



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 Sécurité Industrielle et environnement**

## **Projet de Fin d'Etude**

Pour l'obtention du diplôme de Master

**Filière :** Génie Industrielle

**Option :** Ingénierie de la Maintenance en Instrumentation

**Thème**

**Etude et Conception d'un Luxmètre**

Présenté et soutenu publiquement par :

**Mr. MAHI Slimane**

**Mr. DEGLA Cherif**

Devant le jury composé de :

<b>Nom et Prénom</b>	<b>Grade</b>	<b>Etablissement</b>	<b>Qualité</b>
BELKHOUDJA Leila	MAA	IMSI	Présidente
ZEBIRATE Soraya	PROF	IMSI	Examinatrice
BENABED Khadidja	MAA	IMSI	Encadreur

**Juin 2016**

بِسْمِ اللّٰهِ الرَّحْمٰنِ الرَّحِیْمِ

## ***Remerciements***

*En premier lieu, nous tenons à remercier ALLAH –tout puissant- de nous avoir donné la force pour accomplir cette tâche.*

*Nous tenons à présenter nos sincères remerciements à notre encadreur M<sup>me</sup> :BENABED Khadidja pour son aide précieuse et ses conseils constructifs apportés au cours de l'élaboration de ce projet de fin d'étude, ainsi qu'à tous les professeurs du département de I M S I qui ont contribué à nos formation durant ce cycle.*

*Enfin, je remercie toute personne ayant contribué de près ou de loin à la réalisation de ce modeste travail dans de meilleures conditions.*

# Sommaire

---

Sommaire	.V
Liste des symboles utilisés	.VIII
Liste des abréviations	.X
Liste des figures	.XI
Liste des tableaux	.XIII
Introduction générale	.1

## **Chapitre I : Source de Lumière (Généralités et Paramètres)**

I.1- Introduction	.3
I.2- Comprendre la lumière	.3
I.2.1- Caractérisation de la Lumière	.4
I.2.2- La lumière et l'éclairage	.4
I.2.3- Problèmes liés à l'éclairage	.5
I.2.3.1- Le niveau d'éclairement	.5
I.2.3.2- La présence de rayons UV	.5
I.2.3.3- La chaleur émise	.5
I.2.4- Les différents types d'éclairage	.5
I.2.4.1- La lumière naturelle	.6
I.2.4.2- La Lumière Artificielle	.6
I.2.4.2.1- La lumière incandescente	.7
I.2.4.2.2- L'éclairage halogène	.7
I.2.4.2.3- La lumière fluorescente	.7
I.2.4.2.4- Les DEL	.8
I.3- Photométrie (Optique)	.8
I.3.1- Photométrie et Perception Humaine	.9
I.3.2- Domaines Photométriques	.10
I.3.3- Grandeurs Photométriques	.11
I.4- Sources Lumineuses	.11
I.4.1- Caractérisation de la Source lumineuse	.12
I.4.2- Détermination De L'indicatrice D'une Source Ponctuelle	.13
I.4.3- Entre La Source Lumineuse Et La Surface Eclairée	.13
I.4.4- Au Niveau De La Surface Eclairée	.14
I.5- Les Unités De Mesure	.15
I.5.1- Historique De L'unité D'intensité Lumineuse	.15
I.5.2- Les Unités De La Lumière	.15
I.6- Conclusion	.18

## **Chapitre II : Luxmètre (Typologies et Principes de Fonctionnement)**

II.1-Introduction	.20
II.2- Généralités sur les capteurs	.20
II.3- Capteur de lumière	.21
II.4- Luxmètre	.21

## Sommaire

---

II.4.1- Principe de fonctionnement	.21
II.4.2- typologie	.22
II.4.2.1- Photorésistance	.22
II.4.2.1.1- La définition	.22
II.4.2.1.2- Circuit de conditionnement	.22
II.4.2.1.3- Objectifs	.23
II.4.2.1.4- Description et principe de fonctionnement d'une photorésistance	.25
II.4.2.1.5- Caractéristiques des Différentes Types	.25
II.4.2.1.6- Géométrie du semi-conducteur	.26
II.4.2.2- La Photodiode	.27
II.4.2.2.1- Photodiode PIN	.28
II.4.2.2.2- Historique	.29
II.4.2.2.3- Principe	.29
II.4.2.2.4- Limitations en fréquence	.31
II.4.2.2.5- Caractéristiques électriques	.32
II.4.2.2.6- Application	.33
II.4.2.3- Le Phototransistor	.33
II.4.2.3.1- Fonctionnement	.34
II.4.2.4- Le Capteur Photographique	.35
II.4.2.5- Cellule photovoltaïque	.35
II.4.2.5.1- Principe de fonctionnement	.36
II.4.2.5.2- Utilisation	.38
II.4.3- Usages du luxmètre et démarche HQE	.39
II.4.4- Luxmètres nouvelles générations	.39
II.4.5- Le luxmètre : comment ça marche ?	.40
II.4.6- Capteur de lumière (capteur solaire)	.40
II.4.6.1- Obtention	.41
II.4.6.2- Mode normal	.41
II.4.7- Luxmètres: Valeurs préalables pour les différents endroits	.42
II.5- Etude de cas : Etalonnage d'un luxmètre	.43
II.5.1- Incertitude sur la référence	.44
II.5.2- Incertitudes Associées Aux Conditions De Mesure	.46
II.6- Conclusion	.48

### **Chapitre III : Conception d'un luxmètre**

<b>III.1-</b> Introduction	.50
<b>III.2-</b> Fonction D'usage De L'objet Technique	.50
<b>III.3-</b> Conception d'un Luxmètre à Base de Photorésistance	.50
<b>III.4-</b> Conclusion	.60
Conclusion générale	.61
Reference bibliographique	.62

## Liste des symboles utilises

### Symbole Description

$I_{ph}$	Le photo-courant
$R_s$	La résistance série
$R_p$	La résistance parallèle
$I_s$	Courant de saturation
$I$	Le courant électrique
$V$	La tension électrique
$\gamma$	Rayonnement (photon) gamma
UA	Unité astronomique
$\lambda$	Longueur d'onde
$h$	La hauteur du Soleil
$p$	La zone p de la jonction
$n$	La zone n de la jonction
CAR	Couche anti-réfléchissante
$I_{obs}$	Courant d'obscurité
$V_{th}$	Le potentiel thermique
$T$	La température absolue
$q$	La charge électrique d'un électron en valeur absolue
$R_{sh}$	La résistance shunt
$I_d$	Courant de la diode
$V_j$	La tension aux bornes de la jonction p-n
$I_{cc}$	Courant de court-circuit
$V_{co}$	Tension de circuit ouvert
$P_m$	Puissance maximale
$I_m$	Curant du point du fonctionnement
$V_m$	Tension du point du fonctionnement
FF	Le facteur de forme
$\eta$	Le rendement
$S$	La surface de la cellule
$E$	L'éclairement
$\alpha$	Coefficient de variation relative du $I_{cc}$
$E_g$	Energie du gap
$\Omega$	Ohm
ZCE	Zone de charge d'espace
$E$	Le champ électrique
$E_c$	Le niveau énergétique le plus bas de la bande de conduction
$E_v$	Le niveau énergétique le plus haut de la bande de valence
$L_n$	Longueur de diffusion des électrons
$L_p$	Longueur de diffusion des trous
$\nu$	Fréquence du rayonnement
$P$	La puissance électrique
$I_c$	Le courant corrigé
$C$	La vitesse de la lumière dans le vide

## PRINCIPALES CONSTANTES

La charge électrique d'un électron (en valeur absolue)  $q=1.60281 \times 10^{-19} \text{ C}$

La constante de Boltzmann  $K=1.38066 \times 10^{-23} \text{ J/K} = 8.61400 \times 10^{-5} \text{ eV/K}$

La vitesse de la lumière dans le vide  $C=2.99792 \times 10^8 \text{ m/s}$

## Liste des abréviations

UV	ultra-violet
IR	infra-rouge
CCD	charge coupled device
LDR	Light Dépendent Résistor
CdSe	séléniure de cadmium
ZnO	oxyde de zinc
CdS	Cellules au sulfure de cadmium
CdSe	Cellule au séléniure de cadmium
CdSSe	Cellules au sulfoséléniure de cadmium
PoS	Cellule au sulfure de plomb



Liste des figures

**Chapitre I : Source de Lumière (Généralités et Paramètres)**

<b>Figure I.1 :</b> Spectre Visible	.4
<b>Figure I.2 :</b> Répartition spectrale continue d'énergie relative de la lumière solaire à travers l'atmosphère, variable selon le moment du jour ou la saison	.6
<b>Figure I.3 :</b> Etapes schématiques de l'émission par fluorescence	.8
<b>Figure I.4 :</b> Sensibilité relative de l'œil en fonction de la longueur d'onde à basse luminosité (en Bleu) et à luminosité normale (en Rouge)	.9
<b>Figure I.5 :</b> Atténuation géométrique	.11
<b>Figure I.6 :</b> Indicatrices de luminance et d'intensité lumineuse dans le cas d'une lampe à incandescence	.12
<b>Figure I.7 :</b> Le soleil est la source primaire avec une intensité en candela émet un flux lumineux en lumen, la lune reçoit un certain flux lumineux	.15

**Chapitre II : Luxmètre (Typologies et Principes de Fonctionnement)**

<b>Figure II.1 :</b> Le capteur est le 1 <sup>er</sup> élément d'une chaîne de mesure ou d'instrumentation	.20
<b>Figure II.2 :</b> Photorésistance FW200	.22
<b>Figure II.3 :</b> Symbole normalisé photorésistance	.23
<b>Figure II.4 :</b> Principe d'une photorésistance	.24
<b>Figure II.5 :</b> Sensibilité spectrale d'une photorésistance	.25
<b>Figure II.6 :</b> Géométrie optimale	.27
<b>Figure II.7 :</b> Photodiode amplifié	.28
<b>Figure II.8 :</b> Structure d'une jonction PIN	.28
<b>Figure II.9 :</b> Symbole d'une photodiode PIN	.28
<b>Figure II.10 :</b> Schéma électrique équivalent de la photodiode PIN	.31

<b>Figure II.11</b> : Symbole du phototransistor	.34
<b>Figure II.12</b> : Le phototransistor	.35
<b>Figure II.13</b> : Cellule photovoltaïque en silicium monocristallin	.35
<b>Figure II.14</b> : Cellule photovoltaïque 4 pouces en silicium poly cristallin	.36
<b>Figure II.15</b> : Structure d'une cellule photovoltaïque	.37
<b>Figure II.16</b> : Exemple d'utilisation	.38
<b>Figure II.17</b> : Nouvelle génération d'un luxmètre	.40
<b>Figure II.18</b> : Banc d'étalonnage de luxmètres	.43
 <b>Chapitre III : Conception d'un luxmètre</b>	
<b>Figure III.1</b> : Schéma fonctionnel d'un luxmètre	.50
<b>Figure III.2</b> : Caractéristique de la Photorésistance	.51
<b>Figure III.3</b> : Schéma synoptique du luxmètre	.52
<b>Figure III.4</b> : Schéma de la tension de référence et du premier étage du luxmètre	.55
<b>Figure III.5</b> : Schéma du deuxième étage (amplificateur exponentiel)	.56

## Liste des tableaux

### Chapitre I : Source de Lumière (Généralités et Paramètres)

**Tableau I.1** : Des unités photométriques .17

**Tableau I.2** : Des unités radiométriques .17

### Chapitre II : Luxmètre (Typologies et Principes de Fonctionnement)

**Tableau II.1** : Comparaison du rendement entre les photodiodes PIN et à jonction PN, en silicium .30

**Tableau II.2** : Valeurs préalables pour les différents endroits .42

## Introduction générale

Depuis longtemps, nos ancêtres ont été intéressés par le sujet de la lumière naturelle (soleil, Lune...). L'histoire de l'utilisation de la lumière a commencé il y a 500000 ans avec la domestication du feu. Bientôt, la lumière et la chaleur pouvaient être utilisées de manière ciblée, la lumière artificielle prolonge la journée naturelle

Une valeur appropriée d'éclairage sur le lieu de travail, dans les magasins ou en salle d'opération assure de bonnes conditions de travail. Elle a un effet positif sur les performances de travail grâce à une meilleure vision, une meilleure vision spatiale, particulièrement les couleurs, moins de fatigue et moins d'irritation des yeux. La mesure de l'éclairage est donc très importante et elle est régie par de nombreuses normes et de valeurs limites.

Quel est l'appareil de mesure de la lumière ? L'appareil de mesure pour la lumière est un luxmètre, il permet de mesurer l'éclairement lumineux exprimé en lux de notre ampoule. C'est la mesure la plus couramment utilisée, elle mesure l'éclairement reçu par une unité de surface. Un lux est l'éclairement d'une surface qui reçoit, d'une manière uniformément répartie, un flux lumineux d'un lumen par mètre carré.

Cette mesure de l'éclairement permet de donner des informations sur la quantité de lumière disponible sur une zone définie, données utiles pour calculer les niveaux d'éclairement nécessaires selon l'activité que vous effectuez : plus la tâche est précise, plus le niveau d'éclairement doit être élevé.

L'Association Française de l'Eclairage (AFE) recommande des niveaux d'éclairement de 100 lux au minimum pour des travaux de manutention, de 500 lux minimum pour un travail de bureau, et d'au moins 1500 lux pour des travaux de mécanique de précision.

Dans ce mémoire on a essayé d'entamer les diverses généralités et concepts, de lumière et de luxmètre. Un capteur, un instrument de mesure, un mesureur ... dans la suite on va citer les différents modèles basiques de luxmètre.

On a partagé notre travail sur trois chapitres, le premier chapitre a été consacré pour les sources de lumières (Généralités et Paramètres), dont le but est de citer les différentes connaissances indispensables pour définir un cadre pour l'étude.

A travers le deuxième chapitre on a mis le point sur les différentes typologies de luxmètre et leurs principes de fonctionnement. Et le troisième chapitre est la partie qui représente la conception d'un prototype de luxmètre.

# **CHAPITRE I :**

# **Source de Lumière**

# **(Généralités et Paramètres)**

## **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 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, on estime que la grande majorité des informations reçues par notre cerveau sur notre environnement sont fournies par nos yeux, l'œil est d'ailleurs l'instrument optique le plus perfectionné que nous connaissons, Au fil des siècles, les hommes ont découvert les propriétés de la lumière pour ensuite concevoir de nombreux instruments qui utilisent ses propriétés.

Notre système visuel fonctionne de façon optimale en lumière du jour ou lumière visible, que cette lumière soit naturelle délivrée par le rayonnement solaire ou par des sources de lumière artificielles, Bien peu de nos activités se déroulent en ambiance obscure tandis que les stimulations également de lumière visible, sont alors de niveaux lumineux faibles voire très faibles, dans ce cas, par exemple la nuit par clair de lune, notre système visuel a besoin d'un temps d'adaptation à l'obscurité pour que la perception de lumières de faibles niveaux soit possible, nos performances visuelles étant alors médiocres.

Pour tester le fonctionnement de notre système visuel, il est nécessaire d'adapter la stimulation visuelle au plus près de sa physiologie et de ses propriétés pour en obtenir des réponses optimales.

## **I.2- Comprendre la lumière**

D'où vient la lumière ? La lumière est une forme d'énergie, tout comme l'électricité ou la chaleur, elle est composée de minuscules particules que l'on appelle photons et se déplace sous forme d'onde.

La lumière est en fait générée par les vibrations des électrons dans les atomes, Il s'agit donc d'un mélange d'ondes électriques et magnétiques : on dit que la lumière est une onde électromagnétique.

Il existe plusieurs formes de lumière, celle que nous connaissons est la lumière visible, Il existe cependant plusieurs autres formes d'ondes lumineuses : les infrarouges, les ultraviolets, les rayons X, etc.

D'un rayonnement. Tout corps solide, liquide Gazeux soumis à un changement d'énergie produit un rayonnement Qui se traduit par des radiations variables en fréquences (Hz) et longueur d'onde (nm). Lumière naturelle :

L'exemple parfait d'un corps rayonnant est celui du soleil qui produit notre lumière du jour, dont les radiations sont comprises dans une plage d'onde infinie.

La lumière est transmise à la vitesse de 300 000 kms/s.

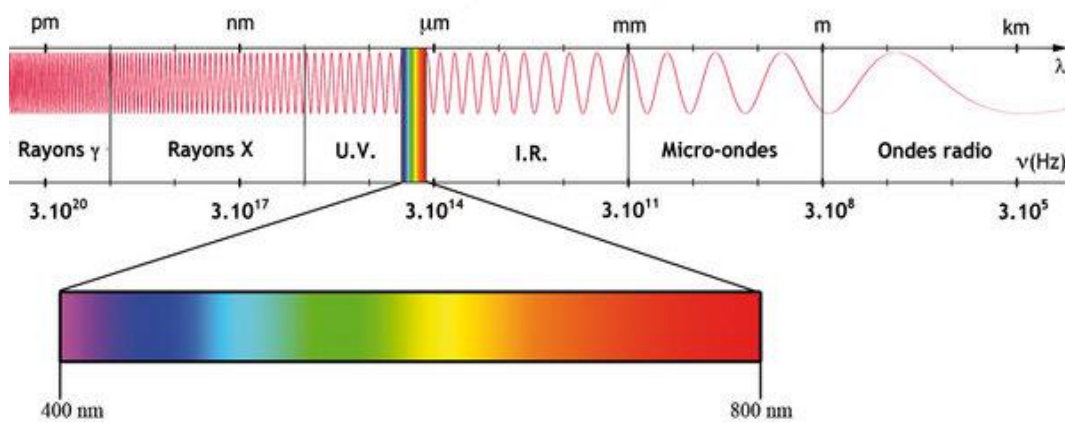


Figure I.1- Spectre Visible

### I.2.1- Caractérisation de la Lumière

Différentes théories, depuis Newton, ont permis d'évoluer vers l'aspect ondulatoire et corpusculaire de la lumière, on peut assimiler la lumière à un rayonnement qui se transmet à la vitesse de 300 000 km/s.

La longueur d'onde de la lumière est donnée par la relation :

$$\lambda = v/f \dots \dots \dots (I.1).$$

Avec :

v : vitesse de la lumière, en mètres par seconde (m/s) Lumière

f: fréquence, en hertz (Hz)

λ: Longueur d'onde, en mètres (m).

### I.2.2- 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 <sup>[01]</sup>.

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.

### **I.2.3- Problèmes liés à l'éclairage**

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.. 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.2.3.1- Le niveau d'éclairement**

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

#### **I.2.3.2- La présence de 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-wattpar lumen.

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.2.3.3- 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.2.4- Les différents types d'éclairage**

On retrouve différents types d'éclairage.

L'éclairage peut être naturel comme la lumière solaire, ou artificielle 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.

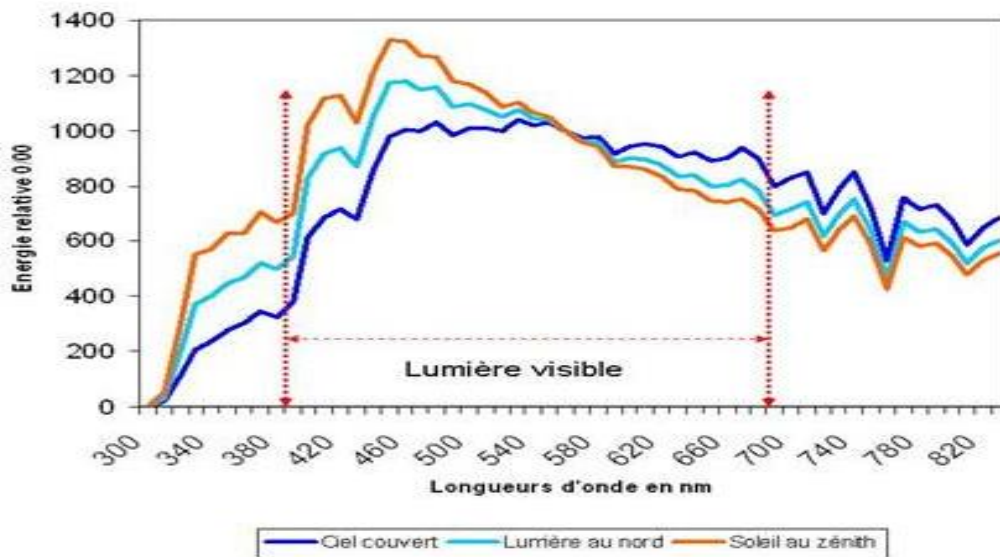
#### I.2.4.1- La lumière naturelle

Délivrée par le soleil, la lumière du jour est de composition relativement constante, mais d'intensité variable, d'un moment du jour à l'autre, d'une saison à l'autre ou d'un point du globe à l'autre (Figure I.2).

Si notre mode de vie y est adapté, cette stimulation naturelle est exclue pour toute exploration fonctionnelle qui nécessite des conditions parfaitement définies, stables et reproductibles.

Les stimulations visuelles doivent être constantes aussi bien dans leur composition spectrale (contenu en longueurs d'onde) que pour leurs niveaux énergétiques, afin que les réponses cellulaires soient elles aussi, reproductibles, elles devraient être émises par des sources de lumière ayant des propriétés similaires à celles de la lumière du jour naturelle.

Plusieurs types de sources de lumière répondent à ces conditions, leurs caractéristiques sont succinctement rappelées ci-dessous.



**Figure I.2-** Répartition spectrale continue d'énergie relative de la lumière solaire à travers l'atmosphère, variable selon le moment du jour ou la saison <sup>[2]</sup>

#### I.2.4.2- La Lumière Artificielle

Sources primaires de lumière proche de la lumière naturelle.

Une source de lumière est dite primaire si elle correspond à une surface ou un volume qui émet de l'énergie rayonnante, contrôlable et reproductible.

Certaines ont des caractéristiques proches de celles de la lumière naturelle.

En 2009, les sources primaires dont les caractéristiques sont les plus proches de celles de la lumière naturelle procèdent de l'émission lumineuse par fluorescence ; elles correspondent, en pratique, aux tubes fluorescents et aux diodes électroluminescentes.

#### **I.2.4.2.1- La lumière incandescente**

La lumière incandescente se retrouve sous forme d'ampoules à faisceau étroit, le « spot », ou à faisceau large, le « flood » et le Flurospray, les ampoules à faisceau large permettent d'éclairer une plus grande surface avec la même puissance, la lumière incandescente est facile à utiliser et contient peu d'ultraviolets. Par contre, elle dégage beaucoup de chaleur.

On pourra y remédier de différentes façons : par une bonne ventilation pour éviter la concentration de chaleur ou en utilisant des ampoules de type « Cool Beam », qui ont l'avantage de dégager moins de chaleur.

On ne doit jamais placer les ampoules directement à l'intérieur d'une vitrine, le dispositif d'éclairage doit être séparé de la vitrine par un diffuseur de lumière, la chaleur est alors évacuée par la partie supérieure ouverte de la vitrine.

Si le niveau d'éclairement est trop fort, plusieurs solutions sont possibles : soit on utilise une ampoule plus faible, soit on augmente la distance entre la source lumineuse et l'objet, plus la distance est grande, plus l'intensité sur l'objet est faible.

#### **I.2.4.2.2- L'éclairage halogène**

L'éclairage halogène dégage beaucoup de chaleur.

De plus, la plupart ont un autre inconvénient majeur, celui d'émettre beaucoup d'ultraviolets.

**Avantages** : La lampe halogène diffuse de la lumière de qualité, son efficacité lumineuse est supérieure à celle des lampes à incandescence bien qu'elle reste dans la moyenne, elle a aussi une grande durée de vie ce qui permet de faire des économies.

**Inconvénients** : La lampe halogène produit aussi beaucoup de chaleur. Elle consomme de l'énergie en grande quantité.

**Fonctionnement** : La lampe halogène est constituée de gaz halogène qui génère la formation de vapeur d'iode. Cette dernière, grâce à un procédé technique, permet la reformation du tungstène à l'infini.

#### **I.2.4.2.3- La lumière fluorescente**

La lumière fluorescente dégage peu de chaleur, mais elle peut émettre trop d'ultraviolets, pour régler ce problème, on peut utiliser des fluorescents n'émettant pas d'ultraviolets ou utiliser des filtres UV.

Il en existe deux sortes : le manchon en plastique souple et le tube en plastique rigide. Les tubes sont plus avantageux à l'achat que les manchons, mais leur efficacité et leur durée se valent, bien entretenus, les tubes et les manchons seront efficaces pendant de nombreuses années.

Si le niveau d'éclairage des fluorescents est trop fort, on y remédie soit en réduisant le nombre de fluorescents soit en plaçant un grillage gris ou un écran genre moustiquaire sur le diffuseur de lumière.

La lumière fluorescente dégage très peu de chaleur, mais l'installation électrique qui la supporte, le ballast, chauffe, on évite de le placer à l'intérieur d'un espace clos, telle une vitrine.

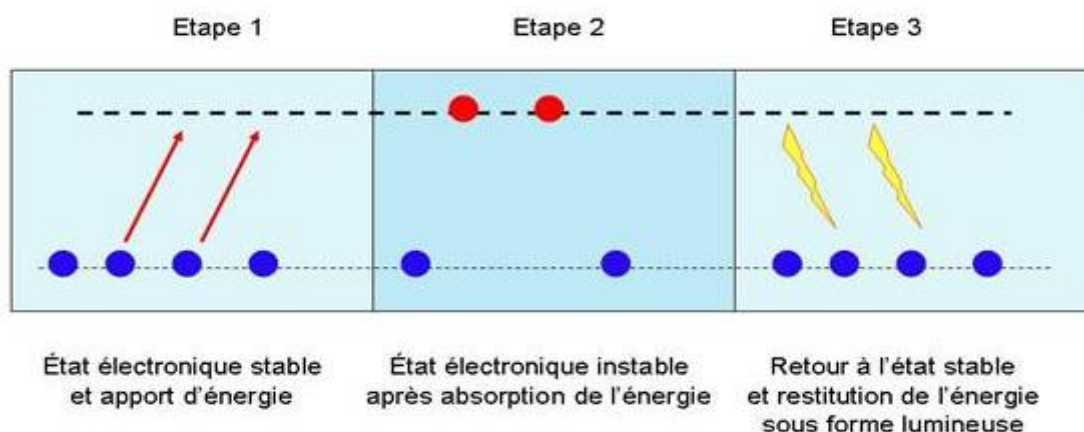


Figure I.3- Etapes schématisées de l'émission par fluorescence

#### I.2.4.2.4- Les DEL

Les DEL (pour diode électroluminescente, LED en anglais), ce nouveau type d'ampoule révolutionne le monde de l'éclairage, en diminuant considérablement la consommation d'électricité et en augmentant la longévité des ampoules, il existe maintenant des DELs qui possèdent un niveau de qualité approprié pour une utilisation muséologique, notamment en raison d'un indice de rendu des couleurs élevé, ces ampoules sont très intéressantes en raison de leur émission négligeable en infra-rouge et de leur faible niveau d'émission en UV.

Comme ces ampoules sont nouvellement arrivées sur le marché, une vérification de leur contenu en ultra-violet est recommandée.

### I.3- Photométrie (Optique)

La photométrie est la science qui étudie le rayonnement lumineux tel qu'il est ressenti par la vision humaine.

Elle se base sur la radiométrie, qui étudie la puissance des rayonnements électromagnétiques, dont la lumière est un cas particulier, en affectant la puissance de chaque

longueur d'onde d'un coefficient d'efficacité lumineuse spectrale qui reflète statistiquement la sensation lumineuse humaine.

Pour le reste, les concepts et grandeurs de la photométrie sont homologues à ceux de la radiométrie.

Les appareils de mesure de grandeurs photométriques sont munis de filtres optiques qui effectuent cette pondération.

Les longueurs d'ondes auxquelles s'intéresse la photométrie correspondent, en effet, à des fréquences largement au-delà des possibilités de traitement électronique direct, excluant une autre mesure que celle de la puissance moyenne.

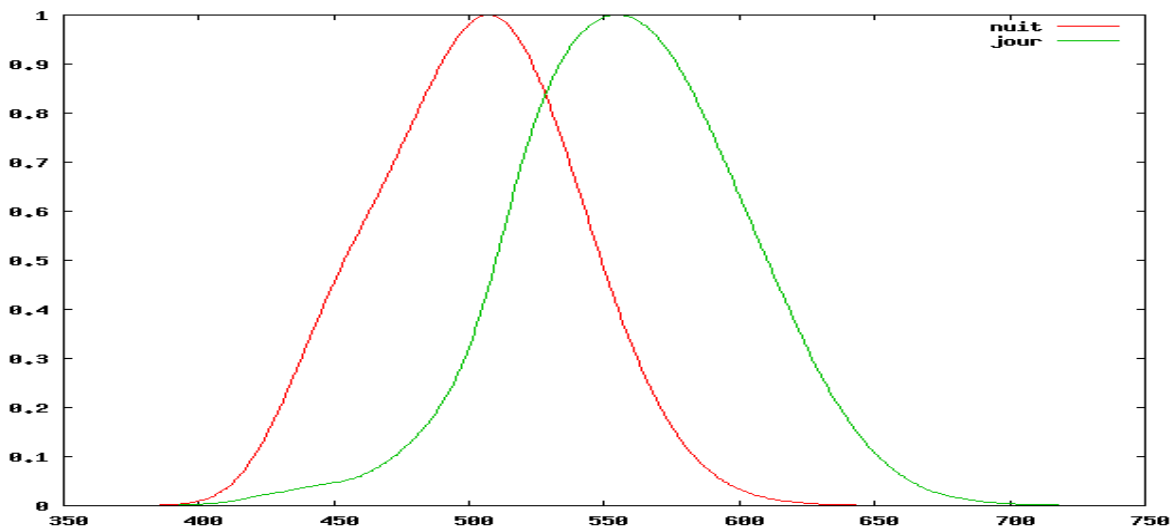
Le domaine d'application principal de la photométrie est l'éclairagisme, Ses unités sont d'usage courant en architecture, en photographie, en audiovisuel, etc.

L'objectif de la photométrie est d'obtenir une mesure physique d'un rayonnement lumineux qui corresponde à la sensation humaine de la luminosité, ou clarté, d'une surface.

Débutant au **XVII<sup>ème</sup>** siècle sans instruments de mesure, la photométrie établit ses bases par comparaison de sources lumineuses, on présente à l'observateur deux surfaces éclairées par deux sources, et on recherche le réglage nécessaire pour qu'elles paraissent également lumineuses, on s'aperçoit alors que la perception de la clarté varie selon le champ visuel mis en jeu.

Quand, à partir de la fin du **XIX<sup>ème</sup>** siècle (ou **19<sup>e</sup> siècle**), on mesure les quantités d'énergie transportés par les rayonnements, on se rend compte que, le plus souvent, la plus grande partie de cette énergie ne crée aucune sensation lumineuse.

### I.3.1- Photométrie et Perception Humaine



**Figure I.4-** Sensibilité relative de l'œil en fonction de la longueur d'onde à basse luminosité (en Bleu) et à luminosité normale (en Rouge)

On trouve assez facilement les limites de longueur d'onde de la lumière visible, les lumières monochromatiques visibles correspondent aux couleurs de la lumière blanche décomposée par le prisme, d'environ 400 nanomètres pour le bleu à environ 700 nanomètres pour le rouge.

Ces lumières sont perçus principalement comme colorées, et de luminosités différentes à puissance égale, les observateurs ne parviennent pas à égaliser avec certitude et régularité la luminosité de deux sources de couleurs très différentes, on procède de proche en proche, et on établit une courbe d'efficacité relative, qui indique le rapport de luminosité entre deux lumières monochromatiques de même intensité <sup>[3]</sup>.

### **I.3.2- Domaines Photométriques**

Dans la vision photopique, quand la lumière est suffisante, les trois types de cônes de la rétine permettent la perception des couleurs, les cônes ne sont pas suffisamment sensibles pour assurer la vision en toutes circonstances.

Dans l'obscurité, un autre type de cellule de l'œil, les bâtonnets, permet la vision scotopique, sans perception des couleurs, Sans l'obstacle de la différence de couleur, on a pu établir plus facilement des courbes d'efficacité relative, celles-ci diffèrent nettement des courbes établies pour la vision colorée, dès 1825 Purkinje avait constaté que les rayonnements qui semblent les plus lumineux en vision nocturne ne sont pas les mêmes qu'en vision diurne.

L'existence de deux domaines est « un scandale pour la photométrie visuelle ».

Comment établir une correspondance entre les unités énergétiques et la perception, si selon la quantité de lumière, les longueurs d'onde composant la lumière n'ont pas la même pondération ?

La sensibilité maximale de l'œil humain est atteinte pour une longueur d'onde de 555 nanomètres en vision diurne et 507 nanomètres en vision nocturne. On a donc deux domaines photométriques correspondant aux différents types de vision, séparés par une vaste zone intermédiaire.

Dans des conditions de forte luminosité, comme on en trouve en plein jour, les bâtonnets n'ont aucune influence.

Dans l'obscurité, les cônes ne perçoivent rien, et on ne perçoit aucune couleur. Entre ces deux domaines se trouve le domaine mésopique correspondant à la vision crépusculaire.

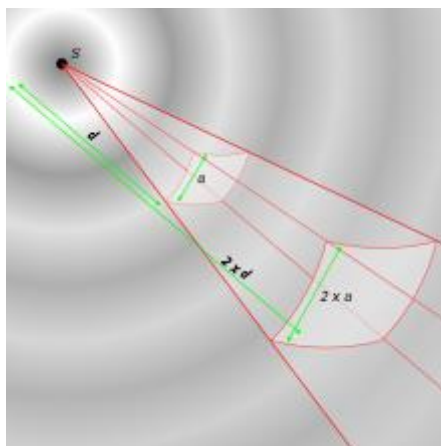
Dans ce domaine les cônes et les bâtonnets fonctionnent conjointement : le déplacement progressif du maximum de sensibilité vers les bleus est nommé effet Purkinje.

La correspondance entre unités radiométriques et unités photométriques s'établit différemment selon le domaine de luminosité où on se situe.

Les fonctions d'efficacité lumineuse spectrale prennent toutes des valeurs nulles pour des longueurs en deçà de 360 nanomètres et au-dessus de 830 nanomètres.

En dehors de cette plage toutes les grandeurs photométriques sont nulles, les rayonnements sont invisibles.

### I.3.3- Grandeurs Photométriques



**Figure I.5-** Atténuation géométrique

La photométrie et la radiométrie étudient le rayonnement comme un transfert de puissance dans l'espace, se propageant par ondes dans toutes les directions.

La notion de transfert implique que la puissance totale reste identique, à moins qu'une partie n'en soit absorbée ou diffusée.

Comme, sauf dans le cas du transfert dans une fibre optique ou un guide d'onde, le cheminement de l'onde n'est pas contenu, la puissance se répartit dans un cône, dont la base a une aire proportionnelle au carré de la distance à la source.

Ce phénomène appelé atténuation géométrique est à la base de la constitution des unités radiométriques et photométriques.

Pour présenter de façon simple les grandeurs utilisées en photométrie nous étudierons une source lumineuse qui éclaire une surface.

### I.4- Sources Lumineuses

Une source lumineuse primaire est un corps qui produit de la lumière par transformation d'une autre forme d'énergie.

Le soleil est un bon exemple : l'énergie libérée par la fusion nucléaire entraîne la production de lumière par incandescence, c'est aussi le cas de toutes les sources de lumière artificielles.

Une source lumineuse secondaire est une source qui renvoie une partie de la lumière qu'elle reçoit.

La lune, le ciel bleu, le plafond d'un appartement nous renvoient une partie du rayonnement solaire qu'ils reçoivent, il en va de même pour la plupart des objets du quotidien.

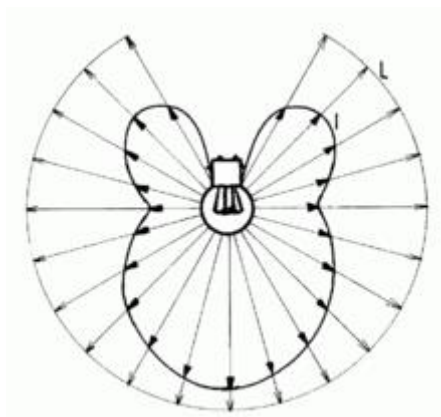
La source lumineuse peut être considérée ponctuelle ou étendue.

Une source est considérée comme ponctuelle quand sa plus grande dimension est petite par rapport à la distance qui la sépare de l'observateur.

Dans le cas contraire, la source est étendue, elle est perçue comme une surface.

#### I.4.1- Caractérisation de la Source lumineuse

La source n'émet pas forcément avec la même puissance dans toutes les directions. Si en tous points d'une sphère centrée autour d'une source ponctuelle, on relève le même éclairement, la source est dite uniforme ou isotrope.



**Figure I.6-** Indicatrices de luminance et d'intensité lumineuse dans le cas d'une lampe à incandescence

Indicatrices de luminance et d'intensité lumineuse dans le cas d'une lampe à incandescence. L'intensité est moins importante dans l'axe du filament car la surface apparente de tungstène est réduite.

Dans le cas contraire, il faut caractériser l'émission de la source dans chaque direction, pour cela, on détermine un angle solide suffisamment petit pour que l'émission de la source y soit constante.

La quantité d'énergie divisée par l'angle solide, en radiométrie, pondérée en photométrie par les coefficients d'efficacité lumineuse spectrale, donne le rayonnement de la source.

### I.4.2- Détermination De L'indicatrice D'une Source Ponctuelle

Si dans une surface de distante  $d$  de la source, d'aire  $s$ , on relève une puissance surfacique uniforme de  $E_e$  (en watt par mètre carré), l'intensité énergétique de la source se calcule en divisant la puissance totale reçue sur l'aire  $S$ , par l'angle solide que cette aire intercepte, c'est-à-dire le quotient de cette aire par le carré de la distance  $d$ .

$$I_e = \frac{E_e \times s}{\frac{s}{d^2}} = E_e \times d^2 \dots\dots\dots(I.1)$$

Si on a mesuré un éclairement uniforme  $E_v$  (en lux), l'intensité de la source s'établit identiquement :

$$I_v = E_v \times d^2 \dots\dots\dots(I.2)$$

L'intensité, énergétique ou lumineuse, ne dépend pas de la distance d'observation si le milieu n'absorbe ni ne diffuse la radiation lumineuse.

Si on s'éloigne, la puissance se répartit sur une surface proportionnelle au carré de la distance, et la puissance surfacique ou l'éclairement diminuent dans la même proportion.

L'intensité lumineuse, exprimée en candela, caractérise la « brillance » ou « éclat lumineux » d'une source ponctuelle dans la direction d'observation.

Avant la définition de cette unité, dont le nom signifie « bougie », « chandelle » en latin, on mesurait l'intensité lumineuse en bougies, par comparaison visuelle avec une bougie-étalon, remplacée ensuite par une lampe électrique à incandescence équivalente <sup>[4]</sup>.

Si la source est étendue, son « éclat » est caractérisé par la luminance, exprimée en candelas par mètre carré : elle renseigne sur l'intensité d'un mètre carré de cette source si celle-ci était observée de suffisamment loin pour être perçue comme ponctuelle, les surfaces brillantes ont une luminance qui dépend de la direction d'observation, pour les surfaces diffusantes, mates, la luminance est la même dans toutes les directions du demi-espace, on dit que l'on a affaire à une source lumineuse orthotrope.

### I.4.3- Entre La Source Lumineuse Et La Surface Eclairée

Le transfert de l'énergie émise se fait par rayonnement, toutes les fréquences de ce rayonnement ne sont pas visibles par l'œil humain, la « puissance visible » du rayonnement porte le nom de flux lumineux et s'exprime en lumen, on peut étudier le flux lumineux émis



par la source dans toutes les directions ou uniquement la partie qui atteint une surface réceptrice, etc, si la source est étendue, on définit alors l'émittance de la source, exprimée en lumens par mètre carré de surface émettrice. Pour une source lumineuse orthotrope, il existe une relation simple entre la luminance et l'émittance exprimée par la loi de Lambert.

La "proportion" de la partie visible du rayonnement par rapport à la totalité du rayonnement constitue ce que l'on appelle l'efficacité lumineuse et s'exprime en lumen par watt.

Dans le cas des sources artificielles modernes, c'est une puissance électrique qui est à l'origine de l'incandescence et/ou de la luminescence, la rentabilité d'une telle source, compte tenu de sa consommation, est caractérisée par le rendement lumineux en lumen par watt ( $\text{lm}\cdot\text{W}^{-1}$ ).

Les fabricants de lampes électriques préfèrent souvent le terme efficacité lumineuse malgré une définition rigoureusement différente.

#### **I.4.4- Au Niveau De La Surface Eclairée**

Si une partie de flux lumineux parvient en un point de la surface, on dit que la surface est éclairée, pour juger de cet éclairage, on définit une grandeur appelée éclairage lumineux, exprimée en lux.

Cet éclairage lumineux ne laisse en rien présager de la quantité de lumière réémise par la surface qui devient une source à son tour (on peut alors définir son émittance). Cette dernière dépend de la nature et de l'état de la surface mais aussi de sa couleur.

La notion de couleur n'est pas abordée en photométrie, c'est le domaine de la colorimétrie.

Cependant, la quantité de lumière réémise dépend des longueurs d'onde de la lumière incidente et l'on définit une réflectance spectrale représentée sous la forme d'une courbe de réflectance pour rendre compte de ce fait.

En l'absence d'un phénomène de fluorescence, de luminescence ou de phosphorescence, le flux lumineux réémis en chaque point est inférieur au flux lumineux incident, ce qui se traduit par le fait que l'émittance en un point de la surface s'exprime par un nombre inférieur au nombre exprimant son éclairage lumineux, émittance et éclairage sont de mêmes dimensions, on utilise respectivement le lumen par mètre carré ( $\text{lm}\cdot\text{m}^{-2}$ ) et le lux (lx) pour les distinguer.

Dans certains domaines comme la photographie, le temps pendant lequel une surface photosensible reçoit un éclairage doit être pris en compte, l'exposition lumineuse (anciennement nommée lamination) est égale au produit de l'éclairage et de la durée d'exposition et s'exprime en lux-seconde ( $\text{lx}\cdot\text{s}$ ).

## I.5- Les Unités De Mesure

### I.5.1- Historique De L'unité D'intensité Lumineuse

Chaque pays a eu sa propre unité d'intensité lumineuse, cette unité est basée en général sur l'émission de lumière par une flamme caractérisée par une consommation d'énergie (lampe) ou une durée (bougie).

En 1909, les laboratoires nationaux des États-Unis, de la France, et de la Grande-Bretagne décident d'adopter une bougie internationale représentée par des lampes à filament de carbone, l'Allemagne a gardé la bougie Hefner, définie comme ayant une flamme égale à environ 90% d'une bougie internationale.

Une norme basée sur les lampes incandescentes n'est pas satisfaisante par manque de stabilité.

Les propriétés du corps noir ont apporté la solution, et dès 1933, apparaissent de nouvelles unités photométriques basées sur l'émission lumineuse d'un corps noir à la température de congélation du platine 2045 K, la bougie "nouvelle" sera définie en 1946 par le Comité International.

La 9<sup>e</sup> CGPM de 1948 adopte la candela (cd) comme unité d'intensité lumineuse, basée sur la luminance d'un radiateur de Planck (un corps noir) à la température de congélation du platine.

En 1967, la résolution 5 de la 13<sup>e</sup> CGPM modifie la définition de 1946.

La candela est l'intensité lumineuse, dans la direction perpendiculaire, d'une surface de 1/600 000 mètre carré d'un corps noir à la température de congélation du platine sous la pression de 101 325 pascals.

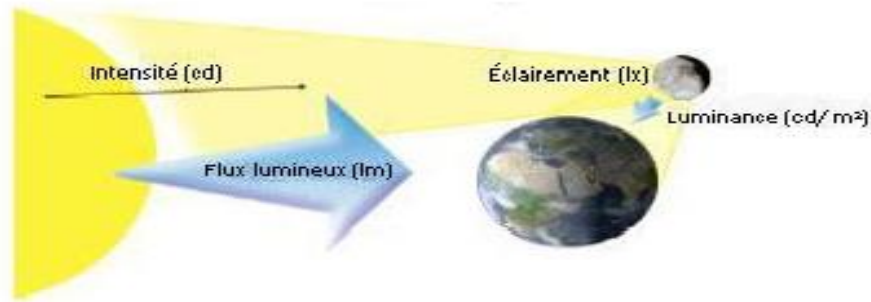
En 1979, en raison des difficultés à réaliser un radiateur de Planck aux températures élevées et des nouvelles possibilités offertes par la radiométrie, la 16<sup>e</sup> CGPM adopte la définition actuelle de la candela, basée sur la mesure de la puissance optique d'un rayonnement.

La candela est l'intensité lumineuse, dans une direction donnée, d'une source qui émet un rayonnement monochromatique de fréquence  $540 \times 10^{12}$  hertz et dont l'intensité énergétique dans cette direction est 1/683 watt par stéradian.

### I.5.2- Les Unités De La Lumière

La lumière peut être caractérisée par d'autres unités suivant qu'on s'intéresse à l'émission de la source, à l'énergie reçue, à la ré-émission de lumière par un corps...

Le soleil est la source primaire.



**Figure I.7-** Le Soleil est la Source Primaire avec une Intensité en Candela Emet un Flux Lumineux en Lumen. La Lune Reçoit un Certain Flux Lumineux

La lune reçoit une certaine quantité de lumière (éclairement) et en réfléchit une partie (luminance) dont une fraction vers la terre, C'est une source secondaire.

• **Intensité Lumineuse :** candela (cd)

Une candela est l'intensité lumineuse, dans une direction donnée, d'une source qui émet un rayonnement monochromatique de fréquence 540.1012 hertz et dont l'intensité énergétique dans cette direction est 1/683 watt par stéradian.

La candela est basée sur une lumière de 0,555  $\mu\text{m}$  de longueur d'onde (couleur verte).

• **Flux Lumineux :** lumen (lm)

Le lumen est le flux lumineux émis dans un angle solide de 1 stéradian par une source ponctuelle uniforme située au sommet de l'angle solide et ayant une intensité lumineuse de 1 candela.

C'est l'énergie émise par une source ponctuelle.

• **Éclairement Lumineux :** lux (lx)

Le lux est l'éclairement d'une surface qui reçoit, d'une manière uniformément répartie, un flux lumineux de 1 lumen par mètre carré.

C'est de la lumière reçue.

**Exemples D'éclairement**

- sensibilité d'une caméra bas niveau 0,001 lux
- nuit de pleine lune 0,5 lux
- rue de nuit bien éclairée 20 - 70 lux
- local de vie 100 – 200 lux
- local de travail 200 - 3 000 lux
- stade de nuit 1 500 lux

- journée ensoleillée > 50 000 lux

• **Luminance** : candela par mètre carré (cd/m<sup>2</sup>)

La luminance d'une source secondaire est l'intensité lumineuse émise par mètre carré.

Il s'agit d'une réémission ou d'une réflexion plus ou moins partielle de lumière issue d'une source primaire, elle est mesurée à proximité de la source (ex : cellule d'un appareil photographique).

Le mot "brillance" a été remplacé en 1948 par le mot luminance pour apprécier l'éclat d'un objet.

Grandeur	Unité SI	Symbole	Notes	Unités énergétiques équivalentes
Quantité de lumière	lumen·seconde	lm·s	le lumen·seconde est parfois appelé <i>talbot</i> dans les pays anglosaxons	J
Flux lumineux	lumen	lm	appelé parfois <i>puissance lumineuse</i>	W
Intensité lumineuse	candela	cd	c'est l' <b>unité de base</b> dans le système SI	W/sr
Luminance	candela par mètre carré	cd/m <sup>2</sup>	appelée autrefois <i>brillance</i>	W/sr/m <sup>2</sup>
Éclairement	lux	lx	il s'agit du flux lumineux reçu par une surface	W/m <sup>2</sup>
Exitance	lumen par mètre carré	lm/m <sup>2</sup>	même dimension que l'éclairement mais il s'agit du flux lumineux émis par une surface	W/m <sup>2</sup>

**Tableau I.1-** Des unités photométriques

Grandeur	Unité SI	Symbole	Notes	Grandeur
Énergie (radiante)	joule	J	c'est l'énergie au sens classique du terme	Énergie (radiante)
Flux ou puissance (radiante)	watt	W	c'est une puissance au sens commun du terme	Flux ou puissance (radiante)
Intensité énergétique	watt par stéradian	W·sr <sup>-1</sup>	la puissance est rapportée à l'unité d'angle solide	Intensité énergétique
Luminance énergétique	watt par stéradian et par mètre carré	W·sr <sup>-1</sup> ·m <sup>-2</sup>	la puissance est rapportée à l'unité d'angle solide et à l'unité de surface apparente (surface projetée perpendiculairement à la direction de mesure)	Luminance énergétique
Éclairement énergétique	watt par mètre carré	W·m <sup>-2</sup>	la puissance est rapportée à l'unité de surface réceptrice	Éclairement énergétique
Exitance énergétique	watt par mètre carré	W·m <sup>-2</sup>	la puissance est rapportée à l'unité de surface émettrice	Exitance énergétique

**Tableau I.2-** Des unités radiométriques

**I.6- Conclusion**

Les sources sont l'élément fondateur de la stimulation visuelle. Le but final de celle-ci est d'exciter ou d'inhiber des groupes de cellules en étant le plus sélectif possible.

Pour cela, le physiologiste va choisir les paramètres d'énergie, de temps, de longueurs d'onde et de répartition spatiale de la stimulation permettant d'obtenir la meilleure identification possible de la fonction cellulaire testée.

Il est possible de remplir toutes les conditions requises si et uniquement si la source détient au minimum les caractéristiques demandées.

De la stimulation naturelle, source solaire, à celle comparable mais reproductible et maîtrisable que ce soit en termes de caractéristiques physiques, d'aspect technologique ou de coût, de nombreuses solutions sont proposées par l'ensemble des concepteurs d'appareillage en vue de l'exploration par électrophysiologie. Malgré tout, elles sont parfois loin de l'idéal... Un bon compromis est le plus souvent trouvé qui permet de stimuler le système visuel et de recueillir ses réponses dans des conditions toujours identiques.

Les progrès technologiques en particulier pour les diodes électroluminescentes blanches et les écrans plats, apporteront dans un futur proche des solutions dont on peut souhaiter qu'elles soient encore plus proches de la physiologie.

# **Chapitre II :**

# **Luxmètre**

# **(Typologies et Principes de**

# **Fonctionnement)**

## II.1- Introduction

Dans de nombreux domaines (industrie, recherche scientifique, services, loisirs ...), on a besoin de contrôler de nombreux paramètres physiques (température, force, position, vitesse, luminosité, ...), le capteur est l'élément indispensable à la mesure de ces grandeurs physiques.

Un capteur est un organe de prélèvement d'information qui élabore à partir d'une grandeur physique, une autre grandeur physique de nature différente (très souvent électrique).

Cette grandeur représentative de la grandeur prélevée est utilisable à des fins de mesure ou de commande.

Un capteur est un transducteur capable de transformer une grandeur physique en une autre grandeur physique généralement électrique (tension) utilisable par l'homme ou par le biais d'un instrument approprié.

Le capteur est le 1er élément d'une chaîne de mesure ou d'instrumentation.

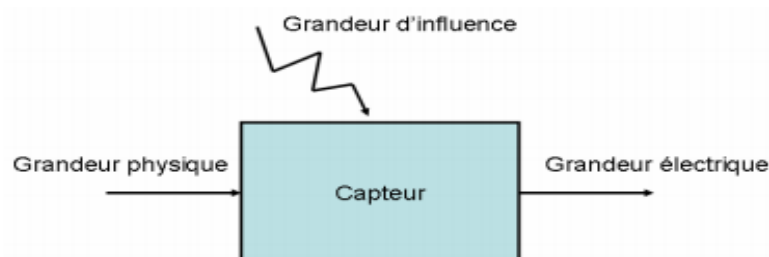
## II.2- Généralités sur les capteurs

Dans un grand nombre de domaine, 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 quand à la conduite de celui-ci.

Les décisions peuvent être automatique c'est à dire prise par un ordinateur ou prise par un opérateur humain via une interface homme machine.

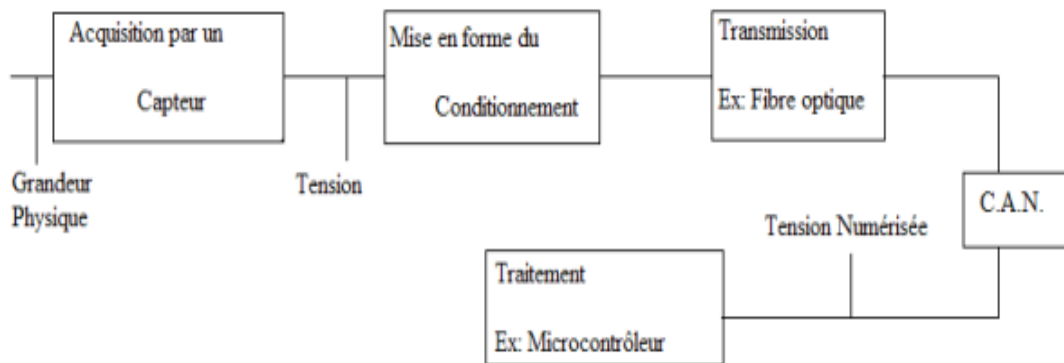
Dans les deux cas, l'état physique du système doit être connu sous la forme d'une grandeur électrique : tension ou courant car les systèmes de traitement n'utilise que ces grandeurs.

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



**Figure II.1-** Le capteur est le 1<sup>er</sup> élément d'une chaîne de mesure ou d'instrumentation

Ex :



### II.3- Capteur de lumière

Les capteurs <sup>[5]</sup> de lumière sont destinés à garantir une protection contre la lumière, à optimiser l'éclaircissement de différents lieux ou même pour mesurer la luminosité, Les solutions dédiées aux capteurs de lumière : luxmètres numériques, capteurs solaires, détecteurs à diodes, tests de LED, capteurs de photons.

Un capteur de luminosité est composé d'un panneau solaire et en fonction de la quantité de lumière qu'il reçoit, il produira plus ou moins d'énergie, le soleil envoie des ondes électromagnétiques (lumière) vers la Terre, la lumière est constituée de photons contenant de l'énergie, lorsqu'un panneau photovoltaïque capte cette énergie, il libère des électrons, et peut donc transformer cela en signal électrique.

### II.4- Luxmètre

Un luxmètre est un capteur permettant de mesurer simplement et rapidement l'éclaircissement dans le spectre visible, La mesure est absolue et non relative. L'unité de mesure est le lux.

#### II.4.1- Principe de fonctionnement

Les luxmètres modernes fonctionnent selon le principe d'une cellule C.C.D ou cellule photovoltaïque ; un circuit intégré reçoit une certaine quantité de lumière (photons constituant le « signal » qui est une énergie de rayonnement) et la transforme en signal électrique (signal analogique).

Ce signal est visualisé par le déplacement d'une aiguille, l'allumage d'une diode, l'affichage d'un chiffre...

Une photorésistance associée à un ohmmètre jouerait le même rôle.

Un filtre de correction de spectre permet d'éviter que les différences de spectre ne faussent la mesure (la lumière jaune est par exemple plus efficace que la bleue pour produire un électron à partir de l'énergie d'un paquet de photons).



Les luxmètres <sup>[6]</sup> peuvent avoir plusieurs échelles pour s'adapter aux faibles ou fortes luminosités (jusqu'à plusieurs dizaines de milliers de lux).

L'unité traditionnelle de mesure est le lux, qui correspondait à la lumière portée par une flamme de bougie à 1 mètre de distance de la lumière réellement reçue en un point donnée (architecture d'intérieur, environnement nocturne).

Une photodiode est un composant semi-conducteur ayant la capacité de détecter un rayonnement du domaine optique et de le transformer en signal électrique.

## II.4.2- typologie

### II.4.2.1- Photorésistance

#### II.4.2.1.1- La définition

Les dispositifs de détection de rayonnement comportent une surface émettrice qui collecte le rayonnement des particules ou électromagnétique et le concentre en direction d'un détecteur qui transforme l'information reçue en une grandeur physique mesurable.

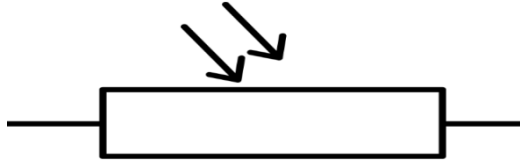
A chaque type de détecteur de rayonnement électromagnétique est associée une sensibilité spectrale qui identifie le domaine du spectre électromagnétique sur lequel il sera particulièrement adapté.



Figure II.2- Photorésistance FW200

#### II.4.2.1.2- Circuit de conditionnement

Le dessin situé en dessous est le symbole d'une photorésistance utilisé dans un grand nombre de schémas de circuit électrique.



**Figure II.3-** Symbole normalisé photorésistance

Le composant sert majoritairement à distinguer la présence ou l'absence de lumière.

La quantification de flux reste possible mais est moins employée.

Les photorésistances sont montées en pont diviseur de tension pour des montages potentiométriques servant à la commande de relais ou de diaphragme.

Pour les photomètres élémentaires on place sur une des branches d'un pont de Wheatstone une photorésistance.

Le courant de déséquilibre introduit par la variation de la résistance de cette branche est mesuré et ramené à une mesure de flux.

#### **II.4.2.1.3- Objectifs**

Une photorésistance de type LDR (Light Dépendent Résistor) est un capteur de lumière dont la résistance varie en fonction de l'éclairement, le but est d'étudier l'influence de l'éclairement sur ce capteur optoélectronique.

Les photorésistances trouvent leurs applications principales dans la détection d'une différence de flux plutôt que dans la mesure précise du niveau de flux reçu (impulsions lumineuses, variation d'éclairage par exemple).

La mesure en photométrie nécessite une détermination précise et une stabilisation des caractéristiques, cette stabilisation ainsi que la détermination de ces caractéristiques passent par un étalonnage rigoureux et l'intégration de la photorésistance dans un conditionneur de capteurs résistifs.

D'après les considérations précédentes, le type de mesurande que les photorésistances sont en mesure de détecter a été défini, cependant, le type de rayonnement détectable dépend du type de semi-conducteur composant la photorésistance.

Par exemple, les photorésistances au CdSe (sélénure de cadmium) permettent de détecter un rayonnement dans les proches IR et le visible alors que celles de ZnO (oxyde de zinc) permettent de détecter un rayonnement UV, l'utilisation de ce type de détecteur est très variée.

- Les détecteurs de flammes qui sont des photorésistances à détection d'infrarouges ou d'UV, à savoir que seule une forte fumée cause une inhibition du capteur UV et que la foudre ou une soudure peut le déclencher accidentellement.

Pour la photorésistance à infrarouges, la présence de vapeur d'eau atténue fortement sa sensibilité.

- Les détecteurs de présence se déclinent sous deux principes différents, un premier détectant l'augmentation du flux induit par la présence d'un corps dans le champ (principalement des capteurs à infrarouges), le second détectant la diminution du flux induit par l'ombre du corps présent dans le champ du capteur qui est plus limité que celui à infrarouges (détection dans le visible et capteur LDR plus directif).
- Les récepteurs infrarouges permettent de faire communiquer deux appareils sans contact, l'un des appareils possède un émetteur infrarouge et le second la photorésistance.
- Les détecteurs à UV qui permettent de mettre en évidence toute source d'UV et ainsi asservir la source ou détecter une fuite par exemple.
- L'allumage des lumières lorsque la luminosité diminue (éclairage public ou domestique).
- La mesure de la luminosité extérieure dans les appareils photographiques ou les ordinateurs.

Les applications de ce composant sont donc très variées, que ce soit dans le monde industriel ou domestique, étant peu cher, il présente un bon rapport qualité pour les industriels souhaitant l'intégrer dans leurs systèmes.

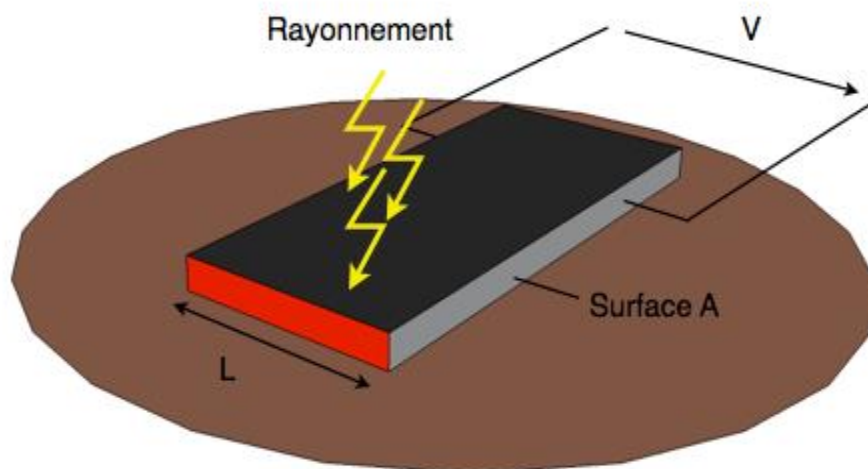


Figure II.4- Principe d'une photorésistance

#### II.4.2.1.4- Description et principe de fonctionnement d'une photorésistance

Un cristal de semi-conducteur à température basse contient peu d'électrons libres, la conductivité du cristal est très faible, proche de celle d'un isolant, lorsque la température du cristal augmente de plus en plus d'électrons qui étaient immobilisés dans les liaisons covalentes s'échappent et peuvent participer à la conduction.

A température constante si le même cristal semi-conducteur est soumis à une radiation lumineuse, l'énergie apportée par les photons peut suffire à libérer certains électrons utilisés dans les liaisons covalentes entre atomes du cristal, plus le flux lumineux sera intense, plus le nombre d'électrons disponibles pour assurer la conduction sera grand, ainsi la résistance de la photorésistance est inversement proportionnelle à la lumière reçue.

Lorsqu'elle est éclairée, la résistance  $R$  de la photorésistance diminue rapidement quand son éclairage (intensité lumineuse)  $E$  croît (Figure II.4) suivant la relation  $R=K.E^{-\gamma}$  où  $K$  est une constante dépendant du matériau, de la température, de la nature spectrale du rayonnement reçu ainsi que de la surface sensible de la photorésistance et où  $\gamma$  est une valeur numérique comprise entre 0,5 et 1.

Sensibilité spectrale  
Relative (%)

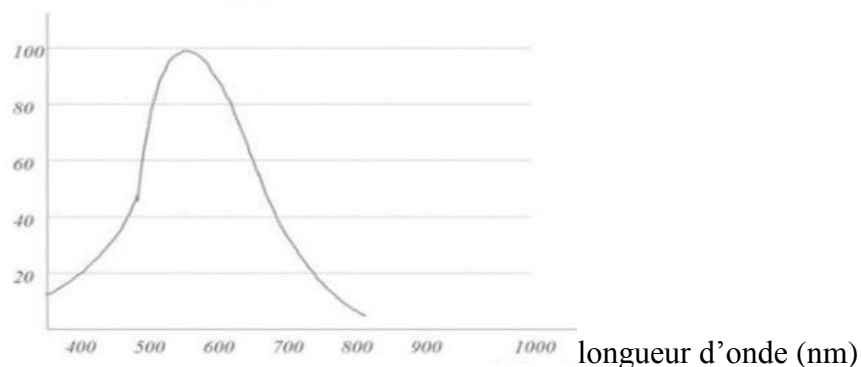


Figure II.5- Sensibilité spectrale d'une photorésistance

#### II.4.2.1.5- Caractéristiques des Différentes Types

Cellules au sulfure de cadmium (CdS)

- Sensibilité spectrale maximale : 575 nm (400 < visible < 800 nm).
- Résistance d'obscurité : 100 M $\Omega$ .
- Résistance d'éclairage : 0,3 k $\Omega$ ; à 1 000 lux.
- Le temps de réponse : 10 à 30 ms.

Cellule au sélénure de cadmium (CdSe)

- Sensibilité spectrale maximale à 730 nm (rouge).
- Résistance d'obscurité : 100 M $\Omega$ .
- Résistance d'éclairage : 0.3 k $\Omega$  à 1000 lux.
- Le Temps de réponse 1 à 3 ms.

Cellules au sulfoséléniure de cadmium (CdSSe)

- Sensibilité spectrale maximale à 600 nm.
- Résistance d'obscurité : 100 MΩ.
- Résistance d'éclairement : 0,3 kΩ a 1000 lux.
- Temps de réponse : 10 à 20 ms.

Cellule au sulfure de plomb (PoS)

- Sensibilité spectrale maximale à 1800 ou 2500 nm (infrarouge).
- Résistance d'obscurité : 1 MΩ.
- Résistance d'éclairement 0,8 kΩ à 1000 lux.
- Temps de réponse : 0,1 à 0.25 ms.

#### II.4.2.1.6- Géométrie du semi-conducteur

Pour conserver la conduction, il faut limiter le nombre de recombinaisons des paires électron-trou.

La surface réceptrice du flux lumineux est un ruban, cette forme minimise la largeur séparant les électrodes et les laissent en contact avec le ruban sur une grande surface.

C'est cette configuration qui donne la résistance la plus faible.

Seules les photorésistances utilisées sous haute tension sont constituées d'un ruban large.

En effet le courant traversant la photorésistance s'écrit:

$$I = q\mu n \frac{A}{L} V$$

Dans cette expression :

- q est la charge de l'électron
- μ est la mobilité de l'électron
- n est la densité d'électrons présents
- A est l'aire de la surface de contact entre les électrodes et la zone photosensible
- L est la largeur du ruban

On constate que pour augmenter cette intensité il faut maximiser A et minimiser L. C'est pourquoi le ruban est la forme la plus efficace.

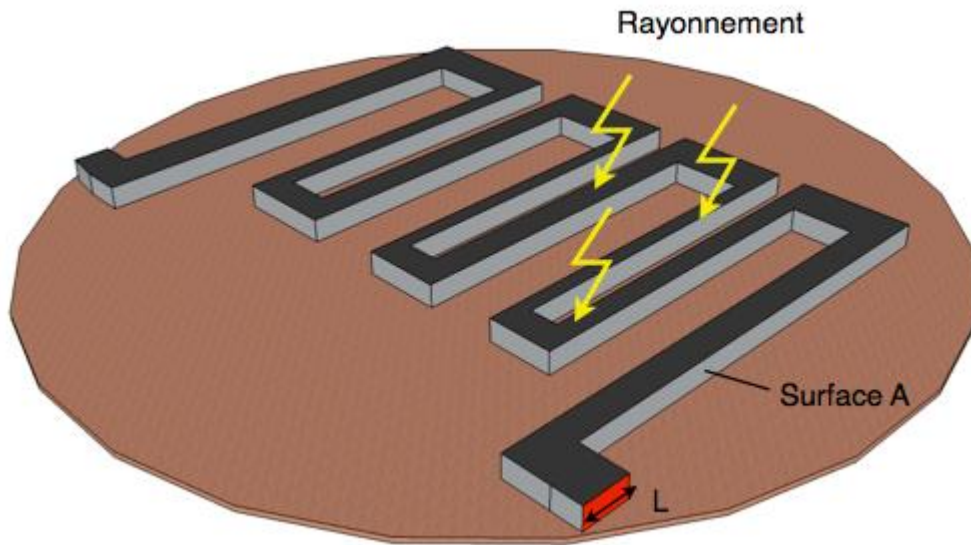


Figure II.6- Géométrie optimale

### Avantages

- Faible coût
- Larges gammes spectrales
- Facilité de mise en œuvre
- Rapport de transfert statique
- Sensibilité élevée

### Inconvénients

- Non linéarité de la réponse en fonction du flux.
- La vitesse de variation de R avec l'éclairement est faible et non symétrique
- Sensibilité thermique
- Refroidissement nécessaire dans certains cas (capteurs thermiques)
- Temps de réponse élevé (0,1 us à 100 ms)
- Bande passante limitée
- Instabilité dans le temps (vieillesse dû aux échauffements)

### II.4.2.2- La Photodiode

Diode qui lorsqu'elle est polarisée en inverse, produit un courant (IR) qui augmente proportionnellement à l'intensité lumineuse.



Figure II.7- Photodiode amplifié

→Utilisé dans la fibre optique.

#### II.4.2.2.1- Photodiode PIN

La photodiode PIN est un composant semi-conducteur de l'optoélectronique. Elle est utilisée comme photodétecteur dans de nombreuses applications industrielles. Sa particularité vient de sa jonction composée d'une zone intrinsèque intercalée entre une région fortement dopée P et une autre fortement dopée N.

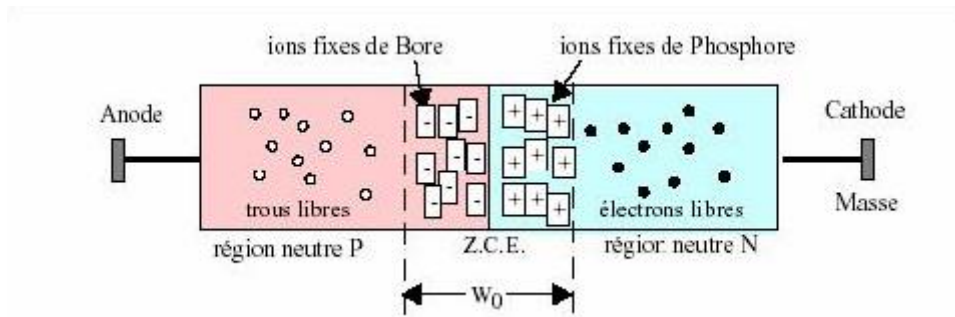


Figure II.8- Structure d'une jonction PIN

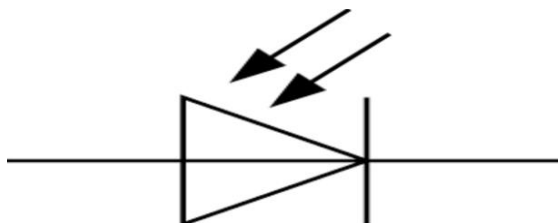


Figure II.9- Symbole d'une photodiode PIN

#### II.4.2.2.2- Historique

Le premier détecteur de lumière fut le tube photoélectrique conçu en 1913 par Elster et Geiter, suite aux études du phénomène photoélectrique menées par Albert Einstein en 1905, le premier tube photomultiplicateur, inventé dans le laboratoire RCA, a pu être commercialisé à partir de 1936.

C'est en 1940 que Ohl découvre la jonction PN, il remarqua qu'en associant des cristaux de silicium dont les quantités d'impuretés sont différentes, il obtenait une jonction de type diode, la théorie de cette jonction fut élaborée par W.Shockley en 1949, ce qui a ensuite incité la recherche sur les autres types de liaisons de semi- conducteurs.

Ces études ont permis au Japonais Jun-ichi Nishizawa d'inventer la diode PIN dès 1950, elle était alors utilisée comme redresseur de puissance.

Nishizawa continua ses recherches et améliora la photodiode PIN, il inventa également la photodiode à avalanche en 1952.

La fin des années 1950 a vu un intérêt grandissant pour l'utilisation des diodes en mode photovoltaïque ainsi que l'amélioration des capacités photoabsorbantes des capteurs optiques.

Ces recherches ont pu voir le jour, notamment grâce aux propriétés particulièrement intéressantes des photodiodes PIN.

Enfin, les premières photodiodes PIN en Germanium, permettant de détecter les infrarouges, furent créées par Riesz en 1962.

#### II.4.2.2.3- Principe

Lorsqu'un photon, d'énergie suffisante, pénètre dans la zone de charge d'espace (ZCE) d'une jonction PN, il génère, du fait de son absorption, une paire électron/trou.

Cette dernière est alors dissociée sous l'action du champ E et chacun de ces photoporteurs est propulsé vers la région dans laquelle il sera majoritaire.

Le déplacement de ces porteurs est à l'origine du photocourant.

Cependant, afin d'obtenir un bon courant, il est important de limiter le nombre de recombinaisons de paires électron/trou (sources de bruit) avec ces photoporteurs. Aussi, il est nécessaire que les photons soient absorbés dans une zone dénuée de porteurs de charges mobiles, la ZCE.

Si une région est plus dopée qu'une autre, la ZCE se forme principalement sur celle la moins dopée, or, un semi-conducteur intrinsèque à la propriété, par définition, de ne pas



être dopé, aussi, face aux régions de type P et de type N qui sont très fortement dopées, la ZCE va s'étendre essentiellement sur la partie intrinsèque.

L'intérêt de la photodiode PIN est donc d'augmenter artificiellement la taille de la ZCE.

Ainsi, la majorité des photons y est absorbée, de plus, cette région intrinsèque étant pure (99.99% pour le silicium), la vitesse des porteurs y est significativement augmentée.

En effet, ces derniers n'y subissent que très peu de collisions du fait de cette absence d'impureté.

Enfin, afin qu'un maximum de photons atteignent la ZCE, la zone traversée par le flux doit être de faible épaisseur.

Ainsi une photodiode PIN a un meilleur rendement qu'une photodiode usuelle.

Le rendement correspond au nombre de paires électrons/trous générées, par photon absorbé, participant au photocourant.

Il s'exprime :

$$\eta = \frac{1240.S}{\lambda}$$

Dans cette expression :

- $\eta$  est le rendement
- S est la sensibilité spectrale de la photodiode en ampère par watt (A/W )
- $\lambda$  est la longueur d'onde en nanomètre (nm)

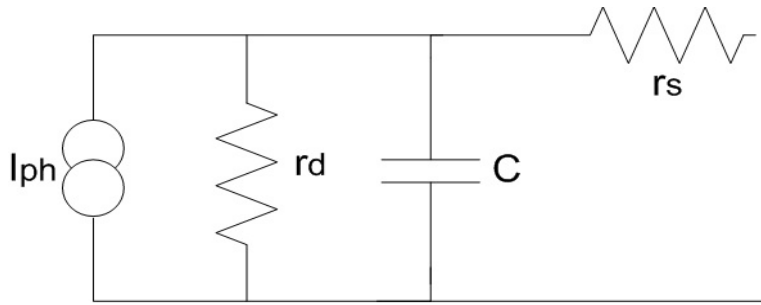
**Comparaison du rendement entre les photodiodes PIN et à jonction PN, en silicium**

Types de jonction	Rendement moyen au maximum de la sensibilité spectrale
PN	0.6 à 0.65
PIN	0.7 à 0.75 voire 0.85 pour les plus performantes

**Tableau II.1-** Comparaison du rendement entre les photodiodes PIN et à jonction PN, en silicium

**Schéma électrique équivalent**

Ci-contre, le schéma électrique équivalent de la photodiode PIN, utilisé lors de l'analyse du circuit électrique dans lequel elle a été intégrée.



**Figure II.10-** Schéma électrique équivalent de la photodiode PIN

- $r_d$  est la résistance dynamique de la jonction  $\approx 10^{10}$  ohms
- $r_s$  est la résistance associée aux contacts ohmiques, de quelques dizaines d'ohms
- $C$  c'est la capacité de la jonction
- $I_{ph}$  est le photocourant

#### II.4.2.2.4- Limitations en fréquence

La montée en fréquence de la photodiode PIN dépend de la largeur de sa ZCE et donc de sa couche intrinsèque, or, la dimension de cette région influe sur la valeur de la capacité  $C$  ainsi que sur le temps de transit des photoporteurs, de plus, ces deux derniers jouent un rôle majeur sur la montée en fréquence de cette photodiode, aussi, deux types de limitations en fréquence sont observables.

- Limitation, à la montée en fréquence, associée à la constante de temps  $\tau=RC$  de la photodiode PIN

Lorsque la taille de la ZCE augmente, la capacité  $C$  de la photodiode diminue, aussi, sa bande passante augmente.

Fréquence de coupure associée :

$$f_c = \frac{1}{2\pi RC}$$

Avec  $R$  la résistance de charge utilisée pour mesurer le photocourant.

- Limitation, à la montée en fréquence, associée au temps de transit  $T$  des photoporteurs dans la ZCE.

Plus la largeur  $W$  de la ZCE augmente, plus le temps de transit des photoporteurs croissent et plus la bande passante qui lui est associée diminue.

Fréquence de coupure associée :

$$f_t = \frac{3.5v}{2\pi W}$$

Avec

$$\frac{1}{v^4} = 0.5 * \frac{1}{ve^4} + \frac{1}{vt^4}$$

$v_e$  est la vitesse de saturation des électrons et  $v_t$  la vitesse de saturation des trous.

- Réponse en fréquence de la photodiode PIN

Fréquence de coupure  $f_c$  3dB de la photodiode :

$$\frac{1}{f_c(3dB)} = \frac{1}{f_c} + \frac{1}{f_t}$$

Afin d'obtenir un bon rendement avec une bande passante pas trop limitée, il est donc nécessaire de faire un compromis sur la largeur de la ZCE, aussi, en fonction de la géométrie utilisée, le temps de transit d'une photodiode PIN peut aller de quelques centaines de nanosecondes à moins d'une demi-nanoseconde.

#### II.4.2.2.5- Caractéristiques électriques

Une photodiode peut être représentée par une source de courant  $I_{ph}$  (dépendant de l'éclairement), en parallèle avec la capacité de jonction  $C_j$  et une résistance de shunt  $R_{sh}$  d'une valeur élevée (caractérisant la fuite de courant), l'ensemble étant en série avec une résistance interne  $R_s$  :

- résistance de shunt : la résistance de shunt d'une photodiode idéale est infinie. En réalité cette résistance est comprise entre 100 k $\Omega$  et 1 G $\Omega$  selon la qualité de la photodiode, cette résistance est utilisée pour calculer le courant de fuite (ou bruit) en mode photovoltaïque, c'est-à-dire sans polarisation de la photodiode.
- capacité de jonction : cette capacité est due à la zone de charge ; elle est inversement proportionnelle à la largeur de charge d'espace (W) :

$$C_j = \frac{\delta SC}{W} A$$

- Où A est la surface de coupe de la photodiode, W est proportionnel à la polarisation inverse et la capacité diminue si la polarisation augmente, cette capacité oscille autour de 100 pF pour les faibles polarisations à quelques dizaines de pF pour les polarisations élevées.
- résistance interne : cette résistance est essentiellement due à la résistance du substrat et aux résistances de contact,  $R_s$  peut varier entre 10 et 500 $\Omega$  selon la surface de la photodiode.

#### II.4.2.2.6- Application

- Contrôle Infrarouge à distance: cette technologie est utilisée pour les souris infrarouges et pour le contrôle à distance des lumières domestiques.

- **Photométrie stellaire:** la photodiode PIN est bien adaptée à la photométrie photoélectrique, instrument qui sert à mesurer l'énergie rayonnée par les étoiles.
- **Photodétecteur:** elle est utilisée dans la détection de lumière, comme pour le déclenchement automatique d'éclairage.  
La photodiode PIN joue alors le rôle d'un commutateur pour rallumer les lumières.
- **Détecteur de fumée:** certains détecteurs optiques de fumée utilisent le principe de dispersion de la lumière, un émetteur lumineux et une photodiode PIN sont placés dans une chambre de mesure de sorte qu'aucune lumière ne peut atteindre la photodiode, la dispersion de la lumière ne se produit que si des particules de fumée entrent dans cette chambre, le faisceau lumineux est reflété par les particules de fumée et est enregistré par la photodiode PIN, le circuit électronique d'analyse génère une alarme si les niveaux enregistrés dépassent un seuil spécifique.
- **Système de transmission par fibre optique:** ce système est utilisé pour la transmission haute qualité de signaux TV.  
La photodiode PIN est utilisée comme récepteur optique afin de détecter le signal, car elle a une bonne sensibilité (0.5 A/W) et son temps de montée est faible (quelques nanosecondes)
- **Télémètre laser:** cette technologie utilise des photodiodes PIN comme photodétecteurs, les télémètres lasers qui utilisent la photodiode PIN se retrouvent dans les systèmes de sécurité, que l'on retrouve au sein des automobiles.  
Parmi les applications destinées à accroître la sécurité au volant, on peut citer le contrôle des distances de sécurité, les systèmes de maintien sur les voies et les systèmes de freinage d'urgence qui se déclenchent dès que d'autres véhicules sont trop près.

#### II.4.2.3- Le Phototransistor

Transistor dont la base est sensible aux rayonnements lumineux.

Il crée un courant lorsque qu'il est éclairée sa sensibilité est entre 100 et 400 fois supérieure à celle d'une photodiode mais le courant d'obscurité est aussi plus important.

De plus la constante de temps est plus importante (base plus épaisse) et donc la fréquence de coupure plus basse que celle des photodiodes.

→Utilisé dans les optocoupleurs.

##### II.4.2.3.1- Fonctionnement



**Figure II.11-** Symbole du phototransistor

Un phototransistor est un transistor bipolaire dont la base est sensible au rayonnement lumineux ; la base est alors dite flottante puisqu'elle est dépourvue de connexion, lorsque la base n'est pas éclairée, le transistor est parcouru par le courant de fuite  $I_{CE0}$ , l'éclairage de la base conduit à un photocourant  $I_{ph}$  que l'on peut nommer courant de commande du transistor.

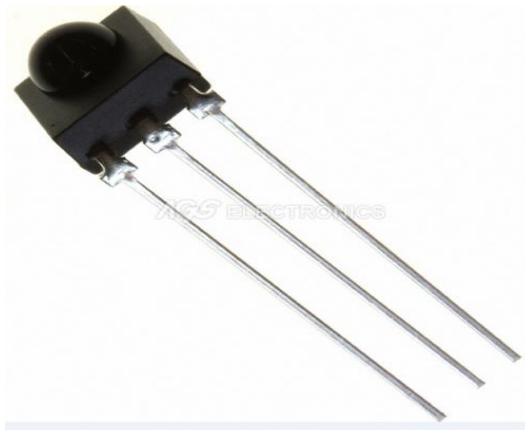
Celui-ci apparaît dans la jonction collecteur-base sous la forme :

$$I_C = \beta I_{ph} + I_{CE0}$$

Pour simplifier, lorsque la base est éclairée le phototransistor est équivalent à un interrupteur fermé entre l'émetteur et le collecteur et lorsque la base n'est pas éclairée, c'est équivalent à un interrupteur ouvert.

Le courant d'éclairage du phototransistor est le photocourant de la photodiode collecteur-base multiplié par l'amplification  $\beta$  du transistor, sa réaction photosensible est donc nettement plus élevée que celle d'une photodiode (de 100 à 400 fois plus). Par contre le courant d'obscurité est plus important.

On observe une autre différence entre phototransistor et photodiode : la base du phototransistor est plus épaisse, ce qui entraîne une constante de temps plus importante et, donc une fréquence de coupure plus basse que celle des photodiodes. On peut éventuellement augmenter la fréquence de coupure en diminuant la photosensibilité en connectant la base à l'émetteur.



**Figure II.12-** Le phototransistor

#### II.4.2.4- Le Capteur Photographique

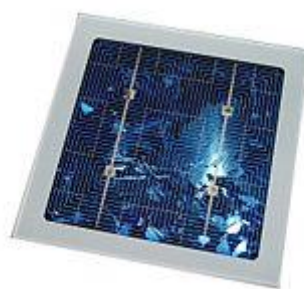
Il convertit un signal rayonnement électromagnétique (UV, visible ou IR) en un signal électrique analogique.

→ Utilisé dans les appareils photos afin de convertir une lumière en un signal qui sera numérisé afin d'obtenir une image numérique.

#### II.4.2.5- Cellule photovoltaïque



**Figure II.13-** Cellule photovoltaïque en silicium monocristallin



**Figure II.14-** Cellule photovoltaïque 4 pouces en silicium poly cristallin

Une cellule photovoltaïque<sup>[7]</sup> également dénommée cellule solaire est un composant électronique qui, exposé à la lumière (photons), produit de l'électricité grâce à l'effet photovoltaïque qui est à l'origine du phénomène, le courant obtenu est proportionnel à la puissance lumineuse incidente.

La cellule photovoltaïque délivre une tension continue.

Les cellules photovoltaïques les plus répandues sont constituées de semi-conducteurs, principalement à base de silicium (Si) et plus rarement d'autres semi-conducteurs : séléniure de cuivre et séléniure d'indium ( $\text{CuIn}(\text{Se})_2$  ou  $\text{CuInGa}(\text{Se})_2$ ), tellure de cadmium (CdTe), etc, elles se présentent généralement sous la forme de fines plaques d'une dizaine de centimètres de côté.

Les cellules sont souvent réunies dans des modules solaires photovoltaïques ou panneaux solaires, en fonction de la puissance recherchée.

#### II.4.2.5.1- Principe de fonctionnement

Dans un semi-conducteur exposé à la lumière, un photon d'énergie suffisante arrache un électron à la matrice, créant au passage un « trou », normalement, l'électron trouve rapidement un trou pour se recombiner, et l'énergie apportée par le photon est ainsi dissipée.

Le principe d'une cellule photovoltaïque est de forcer les électrons et les trous à se diriger chacun vers une face opposée du matériau au lieu de se recombiner en son sein : ainsi, il apparaîtra une différence de potentiel et donc une tension entre les deux faces, comme dans une pile.

L'une des solutions, couramment utilisée, pour extraire sélectivement les électrons et les trous utilise un champ électrique au moyen d'une jonction PN, entre deux couches dopées respectivement P et N :

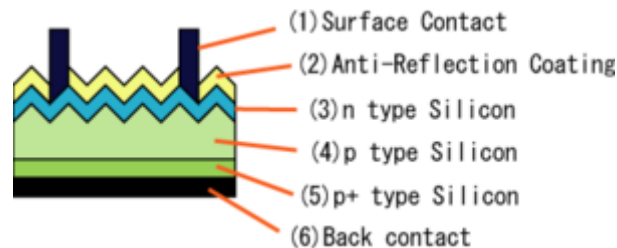


Figure II.15- Structure d'une cellule photovoltaïque

Au moment de la création de la jonction P-N, les électrons libres de la région N diffusent dans la couche P et se recombinent avec les trous de la région P, il existera ainsi, pendant toute la vie de la jonction, une charge positive de la région N au bord de la jonction (parce que les électrons en sont partis) et une charge négative dans la région P au bord de la jonction (parce que les trous en ont disparu) ; l'ensemble forme la Zone de Charge d'Espace (ZCE) et La couche supérieure de la cellule est composée d'un semi-conducteur dopé N, dans cette couche, il existe une quantité d'électrons libres supérieure à celle du matériau intrinsèque (i.e. non dopé), d'où l'appellation de dopage N, comme négatif (charge de

l'électron), le matériau reste électriquement neutre : c'est le réseau cristallin qui supporte globalement une charge négative.

La couche inférieure de la cellule est composée d'un semi-conducteur dopé P, cette couche possédera donc en moyenne une quantité d'électrons libres inférieure à celle du matériau intrinsèque (i.e. non dopé), les électrons sont liés au réseau cristallin qui, en conséquence, est chargé positivement, la conduction électrique est assurée par des trous, positifs (P).

Existe un champ électrique entre les deux, de N vers P, ce champ électrique fait de la ZCE une diode, qui ne permet le passage du courant que dans un sens : les électrons peuvent passer de la région P vers la région N, mais pas en sens inverse ; inversement les trous ne passent que de N vers P.

En fonctionnement, un photon arrache un électron à la matrice, créant un électron libre et un trou, ces porteurs de charges diffusent jusqu'à la zone de charge d'espace, là sous l'effet du champ électrique ils partent chacun à l'opposé : les électrons s'accumulent dans la région N (qui devient le pôle négatif), tandis que les trous s'accumulent dans la couche dopée P (qui devient le pôle positif).

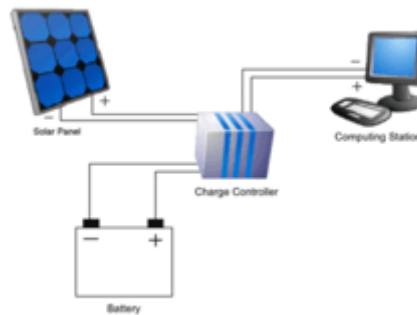
Ce phénomène est plus efficace dans la ZCE, les porteurs de charges (électrons ou trous) étant séparés immédiatement par le champ électrique, ou à proximité immédiate de la ZCE : lorsqu'un photon y crée une paire électron-trou, ils se séparent et ont peu de chance de rencontrer leur opposé, alors que si la création a lieu plus loin de la jonction, l'électron (resp. le trou) nouveau conserve une grande chance de se recombiner avant d'atteindre la zone N (resp. la zone P), mais la ZCE est très mince, aussi n'est-il pas utile de donner une grande épaisseur à la cellule.

D'un point de vue électrique, une cellule photovoltaïque est l'équivalent d'un générateur de courant auquel on a adjoint une diode, il faut ajouter des contacts électriques (qui laissent passer la lumière en face éclairée : en pratique, on utilise un contact par une grille), une couche antireflet pour assurer une bonne transmission des photons vers l'absorbeur.

Pour que la cellule fonctionne, et produise le maximum de courant, on ajuste le gap du semi-conducteur au niveau d'énergie des photons, on peut éventuellement empiler les jonctions, de façon à exploiter au mieux le spectre d'énergie des photons, ce qui donne les cellules multi-jonctions.



#### II.4.2.5.2- Utilisation



**Figure II.16-** Exemple d'utilisation

Les cellules photovoltaïques sont parfois utilisées seules (éclairage de jardin, calculatrice, ...) ou bien regroupées sur des panneaux solaires photovoltaïques.

Elles sont très utilisées en remplacement des piles (dont l'énergie est de loin la plus chère pour l'utilisateur ; même pour le fabricant, un compartiment pile et la pile éventuellement fournie peuvent coûter plus cher qu'une cellule), pourvu que le dispositif ne réclame pas trop d'énergie par rapport à la surface qu'on peut accorder au générateur photovoltaïque, et qu'il y ait assez de lumière pendant l'usage : les cellules ont envahi calculatrices, montres, gadgets, etc.

Il est possible d'augmenter leur plage d'utilisation avec un stockage (condensateur ou une batterie).

Lorsqu'elles sont utilisées avec un dispositif de stockage d'énergie, il est indispensable de placer une diode en série pour éviter la décharge du système pendant la nuit.

Elles sont utilisées pour produire de l'électricité pour de nombreuses applications (satellites, parcmètres, avion solaire, bateau solaire...), ainsi que pour alimenter des habitations ou un réseau public de distribution dans le cas des centrales solaires photovoltaïque.

#### II.4.3- Usages du luxmètre et démarche HQE

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 scialytiques, 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.4.4- Luxmètres nouvelles générations

Certains luxmètres sont équipés d'une mémoire pour enregistrer des 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.

La technique de l'environnement à laquelle appartient la mesure de la lumière, occupe aussi une position primordiale en niveau d'importance, les luxmètres sont très utiles, surtout grâce à leur enregistreur de données, spécialement grâce à la correction complète du cosinus de l'angle de la lumière incidente, ces luxmètres ont une fonction de mémoire pour les valeurs de mesure et un logiciel pour son évaluation.



Figure II.17- Nouvelle génération d'un luxmètre

#### **II.4.5- Le luxmètre : comment ça marche ?**

Anciennement à aiguille et désormais numérique, le luxmètre est un appareil doté d'un système de cellule photovoltaïque qui permet d'obtenir une mesure efficace et rapide de la lumière, la quantité de lumière à mesurer est envoyée vers un circuit intégré qui transforme cette énergie de rayonnement en signal électrique, celui-ci s'affiche ensuite sur écran sous forme de mesures précises.

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.

#### **II.4.6- Capteur de lumière (capteur solaire)**

Le capteur de lumière du jour (nom anglais : day light sensor ) est un bloc qui émet un signal de redstone en fonction de la lumière du soleil (ou son absence).

Le capteur solaire est un composant redstone qui génère un courant de redstone d'une puissance proportionnelle à la lumière du soleil, la nuit, sa sortie est à 0, au matin, le capteur commence à sortir des courants faibles, pour augmenter jusqu'au midi, quand le soleil est le plus haut dans le ciel, la sortie est alors au maximum, le soir la puissance baisse à nouveau jusqu'à se couper la nuit suivante.

Le capteur solaire n'est pas sensible à la lumière artificielle (torche, glowstone, redstone, etc.) il ne réagira qu'à la lumière du soleil.

Le capteur solaire a un fonctionnement particulier quand il est isolé de la lumière du soleil (dans une grotte par exemple), dans ce cas-là, il s'active uniquement pendant la nuit, avec un courant faible.

Il est possible de transformer un capteur solaire en capteur nocturne, pour cela il suffit de faire un click droit sur un capteur posé au sol, il devient alors bleuté.

##### **II.4.6.1- Obtention**

Les capteurs de lumière du jour peuvent être facilement détruits à la main, mais le sont plus rapidement à la hache, les capteurs de lumière du jour inversés ne peuvent pas être collectés, ils donneront un capteur de lumière du jour ordinaire.  
Composant de redstone.

Le capteur de lumière du jour émet un signal de redstone proportionnel à la lumière du soleil qu'il capte ou à l'heure de la nuit.

Un capteur de lumière fait 0,375 bloc de haut ( $3/8^e$  de bloc), les capteurs de lumière du jour ne peuvent pas être déplacés par des pistons, et l'eau et la lave couleront autour des capteurs sans les affecter.

#### II.4.6.2- Mode normal

Dans son mode par défaut, plus le soleil est haut dans le ciel, plus le capteur émettra un signal de forte intensité.

Vers midi et lorsqu'il fait beau, un capteur de lumière du jour exposé totalement à la lumière du soleil émet un signal d'une puissance de 15 blocs, ce même capteur en soirée n'émet approximativement qu'un signal d'une puissance de cinq blocs, et aucun signal lorsque le niveau de lumière est inférieur à quatre, soit vers minuit. Dans ce dernier cas, faire basculer le capteur en « mode inversé » ou le relier à une porte NON permet de réaliser un détecteur de nuit (utile par exemple pour un construire un système de lumières qui s'allument automatiquement la nuit).

Photométrie, spectroscopie, spectrophotométrie...quelles différences ?

La photométrie est la mesure de la lumière reçue, sans chercher à savoir si on veut séparer les couleurs ou non.

La spectroscopie étudie la décomposition de la lumière et ses différentes couleurs, La spectroscopie optique permet de savoir par exemple si une lumière d'une certaine couleur contient ou non d'autres couleurs, ce que la vision humaine n'est pas en capacité de le faire. Elle étudie aussi d'où provient le fait que telle lumière est rouge ou bleue.

La spectrophotométrie va plus loin, elle étudie non seulement la séparation, mais détermine l'intensité de chaque constituant d'une lumière, elle mesure aussi la proportion des différents constituants de la lumière.

#### II.4.7- Luxmètres: Valeurs préalables pour les différents endroits

À cause des nombreuses consultations au sujet des luxmètres, on a recueilli des renseignements dans un tableau avec les minimums qu'on doit maintenir régulièrement dans les lieux intérieurs.

Pour les lieux extérieurs on a des valeurs beaucoup plus élevées (p.ex. 30000 lux ou 200000 lux avec de la lumière du soleil), ces valeurs ne sont que des valeurs recommandées, PCE Instruments ne garantit pas la correction de celles-dessous.

Endroit illuminé	Type / Lieu de travail	Plage d'intensité de lumière
<b>Écoles</b>	réalisation d'expériences	700 - 1500 lux
	écrire sur un tableau	700 - 1500 lux
	salles en général	150 - 300 lux
	salle de lecture	700 - 1500 lux
<b>Bureaux</b>	Réfectoire	300 - 700 lux
	salle travail avec des ordinateurs	1500 - 3000 lux
	réalisation de dessins ou de dessins techniques	1500 - 3000 lux
	Réunions	300 - 700 lux
<b>Usines</b>	Réception	300 - 700 lux
	usine de production	1500 - 3000 lux
	bureaux de développement	700 - 1500 lux
	bureaux de planification	700 - 1500 lux
	travaux en laboratoire	1500 - 3000 lux
	empaquetage de produits	700 - 1500 lux
	salles électriques	150 - 300 lux
<b>Hôpitaux</b>	salle de visites	300 - 700 lux
	Formation	300 - 700 lux
	formation en anatomie	300 - 700 lux
	premiers soins / traitements	700 - 1500 lux
	Pharmacies	700 - 1500 lux
	lecture dans les lits de patients	150 - 300 lux
<b>Hôtels</b>	Buanderie	150 - 300 lux
	Réception	700 - 1500 lux
	Hall	300 - 700 lux
	Bureaux	150 - 300 lux
	Restaurant	150 - 300 lux
	Toilettes	150 - 300 lux
	Escaliers	70 - 150 lux
<b>Commerces / magasins</b>	Vitrine	1500 - 3000 lux
	salles d'exposition	1500 - 3000 lux
	salle d'attente	300 - 700 lux
	salle de réunions	300 - 700 lux
	Toilettes	150 - 300 lux

**Tableau II.2 :** Valeurs préalables pour les différents endroits

### II.5- Etude de cas : Etalonnage d'un luxmètre

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

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

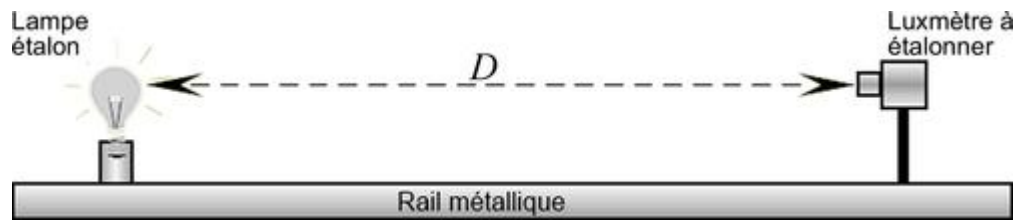


Figure II.18- Banc d'étalonnage de luxmètres

L'équipement requis est constitué :

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

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

### 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'éclairage  $E_{LU}$  indiqué par le luxmètre.

La variation du niveau d'éclairage est obtenue par variation de la distance  $D$ .

L'opération est répétée 5 fois.

Dans un premier temps, on évalue l'incertitude sur l'éclairage de référence  $E$ .

Cet éclairage 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 :

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

#### II.5.1- Incertitude sur la référence

En utilisant la loi de propagation des incertitudes, on exprime l'incertitude-type relative  $u(E)/E$  en fonction de  $u(I_L)/I_L$  et  $u(D)/D$ .

Le modèle de la mesure est :

$$E = \frac{I(L)}{D^2} = f(I(L), D) \dots\dots\dots(\text{II.2})$$

C'est un modèle produit-quotient, on a donc :

$$\frac{u(E)}{E} = \sqrt{\frac{[u(IL)]^2}{IL} + 4 \frac{[u(D)]^2}{D}} \dots\dots\dots(\text{II.3})$$

Pour déterminer l'incertitude type relative  $u(IL)/IL$  sur l'intensité lumineuse rayonnée par la lampe étalon, on prend en compte les informations contenues dans son certificat d'étalonnage.

La lampe étalon est étalonnée avec une incertitude relative élargie de 1% ( $k=2$ ).

En déduire la valeur de l'incertitude type relative associée  $u_1(IL)/IL$ .

D'après le facteur d'élargissement ( $k=2$ ), on a :

$$\frac{u_1(I_L)}{I_L} = 0,5 \% \dots\dots\dots(\text{II.4})$$

La lampe étalon présente une dérive d'étendue totale 0,3% entre 2 étalonnages successifs, en appliquant une loi de probabilité uniforme, on calcule l'incertitude type relative  $u_2(IL)/IL$  associée à cette dérive.

Sans autre information supplémentaire, on considère que la dérive temporelle est associée à une probabilité uniforme sur l'intervalle de temps entre 2 étalonnages successifs, on a donc :

$$\frac{u_2(I_L)}{I_L} = \frac{0,3 \%}{2 \sqrt{3}} = 0,087 \% \dots\dots\dots(\text{II.5})$$

La variation de l'intensité lumineuse  $I(L)$  avec le courant d'alimentation  $i$  ne suit pas une loi linéaire. On a :

$$\frac{\Delta I_L}{I_L} = 6,5 \times \frac{\Delta i}{i} \dots\dots\dots(\text{II.6})$$

L'ampèremètre utilisé pour mesurer le courant traversant la lampe est étalonné avec une incertitude relative élargie de 0,05% (k=2).

En déduire la valeur de l'incertitude type relative associée  $u_3(I_L)/I_L$ .

Pour  $\Delta I = u(I)$  incertitude type sur le courant "i", on a :

$$\Delta I_L = u_3(I_L) \dots\dots\dots(\text{II.7})$$

D'où :

$$\frac{u_3(I_L)}{I_L} = 6,5 \frac{u(i)}{i} \dots\dots\dots(\text{II.8})$$

L'ampèremètre est tel que

$$\frac{u(i)}{i} = \frac{(0,05)10^{-2}}{2} = 2,5 \cdot 10^{-4} \dots\dots\dots(\text{II.9})$$

D'où :

$$\frac{u_3(I_L)}{I_L} = 0,16 \% \dots\dots\dots(\text{II.10})$$

A travers des résultats obtenus précédemment.

En déduire la valeur de l'incertitude type combinée relative  $u(I_L)/I_L$ .

$$\frac{u(I_L)}{I_L} = \sqrt{\left[\frac{u_1(I_L)}{I_L}\right]^2 + \left[\frac{u_2(I_L)}{I_L}\right]^2 + \left[\frac{u_3(I_L)}{I_L}\right]^2} \dots\dots\dots(\text{II.11})$$

Soit

$$\frac{u(I_L)}{I_L} = 0,53 \% = 5,3 \times 10^{-3} \dots\dots\dots(\text{II.12})$$

La mesure de la distance D est de 3m avec un intervalle de variation estimé à  $\pm 5$ mm.

En déduire la valeur de l'incertitude relative  $u(D)/D$ .

$$u(D) = \frac{5}{\sqrt{3}} = 2,88 \text{ mm} \dots\dots\dots(\text{II.13})$$



$$\frac{u(D)}{D} = \frac{2,88 \times 10^{-3}}{3} = 0,1 \% = 10^{-3} \dots\dots\dots(\text{II.14})$$

A partir des calculs précédents, la valeur de l'incertitude type  $u_{\text{réf}}(E)$  pour un éclairage de référence égal à 100 lux.

$$\frac{u_{\text{réf}}(E)}{E} = \sqrt{\left[\frac{u(I_L)}{I_L}\right]^2 + 4 \left[\frac{u(D)}{D}\right]^2} \dots\dots\dots(\text{II.15})$$

Avec

$$\frac{u(I(L))}{I(L)} = 5,3 \times 10^{-3} \dots\dots\dots(\text{II.16})$$

Et

$$\frac{u(D)}{D} = 10^{-3} \dots\dots\dots(\text{II.17})$$

D'où

$$\frac{u_{\text{réf}}(E)}{E} = 5,33 \times 10^{-3} \dots\dots\dots(\text{II.18})$$

Soit pour  $E = 100$  lux

$$u_{\text{réf}}(E) = 0,53 \text{ lux}$$

### II.5.2- Incertitudes Associées Aux Conditions De Mesure

Après avoir traité l'incertitude sur la référence, on évalue ci-après l'incertitude associée aux mesurages et au luxmètre.

L'éclairage ELU mesuré avec le luxmètre à étalonner peut être modélisé par :

$$E_{LU} = \bar{x} + C_{\text{référence}} + C_{\text{résolution}} \dots\dots\dots(\text{II.19})$$

Où

$\bar{x}$	= moyenne de 5 mesures répétées d'éclairement
$C_{référence}$	= Correction associée à la référence
$C_{résolution}$	= Correction associée à la résolution du luxmètre

La série de 5 mesurages dans les mêmes conditions a donné les résultats suivants :

N	1	2	3	4	5
$E_{LU}$	101	102	99	98	101

En déduire les valeurs de  $\bar{x}$  et de l'écart-type estimé  $S(\bar{x}) = u_{rép}$

$$\bar{x} = 100,2 \text{ lux} \dots\dots\dots(\text{II.20})$$

$$s(x) = \sqrt{\frac{1}{5-1} \sum_{k=1}^5 (x_k - \bar{x})^2} = 1,643 \text{ lux} \dots\dots\dots(\text{II.21})$$

$$s(\bar{x}) = \frac{s(x)}{\sqrt{5}} = u_{rép} = 0,735 \text{ lux} \dots\dots\dots(\text{II.22})$$

Sachant que la résolution du luxmètre est de 0,5 lux pour une valeur lue de 100 lux, en déduire l'incertitude type correspondante urés.

$$u_{rés} = \frac{0,5}{2\sqrt{3}} = 0,144 \text{ lux} \dots\dots\dots(\text{II.23})$$

En déduire la valeur de l'incertitude combinée uc(ELU).

Le modèle de la mesure est :

$$E_{LU} = \bar{x} + C_{référence} + C_{résolution}$$

Même si les corrections sont nulles, les incertitudes associées ne le sont pas. On a donc :

$$u_c^2(E_{LU}) = u_{rép}^2 + u_{réf}^2(E) + u_{rés}^2 \dots\dots\dots(\text{II.24})$$

$$u_c(E_{LU}) = \sqrt{u_{rép}^2 + u_{réf}^2(E) + u_{rés}^2} \dots\dots\dots(\text{II.25})$$

$$u_c(E_{LU}) = \sqrt{(0,735)^2 + (0,53)^2 + (0,144)^2} \dots\dots\dots(\text{II.26})$$

Soit

$$u_c(E_{LU}) = 0,92 \text{ lux} \dots\dots\dots(\text{II.27})$$

On exprime le résultat de mesure de l'éclairement sous la forme normalisée en justifiant notamment le choix de la valeur de la constante d'élargissement.

On considère que les incertitudes-types  $U_{réf.}$  et  $U_{rés}$  sont connues exactement, il n'y a donc pas de degrés de liberté  $v_i$  qui leur sont associés.

Dans ces conditions, le nombre de degrés de liberté associé à  $u_c(ELU)$  est  $v=5-1=4$

D'où

$$E_{LU} = 100,20 \pm 2,55 \text{ lux} \dots\dots\dots(\text{II.28})$$

## II.6- Conclusion

Dans cette partie nous avons conclu que le capteur de lumière est un appareil doté d'un système (de cellule photovoltaïque, photodiode, photorésistance, phototransistor ..... ) qui permet d'obtenir une mesure efficace et rapide de la lumière.

La quantité de lumière à mesurer est envoyée vers un circuit intégré qui transforme cette énergie de rayonnement en signal électrique. Celui-ci s'affiche ensuite sur écran sous forme de mesures précises.

# **Chapitre III :**

# **Conception d'un**

# **luxmètre**

### III.1- Introduction

Le luxmètre a d'abord été utilisé par les photographes ou cinéastes<sup>[8]</sup>, 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.

Les luxmètres modernes fonctionnent selon le principe d'une cellule C.C.D ou cellule photovoltaïque, un circuit intégré reçoit une certaine quantité de lumière (photons constituant le « signal » qui est une énergie de rayonnement) et la transforme en signal électrique (signal analogique), ce signal est visualisé par le déplacement d'une aiguille, l'allumage d'une diode, l'affichage d'un chiffre... une photorésistance associée à un ohmmètre jouerait le même rôle.

### III.2- Fonction D'usage De L'objet Technique

La fonction du luxmètre est de mesurer la grandeur de l'éclairement sur le poste de travail, afin de vérifier que cet éclairement est conforme à la valeur spécifiée par les normes.

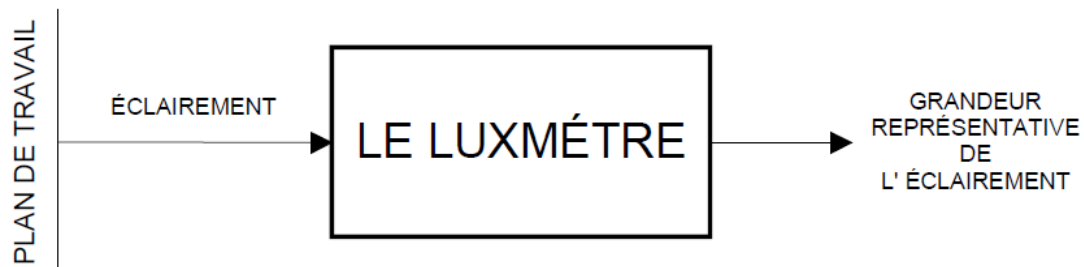


Figure III.1 : Schéma fonctionnel d'un luxmètre

### III.3- Conception d'un Luxmètre à Base de Photorésistance

On désire réaliser un luxmètre, c'est-à-dire un appareil convertissant un éclairement (Lux) en une tension proportionnelle.

Le capteur de lumière est une photorésistance qui exploite la variation de la résistance d'un semi-conducteur soumis à une source de photons.

La caractéristique de la photorésistance est donnée en Figure (III.2).

Cette figure représente en coordonnées log-log, l'évolution de la résistance R (L) du capteur en fonction de l'éclairement.

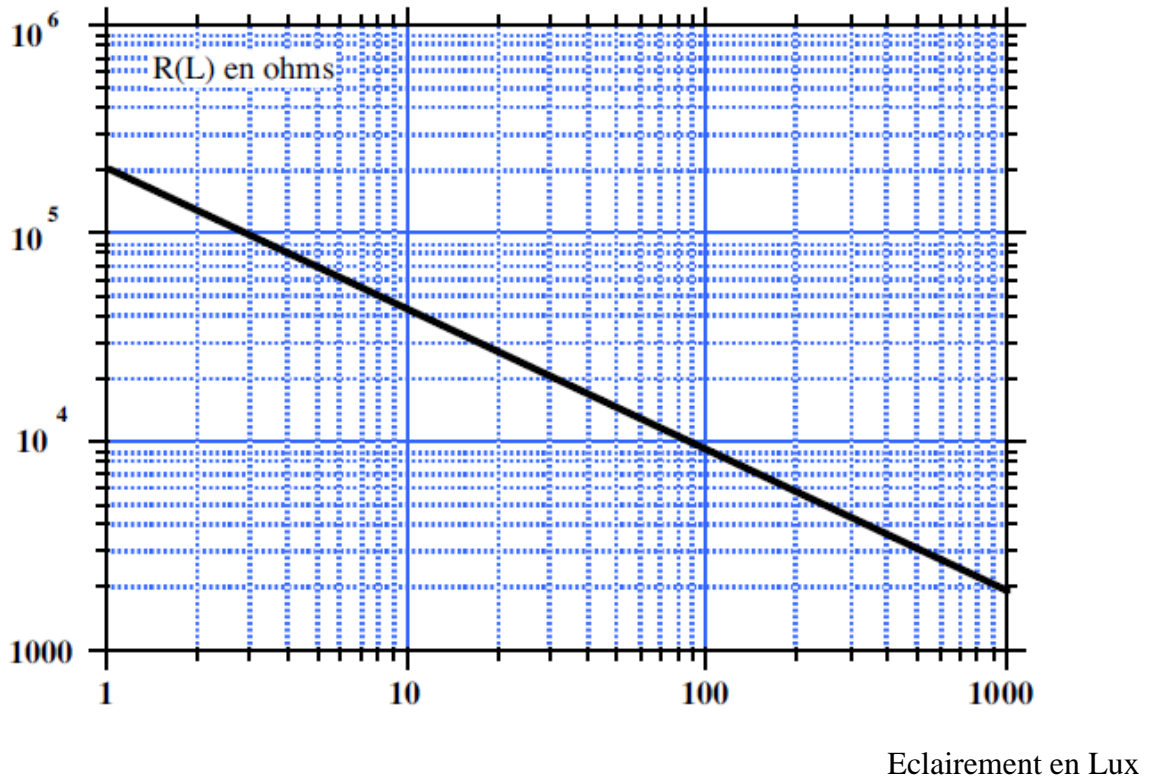


Figure III.2 : Caractéristique de la Photorésistance

Sachant que le graphe de la figure (III.2) est linéaire dans un système de coordonnées log-log, on montre que la loi de variation de la photo résistance est de la forme :

$$R(L) = R_1 L^{-\alpha} \dots\dots\dots(III.1)$$

Et on Détermine en exploitant la figure (III.2), la valeur de la résistance R1 et du coefficient de la relation (III.1).

La linéarité du graphe de la figure (III.2) permet d'écrire :

$$\log R(L) = a-b \cdot \log (L)$$

Exprimons la fonction R (L) :

$$R (L) = 10^{(a-b \cdot \log (L))}$$

$$R (L) = 10^a (10^{\log (L)})^{-b}$$

Soit encore :

$$R(L) = 10^a L^{-b}$$

Solution en prenant deux points du graphe de la figure (III.2) :  $R_1 = 200 \text{ k} \quad -2/3$ .

Afin d'obtenir une tension de sortie du luxmètre proportionnelle à l'éclairement reçu par la photorésistance, on propose, en figure (III.3), un schéma synoptique du luxmètre.

Le luxmètre qui utilise une tension de référence  $V_{ref}$  afin de transformer la variation de résistance  $R(L)$  en variation de courant  $I(L)$ , est composé de deux étages :

Un amplificateur de transrésistance logarithmique tel que :

$$V_{s1} = k_1 \ln [k_2 / I(L)] \dots\dots\dots (III.2)$$

Avec :

$$I(L) = V_{ref} / R(L) \dots\dots\dots (III.3)$$

(La tension  $V_E$  est supposée très inférieure à la tension  $V_{ref}$ ).

Un amplificateur de tension exponentiel délivrant :

$$V_s = k_3 \exp (-k_4 V_{s1}) \dots\dots\dots (III.4)$$

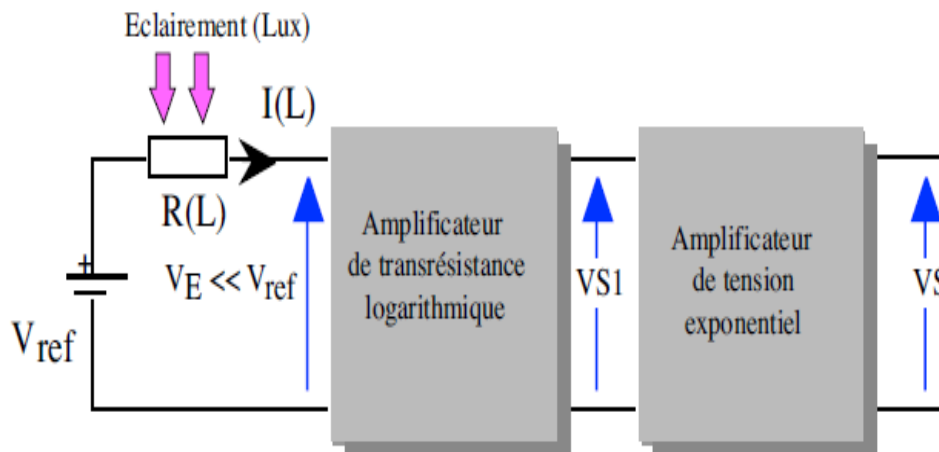


Figure III.3 : Schéma synoptique du luxmètre

Compte tenu de la loi de variation de  $R(L)$  en fonction de  $L$  (équation 1), on exprime la tension de sortie  $V_s$  du montage complet en fonction de  $R_1$ ,  $V_{ref}$ , des coefficients  $k_i$  des amplificateurs et de l'éclairement  $L$  du capteur.

On Montre que:

$$V_s = k_3 \left[ \frac{k_2 R_1}{V_{ref}} \right]^{-k_1 k_4} L^{a k_1 k_4} \dots\dots\dots (III.5)$$

Sachant que la tension de sortie  $V_S$  doit être proportionnelle à l'éclairement  $L$ ,  
Donc quelle relation doit-on satisfaire dans la relation (III.5) ?

Sachant que :

$$V_{S1} = k_1 \ln \left[ \frac{k_2}{I(L)} \right]$$

Et

$$V_S = k_3 \exp(-k_4 V_{S1})$$

On en déduit :

$$V_S = k_3 \exp\left(-k_4 k_1 \ln \left[ \frac{k_2}{I(L)} \right]\right)$$

On peut écrire cette expression sous la forme :

$$V_S = k_3 \left[ \exp\left(\ln \frac{k_2}{I(L)}\right) \right]^{-k_1 k_4}$$

Soit :

$$V_S = k_3 \left[ \frac{k_2}{I(L)} \right]^{-k_1 k_4}$$

Introduisons alors l'expression du courant  $I(L)$  :

$$I(L) = \frac{V_{ref}}{R_1 L^{-\alpha}}$$

$$V_S = k_3 \left[ \frac{k_2}{V_{ref}} R_1 L^{-\alpha} \right]^{-k_1 k_4}$$



$$V_S = k_3 \left[ \frac{k_2 R_1}{V_{ref}} \right]^{-k_1 k_4} L^{\alpha k_1 k_4}$$

La tension de sortie VS sera proportionnelle à L à condition que :

$$(\alpha \cdot k_1 k_4) = 1$$

Expression du coefficient directeur :

$$k_3 \left[ \frac{k_2 R_1}{V_{ref}} \right]^{-k_1 k_4}$$

On doit donc satisfaire la relation :

$$k_1 k_4 = \frac{1}{\alpha}$$

Le schéma du montage réalisant la tension de référence Vref et le schéma du premier étage du luxmètre est donné en figure III.4.

Les amplificateurs opérationnels sont supposés idéaux.

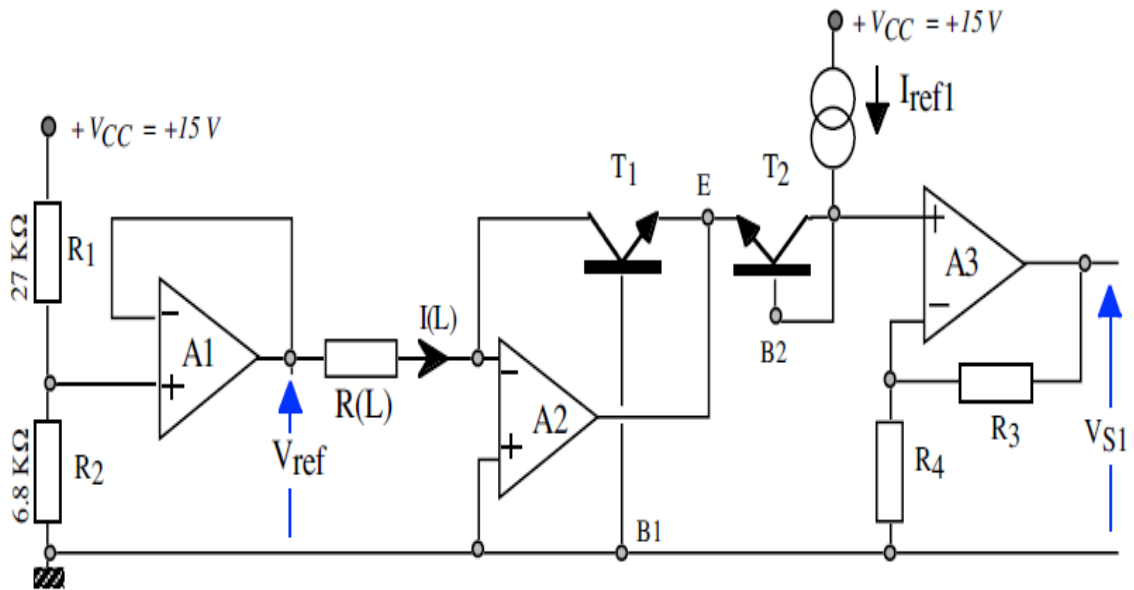
Les transistors bipolaires T1 et T2 intégrés sur la même " puce " sont identiques et obéissent à la loi :

$$I_C = I_{SBC} \exp\left(\frac{V_B E}{U_T}\right) \dots\dots\dots(III.6)$$

Avec :

$$I_{SBC1} = I_{SBC2}$$

Leur gain en courant est supposé suffisamment important pour négliger le courant IB devant IC .



**Figure (III.4) :** Schéma de la tension de référence et du premier étage du luxmètre

L'AOP A1 est monté en suiveur de tension (gain unité).

Sa résistance d'entrée est infinie.

$$V_{ref} = V_{CC} \frac{R_2}{R_1 + R_2} = 3,02V$$

Sans le montage suiveur, on aurait :

$$V_{ref} = V_{CC} \frac{R_2 + R(L)}{R_1 + R_2 + R(L)}$$

Tension non constante.

La photo résistance indique une puissance P max à ne pas dépasser de 100 mW.

La valeur de la tension Vref calculée précédemment est-elle compatible avec P max ?

Puissance dissipée par la photo résistance :

$$P = \frac{V_{ref}^2}{R(L)}$$

Dans le cas le plus défavorable :

$$R(L) = 2 \text{ K}\Omega$$

$$P = 4,5 \text{ mW} < 100 \text{ mW}.$$

En analysant le schéma donné en figure III.4 et en utilisant notamment la relation (III.6)

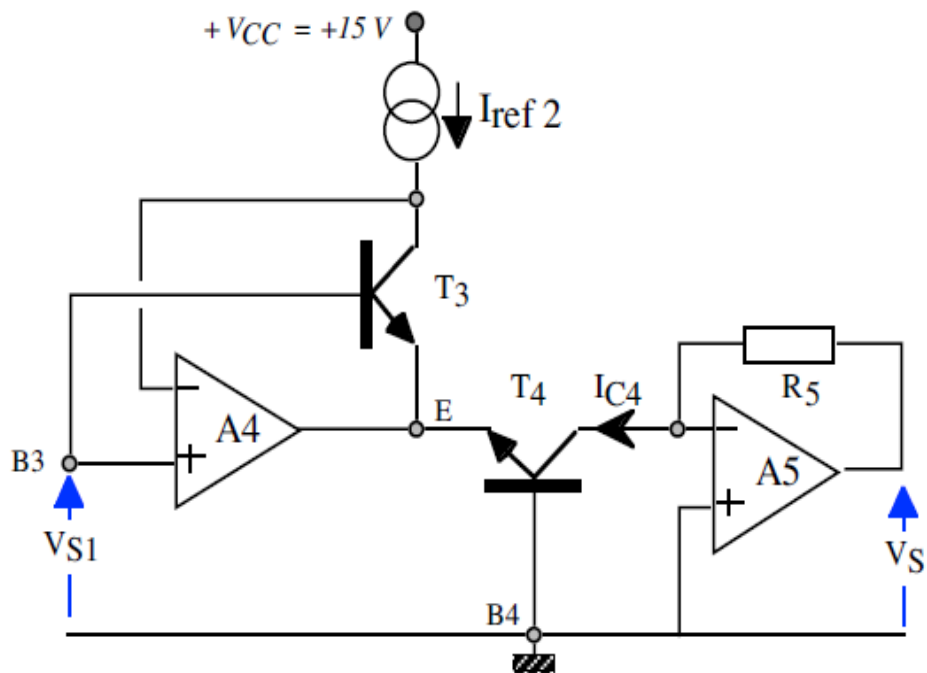
On détermine l'expression de la tension de sortie  $V_S$  1 du montage en fonction des résistances  $R_3$ ,  $R_4$ , de la tension  $U_T$ , du générateur de courant  $I_{ref 1}$  et du courant d'entrée  $I(L)$ .

En déduire l'expression des coefficients  $k_1$  et  $k_2$  de la relation (III.2).

Le schéma de l'amplificateur de tension exponentiel est donné en figure (III.5).

Les amplificateurs opérationnels sont encore supposés idéaux.

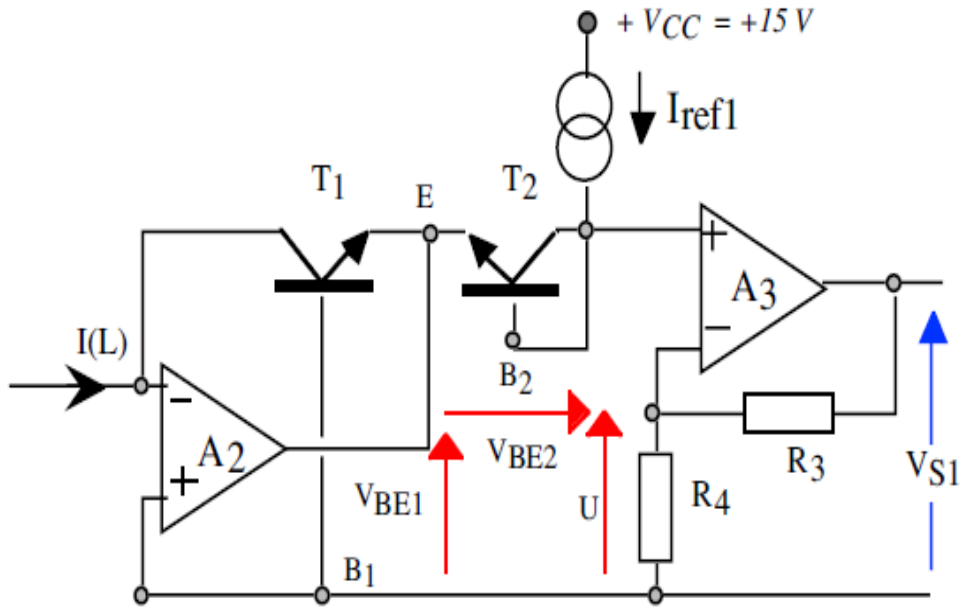
Les transistors bipolaires  $T_3$  et  $T_4$  intégrés sur la même " puce " sont identiques en tout point aux transistors  $T_1$  et  $T_2$  du premier étage, ils obéissent à la relation (III.6)



Figure(III.5) : Schéma du deuxième étage (amplificateur exponentiel)

. Exprimons la tension  $U$  :

$$U = V_{S1} \frac{R_4}{R_3 + R_4} = V_{BE2} - V_{BE1}$$



$I(L)$  est le courant de collecteur de  $T1$ ,  $I_{ref1}$  est celui de  $T2$ .

On écrit donc la relation (III.6) :

$$I_{ref1} = I_{SBC} \exp\left(\frac{V_{BE1}}{U_T}\right)$$

$$I(L) = I_{SBC} \exp\left(\frac{V_{BE2}}{U_T}\right)$$

Soit en divisant :

$$\frac{I_{ref1}}{I(L)} = \exp\left(\frac{V_{BE2} - V_{BE1}}{U_T}\right)$$

Soit :

$$V_{BE2} - V_{BE1} = U_T \ln\left(\frac{I_{ref1}}{I(L)}\right)$$

Bilan :

$$V_{S1} = \frac{R_3 + R_4}{R_4} U_T \ln\left(\frac{I_{ref1}}{I(L)}\right)$$

$$k_1 = \frac{R_3 + R_4}{R_4} U_T$$

$$k_2 = I_{ref1}$$

En analysant le schéma donné en figure III.5 et en utilisant notamment la relation (III.6).

On détermine l'expression de la tension de sortie VS du montage en fonction de la résistance R5, de la tension UT, du générateur de courant Iref2 et de la tension VS 1.

En déduire l'expression des coefficients k3 et k4 de la relation (III.4).

Courant de collecteur de T4 :

$$I_{C4} = \frac{V_S}{R_5}$$

Courant de collecteur de T3 : Iref2

D'autre part :

$$V_{S1} = V_{BE3} - V_{BE4}$$

On utilise encore la relation (III.6) :

$$I_{ref2} = I_{SBC} \exp\left(\frac{V_{BE3}}{U_T}\right)$$

$$I_{C4} = I_{SBC} \exp\left(\frac{V_{BE4}}{U_T}\right)$$

$$\frac{I_{ref2}}{I_{C4}} = \exp\left(\frac{V_{BE3} - V_{BE4}}{U_T}\right)$$

Bilan :

$$\frac{I_{ref2}}{I_{C4}} = \exp\left(\frac{V_{BE3} - V_{BE4}}{U_T}\right)$$

$$k_3 = R_5 I_{ref2}$$

$$k_4 = \frac{1}{U_T}$$

On exprime la tension de sortie VS du luxmètre en fonction de l'éclairement L.

Pour cela, on utilisera les résultats qui on a et l'on prendra maintenant :

$$I_{ref1} = I_{ref2} = I_{ref}.$$

Tension de sortie VS du luxmètre en fonction de l'éclairement L.

Sachant que :

$$V_S = k_3 \left[ \frac{k_2 R_1}{V_{ref}} \right]^{-k_1 k_4} L^{\alpha k_1 k_4}$$

En introduisant les expressions des coefficients k, on en déduit :

$$V_S = R_5 I_{ref} \left[ \frac{I_{ref} R_1}{V_{ref}} \right]^{-U_T \frac{R_3 + R_4}{R_4} \frac{1}{U_T}} L^{\alpha \frac{R_3 + R_4}{R_4}}$$

On notera l'élimination du terme UT qui produisait une dérive en température.

On choisit de prendre  $R_5 = 6.8 \text{ K}$ .

On détermine la valeur des résistances normalisées R3 et R4 ainsi que la valeur des générateurs de courant Iref de telle manière que :

Pour assurer la linéarité on doit avoir :

$$\alpha \frac{R_3 + R_4}{R_4} = 1$$

Avec

$$\alpha = \frac{2}{3}$$

Soit :

$$R_4 = 2.R_3.$$

On peut donc prendre par exemple :  $R_4 = 20 \text{ K}$  et  $R_3 = 10 \text{ K}$ .

$V_S = 10 \text{ V}$  pour 1000 lux conduit à un courant  $I_{ref} = 1,56 \text{ mA}$ .

On propose une solution la plus simple possible pour réaliser les générateurs de courant continus Iref.

On remarquera que la tension sur l'entrée + de l'A.O.P. A3 et l'entrée - de A4 restent très faibles devant la tension d'alimentation VCC de 15 V.

Une résistance R de 9,6 K reliée à l'alimentation VCC, permet de fournir le courant Iref.

#### **III.4- Conclusion**

Dans ce chapitre nous avons conclu que le luxmètre c'est l'outil spécifique consacré à la mesure de l'éclairement c'est-à-dire un appareil convertissant un éclairement (Lux) en une tension proportionnelle.

## Conclusion générale

Le présent travail est le fruit d'une recherche menée sur les différentes sources de lumière naturelle (délivrée par le rayonnement solaire), et artificielle.

Dans ce modeste travail on a établi une étude descriptive de l'appareil de mesure de lumière, le luxmètre.

Notre but était de comprendre profondément les différents composites de base de luxmètres, qui sont : Une photorésistance de type LDR (Light Dépendent Résistor), une photodiode : Comme photo détecteur dans de nombreuses applications industrielles, le phototransistor, le photographique et la cellule photovoltaïque dont la base est sensible au rayonnement lumineux.

Notre mission a visé la conception d'un prototype de luxmètre à base de photorésistance.

Enfin nous souhaiterons que ce travail aille déboucher vers d'autres travaux futurs.



## Références bibliographique

- [1] Naud Colette et André Bergeron, 1995 (Révision 2011). Conservation préventive dans les musées. Manuel d'accompagnement, pages 15 à 20.
- [2] Les sources de lumière typologie et principe de fonctionnement D'après Le Grand Y. T II, édition 2001
- [3] J. Bernard, Energie solaire calcul et optimisation, 1ère édition, ELLIPES, Paris, 2004.
- [4] Augoyard, Jean-François. La conduite du récit. In Grosjean Michèle et Thibaud Jean-Paul (Ed.). L'espace urbain en méthodes. Marseille : Parenthèses, 2001, pp. 173-197
- [5] B. Brousse, Réalisation et caractérisation de cellules photovoltaïques organiques obtenues par dépôt physique, Thèse de doctorat, faculté de sciences et technique, spécialité : électronique des hautes fréquences et optoélectronique, université de Limoges (France), 2004.
- [6] Z. Djessas, Extraction des paramètres physiques d'une cellule solaire à deux exponentiels par la méthode des algorithmes génétiques, Mémoire de magistère, département de physique, faculté des sciences, université de Sétif (Algérie), 2007.
- [7] A. Labouret, M. Viloz, *Energie solaire photovoltaïque*, 3ème édition, DUNOD, Paris, 2006.
- [8] La lumière: Expériences, pratique et savoir-faire - Daniel Gaudry édition 2009

## Annexe 1

### Mode d'utilisation d'un luxmètre : Testo 540



**Applications :** Le luxmètre Testo 540 permet de mesurer l'intensité lumineuse.



**Prise en main :** Insérer les piles :

1. Ouvrez le compartiment pile : faites glisser le couvercle vers le bas.
2. Insérez les piles (2 piles 1,5 V type AAA). Attention à la polarité !
3. Fermez le compartiment pile : faites glisser le couvercle vers le haut.

**Paramétrage (mode configuration) :**



#### Fonctions paramétrables

Fonction Auto Off : OFF (désactivée), ON (activée, l'appareil s'éteint automatiquement 10 min après le dernier actionnement de touche)

1. Lors de l'allumage de l'appareil, maintenez la touche  enfoncée jusqu'à ce que ▲ et ← s'affichent (mode configuration).  
La fonction paramétrable est affichée. Le paramètre actuel clignote.
2. Appuyez plusieurs fois sur ▲ jusqu'à ce que le paramètre désiré clignote.
3. Appuyez sur  (←) pour confirmer la saisie.
  - L'appareil passe en mode mesure.

#### Utilisation du produit

Pour garantir des valeurs de mesure correctes : tenez l'appareil à l'horizontale, de manière à ce que le capteur de lumière soit orienté vers le haut.

- **Allumer l'appareil**  
Appuyez brièvement sur .  
→ Le mode mesure s'ouvre.
- **Allumer l'éclairage de l'écran**  
L'appareil est allumé.  
Appuyez sur .

→ L'éclairage de l'écran s'éteint automatiquement 10 s après le dernier actionnement de touche.

- **Changer la grandeur à mesurer**

Appuyez sur ▲ jusqu'à ce que l'unité désirée s'affiche.


Unités paramétrables

- lux
- ftc



- **Changer l'affichage de l'écran**

Affichages paramétrables


- Valeur actuelle
- **Hold** : Les valeurs sont conservées
- **Max** : Valeurs maximales depuis la dernière mise en marche de l'appareil ou depuis la dernière mise à jour.
- **Min** : Valeurs minimales depuis la dernière mise en marche de l'appareil ou depuis la dernière mise à jour.

Appuyez plusieurs fois sur  jusqu'à ce que l'affichage désiré s'affiche.

- **Mise à jour des valeurs maximales et minimales**

- Appuyez plusieurs fois sur  jusqu'à ce que l'affichage désiré apparaisse.
- Maintenez la touche  enfoncée jusqu'à ce que ---- s'affiche.
- Répétez les étapes 1 et 2 pour toutes les valeurs que vous désirez mettre à jour.

- **Éteindre l'appareil**

Maintenez la touche  enfoncée jusqu'à ce que l'affichage s'éteigne.

## Entretien du produit

- **Changer les piles**

1. Ouvrez le compartiment pile : faites glisser le couvercle vers le bas.
2. Retirez les piles vides et insérez-en des nouvelles (2 piles 1,5 V type AAA).  
Attention à la polarité !
3. Fermez le compartiment pile : faites glisser le couvercle vers le haut.

- **Nettoyer le boîtier**

En cas de salissure, nettoyez le boîtier avec un linge humide (eau savonneuse).

N'utilisez pas de solvants ni de produits de nettoyage forts !

## **Annexe2**

### **Appareil de mesure numérique de précision pour mesurer l'éclairement en lux (lx) ou foot candle (fc)**

Luxmètre numérique destiné au contrôle des sources lumineuses, de l'éclairage urbain, la surveillance de l'éclairage des postes de travail et des bâtiments publics, des installations sportives et des espaces verts, contrôle de la qualité des sources lumineuses, assurance de la qualité lors de la fabrication de lampes et ampoules, pour l'agriculture et la sylviculture. Ces appareils permettent de mesurer de la lumière très forte sans accessoire.

- Appareil de mesure de précision de l'éclairement en lux ou en foot candle
- Mesure de la luminance en  $\text{cd/m}^2$  ou fL par adaptateur de luminance en accessoire, disque adaptateur pour éviter la lumière à incidence latérale
- Grandes plages de mesure, haute résolution, classé selon CIE n° 69
- Photodiode en silicium avec spectre corrigé, c.-à-d sa sensibilité spectrale est adaptée au spectre de sensibilité à la clarté de l'œil humain  $V(\lambda)$
- La différence entre MAVOLUX 5032 C et 5032 B réside dans la précision de cette adaptation
- Correction du cosinus pour la lumière à incidence latérale
- Ces appareils sont également disponibles avec des cordons de mesure de longueur spéciales 3m, 5m ou 10m (supplément de prix) (à indiquer à la commande)