



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieure et de la Recherche Scientifique

جامعة وهران 2 محمد بن أحمد
Université d'Oran 2 Mohamed Ben Ahmed

معهد الصيانة و الأمن الصناعي
Institut de Maintenance et de Sécurité Industrielle

Département de Maintenance en Instrumentation

MÉMOIRE

Pour l'obtention du diplôme de Master

Filière : Génie Industrielle

Spécialité : Ingénierie de la Maintenance en Instrumentation

Thème

**Réalisation d'un luxmètre numérique de type
datalogger**

Présenté et soutenu publiquement par :

Nom : BELGHAZI

Prénom : Yassine

Nom : BOUKHALFA

Prénom : Abderrahim

Devant le jury composé de :

Nom et Prénom	Grade	Etablissement	Qualité
BELKHODJA Leila	MAA	IMSI-Univ. D'Oran2	Présidente
BENABED Khadidja	MAA	IMSI-Univ. D'Oran2	Encadreur
DJELGHOUM Farida	MAA	IMSI-Univ. D'Oran2	Examinatrice

Juillet 2019

Remerciements

En tout premier lieu, nous remercions le bon Dieu, tout puissant, de nous avoir donné la force pour survivre, ainsi que l'audace pour dépasser toutes les difficultés.

Le travail présenté dans ce mémoire a été réalisé au laboratoire d'électronique de l'institut de maintenance et de sécurité industrielle, à l'aide de notre encadreur Madame BENABED Khadidja, notre plus grande gratitude va à elle, pour sa disponibilité et la confiance qu'elle nous a accordée. Nous avons profité pendant longtemps du savoir et du savoir-faire dont nous avons pu bénéficier au cours de nombreuses discussions. Nous aimerions aussi la remercier pour l'autonomie qu'elle nous a accordée, et ses précieux conseils qui nous ont permis de mener à bien ce travail.

Nous exprimons toute notre reconnaissance à Madame BELKHOUDJA Leila pour avoir bien voulu accepter de présider le jury de ce mémoire, ainsi que madame DJELGHOUM Farida pour avoir examiné notre travail.

Nous remercions aussi tous nos amis et collègues qui nous ont apporté leur support moral et intellectuel tout au long de notre démarche.

Afin de n'oublier personne, nos vifs remerciements s'adressent à tous ceux qui nous ont aidé à la réalisation de ce modeste mémoire de près et de loin.



Dédicace

Je dédie ce modeste travail à ma très chère maman

NORA, qui m'a toujours poussé et motivé dans ma vie et mes études et qui a fait de moi l'homme que je suis devenu

aujourd'hui avec son aide immense apporté durant les moments difficiles que j'ai passé.

À mon père MOHAMED, je vous remercie pour tout le soutien et l'amour et la sagesse que vous me portez depuis mon enfance. Que Dieu, le Très Haut, vous accorde santé, bonheur et longue vie.

À mon frère ABDERREZAK, mes chères sœurs SARAH et AMINA, mes cousins qui sont des frères pour moi ABDELHAMID, ZAKARIA BELGHAZI, SIDAHMED et ZAKARIA CHAALAL.

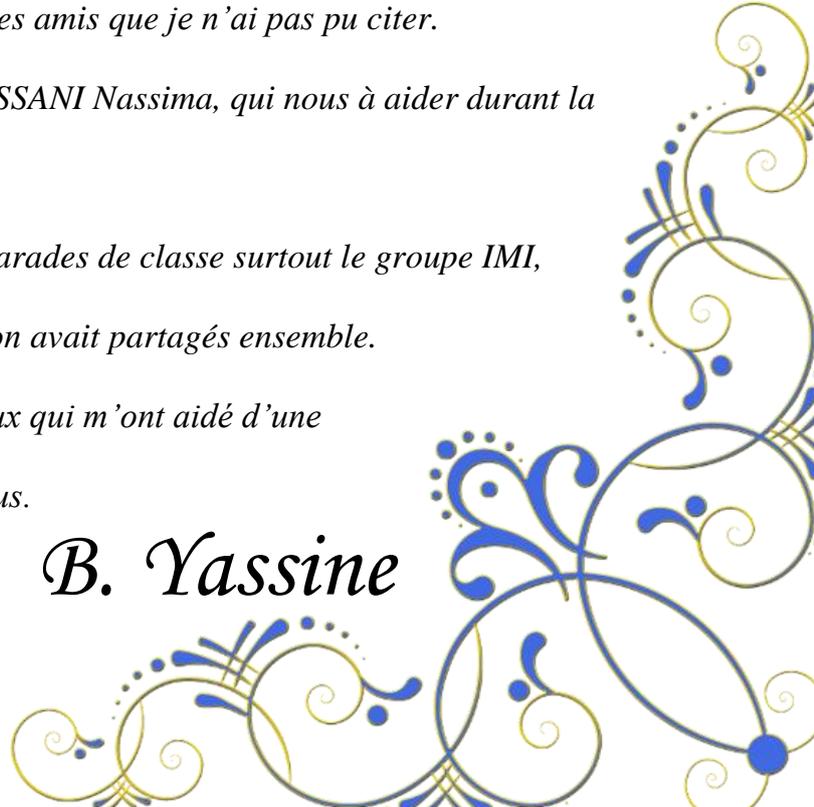
À toute ma famille qui m'ont donné leurs soutient moral, à mon binôme BOUKHALFA Abderrahim, à mes chers amis Abdelaziz, Nesrine, Khaled, Amine, Samir, Sofiane, Salah Kadri et Salah Adjal, Hicham, Abdelwahid, Zaki BZ, Malek, Derradji, Karim, Kheira, Houda, Asma et tous mes autres amis que je n'ai pas pu citer.

Je dédie aussi ce travail à madame AISSANI Nassima, qui nous à aider durant la partie de réalisation de notre projet.

Une spéciale dédicace à tout mes camarades de classe surtout le groupe IMI, merci pour les très bons moments qu'on avait partagés ensemble.

Enfin ma reconnaissance va à tous ceux qui m'ont aidé d'une façon ou d'une autre durant mon cursus.

B. Yassine



Dédicaces

Au nom du dieu le clément et le miséricordieux louange à ALLAH le tout puissant.

Je dédie ce modeste travail en signe de respect, reconnaissance et de remerciement :

*A mes chers parents,
Mohand Saïd et Samira,
qui m'ont aidé de
près et de loin.*

*A mon seul frère
Abdelmoumen.*

A mon ami et mon binôme BELGHAZI Yassine et toute la famille BELGHAZI.

A monsieur CHEIKH Abdenour et madame CHEIKH Nabila.

*A tous mes chers amis
Youcef Derradji, Imed, Aziz,
Nesrine, Hamid, Salah,
Abdelwahid, Badreddine, Youcef,
Hichem, Kheira, Narimene, Houda.*

*A toute l'équipe de
l'instrumentation
de SH RNS surtout
BERRICH Anis.*

*A toute ma famille, qui porte le nom BOUKHALFA, a toute la famille
LAGGOUNE et surtout LAGGOUNE Karima.*

*A tout ceux qui ont participé à l'élaboration de ce modeste travail en particulier,
et à tous ceux qui m'ont aidé durant mon cursus en général.*

B. Abderrahim

Table des matières

Table des matières

Remerciement	
Dédicace 1	
Dédicace 2	
Table des matières	
Liste des figures	
Liste des tableaux	
Résumé	
Introduction générale	01
Chapitre 1 : Sources de lumière	02
I.1 Introduction	03
I.2 Les différents types de lumière	03
I.2.1 La lumière visible	03
I.2.2 La lumière invisible	04
I.3 Les propriétés de la lumière	05
I.3.1 La vitesse de la lumière	05
I.3.2 Caractérisation de la lumière	05
I.3.3 La couleur de la lumière	06
I.4 La lumière et l'éclairage	06
I.4.1 Les problèmes liés à l'éclairage	07
I.4.1.1 Le niveau d'éclairement	07
I.4.1.2 La présence des rayons UV	07
I.4.1.3 La chaleur émise	07
I.4.2 Les différents types d'éclairage	07
I.4.2.1 L'éclairage naturel	08
I.4.2.2 L'éclairage artificiel	08
I.4.2.3 Les types de la lumière artificielles	08
I.4.2.3.1 L'incandescence	09
I.4.2.3.2 La décharge électrique	10
I.4.2.3.3 Les LED	12
I.5 La lumière et l'énergie	12
I.5.1 La radiométrie	13

I.5.2 Energie émise par une source ponctuelle	14
I.5.2.1 Flux énergétique	14
I.5.2.2 Intensité énergétique	14
I.5.3 Energie émise par une source étendue : (luminance énergétique)	14
I.5.4 Energie reçue par une surface : (éclairage énergétique)	14
I.5.5 Unités radiométriques	15
I.6 La photométrie	15
I.6.1 Les grandeurs photométriques	16
I.6.1.1 Le flux lumineux	17
I.6.1.2 L'intensité lumineuse	17
I.6.1.3 L'éclairage lumineux	18
I.6.4.1 La luminance	18
I.6.2 Unités photométrique	19
I.7 La différence entre photométrie et radiométrie	20
I.8 Conclusion	20
Chapitre 2 : Appareils de mesure de lumière	21
II.1 Introduction	22
II.2 Généralité sur les capteurs	22
II.3 Les capteurs de lumière	23
II.3.1 Photorésistance	23
II.3.2 Photodiode	23
II.3.3 Phototransistor	24
II.3.3.1 Fonctionnement	24
II.3.4 Cellule photovoltaïque	24
II.4 Les appareils de mesure	25
II.4.1 Définition d'appareil de mesure	25
II.4.2 Caractéristique d'un appareil de mesure	25
II.4.3 Grandeurs d'influence	25
II.4.4 Types de capteurs	26
II.4.4.1 Les capteurs actifs	26
II.4.4.2 Les capteurs passifs	27
II.4.5 Types d'appareils de mesure	28
II.4.5.1 Appareil de mesure analogique	28
II.4.5.2 Appareil de mesure numérique	28

II.5 Pyranomètre	28
II.5.1 Rayonnement solaire globale	29
II.5.2 Principe de fonctionnement d'un pyranomètre	29
II.5.2.1 Pyranomètre à thermopile	29
II.5.2.2 Pyranomètre photocellule au silicium	30
II.5.3 Domaine d'utilisation du pyranomètre	30
II.6 Posemètre	30
II.6.1 Définition	30
II.6.2 Principe de fonctionnement	31
II.6.3 Qualité d'un posemètre	32
II.6.4 Système de mesure international et autres systèmes	32
II.6.5 Types de mesure	32
II.6.5.1 Mesure de la lumière	32
II.6.5.2 Mesure de la lumière réfléchie	33
II.7 Luxmètre	33
II.7.1 Définition	33
II.7.2 Utilisation d'un luxmètre	34
II.7.3 Fonctionnement d'un luxmètre	34
II.7.4 Classification des mesures	35
II.7.5 Etude d'étalonnage d'un luxmètre	37
II.7.5.1 Mode opératoire	37
II.8 Conclusion	38
Chapitre III : Conception d'un luxmètre	39
III.1 Introduction	40
III.2 Fonction général de l'appareil	40
III.3 Conception du luxmètre	40
III.3.1 Photodiode BPW34	40
III.3.1.1 Description	41
III.3.1.2 Fonctionnalités	41
III.3.1.3 Caractéristique	42
III.3.2 Amplificateur opérationnel CA3130	42
III.3.2.1 Définition	42
III.3.2.2 Caractéristiques du CA3130	43
III.3.2.3 Application du CA3130	45

III.3.3 Le microcontrôleur	45
III.3.4 L'afficheur 7-Segments	47
III.4 Etude fonctionnel	48
III.4.1 Schéma électrique	48
III.4.2 Conversion lumière/courant	48
III.4.3 Conversion courant/tension	50
III.4.4 Filtrage du signal	52
III.4.5 Conversion analogique/numérique	54
III.4.5.1 Le microcontrôleur 8-bit (PIC16F876A)	54
III.4.6 Affichage numérique	55
III.5 Conclusion	56
Chapitre IV : Réalisation du luxmètre	57
IV.1 Introduction	58
IV.2 Description Hardware	59
IV.3 Procédures de travail	60
IV.3.1 Présentation de Proteus	60
IV.3.2 Simulation du circuit	60
IV.3.3 Matériel utilisé	62
IV.3.3.1 Photodiode BPW34	62
IV.3.3.2 Amplificateur CA3130	62
IV.3.3.3 Le PIC16F876A	63
IV.3.3.4 Afficheur 7-Segments 4 digits 5641BH	63
IV.3.3.5 Des piles de 1.5V	63
IV.3.3.6 Tableau des matériels utilisés	64
IV.3.4 Réalisation sur plaque d'essai	64
IV.3.5 Réalisation sur PCB	67
IV.3.6 Produit final	68
IV.3.7 Différents essais de la réalisation	69
IV.4 Conclusion	71
Conclusion générale	72
Annexe : Programmeur du μ C PIC le PICKit2	73
Bibliographie	78

Liste des figures

Liste des figures

Figure I.1 Le spectre électromagnétique	04
Figure I.2 Les couleurs de la lumière	06
Figure I.3 Lampe à incandescence	09
Figure I.4 Lampe halogène	10
Figure I.5 Tubes fluorescents	11
Figure I.6 Lampe à induction	12
Figure I.7 Les LED	12
Figure I.8 Quatre grandeurs énergétiques principales	13
Figure I.9 Les quatre notions de la photométrie	16
Figure I.10 Le flux lumineux	17
Figure I.11 L'intensité lumineuse	17
Figure I.12 L'éclairement	18
Figure I.13 La luminance	19
Figure II.1 Schéma fonctionnel d'un capteur	22
Figure II.2 Schéma d'une LDR	23
Figure II.3 Schéma électrique d'un phototransistor	24
Figure II.4 Cellules photovoltaïque	25
Figure II.5 Utilisation d'un pyranomètre dans une station photovoltaïque	29
Figure II.6 Pyranomètre à thermopile	29
Figure II.7 Pyranomètre à photocellule au silicium	30
Figure II.8 Posemètre flashmètre SEKONIC	31
Figure II.9 Luxmètre numérique industrielle	33
Figure II.10 Banc d'étalonnage du luxmètre	37
Figure III.1 Schéma fonctionnel d'un luxmètre	40
Figure III.2 Photodiode BPW34	41
Figure III.3 Schéma fonctionnel d'un AOP	41
Figure III.4 Saturation d'un AOP	44
Figure III.5 Différents microcontrôleurs existants	45
Figure III.6 Schéma montrant les pins d'un microcontrôleur PIC16F84	46
Figure III.7 Afficheur 7 segments à un digit	47
Figure III.8 Désignation des segments dans l'afficheur	47
Figure III.9 Schéma électrique du luxmètre	48

Figure III.10 Comparatif des graphes de sensibilité spectrale entre une BPW21 et une BPW34	49
Figure III.11 Symbole de la photodiode	50
Figure III.12 L'intensité du courant I_{ra} en fonction de l'éclairement E_A	50
Figure III.13 Circuit basique d'un convertisseur courant-tension	51
Figure III.14 Circuit utilisé pour le convertisseur courant-tension	51
Figure III.15 Filtre passe-bas	52
Figure III.16 Circuit équivalent pour les basse fréquences	53
Figure III.17 Circuit équivalent pour les hautes fréquences	54
Figure III.18 Architecture de la gamme mid-range des microcontrôleurs PIC16F	55
Figure III.19 Module afficheur 4 digits à LED 7-segments classique	56
Figure IV.1 Aperçu du dispositif fermé	58
Figure IV.2 Aperçu du dispositif ouvert	59
Figure IV.3 Synoptique du montage réalisé	59
Figure IV.4 Schéma électrique du convertisseur lumière/tension	60
Figure IV.5 Schéma électrique de la partie microcontrôleur et la conversion analogique/numérique avec affichage	61
Figure IV.6 La photodiode BPW34	62
Figure IV.7 Amplificateur CA3130	62
Figure IV.8 Le PIC16F876A	63
Figure IV.9 Afficheur sept segments de quatre digits	63
Figure IV.10 Les piles	64
Figure IV.11 Branchement sur plaque d'essai du bloc de capteur et conversion courant en tension	65
Figure IV.12 Branchement sur plaque d'essai du pic et de l'affichage	65
Figure IV.13 Injection du programme dans le PIC par le logiciel PICKit 2	66
Figure IV.14 Luxmètre sur la plaque d'essai	66
Figure IV.15 Schéma du PCB partie capteur et conversion courant/tension	67
Figure IV.16 Vue 3D sur le circuit de la PCB sur ARES	67
Figure IV.17 Produit final des PCB	68
Figure IV.18 PCB dans le boîtier en plastique	68
Figure IV.19 Essai en plein lumière	69
Figure IV.20 Essai en lumière ambiante	70
Figure IV.21 Essai en couvrant le capteur	70

Figure A.1 Programmeur PICkit2	74
Figure A.2 Fenêtre du programme PICkit 2	74
Figure A.3 Bouton écriture du programme	75
Figure A.4 Opération programmation réussite	75
Figure A.5 Opération programmation échoué	76
Figure A.6 Bouton vérification du programme	76
Figure A.7 Bouton lecture du programme présent dans le pic	76
Figure A.8 Bouton effacer du programme présent dans le pic	77

Liste des tableaux

Liste des tableaux

Tableau I.1 Tableau des unités radiométriques	15
Tableau I.2 Tableau des unités photométriques	19
Tableau II.1 Grandeurs physique et effets utilisés pour la mesure	26
Tableau II.2 Matériaux utilisés pour la mesure de différentes grandeurs	27
Tableau II.3 Valeurs conseillé en lux pour différents endroits	35
Tableau III.1 Tableau des caractéristiques de la BPW34	42
Tableau III.2 Tableau des caractéristiques de l'AOP CA3130	43
Tableau IV.1 Tableau récapitulatif des composants utilisés	64

ملخص :

تعتبر الإضاءة المرضية ضرورة في مكان العمل الحرج (المستشفى ، المدرسة ، إلخ). ضعيفة جدًا ، تسبب إرهاق العينين ، قوية جدًا ، تسبب عدم الراحة. لمنع تأثيرات الإضاءة السيئة ، هناك حاجة إلى أجهزة محددة لقياس الإضاءة في مكان معين ، من حيث الكمية والجودة. في هذا الموضوع ، يُطلب منا أولاً إجراء دراسة كاملة لمصادر الضوء (الطبيعية والاصطناعية) ، ثم تحليل التصاميم المختلفة للأدوات المخصصة لهذا الغرض ، لاختيار أخيرًا تحقيق نموذج أولي لمقياس و متحكم 8 بت. يجب أن (BPW34) الضوء الرقمي ، استنادًا إلى حول باستخدام الثنائي الضوئي ذي النطاق العريض يظل هذا النموذج الأولي قابلاً للتكرار بسهولة (توفر المكونات) وتكلفة منخفضة.

Résumé :

Un éclairage de niveau satisfaisant est une nécessité dans un lieu de travail critique (hôpital, école, etc...). Trop faible, il engendre une fatigue des yeux, trop fort, une gêne. Pour prévenir des effets d'un mauvais éclairage, il faut disposer d'appareils spécifiques consacrés à la mesure de l'éclairement dans un lieu donné, tant par sa quantité que par sa qualité. Dans ce sujet, il est demandé au préalable de faire une étude complète des sources de lumières (naturelles et artificielles), puis d'analyser diverses conceptions d'instruments dédiés, pour enfin opter pour la réalisation d'un prototype de luxmètre numérique, basé sur l'emploi d'une photodiode à large spectre (BPW34) et d'un microcontrôleur 8-bit. Ce prototype doit rester facilement reproductible (disponibilité des composants) de dimension compacte et à bas coût.

Substract :

Satisfactory lighting is a necessity in a critical workplace (hospital, school, etc.). Too weak, it causes eye fatigue, too strong, discomfort. To prevent the effects of poor lighting, specific devices are needed to measure the lighting in a given place, both in quantity and quality. In this subject, it is first asked to make a complete study of light sources (natural and artificial), then to analyze various designs of dedicated instruments, to finally opt for the realization of a prototype of a digital light meter, based on the use of a broadband photodiode (BPW34) and an 8-bit microcontroller. This prototype must remain easily reproducible (availability of components) compact size and at low cost.

Introduction générale :

La lumière est connue depuis la création des temps. À l'antiquité, les hommes l'utilisaient sans savoir comment elle est créée et comment on peut la mesurer. Ils savaient juste que durant le jour, ils peuvent utiliser la lumière du soleil, et la nuit, ils s'éclairent en allumant du feu.

Il a été observé que la lumière avait un impact direct sur la vie humaine et sur les différents objets existants. Si la lumière est intense, elle peut causer des problèmes, et si elle est minimale, elle peut gêner la bonne perception des choses.

Pour les anciens penseurs, avant les certitudes de la science moderne, la lumière était insaisissable. Ils l'ont cru immatériel. Mais avec le développement des sciences, et la connaissance de nombreux grandeurs physiques tel que la longueur, la masse... etc. On a aussi pu constater que la lumière était une grandeur physique qu'on peut mesurer.

Et après l'apparition de nombreux nouveaux domaines, comme la photographie, la cinématographie, la préservation des artefacts et peintures dans les musées... etc. On a trouvé une nécessité d'avoir un éclairage précis dans ces domaines.

Arrivé à ce stade, c'est quoi la lumière ? Comment on peut la mesurer ? Et avec quel appareil on peut effectuer cette mesure ?

Dans ce mémoire, nous allons répondre à toutes ces questions en commençant par une étude sur la lumière avec ces différents types et caractéristiques, sans oublier les unités utilisées. Nous parlerons aussi de nombreux capteurs et appareils de mesure de la lumière existants avec leurs principes de fonctionnement pour choisir un appareil précis à étudier pour le reproduire. Ensuite, nous passerons par la conception de cet appareil en étudiant ces performances, et les pièces nécessaires pour sa fabrication. Pour finir avec la réalisation de ce dernier montrant les étapes suivies et les différents résultats obtenus avec le produit final.

CHAPITRE I :

Sources de lumière

I.1 Introduction :

La lumière est omniprésente dans notre vie, c'est grâce à elle que la vie est possible sur notre planète, la vie n'aurait pas pu se développer sans la lumière du soleil, encore de nos jours, les plantes et les animaux ont besoin de lumière pour leur survie, la lumière est aussi notre principal moyen de découvrir le monde qui nous entoure.

Dans le présent chapitre, nous présenterons différentes définitions de la lumière et ses différents types et propriétés. Malgré la lumière est nécessaire pour que la vie soit possible, ça ne l'empêche pas d'avoir des inconvénients. La lumière naturelle du jour n'est pas suffisante pour la survie de l'être humain, alors, au fil des siècles, l'homme a trouvé plusieurs manières pour créer sa propre lumière et il a continué à découvrir ses propriétés pour ensuite concevoir de nombreux instruments qui utilisent ses derniers.

I.2 Les différents types de lumière :

I.2.1 La lumière visible :

La lumière prend naissance dans la matière sous une forme énergétique. Un atome peut absorber de l'énergie, il subit alors une transition d'un niveau d'énergie spécifique à un niveau d'énergie supérieur. Il y a émission de lumière (photon) lorsque l'atome subit une transition d'un niveau d'énergie spécifique à un niveau d'énergie inférieur.

Tout corps solide, liquide ou gazeux soumis à un changement d'énergie produit un rayonnement qui se traduit par des radiations variables en fréquences et longueur d'onde.

La lumière visible fait partie des rayonnements électromagnétiques ; les ondes électromagnétiques sont classées et réparties en fonction de leur longueur d'onde λ (mesurée en nanomètre $1\text{nm}=10^{-9}\text{ m}$), et de leur fréquence, inverse de la période T , mesurée en hertz (Hz).

Ce que nous appelons "lumière visible" est la partie du rayonnement électromagnétique visible pour l'humain. Nous l'appellerons rayonnement visible pour indiquer qu'il existe d'autres rayonnements qui sont invisibles à notre système visuel qui accompagnent le rayonnement visible.

En effet, Les sources de lumière, naturelles et artificielles, du soleil aux tubes fluorescents en passant par les lampes halogènes, toutes émettent une très grande quantité de radiations, dans le domaine du visible, comme de l'invisible.

Le rayonnement visible ne représente qu'une petite partie des différents types de rayonnement existant. On trouve les énergies qui ont une plus basse fréquence que la lumière visible (et donc une plus grande longueur d'onde) ; ces types d'énergie incluent le rayonnement infrarouge (IR), les micro-ondes et les ondes radio. Les rayonnements qui ont une haute fréquence que la lumière visible sont les rayons ultraviolets (UV), les rayons-X, et les rayons gamma.

Comme on a dit précédemment, Les ondes électromagnétiques sont classées et réparties en fonction de leur longueur d'onde ou de leur fréquence ; cette répartition est appelée spectre électromagnétique. Ce spectre est représenté sur la figure suivante (Figure I.1), qui consiste en une bande contenant tous les types de rayonnement électromagnétique qui existent dans l'univers.

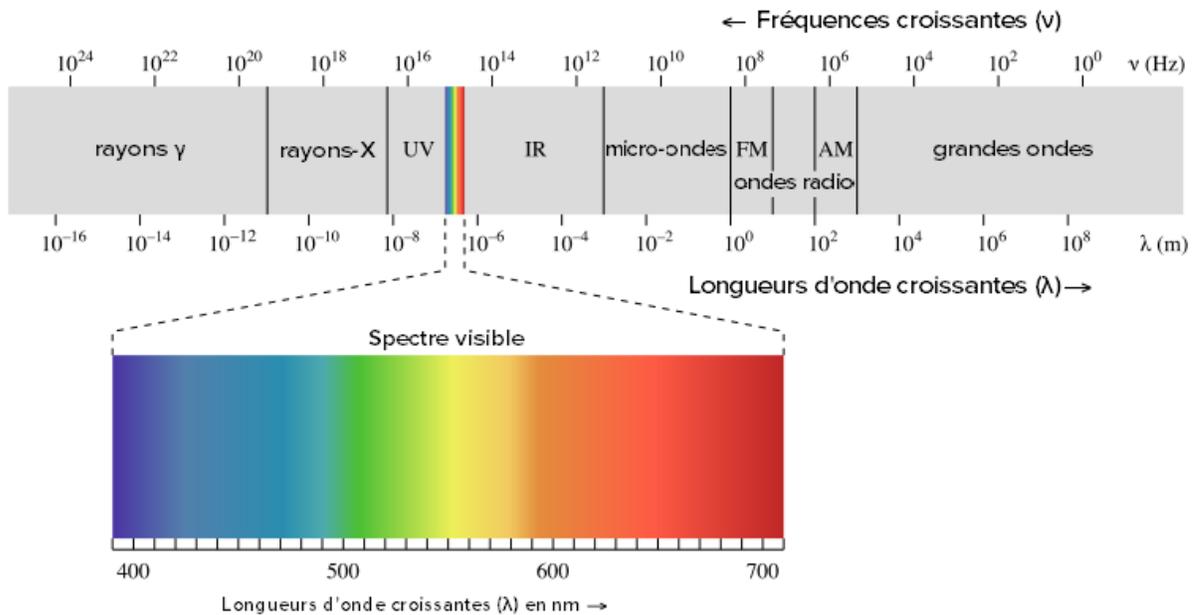


Figure I.1- Le spectre électromagnétique.

I.2.2 La lumière invisible :

Même si la lumière blanche, comme la lumière du soleil ou celle d'une lampe à incandescence, contient des radiations de longueur d'onde supérieure à 700 nm comme les infrarouges ou inférieure à 400 nm, comme les ultra-violets, celles-ci sont invisibles par l'œil humain (comme les infrasons et les ultrasons sont inaudibles par l'oreille humaine).

I.3 Les propriétés de la lumière :

I.3.1 La vitesse de la lumière :

Au fil des siècles et de l'évolution des connaissances, les expériences menées pour déterminer la valeur de la vitesse de la lumière n'ont pas manqué. Dès 1675, Ole Römer et Christian Huygens estimaient que la vitesse de la lumière dans le vide s'élevait à $220.000.000 \text{ m.s}^{-1}$. Et en 1729, James Bradley proposait une approximation à $301.000.000 \text{ m.s}^{-1}$ [1].

Nous savons aujourd'hui que dans le vide, la vitesse de la lumière est de l'ordre de $300.000.000$ mètres par seconde et plus précisément, comme définie en 1983 par le Bureau international des poids et mesures, de $299.792.458$ mètres par seconde.

La vitesse de la lumière dépend du milieu dans lequel elle se propage. Elle dépend notamment de la nature chimique du milieu, de sa densité, de sa concentration et de sa température.

Dans le vide, la lumière se déplace plus rapidement ($300.000.000$ mètres par seconde) que dans la matière. Et il est à noter que la vitesse de la lumière dans le vide correspond à une constante fondamentale de la physique.

Dans l'eau, la lumière se propage à une vitesse moindre, à quelque $225.000.000$ mètres par seconde.

Dans le diamant, la lumière se déplace à une vitesse ne dépassant pas les $125.000.000$ mètres par seconde.

I.3.2 Caractérisation de la lumière :

Une onde électromagnétique est caractérisée par plusieurs grandeurs physiques [2]:

- La longueur d'onde (λ) : C'est la longueur d'un cycle d'une onde, la distance séparant deux crêtes successives. Elle est mesurée en mètre.
- La période (T) : elle représente le temps nécessaire pour que l'onde effectue un cycle. L'unité est la seconde.
- La fréquence (ν) : inverse de la période, elle traduit le nombre de cycles par unité de temps. Elle s'exprime en Hertz (Hz).

La longueur d'onde et la fréquence sont inversement proportionnelles et unies par la relation suivante :

$$\lambda = \frac{c}{\nu} \quad (\text{I.1})$$

Où :

λ : longueur d'onde de l'onde électromagnétique

c : vitesse de la lumière

ν : la fréquence de l'onde

I.3.3 La couleur de la lumière :

La lumière du soleil est appelée « lumière blanche ». La lumière blanche est le résultat de la superposition de toutes les couleurs visibles du spectre solaire. La décomposition de la lumière blanche par un prisme fait apparaître toutes les couleurs de l'arc-en-ciel. C'est la lumière blanche qui donne à notre univers sa diversité de couleurs.

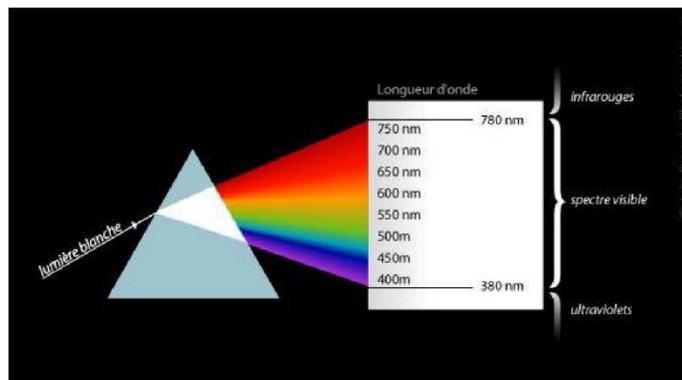


Figure I.2- Les couleurs de la lumière blanche

I.4 La lumière et l'éclairage :

La lumière et la chaleur accélèrent les processus naturels de dégradation. Tous les jours, nous constatons les résultats néfastes d'une exposition prolongée de certains objets au soleil. Sous l'effet de la lumière, les couleurs s'altèrent, les tissus et les papiers deviennent plus fragiles.

La lumière visible, les rayonnements ultraviolet et infrarouge sont des ondes électromagnétiques. Il s'agit d'ondes énergétiques qui peuvent endommager certains types d'objets.

L'action de la lumière est souvent imperceptible. Les couleurs des objets peuvent pâlir sans qu'on ne s'aperçoive de la perte de vivacité des couleurs originales. Il suffit qu'un point de

comparaison subsiste pour que l'on puisse mesurer l'étendue des dommages. Par contre, on constate que certains types d'objets en métal, en verre ou en pierre, à condition qu'ils n'aient pas de revêtement coloré, résistent bien à la lumière [3].

I.4.1 Les problèmes liés à l'éclairage :

Lors du montage en exposition, on devra considérer la sensibilité particulière des objets exposés et leur temps d'exposition. Les problèmes liés à l'éclairage sont de différents ordres dont le niveau d'éclairement, la présence d'ultraviolets et le dégagement de chaleur.

I.4.1.1 Le niveau d'éclairement :

Le niveau d'éclairement lumineux, c'est la quantité de lumière qui atteint un objet. Son unité de mesure est le lux et non le watt, le niveau d'éclairement se mesure avec le luxmètre.

I.4.1.2 La présence des rayons UV :

Le deuxième problème lié à l'éclairage est la présence de rayons ultraviolets ou UV.

La lumière solaire, l'éclairage fluorescent et la plupart des lumières halogènes émettent des UV. Ces rayons très énergétiques endommagent les objets. Les ultraviolets se mesurent avec un ultraviomètre et leur unité de mesure est le micro-watt par lumen [3].

Les UV étant inutiles pour l'éclairage des objets, on recommande de les éliminer ou de les maintenir en dessous de 75 micro-watts par lumen. Même sous un niveau d'éclairement faible, la quantité d'UV peut être excessive.

Des filtres UV sur les fenêtres ou sur les tubes fluorescents arrêtent les ultraviolets, sans diminuer pour autant le niveau d'éclairement.

I.4.1.3 La chaleur émise :

Un troisième problème lié à l'éclairage est celui de la chaleur. La lumière incandescente et la lumière solaire produisent beaucoup de chaleur. Or, une chaleur trop élevée dessèche les matériaux organiques et accélère leur vieillissement.

I.4.2 Les différents types d'éclairage :

L'éclairage peut être naturel comme la lumière solaire, ou artificiel comme la lumière fluorescente ou incandescente. Les problèmes posés par l'éclairage artificiel et naturel sont

comparables. La différence réside dans le fait que l'éclairage artificiel est plus facile à contrôler que l'éclairage naturel.

Quel que soit le type d'éclairage utilisé, on doit limiter le niveau d'éclairement, éliminer les UV, éviter la chaleur et réduire la durée d'exposition.

I.4.2.1 L'éclairage naturel :

La source de lumière naturelle qui éclaire notre planète est le soleil. Toutefois, la voûte céleste, qui reçoit cette lumière, agit comme un filtre/diffuseur pour une part importante de ce flux direct du soleil. Elle se comporte alors comme un large luminaire de lumière naturelle. En éclairage naturel, on considère deux sources, le soleil (rayonnement direct) et le ciel (rayonnement diffus). Les luminances, les éclairements et la répartition spectrale varient dans la journée en fonction de la position du soleil, mais également de la couverture nuageuse qui est un élément aléatoire.

La lumière naturelle est la partie visible du rayonnement électromagnétique provenant du soleil. Les longueurs d'onde de son spectre s'étendent de 400 à 700 nanomètres pour la vision diurne [4].

La composition du rayonnement énergétique global est variable sur la planète et au cours de l'année, elle varie également selon les sources. En première approximation, on peut dire que la répartition est d'environ la moitié de rayonnement visible et l'autre moitié de non-visible.

I.4.2.2 L'éclairage artificiel :

La lumière artificielle, c'est l'éclairage que l'on produit grâce à des lampes et des projecteurs notamment. Elle a besoin d'alimentation électrique pour fonctionner (même si elle fonctionne sur batterie).

La lumière artificielle offre un vaste champ de possibilités et de différents types de sources (lampes fluorescentes, halogènes, LEDs...).

I.4.2.3 Les types de la lumière artificielles :

Une lampe est un convertisseur d'énergie. Bien qu'elle puisse trouver d'autres applications, son but premier est la transformation de l'énergie électrique en rayonnement électromagnétique dans le domaine visible. Il existe de nombreux moyens de créer de la lumière. La méthode standard de création d'un éclairage général consiste à convertir l'énergie électrique en lumière.

I.4.2.3.1 L'incandescence :

Lorsqu'on chauffe des solides ou des liquides, ils émettent aux températures supérieures à 1000 K un rayonnement visible ; ce phénomène est appelé « incandescence ».

Il constitue la base de la production de lumière dans les lampes à filament : un courant électrique traverse un mince fil de tungstène, dont la température atteint 2 500 à 3 200 K, selon le type de lampe et son utilisation [5].

Les lampes à incandescence :

Ces lampes utilisent un filament de tungstène placé dans un gaz inerte ou dans le vide à l'intérieur d'une ampoule de verre. Le gaz inerte élimine l'évaporation du tungstène.

Il existe une grande variété de formes de lampes dont l'aspect vise surtout un but décoratif.

Les lampes à incandescence dont on peut facilement faire varier le flux en réduisant la tension d'alimentation restent employées lorsque la variation de la lumière constitue une caractéristique d'utilisation importante.

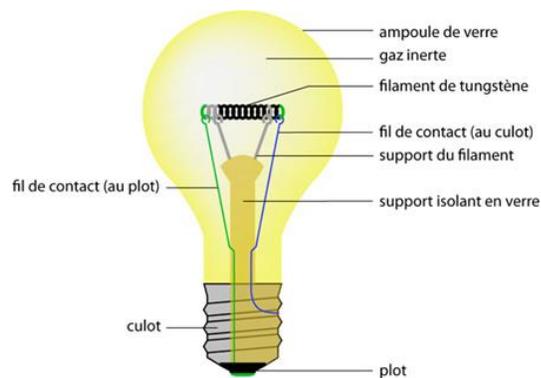


Figure I.3- Lampe à incandescence

Lampes tungstène halogène :

Similaires aux lampes à incandescence, ces lampes produisent de la lumière de la même manière, à partir d'un filament de tungstène. Cependant, l'ampoule contient un gaz halogène (brome ou iode) qui limite chimiquement l'évaporation du tungstène.

Pour le cycle halogène, il est essentiel que l'ampoule présente une température de paroi de 250°C minimum pour assurer le maintien de l'halogénure de tungstène à l'état gazeux et, donc,

éviter sa condensation sur l'ampoule. Cette température implique de fabriquer les ampoules en quartz et non pas en verre, ce qui permet de réduire leur taille.

La plupart des lampes tungstène halogène offrent une meilleure durée de vie que des lampes à incandescence équivalentes, et leur filament atteignant une température supérieure, il génère une lumière plus intense, d'une couleur plus blanche.

Les lampes tungstène halogène sont maintenant très utilisées dans les domaines où une taille réduite et un haut niveau de performances constituent des besoins primordiaux, y compris l'éclairage des scènes de théâtre et des plateaux de cinéma et de télévision où l'orientation et la variation de flux sont des attentes courantes.

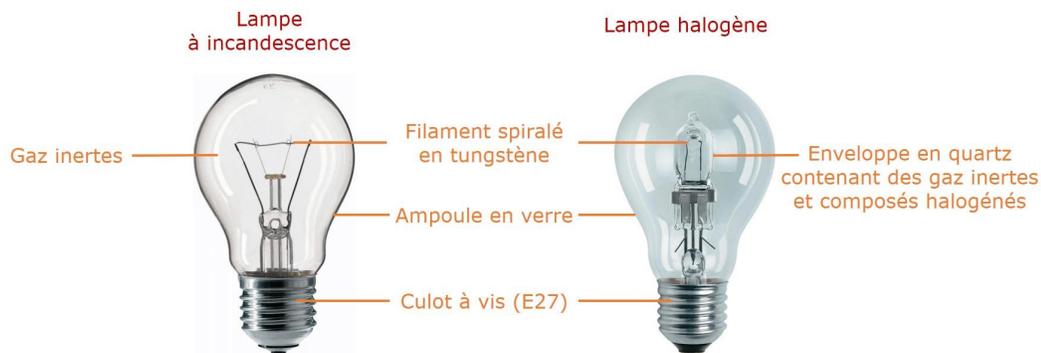


Figure I.4- Lampe halogène

I.4.2.3.2 La décharge électrique :

La décharge électrique est une technique utilisée dans les sources d'éclairage modernes pour le commerce et l'industrie, du fait de sa meilleure efficacité dans la production de lumière.

Un courant électrique traversant un gaz provoque une excitation des atomes et des molécules qui émettent un rayonnement avec un spectre caractéristique des éléments présents. Deux métaux sont habituellement utilisés, le sodium et le mercure, car leurs caractéristiques permettent d'obtenir des rayonnements dans le domaine visible.

Les lampes à décharge sont souvent classées en haute et basse pression, bien que ces termes soient relatifs et qu'une lampe à vapeur de sodium haute pression fonctionne au-dessous d'une atmosphère [5].

Les tubes fluorescents :

Il s'agit de lampes à vapeur de mercure basse pression qui existent en deux versions : à « cathodes chaudes » et à « cathodes froides ». Le tube fluorescent classique utilisé dans les bureaux et les usines correspond à la première version ; le terme « cathode chaude » se rapporte à l'amorçage de la lampe par préchauffage des électrodes pour créer une ionisation suffisante du gaz et des vapeurs de mercure afin de stabiliser la décharge.

Les lampes à cathodes froides sont principalement utilisées pour les enseignes et la publicité.



Figure I.5- Tubes fluorescents

Lampes à induction :

Des lampes utilisant le principe de l'induction ont récemment fait leur apparition sur le marché. Il s'agit de lampes à vapeur de mercure à basse pression avec une couche de substances fluorescentes, similaires aux lampes fluorescentes, destinées à la production de lumière. L'énergie est transférée à la lampe par rayonnement haute fréquence à environ 2,5 MHz à partir d'une antenne située au centre de la lampe. Il n'existe pas de connexion physique entre l'ampoule et la bobine. Sans électrodes ni connexions filaires, la structure du tube de décharge est plus simple et plus durable. La durée de vie de la lampe est principalement déterminée par la fiabilité des composants électroniques et le maintien du flux lumineux de la couche fluorescente.

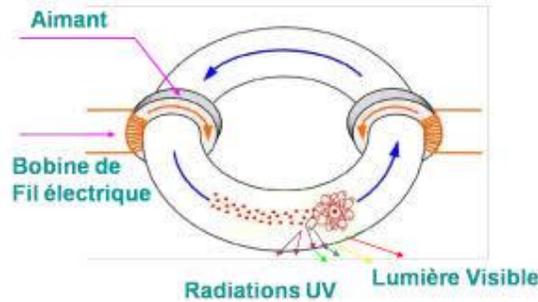


Figure I.6- Lampe à induction

I.4.2.3.3 Les LED :

Une LED ; diode électroluminescente (abrégée DEL en français, mais plus communément nommée LED pour Light Emitting Diode en anglais) ; est un composant opto-électronique qui émet de la lumière lorsqu'il est parcouru par un courant électrique continu. Ainsi, une ampoule LED ne possède pas de filament, contrairement à une ampoule incandescente, mais est constituée de couches de plusieurs matériaux semi-conducteurs que sont le nitrure d'aluminium et le phosphore de gallium. Ces matériaux, en opposant aucune résistance au courant, permettent d'éviter une perte d'énergie tout en créant de la lumière.



Figure I.7- Les LED

I.5 La lumière et l'énergie :

L'énergie lumineuse se présente à la fois sous la forme d'une onde et sous la forme des grains appelés photons.

Les échanges d'énergie portée par le rayonnement électromagnétique qui ont lieu entre le soleil et le système terre-océan-atmosphère ne se font pas de manière continue, mais de façon discrète, sous forme de paquets d'énergie, véhiculés par des corpuscules élémentaires immatériels, les photons. Chaque photon transporte ainsi un quantum d'énergie proportionnel à la fréquence de

l'onde électromagnétique considérée ; cette énergie est d'autant plus grande que la fréquence est élevée [2].

La relation suivante exprime la quantité d'énergie associée à un photon en fonction de la fréquence de l'onde :

$$E = h \cdot \nu \quad (I.2)$$

Où :

- E : l'énergie de l'onde électromagnétique (J)
- ν : la fréquence de l'onde (Hz)
- h : la constante de Planck ($6,625 \cdot 10^{-34}$ J.s)

I.5.1 La radiométrie :

La radiométrie s'applique à l'ensemble des radiations électromagnétiques. C'est un système d'unités physiques bien défini qui permet de quantifier l'énergie de toutes les radiations qu'elles soient visibles ou non, la lumière n'étant qu'une très faible part des radiations électromagnétiques.

Les unités radiométriques sont donc des unités physiques indépendantes de la longueur d'onde. Elles se limitent à quatre unités principales, deux sont définies pour des sources émissives ponctuelles (le flux énergétique et l'intensité énergétique), la troisième pour des sources émissives étendues (la luminance énergétique) et la quatrième pour des sources émissives ponctuelles ou étendues (l'éclairement énergétique) [6].

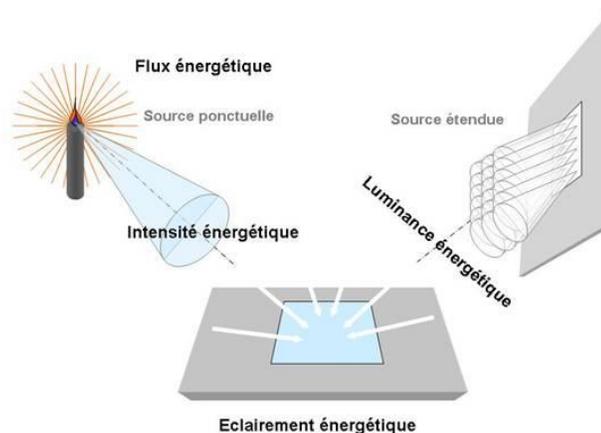


Figure I.8- Quatre grandeurs énergétiques principales

I.5.2 Energie émise par une source ponctuelle :

Une source est considérée comme ponctuelle si son diamètre apparent est inférieur ou égal à une minute d'arc (Sous-unités du degré ; 1' (minute d'arc) = $1^\circ/60 = 0,0166^\circ$). Elle émet de l'énergie dans toutes les directions de l'espace, l'ensemble de cette énergie représente le flux énergétique. L'énergie émise dans une zone de l'espace, autour d'une direction donnée, c'est-à-dire dans un angle solide donné définit l'intensité énergétique.

I.5.2.1 Flux énergétique :

C'est la grandeur fondamentale. Le flux énergétique représente l'énergie émise par une source ponctuelle pendant l'unité de temps et transmise à l'espace, dans toutes les directions ; il s'exprime en Joule par seconde ($J.s^{-1}$) ou en Watt (W) puisqu'une énergie émise par seconde est homogène à une puissance.

I.5.2.2 Intensité énergétique :

Elle représente l'énergie émise par une source ponctuelle par unité de temps mais limitée à une portion de l'espace autour d'une direction donnée, c'est-à-dire limitée à un angle solide donné. Elle s'exprime en Watt par stéradian ($W.sr^{-1}$).

I.5.3 Energie émise par une source étendue : (luminance énergétique)

Pour mesurer l'énergie d'une source étendue, on la décompose en surfaces élémentaires émettrices de très petites tailles, chacune considérée comme ponctuelle. En se plaçant perpendiculairement à chacune de ces surfaces, la luminance énergétique correspond à la somme (l'intégrale) des intensités énergétiques émises par chacune des surfaces élémentaires émettrices de la source. Elle s'exprime en Watt par stéradian et par mètre carré ($Watt.sr^{-1}.m^{-2}$).

I.5.4 Energie reçue par une surface : (Éclairement énergétique)

L'éclairement énergétique (E_e) correspond à l'énergie reçue par une surface donnée, que cette énergie (ou flux) soit émise par une source ponctuelle ou étendue. Il s'exprime en Joule par seconde et par mètre carré ou en Watt par mètre carré ($W.m^{-2}$).

I.5.5 Unités radiométriques :

Grandeur	Unité SI	Symbole	Notes
Énergie (radiante)	Joule	J	C'est l'énergie au sens classique du terme
Flux ou puissance (radiante)	Watt	W	C'est une puissance au sens commun du terme
Intensité énergétique	Watt par stéradian	$W \cdot sr^{-1}$	La puissance est rapportée à l'unité d'angle solide
Luminance énergétique	Watt par stéradian et par mètre carré	$W \cdot sr^{-1} \cdot m^{-2}$	La puissance est rapportée à l'unité d'angle solide et à l'unité de surface apparente
Éclairement énergétique	Watt par mètre carré	$W \cdot m^{-2}$	La puissance est rapportée à l'unité de surface émettrice

Tableau I.1- Tableau des unités radiométriques**I.6 La photométrie :**

La photométrie, ou la mesure de la lumière et des phénomènes lumineux, est une des bases essentielles de l'éclairage. Le but de la photométrie est de quantifier les grandeurs relatives au rayonnement en fonction de l'impression visuelle produite. La photométrie est la science qui étudie le rayonnement lumineux du point de vue de la perception par l'œil humain.

La plupart des appareils de mesure en photométrie, qui ne font pas intervenir directement l'œil en tant qu'élément sensible, sont étalonnés en fonction de la courbe de sensibilité relative de

l'œil humain qui a été établie par la Commission Internationale de l'Éclairage (CIE) à partir d'un grand nombre d'individus. Elle montre que la sensibilité maximale de l'œil humain en vision de jour se produit pour une longueur d'onde de 555 nanomètres. Cette courbe prend des valeurs non nulles pour des longueurs d'onde allant de 400 nanomètres à 700 nanomètres. En dehors de cette plage toutes les grandeurs photométriques seront nulles.

La photométrie permet d'évaluer quantitativement les performances d'un éclairage ; elle est un domaine de la physique appliquée, dédié à la mesure du rayonnement visible. Les unités utilisées en photométrie sont dérivées des unités utilisées en physique. La base de ces unités est la courbe de sensibilité spectrale de « l'observateur de référence CIE » [7].

I.6.1 Les grandeurs photométriques :

Il est difficile de parler objectivement de l'éclairage sans rappeler les quatre notions de base de la photométrie qui sont : l'intensité, le flux lumineux, l'éclairement et la luminance.

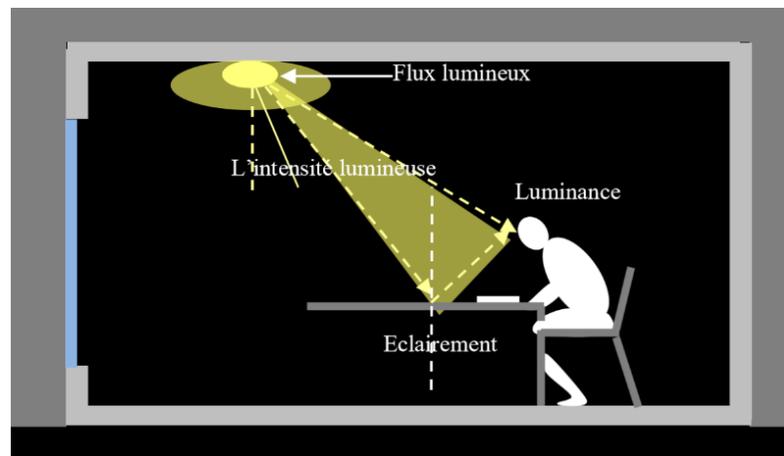


Figure I.9- Les quatre notions de la photométrie

Ces quatre facteurs sont liés entre eux comme ceci : Une source d'éclairage naturelle ou artificielle rayonne dans toutes les directions de l'espace un flux lumineux dont l'unité est le lumen (lm). Ce flux, dans une direction donnée, a une certaine intensité exprimée en candelas (cd) ; une surface, placée à une distance donnée de la source, reçoit un éclairement qui s'exprime en lux (lx). Enfin, cette surface éclairée renvoie une partie de l'éclairement reçu en direction de l'observateur: c'est la luminance exprimée en candelas par mètre carré (cd/m^2).

I.6.1.1 Le flux lumineux :

Le flux lumineux d'une source est l'évaluation, selon la sensibilité de l'œil, de la quantité globale de lumière rayonnée dans toutes les directions de l'espace par cette source. Il s'exprime en lumen (lm). Le flux lumineux décrit la puissance lumineuse totale fournie par une source lumineuse. Cette puissance peut être systématiquement saisie dans l'unité Watt comme énergie fournie. En considérant la sensibilité spectrale de l'œil, on obtient la valeur Lumen. Un flux de rayonnement de 1 W fourni au maximum de la sensibilité spectrale de l'œil (diurne, 555 nm) produit un flux lumineux de 683 lm. Par contre, le même flux de rayonnement dans des plages de fréquence de moindre sensibilité produit des flux lumineux plus petits.

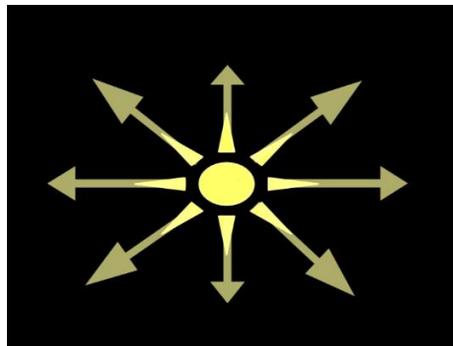


Figure I.10- Le flux lumineux

I.6.1.2 L'intensité lumineuse :

L'intensité lumineuse est le flux lumineux émis par unité d'angle solide dans une direction donnée. Elle se mesure en candela (cd). En photométrie, l'intensité lumineuse est une mesure de l'éclat perçu par l'œil humain d'une source lumineuse. Une source lumineuse ayant la même intensité lumineuse dans toutes les directions est dite à répartition isotrope.

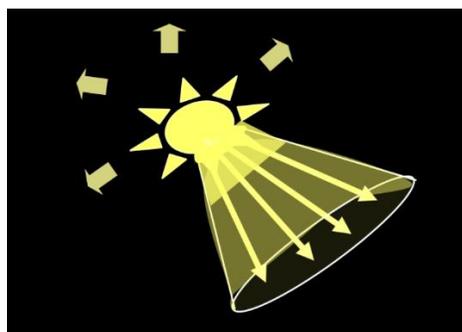


Figure I.11- L'intensité lumineuse

I.6.1.3 L'éclairement lumineux :

L'éclairement d'une surface est le rapport du flux lumineux reçu à l'aire de cette surface. Son unité est le lux, équivalent à $1\text{lm}/\text{m}^2$, il correspond à un flux lumineux de 1 lumen (lm) couvrant uniformément une surface de 1 mètre carré (m^2).

L'éclairement dépend de l'intensité de la source lumineuse, de la distance entre la source et la surface éclairée et de son inclinaison par rapport aux rayons lumineux. L'éclairement caractérise donc la quantité de lumière reçue par une surface. L'échelle des niveaux d'éclairement disponibles naturellement est très étendue.

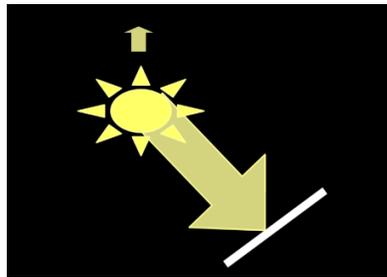


Figure I.12- L'éclairement

I.6.1.4 La luminance :

La luminance est la grandeur de photométrie la plus connue du grand public, c'est celle qui correspond le mieux à nos sensations visuelles. Elle exprime le niveau de luminosité qui est une donnée sensorielle sans tenir compte du débit de lumière.

La luminance d'une source est le rapport entre l'intensité lumineuse émise dans une direction et la surface apparente de la source lumineuse dans la direction considérée. Elle permet de quantifier l'impression lumineuse perçue par un observateur qui regarde une source de lumière. Elle s'exprime en cd/m^2 . Elle traduit la sensation visuelle de luminosité créée par une source lumineuse principale ou par une source secondaire. La luminance est la seule grandeur photométrique réellement perçue par l'œil humain. Elle dépend de l'éclairement de cette surface, de son coefficient de réflexion et de sa brillance. La luminance n'est pas liée à la taille de la surface lumineuse et n'importe quel rayon unique et très fin transporte toute la luminance.

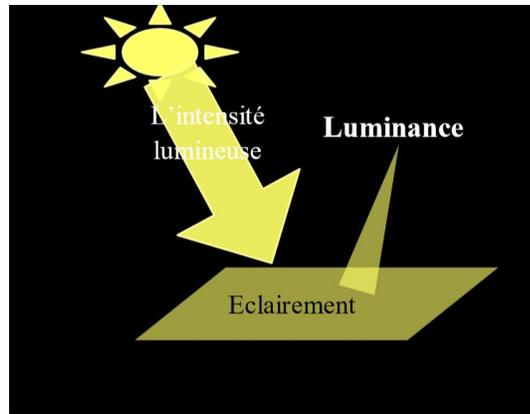


Figure I.13- La luminance

I.6.2 Unités photométriques :

Grandeur	Unité SI	Symbole	Notes	Unités énergétiques équivalentes
Flux lumineux	Lumen	lm	Appelé parfois puissance lumineuse	W
Intensité lumineuse	Candela	cd	C'est l'unité de base dans le système SI	W/sr
Luminance	Candela par mètre carré	cd/m ²	Appelé parfois brillance	W/sr/m ²
Éclairement	Lux	lx	Il s'agit du flux lumineux reçu par une surface	W/m ²

Tableau I.2- Tableau des unités photométriques

I.7 La différence entre photométrie et radiométrie :

La radiométrie est le domaine qui étudie la mesure de l'énergie des rayonnements électromagnétiques, y compris la lumière visible.

En optique, la photométrie est la science qui étudie le rayonnement lumineux du point de vue de la luminosité perçue par l'œil humain, plutôt que l'énergie totale du rayonnement. Les appareils de mesure en photométrie, sont étalonnés en fonction de la courbe de sensibilité relative de l'œil humain.

La différence entre les deux, c'est que la radiométrie prend en compte la totalité de l'énergie du rayonnement émis par un corps alors que la photométrie étudie seulement la partie du rayonnement émis par un corps qui est visible par l'œil humain et en plus la photométrie pondère les mesures en tenant compte de la sensibilité de l'œil humain.

I.8 Conclusion :

En conclusion, dans ce chapitre, on a cité les différents types de lumière avec leurs propriétés physiques, passant par l'éclairage et ses deux types, naturelle et artificielle, on a décrit d'une manière bien détaillée les différents types de l'éclairage artificiel et leurs fonctionnements avec des exemples. En finissant par décrire les deux domaines majeurs qui font les études de la lumière et l'éclairage en précisant les grandeurs les plus importantes dans ces domaines et leurs différentes unités.

CHAPITRE II :
Appareils de mesure de
lumière

II.1 Introduction:

L'amélioration des performances des systèmes techniques (précision, régulation de paramètres, automatisation...) nécessite le recueil des informations correctes et fiable sur la partie opérative avec ce qu'on appelle « capteur ».

La condition essentielle pour qu'un système soit gouvernable est qu'il soit observable, donc les capteurs sont utilisés pour observer le système et le contrôler à tout moment durant le cycle de son exécution.

Afin de mesurer la lumière le plus souvent, on utilise le luxmètre, pyranomètre, posemètre et d'autres appareils de mesure de lumière.

II.2 Généralité sur les capteurs :

Dans un grand nombre de domaines, il est nécessaire d'avoir accès à une grandeur physique, cette connaissance permet de connaître l'état physique d'un système et de pouvoir prendre des décisions quant à la conduite de celui-ci.

Les décisions peuvent être automatiques, c'est-à-dire prises par un ordinateur ou prises par un opérateur humain via une interface homme-machine. Dans les deux cas, l'état physique du système doit être connu sous la forme d'une grandeur électrique : tension ou courant car les systèmes de traitement n'utilisent que ces grandeurs.

L'opération qui permet de transformer une grandeur physique en une grandeur électrique est réalisée par un capteur.

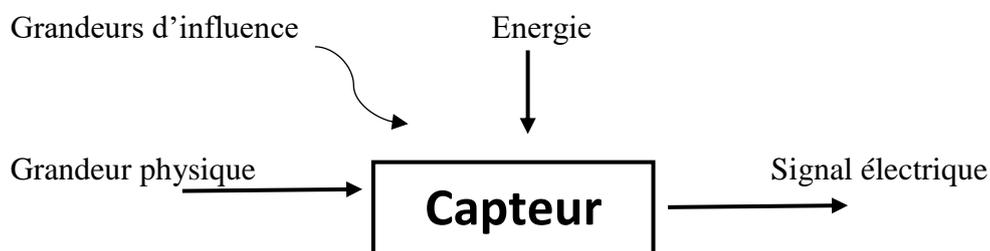


Figure II.1- Schéma fonctionnel d'un capteur

II.3 Les capteurs de lumières :

II.3.1 Photorésistance :

Une photorésistance est un composant électronique dont la résistivité fluctue (fréquemment une diminution) selon l'augmentation de lumière qui l'atteint. On peut aussi le nommer résistance photo-dépendante (light-dependent resistor (LDR)) ou photoconducteur [8].

Une photorésistance se compose d'un semi-conducteur à haute résistivité. Si la lumière incidente est de fréquence suffisamment élevée, les photons absorbés par le semi-conducteur donneront aux électrons liés assez d'énergie pour sauter dans la bande de conduction, les électrons libres (avec leurs trous d'électron) ainsi produits abaissant la résistance de la totalité.

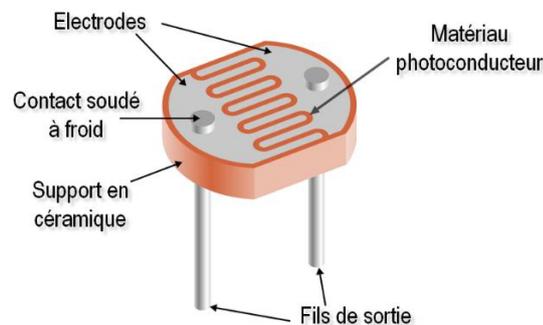


Figure II.2- Schéma d'une LDR

II.3.2 Photodiode :

Une photodiode est un semiconducteur formé par une simple jonction P-N photoréceptrice généralement non amplificatrice mais dans certaines conditions une amplification interne peut se produire.

Lorsque les photons pénètrent dans le semiconducteur, pourvu qu'ils aient une énergie suffisante, peuvent créer des photo-porteurs en excès dans le matériau. Ces photo-porteurs sont des paires d'électrons-trous. Chaque paire créée se traduit par la circulation dans le circuit extérieur d'une charge élémentaire [9].

On observe ainsi une augmentation du courant. Vu que les photo-courants créés sont très faible, il faut que la jonction soit polarisée en inverse, d'une part pour éviter le courant en direct de la photodiode qui est beaucoup plus important que les photo-courant et d'autre part pour augmenter son rendement.

II.3.3 Phototransistor :

Un photo transistor est un dispositif qui convertit l'énergie lumineuse en énergie électrique. Les phototransistors sont similaires aux photorésistances, mais ils produisent du courant et de la tension contrairement aux photorésistances qui ne produisent que du courant.

Le phototransistor est constitué d'un semi-conducteur bipolaire et concentre l'énergie qui passe en lui. Les phototransistors sont enfermés (généralement) dans une petite coque opaque ou transparente sur mesure, afin de renforcer la lumière qui passe dedans et permet à la lumière d'atteindre les endroits sensibles des phototransistors [10].

II.3.3.1 Fonctionnement :

Le phototransistor a généralement une base exposée à la lumière (Figure II.3) qui entre en contact avec celui-ci et qui l'amplifie (la lumière). Ceci forme un courant élevé qui passe dans le phototransistor et donc le courant se répartit de la base à l'émetteur, et c'est alors que le courant est concentré et converti en tension.

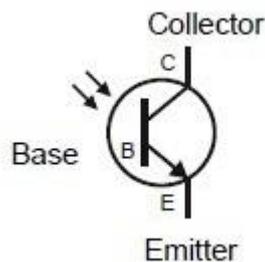


Figure II.3- Schéma électrique d'un phototransistor

II.3.4 Cellule photovoltaïque :

Une cellule photovoltaïque est un composant électronique qui, exposé à la lumière (photons), génère de l'électricité. C'est l'effet photovoltaïque qui est à l'origine du phénomène.

Le courant obtenu dépend de la lumière incidente. L'électricité produite dépend de l'éclairement, la cellule photovoltaïque produit un courant continu.

Les cellules photovoltaïques les plus communes sont constituées de semi-conducteurs, essentiellement à base de silicium (Si) et plus rarement d'autres semi-conducteurs : sélénure de cuivre et d'indium ($\text{CuIn}(\text{Se})_2$ ou $\text{CuInGa}(\text{Se})_2$), tellure de cadmium (CdTe), etc. Elles se présentent le plus souvent sous la forme de fines plaques d'une dizaine de centimètres de côté, prises en sandwich entre deux contacts métalliques, pour une épaisseur de l'ordre du millimètre.

Les cellules sont fréquemment réunies dans des modules solaires photovoltaïques ou panneaux solaires, selon la puissance recherchée [11].



Figure II.4- Cellules photovoltaïque

II.4 Les appareils de mesure :

II.4.1 Définition d'appareil de mesure :

Un appareil de mesure est un système qui transforme une grandeur physique difficilement exploitable à l'œil nu en une grandeur normée, généralement électrique, qui peut être interprétée par un dispositif de contrôle commandé [12].

II.4.2 Caractéristique d'un appareil de mesure :

- Etendue de mesure : Valeurs extrêmes pouvant être mesurée par le capteur
- Résolution : Plus petite variation de grandeur mesurable par le capteur.
- Sensibilité : Variation du signal de sortie par rapport à la variation du signal d'entrée
- Précision : Aptitude du capteur à donner une mesure proche de la valeur vraie
- Rapidité : Temps de réaction du capteur. La rapidité est liée à la bande passante
- Linéarité : représente l'écart de sensibilité sur l'étendue de mesure

II.4.3 Grandeurs d'influence :

- Température: modifications des caractéristiques électriques, mécaniques et dimensionnelles
- Pression, vibrations: déformations et contraintes pouvant altérer la réponse
- Humidité: modification des propriétés électriques (constante diélectrique ou résistivité), dégradation de l'isolation électrique
- Champs magnétiques: création de f.e.m d'induction pour les champs variables ou modifications électriques (résistivité) pour les champs statiques
- Tension d'alimentation: lorsque la grandeur de sortie du capteur dépend de celle-ci directement (amplitude ou fréquence)

II.4.4 Types de capteurs :

II.4.4.1 Les capteurs actifs :

Fonctionnant en générateur, un capteur actif est généralement fondé dans son principe sur un effet physique qui assure la conversion en énergie électrique de la forme d'énergie propre à la grandeur physique à prélever, énergie thermique, mécanique ou de rayonnement [13]. Les plus classiques sont :

- Effet thermoélectrique : un circuit formé de deux conducteurs de nature chimique différente, dont les jonctions sont à des température T_1 et T_2 , est le siège d'une force électromotrice (T_1 , T_2).
- Effet piézo-électrique : L'application d'une contrainte mécanique à certains matériaux dits piézo-électrique (le quartz par exemple) entraîne l'apparition d'une déformation et d'une même charge électrique de signe différent sur les faces opposées.
- Effet d'induction électromagnétique : La variation du flux d'induction magnétique dans un circuit électrique induit une tension électrique.
- Effet photo-électrique : La libération de charges électriques dans la matière sous l'influence d'un rayonnement lumineux ou plus généralement d'une onde électromagnétique dont la longueur d'onde est inférieure à un seuil caractéristique du matériau.
- Effet Hall : Un champ B crée dans le matériau un champ électrique E dans une direction perpendiculaire.
- Effet photovoltaïque : Des électrons et des trous sont libérés au voisinage d'une jonction PN illuminée, leur déplacement modifie la tension à ses bornes.

Grandeur physique à mesurer	Effet utilisé	Grandeur de sortie
Température	Thermoélectricité	Tension
Température	Pyroélectricité	Charge
Flux de rayonnement optique	Photoémission	Courant
Flux de rayonnement optique	Effet photovoltaïque	Tension
Flux de rayonnement optique	Effet photo-électrique	Tension
Force ou pression	Piézo-électricité	Charge

Accélération ou vitesse	Induction électromagnétique	Tension
Position (aimant) ou courant	Effet Hall	Tension

Tableau II.1- Grandeurs physique et effets utilisé pour la mesure

II.4.4.2 Les capteurs passifs :

Il s'agit généralement d'impédances (résistance, inductance, capacité) dont l'un des paramètres déterminants est sensible à la grandeur mesurée [13]. La variation d'impédance résulte :

- Soit d'une variation de dimension du capteur, c'est le principe de fonctionnement d'un grand nombre de capteur de position, potentiomètre, inductance à noyaux mobile, condensateur à armature mobile.
- Soit d'une déformation résultant de force ou de grandeur s'y ramenant, pression accélération (armature de condensateur soumise à une différence de pression, jauge d'extensiométrie liée à une structure déformable).

L'impédance d'un capteur passif et ses variations ne sont mesurables qu'en intégrant le capteur dans un circuit électrique, par ailleurs alimenté et qui est son conditionneur.

Grandeur physique à mesurer	Caractéristique sensible	Matériaux utilisé
Température	Température	Métaux : platine, nickel, cuivre...
Très basse température	Constante diélectrique	Verre
Flux de rayonnement optique	Résistivité	Semi-conducteur
Déformation	Résistivité	Alliage de nickel, silicium dopé
Déformation	Perméabilité magnétique	Alliage ferromagnétique
Position (aimant)	Résistivité	Matériaux magnéto résistants
Humidité	Résistivité	Chlorure de lithium

Tableau II.2- Matériaux utilisé pour la mesure de différentes grandeurs

II.4.5 Types d'appareils de mesure :

II.4.5.1 Appareil de mesure analogique :

Un appareil analogique fait correspondre à la grandeur que l'on veut mesurer une grandeur analogue. Le plus souvent il s'agit de l'angle de rotation d'une aiguille.

Par exemple, lorsque la grande aiguille de votre montre a tourné d'un angle de 90° , vous savez que 15 minutes sont passées.

Les appareils de mesure analogiques sont fabriqués en général à partir d'un galvanomètre à cadre mobile. Ce sont des appareils fragiles [14].

II.4.5.2 Appareil de mesure numérique :

On utilise de plus en plus des appareils à affichage numérique. Un affichage 2000 points, peut afficher les nombres de 0 à 1999 ainsi qu'une virgule flottante. Les appareils numériques ne contiennent pas de pièces mécaniques en mouvement, mais seulement des composants électroniques. Ils sont beaucoup plus robustes que les appareils analogiques [14].

II.5 Pyranomètre :

Un pyranomètre est un capteur de flux thermique utilisé pour la mesure de la quantité d'énergie solaire en lumière naturelle et est notamment utilisé en météorologie. Il permet la mesure de la puissance du rayonnement solaire total en watts par mètre carré. Il est sensible dans un domaine spectral de 300 à 2500 nanomètres selon le filtre utilisé [15].

Le pyranomètre est utilisé, par exemple, lors de la mesure de rayonnement solaire en serre, évalué en comparaison de la valeur du rayonnement en extérieur pour estimer les pertes d'énergie directe lors de la traversée des toitures. L'unité du rayonnement est le watt par mètre carré (W/m^2).



Figure II.5- Utilisation d'un pyranomètre dans une station photovoltaïque

II.5.1 Rayonnement solaire globale :

Le soleil produit un rayonnement sur des longueurs d'onde de 0,15 à 4,0 μm , ce qu'on appelle le spectre solaire.

La mesure du rayonnement du soleil sur la terre est appelée rayonnement solaire global, parfois appelé rayonnement à ondes courtes.

II.5.2 Principe de fonctionnement d'un pyranomètre :

II.5.2.1 Pyranomètre à thermopile :

Les pyranomètres à thermopile utilisent une série de jonctions thermoélectriques (jonctions multiples de deux métaux différents - principe du thermocouple) pour fournir un signal de plusieurs $\mu\text{V}/\text{W}/\text{m}^2$ proportionnel à la différence de température entre une surface absorbante noire et une référence. La référence peut être soit une surface réfléchissante blanche, soit la partie interne de la base du capteur. La surface noire du pyranomètre à thermopile absorbe uniformément le rayonnement solaire à travers le spectre solaire [16].



Figure II.6- Pyranomètre à thermopile

II.5.2.2 Pyranomètre photocellule au silicium :

Les pyranomètres photocellulaires au silicium produisent un courant de sortie μA similaire à un panneau solaire qui convertit l'énergie solaire en électricité. Lorsque le courant traverse une résistance de dérivation (par exemple, 100 ohms), il est converti en un signal de tension avec une sensibilité de plusieurs $\mu\text{V}/\text{W}/\text{m}^2$. Un diffuseur en plastique est utilisé pour fournir une réponse cosinus uniforme à différents angles du soleil.



Figure II.7- Pyranomètre à photocellule au silicium

II.5.3 Domaine d'utilisation du pyranomètre :

Les mesures du rayonnement solaire global sont utilisées dans plusieurs applications à des fins différentes :

- L'énergie solaire pour déterminer à quel point les panneaux solaires sont efficace en transformant l'énergie solaire en électricité et lorsque les panneaux doivent être nettoyés. Les capteurs utilisés à cet effet mesurent habituellement le rayonnement dans le plan des panneaux solaires.
- Les services publics pour prédire l'utilisation de l'énergie au gaz et à l'électricité.
- La recherche en tant que paramètre unique pour prédire ou quantifier la croissance ou la production des plantes.
- L'agriculture, ainsi que l'entretien d'un golf et d'un parc, comme un paramètre pour prédire l'utilisation de l'eau pour les plantes et pour planifier l'irrigation.
- La météorologie comme facteur unique des modèles de prévision météorologique.

II.6 Posemètre :

II.6.1 Définition :

Un posemètre est un appareil utilisé en photographie pour mesurer la luminosité d'une scène et ainsi déterminer l'exposition optimum d'une prise de vue.

Il permet de calculer la résultante des variables d'exposition en fonction de l'éclairement ou la luminance de la scène, du temps d'exposition, de l'ouverture du diaphragme et de la sensibilité de la surface (film ou capteur).

Il est composé d'une cellule photo-électrique et d'un calculateur, manuel (de type règle à calcul) ou électronique. Cette capacité de calcul le différencie d'un simple luxmètre.



Figure II.8- Posemètre flashmètre SEKONIC

II.6.2 Principe de fonctionnement :

Les posemètres sont basés sur un capteur photosensible capable de produire un signal électrique proportionnel au flux lumineux qu'il reçoit. Il peut s'agir de :

- Une cellule photovoltaïque, qui permet au posemètre de fonctionner sans alimentation électrique.
- Une cellule photorésistante.
- Une photodiode.

Sur les posemètres indépendants, ce capteur est situé derrière une fenêtre transparente qu'on oriente vers la scène pour une mesure en lumière réfléchie, ou bien derrière un diffuseur translucide plat ou hémisphérique (sphère intégrative) pour une mesure en lumière incidente. Sur les spotmètres et les posemètres intégrés, le capteur se trouve derrière un objectif.

Les spotmètres :

Ce sont des posemètres en lumière réfléchie dont la particularité est d'avoir un angle d'analyse extrêmement réduit, généralement entre 1° et 5°, comparativement aux posemètres qui ont un angle d'analyse de 30° à 50° suivant les modèles.

II.6.3 Qualité d'un posemètre :

- Sensibilité
- Précision
- Qualité de l'hémisphère intégratif.

II.6.4 Système de mesure international et autres systèmes :

Les posemètres destinés plus particulièrement au cinéma, comportent un double système de mesure en Lux (lx) et en foot-candle (fc) pour la lumière incidente et en candela par mètre carré (cd/m²) et foot-lambert (fL) pour la lumière réfléchie.

Ce double système de lecture s'explique par les habitudes d'utilisation des unités, en particulier aux États-Unis.

Avec les relations :

- Pour les foot-candles : $1 \text{ fc} \approx 10,764 \text{ lx}$
- Pour les foot-Lamberts : $1 \text{ fL} \approx 3,426 \text{ cd/m}^2$.

II.6.5 Types de mesure :

II.6.5.1 Mesure de la lumière :

Pour une mesure en lumière incidente le posemètre constitue un luxmètre spécialisé. Une cellule photoélectrique, généralement recouverte d'une boule en plastique translucide (sphère intégrative), recueille la lumière incidente à laquelle le sujet est exposé (variable E) et en mesure l'intensité.

Donc cette technique consiste à mesurer la lumière qui éclaire le sujet et pas, comme les posemètres intégrés aux appareils, la lumière réfléchie par le sujet.

Pour effectuer la mesure, il faut placer le posemètre autonome le plus près possible du sujet à photographier, Cette mesure est très précise puisqu'elle tient compte de toutes les lumières (principale, secondaire et même parasites) qui éclairent le sujet.

Ce type de mesure trouve principalement son utilité en studio où on utilise toujours des sources lumineuses multiples. Elle ne peut être utilisée que si on peut approcher le sujet. Elle ne peut se faire qu'à l'aide de posemètres indépendants.

II.6.5.2 Mesure de la lumière réfléchie :

En mesure réfléchie, le posemètre analyse la quantité de lumière réfléchie par le ou les sujets visibles par la surface sensible et calcule les variables d'exposition.

C'est le cas des cellules d'appareils photographiques. En fonction de normes définies, ils calculent la quantité de lumière moyenne devant impressionner la surface sensible.

Pour une mesure avec une plus grande exactitude, il existe des posemètres spécialisés, les spotmètres qui mesurent la lumière réfléchie sur une petite surface du sujet (de 1° à 10° et peuvent être intégrés à la caméra). Il s'agit donc de la quantité de lumière réfléchie (et non incidente) par la scène (produit $E \times R$).

Certains permettent la mémorisation de plusieurs valeurs et réalisent au choix une moyenne arithmétique ou pondérée.

II.7 Luxmètre :

II.7.1 Définition :

Le luxmètre est un appareil qui permet de mesurer l'éclairement lumineux reçu par unité de surface et donné en lux (lx). Un lux correspond à l'éclairement d'une surface qui reçoit un flux lumineux d'un lumen par mètre carré [17].

Le luxmètre est principalement utile aux professionnels de l'éclairage, quel que soit leur domaine de prédilection : cinéma, éclairage d'extérieur ou intérieur, ergonomie du poste de travail, etc.



Figure II.9- Luxmètre numérique industrielle

II.7.2 Utilisation d'un luxmètre :

Le luxmètre a d'abord été utilisé par les photographes ou cinéastes, par les éclairagistes, il est de plus en plus utilisé par les énergéticiens pour optimiser l'éclairage intérieur (20 à 60 % de l'électricité est consommée par l'éclairage) ou extérieur (qui gaspille souvent beaucoup d'énergie), on les utilise aussi plus rarement pour mesurer la luminosité du ciel en météorologie, pour mesurer la lumière reçue au sol en forêt ou dans une serre.

Depuis quelques années, il est utilisé par des écologues, astronomes ou architectes « HQE » (Haute qualité environnementale) pour établir des indices quantitatifs de pollution lumineuse ou de l'intrusion lumineuse afin de les réduire par des matériels et stratégies d'éclairage adaptées, cet appareil est utilisé aussi par les ingénieurs biomédicaux dans le domaine médical au niveau de bloc opératoire pour mesurer la puissance d'éclairage des scalytiques, il est aussi utilisé en industrie afin de déterminer si les travailleurs ont l'éclairage nécessaire pour effectuer leur travail.

Le luxmètre est utilisé dans des domaines assez variés, les énergéticiens y ont notamment recours pour optimiser l'éclairage intérieur et extérieur des bâtiments afin que ces derniers puissent s'inscrire dans une démarche respectueuse de l'environnemental, mais aussi réduire leur consommation d'électricité, en effet, un simple éclairage optimisé peut limiter considérablement les émissions de dioxyde de carbone.

Par ailleurs, les écologues et architectes HQE (Haute Qualité Environnementale) l'utilisent pour mesurer le niveau de pollution lumineuse ou « intrusion lumineuse », dans une optique de protection de l'écosystème, une mesure au luxmètre permettra alors de détecter toute présence anormale de lumière, de manière à mettre en place une stratégie d'éclairage adaptée en évitant ainsi d'éventuelles conséquences néfastes.

II.7.3 Fonctionnement d'un luxmètre :

Auparavant, les luxmètres étaient analogique dotés d'un affichage à aiguille donc galvanométrique. Et désormais tout est devenue numérique, alors on a profité pour l'améliorer avec des circuits intégrés et un affichage numérique.

Équipé d'une photodiode ou système de cellules photovoltaïques qui permet d'obtenir une mesure efficace et rapide de la lumière, la quantité de lumière à mesurer est envoyée vers le circuit intégré à travers la photodiode par exemple, qui elle-même transmet un signal compris par ce circuit afin de nous afficher le résultat de la mesure précise de l'éclairement.

Le luxmètre procède à la mesure de l'éclairement lumineux, soit la quantité de flux lumineux (ou la quantité de lumière émise dans toutes les directions par une source primaire) et se mesure en lux, pour plus d'efficacité, on peut également associer cette mesure à celle de l'intensité lumineuse, exprimée en candela (cd) et correspondant au flux lumineux émis dans une direction donnée.

Certains luxmètres sont équipés d'une mémoire pour enregistrer les données. La mesure de l'intensité de la lumière prend de plus en plus d'importance dans les postes de travail qui ont besoin d'écrans protecteurs.

II.7.4 Classification des mesures :

Afin d'avoir une référence pour la comparer aux nombreuses mesures qu'on peut effectuer avec un luxmètre, nous avons préparé un tableau informatif avec les valeurs de mesure minimum d'intérieur. A l'extérieur, les valeurs de mesure sont beaucoup plus élevées [18].

Lieu éclairé	Type ou lieu de travail	Plage d'intensité lumineuse
Ecoles	Réalisation d'expérimentations	700 – 1500 lux
	Travaux au tableau	700 – 1500 lux
	Réalisation de dessin ou graphisme	700 – 1500 lux
	Couloirs	150 – 300 lux
	Salles en générale	150 – 300 lux
	Salle de lecture	700 – 1500 lux
	Cantine	300 – 700 lux
Bureaux	Salle et travaux avec ordinateurs	1500 – 3000 lux
	Réalisation de dessins ou graphisme	1500 – 3000 lux
	Réunions	300 – 700 lux
	Cantines	150 – 300 lux
	Réception	300 – 700 lux
Usine	Hangar de production	1500 – 3000 lux
	Bureau de recherche	700 – 1500 lux

	Bureau de planification	700 – 1500 lux
	Réalisation de travaux dans laboratoire	1500 – 3000 lux
	Empaquetage de produits	700 – 1500 lux
	Entrepôt	300 – 700 lux
	Salles électriques	150 – 300 lux
Hôpitaux	Salles de visites	300 – 700 lux
	Formation	300 – 700 lux
	Formation anatomique	300 – 700 lux
	Salles de traitements et premiers secours	700 – 1500 lux
	Pharmacie	700 – 1500 lux
	Lecture au lit (patients)	150 – 300 lux
	Salle de rayons X	70 – 150 lux
	Blanchisserie	150 – 300 lux
Hôtels	Réception	700 – 1500 lux
	Entrées	300 – 700 lux
	Salle de banquets	300 – 700 lux
	Bureaux	150 – 300 lux
	Restaurant	150 – 300 lux
	Salle de bain	150 – 300 lux
	Blanchisserie	150 – 300 lux
	Bar	70 – 150 lux
	Couloirs	70 – 150 lux
	Escaliers	70 – 150 lux
Loisirs	Vitrines	1500 – 3000 lux

	Salles d'exposition	1500 – 3000 lux
	Empaquetage	700 – 1500 lux
	Salle d'attente	300 – 700 lux
	Salle de réunions	300 – 700 lux
	Salles de bains	150 – 300 lux
	Escaliers	70 – 150 lux

Tableau II.3- Valeurs conseillées en lux pour différents endroits

II.7.5 Etude d'étalonnage d'un luxmètre :

La méthode d'étalonnage consiste à comparer la valeur d'un éclairement de référence à la valeur affichée sur le luxmètre en étalonnage.

Le dispositif utilisé pour l'étalonnage est illustré sur la figure suivante :

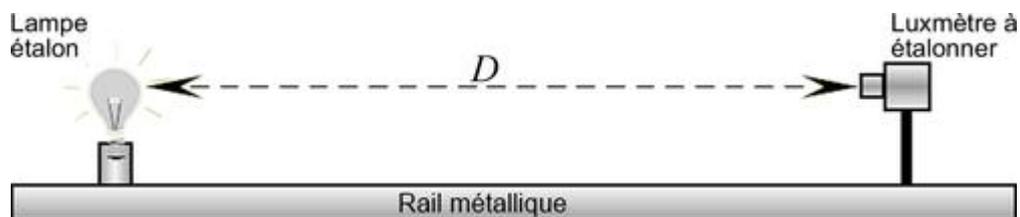


Figure II.10- Banc d'étalonnage du luxmètre

L'équipement sur la figure (figure II.10) est constitué de :

- Une rail métallique servant de support mécanique aux différents composants.
- Une lampe étalon d'intensité lumineuse I_L connue.
- Un luxmètre à étalonner.

Le dispositif produit un éclairement ajustable par la distance D séparant la lampe du luxmètre et spatialement uniforme sur la surface réceptrice du luxmètre.

II.7.5.1 Mode opératoire :

L'opérateur monte la lampe étalon à une extrémité du banc, le luxmètre est placé sur un support mobile capable de se déplacer sur le rail métallique.

L'opérateur relève la distance D séparant la lampe et le luxmètre ainsi que la valeur de l'éclairement indiqué par le luxmètre.

La variation du niveau d'éclairement est obtenue par variation de la distance D . L'opération est répétée 5 fois.

Dans un premier temps, on évalue l'incertitude sur l'éclairement de référence E . Cet éclairement est déterminé en appliquant la loi de Bouguer.

Pour une source considérée comme ponctuelle d'intensité $I(L)$ située à la distance D du luxmètre, on a :

$$E = \frac{I(L)}{D^2} \quad (\text{II.1})$$

Avec :

- E : Eclairement (lx)
- $I(L)$: Intensité lumineuse (cd)
- D : Distance (m)

II.8 Conclusion :

Dans ce chapitre, nous concluons qu'il existe plusieurs types d'appareils de mesure de lumière qui utilisent différentes méthodes de calculs.

Chaque appareil est constitué d'un composant sensible à la lumière (photodiode, photorésistance, plaque photovoltaïque, ...etc.). Alors en analysant ces composants un par un, on peut réaliser l'appareil adéquat pour nous donner une mesure fiable et précise de la lumière.

CHAPITRE III :

Conception du luxmètre

III.1 Introduction :

Le luxmètre peut porter des diverses caractéristiques à savoir l'intervalle de mesure, le type de rayonnement à mesuré...etc. Ceci nous a permis de construire un luxmètre en passant par différents schémas électriques et parmi lesquels le prototype choisit à la réalisation de notre travail.

III.2 Fonction général de l'appareil :

La fonction primaire d'un luxmètre est de mesurer la quantité de lumière en un point donné, afin de vérifier que l'éclairement est conforme à des normes spécifiées.



Figure III.1- Schéma fonctionnel d'un luxmètre

III.3 Conception du luxmètre :

On veut réaliser un luxmètre numérique convertissant l'éclairement reçu par notre appareil en une tension linéairement variable par rapport à la variation de l'éclairement, qui sera ensuite traité par un microcontrôleur et affiché sur un afficheur 7 segments avec des valeurs numérique.

Afin de réaliser cette manipulation, on a besoin d'un élément sensible à la lumière. Parmi plusieurs détecteurs (photodiode, photorésistance, phototransistor, ...) on a choisi la photodiode BPW34 répondant à nos besoins et aussi par rapport à sa disponibilité au marché.

III.3.1 Photodiode BPW34 :

Un capteur est un dispositif qui fournit une interface entre l'équipement électronique et un phénomène physique. En effet, il convertit une quantité physique ou chimique en un signal électrique. En particulier un photodétecteur (ou détecteur photoélectrique) est un détecteur de rayonnement, il absorbe un signal optique et le transforme en un signal thermique, mécanique ou dans la majorité des cas un signal électrique.

III.3.1.1 Description :

La BPW34 est une photodiode PIN silicium à haute vitesse et haute sensibilité de rayonnement dans un boîtier plastique transparent, plat et miniature. Elle est sensible aux rayonnements visibles et quasi-infrarouges [19].

Cette photodiode a plusieurs utilisations, dont l'une est de l'utiliser comme mini-cellule solaire pour alimenter de petits projets à faible consommation d'énergie.

Elle est également utile lorsqu'elle est utilisée comme capteur pour détecter la lumière. La cellule est sensible à une large gamme de longueurs d'ondes lumineuses (430-1100nm), elle doit donc produire de la puissance dans un certain nombre de paramètres différents. La tension nominale de circuit ouvert est de 350 mV (source de lumière de 950 nm, 1 mW / cm²) et le courant de court-circuit est de 47 μ A.



Figure III.2- Photodiode BPW34

III.3.1.2 Fonctionnalités :

- Type d'emballage : plombé
- Forme de paquet : vue de dessus
- Dimensions (L x l x h en mm) : 5,4 x 4,3 x 3,2
- Zone sensible aux radiations (en mm²) : 7.5
- Haute photo-sensibilité
- Haute sensibilité rayonnante
- Convient pour rayonnement visible et quasi-infrarouge
- Temps de réponse rapide
- Angle de demi-sensibilité de 65°

III.3.1.3 Caractéristiques de base :

Paramètre	Conditions de teste	Symbole	Min.	Typ.	Max.	Unité
Tension de claquage	$I_R = 100 \mu A$, $E = 0$	$V_{(BR)}$	60	-	-	V
Courant d'obscurité inverse	$V_R = 10 V$, $E = 0$	I_{ro}	-	2	30	nA
Capacité de la diode	$V_R = 0 V$, $f = 1$ MHz, $E = 0$	C_D		70		pF
Capacité de la diode	$V_R = 3 V$, $f = 1$ MHz, $E = 0$	C_D		25	40	pF
Tension de circuit ouvert	$E_e = 1 mW/cm^2$, $\lambda = 950 nm$	V_o	-	350	-	mV
Courant de court-circuit	$E_A = 1 klx$	I_k	-	70	-	μA
Courant de court-circuit	$E_e = 1 mW/cm^2$, $\lambda = 950 nm$	I_k	-	47	-	μA
Courant de lumière inverse	$E_A = 1 klx$, $V_R = 5 V$	I_{ra}	-	75	-	μA
Courant de lumière inverse	$E_e = 1 mW/cm^2$, $\lambda = 950 nm$, $V_R = 5 V$	I_{ra}	40	50	-	μA
Angle de demi sensibilité	-	ϕ	-	± 65	-	deg
Longueur d'onde de la sensibilité maximale	-	λ_p	-	900	-	nm
Plage de bande passante spectrale	-	$\lambda_{0.1}$	-	430 to 1100	-	nm

Tableau III.1- Tableau des caractéristiques de la BPW34

III.3.2 Amplificateur opérationnel CA3130 :**III.3.2.1 Définition :**

L'amplificateur opérationnel est un amplificateur différentiel qui permet de faire une amplification de la différence de potentiel présente à ces entrées.

Il a été conçu initialement pour faire des opérations mathématiques dans les calculateurs analogiques (addition, soustraction, intégration, dérivation, ...).

Par la suite, l'amplificateur opérationnel est utilisé dans plusieurs applications tel que la commande des moteurs, la régulation de tension, les sources de courants, les oscillateurs...etc.

CA3130 est un amplificateur opérationnel qui associe l'avantage des transistors bipolaires et CMOS ensemble. Les transistors MOSFET à canal P protégés par une gâchette sont utilisé dans le circuit d'entrée pour fournir une impédance d'entrée très élevée, un courant d'entrée très faible et vitesse exceptionnelle performance [20].

Dans la figure suivante (figure III.3), on met en évidence le schéma équivalent de l'amplificateur opérationnel et ses résistances.

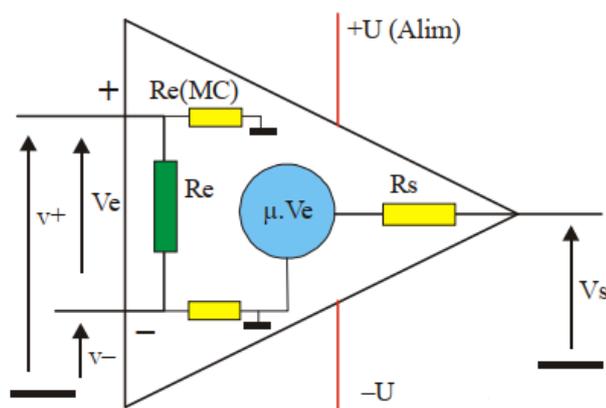


Figure III.3- Schéma fonctionnel d'un AOP

III.3.2.2- Caractéristiques du CA3130 :

PARAMETER	SYMBOL	TEST CONDITIONS	CA3130			CA3130A			UNITS
			MIN	TYP	MAX	MIN	TYP	MAX	
Input Offset Voltage	$ V_{IO} $	$V_S = \pm 7.5V$	-	8	15	-	2	5	mV
Input Offset Voltage Temperature Drift	$\Delta V_{IO}/\Delta T$		-	10	-	-	10	-	$\mu V/^\circ C$
Input Offset Current	$ I_{IO} $	$V_S = \pm 7.5V$	-	0.5	30	-	0.5	20	pA
Input Current	I_I	$V_S = \pm 7.5V$	-	5	50	-	5	30	pA
Large-Signal Voltage Gain	A_{OL}	$V_O = 10V_{P-P}$ $R_L = 2k\Omega$	50	320	-	50	320	-	kV/V
			94	110	-	94	110	-	dB
Common-Mode Rejection Ratio	CMRR		70	90	-	80	90	-	dB
Common-Mode Input Voltage Range	V_{ICR}		0	-0.5 to 12	10	0	-0.5 to 12	10	V

Tableau III.2- Tableau des caractéristiques de l'AOP CA3130

Pratiquement tous les amplificateurs opérationnels ont la même structure interne : ce sont des circuits monolithiques dont une « puce » de silicium constitue le substrat commun. Ils comportent en entrée un amplificateur différentiel suivi d'un étage adaptateur d'impédance ; l'amplificateur de sortie, de type push-pull, fonctionne en classe B. Toutes les liaisons sont directes.

L'amplificateur se caractérise par :

- Un gain de tension μ_D très important : $\mu \approx 10^5$ à 10^7
- Une impédance d'entrée très grande : $R_E \approx 1.5 \times 10^{12} \Omega$
- Une impédance de sortie très faible : $R_S \approx 10$ à 500Ω
- Tension de saturation : La tension de sortie peut varier entre les valeurs extrêmes $+V_{sat}$ et $-V_{sat}$ (tensions de saturation) qui sont légèrement inférieures aux tensions d'alimentation (figure III.3). Le gain étant très grand, la saturation de la sortie est obtenue pour des tensions d'entrée très faibles.

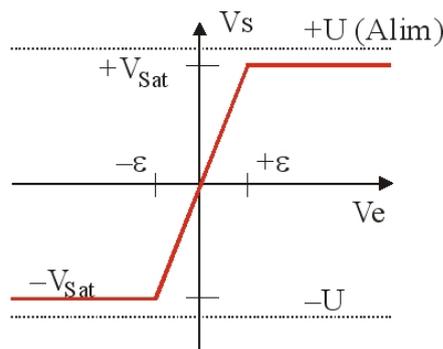


Figure III.4- Saturation d'un AOP

- Ils possèdent deux entrées notées + (l'entrée non inverseuse) et - (l'entrée inverseuse) mais ont une seule sortie.
- Ils utilisent, sauf exception, deux alimentations $+U$ et $-U$, symétriques par rapport à la masse.
- Un faible courant d'entrée $I_E = 5 \text{ pA}$ avec une tension de 15V et $I_E = 2 \text{ pA}$ avec une tension de 5V.

III.3.2.3- Applications du CA3130 :

- Suiveur de tension,
- Régulateur de tension,
- Détecteur de pic,
- Redresseurs de précision à double onde à alimentation unique,
- Convertisseur pour photodiode [20].

Dans notre réalisation, on utilise cet amplificateur pour convertir le signal obtenu de notre photodiode BPW34 dans l'étage de conversion courant/tension.

III.3.3- Le microcontrôleur :

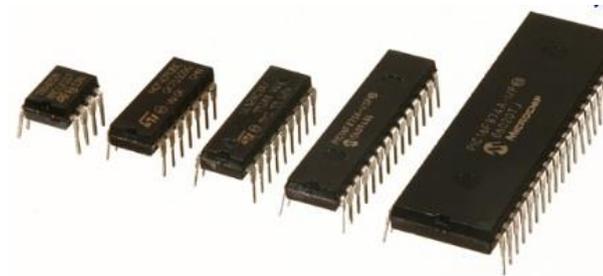


Figure III.5- Différents microcontrôleurs existants

Le microcontrôleur est un circuit intégré programmable assurant le traitement des signaux et informations provenant du procédé où il est utilisé. Il est composé de quatre parties :

- Un microprocesseur qui va prendre en charge la partie traitement des informations et envoyer des ordres. Il est lui-même composé d'une unité arithmétique et logique (UAL) et d'un bus de données. C'est donc lui qui va exécuter le programme embarqué dans le microcontrôleur.
- Une mémoire de données (RAM) dans laquelle seront entreposées les données temporaires nécessaires aux calculs. C'est en fait la mémoire de travail qui est donc volatile.
- Une mémoire programmable (ROM ou EEPROM), qui va contenir les instructions du programme pilotant l'application à laquelle le microcontrôleur est dédié. Il s'agit ici d'une mémoire non volatile puisque le programme à exécuter est à priori toujours le même. Il existe différents types de mémoires programmables que l'on utilisera selon l'application, notamment :

- PROM (Programmable Read Only Memory) ou OTPROM (One Time PROM) : c'est un type de mémoire morte qui peut être programmée une seule fois.
- EPROM (Erasable Programmable Read-Only Memory) : c'est un type de mémoire dite morte dont le code peut être modifié dans certaines conditions.
- EEPROM (Electrically-Erasable Programmable Read-Only Memory) : est un type de mémoire morte. Une mémoire morte est une mémoire utilisée pour enregistrer des informations qui ne doivent pas être perdues lorsque l'appareil qui les contient n'est plus alimenté en électricité.
- Mémoire Flash (la plus récente) : c'est mémoire de masse à semi-conducteurs possédant les caractéristiques d'une mémoire vive mais dont les données ne disparaissent pas lors d'une mise hors tension.
- Les ressources auxiliaires. Celles-ci sont généralement :
 - Ports d'entrées / sorties parallèle et série.
 - Des timers pour générer ou mesurer des signaux avec une grande précision temporelle.
 - Des convertisseurs A/N pour traiter les signaux analogiques.

Si dessous, on trouve le schéma représentant un microcontrôleur utilisé généralement dans plusieurs applications (PIC16F84).

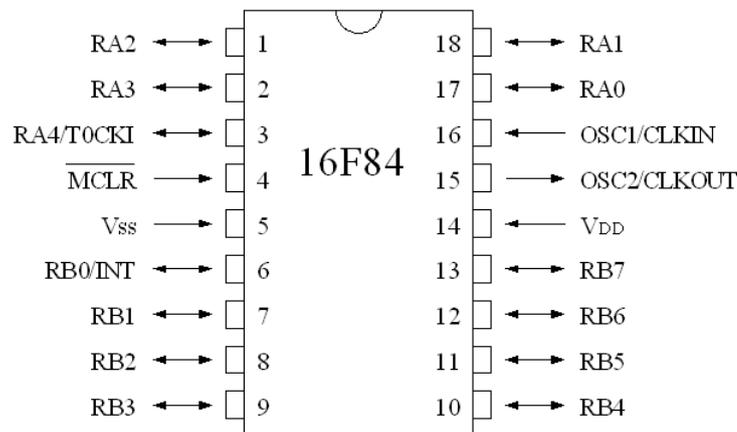


Figure III.6- Schéma montrant les pins d'un microcontrôleur PIC16F84

Il existe plusieurs types de microcontrôleurs, tous basés sur le même principe, mais avec différentes caractéristiques. Alors c'est ces caractéristiques qui nous obligent d'utiliser tel M.C. et pas un autre. Parmi ces caractéristiques on cite : l'architecture, taille du registre, nombre de pin, le prix... etc.

III.3.4- L'afficheur 7-Segments :

Les afficheurs 7 segments sont un type d'afficheur particulièrement présent sur les calculatrices et les montres à affichage numérique : les caractères (des chiffres, quoique quelques lettres soient utilisées pour l'affichage hexadécimal) s'écrivent en allumant ou en éteignant des segments, au nombre de sept. Lorsque les 7 segments sont allumés, on obtient le chiffre 8.

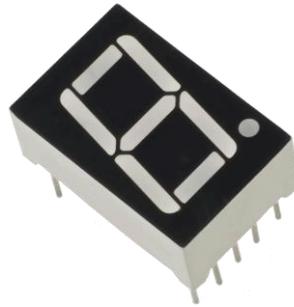


Figure III.7- Afficheur 7 segments à un digit

Dans un afficheur 7 segments, les segments sont le plus souvent désignés par les lettres allant de A à G. Dans le cas où l'afficheur comporte un point, servant de séparateur décimal, ce dernier est désigné DP (de l'anglais decimal point) ; certains parlent dans ce cas d'un afficheur «8 segments ».

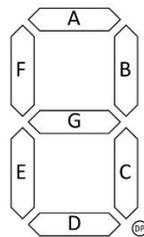


Figure III.8- Désignation des segments dans l'afficheur

Dans le cas d'afficheurs à DEL, deux cas de figures sont présents :

- Afficheur à anode commune : l'ensemble des anodes sont reliées et connectées au potentiel haut. La commande du segment se fait par sa cathode mise au potentiel bas.
- Afficheur à cathode commune : l'ensemble des cathodes sont reliées et connectées au potentiel bas. La commande du segment se fait par son anode mise au potentiel haut.

Il existe plusieurs types d'afficheurs 7-segments, appelés par le nombre de digit affiché. Ainsi on trouve des 7-seg à deux digits, 7-seg à trois digits et même des 7-seg à 4 digits.

Pour la commande du 7 segments, on peut le programmer soit sur un Microcontrôleur ou une carte Arduino.

III.4- Etude fonctionnel :

III.4.1- Schéma électrique :

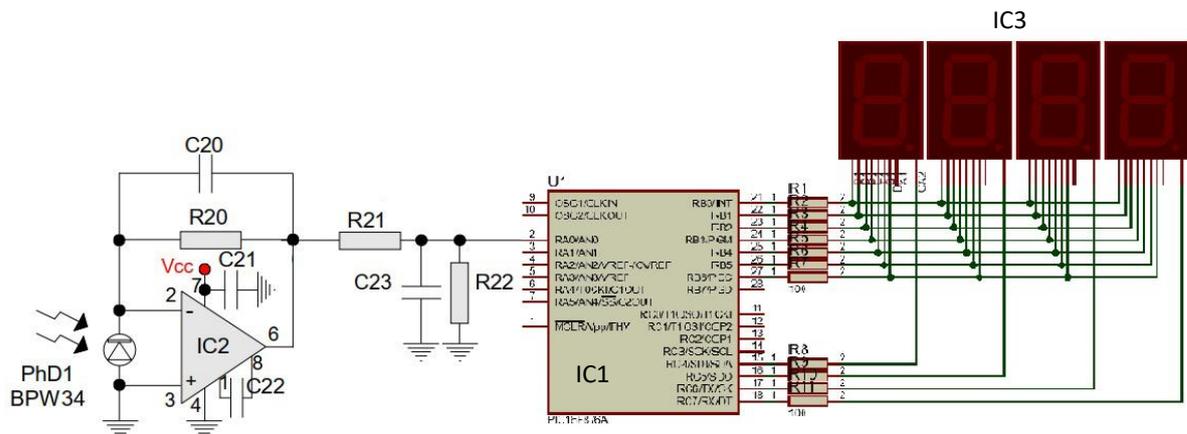


Figure III.9- Schéma électrique du luxmètre

Le schéma du luxmètre sur la figure précédente (figure III.9) comprend cinq parties essentielles dont chacune d'entre ces derniers réalise une fonction déterminée.

Ces parties sont :

- 1- Conversion lumière/courant,
- 2- Conversion courant/tension,
- 3- Filtrage du signal,
- 4- Conversion analogique/numérique,
- 5- Affichage numérique.

III.4.2- Conversion lumière/courant :

Initialement, nous avons envisagé d'utiliser une photodiode réceptrice dans le visible (une BPW21 [21]) et une autre pour le proche infrarouge (une BPW34 [19]) ; mais, en analysant plus en détails les datasheets de ces deux photodiodes, nous avons fini par faire le constat suivant :

- la photodiode BPW21 a une sensibilité maximale de 10 nA/Lux à 550 nm (vert). Cette sensibilité chute à 70% pour le rouge (660nm), ce qui donne seulement 7 nA/Lux.

- la photodiode BPW34 a une sensibilité maximale de 75 nA/Lux à 900 nm (infrarouge). Cette sensibilité chute à 98% pour la longueur d'onde 940nm, ce qui donne 73.5 nA/Lux.

Cette sensibilité chute à 60% pour la longueur d'onde 660nm, ce qui donne 45 nA/Lux, ce qui est entre 6 à 7 fois plus fort que la sensibilité de la BPW21. En fin de compte, nous avons décidé d'utiliser une seule photodiode : la BPW34.

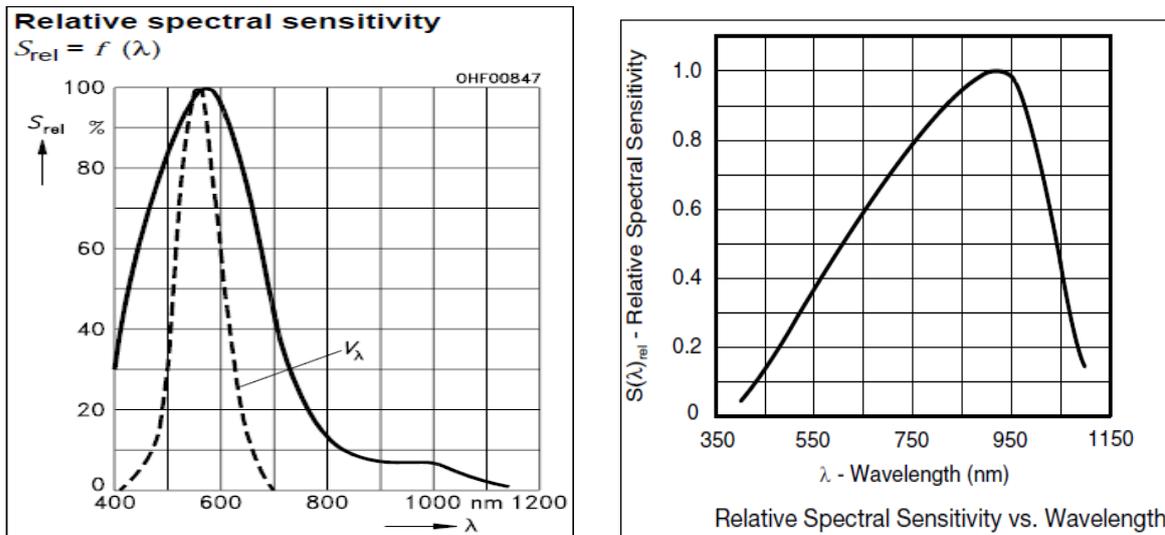


Figure III.10- Comparatif des graphes de sensibilité spectrale entre une BPW21 et une BPW34.

La photodiode (BPW34) nous assure la conversion proportionnelle d'éclairement en courant. La fonction qui exprime l'intensité du courant produit par la diode en fonction de l'éclairement auquel elle est soumise peut s'écrire :

$$I_{ra} = A \times E_A \quad (III.1)$$

Avec :

- I_{ra} : Courant de lumière inverse.
- E_A : L'éclairement.
- A : coefficient (définie par le fabricant).

Lorsque la photodiode est éclairée, un courant I_{ra} , appelé courant de lumière inverse, est généré. L'intensité de ce courant est proportionnelle à l'intensité de la lumière qui éclaire la

photodiode E_A , qui veut dire, plus l'éclairement E_A est important plus le courant I_{ra} est grand et vice versa.

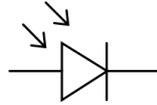


Figure III.11- Symbole de la photodiode.

L'équation (III.1) qui caractérise la relation entre l'intensité de l'éclairement et l'intensité du courant produit par la diode nous donne une courbe parfaitement linéaire. Le courant de lumière inverse I_{ra} , qui est mesuré quand la BPW34 est mise sous une tension inverse V_R égale à 5V, vaut jusqu'à 750 μA sous un éclairement lumineux qui est presque égale à 10 000 lx.

La courbe correspondante à l'équation (III.1) qui caractérise la relation entre l'intensité de l'éclairement E_A et l'intensité du courant I_{ra} est représentée dans la figure suivante (Figure III.12).

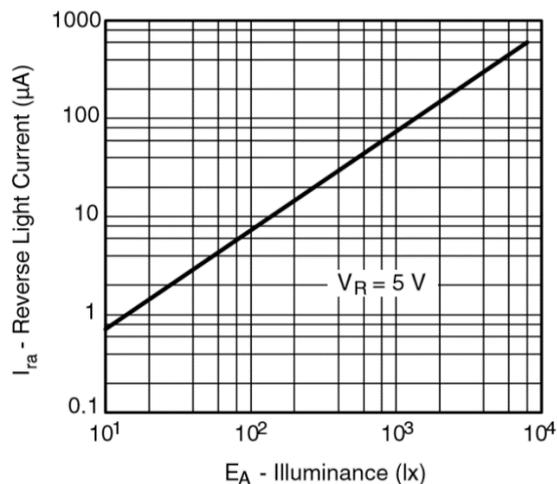


Figure III.12- L'intensité du courant I_{ra} en fonction de l'éclairement E_A .

III.4.3- Conversion courant/tension :

Un convertisseur courant-tension est le moyen le plus facile pour convertir le courant généré par la photodiode, lors de son exposition à la lumière, à une tension qui a une valeur proportionnelle à l'intensité du courant ; et aussi maintenir la tension entre les bornées de la diode à 0V.

Le circuit basique d'un convertisseur courant-tension se compose d'une photodiode, d'un amplificateur et d'un couple condensateur / résistance de réaction. Ce circuit a l'air assez

simple, mais les parasites cachés peuvent involontairement causer une instabilité indésirable du circuit.

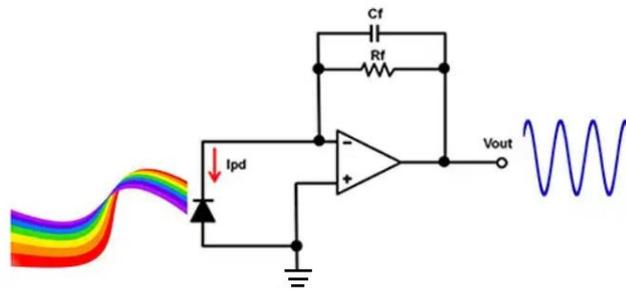


Figure III.13- Circuit basique d'un convertisseur courant-tension

La réception de la lumière par la photodiode crée un courant (I_{pd}) qui circule de la cathode de la diode à l'anode. Ce courant circule également à travers la résistance de contre-réaction, R_f . La valeur de I_{pd} fois R_f crée la tension de sortie à la sortie de l'ampli op, V_{out} . Dans ce circuit, l'augmentation de la lumière rend la tension de sortie plus positive.

Si la tension de polarisation inverse aux bornes de la photodiode est de 0V, le courant de fuite ou le courant d'obscurité est faible et la capacité de jonction de la photodiode est élevée par rapport aux configurations dans lesquelles les tensions de polarisation inverse sont plus importantes.

Dans notre circuit, on utilise le CA3130 en mode convertisseur courant-tension, alimenté avec une tension $V_{cc} = 6V$, avec une boucle de contre réaction, pour assurer la stabilité du signale de sortie de circuit, composée d'une résistance de $R_{20} = 13.33\text{ K}\Omega$ et un condensateur C20 qui peut prendre une valeur de 220pF jusqu'à 100nF.

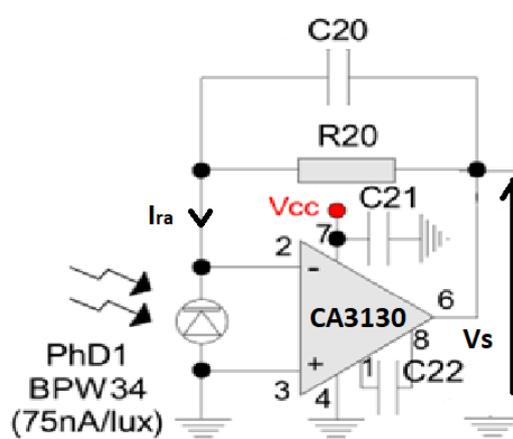


Figure III.14- Circuit utilisé pour le convertisseur courant-tension

Le gain du convertisseur courant-tension est défini par la valeur de la résistance de la boucle de contre-réaction R20.

On peut calculer la valeur de la résistance R20 par la relation suivante :

$$\frac{\Delta V}{\Delta I} = R \quad (\text{III.2})$$

- ΔV la plage de la tension électrique de la sortie.
- ΔI la plage de l'intensité du courant électrique de l'entrée.
- R la résistance de la boucle de contre-réaction.

III.4.4- Filtrage du signal :

Le filtrage de la tension a la sortie de l'amplificateur est indispensable pour éliminer les fréquences non désirées afin d'avoir une valeur correcte de notre mesure. Les filtres les plus simples sont basés sur des circuits RC, RL.

Plus précisément, dans notre application, on a utilisé un filtre passe-bas à base de circuit RC qui empêche les hautes fréquences de passer et atténuer les fréquences de 50 Hz des sources lumineuses d'intérieures.

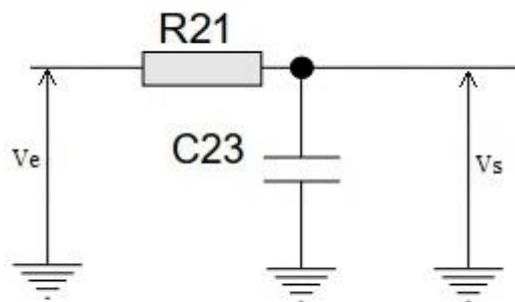


Figure III.15- Filtre passe-bas

De ce circuit, l'impédance du condensateur C23 est comme suit :

$$Z_C = \frac{1}{j\omega C} \quad (\text{III.3})$$

Avec :

- Z_C : L'impédance (Ω)
- C : Capacité du condensateur (F)
- ω : La pulsation (rad/s)

Autrement dit, le module de l'impédance est donc :

$$|Z_C| = \frac{1}{c\omega} \quad (\text{III.4})$$

Avec :

$$\omega = 2\pi f$$

- f : Fréquence (Hz)
- π : Constante 3.14rad

Donc : 1^{er} cas

$$f \longrightarrow 0 \quad \text{Alors} \quad |Z_C| \longrightarrow \infty$$

Le circuit équivalent est alors comme suit :

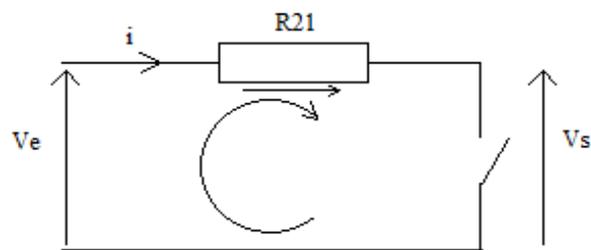


Figure III.16- Circuit équivalent pour les basses fréquences

$$Ve(t) - R21 \times i(t) - Vs(t) = 0 \quad (\text{III.5})$$

Avec :

- Ve : Tension d'entrée (V)
- Vs : Tension de sortie (V)

Alors

$$Ve(t) = Vs(t) \quad (\text{III.6})$$

2^{ème} cas

$$f \longrightarrow \infty \quad \text{Alors} \quad |Z_C| \longrightarrow 0$$

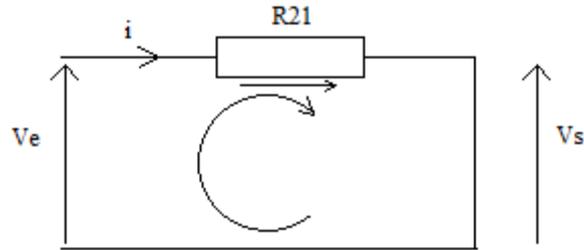


Figure III.17- Circuit équivalent pour les hautes fréquences

$$V_e(t) - R_{21} \times i(t) - V_s(t) = 0 \quad (\text{III.7})$$

Alors

$$V_s(t) = 0 \text{ V} \quad (\text{III.8})$$

III.4.5- Conversion analogique/numérique :

Le signal arrivant à cette partie du circuit est une tension, donc un signal analogique. Pour traiter ce dernier et l'afficher sur un afficheur numérique, on doit passer par une conversion analogique numérique. De ce fait, l'utilisation d'un microcontrôleur est indispensable pour arriver à notre fin.

Pour notre application, on a trouvé idéal d'utiliser un MC de la famille du PIC16F qui est le plus disponible au marché, et pour cela on utilise le PIC16F876A.

III.4.5.1- Le microcontrôleur 8-bit (PIC16F876A) :

Il s'agit d'un microcontrôleur de la gamme *mid-range* de la société américaine Microchip [22], devenu leader mondial dans cette catégorie de composants numériques programmables. Il est doté d'une architecture RISC, dont les performances en vitesse d'exécution et taux d'occupation mémoire sont bien meilleurs que l'ancienne architecture CISC (exemple : Motorola 68705 ou Intel 8051).

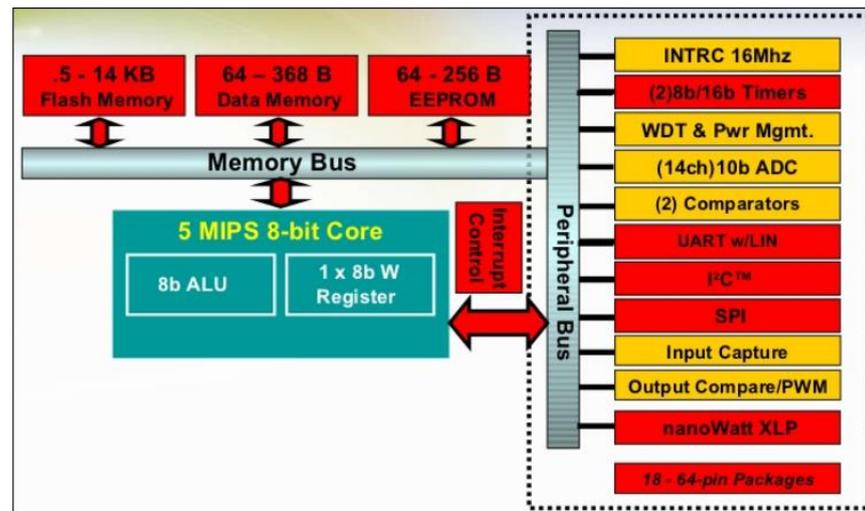


Figure III.18- Architecture de la gamme *mid-range* des microcontrôleurs PIC16F.

Le microcontrôleur est alimenté par une tension stable de 6V à partir de quatre piles de 1.5V identique pour fournir la même énergie. Le fonctionnement (et la précision des mesures) du module interne de conversion analogique numérique ADC de résolution 10-bit dépend étroitement de la stabilité de cette alimentation. Enfin, ce PIC16F876A est cadencé par un quartz de 8Mhz pour assurer son bon fonctionnement.

Nous avons tenté d'utiliser une horloge système plus basse vu que la consommation de courant serait réduite encore plus, mais ce choix a été vite abandonné vu l'instabilité des 4 digits de l'afficheur. A noter toutefois qu'avec un essai sur 3 digits seulement, on a pu réduire le signal d'horloge fournis par le quartz et avoir un affichage lisible.

III.4.6- Affichage numérique :

Un module afficheur 4 digits à LED 7-segments classique nécessite 11 lignes I/O (entrées/sorties) de la part du PIC (ou 12 lignes si on veut afficher le point se trouvant en dessous des segments), comme le montre le schéma suivant :

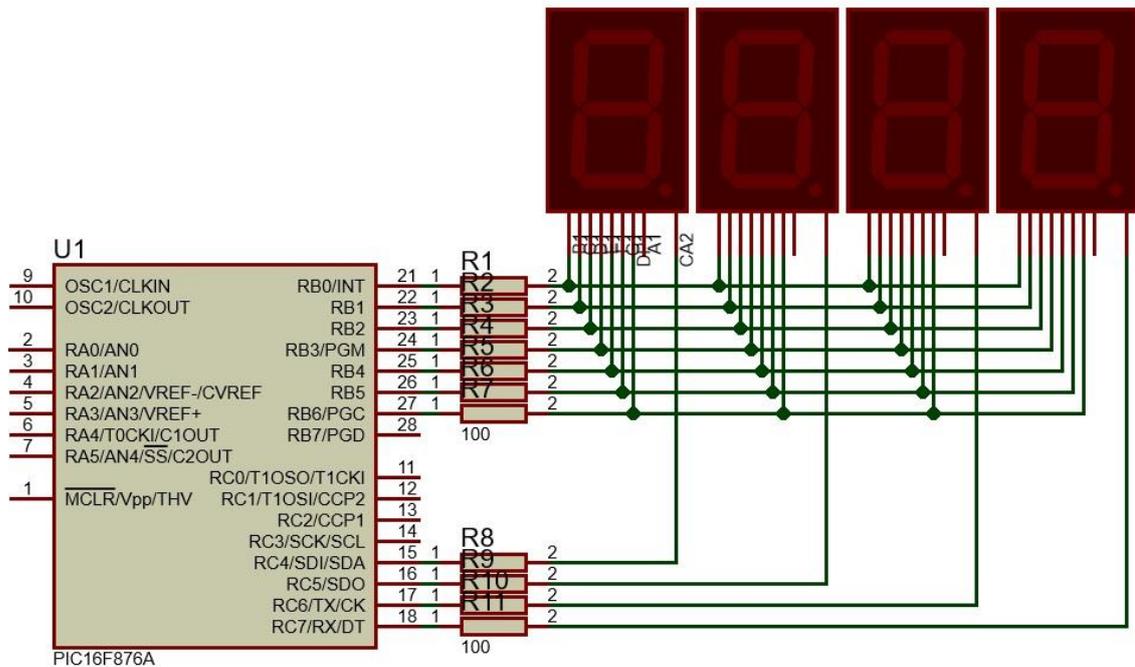


Figure III.19- module afficheur 4 digits à LED 7-segments classique.

Dans notre montage, nous avons utilisé un module afficheur 7 segment à 4 digits anode commun (CA) avec des résistances de 100Ω dans chaque pin pour protéger les LED d'un fort courant qui peut conduire à sa destruction. Il est commandé par le microcontrôleur PIC16F876A.

Ce genre d'afficheur à 7 segments fonctionne en alternance ; pour afficher un chiffre à 4 digits, il faut afficher chaque digit seul et modifier le temps de son clignotement tel que l'œil ne peut pas le remarquer.

III.5- Conclusion :

Dans ce chapitre, nous concluons que pour concevoir un luxmètre numérique, on doit passer par plusieurs étapes ou plusieurs parties. La plus importante est de retrouver le capteur de lumière adéquat pour notre application, ensuite on cherche à traiter le signal émis par ce capteur afin de le convertir en valeur numérique et de l'afficher sur un afficheur où on peut lire la valeur en Lux. Tout ça après l'étude théorique du circuit qu'on va utiliser qui nous donne une tension proportionnelle au rayonnement lumineux.

CHAPITRE IV :

Réalisation du luxmètre

IV.1 Introduction :

Après ce qu'on a vu dans les précédents chapitres, de l'étude théorique et la conception du luxmètre avec son montage, on passe maintenant à la concrétisation de ces recherches par la réalisation d'un luxmètre.

Ce dispositif est un prototype expérimental simple dédié à la mesure (absolue et non relative) de l'éclairement dans le spectre visible, basé sur l'utilisation d'une photodiode bas coût (une BPW34) dont la courbe de réponse de la sensibilité à l'éclairement est linéaire et est indiquée en Lux. Ces mesures sont acquises périodiquement et immédiatement visualisées sur un afficheur LED 7-segments à 4 digits. L'alimentation de ce dispositif est assurée par 4 piles délivrant 6V.

Les différentes parties de ce travail ont été réalisées au niveau du laboratoire pour effectuer de nombreux tests dans un environnement adéquat.



Figure IV.1 : Aperçu du dispositif fermé.

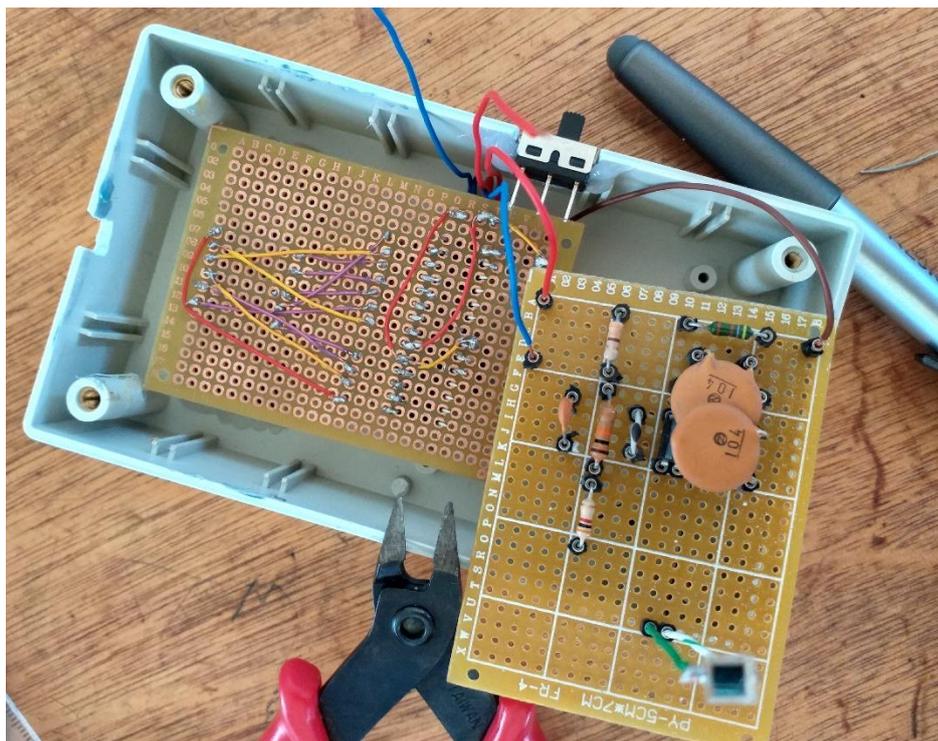


Figure IV.2 : Aperçu du dispositif ouvert.

IV.2 Description Hardware :

Le synoptique suivant indique les principaux modules de ce montage : un microcontrôleur 8-bit (PIC16F876) pouvant accéder à 8 bits de données en une seule opération grâce à la taille de son bus de données, un module afficheur LED 7-segments à 4 digits, un module photodiode BPW34 avec préampli courant-tension CA3130.

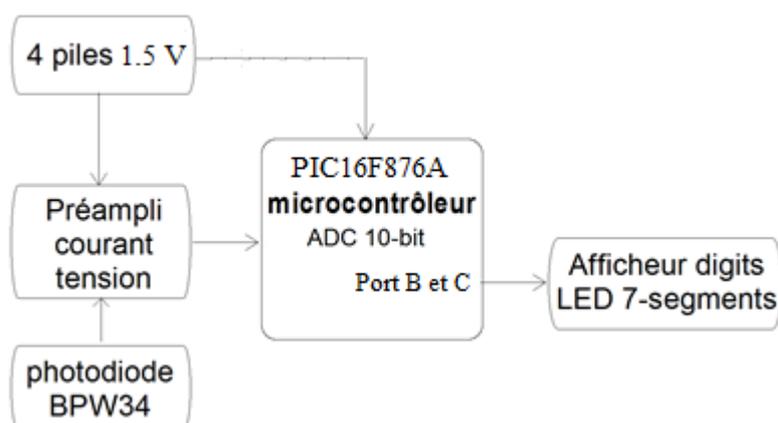


Figure IV.3 : Synoptique du montage réalisé.

IV.3 Procédures de travail :

Avant de passer par la réalisation de n'importe quel projet, il faut toujours passer par l'étape de simulation sur un ordinateur pour faire une étude presque complète de notre conception.

Il existe plusieurs logiciels de simulation sur internet, soit payants ou gratuits, dont on cite (Psim, NI Multisim, Eagle, EasyEDA, Proteus, ...Etc.).

Vu qu'on a déjà travaillé avec Proteus auparavant, on a décidé de l'utiliser pour notre simulation car il possède une interface assez facile pour l'utilisation et il dispose d'une bibliothèque riche en composants.

IV.3.1 Présentation de Proteus :

Proteus est une suite logicielle permettant la CAO (Conception Assisté par Ordinateur) électronique éditée par la société Labcenter Electronics. Proteus est composé de deux logiciels principaux : ISIS, permettant entre autres la création de schémas et la simulation électrique, et ARES qu'on va utiliser ultérieurement, destiné à la création de circuits imprimés.

Grâce à des modules additionnels, ISIS est également capable de simuler le comportement d'un microcontrôleur (PIC, Atmel, 8051, ARM, HC11...) et son interaction avec les composants qui l'entourent.

IV.3.2 Simulation du circuit :

On a commencé notre simulation par faire le montage de conversion du courant en tension et le filtrage comme on le voit sur la figure suivante (Figure IV.4) :

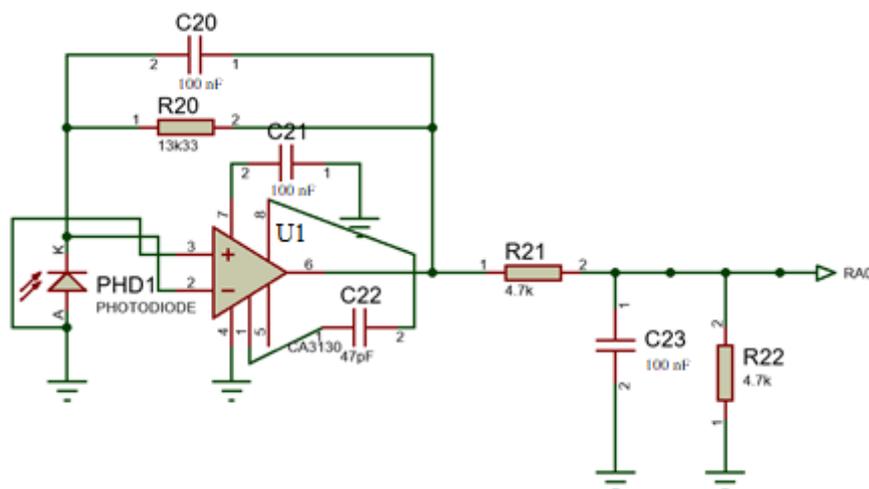


Figure IV.4 : Schéma électrique du convertisseur lumière/tension

Cette partie du circuit fait la conversion du courant produit par la photodiode en tension grâce à l'amplificateur opérationnel, cette variation est donc linéaire par rapport au changement de la lumière comme on l'a vue précédemment.

Malheureusement dans le logiciel, on n'a pas trouvé une source de lumière pouvant nous simuler le fonctionnement complet de cette partie du circuit et étudier son fonctionnement en simulation. Donc on a opté pour une autre solution afin de faire varier notre affichage numérique à la sortie du MC. On utilise alors un potentiomètre pour remplacer cette variation de tension et nous avons programmé notre MC pour fonctionner proportionnellement avec cette variation.

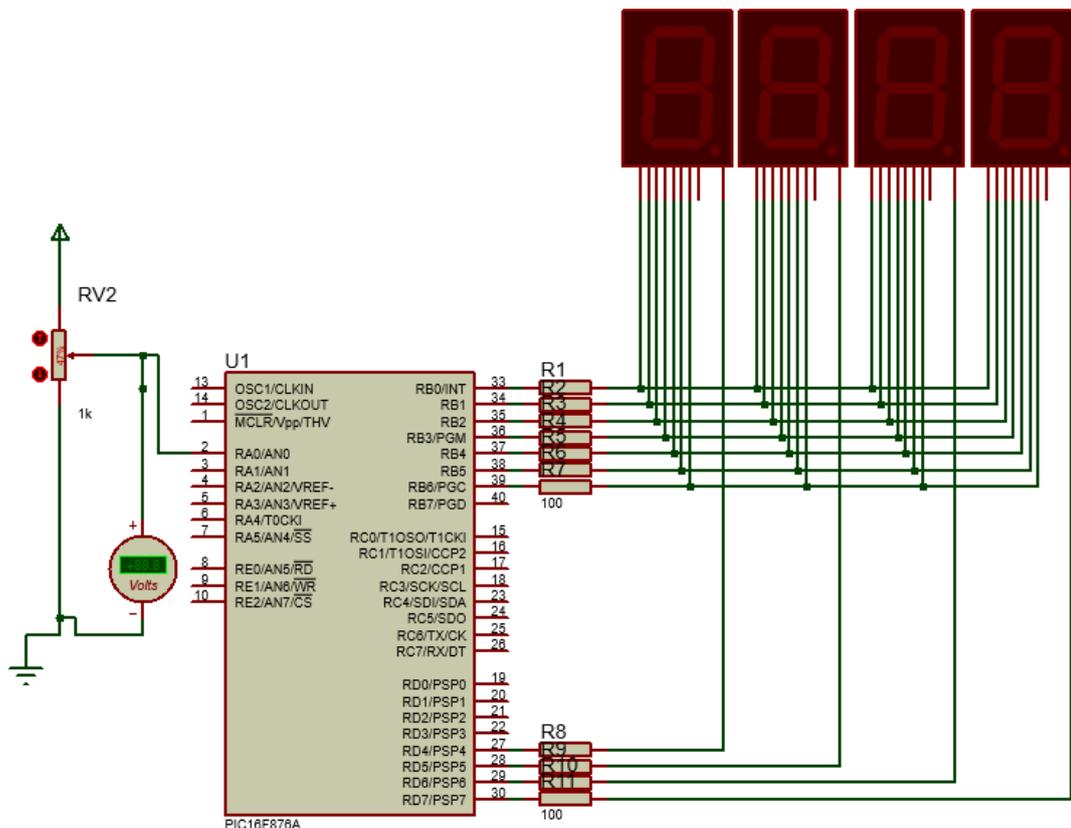


Figure IV.5 : Schéma électrique de la partie microcontrôleur et la conversion analogique/numérique avec affichage

Comme on peut le voir sur la figure IV.5, on a utilisé l'entrée RA0 comme entrée analogique qui va recevoir le signal de notre circuit apparaissant sur la figure IV.4. Après le MC va traiter ce signal dans son convertisseur à 10 bits et le transformer en un signal numérique proportionnel pour enfin l'afficher sur l'afficheur 7 segments.

Le programme injecté dans le microcontrôleur pour simuler son fonctionnement a été écrit sur le logiciel MikroC Pro qui est un outil de développement conçu pour faciliter la programmation des PIC avec le langage C pour ensuite le compiler dans un fichier .hex afin de l'injecter dans le MC.

IV.3.3 Matériel utilisé :

IV.3.3.1 Photodiode BPW34 :

La BPW34 est la photodiode que nous avons choisie comme un capteur de lumière pour appareil luxmètre grâce à plusieurs caractéristiques, parmi ces caractéristiques :

- la grande plage de sensibilité de la lumière qui a une longueur d'onde qui vaut de 430nm jusqu'à 1100nm.

- elle produit une intensité courant proportionnelle à l'intensité de l'éclairement lumineux de valeur 75nA/lx.



Figure IV.6- La photodiode BPW34.

IV.3.3.2 Amplificateur CA3130 :

Pour le bloc de conversion courant-tension, nous avons choisi l'amplificateur opérationnel CA3130 pour son efficacité, disponibilité et rapidité de réponse, et nous l'avons monté en mode convertisseur courant tension.

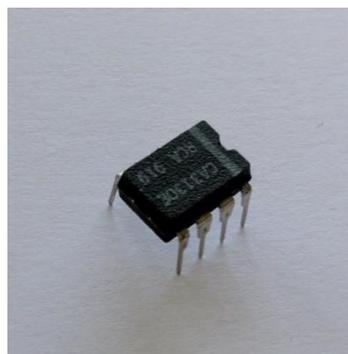


Figure IV.7- Amplificateur CA3130.

IV.3.3.3 Le PIC16F876A :

Le PIC16876A est le composant qui est responsable de la lecture de la valeur de la tension converti par l'amplificateur, et la conversion de cette valeur en code numérique pour en fin commander des afficheurs sept segments qui affichent la valeur de l'éclairement mesurée par la photodiode.

Nous avons choisi ce microcontrôleur pour sa taille miniature, sa programmation facile, son nombre de pates et sa disponibilité.

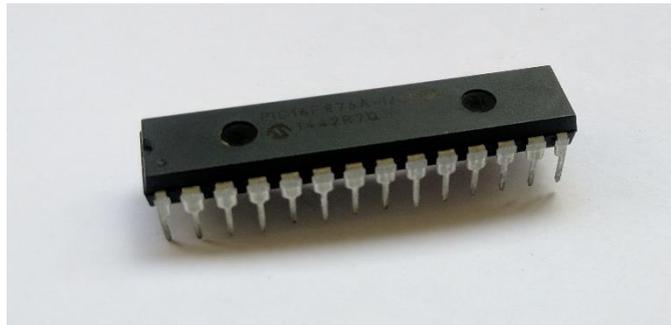


Figure IV.8- Le PIC16F876A.

IV.3.3.4 Afficheur 7-Segments 4 digits 5641BH :

Pour afficher les différentes valeurs calculées par le microcontrôleur nous avons placé un afficheur sept segments de quatre digits sur notre circuit.



Figure IV.9- Afficheur sept segment de quatre digits.

IV.3.3.5 Des piles de 1.5V :

On a utilisé quatre piles de 1.5V pour alimenter notre circuit électronique, ils sont placés en série pour créer une tension de 6V qui est l'alimentation nécessaire pour le circuit.



Figure IV.10- Les piles.

IV.3.3.6- Tableau des matériels utilisés :

Composant	Référence	Valeur	Quantité
Photodiode BPW34	PhD1	-	1
Amplificateur opérationnel	IC2	-	1
PIC16F876A	IC1	-	1
Afficheur 7 segments	IC3	-	1
Résistances	R20	13.33k Ω	1
Résistances	R21, R22	4.7 k Ω	3
Résistances	R1, R2, ..., R11	100 k Ω	11
Condensateurs	C20, C21, C23	100nF	3
Condensateurs	C22	47pF	1
Piles	-	1.5V	4
Boitier en plastique	-	10 x 7 cm	1
Switch	-	-	1
Des barrettes tulipe	-	-	-

Tableau IV.1- Tableau récapitulatif des composants utilisés.

IV.3.4 Réalisation sur la plaque d'essai :

Dans cette partie, on va entamer le branchement des différentes pièces formant notre circuit. On commence par mettre en place l'amplificateur opérationnel CA3130 et la Photodiode BPW34, ensuite on place les différentes résistances et condensateurs pour finir avec l'alimentation de l'AOP. On prend quelques mesures pour vérifier le bon fonctionnement et branchement du circuit.

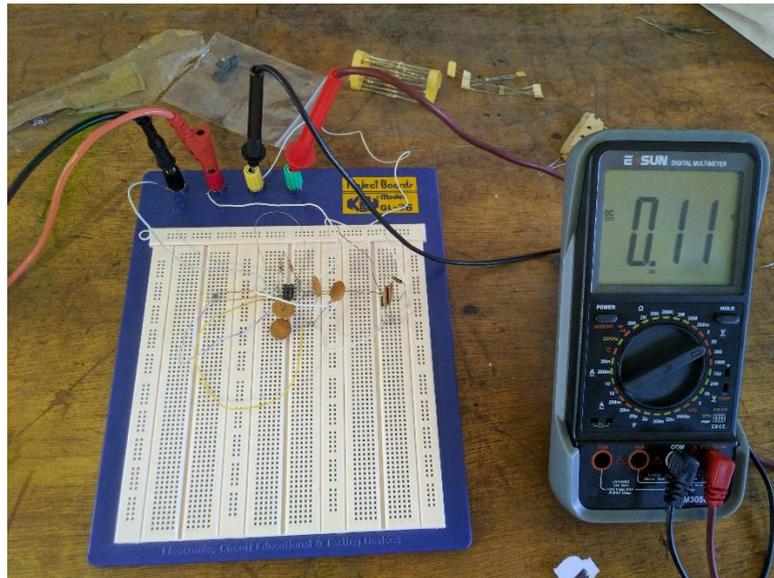


Figure IV.11- Branchement sur la plaque d'essai du bloc de capteur et conversion en tension.

Ensuite, nous avons placé le PIC16F876A déjà programmé, et l'afficheur à 7 segments en les reliant ensemble par le biais de résistances afin de protéger l'afficheur des courants forts.

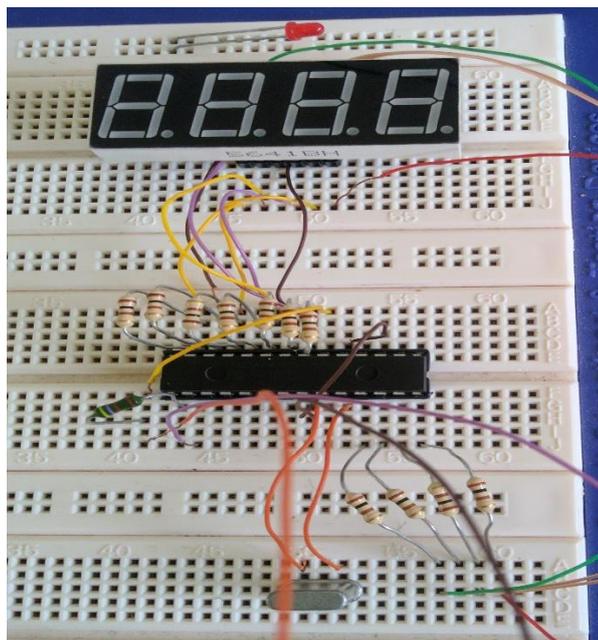


Figure IV.12- Branchement sur la plaque d'essai du pic et de l'affichage.

Le logiciel utilisé pour injecter le code du programme dans le microcontrôleur est PICKit2 avec son programmeur PICKit relié à l'ordinateur via un câble USB.

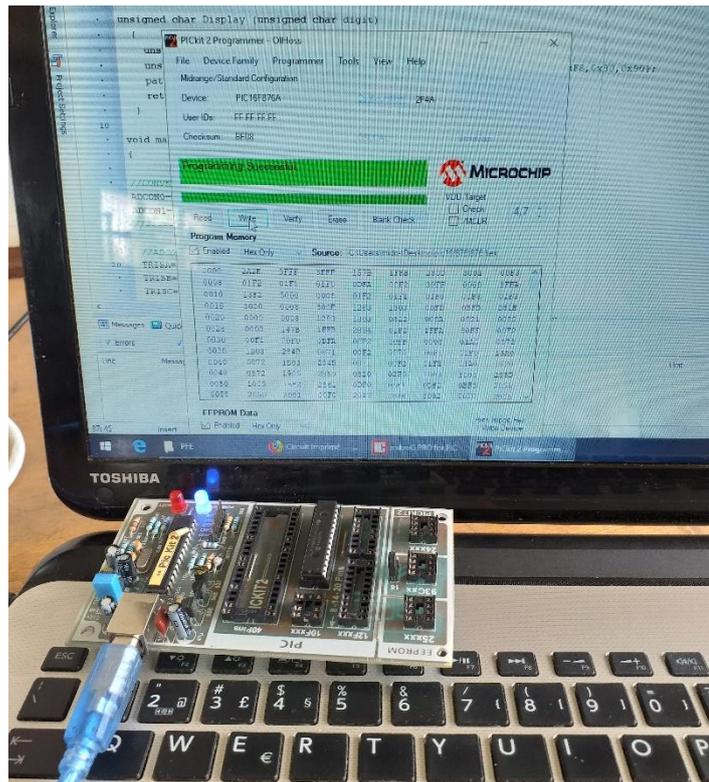


Figure IV.13- Injection du programme dans le PIC par le logiciel PICkit2.

Enfin pour avoir le résultat global suivant :

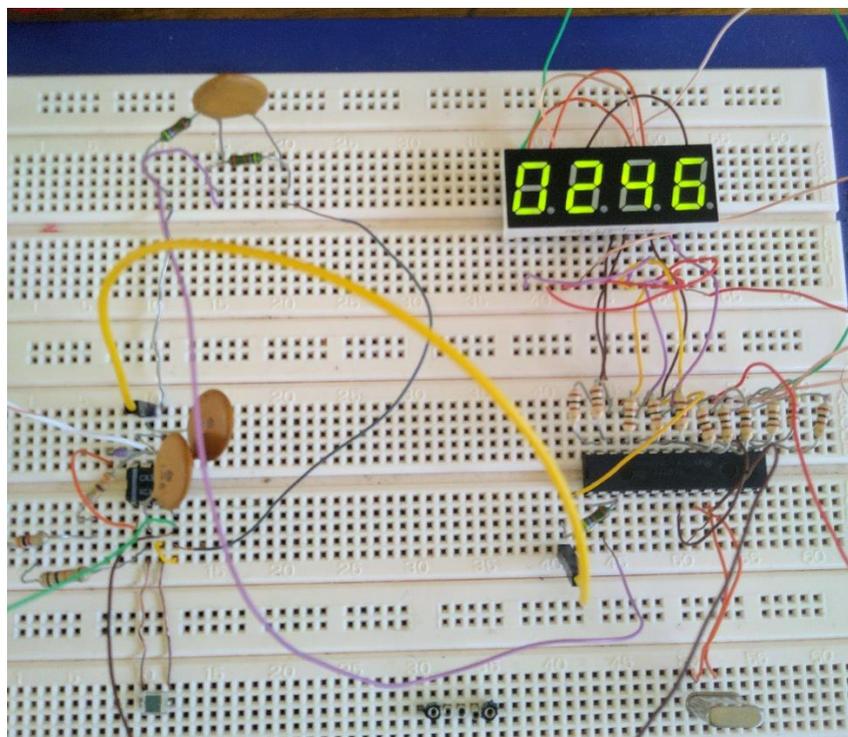


Figure IV.14- Luxmètre sur la plaque d'essai.

IV.3.5 Réalisation sur PCB :

L'étape de simulation et des essais sur la plaque achevée, alors on passe à la création définitive de notre circuit sur une PCB.

Proteus nous propose un outil performant pour réaliser des PCB facilement à partir du schéma qu'on lui fournit appelé « ARES » ; Ce logiciel est un outil d'édition de création de PCB. Un schéma électrique réalisé sur ISIS peut alors être importé facilement sur ARES pour réaliser le PCB de la carte électronique.

Après avoir dessiné notre circuit sur ISIS, on l'a importé dans ARES qui nous a donné le schéma présenté dans la figure IV.15.

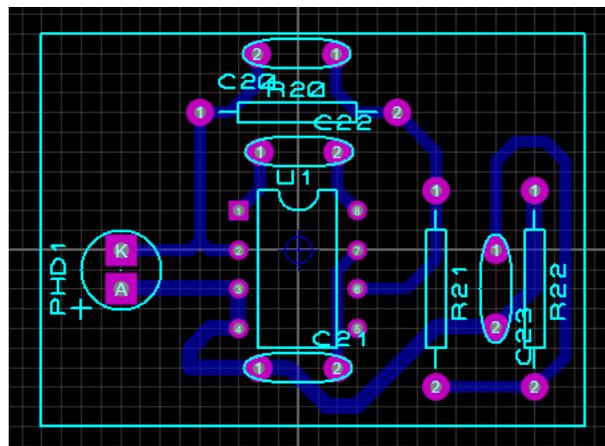


Figure IV.15- Schéma du PCB partie capteur et conversion courant/tension

La figure IV.15 nous montre comment placer les composants facilement, ensuite on peut passer par la vue 3D pour nous aider mieux à voir notre circuit.

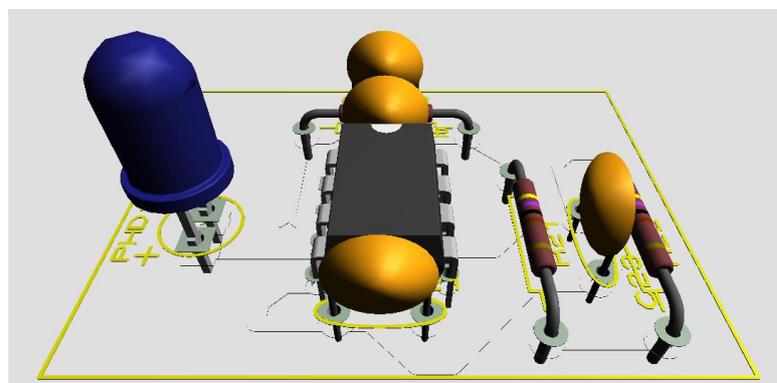


Figure IV.16- Vue 3D sur le circuit de la PCB sur ARES

Vue qu'on n'avait pas les ressources nécessaires pour imprimer ce circuit à partir d'ARES, on a choisi d'acheter une PCB standard et placer les composants manuellement.

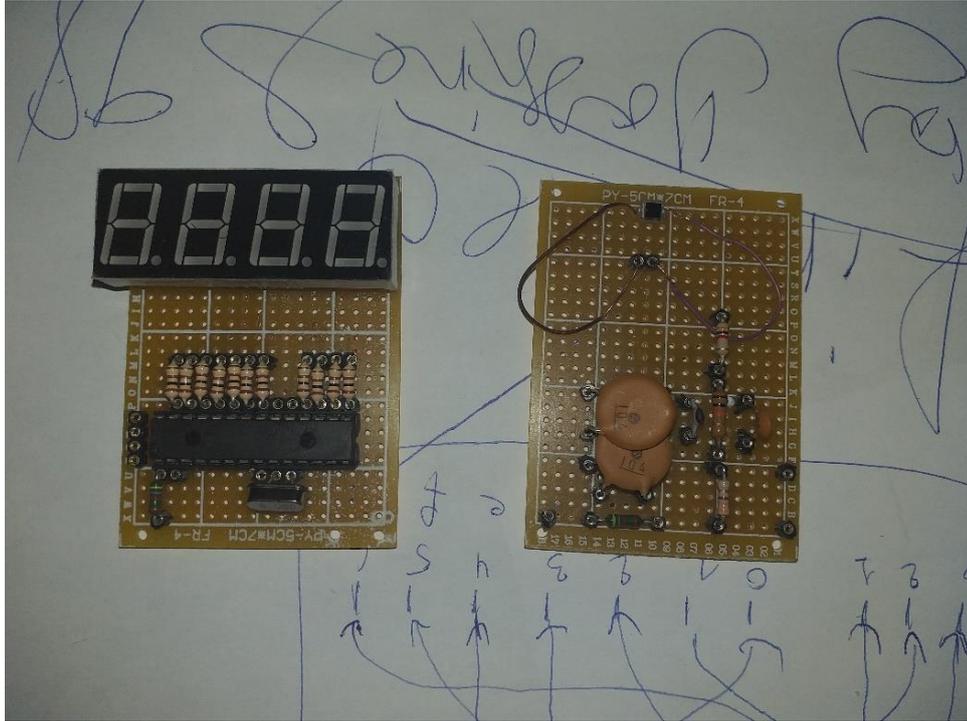


Figure IV.17- Produit final des PCB

IV.3.6 Produit final :

Pour la dernière étape, nous avons mis les plaques qu'on avait soudées dans un boîtier en plastique.

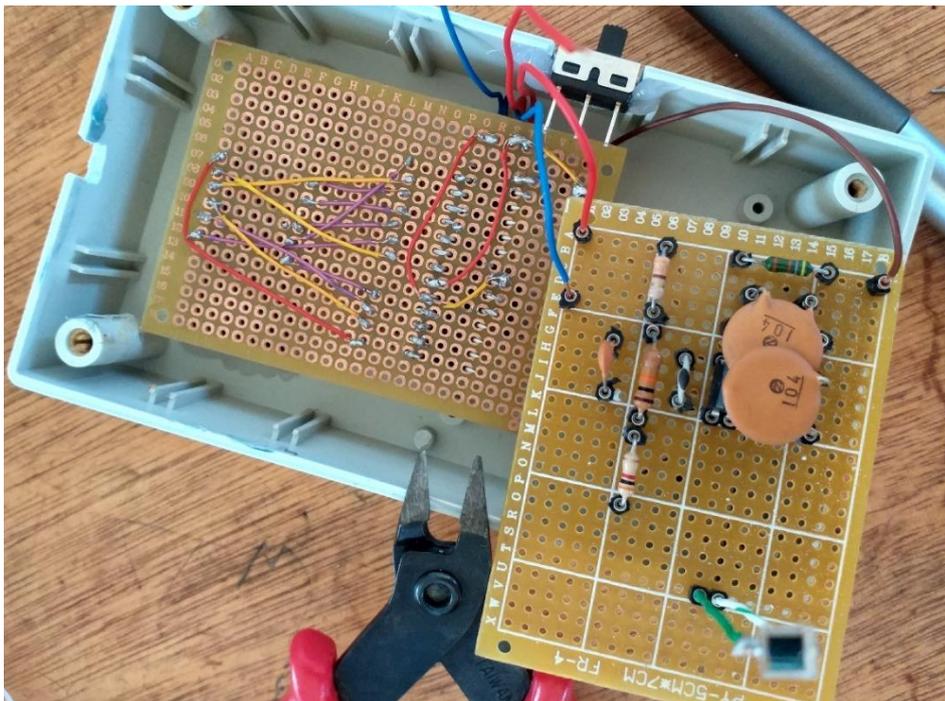


Figure IV.18- PCB dans le boîtier en plastique

IV.3.7 Différents essais de la réalisation :



Figure IV.19- Essai en plein lumière



Figure IV.20- Essai en lumière ambiante



Figure IV.21- Essai en couvrant le capteur

IV.4 Conclusion :

En conclusion, après l'étude théorique et les nombreux essais et simulations, on a pu réaliser le luxmètre numérique qui peut nous fournir des valeurs de mesures de l'éclairement lumineux.

Après le passage par les essais de mesures avec le produit final, on a remarqué qu'il existait des décalages entre les résultats obtenus par la simulation et ceux obtenus en réalité.

On a conclu que ce décalage existe parce que la simulation présente un modèle parfait du circuit, tandis qu'en réalité il existe plusieurs pertes dans ce dernier dû aux résistances, condensateurs utilisés et même à l'alimentation du circuit.

Conclusion générale :

Durant ce projet, nous avons pu répondre aux questions posées au début du mémoire en introduisant la lumière en général avec ces différents types et caractéristiques et citant les différents appareils utilisés dans ce domaine.

On a eu à la fin de ce projet la chance de réaliser un luxmètre numérique, et pour y arriver nous avons passé par une étude théorique du circuit utilisé avec simulation et différents tests durant toutes ces étapes. Pour finir à avoir un projet fini capable de nous faire une mesure avec un affichage numérique de la valeur en lux.

Nous avons appris durant ce projet comment lire sur une datasheet et comprendre les fonctions principales d'un composant, et aussi nous avons pratiquer encore plus la programmation et les branchements électroniques.

Nous sommes convaincus que la réalisation pratique exige beaucoup de temps et nous confirmons qu'il y a une grande différence entre la simulation et la réalisation pratique.

Nous devons préciser que nous avons rencontré quelques obstacles tels que la non-disponibilité de certains composants comme le PIC, la photodiode, l'afficheur et quelques composants électroniques.

Néanmoins, on a eu le privilège de découvrir un nouveau domaine, qui est la mesure de la lumière. Et nous avons enrichi d'avantage nos connaissances en électronique, pour qu'enfin, on a pu faire la corrélation entre les deux et atteindre le but de notre projet qui est la réalisation d'un prototype de luxmètre numérique.

On note que pendant l'élaboration de notre travail, nous avons rencontré plusieurs difficultés surtout dans la partie réalisation où on trouve une différence remarquable par rapport à la simulation qui présente un cas parfait de notre conception, car, dans la réalisation on trouve de nombreuses pertes qui influencent sur le fonctionnement correct de l'appareil dû à l'imperfection des composants.

En conclusion, malgré l'insuffisance des moyens, nous sommes satisfaits des résultats obtenus puisqu'ils répondent adéquatement aux objectifs fixés au départ. Nous sommes tout de même conscient que, comme dans tout projet, il y aurait place à l'amélioration.

ANNEXE :

Programmeur d'un μ C
PIC le PICkit2

1- Programmeur d'un μ C PIC le PICKit2 :

Après programmation du PIC avec MikroC et simulation sur Proteus on injecte notre programme dans le pic en utilisant un programmeur destiné à ce modèle de μ C conçu par Microchip Le pickit2 et un logiciel compatible à cet injecteur en suivant les étapes suivantes On met le μ C PIC dans son emplacement dans le programmeur pickit2 Et on le branche au PC via un câble USB.

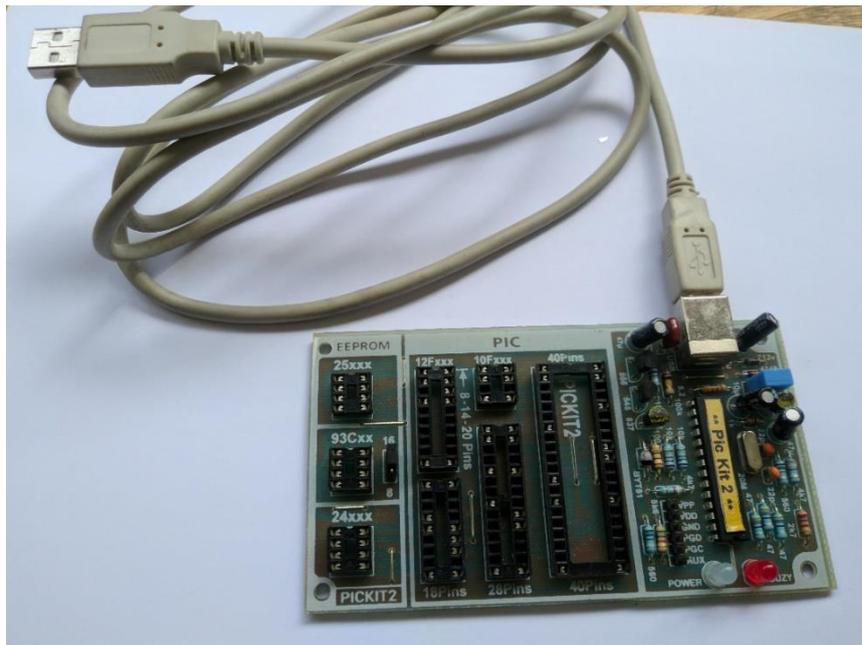


Figure A.1- Programmeur PICKit2

Ensuite on exécute le programme pickit2 programmer qui est déjà installé et une interface qui contient plusieurs fonctionnalités

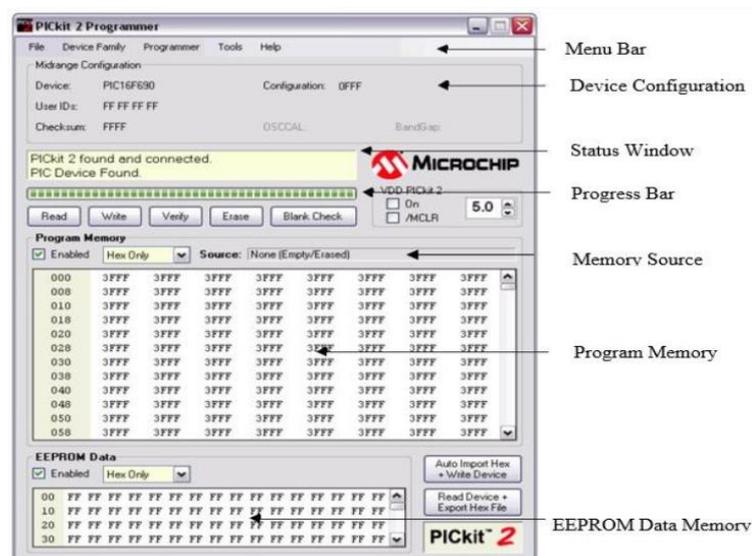


Figure A.2- Fenêtre du programme PICKit 2

2- Les étapes de programmation avec le logiciel PICkit2 :

Lorsque l'application PICkit2 Programmer est ouverte pour la première fois, elle tente d'identifier l'appareil connecté par l'ID de l'appareil et de l'afficher dans la fenêtre de configuration :

2.1- Importer le fichier HEX :

Pour importer un programme compilé (fichier hex) à programmer dans l'appareil cible, sélectionnez File> Import HEX.

Parcourez le fichier hexadécimal et cliquez sur Ouvrir. Le code est affiché dans la mémoire de programme et les fenêtres de données EEPROM. Le nom du fichier hexadécimal est affiché dans le bloc Source sous Mémoire de programme.

2.2- Ecriture du programme :

Une fois qu'une famille de périphériques a été sélectionnée et qu'un fichier hex a été importé, le périphérique cible peut être programmé en cliquant sur « Write » (Figure A.3).



Figure A.3- Bouton écriture du programme

L'appareil sera effacé et programmé avec le code hexagonal précédemment importé. L'état de l'opération d'écriture s'affiche dans la barre d'état située sous la fenêtre Configuration du périphérique. Si l'écriture est couronnée de succès, la barre d'état devient verte et affiche « Programming Successful » (Figure A.4).

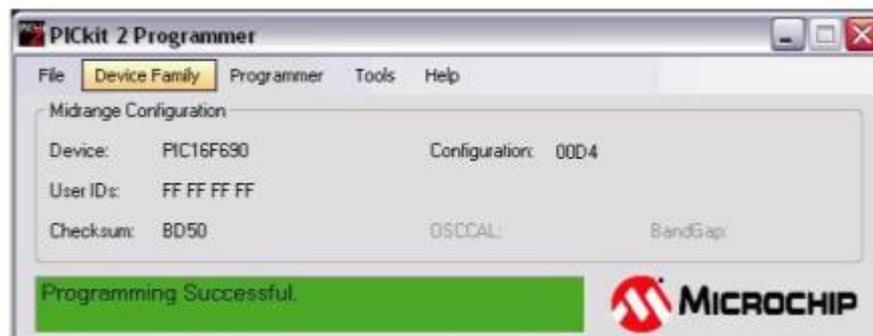


Figure A.4- Opération programmation réussite

Si l'écriture échoue, la barre d'état devient rouge et affiche « Programming failed », comme le montre la Figure A.5.

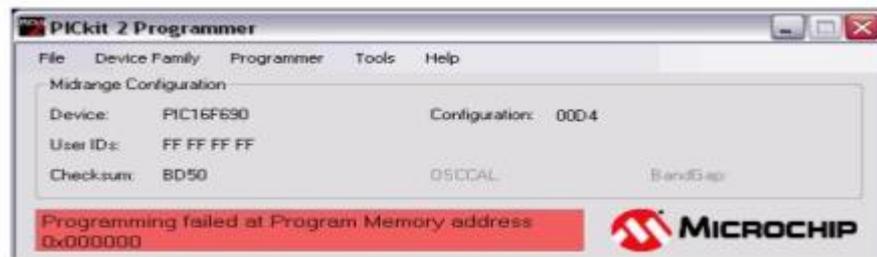


Figure A.5- Opération programmation échoué

Cette erreur indique que les données ont été endommagées pendant la séquence de programmation. Si cette erreur est affichée, essayez d'écrire à nouveau le programme sur l'appareil.

2.3- Vérification :

La fonction « Vérifier » vérifie que le programme dans la mémoire de l'appareil correspond au fichier hexadécimal importé dans l'application « PICkit 2 Programmer ». Il compare toutes les zones de mémoire, y compris la mémoire de programme, la mémoire EEPROM de données, les ID et les bits de configuration.

Pour vérifier le code, importez le fichier hexadécimal et cliquez sur « Verify ». Notez qu'une opération Write est automatiquement vérifiée si Programmer > Verify on Write est coché.



Figure A.6- Bouton vérification du programme

Si le code est identique, la barre d'état devient verte et affiche "Device Verified". En cas de décalage, la barre d'état devient rouge et affiche où se trouve l'erreur : "Erreur dans la mémoire du programme, la mémoire EEPROM de données ou les bits de configuration".

2.3- Lecture :

Pour afficher le code écrit sur l'appareil, cliquez sur « Read ».

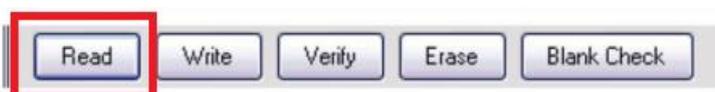


Figure A.7- Bouton lecture du programme présent dans le pic

Le code est affiché dans la mémoire de programme et les fenêtres de données EEPROM pour votre évaluation. Si tous les zéros sont affichés, il est possible que l'appareil soit protégé par code.

2.3- Effacer :

La fonction Effacer efface la mémoire de programme, la mémoire EEPROM de données, les ID et les bits de configuration, quel que soit l'état des cases à cocher « Programmes » et « Données activées » de la mémoire EEPROM. Cependant, cette fonction n'est normalement pas nécessaire car la fonction d'écriture effectue une opération d'effacement avant la programmation du périphérique.

Pour effacer la mémoire du PIC, cliquez sur « Erase ».



Figure A.8- Bouton effacer du programme présent dans le pic

Bibliographie

Bibliographie

- [1] : Nathalie Mayer, « vitesse de la lumière », article, <https://www.futura-sciences.com/sciences/definitions/physique-vitesse-lumiere-16087/>, 11/04/2019
- [2] : Anselme Brice, « Le rayonnement électromagnétique : nature et propagation », cours, <https://e-cours.univ-paris1.fr/modules/uved/envcal/html/rayonnement/1-rayonnement-electromagnetique/1-2-les-ondes-electromagnetiques.html>, 11/04/2019
- [3] : Naud Colette et André Bergeron, « Conservation préventive dans les musées », pages 15 et 16, 1995 (Révision 2011)
- [4] : Yannick Sutter, « L'éclairage naturel », Les guides bio-tech, page 11, Mars 2014
- [5] : Richard Forster, « l'Encyclopédie de sécurité et de santé au travail du bureau international du travail », partie VI. Les risques professionnels, chapitre 46 - L'éclairage, 2015
- [6] : Florence Rigaudière, Yvon Grall et Jean-François Le Gargasson, « LA MESURE DES SOURCES ou METROLOGIE VISUELLE », Œil et physiologie de la vision, 18/06/2013
- [7] : « La lumière naturelle dans le bâtiment », chapitre 1 : La lumière naturelle dans le bâtiment,
<http://webcache.googleusercontent.com/search?q=cache:Nr3G3HaRDXcJ:thesis.univ-biskra.dz/1126/3/CHAPITRE%2520I.pdf+&cd=1&hl=fr&ct=clnk&gl=dz&client=firefox-b-d>, 06/05/2019
- [8] PATRICK POULICHET, La photorésistance, électronique et loisirs magazine N146, composants électroniques passifs et actifs, 04/2010.
- [9] MEDA BEREKSI REGUIG, Les photodiodes, études des capteurs de lumières, « mémoire de fin d'étude Juin 2017 », université de Aboubakar Belkaid, Tlemcen.
- [10] Les phototransistors, ELECTROBOT, <http://electrobot.e-monsite.com/pages/les-composants/les-phototransistors.html>, 10/02/2019.
- [11] Cellules photovoltaïques, électronique et loisirs magazine N146, composants électroniques passifs et actifs, PATRICK POULICHET, 04/2010.

- [12] CHRISTIAN BISSIERES, Acquisition de grandeurs physiques, cours physique appliqué, 2007.
- [13] Capteur passif actif : Instrumentation CIRA, chapitre II : capteurs et transmetteurs, 2006-2007
- [14] Appareils de mesure, les divers types, cours physique académie de bordeaux, <http://webetab.ac-bordeaux.fr/Pedagogie/Physique/Physico/Electro/e03appar.htm>
- [15] Wikipédia, <https://fr.wikipedia.org/wiki/Pyranom%C3%A8tre> consulté le 06/02/2019.
- [16] ISO 9060:1990 Solar energy - Specification and classification of instruments for measuring hemispherical solar and direct solar radiation, International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland.
- [17] Nathalie Mayer, « Luxmètre », article, <https://www.futura-sciences.com/sciences/definitions/physique-luxmetre-14907/>
- [18] Luxmètre PCE-172 datasheet, PCE Instruments
- [19] BPW34 silicon PIN photodiode datasheet, VISHAY semiconductors, 08/09/2008
- [20] CA3130 datasheet: 15MHz, BiMOS Operational Amplifier with MOSFET Input/CMOS Output, HARRIS SEMICONDUCTOR, 1998
- [21] BPW21 datasheet: Silicon Photodiode for the visible spectral range, SIEMENS SEMICONDUCTOR, 1998
- [22] PIC16F876A datasheet: 28-pin 8-bit CMOS FLASH Microcontroller, MICROSHIP