



UNIVERSITE D'ANTANANARIVO

ECOLE SUPERIEURE POLYTECHNIQUE



Premier Partenaire des Professionnels

DOMAINE : SCIENCES ET TECHNIQUES DE L'INGENIEUR

MENTION : GENIE DES PROCEDES CHIMIQUES ET INDUSTRIELS

Parcours : Sciences et Techniques des Génies de Procédés

**Mémoire de fin d'étude en vue de l'obtention du Diplôme de LICENCE
en Génie des Procédés Chimiques et Industriels**



**CONCEPTION ET REALISATION D'UN MINI
SPECTROPHOTOMETRE ET REFLECTOMETRE
VISIBLES EN VUE D'ANALYSE DE
SOLUTION CHIMIQUE ET DE SURFACE**

Présenté par : NARINDRANJANAHARY Emmanuëla

Soutenu le : 26 Septembre 2022

Promotion : 2022

Rapporteur : Mr RAZAFIMANDEFITRA André



UNIVERSITE D'ANTANANARIVO

ECOLE SUPERIEURE POLYTECHNIQUE



Premier Partenaire des Professionnels

DOMAINE : SCIENCES ET TECHNIQUES DE L'INGENIEUR

MENTION : GENIE DES PROCEDES CHIMIQUES ET INDUSTRIELS

Parcours : Sciences et Techniques des Génies de Procédés

**Mémoire de fin d'étude en vue de l'obtention du Diplôme de LICENCE
en Génie de Procédés Chimiques et Industriels**



**CONCEPTION ET REALISATION D'UN MINI
SPECTROPHOTOMETRE ET REFLECTOMETRE
VISIBLES EN VUE D'ANALYSE DE
SOLUTION CHIMIQUE ET DE SURFACE**

Présenté par : NARINDRANJANAHARY Emmanuëla

Soutenu le : 26 Septembre 2022

Promotion : 2022

Président : Pr ANDRIANARISON Edouard Ravalison

Encadreur : M. RAZAFIMANDEFITRA André

Examinateurs : Dr RABEHARITSARA Andry Tahina

Mme ANDRIANARISON Jemima

Mme ANDRIANIMANANA JULLIE Sylviano

REMERCIEMENTS

Tout d'abord, je tiens à remercier tout particulièrement et à témoigner toutes mes reconnaissances aux personnes suivantes, pour leur dévouement et leur soutien dans la concrétisation de ce Mémoire de Licence.

Je tiens tout d'abord à remercier le Professeur RAKOTOSAONA Rijalalaina, directeur de l'Ecole Supérieure Polytechnique d'Antananarivo, qui a mis toute son attention à l'égard de l'Etablissement pour son bon fonctionnement et d'avoir accordé la présentation de ce mémoire.

Je tiens également à adresser mes remerciements au Docteur RATSIMBA Marie Hanitriniaina, Responsable de la Mention Génie des Procédés Chimiques et Industriels, Elle n'a pas ménagé ses efforts pour le rayonnement de ladite Mention.

Mes sincères remerciements s'adressent au Professeur ANDRIANARISON Edouard Ravalison, d'avoir bien voulu présider le jury de ce mémoire malgré ses innombrables occupations.

J'exprime mes reconnaissances à Monsieur RAZAFIMANDEFITRA André pour son aide et précieux conseils et d'avoir accepté de rapporter ce mémoire.

Ma profonde reconnaissance et mes sincères remerciements s'adressent au Docteur Maitre de conférence RABEHARITSARA Andry Tahina, à Madame ANDRIANIMANANA JULLIE Sylviano et à Madame ANDRIANARISON Jemima, qui m'a fait l'honneur de siéger dans le membre de jury comme guise d'examinateur. Vos remarques les plus pertinents sont précieuses pour bien faire ce travail.

Je suis arrivé à ce stade grâce aussi à l'intervention pertinente des membres du corps professoral de la Mention Génie des Procédés Chimiques et Industriels. J'aimerais leur exprimer mes remerciements respectueux.

Mes profondes gratitudes et salutations vont à tous ceux qui, de près ou de loin ont contribué à l'achèvement de ce mémoire.

Et pour finir, non des moindres, je tiens à manifester mes vifs remerciements à mes parents pour leurs soutiens moral et matériel ainsi que pour les encouragements qu'ils m'ont témoignés tout au long de mes études universitaires et durant la concrétisation de ce mémoire. J'en suis très reconnaissant envers eux.

SOMMAIRE

INTRODUCTION

PARTIE I : Etudes théoriques et revues bibliographiques

CHAPITRE I : Généralités sur la couleur

CHAPITRE II : Comportement et interaction des rayons lumineux

CHAPITRE III : Les éléments constitutifs d'un spectrophotomètre

PARTIE II : Matériels et méthodes

CHAPITRE IV : Réalisation du réflectomètre

CHAPITRE V : Réalisation et conception du spectrophotomètre visible

PARTIE III : Essais, résultats et discussions

CHAPITRE VI : Essai du réflectomètre

CHAPITRE VII : Essais du spectrophotomètre lumière visible

CONCLUSION

GLOSSAIRE

(Z)-rétinal : Appelé aussi (Z)-rétinaldéhyde, est l'une des trois formes de la vitamine A. Il est capable d'absorber la lumière et présente une couleur orangée. Il se lie à des protéines, les opsines, et constitue la base moléculaire de la vision.

Bluetooth : Norme de télécommunications permettant l'échange bidirectionnel de données à courte distance en utilisant des ondes radio UHF sur la bande de fréquence de 2,4GHz. Son but est de simplifier les connexions entre les appareils électroniques à proximité en supprimant des liaisons filaires.

Chromaticité : Valeur utilisée en colorimètre pour déterminer une couleur indépendamment de sa luminosité.

CIE : Commission Internationale de l'Eclairage qui a rédigé les documents (1931, 1964, 1969) regroupant les recommandations sur les conditions d'éclairage, les systèmes de coordonnées trichromatiques, les courbes de visibilité, les courbes de répartition spectrale et différentes sources de lumière.

CIELAB : Espace colorimétrique $L^*a^*b^*$ fondé en 1976 par la CIE. LAB désigne un système de coordonnées de couleurs qui s'appuie étroitement sur la perception des couleurs par l'œil humain. L'espace colorimétrique CIELAB est formé à partir d'un axe de luminosité L^* , un axe rouge-vert a^* et un axe jaune-bleu b^* .

Dipôle : En électronique, c'est un circuit possédant seulement deux bornes.

Dodecahydraté : Un hydrate dont le solide contient douze molécules d'eau de cristallisation par molécule, ou par cellule unitaire.

Étalon : Matérialisation d'une grandeur donnée dont on connaît la valeur avec une grande exactitude. Il peut servir à étalonner d'autres étalons de moindre exactitude ou des équipements de mesure de la même grandeur.

Isomérie : Cas dans lequel des molécules organiques possèdent la même formule brute mais ont des formules semi-développées ou des formules développées différentes ; cas où les molécules ont la même composition atomique mais ont des arrangements d'atomes différentes.

Isotrope : Qui possède les mêmes propriétés dans toutes les directions.

Lampe à deutérium : Source de lumière à décharge de gaz à basse pression, souvent utilisée en spectroscopie lorsqu'un spectre continu dans la région ultraviolette est nécessaire.

Lampe tungstène-halogène : Lampe enveloppée de quartz spécial permettant une transmission élevée en dessous de 380nm. Elle est appelée ainsi car elle composée d'un filament de tungstène et est remplie d'un mélange de gaz halogène, spécifique à son

application finale. Elle offre une température de couleur élevée, une efficacité lumineuse élevée et une longue durée de vie

LCD 16 X 2 : Liquid Crystal Display 16x2 ou Ecran à cristaux liquides 16x2 en français, est un écran constitué de 16 colonnes et de 2 lignes, affichant ainsi jusqu'à 1120 pixels.

Ligand : (domaine chimique) Atome ou groupe d'atomes lié à un atome central, généralement métallique, dans une entité moléculaire polyatomique.

Lumière ambiante : Type d'éclairage qui sert à voir un espace dans son ensemble, en fournissant une base de lumière générale plus faible.

Monochromatique : qui ne contient qu'une seule longueur d'onde

Opsine : Protéine entrant dans la composition de la rhodopsine, ou pourpre rétinien.

Photodétecteur : Dispositif qui détecte ou répond à la lumière incidente en utilisant l'effet électrique de photons individuels.

Photon : Corpuscule, quantum d'énergie dont le flux constitue le rayonnement électromagnétique.

Photonique : Branche de la physique concernant l'étude et la fabrication de composants permettant la génération, la transmission, le traitement ou la conversion de signaux optiques.

Prisme : Instrument d'optique qui sert à réfracter et à décomposer la lumière et qui est un prisme triangulaire de verre blanc ou de cristal.

Quartz : Forme la plus courante de la silice naturelle cristallisée. Découpé selon une forme appropriée pour être utilisé comme oscillateur piézoélectrique.

Rayon gamma : Rayonnement électromagnétique à haute fréquence émis lors de la désexcitation d'un noyau atomique résultant d'une désintégration. Les photons émis sont caractérisés par des énergies allant de quelques keV à plusieurs centaines de GeV voire jusqu'à 450 TeV pour le plus énergétique jamais observé.

Rayon x : Forme de rayonnement électromagnétique à haute fréquence constitué de photons dont l'énergie varie d'une centaine d'eV.

Rhodopsine : Pigment protéique photosensible présent dans les photoréceptrices de la rétine.

Semi-conducteur : Matériau présentant une conductivité électrique intermédiaire entre les métaux et les isolants.

Spectre : Ensemble des radiations monochromatiques résultant de la décomposition d'une lumière ou d'un rayonnement complexe ; ensemble des radiations émises, absorbées, diffusées, etc., par un élément. Une espèce chimique, dans des conditions déterminées.

Stimulus : Impulsion susceptible de provoquer la réponse ou l'excitation d'un organe.

Transistor : Composant électronique constitué de matériaux semi-conducteurs, utilisé pour redresser, amplifier, interrompre des oscillations électriques.

Trichromatique : Qui concerne les quantités relatives des radiations primaires (bleu, vert, rouge) nécessaires pour reconstituer l'impression de couleur.

Trinitré : Dérivé nitré des composés organiques dont la formule comporte trois groupes fonctionnels $-NO_2$ lié à un atome de carbone.

White spirit : Essence minérale issue de la distillation du pétrole et constituée d'un mélange d'hydrocarbures.

WIFI : Abréviation de Wireless Fidelity qui signifie fidélité sans fil en français, est une technique qui permet la communication sans fil entre divers appareil (ordinateur, périphérique, téléviseur...) grâce aux ondes radioélectriques.

LISTE DES PHOTOS

Photo 1 : Exemple de courbe spectrale d'une analyse à spectrophotomètre infrarouge (transmittance en fonction du nombre d'onde)	15
Photo 2 : Photo d'une photodiode	33
Photo 3 : Photo d'une photorésistance ou résistance dépendant de la lumière.....	34
Photo 4 : Photo d'un phototransistor.....	35
Photo 5 : Photo du photodétecteur temt6000 utilisé.....	42
Photo 6 : Photo du bloc optique vue de profil dans l'enceinte noire	44
Photo 7 : Photo des 4 LED montées avec le capteur photosensible.....	44
Photo 8 : Microcontrôleur arduino nano	45
Photo 9 : Photo réelle du reflectomètre	52
Photo 10 : Photo du bloc optique du spectrophotomètre visible.....	55
Photo 11 : Photo d'un ESP32.....	57
Photo 12 : Photo réelle de spectrophotomètre visible	63
Photo 13 : Les peintures commerciales utilisées.....	62
Photo 14 : Seringues utilisées pour les prises de volume.....	63
Photo 15 : Modèle de couleur analysée.....	64
Photo 16 : Appareil commercial fonctionnel	65
Photo 17 : Résultat de l'essai sur un spectrophotomètre UV-VISIBLE de laboratoire	73

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Les différents spectres électromagnétiques	3
Figure 2 : Perception humaine de la couleur.....	5
Figure 3 : Changement de conformation de la molécule de rhodopsine entraînant le mécanisme de la vision	6
Figure 4 : Structure du diméthylfulvène (jaune)	8
Figure 5 : Structure du Métaxylène (incolore)	8
Figure 6 : Passage de lumière monochromatique sur une solution	10
Figure 7 : Différentes méthodes de spectrophotométries	11
Figure 8 : Courbe d'absorbance en fonction de la concentration	12
Figure 9 : Absorption d'une solution de paranitrophénol à 400 mg/L dans l'éthanol	13
Figure 10 : Absorption d'une solution de paranitrophénol à 20 mg/L dans l'éthanol	13
Figure 11 : Absorption d'une solution de paranitrophénol à 20 mg/L dans l'eau à pH= 6,8... <td>13</td>	13
Figure 12 : Interaction parfaite de la lumière sur une surface.....	18
Figure 13 : Représentation de diverses teintes	20
Figure 14 : Evolution de la saturation de gauche à droite	20
Figure 15 : Evolution de la clarté de gauche à droite	21
Figure 16 : Représentation schématique de l'arbre de couleur de Mensell	21
Figure 17 : Addition de trois couleurs primaires.....	22
Figure 18 : Superposition des trois couleurs secondaires	22
Figure 19 : Soustraction des couleurs par le filtre.....	23
Figure 20 : cercle chromatique.....	23
Figure 21 : Représentation cubique des couleurs RVB et CMJ;.....	25
Figure 22 : Diagramme de chromaticité Yxy	26
Figure 23 : Diagramme de chromaticité à Y constante	27
Figure 24 : Diagramme de chromaticité L*a*b*	28
Figure 25 : Représentation 3D de l'espace couleur L*a*b*	28
Figure 26 : Schéma de principe d'une LED de type 5 mm vue en coupe.....	30
Figure 27 : Branchement d'une diode lumineuse avec une résistance de protection	31
Figure 28 : Spectre de lumière RVB	32

Figure 29 : Schéma d'emploi d'une photodiode	33
Figure 30 : Schéma d'un phototransistor	35
Figure 31 : Absorption d'une cuve plastique pleine d'eau par rapport à l'air dans l'UV et le visible (entre 200 et 800 nm).....	36
Figure 32 : Absorption d'une cuve en quartz pleine d'eau par rapport à l'air dans l'UV et le visible (entre 200 et 800 nm).....	36
Figure 33 : Architecture générale d'un système embarqué	38
Figure 34 : Diagramme de fonctionnement du réflectomètre	39
Figure 35 : Schéma de la LED RVB à anode commune utilisée avec ses broches.....	40
Figure 36 : Vue schématique du montage du LED RVB à anode commune sur un microcontrôleur arduino nano	41
Figure 37 : Vue schématique du branchement du photodétecteur su la carte arduino	43
Figure 39 : Schéma du branchement de l'arduino avec les composants optiques	46
Figure 40 : Branchement des LED RVG sur une carte arduino alimentée avec une batterie de 9V	47
Figure 41 : Schéma du branchement de l'écran LCD sur le microcontrôleur	48
Figure 42 : Branchement du bouton poussoir pour la commande.....	49
Figure 43 : Câblage du circuit complet constituant l'appareil	50
Figure 44 : Diagramme de constitution de l'appareil de spectrophotomètre visible	53
Figure 45 : Câblage du LED RVB sur la carte ESP32.....	54
Figure 46 : Schéma d'une cuve à spectrophotomètre	55
Figure 47 : Câblage du photodétecteur MAX44009 sur une carte ESP32	56
Figure 48 : Câblage de l'écran LCD sur la carte ESP32.....	58
Figure 49 : Câblage des commandes sur la carte ESP32	59
Figure 50 : Câblage de tous les composants de l'appareil	60
Figure 51 : Graphe d'une courbe de tendance $A = f(C)$ des étalons	62
Figure 52 : Courbe de l'absorbance en fonction de la concentration des étalons.....	70
Figure 53 : Comparative de l'évolution de l'absorbance de chaque appareil	74

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : L'absorbance des lumières face aux différentes longueurs d'onde	32
Tableau 2 : Résultat des prises d'essais de 3 couleurs en RVB.....	60
Tableau 3 : Valeur des 3 essais dans l'espace XYZ.....	61
Tableau 4 : Valeur des 3 essais en espace L*a*b*.....	61
Tableau 5 : Proportion en unité de volume des mélanges de teinte	63
Tableau 6 : Valeurs des mesures prises par l'appareil conçu	64
Tableau 7 : Valeurs des mesures prises par l'appareil commercial	65
Tableau 8 : Comparative visuel avec des couleurs qui sont faites avec un logiciel	66
Tableau 9 : Tableau des proportions des étalons préparées	68
Tableau 10 : Correspondances et valeurs des étalons	69
Tableau 11 : Tableau des valeurs des solutions à concentration inconnue	70
Tableau 12 : Valeur des concentrations déterminées par la loi de Beer-Lambert.....	71
Tableau 13 : Résultats des essais sur l'appareil	71
Tableau 14 : Résultats sur le spectrophotomètre fonctionnel de laboratoire	72
Tableau 15 : Tableau comparatif des deux résultats obtenus par les deux appareils	73

LISTE DES ABRÉVIATIONS,

UNITÉS ET ACRONYMES

A_λ	: Absorbance
c	: Vitesse de la lumière
C.G.S	: Système centimètre-gramme-seconde
CCD	: Charged Coupled Device
cm	: Centimètre
cm⁻¹	: Par centimètre
CMOS	: Complementary Metal Oxide Semiconductor
ξ	: Epsilon
eV	: Électron-Volt
Fe(SO)₄NH₄.12H₂O	: Sulfate d'ammonium ferrique dodecahydraté
Fe(SCN)²⁺	: Thiocyanate de Fer
h	: Constante de Planck
H₂O	: Eau
IHM	: Interface Humain-Machine
J	: Joule
J.s	: Joule seconde
KSCN	: Thiocyanate de potassium
lux	: Lux
M	: Moles par litre
m/s	: Mètre par seconde
M^{-1.cm⁻¹}	: Litre par mole par centimètre
M.K.S.A	: Système mètre-kilogramme-seconde-ampère
ml	: Millilitre
mm	: Millimètre

n	: Indice de réfraction
NH₄⁺	: Ion ammonium
nm	: Nanomètre
PMMA	: Poly méthacrylate de méthyle acrylique
RDL	: Résistance dépendante de la lumière
RVB	: Rouge Vert Bleu
v	: Nu
SCN⁻	: Ion thiocyanate
UV	: Ultraviolet
V	: Volt
W	: Watt
ω	: Vecteur oméga
W.m⁻²	: Watt par mètre carré
θ	: Téta
λ	: Lambda
μ	: Mu
μm	: Micromètre
Ω	: Ohm

INTRODUCTION



INTRODUCTION

L'un des obstacles confrontés par un étudiant lors de son parcours académique, surtout dans le domaine scientifique, est le manque de matériels. Bien que certains appareils soient disponibles dans les grands laboratoires, l'accessibilité reste restreinte et coûteuse, car à ce jour, il n'existe qu'un petit nombre de fabricants d'appareillages destinés à la recherche scientifique. Et pour en bénéficier dans un pays qui ne possède pas de fabricant local, on doit recourir à l'importation de l'appareil, ou à l'envoie de l'échantillon à l'étranger. Dans tous les cas, l'utilisation de ces appareils est coûteuse.

Cependant, le développement scientifique et le développement industriel est étroitement lié à l'innovation technologique. C'est dans cette idée là que nous entreprenons la conception d'appareils électroniques utilisés en laboratoire et dans les industries en sollicitant les technologies actuelles comme celles à base de système embarqué.

Le spectrophotomètre visible est un appareil souvent utilisé en laboratoire pour la détermination de la concentration d'une espèce chimique colorée en solution et le réflectomètre est un appareil spécialement utilisé en industrie de peinture pour la quantification des couleurs afin de la reproduire.

Le but de ce mémoire est alors de concevoir, de réaliser ces deux appareils, et de les appliquer. D'où le titre « *Conception et réalisation d'un mini spectrophotomètre et réflectomètre visibles en vue d'analyse de solution chimique et de surface* ».

Afin de bien mener cette étude, nous divisons ce travail en trois grandes parties :

En premier lieu, nous allons voir les études théoriques et revues bibliographiques.

Ensuite, nous parlerons des matériels et méthodes pour la réalisation.

Enfin, nous aboutirons sur des essais dont nous discuterons les résultats.

PARTIE I

ETUDES THEORIQUES ET REVUES BIBLIOGRAPHIQUES



CHAPITRE I : GENERALITES SUR LA COULEUR

1.1. Historique

En 1802, WOLLASTON observait le spectre de lumière blanche du soleil considéré en ce temps-là comme continu, était en fait sillonné de raies dites « noires ». Mais en 1814, FRAUNHOFER, qui fit la même découverte et approfondit son étude, révélait une suite de raies dans la région visible du spectre solaire. Il les classait par ordre alphabétique sans se soucier de leur origine chimique même. BREWSTER, en 1832, a ensuite émis une hypothèse sur les raies de FRAUNHOFER mentionnant que les raies devaient être dues à la présence de certaines vapeurs dans l'atmosphère.

Historiquement, les plus importantes expériences de détermination des réponses trichromatiques de l'œil, base de la colorimétrie, ont été réalisées par W. D. WRIGHT en 1928 et J. GUILD en 1932, pour quantifier chaque couleur perceptible en termes de trois couleurs primaires. Dans ces expériences, une tâche lumineuse a été créée à partir de la combinaison de trois lumières monochromatiques primaires. L'utilisation des fonctions colorimétriques de l'observateur standard permet de convertir une courbe spectrale en trois nombres appelés valeurs tristimulaires XYZ, conduisant à l'identification de la couleur d'un objet ou d'une source de lumière [30].

1.2. Qu'est-ce que le spectre électromagnétique ?

Dans la vie de tous les jours, nous sommes entourés par les ondes électromagnétiques : les ondes radio utilisées par les stations radios, les micro-ondes utilisées par les fours et les téléphones portables, les ondes infrarouges pour les commandes à distance (type télécommande) ainsi que pour la communication à courte distance entre les ordinateurs et leurs périphériques, la lumière visible venant des lampes de notre maison, les ultraviolets capables de brûler notre peau, les rayons X pour la médecine et les rayons gamma émis en particulier par les matériaux radioactifs dans les centrales nucléaires. Le rayonnement électromagnétique se présente sous la forme d'onde de champ électromagnétique qui se propage dans le vide à la même vitesse qui est celle de la lumière ($2,9979 \cdot 10^8 \text{ m.s}^{-1}$ dans le vide). Seule une partie de ces ondes est visible sous forme de lumière. L'ensemble de ces ondes, visibles ou non, forme ce que l'on appelle le spectre électromagnétique.

Le rayonnement électromagnétique peut être caractérisé par sa longueur d'onde λ , par le nombre d'onde ν , ou encore par la fréquence v [2] :

$$\lambda = \frac{c}{v}$$

F. 1.01

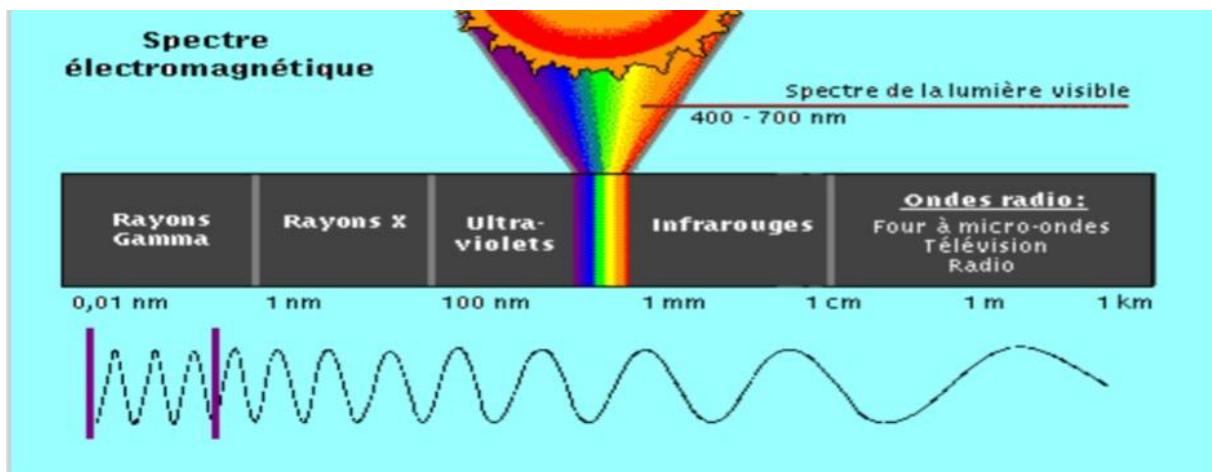


Figure 1 : Les différents spectres électromagnétiques

Source : Jean M. F., 2010 [14]

Les différentes répartitions du spectre électromagnétique, allons du rayon gamma aux ondes radio. Il y a le domaine visible ou la lumières blanche et il y a le domaine du non visible. Le visible n'est qu'une infime partie de l'ensemble des spectres électromagnétiques

1.3. Qu'est-ce que la lumière visible ?

La lumière est composée de rayons lumineux se propageant en ligne droite. Un rayon lumineux est composé par des photons. Les photons sont les particules élémentaires de la lumière et ont une principale caractéristique de longueur d'onde [29].

La lumière visible peut être considérée comme un flux de particules énergétiques (photons) dénuées de masse qui se propagent sous forme d'ondes électromagnétiques, dont les radiations se situent dans le domaine 380nm – 780nm (domaine de stimulation de notre sens de la vue). Une radiation électromagnétique est caractérisée par sa longueur d'onde λ exprimée en mètres (m). Le domaine 380nm – 780nm est appelé le domaine du visible. L'énergie de telles radiations est généralement exprimée en joules (J), la puissance correspondante en watts (W) et la quantité d'énergie transmise à une surface en watt par mètre carré (W.m^{-2}). Une lumière peut être décrite par sa répartition spectrale d'énergie notée (dans le domaine du visible) $I(\lambda)$, la quantité d'énergie émise par intervalle de longueurs d'onde (l'amplitude des intervalles est

en général fixée à 1nm). Pour qu'un objet soit perçu par l'œil dans un environnement donné, il faut une source lumineuse qui rayonne de l'énergie dans le spectre visible, des radiations dont la longueur d'onde λ est comprise entre 380 et 780nm. La lumière émise a des caractéristiques spectrales variables selon qu'elle provient d'une source naturelle (soleil) ou artificielle comme les lampes à filament de tungstène [29].

1.4. Quelle est la genèse de la couleur ?

Depuis la conscience intelligente des êtres humains, l'homme essaie de comprendre la perception de la couleur. Ce n'est qu'à la fin du XVIIème siècle (précisément en 1672), notamment grâce aux travaux d'Isaac Newton et à son expérience sur la décomposition de la lumière par un prisme, que le concept de couleur a commencé à prendre forme.

La complexité de la perception de la couleur réside dans le fait que la sensation visuelle de la couleur résulte d'interactions complexes. Tout d'abord, il n'y aurait pas de couleur sans lumière. D'un point de vue physique, la couleur est un attribut qui permet de rendre compte d'un ensemble de propriétés physiques du signal électromagnétique de longueur d'onde comprise entre 380nm – 780nm. Les matériaux sont composés d'objets qui ont la propriété de réfléchir ou transmettre tout ou une partie des rayons lumineux émis par une source. Les rayons lumineux issus de l'interaction entre la lumière et la surface de l'objet forment le stimulus qui va venir exciter les cellules réceptrices de l'œil.

En fait, un matériau n'a pas de couleur intrinsèque : il a la propriété de transformer la lumière en fonction d'une part de sa nature chimique et d'autre part de son état physique (état de surface en particulier). L'œil, à son tour, convertit le stimulus reçu en un signal nerveux qu'il transmet au cerveau. Ce dernier identifie ainsi l'objet observé et, entre autres sa couleur perçue. La perception humaine de la couleur est donc la réponse consciente que nous donnons au stimulus reçu par l'intermédiaire de notre récepteur, l'œil et de notre système d'interprétation, le cerveau. [31].

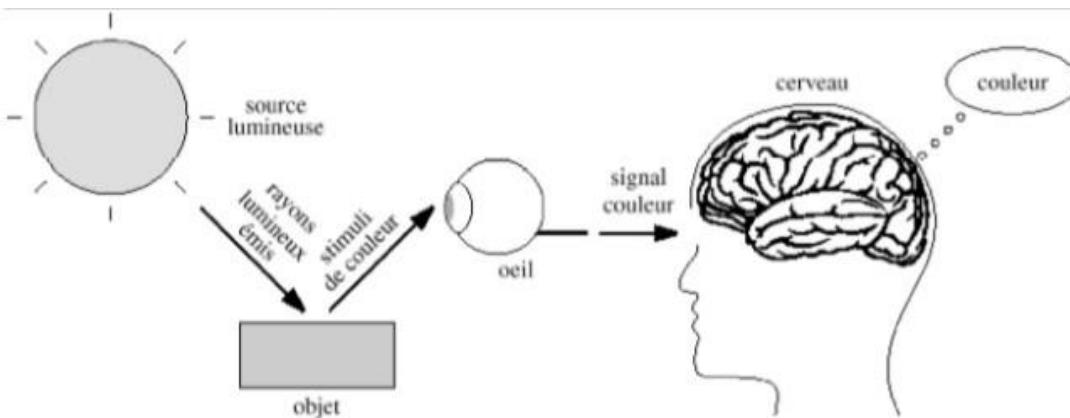


Figure 2 : Perception humaine de la couleur

Source : Trémau A., 2000 [3]

La couleur est une interprétation du cerveau et non prédéfinie par l'objet. L'objet absorbe certaine partie de la lumière visible. Et chaque personne interprète par le biais de son cerveau la couleur de l'objet.

1.4.1. Définitions

L'étude de la couleur relève de plusieurs domaines :

- la physique (l'électromagnétisme, plus précisément), qui explicite les interactions particulièrement complexes de la lumière et des matériaux,
- la physiologie, qui décrit le fonctionnement du système visuel humain

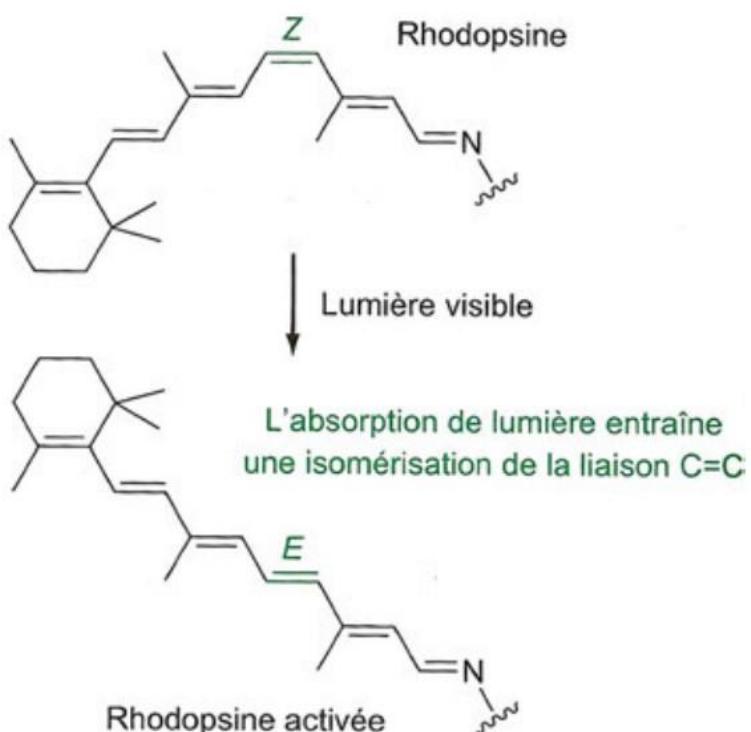
Lorsqu'un photon ayant une énergie correspondant au domaine du visible (longueur d'onde de 400 à 800 nm) frappe la rétine, il se produit un phénomène purement chimique, ou plus précisément photochimique, qui constitue l'acte premier de la vision.

Pour expliciter cela, il faut déjà préciser que la rétine de l'œil humain soit composée de cellules photosensibles de deux sortes : les cônes et les bâtonnets.

Les cônes sont responsables de la vision en couleur et par lumière de forte intensité (diurne par exemple), tandis que les bâtonnets permettront une vision en environnement de faible intensité lumineuse (nocturne par exemple). Ces cellules sont photosensibles. **Aucune entrée de table d'illustration n'a été trouvée.** du fait de leur composition en pigments photosensibles particuliers : des iodopsines dans le cas des cônes, de la rhodopsine dans le cas des bâtonnets.

1.4.1.1. Explication en terme chimique de la vision au niveau de la rétine

La rhodopsine est formée au sein de l'œil par une réaction entre une molécule appelée (Z)-rétilal avec une protéine appelée opsine. La rhodopsine est photosensible car, lorsque la lumière l'atteint, la double liaison C=C qu'elle contient change de configuration (configuration Z à configuration E), elle donne ainsi la rhodopsine activée. Ce changement de configuration déclenche une cascade de réaction qui se traduit, quasi instantané, en un influx nerveux envoyé au cerveau via le nerf optique. Ce mécanisme est très sensible puisqu'il suffit qu'un seul photon frappe la rétine pour que l'œil puisse le percevoir. La rhodopsine activée s'isomérise ensuite de nouveau en rhodopsine initiale, ce qui lui permet de réagir de nouveau avec les photons [12].



Lorsque la lumière frappe la rhodopsine, la liaison C=C passe d'une configuration Z à E.

Figure 3 : Changement de conformation de la molécule de rhodopsine entraînant le mécanisme de la vision

Source : Trémau A., 2020 [12]

L'impression colorée résulte alors en une interprétation du cerveau des différents signaux électriques résultant des réactions ayant lieu au sein des cônes et des bâtonnets. La rétine de l'œil a alors une réponse spectrale trichromique : les cônes sont en effet sensibles au bleu, au

vert, et au rouge, ce qui justifie alors le choix pertinent de ces trois couleurs comme couleurs élémentaires primaires dans la synthèse additive.

1.4.2. Facteurs chimiques et apparition de couleur

Chimiquement, la couleur de certaines molécules est due à l'absorption de certaines radiations dans le domaine visible par des groupements possédant de liaisons multiples où un certain nombre d'électrons mobiles. Il existe un lien entre la couleur d'un colorant organique et sa composition chimique. D'après la théorie de Witt (1876), la coloration est due à la présence de groupes insaturés appelés chromophores et de groupes ionisables appelés auxochromes dans la molécule colorée. L'ensemble de chromophore + auxochrome est appelé chromogène.

1.4.2.1. Les chromophores

Les groupements chromophores sont des groupements d'atomes, à la ressemblance des fonctions des composés organiques, qui sont responsables d'absorptions caractéristiques de la lumière [8]. Du fait de la conjugaison des doublets, la présence des électrons non localisés

1.4.2.2. Les auxochromes

Ce sont des groupes d'atomes ionisables fixés sur un groupe chromophore. Ils possèdent des doublets électroniques non liants participant à la conjugaison de double liaison de la molécule. Ils sont :

Les halogènes (fluor F, chlore Cl, brome Br, iodé I)

Les groupes acides carboxyliques (-COOH) et **carboxylate** (-COO⁻)

Les groupes ester (-COOR)

Les groupes alcool (-OH)

Les groupes cétone (-C=O)

Les groupes éther (-O-)

Les groupes amine (-NH₂, -NRH, -NRR')

Les groupes nitro (-NO₂)

1.4.2.3. L'interprétation des groupes chromophore et auxochrome

En prenant comme exemple, le benzène C₆H₆ qui est incolore. En le traitant par l'acide azotique, on peut lui ajouter le chromophore -NO₂; le trinitrobenzène C₆H₃(NO₂)₃ est coloré en jaune, mais il n'est pas colorant c'est-à-dire, il ne modifie pas la couleur de quelque chose

d'une façon durable. Si dans la molécule, on introduit le groupement auxochrome $-OH$, on obtient le phénol trinité $C_6H_2(NO_2)_3OH$ (acide picrique), qui est fortement un colorant jaune.

Il est aussi souligné que la couleur d'un corps dépend du mode de liaison des atomes dans la molécule. En effet, deux corps isomères peuvent être l'un incolore et l'autre coloré.

Ainsi, les xylènes (diméthylbenzènes) sont parfaitement incolores, et il existe un carbure isomère C_8H_{10} nettement coloré en jaune que l'on appelle le diméthylfulvène et auquel on attribue la formule de constitution suivante :

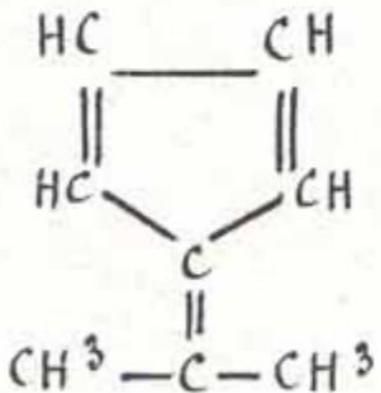


Figure 4 : Structure du diméthylfulvène (jaune)

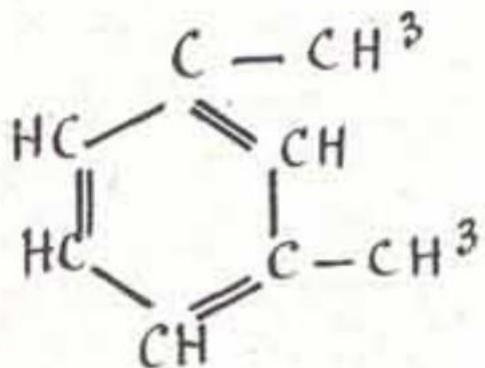


Figure 5 : Structure du Métaxylène (incolore)

Source : Auteur

C'est deux molécules sont des isomères mais par leur différences de configuration, leur couleurs se diffèrent. Il y à donc diméthylefulvène : en Jaune et le Métaxylène incolore.

1.5. La spectrométrie

1.5.1. Principe de la spectrométrie

1.5.1.1. Niveau d'énergie atomique

Chaque atome est constitué essentiellement d'un noyau où est concentrée pratiquement toute la masse M de l'atome qui porte Z charges positives élémentaires, et d'un cortège électronique formé de Z électrons, orbitant autour du noyau, dans le champ électrique créé par le noyau. Le phénomène fondamental non prévu par la physique classique, est qu'un tel système ne peut exister d'une manière stable que si son énergie possède certaines valeurs bien déterminées, appelées niveaux d'énergie quantifiés. Ceci a été mis en évidence par Bohr, en 1913. Parmi tous ces niveaux, on trouve le niveau ou état fondamentale, qui est l'état d'un atome ou molécule en équilibre à température ordinaire (s'ils peuvent exister à l'état libre) : C'est l'énergie minimale. Les autres niveaux sont appelés niveaux excités. Le passage d'un atome de l'état fondamental à un état excité ne peut se faire que par un apport d'énergie : énergie mécanique ou énergie électromagnétique. Par exemple : par un choc d'un atome à l'état fondamental à une particule suffisamment rapide. L'énergie nécessaire a été puisée dans l'énergie cinétique avant le choc. Et le passage de l'état excité à l'état fondamental libère de l'énergie sous forme de rayonnement [26].

D'après le théorème d'absorption et d'émission de Bohr : *Un atome ne peut absorber que les radiations qu'il est capable d'émettre.* C'est aussi la loi établie par KIRCHHOFF : « **Tout corps chimique peut absorber les radiations qu'il émet lui-même dans des conditions déterminé** » [11].

1.6. La spectrophotométrie

1.6.1. Définition

La spectrophotométrie est une méthode d'analyse quantitative qui consiste à mesurer l'absorbance ou la densité optique d'une substance chimique donnée en solution. Plus cette espèce est concentrée, plus elle absorbe la lumière dans les limites des proportionnalités énoncées par la loi de Beer-Lambert. L'absorbance est la capacité du milieu à absorber la lumière qui la traverse. On utilise aussi les termes densité optique, opacité ou extinction selon le domaine. La densité optique des solutions est déterminée par un spectrophotomètre préalablement étalonné sur la longueur d'onde.

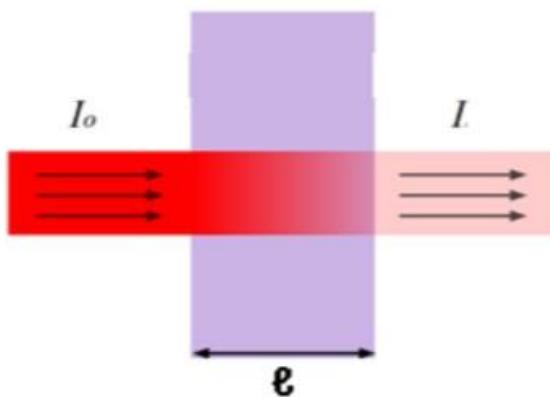


Figure 6 : Passage de lumière monochromatique sur une solution

Source : Auteur

Avec I_0 : intensité du rayon incident

I : intensité du rayon émergent

On peut tirer la transmittance

$$T = \frac{I}{I_0} \quad F. 1.02$$

Avec T sans unité.

Comme on connaît la quantité de lumière incidente et la quantité de lumière transmise, on en déduit l'absorbance.

$$A_\lambda = -\log \frac{I}{I_0} \quad F. 1.03$$

Où A_λ : absorbance à la longueur d'onde λ

Selon le mode de fonctionnement, Il existe 2 types de spectrophotomètre :

- ❖ Le premier (b) fonctionne en éclairant un échantillon avec une source lumineuse à longueur d'onde unique variable et en mesurant l'intensité lumineuse réfléchie/transmise en fonction de la longueur d'onde.
- ❖ La deuxième (a) fonctionne en éclairant un échantillon avec une source de lumière blanche, en dispersant les composantes spectrales de la lumière réfléchie/transmise à l'aide d'un prisme ou d'un réseau et en mesurant l'intensité en fonction de la longueur d'onde à l'aide d'un réseau de photodiode. Dans les deux cas, l'intensité de la lumière qui a réagi avec un échantillon est mesurée en fonction de la longueur d'onde [30].

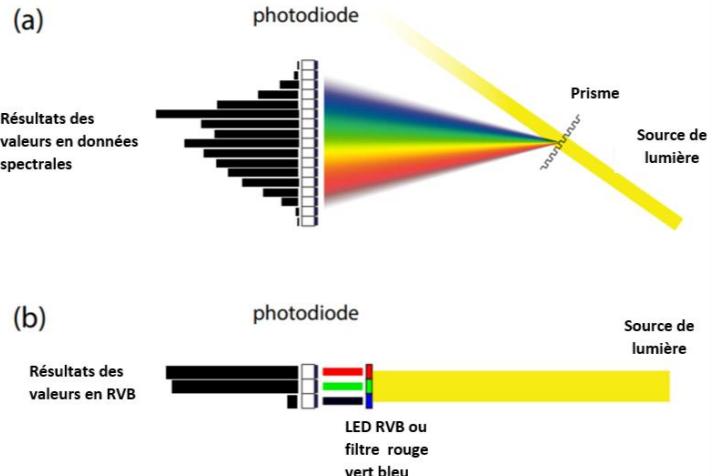


Figure 7 : Différentes méthodes de spectrophotométries

Source : Auteur

On voit que le prisme décompose les ondes électromagnétiques. C'est résultat peuvent être interprété en RVB.

1.6.1.1. Loi de Beer-Lambert

L'absorbance d'un faisceau de lumière monochromatique dans un milieu homogène et isotrope est proportionnelle à la longueur du trajet optique suivie par cette radiation et la concentration, en solution (ou la pression partielle en phase gazeuse) des espèces absorbantes [19].

Elle peut s'exprimer par :

$$A_\lambda = \varepsilon_\lambda l c \quad F.1.04$$

- ❖ A_λ : l'absorbance ou la densité optique de la solution pour une longueur λ ;
- ❖ C (M) : la concentration de l'espèce absorbante ;
- ❖ l (cm) : est la longueur du trajet optique ;
- ❖ ε_λ ($M^{-1} \cdot cm^{-1}$) est le coefficient d'absorption molaire de l'espèce absorbant en solution. Il dépend de :
 - La nature de la substance
 - La longueur d'onde λ de la lumière
 - La nature du solvant
 - La température

Par F.I.04 et F.I.05 on a

$$A_\lambda = -\log \frac{I}{I_0} = \varepsilon_\lambda l c \quad F.1.05$$

Détermination de la concentration

Par la loi de Beer Lambert sur F.I.05, pour une solution de même nature mais de concentration différente, on peut déterminer la concentration de l'espèce chimique présente dans la solution.

$A_\lambda = \varepsilon_\lambda l c$ Avec ε_λ et l une constante pour une même solution dans une même condition.

Posons $\varepsilon_\lambda l = k_\lambda$

On a :

$$A_\lambda = k_\lambda c \quad F. 1.06$$

Avec k_λ une constante pour une épaisseur de cuve donnée, une longueur d'onde donnée et un soluté donné.

De F.I.07 on en déduit une équation de droite linéaire de la forme $y = ax$

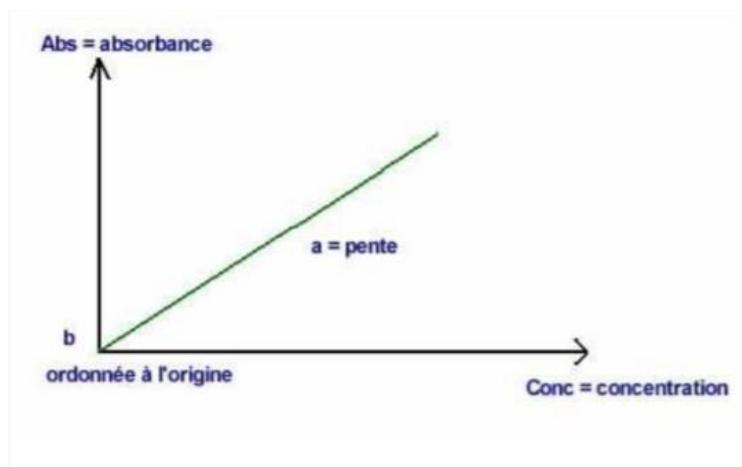


Figure 8 : Courbe d'absorbance en fonction de la concentration

Source : Auteur

Donc pour une solution A contenant une espèce chimique B de concentration et d'absorbance connue, on peut déterminer la concentration d'une solution A' contenant l'espèce chimique B de concentration inconnue.

1.6.1.2. La limite de validité de la loi de Beer-Lambert

Comme l'absorbance est proportionnelle à la concentration, les facteurs qui peuvent modifier cette proportionnalité sont :

- ❖ **La concentration :** si la solution est trop concentrée, il peut y avoir des interactions entre le soluté et le solvant.

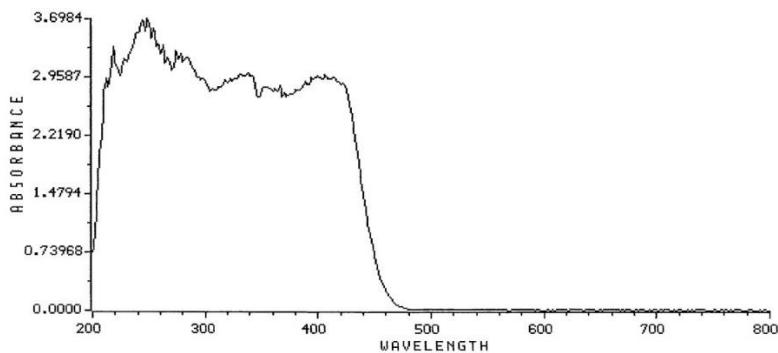


Figure 9 : Absorption d'une solution de paranitrophénol à 400 mg/L dans l'éthanol

Source : Meyer R., 1996 [12]

Avec une $\lambda_{max} = 250$ nm et A = 3,698

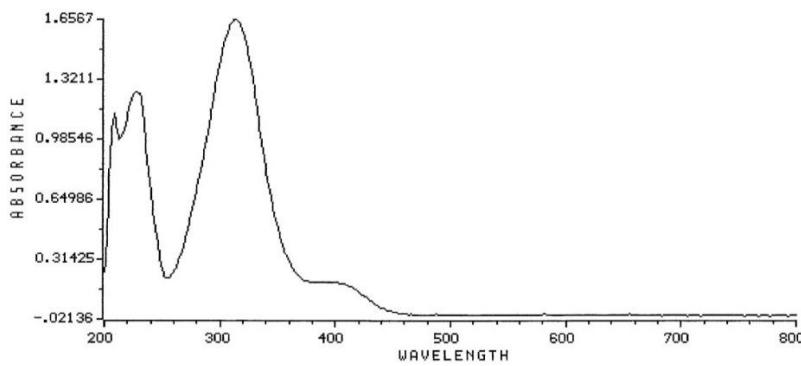


Figure 10 : Absorption d'une solution de paranitrophénol à 20 mg/L dans l'éthanol

Source : Meyer R., 1996 [21]

Avec une $\lambda_{max} = 314$ nm et A = 1,652

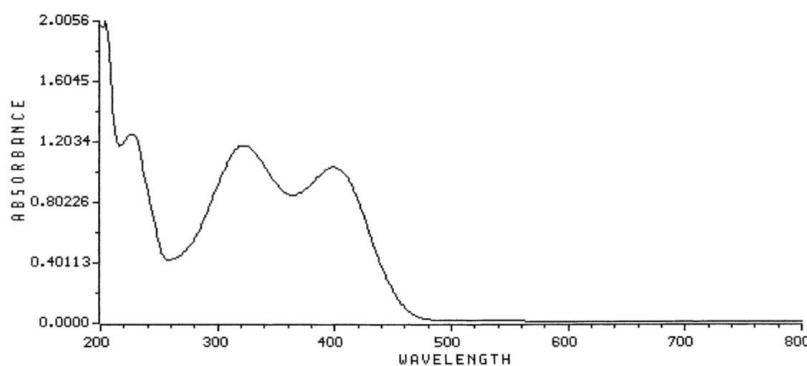


Figure 11 : Absorption d'une solution de paranitrophénol à 20 mg/L dans l'eau à pH= 6,8

Source : Meyer R., 1996 [21]

Avec une $\lambda_{max} = 318$ nm et A = 1,172

$\lambda_{max} = 400$ nm et A = 1,037

❖ **La sensibilité du détecteur :** la loi n'est vérifiée que dans un domaine limité de l'absorbance entre 0 à 1,5 ou 2 selon le capteur photosensible [21].

❖ **La dilution :** la loi de Beer-Lambert implique que la dilution de la solution n'entrainera pas un déplacement de l'équilibre chimique de la solution.



❖ **La limpideté :** la solution ne doit contenir de précipité ou de perturbateur du passage de la lumière et doit être limpide.

1.6.2. Quelques types de spectrophotomètres

Les rayonnements les plus utilisés en spectrophotométrie sont l'ultraviolet (UV), la lumière visible et l'infrarouge (IR). La lumière visible et l'Ultraviolet sont surtout utilisés pour une mesure quantitative car ils ne sont pas bien équipés pour des informations structurales. Pour cela, on utilise les rayons infrarouges.

1.6.2.1. Spectrophotomètre infra rouge

La spectrophotométrie infrarouge est une méthode analytique d'identification et de dosage, basée sur l'absorption (ou la réflexion) d'un échantillon sous une radiation comprise entre 1 et 1000 μm divisé en 3 plages de longueur d'onde : Le proche infrarouge (de 1 à 2,5 μm), le moyen infrarouge (de 2,5 à 25 μm) et le reste est le lointain infrarouge. La plus riche en information et la plus accessible est le moyen infrarouge. Les absorptions dans ce domaine constituent une sorte d'empreinte digitale des composés, permettant ainsi de déduire les particularités de structure [24].

Il peut être alors interprété graphiquement sur la courbe : intensité de lumière transmise (transmittance T) en fonction de la longueur d'onde ou du nombre d'onde (cm^{-1}).

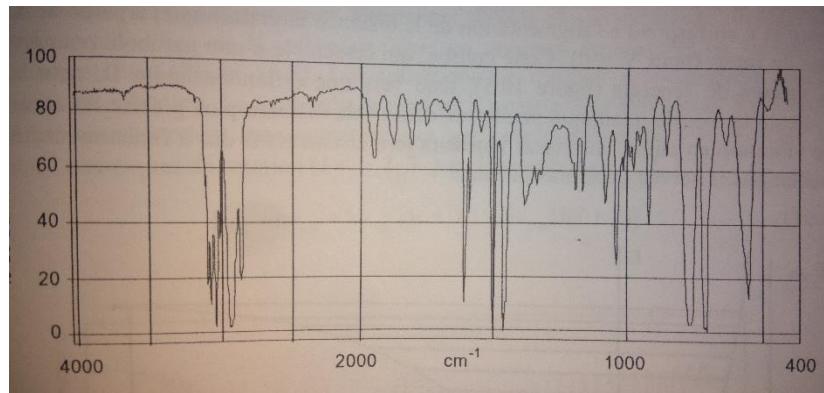


Photo 1 : Exemple de courbe spectrale d'une analyse à spectrophotomètre infrarouge (transmittance en fonction du nombre d'onde)

Source : Ourisson G., 1994 [24]

Avec la relation reliant le nombre d'onde et la longueur d'onde

$$\bar{v}_{(cm^{-1})} = \frac{1}{\lambda_{(cm)}} \quad F.1.07$$

Où \bar{v} : est le nombre d'onde exprimé en cm^{-1}

λ : La longueur d'onde spécifique en cm mais le plus courant utilisé est le μm .

1.6.2.2. Spectrophotomètre ultraviolet visible (UV-VIS)

La spectrométrie d'absorption dans l'ultraviolet et le visible est basée sur l'absorption du rayonnement par les molécules dans le domaine allant de 190 à 800 nm. De 190 à 400 nm pour l'ultraviolet et de 400 à 800nm pour le domaine visible.

On peut considérer le rayonnement UV-VIS comme une onde électromagnétique qui transporte une énergie E liée à la fréquence v par la relation :

$$E = hv = \frac{hc}{\lambda} \quad F.1.08$$

Où

- \mathbf{h} : La constante de Planck $6,63 \cdot 10^{-34}$ J.s
- \mathbf{c} : La vitesse de la lumière dans le vide $2,99793 \cdot 10^8$ m/s
- $\mathbf{\lambda}$: La longueur d'onde, exprimé habituellement en (nm).

Elle permet de déterminer ainsi la concentration de l'élément chimique présent par la loi Beer-Lambert [25].

1.6.3. La colorimétrie

1.6.3.1. Quelques définitions

La colorimétrie peut être définie comme la science de la mesure de la couleur, elle s'appuie sur la théorie trichromatique et sur le concept d'un observateur de référence. Elle n'est applicable que dans les longueurs d'onde du visible (entre 400nm et 800nm) [3].

La colorimétrie décrit la quantification relative de la couleur en termes d'intensité de portions sélectives du spectre visible. L'une des technologies colorimétriques les plus courantes est le capteur d'image RVB que l'on trouve dans la plupart des appareils photos numériques. Ces capteurs d'image sont constitués d'un réseau de photodiodes [30]

Un observateur de référence est nécessaire car la perception des couleurs de l'œil humain varie d'un individu à un autre. C'est dû à l'âge, à la qualité de la vue, à l'interprétation du cerveau.

1.6.3.2. Rôle d'un colorimètre

Afin de quantifier la lumière réfléchie dans les 3 plages de longueur d'onde du spectre visible, on utilise *un colorimètre*. Ce dernier utilise des filtres rouge, vert et bleu correspondant généralement aux fonctions de correspondance des couleurs CIE 1931.

1.6.3.3. Principe de la méthode colorimétrique

Etant donnée une substance chimique de nature connue, colorée, dissoute en proportion inconnue dans un liquide incolore, on peut évaluer la teneur de cette dissolution en comparant son intensité de coloration à celle d'une solution type, titrée, de la même substance, dans le même solvant.[30]

C'est une méthode dite comparative, ce qui implique une grande précision des données, des matériels et appareil utilisés.

1.6.4. Quelques définitions

Un dosage est la détermination d'une concentration ou d'une teneur massique dans un milieu (solution en chimie). Il est basé sur la propriété physique qui caractérise la substance à doser : dosage par absorbance, par conductance, ... [9].

Un titrage est un peu différent du dosage, Car il consiste à déterminer une concentration inconnue à l'aide d'une concentration dont on connaît le titre, par transformation chimique entre

la substance à doser et la substance titrante. Pour ce procédé de dosage, la réaction doit être totale et le cinétique de la réaction doit être rapide. [9]

1.6.5. Dosage complexo-métrique

Le dosage colorimétrie par complexation ou dosage complexo-métrique est une méthode permettant, en principe de doser tous les cations bi et trivalents. Il permet de déterminer la concentration du métal dans un échantillon ou de déterminer la constante de stabilité de ce métal avec un agent complexant. [23]



CHAPITRE II : COMPORTEMENT ET INTERACTION DES RAYONS LUMINEUX

Nous pouvons classer les lois qui décrivent les interactions entre la lumière et les matériaux selon leurs hypothèses fondatrices. En effet, aucune loi ne permet de prendre en compte le cas général. Nous décrirons brièvement les lois de la réflexion et de la réfraction de *Descartes-Shell* qui permettent de déterminer les directions réfléchie et incidente ainsi que les facteurs de Fresnel qui expriment le rapport entre les énergies réfléchie et réfractée. Ces lois sont applicables lorsque l'interface séparant deux milieux homogènes est parfaitement plane (à l'échelle de la longueur d'onde étudiée). Les interfaces rugueuses relèvent de théories nettement plus complexes. Nous nous contenterons ici de décrire quelques modèles de comportement de la lumière déduits de ces théories.

2.1. Interaction de la lumière avec une surface plane parfaite

Les milieux homogènes sont décrits par un indice de réfraction, qui exprime pour chaque longueur d'onde, la vitesse de propagation de la lumière. Ainsi, lorsqu'un rayonnement électromagnétique rencontre une interface parfaitement plane séparant deux milieux homogènes d'indices de réfraction n_1 et n_2 , une partie de l'énergie est réfléchie et l'autre est transmise de l'autre côté de la surface. Les ondes réfléchie et réfractée sont dans le plan d'incidence formé par la normale à la surface et la direction de propagation de l'onde incidente [17].

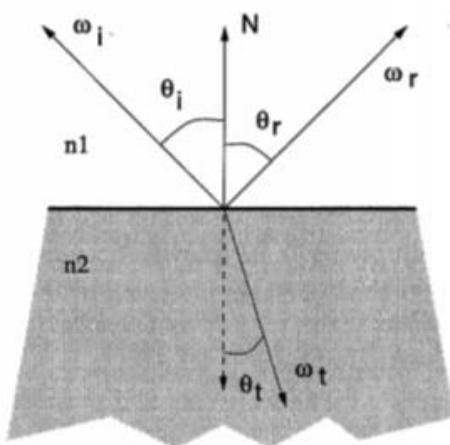


Figure 12 : Interaction parfaite de la lumière sur une surface

Source : Jean.C., 2000 [17]

2.1.1. Rayon incident

Le rayon incident $\vec{\omega}_i$ est le rayon provenant de la source de lumière arrivant sur la surface.

2.1.2. Rayon réfléchi

Le rayon réfléchi $\vec{\omega}_r$ est la symétrie par rapport à la normale \vec{n} de la direction du rayon incident. L'angle réfléchi s'exprime par $\theta_r = \theta_i$ [17]

Et le rayon réfléchi ($\vec{\omega}_r$) et le rayon incident ($\vec{\omega}_i$) sont reliés par la relation suivante :

$$\vec{\omega}_r = \vec{\omega}_i - 2(\omega_i \cdot \vec{n})\vec{n} \quad F.2.01$$

2.1.3. Rayon réfracté

Par définition, le rayon réfracté ($\vec{\omega}_t$) est le rayon de lumière se propageant dans un deuxième milieu et qui à subit une réfraction normale qui est la droite perpendiculaire à la surface de séparant les deux milieux [17].

La direction réfractée $\vec{\omega}_t$ dépend des indices de réfraction et de la direction d'incidence $\vec{\omega}_i \wedge \vec{n} = \vec{\omega}_i \wedge \vec{n}$ avec $\|\vec{n}\| = 1$, $\|\vec{\omega}_i\| = n_1$, $\|\vec{\omega}_t\| = n_2$. L'angle réfracté s'exprime par $n_2 \sin \theta_t = n_1 \sin \theta_i$ et la direction du rayon réfracté est exprimé par :

$$\vec{\omega}_t = \frac{n_1}{n_2} + \left(\frac{n_1}{n_2} \cos \theta_i \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{n_1}{n_2} \right)^2 \sin^2 \theta_i} \right) \vec{n} \quad F.2.02$$

Avec n_1 et n_2 , les indices de réfractions respectifs du milieu incident et du milieu réfracté.

2.2. Interprétation d'une couleur

Bien que le concept de couleur soit intuitif pour presque tous les humains, il peut être difficile de répondre à des questions apparemment simples sur la couleur ("qu'est-ce que la couleur?", "comment la couleur est-elle générée?", "comment la couleur est-elle mesurée?") sans une appréciation de la théorie des couleurs. La couleur décrit un aspect de la perception visuelle lié à la sensibilité de l'œil à différentes composantes spectrales (longueurs d'onde) de la lumière. Le spectre électromagnétique, dont la lumière visible à l'œil humain occupe une très petite plage. Le spectre de la lumière visible couvre une gamme de couleurs comprenant l'indigo (≈ 390 nm), le bleu (≈ 410 nm), le vert (≈ 520 nm), le jaune (≈ 580 nm) et le rouge (≈ 680 nm). Une couleur particulière peut être une composante spectrale unique ou une combinaison de composantes d'intensités différentes (un spectre). [30]

La couleur n'est pas matérielle, C'est la perception de l'œil et l'interprétation du cerveau des différentes longueurs d'onde qui font que l'on observe une différence visuelle de la couleur.

2.2.1. Classification de la couleur selon Munsell

En 1905, Munsell A. H. est un peintre et professeur d'art américain qui a classé la perception de la couleur sous trois aspects (teinte, saturation et clarté) :

2.2.1.1. La teinte

La teinte correspond à ce que nous appelons dans notre vie courante : couleur. Elle est caractérisée par la perception directe de la couleur par l'œil selon les couleurs proches de la couleur mère. Par exemple : bleu, bleu ciel, rouge pourpre, rose bonbon, ... [27].

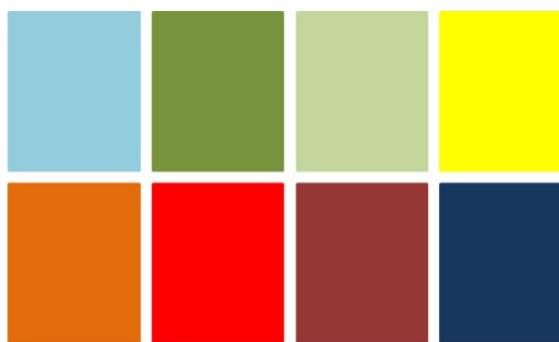


Figure 13 : Représentation de diverses teintes

Source : Pousset N., 2010 [27]

2.2.1.2. La saturation

La saturation désigne l'illumination de la teinte, allant du blanc à la couleur dite mère de la teinte.



Figure 14 : Evolution de la saturation de gauche à droite

Source : Pousset N., 2010 [27]

2.2.1.3. La clarté

La clarté désigne l'intensité de la clarté ou de la sombreur de la teinte. Sachant que la plus claire est la blanche et la moins claire est la noire. Ce sont les extrêmes de la clarté mais en passant, au milieu par la teinte désignée.



Figure 15 : Evolution de la clarté de gauche à droite

Source : Pousset N., 2010 [27]

Par ces trois paramètres, Munsell a représenté la couleur dans une espace tridimensionnelle en forme de 2 cônes superposés.

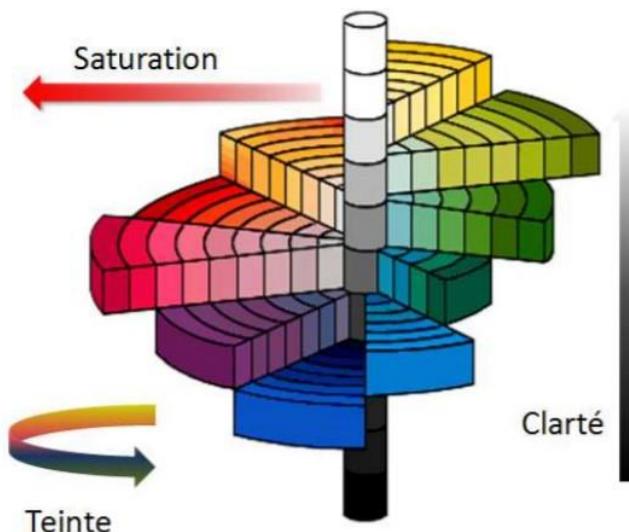


Figure 16 : Représentation schématique de l'arbre de couleur de Mensell

Source : Pousset N., 2010 [27]

Synthèses additive et soustractive des couleurs :

2.2.2. Synthèse additive

C'est la composition de trois couleurs primaires : rouge, verte, bleue par addition. La superposition des trois couleurs donne le blanc et l'absence de couleur le noir.

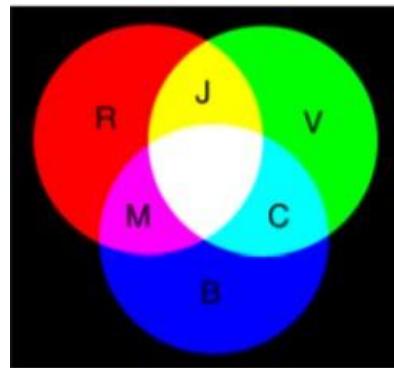


Figure 17 : Addition de trois couleurs primaires

Source : Thon S., 2014 [34]

2.2.3. Synthèse soustractive

C'est la composition de trois couleurs primaires par soustraction de la lumière. C'est aussi l'addition des trois couleurs secondaires cyan, magenta, jaune. La superposition des trois couleurs donne le noir et le fond est blanc en l'absence de couleur.

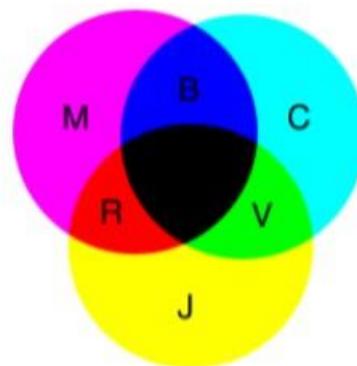


Figure 18 : Superposition des trois couleurs secondaires

Source : Thon S., 2014 [34]

La soustraction a aussi lieu par l'utilisation des filtres

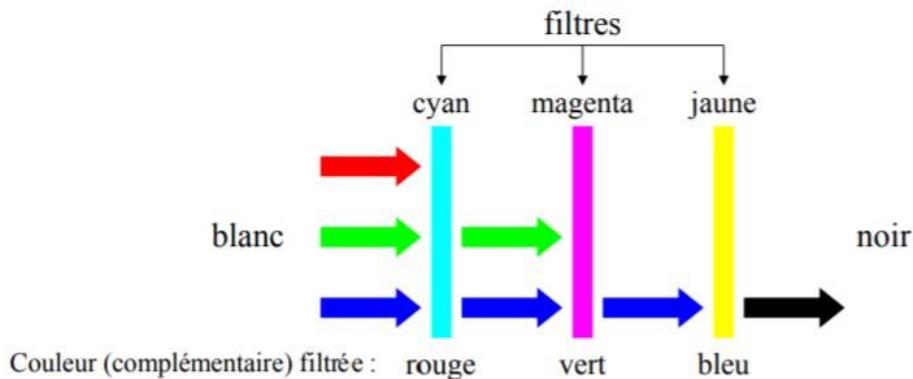


Figure 19 : Soustraction des couleurs par le filtre

Source : Thon S., 2014 [34]

2.2.4. Couleur complémentaire

Par la synthèse additive et soustractive, on peut en déduire alors que toutes les couleurs possèdent une couleur complémentaire. Cela veut dire que par l'addition d'une couleur avec sa complémentaire donnera du noir en synthèse soustractive ou du blanc en synthèse additive. On peut aussi voir autrement, que si on éclaircit un objet coloré par une source de lumière, la couleur de l'objet absorbera sa complémentaire. C'est le principe d'absorbance des couleurs.

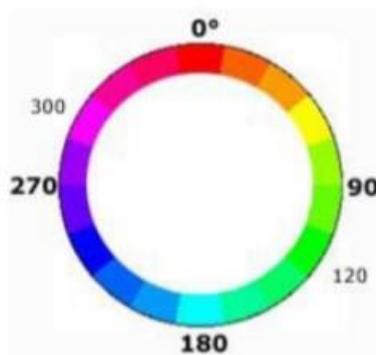


Figure 20 : cercle chromatique

Source : Thon S., 2014 [34]

Sur le cercle chromatique, les couleurs diamétralement opposées sont les couleurs complémentaires. Cela veut dire que par soustraction de la couleur blanche par une de ces couleurs donnera son complémentaire.

2.3. Certains espaces couleur de la lumière visible

Pour pouvoir quantifier une couleur, on doit recourir à des espaces mathématiques (espace plane, espace tridimensionnel, espace sphérique...).

2.3.1. L'espace couleur RVB (Rouge-Vert-Bleu) :

L'espace couleur RVB est l'un des espaces tridimensionnels où l'on peut représenter les compositions trichromatiques (RVB) d'une couleur dans un cube.

2.3.1.1. Principe du système RVB

Le système RVB, en français et RGB (Red Green Blue) en anglais, établi en 1931 par la CIE, est défini à partir de trois couleurs primaires (Guild et Wright) : C'est le modèle de couleur le plus répandu dans le domaine de l'informatique.

Ce modèle consiste à interpréter toutes les couleurs comme un mélange de trois longueurs d'ondes (700 nm, 546.1 nm et 435.8 nm). Elles correspondent aux maximums d'absorption des trois types de cônes dans les rétines.

2.3.1.2. Sous espace couleur CMJ (ou couleur secondaire)

Le CMJ (Cyan Magenta Jaune) est un espace de couleurs dans lequel on décrit les quantités de Cyan, de Magenta et de Jaune qui doivent être absorbées (et non émis comme pour le RVB) pour obtenir la couleur finale à partir d'une couleur blanche.

Principe de l'espace couleur CMJ

L'interaction des trois couleurs se manifeste comme suit :

- Si les trois quantités sont nulles, rien n'est absorbé et on obtient la couleur blanche.
- Si toutes les quantités sont maximales, tout est absorbé et on obtient la couleur noire.
- L'absorption de Cyan et de Magenta donne du Bleu.
- L'absorption de Cyan et de Jaune donne du Vert.
- L'absorption de Magenta et de Jaune donne du Rouge.

C'est le principe le plus utilisé en impression couleur.

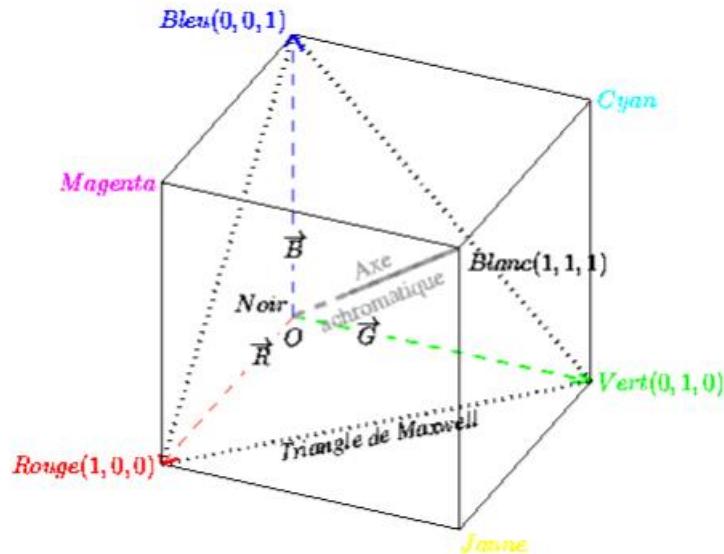


Figure 21 : Représentation cubique des couleurs RVB et CMJ;

Source : Thon S., 2014 [34]

2.3.2. L'espace couleur XYZ :

C'est un système tridimensionnel qui peut être transformé en bidimensionnel sans perdre d'information.

Le problème avec l'espace couleur RVB est qu'il ne permet pas de mesurer certaines couleurs. L'apparition d'une valeur négative du rouge fait que la couleur ne pourra pas être reproduite par le mélange trichromatique RVB, et on aperçoit que certaines couleurs de teinte « bleu -vert » sont impossibles à atteindre [15] [32].

Ces courbes correspondent à des composants X, Y, Z monochromatiques fictifs (irréalisables physiquement). Une couleur peut être alors représentée par ses coordonnées X, Y, Z dans un système à trois axes.

L'espace XYZ [32] est défini à partir d'une transformation linéaire sur l'espace RGB telle que toutes les couleurs du spectre visible soient contenues dans le triangle xyz. Ainsi, les coordonnées XYZ des couleurs naturelles ont toujours des valeurs positives [2].

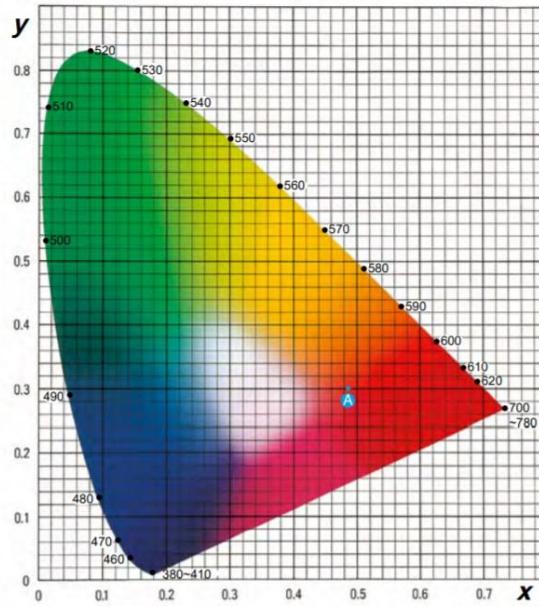


Figure 22 : Diagramme de chromaticité Yxy

Source : Konica M., 2007 [15]

2.3.2.1. Transformation du système couleur RGB en XYZ

Aux trois composants X, Y, Z on peut faire correspondre trois vecteurs directeurs normés, les vecteurs forment alors un espace vectoriel à trois dimensions appelé espace XYZ, d'origine O. [3].

Toute couleur peut alors être décrite par

$$\vec{C} = X \cdot \vec{X} + Y \cdot \vec{Y} + Z \cdot \vec{Z} \quad F. 2.03$$

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2.7690 & 1.7518 & 1.1300 \\ 1.0000 & 4.5907 & 0.0601 \\ 0.0000 & 0.0565 & 5.5943 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} \quad F. 2.04$$

2.3.2.2. Transformation de l'espace tridimensionnelle X, Y, Z en espace bidimensionnel (x, y)

La normalisation des coordonnées XYZ donne :

$$\begin{cases} x = \frac{X}{X+Y+Z} \\ y = \frac{Y}{X+Y+Z} \\ z = \frac{Z}{X+Y+Z} \end{cases} \quad F. 2.05$$

Etant donné que $x + y + z = 1$, la transformation inverse est donnée par

$$X = x \cdot \frac{Y}{y} \quad \text{et} \quad Z = (1 - x - y) \cdot \frac{Y}{y} \quad F. 2.06$$

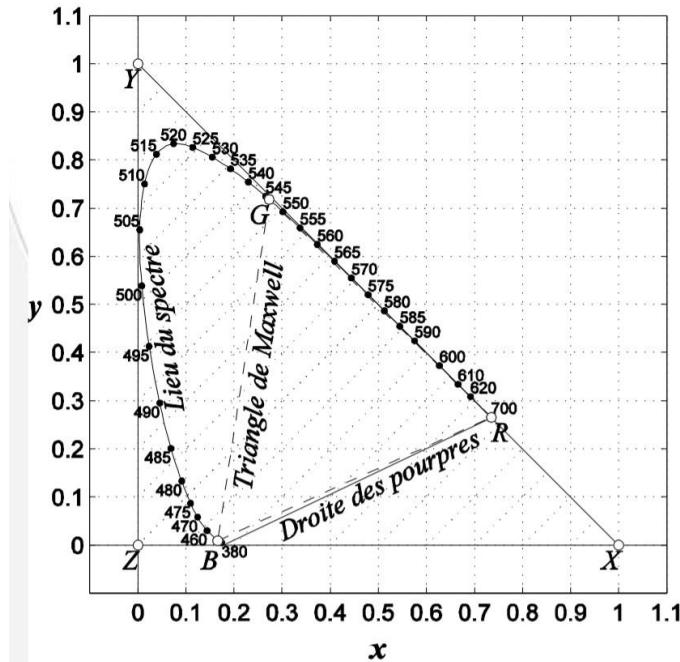


Figure 23 : Diagramme de chromaticité à Y constante

Source : Alain T., 2005 [3]

On peut donc passer dans un système à deux dimensions sans perdre d'informations, appelé représentation (x, y). [32].

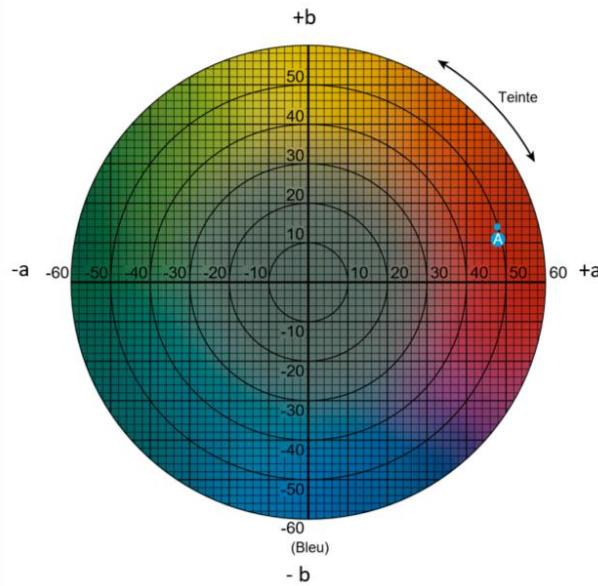
2.3.3. L'espace couleur $L^*a^*b^*$

Cet espace est l'un des espaces sphériques de représentation de la couleur.

L'espace colorimétrique $L^*a^*b^*$, communément appelé CIELAB, est un espace de couleur uniforme défini par la CIE en 1976. Le repérage se fait à l'aide de coordonnées cartésiennes $L^*a^*b^*$. Il est basé sur les composantes trichromatiques XYZ définies par la CIE en 1931. Ce système est couramment utilisé dans l'industrie de peinture et certains appareils commerciaux afin de pouvoir reproduire une couleur [10].

L^* : Désigne la luminance (anologue à la clarté)

a^* et b^* sont les coordonnées de chromaticité. Ils indiquent la direction des couleurs.



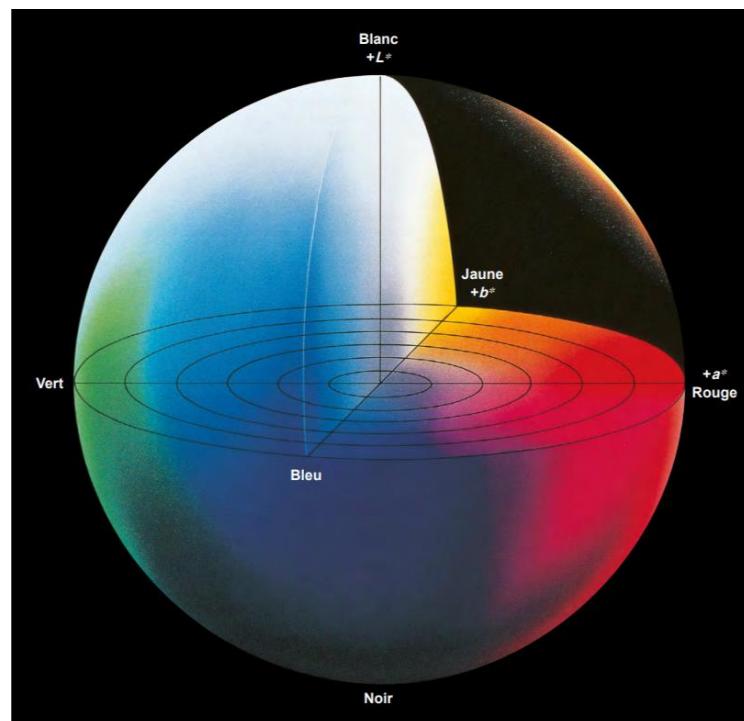
*Figure 24 : Diagramme de chromaticité $L^*a^*b^*$*

Source : Konika M., 2007 [15]

$+a^*$ va vers le rouge et $-a^*$ va vers le vert.

$+b^*$ va vers le jaune, $-b^*$ va vers le bleu.

Plus les valeurs de a^* et b^* augmentent, plus le point s'éloigne du centre. On peut ainsi reproduire une couleur par la combinaison des teintes rouge, jaune, bleue, verte, blanche et noire.



*Figure 25 : Représentation 3D de l'espace couleur $L^*a^*b^*$*

Source : Konika M., 2007 [15]

$+L^*$ désigne une couleur plus laminante ou plus claire, tandis que $-L^*$ désigne une couleur plus sombre.

Avec

$$0 \leq L^* \leq 100$$

$$-128 \leq a^* \leq 127$$

$$-128 \leq b^* \leq 127$$

2.3.3.1. Transformation du système couleur RVB en $L^*a^*b^*$

Il n'y a pas de transformation directe du système RVB en $L^*a^*b^*$, le passage doit se faire par le système XYZ. Elle est basée directement sur le système XYZ, le système $L^*a^*b^*$ requiert une couleur de référence (généralement du blanc pur), de coordonnées X_n ; Y_n ; et Z_n afin de la situer par rapport à cette couleur,

Avec :

$$\begin{cases} L^* = 116 \left(\frac{Y}{Y_0} \right)^{\frac{1}{3}} - 16 & \text{si } \frac{y}{Y_0} > 0,008856 \\ L^* = 903,3 \left(\frac{Y}{Y_0} \right) & \text{si } \frac{Y}{Y_0} < 0,008856 \\ a^* = 500 \left[f \left(\frac{X}{X_0} \right) - f \left(\frac{Y}{Y_0} \right) \right] \\ b^* = 200 \left[f \left(\frac{Y}{Y_0} \right) - f \left(\frac{Z}{Z_0} \right) \right] \end{cases} \quad F. 2.07$$

$$\text{Avec } \begin{cases} f(U) = U^{\frac{1}{3}} & \text{si } U > 0,008856 \\ f(U) = 7,787U + \frac{16}{116} & \text{si } U < 0,008856 \\ \text{pour } U = \frac{X}{X_0} \text{ ou } \frac{Y}{Y_0} \text{ ou } \frac{Z}{Z_0} \end{cases}$$

Source : Colantoni P., 2004 [6]

CHAPITRE III : LES ELEMENTS CONSTITUTIFS D'UN SPECTROPHOTOMETRE

3.1. Les éléments constitutifs de base d'un colorimètre

Dans un colorimètre typique, on trouve une source lumineuse, un récipient d'échantillon et un détecteur. Ils sont disposés en ligne droite. La lumière de la source traverse l'échantillon dans une cuvette et atteint le détecteur ou un capteur qui transforme les grandeurs physiques en grandeur électrique [36].

3.1.1. La source de lumière

Comme source de lumière, les colorimètres sont munis de LED, qui émettent une lumière de longueur d'onde connue.

3.1.1.1. Les diodes électroluminescente DEL ou LED

La lumière produite par les LED de faible puissance est causée par le transfert de charges d'électrons et de trous à un niveau d'énergie plus élevé et produira autrement des photons. Ces photons seront vus dans l'œil sous forme de lumière.

Les LED sont des substituts idéaux pour remplacer les sources lumineuses encombrantes et à forte consommation d'énergie telles que les lampes tungstène-halogène ou au deutérium, qui sont couramment utilisées en conjonction avec des détecteurs [20].

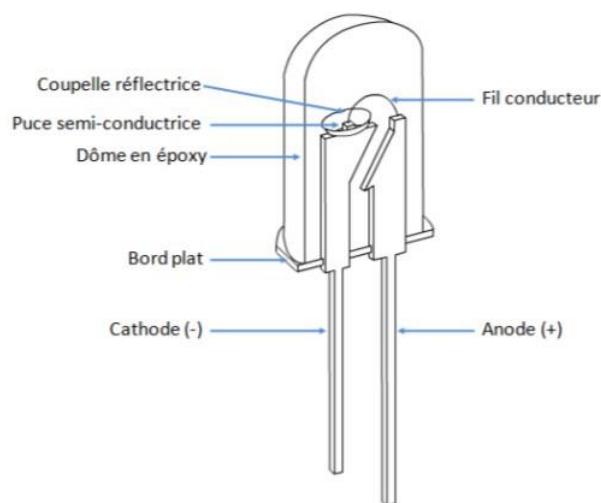


Figure 26 : Schéma de principe d'une LED de type 5 mm vue en coupe

Source : Montag E. D., 2009 [22]

Les LED mono couleurs

Les diodes électroluminescentes mono couleurs sont des composants qui émettent de la lumière avec une longueur d'onde caractéristique. La lumière émise n'est pas vraiment monochromatique, comme dans les spectrophotomètres, mais elle a quand même un maximum d'émission très net pour une faible étendue de longueurs d'onde. Par exemple, une diode rouge peut avoir une émission maximale à 625 nm et une diode bleue à 470 nm.

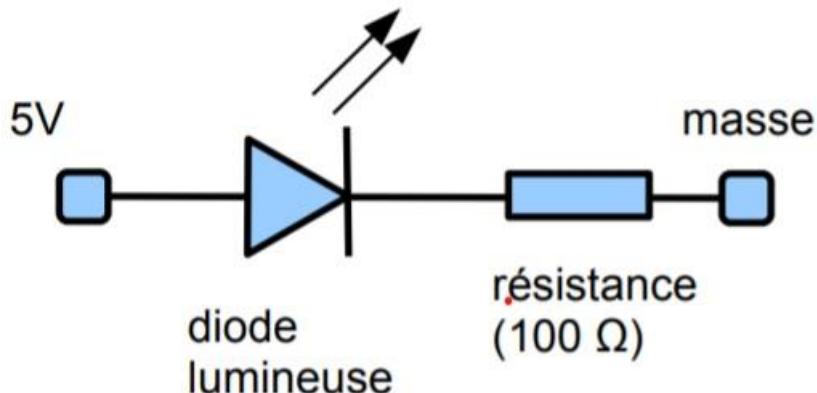


Figure 27 : Branchement d'une diode lumineuse avec une résistance de protection

Source : Dieumegard P., 2014 [7]

Ces diodes lumineuses sont assez fragiles sur le plan électrique : il ne faut pas que l'intensité qui les traverse soit trop forte, sinon elles sont détériorées et arrêtent d'émettre de la lumière, et normalement il faut mettre une résistance en série pour éviter cette surintensité. L'intensité prévue pour les diodes lumineuses est environ 20mA.

Les LED RGB

Les LED RGB sont des LED qui peuvent émettre trois couleurs en même temps. Avec ces trois couleurs dites primaires mélangées en proportion variable, on peut créer plus d'1 million de couleurs.

Les LED RVB ont une plage de longueur d'onde :

- La Bleue comprise entre 400 à 500 nm
- La Verte de longueur d'onde entre 450 et 600 nm
- Le rouge se situe entre 600 à 700 nm

La bleue a le plus d'intensité par rapport au rouge et au verte.

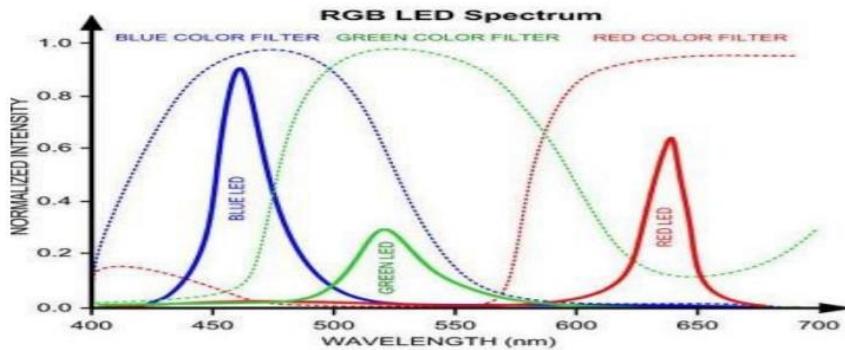


Figure 28 : Spectre de lumière RVB

Source : Yulkifli et al, 2019 [36]

Au total, ils couvrent un intervalle de longueur d'onde allant de 380 à 780 nm selon le microcontrôleur qui le dirige.

Tableau 1 : L'absorbance des lumières face aux différentes longueurs d'onde

Longueur (nm)	Couleur absorbée	Solution colorée
380 - 435	Violet	Vert-jaune
435 - 480	Bleu	Jaune
480 - 490	Bleu-vert	Orange
490 - 500	Vert-bleu	Rouge
500 - 560	Vert	Violet
560 - 580	Vert-jaune	Violet
580 - 595	Jaune	Bleu
595 - 650	Orange	Bleu-vert
650 - 780	Rouge	Vert-bleu

Source : Le Quoc H. et al, 2020 [18]

Le tableau de Le Quoc nous montre toutes les plages d'absorbance de la LED RVB et les répartitions des intervalles de longueur d'onde des couleurs émises par cette LED.

3.1.2. Les capteurs photosensibles

Les capteurs photosensibles sont des capteurs qui peuvent transformer la variation de luminosité proportionnelle en signal électrique.

Les

capteurs les plus utilisés sont :

3.1.2.1. La photodiode

Une photodiode est un détecteur semi-conducteur qui se compose d'un cristal semi-conducteur hétérogène de structure PN placé entre deux électrodes. Ces deux électrodes sont reliées à une source de tension par l'intermédiaire d'une résistance de charge R comme l'illustre la figure ci-dessous [5].

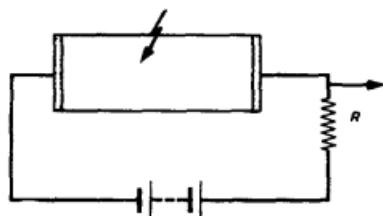


Figure 29 : Schéma d'emploi d'une photodiode

Source : Brullot B. et al., 1997 [5]



Photo 2 : Photo d'une photodiode

Source : Auteur

3.1.2.2. La Résistance Dépendante de la Lumière (RDL)

Une Résistance Dépendante de la Lumière ou RDL est une résistance dont sa valeur diminue avec la lumière incidente. En absence absolue de la lumière, les valeurs de la résistance tendent vers « l'infinie », c'est-à-dire, une valeur très élevée [8].

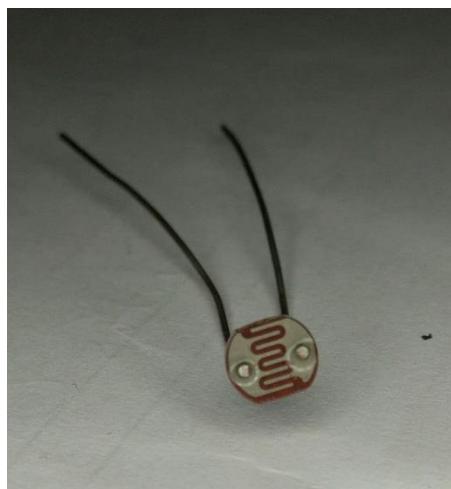


Photo 3 : Photo d'une photorésistance ou résistance dépendant de la lumière

Source : Auteur

3.1.2.3. Le phototransistor

Le phototransistor est la combinaison d'une photodiode et de son amplificateur. En dirigeant la lumière sur la jonction collecteur-base (qui est polarisée en inverse) on génère un courant base d'origine photonique qui est amplifié par le gain en courant β du transistor. Si la base est accessible de l'extérieur, une polarisation du transistor est possible. On a :

$$E = (I_p + I_B)(\beta + 1) \quad F.3.01$$

I_p courant base d'origine photonique

I_B courant base extérieure

I_E : courant émetteur

β : gain en courant du transistor

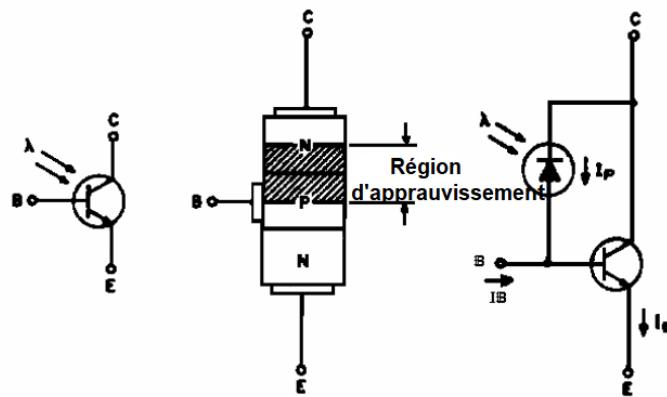


Figure 30 : Schéma d'un phototransistor

Source : Redoutey J., 2013 [28]

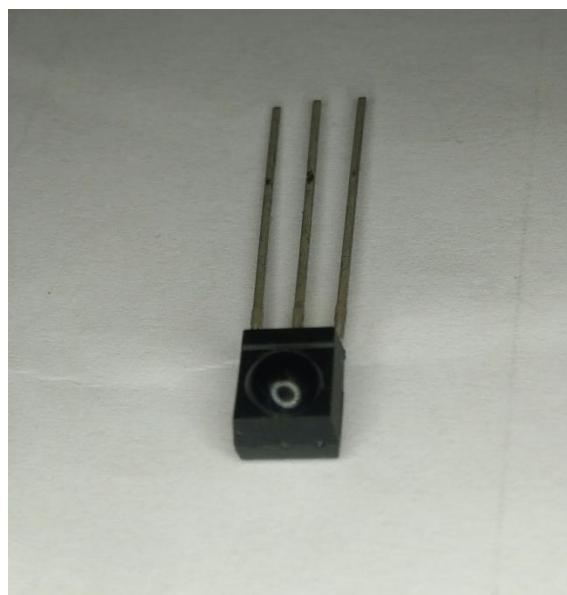


Photo 4 : Photo d'un phototransistor

Source : Auteur

On remarque que la sensibilité et la réponse du phototransistor varient avec le gain du transistor, c'est-à-dire avec le niveau de courant, la polarisation éventuelle et la température. La vitesse de réponse du phototransistor est très inférieure à celle d'un transistor équivalent. Ceci est dû à la capacité de la photodiode d'une part et associée à l'impédance d'entrée élevée du transistor d'autre part.

De ce fait, le temps de réponse du dispositif est essentiellement gouverné par la constante de temps d'entrée de l'amplificateur. Ceci est en général pour la plupart des photos détecteurs et l'on peut dire que : plus le gain est élevé, plus la réponse est lente. [28]

3.1.3. La cuve à solution

Les cuves doivent être transparentes à la lumière qui les traverse. Elles font presque toutes un centimètre de trajet optique, mais il y a des exceptions comme 2, 3, 4 ou 5 cm de trajet optique selon l'étude.

Selon la nature du matériau utilisé : plastique (polystyrène ou PMMA), verre ou quartz, le domaine de longueur d'onde utilisable est différent [21].

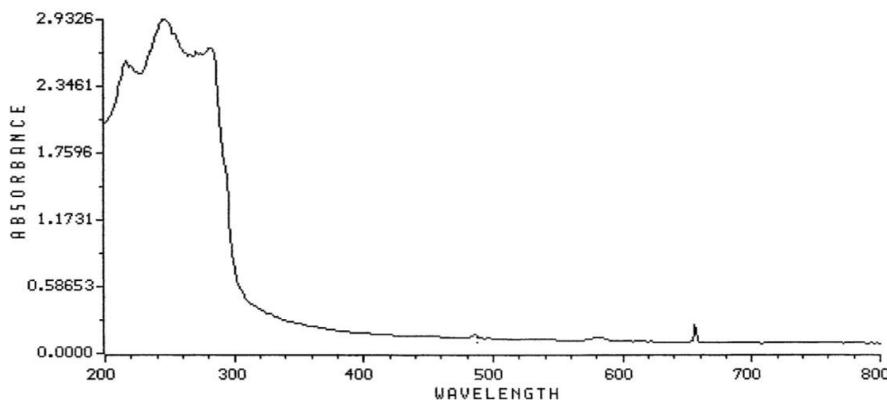


Figure 31 : Absorption d'une cuve plastique pleine d'eau par rapport à l'air dans l'UV et le visible (entre 200 et 800 nm).

Source : Meyer R. 1996 [21]

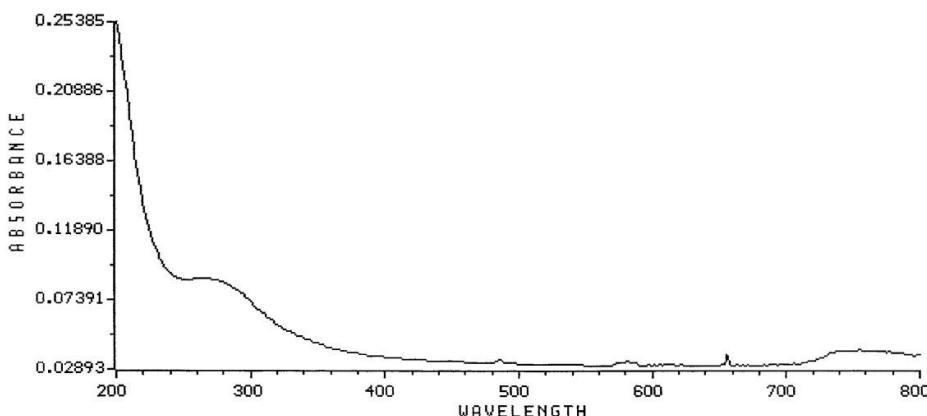


Figure 32 : Absorption d'une cuve en quartz pleine d'eau par rapport à l'air dans l'UV et le visible (entre 200 et 800 nm).

Source : Meyer R. 1996 [21]

3.1.4. Le système embarqué

3.1.4.1. Définition

Un système embarqué est un système électronique et informatique autonome qui est dédié à une tâche bien précise [33].

Un

système embarqué est une combinaison de matériels et de logiciels permettant de remplir une ou plusieurs fonctions spécifiques avec des contraintes plus ou moins sévères telles que la consommation, la température, la taille, les performances [16].

3.1.4.2. Caractéristiques

Un système embarqué doit répondre à certains critères pour être validé comme système embarqué :

❖ Des ressources limitées

Les pièces et matériels utilisées doivent être à disposition de toutes, faciles à acquérir.

❖ Système principalement numérique

Le système ne traite que des valeurs numériques et non d'autres valeurs.

❖ Le moins cher possible

Comme il doit être à la portée de toute personne, le prix sera donc proportionnel à sa performance.

❖ Faible consommation

Le système doit fonctionner avec une faible alimentation ; comme l'utilisation de batterie d'emmagasinassions d'énergie.

❖ Dimensionnement petit

Pour que le mot embarqué tienne, sa taille doit être minimale, et il doit avoir un faible poids. L'ensemble avec les composants doivent tenir sur une faible surface. [4]

3.1.4.3. Architecture du système embarqué

Un système embarqué doit contenir une architecture générale :

❖ Un microprocesseur ou microcontrôleur

C'est celui qui traite toutes les données. Il est le « cœur » du système. C'est celui qui désigne la performance de l'appareil. Il commande tous les composants, calcule toutes les valeurs, ...

❖ Des entrées et sorties

Une broche de communication, permettant au microcontrôleur de récolter ou d'envoyer des données.

Une mémoire

Le mémoire permet à la machine de stocker des valeurs qui seront nécessaires pour des calculs ou des traitements. Le système embarqué ne possède pas une importante capacité de stockage.

Une interface Humain machine IHM

Pour qu'il y a communication entre la machine et l'humain, les langages doivent être transformés et interprétés, de la machine à l'humain ou l'inverse.

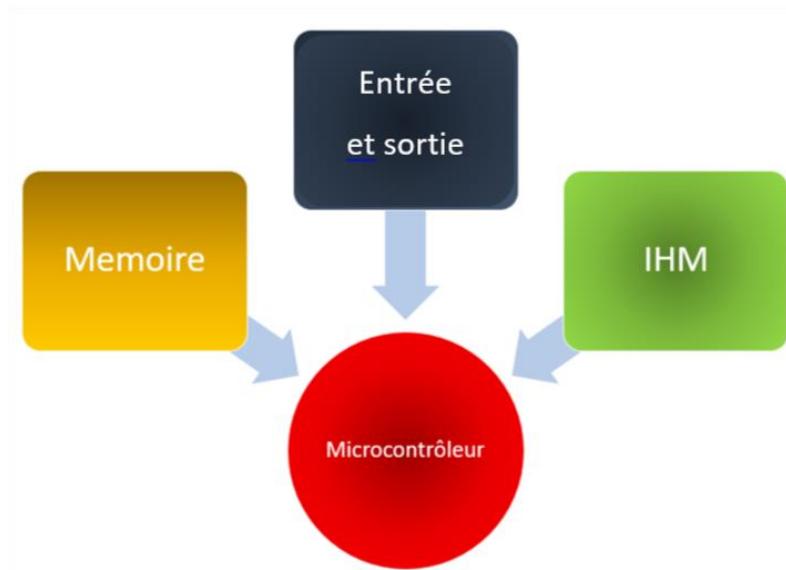


Figure 33 : Architecture générale d'un système embarqué

Source : Auteur

3.2. Les éléments complémentaires

3.2.1. L'interface utilisateur

L'interface utilisateur est le point de communication de l'appareil avec l'utilisateur ou vice versa. Cela peut être un écran, un afficheur, un signal lumineux ou sonore. Il permet à la machine de communiquer avec l'utilisateur. Pour le sens inverse, l'utilisateur aura besoin de : ligne de code, de bouton, ou différents détecteurs afin de transformer les langages utilisateurs en langages machines.

3.2.2. Les complémentaires du circuit électrique

3.2.2.1. Résistance statique

Ce sont des résistances électriques dont la valeur est constante. Elles peuvent être utilisées comme résistance de limitation de courant. Elles possèdent des codes couleurs pour connaître leur valeur, exprimée en Ohm (Ω). Relier par le courant et la tension par la loi d'ohm

$$U = R \cdot I$$

F.3.02

Avec :

- ❖ U : tension aux bornes du dipôle en Volt (V). C'est la différence de potentiel aux bornes du dipôle, généralement générée par un générateur.
- ❖ I : intensité du courant traversant le dipôle en Ampère (A). Elle est proportionnelle à la quantité de charge électrique (électron ou ion) traversant le circuit
- ❖ R : résistance en Ohm (Ω).

3.2.2.2. Résistance variable

Ce sont des résistances électriques dont les valeurs peuvent varier sous l'action extérieure. Comme :

- ❖ Les potentiomètres : dont la résistance peut varier par une action mécanique externe.
- ❖ Les photorésistances : où la valeur peut varier par l'influence de la lumière ou la quantité de lumière incidente.

PARTIE II

MATERIELS

ET

METHODES



CHAPITRE IV : RÉALISATION DU REFLECTOMETRE

Le réflectomètre est composé généralement de trois grandes unités : le blocus optique, le système embarqué et l'interface utilisateur.

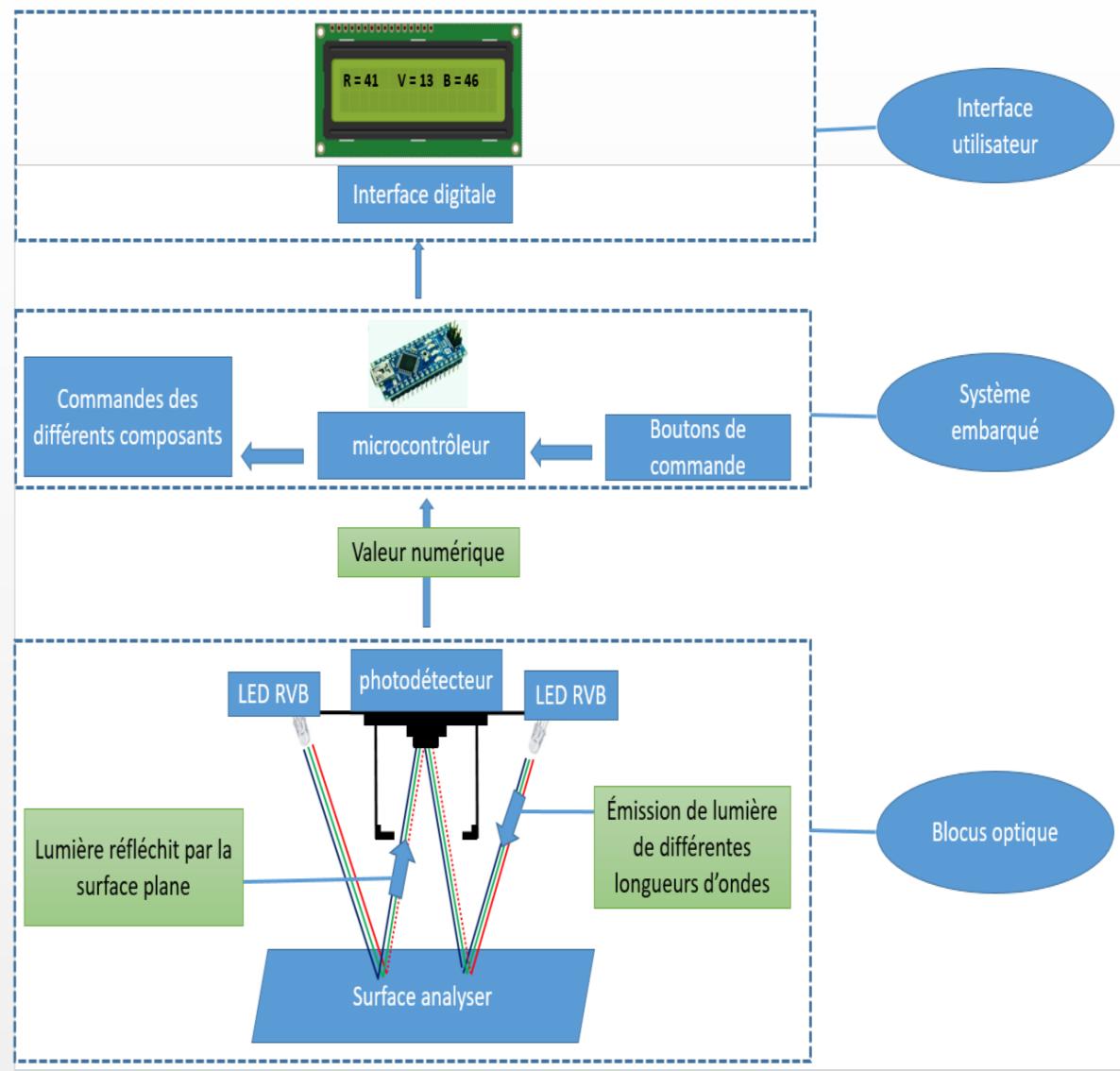


Figure 34 : Diagramme de fonctionnement du réflectomètre

Source : Auteur

4.1. Le blocus optique

4.1.1. La source de lumière

La lumière utilisée est le RVB (Rouge-Vert-Bleu) générée par une LED à cathode commune. Cette lumière produite couvre une plage de longueur d'onde allant de 380 à 780nm.

Toutes les bandes de spectre peuvent être modifiées en mélangeant en différentes proportions les trois couleurs de la LED.

4.1.1.1. Caractéristiques de la LED RVB

La LED RVB possède 4 broches pour son branchement et pour la commande de la composition de couleurs voulues : une pour la commande du rouge, la deuxième pour le vert, la troisième pour le bleu et la dernière broche sert d'anode commune.

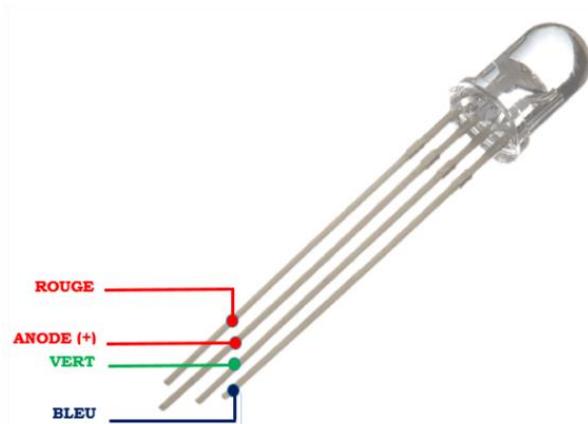


Figure 35 : Schéma de la LED RVB à anode commune utilisée avec ses broches

Source : Auteur

La LED peut fonctionner sous une tension de 5V mais nécessite des résistances de limitation de courant sur chaque broches de commande des couleurs.

4.1.1.2. Branchement de la LED sur un microcontrôleur arduino

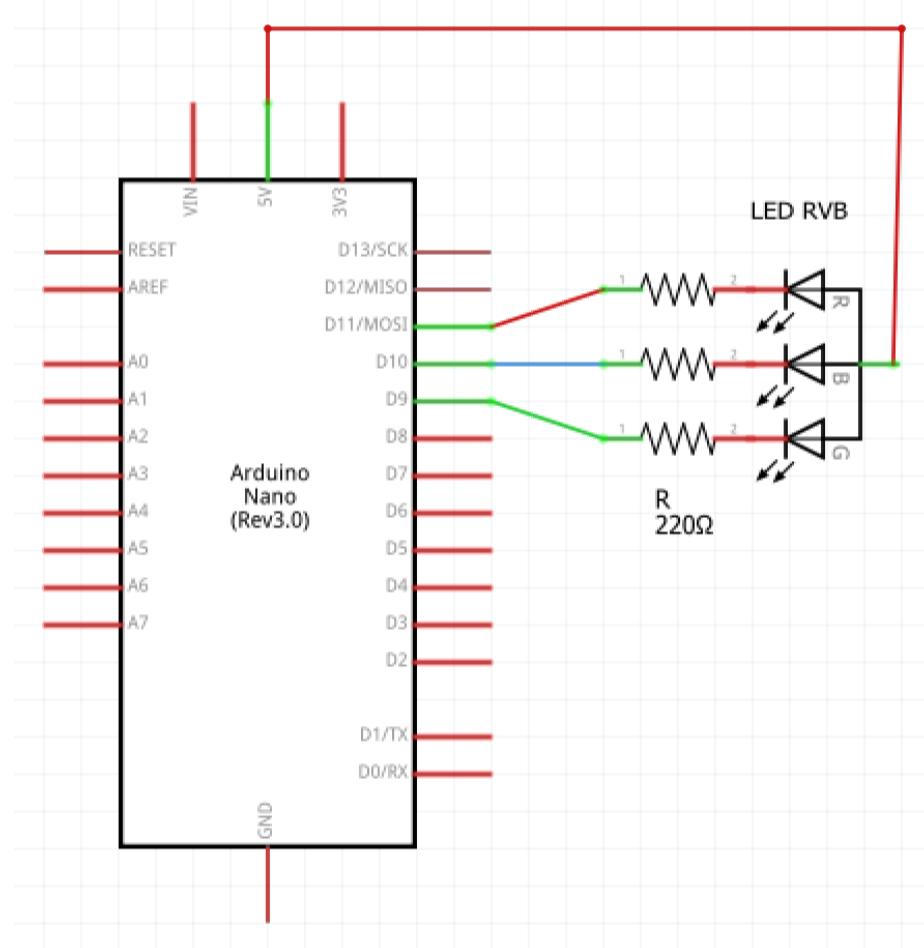


Figure 36 : Vue schématique du montage du LED RVB à anode commune sur un microcontrôleur arduino nano

Source : Auteur

Lors du branchement, l'anode commune est reliée à la broche 5V de la carte arduino. Chaque broche cathodique de commande (rouge, vert, bleu) de la LED est branchée en série avec une résistance de 220Ω puis reliée aux broches numérotées 11, 10, 9 du microcontrôleur arduino.

4.1.2. Le capteur photosensible

Le capteur photosensible transforme les données physiques, transmises par la réflexion de la lumière générée par les LED sur une surface plane, en données numériques interprétables par le microcontrôleur. Le capteur photosensible utilisé est sous le nom de référence Temt6000.

4.1.2.1. Caractéristique du Temt6000

Ce capteur photosensible comporte un phototransistor NPN comme composant capteur de quantité de lumière. Il a une dimension de 1,5 x 0,8 mm et possède une portée de détection entre 440 et 800 nm avec 570nm comme pic maximal du spectre.

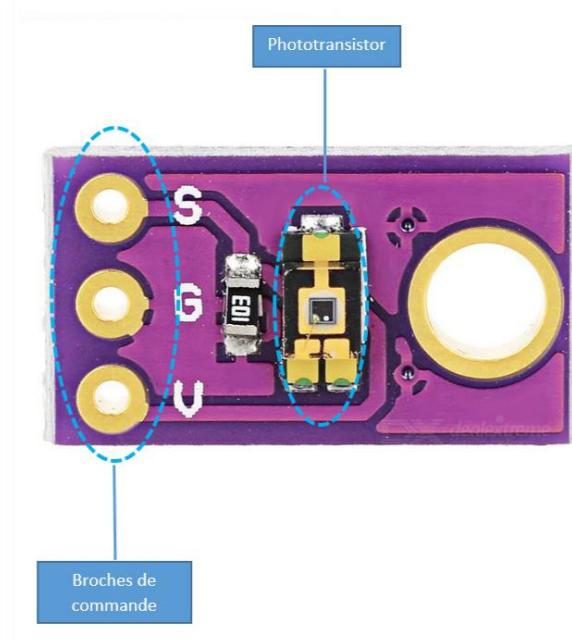


Photo 5 : Photo du photodétecteur temt6000 utilisé

Source : Auteur

4.1.2.2. Branchement du photodétecteur sur le microcontrôleur

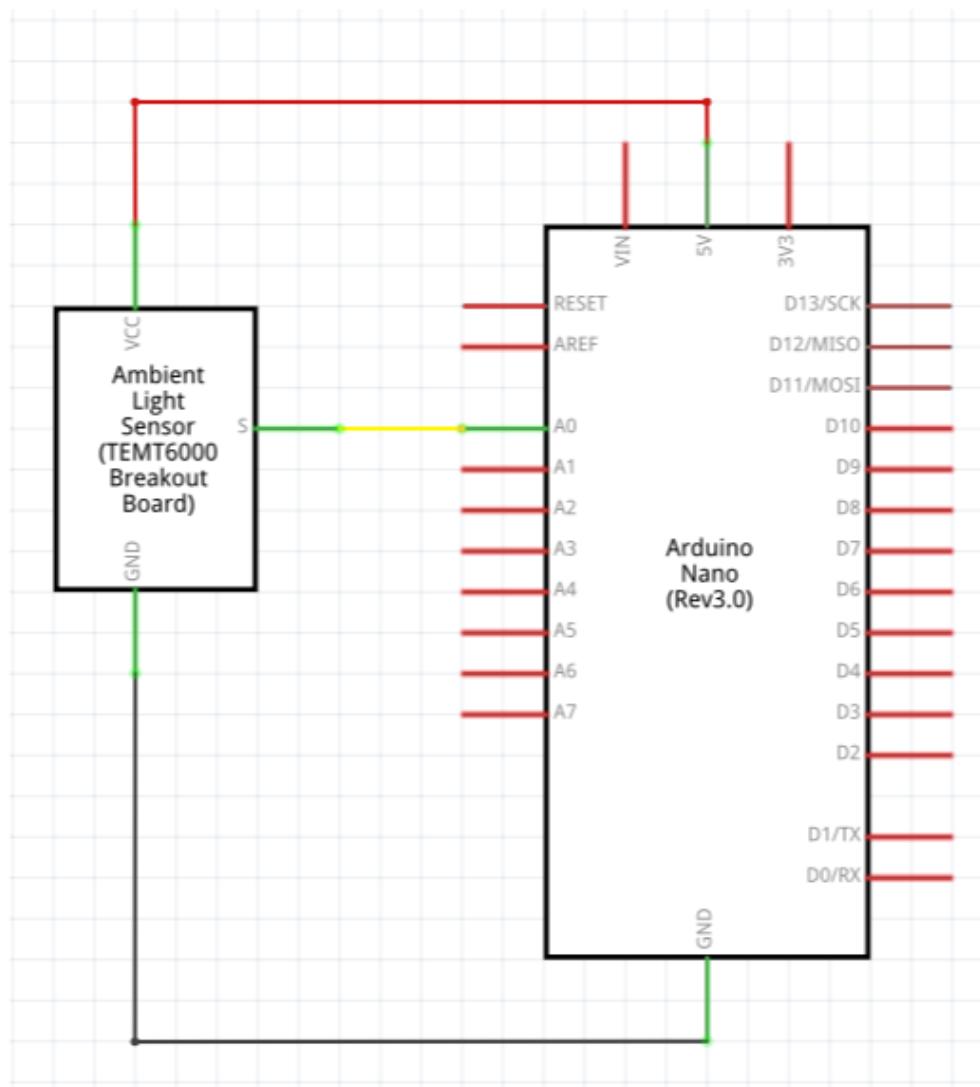


Figure 37 : Vue schématique du branchement du photodétecteur su la carte arduino

Source : Auteur

Lors du branchement, la broche sortie du photodétecteur est connecté sur la broche numérotée A0 de l'arduino. Les autres broches sont des alimentations sur le 5V et le GND.

4.1.3. Photo du blocus optique monté



Photo 6 : Photo du bloc optique vue de profil dans l'enceinte noire

Source : Auteur

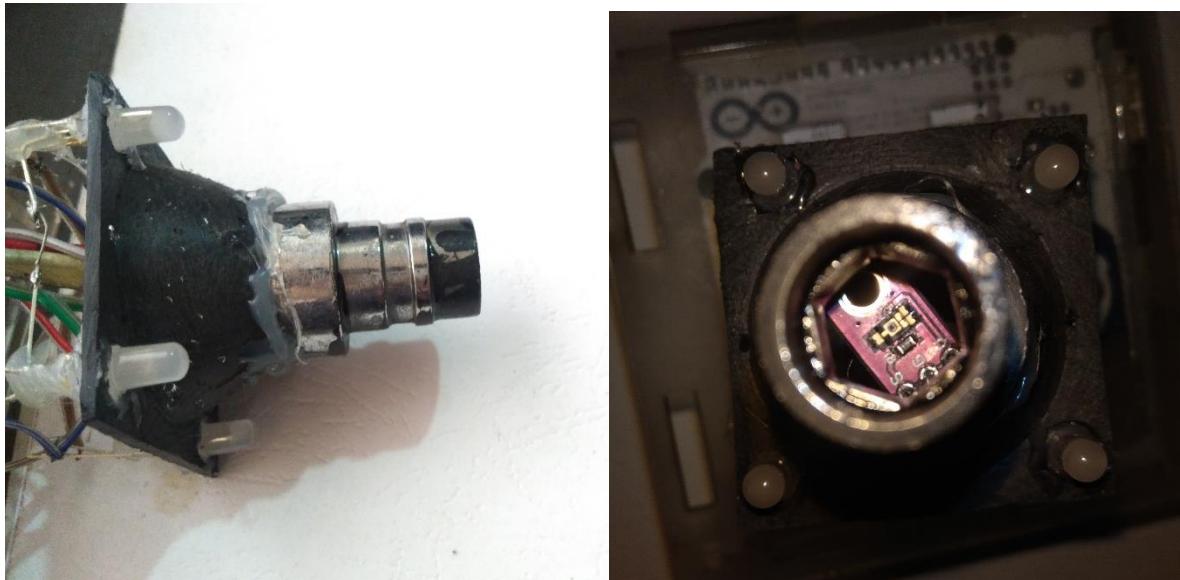


Photo 7 : Photo des 4 LED montées avec le capteur photosensible

Source : Auteur

Précaution à prendre :

Toute l'enceinte du bloc optique est recouverte de peinture noir mat pour éviter le maximum de réflexion de lumière sur les parois. Le photodétecteur est placé dans un canon optique afin que seule la lumière réfléchie sur la surface à analyser arrive sur ce dernier.

4.2. Le système embarqué

4.2.1. Le microcontrôleur

Le microcontrôleur utilisé est un arduino Nano, un des variant de la gamme arduino. Ce microcontrôleur a une dimension de 3,5cm x 1,7cm et fonctionne sous une tension de 9V.



Photo 8 : Microcontrôleur arduino nano

Source : Auteur

4.2.1.1. Branchement du microcontrôleur avec les composants

Le microcontrôleur est branché avec les composants du bloc optique. Il récolte les valeurs du photodétecteur, les interprète et effectue les traitements de données nécessaires afin de le transformer en pourcentage de rouge, de vert et de bleu. Le branchement se fait comme suit :

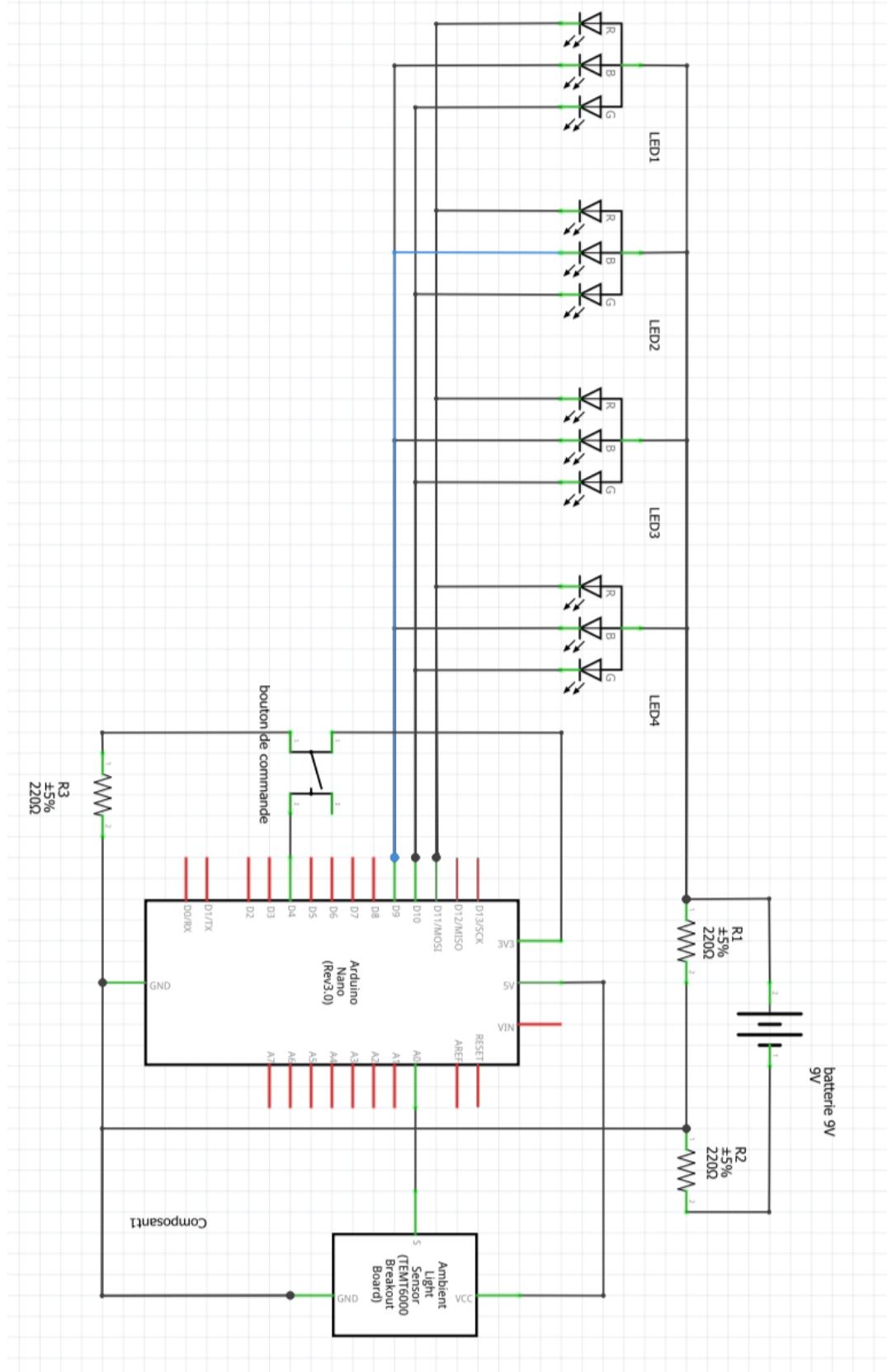


Figure 39 : Schéma du branchement de l'arduino avec les composants optiques

Source : Auteur

On utilise 4 LED afin de couvrir uniformément de lumière, toute la surface à analyser.

Les LED sont alimentées avec une batterie de 9V car le microcontrôleur ne suffit pas à alimenter toutes les 4 LED et le capteur photosensible en même temps. Le branchement est illustré comme suit:

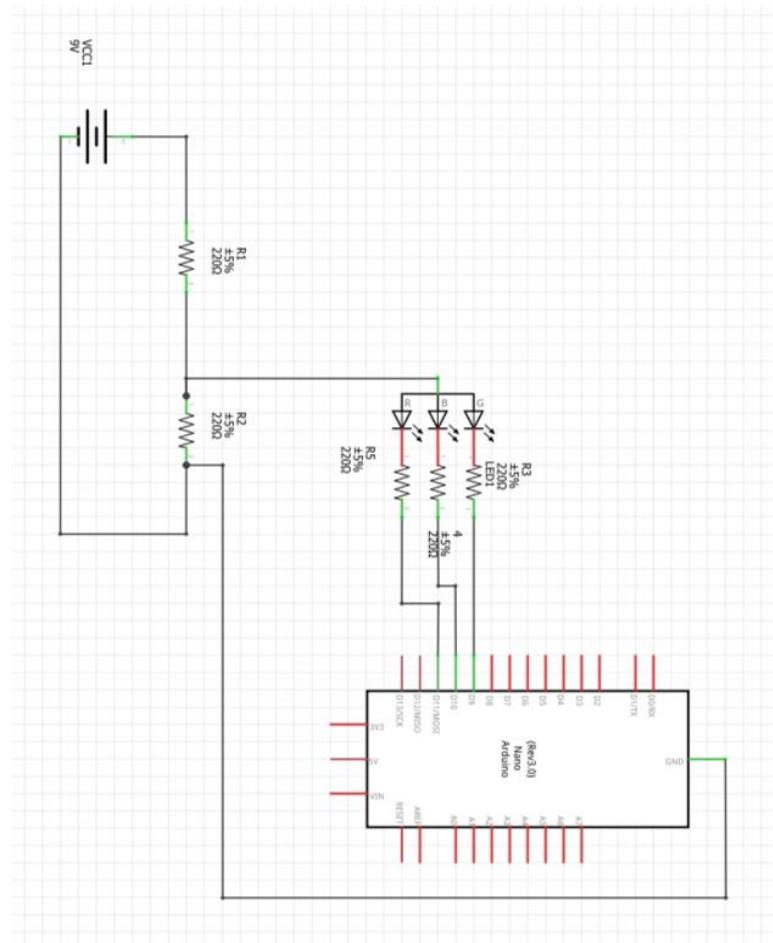


Figure 40 : Branchement des LED RVG sur une carte arduino alimentée avec une batterie de 9V

Source : Auteur

Le microcontrôleur commande les LED de s'allumer, successivement, sur le rouge puis le vert et enfin le bleu. Pendant ce temps, le photodétecteur mesure les intensités lumineuses réfléchies.

4.3. L'interface utilisateur

4.3.1. L'écran LCD

Après les calculs du microcontrôleur, l'écran LCD affiche les résultats de l'analyse de prise de couleur.

4.3.1.1. Branchement de l'écran LCD sur le microcontrôleur (carte arduino)

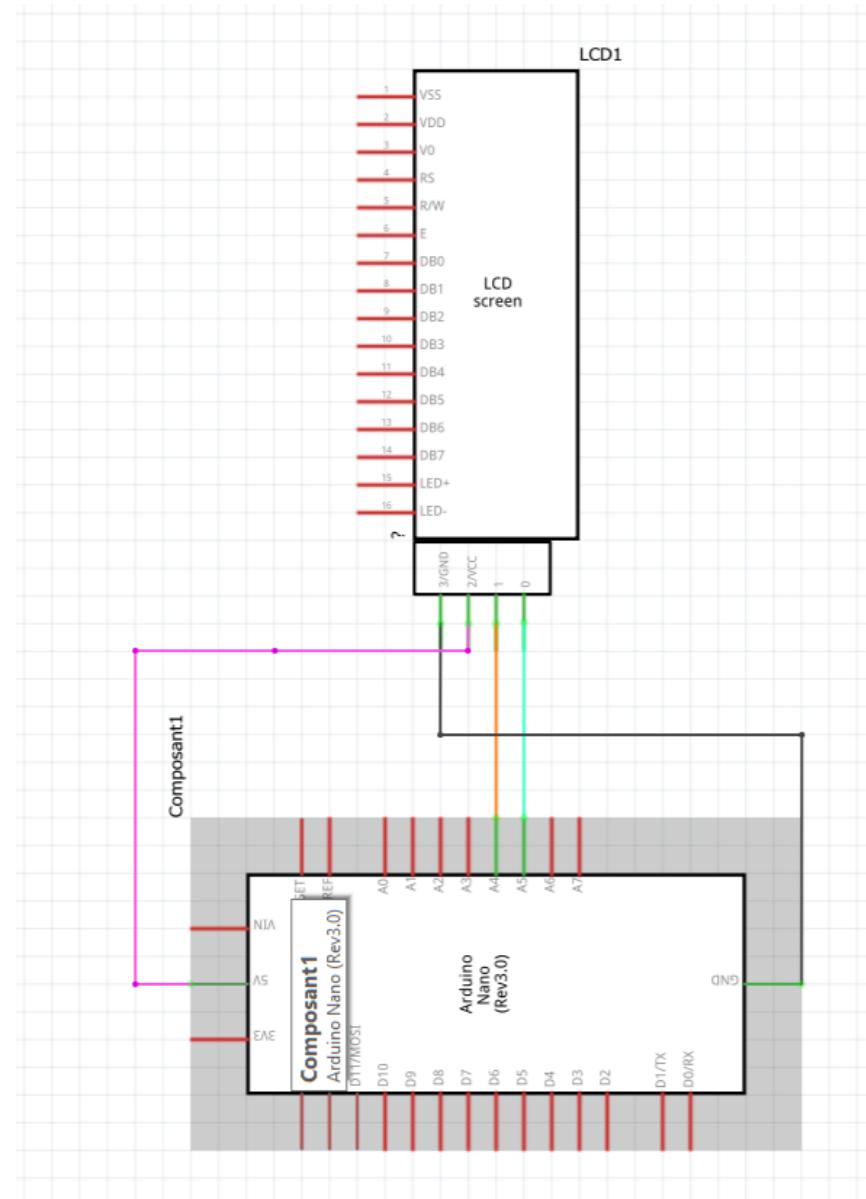


Figure 41 : Schéma du branchement de l'écran LCD sur le microcontrôleur

Source : Auteur

Les broches SDA et SLC de l'écran LCD sont branchées respectivement sur les broches A4 et A5 de la carte arduino.

4.3.2. Le bouton de commande

Le bouton de commande utilisé est un bouton poussoir à 4 broches. Il se connecte sur la broche numéro 4 de la carte arduino et sert de déclencheur lors de l'analyse.

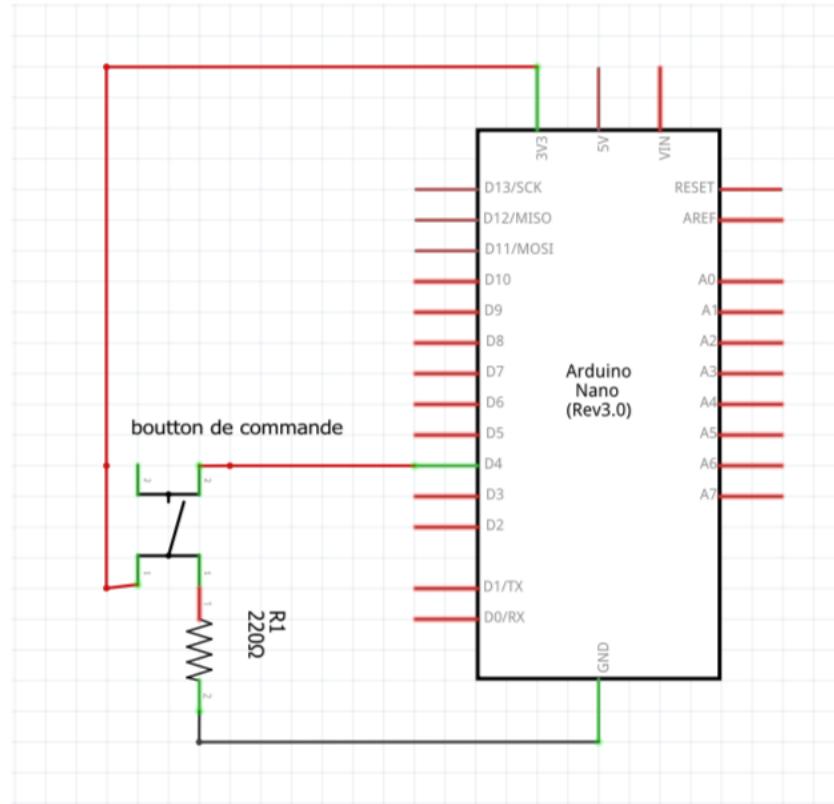


Figure 42 : Branchement du bouton poussoir pour la commande

Source : Auteur

4.2. Fonctionnement de l'ensemble

4.2.1. Montage complet de l'appareil

L'ensemble est monté comme suit pour réaliser l'appareil : les 4 LED qui forment un carré, la photodétecteur au centre des LED ; formant ainsi le bloc optique ; la carte arduino pour le système embarqué ; l'écran et le bouton de commande pour l'interface de communication utilisateur.

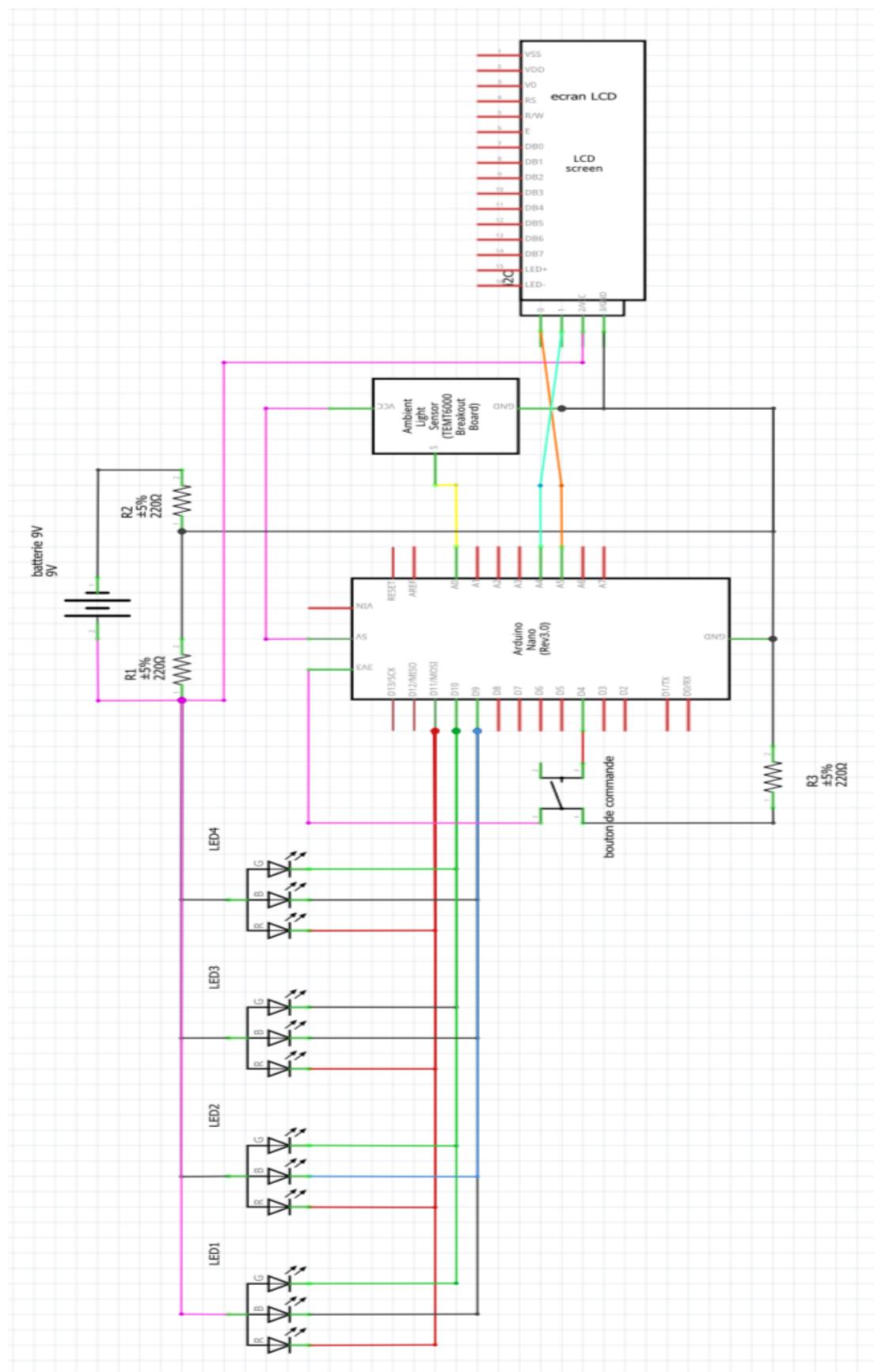


Figure 43 : Câblage du circuit complet constituant l'appareil

Source : Auteur

Un générateur 9V est nécessaire pour alimenter tous les composants car la carte arduino uno ne sera pas capable de tous les alimenter avec les 4 LED RVB et l'écran LCD. Il y aura une sous tension et les composants ne fonctionneraient pas correctement, d'où la nécessité d'ajouter une pile 9V, que l'on peut communiquer directement avec la câble d'alimentation de la carte arduino. Ainsi le générateur est monté en dérivation avec la carte et les composants.

4.2.2. Fonctionnement de l'appareil

Pour mesurer les valeurs de pourcentage des couleurs primaires, l'appareil procède comme suit :

4.2.2.1. Etalonnage

Une surface blanche est d'abord illuminée par les LED en guise d'étalon. Premièrement par une lumière rouge. Le photodétecteur mesure ensuite l'intensité lumineuse réfléchie sur lui. Il fait 20 mesures sur la même couleur et envoie ensuite toutes les valeurs au microcontrôleur qui calcule les valeurs moyennes du capteur et la stocke comme étalon de rouge. Ensuite les LED émettent une lumière verte, l'opération est la même avec la prise de 20 valeurs et le calcul de la valeur moyenne. Enfin les LED émettent une lumière bleue que le capteur capte et dont le microcontrôleur enregistre la valeur moyenne.

4.2.2.2. Mesure de la couleur à analyser

Comme pour la mesure sur la surface blanche, les LED illuminent successivement plusieurs fois sur les trois couleurs et le microcontrôleur enregistre la valeur moyenne pour chaque couleur. Il compare ensuite les valeurs de chaque couleur avec celui de l'étalon. En prenant les valeurs de l'étalon comme valeur maximum ou 100%, on peut connaître les valeurs des 3 couleurs RVB. Ces valeurs sont entre 0 et 255. L'appareil stocke ces valeurs et passe au calcul suivant.

4.2.2.3. Transformation des valeurs en espace XYZ puis en L*a*b*

Afin de connaître les valeurs en espace L*a*b*, on passe d'abord en espace XYZ dont la formule de passage est :

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2.7690 & 1.7518 & 1.1300 \\ 1.0000 & 4.5907 & 0.0601 \\ 0.0000 & 0.0565 & 5.5943 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R \\ V \\ B \end{bmatrix}$$

Puis, en obtenant les valeurs X, Y, Z, on procède par une deuxième transformation, en espace L*a*b*.

Les formules de passage sont :

$$\begin{cases} L^* = 116 \left(\frac{Y}{Y_0} \right)^{\frac{1}{3}} - 16 & \text{si } \frac{y}{Y_0} > 0,008856 \\ L^* = 903,3 \left(\frac{Y}{Y_0} \right) & \text{si } \frac{Y}{Y_0} < 0,008856 \\ a^* = 500 \left[f \left(\frac{X}{X_0} \right) - f \left(\frac{Y}{Y_0} \right) \right] \\ b^* = 200 \left[f \left(\frac{Y}{Y_0} \right) - f \left(\frac{Z}{Z_0} \right) \right] \end{cases} \quad F.4.01$$

Avec

$$\begin{cases} f(U) = U^{\frac{1}{3}} & \text{si } U > 0,008856 \\ f(U) = 7,787U + \frac{16}{116} & \text{si } U < 0,008856 \\ \text{pour } U = \frac{X}{X_0} \text{ ou } \frac{Y}{Y_0} \text{ ou } \frac{Z}{Z_0} \end{cases}$$

Avec $0 \leq L^* \leq 100$

$$-128 \leq a^* \leq 127$$

$$-128 \leq b^* \leq 127$$

L'appareil affiche ensuite les valeurs en L*, a*, b* de la couleur dont on calcule les proportions volumiques après.



Photo 9 : Photo réelle du reflectomètre

Source : Auteur

CHAPITRE V : RÉALISATION DU SPECTROPHOTOMÈTRE VISIBLE

L'appareil de spectrophotomètre visible sert à déterminer la concentration d'une espèce chimique en solution. La solution doit être colorée d'abord afin de déterminer l'absorbance dans une longueur d'onde donnée. Elle se compose généralement de trois grandes unités : Le bloc optique, le système embarqué et l'interface utilisateur.

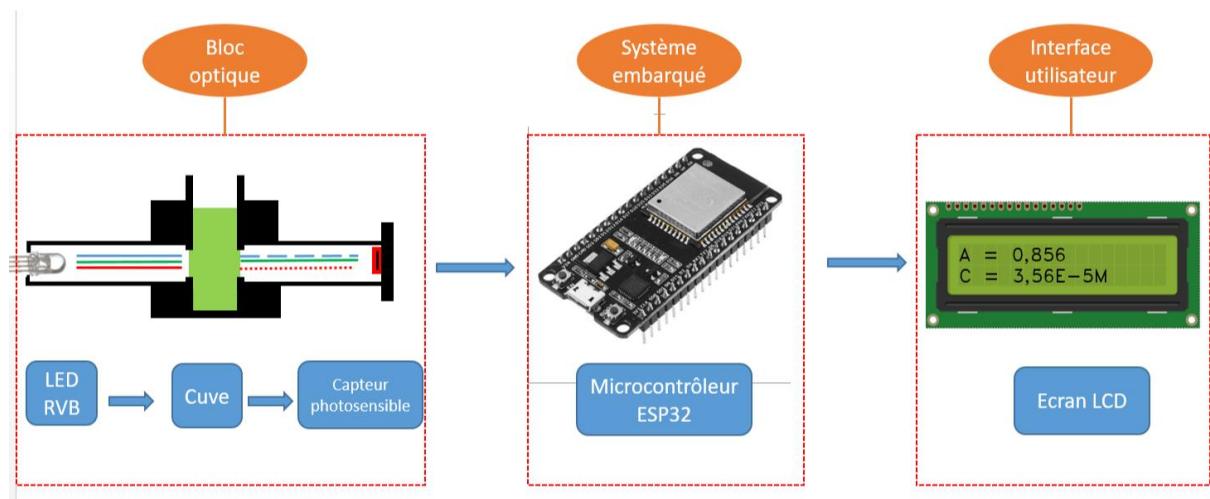


Figure 44 : Diagramme de constitution de l'appareil de spectrophotomètre visible

Source : Auteur

5.1. Le bloc optique

5.1.1. La source de lumière

Comme pour le colorimètre à solution, on utilise une LED RVB à anode commune de plage de longueur d'onde connue. La seule différence est que l'on n'utilise qu'une seule LED dont la lumière est canalisée à travers une fonte.

5.1.1.1. Branchement de la LED sur la carte ESP32

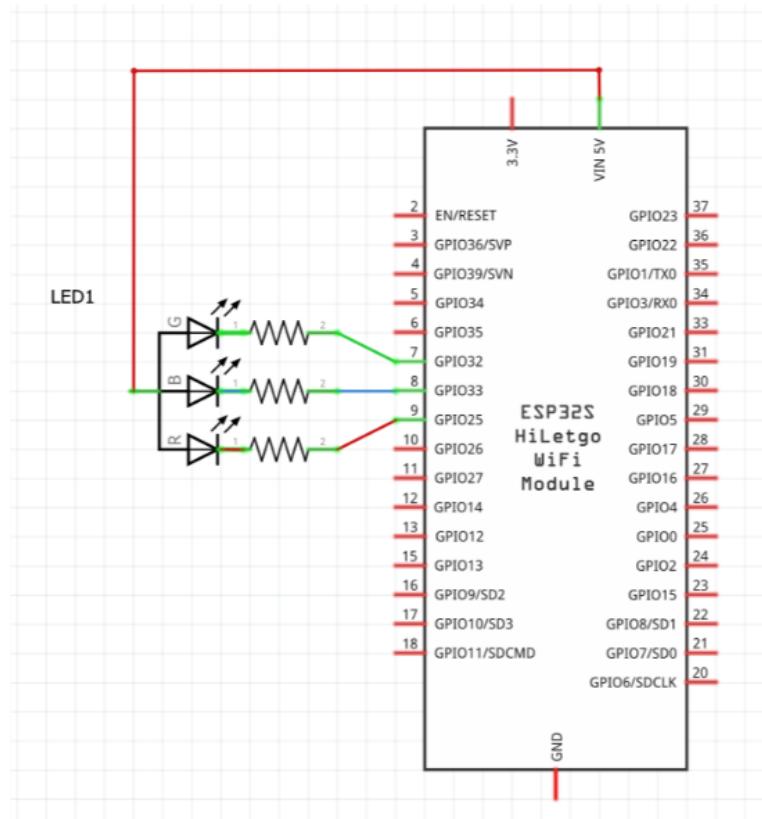


Figure 45 : Câblage du LED RVB sur la carte ESP32

Source : Auteur

La LED RVB est alimentée sur la broche 5V de la carte. Chaque broche qui commande la couleur de la LED est branchée en série avec une résistance de 220Ω , puis connectée sur les broches D25, D32 et D33 respectivement rouge, vert et bleu.

5.1.2. La cuve à solution

C'est une cuve en quartz de 10mm de côté, 10mm de longueur optique et 45mm de hauteur. Elle possède deux faces opaques pour faciliter la manipulation. L'épaisseur du quartz est de 1mm.

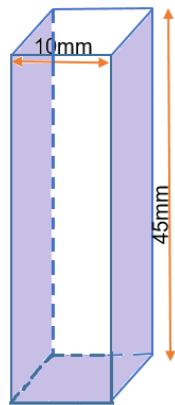


Figure 46 : Schéma d'une cuve à spectrophotomètre

Source : Auteur

5.1.3. Le photodétecteur

Pour la conception de cet appareil, on utilise un module capteur de lumière ambiante de référence MAX44009. Il dispose d'une plage de 0.045 lux à 188 000 lux et fonctionne à faible luminosité, idéal pour la détection de variation d'intensité lumineuse d'une bande de spectre. Il est composé d'une photodiode sur puce de dimension 1,32 cm x 1,05 cm.

5.1.4. Photo réelle du bloc optique

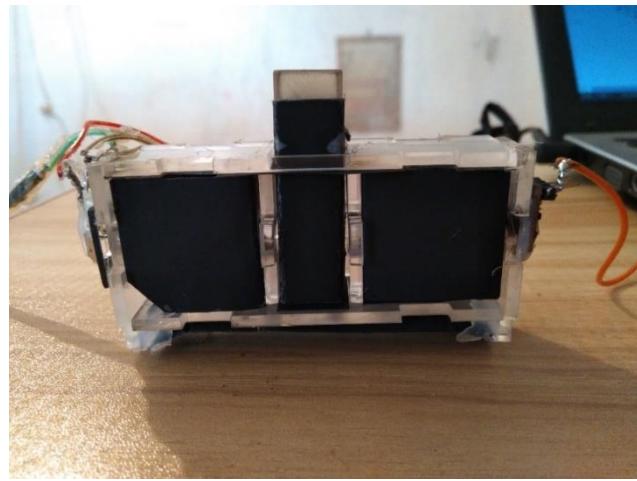


Photo 10 : Photo du bloc optique du spectrophotomètre visible

Source : Auteur

A gauche, on a le compartiment LED, à droite, le compartiment du photodétecteur, et au centre, l'emplacement de la cuve.

Précaution à prendre :

Tout le bloc est englobé dans une boite en plexiglass dont la surface intérieure est recouverte de carton peint en noir mat afin d'éviter au maximum l'interférence avec la lumière extérieure et celle réfléchie sur les parois.

5.1.4.1. Branchement du photodétecteur sur le microcontrôleur

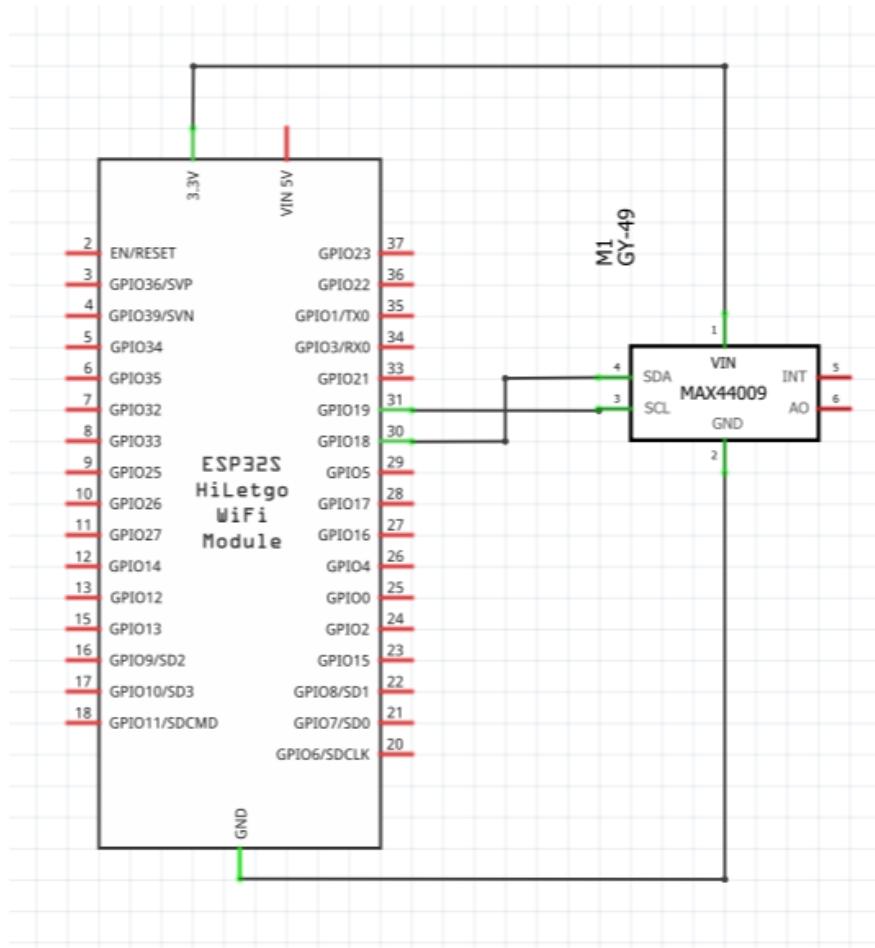


Figure 47 : Câblage du photodétecteur MAX44009 sur une carte ESP32

Source : Auteur

Pour ce montage, les branchements sont comme suit, sur le capteur de la carte ESP32 :

- La broche VIN sur 3,3V
- GND sur GND
- SCL sur le pin digital 19
- SDA sur le pin digital 18

5.2. Le système embarqué

Ici, le microcontrôleur utilisé est une carte avec comme nom de référence *ESP32*, un modèle de carte avec un module WIFI et Bluetooth intégré pour la communication sans fils. Il a une dimension de 4,8cm de longueur ; 2,6cm de largeur et 1,15 cm de hauteur. Il se programme comme la carte arduino, utilisant le même langage et une architecture assez similaire.

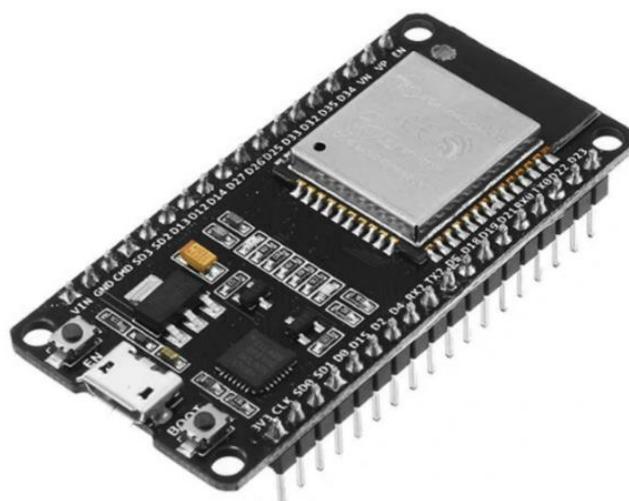


Photo 11 : Photo d'un ESP32

Source : Auteur

5.3. L'interface utilisateur

5.3.1. L'écran LCD

Comme sur le réflectomètre, l'interface utilisée est un écran LCD 16 x 2 et de dimensionnement 7cm x 2,4cm. La différence est que celui-ci est monté sur une carte ESP32.

5.3.1.1. Branchement sur la carte ESP32

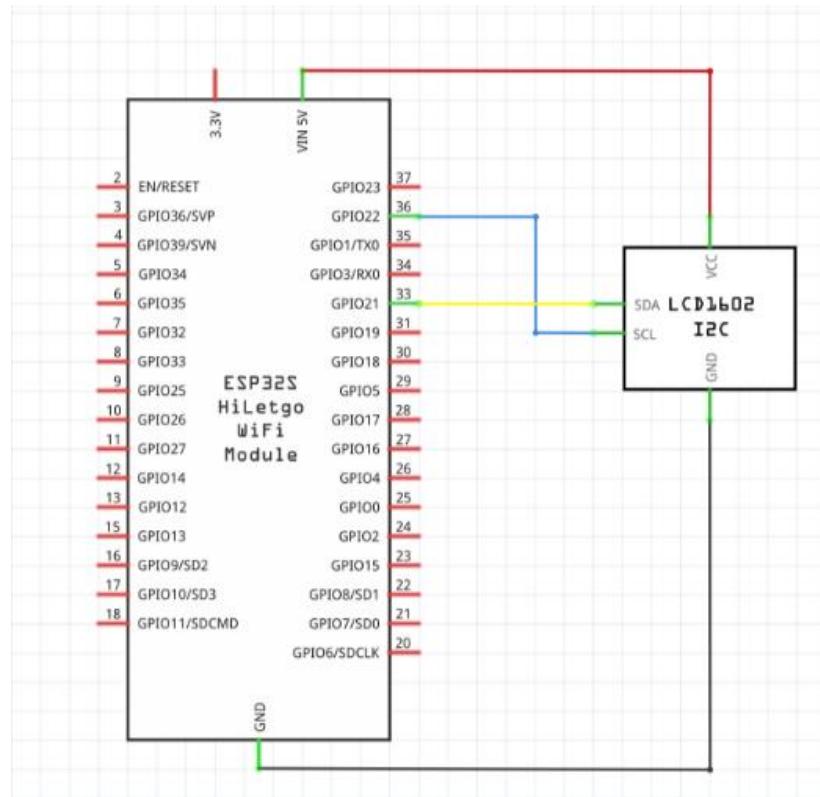


Figure 48 : Câblage de l'écran LCD sur la carte ESP32

Source : Auteur

Les branchements de l'écran se font comme suit :

De l'écran LCD au microcontrôleur

- La broche GND sur GND
- La broche VCC sur 5V
- La broche SDA sur D21
- La broche SLC sur D22

5.3.2. Les commandes

5.3.2.1. Le bouton de commande

On utilise ici un bouton poussoir à 4 broches pour commander l'appareil. Avec une dimension de 1cm x 1cm, il sert à l'utilisateur de commander l'appareil.

5.3.2.2. Le potentiomètre rotatif

Un potentiomètre rotatif est utilisé pour permettre à l'utilisateur de faire le calibrage de la longueur d'onde de la LED. En faisant balayer (en tournant) le potentiomètre, on peut choisir la valeur de la longueur d'onde.

5.3.2.3. Branchement du bouton et du potentiomètre sur la carte ESP32

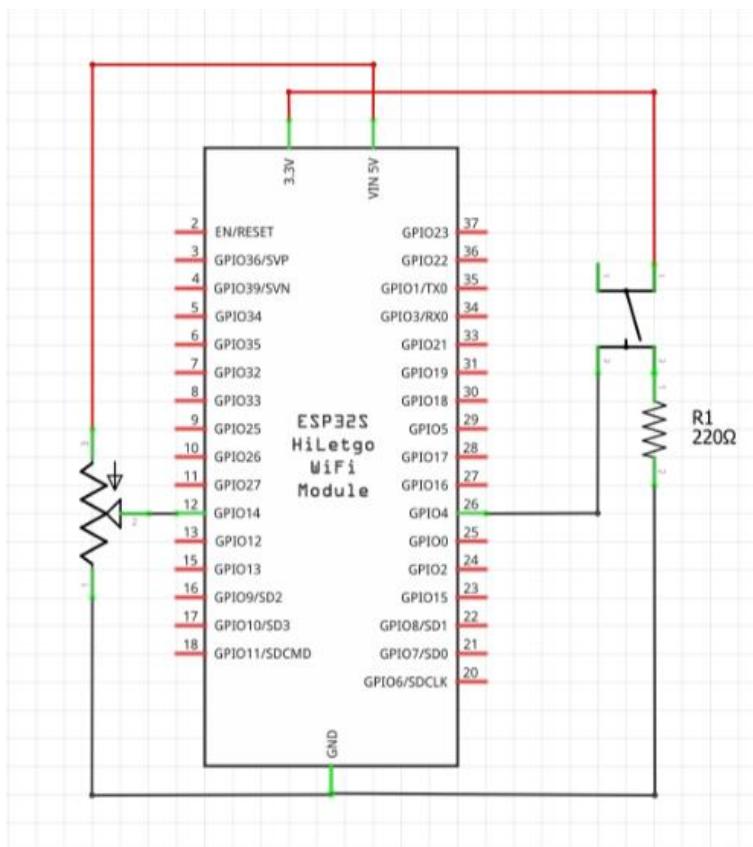


Figure 49 : Câblage des commandes sur la carte ESP32

Source : Auteur

Le bouton est alimenté par la broche 3,3V et GND du microcontrôleur et il est monté en série avec une résistance de 220Ω . Afin de communiquer avec le microcontrôleur, le bouton est connecté sur la broche numérotée D04. Ainsi, à chaque fois que l'on appuie sur le bouton, un signal arrive à la carte et celle-ci sera commandée pour interpréter ce signal.

Le potentiomètre est connecté sur la broche numéro D14 du microcontrôleur et il est alimenté par une tension de 5V du microcontrôleur.

5.4. Principe et mode de fonctionnement de l'ensemble (LED, photodéTECTEUR, microcontrôleur, écran LCD et bouton de commande)

5.4.1. Montage complet de l'appareil

Tous les composants cités précédemment sont montés et illustrés ci-dessous. Avec le microcontrôleur :

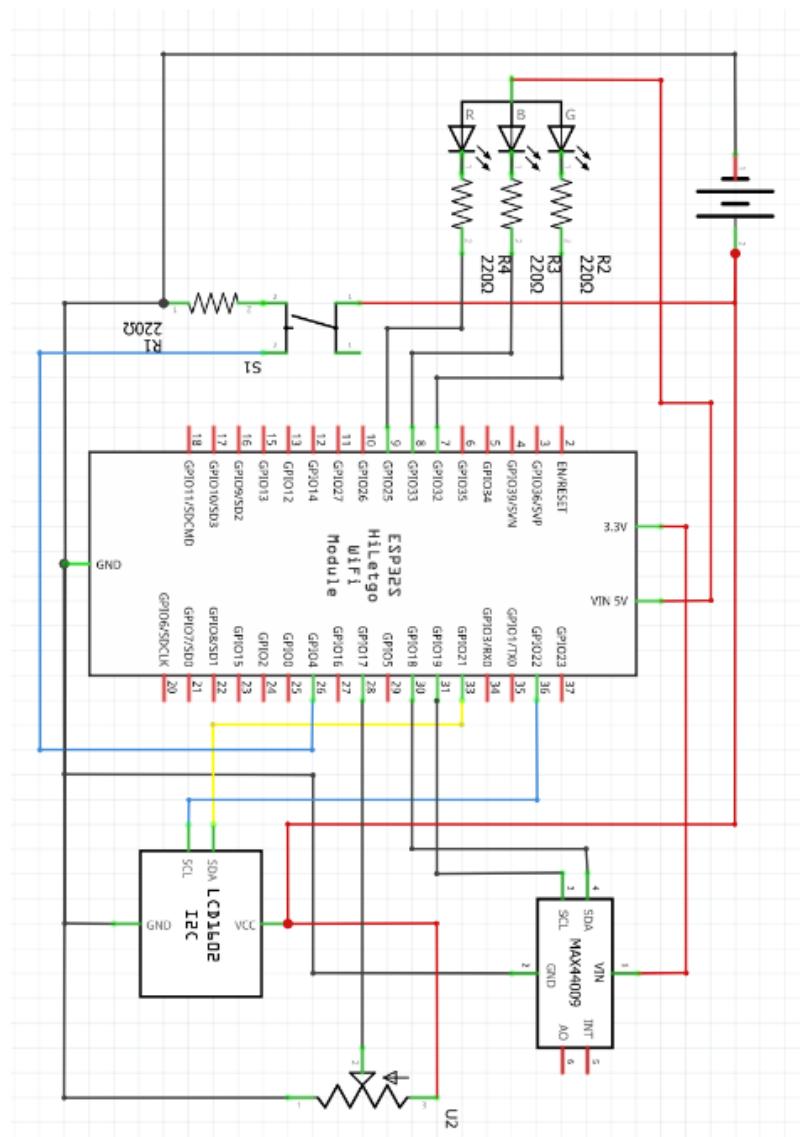


Figure 50 : Câblage de tous les composants de l'appareil

Source : Auteur

Pour avoir de la précision et une stabilité de mesure, il est nécessaire d'alimenter l'écran LCD avec une autre source d'alimentation que celui de la carte ESP32. Ainsi, la batterie de 5V est branchée en dérivation avec l'écran LCD sur et la carte microcontrôleur.

5.4.2. Fonctionnement de l'appareil

Afin de mesurer la concentration d'une espèce chimique en solution, l'appareil procède comme suit.

5.4.2.1. Etalonnage

Il est d'abord nécessaire de procéder à l'analyse de 3 ou 4 étalons de concentrations croissantes avant d'analyser la solution de concentration inconnue. Donc pour une analyse, il faut procéder aux étapes suivantes après avoir allumé l'appareil.

✍ Calibrage de la longueur d'onde

Si l'on ne connaît pas encore la longueur d'absorbance de la solution, il est d'abord préférable d'analyser la solution, en faisant balayer les longueurs d'onde émanant de la LED. L'appareil déterminera automatiquement la longueur d'onde d'absorbance.

Si l'on connaît d'avance la longueur d'absorbance de l'élément chimique en solution, il suffit d'entrer la longueur d'onde de fonctionnement. Grâce au potentiomètre, on peut régler la longueur d'onde qui sera émise par la LED.

✍ Mesure à vide

C'est le fait de mesurer l'intensité lumineuse de la source à vide. C'est-à-dire, sans la cuve, juste la source de lumière et le capteur.

✍ Étalonnage à blanc

Il consiste à déterminer l'absorbance du solvant et de la cuve seulement à 0 concentration de l'espèce chimique. Cette mesure sera la base ou référence de toutes les mesures suivantes.

Etalonnage croissant

Après l'etalonnage à blanc, on procède à l'etalonnage croissant. C'est le fait de mesurer les absorbances des concentrations croissantes. Il nécessite la mesure de 3 ou 4 étalons de concentration croissante.

5.4.2.2. Mesure de la concentration inconnue

Après les étalonnages, on est en possession de plusieurs valeurs. On construit la courbe de tendance $A = f(C)$, où A est l'absorbance et C la concentration. A partir de ces étalons par, on obtient une équation de droite linéaire. On mesure ensuite l'absorbance de la solution à concentration inconnue.

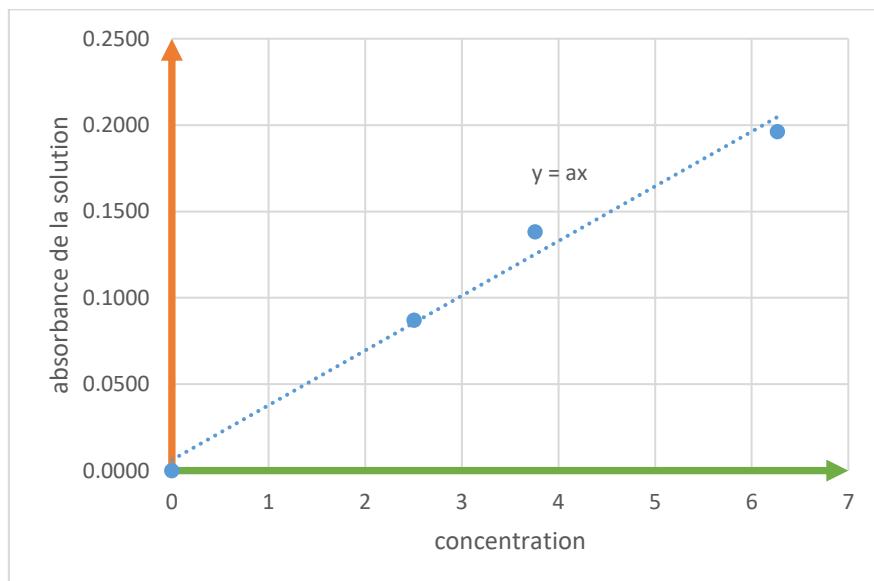


Figure 51 : Graphe d'une courbe de tendance $A = f(C)$ des étalons

Source : Auteur

Par la courbe de l'absorbance en fonction de la concentration, on a une équation de droite de la forme $y = ax$ où $y = A$ (absorbance) et $x = C$ (concentration). Après la mesure de l'absorbance de la solution inconnue, par interpolation, on en déduit sa concentration.

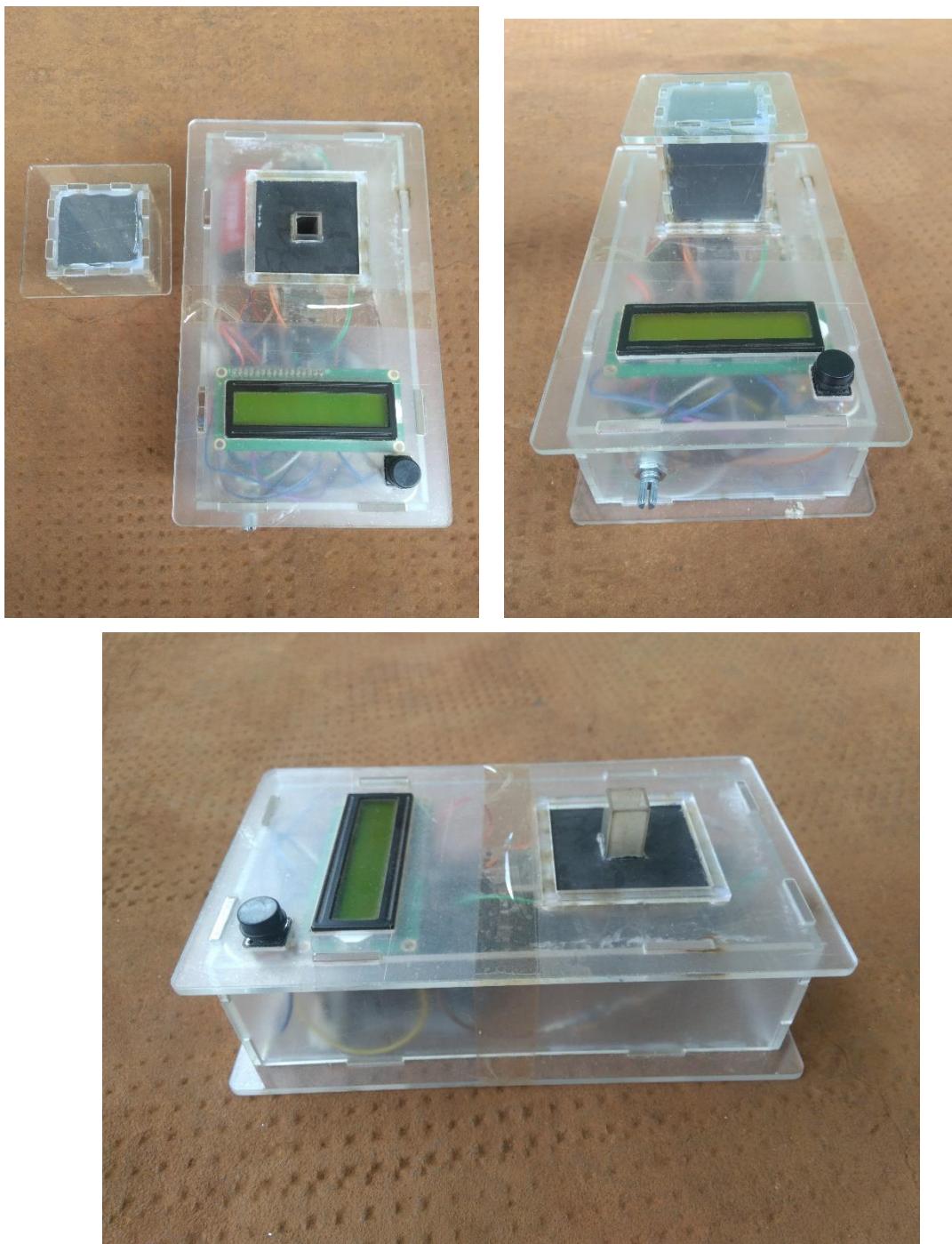


Photo 12 : Photo réelle de spectrophotomètre visible

Source : Auteur

PARTIE III

Essais, Résultats et Discussions



CHAPITRE VI : ESSAI DU REFLECTOMETRE

6.1. Essai de reproduction de couleur

Cet essai consiste à reproduire physiquement la couleur d'une surface plane, grâce aux valeurs prises et l'aide des teintes.

6.1.1. Mesure colorimétrique de la surface

La première étape est de prendre les valeurs colorimétriques (le taux de rouge, du vert et du bleu) de la surface avec l'appareil.

3 essais ont été effectués, avec 3 mesures de surfaces colorées

Tableau 2 : Résultat des prises d'essais de 3 couleurs en RVB

	Essai 1	Essai 2	Essai 3	Couleur Blanche
R :	255	176	33	255
V :	79	79	74	255
B :	55	55	85	255

Source : Auteur

Avec R, V, B : les valeurs respectives de Rouge, Vert et du Bleu comprises entre 0 et 255.

6.1.2. Transformation des valeurs en espace L*a*b*

6.1.2.1. Transformation en espace XYZ

Afin de pouvoir transformer en L*a*b*, il est d'abord nécessaire de passer par l'espace XYZ, par la formule de (Alain.T,2005),

Passage de RVB en XYZ :

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2.7690 & 1.7518 & 1.1300 \\ 1.0000 & 4.5907 & 0.0601 \\ 0.0000 & 0.0565 & 5.5943 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R \\ V \\ B \end{bmatrix}$$

Par le produit matriciel précédent, on peut transformer les valeurs de l'espace RVB en espace XYZ.

Tableau 3 : Valeur des 3 essais dans l'espace XYZ

	Essai 1	Essai 2	Essai 3	Couleur blanche
X :	906,64	687,88	317,06	1440,95
Y :	620,97	534,80	377,82	1440,95
Z :	312,15	312,12	479,70	1440,95

Source : Auteur

On retrouve les valeurs en RVB transformé en XYZ. Ces valeurs se trouvent dans l'intervalle 0 à 1440,95.

6.1.2.2. Transformation en espace L*a*b*

Pour avoir une idée des teintes constituant la couleur, on utilise l'espace couleur L*a*b*.

Les calculs de passage d'une espace XYZ en L*a*b* sont donnés par [24].

$$\begin{cases}
 L^* = 116 \left(\frac{Y}{Y_0} \right)^{\frac{1}{3}} - 16 & \text{si } \frac{y}{Y_0} > 0,008856 \\
 L^* = 903,3 \left(\frac{Y}{Y_0} \right) & \text{si } \frac{Y}{Y_0} < 0,008856 \\
 a^* = 500 \left[f \left(\frac{X}{X_0} \right) - f \left(\frac{Y}{Y_0} \right) \right] \\
 b^* = 200 \left[f \left(\frac{Y}{Y_0} \right) - f \left(\frac{Z}{Z_0} \right) \right]
 \end{cases}$$

Avec

$$\begin{cases}
 f(U) = U^{\frac{1}{3}} & \text{si } U > 0,008856 \\
 f(U) = 7,787U + \frac{16}{116} & \text{si } U < 0,008856 \\
 \text{pour } U = \frac{X}{X_0} \text{ ou } \frac{Y}{Y_0} \text{ ou } \frac{Z}{Z_0}
 \end{cases}$$

Avec X_0, Y_0, Z_0 , les valeurs de la couleur blanche.

D'où les valeurs suivantes :

*Tableau 4 : Valeur des 3 essais en espace L*a*b**

	Essai 1	Essai 2	Essai 3
L* :	71,61	67,35	58,04
a* :	50,79	31,39	-17,28
b* :	30,95	23,52	-10,55

Source : Auteur

Avec

$$0 \leq L^* \leq 100$$

$$-128 \leq a^* \leq 127$$

$$-128 \leq b^* \leq 127$$

6.1.2.3. Interprétation des valeurs

- ❖ On peut varier la valeur de L* en ajoutant du blanc ou du noir : le blanc la fera tendre vers 100 et le noir la fera tendre vers 0.
- ❖ On peut varier la valeur de a* en ajoutant du rouge ou du vert : le rouge la fera tendre vers 60 et le vert la fera tendre vers -60.
- ❖ On peut varier la valeur de b* en ajoutant du jaune ou du bleu : le jaune la fera tendre vers 60 et le bleu la fera tendre vers le -60.

Donc :

Pour une valeur de L* supérieure à 50, on ajoute du blanc ; inférieure 50, on ajoute du noir.

Pour une valeur de a* positive, on ajoute du rouge ; négative, on ajoute du vert.

Pour une valeur de b* positive, on ajoute du jaune ; négative, on ajoute du bleu.

6.1.2.4. Mélange des peintures

On utilise des peintures commerciales de différentes teintes : rouge, jaune, verte, bleue, noire, et blanche.



Photo 13 : Les peintures commerciales utilisées

Source : Auteur

Ce sont des teintures commerciales pour peinture à eau et le blanc pour peinture à huile. Les choix sont faits pour couvrir les plages tout autant dans l'espace RVB que dans l'espace CMJN. Les proportions sont les suivantes :

Tableau 5 : Proportion en unité de volume des mélanges de teinte

Teinte	Essai 1 (en volume)	Essai 2 (en volume)	Essai 3 (en volume)
rouge	2,40	1,48	
jaune	1,46	1,11	
vert			0,81
bleu			0,49
noire			
blanc	2,59	2,08	0,95
solvant incolore (eau ou white spirit)	11,55	13,33	15,75
volume de peinture préparé (en unité de volume)	18	18	18

Source : Auteur

Le solvant neutre utilisé peut être de l'eau, si c'est de la peinture à l'eau ou du white spirit pour la peinture à l'huile. Pour notre cas, afin de mesurer le volume nécessaire, on utilise des seringues graduées de 5ml donc notre unité de volume est le ml.

*Photo 14 : Seringues utilisées pour les prises de volume*

Source : Auteur

6.2. Etalonnage de l'appareil conçu avec un appareil commercial

6.2.1. Mesure par l'appareil conçu

Pour cette essai, on compare les mesures prises par l'appareil conçu par celles prises par un appareil commercial utilisé dans une industrie de peinture. Le mode de prise de mesure des valeurs trichromatiques est comme celui dit précédemment.

Une surface utilisée comme modèle dans l'industrie est alors analysée. L'appareil prend d'abord les valeurs en RVB puis les transforme en XYZ et enfin en $L^*a^*b^*$.

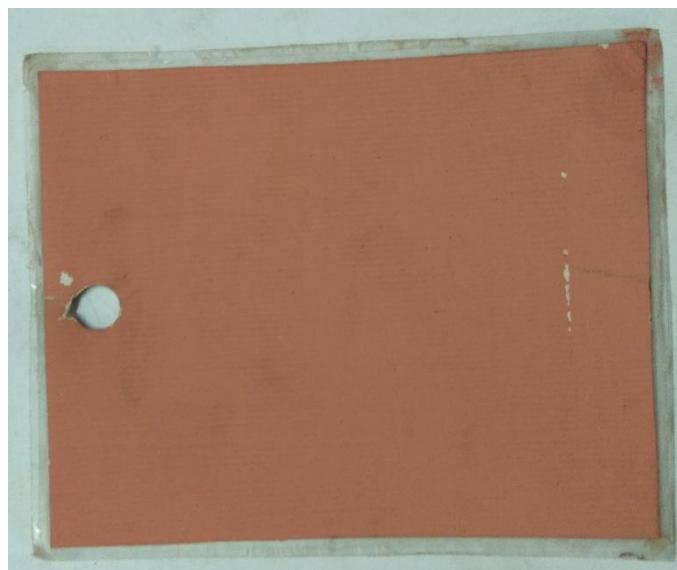


Photo 15 : Modèle de couleur analysée

Source : Auteur

Les résultats sont alors comme suit :

Tableau 6 : Valeurs des mesures prises par l'appareil conçu

R	247	X	1149,95	L*	86,50
V	160	Y	993,95	a*	21,94
B	157	Z	887,35	b*	6,56

Source : Auteur

6.2.2. Mesure sur un appareil commercial

Le même modèle de couleur est analysé avec un appareil commercial fonctionnel utilisé par une industrie de peinture.

Ses valeurs $L^* a^* b^*$ sont les suivantes :



Photo 16 : Appareil commercial fonctionnel

Source : Auteur

$$L^* = 64,06$$

$$a^* = 25,77$$

$$b^* = 12,23$$

L'appareil n'affiche que les valeurs en $L^*a^*b^*$, mais par calcul, les valeurs prises par l'appareil commercial sont :

Tableau 7 : Valeurs des mesures prises par l'appareil commercial

R 254	X 1186,96	L* 64,06
V 169	Y 1039,80	a* 25,77
B 166	Z 938,20	b* 12,23

Source : Auteur

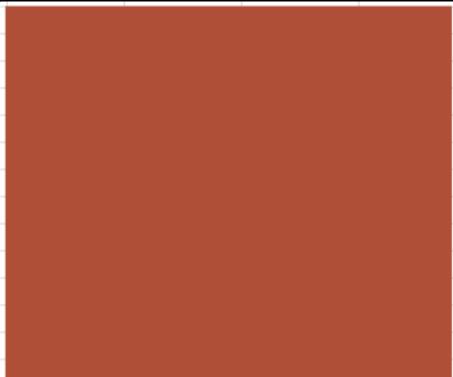
6.3. Comparaison et discussion des résultats

6.3.1. Comparaison des couleurs physiques et celles créées sur un logiciel

Comparons les résultats de l'essai de reproduction de couleur avec des couleurs créées sur un logiciel.

Les résultats sont les suivants :

Tableau 8 : Comparative visuel avec des couleurs qui sont faites avec un logiciel

Colonne A	Colonne B	Colonne C
Couleurs reproduites	Couleur par logiciel	Valeurs
		R = 255 V= 79 B = 555
		R = 176 V= 94 B =55
		R = 33 V=74 B =85

Source : Auteur

La colonne A présente les peintures mélangées manuellement.

La colonne B présente les couleurs reproduites sur un logiciel, La couleur issue du logiciel semble être plus claire. Cela peut être dû à la sensibilité du photodétecteur ou à l'éclairage. La différence peut aussi être due à un défaut de manipulation lors des mélanges car on joue sur le volume avec une seringue graduée (en ml).

CHAPITRE VII : ESSAI D'ANALYSE AVEC LE SPECTROPHOTOMETRE VISIBLE

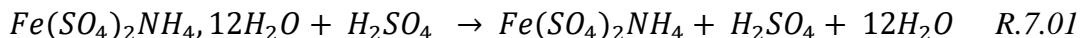
7.1. Essai d'analyse de Fer (III) dans le complexe Thiocyanate de Fer (III)

A partir de Sulfate d'ammonium ferrique dodécahydraté ou alun ferrique dodécahydraté de formule chimique $Fe(SO_4)_2NH_4 \cdot 12H_2O$, on fait le dosage de la concentration en Fer (III) en complexation avec l'ion SCN^- .

7.1.1. Préparation de l'étalon

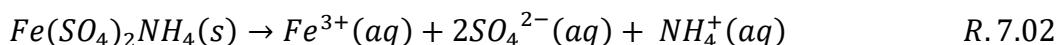
7.1.1.1. Préparation de la solution à titrer

La solution d'alun ferrique est d'abord mélangée avec une solution d'acide sulfurique 10% afin de séparer l'eau de l'alun ferrique et pour éviter la formation d'hydroxyde ferrique $Fe(OH)_3$



Pour chacun des étalons, le volume de l'acide ajouté correspond toujours à 10ml.

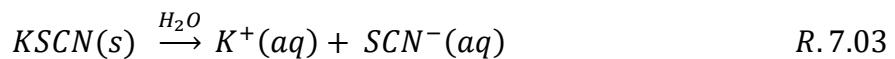
Vient ensuite la décomposition de l'alun.



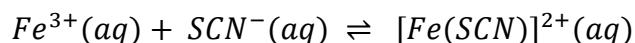
7.1.1.2. Préparation de la solution titrante

La préparation d'une solution de KSCN de 0,5M correspondant 4,85g/100ml.

Pesage de 4,5 g de cristaux de KSCN et le mètre dans 100ml d'eau distillée



Par R.VII.01 et R.VII.02, on a



Et c'est la solution de $[Fe(SCN)]^{2+}$ qui donne une coloration rouge orangé.

Le mélange se fait suivant les valeurs du tableau suivant.

Tableau 9 : Tableau des proportions des étalons préparées

Solution préparée	T	1	2	3	4	5
Solution de Fe III (10⁻³ l)	0,0000	0,5000	1,0000	1,5000	2,0000	2,5000
H₂SO₄ 10% (10⁻³ l)	10,0000	10,0000	10,0000	10,0000	10,0000	10,0000
KSCN 0,5M (10⁻³ l)	20,0000	20,0000	20,0000	20,0000	20,0000	20,0000
Eau distillée (10⁻³ l)	70,0000	69,5000	69,0000	68,5000	68,0000	67,7000
Correspondance Mol d'Fe (III)/ litre	0,0000	1,2535	2,5069	3,7604	5,0139	6,2673

 Solutions supposées inconnues à déterminer sur l'appareil conçu

Source : Auteur

Pour cet essai, on prépare 6 solutions de concentration en Fe(III) croissante. On maintient le volume préparé à 100ml. On obtient 5 solutions rouge orangé de thiocyanate de Fer (III) et une solution incolore pour l'étalon à blanc.

7.1.2. Essai sur l'appareil conçu

7.1.2.1. Etalonnage et calibrage de l'appareil

Sur cet essai, on réalise 4 étalonnages partir du tableau précédent : le (T) ; (2) ; (3) ; (5).

Le (1) et (4) sont supposés inconnues et à déterminer.

On calibre l'appareil sur une longueur d'onde de 480nm. On fait la mesure de l'intensité lumineuse à vide puis l'intensité lumineuse à blanc c'est-à-dire à 0,00 M, ensuite celle des étalons. Comme on connaît la quantité de lumière incidente et la quantité de lumière transmise, on en déduit l'absorbance :

$$A_{\lambda} = -\log \frac{I}{I_0} \quad F. 7.01$$

Tableau 10 : Correspondances et valeurs des étalons

Récipient	Lumière incident à vide (I_0)	Lumière transmise à blanc	Lumière transmise (I)	Absorbance cuve + solvant	Absorbance cuve + solution de Fe (III)	Absorbance solution Fe(III)	Concentration (10-5 M)
T	73,4400	67,3200	67,3200	0,0378	0,0378	0,0000	0,0000
2			55,0800		0,1249	0,0872	2,5069
3			48,9600		0,1761	0,1383	3,7604
5			42,8400		0,2341	0,1963	6,2673

Source : Auteur

Premièrement, la mesure de l'intensité du rayon incident relevée par le photodétecteur est de 73,44. Ensuite, la mesure de l'intensité transmise à blanc est de 67,32 ; d'où l'absorbance du récipient et du solvant est $A_r = 0,0378$. Et enfin, on mesure l'absorbance des 3 autres étalons (2) ;(3) ; et (5) de concentration connues.

Comme l'absorbance est une grandeur additive, en connaissant celle à blanc et celle des étalons avec la cuve, on fait la soustraction entre l'absorbance de l'étalon avec cuve et solvant à et la solution de Fe(III) :

$$A_t = A_r + A_s$$

$$\Leftrightarrow A_s = A_t - A_r$$

Avec A_t : Absorbance totale de l'ensemble

A_r : Absorbance de la cuve contenant le solvant ou *absorbance à blanc*

A_s : Absorbance de la solution de Fe(III)

A partir de ce tableau, on obtient la courbe de l'absorbance en fonction de la concentration de Fer (III).

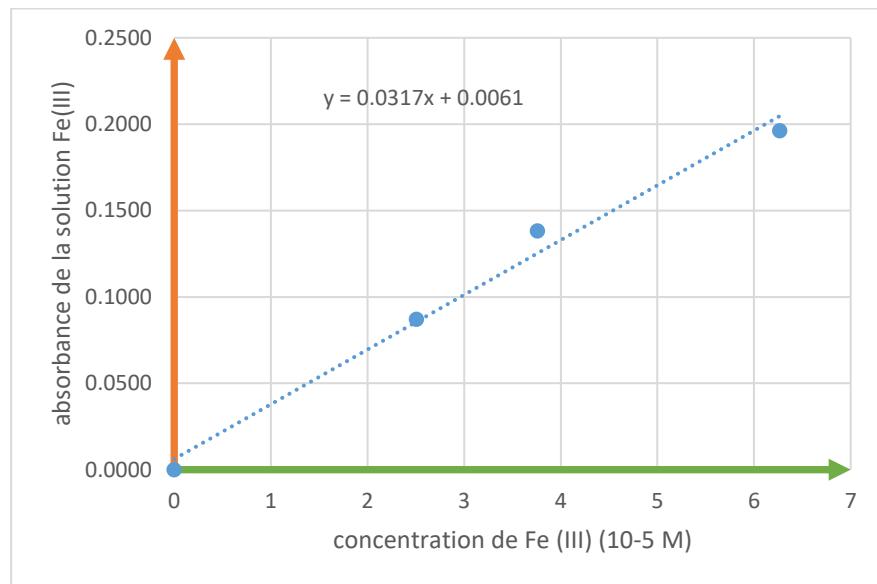


Figure 52 : Courbe de l'absorbance en fonction de la concentration des étalons

Source : Auteur

La courbe de tendance obtenue est une droite d'équation $y = 0,0317x + 0,0061$.

L'ordonnée à l'origine n'est pas nulle car à cause de la construction de la courbe de tendance, les points ne sont pas parfaitement alignés.

7.1.2.2. Détermination des solutions de concentrations inconnues

Les mesures de l'absorbance des 2 autres solutions (1) et (4) sont ensuite faites puis, on ajoute une 6^{ème} solution de concentration inconnue. Les valeurs sont affichées sur le tableau suivant :

Tableau 11 : Tableau des valeurs des solutions à concentration inconnue

Récipient	Lumière incidente à vide	Lumière transmise à blanc	Lumière transmise	Absorbance cuve + Solution	Absorbance solution
1	73,4400	67,3200	60,3400	0,0853	0,0475
4			45,9000	0,2041	0,1663
6			59,9000	0,0885	0,0507

Source : Auteur

Après avoir mesuré l'absorbance de ces solutions, et en appliquant la loi de *Beer-Lambert* :

$$A_\lambda = \varepsilon_\lambda l c \quad F.7.02$$

On déduit leur concentration :

$$A_\lambda = \varepsilon_\lambda l c \text{ Par analogue à } y = 0,0317x + 0,0061$$

$$\Rightarrow y - 0,0061 = 0,0317x$$

Par identification,

$$\varepsilon_\lambda l = 0,0317, \text{ avec } l = 1 \text{ cm}$$

$$\text{Donc le coefficient d'extinction molaire } \varepsilon_\lambda = 0,0317 \text{ mol}^{-1} \cdot \text{l} \cdot \text{cm}^{-1}$$

D'où les concentrations respectives de chaque solution inconnue sont :

Tableau 12 : Valeur des concentrations déterminées par la loi de Beer-Lambert

Récipients	Concentration De Fe(III) (10 ⁻⁵ M)
1	1,3072
4	5,0546
6	1,4075

Source : Auteur

En tout, les résultats de l'appareil lors des analyses sont :

Tableau 13 : Résultats des essais sur l'appareil

Récipient	Lumière entrant à vide	lumière transmise à blanc	lumière transmis	Absorbance de la cuve + solvant	Absorbance de cuve + solution de Fe (III)	Absorbance de la solution de Fe(III)	Concentration de Fe(III) (10 ⁻⁵ M)
T	73,4400	67,3200	67,3200	0,0378	0,0378	0,0000	0,0000
1			60,3400		0,0853	0,0475	1,3072
2			55,0800		0,1249	0,0872	2,5069
3			48,9600		0,1761	0,1383	3,7604
4			45,9000		0,2041	0,1663	5,0546
5			42,8400		0,2341	0,1963	6,2673
6			59,9000		0,0885	0,0507	1,4075

 Solution de concentration de Fe (III) supposée inconnue mais à vérifier sur l'appareil

 Solution de concentration Fe(III) préparée au hasard

Source : Auteur

7.1.3. Essai sur un appareil fonctionnel de laboratoire

La méthode d'analyse est la même que celle utilisée précédemment. On passe par la calibration de l'appareil à 480nm, ensuite l'étalonnage à blanc puis à l'étalonnage croissant et enfin à la mesure de la concentration inconnue. Les résultats sont affichés sur le tableau suivant :

Tableau 14 : Résultats sur le spectrophotomètre fonctionnel de laboratoire

Récipient	Absorbance	Concentration de la solution Fe(III) (10 ⁻⁵ M)
T	0,0000	0,0000
1	0,0653	1,2535
2	0,1679	2,5069
3	0,2254	3,7604
4	0,3088	5,0139
5	0,3619	6,2673
6	0,0930	1,5613

 Solution de concentration Fe(III) préparée au hasard

Source : Auteur

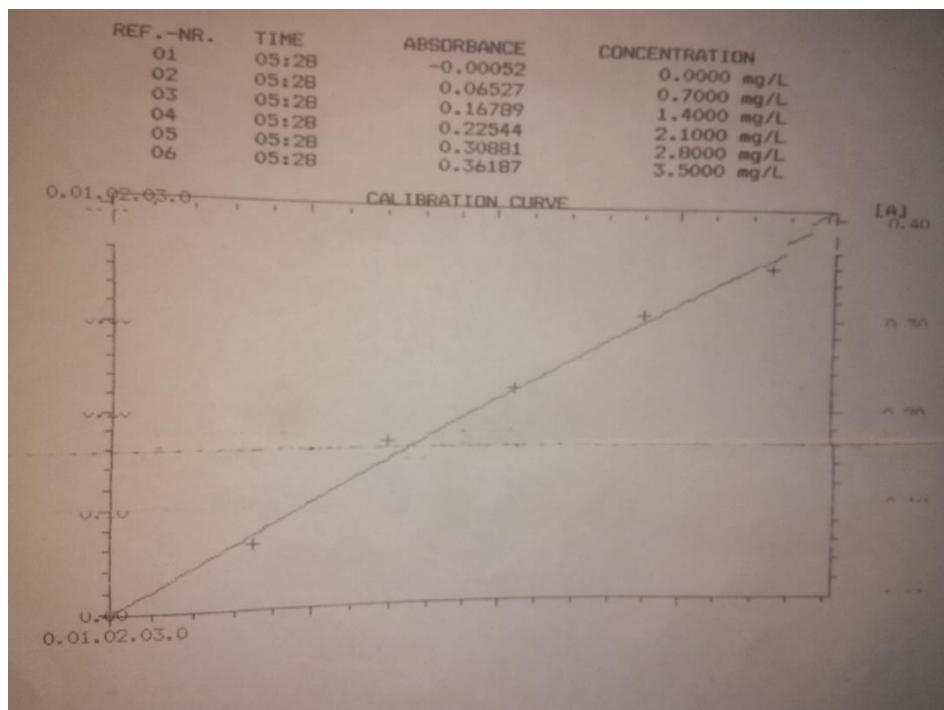


Photo 17 : Résultat de l'essai sur un spectrophotomètre UV-VISIBLE de laboratoire

Source : Auteur

On trouve ici l'absorbance mesurée sur un appareil fonctionnel de laboratoire et la courbe correspondante à l'absorbance en fonction de la concentration ; imprimée par l'imprimante de l'appareil.

7.2. Comparaison et discussion des résultats

Tableau 15 : Tableau comparatif des deux résultats obtenus par les deux appareils

Récipient	Absorbance		Concentration de Fe(III) (10-5 M)	
	Appareil de laboratoire	Appareil conçue	Appareil de laboratoire	Appareil conçue
T	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
1	0,0653	0,0475	1,2535	1,3072
2	0,1679	0,0872	2,5069	2,5069
3	0,2254	0,1383	3,7604	3,7604
4	0,3088	0,1663	5,0139	5,0546
5	0,3619	0,1963	6,2673	6,2673
6	0,0930	0,0507	1,5613	1,4075

Solution de concentration de Fe (III) supposée inconnue mais à vérifier sur l'appareil

Solution de concentration Fe(III) préparée au hasard

Source : Auteur

Le précédent tableau nous montre qu'**au niveau de l'absorbance** : on constate une différence au niveau des capteurs photosensibles de chaque appareil. Cela est due à la différence des composants de chaque appareil : de la source de lumière, du capteur photosensible, ...

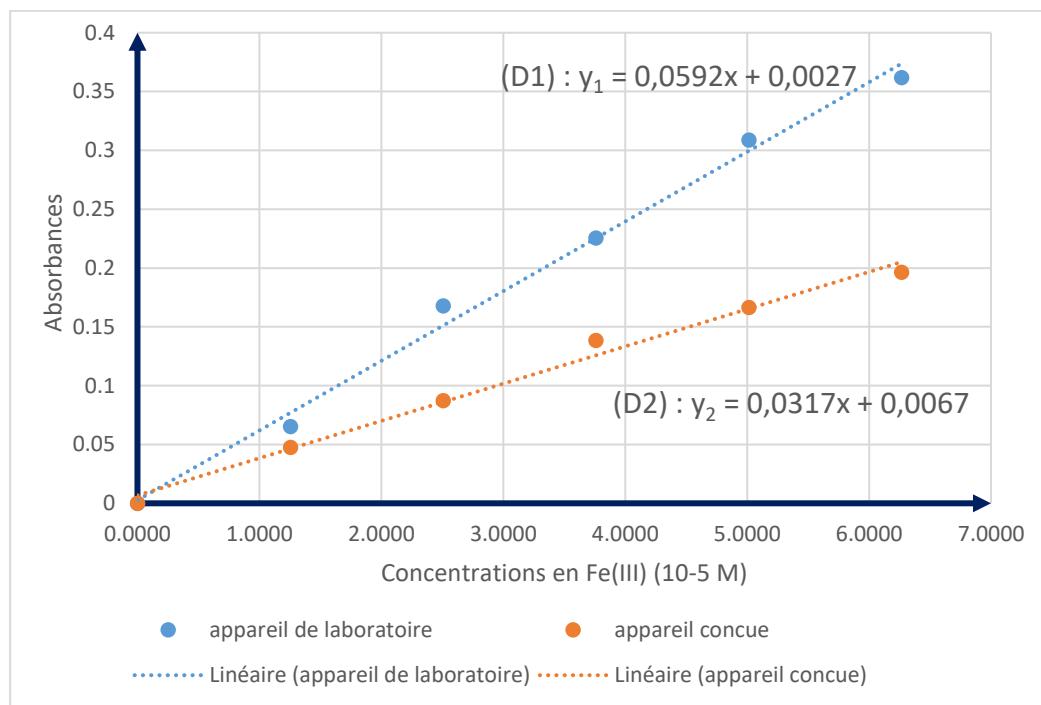


Figure 53 : Comparative de l'évolution de l'absorbance de chaque appareil

Source : Auteur

On constate, pour l'appareil conçu, à la différence de l'appareil de laboratoire, qu'il affiche peu d'absorbance, même pour une concentration élevée. Ceci s'interprète par le fait que l'appareil conçu perçoit plus de quantité de lumière donc moins d'absorbance. Cela est utile pour la détermination de la concentration d'une solution plus concentrée car selon **Meyer R. en 1996**, la loi de Beer-Lambert n'est vérifiée que pour une absorbance entre 0 à 1,5 ou 2. Or, d'après la pente des 2 droites, la droite (D1), de l'appareil de laboratoire, pour une absorbance maximale de 1,5, correspond à une concentration maximale de $25,2922 \times 10^{-5} \text{ M}$. Tandis que pour la droite (D2) de l'appareil conçu ; pour une absorbance maximale de 1,5, il affiche une concentration maximale de $47,1073 \times 10^{-5} \text{ M}$. Ainsi, pour une même solution, l'appareil conçu peut mésuser une concentration plus élevée.

CONCLUSION



CONCLUSION

Ce présent mémoire a pour objectif de concevoir un appareil capable de mesurer la concentration d'une espèce en solution et un appareil capable de mesurer la composition d'une couleur. Cette étude nous a appris toutes les étapes générales nécessaires à la conception et à la réalisation, en commençant par les recherches appropriées du domaine, le choix des composants utilisés, les modes de montage des appareils, les calculs et les contraintes pour aboutir à des essais et des résultats. Nous avons vu le mode fonctionnement du spectrophotomètre visible et du réflectomètre ainsi que toutes les pièces nécessaires à leur conception et à leur élaboration.

Notre spectrophotomètre développé permet de déterminer la concentration d'une espèce chimique colorée en solution et notre réflectomètre permet de savoir les compositions trichromatiques des couleurs d'une surface afin de la reproduire. Tous les composants utilisés sont faciles d'acquisition et disponibles à moindre cout, et nombreuses sont les littératures qui évoquent en partie leur conceptions. La validation expérimentale par rapport à des homologues commerciaux a montré des résultats prometteurs. Face à cela, on peut dire que ces dispositifs sont capables de mesurer avec un bon niveau d'exactitude et de précision, malgré le fait qu'ils prennent encore un peu de temps pour l'effectuer.

La conception de ces appareils a permis la naissance de nouvelles idées qui vont servir de perspectives d'avenir :

- Une amélioration du temps de mesure,
- Un élargissement des plages de longueur d'onde d'analyse dans l'ultraviolet pour les solutions incolores et puis dans l'infrarouge pour la détermination de fonction chimique,
- Une élaboration d'une base de données pour stocker les précédentes valeurs d'analyses,
- Conception d'autres appareils de laboratoires difficiles d'accès à Madagascar voir même un robot de laboratoire pour les tâches dangereuses ou répétitives.

LISTE DES REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES



LISTE DES RÉFÉRENCES

BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] **Aline G**, 2013, « Ultraviolet-visible and spectroscopy of key atmospheric molecules», HAL open science
- [2] **Antoine M.**, 2010, « Image precessing and recognition», 2010
- [3] **Alain T.**, 2005« Winter school on color imagery », Lille
- [4] **Briki I. D.**, 2017, « Ebedded system and mobile operating system course»
- [5] **Brullot B.**, 1997, « Response of silicium photodiode to sub-nanosecond proyon pulses», diretion of military application
- [6] **Colantoni P.**, 2004, « Color Space Transformation »
- [7] **Dieumegarde P.**, 2014, « Contribution and use of a colorimeter with light diodes»
- [8] **Francisco A. A. M., Marta M. D. C., Matthieu T.**, 2003, « A simple device for quantitative colorimetric diffuse reflectance measurements », Instituto de Quí'mica, Universidade Estadual de Campinas
- [9] **Gauchon L.**, 2008, « Understand titration – representation of student of first and terminal science and effect is somewhat variable», HAL open science Université PARIS DIDEROT, tome 7, Fascicule 3
- [10] **Grimm M.**, 1994, « proposal of new method for transforming RGB video signal into HSI. Application to real-time color vision systems», University Henry POINCARE NANCY
- [11] **Guillaume Ed.**, 1904, «The Radiations »
- [12] **Guillemeney L.**, 2020, «The color chemistry of colors : From painting to glass arts to photography », Ecole Normale supérieure of Lyon, Chemestry at the service of art and creation
- [13] **Jean C.**, 2000, « Study on the throwing of spectral rays », UNIVERSITY JEAN MONNET DE SAINT-ETIENNE
- [14] **Jean M. F.**, 2017, « Human perception of color »
- [15] **Konica M.**, 2007, « Color analysis, speak clearly », From the visual appreciation of color to its precise measurement
- [16] **Kadionik P.**, 2004, « Definition of embedded system»
- [17] **Jean C.**, 2000, « Spectral ray tracing study », JEAN MONNET UNIVERSITY OF SAINT-ETIENNE

- [18] **Le Quoc H.**, 2020, « Development of a low-cost colorimeter and its application for determination of environmental pollutants », Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy
- [19] **Mathevet R. et al**, 2021, « A quantitative approach to the Beer-Lambert law with a smartphone», First part
- [20] **Marina O., Diamond D.**, 2008, « Absorbance Based Light Emitting Diode Optical Sensors and Sensing Devices », National Center for Sensor Research, School of Chemical Sciences, Dublin City University
- [21] **Meyer R., Biasini G.**, 1996, « Pratical spectroscopy in the visible and ultra-violet», Paul Sabatier University, Bulletin of the union of physicist
- [22] **Montag E. D.**, 2006, « Empirical formula for creating bars for the method of paired comparisons », Journal of electrical imaging, vol. 15, 2006
- [23] **Ollat C.**, 1957, « Complexometric dosage», Overseas scientific and technical research office
- [24] **Ourisson G.**, 1994, « Chemical analysis Method and modern insteumental technique », 2nd édition
- [25] **Philippe B.**, 2004, « Absorption spectrophotometry in the ultraviolet and the visible »
- [26] **Pinta M.**, 1971, « Atomic absorption spectrometry»
- [27] **Pousset N.**, 2010, « Characterization of the color rendering of new sources of electromagnetic diodes»
- [28] **Redoutey J.**, 2013, « Introduction to the optoélectronic device used in power electronics », central Marseilles
- [29] **Reste de savoir**, 2019, « RGB and HSV color space»
- [30] **Samuel S.**, 2012, « Colorimetric Water Quality Sensing with Mobile Smart Phones », The University of British Columbia
- [31] **Sawadogo A.**, 2010, « Tools for assessing the quality of visual property setting in the case of color textures », HAL open science
- [32] **Système International de la CIE**, 1931, « CIE 15 : Technical Report : Colorimetry, 3rd edition »
- [33] **Tayari M. L.**, 2015, « Embedded system coursematerial », Ministry of the formerly higher technological studies of Gabes
- [34] **Thon S.**, 2014, « Complementary knowledge in digital imagery computer representation of color », University Institutte of technology
- [35] **Trémau A.**, 2005, « basic element of colorimetry», Lab. LIGIV – Univ. Saint Etienne – France.

- [36] **Yulkifli** , 2019, « Development of color detector using colorimetry system with photodiode sensor for food dye determination application », Journal of Physics: Conference Series

ANNEXE



ANNEXE 1 :

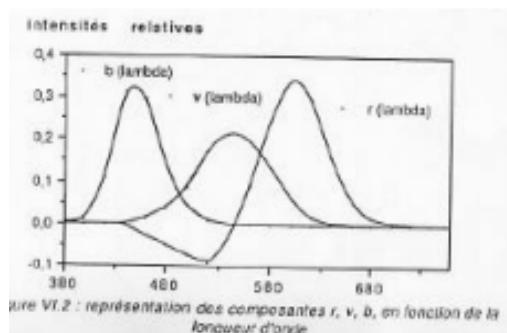
SYSTÈME
INTERNATIONAL
DE LA CIE 1931

VI) SYSTEME INTERNATIONAL DE LA CIE (1931)

Commission Internationale de l'Eclairage : cette commission a rédigé et édité des documents (1931, 1964 et 1969) qui regroupent différentes recommandations sur les conditions d'éclairage, les systèmes de coordonnées trichromatiques, les courbes de visibilité, les courbes de répartition spectrale de différentes sources (lumière du jour et illuminants normalisés).

1. Inconvénients du système RVB:

Le choix de la longueur d'onde des trois primaires pose quelques problèmes. On s'aperçoit que certaines couleurs de teinte "bleu-vert" sont impossible à réaliser. La quantification trichrome **des teintes pures induit des composantes négatives.**



λ (nm)	$r(\lambda)$	$v(\lambda)$	$b(\lambda)$
380	0,00003	-0,00001	0,00117
400	0,00030	-0,00014	0,01214
420	0,00211	-0,00110	0,11541
440	-0,00261	0,00149	0,31228
460	-0,02608	0,01485	0,29821
480	-0,04939	0,03914	0,14494
500	-0,07173	0,08536	0,04776
520	-0,00264	0,17468	0,01221
540	-0,03152	0,21466	0,00146
560	0,09080	0,19702	-0,00130
580	0,24526	0,13610	-0,00108
600	0,34429	0,06246	-0,00049
620	0,29708	0,01828	-0,00015
640	0,15968	0,00334	-0,00003
660	0,05932	0,00037	0,00000
680	0,01687	0,00003	0,00000
700	0,00410	0,00000	0,00000
720	0,00105	0,00000	0,00000
740	0,00025	0,00000	0,00000
760	0,00006	0,00000	0,00000

Tableau VI.1 : valeur des composantes r , v , b , nécessaires à la synthèse trichrome des couleurs monochromatiques

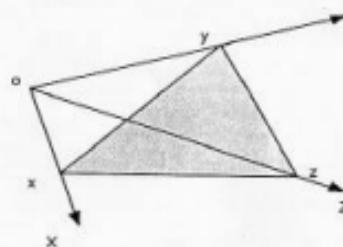


Figure VI.4 : définition du plan de luminance constante dans le système XYZ

2. Système X,Y,Z :

Des manipulations mathématiques ont été réalisées sur les courbes trichromatiques $r(\lambda)$, $v(\lambda)$, $b(\lambda)$ pour obtenir de nouvelles courbes $x(\lambda)$, $y(\lambda)$, $z(\lambda)$.

Ces courbes correspondent à des composantes X , Y , Z monochromatiques fictives (irréalisables physiquement).

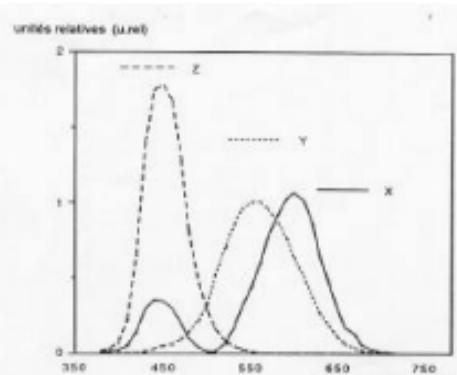
Une couleur est représentée par ses coordonnées X , Y , Z dans un système à trois axes.

On définit à nouveau un plan de luminosité constante et les points de ce plan sont repérés par les coordonnées réduites.

$$\left. \begin{array}{l} x = \frac{X}{(X+Y+Z)} \\ y = \frac{Y}{(X+Y+Z)} \\ z = \frac{Z}{(X+Y+Z)} \end{array} \right\} \quad \text{avec } x + y + z = 1$$

On peut donc passer dans un système à deux dimensions sans perdre d'information.

C'est la représentation (x , y) qui est la plus utilisée.



Dans le plan $x + y + z = 1$, l'intensité ou la luminosité est constante. La position d'un point couleur définit l'espèce et la pureté de la couleur. Ce diagramme (x, y) est appelé "plan de chromaticité" ou "diagramme de chromaticité".

3. Caractéristiques de ce diagramme de chromaticité :

- Les teintes spectrales (pureté = 1) forment dans le plan chromatique une enveloppe recourbée appelée "spectrum locus" (lieu du spectre).
- Les deux extrémités de cette enveloppe correspondent aux longueurs d'ondes limites de la sensibilité de l'œil humain. (violet et rouge)
- Le segment défini par ces deux points extrêmes est appelé "ligne des pourpres". Les couleurs situées sur ce segment ne peuvent être obtenues que par le mélange des deux longueurs d'ondes extrêmes (380 à 410 nm et 680 à 780 nm).
- Les couleurs situées sur l'enveloppe de la surface présente une pureté p = 1 (100%) en raison de leur nature monochromatique.
- Le blanc parfait présente une pureté p = 0 et se situe aux coordonnées $X = Y = Z : x = 0,333$ et $y = 0,333$ dans le plan (x, y).
Un colorimètre ou un spectrocolorimètre fournit les valeurs X, Y, Z: on en déduit x, y, z.

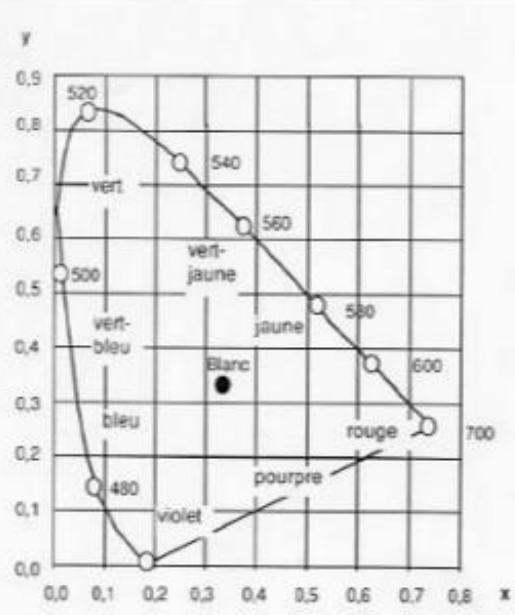


figure VI.7 : correspondance entre la position des points couleur dans le diagramme de chromaticité et la perception colorée

4. DETERMINATION DES CARACTÉRISTIQUES D'UNE COULEUR C :

- La position du point couleur C dans le diagramme de chromaticité permet de définir les caractéristiques de la couleur: espèce et pureté.
- La projection du segment, qui joint le blanc parfait (point W) et le point C coupe le spectrum locus (en E) à la longueur d'onde d'espèce de la couleur analysée (longueur d'onde dominante).
- Le prolongement de ce segment dans la direction opposée permet de définir avec précision la longueur d'onde d'espèce de sa couleur complémentaire.

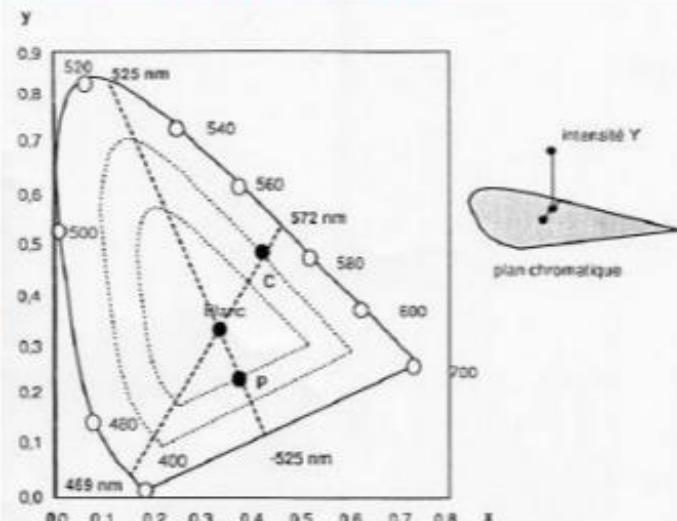


figure VI.8 : correspondance entre la position du point chromatique et les caractéristiques de la couleur (pureté, tonalité chromatique et intensité)

- La situation du point C par rapport à l'enveloppe permet de mesurer la pureté p de la couleur tel que : $p = \frac{WC}{WE}$

EXEMPLES:

<u>Couleur C:</u>	<u>Couleur P:</u>
Longueur d'onde d'espèce = 572 nm Pureté p = 70% Longueur d'onde complémentaire = 469 nm	Longueur d'onde d'espèce = - 525 nm Pureté p = 45% Longueur d'onde complémentaire = 525 nm

- Pour la couleur P, le segment WP coupe la ligne des pourpres. Dans ce cas, l'espèce de la couleur est définie par la longueur d'onde de sa couleur complémentaire précédée d'un signe - .
- La valeur Y fournie par le colorimètre est proportionnelle à l'intensité visuelle perçue par un observateur moyen.
- Conclusion: chaque couleur est définie par trois coordonnées x, y pour la chromaticité (qualité : espèce (λ) et pureté) et Y pour l'intensité (quantité). Y est porté sur un axe perpendiculaire au plan de chromaticité (x, y).

ANNEXE 2 :

AUTRE ESPACE COULEURS

Espaces de couleur

Cube RGB ou cube des couleurs

Ne pas confondre avec l'espace RGB défini par la CIE où certaines couleurs ont des composantes trichromiques négatives. Dans le cube des couleurs, les composantes sont toujours positives. Dans ce système, une couleur est représentée par trois valeurs correspondant au rouge, au vert et au bleu (voir diaporama). Système utilisé par les logiciels de dessin ou de retouche photo.

TSV (HSV ou HSB)

Système colorimétrique utilisant les trois grandeurs : Teinte, Saturation, Valeur (Hue, Saturation, Value (HSV) ou Hue, saturation, Brightness (HSB)). Système utilisé par les logiciels de dessin ou de retouche photo.

TSL (HSL)

Système colorimétrique utilisant les trois grandeurs : Teinte, Saturation, Luminance (Hue, Saturation, Lightness (HSL)). Système utilisé par les logiciels de dessin ou de retouche photo. Le plus intuitif des espaces colorimétriques. Il est différent du modèle précédent.

CIE XYZ 1931

C'est un espace de couleur non uniforme sur lequel est construit le diagramme de chromaticité CIExy.

CIE UVW 1960 CIE U'V'W' 1976

Espace colorimétrique défini par la CIE en 1960. Il est construit à partir du CIE XYZ, il fut introduit pour améliorer l'uniformité de la répartition des couleurs. Il a été supplanté par le système CIE U'V'W' 1976.

CIE L*U*V* 1976

C'est un système basé sur le précédent, toujours pour avoir une répartition plus uniforme des couleurs par rapport à la perception humaine.

CIE L*a*b* 1976

c'est un espace qui dérive du modèle Hunter Lab de 1948 (d'où les * pour le distinguer). Il fait intervenir trois paramètres : L* la clarté ; a* mesure le rapport rouge-vert et b* le rapport jaune bleu

CIE L*C*h

Ce système correspond au précédent en coordonnées cylindriques. L* défini toujours la clarté ; C* (Chroma) $C^* = \sqrt{a^* + b^*}$ représente la saturation ; h (hue) est défini par les relations : $a^* = C^* \cos(h)$ et $b^* = C^* \sin(h)$ et représente l'angle de teinte, il varie entre 0 et 360°.

Gamut

Le gamut d'un appareil (écran, imprimante, etc.) est l'ensemble des couleurs que peut reproduire cet appareil.

Illuminant

L'application du système colorimétrique de la CIE nécessite la définition d'illuminants de référence. Ces illuminants correspondent, suivant la définition de la CIE, à des répartitions spectrales d'énergie représentatives d'une moyenne de sources de lumière conventionnelles. Parmi ceux-ci les plus importants sont :

- illuminant A : Lumière émise par un corps noir à la température de 2856 K.
- illuminant D₆₅ : représente une des répartitions spectrales relatives d'énergie de la lumière du jour correspondant à une température de couleur proximale sensiblement égale à 6504 K.
- illuminant B : représente la lumière directe du Soleil de température de couleur proximale sensiblement égale à 4874 K.
- illuminant C : représente la lumière moyenne du jour de température de couleur proximale sensiblement égale à 6774 K.

Luminance

C'est le quotient de l'intensité lumineuse d'une surface par l'aire apparente de cette surface. Elle s'exprime en candela par mètre carré (cd/m²). Elle exprime la sensation visuelle que nous avons de la lumière.

On emploie en fait souvent le terme de clarté lorsqu'on se contente de valeurs relatives (sur une échelle de 0 (noir) à 100 (blanc)).

Luminosité

Caractère non quantifiable de la sensation selon laquelle une surface apparaît plus ou moins lumineuse. Ce n'est pas un synonyme de luminance. Le terme de luminosité (traduction littérale du mot anglais lightness), est souvent employé à tort (dans certains logiciels) à la place de clarté.

Métamères, métamérisme

Deux couleurs peuvent sembler identiques sous un certain éclairage et différentes sous un autre. Elles sont physiquement différentes. Elles sont dites métamères.

Oeil standard

Dans les années 30, sous l'égide de la CIE (Compagnie Internationale de l'Éclairage) plusieurs centaines de personnes ont été testées afin de déterminer combien de couleurs percevait l'œil humain. Les personnes ayant l'acuité visuelle la plus fine perçoivent jusqu'à 200 nuances par couleur (rouge, vert, bleu), mais jamais, dans les trois couleurs à la fois. Aussi, ce qu'on appelle un œil standard correspond à un œil qui percevrait 200 nuances par couleur, soit un total de huit millions de couleurs. La moyenne des gens ne perçoit que 100 nuances par couleur, soit un total d'un million de couleurs...

Température de couleur (d'une source de lumière)

Température du corps noir dont le rayonnement possède la même chromaticité que celle de la source considérée. Elle est exprimée en kelvins (K).

Température de couleur proximale (d'une source de lumière)

Température du corps noir dont le rayonnement possède la chromaticité la plus voisine de celle de la source considérée. Elle est exprimée en kelvins (K).

ANNEXE 3 :

LES SEMI-CONDUCTEURS
UTILISÉS POUR
LES LED COLORÉES

Zone du spectre électromagnétique	Longueur d'onde λ (nm)	Tension directe V_F (V) ^[1]	Semi-conducteurs utilisés
Infrarouge	$\lambda > 780$	$V_F < 2,5$	arséniure de gallium aluminium (AlGaAs) arséniure de gallium (GaAs) phosphure arsenium gallium indium (InGaAsP)
Rouge	$610 < \lambda < 780$	$1,5 < V_F < 3$	phosphure aluminium gallium indium (AlGaNp) arséniure de gallium aluminium (AlGaAs) arséniure phosphure de gallium (GaAsP) phosphure de gallium (GaP)
Orange	$590 < \lambda < 610$	$2 < V_F < 2,5$	phosphure aluminium gallium indium (AlGaNp) arséniure phosphure de gallium (GaAsP) phosphure de gallium (GaP)
Jaune	$570 < \lambda < 590$	$1,5 < V_F < 3$	phosphure aluminium gallium indium (AlGaNp) arséniure phosphure de gallium (GaAsP) phosphure de gallium (GaP)
Vert	$500 < \lambda < 570$	$1,5 < V_F < 3$	nitrure de gallium indium (InGaN) phosphure de gallium (GaP) phosphure aluminium gallium indium (AlGaNp)
Bleu	$450 < \lambda < 500$	$2,5 < V_F < 4$	nitrure de gallium indium (InGaN) sélénium de zinc (ZnSe) carbure de silicium (SiC)
Violet	$380 < \lambda < 450$	$3 < V_F < 5$	nitrure de gallium indium (InGaN) nitrure gallium (GaN)
Ultraviolet	$\lambda < 380$	$3 < V_F < 5$	nitrure de gallium indium (InGaN) nitrure gallium aluminium (AlGaN) nitrure gallium (GaN) nitrure aluminium gallium indium (AlGaNIN) nitrure aluminium (AIN)
Blanc		$3 < V_F < 5$	idem que le bleu ou l'ultraviolet

[18]

TABLE DES MATIÈRES

Remerciements.....	I
Sommaire.....	II
Glossaire.....	III
Liste des photos.....	IV
Liste des figures.....	V
Liste des tableaux.....	VII
Liste des abréviations, unités et acronymes.....	VIII
Introduction.....	1
Partie 1 : Etudes théoriques et revues bibliographiques	
Chapitre 1 : Généralités sur la couleur	2
1.1. Historique	2
1.2. Qu'est-ce que le spectre électromagnétique ?	2
1.3. Qu'est-ce que la lumière visible ?	3
1.4. Quelle est la genèse de la couleur ?	4
1.4.1. Définitions	5
1.4.2. Facteurs chimiques et apparition de couleur	7
1.5. La spectrométrie	9
1.5.1. Principe de la spectrométrie	9
1.6. La spectrophotométrie	9
1.6.1. Définition.....	9
1.6.2. Quelques types de spectrophotomètres.....	14
1.6.3. La colorimétrie	16
1.6.4. Quelques définitions	16
1.6.5. Dosage complexo-métrique.....	17
Chapitre 2 : Comportement et interaction des rayons lumineux	18
2.1. Interaction de la lumière avec une surface plane parfaite	18

2.1.1. Rayon incident.....	19
2.1.2. Rayon réfléchi.....	19
2.1.3. Rayon réfracté.....	19
2.2. Interprétation d'une couleur	19
2.2.1. Classification de la couleur selon Munsell	20
2.2.2. Synthèse additive.....	21
2.2.3. Synthèse soustractive.....	22
2.2.4. Couleur complémentaire	23
2.3. Certains espaces couleur de la lumière visible	24
2.3.1. L'espace couleur RVB (Rouge-Vert-Bleu) :	24
2.3.2. L'espace couleur XYZ :	25
2.3.3. L'espace couleur L*a*b.....	27
Chapitre 3 : Les éléments constitutifs d'un spectrophotomètre	30
3.1. Les éléments constitutifs de base d'un colorimètre.....	30
3.1.1. La source de lumière	30
3.1.2. Les capteurs photosensibles.....	32
3.1.3. La cuve à solution.....	36
3.1.4. Le système embarqué	36
3.2. Les éléments complémentaires	38
3.2.1. L'interface utilisateur	38
3.2.2. Les complémentaires du circuit électrique	39
Partie 2 : Matériels et méthodes	
Chapitre 4 : Réalisation du réflectomètre	39
4.1. Le blocus optique	39
4.1.1. La source de lumière	39
4.1.2. Le capteur photosensible	41
4.1.3. Photo du blocus optique monté	44
4.2. Le système embarqué	45

4.2.1. Le microcontrôleur	45
4.3. L'interface utilisateur	47
4.3.1. L'écran LCD.....	47
4.3.2. Le bouton de commande	49
4.2. Fonctionnement de l'ensemble.....	49
4.2.1. Montage complet de l'appareil	49
4.2.2. Fonctionnement de l'appareil	51
Chapitre 5 : Réalisation du spectrophotomètre visible.....	53
5.1. Le bloc optique	53
5.1.1. La source de lumière	53
5.1.2. La cuve à solution.....	54
5.1.3. Le photodétecteur	55
5.1.4. Photo réelle du bloc optique	55
5.2. Le système embarqué	57
5.3. L'interface utilisateur	57
5.3.1. L'écran LCD.....	57
5.3.2. Les commandes	58
5.4. Principe et mode de fonctionnement de l'ensemble (LED, photodétecteur, microcontrôleur, écran LCD et bouton de commande)	60
5.4.1. Montage complet de l'appareil	60
5.4.2. Fonctionnement de l'appareil	61
Partie 3 : Essais, résultats et discussions	
Chapitre 6 : Essai du réflectomètre.....	60
6.1. Essai de reproduction de couleur.....	60
6.1.1. Mesure colorimétrique de la surface	60
6.1.2. Transformation des valeurs en espace L*a*b*.....	60
6.2. Etalonnage de l'appareil conçu avec un appareil commercial	64
6.2.1. Mesure par l'appareil conçu	64

6.2.2. Mesure sur un appareil commercial	64
6.3. Comparaison et discussion des résultats.....	65
6.3.1. Comparaison des couleurs physiques et celles créées sur un logiciel	65
Chapitre 7 : Essai d'analyse avec le spectrophotomètre visible.....	67
7.1. Essai d'analyse de Fer (III) dans le complexe Thiocyanate de Fer (III)	67
7.1.1. Préparation de l'éta ⁿ lon.....	67
7.1.2. Essai sur l'appareil conçu	68
7.1.3. Essai sur un appareil fonctionnel de laboratoire.....	72
7.2. Comparaison et discussion des résultats.....	73
Conclusion.....	76
Liste des références bibliographiques.....	77
Annexes	
Annexe 1.....	i
Annexe 2.....	iv
Annexe 3.....	vii
Table des matières.....	viii

Nombre de pages	: 79
Nombre de tableaux	: 14
Nombre de figures	: 52
Nombre de photos	: 17

Auteur : NARINDRANJANAHARY Emmanuëla

Téléphone : +261 34 77 582 82

E-mail : ing.emmanuela@gmail.com

Titre du mémoire : « *Conception et réalisation d'un mini spectrophotomètre et réflectomètre visibles en vue d'analyse de solution chimique et de surface* »



FINTINA:

Ny tanjon'ity fandalinana ity dia ny hamolavolana sy hanamboarana spekitiraofotometatra amin'ny hazavana hita maso sy refilekitaometatra ; avy amin'ny fitaovana mitovy. Mba hanaovana izany, dia nanakambana hevitra tamin'ny boky maro. Avy eo, natao ny fanokanana ny fitaovana nampiasaina sy ny fisafidianana ny fomba noraisina. Farany, natsangana izy ireo ary nandramana sy nampitahaina tamin'ny fitaovana efa nisy izay amidy. Ny valiny dia nampiseho fa ny spekitiraofotometatra amin'ny hazavana hita maso dia afaka mamaritra ny tahan'ny singa simika miloko iray ao anatin'ny tsirano ary ny refilekitaometatra dia afaka mamantatra ny tahan'ireo loko fototra Mena,Maitso,Manga izay mandrafitra ny loko iray ary ahafhana mamerina indray ilay loko. Misy fahasamihafana kely raha oharina amin'ireo fitaovana efa misy na izany aza, afaka hatsaraina bebe kokoaindrindra eo ami'ny hafaanganany.

Teny fototra : spekitiraofotometatra, Colorimetatra, Loko, Famakafakana simika

RESUME:

Le but de ce mémoire est de concevoir et de réaliser un spectrophotomètre visible et un réflectomètre avec des composants similaires. Pour ce faire, des revues bibliographiques ont été consultées. Ensuite, l'inventaire des matériels utilisés et le choix des méthodes adoptées ont été faits. Enfin, ils ont été montés, branchés puis testés et comparés avec des appareils commerciaux. Les résultats ont été concluants et ont montré que le spectrophotomètre visible est capable de déterminer la concentration d'une espèce chimique colorée en solution et le réflectomètre est capable de mesurer le taux des couleurs primaires RVB afin de reproduire une couleur, avec une légère différence par rapport à ceux des appareils commerciaux. Cependant, la vitesse d'analyse peut être encore améliorée.

Mots-clés : Spectrophotomètre, Colorimètre, Couleur, Analyse chimique

ABSTRACT:

The purpose of this mémoire is to design and realize a visible spectrophotometer and reflectometer with similar components. To do this, bibliographic reviews were consulted. Then, the inventory of materials used and the choice of methods adopted were made. Finally, they were mounted, connected and then tested and compared with commercial devices. The results were conclusive and showed that the visible spectrophotometer is able to determine the concentration of colored chemical species in solution and the reflectometer is able to measure the rate of RGB primary colors in order to reproduce a color, with a slight difference compared to those of commercial devices. However, the analysis speed can be further improved.

Keywords: Spectrophotometer, Colorimeter, Color, Chemical analysis

Encadreur : RAZAFIMANDEFITRA André