait également être utilisé par les laboratoires pharmaceutiques qui définiraient dès le début la couleur d'un médicament.

Annexes

Annexe 1 :

FICHE D'IDENTIFICATION DES FORMES ORALES ET SOLIDES DU MEDICAMENT

Nom du correspondant CAP : _____ Date et heure : _____ N° : _____

DEMANDEUR

Adresse :

Tél. :

Poste :

- Hôpital
- CHU Nancy
- Autres CAP
- Labo toxico/police
- Pharmacien de ville
- Médecin de ville
- Particulier
- Autre :

CONTEXTE DE LA DEMANDE

Urgent

oui

non

Contexte :

FORME GALENIQUE

comprimé

gélule

capsule

autre :

DIMENSIONS

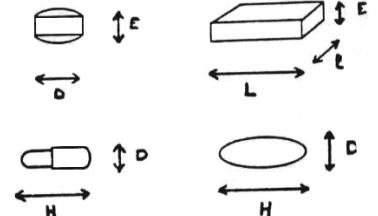
Mesurées au pied à coulisse

oui

au milieu

au bord

non



Diamètre ou longueur	
Largeur	
Épaisseur ou hauteur	
Poids	

INSCRIPTION

(à dessiner ou à décrire)

oui

sur 1 face

sur 2 faces

non

COULEURS

Couleur(s) externe(s) <input type="checkbox"/> et / <input type="checkbox"/> ou	Couleur(s) interne(s) <input type="checkbox"/> et / <input type="checkbox"/> ou
-	-
-	-
-	-

ASPECT

uni

tacheté

marbré

ODEUR

oui

non

COMPRIMÉS

- *FORME*
 - Vue du dessus circulaire elliptique/ovale oblongue
 - autre
 - Vue de profil convexe plate concave
 - autre
 - Arêtes vives ou angles abattus bords arrondis
- *SECABILITE*
 - Non sécable
 - Sécable
 - au demi sur 1 face
 - au quart sur 2 faces
 - autre :
- *ENROBAGE* sans enrobage pelliculé dragéifié
- *DOUBLE NOYAU* oui non
- *EFFERVESCENCE* oui non

GELULES ET CAPSULES

- *FORME* oblongue ovale
- *PAROI* opaque transparente mixte
- *CONTENU* poudre granulés pâte
- liquide autre :

RESULTATS

Recherche effectuée le : par :

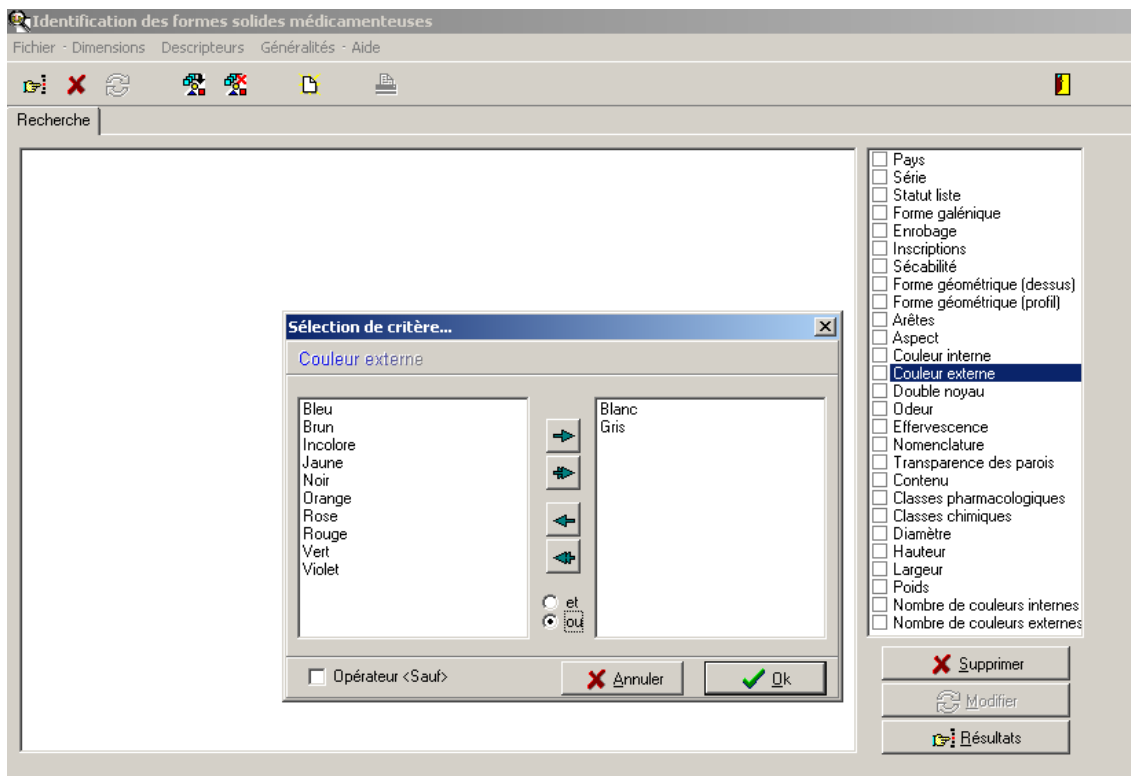
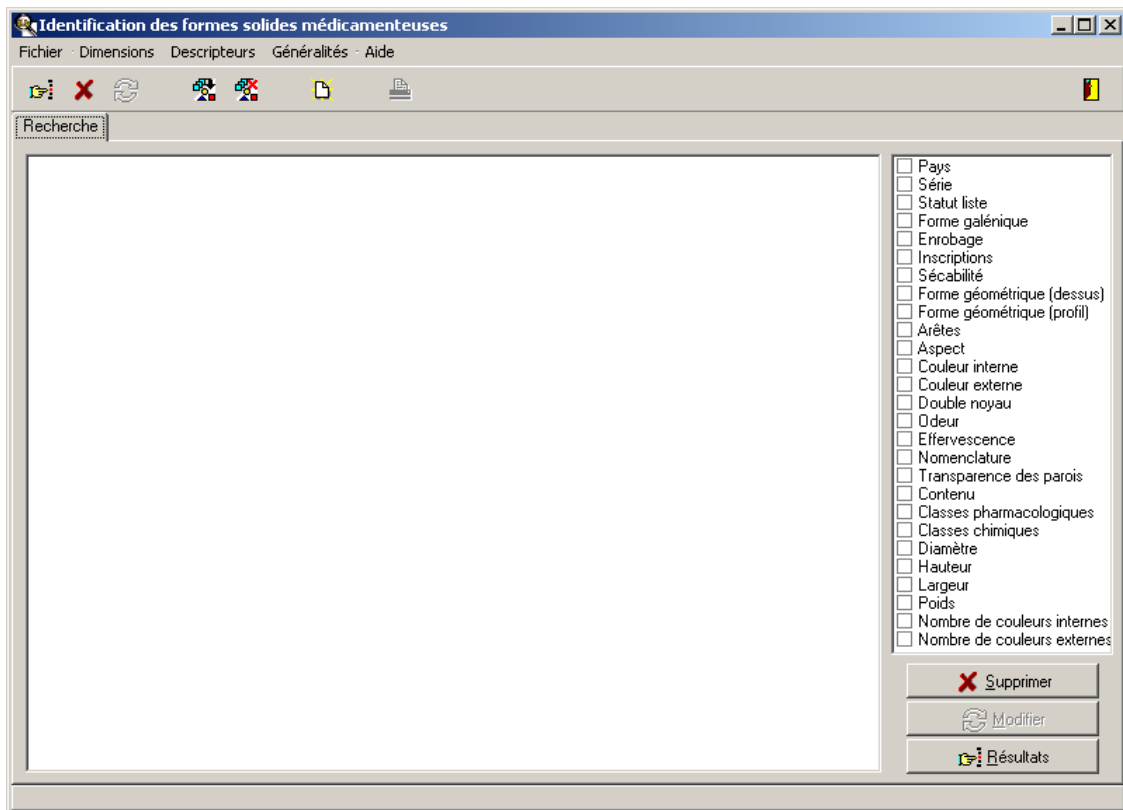
Réponse communiquée : oui non le :

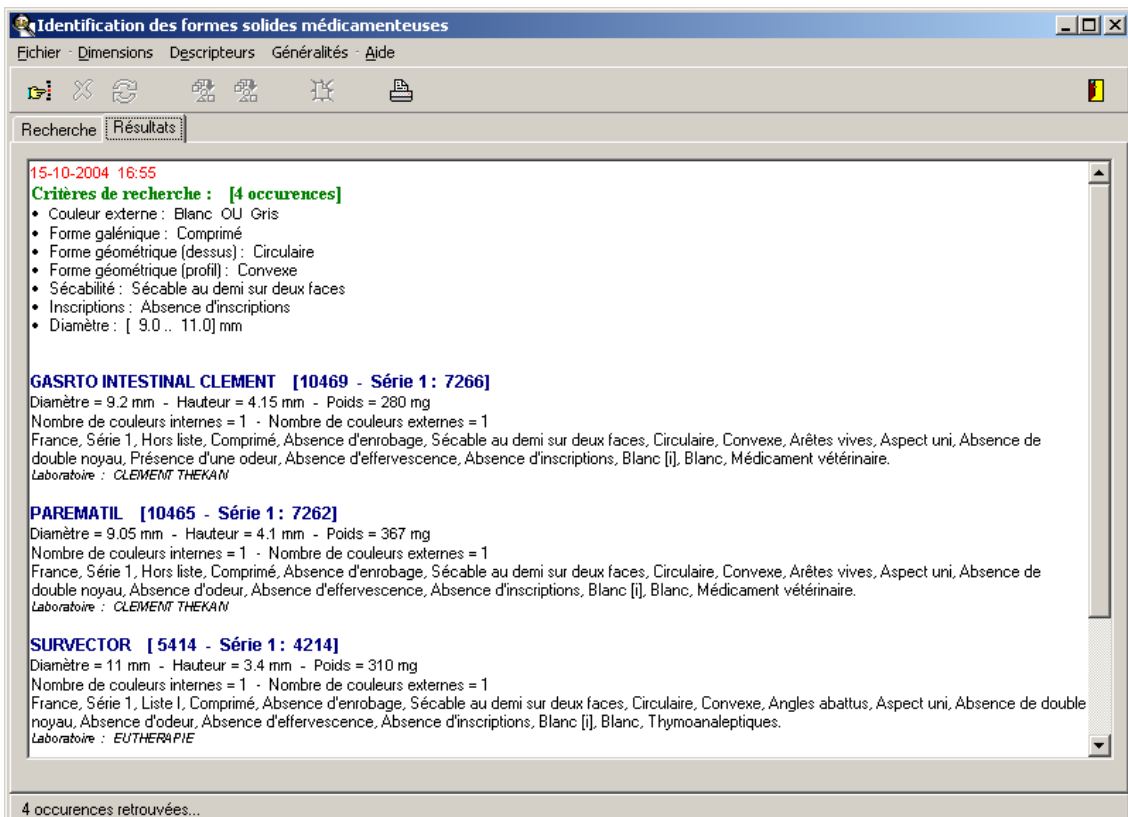
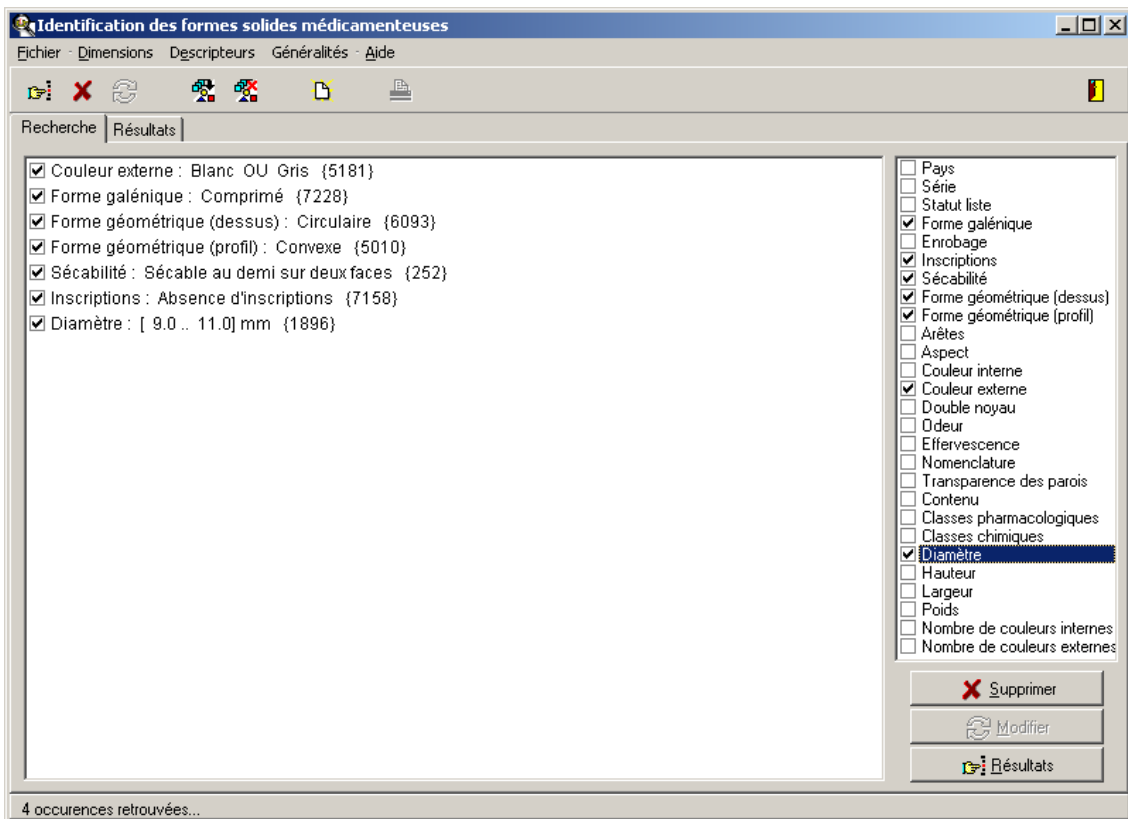
Vérification effectuée par :

Spécialités	Numéros

Annexe 2 :

Logiciel d'identification des formes orales solides





LE FICHER NATIONAL D'IDENTIFICATION DES FORMES ORALES SOLIDES MEDICAMENTEUSES

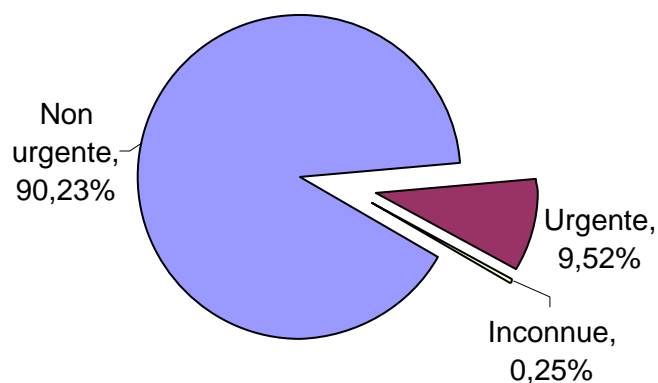
BILAN 2007

1. Caractère urgent ou non

Il est toujours difficile d'apprécier « l'urgence » réelle à identifier un comprimé, les demandeurs considérant parfois urgente une situation ou personne ne court de réel danger. Autant que possible, ce critère a été évalué sur le contexte de la demande (service de réanimation, SAMU pour urgent, ou mère de famille).

caractère d'urgence		
non urgent	720	90,23
Urgent et inconnu	78	9,77
Total	798	100,00

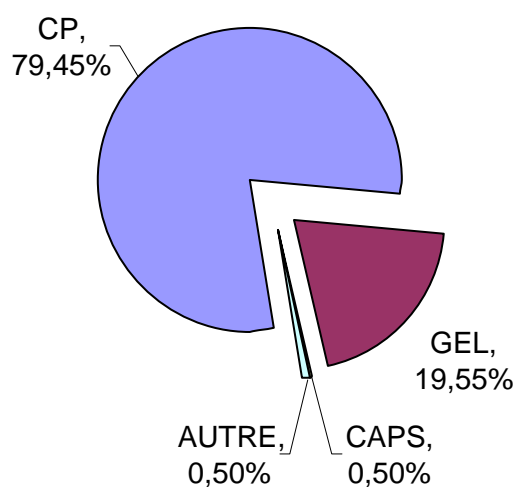
Caractère de la demande



2. Forme galénique

nature de la forme solide orale		
CP	634	79,45
GEL	156	19,55
CAPS	4	0,50
AUTRE	4	0,50
TOTAL	798	100,00

Forme galénique



3. Origine des appels

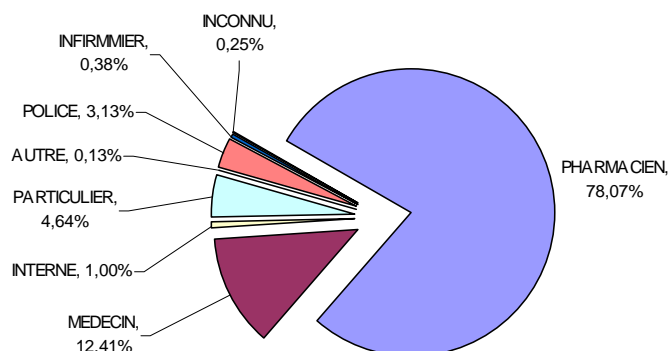
a. Nature du demandeur

nature du demandeur	Nb	%
PHARMACIEN	623	78,07
MEDECIN	99	12,41
INTERNE	8	1,00
PARTICULIER	37	4,64
AUTRE	1	0,13
POLICE	25	3,13
INFIRMIER	3	0,38
INCONNU	2	0,25
TOTAL	798	100,00

L'hôpital est le principal demandeur d'identification, suivi des pharmacies de ville.

A noter que sur les 183 appels émanant d'un établissement hospitalier, 13 venait du CHU Nancy, soit 7.10%.

Nature du demandeur



b. Nature du demandeur à l'hôpital

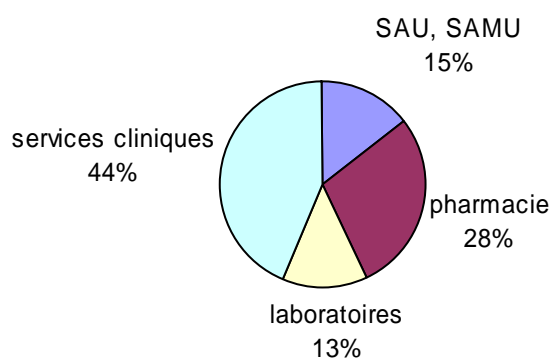
nature du demandeur hospitalier	Nb	%
CAP, CEIP	33	19,41
SAU, SAMU	20	11,76
pharmacie	39	22,94
laboratoires	18	10,59
services cliniques	60	35,29
total	170	100,00

Les autres Centres antipoison et de toxicovigilance (CAP) et Centre d'évaluation et d'information sur la pharmacodépendance (CEIP) savent que nous disposons d'une base de données efficace et nous passent le relais pour les identifications, soit en nous appelant directement, soit en nous recommandant.

Quelques services cliniques nous appellent directement mais ils sont souvent mal équipés pour donner les caractères de taille et de poids du comprimé ; ils nous appelleront plus facilement si le médicament porte une inscription. Dans le cas contraire, le comprimé est la plupart du temps transmis soit à la pharmacie soit aux laboratoires d'analyse toxicologique, qui ne sont malheureusement pas assez informés du contexte de découverte ou d'utilisation, ce qui est dommageable pour les identifications difficiles.

Enfin, certains laboratoires toxicologiques nous appellent pour confirmer leur résultat, alors qu'ils auraient sans doute gagné du temps à explorer les produits retrouvés suite à une identification organoleptique.

nature du demandeur hospitalier

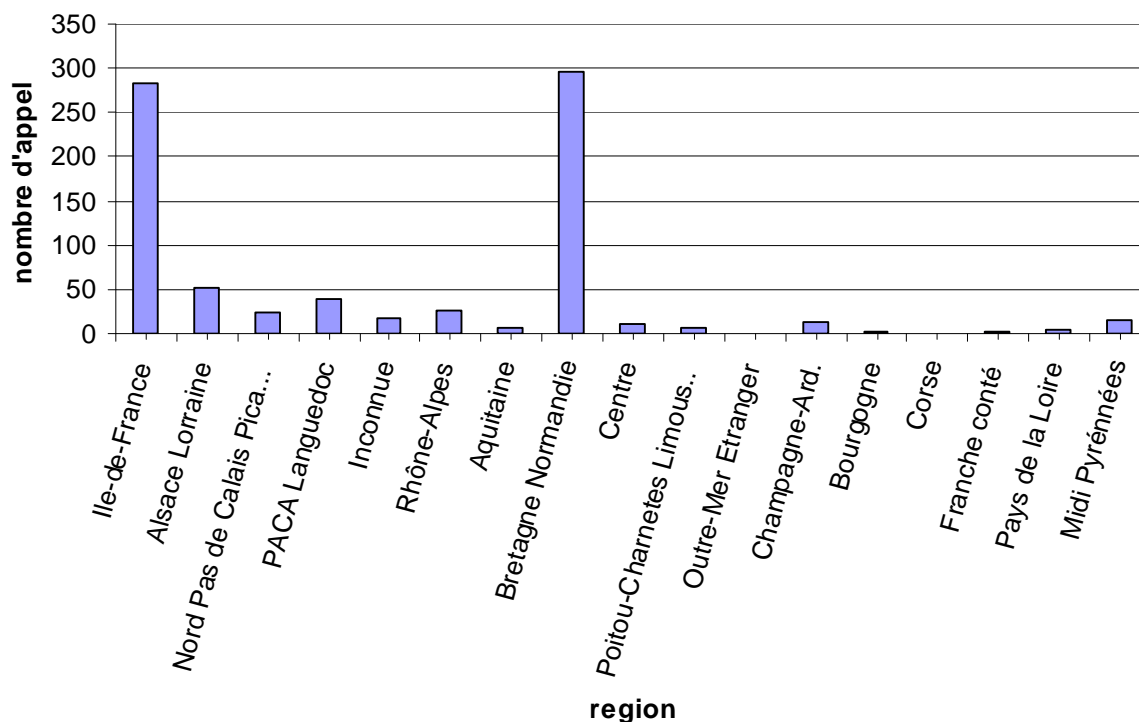


c. Provenance

répartition géographique des demandes	nb	%
Ile-de-France	284	35,59
Alsace Lorraine	52	6,52
Nord Pas de Calais Picardie	23	2,88
PACA Languedoc	38	4,76
Inconnue	17	2,13
Rhône-Alpes	26	3,26
Aquitaine	7	0,88
Bretagne Normandie	295	36,97
Centre	11	1,38
Poitou-Charnetes Limousin Auvergne	7	0,88
Outre-Mer Etranger	1	0,13
Champagne-Ard.	12	1,50
Bourgogne	2	0,25
Corse	1	0,13
Franche conté	3	0,38
Pays de la Loire	4	0,50
Midi Pyrénées	15	1,88
total	798	100,00

Les appels proviennent de toute la France, et même si l'Ile-de-France est toujours en tête des appels, toutes les régions de France font appel à nous, hormis la Corse, qui nous « boycottait » déjà en 2004 et 2005.

Repartition gographique

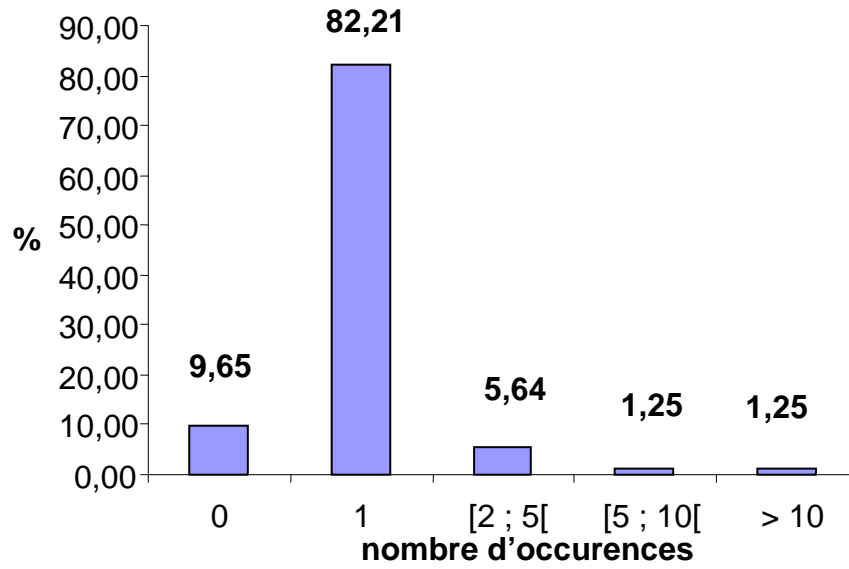


4. Nombre d'occurrences communiquées

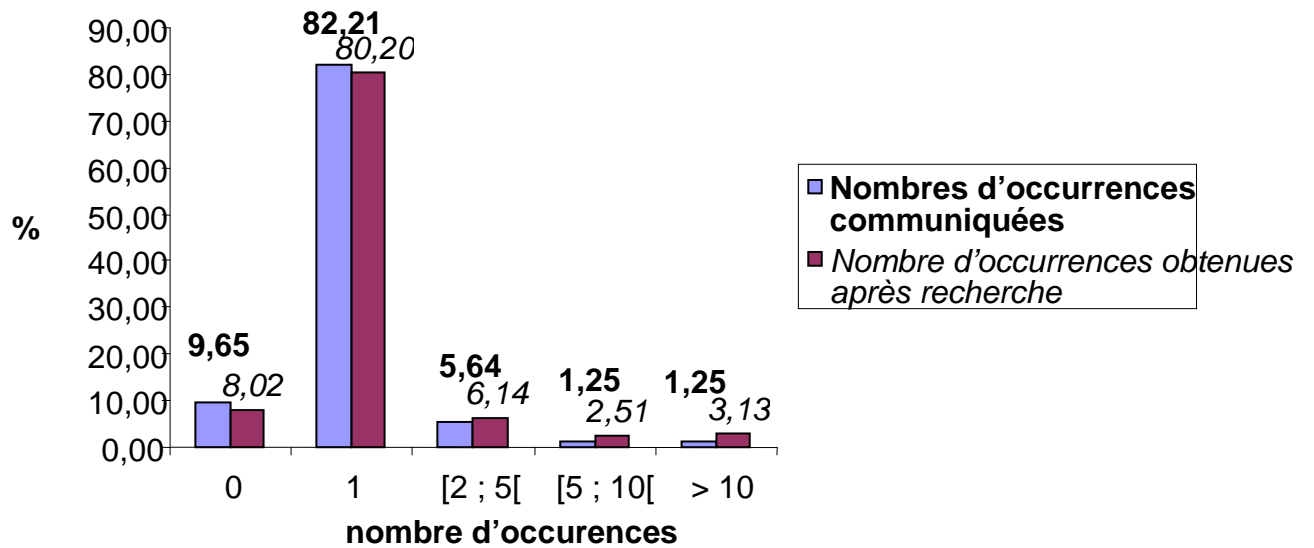
nombre de réponses	nb	%
0	77	9,65
1	656	82,21
[2 ; 5[45	5,64
[5 ; 10[10	1,25
> 10	10	1,25
TOTAL	798	100

Certaines communications n'ont pas donné lieu à identification, soit parce que la demande était différente (envoi de la photographie d'un comprimé, recensement des formes contenant une substance active en particulier, vérification de l'inscription sur la liste des produits dopants...), soit parce que l'identification demandait trop d'efforts à l'interlocuteur qui a abandonné lorsque l'identification n'était pas vitale.

Nombre d'occurrences communiquées



Nombre d'occurrences communiquées



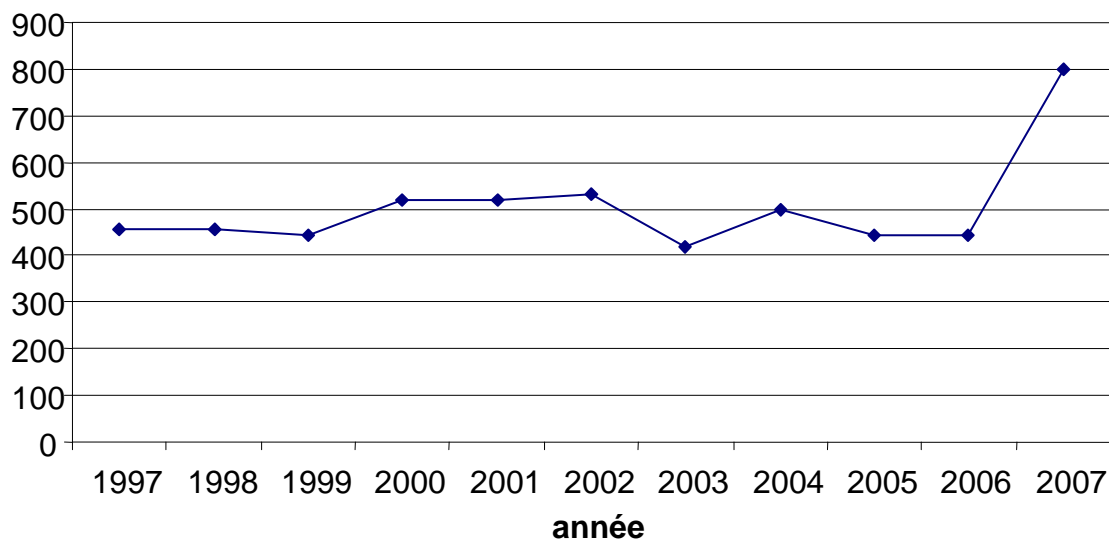
5. Evolution

nombre appels /années	années	nombre appels
	1997	457
	1998	455
	1999	444
	2000	517
	2001	517
	2002	531
	2003	420
	2004	498
	2005	444
	2006	444
	2007	798

Le nombre d'appels est assez stable depuis 1997, le service a reçu entre 444 et 517 appels/an sur cette période de 9 ans.

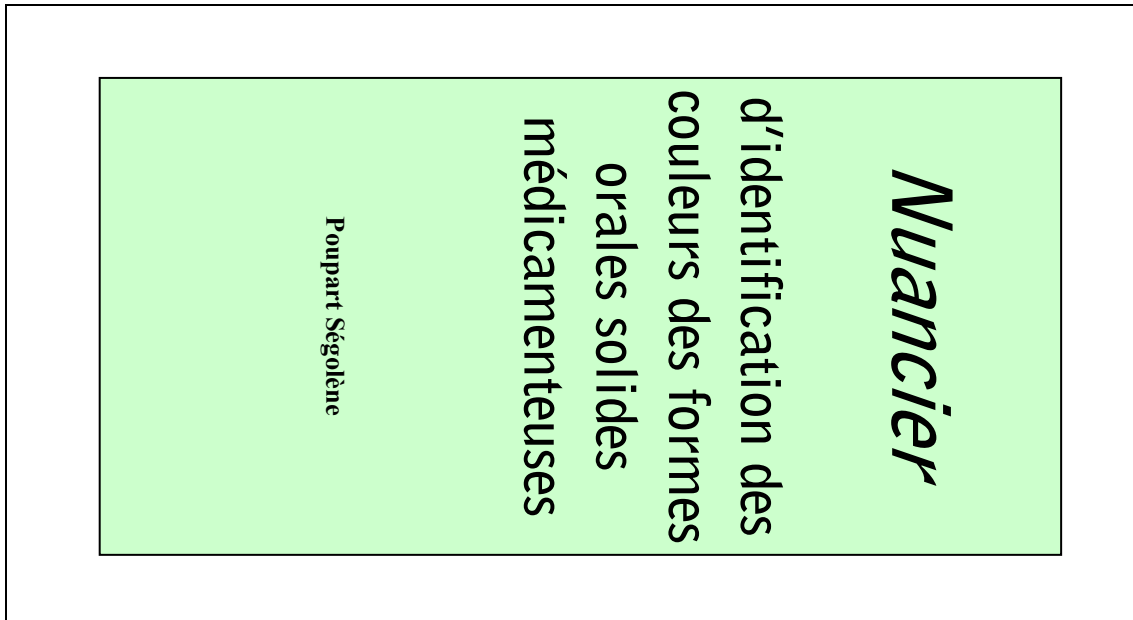
Evolution du nombre de demande d'identification

nombre de demande



Annexe 4 :

Proposition d'un nuancier d'identification des formes orales solides



white	Cool gray 1	Cool gray 2	Cool gray 3	Cool gray 4	Cool gray 5	Cool gray 6	Cool gray 7	Cool gray 8	Cool gray 9	Cool gray 10	Cool gray 11	black
196	197	189	190	198	199	192	185	186	193	187	194	188
155	156	162	163	164	157	158	152	153	159	160	168	161
100	101	127	128	113	114	115	103	104	118	111	102	105

379	380	386	387	396	397	381	382	390	383	384	385	399
372	373	365	366	374	375	376	368	377	369	370	378	553
351	352	358	359	360	361	354	355	362	363	356	357	5535
344	345	3375	3385	3395	3405	347	348	3415	3425	342	343	560

331	332	3248	3258	3245	3255	3265	3275	326	3285	327	329	3305
317	318	3105	3115	2985	2995	3005	Process blue	307	308	3015	3025	5463
290	291	297	298	299	300	292	293	301	294	302	295	296
277	278	283	284	279	285	Reflex blue	286	287	288	280	281	282

2635	2645	270	271	2725	2735	272	273	2745	2755	274	275	276
263	264	2563	2573	2577	2587	2583	2593	2597	2607	260	261	262
250	251	243	244	252	Purple	253	246	247	254	248	255	249
230	231	223	224	232	Rhod- -amine	219	Rubine Red	234	227	220	221	222

Mode d'utilisation :

1. L'observateur ne doit pas être atteint de troubles de la vision des couleurs.
2. Procéder à l'identification de la couleur en apposant le médicament à côté des cases colorées, sous une lumière blanche d'intensité moyenne.
3. La surface sous le nuancier doit être de couleur neutre, de même que les vêtements de l'observateur.
4. Choisir la teinte vous semblant la plus proche de celle du médicament et noter sa référence Pantone®.

Références bibliographiques

1. ARMAND C., BOLTZ P., GAMBIER N., LAMBERT H., MANEL J., PUSKARCSZYK E., *Médicaments détournés de leur usage : apport du système d'identification des formes orales solides médicamenteuses du Centre Antipoison du CHU de Nancy*, Alcoologie et addictologie, 2004, vol. 26, n° 3, pp. 227-234.
2. AURENGO A., PETITCLERC T., *Biophysique*, 3^e édition, Paris : Médecine-Sciences Flammarion, 2006, pp 173-200.
3. BATTERBURY M., BOWLING B., *Ophthalmologie*, Paris : Elsevier, 2005, 122 p.
4. BAUDOT S., *Importance des colorants végétaux dans l'histoire*, Th : Pharmacie : Nancy, 1986.
5. BELIN C., BOUCART M., HENAFF M.A., *Vision : aspects perceptifs et cognitifs*, Marseille : Solal, 1998, 363 p.
6. BORDENAVE L., DE CERTAINES J., GRALL Y., IDY-PERETTI I., *Biophysique pour les sciences de la vie et de la santé*, Sophia-Antipolis : Omniscience, 2007, pp 470-475.
7. BRUCE V., GREEN P., *La perception visuelle : physiologie, psychologie et écologie*, Grenoble : Presses Universitaires de Grenoble, 1993, 511 p.
8. BUNTING F., FRASER B., MURPHY C., *Gestion des couleurs*, Paris : CampusPress, 2003, 474 p.
9. BUSER P., IMBERT M., *Neurophysiologie fonctionnelle - 4, Vision*, Paris : Hermann, 1987, 501 p.
10. BUSSAC M.N., GRIMM C., ZUPPIROLI L., *Traité des couleurs*, Lausanne : Presses polytechniques et universitaires romandes, 2001, 381 p.

11. Colloque International du CNRS, *Pigments et colorants de l'Antiquité et du Moyen Age : teintures, peintures, enluminure, études historiques et physico-chimiques*, Paris : Editions du CNRS, 1990, 375 p.
12. Commission Nationale de Pharmacopée, *Pharmacopée Française : rédigée par ordre du gouvernement*, 10^e édition, Saint-Denis : Agence Française de Sécurité Sanitaire des Produits de Santé, 2007.
13. COUWENBERGH J.P., *Guide pratique et complet de la couleur*, Paris : OEM-Eyrolles, 2003, pp 11-64.
14. DEMERS O., *Textures et couleurs*, Paris : CampusPress, 2001, 328 p.
15. DERIBERE M., *La couleur*, 11^e édition, Paris : Presses universitaires de France, 2008, 127 p.
16. ELIAS M., LAFAIT J., *La couleur : lumière, vision et matériaux*, Paris : Belin, 2006, 351 p.
17. FLAMENT J., *Ophthalmologie, pathologie du système visuel*, Paris : Masson, 2002, pp 3-21.
18. GALLEN B., *Couleur et travail - Ambiance colorée, dyschromatopsies, aptitudes professionnelles*, Th : Médecine : Paris : 1980, 240 p.
19. GANONG W., *Physiologie médicale*, 19^e édition, Paris : De Boeck, 2001, pp 142-162.
20. GEORGET A., *Les colorants des médicaments*, Th : Pharmacie : Reims : 1984, 591, 122 p.
21. GOETHE J., *Matériaux pour l'histoire de la théorie des couleurs*, Toulouse : Presses Universitaires du Mirail, 2003, 475 p.

22. GOMEZ A., PECHEREAU A., ROTH A., *La réfraction de l'œil : du diagnostic à l'équipement optique*, Issy-lès-moulineaux : Elsevier, 2007, 396 p.
23. GREGORY RL., *L'œil et le cerveau : la psychologie de la vision*, Paris : De Boeck Université, 2000, 335 p.
24. GUYTON C., HALL E., *Précis de physiologie médicale*, 2^e édition française, Padoue (Italie) : Piccin, 2002, pp 596-633.
25. GUYTON A., *Traité de physiologie médicale*, Paris : Doin, 1989, pp 710-747.
26. HOLZSCHLAG M., *La couleur pour les sites web : mode d'emploi*, Paris : Pyramid, 2001, 175 p.
27. HUBEL D., *L'œil, le cerveau et la vision : les étapes cérébrales du traitement visuel*, Paris : Pour la science, diffusion Belin, 1994, 240 p.
28. ITTEN J., *Art de la couleur*, Edition abrégée, Stuttgart : Dessain et Tolra, 2004, 95 p.
29. KLYNE M.A., ALI M.A., *La vision chez les vertébrés*, Paris : Masson, 1986, 266 p.
30. KOVAROSKI C., *La malvoyance chez l'adulte : la comprendre, la vivre mieux*, Paris : Vuibert, 2005, 400 p.
31. LAMOULINE R., *Voir, nommer et figurer les couleurs*, Moélans-Revel : Atelier Perrousseaux, 2006, 199 p.
32. LANG J.K., *Ophthalmologie*, Paris : Maloine, 2002, 586 p.
33. LANTHONY P., *Vision des couleurs et daltonisme*, Paris : Ediss, 2001, 69 p.
34. LANTHONY P., *Physiologie, pathologie et écologie de la vision des couleurs*, Paris : CERES, 1994, 69 p.

35. LARMANDE P., LARMANDE A., *Neuro-ophtalmologie*, Paris : Masson, 1989, 250 p.
36. LEID J., LANTHONY P., ROTH A., VOLA J., RIGAUDIERE F. and VIENOT F., *Les dyschromatopsies*, Rapport annuel-numéro spécial, Marseille: BSOF, 2001, 301 p.
37. MEYER P., *L'œil et le cerveau : biophilosophie de la perception visuelle*, Paris : O. Jacob, 1997, 163 p.
38. MOLLARD COMTE N., *La perception de la couleur*, Th : Dentaire : Montpellier : 2001, 30, 136 p.
39. OCP Documentation, *Dico Plus, la référence en parapharmacie*, 16^e édition, Saint-Ouen : OCP Répartition, 2003, p 2.
40. ORBAN G., *La vision, mission du cerveau : les trois révolutions des neurosciences*, Paris : Fayard, 2007, 85 p.
41. PELISSIER C., *Couleurs et temps : de la physique à la phénoménologie*, Paris : L'Harmattan, 2006, 212 p.
42. PEZAC B., *Médicaments et vision des couleurs : les dyschromatopsies iatrogènes*, Th : Pharmacie : Bordeaux : 1997, 11, 163 p.
43. PIRENNE M.H., CROUZY R., *L'œil et la vision*, Paris : Gauthier-Villars, 1972, 287 p.
44. POCOCK G., RICHARDS C., *Physiologie humaine : les fondements de la médecine*, Paris : Masson, 2004, pp 121-133.
45. RENAULT I., *Les colorants alimentaires : leurs utilisations, leurs inconvénients*, Th : Pharmacie : Rennes, 1984.
46. ROCK I., *La perception*, Paris : De Boeck, 2001, 267 p.

47. RODIECK R., *La vision*, Paris : De Boeck, 2003, 562 p.
48. SARAUX H., LEMASSON C., OFFRET H., RENARD G., *Anatomie et histologie de l'œil*, 2^e édition mise à jour, Paris : Masson, 1982, 397 p.
49. SARAUX H., *Ophtalmologie*, 6^e édition, Paris : Masson, 1995, 218 p.
50. SEVE R., *Physique de la couleur : de l'apparence colorée à la technique colorimétrique*, Paris : Masson, 1996, 334 p.
51. SIMON G., *Archéologie de la vision : l'optique, le corps, la peinture*, Paris : Edition du Seuil, 2003, 290 p.
52. TORTORA G., GRABOWSKI S., *Principes d'anatomie et de physiologie*, 3^e édition française, Paris : De Boeck, 2001, pp 542-557.
53. VARICHON A., *Couleurs : pigments et teintures dans les mains des peuples*, Paris : Edition du Seuil, 2000, 234 p.
54. WIDMAIER E., RAFF H., STRANG K., *Physiologie humaine: les mécanismes du fonctionnement de l'organisme*, 4^e édition, Paris : Maloine, 2004, pp 222-230.
55. ZANANIRI C., *Couleurs et lumière*, Paris : Ellipses, 2000, 192 p.
56. ZEKI S., *Colour vision and functional specialisation in the visual cortex*, Amsterdam : Elsevier, 1990, 64 p.

N° d'identification :

TITRE :

Perception des couleurs et formes orales solides

Thèse soutenue le 10 mars 2009

Par Ségolène POUPART

RESUME :

La perception colorée est un phénomène complexe. Il s'agit de la sensation que produisent sur l'œil les radiations de la lumière et de la manière dont une personne les interprétera. Les cônes et les bâtonnets qui composent la rétine réagissent aux signaux lumineux et envoient des informations au cerveau qui les traduira en couleurs.

Il existe différents facteurs influençant la perception colorée. L'individu est le principal : en effet, il existe des variations inter-individuelles qui orientent le choix d'une couleur. De plus, les altérations de la vision des couleurs ne sont pas rares et il existe différentes pathologies congénitales ou acquises qui conduisent à un défaut de la perception colorée. La source de lumière, l'environnement sont aussi des facteurs importants.

Le Fichier National d'Identification des Formes Orales Solides du Centre Antipoison de Nancy utilise la couleur comme un des principaux critères d'identification de comprimés, de gélules et capsules lors d'intoxications volontaires ou accidentelles, de perquisition par les forces de Police.

MOTS CLES : Vision, Couleurs, Nuanciers, Gélules, Comprimés, Identification.

Directeur de thèse	Intitulé du laboratoire	Nature
Monsieur Luc FERRARI	Toxicologie	Expérimentale <input type="checkbox"/> Bibliographique <input checked="" type="checkbox"/> Thème <input type="checkbox"/> 3

Thèmes 1 – Sciences fondamentales 2 – Hygiène/Environnement
 3 – Médicament 4 – Alimentation – Nutrition
 5 – Biologie 6 – Pratique professionnelle