

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne démocratique et populaire

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

جامعة سعد حطاب البليدة
Université SAAD DAHLAB de BLIDA

كلية التكنولوجيا
Faculté de Technologie

قسم الإلكترونيك
Département d'Électronique



Mémoire de Projet de Fin d'Études

présenté par

MELLAK AMIRA

&

BELARBI ISLEM

Pour l'obtention du diplôme de Master en Électronique option AUTOMATIQUE

Thème

Régulation d'un flux lumineux dans une plage donnée par un régulateur proportionnel

Proposé par : Mr TAYEB CHERIF Rachid

Année Universitaire 20011-2012

Remerciements

Nous tenons tout d'abord à remercier Dieu le tout puissant et miséricordieux, qui nous a donné la force et la patience d'accomplir ce modeste travail.

En second lieu, nous tenons à remercier notre promoteur Mr : Tayeb Cherif Rachid, Les conseils qu'il nous a prodigué, la patience, la confiance qu'il nous a témoignés ont été déterminants dans la réalisation de notre travail de recherche.

Nos remerciements s'étendent également à tous nos enseignants durant les années d'études.

Nos vifs remerciements vont également aux membres du jury pour l'intérêt qu'ils ont porté à notre recherche en acceptant d'examiner notre travail Et de l'enrichir par leurs propositions.

Enfin, nous tenons également à remercier toutes les personnes qui ont participé de près ou de loin à la réalisation de ce travail.



Merci

Dédicace :

A mes chers parents qui était ma raison de vivre, et qui m'ont bien soutenu pour arriver jusqu'ici.

A mes proches et toute ma famille

A mes camarades de promotion que je n'oublierai jamais ces moments passés avec eux.

A tout les gens qui m'aiment.

Au bonheur des plus chers.

Je dédie de modeste travail

AMIRA

ملخص:

يكمُن هذا العمل في التحكم بالإشعاع الضوئي المنبعث من مصادر الضوء (الصمام الثنائي الضوئي) التي تتلقاها جهاز استشعار الضوء الذي يحوله إلى الفلطية تيار كهربائي و ذلك باستخدام وحدة التحكم التناظرية ذات النوع النسبي

كلمات المفاتيح وحدة التحكم التناظري:مصادر الضوء' الإشعاع الضوئي' استشعار الضوء

Résumé :

Ce travail consiste à faire la régulation d'un flux lumineux émis par une source lumineuse (diode électroluminescente 'LED'), reçu par un capteur de lumière (photorésistance) et transmit sous forme de tension, dans une plage de variation spécifiée, en utilisant un contrôleur analogique de type proportionnel (P)

Mots clés : Flux lumineux, Photoémetteurs, photorécepteurs, Contrôleur analogique

Abstract :

This job is to regulate a luminous flux emitted by a light source(light emittingdiode'LED'), received by a light sensor(photo resistor) and transmitted as a voltage in a specified range of variation, using an analog controller proportional (P)

Keywords : Luminous flux-light source-light sensor, analog controller

Listes des acronymes et abréviations

$h=6,6256.10^{-34}$ J.S EST LA CONSTANTE DE PLANCK

Γ : LA FREQUENCE

C : LA VITESSE DE LA LUMIERE

ϵ_0 et μ_0 SONT LA PERMITTIVITE ET LA PERMEABILITE DU VIDE

E ENERGIE

A_e :AIRE DE LA SURFACE EMETTANTE

A_p :AIRE APPARENTE DE LA SURFACE EMETTANTE.

A_d : AIRE DE DETECTION

ϕ EST L'ENERGIE RAYONNANTE EN JOULES

T EST LE TEMPS EN SECONDE

INTENSITE ENERGETIQUE I_e

LUMINANCE ENERGETIQUE L_e

ECLAIREMENT ENERGETIQUE E_e

EMITTANCE ENERGETIQUE M_e

FLUX LUMINEUX : Φ

Q : LA QUANTITE DE LUMIERE

INTENSITE LUMINEUSE I

LUMINANCE L

ECLAIREMENT E

EMITTANCE M

FLUX PHOTONIQUE ϕ_p

INTENSITE PHOTONIQUE I_p

LUMINANCE PHOTONIQUE L_p

ECLAIREMENT E_p

EMITTANCE PHOTONIQUE M_p

Q_e : QUANTITE D'ECLAIREMENT

DENSITE SPECTRALE D'UNE GRANDEUR PHOTOMETRIQUE X_λ

LE CONTRASTE C

QUANTITE D'ENERGIE RAYONNANTE Q_p

ARSENIURE DE GALLIUM G_aA_s

PHOSPHORE DE GALLIUM G_aP

τ EST LA DUREE DE VIE DES PORTEURS MINORITAIRES.

C : EST LA VITESSE DE LA LUMIERE.

E_1 NIVEAU D'ENERGIE AVANT LA TRANSITION.

E_2 // // APRES LA TRANSITION.

h CONSTANTE DE PLANCK.

f_0 FREQUENCE D'EMISSION

R LA RESISTANCE DU MATERIAU

σ LA CONDUCTIVITE DU MATERIAU QUI DEPEND DE L'ECLAIREMENT REÇU

L LA LARGEUR DE LA BANDE DU SEMI-CONDUCTEUR PHOTOSENSIBLE

A LA SURFACE DE LA BANDE DU SEMI-CONDUCTEUR PHOTOSENSIBLE

E : L'ECLAIREMENT A CONSTANCE DEPENDANT DU MATERIAU, DE LA TEMPERATURE ET DU SPECTRE DU RAYONNEMENT

γ CONSTANTE GENERALEMENT COMPRISE ENTRE 0.5 ET 1

I : COURANT

U : DIFFERENCE DE TENSION

MOS : METAL OXYDE SEMI-CONDUCTEUR

MS: MICROSECONDE

CDS : CELLULES AU SULFURE DE CADMIUM

CDSE : CELLULES AU SULFOSELENIURE DE CADMIUM

PBS : CELLULES AU SULFURE DE PLOMB

LDR : PHOTORESISTANCE

P : SORTIE DONNANT LE SIGNAL DE COMMANDE A L'ELEMENT DE CONTROLE FINAL

E : SIGNAL D'ERREUR

CM : SIGNAL DE MESURE

CSP : POINT DE FONCTIONNEMENT (CONSIGNE)

C_{MAX}=VALEUR MAXIMALE DE LA VARIABLE CONTROLEE

C_{MIN}=VALEUR MINIMALE DE LA VARIABLE CONTROLEE

P : PLAGES DE CONTROLE

LA CONSIGNE :CSP

LA MESURE DE LA GRANDEUR A MAITRISER ; CM

L'ECART & OU L'ERREUR ENTRE LA CONSIGNE ET LA MESURE : &= CSP-CM

LA GRANDEUR REGLANTE **G**, EST LA GRANDEUR INCIDENTE CHOISIE POUR SES CARACTERISTIQUES DE RAPIDITE D'ACTION, DE SOUPLESSE D'UTILISATION ET DE SON IMPORTANCE D'INFLUENCE

LA GRANDEUR A MAITRISER EST NOTEE **G_M**

K_p : CONSTANTE DE PROPORTIONNALITE ENTRE L'ERREUR ET LA SORTIE DU CONTROLEUR(%)

P_0 : SORTIE DU CONTROLEUR LORSQUE L'ERREUR EST NULLE

BP : BANDE PROPORTIONNELLE

K_p : LA CONSTANTE DE PROPORTIONNALITE

EP : LE POINT DE FONCTIONNEMENT

P : SORTIE DU CONTROLEUR

K_i : CONSTANTE LIANT LE TAUX DE VARIATION A L'ERREUR

$\frac{dP}{dt}$: TAUX DE VARIATION (OU VITESSE DE VARIATION) DE LA SORTIE DU CONTROLEUR (%/s)

$T_i = \frac{1}{K_i}$ EXPRIME EN SECONDE OU MINUTE

$P_I(0)$: EST LE TERME INTEGRAL A T=0

F : FREQUENCE DE TRAVAIL

τ_e : LA DUREE DE VIE DES PORTEURS MINORITAIRES DE LA JONCTION PN.

τ_c est le temps de reponse de la LDR

R_c ; RESISTANCE DE LA LDR

V_S : TENSION DE SORTIE DU CONTROLEUR

V_p : TENSION D'ERREUR

V_0 : TENSION DE SORTIE POUR UNE ERREUR NULLE.

$G_p V_p$: AMPLIFICATEUR DE V_p PAR G_p

YI : LE SIGNAL DE SORTIE

VM : SORTIE DU CONDITIONNEUR

E : L'ECLAIREMENT

VCC : TENSION D ENTRE

RV : RESISTANCE D ENTRE DU CONDITIONNEUR

Table des matières

| | |
|---|----|
| <i>Introduction générale</i> | 1 |
| Chapitre 1 : ELEMENTS DE PHOTOMETRIE | 2 |
| Introduction..... | 2 |
| 1.1 La lumière..... | 3 |
| 1.1.1 La théorie ondulatoire..... | 3 |
| 1.1.2 La théorie corpusculaire..... | 3 |
| 1.2 La photométrie..... | 5 |
| 1.2.1 Unités de la lumière..... | 5 |
| 1.2.2 Grandeurs et unités radiométriques..... | 6 |
| 1.2.3 Grandeurs et unités visuelles..... | 8 |
| 1.2.4 Grandeurs et unités photoniques..... | 11 |
| 1.2.5 Autres grandeurs et autres lois..... | 12 |
| Chapitre 2 : SOURCES LUMINEUSES ET PHOTODETECTEURS | 14 |
| Introduction..... | 15 |
| 2.1 Sources lumineuses..... | 16 |
| 2.1.1 Lampe à tungstène..... | 16 |
| 2.1.2 Diode électroluminescente..... | 17 |
| 2.1.3 Diode infrarouge & Diode lazer..... | 23 |
| 2.2 Capteurs optiques..... | 26 |
| 2.2.1 Caractéristiques métrologiques des capteurs optiques..... | 26 |
| 2.2.2 Capteurs optiques..... | 28 |
| Chapitre 3 : SOURCES LUMINEUSES ET PHOTODETECTEURS | 35 |
| Introduction..... | 35 |
| 3.1 Système de contrôle..... | 36 |
| 3.2 Paramètres d'un système de contrôle..... | 36 |
| 3.1.1 L'erreur..... | 36 |
| 3.1.2 Plage de variation de la variable dynamique..... | 37 |
| 3.1.3 Plage de contrôle..... | 37 |
| 3.1.4 Retard sur le contrôle..... | 38 |

| | |
|--|-----------|
| 3.1.5 Temps mort..... | 38 |
| 3.3 Techniques de régulation..... | 38 |
| 3.3.1 Régulateurs purement analogiques..... | 40 |
| 3.3.2 Régulateurs numériques de type analogique..... | 40 |
| 3.3.3 Régulateurs purement numériques | 40 |
| 3.4 Principe des contrôleurs | 41 |
| 3.4.1 Le mode de contrôle discontinu..... | 41 |
| 3.4.2 Le mode de contrôle continu..... | 42 |
| Chapitre 4 : ETUDE PRATIQUE DE LA BOUCLE..... | 52 |
| 4.1 Etude pratique de la boucle..... | 52 |
| 4.1.1 Bloc synoptique du projet..... | 52 |
| 4.1.2 Fonction de transfert en boucle ouverte et en boucle fermée..... | 56 |
| 4.2 Réalisation électronique de la boucle..... | 56 |
| 4.2.1 Dispositif de mesure..... | 56 |
| 4.2.2 Circuit associé à la LED et la LDR..... | 57 |
| 4.2.3 Contrôleur proportionnel..... | 58 |
| 4.2.4 Etalonnage du capteur..... | 60 |
| Chapitre 5 : RESULTATS EXPERIMENTAUX & EXTENSION DU PROJET..... | 70 |
| 5.1 Résultats atteints par simulation par MATLAB..... | 70 |
| 5.2 Extension du projet..... | 73 |
| Conclusion générale..... | 77 |
| <i>Bibliographie.....</i> | <i>78</i> |

Table des figures

FIGURE I.1 : THEORIE ONDULATOIRE

FIGURE I.2: SPECTRE VISIBLE

FIGURE I.3 : RADIAN

FIGURE I.4 : L'ANGLE SOLIDE

FIGURE I.5 :L'AXE DE MESURE ET L'AXE MECANIQUE

FIGURE I.6 : LUMINANCE ENERGETIQUE SPE CITRIQUE

FIGURE I.7: REPONSE SPECTRALE DE L'ŒIL

FIGURE I.8 : EFFICACITE LUMINEUSE RELATIVE

FIGURE II.1 : LAMPE A TUNGSTENE

FIGURE II.2 : COURBE D'EMISSION SPECTRALE

FIGURE III.3 : JONCTION PN ET POLARISATION DE LA LED

FIGURE II.4 : LA PUISSANCE LUMINEUSE EN FONCTION DU COURANT D'ENTREE

FIGURE II.5 : REPONSE SPECTRALE D'UNE LED

FIGURE II.6 : REPONSE EN FREQUENCE D'UNE LED

FIGURE II.7.PUISSANCE EMISE EN FONCTION DE LA DIRECTION

FIGURE II.8 : PUISSANCE EMISE EN FONCTION DU RAPPORT CYCLIQUE

FIGURE II.9 : CIRCUITS DE MONTAGE POUR LES LED

FIGURE II.10 : AUTRES EXEMPLES DE CIRCUITS

FIGURE II.11 : LES NIVEAUX D'ENERGIE

FIGURE II.12 : TYPES DE TRANSITION POUR LES ELECTRONS

FIGURE II.13 : RESONATEUR DE PEROT - FABRY

FIGURE II.14. PHOTORESISTANCE

FIGURE II.15 : PHOTOTRANSISTOR

FIGURE II.16 : PHOTODIODE

FIGURE II.17 : CARACTERISTIQUE DE LA PHOTORESISTANCE

FIGURE III.1-SCHEMA DU PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT D'UNE REGULATION

FIGUREIII.2- : PROPRIETES GENERALES D'UN CONTROLEUR

FIGURE II.3. SCHEMA FONCTIONNEL D'UN SYSTEME DE CONTROLE

FIGURE III.4 : SCHEMA FONCTIONNEL D'UN REGULATEUR PROPORTIONNEL

FIGURE III.5. LA SITUATION DANS LE CAS D'UNE ACTION INVERSE ($K_p < 0$.)

FIGURE III.6 : L'OFFSET

FIGURE III.7. LE TAUX DE VARIATION DE LA SORTIE DU CONTROLEUR P EN FONCTION DE L'ERREUR

FIGURE III.8.LA SORTIE DU CONTROLEUR D EN FONCTION DU TAUX DE VARIATION DE L'ERREUR

FIGURE III.9. LE COMPORTEMENT DU CONTROLEUR EN FONCTION DU TEMPS POUR UN SIGNAL D'ERREUR DONT LA VARIATION EST ARBITRAIREMENT CHOISI

FIGURE III.10.MECANISME DE L'ACTION INTEGRALE, « ACTION INVERSE »

FIGURE III.11/MECANISME DU CONTROLE PROPORTIONNEL DERIVE « ACTION INVERSE »

FIGURE III.12. EXEMPLE DE REPOSE DU CONTROLEUR PID PAR UNE HYPOTHETIQUE ERREUR.

FIGURE IV.1 : LE SCHEMA FONCTIONNEL DE LA BOUCLE DE CONTROLE D'UNE MANIERE GENERALE.

FIGURE IV.2 : LE SCHEMA FONCTION GENERAL DE LA BOUCLE DE NOTRE PROJET.

FIGURE IV.3/ LA BOUCLE DE REGULATION APRES AVOIR REMPLACE CHAQUE ELEMENT PAR SA FONCTION DE TRANSFERT

FIGURE IV/ .4 : LE MODE SIMILAIRE DE LA BOUCLE

FIGURE IV.5 : DISPOSITIF DE MESURE

FIGURE IV.6 : LE CIRCUIT ELECTRIQUE POUR FAIRE VARIER LE C COURANT DANS LA LED

FIGURE IV.7 : AMPLIFICATEUR SOMMATEUR

FIGURE IV.8 : ETALONNAGE DU CAPTEUR

FIGURE IV.9 : LA RESISTANCE EN FONCTION DU RAYONNEMENT

FIGURE IV.10 : $\ln(Rc) = f(\ln(E))$

FIGURE IV.11 (STRUCTURE EN ½ PONT)

FIGURE IV-12 : SORTIE DU CONDITIONNEUR EN FONCTION DU RAYONNEMENT

Liste des tableaux

TABLEAU I.1 : CLASSIFICATION DES ONDES ELECTROMAGNETIQUES

TABLEAU II.1 : DIFFERENTS TYPES DE LED

TABLEAU II.2 : COMPARAISON ENTRE EMETTEURS

TABLEAU IV.1 : RESULTATS DE MESURE

Introduction générale

Pendant des années, l'être-humain a toujours essayé de contrôler la nature et ses différents éléments. La lumière est l'un des plus importants de ces éléments, mais son étude a toujours été rigoureuse car il n'y avait pas beaucoup de théorie qui nous aide à mieux le comprendre.

Ces derniers temps, l'optoélectronique et ses différents principes ont amélioré sa compréhension pour pouvoir mieux comprendre ce phénomène.

Notre projet a pour but de faire la régulation d'un flux lumineux dans une plage bien définie. Pour arriver à le faire on a fait appel à plusieurs disciplines (optoélectronique, automatismeetc.)

Pour cela nous allons commencer par les notions de photométrie dans le premier chapitre, où on va définir la lumière et ses différentes unités, puis faire une étude sur les différentes sources lumineuses et les photorécepteurs dans le deuxième chapitre. Pour le contrôle, nous allons étudier son principe et ses différents types, ce qui est présenté dans le troisième chapitre. Au quatrième chapitre, nous allons aborder l'étude pratique de la boucle suivie par sa réalisation électronique. Les différents résultats expérimentaux après les tests pratiques seront exposés dans le dernier chapitre.

Ce travail peut avoir différentes applications dans le domaine industriel que ce soit dans les systèmes de vision, l'asservissement visuel en robotique, la télémétrie laser et l'instrumentation optique.

Chapitre 1 ELEMENTS DE PHOTOMETRIE

A ses débuts, la photométrie traitait principalement des grandeurs lumineuses perceptibles à l'œil humain, le capteur optique le plus utilisé. Avec l'usage grandissant de sources et de détecteurs optiques fonctionnant dans un domaine spectral beaucoup plus large que le visible, la photométrie s'est étendue à l'étude des grandeurs énergétiques des ondes électromagnétiques correspondantes ($0,01 \mu\text{m} < \lambda < 1 \text{ mm}$).

Ce chapitre présente les principes de base de la photométrie dite géométrique, c'est-à-dire reposant sur la propagation rectiligne de la lumière (milieux supposés homogènes) et sur les lois de l'optique géométrique. Les résultats ne prennent en compte la diffraction que dans les cas où elle est déterminante dans la performance photométrique d'un système (par exemple dans l'image d'un point source).

1.1 La lumière :

Pour décrire la lumière, il existe deux théories fondamentales :

1.1.1 La théorie ondulatoire :

Elle soutient que la lumière est une énergie propagée sous formes d'ondes électromagnétique et qui explique tous les phénomènes d'interférence et de diffraction (Hooke, Huygens, Yong...) **Figure I.1**

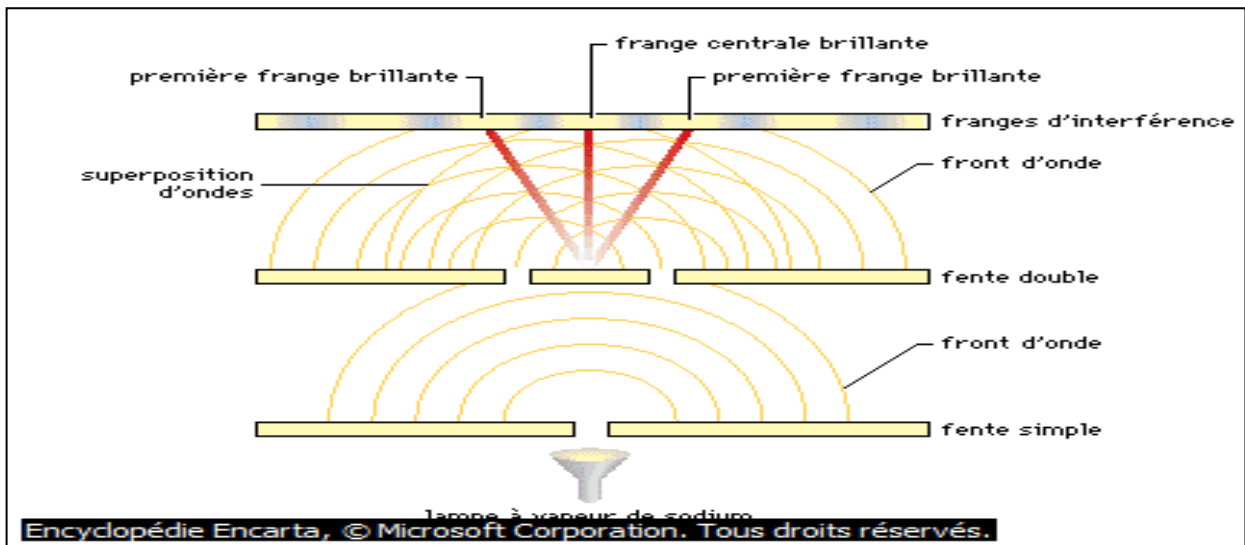


Figure I.1 : Théorie ondulatoire

1.1.2 La théorie corpusculaire :

Elle considère que la lumière est composée de particules d'énergie appelés PHOTONS et qui explique les phénomènes mise en jeu lors de l'interaction lumière- matière (Travaux de newton, Einstein et Planck)

Planck et Einstein ont montré qu'un photon (particule sans masse) transporte une énergie élémentaire (porteur d'énergie) dont la valeur est une fonction de la fréquence de radiation.

$$E = h \cdot \gamma = h \cdot \frac{C}{\lambda} \dots \dots \dots (I.1)$$

Ou : $h=6,6256 \cdot 10^{-34}$ J.s est la constante de Planck

γ : La fréquence

C : La vitesse de la lumière

Pour les deux théories, une constante fondamentale revient : la vitesse de la lumière C dans le vide est égale à :

$$C = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}} \approx 3 \cdot \frac{10^8 \text{ m}}{\text{s}} \dots \dots \dots (I.2)$$

Où ϵ_0 et μ_0 sont la permittivité et la perméabilité du vide

D'après les travaux de tous ces scientifique, on a pu établir une classification des ondes électromagnétiques suivant leurs longueur d'ondes λ , leurs fréquences γ , et leurs énergies E, donnée dans le tableau ci-dessous :

| Type de rayonnement | Longueur d'onde λ | Fréquence(Hz) | Energie E (e.v) |
|---------------------|---------------------------|---------------------|----------------------|
| Ondes radio | 100km | $3 \cdot 10^8$ | $1,2 \cdot 10^{-11}$ |
| | 300mm | 10^9 | $4 \cdot 10^{-6}$ |
| Micro-ondes | 0,3mm | 10^{12} | $4 \cdot 10^{-3}$ |
| Infrarouge | 0,7 μ m | $4,3 \cdot 10^{14}$ | 1,8 |
| Visible | 0,4 μ m | $7,8 \cdot 10^{14}$ | 3,1 |
| Ultraviolet | 0,03 μ m | 10^{16} | 40 |
| Rayons X | 0,1nm | $3 \cdot 10^{18}$ | $1,2 \cdot 10^{13}$ |
| Rayons Gamma | 1,0pm | $3 \cdot 10^{20}$ | $1,2 \cdot 10^{20}$ |

Tableau I.1 : Classification des ondes électromagnétiques

Dans ce spectre, un domaine particulier nous intéresse puisqu'il est en relation directe avec la réponse spectrale de l'œil : C'EST LE SPECTRE VISIBLE. Il se situe entre 390 et 770 nm, des longueurs d'ondes que l'œil perçoit sous forme de couleurs. Figure I.2

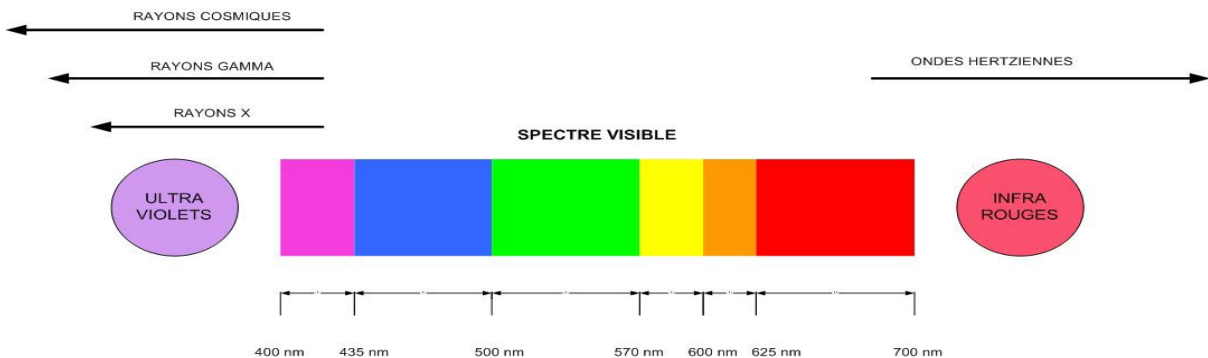


Figure I.2: spectre visible

La lumière blanche est une combinaison de toutes les couleurs composant cette partie du spectre.

1.2 La photométrie :

La photométrie peut être vue sous 3 aspects différents :

- **Aspect radiométrique (ou énergétique) :**

Il nous permet de mesurer la radiation de la lumière pour toutes les longueurs d'ondes du spectre électromagnétique indépendamment de toute sensation lumineuse .En radiométrie, la plus importante mesure est celle du flux énergétique appelé également « puissance rayonnante » exprimée en Watts. Autrement dit, en radiométrie on s'intéresse uniquement à l'énergie véhiculée par la lumière.

- **Aspect visuel :**

Il nous permet de mesurer l'intervalle visible de la lumière en tenant compte de la réponse spectrale de l'œil.

- **Aspect photonique :**

Il nous permet de définir le nombre de photons transportés par la lumière par unité de temps.

1.1.1 Unités de la lumière :

- **Radian :**

C'est l'unité de mesure d'angle correspondant à l'angle au centre de la circonférence, un arc de longueur égale à celle du rayon de la circonférence. Figure I.3

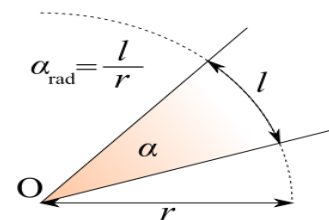
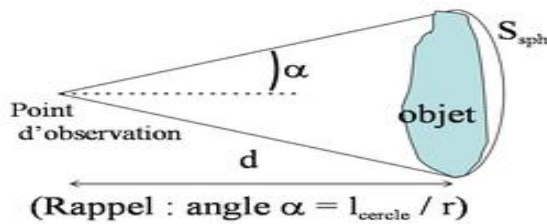


Figure I.3 : Radian

- **Angle solide Ω :**

C'est un angle ayant son sommet au centre d'une sphère et découpant sur sa surface une aire égale à celle d'un carré qui aurait pour coté le rayon de la sphère. Il s'exprime en stéradian (sr) Figure 1.4

Ω = angle solide (sous lequel est vu un objet depuis un point d'observation)
 = rapport entre l'aire S_{sph} de la calotte sphérique définie par la silhouette de l'objet, et le carré de la distance au point d'observation



$$\Omega = S_{sph} / d^2$$

Cônes de demi angle α :
 $\Omega = 2\pi (1 - \cos\alpha)$
 $\Omega = \pi\alpha^2$ (si α petit)

Figure 1.4 :L'angle solide

Comme l'aire d'une sphère est égale à $4\pi R^2$, on conclue donc qu'il y'a $\frac{4\pi R^2}{R^2}=4\pi$ stéradians d'angle solide autour du centre de la sphère.

Dans un cône le nombre de stéradian pour un angle au sommet 2θ est égal à $2\pi (1-\cos \theta)$.

○ **Autres références géométriques :**

A_e :Aire de la surface émettante : La surface émettante peut être une surface qui sert de réflecteur.

A_p :Aire apparente de la surface émettante.

A_d : Aire de détection : C'est une aire spatiale ou simplement l'aire qui nous intéresse
 L'axe de mesure est la direction dans laquelle on prend la mesure de la source d'énergie rayonnante par rapport à celle de l'axe mécanique.Figure I.5

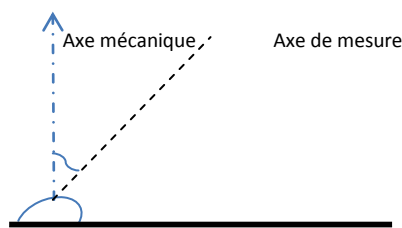


Figure I.5 :L'axe de mesure et l'axe mécanique

1.1.2 Grandeurs et unités radiométriques :

- **Flux énergétique P , ϕ_e** : Le flux énergétique ϕ_e est la puissance émise par une source, C'est-à-dire le flux de l'énergie rayonnante voyageant sous forme d'ondes électromagnétiques, émises par la source ,par unité de temps :

$$\phi_e = \frac{d\phi}{dt} \dots \dots \dots (I.3)$$

Où : ϕ est l'énergie rayonnante en joules

t est le temps en seconde

ϕ_e s'exprime donc en Watts

- **Intensité énergétique I_e** : C'est la mesure de la puissance rayonnante voyageant dans une direction donnée par unité d'angle solide :

$$I_e = \frac{d\phi_e}{d\Omega}; \text{Unité } W.sr^{-1} \dots \dots \dots (I.4)$$

- **Luminance énergétique L_e** : C'est le rapport entre l'intensité énergétique émise par une source et l'aire de la surface qui reçoit la projection dans une direction donnée : Figure I.6

$$L_e = \frac{dI_e}{dA_p} = \frac{dI_e}{dA_e \cdot \cos \theta} = \frac{d^2I_e}{dA_e \cdot \cos \theta \cdot d\Omega} \text{ Unité } W.sr^{-1}m^{-2} \dots \dots \dots (I.5)$$

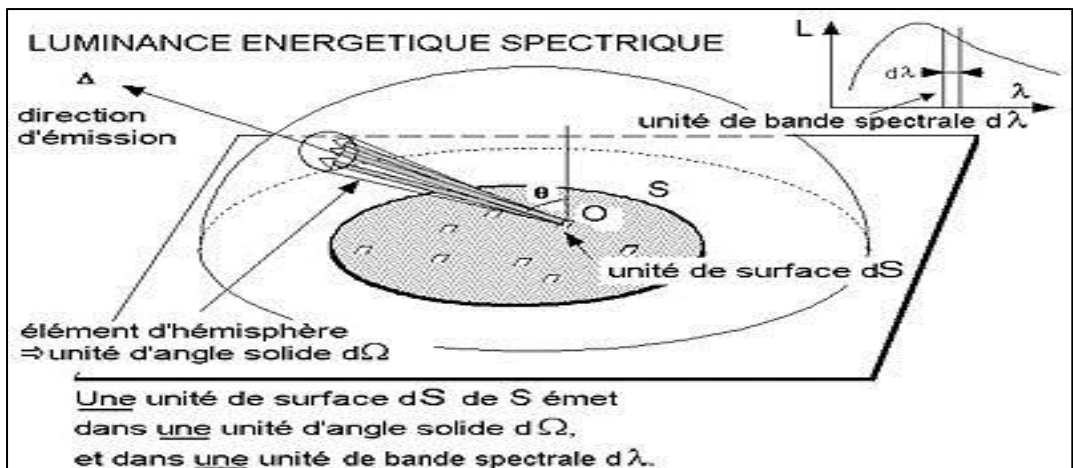


Figure I.6 : Luminance énergétique spécitrique

- **Eclairement énergétique E_e** : C'est la densité du flux incident sur une surface qui la reçoit. C'est le quotient du flux émis par une surface par l'aire éclairée :

$$E_e = \frac{d\phi_e}{dA_d}; \text{Unité } w.m^{-2} \dots \dots \dots (I.6)$$

- **Emittance énergétique M_e** : C'est la puissance rayonnante émise par une surface .C'est le rapport du flux émis par une surface par l'aire de cette surface :

$$M_e = \frac{d\phi_e}{dA_e}; \text{Unité } w.m^{-2} \dots \dots \dots (I.7)$$

1.1.3 Grandeurs et unités visuelles :

La photométrie visuelle se réfère souvent à la réponse spectrale de l'œil humain qui a le pouvoir de désigner les couleurs ; En effet, comme nous l'avons vu, la lumière est composée en fait de diverses couleurs dont chacune correspond à une longueur d'onde précise.

○ Réponse spectrale de l'œil :

La réponse de l'œil humain moyen dépend de l'intensité et de la longueur d'onde de la lumière, de la durée d'exposition et des conditions d'éclairage, de l'environnement, de l'âge de l'observateur et de la partie de la rétine qui détecte l'information. En effet, les éléments sensibles de l'œil sont constitués par des bâtonnets et des cônes repartis en proportion inverse sur la surface de la rétine ; Mais une petite zone centrale appelée fovéa, d'environ 2,5 mm de diamètre, contient uniquement des cônes en grande densité, ce qui procure à l'œil son grand pouvoir de résolution.

Ainsi la sensation de couleurs est due aux cônes et on distingue la vision sous deux aspects : Figure I.7

- Vision photo-pique ou diurne assurée par les cônes de la fovéa correspondant aux luminances nominales (sensation colorée et résolution élevée).
- Vision scotopique ou crépusculaire assurée par des bâtonnets et qui permet à l'œil de voir aux faibles éclairages mais avec une résolution faible.

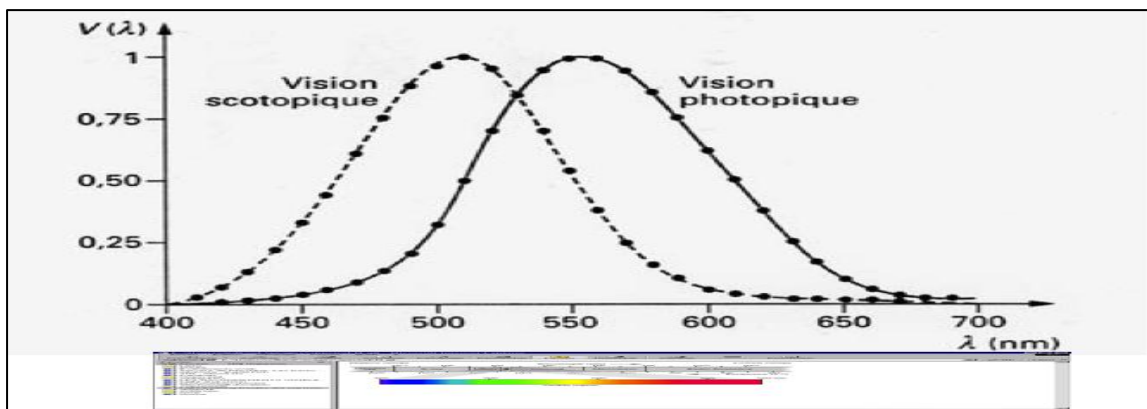


Figure I.7: réponse spectrale de l'œil

Ces courbes montrent que l'œil a son maximum de sensibilité vers 550nm en vision photo-pique et de 510nm en vision scotopique.

Généralement, on fixe des seuils de luminance pour déterminer si la vision est photo-pique ou scotopique.

○ **L'efficacité lumineuse relative d'un rayonnement monochromatique de longueur d'onde λ :**

La mesure de l'énergie d'une radiation électromagnétique quand toutes les longueurs d'ondes du spectre électromagnétique sont traitées est connue sous le nom de radiométrie. La mesure de ces aspects de radiation qui affectent la vision est connue sous le terme de photométrie. Le lien entre ces deux aspects est la courbe de luminosité standard montrée sur la figure I.7 et se référant à la réponse spectrale V_λ d'un œil moyen à la lumière de différentes longueurs d'ondes. La valeur de V_λ (souvent appelée

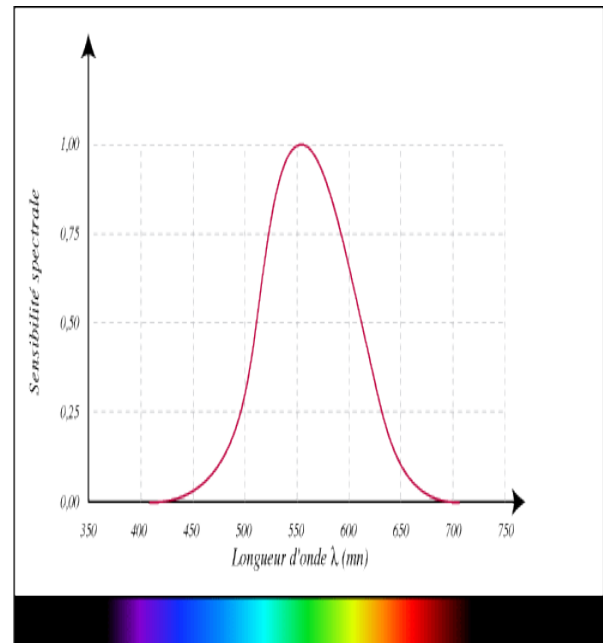


Figure I.8 : Efficacité lumineuse relative

(L'efficacité lumineuse relative) est prise égale à 1 quand $\lambda=555\text{nm}$ où l'œil a son maximum de sensibilité en vision photo-pique. Figure I.8

La valeur de V_λ tombe à une valeur voisine de 0 aux extrémités du spectre visible ($\lambda=700\text{ nm}$ et 400nm). Pour une vision photo-pique normale (quand l'œil est adaptée aux niveaux élevés de lumière excitante) au pic de sensibilité de l'œil ($\lambda=555\text{nm}$), un watt d'énergie radiométrique est égal à 680 lumens d'énergie photométrique par définition. A toute autre longueur d'onde, cette conversion doit être multiplié par la valeur de V_λ à cette longueur d'onde.

Autrement dit si on appelle K_λ l'efficacité lumineuse d'un rayonnement, on a :

$$K_\lambda = \frac{\phi_\lambda}{\phi_{e\lambda}} = \frac{d\phi_\lambda}{d\phi_{e\lambda}} = K_m \cdot V_\lambda \text{ Avec } K_m = 680 \frac{\text{lumens}}{\text{watt}} \dots \dots \dots (I.8)$$

On peut faire un raisonnement analogue pour la version scotopique V'_λ ou l'efficacité lumineuse du rayonnement est donnée par :

$$K'_\lambda = K'_m \cdot V'_\lambda \text{ Avec } \lambda_m = 510\text{nm et } K'_m = 1746 \frac{\text{lumens}}{\text{watt}} \dots \dots \dots (I.9)$$

○ **Grandeurs et unités visuelles :**

○ **Flux lumineux : ϕ** => C'est la quantité de la lumière émise par unité de temps.

$$\phi = \frac{dQ}{dt} \dots \dots \dots (I.10)$$

Où Q est la quantité de lumière en lumens par seconde (Lmn.sc)

et t est le temps en seconde s)

ϕ s'exprime en lumens (lm)

○ **Intensité lumineuse I :**

$$I = \frac{d\phi}{d\Omega} ; \dots \dots \dots (I.11)$$

C'est le rapport entre le flux lumineux d'une source qui illumine une surface dans une direction donnée et l'angle solide de la source avec l'aire de détection

Unité: Candela = lumen. sr^{-1}

○ **Luminance L :** C'est le rapport entre l'intensité lumineuse émise par une surface A_e dans une direction donnée et l'unité d'aire de la surface qui reçoit la projection de la surface émettante dans la direction donnée ; soit : $A_p = A_e \cdot \cos \theta$

$$L = \frac{dI}{dA_p} = \frac{dI}{dA_e \cos \theta} = \frac{d^2\phi}{dA_e \cos \theta \cdot d\Omega} \dots \dots \dots (I.12)$$

Unité : candela / $m^2 = cd/m^2$; appelés aussi « nit »

D'autres unités existent telles que :

Stilb : $10^4 cd/m^2$

Blondel : $\frac{1}{\pi} cd/m^2$

Expo stilb

- **Eclairement E** : C'est le rapport entre le flux lumineux émis par une source et l'aire de la surface qui reçoit le flux :

$$E = \frac{d\phi}{dA_d}; \text{unité lux ou } \frac{lm}{m^2} \dots \dots \dots (I.13)$$

- **Emittance M** : C'est le rapport entre le flux émis par une source et l'aire de la surface qui émet ce flux :

$$E = \frac{d\phi}{dA_e}; \text{Unité } \frac{lm}{m^2};$$

$$\text{Autres unité: } 1\text{phot} = \frac{10000lm}{m^2} \dots \dots \dots (I.14)$$

1.1.4 Grandeurs et unités photonique :

- **Flux photonique ϕ_p** : C'est le nombre de photons N transportés par un rayonnement, par unité de temps. Unité : s^{-1}

- **Intensité photonique I_p** :

$$I_p = \frac{d\phi_p}{d\Omega} \dots \dots \dots (I.15);$$

Unité : nombre de photons par seconde et par stéradian ($s^{-1}sr^{-1}$)

- **Luminance photonique L_p** :

$$L_p = \frac{dI_p}{dA_p} = \frac{dI_p}{dA_e \cos \theta} = \frac{d^2\phi_p}{dA_e \cos \theta d\Omega}; \dots \dots \dots (I.16)$$

Unité: $s^{-1}m^{-2}sr^{-1}$

- **Eclairement E_p** :

$$E_p = \frac{d\phi_p}{dA_d}; \dots \dots \dots (I.17)$$

Unité: $s^{-1}m^{-2}$

- **Emittance photonique M_p** :

$$M_p = \frac{d\phi_p}{dA_e}; \dots \dots \dots (I.18)$$

Unité $s^{-1}m^{-2}$

1.1.5 Autres grandeurs et autres lois :

- **Grandeurs énergétiques :**

- a) **Sources ponctuelle :** Une source ponctuelle est une source d'énergie dont les dimensions sont négligeables par rapport à sa distance au récepteur.

- b) **Source ponctuelle uniforme :** C'est une source ponctuelle qui émet uniformément dans toutes les directions (Loi de Lambert)

- c) **Irradiation en un point d'une surface :** L'irradiation en un point d'une surface est égale au produit de l'éclairement énergétique au point considéré par sa durée .Elle s'exprime en J/m^2

- d) **Densité spectrale d'une grandeur énergétique :** On appelle densité spectrale $X_{e\lambda}$, d'une grandeur énergétique quelconque X_e , le quotient de cette grandeur prise dans un intervalle infiniment petit encadrant une longueur d'onde (ou une fréquence) donnée par cet intervalle :

$$X_{e\lambda} = \frac{dX_e}{d\lambda} \text{ ou } X_{e\lambda} = \frac{dX_e}{d\gamma} \dots \dots \dots (I. 19)$$

- **Grandeurs visuelles :**

- a) **Quantité d'éclairement (en photographie : lumen)** : La quantité d'éclairement Q_e est égale au quotient de l'éclairement E par sa durée :

- i. $Q_E = \int E dt \dots \dots \dots (I. 20)$

- ii. *en lux.seconde*

- b) **Densité spectrale d'une grandeur photométrique :** Même définition que pour une grandeur énergétique :

- i. $X_\lambda = \frac{dX}{d\lambda} \text{ ou } X_\nu = \frac{dX}{d\nu} \dots \dots \dots (I. 21)$

- c) **Courbe de répartition spectrale relative d'une grandeur photométrique :** C'est la courbe représentant la variation de la densité spectrale de cette grandeur, en mesure relative par rapport à une valeur donnée de cette grandeur en fonction de la longueur d'onde, ou de la fréquence.

- d) **Seuil absolu de luminance :** C'est la luminance minimum perceptible.

- e) **Contraste :** Le contraste C (ou τ ou δ) est, dans le cas de la luminance défini par le rapport suivant :

$$C = \frac{L_2 - L_1}{L_1} \dots \dots \dots (I.22)$$

où L_2 et L_1 sont les luminances des deux plages voisines

○ **Grandeurs photoniques :**

a) **Quantité d'énergie rayonnante :** C'est la quantité d'énergie Q_p des photons.

$$Q_p = h \int \frac{dN}{d\gamma} \gamma \cdot d\gamma \dots \dots \dots (I.23)$$

où $\frac{dN}{d\gamma}$ est la repartition spectrale des photons en fréquence, Elle s'exprime en joules ou en e.v ($1e.v = 1,6 * 10^{-19}J$)

b) **Irradiation en un point d'une surface :** C'est le produit de l'éclairement photonique par sa durée. Elle s'exprime en nombre de photons par m^2 . ($\frac{N}{m^2}$)

Chapitre 2 : SOURCES LUMINEUSES & PHOTODETECTEURS

L'optoélectronique englobe essentiellement les photoémetteurs ou sources lumineuses (phénomènes d'électroluminescences) et les photorécepteurs ou capteurs de lumière.

Parallèlement au développement des photoémetteurs, la technique des semi-conducteurs a permis de réaliser des photorécepteurs présentant des caractéristiques en parfaite concordance avec les émetteurs et de concevoir des associations optoélectroniques de qualité.

2.1 Source lumineuse :

L'optimisation de fonctionnement d'un capteur optique dépend en premier lieu des caractéristiques du rayonnement reçu (spectre, flux, fréquence, λ_{\max} ...). Or ce rayonnement dépend de la source qui émet ce rayonnement. C'est pourquoi il est important de connaître les principales sources de lumière qui seront couplés optiquement aux capteurs. On peut-on distinguer 3 classes :

- Les lampes au tungstène
- Les diodes électroluminescentes
- Le laser

2.1.1 Lampe au tungstène :

- **Description :** une lampe en tungstène est formée d'une enceinte dans laquelle règne le vide ou dans laquelle on introduit un gaz rare sous basse pression. Un filament en tungstène est placé dans cette enceinte sur lequel on envoie un courant électrique. Figure II.1

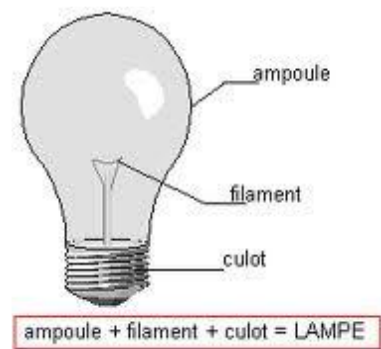


Figure II.1 : lampe à tungstène

- **Caractéristiques :**

- **Caractéristiques électriques :**

- Tension nominale d'alimentation
- Puissance consommée en Watt
- Résistance du filament variant avec la température : $R = \rho \frac{l}{s}$;

$$\text{Avec : } \rho = \rho_0 \left[1 + \frac{5238}{10^3} T + \frac{0,7}{10^5} T^2 + \frac{0,062}{10^9} T^3 \right] ; \text{ Avec } T \text{ exprimée en } ^\circ\text{C}.$$

- **Caractéristiques photométriques :**

- Flux lumineux total ϕ rayonné par la lampe (lumen) 20 ---->200000lm.
- Efficacité lumineuse en lumen/Watt : Elle augmente avec la puissance consommée, car lorsque la puissance nominale augmente, le flux lumineux augmente encore plus ; elle varie de 8 à 20 lm/w.

- Courbe d'émission spectrale : La lampe en tungstène présente un large spectre d'émission qui peut s'étendre jusqu'au lointain infrarouge, comme le montre la figure si dessous :Figure II.2

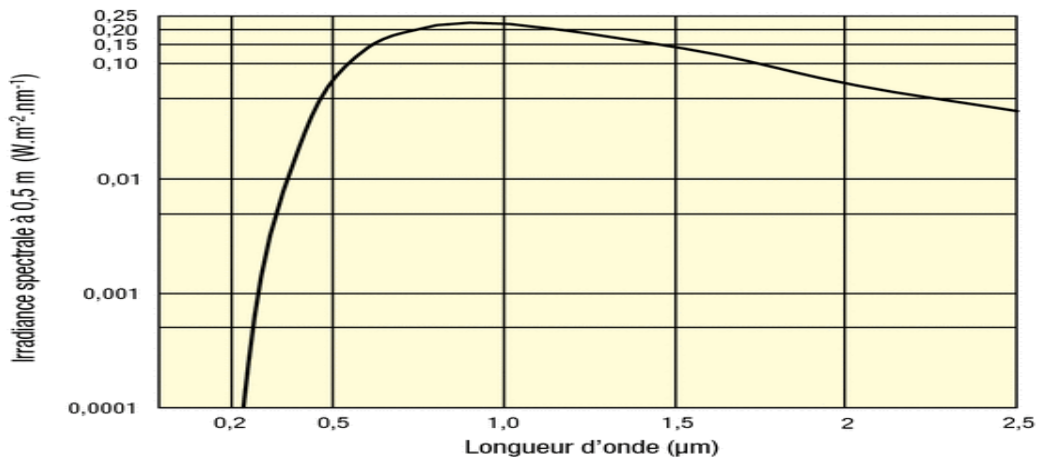
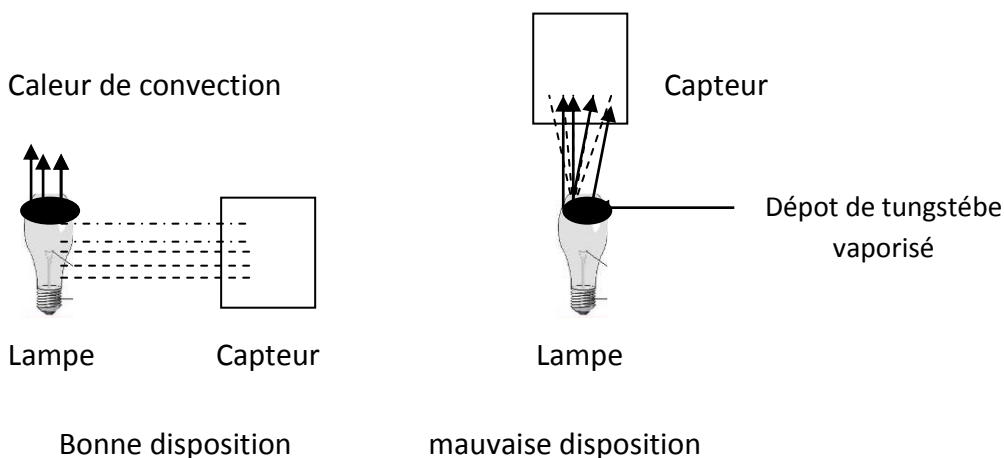


Figure II.2 : courbe d'émission spectrale

- **Durée de vie** : Pour qu'une lampe en tungstène dure plus longtemps, il est nécessaire de la sous-alimenter, c.-à-d. ne pas lui fournir une puissance nominale trop élevée, la température du filament augmente, ce qui provoque l'évaporation du tungstène, donc diminution de la section du fil ; il s'ensuit une augmentation de la résistance R, La puissance consommée diminue.

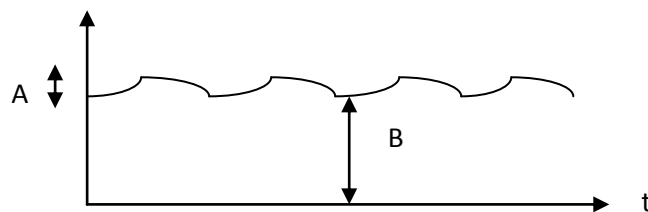
Pour augmenter la durée de vie, on introduit un gaz rare (xénon, néon....) pour limiter l'évaporation du filament

Il faut aussi éviter de disposer l'ensemble lampe-capteur verticalement à cause de la chaleur de convection qui risque d'altérer le tout



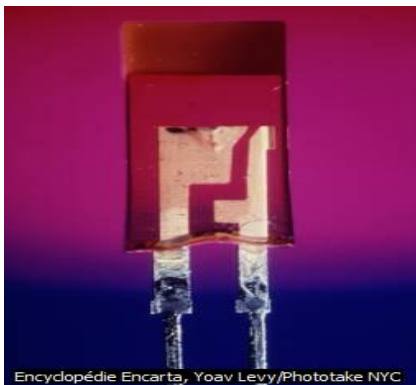
- **Avantages et inconvénients ;**

- **Avantage :**
 - Flux important
 - Spectre étendu que l'on peut réduire à l'aide de filtres.
- **Inconvénients :**
 - Durée de vie limitée.
 - Inertie thermique importante rendant impossible la modulation rapide du rayonnement par le courant d'alimentation $A/B=1/2$ au-dessous de 10Hz.
 - Fragilité aux chocs et vibrations.



2.1.2 Diode électroluminescentes (LED, Light Emitting Diode) :

- **Principe de fonctionnement :** A partir d'un semi-conducteur (germanium ou silicium), on forme une jonction P.N (voir figure) ; On polarise cette diode en direct.



On polarise cette diode en direct.

Du fait de cette polarisation directe, un courant va circuler et va créer des paires électrons-trous : Les porteurs majoritaires des deux côtés de la jonction vont traverser la barrière de potentiel interne, sous l'excitation du champ externe, les électrons passent

dans la région P et les trous dans la région N causant une augmentation de la concentration des porteurs minoritaires dans ces régions. Les porteurs minoritaires en excès vont diffuser au-delà de la jonction où se fait la recombinaison des porteurs. Figure II.3. La recombinaison de ces porteurs au niveau de la jonction libère une énergie rayonnée sous forme de photons égale à :

$$h \cdot \gamma = E_c - E_v = E_g = \frac{hC}{\lambda_g} \dots \dots \dots (II. 1)$$

où, E_c, E_v sont respectivement la bande de conduction et la bande de valence.

On voit donc que la fréquence d'émission γ de la radiation émise, donc sa longueur d'onde soit directement liées à la largeur de la bande interdite (gap) du semi-conducteur, laquelle est elle même lié à la tension coude de la caractéristique de la jonction considérée

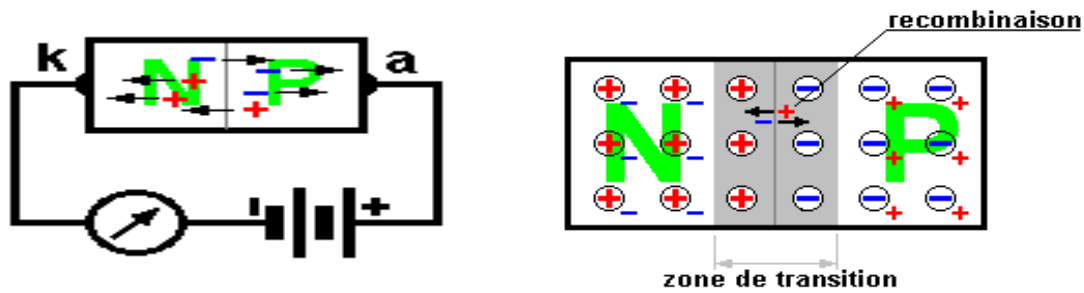


Figure II.3 : Jonction PN Et polarisation de la LED

Par exemple, une LED à base d'arséniure de gallium (GaAs) a une bande interdite de 1,44 eV qui correspond à une longueur d'onde de 0,86 μm . À cause de l'excitation thermique, les électrons dans la bande de conduction ont une énergie probable de $\frac{1}{2} kT$ au-dessus du niveau le plus bas de la B.C. De ce fait les transitions de bande à bande des porteurs donnent naissance à une émission des photons dont la longueur d'onde est légèrement inférieure à celle donnée par la formule plus haut.

○ **Caractéristiques des LEDS :**

- **Construction et rendement quantique :** Une LED a toujours un certain rendement quantique défini comme étant le rapport entre le nombre de photons émis réellement vers l'extérieur (car certains ne sont pas rayonnés vers l'extérieur : absorption par d'autres atomes ou phénomène de réflexion totale) et le nombre d'électrons qui leur ont donné naissance ; Le rendement peut varier d'un constructeur à un autre suivant la structure géométrique adoptée pour leur construction.

$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2 \dots \dots \dots (II.2)$$

L'angle critique ($\theta_1 = \theta_c$) survient quand $\theta_2 = 90^\circ$

A ce moment nous avons :

$$n_1 \sin \theta_c = n_2 \text{ D'où } \theta_c = \sin^{-1} \left(\frac{n_2}{n_1} \right) \dots \dots \dots (II.3)$$

La lumière émise au centre de recombinaison près de la jonction PN sera rayonnée d'une manière isotrope .On peut montrer que la fraction F du rayonnement total généré qui sera réellement transmis est donné par la relation :

$$F \approx \frac{1}{4} \left(\frac{n_2}{n_1} \right)^2 \left[1 - \left(\frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2} \right)^2 \right] \dots \dots \dots (II.4)$$

On peut augmenter F de deux manières :

- La première est de s'assurer que la plupart des rayons frappant la surface séparatrice des deux milieux sont sous une incidence inférieure à l'angle critique ; Cela peut se faire en donnant une forme d'hémisphère à la LED. Bien que cette technique soit utilisée occasionnellement pour des diodes à haute puissance, elle demeure difficile et chère dans la plupart des situations.
- La seconde technique, et la plus connue, est d'encapsuler la jonction PN dans un milieu transparent à grand indice de réfraction .On utilise généralement un matériau plastique dont $n=1.5$

Ainsi avec une diode faite à partir de l' A_sG_a .et si le milieu de transmission est l'air, on a : $F \approx 0.013$.

- **La puissance lumineuse** est une fonction quasi-linéaire du courant d'entrée

RELATIVE FLUX VS. CURRENT ($T_j = 25^\circ\text{C}$)

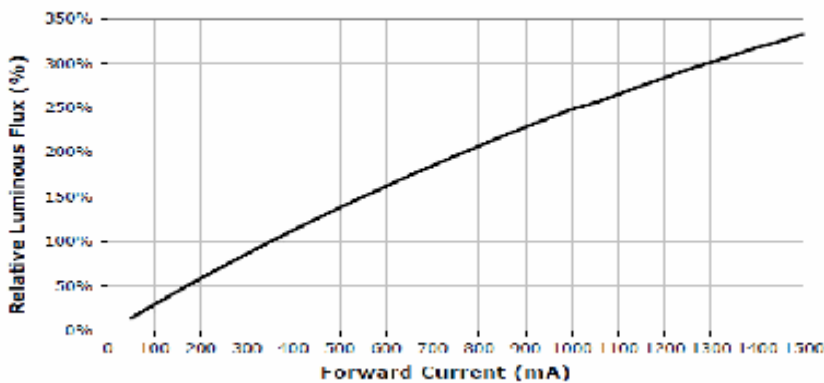
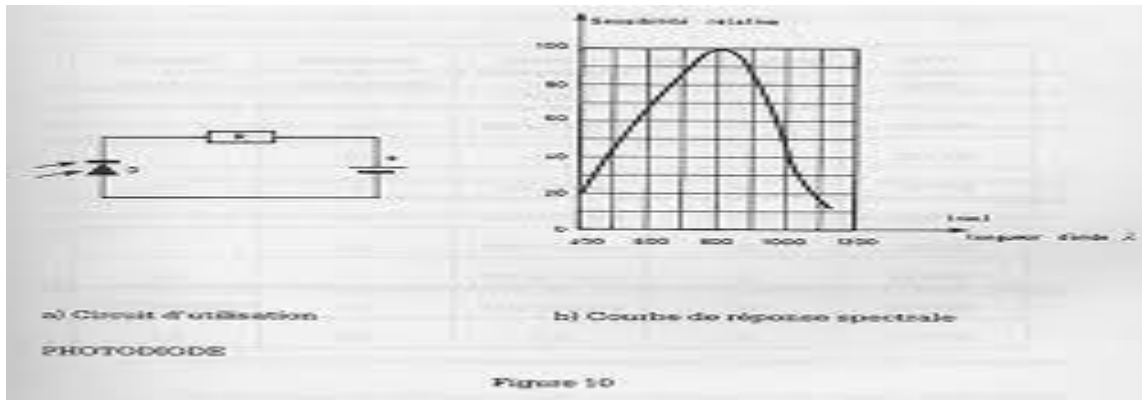


Figure II.4 : La puissance lumineuse en fonction du courant d'entrée

- **La réponse spectrale** varie suivant le matériau utilisé pour leurs réalisations, la forme est donnée sur la figure :



Différentes LEDs :

| Matériau | Dopant | Pic d'émission λ_{max} (nm) | Couleur | Rendement quantique externe |
|---|--------|-------------------------------------|------------|-----------------------------|
| Arséniure de gallium G_aA_s | Z_n | 900 | Infrarouge | 0.1 |
| Phosphore de gallium G_aP | N | 570 | Vert | 0.1 |
| | N, N | 590 | Jaune | 0.1 |
| | Zn, O | 700 | rouge | 4 |
| Arsénio-phosphore de gallium $G_aA_s0.6$; $P = 0.4$ | N | 650 | rouge | 0.2 |
| $G_aA_s = 0.35$; $P = 0.65$ | N | 632 | orange | 0.2 |
| $G_aA_s = 0.15$; $P = 0.85$ | N | 589 | jaune | 0.05 |
| Arséniure de gallium G_aA_s | S_i | 910->1020 | Infrarouge | 10 |

Tableau II.1 : Différents types de LED

- **Réponse en fréquence :**

La puissance émise en fonction de la fréquence est donnée par la relation suivante :

$$P(f) = \frac{P(0)}{(1+4\pi^2 f^2 \tau^2)^{1/2}} \dots \dots \dots (II.5)$$

OU τ est la durée de vie des porteurs minoritaires.

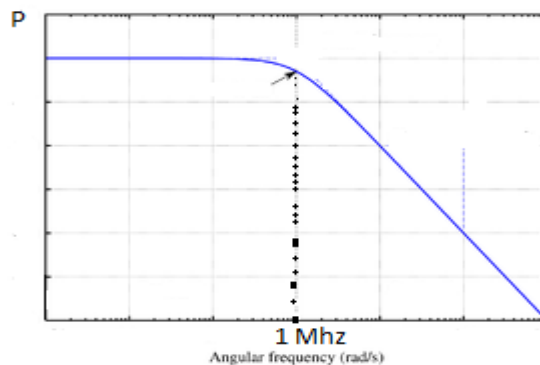


Figure II.6 : Réponse en fréquence d'une LED

- **Puissance émise en fonction de la direction :**

Faisceau étroit



Faisceau large

Figure II.7 : puissance émise en fonction de la direction

- **Puissance émise en fonction du rapport cyclique de contrôle :**

La puissance émise n'est pas forcément continue, Elle peut émettre de la lumière pulsée

$$P_{crête} = R_d I_{max}^2 \dots \dots (II.6)$$

$$I_f = I_{moy} = \frac{1}{T} \int_0^T i(t) dt \dots (II.7)$$

$$I_f = \frac{\tau}{T} I_{max}$$

$$\rightarrow I_{max} = \frac{I_f T}{\tau} \dots \dots (II.8)$$

$$P_{crête} = R_d \frac{(I_f)^2}{(\tau/T)^2} \dots \dots (II.9)$$

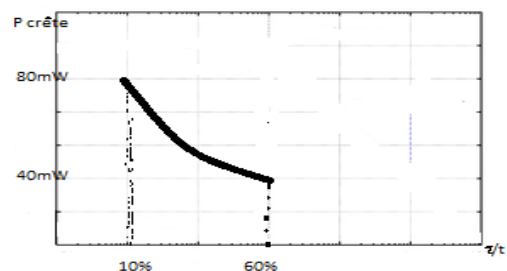
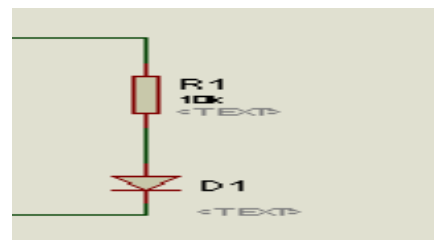


Figure II.8 : Puissance émise en fonction du rapport cyclique

- **Comparaison entre émetteurs :**

| Caractéristiques | Lampe | LED |
|---|-------------------------|----------------------------|
| Durée de vie | <10 ⁵ heures | 10 ⁵ heures |
| Luminosité | Elevée | Environ 50% lampe |
| Sensibilité à la tension d'alimentation | Grande | Modérée |
| Sensibilité à la température | Nulle | Elevée (jusqu'à 1 % lampe) |

| | | |
|------------------------|---------------|---|
| Tenue aux vibrations | Modérée | Bonne |
| Tenue aux chocs | Modérée | Bonne |
| Consommation | 5V.....120 mA | ≤60 mA, régulateur de courant compris |
| Encombrement | Modéré | Faible |
| Spectre d'émission | Plat | Etroit, bien adapté au max de la courbe |
| Dimension de faisceaux | qq mm | qq 1/10 mm |

Tableau II.2 : Comparaison entre émetteurs

○ **Circuit de montage pour les LED :**

Les courants type varient entre 20 mA et 100 mA, tandis que les tensions de polarisation direct varient de 1.2V pour Ga As à 2V pour les diodes Gap.

Les circuits d'attaque des diodes pour un fonctionnement continu ou alternatif sont donnés sur la figure ci-dessous :

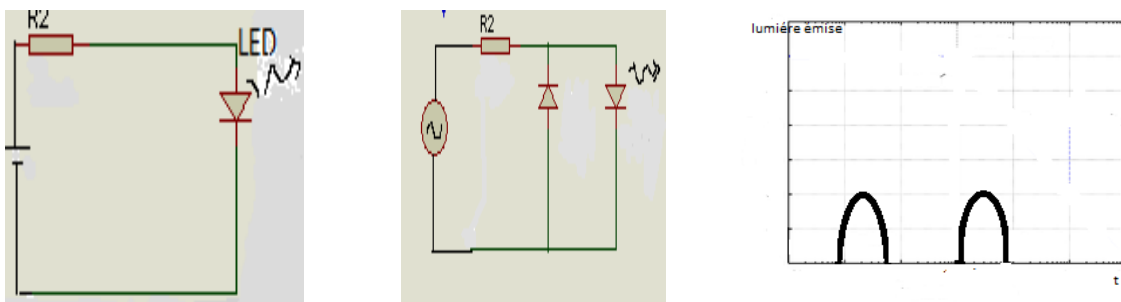


Figure II.9 : Circuits de montage pour les LED

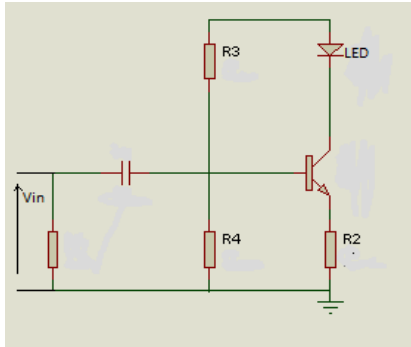
Dans les 2 cas une résistance R_s limite le courant et peut être calculée par la relation :

$$R_s = \frac{V_b - V_d}{i_d} \dots \dots \dots (II.10)$$

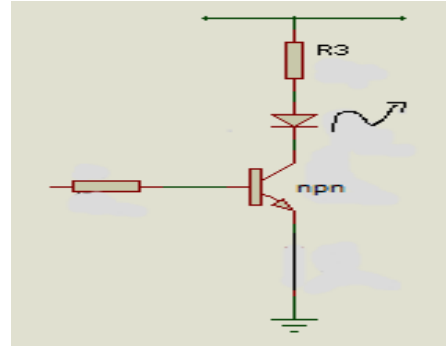
Où V_b est l'alimentation, V_d la tension à laquelle fonctionne la diode et i_d le courant désiré.

Dans le montage alternatif, une diode redresseuse est utilisée en parallèle sur la LED pour la protéger contre les tensions de polarisation inverse à partir desquelles se produit la destruction de la diode.

- Si on veut faire fonctionner la LED en pulsé (ON-OFF), ou si on veut moduler la sortie on utilise les circuits suivants :



a- Le transistor fonctionne en bloqué saturé



b- modulation ON-OFF

Figure II.10 : Autres Exemples de circuits

Dans le montage b, le transistor est polarisé de telle façon que le courant moyen dans la diode est environ la moitié de la valeur maximum, Le transistor et la LED sont donc polarisés dans leur région linéaire. Les variations du courant traversant la diode sont donc directement proportionnelles aux variations de la tension d'entrée V_{in} .

On peut enfin augmenter le gain β en utilisant un montage Darlington.

2.1.3 diodes infrarouge et diode laser :

o Principe d'émission ; effet laser :

Chaque électron dans les atomes et les molécules a un niveau spécifique discret d'énergie comme le montre la figure ci-dessous (théorie des bandes).

La transition des électrons entre les différents niveaux d'énergie est quelquefois accompagnée d'absorption ou d'émission de la lumière de longueur d'ondes λ donnée par :

$$\lambda = \frac{C}{f_0} = \frac{C}{|E_2 - E_1|/h} = \frac{1.2398}{|E_2 - E_1|} \dots \dots (II.11)$$

Où - C est la vitesse de la lumière.

- E_1 niveau d'énergie avant la transition.
- E_2 // // après la transition.

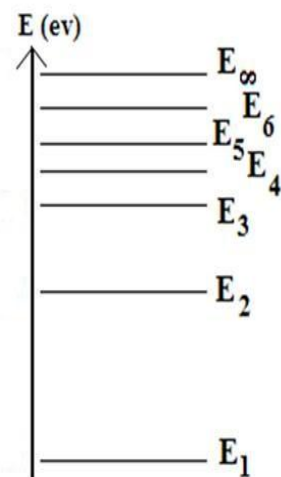


Figure II.11 : les niveaux d'énergie

- h constante de Planck.
- f_0 fréquence d'émission

Il y a 3 types de transition pour les électrons comme le montre la figure suivante :

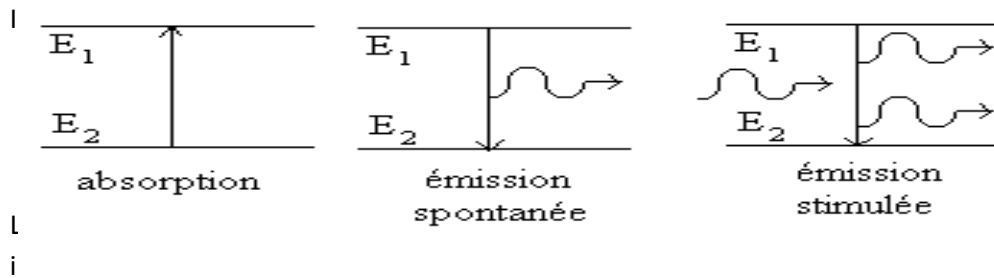


Figure II.12 : Types de transition pour les électrons

Il y'a d'abord ce qu'on appelle l'absorption par résonance ; l'électron subit la transition de l'état stable E_0 vers le niveau supérieur E_1 , à travers l'absorption de la lumière.

Ensuite on a l'émission spontanée : un électron transite de E_1 vers E_0 (niveau le plus stable). En même temps l'énergie de compensation $|E_1 - E_0|$ est émise sous la forme de lumière (LED, IRED). Puisque chaque électron dans le niveau E_1 transite indépendamment des autres, la lumière est émise aléatoirement et sans phase une telle lumière est dite une lumière incohérente, une des caractéristiques types de l'émission spontanée, A l'équilibre thermique, la probabilité de présence d'électron du niveau E_0 est plus grande que celle du niveau E_1 . De ce fait la transition $E_0 \rightarrow E_1$ des électrons par absorption de la lumière est plus fréquente. Pour émettre de la lumière, les électrons doivent exister dans E_1 avec une grande probabilité, phénomène connu sous le nom l'inversion de la population.

Enfin, la figure c montre l'émission stimulée : les électrons du niveau E_1 sont transférées d'office vers E_0 au moyen d'une lumière incidente. Cette transition donne naissance à un autre photon. Ce qui est remarquable c'est que le photon incident responsable de la transition, subsiste et continue sur la trajectoire avec la même fréquence, la même phase que le photon crée par ce que la lumière émise par émission stimulée se fait en résonance avec la lumière incidente, cette lumière est dite lumière cohérente (lumière laser, light amplification by stimulated emission of radiation)

L'émission stimulée nous suggère donc un moyen :

- D'amplifier le nombre de photons, donc la puissance de rayonnement.
- D'obtenir une lumière d'une grande cohérence.

Il est clair que si nous voulons amplifier la lumière, nous devons prévoir un système qui permette de renvoyer à l'entrée une fraction de la lumière émise qui à son tour, va provoquer la naissance nouveau photon (toujours avec la même fréquence la même phase et la même polarité) et un effet commutatif permet naissance (effet laser).cette contre-réaction optique confère au laser rôle d'oscillateur, de manière similaire à un circuit électronique. Dans un oscillateur électronique, un ampliateur accordé à une fréquence particulier est pourvu d'une contre réaction positive, et hors de la mise en marche, tout signal de bruit électrique de fréquence appropriée apparaissant à l'entrée sera amplifier. La sortie amplifiée est de nouveau dirigée vers l'entré à travers une contre-réaction et amplifiée davantage et ainsi de suite jusqu' à l'obtention d'une sortie stable vite atteinte d'ailleurs,

S'agissant du laser, la contre réaction positive est obtenue en plaçant le milieu amplificateur entre une paire de miroirs semi -réfléchissant qui forme une cavité optique de résonance : résonateur de PEROT - FABRY. Figure II.13

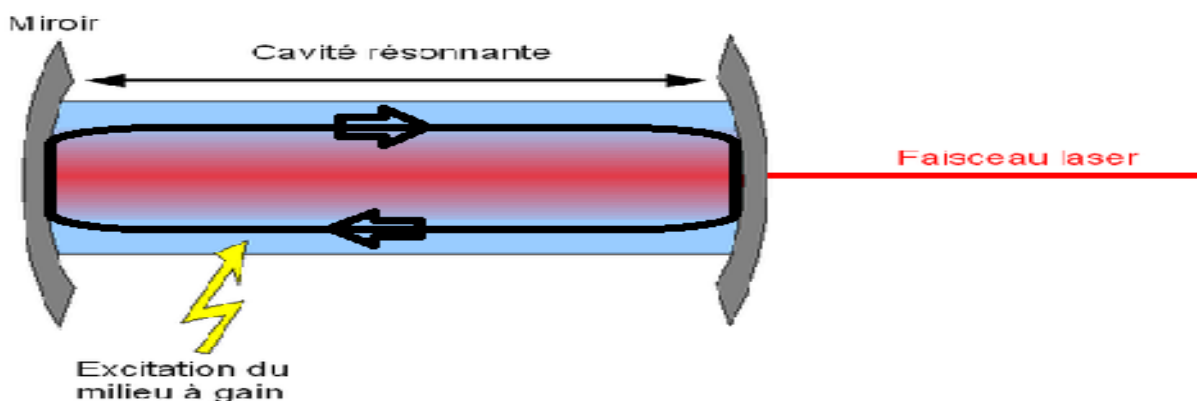


Figure II.13 : résonateur de PEROT - FABRY

La lumière incidente est amplifier par l'émission par stimulée, puis subit une réflexion ce qui l'amène à sa position initiale. Ce processus accompagne celui des pertes durant le trajet aller-retour du rayonnement (diffraction, absorption, distraction....) quand le taux de perte est supérieur au gain d'amplification, il se produit une atténuation de la lumière. Une injection de courant dans une diode laser par exemple permet de fortifier l'amplification et la condition pour laquelle on a égalité entre le gain et la perte constitue ce qu'on appelle le seuil (la lumière incidente= la lumière réfléchie) le laser oscille au-dessous de ce seuil quand le gain croit d'une façon signifiante

○ **IRED : structure et caractéristique :**

Le fonctionnement reste le même pour que celui d'une LED sauf que la lumière émise se situe dans l'infrarouge (non visible) et que ce sont des hétérojonctions, c'est-à-dire construites avec deux semi-conducteurs différents.

○ **Application des diodes infrarouge et du laser :**

- communication par fibres optique.
 - imprimantes laser
 - systèmes de disques mémoires optiques.
 - systèmes de mesures et de contrôle
 - facsimiles
 - focalisation des caméras
 - communication par fibres optique
- } LD
- } IRED

2.2 Capteurs optiques :

Généralement la sortie des capteurs optique est un courant : c'est donc la valeur et ses variations en fonction des divers paramètres qui serviront à spécifier les performances du capteur, avant de voir les différents capteurs associés aux sources lumineuses décrites antérieurement, on va d'abord définir les caractéristiques métrologiques propres aux capteurs optiques.

2.2.1 caractéristique métrologiques des capteurs optiques :

○ **1courant d'obscurité I_0 .**

C'est un courant qui est délivré en permanence par le capteur quand il est placé dans l'obscurité, c'est à dire en l'absence de lumière. Il a pour origine deux causes principales :

-Origine interne à la création due à la création de porteurs par excitation thermique

-une origine externe qui est le rayonnement thermique, à dominance infrarouge émis par l'environnement et qui étant reçu par le capteur y crée un courant par effet photoélectrique pourvu que le capteur soit sensible aux radiations considérées.

○ **Sensibilité S :**

Le flux du signal optique reçu par le capteur crée un courant d'origine photoélectrique I_p , qui s'ajoutant au courant d'obscurité I_0 détermine le courant I traversant le capteur :

$$I = I_p + I_0 \dots \dots \dots (II.12)$$

La sensibilité est donc S :

$$S = \frac{\Delta I}{\Delta \Phi} = \frac{\Delta I_p}{\Delta \Phi} \dots \dots \dots (II.13)$$

Unité : A/W ou A/lumen ou encore A/lux lorsque le flux est spécifié sous forme d'éclairement visuel.

Pour un capteur linéaire $\frac{\Delta I_p}{\Delta \Phi} = K \rightarrow I_p = K\Phi$ et $S=K=\frac{I_p}{\Phi} \dots \dots \dots (II.14)$

On distingue :

- La sensibilité spectrale $S(\lambda) = \Delta I_p / \Delta \Phi(\lambda)$ lorsque le capteur reçoit un rayonnement monochromatique.
- La courbe de la réponse spectrale est alors la variation de la sensibilité relative $S(\lambda)/S(\lambda_p)$ en fonction d'onde du pic, correspondant à la sensibilité spectrale maximal

Pour un capteur linéaire

$$S(\lambda) = \frac{I_p}{\Phi(\lambda)} \dots \dots \dots (II.15)$$

○ **Défectivité:**

La défektivité permet de caractériser le capteur par rapport à son bruit de fond et de qualifier son aptitude à détecter des signaux faibles.

Au niveau du bruit, on considère trois différentes sources :

- le bruit dû à l'agitation thermique des porteurs de charge.

$$\langle I_b R^2 \rangle = \frac{4kTB}{R} \dots \dots \dots (II.16)$$

- le bruit de grenaille qui est présent lorsqu'un courant traverse une barrière de potentiel.

$$\langle I_b S^2 \rangle = 2qIB \dots \dots \dots (II.17)$$

- le bruit de génération recombinaison des porteurs de charge.

2.2.2 Capteurs optiques:

- les différents types des capteurs optiques :

a).Photorésistance :

Certains composés, à l'instar du sulfure de cadmium (SCd,) possèdent la particularité physique d'avoir une résistance qui varie en fonction de l'éclairement reçu. La résistance vérifie les lois suivantes :

$$R = \frac{1}{\sigma} \cdot \frac{L}{A} \text{ et } R = a \cdot E^{-\gamma} \dots\dots (II.18)$$

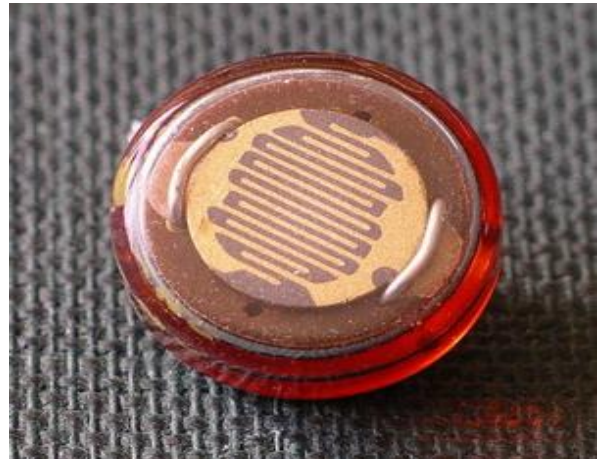


Figure II.14. Photorésistance

Avec

R la résistance du matériau

σ La conductivité du matériau qui dépend de l'éclairement reçu

L la largeur de la bande du semi-conducteur photosensible

A la surface de la bande du semi-conducteur photosensible

E l'éclairement a constante dépendant du matériau, de la température et du spectre du rayonnement

γ Constante généralement comprise entre 0.5 et 1

Or, la grandeur mesurée dans le cas d'une photorésistance est le courant de sortie. Il vérifie la loi d'Ohms $U=RI$ d'où :

$$I = \sigma \cdot \frac{A}{L} \cdot U \dots\dots\dots(II.19)$$

Afin d'optimiser le capteur et que le courant I soit assez important pour être mesuré, la surface A d'exposition du semi-conducteur doit être grande vis-à-vis de sa largeur de bande. Pour cette raison que le semi-conducteur est disposé en "serpentin".

○ Principales caractéristiques métrologiques

- Temps de réponse : Elevé (de l'ordre de quelques millisecondes).
- Puissance: De l'ordre d'une centaine de milli-Watts.
- Résistance d'obscurité : De l'ordre du Mega-Ohms
- Résistance en mode éclairé : De l'ordre de la dizaine du kilo-Ohms
- Température de fonctionnement: De -60 °C à +75 °C

○ Utilisation

Les photorésistances sont généralement employées dans les montages permettant de détecter des seuils d'éclairement:

- allumage de l'éclairage public
- flash automatique des appareils photos
- Détection d'intrusion
- Jouets divers...

b).Phototransistor :

Tous les transistors sont potentiellement des phototransistors. Pour éviter cet effet qui est généralement indésirable lorsque le transistor est utilisé en tant que composant électronique, il suffit de le recouvrir d'une paroi opaque. Dans le cas du phototransistor, la paroi est transparente. La base des transistors est le composant MOS (Métal Oxyde Semi-conducteur).



Figure II.15 : Phototransistor

Le MOS est constitué de 4 éléments :

- La source
- Le drain
- La grille
- Le substrat

La source et le drain sont constitués de semi-conducteurs très fortement dopés. La grille est constituée d'une couche isolante de très faible épaisseur surmontée d'une couche très conductrice. Le transistor MOS peut être assimilé à un interrupteur commandé en tension par sa grille, qui laisse passer un courant entre le drain et la source. Concrètement, ce courant est

créé par les charges accumulées sous l'isolant de la grille.

Remarque :

Les grilles doivent être constituées de matériaux transparents comme par exemple du Silicium très fortement dopé, le degré de transparence diminue dans le violet et l'ultraviolet pour des longueurs d'onde inférieures à 400nm.

○ **Caractéristiques**

Coût

Prix : À partir d'une dizaine de centimes d'euros.

Principales caractéristiques métrologiques

- La Sensibilité d'un phototransistor est cent fois plus élevée que celle d'une photodiode.
- Le Gain est élevé. En général, l'amplification en courant du phototransistor varie de 100 à 1000 et varie fonction de l'éclairement.
- Le temps de réponse est relativement long par rapport à celui des autres composants (de l'ordre de 1 à 30µs).

Utilisation

Les phototransistors sont utilisés dans les systèmes de commande et de régulation.(codeur optiques)

c).Photodiode :

Une photodiode correspond à une jonction PN, c'est-à-dire à un composant où deux semi-conducteurs sont mis en présence :

- Un semi-conducteur de type N : semi-conducteur à porteurs de charges négatifs (électrons) majoritaires.
- Un semi-conducteur de type P : semi-conducteur à porteurs de charges positifs (trous) majoritaires.

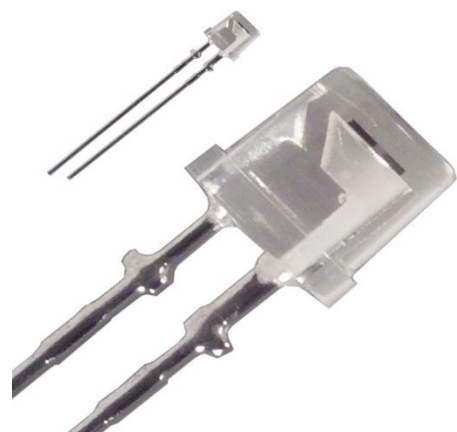


Figure II.16 : Photodiode

Une photodiode correspond à une jonction PN, c'est-à-dire à un composant où deux semi-conducteurs sont mis en présence :

- Un semi-conducteur de type N : semi-conducteur à porteurs de charges négatifs (électrons) majoritaires.
- Un semi-conducteur de type P : semi-conducteur à porteurs de charges positifs (trous) majoritaires.

De part et d'autre de la jonction d'un semi-conducteur se forme une zone dite **zone de déplétion** où le champ électrique est non nul et donc dénuée de porteurs libres. Cette zone de déplétion établit entre les deux éléments semi-conducteurs une barrière de potentiel.

Si aucune tension extérieure n'est appliquée, le courant à travers la jonction est nul puisqu'il correspond à la somme des courants dus aux porteurs majoritaires et minoritaires. La tension v_d appliquée à la jonction détermine le courant I qui la traverse :

$$I = I_o \cdot \exp\left(\frac{q \cdot v_d}{kT}\right) - I_o \dots\dots\dots(II.20)$$

En mode photoconducteur la diode est polarisée en inverse et le signal recueilli aux bornes d'une résistance R_m .

Soit $v_d < 0$; la tension inverse appliquée à la diode, le courant I_r qui la traverse est égal à :

$$I_r = -I_o \cdot \exp\left(\frac{q \cdot v_d}{kT}\right) + I_o + I_p \dots\dots\dots(II.21)$$

Avec I_p le courant d'origine photoélectrique créé dans la zone de déplétion par le flux.

$$I_p = \frac{q\eta(1-t)\lambda}{hc} \cdot \phi_0 \exp(-\alpha X) \dots\dots(II.22)$$

Le terme exponentiel correspondant devient négligeable pour une tension inverse suffisante.

Le courant mesurer en sortie de la photodiode est alors donné par l'expression :

$$I_r = \frac{E_s}{R_m} + \frac{v_d}{R_m} \dots\dots\dots(II.23)$$

○ **Caractéristiques**

Coût

Le prix est variable de un euro à quelques centaines d'euros suivant les modèles.

Principales caractéristiques métrologiques

- Longueur d'onde typique : 365nm; 436nm; 440nm; 470nm; 525nm; 550nm; 560nm; 565nm; 580nm; 650nm; 660nm; 740nm; 760nm; 800nm; 820nm; 850nm; 880nm; 890nm; 900nm; 920nm; 925nm; 930nm; 935nm; 940nm; 950nm; 960nm. (Suivant le matériau photosensible utilisé et le filtrage ou non sur certaines longueurs d'ondes).
 - **Sensibilité** : De 0.1 à 1 Ampères/Watts
 - **Courant d'obscurité** : 10^{-8} à 10^{-10} W.
 - **Bande passante** : D'une dizaine de kilohertz à une trentaine de Gigahertz.
 - **Température de fonctionnement** : De -55 °C à 75 °C.
 - **Temps de réponse** : 10^{-12} s.
 - **Bruit de fond** : 10^{10} à 10^{13} cm Hz^{1/2} W⁻¹
 - Utilisation
-

La photodiode est le capteur optique le plus utilisé. Elle est présente dans les pyromètres optiques, les détecteurs de mouvements, de déplacements,...

d). Photomultiplicateur :

Le photomultiplicateur est basé sur le principe de la photo multiplication. Quand la lumière pénètre dans le tube et frappe la photocathode, des photoélectrons sont arrachés et émis dans l'enceinte sous vide du tube. Ces électrons sont attirés vers des électrodes secondaires (dynodes) portées à un potentiel supérieur. Le choc mécanique entre les électrons et chaque dynode crée des électrons secondaires qui sont émis sur chacune de ces dynodes. Le signal d'entrée est ainsi amplifié et apparait en sortie sur l'anode. Soit i_k le courant de cathode et i_a le courant d'anode.

i_a est donné par la relation :

$$i_a = G \cdot i_k \quad (G = \delta \cdot n) \dots \dots \dots (II.24)$$

Avec :

G : est le gain du Photomultiplicateur.

δ : est le coefficient d'émission secondaire sur chaque dynode

n : est le nombre de dynodes

Caractéristiques

Coût

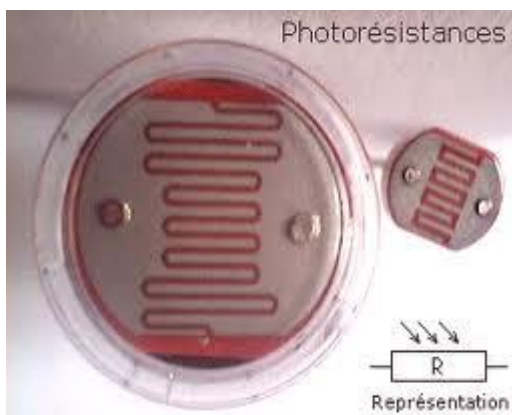
Prix : élevé (A partir de 700 euros jusqu'à plusieurs milliers d'euros suivant les composants).

Principales caractéristiques métrologiques

- Rapidité élevée.
- Bruit faible.
- Sensibilité élevée.
- Domaine d'utilisation élevé.

Utilisation

- Spectroscopie uv, visible et infrarouge
- Fluorescence X
- Spectrophotométrie Raman
- Diffractométrie X
- **Etude détaillée du capteur photo-conductif : (photorésistance)**



Si l'on éclaire un semi-conducteur, on constate que sa conductivité augmente considérablement. L'action des photons produit sur un semi-conducteur du type N, un transfert d'électrons qui sont introduits dans la bande de conduction. Il y a une augmentation de la conductibilité. Ce phénomène est appelé photoconduction.

Une photorésistance utilise cette propriété. Elle est constituée d'une plaquette isolante sur laquelle on dépose un semi-conducteur dopé.

Dans l'obscurité, la résistance de l'élément est très élevée. Dès qu'il est éclairé, la résistance diminue en fonction de l'éclairement.

Caractéristiques des LDR :

Cellules au sulfure de cadmium (CDS, couleur marron)

Sensibilité spectre maximale à 575 nm

(400 < visible < 800 nm).

Résistance d'obscurité : 100 M

Résistance d'éclairement : 0.3 k à 1000 lux.

Le temps de réponse : 10 à 30 ms.

Cellules au sulfoséléniure de cadmium (CDSE)

Sensibilité spectre maximale à 600 nm

Résistance d'obscurité : 100 M

Résistance d'éclairement : 0.3 k à 1000 lux.

Le temps de réponse : 10 à 20 ms.

Cellules au sulfure de plomb (PBS)

Sensibilité spectre maximale à 1800 nm ou 2500 nm (Infrarouge)

Résistance d'obscurité : 1 M

Résistance d'éclairement : 0.8 k à 1000 lux.

Le temps de réponse : 0.1 à 0.25 ms.

Applications analogiques

- Contrôle de l'exposition photo
- Mise au point automatique Diapositive - double cellule
- Machines de photocopie - la densité de toner
- Équipement de test colorimétrique
- Densitomètre
- Les balances électroniques portables à double
- Contrôle automatique de gain - la lumière modulée source
- Miroir automatisé Vue arrière

Applications numériques

- Variateur automatique des phares
- Contrôle Night Light
- la flamme du brûleur d'huile Out
- Éclairage de contrôle
- Absence / présence (faisceau disjoncteur)

CARACTÉRISTIQUES

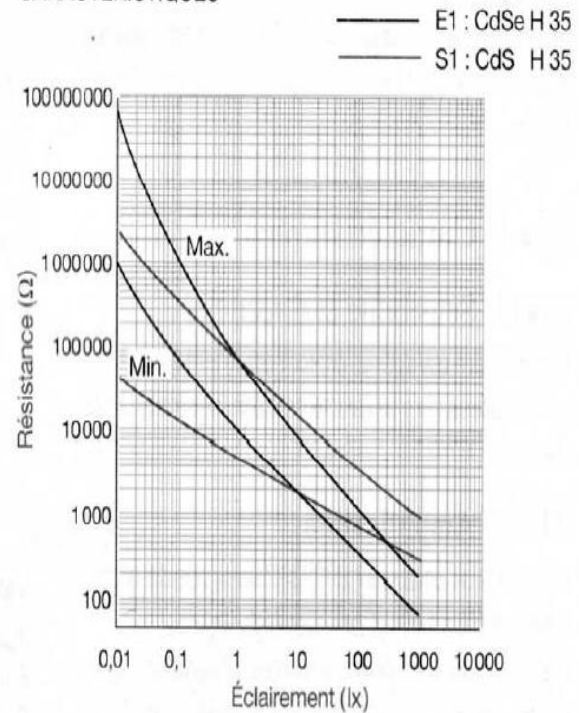


Figure II.17 : Caractéristique de la photorésistance

Chapitre 3 : REGULATION & CONTROLEURS

Un système est dit automatique lorsqu'il accomplit une fonction bien déterminée sans nécessiter l'intervention de l'homme. Donc automatiser c'est transformer un système de façon que l'intervention de l'homme soit réduite en employant des appareils ou dispositifs automatiques.

L'objectif d'une régulation ou d'un asservissement automatique d'un procédé est de le maintenir le plus près possible de son optimum de fonctionnement, prédéfini par un cahier des charges (conditions ou performances imposées). Les aspects de sécurité du personnel et des installations sont à prendre en compte comme ceux concernant l'énergie et le respect de l'environnement.

Le cahier des charges définit des critères qualitatifs à imposer qui sont traduits le plus souvent par des critères quantitatifs, comme par exemple, de stabilité, de précision, de rapidité ou de lois d'évolution

3.1 Système de contrôle :

Un système de contrôle regroupe l'ensemble des moyens matériels et techniques mis en œuvre pour maintenir automatiquement une grandeur physico-chimique parmi les grandeurs de sortie du procédé (Grandeur réglée), égale à une valeur désirée appelée consigne, quelles que soient les entrées du procédé non commandables ou perturbations. Figure III.1

Lorsque des perturbations ou un changement de consigne se produisent, la régulation automatique provoque une action correctrice sur une autre grandeur physique, parmi les grandeurs d'entrée du procédé (grandeur réglante), afin de ramener la grandeur réglée vers sa consigne initiale (cas de perturbations) ou vers sa nouvelle consigne.

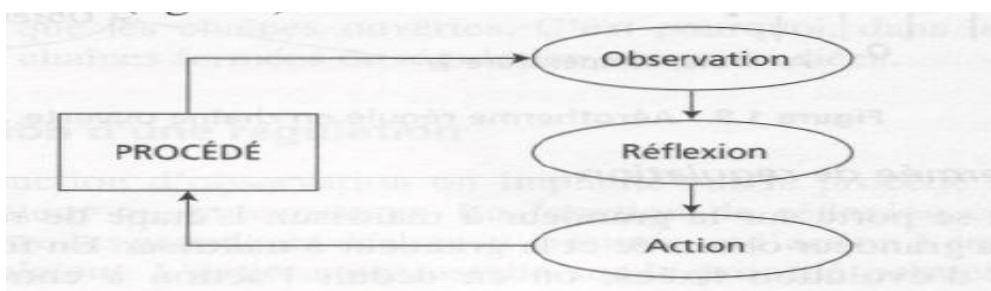
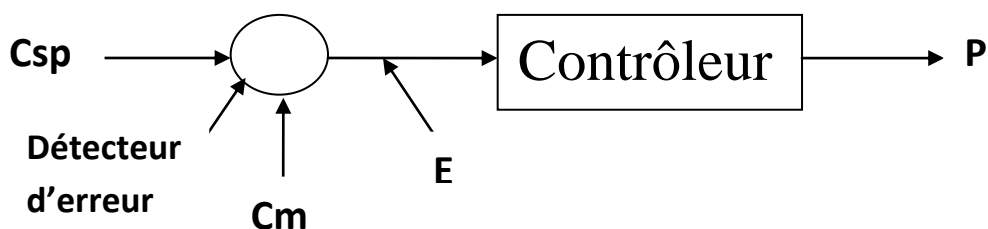


Figure III.1 : Système de contrôle

3.2 Paramètres d'un système de contrôle :

3.1.1 L'erreur :

Les propriétés générales d'un contrôleur sont résumées dans la figure.III.2 :



-Figure.III.2- : Propriétés Générales d'un contrôleur

Tel que :

P : Sortie donnant le signal de commande a l'élément de contrôle final

$E = |C_m - C_{pm}|$ = Signal d'erreur

C_m : Signal de mesure

C_{sp} : Point de fonctionnement (Consigne)

Généralement, l'erreur de mesure E est exprimée dans la même unité que celle signal mesuré C_m .

En contrôle industriel, on a l'habitude d'exprimer cette erreur par rapport a l'étendue de mesure EM de la variable contrôlée car celle-ci est plus utile et plus significative en termes de précision, Ce rapport est exprimé en% de l'EM sous la forme suivante :

$$E_p = \left| \frac{C_m - C_p}{C_{max} - C_{min}} \right| \cdot 100 \dots \dots \dots (III.1)$$

C_{max} =valeur maximale de la variable contrôlée

C_{min} =valeur minimale de la variable contrôlée

3.1.2 Plage de variation de la variable dynamique :

Généralement, la variable sous contrôle fluctue dans une plage dans laquelle le contrôle doit être maintenu. Cette plage peut être exprimée pour une valeur minimale et maximale \pm la fluctuation possible autour de cette valeur nominale

Si un ordinateur contrôle la boucle, alors la traduction est telle que la valeur minimale de la variable contrôlée correspond a 000.....0 et à valeur maximale à 111.....1.

3.1.3 Plage de contrôle :

Un autre paramètre important des contrôleurs est la plage de contrôle, ici nous supposons que L'élément de control final que commande le contrôleur est caractérisé par un effet minimum et maximum sur l'état du processus, La plage de sortie du contrôleur doit donc être une traduction de ces deux effets .Ainsi dans le cas d'un processus contrôlé par ordinateur, tous les « 0 » représente la valeur minimale du signal de commande et tous les

« 1 » les valeurs maximales. Cependant ces nombre ne représentent pas nécessairement le minimum ou le maximum de l'élément de control final.

Pr exemple, si le contrôleur commande une vanne (contrôle d'un fluide) nous pouvons souhaiter que l'effet minimum de la vanne sur le débit du fluide ne sont pas tout à fait zéro (autrement dit que la vanne n'est pas totalement fermée). Alors les « 0 » du signal de commande à la sortie de l'ordinateur peuvent signifier un certain pourcentage par rapport à la pleine ouverture de la vanne (effet maximum de la vanne sur le débit est représenté par des « 1 »).

En contrôle industriel, on exprime souvent les plages de contrôle sous forme d'un pourcentage o 0% est la sortie minimale du contrôleur et 100% la sortie maximale. Elle est donnée par :

$$P = \left[\frac{Sp - Smin}{Smax - Smin} \right] \cdot 100 \dots \dots \dots (III. 2)$$

3.1.4 Retard sur le contrôle :

C'est le temps mis par la boucle de contrôle pour effectuer les ajustements nécessaires (modification du signal de commande) à l'élément de control final lorsque les variables dynamiques qui caractérisent le processus vont brusquement dévier de leurs valeurs nominale

3.1.5 Temps mort :

Ce paramètre désigne la durée écoulée pendant laquelle le contrôleur n'émet aucune nouvelle réponse pour l'élément de contrôle final lorsque la variable viens brusquement a varier. Il dépend fortement des caractéristiques physiques du processus contrôlé. Ainsi la variation d'un débit d'un fluide coulant dans un tuyau très long ne peut d'effectuer que le temps nécessaire au fluide pour parcourir cette distance soit écoulée

3.3 Technique de régulation

Pour réaliser la fonction et mesurer, l'action à entreprendre est assurée par le régulateur. L'actionneur installé sur le procédé permet évidemment d'agir sur la grandeur incidente

choisie du point d'observation en implantant sur le procédé un organe de mesure appelé capteur ou transmetteur .La fonction de réflexion consiste à calculer l'écart entre les grandeurs désirées et mesurées, , L'actionneur installé sur le procédé permet évidemment d'agir sur la grandeur incidente choisie du procédé. Le procédé ainsi équipé sera par la suite appelé procédé instrumenté ou encore système. La chaîne fermée de régulation ainsi contrôlée se représente par un schéma appelé schéma fonctionnel

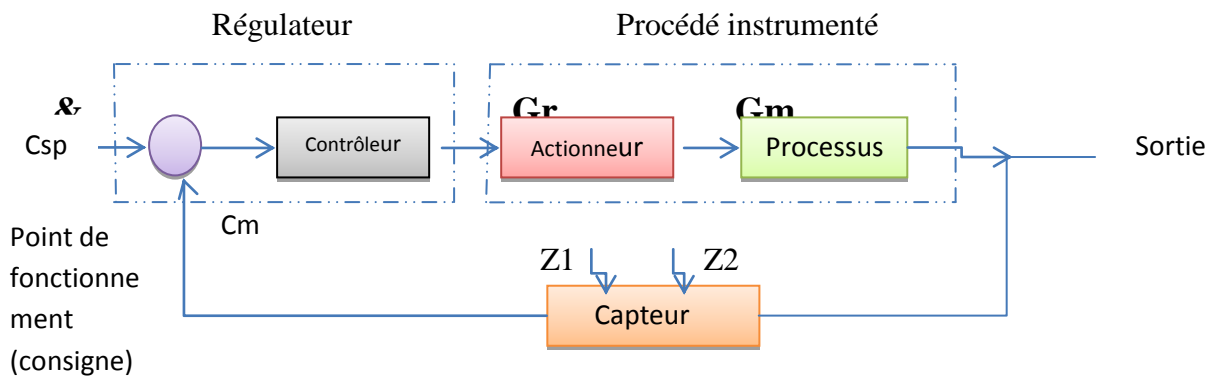


Figure III.3.Schéma fonctionnel

Les éléments constructifs d'une chaîne fermée de régulation peuvent être déclinés en deux catégories :

- Les éléments fonctionnels :

Ils sont représentés par des rectangles.

Le régulateur comprend le soustracteur (ou comparateur) et le correcteur

Le soustracteur reçoit la consigne et le signal de mesure dont il effectue la différence. Les résultats de cette différence est appelée écart (ou erreur)

Le correcteur est chargé d'élaborer un signal de commande à partir de l'écart constaté afin d'obtenir les performances fixées par le cahier de charge (stabilité, Précision, Rapidité...)

L'actionneur est commandé par le signal de commande provenant du régulateur. C'est l'organe de puissance de la chaîne de régulation. Il agit sur la grandeur réglante du procédé pour modifier la grandeur physique à maîtriser.

Le capteur (Ou transmetteur) élabore la mesure de la grandeur à maîtriser et la transmet au régulateur.

- Les grandeurs et signaux d'informations :

Ils sont représentés par des flèches

- La consigne notée C_{sp} : C'est la valeur désirée pour la grandeur à maîtriser
- La mesure de la grandeur à maîtriser ; C_m
- L'écart e ou l'erreur entre la consigne et la mesure : $e = C_m - C_{sp}$
- Le signal de commande ou l'ordre correcteur
- La grandeur réglante G , est la grandeur incidente choisie pour ses caractéristiques de rapidité d'action, de souplesse d'utilisation et de son importance d'influence
- La grandeur à maîtriser est notée G_m
- Les grandeurs incidentes Z_1 et Z_2 non contrôlées sont les grandeurs perturbatrices appelées perturbations.

Il existe trois types de régulateurs :

3.3.1 Régulateurs purement analogiques

Ce sont les régulateurs mécaniques, pneumatiques, électroniques à base d'amplis opérationnels. Ces techniques, encore très répandues dans l'industrie, tendent à disparaître au profit des techniques numériques.

3.3.2 Régulateurs numériques de type analogique

Ce sont la plupart des régulateurs de tableau. Ils fonctionnent à fréquence d'échantillonnage élevée (période de 100 à 200 ms) quel que soit le processus. Les algorithmes sont simples (essentiellement des PID) et n'utilisent pas les potentialités des algorithmes avancés de l'automatique. Leur comportement est calqué sur celui des régulateurs analogiques. Cependant, grâce aux microprocesseurs, des fonctions additionnelles (autoréglage, auto adaptatif, auto calibration, autotest, etc.) ont pu être rajoutées par rapport aux régulateurs analogiques.

3.3.3 Régulateurs purement numériques

Ces régulateurs sont en général mis en œuvre sur calculateur industriel, automate ou régulateur de tableau haut de gamme. La fréquence d'échantillonnage est choisie en

fonction de la bande passante du procédé continu. La capacité de calcul permet d'implémenter des algorithmes plus complexes qu'un PID. Le régulateur est évolutif. Changer de stratégie ou le traitement des mesures, revient à modifier le programme contenu en mémoire sans changer le matériel.

3.4 Principe des contrôleurs:

On distingue deux modes de contrôle :

3.4.1 Le mode de contrôle discontinu :

C'est un mode où la sortie du contrôleur varie d'une façon abrupte lorsque le signal d'erreur E_p vient à changer ; Parmi ces modes On trouve le mode ON-OFF (deux positions), le mode multipositions (le plus répandu est le contrôle à 3 positions) et le contrôle flottant.

○ Mode à deux positions :

Le mode de contrôle le plus élémentaire est celui du mode à deux positions ON-Off, C'est le plus Simple et le moins cher ; Bien qu'une équation analogique ne peut pas être écrite, nous pouvons dire que :

$$P(\%) = \begin{cases} 100\% & \text{Pour } E_p > 0 \\ 0\% & \text{Pour } E_p < 0 \end{cases}$$

Cette relation montre que lorsque le signal de mesure dépasse le point de fonctionnement, la sortie du contrôleur est au maximum (100%) et l'inverse (0%).

○ Mode multipositions :

Ce mode fait passer la sortie du contrôleur par plusieurs états au lieu de deux, ce mode permet de réduire l'oscillation de l'erreur autour de 0, Ce mode est représenté par :

$$P = P_i \quad \text{Pour } E_p > |E_i| \quad \text{Avec } i = 1, 2, \dots, n$$

Quand l'erreur dépasse la limite $\pm E_i$, la sortie du contrôleur est ajustée pour appliquer la valeur P_i .

Le mode le plus commun est celui de trois positions :

$$P_i = \begin{cases} 100 & \text{si } E_p > E_1 \\ 50 & \text{si } E_1 < E_p < E_1 \\ 0 & \text{si } E_p < -E_1 \end{cases}$$

- Mode flottant :

Dans ce mode la sortie du contrôleur n'est pas uniquement déterminée par la valeur de l'erreur ; Si l'erreur est 0, la sortie ne change pas (flotte) quel que soit l'entrée évoluant vers la valeur nulle ; quand l'erreur s'éloigne du zéro, la sortie du contrôleur commence à changer quand l'erreur soit d'une bande $2\Delta E_p$

3.4.2 Le mode de control continue :

- Mode de control proportionnel :

Le rôle de l'action proportionnelle est d'accélérer la réponse de la mesure, ce qui a pour conséquence de réduire l'écart entre la mesure et la consigne.

Dans ce type de contrôle, il existe une relation graduelle et linéaire entre la sortie du contrôleur et l'erreur, Ainsi, dans une plage d'erreur autour du point de fonctionnement, chaque valeur de l'erreur lui est associé une valeur unique a la sortie du contrôleur

La plage convient une variation de 0% à A100% ;La sortie du contrôleur est appelée BANDE PROPORTIONNELLE.

Ce mode peut être représenté par :

$$P = K_p E_p + P_0 \dots \dots \dots (III.3)$$

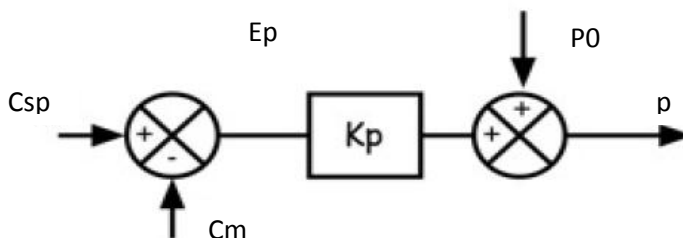


Schéma fonctionnel d'une régulation proportionnelle

Figure III.4

Ou : K_p : Constante de proportionnalité entre l'erreur et la sortie du contrôleur(%)

P_0 : Sortie du contrôleur lorsque l'erreur est nulle

○ Action inverse :

L'équation précédente peut être utilisée aussi bien pour une action directe ou inverse .Dans le cas de l'action inverse, la correction $K_p E_p$ est soustraite de P_0 , autrement dit K_p est négatif.

La sortie du contrôleur pour des erreurs dépassant la bande proportionnelle se sature soit à 100% ou 0% dépendant du signe de l'erreur, La figure (III.5) illustre la situation dans le cas d'une action inverse ($K_p < 0$.)

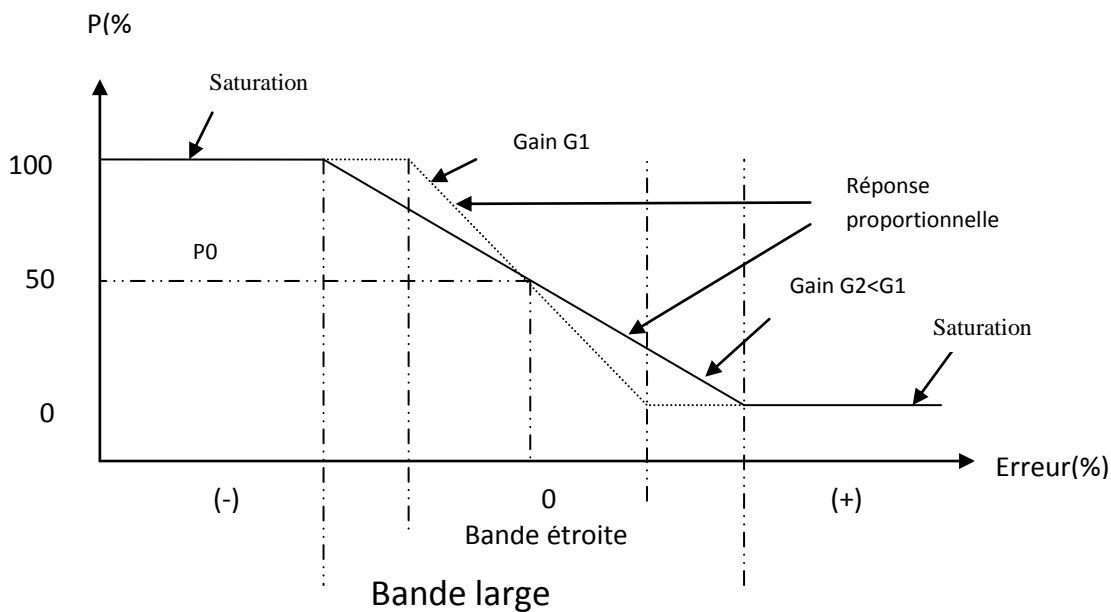


Figure III.5 :action inverse

On observe que la constante de proportionnalité K_p détermine la bande proportionnelle

La valeur de P_0 est souvent prise à 50% ; afin que la sortie du contrôleur peut fluctuer autour de cette valeur de la même quantité (+) ou (-) par rapport au point d fonctionnement.

En générale, on définit la bande proportionnelle par :

$$BP = \frac{100}{K_p} \dots \dots \dots (III.4)$$

- Offset :

Une importante caractéristique du mode de contrôle proportionnel est s'il produit une erreur résiduelle permanente par rapport au point de fonctionnement quand un paramètre qui caractérise le processus viens à changer. Cette erreur est appelée offset et peut être minimisé en prenant une grande constante K_p , ce qui réduit la bande proportionnelle PB. Pour comprendre l'existence de cette erreur résiduelle, supposons un processus a charge nominale (tous les paramètres ont une valeur nominale) tel que $E_p = 0\%$ et $P(\%) = 50$, si la valeur d'un paramètre viens a changer (variation de charge) , la sortie du contrôleur va varier de manière à neutraliser cette erreur transitoire (qui ne dure pas). Si cependant un changement de charge reviens un changement permanent a la sortie du contrôleur pour annuler l'erreur, il est clair que ce nouvel état ne peut jamais être atteints. Cependant le système produit une légère déviation (offset) pour atteindre à la sortie du contrôleur une position de compromis pour faire face à la nouvelle situation née du nouveau changement de charge.

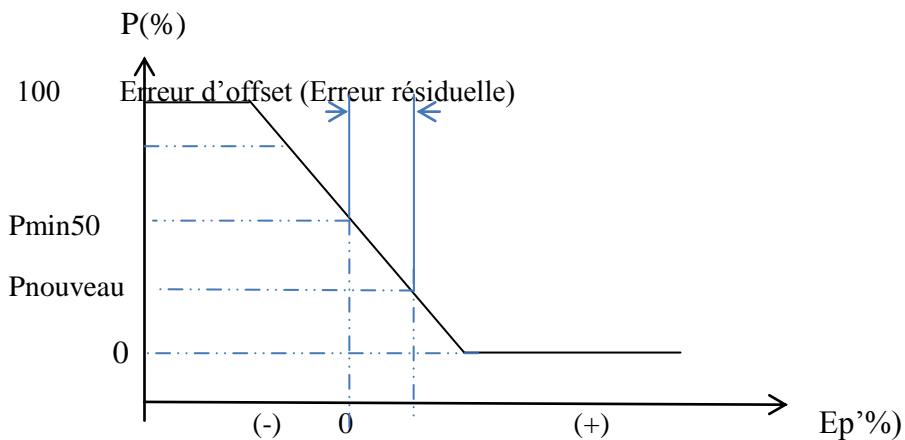


Figure III.6: l'offset

- Application :

L'erreur d'offset limite l'emploi du mode proportionnel a quelques cas seulement, particulièrement ceux pour lesquelles une remise à zéro manuelle est possible pour éliminer cette erreur, le contrôle proportionnel est généralement utilisé pour des processus dont les changements de charges importantes ne sont pas souhaités. Ou caractérisés par des temps de réponse petits.

Ainsi, si le temps de réponse est court, la bande proportionnelle peut devenir très étroite (K_p grand) ce qui réduit l'erreur d'offset, si la PB devient très petite, le mode proportionnel se comporte alors comme discontinu ON, OFF précédemment étudié, comme ce dernier est caractérisé par une oscillation entre des points de fonctionnement de la sortie du contrôleur, on peut conclure que le mode proportionnel peut causer des oscillations si on choisit un K_p très grand.

○ *Mode de contrôle intégral :*

Le rôle de l'action intégrale est **d'annuler l'écart** entre la mesure et la consigne. Le signal de sortie du régulateur en intégrateur seul est **proportionnel à l'intégrale** de l'écart mesure-consigne.

L'action intégrale est généralement associée à l'action proportionnelle.

Comme dans le cas de l'action proportionnelle, une augmentation excessive de l'action intégrale (diminution de T_i) peut être source d'instabilité. L'étude de l'action intégrale sur un système stable est donnée par les figures suivantes pour un test en asservissement et un autre en régulation.

Le comportement de l'action intégrale sur un procédé instable, est sensiblement le même que sur un procédé stable. Il faut noter que **l'action intégrale est nécessaire pour annuler l'écart, suite à des perturbations**. Lors de changement de consigne,

Son intérêt est moindre car l'écart s'annule naturellement du fait que le procédé est lui-même intégrateur. Dans ce cas l'action intégrale donne une réponse plus rapide qu'en régulation à action proportionnelle seule.

• **Principe de l'action intégrale:**

Ce mode est une extension du mode flottant étudié plus haut, lorsque les changements de la sortie et de l'entrée se produisent ; Au lieu d'avoir une vitesse unique, ou même multiple nous avons un changement continu en vitesse et qui dépend de l'erreur.

Nous pouvons représenter ce mode analytiquement par :

$$\frac{dP}{dt} = K_i E_p \dots \text{(III.5)}$$

Avec :

$\frac{dP}{dt}$: Taux de variation (ou vitesse de variation) de la sortie du contrôleur (%/s)

K_i : Constante liant le taux de variation à l'erreur (%/s/%)

L'inverse de K_i est appelé temps d'intégration T_i noté :

$$T_i = \frac{1}{K_i} \dots\dots\dots \text{ Exprimé en seconde ou minute}$$

Si nous intégrant l'équation (III.5), on obtient :

$$P(t) = \int_0^t K_i E_p(t) dt + P(0) = K_i \int_0^t E_p(t) dt + P(0) \dots\dots\dots (III.6)$$

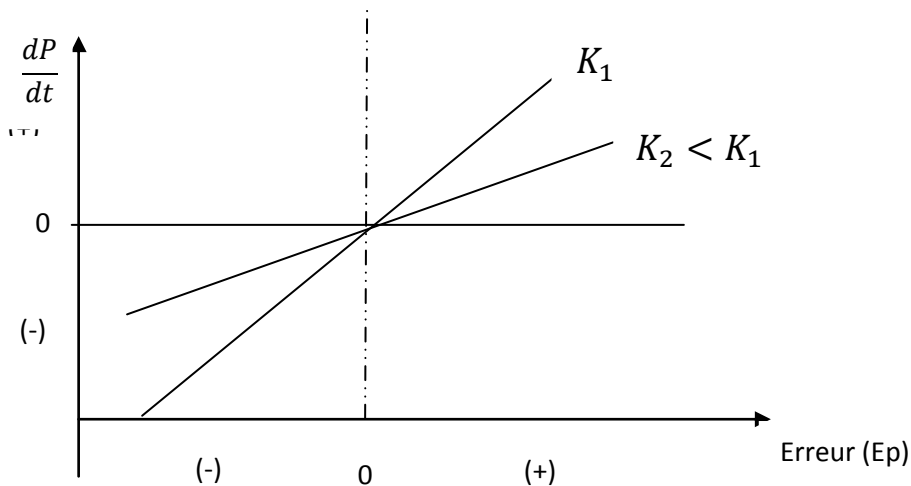
Ou :

$P(0)$: la sortie du contrôleur à $t=0$.

L'équation (2) montre que la sortie du contrôleur dépend de l'historique des erreurs à partir du temps initial d'observation $t=0$.

La relation (1) nous montre également que si l'erreur double par exemple, le taux de variation $\frac{dP}{dt}$ double aussi, la constante K_i rend compte de cette dépendance $\frac{dP}{dt}$ et E_p

Ainsi, une grande valeur de K_i signifie qu'une petite erreur E_p produit un grand taux de variation à la sortie du contrôleur et vis-versa .La figure (III.7) illustre cette dépendance :



(a): $\frac{dP}{dt} = f(K_i)$

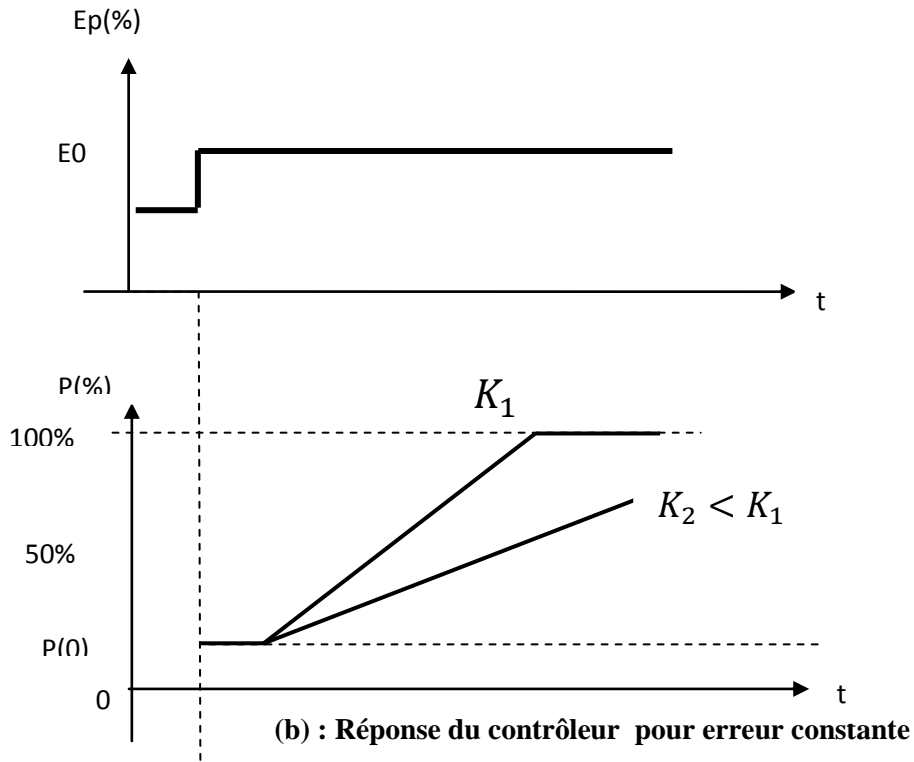


Figure III.7

- Mode de control a action dérivée :

Ce mode ne peut pas être utilisé seul, car si $E_p=0$ ou constante, La sortie du contrôleur est nulle. L'expression analytique est :

$$P=K_D \frac{dE_P}{dt} \dots\dots\dots(III.7)$$

Ou $::K_D$:Constante de proportionnalité du mode dérivé (%/%/s=s)

$\frac{dE_P}{dt}$: Taux de variation de l'erreur (%/s)

La constante de gain dérivé est aussi appelé taux de la dérivée temporelle et est exprimé généralement en minute ; Le graphe $P(\%)=f(\frac{dE_P}{dt})$ de ce mode est illustré dans la figure III.8

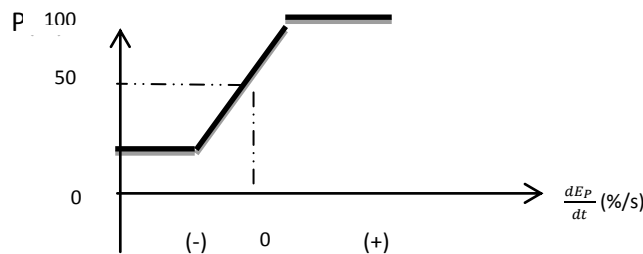


Figure III.8

On voit donc que la sortie P(%) du contrôleur dépend du taux de variation de l'erreur et non de la valeur de l'erreur elle-même.

Ce graphe montre que pour un taux de variation $\frac{dE_P}{dt}$ donné, il y'a une valeur unique à la sortie du contrôleur, La figure III.9 montre le comportement du contrôleur en fonction du temps pour un signal d'erreur dont la variation est arbitrairement choisie

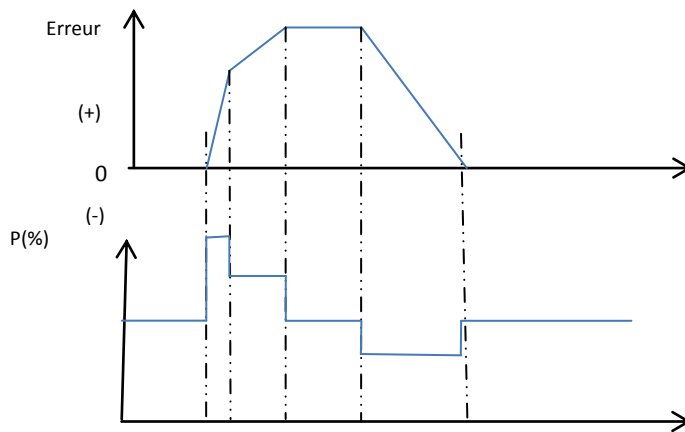


Figure III.9

- Mode de control composite :

Généralement, dans les systèmes complexes, il est rare de trouver des applications ou l'utilisation d'un seul mode suffit, Le plus souvent on combine plusieurs modes pour tirer le maximum d'avantages offerts par chacun d'eux tout en éliminant les inconvénients de chaque mode individuel .Nous allons donc passer aux principaux modes combinés, dits modes composites.

- Contrôle proportionnel-Intégral :

L'expression analytique de ce mode est :

$$P=K_P \cdot E_P + K_P K_I \int_0^t E_P \cdot dt + P_I(0).....(III.8)$$

Ou :

$P_I(0)$: est le terme intégral a t=0 (valeur initiale)

Le principal avantage de ce mode est qu'il tire profit a la correspondance directe entre la sortie du contrôleur et l'erreur (mode proportionnel) et le mode intégral élimine l'erreur d'offset vu en mode proportionnel.

Le gain proportionnel comme le voyons dans l'équation(10) change le gain net du mode intégral, mais le gain du mode intégral a travers K_I , peut être ajusté indépendamment.

Ce mode permet donc d'atteindre une nouvelle sortie du contrôleur tout en assurant une erreur nulle (annulation de l'offset), ce qui est impossible à réaliser avec le mode proportionnel seul.

La figure III.10 illustre ce mécanisme ou en temps $t=t_1$ suivant un changement de charge entraînant une erreur de la forme donnée sur la figure.

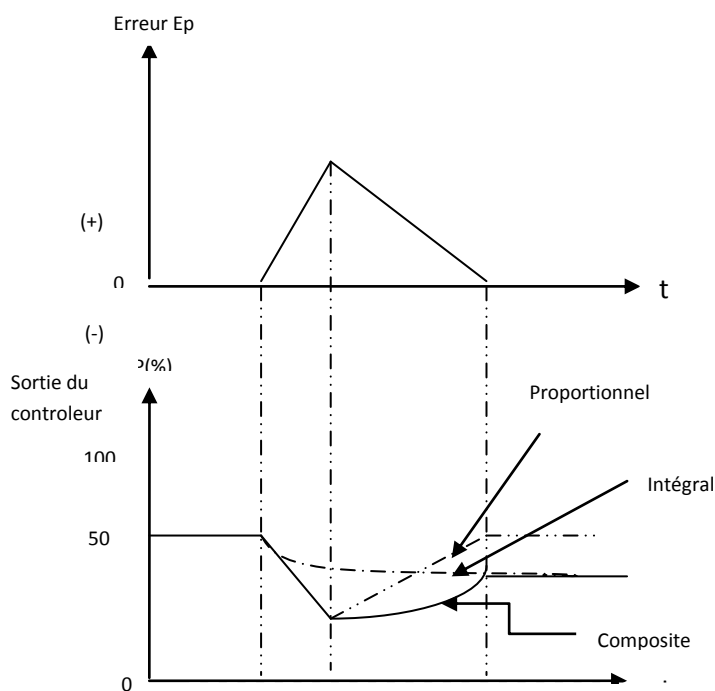


Figure III.10 (action inverse)PI

○ Application :

De par sa capacité à annuler l'erreur d'offset, ce mode convient bien à des systèmes caractérisés par les grands changements de charges. Ce pendant à cause du temps d'intégration, la précision doit présenter des variations de charge relativement lents pour présenter les éventuelles oscillations induits par l'over shoot intégral.

○ Contrôle proportionnel-Dérivée :

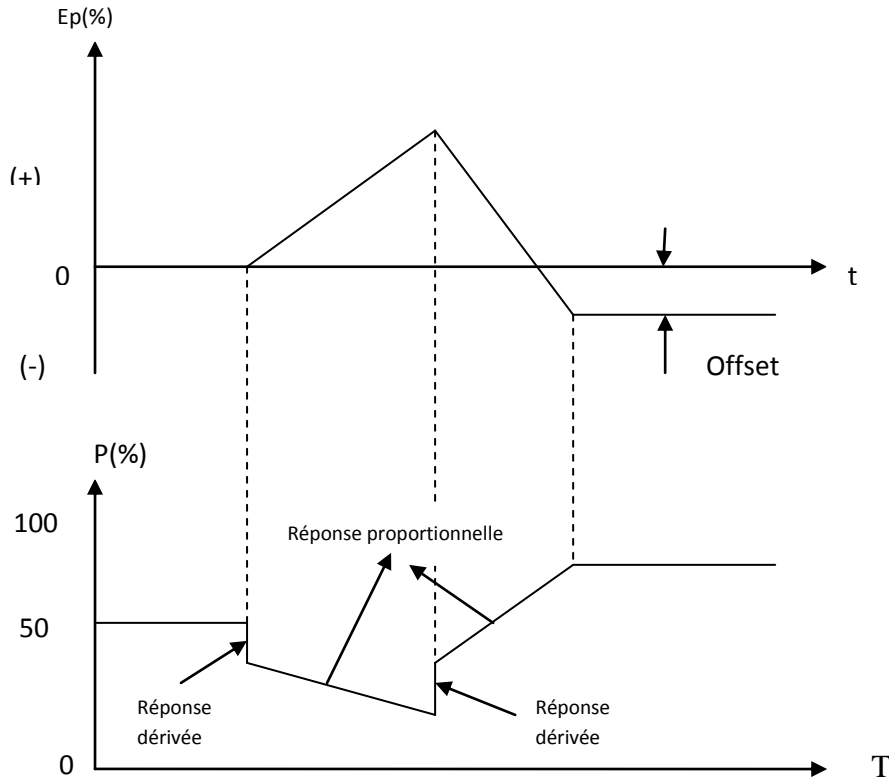
Un second mode de combinaison est la mise en cascade de l'action proportionnelle et de l'action dérivée (PD). Ce mode a de nombreuses applications industrielles.

Il peut être exprimé par l'expression analytique suivante :

$$P = K_P \cdot E_P + K_P \cdot K_D \frac{dE_P}{dt} + P_0 \dots\dots\dots(III.9)$$

Il est clair que ce système ne peut pas éliminer l'erreur d'offset du mode proportionnel, Il peut cependant convenir a des rapides variations de charge tant que l'erreur d'offset induite par ce changement est tolérable

Un exemple pour une hypothétique variation de charge est donné sur la figure III.11 :



FigureIII.11. (action inverse)

○ **Contrôleur PID (Combinaisons des trois modes) :**

Un des plus puissant mais complexe mode de contrôle combine le mode proportionnel, intégral et dérivée. Ce système peut être utilisé pour n'importe quelle condition d'un processus virtuel

L'expression analytique est :

$$P = K_P \cdot E_P + K_P K_I \int_0^t E_P \cdot dt + K_P \cdot K_D \frac{dE_P}{dt} + P_I(0) \dots(III.10)$$

Ce mode élimine l'erreur d'offset du mode proportionnel (terme intégral) tout en assurant une réponse rapide (mode dérivée), La figure III.12 montre un exemple de réponse du contrôleur PID par une hypothétique erreur.

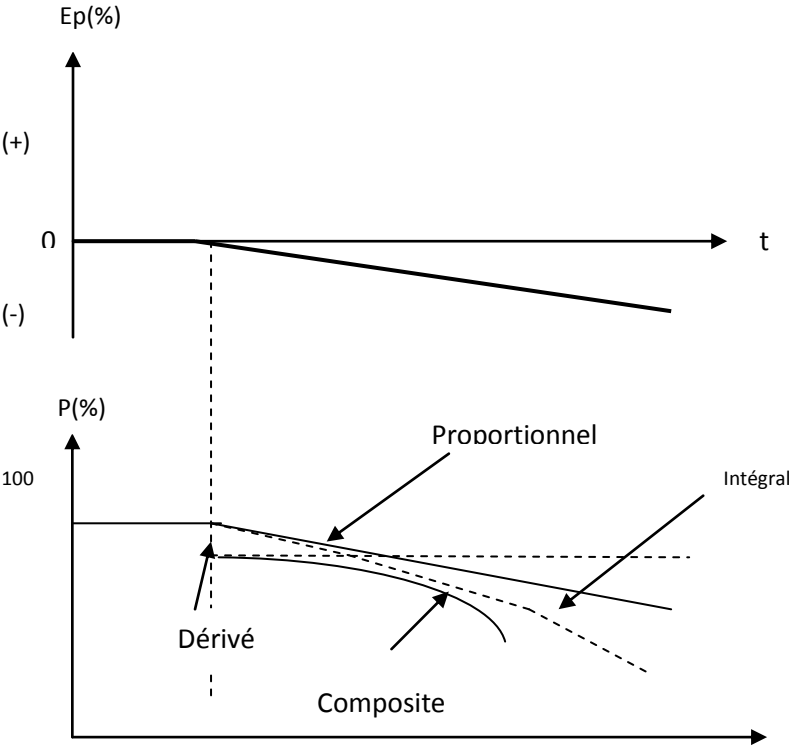


Figure III.12 PID

Chapitre 4 : Etude pratique de la boucle

4.1 Etude pratique de la boucle :

4.1.1 Bloc synoptique du projet :

Le schéma fonctionnel d'une boucle de contrôle est donné par la figure III-1 :

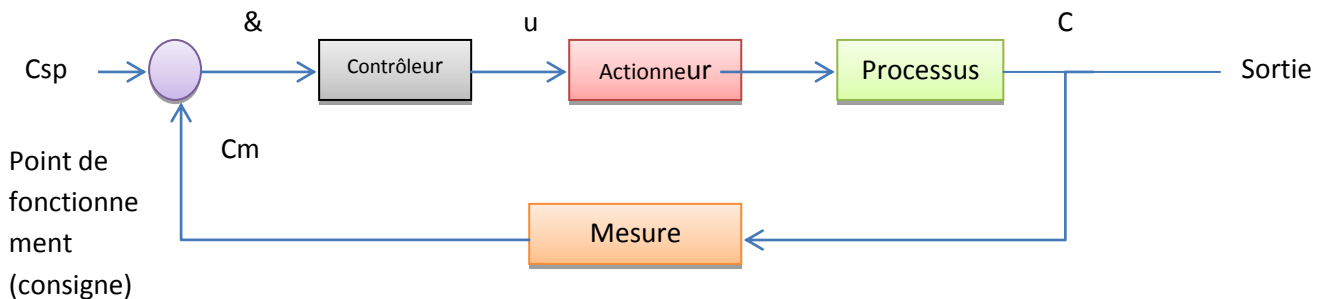


Figure IV.1 : Le schéma fonctionnel d'une boucle de contrôle

& : signal d'erreur $=|Csp - Cm|$; C : signal de sortie, réponse de la boucle

U : signal de commande ; Cm : signal mesuré

Appliquons pour notre cas où il s'agit de régler (maintenir un flux lumineux à une valeur fixe) un flux lumineux émis par une source lumineuse de type LED,

Pour pouvoir simuler la boucle sur MATLAB, Il faut modéliser chaque bloc par sa fonction de transfert.

- **Processus :**

C'est une LED dont on souhaite régler l'éclairement E , ce dernier dépend du courant qui circule dans la jonction, il faut donc associer la LED a un circuit qui permet de faire varier le courant Lequel module l'éclairement E.

- **Mesure :**

Pour pouvoir réguler E , il faut disposer d'un capteur qui le mesure afin de le comparer à la valeur de consigne. On a choisi une photorésistance LDR.

- **Contrôleur :**

On résonne pour notre application sur un contrôleur analogique de type proportionnel.

- **Actionneur :**

Ici, on n'a pas besoin d'actionneur puisque le signal de commande U émis par ce bloc, peut à travers le circuit associé à la LED moduler le circuit qui la traverse.

Pour faire varier E , il faut changer I , donc changer la tension d'alimentation de la LED. Autrement dit, la modulation de E résulte de la variation de U dans une plage correspondant à la plage de variation de E .

Comme U doit être une tension, il en résulte que C_{sp} et C_m doivent avoir la même unité, C'est-à-dire des tensions, Donc le bloc mesure doit se composer du capteur (LDR) associé à un conditionneur qui traduit la variation de la résistance du capteur en une tension.

Le schéma fonctionnel général de la boucle devient :

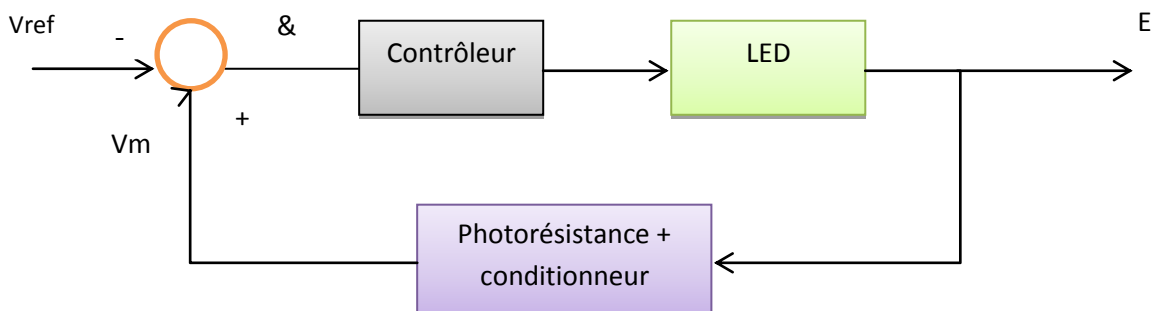


Figure IV.2 : Le schéma fonctionnel général de la boucle

Il faut maintenant déterminer les différentes fonctions de transfert pour pouvoir étudier la réponse dynamique.

a). Contrôleur : Sa fonction de transfert dans le domaine de Laplace est

$$\frac{U}{I}(s) = K_p$$

Avec : $s = \sigma + j\omega$ ($\omega = 2\pi f$,

f : fréquence de travail).

b). LED : La LED reçoit un courant (électrons) et délivre un éclairage (photons) . On peut donc définir un rendement quantique (nombre de photons émis par rapport aux nombre d'électrons injectés) défini par :

$$Q(s) = \frac{P(s)}{F(s)} = \frac{E(s)}{U(s)} = \frac{1}{1 + s\tau_e} \dots (\text{on peut le montrer à partir de la théorie})$$

Où τ_e est la durée de vie des porteurs minoritaires de la jonction PN.

En régime sinusoïdal $s = j\omega = j2\pi f$ et :

$$Q(jf) = \frac{1}{1 + j2\pi f\tau_e}$$

$$\text{Et } |Q(jf)| = \frac{1}{\sqrt{1 + 4\pi^2 f^2 \tau_e^2}}$$

c). Photorésistance +Conditionneur :

L'éclairage E en lux (lx) est traduit sous forme de variation de la résistance (Ω ou $K\Omega$) suivant une fonction de transfert dynamique que l'on peut trouver dans les fiches techniques du capteur (sensibilité) exprimée en Ω/lx

Le conditionneur cette variation en une tension .La réponse en fréquence d'une photorésistance est généralement non linéaire, C'est-à-dire que la sensibilité S décroît lorsque la fréquence de modulation de la lumière croît. Ce phénomène est caractérisé par une fréquence de coupure f_c de l'ordre de l'inverse du temps de réponse qui, lui dépend de matériel de fabrication. Cette fréquence de coupure se situe suivant les matériaux entre quelques centaines de HZ à 10^5 HZ. On peut modéliser cette fonction de transfert par :

$$S = \frac{V_m}{E}(s) = \frac{1}{1 + s\tau_c} \dots (\text{en } V/\text{lx})$$

Où τ_c est le temp de reponse de la LDR

En régime sinusoïdal :

$$\frac{V}{E}(jf) = \frac{1}{1+j2\pi f\tau_c} \Rightarrow \left| \frac{V}{E}(jf) \right| = \frac{1}{\sqrt{1+4\pi^2 f^2 \tau_c^2}}$$

Donc la figure 3 doit être remplacée par la figure 4 :

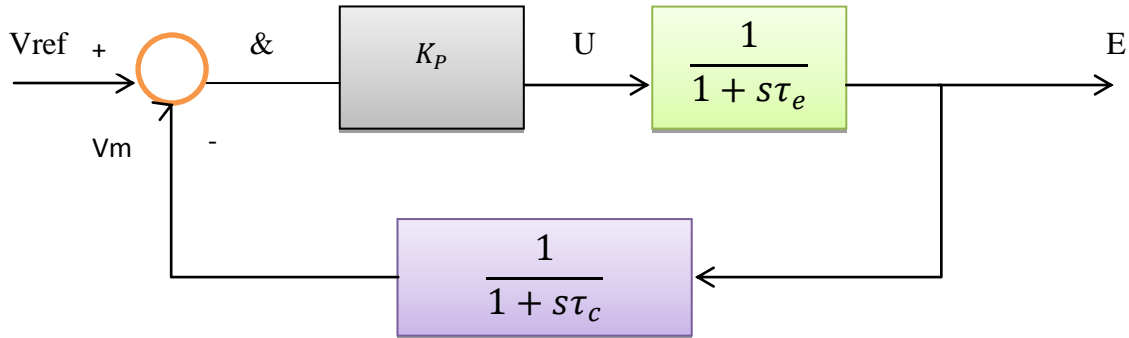


Figure IV.3

Donc ce schéma, Vref doit être choisit de manière à représenter l'éclairement de consigne E0 qui sera précise dans le cahier de charge, Il faut consulter les fiches techniques de la LED et de la LDR pour pouvoir connaître ou estimer les valeurs de τ_e et τ_c .

Mode similaire :

Si on associe un capteur un conditionneur tel que le signal de sortie Vm soit une fonction linéaire dans une plage encadrant la valeur de consigne E0, alors on peut écrire dans cette plage :

$$V_m \approx K_l E + K_0 \quad \text{et} \quad S = \frac{\Delta V_m}{\Delta E} = K_l = \text{Constante}$$

Alors la fonction de transfert du bloc de mesure se simplifie :

$$\frac{V_m}{E}(s) = K_l$$

Le schéma fonctionnel de a figure 4 devient celui de la figure 5 :

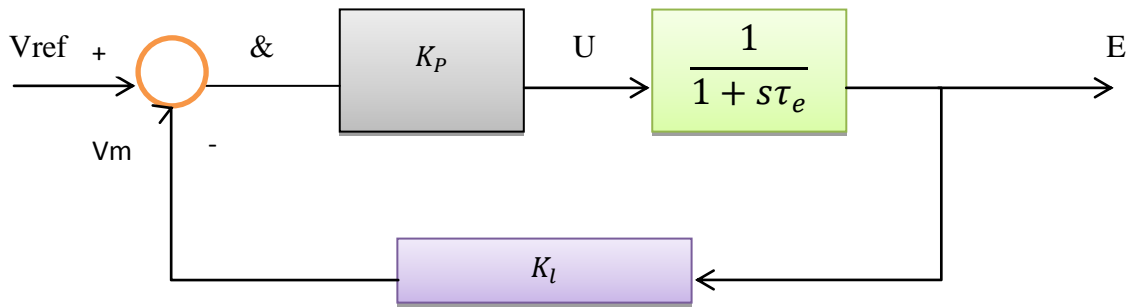


Figure IV4

4.1.2 Fonction de transfert en boucle ouverte et en boucle fermée

a) Model réel : (figure4)

$$\text{Fonction de boucle ouverte : FBO : } GH = \frac{K_p}{1+s\tau_e} \cdot \frac{1}{1+s\tau_c}$$

$$\text{Fonction en boucle fermée : FTBF} = \frac{G}{1+GH} = \frac{K_p / \tau_E \tau_c (1+s\tau_c)}{s^2 + \frac{\tau_E + \tau_c}{\tau_E \tau_c} s + \frac{1+K_p}{\tau_E \tau_c}}$$

L'étude de la boucle revient donc à étudier un système en deuxième ordre :

b) Model simplifié : (figure5)

$$\text{FTBP : } GH = \frac{K_p K_l}{1+s\tau_e}$$

$$\text{FTBF : } \frac{G}{1+GH} = \frac{K_p / (1+K_p K_l)}{1+s \frac{\tau_e}{1+K_p K_l}}$$

Le comportement dynamique de la boucle est celui d'un système du 1^{er} ordre.

4.2 Réalisation électronique de la boucle :

4.2.1 Dispositif de mesure

Pour mesurer l'éclairement et déduire expérimentalement la variation $R_c = f(E)$, il faut disposer d'instrument adéquats (en particulier d'un luxmètre), On peut agir suivant deux voies :

- a) Travailler en lumière ambiante et faire alimenter la LED périodiquement avec une impulsion de courant d'amplitude variable. Une démodulation (filtre passehaut) permet de rejeter l'influence de la lumière ambiante et tiens compte a la modulation de lumière pulsée.
- b) Eliminer la lumière ambiante en protégeant la LDR de toute autre perturbation autre que celle émise par la LED, il faut alors placer la LED et la LDR sur le même axe optique, à l'abri de la lumière ambiante a une certaine distance , Ceci est possible en réalisant un dispositif de mesure tel qu'indiqué sur la figure IV.5

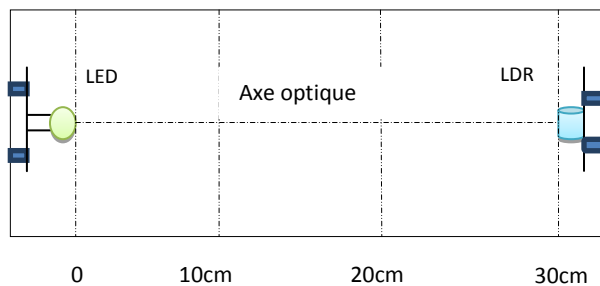


Figure IV.5

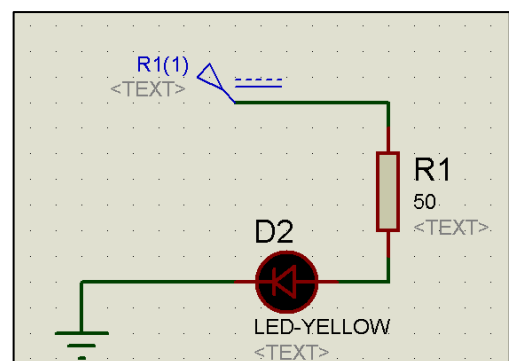
Ce dispositif doit nous permettre de varier la distance d entre LED-LDR

On adapte la méthode B car ce dispositif nous permet d'étudier la variation de R_c avec la distance d .

4.2.2 Circuit associé à la LED et la LDR :

Le circuit électrique pour faire varier le courant dans la LED est simple (figure IV.6)

On se suivant les fiches techniques, les informations fournis par le cahier de charge, on peut calculer la valeur de la résistance de protection R_p et déduire a partir des mesures l'éclairement E . Figure IV.6



En ce qui concerne la LDR, on adapte un conditionneur décrit par la figure 1 en veillant à ce que la résistance d'entrée R_m de l'instrument de mesure (Oscilloscope ou voltmètre électronique), ne perturbe pas la mesure (isolation galvanique)

Il faut également consulter les fiches techniques de ce capteur afin de relever :

- La longueur d'onde D_p (PIC) de la réponse spectrale, ceci nous guide pour choisir la couleur d'émission de la LED.
- La résistance d'obscurité
- La puissance de dissipation maximale.
- La surface sensible de réception (ceci est utile pour déduire l'éclairement)

4.2.3 Contrôleur proportionnel :

L'implémentation électronique de ce mode exige la réalisation d'un circuit qui a une réponse de la forme

$$P = K_P E_P + P_0 \quad \dots \text{ Voir partie théorique}$$

Ou :

P : Sortie du contrôleur en %

K_P : Gain de proportionnalité

E_P : Pourcentage d'erreur dans l'étendue de mesure de la variable contrôlée.

P_0 : Sortie du contrôleur avec $E_P = 0$

A conception électronique analogique en terme de tensions doit aboutir à une équation de la forme :

$$V_S = G_P V_p + V_0$$

Ou :

V_S : Tension de sortie du contrôleur

$$G_P = \frac{R_2}{R_1} + \text{Gain}$$

V_p : Tension d'erreur

V_0 : Tension de sortie pour une erreur nulle.

Cette équation Comprend deux termes :

$G_P V_p$: Amplificateur de V_p par G_P

Ceci peut être conçu a partir d'un amplificateur sommateur donné par la figure IV.6

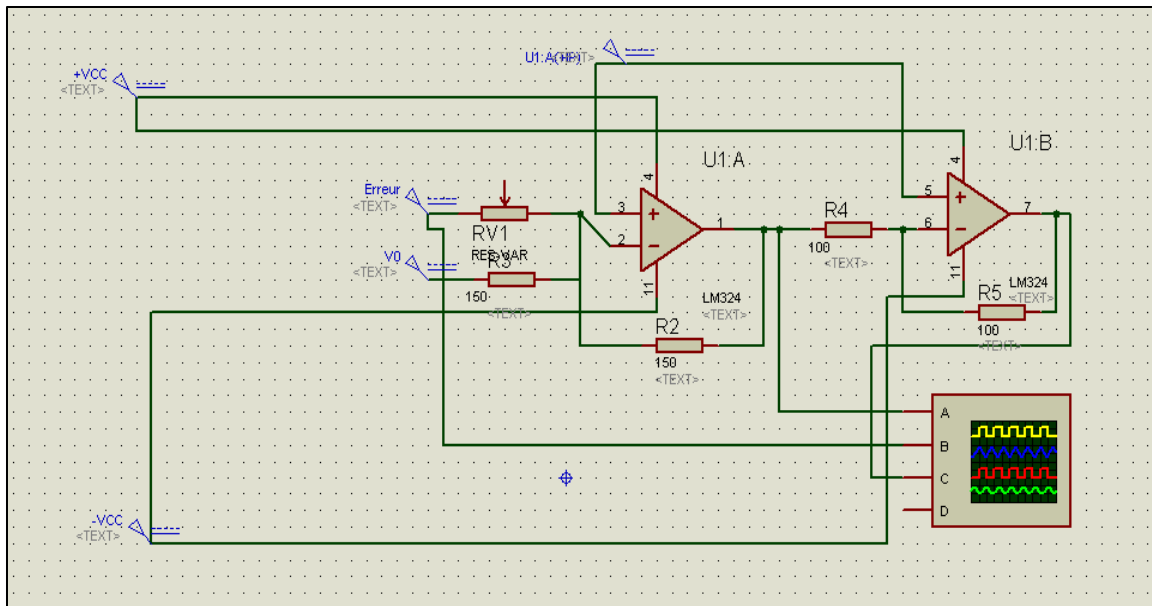


Figure IV-7 : Amplificateur sommateur

Supposons qu'on veut augmenter le rayonnement, la tension d'entrée doit nécessairement augmenter, à la sortie du conditionneur, la tension doit diminuer pour annuler l'erreur V_f qui était négative au paravent.

L'inverse est correctement possible.

- Calcul de V_0 :

Supposons que :

$$R_c(E_{min}) = R_{c1}$$

$$R_c(E_{max}) = R_{c2}$$

$$R_c(E_{sp}) = R_{c0}$$

Nous calculons ensuite V_m (Sortie du conditionneur) pour les différentes valeurs ; Soit :

$$V_m = V_{m_min} \text{ pour } R_c(E_{min})$$

$$V_m = V_{m_max} \text{ pour } R_c(E_{max})$$

$$V_m = V_{m_sp} \text{ pour } R_c(E_{sp})$$

$$\text{Tel que : } V_m = R_c \epsilon \cdot \frac{V_{cc}}{R_v + R_c(E)}$$

Donc quant E varie de E_{min} à E_{max} , la plage de variation en tension a la sortie du conditionneur est $V_{m_max} - V_{m_min} = \Delta V_m$

A la sortie de l'amplificateur différentiel, nous obtenant le signal d'erreur V_f

$$V_f = V_m - V_{m_sp}$$

Si nous fixons toutes les résistances de l'amplificateur différentiel a une valeur commune (gain 1 et gain de reste commun nul) et que la seconde entrée soit fixée à 1V ($V_1 = V_m$ & $V_2 = V_3$)

Un Contrôleur a bande proportionnelle BP=75% avec un point de fonctionnement de E_{sp} exige une sortie du contrôleur à erreur nulle de :

$$V_0 = \frac{V_{Esp} - V_{Emin}}{V_{Emax} - V_{Emin}} * 10$$

Avec : 10 tension d'entrée qui alimente la LED

Un BP de 75% signifie quand le flux varie de $\Delta E = (E_{max} - E_{min}) * \frac{75}{100}$, la sortie du controleur devrait osciller de 10V

En terme de résistance du capteur, elle devrait correspondre à $\Delta R_c \epsilon = K * (\Delta E)^{-\alpha}$

En terme de signal d'erreur, On a $V_f = V_{sp} - V_m$

La réponse globale du contrôleur est donc :

$$V_{out} = G_p * V_p + V_0$$

4.2.4 L'étalonnage du capteur :

- **Régression linéaire au sens des moindres carrés :**

L'étalonnage d'un capteur fournit a l'expérimentateur un certain nombre de points expérimentaux (Y_i , E_i) ou E_i ($i=1.2.....m$) sont les différentes valeurs prises par le signal d'entrée (grandeur physique ou mesurande) et Y_i le signal de sortie (généralement un signal électrique) avec $i=1.2...m$ (on effectue m mesures)

Si on trace la courbe $Y_i=f(E_i)$, on ne constate que les différents points ne se trouvent qu'approximativement sur une droite (erreurs de mesure et imperfections du capteur) ; En conséquence la relation entre E_i et Y_i peut s'écrire sous la forme :

$$Y_i = a + bE_i + r_i \quad (i=1,2,\dots,m) \dots\dots\dots (1)$$

Où a et b sont des constantes et r_i un résidu provenant des erreurs commises comme aucune mesure n'est tout à fait précise, on arrive jamais à déterminer exactement a et b , mais on essaye de déterminer « les meilleures valeurs » passant par les points mesurés.

La méthode du moindre carrés permet de résoudre ces problèmes et les « meilleures valeurs obtenues » sont appelées les estimations de a et b , on les note a' et b' .

La méthode des moindres carrés consiste à déterminer a et b tels que la somme des carrés des résidus soit minimale, C'est-à-dire :

$$S = \sum_{i=0}^m r_i^2 = \sum_{i=0}^m (Y_i - a - bE_i)^2 \quad \text{Soit minimale....(2)}$$

Du point de vue géométrique, les résidus r_i représentent la distance entre les points (Y_i, E_i) et la droite $Y_i = a + bE_i$ mesurées parallèlement à l'axe des Y .

Solution de (2):

Rappelons la procédure classique du calcul différentiel: on trouve le minimum d'une fonction en égalant sa dérivée première à zéro. Dans le cas qui nous occupe, il suffit de calculer successivement les dérivées partielles par rapport aux deux paramètres, a et b . Les valeurs recherchées des paramètres sont celles qui satisfont simultanément ces deux équations, égales à zéro.

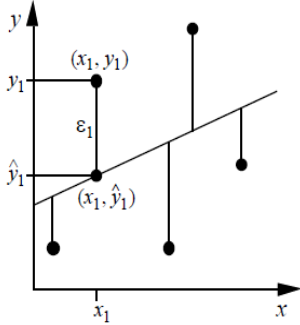


Figure IV.8

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial S}{\partial a} = (-2)(Y_i - a - bE_i) = 0 \\ \frac{\partial S}{\partial b} = (-2E_i)(Y_i - a - bE_i) = 0 \end{array} \right.$$

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^m (-2Y_i) + \sum_{i=1}^m 2a + \sum_{i=1}^m 2bE_i &= 0 \\ \sum_{i=1}^m (-2E_i Y_i) + \sum_{i=1}^m 2aE_i + \sum_{i=1}^m 2bE_i^2 &= 0 \end{aligned}$$

$$\left\{ \begin{aligned} \sum_{i=1}^m Y_i - ma - b \sum_{i=1}^m RE_i &= 0 \\ \sum_{i=1}^m E_i Y_i - a \sum_{i=1}^m E_i - b \sum_{i=1}^m E_i^2 &= 0 \end{aligned} \right.$$

D'où les équations suivantes :

$$\left\{ \begin{aligned} \sum_{i=1}^m Y_i &= ma - b \sum_{i=1}^m RE_i \\ \sum_{i=1}^m E_i Y_i &= a \sum_{i=1}^m E_i - b \sum_{i=1}^m E_i^2 \end{aligned} \right.$$

En posant :

$$\alpha_{11} = m ; \alpha_{12} = \alpha_{21} = \sum_{i=1}^m E_i ; \alpha_{22} = \sum_{i=1}^m E_i^2$$

$$C_1 = \sum_{i=1}^m Y_i$$

$$C_1 = \sum_{i=1}^m E_i Y_i$$

On écrit :

$$\left\{ \begin{aligned} C_1 &= \alpha_{11}a - \alpha_{12}b \\ C_2 &= \alpha_{21}a - \alpha_{22}b \dots\dots(3) \end{aligned} \right.$$

En écrivant (3) sous forme matricielle On aura :

$$Y = AX + R$$

Avec :

$$Y = \begin{vmatrix} Y_1 \\ Y_2 \\ \dots \\ \cdot \\ Y_m \end{vmatrix} ; A = \begin{vmatrix} 1 & E_1 \\ 1 & E_2 \\ \dots & \dots \\ \dots & \dots \\ 1 & E_m \end{vmatrix} ; X = \begin{vmatrix} a \\ b \end{vmatrix} ; R = \begin{vmatrix} r_1 \\ r_2 \\ \dots \\ \dots \\ r_m \end{vmatrix}$$

Démonstration : $S=R^tR=(Y-AX)^t(Y-AX)$

$$R=Y-AX=\begin{vmatrix} r1 \\ r2 \\ \dots \\ rm \end{vmatrix} \quad \text{et } R^t = | r1 \ r2\dots \dots rm |$$

D'où le produit des deux matrices nous donne :

$$R^tR = r1^2 + r2^2 + \dots\dots +rm^2$$

$$= \sum_{i=1}^m ri^2 = S$$

$$A^t * A = \begin{vmatrix} 1 & \dots & 1 \\ E1 & E2 & \dots & Em \end{vmatrix} \quad \begin{vmatrix} 1 & E1 \\ 1 & E2 \\ \dots & \dots \\ 1 & Em \end{vmatrix}$$

$$A^t * A = \begin{vmatrix} m\sum_{i=1}^m Ei \\ \sum_{i=1}^m Ei \sum_{i=1}^m Ei^2 \end{vmatrix} ;$$

$$A^t * A = \begin{vmatrix} \alpha 1 & \alpha 12 \\ \alpha 21 & \alpha 22 \end{vmatrix}$$

$$A^t * Y = \begin{vmatrix} 1 & 1 & \dots & 1 \\ E1 & E2 & \dots & Em \end{vmatrix} * \begin{vmatrix} Y1 \\ Y2 \\ \dots \\ Ym \end{vmatrix}$$

$$A^t * Y = \begin{vmatrix} \sum_{i=1}^m Yi. \\ \sum_{i=1}^m EiYi. \end{vmatrix}$$

$$A^t * Y = \begin{vmatrix} C1 \\ C2 \end{vmatrix}$$

D'où On a :

$$A^tAX = A^ty$$

Alors la Solution selon la méthode des moindres carrés du Système de m équations à deux inconnus a et b $AX=Y$ est :

$$X = (A^t A)^{-1} A^t Y \text{ Si } (A^t A)^{-1} \text{ Existe}$$

- **Application a une photorésistance (LDR) :**

Une photorésistance (LDR) est un capteur de lumière dont la résistance électrique R_c varie avec l'éclairement reçu E en lux (lx) .Un étalonnage précis avec un luxmètre d'une LDR a donné les résultats de mesure suivant :

| Tension d'entrée | Eclairement | Résistance de la LDR | Sortie du conditionneur |
|-------------------------|--------------------|-----------------------------|--------------------------------|
| 0 | 0.0224 | 200M | 5 |
| 0.4 | 0.0227 | 197M | 5 |
| 0.8 | 0.0357 | 117M | 5 |
| 1.2 | 0.0399 | | 5 |
| 1.6 | 0.7067 | 3.08M | 4.9998 |
| 2 | 96.6365 | 13.4K | 4.9446 |
| 2.4 | 203.4359 | 5.7K | 4.8718 |
| 2.8 | 296.3898 | 3.7K | 4.8052 |
| 3.2 | 366.4399 | 2.9K | 4.7541 |
| 3.6 | 448.4062 | 2.3K | 4.6919 |
| 4 | 506.4429 | 2K | 4.6512 |
| 4.4 | 555.1093 | 1.8K | 4.6154 |
| 4.8 | 615.0704 | 1.6K | 4.5714 |
| 5.2 | 650.6294 | 1.5K | 4.5455 |
| 5.6 | 650.6294 | 1.5K | 4.5455 |
| 6 | 682.4370 | 1.42K | 4.5223 |
| 6.4 | 708.5827 | 1.36K | 4.5033 |
| 6.8 | 717.7839 | 1.34K | 4.4966 |
| 7.2 | 736.9794 | 1.30K | 4.4828 |
| 7.6 | 746.9975 | 1.28K | 4.4755 |
| 8 | 767.9390 | 1.24K | 4.4604 |
| 8.4 | 773.3732 | 1.23K | 4.4565 |
| 8.8 | 790.1837 | 1.2K | 4.4444 |
| 9.2 | 801.8342 | 1.18K | 4.4361 |

| | | | |
|-----|----------|-------|--------|
| 9.6 | 807.7992 | 1.17K | 4.4318 |
| 10 | 813.8602 | 1.16K | 4.4275 |

La courbe Rc = f(E) : (tracée par MATLAB) :

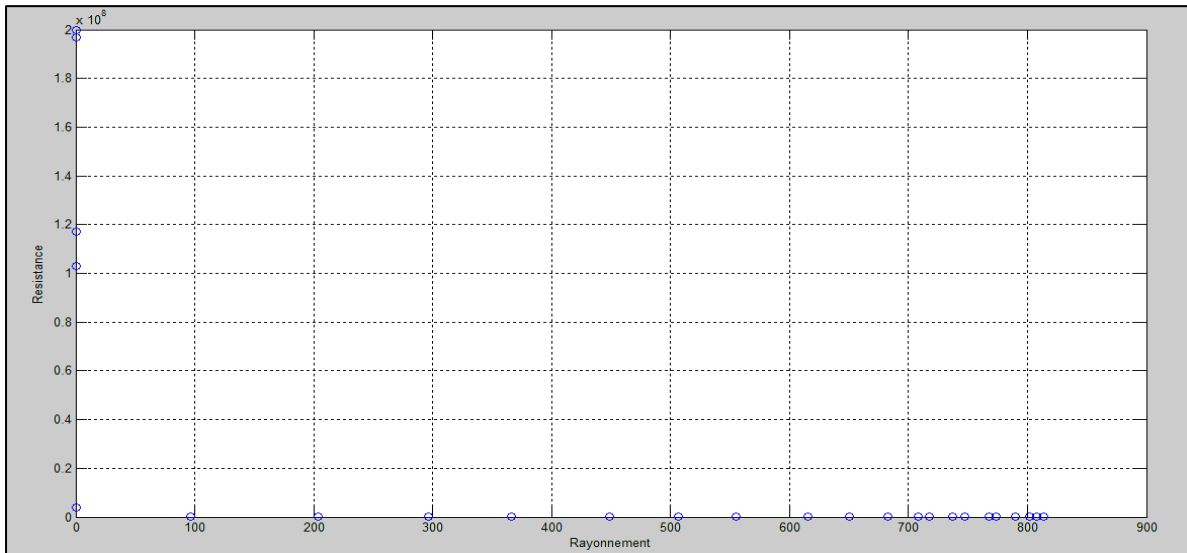


Figure IV.9 : La résistance en fonction du rayonnement

La résistance Rc de la LDR varie en fonction de E (lx) suivant la relation $Rc = R_{obs} // R(E)$ ou R_{obs} est la résistance du capteur dans l'obscurité totale et $R(E) = K.E^{-\alpha}$, Avec K et α des constantes.

A partir des valeurs lues sur le tableau 1 , On observe que :

$$Rc \approx K.E^{-\alpha} \quad \text{Ou} \quad \ln(Rc) = \ln(K) - \alpha. \ln(E)$$

En adaptant la technique exposée en 1 Travons les valeurs de K et α qui linéarisent en mieux la résistance Rc Dans l'étendue de mesure spécifiée.

Les valeurs trouvées par le programme MATLAB sont :

$$\text{alpha} = 1.1282$$

$$K = 2.5727e+006$$

La courbe $\ln(Rc) = f(\ln(E))$

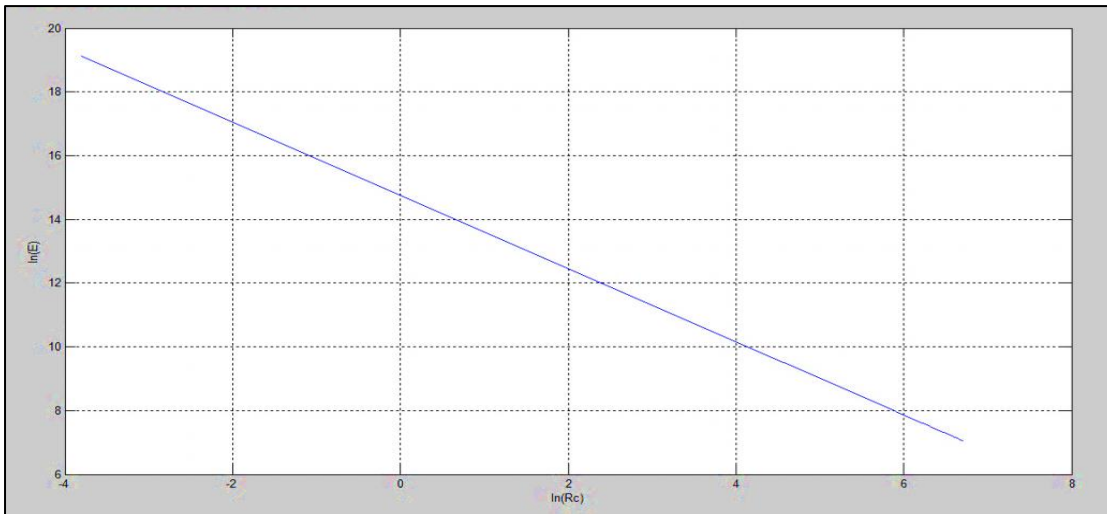


Figure IV.10 : $\ln(Rc) = f(\ln(E))$

On associe a la LDR un conditionneur donné sur la figure IV.11 (Structure en ½ pont)

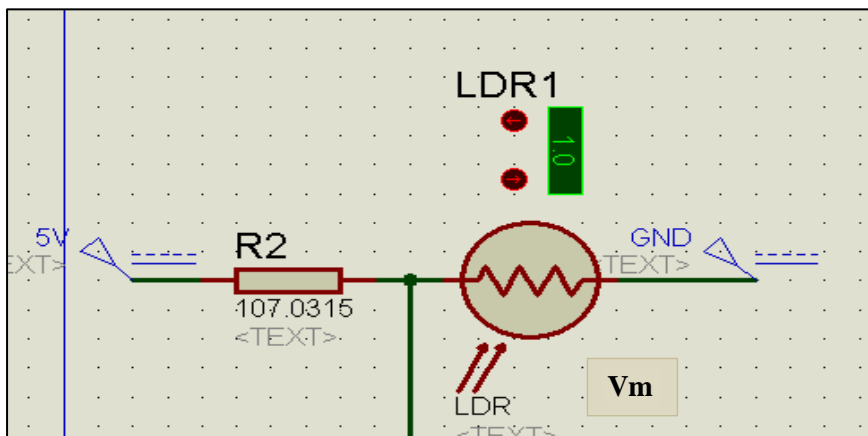


Figure IV.11 (Structure en ½ pont)

L'expression de la tension de mesure V_m est donnée par :

$$V_m = \frac{R_c}{R_c + R_2} V_{cc}$$

Avec : $R_c = KE^{-\alpha}$

D'après cette expression ; On remarque que le montage n'est pas linéaire par rapport aux variations de R_c

On veut linéariser en mieux le signal Autour de la valeur $E_0 = 0.8534 \text{ lx}$ (point de fonctionnement ou consigne, Il suffit que la tension V_m présente un pont d'inflexion en ce point, C'est-à-dire :

$$\left. \frac{d^2 V_m}{dE^2} = 0 \right|_{E=E_0}$$

On pose $R_c = R_c(E_0)$

Pour rendre V_m le plus linéaire possible autour de E_0 , On doit déterminer la valeur à donner à la résistance fixe R_2 , en se basant sur l'équation()

On a :

$$\frac{dV_m}{dE} = \frac{dV_m}{dR_c} \cdot \frac{dR_c}{dE}$$

- $\frac{d^2 V_m}{dE^2} = \frac{d}{dE} \left(\frac{dV_m}{dE} \right)$

$$= \frac{d}{dE} \left(\frac{dV_m}{dR_c} \cdot \frac{dR_c}{dE} \right)$$

- $\frac{d^2 V_m}{dE^2} = \frac{d}{dE} \left(\frac{dV_m}{dR_c} \right) \cdot \frac{dR_c}{dE} + \frac{dV_m}{dR_c} \cdot \frac{d^2 R_c}{dE^2}$

$$= \frac{d}{dR_c} \left(\frac{dV_m}{dR_c} \right) \left(\frac{dR_c}{dE} \right)^2 + \frac{dV_m}{dR_c} \cdot \frac{d^2 R_c}{dE^2}$$

$$= \frac{d^2 V_m}{dE^2} \cdot \left(\frac{dR_c}{dE} \right)^2 + \frac{dV_m}{dR_c} \cdot \frac{d^2 R_c}{dE^2}$$

- $\frac{dV_m}{dR_c} = \frac{V_{cc} \cdot (R_c + R_2) - R_c \cdot V_{cc}}{(R_c + R_2)^2}$
- $= \frac{R_v \cdot V_{cc}}{(R_c + R_2)^2}$
- $\frac{d^2 V_m}{dE^2} = \frac{-R_2 \cdot R_c \cdot 2 \cdot (R_c + R_2)}{(R_c + R_2)^4}$
- $= \frac{-2 \cdot R_2 \cdot V_{cc}}{(R_c + R_2)^3}$
- $\left. \frac{d^2 V_m}{dE^2} = 0 \right|_{E=E_0}$

$$\frac{-2 \cdot R_2 \cdot V_{cc}}{(R_c + R_2)^3} \left(\frac{dR_c}{dE} \right)^2 + \frac{R_2 \cdot V_{cc}}{(R_c + R_2)^2} \cdot \frac{d^2 R_c}{dE^2} \Bigg|_{E=E_0} = 0$$

Soit :

$$\bullet \frac{2.R2.Vcc}{(Rc+R2)^3} \left(\frac{dRc}{dE} \right)^2 \Big|_{E=E0} = \frac{R2.Vcc}{(R2+Rc)^2} \cdot \frac{d^2Rc}{dE^2} \Big|_{E=E0}$$

$$\frac{d^2Rc}{dE^2} \Big|_{E=E0} = \frac{2}{(Rc+R2)} \cdot \left(\frac{dRc}{dE} \right)^2 \Big|_{E=E0}$$

$$Rc+R2 = \frac{2 \left(\frac{dRc}{dE} \right)^2 \Big|_{E=E0}}{\frac{d^2Rc}{dE^2} \Big|_{E=E0}}$$

Donc :

$$R2 = \frac{2 \left(\frac{dRc}{dE} \right)^2 \Big|_{E=E0}}{\frac{d^2Rc}{dE^2} \Big|_{E=E0}} - Rc$$

- $Rc = K \cdot E^{-\alpha}$
- $\frac{dRc}{dE} = -\alpha K E^{-\alpha-1}$

$$= -\alpha \cdot K \cdot E^{-\alpha} \cdot E^{-1}$$

$$= -\alpha \cdot Rc \cdot E^{-1}$$

- $\frac{dRc^2}{dE} = \alpha^2 \cdot Rc^2 \cdot E^{-2}$

$$\frac{d^2Rc}{dE^2} = \alpha (\alpha + 1) K E^{-\alpha-2}$$

$$= \alpha (\alpha + 1) K E^{-\alpha} E^{-2}$$

$$= \alpha (\alpha + 1) Rc E^{-2}$$

D'où :

- $R2 = \frac{2\alpha^2 \cdot Rc^2 \cdot E^{-2}}{\alpha(\alpha+1)RcE^{-2}}$

$$R2 = \frac{2\alpha Rc}{\alpha+1} - Rc$$

Alors :

$$R2 = \frac{\alpha - 1}{\alpha = 1} R_c$$

$$R2 = \frac{\alpha - 1}{\alpha = 1} K.E0^{-\alpha}$$

La courbe $V_m = F(E)$:

En utilisant la méthode de régression linéaire sur l'étendue de mesure $E = [E_{\min} - E_{\max}]$, l'approximation linéaire de V_m est donnée par :

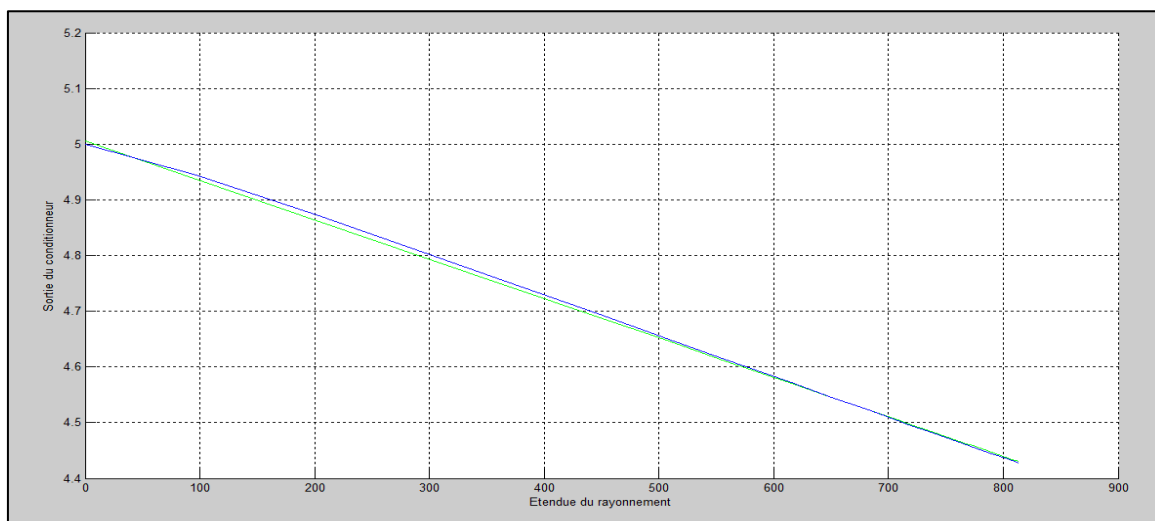


Figure IV-12 : $V_m = F(E)$:

Chapitre 5 : Résultats expérimentaux & extension du projet

5.1 Résultats atteints par simulation par MATLAB :

Pour construire la boucle de régulation sur le bloc SIMULINK sur MATLAB, On doit faire une recherche des différents paramètres des éléments de la boucle pour représenter chacun par sa fonction de transfert.

- **La LED :**

Pour avoir sa fonction de transfert, il nous faut juste trouver la durée de vie de ses porteurs minoritaires, et comme nous utilisons une LED jaune, alors nous avons :

$$T_e=90\text{ns} \quad \text{d'où } F(s)_{\text{LED}}=\frac{1}{1+90*10^{-9}S}$$

- **La LDR :**

Pour la photorésistance, le paramètre qu'on doit trouver est son temps de réponse, pour notre type, il est égale à 15ms

$$\text{D'où : } F(s)_{\text{LDR}}=\frac{1}{1+15*10^{-3}S}$$

- **Kp :**

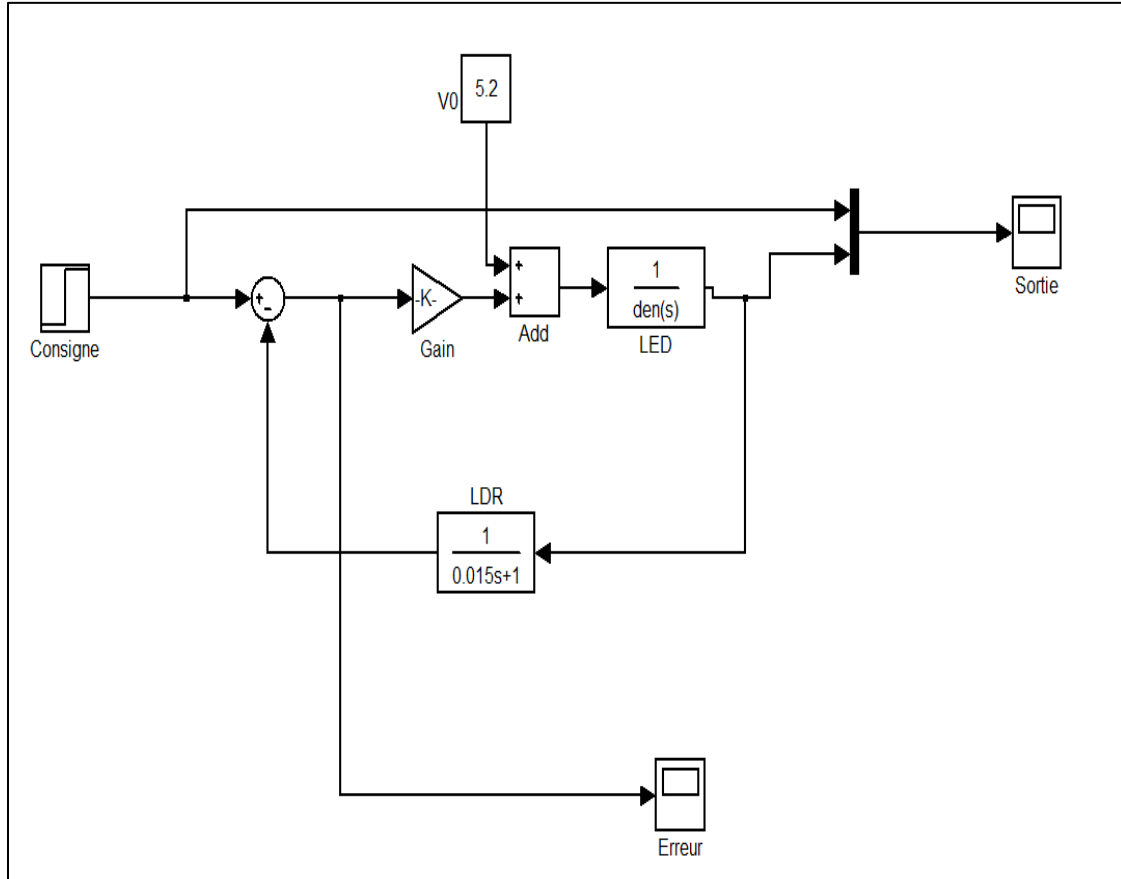
On sélectionne une bande proportionnelle BP(%) à l'intérieur dans laquelle le contrôle doit s'effectuer (par exemple 75 %)

$$(BP=100/K_p) \Rightarrow K_p=1/0.75=1,33$$

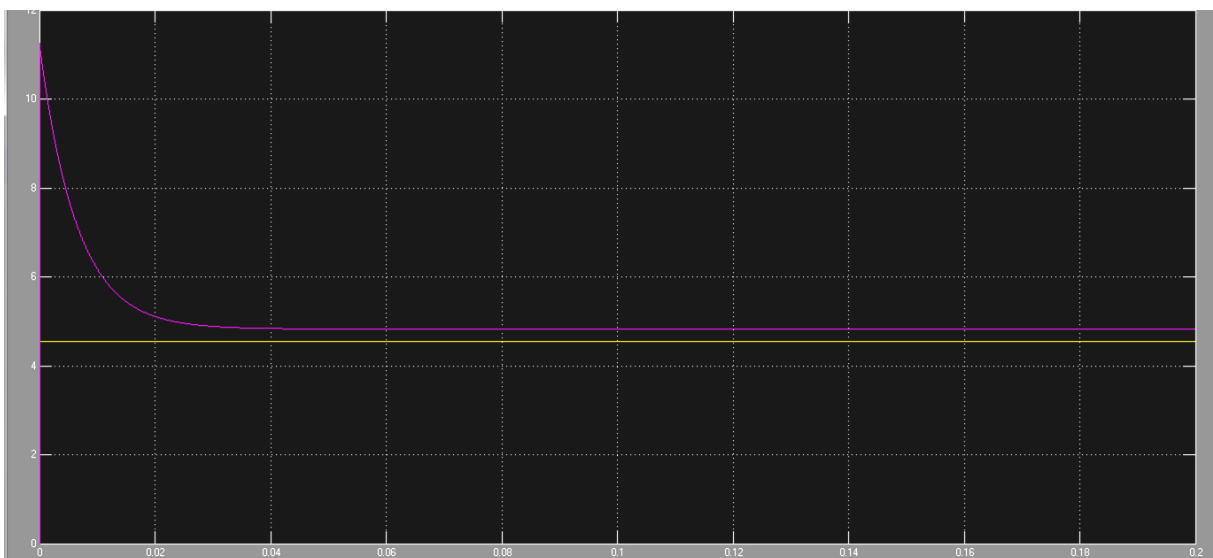
- **VO :**

C'est la tension du contrôleur pour une erreur statique nulle

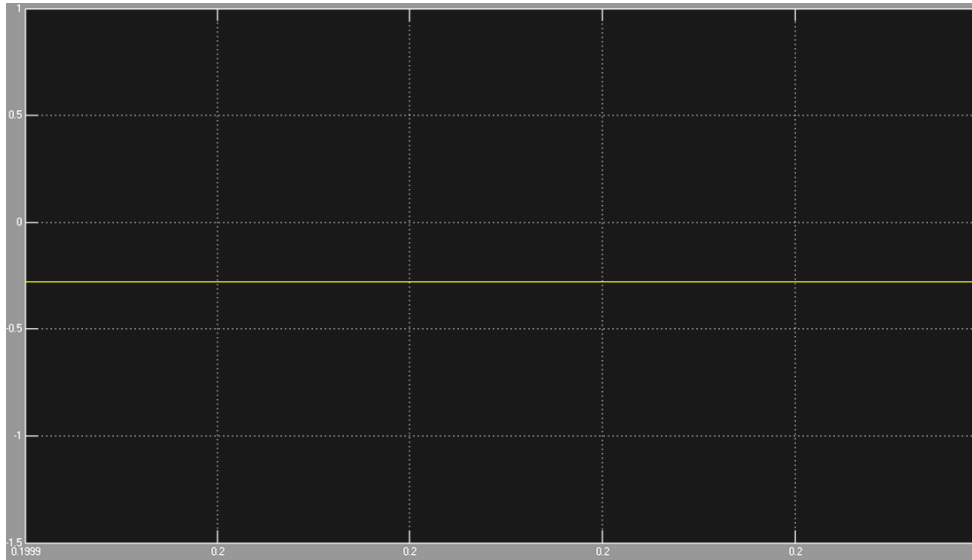
D'où : Le bloc fonctionnel de la boucle sera :



Simulation par MATLAB

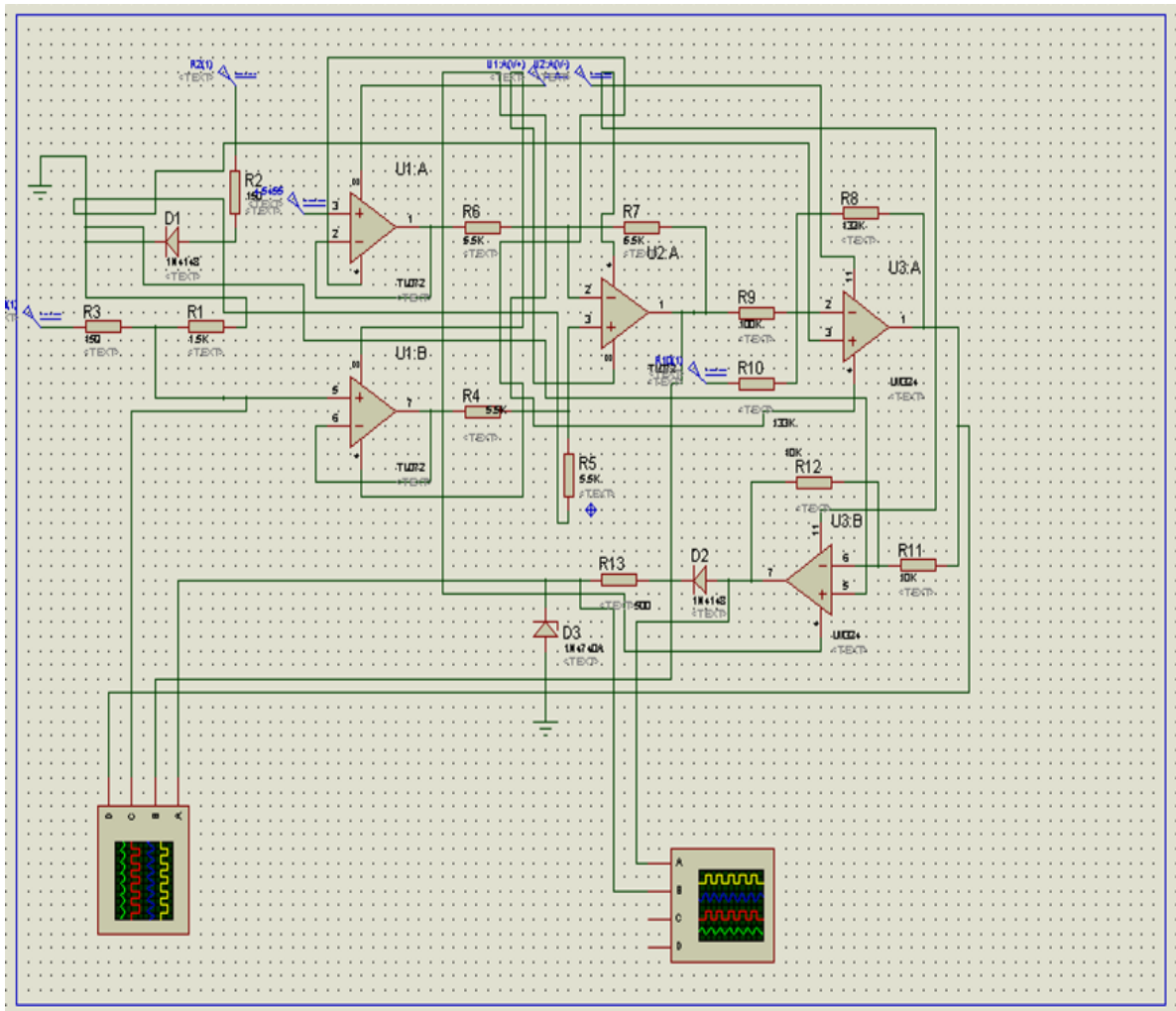


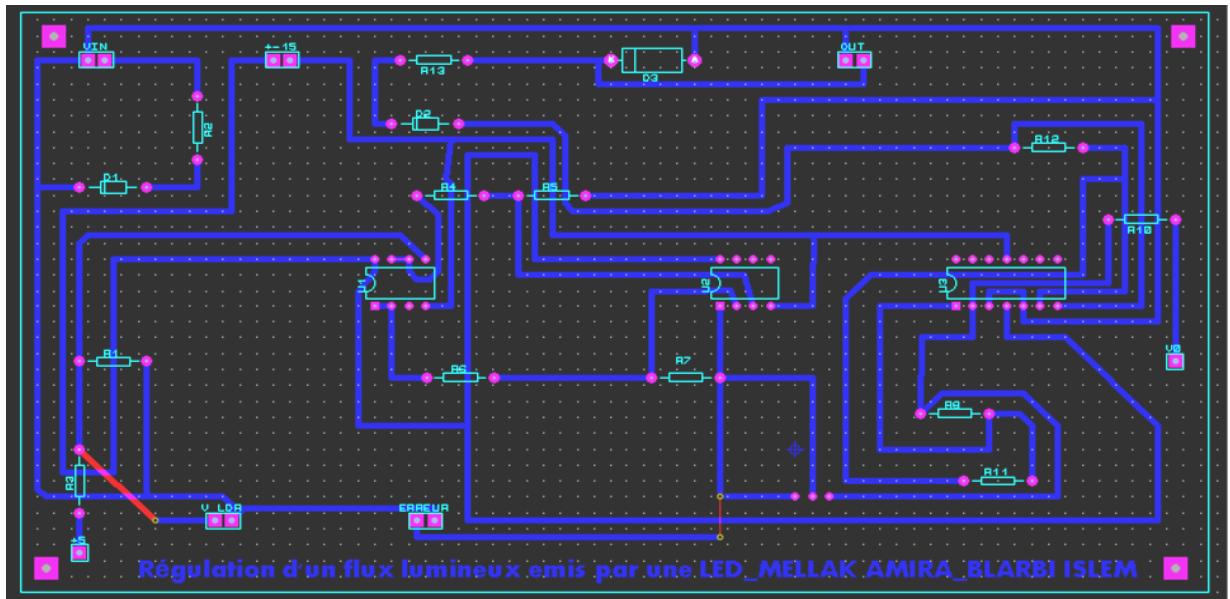
La convergence du signal de mesure vers la consigne



Le signal d'erreur

- Le schéma de la carte :



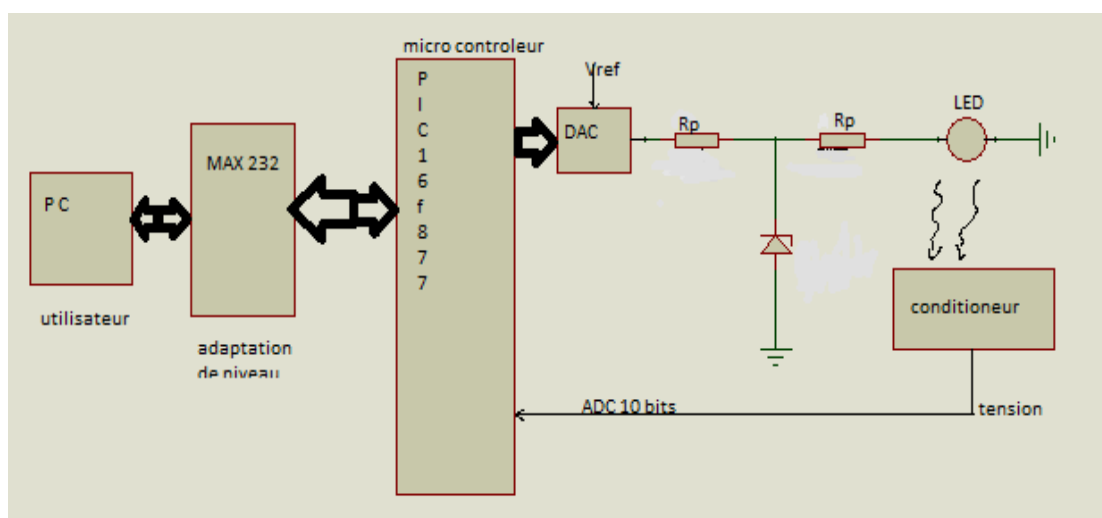


5.2 Extension du projet :

Le but de cette partie est de concevoir une boucle contrôlée par un microcontrôleur fonctionnant en mode contrôleur et qui doit générer le signal de consigne à partir d'un programme.

D'où, programmer un signal transitoire qui s'ajoute temporairement (données à programmer) un signal de consigne et vérifier si la boucle fonctionne correctement (le contrôleur doit changer sa sortie de manière à annuler l'erreur et retourner à la situation d'avant.

Ossature générale de la régulation par contrôleur 16F877



- Pour le conditionneur, nous avons 2 options :
 - laisser le conditionneur déjà développé dans la boucle analogique .il faudrait alors linéariser la tension recueillie avant de pouvoir calculer par programme le signal d'erreur. On sera alors obligé d'enregistrer dans le microcontrôleur la table de transfert (look-table) qui donne la tension mesurée pour différents valeurs de la LDR s'en servir pour linéariser le signal de mesure.
 - placer le LDR en rétroaction dans un A-O comme le montre la figure :

$$V_0 = - \frac{R_2}{R_1} V_i$$

Si $V_i = -1 v$ et si on choisit

$$R_1 = R_2 \text{ (point de fonctionnement) } = R_0$$

$$\text{Alors } V_0 = \frac{R_2}{R_0} ,$$

$$\text{Comme } R_2 = E^{-\alpha} \rightarrow V_0 = \frac{KE^{-\alpha}}{R_0}$$

$$\text{Alors : } \ln(V_0) = \ln\left(\frac{K}{R_0}\right) - \alpha \ln(E)$$

$$\text{Si } y = \ln(V_0) \text{ et } \ln E = x \rightarrow y = \beta - \alpha x$$

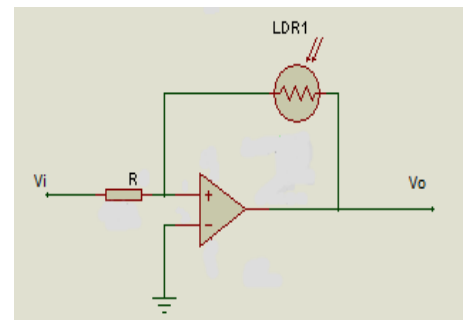
Cette méthode nous évite decrire dans la mémoire du microcontrôleur le tableau de mesures (déjà effectué) et développer un programme de linéarisation par table de transfert.

Il logiciel de gestion et algorithmes de calcul :

- 1) Le flux variant dans une plage $E_{min} \rightarrow E_{max}$ il faut coder le signal issu du contrôleur tel que :

$E_{min} \rightarrow 000H$

$E_{max} \rightarrow FFFH$



2) L'algorithme sur lequel sera développé le logiciel devra calculer directement l'équation

$$P = K_p R_p + P_0$$

Evidemment toutes les expressions doivent être transmises au microcontrôleur, sous forme numérique, Le développement du logiciel repose sur la réalisation des 3 équations suivante (sous forme digital) :

$$DE = \frac{DV - DSP}{D_{MAX} - D_{MIN}} \dots\dots\dots 1$$

OU DV : signal de la mesure (issue du conditionneurs)
 DSP : signal correspondant au point de fonctionnement
 DMAX : signal correspondant à la valeur maximale du flux
 DMIN : // // // minimale //

} sortie ADC

$$D_{MIN} = \frac{E_{min}}{E_{max} - E_{min}} * 1024 \rightarrow \text{valeur hexadécimal} \quad (\text{pour } n = 10)$$

$$D_{MAX} = \frac{E_{max}}{E_{max} - E_{min}} * 1024 \rightarrow \text{valeur hexadécimal}$$

Remarque:

L'erreur c est exprimée en fraction par rapport a la plage de variation de grandeur ajoutée.

$$P = P_0 + K_p * DE \dots\dots\dots 2$$

$$P_{OUT} = P * R_{OUT} \dots\dots\dots 3$$

OUP0 : fraction de la sortie avec une erreur nulle

KP : gain proportionnel en %/%

P : fraction de sortie avec une erreur nulle

ROUT : sortie maximale

POUT : sortie finale

Il faut évidemment exprimer toutes en expression toutes ces expression en hexadécimal

Conclusion générale

Ce projet a été la base des circuits de régulation en optoélectronique vu que les éléments choisis étaient les plus simples par rapport à leurs caractéristiques et leurs études simples et aussi leur disponibilité sur le marché, ce qui est possible de choisir d'autres éléments que ce soit pour les photoémetteurs (LED LASER, LED INFRAROUGE) ou les photorécepteurs (photodiode, phototransistor) En étudiant leurs caractéristiques et en modifiant quelque paramètre, mais en suivant le même principe et les mêmes étapes pour réaliser le circuit.

De même pour le type de régulateur choisi, On voit que le régulateur P assure une transmission instantanée du signal d'erreur; dans ce sens, son action est relativement dynamique: sa commande ne dépend pas du passé, ni d'une tendance, mais simplement de ce qui se passe à l'instant présent.

Une limitation du régulateur P est son incapacité à annuler notamment l'erreur statique en régulation de maintien, Ce qui était possible d'ajouter une action intégrale, pour annuler cet écart entre la mesure et la consigne.

Pour arriver à atteindre le but mentionné précédemment on a eu beaucoup de problèmes qui ont été la cause de notre échec dans notre projet, le premier obstacle a été l'absence des fiches techniques des composants c'est qui nous a mené à travailler avec des mesures non-réelles et pour dépasser ce problème on s'est basé sur des équations ceci a fait que les résultats obtenus ne sont pas vraiment fiables et le problème qui a offensé notre bonne volonté à réussir dans notre projet l'absence des appareils de mesure comme le luxmètre et oscilloscope à mémoire donc on n'a pas eu la possibilité de faire une comparaison entre la simulation et la pratique.

Photométrie et mesures :

- Electronique industrielle-Mesure en milieu industriel-HAI-VO-HO_R.MULLEN
 - Edition : LE GRIFON D'ANGILE
- Les capteurs en instrumentation industrielle-G.ACH
 - Edition : DOUND 1999
- OPTOELECTRONIQUE INDUSTRIELLE-PIERRE MAYE
 - Edition :DOUND 2001
- Capteurs-Principes et utilisations-F.BOUDOIH_M.LAVABRE
 - Edition : CASTEILLA 2007
- SITES INTERNET :
 - <http://www.google.fr/imghp?hl=fr&tab=wi>
 - wikipedia.org

Automatique et MATLAB:

- MATLAB 5.2 et 5 .3 et Simulink 2 et 3 pour étudiants et ingénieurs-MOHAND MOKHTARI
 - Edition : SPRINGER 2000
- Le carnet du régleur-Mesures régulation-J.M.VALANCI
 - Edition : VALANCE 2001
- Régulation-C.SERMONDADE
 - Edition : MITHAN 2002
- AUTOMATIQUE-Contrôle et régulation-PATRICK PROUVOST
 - Edition : DOUND
- DrM.Rabi Régulation analogique industrielle – ESTF- G. Thermique-G. Procédés (avec des modifications)