



Département : Electronique

# Polycopié pédagogique

Dr : Fatima Brik

Titre

## Dispositifs Optoélectroniques

Cours destiné aux étudiants de  
Licence Electronique 3<sup>ème</sup> année

Année : 2023

**Semestre: 6**

**Unité d'enseignement: UED 3.2**

**Matière 1: Dispositifs optoélectroniques**

**VHS: 45h00**

**Crédits: 2**

**Coefficient: 2**

**Objectifs de l'enseignement:**

Acquérir des connaissances de base sur l'optoélectronique. Connaître les composants Optoélectroniques et leurs utilisations.

**Connaissances préalables recommandées:**

Physique des semi-conducteurs.

**Contenu de la matière:**

**Chapitre 1. Interaction lumière-semi-conducteur (1 Semaine)**

Propriétés de la lumière, flux lumineux, flux luminance, dualité onde-particule de la lumière, spectre du rayonnement électromagnétique, différents types d'interactions lumière-matière: photo conductivité, photo-ionisation, photoélectron, photovoltaïque.

**Chapitre 2. Propriétés électronique et optique des semi-conducteurs (2 Semaines)**

Structure de bandes des semi-conducteurs, notions sur les bandes d'énergie, processus radiatif et non radiatif dans les semi-conducteurs, phénomène d'absorption de la lumière, composants d'optoélectronique.

**Chapitre 3. Emetteurs de lumière (4 Semaines)**

Diodes électroluminescentes: principe, caractéristiques électriques et spectrale, différents types de diode LED, diodes laser: oscillation laser, caractéristiques électriques et spectrale, différents types de diode laser.

**Chapitre 4. Détecteurs de lumière (4 Semaines)**

Photorésistance: fonctionnement, technologie, symboles et codifications, schémas et applications. Photodiode: fonctionnement, caractéristiques électriques, caractéristiques optiques, symboles et codifications, circuits associés.

Phototransistor: principe, caractéristiques, symboles et codifications, schémas et applications.

Cellules photovoltaïques (Photopile, Batterie solaire): effet photovoltaïque.

Afficheurs à cristaux liquides, Photomultiplicateur, Capteurs d'images.

**Chapitre 5. Fibres optiques (4 Semaines)**

Introduction, optique géométrique, structure de la fibre optique, types de fibres, atténuation, dispersion, fonctionnement des fibres optiques (guidage de l'onde, paramètres, phénomènes non linéaires), connectiques et pertes dans les fibres.

**Mode d'évaluation:**

Examen: 100%.

**Références bibliographiques:**

1. E. Rosencher, B. Vinter, « Optoélectronique », Collection Sciences Sup, Dunod, 2002 - 2e éd.
2. Z. Toffano, « Optoélectronique: composants photoniques et fibres optiques », Ellipses, 2001.
3. G. Broussaud, « Optoélectronique », Edition Masson, 1974.
4. P. Mayé, « Optoélectronique industrielle : conception et applications », Dunod, 2001.
5. J-C. Chaimowicz, « Introduction à l'optoélectronique principes et mise en oeuvre », Dunod.
6. J-M. Mur, « Les fibres optiques : Notions fondamentales », Epsilon, 2011.
7. D. Decoster, J. Harari, « Détecteurs optoélectroniques », Lavoisier, 2002.

### *Avant-propos*

Les prérequis nécessaires au module de dispositifs optoélectroniques sont les notions de base de la physique des semi-conducteurs et de l'optoélectronique. Ce module a pour but de comprendre le fonctionnement fondamental des composants optoélectroniques et leurs utilisations dans le domaine de l'électronique.

Ce polycopié de cours a été préparé selon le canevas officiel de la matière Dispositifs Optoélectroniques inclus dans le programme des étudiants en troisième année de licence en électronique.

Ce manuscrit, rédigé avec concision et simplicité, est le fruit de nombreuses années d'expérience. Il se compose de cinq chapitres :

Le premier chapitre : **Interaction lumière-matière,**

Le deuxième chapitre : **Propriétés électroniques et optiques des semi-conducteurs,**

Le troisième chapitre : **Emetteurs de lumière,**

Le quatrième chapitre : **Détecteurs de lumière,**

Le cinquième chapitre : **Fibres optiques.**

Chaque partie du chapitre est illustrée par des exemples : en donnant un domaine d'application dans la vie quotidienne, afin de faire une meilleure compréhension et permettre à l'étudiant d'acquérir le principe physique de ces dispositifs.

Aussi, à la fin de chaque chapitre, des exercices d'applications avec leurs solutions sont à disposition de l'étudiant, pour mieux évaluer ses acquis, ainsi savoir l'ordre de grandeur des paramètres caractéristiques de chaque composant, ainsi que des questions multi choix (QCM).

La physique des semi-conducteurs et les dispositifs optoélectroniques sont des approches difficiles, mais qui permettent à l'étudiant de réfléchir et d'acquérir une démarche scientifique.

En espérant que cette contribution sera utile à ce module et bénéfique pour les étudiants.

## Table des matières

---

### Table des matières :

Avant-propos.....	1
Table des matières :.....	1
Liste des figures.....	1
Liste des Tableaux.....	1
Liste des symboles.....	1
<b>1. Interaction lumière semi-conducteur.....</b>	<b>1</b>
Introduction.....	1
1.1. Description de la lumière.....	1
1.2. Dualité onde-photon.....	1
1.2.1. La lumière : une onde.....	1
1.2.2. La lumière : un flux de corpuscule.....	2
1.3. Quantifications des niveaux d'énergie de l'atome.....	3
1.4. Propriétés de la lumière.....	3
1.5. Spectre électromagnétique.....	4
1.6. Unités photométriques (grandeurs optoélectroniques).....	5
1.7. Différents type d'interaction Lumière- Matière.....	6
1.7.1. Photoconductivité.....	6
1.7.2. Photo ionisation.....	6
1.7.3. Effet photoélectrique.....	6
1.7.4. Effet photovoltaïque.....	8
Exercices d'applications chapitre 1.....	9
Solutions des exercices d'applications chapitre 1.....	10
Questions à choix multiple (QCM ).....	11
<b>2. Propriétés électroniques et optiques des semi-conducteurs.....</b>	<b>12</b>
Introduction.....	12
2.1. Notions sur les semi-conducteurs.....	12
2.2. Structure et bandes d'énergie du semi-conducteur.....	13
2.3. Notion d'électron et trou.....	15
2.4. Types de semi-conducteurs.....	16
2.4.1. Semi-conducteur intrinsèque.....	16
2.4.2. Semi-conducteur extrinsèque.....	16
2.5. Notions sur les bandes d'énergie dans un semi-conducteur.....	19
2.6. Gap direct et indirect dans les semi-conducteurs.....	19
2.7. Processus radiatif et non radiatif dans les semi-conducteurs.....	20
2.7.1. Génération de porteurs.....	20
2.7.2. Recombinaisons des porteurs.....	21

## Table des matières

---

2.7.2.1. Recombinaison radiative .....	21
2.7.2.2. Recombinaisons non radiatives .....	22
2.8. Phénomène d'absorption et d'émission de la lumière .....	22
2.8.1. Absorption .....	23
2.8.2. Emission .....	23
2.8.2.1. Emission spontanée .....	24
2.8.2.2. Emission stimulée .....	24
2.9. Composants optoélectroniques .....	26
Exercices d'applications du chapitre 2 .....	27
Solution des exercices d'applications chapitre 2 .....	28
Questions à choix multiples (QCM) .....	29
<b>3. Emetteurs de lumière .....</b>	<b>30</b>
Introduction .....	30
3.1. La diode électroluminescente LED .....	30
3.1.1. Principe de fonctionnement de la LED .....	30
3.1.2. Caractéristiques électriques et optiques de la LED .....	32
3.1.3. Rendement d'une diode .....	35
3.1.4. Principales structures de la diode électroluminescente : .....	36
3.1.5. Classification de la LED .....	39
3.1.6. Atouts et limites de la LED .....	40
3.2. La diode LASER .....	43
3.2.1. Présentation et principe de fonctionnement de la diode Laser .....	43
3.2.2. Principales caractéristique de la diode laser .....	44
3.3. Le LASER : .....	44
3.3.1. Condition d'oscillation LASER .....	44
3.3.2. Caractéristiques électriques et optiques d'un Laser .....	46
3.3.3. Différentes catégories des lasers .....	47
Exercices d'applications du chapitre 3 .....	50
Solution des exercices d'applications .....	51
Questions à choix multiples (QCM) .....	52
<b>4. Les détecteurs de lumière .....</b>	<b>53</b>
Introduction .....	53
4.1. Principe de fonctionnement d'un détecteur .....	53
4.2. Les différents types de photo détecteurs .....	53
4.2.1. La photorésistance .....	54
4.2.2. La Photodiode .....	56
4.2.3. Le Phototransistor .....	62

## Table des matières

---

4.2.4. La photopile (cellule solaire) .....	66
4.2.5. Photo coupleur .....	70
4.2.6. Le photomultiplicateur.....	71
4.2.7. Capteur d'image.....	72
4.2.8. Afficheur à cristaux liquides .....	74
Exercices d'applications chapitre 4.....	77
Solution des exercices d'application.....	78
Questions à choix multiples (QCM) .....	79
<b>5. Les fibres optiques.....</b>	<b>80</b>
Introduction.....	80
5.1. La fibre optique .....	80
5.1.1. Structure de la fibre .....	80
5.1.2. Paramètres caractéristiques de la fibre optique.....	81
5.2. Optique géométrique.....	81
5.2.1. Loi de Snell Descartes.....	81
5.2.2. Fonctionnement de la fibre optique .....	82
5.3. Types de fibre optique .....	83
5.3.1.1. Fibres optiques monomodes SMF (Single Mode Fiber).....	83
5.3.1.2. Fibres optiques multi modes (MMF : Multi Mode Fiber).....	84
5.4. Limitations de la fibre optique.....	86
5.4.1. Atténuation.....	87
5.4.2. La dispersion .....	90
5.5. Fenêtres de transmission .....	91
5.6. Domaines d'applications de la fibre optique.....	93
5.6.1. Les télécommunications.....	93
5.6.2. La médecine.....	94
5.6.3. Les capteurs.....	95
5.6.4. L'éclairage.....	96
Exercices d'application chapitre 5.....	98
Solution des exercices d'application.....	99
Questions à choix multiples (QCM) .....	100
Références bibliographiques.....	

## Liste des figures

### Liste des figures

<b>N° Fig.</b>	<b>Titre</b>	<b>Page</b>
1.1	Propagation de l'onde électromagnétique	<b>01</b>
1.2	Phénomènes de réflexion et réfraction de la lumière	<b>03</b>
1.3	Expérience du crayon plongé dans un verre d'eau illustrant le phénomène de réfraction.	<b>04</b>
1.4	Spectre de la lumière visible.	<b>05</b>
1.5	Principe de l'effet photoélectrique	<b>07</b>
2.1	Structure cristalline	<b>13</b>
2.2	Représentation énergétique	<b>14</b>
2.3	Phénomène de recombinaison	<b>15</b>
2.4	Semiconducteur de type N	<b>17</b>
2.5	Le silicium dopé au phosphore à température ambiante	<b>17</b>
2.6	Structure du silicium dopé au bore (type P)	<b>18</b>
2.7	Silicium dopé au bore à température ambiante	<b>18</b>
2.8	Structure de bandes dans les semiconducteurs	<b>19</b>
2.9	Semi-conducteur à gap direct (à gauche), à gap indirecte (à droite)	<b>20</b>
2.10	Phénomène d'absorption dans le semiconducteur	<b>23</b>
2.11	Phénomène d'émission spontanée	<b>24</b>
2.12	Phénomène d'émission stimulée	<b>25</b>
3.1	La jonction PN sans polarisation	<b>31</b>
3.2	Principe de fonctionnement de la LED sous polarisation	<b>32</b>
3.3	Caractéristiques puissance-courant	<b>33</b>
3.4	Spectre d'émission d'une LED	<b>34</b>
3.5	Structure de la LED encapsulée (Dome LED)	<b>36</b>
3.6	Structure de la LED planaire (Planer LED)	<b>37</b>
3.7	Structure ELED	<b>38</b>
3.8	a) Structure de la diode LASER b) photo réelle d'une diode laser verte.	<b>43</b>
3.9	Système à trois niveaux d'énergie (avec pompage optique)	<b>45</b>
3.10	Structure d'un résonateur optique	<b>46</b>
3.11	Caractéristique de sortie du laser	<b>47</b>
4.1	Principe d'un détecteur à base de semi-conducteur	<b>51</b>
4.2	Symbole de la photorésistance à gauche, photorésistance réelle à droite	<b>54</b>
4.3	Symbole de la photodiode à gauche, Photodiode réelle à droite	<b>57</b>
4.4	Principe de fonctionnement de la photodiode PIN	<b>58</b>
4.5	Réponse spectrale de la photodiode	<b>60</b>
4.6	Sens de directivité d'une photodiode	<b>60</b>
4.7	Schéma électrique équivalent à de la photodiode avec son symbole.	<b>61</b>
4.8	a) Symbole du phototransistor b) Structure du phototransistor	<b>83</b>
4.9	Montage d'application d'un phototransistor	<b>65</b>
4.10	Schéma d'une photopile (structure d'une photopile)	<b>67</b>
4.11	Découpe des wafers (tranches fines) à partir de lingot de Silicium	<b>68</b>
4.12	Panneau solaire	<b>69</b>
4.13	Structure d'un Opto-coupleur - Exemple d'optocoupleur réel	<b>71</b>

## Liste des figures

---

4.14	Structure d'un photomultiplicateur à gauche, à droite un photomultiplicateur	<b>71</b>
4.15	Structure d'une cellule CCD à gauche, image réelle d'un capteur CCD à droite	<b>73</b>
4.16	Composition d'une cellule à cristaux liquide.	<b>75</b>
5.1	Structure d'une fibre optique	<b>80</b>
5.2	Loi de Snell-Descartes : angle limite de réfraction et réflexion.	<b>82</b>
5.3	Guidage de la lumière dans le cœur de la fibre optique	<b>83</b>
5.4	Structure d'une fibre optique monomode	<b>84</b>
5.5	Profil d'indice dans une fibre optique à saut d'indice.	<b>85</b>
5.6	Modes de propagation dans une fibre optique multimode à saut d'indice	<b>85</b>
5.7	Structure d'une fibre optique à gradient d'indice	<b>86</b>
5.8	propagation de la lumière dans une fibre à gradient d'indice.	<b>86</b>
5.9	Phénomènes d'atténuation et de dispersion dans une fibre optique.	<b>87</b>
5.10	Illustration d'une courbure dans une fibre optique.	<b>89</b>
5.11	fenêtres de transmission pour la fibre en Silice.	<b>91</b>
5.12	Sources de pertes dans une chaîne de transmission par fibre optiques.	<b>92</b>

## Liste des tableaux

---

### *Liste des Tableaux*

<b>N° Tableau</b>	<b>Titre</b>	<b>Page</b>
1.1	Fréquence seuil de quelques métaux	<b>07</b>
2.1	Quelques exemples des semi-conducteurs composés.	<b>14</b>

## Liste des symboles

---

### Liste des symboles

**C** : Célérité de la lumière (vitesse de la lumière dans le vide)

**v** : fréquence [Hz]

**$\lambda$**  : Longueur d'onde [m]

**h** : constante de planck

**E** : énergie [eV] ou [J]

**e = q** : charge élémentaire

**$E_c$**  : niveau d'énergie de la bande de conduction

**$E_v$**  : niveau d'énergie de la bande de valence

**$E_g$**  : énergie de gap

**Cd** : Candela

**Lx** : lux

**L** : luminance

**F** : flux lumineux

**$\eta$**  : rendement quantique

**k** : constante de boltzman

**$U_v$**  : densité spectrale d'énergie

**S** : sensibilité

**$I_{ob}$**  : courant d'obscurité

**$I_{ph}$**  : Photocourant

**CTR** : Curent Transfert Ratio d'un optocoupleur

**$\Delta$**  : différence d'indice

**n** : indice de réfraction.

**ON** : ouverture numérique

**Dc** : diamètre du cœur de la fibre

**$D_{ch}$**  : coefficient de dispersion chromatique

## 1. Interaction lumière semi-conducteur

### Introduction

Dans ce chapitre nous allons commencer d'abord par la définition de la lumière et la dualité onde-photon, puis nous présentons ses propriétés, et enfin nous aborderons l'effet photoélectrique et ses dérivés.

### 1.1. Description de la lumière

La lumière est le facteur physique qui rend les objets visibles et plus facilement éclairés par l'œil : sans lumière, nous ne pouvons pas voir, donc la lumière est un type de rayonnement électromagnétique qui a la particularité de pouvoir être détecté par l'œil.

La lumière est aussi un phénomène vibratoire qui transfère de l'énergie par propagation ; autrement dit, le rayonnement peut être caractérisé en termes d'énergie. C'est l'énergie transmise par la lumière qui permet de réchauffer notre planète.

### 1.2. Dualité onde-photon

La dualité de la lumière décrit le principe selon lequel la lumière se comporte à la fois comme une onde et comme un flux de particules (photons).

#### 1.2.1. La lumière : une onde

La lumière est une onde électromagnétique (**OEM**) ; elle possède toutes les propriétés de l'onde en particulier, la longueur d'onde  $\lambda$  et la fréquence  $f$ .

La lumière visible par l'œil humain ne correspond donc qu'à une partie du spectre solaire (longueurs d'ondes comprises entre 380 et 780 nm).

L'onde électromagnétique est constituée d'un champ électrique et un champ magnétique oscillants à la même fréquence.

Ces deux champs sont perpendiculaires l'un à l'autre et à la direction de propagation.

Figure (1.1)

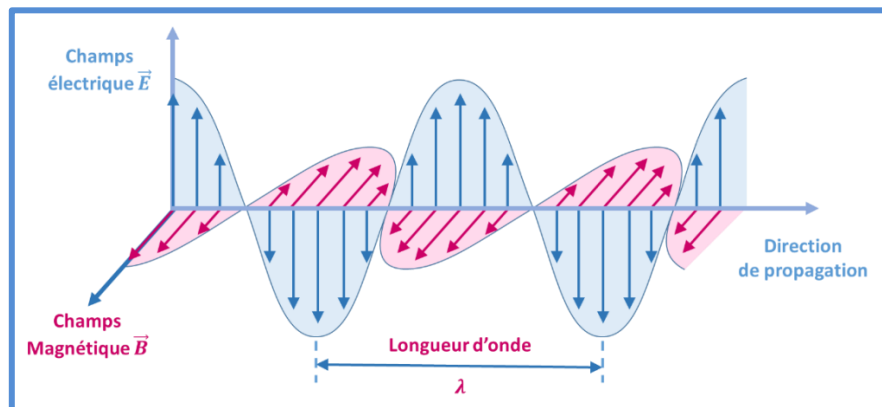


Figure (1.1) : Propagation de l'onde électromagnétique

## Chapitre 1 : Interaction lumière semi-conducteur

---

➤ On dit que la lumière a un aspect ondulatoire.

La théorie ondulatoire (de Maxwell) à prédire l'existence des ondes électromagnétique et montrer que la lumière même est une onde électromagnétique uniformément répartie.

Dans le vide, la lumière se propage en ligne droite à la vitesse de la lumière notée C.

La fréquence et la longueur d'onde sont liées par la relation :

$$\lambda = C/f \quad (1.1)$$

Avec :

C : célérité de la lumière (vitesse de la lumière dans le vide) :  $C = 3.10^8 \text{ ms}^{-1}$  ;

f : fréquence [Hz] ;  $\lambda$  : Longueur d'onde [m].

### 1.2.2. La lumière : un flux de corpuscule

Des expériences ont permis de montrer que la lumière pouvait également être considérée comme un flux de particule : **des photons** (particules élémentaires qui constituent la lumière).

- Les photons se déplacent à la vitesse de la lumière  $C = 3.10^8 \text{ ms}^{-1}$
- Ils n'ont pas de masse, ni de charge électrique
- Chaque photon transporte (véhicule) une énergie E ; telle que :

$$E = h\nu \quad (1.2)$$

Avec :

E : Énergie en [J] ou [eV]

h : Constante de Planck en [J.s]

$\nu$  (nu) : la fréquence [Hz =  $\text{s}^{-1}$ ]

C'est Albert Einstein qui a mis le postulat du terme photon.

#### Astuce de calcul

En utilise pour simplifier les calculs pour l'énergie, l'expression :  $E_g = 1.24/\lambda(\mu\text{m})$

Comme :

$$E = h\nu = hC/\lambda = 6.62.10^{-34} \cdot 3.10^8 / 1.6.10^{-19} = 1240 \text{ nm.eV} = 1.24 \mu\text{m.eV}$$

Donc :  $E_g = 1.24 / \lambda (\mu\text{m})$ .

### 1.3. Quantifications des niveaux d'énergie de l'atome

D'après la théorie de la physique quantique, les atomes ne peuvent posséder qu'une quantité d'énergie déterminée, ce qui correspond à une certaine répartition des électrons dans les couches électroniques (couches K, L, M).

Les énergies échangées entre matière et lumière ne peuvent pas prendre donc des valeurs quelconques, les transferts énergétiques sont discontinus ou quantifiés : ils ne peuvent se faire que par **paquets** ou **quanta** d'énergie bien déterminée.

### 1.4. Propriétés de la lumière

Par sa nature, quand la lumière change de milieu de propagation, elle peut subir plusieurs phénomènes, comme la réflexion et la réfraction.

Lorsqu'un faisceau lumineux rencontre une surface séparant deux milieux d'indices de réfraction différents : deux phénomènes peuvent se produire : la réfraction et la réflexion.

Dans la réflexion, la lumière change de direction et reste dans le milieu.

Dans la réfraction, la lumière change de direction et traverse (pénètre) la surface séparant les deux milieux.

La figure (1.2) illustre les phénomènes de réflexion et réfraction de la lumière.

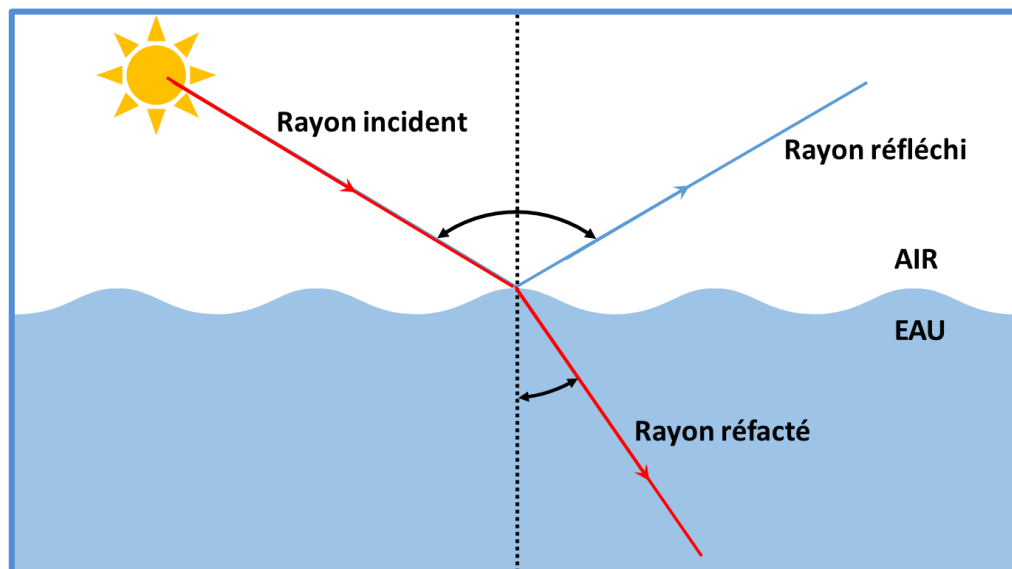


Figure (1.2) : Phénomènes de réflexion et réfraction de la lumière

### *Exemple dans la vie quotidienne :*

Lorsque vous faites plonger un crayon dans un verre d'eau, vous observez que le crayon est semblé cassé. En effet, c'est une illusion optique.

Le phénomène de réflexion permet de voir le crayon et c'est le phénomène de réfraction qui donne au bâton son aspect "cassé" : donc on voit le crayon cassé. Figure (1.3)



Figure (1.3) : Expérience du crayon plongé dans un verre d'eau illustrant le phénomène de réfraction.

### **1.5. Spectre électromagnétique**

Nous vivons au milieu des ondes électromagnétiques, elles nous entourent partout : téléphone portable, four micro-onde, imagerie médicale, GPS, ...elles sont invisibles et imperceptibles.

La lumière visible est la seule onde électromagnétique que l'œil humain peut percevoir, les autres ondes sont invisibles (non détectées par l'œil).

La lumière visible appartient donc à la grande famille des ondes électromagnétiques dont le spectre de la figure (1.4) est décomposé en différents domaines : des rayons gamma aux ondes radio. La lumière visible par l'œil humain ne correspond donc qu'à une partie du spectre solaire. Elle s'étend de 400nm à 780nm et comporte les sept couleurs (rouge au violet).

La lumière blanche est composée de toutes les couleurs. La dispersion de la lumière est observée lorsque la lumière blanche est décomposée en couleurs individuelles.

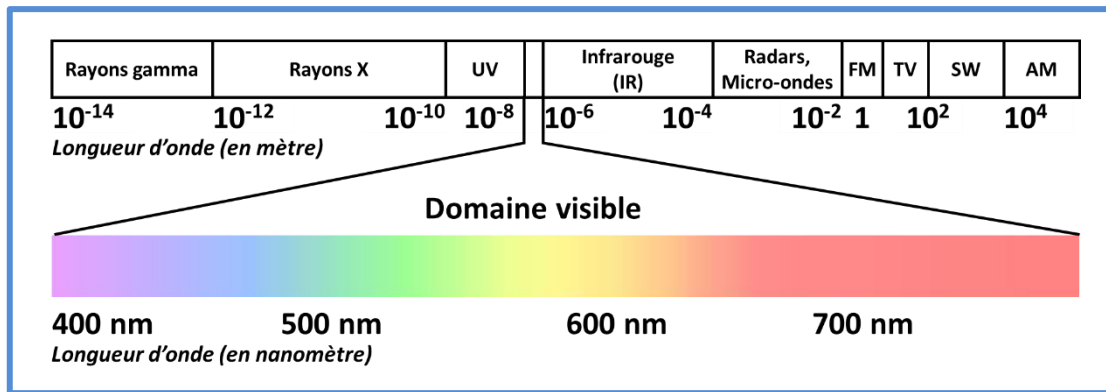


Figure (1.4) : Spectre de la lumière visible.

### 1.6. Unités photométriques (grandeurs optoélectroniques)

La photométrie est l'art de mesurer le rayonnement lumineux, ses différentes grandeurs sont : le flux lumineux, l'intensité lumineuse, l'éclairement et la luminance.

#### a) Flux lumineux

Puissance lumineuse émise dans toutes les directions par une source (débit de lumière), il se mesure en Lumens (lumène= lumière).

Symbole : F[lm]

#### b) Intensité lumineuse

Partie du flux la plus petite possible dans une seule direction, elle se mesure en Candela.

Symbole : I[Cd]

Le Candela= intensité lumineuse d'une source qui émet un Lumen par Stéradian.

Le Stéradian est l'unité de mesure de l'angle solide

#### c) Eclairement

L'éclairement d'une surface est égal au flux lumineux tombant sur chaque mètre carré de cette surface, il se mesure en Lux

Symbole : E[lx]

lx : éclairement d'une surface unité qui reçoit un lumen

#### d) Luminance

Elle correspond au nombre de Candela par mètre carré de surface apparente, elle caractérise l'aspect lumineux d'une surface éclairée ou d'une source dans une direction précise.

Symbole : L[Cd/m<sup>2</sup>].

### 1.7. Différents type d'interaction Lumière- Matière

On désigne sous le nom d'effet photoélectrique tous les phénomènes électriques qui sont provoqués par l'action de la lumière sur la matière.

L'absorption de la lumière par un solide peut entraîner l'éjection des électrons dans le vide ou dans le milieu qui est en contact avec lui : on parle alors d'émission photoélectrique.

L'absorption de la lumière peut également augmenter la conductivité d'un corps : on parle alors de photoconductivité.

Certaines chaînes de conducteurs éclairés de façon appropriée font apparaître des forces électromotrices d'où il résulte une transformation directe d'énergie lumineuse en énergie électrique : on parle alors d'effet photovoltaïque.

#### 1.7.1. Photoconductivité

La photoconductivité est un mécanisme physique : on dit qu'il ya photoconductivité chaque fois que la résistance électrique d'un corps fluctue, quand on l'éclaire avec une radiation électromagnétique apparente à l'ensemble des domaines du spectre lumineux.

Ce phénomène s'observe sur les matériaux semiconducteurs résistifs : la lumière avec une fréquence (énergie) suffisante va restituer suffisamment d'énergie aux électrons dans la bande de valence pour franchir la bande de conduction. Les électrons résultants et leurs trous associés vont permettre d'augmenter la conductivité électrique, par conséquent la diminution de la résistance.

#### 1.7.2. Photo ionisation

De manière basique, l'ionisation d'un atome ou d'une molécule est réalisée si l'apport d'énergie (rayonnement) est supérieur à l'énergie de liaison d'un des électrons périphériques qui, arraché de l'atome, donne un ion chargé positivement (cation). On dit que l'atome n'est plus neutre électriquement lorsqu'il perd ou gagne des charges.

La photo ionisation se produit lorsqu'une molécule M absorbe un photon d'énergie  $h\nu$  selon la réaction :  $M + h\nu \rightarrow M^+ + 1e^-$

#### 1.7.3. Effet photoélectrique

En 1887, Hertz réalisa expérimentalement qu'un matériau métallique (zinc) exposé à la lumière pouvait émettre des particules chargés négativement (électrons). Cette découverte porte le nom : effet photoélectrique.

La figure (1.5) illustre l'effet photoélectrique : quand une source de lumière (photons) est projetée sur un métal, la lumière rejette des électrons à la surface du métal.

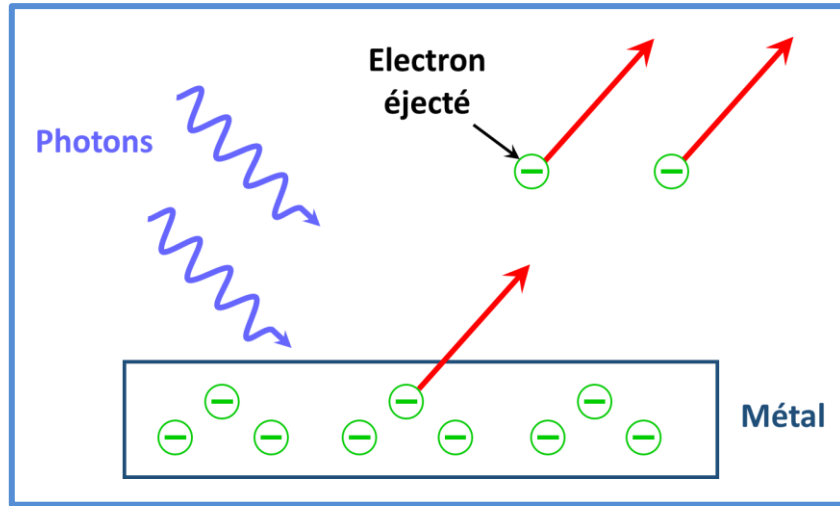


Figure (1.5) : Principe de l'effet photoélectrique

**Interprétation de l'effet photoélectrique par Einstein :**

Pour extraire un électron d'un métal, il faut lui fournir une énergie appelé : travail de sortie (travail d'extraction), notée  $W_s$ .

-A l'intérieur du métal, l'électron a moins d'énergie, car il est lié au réseau.

-Lorsque l'électron reçoit une énergie  $E=W_s$ , il est sorti du métal, mais il est au repos.

- Lorsque l'électron capte une énergie  $E > W_s$ , il est sorti du métal, et a une énergie cinétique

L'effet photoélectrique est une interaction entre photon et électron et il existe un seuil photoélectrique qui caractérise chaque matériau.

Le tableau (1.1) donne des exemples de fréquences seuils des différents matériaux utilisés.

**Tableau (1.1) : Fréquence seuil de quelques métaux**

Métal	Symbole	$\lambda_0$ ( $\mu\text{m}$ )	$\nu_0$ ( $10^{14}$ Hz)
<i>Césium</i>	Cs	0,65	4,62
<i>Potassium</i>	K	0,54	5,56
<i>Sodium</i>	Na	0,52	5,77
<i>Baryum</i>	Ba	0,50	6,00
<i>Zinc</i>	Zn	0,37	8,11
<i>Molybdène</i>	Mo	0,30	10,0
<i>Cuivre</i>	Cu	0,29	10,3
<i>Argent</i>	Ag	0,27	11,1
<i>Platine</i>	Pt	0,19	15,3

### 1.7.4. Effet photovoltaïque

L'effet photovoltaïque est le procédé permettant de transformer l'énergie lumineuse du soleil en énergie exploitable par l'homme en l'occurrence en électricité.

La cellule photovoltaïque est le composant électronique de base. Elle utilise l'effet photoélectrique pour convertir les ondes électromagnétiques émises par le soleil en électricité.

Plusieurs cellules reliées entre elles forment un module solaire photovoltaïque. Plusieurs modules regroupés forment une installation solaire.

L'électricité est soit consommée ou stockée sur place, soit transportée par le réseau de distribution et le réseau de transfert.

✚ Quelques applications de l'effet photoélectrique dans la vie quotidienne :



### Exercices d'applications chapitre 1

- **Applications n°1**

- Calculer l'énergie qui correspond à la longueur d'onde  $\lambda=400\text{nm}$  et  $\lambda=700\text{nm}$ .
- Calculer en (J) puis en (eV) l'énergie d'un photon issu d'un laser de longueur d'onde  $\lambda=3.39\mu\text{m}$ .

- **Application n°2**

Un atome de sodium se désexcite en émettant un photon d'énergie  $E = 2,11 \text{ eV}$ .

- Calculer la longueur d'onde du rayonnement émis.
- Quel est le travail d'extraction d'une radiation lumineuse de fréquence  $\nu = 5.10^{14}\text{Hz}$

- **Application n°3**

On dispose d'une cellule photoélectrique au potassium dont le travail d'extraction est de  $2,3 \text{ eV}$ . On l'éclaire par un faisceau de deux radiations de longueur d'onde  $\lambda_1=420 \text{ nm}$  et  $\lambda_2=610 \text{ nm}$ .

- Calculer l'énergie des photons correspondant aux deux radiations et préciser si celles-ci conduisent à observer un effet photoélectrique.

- **Application n°4**

On produit un effet photoélectrique sur un morceau d'étain de fréquence seuil  $\nu_0= 9 \times 10^{14} \text{ Hz}$ .

- Quelle est la longueur d'onde correspondante ?

- **Application n°5 :**

L'énergie d'extraction d'un électron d'une surface métallique est  $W_{\text{ext}} = 2.2\text{eV}$ .

Si on l'éclaire par une radiation lumineuse dont  $\lambda = 355\text{nm}$ .

- Calculer l'énergie d'un photon et montrer que l'on doit observer l'effet photoélectrique.

On donne :

- **Constante de Planck** :  $h=6,62 \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$
- **Conversion d'unités** :  $1 \text{ eV} = 1,60 \times 10^{-19} \text{ J}$
- **Célérité de la lumière dans le vide** :  $C=3,00 \times 10^8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$
- **Charge électrique élémentaire** :  $e = q = 1.602 \times 10^{-19} \text{ C}$
- **Masse effective d'un électron** :  $m_e = 9.10^{-31} \text{ kg}$

### *Solutions des exercices d'applications chapitre 1*

➤ **Solution application n°1 :**

$$E = 3.1\text{eV} = 4.96 \cdot 10^{-19}\text{J} \quad \text{et} \quad E = 1.77\text{eV} = 2.83 \cdot 10^{-19}\text{J}$$

$$E = 0.36\text{eV} = 0.58 \cdot 10^{-19}\text{J}$$

➤ **Solution application n°2 :**

$$\lambda = 0.587\mu\text{m}$$

$$W_{\text{ext}} = 3.31 \cdot 10^{-19}\text{J} = 2.06\text{eV}$$

➤ **Solution application n°3 :**

$$E_1 = 2.95\text{eV} \quad E_2 = 2.03\text{eV}$$

$$E_1 > W_{\text{ext}} = E_0 = 2.3\text{eV} \rightarrow \text{Existence de l'effet photoélectrique}$$

$$E_2 < E_0 \rightarrow \text{pas d'effet électronique}$$

➤ **Solution application n°4 :**

$$\lambda = 3.3 \cdot 10^{-7}\text{m} = 0.33\mu\text{m}$$

➤ **Solution application n°5 :**

$$E_{\text{ph}} = 3.493\text{eV} = 3.5\text{eV} > W_{\text{ext}} \rightarrow \text{observation d'effet photoélectrique}$$

*Questions à choix multiple (QCM)*

1. **L'intensité lumineuse est la partie du flux dans une :**
  - Seule direction
  - plusieurs directions
  - selon l'angle solide
2. **Lors de l'arrachage d'un électron par effet photoélectrique, le travail d'extraction est :**
  - L'énergie de l'électron extrait
  - L'énergie que possède le photon
  - L'énergie minimale pour qu'il ait extraction
  - L'énergie que le photon a transmis à l'électron
3. **La lumière du soleil est :**
  - monochromatique
  - poly chromatique
  - possède 7couleurs
4. **La lumière peut être considérée comme :**
  - Flux de particule
  - OEM
  - Phonon
  - Onde et photon
5. **L'unité de mesure de l'intensité lumineuse est :**
  - Watt/cm
  - Lumen
  - Candela
  - Watt
6. **Les cellules photovoltaïques produisent à partir du rayonnement solaire :**
  - Un courant alternatif
  - de la chaleur
  - Un courant continu
  - Une lumière
7. **Le flux lumineux se mesure en :**
  - Lux
  - Lumen
  - Candela
  - Watt
8. **Le stéradian est l'unité de mesure du :**
  - L'intensité lumineuse
  - Angle solide
  - la luminosité
  - le photon
9. **La longueur d'onde et la fréquence sont reliées par l'expression :**
  - $f=C/\lambda$
  - $f=\lambda/T$
  - $f=C/T$
10. **Le photon transporte une énergie caractérisée par :**
  - une longueur d'onde
  - une masse effective
  - une charge positive

### 2. Propriétés électroniques et optiques des semi-conducteurs

#### Introduction

On a vu que la lumière est capable d'interagir avec la matière plus précisément au niveau microscopique, les photons qui composent la lumière peuvent interagir avec les atomes qui constituent la matière.

Dans ce chapitre, nous allons tenter de montrer comment la matière et le rayonnement interagissent. En effet, Les propriétés électroniques et optiques des semi-conducteurs dérivent directement de la structure des atomes qui constituent le matériau. Nous allons d'abord faire un rappel sur les semi-conducteurs, puis nous intéressons particulièrement à la façon dont la matière absorbe ou émet du rayonnement en examinant qualitativement et quantitativement les différents processus d'interaction.

#### 2.1. Notions sur les semi-conducteurs

Un semi-conducteur est un matériau qui possède une conductivité électrique intermédiaire entre celle des métaux et celle des isolants.

Dans un **matériau conducteur**, les liaisons chimiques n'utilisent pas tous les électrons de la couche périphérique. Ceux qui sont excédentaires sont alors libres de circuler et se déplacent naturellement dans la bande de conduction (même à 0K). Ceci se traduit par un gap nul ou négatif : les bandes de conduction et de valence se chevauchent.

L'énergie de gap de l'Etain (Sn) est de 0 eV

Un **matériau isolant** possède un gap élevé. Tous les électrons de la couche périphérique sont utilisés dans les liaisons chimiques covalentes. A la température de 0K, il n'y a pas d'électrons dans la bande de conduction. Une élévation de la température peut toutefois apporter l'énergie nécessaire au passage de certains électrons dans la bande de conduction, mais à température ambiante, cette probabilité est très faible, et le matériau reste isolant.

L'énergie de gap du carbone est de 5.5eV.

Un **matériau semi-conducteur (SC)** est un isolant possédant un faible gap. Il est parfaitement isolant à 0K, mais devient progressivement conducteur lorsque la température augmente ou par apport d'énergie sous une forme quelconque (lumière ou tout rayonnement électromagnétique, chauffage). Il reste cependant proche de l'isolant à température ambiante.

L'énergie de gap du silicium est de 1.12 eV

### 2.2. Structure et bandes d'énergie du semi-conducteur

Une structure cristalline est constituée d'un assemblage régulier d'atomes.

Un atome est en général constitué de plusieurs couches d'électrons qui se trouvent autour du noyau. La disposition de ses électrons se fait suivant un arrangement spécifique, comme s'est illustré à la figure (2.1).

Ces atomes mettent en commun des électrons de leur couche périphérique pour constituer des **liaisons covalentes**.

La couche électronique périphérique assure la stabilité de l'atome. Elle est complète lorsqu'elle comporte 8 électrons pour atteindre la saturation.

Les résultats de la mécanique quantique montrent, que chaque électron possède un niveau d'énergie déterminé. Les deux dernières sont :

- **La bande de valence** si l'électron est attaché à l'atome.
- **La bande de conduction** si cet électron se libère de l'atome (on dit alors qu'il est libre).

Des bandes interdites séparent tous ces niveaux.

La figure (2.2), illustre ce phénomène. La distance énergétique séparant les bandes de conduction et de valence est appelée 'Gap'. Sa valeur détermine la plus ou moins bonne conductivité du matériau : plus le gap est faible, plus le matériau est conducteur.

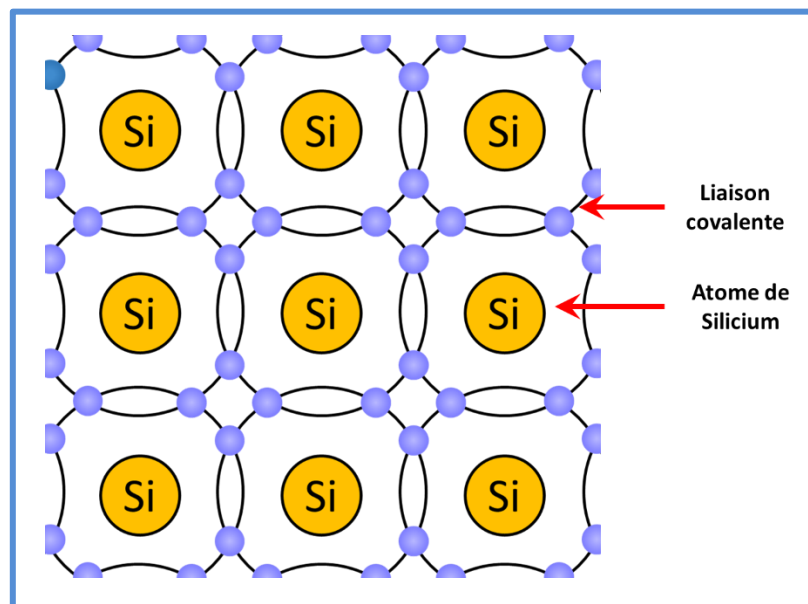


Figure (2.1) : Structure cristalline

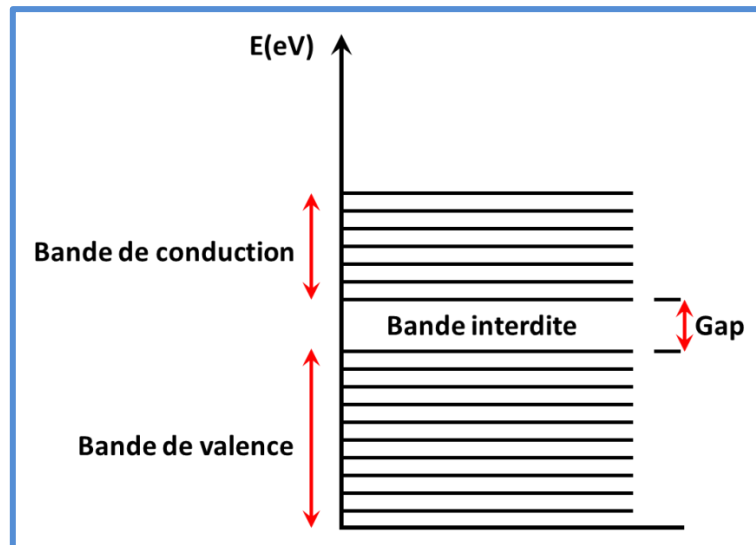


Figure (2.2) : Représentation énergétique

Il existe des semi-conducteurs simples, constitués d'un seul élément comme le Silicium et le germanium, et des semi-conducteurs composés (alliages) : soit de deux types d'atomes, de trois et même de quatre types d'atomes.

Le tableau (2.1) montre quelques types des semi-conducteurs selon le tableau de Mendeleïev.

**Tableau 2.1 : Quelques exemples des semi-conducteurs composés.**

Colonne		Semi-conducteur
IV		Ge, Si
III-V	Binaire	GaAs, GaP, GaSb, InAs, InP, InSb
	Ternaire	$Al_xGa_{1-x}As$ , $GaAs_yP_{1-y}$
	Quaternaire	$Al_xGa_{1-x}As_yP_{1-y}$
II-VI	Binaire	CdS, HgTe, CdTe, ZnTe, ZnS
	Ternaire	$Cd_xHg_{1-x}Te$

### ✚ Application des semi-conducteurs :

Les conducteurs sont des conducteurs, on ne peut-on faire que pour conduire le courant. Tels que : le cuivre, l'aluminium et l'or.

Les isolants sont des isolants, donc ne conduisent pas le courant, comme le : bois, la silice, le plastique.

Les semi-conducteurs sont à la base des composants électroniques, on peut fabriquer une diode, un transistor...etc.

## Chapitre 2 : Propriétés électroniques et optiques des semi-conducteurs

Le matériau semi-conducteur le plus utilisé en électronique est le **Silicium** (de symbole Si et de nombre atomique 14), car c'est un matériau abondant, et constitue 25% de présence dans la croûte terrestre, en plus on maîtrise bien sa production et son technologie de fabrication.

### 2.3. Notion d'électron et trou

Lorsqu'un électron quitte la bande de valence pour atteindre la bande de conduction, il se déplace librement dans le réseau. L'atome qu'il laisse n'est plus neutre, mais s'ionise positivement. Cet atome dispose donc d'une place inoccupée appelée 'trou' on dit aussi 'lacune'.

Un électron venant d'un atome voisin peut alors occuper la place libre en laissant un trou à son tour : c'est le mécanisme de recombinaison d'une paire électron-trou illustré à la figure (2.3).

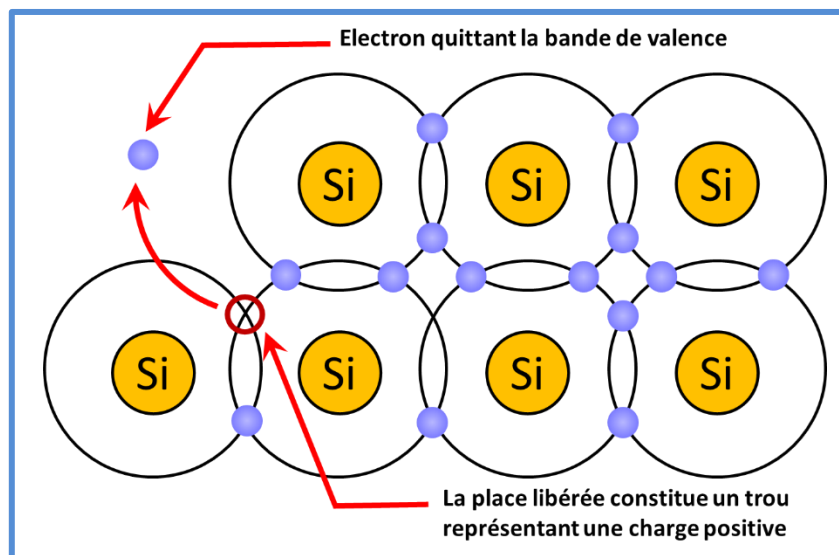


Figure (2.3) : Phénomène de recombinaison

Le mouvement des charges négatives s'accompagne donc nécessairement d'un mouvement des trous dans le sens inverse.

### 2.4. Types de semi-conducteurs

#### 2.4.1. Semi-conducteur intrinsèque

Dans un semi-conducteur intrinsèque se sont les mêmes atomes qui constituent le cristal. Donc le cristal n'est pas pollué par des impuretés.

Pour une température différente de 0K, les électrons devenir libres où leur concentration est notée  $n$ . ces électrons laissent des trous dans la bande de valence, qui sont eux aussi libres avec une concentration notée  $p$ .

Dans un semi-conducteur intrinsèque on a l'égalité :

$$n = p = n_i^2 \text{ (Concentration intrinsèque).}$$

#### 2.4.2. Semi-conducteur extrinsèque

Dans un semi-conducteur extrinsèque, on ne trouve pas le même type d'atomes qui constitue le cristal, cependant il y'en a d'autres.

L'opération de dopage est une technique utilisée afin d'augmenter et d'améliorer les performances de conduction des semi-conducteurs.

La technologie de dopage augmente la densité de porteurs à l'intérieur du matériau semi-conducteur. Si la densité électronique est augmentée, il s'agit d'un dopage de type N ; si la densité de trous est augmentée, il s'agit d'un dopage de type P, et de tels matériaux dopés sont appelés semi-conducteurs extrinsèques.

Un Semi-conducteur dopé est une structure cristalline dans laquelle on a introduit des atomes étrangers. Pour le cas du silicium on introduit des atomes étrangers de valence 3 ou 5. L'état électronique s'en trouve modifié : le dopage accroît la conductibilité du cristal tout en le maintenant entre l'isolant et le conducteur.

##### a) *Semi-conducteur dopé N*

En choisissant un dopant de valence 5 (phosphore, arsenic), le SC contient des électrons excédentaires qui traduisent des charges négatives supplémentaire : le semi-conducteur est dopé N, figure (2.4).

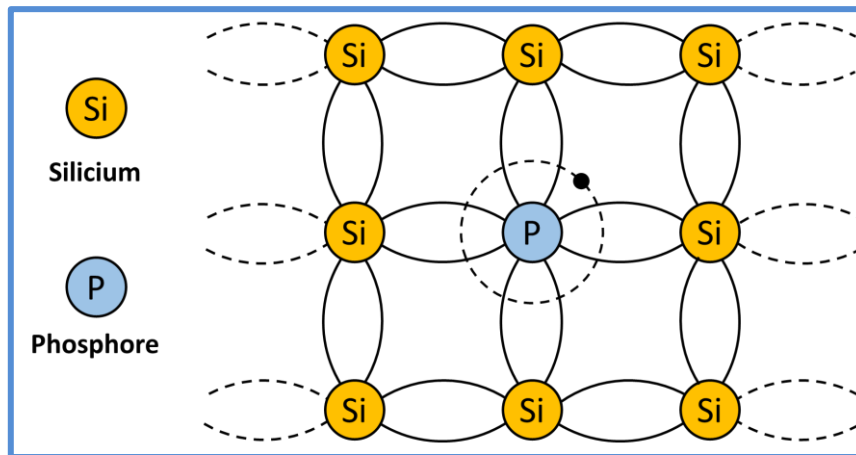


Figure (2.4) : Semiconducteur de type N

A température ambiante, tous les atomes dopants sont ionisés, mais le matériau reste neutre. Chacun a libéré un électron qui circule dans le réseau. On distingue alors deux types de porteurs de charges : figure (2.5).

- des électrons libres ;
- des ions positifs fixes (les atomes dopants qui perdent un électron).

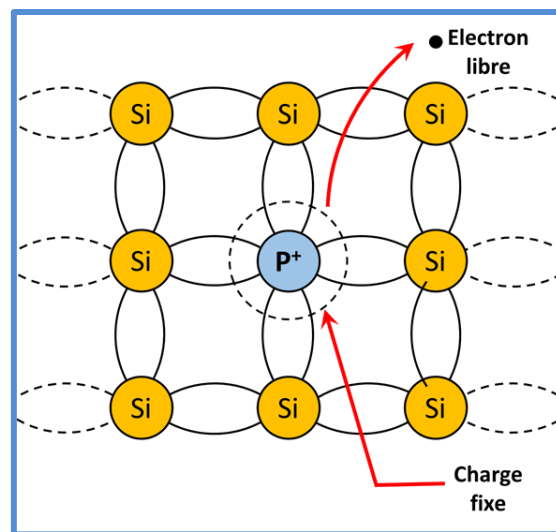


Figure (2.5) : Le silicium dopé au phosphore à température ambiante.

On dit que les atomes de phosphores sont des atomes donneurs et de concentration notée  $N_D$ .

L'électron ainsi libre se trouve dans un niveau d'énergie proche au niveau  $E_c$  de la bande de conduction.

### b) Semi-conducteur dopé P

En substituant des atomes de valence 3 (bore, aluminium, galium, indium), des électrons manquent pour compléter les couches périphériques voisines, figure (2.6). Ceci entraîne la présence de charges positives excédentaires : le SC est dopé P (ou de type P).

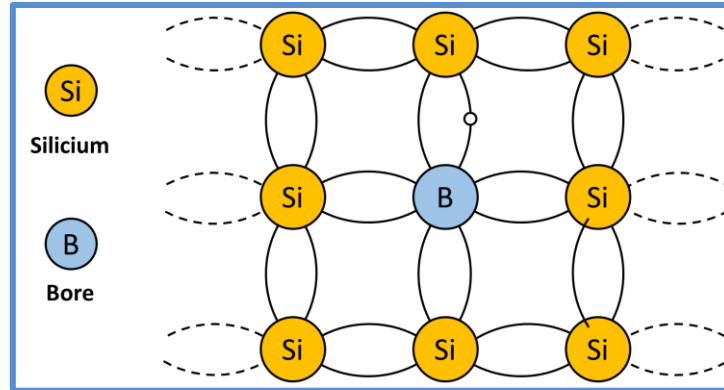


Figure (2.6) : Structure du silicium dopé au bore (type P)

A température ambiante, tous les atomes dopants sont ionisés. Chacun a généré un trou qui est libre de circuler dans le réseau. Tout en restant globalement neutre, on distingue donc deux types de porteurs de charges :

- des trous libres.
- des ions négatifs fixes (les atomes dopants qui gagnent un électron). Figure (2.7)

On dit que les atomes de bore sont des atomes accepteurs et de concentration notée  $N_A$ .

Le trou ainsi créé se trouve dans un niveau d'énergie proche au niveau  $E_v$  de la bande de valence.

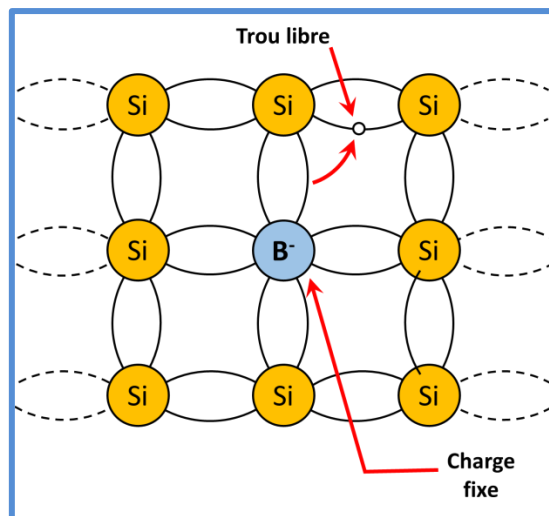


Figure (2.7) : Silicium dopé au bore à température ambiante

### 2.5. Notions sur les bandes d'énergie dans un semi-conducteur

Le comportement électrique des semi-conducteurs est souvent modélisé à l'aide de la théorie des bandes d'énergie.

La formation des bandes interdites étant due à la régularité de la structure cristalline.

Lorsque les atomes se trouvent dans un cristal (arrangement périodique), les niveaux discrets se rassemblent dans des bandes d'énergies (valence et conduction).

La théorie de la physique quantique nous renseigne que le nombre de niveaux d'énergie est le même que le nombre des atomes.

Dans un semi-conducteur, les bandes d'énergie permise sont séparées par des zones appelées bandes interdites où il n'y a pas de niveau d'énergie permise.

La figure (2.8) représente le diagramme de bandes d'énergie dans un semi-conducteur.

Avec :

$E_c$  : niveau d'énergie le plus bas de la bande de conduction

$E_v$  : niveau d'énergie le plus élevé de la bande de valence.

$E_g = E_c - E_v$  : est l'énergie du gap

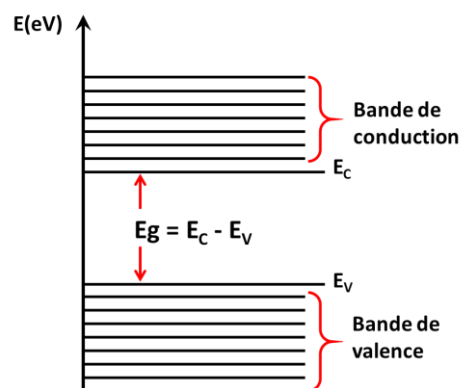


Figure (2.8) : Structure de bandes dans les semiconducteurs

### 2.6. Gap direct et indirect dans les semi-conducteurs

Les courbes  $E_c$  et  $E_v$  ( $K$ ) dites aussi : 'relation de dispersion ' où  $E_c$  est le bas de la bande de conduction,  $E_v$  le haut de la bande de valence et  $K$  le vecteur d'onde associé à un électron, font apparaître deux types de semi-conducteurs : ceux pour lesquels le minimum de  $E_c$  et le maximum de  $E_v$  se produisent pour la même valeur du  $K$  ( fonction d'onde d'électron), que l'on appellera **Semi-conducteurs à gap direct**, et les autres appelés **semi-conducteurs à gap indirect**. Figure (2.9).

## Chapitre 2 : Propriétés électroniques et optiques des semi-conducteurs

La nature du gap joue un rôle fondamental dans l'interaction du semi-conducteur avec le rayonnement lumineux : utilisation en optoélectronique.

La figure de gauche montre le cas d'une transition directe ; ce cas se rencontre pour le GaAs. Lors de la transition, l'électron peut émettre un photon dont la longueur d'onde est directement liée à la distance énergétique.

La figure de droite montre le cas d'une transition indirecte ; ce cas se rencontre pour le Si. Pour un électron transitant depuis le bas de la bande de conduction vers le haut de la bande de valence, il faut à la fois, une modification de l'énergie et de  $k$ . Cette modification est apportée par un échange de quantité de mouvement avec le réseau sous forme de vibration (phonons).

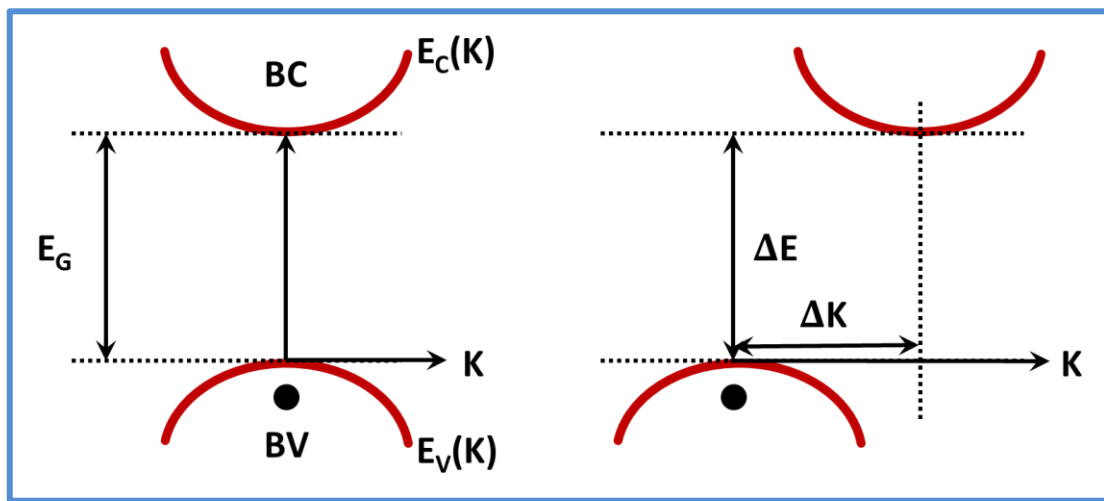


Figure (2.9) : Semi-conducteur à gap direct (à gauche), à gap indirecte (à droite)

### 2.7. Processus radiatif et non radiatif dans les semi-conducteurs

#### 2.7.1. Génération de porteurs

Quand on éclaire un semi-conducteur à l'aide d'un faisceau lumineux tel que l'énergie du photon satisfait la condition  $h\nu \geq E_g = E_C - E_V$ , on va exciter un électron de la bande de valence qui passe vers la bande de conduction. On dit qu'il y a une génération d'une paire électron-trou : c'est l'effet photoélectrique.

Cette génération n'est possible que si :  $h\nu \geq E_g$  Alors  $\frac{hc}{\lambda} \geq \frac{hc}{\lambda_0}$

Ce qui donne :  $\lambda \leq \lambda_0$

$\lambda_0$ : est appelée longueur d'onde –seuil de génération-

- Si  $\lambda > \lambda_0$  le photon traverse la matière sans perdre son énergie, on dit que le matériau est transparent.
- Si  $\lambda \leq \lambda_0$  on a absorption

L'absorption d'un flux lumineux dans un matériau semi-conducteur suit une loi exponentielle.

Si  $\Phi_0$  est le flux envoyé en  $x=0$  noté  $\Phi(x=0)$ , alors :

$$\Phi(x) = \Phi_0 e^{-\alpha x}$$

Où :  $\alpha$  : coefficient d'absorption et  $x$  : la distance parcourue.

### 2.7.2. Recombinaisons des porteurs

Inversement, un électron de la bande de conduction ( $B_C$ ) peut retomber spontanément dans la bande de valence ( $B_V$ ) (dans un état vide) en cédant un photon d'énergie  $h\nu$  : C'est le phénomène de recombinaison. L'énergie libérée lors de la recombinaison s'écrit :

$$h\nu = E_g = E_C - E_V$$

La longueur d'onde émise est une caractéristique du matériau :

$$\lambda_0 = \frac{hc}{E_g}$$

Il existe deux types de recombinaisons : radiative et non radiative.

#### 2.7.2.1. Recombinaison radiative

Pendant les recombinaisons radiatives, il y a émission photonique (émission de photon qui possède une énergie =  $h\nu$ ).

Pour ce genre de recombinaison on distingue :

##### a) Recombinaison bande à bande

C'est la recombinaison directe : un électron de la bande de conduction se recombine avec un trou de la bande de valence.

##### b) Recombinaison par l'intermédiaire des centres donneurs ou accepteurs

A basse température, un nombre d'atomes donneurs peuvent être encore neutre. Quand la température augmente un peu, l'électron quasi-libre du centre donneur, au lieu de monter vers la bande de conduction, il descend vers la bande de valence et se recombine avec un trou avec l'émission d'un photon.

### 2.7.2.2. *Recombinaisons non radiatives*

Il s'agit de recombinaisons réalisées sans émission de photons, mais avec émission de phonons (particules fictives qui correspondent à la vibration du réseau et sont libérées sous forme de chaleur). On distingue :

#### *a. Recombinaison Auger*

Cette recombinaison se fait par transition direct : Bande à bande, ou par un centre de recombinaison. C'est une recombinaison qui fait intervenir 3 particules : c'est-à-dire que la recombinaison d'une paire électron-trou va libérer une énergie  $E_g = hv$  qui servira à exciter un 3ème porteur qui va passer vers les vallées d'énergie supérieures. Quand ce 3ème porteur relaxe (revient à l'état initial), il y a émission de phonons (chaleur) qui va échauffer le semi-conducteur.

#### *b. Recombinaison par l'intermédiaire d'un centre H-S-R (Shockley-Read-Hall)*

Ce phénomène se produit principalement dans les semi-conducteurs à bande interdite indirecte, comme le silicium. En effet, la présence d'impuretés dans le silicium conduit à l'existence de niveaux d'énergie dans la bande interdite, qui se comportent comme des centres de recombinaison ou des centres de piégeage de porteurs.

Ces centres interceptent les électrons de la bande de conduction dans leur chemin vers la bande de valence, et la recombinaison électron-trou se fait par émission de phonons d'énergie égale à  $E_g$  (émission de chaleur).

Les niveaux énergétiques supplémentaires (qui correspondent aux impuretés), se localisent dans la bande interdite sur un niveau d'énergie noté  $E_T$ .

Il existe trois types de centre de recombinaison.

- Centre piège à électron : Ce niveau est voisin de la bande conduction (probabilité de capture d'un  $e^-$  est supérieur à celle de capture d'un trou).
- Centre piégé à trou : il se trouve près de la bande de valence et la probabilité de capture d'un trou est supérieure à celle de capture d'un électron.
- Centre de recombinaison : où la probabilité de capture d'un électron est voisine à celle de capture d'un trou, conduisant au processus de recombinaison indirecte.

### 2.8. *Phénomène d'absorption et d'émission de la lumière*

On considère un atome qui a deux niveaux d'énergie :  $E_1$  (appelé niveau fondamental) et  $E_2$  (niveau excité), le processus d'absorption et d'émission se font comme suit :

### 2.8.1. Absorption

Les photons en fonction de leur longueur d'onde peuvent interagir avec seulement certains atomes de la matière. Cette interaction se traduit par l'absorption de ces photons.

Lors de l'absorption, l'énergie lumineuse du photon est transmise à l'atome. Figure (2.10).

Elle est alors transformée en une autre énergie qui se traduit par l'excitation de l'atome.

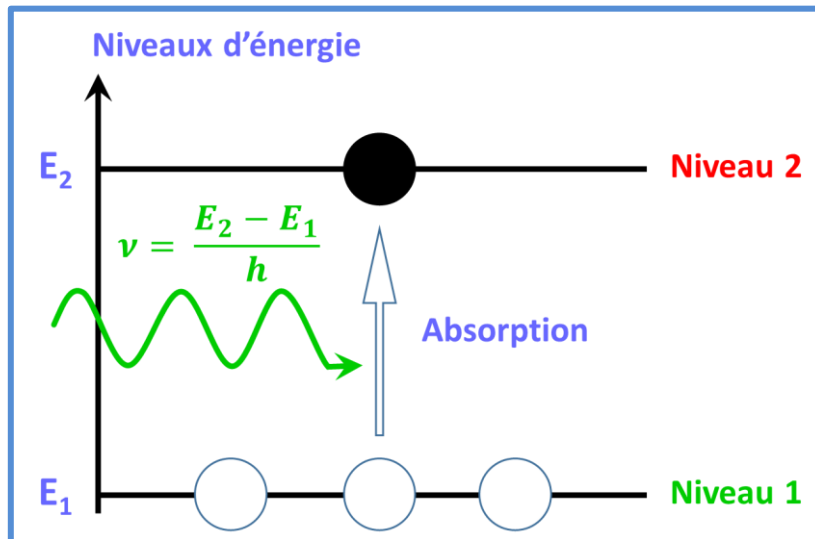


Figure (2.10) : Phénomène d'absorption dans le semiconducteur

On peut traduire le phénomène d'absorption par l'équation suivante :

$$dn_1 = -An_1U_\nu dt \quad (2.1)$$

Avec :

$dn_1$  : le nombre d'atomes passés du niveau  $E_1$  au niveau  $E_2$  sous l'effet du rayonnement d'énergie.

$A$  : Probabilité d'absorption.

$n_1$  : Nombre d'atomes présents dans le niveau  $E_1$

$U_\nu$  : Densité spectrale d'énergie

$dt$  : le temps d'interaction du processus d'absorption

### 2.8.2. Emission

Un atome excité libère un photon lorsqu'il revient dans son état normal. Lors de cette désexcitation, l'atome émet un photon de longueur d'onde identique à celui qui a servi à son excitation.

Il existe deux types pour l'émission : l'émission spontanée et l'émission stimulée.

### 2.8.2.1. Emission spontanée

On parle d'émission spontanée lorsque le processus de recombinaison radiative est entièrement aléatoire : quand l'électron passe au niveau  $E_2$  et l'énergie s'écoule, il retombe (on a retour spontané) et les photons émis le sont à des instants indépendants, et ne présentent aucune sorte de corrélation entre eux. Figure (2.11).

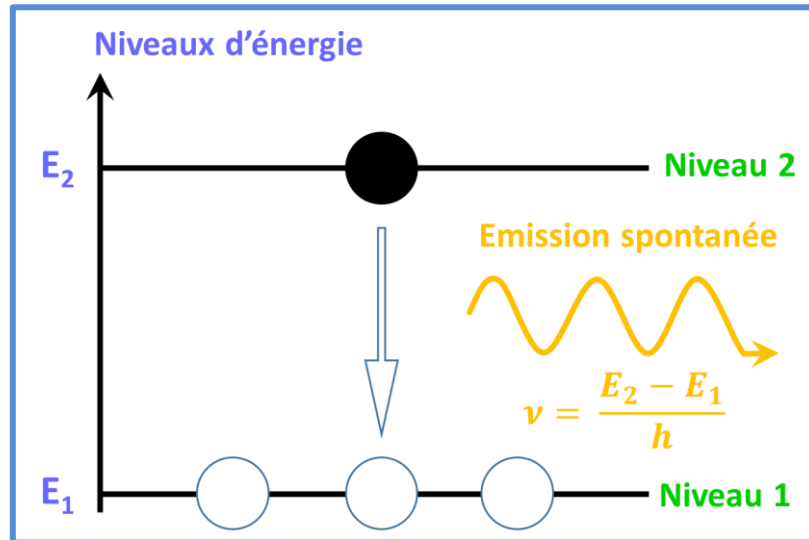


Figure (2.11) : Phénomène d'émission spontanée

Le nombre d'électrons qui passent du niveau  $E_2$  à  $E_1$  spontanément est donné par :

$$dn_2 = -B_1 n_2 dt \quad (2.2)$$

$B_1$ : Probabilité d'émission spontanée

$n_2$ : Nombre des électrons présents dans le niveau d'énergie  $E_2$

$dt$  : le temps d'interaction

### 2.8.2.2. Emission stimulée

Un photon possédant une énergie  $h\nu$  égale à celle de la largeur de la bande interdite  $E_g$  est susceptible d'induire une transition radiative, avec production d'un second photon de même fréquence  $\nu$  et par conséquent de même énergie  $h\nu$  que le photon inducteur. De plus, le photon induit possède la même phase que le photon inducteur. Ce processus constitue l'émission stimulée c'est la base du fonctionnement des Lasers. Figure (2.12).

Le nombre d'électrons qui passent de  $E_2$  à  $E_1$  sous l'effet d'une excitation est donné par :

$$dn_2' = -B_2 n_2 U_\nu dt \quad (2.3)$$

$B_2$ : Probabilité d'émission stimulée

$n_2$  : Nombre d'électrons dans le niveau 2

$U_\nu$  : Densité spectrale d'énergie (excitation)

$dt$  : intervalle de temps

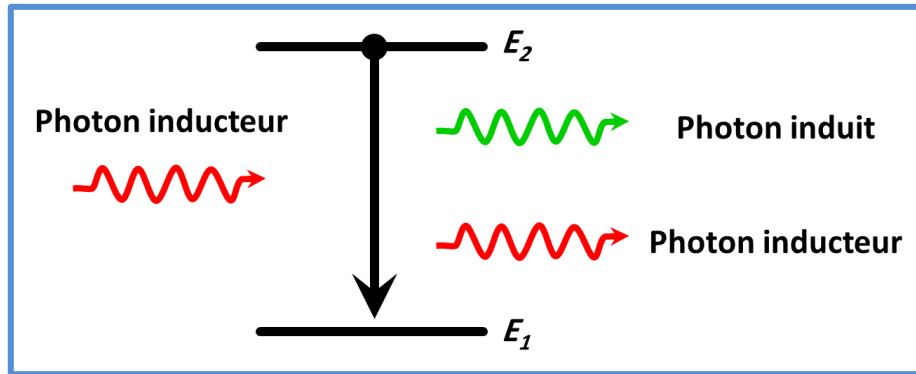


Figure (2.12) : Phénomène d'émission stimulée

### ✚ Conditions d'équilibre et relation entre les différents coefficients $A$ , $B_1$ et $B_2$

Pour qu'un ensemble d'atomes demeure en équilibre, le passage au niveau supérieur doit correspondre à celui du retour au niveau inférieur, c'est-à-dire :

$$dn_1 = dn_2 + dn_2'$$

En remplaçant les valeurs  $dn_1$ ,  $dn_2$  et  $dn_2'$  par leurs expressions (2.1), (2.2) et (2.3) respectivement, on obtient :

$$-An_1U_\nu dt = -B_1n_2dt - B_2n_2U_\nu dt$$

D'où on peut déduire le coefficient  $B_1$  :

$$B_1 = \left( A \frac{n_1}{n_2} - B_2 \right) U_\nu \quad (2.4)$$

D'après la statistique de Boltzman<sup>1</sup> on a :

$$\frac{n_1}{n_2} = e^{-(E_1-E_2)/kT} = e^{\frac{h\nu}{kT}} \quad (2.5)$$

Avec :

$n_1$  : nombre des électrons au niveau  $E_1$

$n_2$  : nombre des électrons au niveau  $E_2$ .<sup>(1)</sup>

1- La statistique de Maxwell-Boltzmann est une loi de probabilité ou distribution utilisée en physique statistique pour déterminer la répartition des particules entre différents niveaux d'énergie

D'autre part, la loi de Planck pour le corps noir<sup>2</sup> est donnée par la densité spectrale d'énergie :

$$u_\nu = \frac{8\pi h \nu^3}{c^3} \frac{1}{e^{\frac{h\nu}{kT}} - 1} \quad (2.6)$$

Avec :

$h$  : La constante de Planck  $h = 6,63 \cdot 10^{-34} J \cdot s$

$c$  : La vitesse de la lumière  $c = 3 \cdot 10^8 m \cdot s^{-1}$

$K$  : Constante de Boltzmann  $K = 1,38 \cdot 10^{-23} J/K$

On remplace les expressions des équations (2.5) et (2.6) dans l'équation (2.4), on obtient :<sup>(1)</sup>

$$B_1 = \left( A e^{\frac{h\nu}{kT}} - B_2 \right) \frac{8\pi h \nu^3}{c^3} \frac{1}{e^{\frac{h\nu}{kT}} - 1}$$

### 2.9. Composants optoélectroniques

Le fonctionnement de divers éléments photosensibles semi-conducteurs repose sur les mêmes principes physiques. Lorsqu'un cristal semi-conducteur absorbe des photons d'énergie  $E = h\nu$  supérieur à sa largeur de bande interdite, cela crée des paires électron-trou ; un électron passe de la bande de valence à la bande de conduction, laissant un trou à sa place.

Les dispositifs optoélectroniques se trouvent dans divers domaines de l'électronique. Les diodes électroluminescentes ont remplacé les lampes à incandescence.

L'essor de l'optoélectronique a d'abord conduit à la production de composants tels que les optocoupleurs, largement utilisés dans l'industrie pour assurer les circuits électriques, les modules de commutation ou les composants de transmission à isolation galvanique utilisés comme réflecteurs pour les capteurs ou les fibres optiques.

Dans les chapitres 3 et 4, nous allons décrire la majorité des dispositifs optoélectroniques en tant qu'émetteurs et récepteurs de lumière.

---

2- Corps noir : Enceinte parcourue en tous sens par un rayonnement électromagnétique et dont les parois sont recouvertes d'un matériau totalement absorbant et dans laquelle le rayonnement et l'enceinte sont à l'équilibre thermique.

### *Exercices d'applications du chapitre 2*

- **Application n°1 :**

Trouver la longueur d'onde seuil à 300°K pour ces trois types de semi-conducteur :

Le Silicium avec  $E_g=1.12\text{eV}$

L'Arséniure de Galium (GaAs) avec  $E_g=1.43\text{eV}$

Le Germanium (Ge) avec  $E_g=0.72\text{eV}$

- **Application n°2 :**

Démontrer d'après les équations (2.5) et (2.6) que l'émission stimulée peut être négligée lorsque la formule de Planck revient à l'expression simplifiée pour les fréquences élevées.

- **Application n°3 :**

A quelle longueur d'onde  $\lambda$  l'émission induite pour une température donnée est-elle égale à l'émission spontanée ?

- Calculer  $\lambda$  pour :

$$T = 300^\circ K \quad \text{et} \quad T = 30000^\circ K$$

On donne :  $k=1.38.10^{-23} \text{J.K}^{-1}$

- **Application n°4**

Pour une longueur d'onde  $\lambda=34.76\mu\text{m}$ .

A quelle température l'émission stimulée égale à l'émission spontanée ?

*Solution des exercices d'applications chapitre 2*

➤ **Solution application n°1 :**

- Pour le Si, on trouve  $\lambda_0 = 1.10\mu\text{m}$
- Pour le GaAs, on trouve  $\lambda_0 = 0.867\mu\text{m}$
- Pour le Ge, on trouve  $\lambda_0 = 1.722\mu\text{m}$

➤ **Solution application n°2 :**

Emission stimulée négligée  $\Rightarrow dn_1 = dn_2$

$$-A n_1 U_\nu dt = -B_1 n_2 dt \Rightarrow$$

$$U_\nu = \frac{B_1}{A} \cdot \frac{n_2}{n_1}$$

Sachant que :  $B_1 = \frac{8Ah\nu^3}{c^3}$  et  $\frac{n_2}{n_1} = e^{\frac{E_1-E_2}{kT}} = e^{\frac{-h\nu}{kT}}$

Donc :  $U_\nu = \frac{8\pi h\nu^3}{c^3} e^{\frac{-h\nu}{kT}}$

C'est l'expression de Planck simplifiée pour les hautes fréquences  $h\nu \gg kT$

➤ **Solution application n°3 :**

Emission spontanée = émission stimulée

$$dn_2 = d\dot{n}_2 \Rightarrow \frac{dn_2}{d\dot{n}_2} = 1 = \frac{-B_1 n_1 dt}{-B_2 n_2 U_\nu dt}$$

$$\Rightarrow \frac{B_1}{B_2 U_\nu} = 1 \Rightarrow U_\nu = \frac{B_1}{B_2} = \frac{8\pi h\nu^3}{c^3}$$

(Car :  $B_2 = A$  et  $B_1 = A \cdot \frac{8\pi h\nu^3}{c^3}$ )

Donc :  $U_\nu = \frac{8\pi h\nu^3}{c^3} \cdot \frac{1}{e^{\frac{h\nu}{kT}-1}} = \frac{8\pi h\nu^3}{c^3} \Rightarrow$

$$e^{\frac{h\nu}{kT}-1} = 1 \Rightarrow e^{\frac{h\nu}{kT}} = 2 \Rightarrow \ln 2 = \frac{h\nu}{kT} = \frac{hc}{\lambda kT}$$

On déduit donc :  $\lambda = \frac{hc}{\ln 2 \cdot k \cdot T}$

À  $T = 300^\circ\text{K} \rightarrow \lambda_1 = 69\mu\text{m}$  (I. R lointain)

À  $T = 30.000^\circ\text{K} \rightarrow \lambda_2 = 0,69\mu\text{m}$  (Le rouge)

➤ **Solution application n°4 :**

En utilisant la même expression de l'application n°3, on trouve :

**T=600°K**

*Questions à choix multiples (QCM)*

1. **Pour les transitions entre deux niveaux d'énergie, il y a égalité entre :**
  - Absorption et émission induite
  - Emission induite et émission spontanée
  - Absorption et émission spontanée
  - Recombinaison radiative et non radiative
2. **Pour une longueur d'onde  $\lambda=0.34\mu\text{m}$ , l'émission stimulée égale à l'émission spontanée pour une température :**
  - $T=6000^\circ\text{K}$
  - $T=600^\circ\text{K}$
  - $T=300^\circ\text{K}$
3. **Dans la recombinaison par les centres pièges :**
  - L'électron est absorbé par le centre
  - L'énergie libérée est non radiative
  - L'énergie libérée est radiative
4. **La recombinaison Auger fait intervenir :**
  - Plus que deux particules
  - Une seule particule
  - Trois particules
5. **L'absorption dans les semi-conducteurs est satisfaite lorsque :**
  - $\lambda > \lambda_0$
  - $\lambda = \lambda_0$
  - $\lambda < \lambda_0$
6. **Dans la recombinaison bande à bande, l'énergie libérée est :**
  - Sous forme de phonon
  - Sous forme de photon
  - Sous forme d'onde
7. **La fréquence d'un rayonnement lors du phénomène d'absorption est :**
  - $\nu > \nu_0$
  - $\nu = E. \nu_0$
  - $\nu < \nu_0$
8. **Dans l'émission stimulée, le photon déclenché suit le photon inducteur dans :**
  - La directivité
  - La longueur d'onde
  - L'énergie incidente
9. **Dans un semi-conducteur de type N, les dopants sont :**
  - Des pentavalent
  - Des Trivalent
  - Atomes neutres
10. **Quand un atome perd un électron, elle devient :**
  - Un ion fixe
  - Un ion mobile
  - Une charge fixe
  - Une charge mobile

### 3. Emetteurs de lumière

#### Introduction

Les émetteurs de lumière convertissent l'énergie électrique qu'ils reçoivent en rayonnement optique, le rôle de l'émetteur est donc de convertir les signaux électriques en signaux optiques.

Les émetteurs de lumière sont souvent appelés : transducteurs électro-optiques.

Dans ce chapitre nous allons présenter les émetteurs de lumières à savoir la diode électroluminescente LED et la diode Laser.

#### 3.1. La diode électroluminescente LED

LED est l'acronyme de **Light Emitting Diode** ou bien diode électroluminescente, en français.

La LED est une source de lumière à base de semi-conducteur, c'est un composant électronique qui émet de la lumière lorsqu'un courant électrique le traverse.

La LED convertit directement l'énergie électrique en lumière : c'est l'électroluminescence.

L'électroluminescence est l'émission consécutive de lumière suite à une excitation électrique.

Dans une LED, cette excitation électrique est obtenue en polarisant une diode PN en direct. Il en résulte de l'injection de porteurs en excès de part et d'autres de la jonction et si le matériau est convenablement choisi ou dopé, la recombinaison directe de ces porteurs en excès donne lieu à une émission de photons.

##### 3.1.1. Principe de fonctionnement de la LED

Lorsqu'on met deux types de semi-conducteurs de types différents (type P et type N), on obtient une structure dite : jonction PN, figure (3.1).

Il s'agit essentiellement d'une jonction PN polarisée en direct, les porteurs injectés par les contacts (+ et - du générateur) vont diffuser : les électrons vont vers la région (P) et les trous vers la région (N), et on a une recombinaison d'une paire (électron-trou) avec émission de photons d'énergie  $h\nu$  (recombinaison essentiellement radiative). Figure (3.1).

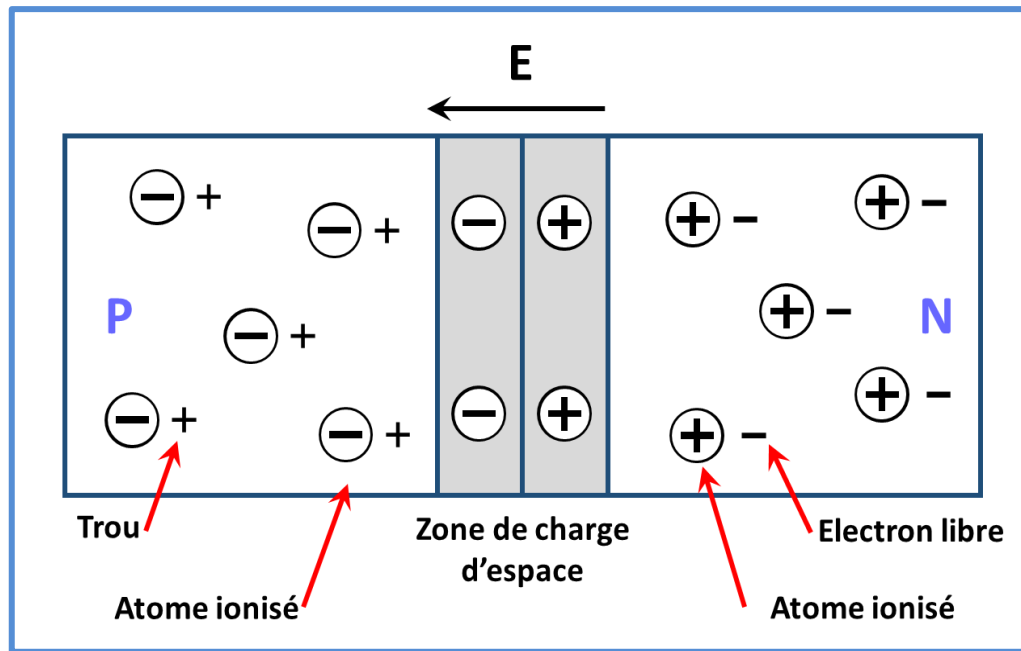


Figure (3.1) : La jonction PN sans polarisation

Lorsque une tension  $V$  est appliquée telle que la diode soit polarisée en direct, les porteurs circulent à l'intérieur de la jonction et se recombinent dans les trois régions : P, N et la ZCE (Zone de charge d'espace), et comme la mobilité des électrons est supérieure à celle des trous, donc les électrons arrivent rapidement dans la région P et les trous qui sont plus longs arrivent plus tard dans la région N. on aura une zone des électrons dans la région P. ∴ la région émettrice de la lumière est représentée par la région P. figure (3.2)

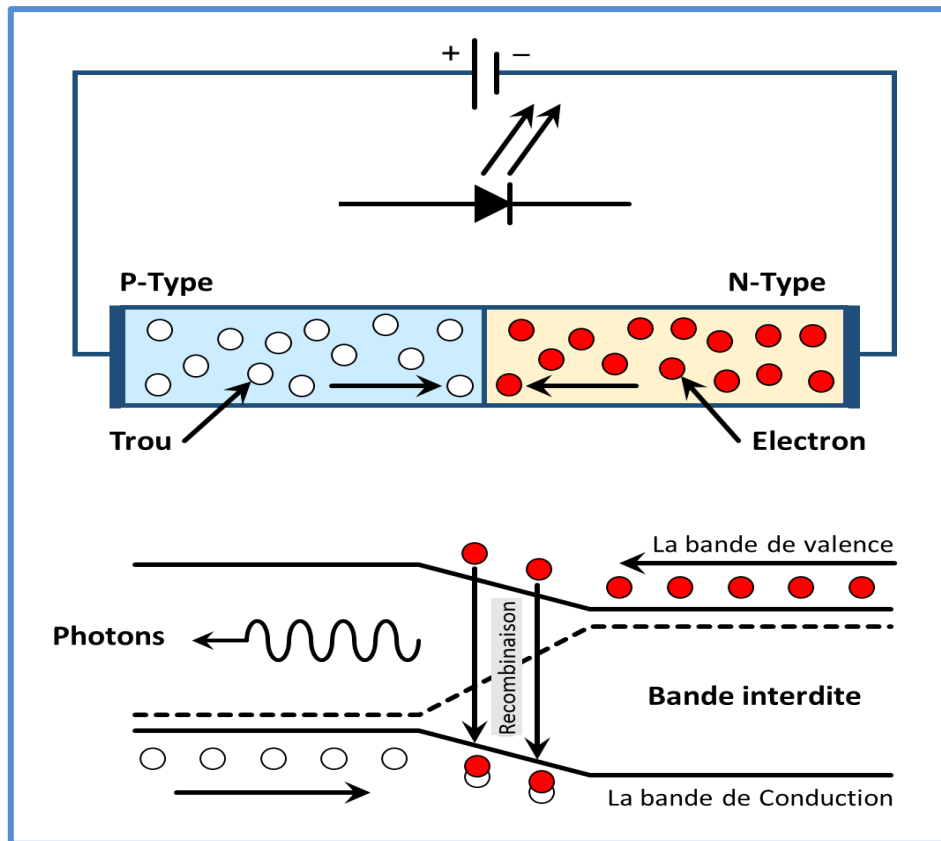


Figure (3.2) : Principe de fonctionnement de la LED sous polarisation

### 3.1.2. Caractéristiques électriques et optiques de la LED

#### a) Caractéristiques électriques

1. Tension directe : La tension directe est la tension minimale requise pour faire passer un courant à travers la LED. Cette tension dépend du type de LED et de la couleur de la lumière émise.
2. Courant direct : Le courant direct est le courant qui traverse la LED lorsqu'elle est polarisée en direct. Ce courant est limité par une résistance en série pour éviter une surintensité qui pourrait endommager la LED.
3. Courant inverse : Le courant inverse est le courant qui traverse la LED lorsqu'elle est polarisée en inverse. Ce courant est très faible et doit être limité pour éviter d'endommager la LED.
4. Intensité lumineuse : L'intensité lumineuse est la mesure de la quantité de lumière produite par la LED. Elle dépend du courant direct qui traverse la LED et de la couleur de la lumière émise.

La LED possède une caractéristique puissance-courant assez linéaire avec une pente de l'ordre de 10mW/A. Figure (3.3).

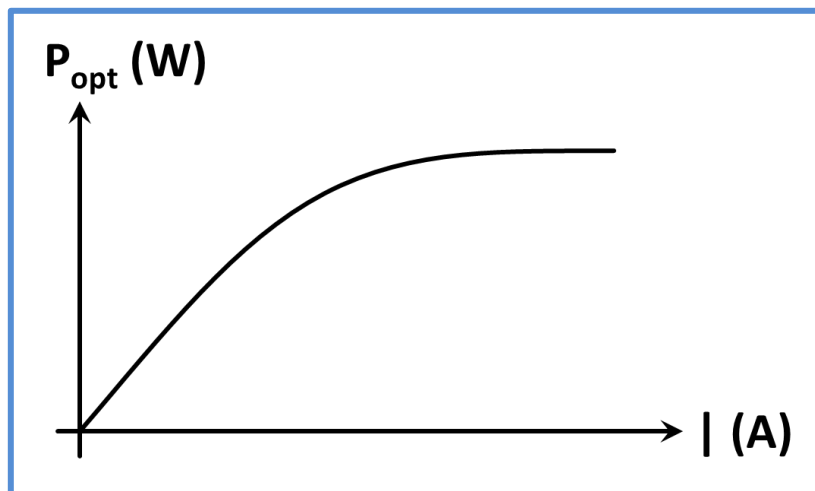


Figure (3.3) : Caractéristiques puissance-courant

L'intensité lumineuse émise par une LED dépend directement du courant qui la traverse comme le montre la figure (3.3) qui représente la caractéristique P(I).

La puissance est linéaire aux faibles courants, aux forts courants ( $I > 100\text{mA}$ ) l'effet Joule devient important et la recombinaison Auger devient dominante, le semi-conducteur s'échauffe et la puissance émise sature.

### **b) Caractéristiques optiques**

Ce sont les caractéristiques optiques qui déterminent la performance en tant que source de lumière pour la LED.

1. Couleur de la lumière : Les LED sont disponibles dans une large gamme de couleurs, allant du rouge au violet en passant par le jaune, le vert et le blanc. La couleur de la lumière dépend du matériau semi-conducteur utilisé dans la fabrication de la LED.
2. Intensité lumineuse directionnelle : Contrairement aux sources de lumière traditionnelles qui émettent de la lumière dans toutes les directions, les LED émettent de la lumière de manière directionnelle. La forme et l'angle de l'émission dépendent de la conception de la LED.
3. Luminosité : La luminosité est la mesure de la quantité de lumière émise par la LED dans une direction donnée. Elle dépend de l'intensité lumineuse et de la forme de l'émission de la LED.

### Chapitre 3 : Emetteurs de lumière

4. Spectre d'émission : Le spectre d'émission de la LED est la distribution de l'énergie lumineuse émise en fonction de la longueur d'onde. La forme et la largeur du spectre d'émission dépendent de la couleur de la lumière émise et du matériau semi-conducteur utilisé.

La réponse spectrale issue de la LED est illustrée sur la figure (3.4), elle est sensiblement gaussienne avec un max  $\lambda_R$  (valeur voisine de  $\lambda_0$  qui correspond au gap du matériau).

Selon la figure (3.4), on constate que La LED possède donc un spectre d'émission spontanée, continu et assez large (avec largeur spectrale  $\Delta\lambda$ ).

Les photons sont émis indépendamment les uns des autres, ce qui donne une lumière non cohérente (non uniforme), et aussi non monochromatique (pas une seule longueur d'onde).

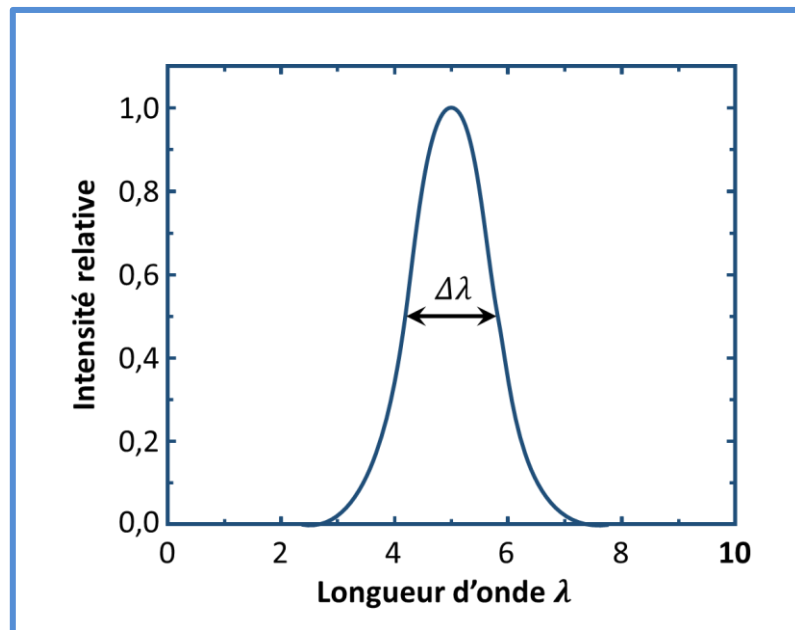


Figure (3.4) : Spectre d'émission d'une LED

5. Température de couleur : La température de couleur est une mesure de la "chaleur" de la lumière émise par la LED. Elle est exprimée en degrés Kelvin (K) et varie de la lumière chaude (environ 2 700 K) à la lumière froide (environ 6 500 K). La température de couleur dépend de la couleur de la lumière émise et peut être choisie pour répondre aux besoins spécifiques de l'application.

### ✚ Exemple de matériaux électroluminescents :

Le silicium et le germanium semi-conducteurs à gap indirect, ne peuvent pas émettre de la lumière.

Les matériaux émetteurs employés sont donc essentiellement des semi-conducteurs III-V (composés d'éléments de la 3ème et 5ème colonne du tableau périodique), ou des alliages d'entre eux, dont beaucoup sont direct :

AlGaAs, qui émet dans le rouge ;

GaP, qui émet dans le vert ;

GaAs, qui émet dans la première fenêtre des infrarouge ( $\lambda=900\text{nm}$ ).

### 3.1.3. Rendement d'une diode

On définit plusieurs rendements essentiels relatifs à la diode électroluminescente.

#### a) Rendement quantique interne

Il est défini comme étant le rapport du nombre de photons générés (recombinaison radiative) et celui de la recombinaison totale (radiative et non radiative).

$$\eta_i = \frac{r_r}{r_r + r_{nr}} = \frac{1/\tau_r}{1/\tau_r + 1/\tau_{nr}} \quad (3.1)$$

$$\eta_i = \frac{1}{1 + \frac{\tau_r}{\tau_{nr}}} \quad (3.2)$$

$r_r = \frac{\Delta n}{\tau_r}$  : Taux de recombinaisons radiatives ;

$\tau_r$  : durée de vie des recombinaisons radiatives

$r_{nr} = \frac{\Delta n}{\tau_{nr}}$  : Taux de recombinaisons non radiatives ;

$\tau_{nr}$  : durée de vie des recombinaisons non radiatives.

➤ Pour les semi-conducteurs à gap direct  $\eta_i \sim 100\%$

#### b) Rendement quantique externe

Il est défini comme étant le rapport du nombre de photons émis par la led et le nombre de porteurs traversant la jonction

Soit I le courant traversant la led,  $I = N_e \cdot q$

La puissance lumineuse émise par la diode est :  $P = N_{ph} \cdot E_g$  ;  $E_g = hc/\lambda$

$$\eta_{ex} = P \cdot \lambda(\text{nm}) / I \cdot 1240 \quad (3.3)$$

### c) Rendement global

Il est défini comme étant le rapport de la puissance optique émise et la puissance électrique.

$$\eta_g = hv/qV\eta_{ex} \quad (3.4)$$

### 3.1.4. Principales structures de la diode électroluminescente :

#### a) LED encapsulée (Dome LED)

Une LED encapsulée est une diode électroluminescente (LED) qui est protégée par une coque (de forme hémisphère) en plastique ou en verre pour la protéger contre les éléments extérieurs et pour faciliter son installation. L'encapsulation permet également de concentrer la lumière émise par la LED dans une direction spécifique pour une utilisation plus efficace. Figure (3.5).

Les LEDs encapsulées sont utilisées dans une grande variété d'applications, notamment dans les éclairages, les affichages numériques, les indicateurs lumineux et les écrans. Elles sont disponibles dans une gamme de tailles, de couleurs et de formes, en fonction des besoins spécifiques de l'application.

Les LEDs encapsulées sont également connues pour leur durabilité, leur faible consommation d'énergie et leur longue durée de vie, ce qui en fait un choix populaire pour les applications nécessitant une source de lumière fiable et à faible coût.

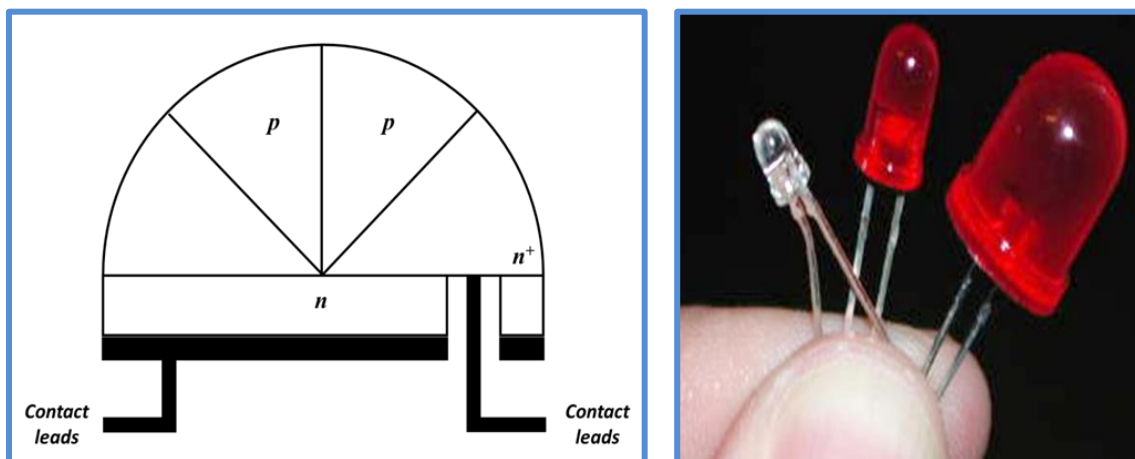


Figure (3.5) : Structure de la LED encapsulée à gauche, photo réelle d'une Dome (LED) à droite

### b) La LED planaire (Planer LED)

La LED plane a la structure la plus simple de LED. Elle est peut être fabriqué par un processus d'épitanie en phase liquide ou vapeur, ou la jonction est formée par une technique de diffusion. La jonction est conçue de manière à ce que la plupart des recombinaisons radiatives aient lieu du côté de la jonction le plus proche de la surface et, par conséquent, la probabilité de réabsorption est fortement réduite. Ceci est accompli en faisant en sorte que la majeure partie du courant traversant la diode soit transportée par les porteurs qui sont injectés dans la couche de surface.

Les LED planaires sont généralement fabriquées à l'aide de matériaux semi-conducteurs, tels que le nitrure de gallium (GaN) ou le nitrure d'indium et de gallium (InGaN). Ces matériaux sont déposés sur un substrat, tel que le saphir ou le silicium, en couches pour créer la structure LED. Les couches sont ensuite modelées et gravées pour créer la forme souhaitée et des contacts électriques sont ajoutés pour compléter la LED. Figure (3.6)

Les LED planaires sont souvent utilisées dans les écrans, tels que ceux que l'on trouve dans les appareils électroniques ou les grands écrans LED, car elles offrent un profil bas et une luminosité élevée. Ils sont également utilisés dans les applications d'éclairage général, car ils peuvent être disposés en réseaux ou en bandes pour créer des solutions d'éclairage personnalisées.

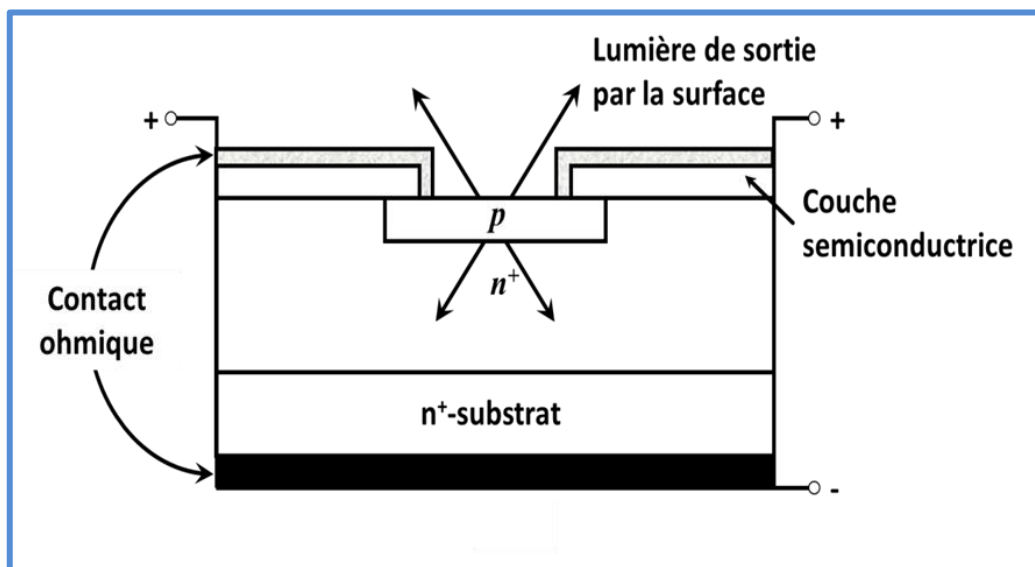


Figure (3.6) : Structure de la LED planaire (Planer LED)

#### c) ELED

ELED (Edge Emitter LED), également connue sous le nom de "diode superluminescente" (SLED), est un type de diode électroluminescente (LED) qui émet de la lumière depuis le bord plutôt que sa surface. Elle possède une structure similaire à celle d'une diode laser, mais elle est conçue pour produire un large spectre de lumière plutôt qu'un faisceau cohérent.

Les ELED sont construits à l'aide d'une fine couche semi-conductrice, telle que l'arséniure de gallium, qui est prise en sandwich entre deux couches de matériau transparentes. Figure (3.7)

La puce semi-conductrice contient une jonction p-n, qui émet de la lumière lorsqu'un courant électrique lui est appliqué. La lumière est ensuite dirigée hors du bord de la puce, où elle peut être focalisée et contrôlée. Les ELED sont généralement utilisés dans les applications à haute puissance, telles que l'éclairage et la communication par fibre optique, car ils peuvent produire une lumière directionnelle de haute intensité.

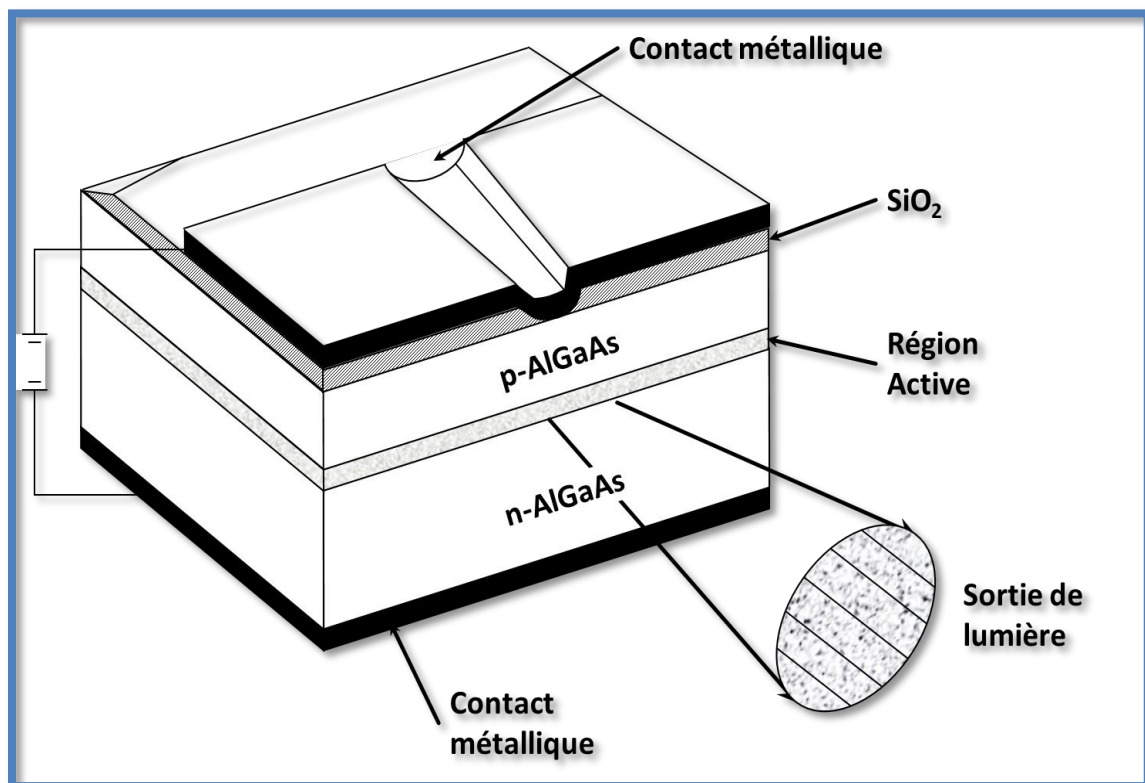


Figure (3.7) : Structure ELED

### 3.1.5. Classification de la LED

Il existe plusieurs types de diodes électroluminescentes (LED), elles sont classées en fonction de leur composition chimique, de leur couleur d'émission et de leur puissance.

#### a) Classification selon la composition chimique

1. **LED organique (OLED)** : La LED organique, ou OLED (Organic Light Emitting Diode), est une diode électroluminescente organique qui utilise des matériaux organiques pour émettre de la lumière. Habituellement, une couche très fine de matière organique est imprimée sur un substrat de verre. Un circuit semi-conducteur est alors employé pour transporter les charges électriques aux pixels imprimés, les faisant briller. Les OLED sont couramment utilisées dans les écrans de téléviseurs et de smartphones, ainsi que dans l'éclairage.
2. **LED inorganiques** : Ce type de LED est la représentation traditionnelle d'une diode. Comme leur nom l'indique, ils sont constitués de matériaux inorganiques. Certains des plus couramment utilisés sont des composés responsables de la conduction, tels que l'arsenic, l'aluminium, le gallium, les phosphures, etc. Ces LED sont identifiées par de petites ampoules LED qui servent d'indicateurs de panneau, bien qu'il existe de nombreux formats de ce type. Cependant, dans le domaine des LED inorganiques, de nombreux styles de LED différents peuvent être vus et utilisés.
3. **LED à semi-conducteur composé (CLED)** : Les LED à semi-conducteur composé, ou CLED, sont des diodes électroluminescentes qui utilisent des semi-conducteurs composés tels que l'arséniure de gallium ou le phosphure d'indium-gallium pour émettre de la lumière. Les CLED sont utilisées dans l'éclairage haut puissance, les affichages, les communications optiques et les capteurs.

#### b) Classification selon le spectre d'émission

- Les chromatiques : l'énergie est concentrée sur une plage étroite de longueur d'onde (20 à 40 nm). Ces sources ont un spectre quasiment monochromatique ;
- Les blanches : l'énergie est répartie dans le visible sur toute la gamme de longueurs d'onde 380 à 780 nm environ.
- Les infrarouges : l'énergie est émise hors du spectre de la lumière visible, au-delà de 700 nm de longueur d'onde (lumière ultraviolette). Elles sont utilisées pour

transmettre des signaux de télécommandes ou servir d'éclairage pour les caméras infrarouge, etc.

### c) Classification selon la puissance

- Les diodes électroluminescentes de faible puissance  $< 1$  W. Ce sont les plus connues du grand public car elles sont présentes dans notre quotidien depuis des années. Ce sont elles qui jouent le rôle de voyant lumineux sur les appareils électroménagers par exemple ;
- Les LED de forte puissance  $> 2$  W. Elles sont en plein essor et leurs applications sont de plus en plus connues du grand public : flash de téléphones portables, éclairage domestique, éclairage de spectacle, lampe de poche ou frontales...

### 3.1.6. Atouts et limites de la LED

#### a) A tous

- Faible consommation d'énergie : Les LED consomment beaucoup moins d'énergie que les ampoules à incandescence ou les lampes fluorescentes, ce qui les rend plus économiques à long terme.
- Durabilité : Les LED sont beaucoup plus durables que les ampoules à incandescence ou les lampes fluorescentes et ont une durée de vie plus longue.
- Taille compacte : Les LED sont très petites et peuvent être intégrées dans des designs très compacts.
- Faible dégagement de chaleur : Les LED dégagent beaucoup moins de chaleur que les ampoules à incandescence ou les lampes fluorescentes, ce qui les rend plus sûres à utiliser.
- Haute efficacité lumineuse : Les LED ont une efficacité lumineuse élevée, ce qui signifie qu'elles produisent plus de lumière par rapport à la quantité d'énergie qu'elles consomment.
- Pas de mercure : Contrairement aux lampes fluorescentes, les LED ne contiennent pas de mercure, ce qui les rend plus respectueuses de l'environnement.
- Couleurs vives : Les LED sont disponibles dans une gamme de couleurs vives et peuvent être utilisées pour créer des effets d'éclairage spectaculaires.
- Allumage instantané : Les LED s'allument instantanément, contrairement aux lampes fluorescentes qui peuvent prendre du temps pour atteindre leur luminosité maximale.
- Contrôle de l'intensité : Les LED peuvent être facilement contrôlées en termes d'intensité et de couleur, ce qui les rend idéales pour une variété d'applications d'éclairage.

#### b) Limites

- Sensibilité à la température : Les LED peuvent être sensibles à la température et leur

performance peut être affectée dans des environnements chauds ou froids.

- Difficulté à être recyclées : Les LED contiennent des matériaux toxiques tels que l'arsenic et le plomb, ce qui peut rendre leur recyclage plus difficile et plus coûteux.
- Risque de phototoxicité : Les LED peuvent émettre une lumière bleue, qui peut être nocive pour les yeux si elle est exposée pendant de longues périodes.
- La LED étant un semi-conducteur, elle est affectée par la température : plus elle chauffe, plus sa tension directe de jonction décroît, et son rendement lumineux se dégrade. Cela pose des problèmes de fiabilité si une mise en œuvre thermique adéquate n'est pas réalisée (pour les modèles de puissance).
- Désavantages propres aux LED de forte puissance est que le rendement lumineux est plus faible.

### **Domaine d'application de la diode électroluminescente :**

La LED fait partie de notre quotidien, elle est presque partout. On trouve la LED dans :

1. **Éclairage** : les LED sont de plus en plus utilisées pour l'éclairage intérieur et extérieur, car elles sont très économes en énergie, ont une durée de vie plus longue et produisent une lumière de qualité supérieure par rapport aux autres sources d'éclairage.
2. **Écrans** : les LED sont utilisées dans les écrans d'affichage pour les téléviseurs, les ordinateurs, les téléphones portables, les panneaux publicitaires, etc. car elles produisent une lumière vive et uniforme et peuvent être disposées en matrices pour former des images.
3. **Signaux de circulation** : les LED sont utilisées pour les feux de circulation et les signaux de sécurité car elles sont plus lumineuses et plus visibles que les autres sources d'éclairage.
4. **Équipement de mesure** : les LED sont utilisées dans les instruments de mesure tels que les multimètres, les oscilloscopes, etc. car elles sont plus précises et plus stables que les autres sources d'éclairage.
5. **Médecine** : les LED sont utilisées en médecine pour le traitement des maladies de la peau, pour la photothérapie et pour la stimulation de la croissance cellulaire.  
Agriculture : les LED sont utilisées pour la culture de plantes en intérieur et en serre, car elles peuvent être ajustées pour émettre des longueurs d'onde spécifiques pour optimiser la croissance des plantes.
6. **Sécurité** : les LED sont utilisées pour la sécurité des bâtiments et des zones

## Chapitre 3 : Emetteurs de lumière

industrielles, pour les lampes de poche, les éclairages de véhicules d'urgence, etc.

✚ Quelques photos sur les applications de la LED au quotidien.



**Lampes LED**



**Lampes Torchés**



**Voyant lumineux à LED**



**Phares de voitures**

### A retenir :

Ce composant de performances limitées est cependant très utile grâce à son coût faible, bruit très bas et son excellente fiabilité.

Les LED sont utilisées comme source lumineuse - soit dans un but de visualisation (voyants ...) - soit pour transmettre un signal (coupleurs optoélectroniques, capteurs ...).

Les trois principales fonctions de la LED sont : l'affichage, les photo-coupleurs, télécommunication par fibres optiques à courte distance.

### 3.2. La diode LASER

#### 3.2.1. Présentation et principe de fonctionnement de la diode Laser

La diode laser est une forme de diode électroluminescente qui utilise l'émission stimulée pour produire une lumière cohérente et directionnelle.

Le cœur de la diode laser est une jonction p-n, similaire à une diode électroluminescente (LED). Cependant, contrairement à une LED qui émet de la lumière dans toutes les directions, la diode laser émet un faisceau de lumière cohérente dans une seule direction.

La figure (3.8) montre la structure d'une diode Laser dont le fonctionnement est le suivant :

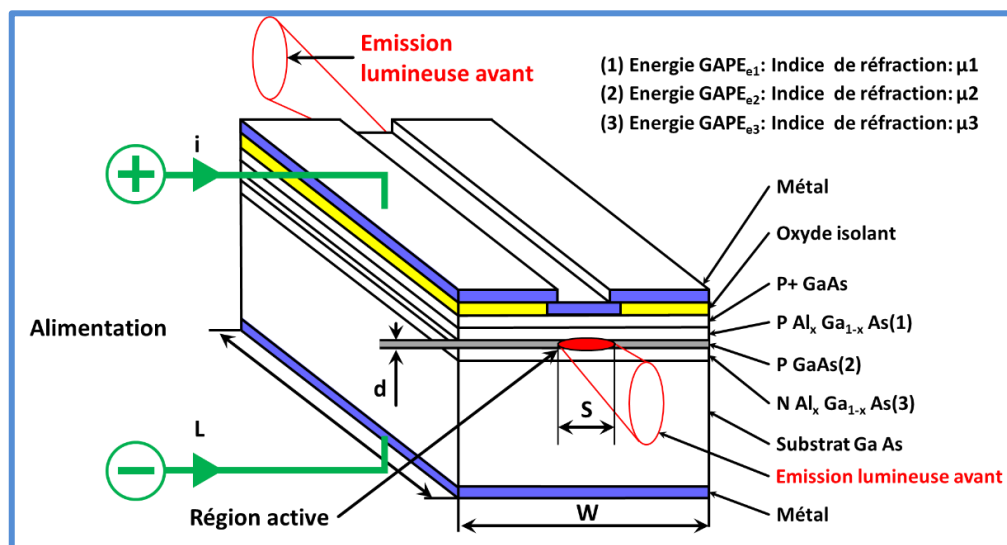


Figure (3.8) : a) Structure de la diode LASER b) photo réelle d'une diode laser verte.

1. Injection de porteurs de charge : un courant électrique est appliqué à la jonction p-n, ce qui injecte des porteurs de charge (électrons et trous) dans la région active de la diode.

2. Stimulation de l'émission : les électrons et les trous qui sont injectés dans la région active se recombinent, libérant de l'énergie sous forme de photons. Certains de ces photons stimulent l'émission d'autres photons identiques en traversant la région active.
3. Réflexion interne totale : le faisceau de photons qui se forme dans la région active est réfléchi en interne par des facettes de la diode, ce qui crée un champ optique amplifié.
4. Émission de lumière : finalement, la lumière est émise par une des facettes de la diode, produisant ainsi un faisceau de lumière cohérente et directionnel.

### 3.2.2. Principales caractéristique de la diode laser

1. Faible consommation d'énergie : Les diodes laser ont une efficacité énergétique élevée et consomment peu d'énergie électrique par rapport aux autres types de lasers.
2. Taille compacte : Les diodes laser sont très petites et peuvent être intégrées dans des dispositifs électroniques tels que des lecteurs de CD, des imprimantes laser et des équipements médicaux.
3. Haute fréquence d'oscillation : Les diodes laser peuvent osciller à des fréquences très élevées, ce qui les rend utiles dans les applications de communication optique.
4. Durée de vie relativement courte : Bien que les diodes laser aient une durée de vie raisonnable, elle est généralement plus courte que celle des autres types de lasers.
5. Coût relativement bas : Les diodes laser sont généralement moins chères que les autres types de lasers.

✚ Les diodes laser sont largement utilisées dans les applications de communication optique, telles que les fibres optiques, les réseaux optiques et les communications spatiales. Elles sont également utilisées dans les équipements médicaux tels que les lasers de chirurgie et de thérapie, ainsi que dans les applications industrielles telles que le traitement de surface et la découpe au laser.

### 3.3. Le LASER

Le laser (**Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation**), est un dispositif qui émet la lumière grâce à l'émission stimulée, il possède une structure complexe par rapport à la LED et la diode laser.

#### 3.3.1. Condition d'oscillation LASER

Pour que le LASER se mette à osciller, c'est-à-dire pour qu'il produise un faisceau cohérent de lumière, on doit satisfaire les deux conditions.- **Inversion de population**

#### - **Présence de cavité**

Pour réaliser l'**inversion de population**, il faut qu'il y'ait suffisamment de porteurs dans l'état supérieur.

### Chapitre 3 : Emetteurs de lumière

Le dispositif de pompage avec lequel on réalise une inversion de population, dépend du type du laser. Un flash lumineux peut produire l'inversion de population, il y a alors pompage optique, une décharge électrique peut aussi provoquer l'inversion de population par collisions entre atomes.

Dans un semi-conducteur, cette inversion est réalisée par l'opération de pompage qui consiste à mettre suffisamment d'électrons dans la bande de conduction, pour cela le milieu doit comporter au moins trois niveaux d'énergie.

Dans un semi-conducteur, cette inversion est réalisée par l'opération de pompage qui consiste à mettre suffisamment d'électrons dans la bande de conduction, pour cela le milieu doit comporter au moins trois niveaux d'énergie.

Les électrons sont 'pompeés' à partir du niveau fondamental  $E_1$  sur un niveau  $E_3$ . En utilisant un rayonnement de longueur d'onde spécifique, la durée de vie  $\tau_{32}$  pour les transitions  $E_3 \rightarrow E_2$  étant très courte devant la durée de vie  $\tau_{21}$ , pour les transitions  $E_2 \rightarrow E_1$ . Figure (3.9)

Les électrons vont s'accumuler sur le niveau  $E_2$ , le niveau intermédiaire  $E_3$  ne sert qu'à la facilité de l'inversion de population.

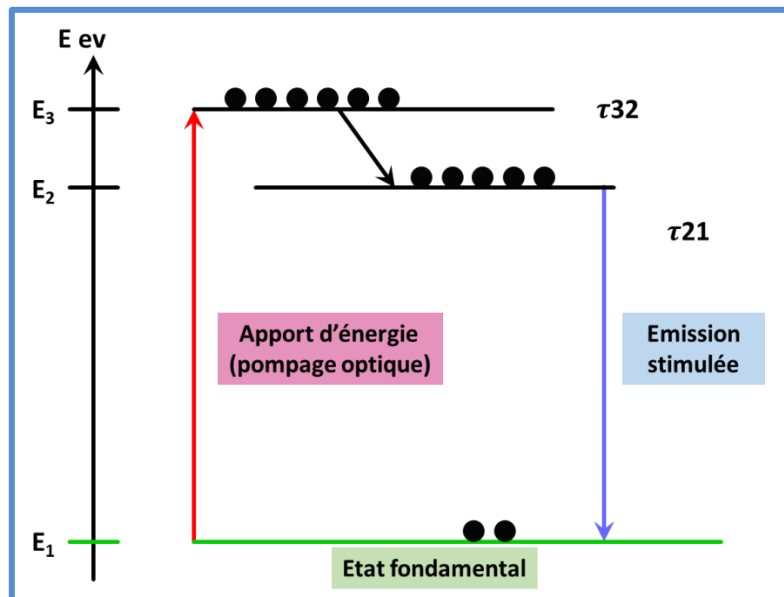


Figure (3.9) : Système à trois niveaux d'énergie (avec pompage optique)

**La présence de cavité LASER** doit permettre à la lumière de circuler plusieurs fois à travers le milieu amplificateur, de sorte que l'amplification s'accumule.

Un milieu actif est un milieu amplificateur : ce n'est pas un générateur de rayonnement. Pour transformer un amplificateur en générateur, il faut relier la sortie de

l'amplificateur à son entrée en créant un circuit de réaction. C'est le rôle du résonateur optique qui est constitué par un interféromètre. Le milieu actif est placé dans le résonateur formé par le miroir plan et le miroir plan semi réfléchissant, ces deux miroirs sont parallèles et ils se comportent comme un interféromètre Fabry Péro. Figure (3.10).

Supposons que le pompage est produit par un flash. Par suites des réflexions multiples entre les deux miroirs, les photons dus à l'émission stimulée produisent à leur tour de plus en plus de photons et comme toutes les ondes associées sont en phase, l'amplitude et l'intensité de l'onde deviennent considérables et une impulsion intense sort du miroir semi réfléchissant.

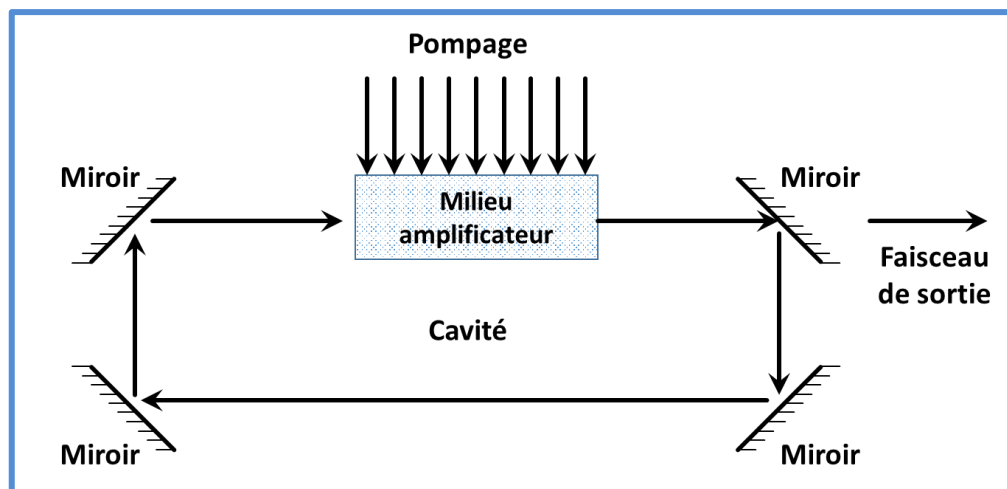


Figure (3.10) : Structure d'un résonateur optique

### 3.3.2. Caractéristiques électriques et optiques d'un Laser

#### a) Caractéristiques électriques :

- Le LASER a besoin d'une source d'alimentation électrique pour fonctionner. Le courant électrique fourni au laser est utilisé pour exciter les électrons dans le matériau amplificateur.
- Le LASER nécessite une faible consommation d'énergie et il est très efficace en termes de conversion d'énergie électrique en énergie lumineuse.
  - Caractéristique puissance-courant linéaire. Figure (3.11).

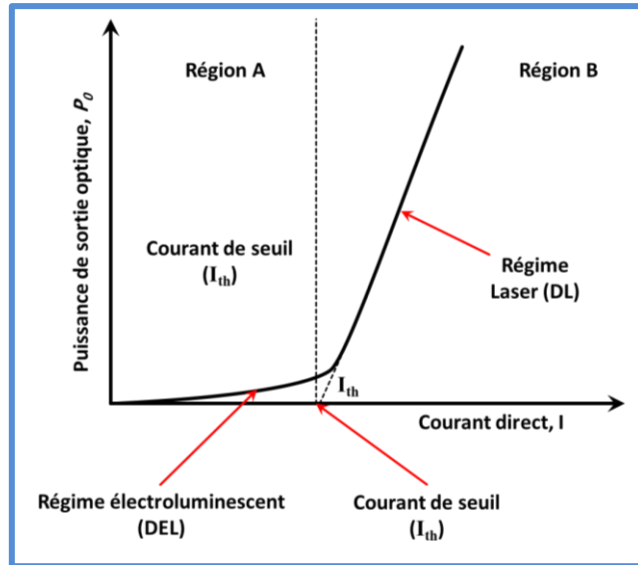


Figure (3.11) : Caractéristique de sortie du laser

### b) Caractéristiques spectrales

- Un diagramme de rayonnement qui présente une raie très fine par rapport à la LED.
- Le LASER émet une lumière monochromatique, c'est-à-dire qu'il produit une seule longueur d'onde de lumière, ce qui le rend utile dans des applications telles que la spectroscopie.
- Le LASER produit également une lumière cohérente, c'est-à-dire que les ondes lumineuses émises sont en phase les unes avec les autres, ce qui permet aux faisceaux de se propager sur de longues distances avec peu de divergence.
- Le LASER a une luminosité élevée, c'est-à-dire qu'il produit une lumière très brillante. Cette propriété les rend utiles dans des applications telles que la projection et la lecture optique de médias.
- Le LASER peut être polarisé, ce qui signifie que la lumière émise par un LASER peut être alignée dans une direction spécifique. Cette propriété les rend utiles dans des applications telles que la communication optique.

### 3.3.3. Différentes catégories des lasers

Il existe plusieurs types de Laser, on les classe selon la méthode de l'amplification et le domaine des longueurs d'ondes selon l'application, on trouve :

#### a) Les lasers à Gaz

Ce type de laser utilise des gaz tels que l'hélium, le néon, l'argon ou le dioxyde de carbone pour produire un faisceau laser. Dans ce type de laser, le pompage est généralement produit par une décharge électrique continue. Parmi les plus connus on cite :

- le laser Hélium-néon, qui est utilisé dans la reconnaissance de code- barres, la spectroscopie et les démonstrations optiques... ( $\lambda=632\text{nm}-3.39\mu\text{m}$ )
- le laser à Argon, qui est utilisé dans la luminothérapie rétinienne et la lithographie, ( $\lambda=454,6\text{nm}$ ).

#### *b) Les lasers à solides*

Ce type de laser utilise un cristal solide ou un verre dopé comme milieu amplificateur pour produire un faisceau laser. Le pompage se fait soit par échauffement soit par une source émettant un spectre. Parmi les plus connus, on cite :

- le laser à rubis, qui est utilisé en holographie, ( $\lambda=694.3\mu\text{m}$ )
- le laser Nd-YAg, pour l'usinage des matériaux, la chirurgie et la recherche, c'est le laser le plus puissant, ( $\lambda=1.064\mu\text{m}$ )
- Le laser Nd.Yap, utilisé en médical et principalement en dentisterie, ( $\lambda = 1.079\mu\text{m}$ ).

#### *c) Les lasers à colorants*

Le laser à colorant est un type de laser qui utilise un colorant organique liquide ou un colorant synthétique dissous dans un solvant comme milieu actif. Lorsque la solution est exposée à une source de lumière intense, les molécules de colorant sont excitées, ce qui les amène à émettre de la lumière sous forme de photons.

Le laser à colorant peut produire des faisceaux de lumière dans une gamme de longueurs d'onde allant du visible à l'infrarouge proche. Il est utilisé dans de nombreuses applications, notamment en biologie et en médecine, pour l'imagerie et la spectroscopie, ainsi que dans les spectacles de lumière et l'industrie du divertissement pour produire des effets visuels spectaculaires.

#### *d) les lasers à excimère*

Ce type de LASER utilise des molécules excitées, telles que l'argon et le fluor, comme milieu actif. Les LASER à excimère sont utilisés dans les applications industrielles, médicales et de recherche, telles que la photolithographie pour la fabrication de semi-conducteurs et la chirurgie oculaire.

#### *e) Les lasers à semi-conducteurs*

Ce type de LASER utilise des matériaux semi-conducteurs, tels que le gallium-arséniure ou l'indium-phosphure, comme milieu actif. Les LASER à semi-conducteur sont couramment utilisés dans les lecteurs de DVD et de CD, les imprimantes laser et les capteurs optiques. La source d'excitation est un courant électrique.

## Chapitre 3 : Emetteurs de lumière

Parmi les plus connus on cite :

- Diode laser à AlGaAs, utilisé comme pointeur laser, disques optiques et transmission des données, ( $\lambda=0.63-0.9\mu\text{m}$ ).
- Diode laser à cavité verticale (VCSEL), qui émet par la surface, il est utilisé en télécommunications avec Fibres optiques, ( $\lambda = 1.3\mu\text{m}$ ).

### ✚ Exemples d'application des lasers dans la vie quotidienne

Le laser possède un large champ d'applications dans la vie de tous les jours comme :



**Pilotage des avions**



**En médecine**



**Les imprimantes**



**Codes barre dans les superettes**



**Diode laser pour la médecine  
(en chirurgie, en esthétique)**



**Les lecteurs DVD**

### *Exercices d'applications du chapitre 3*

- **Application n°1**

1/ Calculer le rendement quantique interne d'une LED dont les durées de vie radiative et non radiative sont respectivement **2.5ms** et **60ms**.

2/ Calculer la puissance optique émise d'une led parcourue d'un courant de **20mA** et pour une tension de **1.5V**, dont le rendement globale est de **20%**.

- **Application n°2**

Une LED au GaP ( $\lambda = 0.575\mu\text{m}$ ) est traversé par un courant de **100mA** pour une polarisation de **2.2V**. Elle présente un rendement quantique externe de **0.3%** Calculer :

- a) Le nombre de photons émis par la diode.
- b) Son rendement global.

- **Application n°3**

1- Calculer l'énergie  $E_g$  associée à la largeur de la bande interdite pour une LED en GaAs, émettant à la longueur d'onde  $\lambda = 0.9\mu\text{m}$  et traversée par un courant  $I = 100\text{mA}$ .

2- Calculer le nombre des électrons  $N_e$  traversant la jonction par unité de temps.

3- Calculer le nombre de photons  $N_{ph}$  émis par unité de temps dans la led pour un rendement quantique externe  $\eta_{ext} = 50\%$ .

4- Calculer le rendement d'absorption  $\eta_a$ , si  $\alpha = 8.10^3\text{Cm}^{-1}$ , et si l'épaisseur de la zone émettrice P est de **1 $\mu\text{m}$** .

### *Solution des exercices d'applications chapitre 3*

#### ➤ Solution application n°1 :

1/ Le rendement quantique interne est donné par :  $\eta_{in} = \frac{1/\tau_r}{\frac{1}{\tau_r} + \frac{1}{\tau_{nr}}}$ ,

$$\text{Donc : } \eta_{in} = \frac{2.5}{2.5+60} = 0.96 = 96\%$$

2/ la puissance optique émise par la Led, on a :  $\eta_g = P_o/P_e$  avec :

$P_o = N_{ph} \cdot E_g$  (puissance optique) et  $P_e = V \cdot I$  (Puissance électrique)

$$P_o = 6 \text{mWatt}$$

#### ➤ Solution application n°2 :

a) Le nombre de photons :  $N_{ph} = \eta_{ex} \cdot N_e$  et on sait que :  $I = N_e \cdot q$  (le courant égale au nombre des électrons multiplié par leur charge).

$$\text{Donc : } N_{ph} = 18.75 \text{photons}$$

b) Le rendement global :

$$\eta_g = P_o/P_e = N_{ph} \cdot E_g / N_e \cdot q \cdot V = N_{ph} \cdot h \nu / N_e \cdot q \cdot V = \eta_{ex} \cdot 1.24 / \lambda \cdot V$$

$$\text{Donc : } \eta_g = 0.29\%$$

#### ➤ Solution application n°3 :

$$1/ E_g = 1.37 \text{eV}$$

$$2/ N_e = 6.25 \cdot 10^{17} \text{ électrons/s}$$

$$3/ N_{ph} = 2.81 \cdot 10^{17} \text{ photons/s}$$

4/  $\eta_a = e^{-ax}$  (où x : représente la distance à parcourir pour sortir)

$$\text{Donc : le rendement d'absorption } \eta_a = 45\%$$

*Questions à choix multiples (QCM)*

1. La face émettrice dans une LED est la région P car :
  - $\mu_n = \mu_p$ .
  - $\mu_n \gg \mu_p$ .
  - $\mu_p \gg \mu_n$ .
2. Le LASER donne une lumière
  - Blanche
  - Polychromatique
  - monochromatique
3. Le LASER est une source de lumière
  - Cohérente
  - dispersée
  - étroite
  - avec largeur spectrale
4. La structure d'une LED est une jonction polarisée :
  - En direct
  - en inverse
  - sans polarisation
  - en optique
5. On peut obtenir l'inversion de population pour un système à :
  - 3 niveaux d'énergie
  - 2 niveaux d'énergie
  - 4 niveaux d'énergie
  - 1 seul niveau d'énergie
6. Le LASER est la structure qui nécessite :
  - Un pompage électrique
  - Un courant alternatif
  - Un courant continue
7. La LED possède un spectre
  - Large
  - Etroit
  - avec largeur spectrale
  - large avec  $\Delta\lambda$
8. La LED est basé sur le principe de :
  - L'émission Stimulée
  - émission spontanée
  - recombinaison directe
  - absorption
9. L'électroluminescence est l'émission consécutive suite à une excitation
  - Magnétique
  - thermique
  - électrique
  - accoustique
10. L'émetteur de lumière est un transducteur :
  - Opto-électrique
  - électro-optique
  - électrique
  - optique

### 4. Les détecteurs de lumière

#### Introduction

Ce chapitre a pour but de poser les bases générales et nécessaires, à la compréhension du fonctionnement des photo- détecteurs. Nous nous intéressons aux photo- détecteurs optiques à base de semi-conducteurs utilisés en électronique.

Nous allons vous présenter d'abord le principe de fonctionnement d'un détecteur, ensuite nous énumérons les différents types de structures existantes, ainsi que leurs caractéristiques et domaine d'application.

#### 4.1. Principe de fonctionnement d'un détecteur

Lorsque la lumière tombe sur un détecteur à base de semi-conducteur, cela peut provoquer le passage d'électrons d'un état de la bande de valence à un état plus élevé de la bande de conduction. Dans cette dernière, les électrons moins liés deviennent libres. Le photon a donc laissé place à une paire (électron-trou), Figure (4.1).

Les porteurs ainsi générés peuvent alors recueillis vers un circuit extérieur et contribuent au passage d'un courant que l'on appelle : photo-courant. Le nombre de paires électron-trou est égal au nombre de photons absorbés

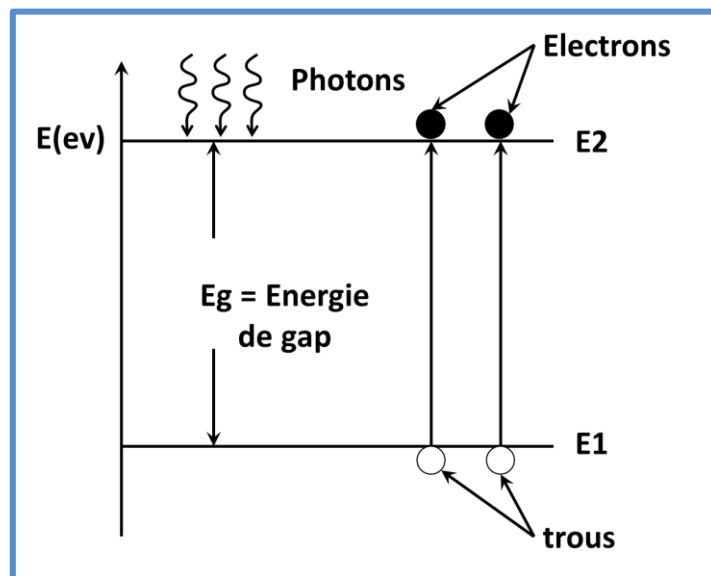


Figure (4.1) : Principe d'un détecteur à base de semi-conducteur

#### 4.2. Les différents types de photo détecteurs

Il existe une multitude variétés de photo- détecteurs, les plus répandus sont :

### 4.2.1. La photorésistance

Appelée aussi cellule photoconductrice ou LDR pour (light dependent resistor) en anglais, est un type de résistance qui change sa valeur en fonction de l'intensité de la lumière incidente.

La photorésistance est un capteur qui permet de détecter la lumière. Elle est très petite, bon marché, et économique en énergie.

#### a) Technologie

La photorésistance est constituée de cristaux mixtes, comme le Sulfure de Cadmium (CdS), le sélénure de cadmium (CdSe), ou bien des combinaisons de plomb et d'indium, de germanium dopé à l'or, ou au cuivre.

#### b) Symbole et codification

Le symbole de LDR est schématisé en dessous, figure (4.2).

Le matériau constituant la photorésistance est déposé en serpentin sur une plaquette de céramique.

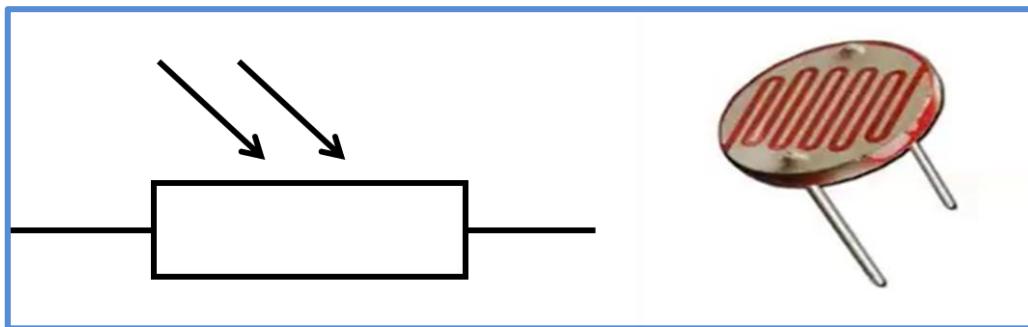


Figure (4.2) : Symbole de la photorésistance à gauche, photorésistance réelle à droite

- Dans l'obscurité la valeur de la résistance est supérieure à  $10\text{ M}\Omega$  et peut chuter à  $75\Omega$  pour un éclairage intense.
- Le temps de réponse étant relativement important (ordre de grandeur : 20 à 100 ms) ce type de composant est peu intéressant pour les communications.

#### c) Principe de fonctionnement

Les photorésistances sont souvent utilisées dans les circuits électroniques pour détecter la présence ou l'absence de lumière. Lorsqu'elles sont exposées à la lumière, leur résistance diminue, ce qui permet au courant de passer plus facilement à travers le circuit. À l'inverse, lorsque la lumière est faible ou inexistante, la résistance de la photorésistance augmente, ce qui limite le courant.

Donc le principe de fonctionnement de LDR repose sur l'augmentation de la conductivité électrique du semi-conducteur, provenant de la création de porteurs par le

## Chapitre 4 : Les détecteurs de lumière

---

rayonnement incident. Comme il ya peu d'impuretés dans la photorésistance, il faut un temps important pour les porteurs excédentaires se recombinent.

En effet ce composant passif exploite le principe de la photoconduction.

### *d) Caractéristiques des photorésistances*

#### • *Loi de la variation de la résistance R*

$$R = \frac{R_0}{R_p} \quad (4.1)$$

$R_0$  : Résistance de la cellule dans l'obscurité ;

$R_p$  : Résistance déterminée par l'effet photoélectrique du flux incident ;

$$R_p = aE^{-\gamma} \quad (4.2)$$

$E$  : Éclairement (flux incident)

$a$  : Constante dépendant du matériau et de la température

$\gamma$  : Coefficient compris, en général, entre 0.5 et 1.

#### • *Gain en photocourant*

$$\text{Gain} = \frac{N_{e^-} : \text{Nombre des électrons}}{N_{ph} : \text{Nombre des photons}} \quad (4.3)$$

$$N_{e^-} = \frac{I_{ph}}{q} \quad (4.4)$$

$$N_{ph} = G \cdot V = G \cdot L \cdot l \cdot h \quad (4.5)$$

$V$  : Volume de la structure.

La génération en régime stationnaire :

$$G = \frac{\Delta n}{\tau} = R \quad (4.6)$$

$\tau$  : La durée de vie des porteurs en excés

En remplaçant dans l'expression du gain :

$$G = \frac{q \cdot \mu_n \cdot \delta n \cdot \frac{V}{L} \cdot h \cdot l}{q \cdot \frac{\delta n}{\tau} \cdot h \cdot l \cdot L} \quad (4.7)$$

Le gain devient :

$$G = \frac{\mu_n \cdot V \cdot \tau}{L^2} \quad (4.8)$$

On a aussi :

$$E = \frac{V}{L} \quad (4.9)$$

$$G = \frac{\mu_n \cdot E \cdot \tau}{L} = \frac{v_n \cdot \tau}{L} \quad (4.10)$$

$v_n = \mu_n \cdot E$  : La vitesse de propagation des électrons

$\frac{L}{v_n} = t_t$  : Temps de transition

L'expression du gain sera :

$$G = \frac{\tau}{t_t} \quad (4.11)$$

- **Sensibilité :**

$$S = \frac{I_{ph}}{P_i} = \frac{I_{ph}}{N_{ph} \cdot h\nu} [A/W] \quad (4.12)$$

$P_i$  : Puissance incidente d'éclairement

- **Expression du photo courant**

$$J_{ph} = \sigma \cdot E \quad (4.13)$$

$\sigma$  : La conductivité

$\mu$  : La mobilité

$$\sigma = q(\mu_n + \mu_p) \cdot \delta n \quad \delta n = \delta p \quad (4.14)$$

$$E = \frac{V}{L} \quad (4.15)$$

Comme  $\mu_p \ll \mu_n$

$$J_{ph} = q \cdot \mu_n \cdot \delta n \cdot \frac{V}{L} \quad (4.16)$$

$$I = J_{ph} \cdot S = q \cdot \mu_n \cdot \delta n \cdot \frac{V}{L} \cdot h \cdot l \quad (4.17)$$

- ✚ **Exemple de domaine d'application de la photorésistance :**

Les photorésistances sont souvent utilisées dans des applications telles que la détection de mouvement, les capteurs de luminosité pour l'éclairage public, les systèmes d'alarme de sécurité, les jouets électroniques et les appareils photo, ainsi que la détection d'intrusion.

On la trouve aussi dans l'éclairage automatique et dans les ascenseurs.

### 4.2.2. La Photodiode

Une photodiode est un composant opto-électronique qui convertit la lumière en courant électrique.

La structure d'une photodiode est une jonction PN simple constituée de deux couches, à savoir des semi-conducteurs de type P et de type N, tandis que la photodiode PIN est constituée de trois couches, à savoir le type P, le type N et une couche d'addition appelée

## Chapitre 4 : Les détecteurs de lumière

semi-conducteur intrinsèque, placée entre le semi-conducteur de type P et le semiconducteur de type N.

La photodiode PIN est alors développée à partir des photodiodes à jonction PN. Pour la détection et contrairement à l'émission, il n'est pas obligatoire que le semi-conducteur utilisé soit à gap direct, le Silicium à gap indirect est employé largement grâce à son coût faible et ses meilleures performances.

### a) Symbole et codification

La figure (4.3), illustre une image de la photodiode réelle ainsi que son symbole électrique.

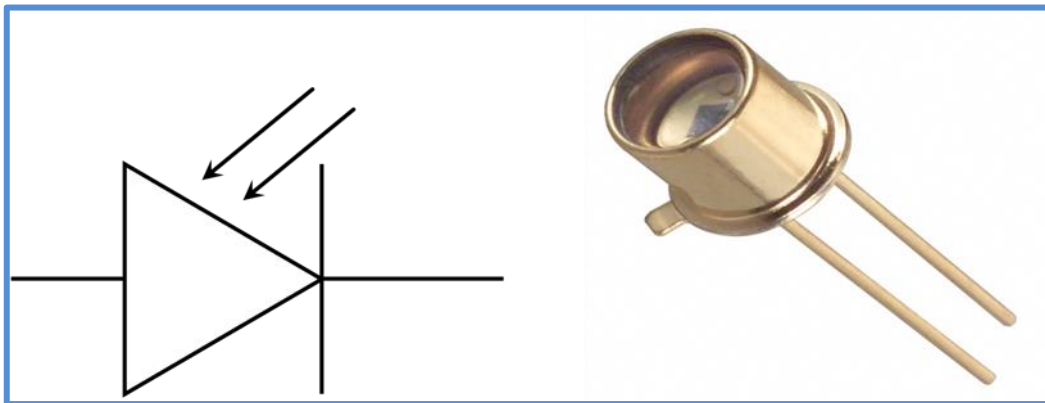


Figure (4.3) : Symbole de la photodiode à gauche, Photodiode réelle à droite

### b) Principe de fonctionnement

Elle utilise la photo détection (conversion d'un photon en une paire électron-trou). Sa structure est une simple diode PN polarisée en inverse, les photons sont absorbés dans la zone intrinsèque qui, du fait de la polarisation, est vide de porteurs mobiles.

Les électrons et les trous ainsi créés ont une faible probabilité d'être recombinaisonnés, car ils sont séparés par le champ électrique 'E' qui règne dans la zone intrinsèque et qui les dirige vers la zone N et P, où ils sont majoritaires. Figure (4.4).

La zone traversée par la lumière doit être de faible épaisseur et protégée par une couche antireflet qui améliore le rendement externe et protège le matériau.

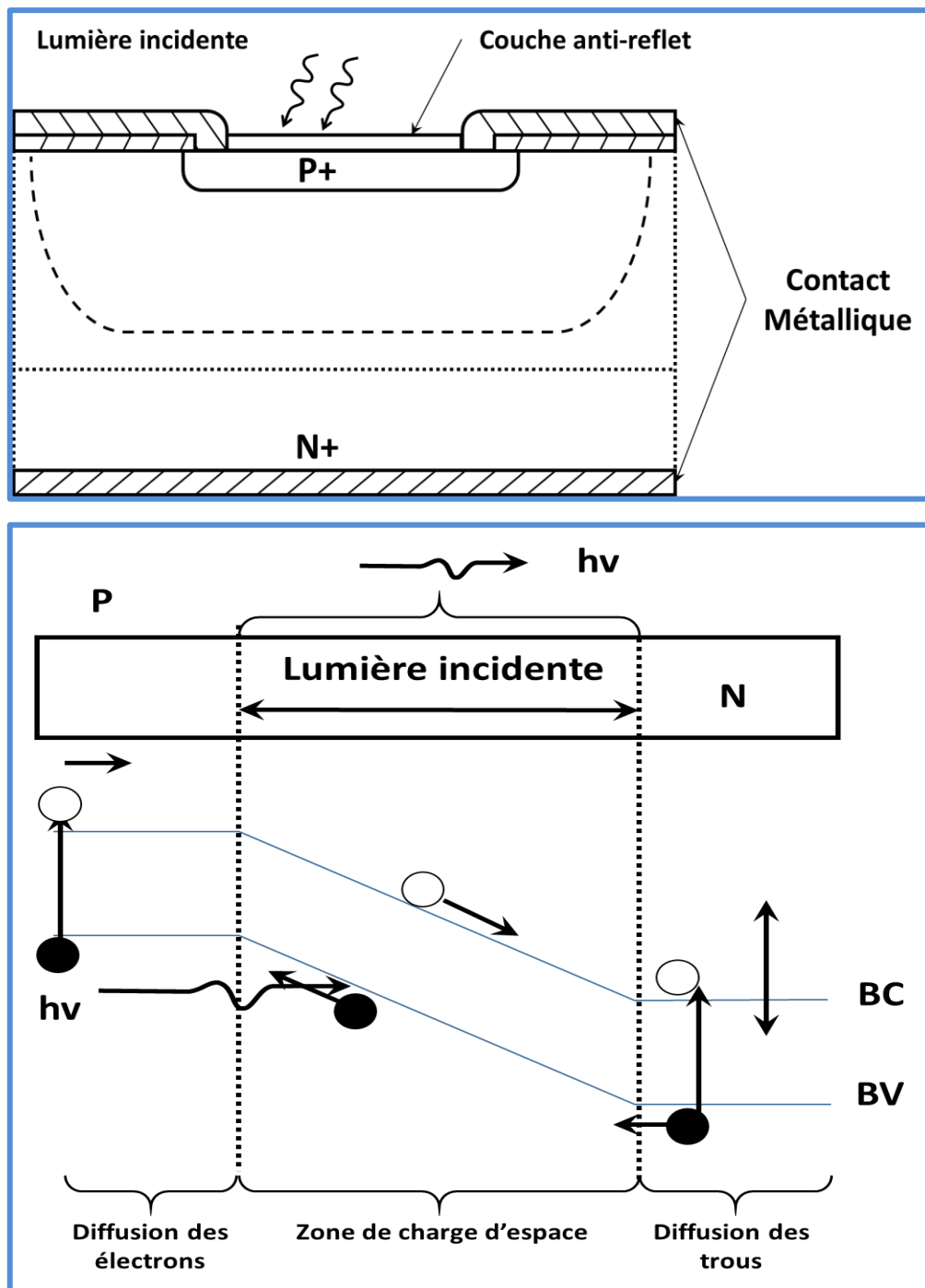


Figure (4.4) : Principe de fonctionnement de la photodiode PIN

Le courant établi dans la photodiode PIN est donné par :

$$I_{ph} = i_s + i_D \quad (4.18)$$

Où :  $i_s = S \cdot P$  photo courant proportionnel à la puissance optique  $P$  et la sensibilité  $S$ .

$i_D$  : Courant d'obscurité, c'est le courant qui circule dans la jonction en absence d'éclairement, il provient à la fois de courants de fuite et de génération thermique, il augmente avec la température et la tension de polarisation.

### c) *Caractéristiques optiques et électriques de la photodiode*

- *Caractéristiques optiques*

La photodiode est le plus souvent caractérisée par son rendement quantique interne, sa sensibilité, sa directivité et le temps de réponse.

- *Rendement quantique interne :*

Il définit comme étant le rapport du nombre des électrons photo générés sur le nombre de photons.

$$\eta_{\text{int}} = I \cdot h\nu / q\Phi_i$$

Avec :

$\Phi_i$  : flux incident en Watt ;

I : courant électrique (A) ;

h : constante de Planck,  $h = 6.62 \cdot 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$

q : charge de l'électron,  $q = 1.6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$

$\nu$  : fréquence,  $\nu = c/\lambda$

- *Sensibilité*

Elle est désignée par S et exprimée en Ampères par Watt et définissant le rapport du photocourant  $I_{\text{ph}}$  au flux énergétique (puissance optique) reçu.

Son expression est donnée par :

$$S = I_{\text{ph}}/P_o = \eta q/h\nu$$

Avec :

$\eta$  : Rendement quantique

q : charge de l'électron ;  $q = 1.6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$

h : constante de Planck ;  $h = 6.62 \cdot 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$

La sensibilité augmente avec la longueur d'onde, jusqu'à une valeur où elle est maximale, puis chute brusquement à l'approche de la longueur d'onde limite  $\lambda_c = hc/E_g$ . Au-delà le matériau est devenu transparent.

Le constructeur d'une photodiode donne une courbe de réponse de l'élément en fonction de la longueur d'onde de la lumière reçue.

La figure (4.5) montre un exemple de la courbe de sensibilité de la photodiode.

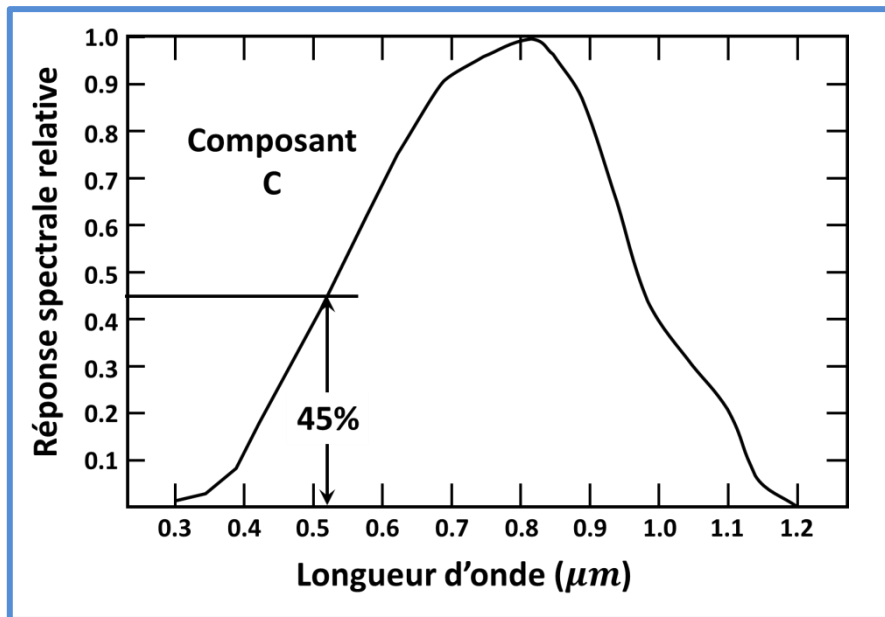


Figure (4.5) : Réponse spectrale de la photodiode

- **Directivité**

Le fabricant indique la courbe directionnelle du capteur en fonction de l'angle de réception de la lumière. Figure (4.6)

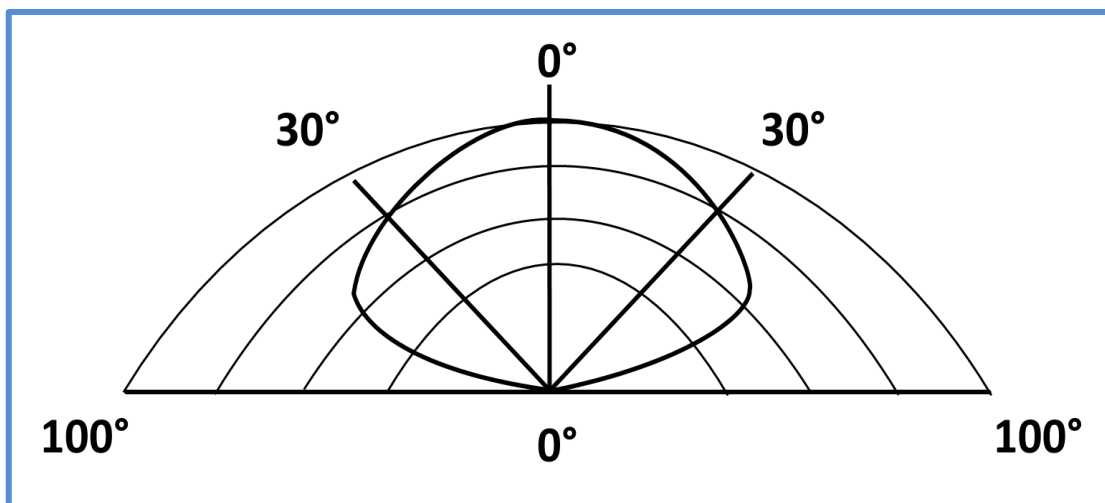


Figure (4.6) : Sens de directivité d'une photodiode

- **La réponse temporelle  $\tau$**

La réponse temporelle d'un photo-détecteur peut être limitée par des effets capacitifs, par le piégeage des porteurs ou par la vitesse limite de saturation des porteurs dans le semi-conducteur. La réponse temporelle d'un photo-détecteur est caractérisée par le temps de

déclin (ou temps de montée), qui est par définition le temps nécessaire au photo détecteur pour tomber de 90% à 10% de son maximum (ou pour monter de 10% à 90% de celui-ci).

### d) Caractéristiques électriques

- **Le courant d'obscurité**

Le courant d'obscurité est le courant circulant en l'absence de toute source lumineuse. Son origine est thermique et il augmente de 10% pour une augmentation de température de 1°C.

Il provient à la fois de courants de fuite et de génération thermique, il augmente avec la température et la tension de polarisation.

- **Circuit associé à une photodiode**

Le circuit équivalent d'une photodiode est représenté sur la figure (4.7)

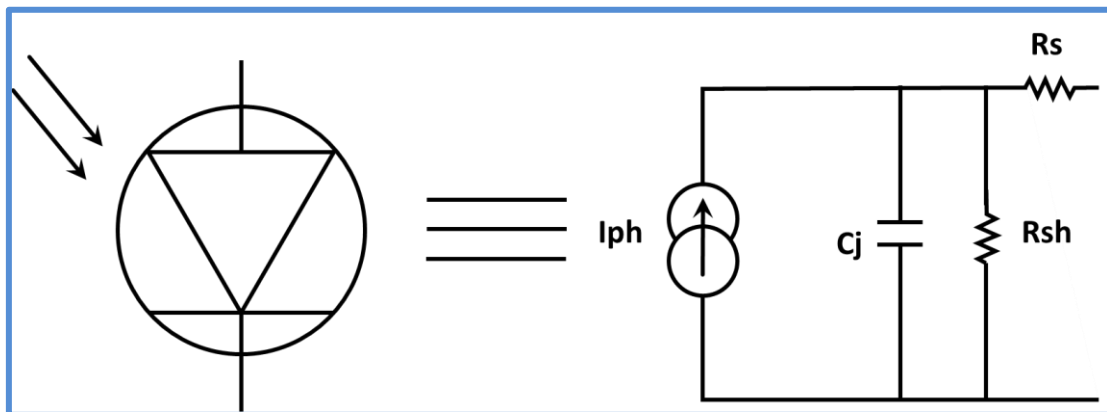


Figure (4.7) : Schéma électrique équivalent à de la photodiode avec son symbole.

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

- **Résistance de shunt** : la résistance de shunt d'une photodiode idéale est infinie. En réalité cette résistance est comprise entre 100kΩ et 1GΩ selon la qualité de la photodiode. Cette résistance est utilisée pour calculer le courant de fuite (ou bruit) en mode photovoltaïque, c'est-à-dire sans polarisation de la photodiode.

- **Capacité de jonction** : cette capacité est due à la zone de charge ; elle est inversement proportionnelle à la largeur de charge d'espace ( $W$ ). Où  $A$  est la surface de coupe de la photodiode.  $W$  est proportionnel à la polarisation inverse et la capacité diminue si la polarisation augmente. Cette capacité oscille autour de 100 pF pour les faibles polarisations à quelques dizaines de pF pour les polarisations élevées.
- **Résistance interne** : cette résistance est essentiellement due à la résistance du substrat et aux résistances de contact.  $R_s$  peut varier entre 10 et 500 $\Omega$  selon la surface de la photodiode.

### *Domaine d'application de la photodiode :*

La photodiode trouve ces applications dans ce qui suit :

**Détection de lumière** : Les photodiodes sont souvent utilisées dans les capteurs de lumière pour mesurer la quantité de lumière incidente. Elles sont également utilisées dans les dispositifs de détection de fumée, de détecteurs de mouvement et de capteurs de proximité.

**Télécommunications** : Les photodiodes sont utilisées pour convertir les signaux optiques en signaux électriques dans les fibres optiques.

**Imagerie** : Les photodiodes sont utilisées dans les caméras numériques, les scanners, les machines à rayons X et autres équipements d'imagerie.

**Contrôle industriel** : Les photodiodes sont utilisées pour mesurer la quantité de lumière dans les processus industriels tels que la soudure, le brasage, la découpe laser et autres.

**Mesures scientifiques** : Les photodiodes sont utilisées pour mesurer la lumière dans les expériences scientifiques, notamment dans les spectromètres et les détecteurs de rayonnement.

**Énergie solaire** : Les photodiodes sont utilisées dans les cellules solaires pour convertir la lumière du soleil en énergie électrique.

**Contrôle de l'éclairage** : Les photodiodes sont utilisées pour réguler l'intensité de l'éclairage dans les éclairages de rue, les éclairages publics et les feux de circulation.

### **4.2.3. Le Phototransistor**

Un phototransistor est un type de transistor qui est sensible à la lumière. Il peut être utilisé pour détecter la présence ou l'absence de lumière, ou pour mesurer l'intensité de la lumière incidente.

## Chapitre 4 : Les détecteurs de lumière

Un phototransistor est donc un transistor bipolaire dont la base est accessible au rayonnement lumineux. Dans le transistor bipolaire, le courant circulant dans la base est amplifié et le courant du collecteur circule. Dans le phototransistor, la lumière entrante agit comme le courant de base, et le courant du collecteur circule en fonction de la quantité de lumière entrante.

### a) Symbole et codification

Le phototransistor a un symbole similaire à celui du transistor, mais qu'il n'a pas de borne de base. La figure (4.8.a) illustre son symbole.

Son corps est enfermé dans de la résine ou du plastique ou enfermé dans une coque en métal avec fenêtre.

Il possède une conception similaire à un transistor bipolaire normal, sauf que la région de base et de collecteur est plus grande par rapport à un transistor normal. La base est recouverte de résine époxy transparente et d'une lentille pour concentrer la lumière lors de l'entrée dans la région. Physiquement, cela ressemble à une photodiode. Figure (4.8.b)

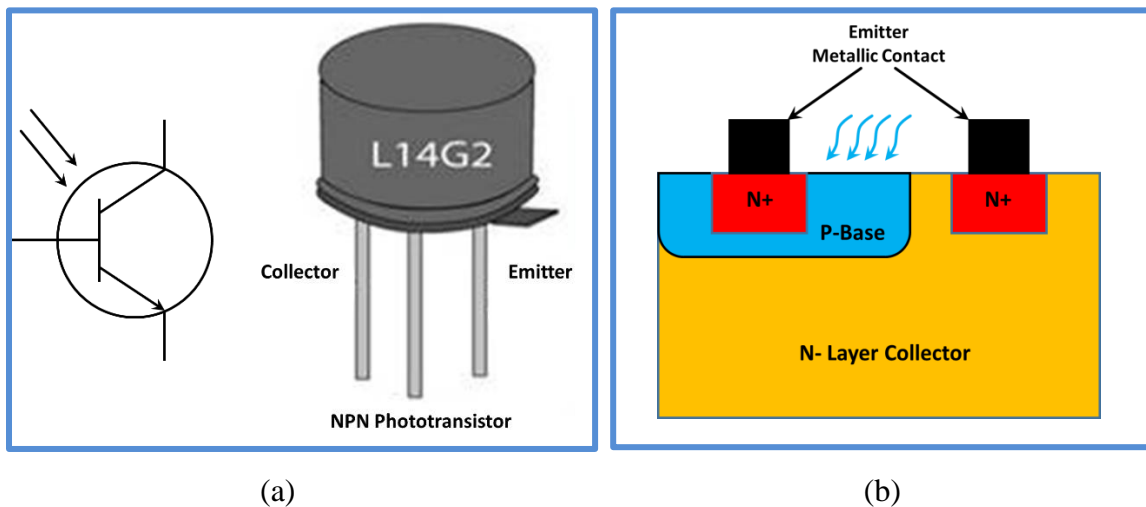


Figure (4.8) : a) Symbole du phototransistor b) Structure du phototransistor

### b) Principe de fonctionnement

Le phototransistor fonctionne en utilisant l'effet photoélectrique appliqué sur une région semi-conductrice.

Lorsqu'une source de lumière brille sur la jonction PN du phototransistor, les photons de la lumière frappent les atomes de la jonction, fournissant suffisamment d'énergie pour libérer des électrons de la zone de valence vers la zone de conduction. Cela crée une

quantité de porteurs de charge (électrons et trous) qui augmente le courant de base du transistor. En conséquence, le courant collecteur-émetteur est amplifié en proportion.

### *c) Caractéristiques du phototransistor*

1. Sensibilité à la lumière : Le phototransistor est très sensible à la lumière et peut détecter de faibles niveaux de lumière. Cela le rend utile dans les applications de détection de faible luminosité, telles que les capteurs de lumière ambiante pour les écrans d'ordinateur et les téléviseurs.
2. Amplification : L'amplification en courant du phototransistor varie normalement de 100 à 1000. Il varie avec l'éclairement. Les constructeurs donnent des courbes représentant le courant en fonction de la tension pour un éclairement défini (E) et ceci pour différents éclairagements.
3. Courant de saturation : Le phototransistor peut être utilisé pour amplifier le courant électrique qui circule à travers lui. Cependant, il a une limite de courant de saturation au-delà de laquelle sa capacité d'amplification est limitée.
4. Temps de réponse : Le temps de réponse du phototransistor est relativement court, ce qui le rend utile dans les applications qui nécessitent une réponse rapide, telles que les capteurs de mouvement et les détecteurs de proximité.
5. Sensibilité spectrale : La sensibilité spectrale du phototransistor dépend de la composition de son matériau semi-conducteur. Certains phototransistors sont sensibles à des longueurs d'onde spécifiques de la lumière, tandis que d'autres sont sensibles à un large spectre de longueurs d'onde.
6. Taille compacte : Les phototransistors sont généralement très petits, ce qui les rend utiles dans les applications où l'espace est limité.
7. Le CTR (Current Transfert Ratio) : c'est le courant que peut délivrer le phototransistor d'un optocoupleur. Il est donné par le rapport du courant de sortie dans le transistor et le courant de la LED. Donc :  $CTR = I_c/I_{LED}$

- *Schéma et application du phototransistor*

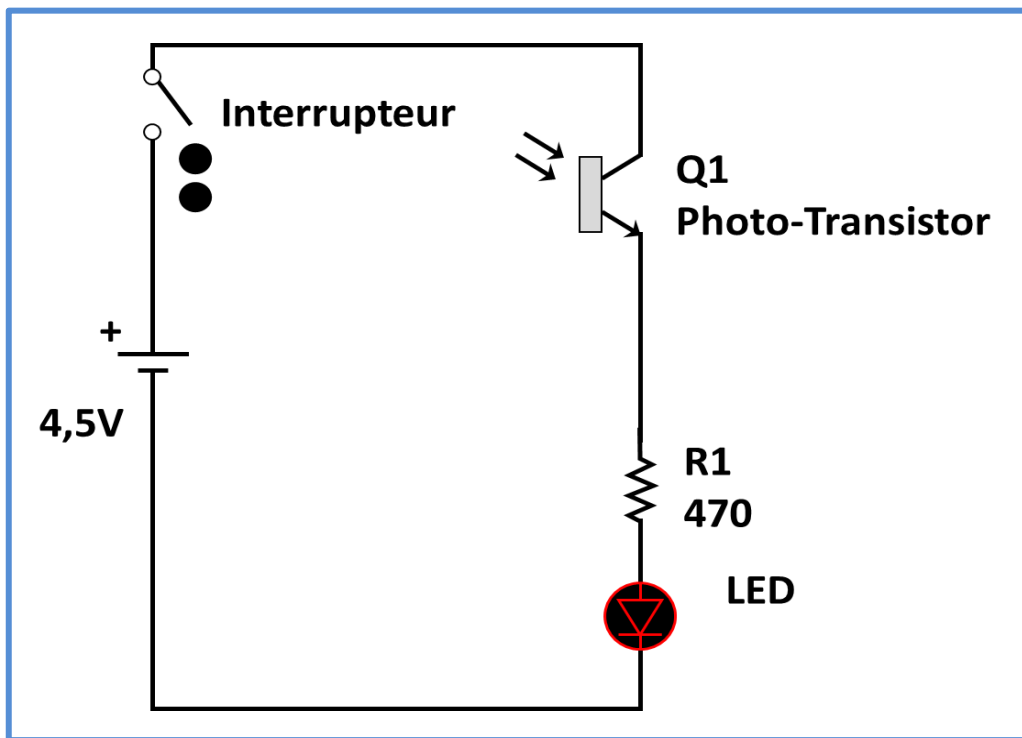


Figure (4.9) : Montage d'application d'un phototransistor

Dans le montage illustré sur la figure (4.9) et quand l'interrupteur est fermé, lorsque le phototransistor reçoit une lumière intense, il s'allume et la LED s'allume également.

Quand le phototransistor ne reçoit pas de lumière (si on déplace lentement la main sur lui), la LED devient plus faible jusqu'à ce qu'elle s'éteigne.

### ✚ *Domaine d'application du phototransistor :*

Les phototransistors sont couramment utilisés dans les applications de détection de lumière, comme les détecteurs de mouvement pour les systèmes de sécurité, les capteurs de lumière pour les appareils photo, et les compteurs de lumière pour mesurer l'intensité de la lumière dans les environnements de photographie. Ils sont également utilisés dans les circuits électroniques pour amplifier des signaux lumineux faibles.

Les phototransistors sont appliqués en tant que photo-capteurs. Ils détectent la commutation ON / OFF de la lumière en mode sans contact, sans nécessiter de contact mécanique.

Par exemple, si vous dirigez un faisceau sur un phototransistor, vous pouvez compter le nombre d'objets susceptibles d'avoir traversé le faisceau.

### 4.2.4. La photopile (cellule solaire)

Une photopile, également appelée aussi cellule photovoltaïque, est un dispositif électronique qui convertit l'énergie lumineuse du soleil en énergie électrique. C'est le composant de base des panneaux solaires.

La photopile n'est autre qu'une photodiode qui fonctionne sans polarisation extérieure. Elle débite son photocourant dans une charge. Figure (4.10).

Les avantages des cellules solaires incluent leur faible coût d'exploitation et leur faible impact environnemental, car elles ne produisent pas de pollution lors de la production d'électricité. Cependant, leur coût initial peut être élevé et leur efficacité peut être affectée par les conditions météorologiques, telles que les nuages et la pluie.

La photopile est une cellule photovoltaïque en Silicium, mais sa taille réduite fait, qu'exposé à la lumière du soleil donne une tension de 0.5V à 0.6V sous  $1000\text{W/m}^2$ , c'est pour cela qu'il convient de raccorder en série des cellules pour constituer un module appelé : panneau solaire.

Le rendement d'une photopile est limité par plusieurs facteurs tel que l'indice de réflexion du semiconducteur qui est très grand (30%), Le gap du matériau qui limite la conversion en énergie électrique une bande étroite du rayonnement solaire (notons que le visible et le proche infra-rouge n'est qu'une petite partie du rayonnement solaire). Le silicium par exemple a un gap de 1.1 eV, si l'énergie des photons est inférieure à 1.1 eV (infra rouge et au-delà), les photons vont traverser le matériau sans être absorbé, donc sans génération de photocourant. Si l'énergie des photons dépasse les 3eV (ultraviolet et au-delà), l'absorption est élevée mais elle se fera essentiellement en surface, vu l'état d'interface semiconducteur oxyde, les photocourants générés seront immédiatement recombinés et ne participeront pas à un courant utile. D'où l'explication d'un rendement aussi faible.

Plusieurs techniques existent pour augmenter le rendement, par exemple déposer une couche d'anti-réflexion sur la cellule solaire, le rayonnement réfléchi par le matériau est réinjecté grâce à cette couche, ainsi les pertes sont réduites. Une autre solution consiste à employer plusieurs matériaux ayant des énergies de gap différentes comme l'Arsénure de Gallium ou le tellure de Cadmium, on obtient alors une structure multicouche, chaque couche est admise une efficacité maximale dans une région du spectre, ceci augmente le rendement mais augmente aussi le prix de la cellule.

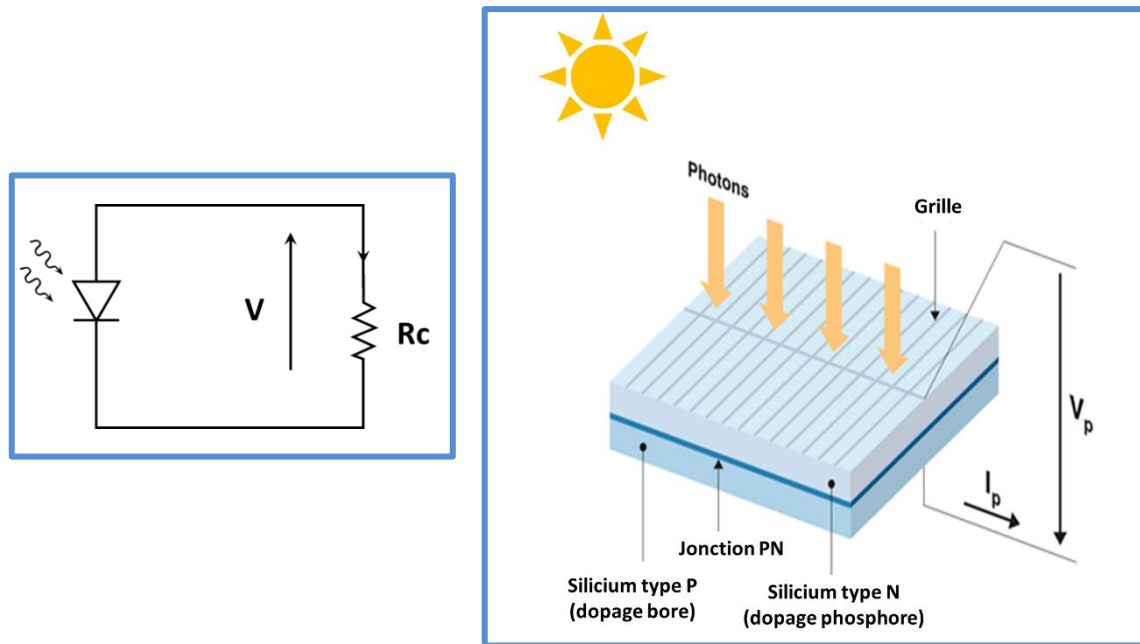


Figure (4.10) : Schéma d'une photopile (structure d'une photopile)

### a) Effet photovoltaïque

Le terme « photovoltaïque » désigne le processus physique qui consiste à transformer l'énergie lumineuse en énergie électrique par le transfert de l'énergie des photons aux électrons d'un matériau. Le préfixe Photo vient du grec « phos » qui signifie lumière, et « Volt » vient du patronyme d'Alessandro Volta (1745-1827), physicien qui a contribué aux recherches sur l'électricité. Photovoltaïque (PV) signifie donc littéralement électricité lumineuse.

L'effet photovoltaïque se manifeste quand un photon est absorbé dans un matériau composé de semi-conducteurs dopés p (positif) et n (négatif), dénommé comme jonction p-n (ou n-p). Sous l'effet de ce dopage, un champ électrique est présent dans le matériau de manière permanente (comme un aimant possède un champ magnétique permanent). Quand un photon incident (grain de lumière) interagit avec les électrons du matériau, il cède son énergie  $h\nu$  à l'électron qui se retrouve libéré de sa bande de valence et subit donc le champ électrique intrinsèque. Sous l'effet de ce champ, l'électron migre vers la face supérieure laissant place à un trou qui migre en direction inverse. Des électrodes placées sur les faces supérieure et inférieure permettent de récolter les électrons et de leur faire réaliser un travail électrique pour rejoindre le trou de la face antérieure.

### *b) Fabrication des cellules photovoltaïques*

Le silicium est le matériau le plus fréquemment utilisé pour fabriquer des cellules photovoltaïques. La fabrication des cellules photovoltaïques est un processus complexe qui implique plusieurs étapes.

Voici les principales étapes de fabrication des cellules photovoltaïques :

- 1- Purification du silicium : Le silicium, qui est l'un des principaux matériaux utilisés dans la fabrication des cellules photovoltaïques, est extrait de la silice, un composé abondant dans la croûte terrestre. Le silicium est ensuite purifié pour éliminer les impuretés et obtenir un matériau semi-conducteur de haute qualité.
- 2- Croissance de lingots de silicium : Le silicium purifié est fondu et coulé en lingots, qui sont des blocs de silicium cristallin de haute pureté. Les lingots sont coupés en tranches très minces appelées wafers, comme s'est schématisée sur la figure (4.11)

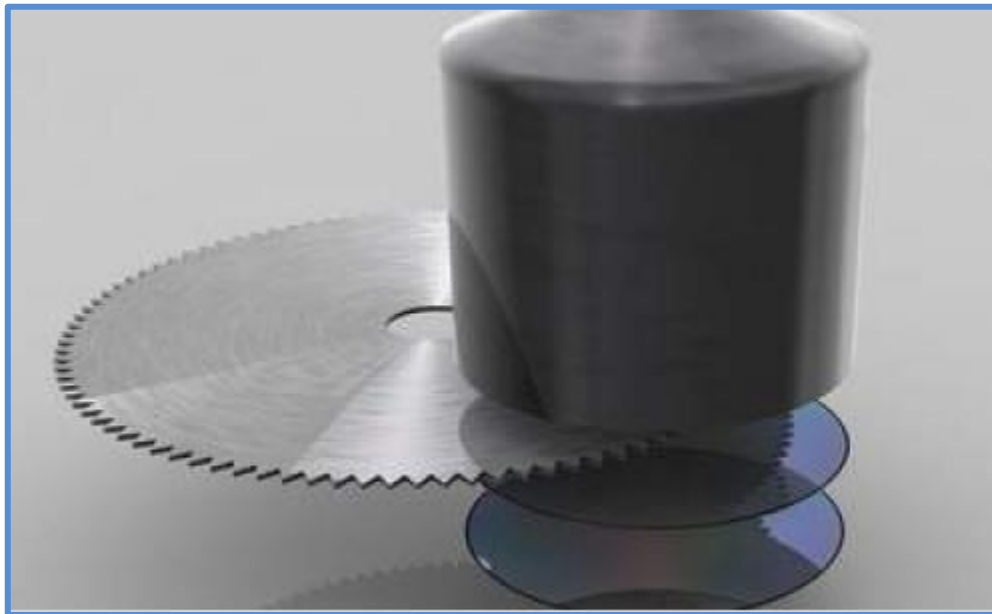


Figure (4.11) : Découpe des wafers (tranches fines) à partir de lingot de Silicium

- 3- Diffusion de dopants : Les wafers sont dopés avec des impuretés pour créer des couches de semi-conducteurs avec des propriétés électriques spécifiques. Cette étape est appelée diffusion et elle permet de créer des zones de type p et de type n sur la surface des wafers.
- 4- Formation des contacts : Les contacts métalliques sont déposés sur les couches p et n pour permettre la collecte de courant électrique à partir des wafers. Cette étape est généralement réalisée en utilisant un processus de dépôt physique en phase vapeur (PVD) ou de dépôt chimique en phase vapeur (CVD).

## Chapitre 4 : Les détecteurs de lumière

---

- 5- Pose de Revêtement anti-réfléchissant afin d'avoir une meilleure absorption des rayons de soleil, et éviter les réflexions.
- 6- Assemblage en cellules photovoltaïques : Les wafers dopés et contacts métalliques sont assemblés en cellules photovoltaïques. Plusieurs cellules photovoltaïques sont ensuite reliées entre elles pour former un module photovoltaïque. Figure (4.12).
- 7- Systèmes de stockage de l'énergie et suiveurs solaires.

Il est important de noter que la fabrication des cellules photovoltaïques nécessite des ressources et de l'énergie, et que la production à grande échelle peut avoir un impact environnemental. Les fabricants de cellules photovoltaïques doivent donc utiliser des pratiques de fabrication durables pour minimiser l'impact environnemental et assurer la durabilité à long terme de l'utilisation de l'énergie solaire.



Figure (4.12) : Panneau solaire

### **Domaine d'application de la photopile :**

L'application principale d'une photopile est le développement de cellules solaire c'est à dire la production de l'énergie électrique à partir de l'énergie solaire. Elle présente une utilité dans le cas où il serait difficile d'acheminer l'électricité. C'est le cas en particulier des satellites.

Autre application concerne la protection des structures en métal contre la corrosion. Elle est applicable aux ponts, aux canalisations, aux bâtiments, aux réservoirs, aux puits et aux lignes ferroviaires. Une petite tension négative est appliquée à la structure

en métal et ceci l'empêche de s'oxyder ou de se rouiller. Des piles solaires photovoltaïques sont souvent employées dans des sites éloignés pour fournir cette tension.

Les cellules photovoltaïques fournissent une solution rentable aux problèmes des bornes pour télécommunication qui sont éloigné des zones d'agglomérations. Celles-ci se composent typiquement d'un récepteur, d'un émetteur et d'un système basé sur l'alimentation solaire. Des milliers de ces systèmes ont été installés autour du monde et ils ont une excellente réputation pour la fiabilité et les coûts relativement bas de leur entretien.

### **4.2.5. Photo coupleur**

Un optocoupleur est un composant électronique qui permet de connecter électriquement deux circuits sans qu'ils soient physiquement reliés. Il est composé de deux parties : une LED (diode électroluminescente) qui émet de la lumière lorsqu'elle est alimentée en courant, et un phototransistor ou une photodiode qui réagit à cette lumière en produisant un courant électrique. Figure (4.13).

Lorsque la LED est alimentée en courant, elle émet de la lumière qui traverse une barrière optique pour atteindre le phototransistor ou la photodiode. Cette dernière convertit alors la lumière en un courant électrique, qui peut être utilisé pour contrôler le fonctionnement d'un autre circuit.

Donc, le photo coupleur est un dispositif composé de deux éléments électriquement indépendants, mais optiquement couplés. Les deux éléments constitutifs de ces dispositifs sont à l'entrée un photoémetteur et à la sortie un photorécepteur (photodiode ou le plus souvent un phototransistor).

Le couplage en circuit intégré est optimisé par rapport à un couplage réalisé par l'utilisateur et évite les perturbations lumineuses extérieures.

Le but de l'utilisation de l'optocoupleur est de réaliser la protection des personnes, circuits et éviter les perturbations des circuits. Ce dispositif isole aussi les circuits jusqu'à quelques milliers de volts.

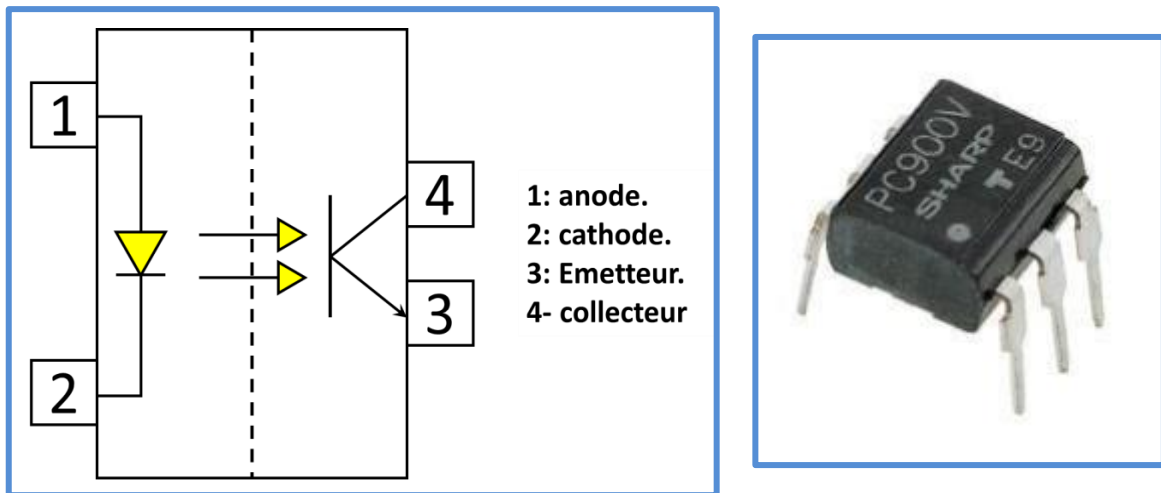


Figure (4.13) : Structure d'un Opto-coupleur - Exemple d'optocoupleur réel

### 4.2.6. Le photomultiplicateur

Un photomultiplicateur (PMT) est un dispositif électronique utilisé pour détecter et mesurer de faibles niveaux de lumière, en convertissant les photons en signaux électriques amplifiés.

#### a. Symbole et codification

Le PMT est constitué d'une photocathode, d'un système d'électrodes et d'un collecteur d'électrons. La photocathode est un matériau qui émet des électrons lorsqu'elle est exposée à la lumière. Les électrons émis sont ensuite accélérés vers une série d'électrodes appelées dynodes. Chaque dynode est maintenue à une tension légèrement supérieure à celle de la précédente, ce qui provoque une multiplication des électrons à chaque étape, produisant ainsi une avalanche d'électrons. Figure (4.14).

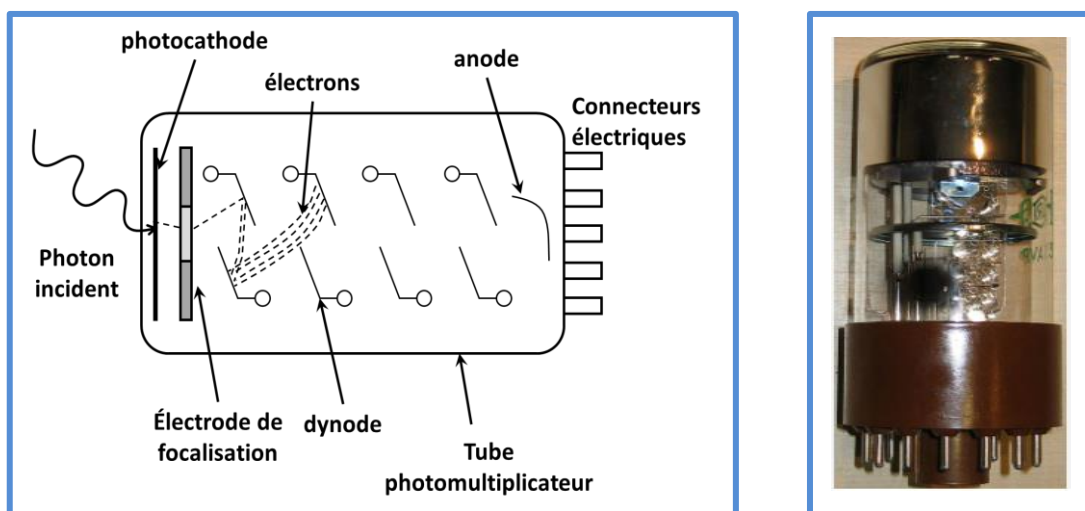


Figure (4.14) : Structure d'un photomultiplicateur à gauche, à droite un photomultiplicateur

### *b. Principe de fonctionnement*

Le principe de fonctionnement du PMT est basé sur l'effet photoélectrique et l'amplification par avalanche.

Lorsqu'un photon de lumière frappe la photocathode, il éjecte un électron, qui est ensuite accéléré à travers une série d'électrodes en aval appelées dynodes. À chaque étape, les électrons sont multipliés à travers un processus de décharge électrique jusqu'à ce qu'un grand nombre d'électrons soient collectés à l'écran final.

Le collecteur d'électrons récupère ensuite les électrons multipliés et les envoie vers un amplificateur de sortie pour produire un signal de sortie proportionnel à l'intensité de la lumière incidente. Le signal de sortie peut être enregistré et traité par un système d'acquisition de données pour fournir des informations sur la lumière détectée.

Le photomultiplicateur est capable de détecter des niveaux très faibles de lumière car le processus de multiplication des électrons amplifie le signal de manière exponentielle, permettant de mesurer des quantités de lumière extrêmement faibles. Les photomultiplicateurs sont couramment utilisés dans les domaines de la spectroscopie, la microscopie à fluorescence, de la détection de particules, de l'imagerie médicale et de la détection de rayonnement.

#### *4.2.7. Capteur d'image*

Un capteur d'image est un dispositif électronique qui convertit la lumière en signaux électriques, permettant de capturer une image. Le capteur d'image est composé de milliers ou de millions de photosites (pixels) qui mesurent l'intensité de la lumière qui les atteint. Les pixels sont disposés en grille sur la surface du capteur et chaque pixel enregistre la quantité de lumière qu'il reçoit. Les données de chaque pixel sont ensuite combinées pour créer l'image complète.

Il existe plusieurs types de capteurs d'image, notamment les capteurs **CCD** (dispositif à transfert de charge) et les capteurs **CMOS** (semi-conducteur complémentaire à oxyde de métal).

Les capteurs CCD (charge-coupled device) ou dispositif à transfert de charge, sont l'un des types de capteurs d'image les plus anciens et les plus éprouvés. Ils ont été inventés dans les années 1960 et ont été largement utilisés dans les appareils photo numériques jusqu'au début des années 2000. Aujourd'hui, les capteurs CMOS sont plus couramment utilisés, mais les capteurs CCD sont encore utilisés dans certaines applications spécifiques, telles que les caméras de surveillance de haute qualité.

## Chapitre 4 : Les détecteurs de lumière

**Structure de base** : Le bloc de base du CCD est une capacité M.O.S. montré dans la figure (4.15) polarisée avec une tension supérieure à la tension de seuil (régime de déplétion profonde). Quand cette cellule est excitée par la lumière il y a absorption et génération de photo porteurs. Si la génération se produit dans la région de charge d'espace, les électrons et les trous sont séparés par le champ électrique ; les charges positives descendent à l'électrode en bas tandis que les charges négatives sont piégées à l'interface  $\text{SiO}_2/\text{Si}$ . Si l'absorption se produit hors ZCE, les charges positives vont ou bien se recombiner ou bien contribuer au signal par diffusion.

Si on met une deuxième capacité MOS à côté de la première, on peut faire transiter les charges accumulées de l'une à l'autre. C'est le principe de transfert de charge.

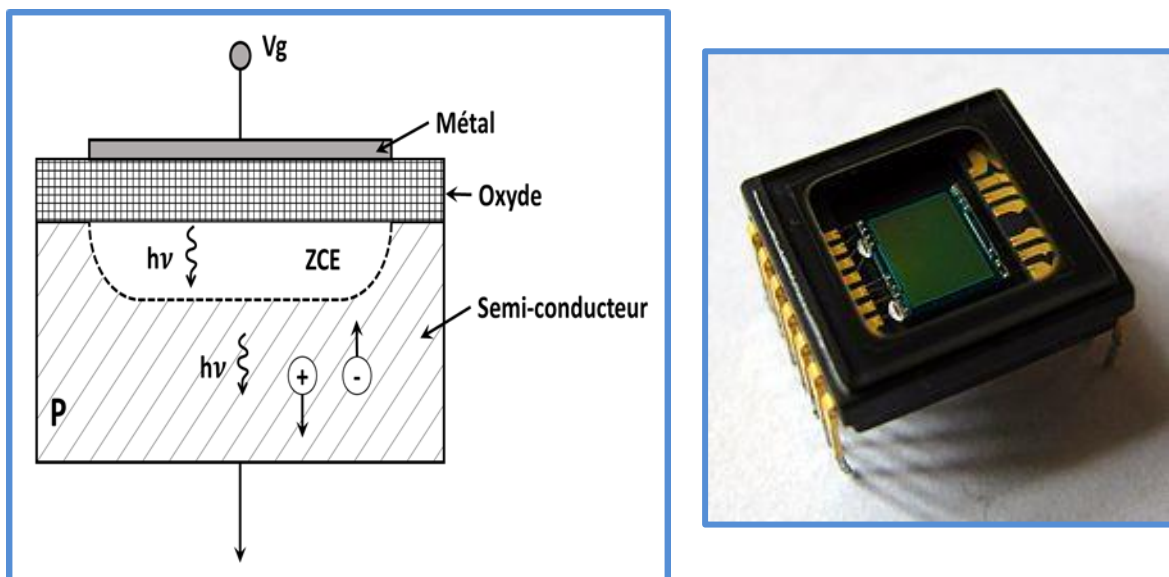


Figure (4.15) : Structure d'une cellule CCD à gauche, image réelle d'un capteur CCD à droite

En même temps que les électrons dus à la lumière s'établissent à l'interface, d'autres électrons dus au phénomène de génération thermique viennent s'y ajouter. On définit un temps de stockage le temps nécessaire pour l'établissement de la couche d'inversion, pour le Silicium ce temps est de l'ordre de la seconde. Ce temps est atteint si la charge accumulée est égale à la charge positive de l'électrode. Tant que le temps est très inférieur au temps de stockage, les charges dues aux générations thermiques sont négligeables de sorte les charges accumulées constituent sont proportionnel à la lumière reçue.

Le principe de fonctionnement d'un capteur CCD est assez simple. Les photons de lumière qui frappent la surface du capteur créent des charges électriques qui sont stockées

dans des condensateurs. Les charges sont ensuite déplacées d'un condensateur à l'autre à l'aide de signaux électriques appliqués aux électrodes du capteur. Les charges finissent par être acheminées vers un amplificateur et un convertisseur analogique-numérique pour être converties en données numériques.

Les capteurs CCD offrent généralement une meilleure qualité d'image et une sensibilité plus élevée dans les environnements à faible luminosité, mais ils consomment plus d'énergie et sont plus coûteux à fabriquer.

Le fonctionnement d'un capteur CMOS est similaire à celui d'un capteur CCD, mais les deux technologies diffèrent dans la manière dont les charges électriques sont stockées et déplacées. Les capteurs CMOS utilisent des transistors intégrés à chaque pixel pour amplifier et transmettre les signaux électriques. Cela rend les capteurs CMOS plus efficaces en termes d'énergie et moins coûteux à fabriquer que les capteurs CCD.

Les capteurs CMOS offrent également des avantages en termes de vitesse de lecture, de consommation d'énergie et de taille. Ils peuvent lire des images plus rapidement que les capteurs CCD, ce qui les rend utiles pour les applications qui nécessitent une capture d'image en temps réel, telles que la vidéo en direct ou la photographie sportive. Les capteurs CMOS sont également plus compacts et nécessitent moins de composants électroniques pour fonctionner, ce qui les rend plus faciles à intégrer dans des appareils électroniques de petite taille. Cependant, ils ont généralement une sensibilité plus faible dans les environnements à faible luminosité par rapport aux capteurs CCD.

### **Domaine d'application des CCD :**

On les trouve dans les appareils photo numériques, les caméras de vidéosurveillance, les scanners et autres dispositifs de capture d'image.

#### **4.2.8. Afficheur à cristaux liquides**

LCD (Liquid Crystal Display) est une technologie d'affichage qui utilise des cristaux liquides pour produire des images. Dans un écran LCD, un rétroéclairage situé à l'arrière de l'écran illumine des cristaux liquides qui sont organisés en pixels, permettant de créer une image.

Les cristaux liquides sont disposés entre deux couches de verre polarisant, et leur orientation est modifiée par un champ électrique, permettant de contrôler la quantité de lumière qui passe à travers chaque pixel. Cela permet de créer des images nettes et colorées sur l'écran.

## Chapitre 4 : Les détecteurs de lumière

Les afficheurs à cristaux liquides sont des modules compacts intelligents et nécessitent peu de composants externes pour un bon fonctionnement. Ils sont relativement bons marchés et s'utilisent avec beaucoup de facilité. Un exceptionnel microprocesseur "pilote" de la famille C-MOS diminue considérablement leur consommation (inférieur à 0.1 mW). Ils sont pratiquement les seuls à être utilisés sur les appareils à alimentation par piles. Plusieurs afficheurs sont disponibles sur le marché et ne diffèrent les uns des autres, non seulement par leurs dimensions, (de 1 à 4 lignes de 6 à 80 caractères), mais aussi par leurs caractéristiques techniques et leurs tension de service. Cette fonction fait appel à des LED montées derrière l'écran du module, cependant, cet éclairage est gourmand en intensité (250 mA max.).

En général un afficheur à cristaux liquides simple est composé de 4 couches : Figure (4.16).

- Le film polariseur de devant P1.
- La cellule à cristaux liquides CL.
- Le film polariseur de derrière P2.
- Le film réfléchissant (miroir) M.

Les deux plaques de verre sont recouvertes d'électrodes transparentes et conductrices, situées face à face : elles permettent d'imposer un champ électrique  $E$  vertical dans la couche de cristal liquide (figure 4.16)

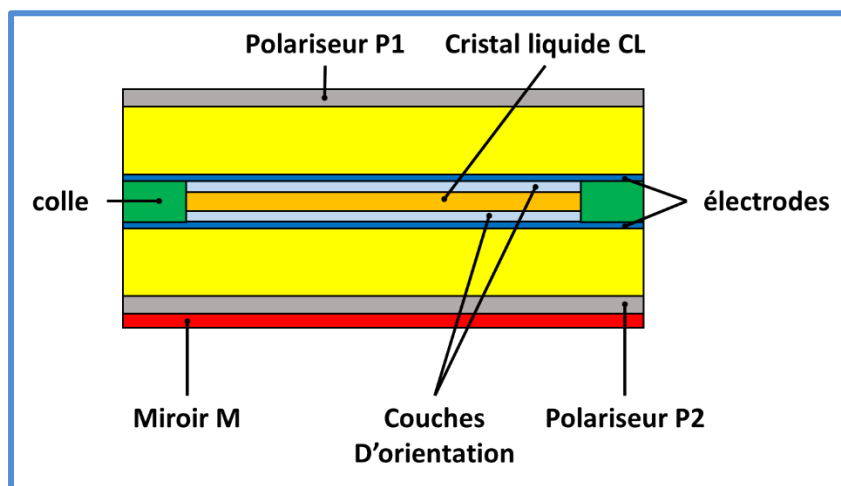


Figure (4.16) : Composition d'une cellule à cristaux liquide.

### *Domaine d'application des LCD dans la vie quotidienne :*

On les trouve largement utilisés dans les téléviseurs, les ordinateurs portables, les smartphones, les tablettes et d'autres appareils électroniques.

Ils ont l'avantage d'être moins chers à produire que les écrans OLED, mais offrent généralement une qualité d'image inférieure en termes de contraste et de couleurs.

### *Exercices d'applications chapitre 4*

- **Application n°1**

Une photodiode PIN possède un rendement quantique de **75%** lorsqu'elle fonctionne à **1.3 $\mu\text{m}$** . La puissance optique reçue est convertie en tension par une résistance de charge de **4k $\Omega$** .

- Calculer le photocourant détecté dans le cas où la puissance optique reçue est de **180nW**.

- **Application n°2**

Déterminer la longueur d'onde du signal optique reçu par un photodétecteur de sensibilité **S=0.293A/W**. Ce photodétecteur reçoit un flux lumineux de **5.10<sup>7</sup>** photons et le convertit en un photocourant crée par **1.4.10<sup>7</sup>** électrons.

- **Application n°3**

Un circuit de commande ne peut pas délivrer plus de 15mA pour faire briller la LED de l'optocoupleur. Sachant que le CTR de l'optocoupleur peut varier (d'un optocoupleur à l'autre) de **80%** à **160%**. Quel courant minimum peut-on garantir en sortie de l'optocoupleur ?

- **Application n°4**

Quel courant minimum dans la LED faut-il pour garantir au moins 2mA, sachant que le CTR de l'optocoupleur peut aller de 160 à 320%.

### *Solution des exercices d'application chapitre 4*

➤ *Solution application n°1 :*

On peut démontrer que l'expression de la sensibilité peut être mise sous cette formule :

$$S = 0.805 \cdot \eta_{in} \cdot \lambda (\mu\text{m})$$

Et par conséquent on trouve :

$$I_{ph} = 141.3 \text{ nA}$$

➤ *Solution application n°2 :*

$$\lambda = 1.3 \mu\text{m}$$

➤ *Solution application n°3*

Le pire cas lorsque le CTR est minimum, donc 80%.

$$\text{On a : } CTR = I_C / I_{LED}$$

Donc on trouve :  **$I_C = 12 \text{ mA}$** .

➤ *Solution application n°4 :*

$$CTR = I_C / I_{Led}$$

$$I_{led} = 1.25 \text{ mA}$$

*Questions à choix multiples (QCM)*

1. La photorésistance est basé sur le principe de la :
  - Photo ionisation.
  - Photomultiplication.
  - Photoconduction.
2. La structure d'une photodiode est une jonction polarisée :
  - En inverse
  - En direct
  - Tout optique
3. Le phototransistor possède une structure similaire au
  - Transistor bipolaire
  - Transistor à effet de champ
  - Thyristor
4. La photodiode est un transducteur
  - Electro-optique
  - Opto-électrique
  - Thermo-optique
5. La photodiode transforme :
  - Le signal électrique en signal lumineux
  - Le signal lumineux en signal électrique
  - Le signal lumineux en signal acoustique
6. L'optocoupleur est utilisé en :
  - Télécommunication
  - Mesure
  - Asservissement
7. L'utilisation d'une couche antireflet dans une photopile a pour but :
  - Augmenter l'absorption
  - Diminuer l'absorption
  - Augmenter le gain de la cellule.
8. Le courant d'obscurité est influencé par :
  - La température
  - Les dimensions de la photodiode
  - Le matériau semiconducteur
9. Le rendement quantique interne d'une photodiode est donné par :
  - $\eta_{in} = N_e / N_{ph}$
  - $\eta_{in} = N_{ph} / N_e$
  - $\eta_i = S / I_{ph}$
10. L'unité de mesure de la sensibilité est :
  - Ampère
  - Ampère/watt
  - Watt

### 5. Les fibres optiques

#### Introduction

La fibre optique possède de multiples applications dans différents domaines : comme l'industrie, la médecine, la défense, la télécommunication et l'automobile.....

Dans ce chapitre, nous allons présenter d'abord la structure de la fibre optique, sa constitution, ainsi que son fonctionnement. Ensuite nous présenterons les types de fibres optiques (multi modes et monomodes), ainsi que les limitations de la fibre (atténuation et dispersion), et enfin nous exposons la connectique et les pertes dans la fibre optique.

#### 5.1. La fibre optique

Une fibre optique est un long câble constitué d'un brin ou plusieurs centaines de brins de verre de haute pureté d'un diamètre de l'ordre de la taille d'un cheveu humain. Ces brins peuvent transporter des signaux optiques sur des centaines voire des milliers de kilomètres et sont protégés par une gaine. Le centre d'une fibre optique est le noyau à travers lequel la lumière se propage. La lumière est réfléchiée et dirigée par l'enveloppe optique entourant le cœur. Les couches isolantes, d'autre part, protègent la fibre de l'humidité, de la saleté et d'autres influences environnementales (produits chimiques, température, écrasement...)

Elle offre un débit d'information nettement supérieur à celui des câbles coaxiaux et supporte un réseau large bande par lequel peuvent transiter aussi bien la télévision, le téléphone et les données informatiques

##### 5.1.1. Structure de la fibre

La fibre optique est constituée d'un milieu diélectrique appelé '**cœur**', d'indice de réfraction **nc** recouvert d'un matériau appelé '**gaine**' d'indice de réfraction **ng**. La gaine elle-même recouverte d'une couche de matériau plastique appelé '**revêtement**' destiné à la protéger, contre les agressions chimiques et climatiques. Figure (5.1).

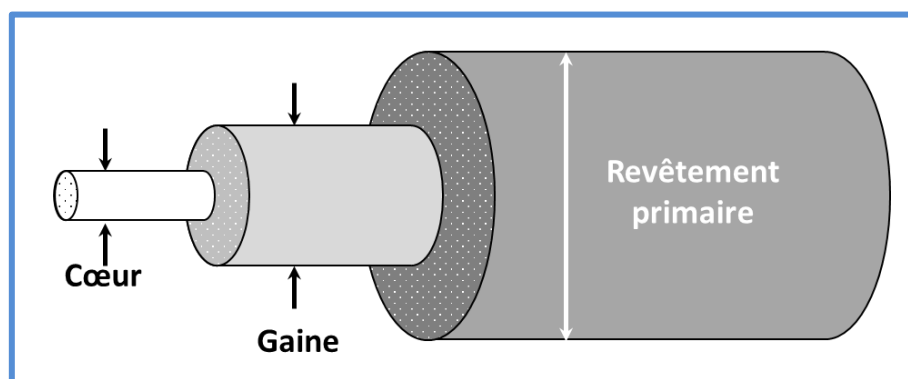


Figure (5.1) Structure d'une fibre optique

### 5.1.2. Paramètres caractéristiques de la fibre optique

La fibre optique est souvent décrite par deux paramètres qui sont : la différence d'indice normalisée et l'ouverture numérique

#### ❖ Différence d'indice normalisée

Elle définit la différence entre l'indice de réfraction du cœur et celui de la gaine, son expression est donnée par :

$$\Delta = \frac{n_c - n_g}{n_c} \quad (5.1)$$

$n_c$  : Indice de réfraction du cœur de la fibre

$n_g$  : Indice de réfraction de la gaine.

#### ❖ Ouverture numérique

L'ouverture numérique est un paramètre important pour coupler une grande quantité de lumière. Elle est donnée par l'expression :

$$ON = \sqrt{n_c^2 - n_g^2} \quad (5.2)$$

L'ouverture numérique pour les fibres télécoms est comprise entre 0.1 et 0.6.

## 5.2. Optique géométrique

L'optique géométrique est une branche de l'optique qui étudie le comportement de la lumière sur la base d'approximations géométriques.

Dans le domaine de l'optique géométrique, la lumière est considérée (représentée le plus souvent), comme un rayon lumineux se propageant en ligne droite dans un milieu homogène et transparent.

L'optique géométrique étudie principalement la réflexion, la réfraction, la formation d'images et les systèmes optiques tels que les lentilles et les miroirs. Elle utilise des lois et des principes géométriques pour prédire le comportement de la lumière dans ces situations, tel que la loi de Snell-Descartes.

### 5.2.1. Loi de Snell Descartes

Elle exprime le changement de direction d'un faisceau lumineux lors de la traversé d'une paroi, séparant deux milieux ; chaque milieu est caractérisé par sa capacité à ralentir la lumière.

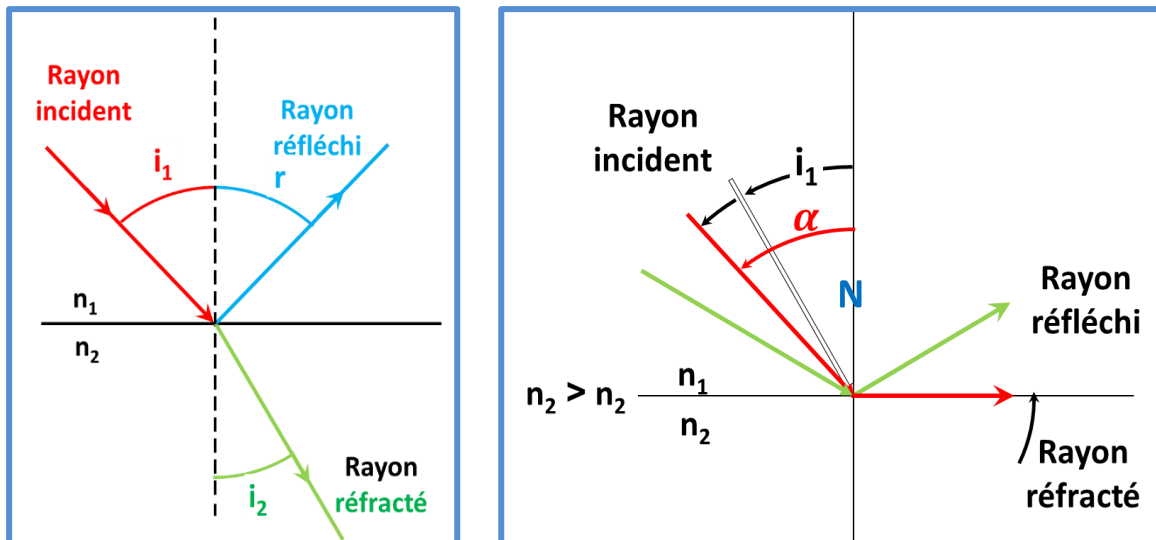


Figure (5.2) : Loi de Snell-Descartes : angle limite de réfraction et réflexion.

Le passage d'un milieu d'indice  $n_1$  à un milieu d'indice  $n_2$  ( $n_1 < n_2$ ), par un rayon lumineux ayant un angle d'incidence  $i_1$  est donné par :

$$n_1 \sin i_1 = n_2 \sin i_2 \quad (5.3)$$

Avec:

$i_1$  : Angle d'incidence, angle que fait le rayon avec la normale du plan ( N).

$i_2$  : Angle de réfraction,

$n$  : Indice de réfraction d'un milieu transparent.

Il existe un angle limite entre la réflexion et la réfraction, comme s'est schématisée dans la figure (5.2).

En utilisant l'expression (5.3), on peut déduire la valeur de l'angle critique lorsque ( $i_1 = \alpha$ ) tel que :

$$\alpha = \sin^{-1}\left(\frac{n_1}{n_2}\right)$$

$\alpha$  : angle limite de réfraction.

### 5.2.2. Fonctionnement de la fibre optique

La transmission de données via la fibre optique se fait à l'aide d'ondes lumineuses, tandis que la propagation de la lumière dans la fibre optique est basée sur le principe de la réfraction totale. Lorsque la lumière rencontre la surface de séparation entre le cœur et le revêtement, elle est réfléchi vers l'intérieur du cœur plutôt que de se propager à l'extérieur. Cela permet à la lumière de rester confinée à l'intérieur de la fibre.

Soit la figure (5.3), elle montre la cône d'acceptance de la lumière que l'on peut injecter à l'intérieur de la fibre en respectant que :

- L'indice de réfraction du guide doit être légèrement supérieur à celui de la gaine
- Tous les rayons qui pénètrent dans la fibre optique sous un angle d'incidence inférieur à l'angle  $\theta$  peuvent se propager dans cette fibre par suite de multiples réflexions.

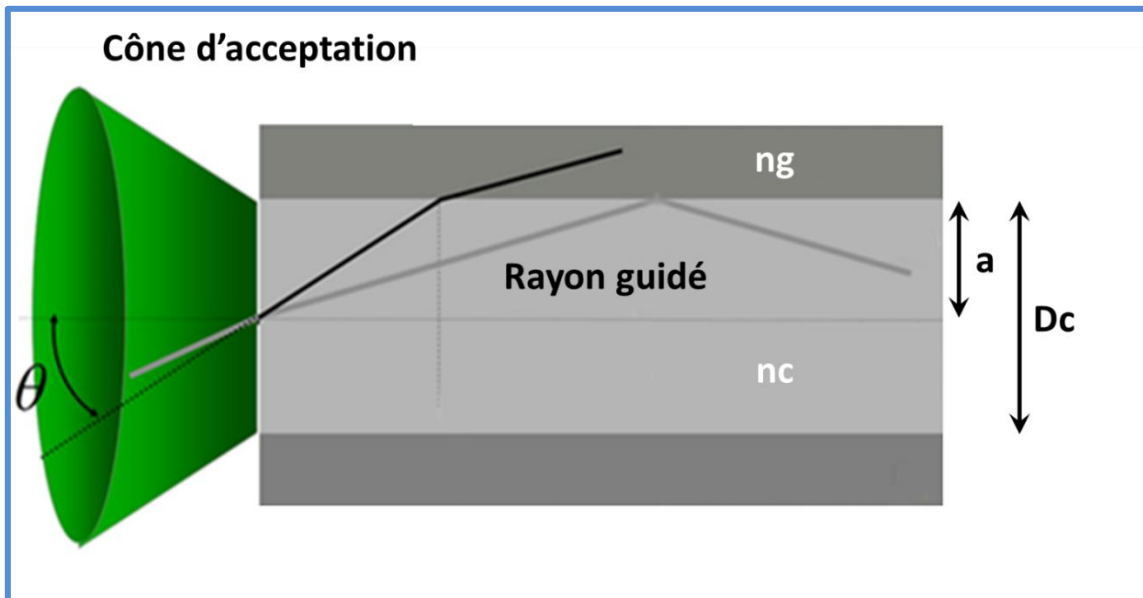


Figure (5.3) : Guidage de la lumière dans le cœur de la fibre optique

L'angle limite permettant d'accepter la lumière dans la région du cœur est donné par :

$$2\theta_{\max} = 2\arcsin ON.$$

### 5.3. Types de fibre optique

On distingue deux types de fibre optique : les fibres monomodes et les fibres multi modes.

#### 5.3.1.1. Fibres optiques monomodes SMF (Single Mode Fiber)

Ce sont des fibres optiques dont le cœur possède un diamètre très étroit. Un seul mode peut se propager sur l'axe central, le diamètre du cœur varie de **8 à 10 $\mu\text{m}$** , figure (5.4).

Dans ces conditions l'approximation de l'optique géométrique n'est plus valable et les calculs doivent recourir à l'électromagnétisme (approche ondulatoire).

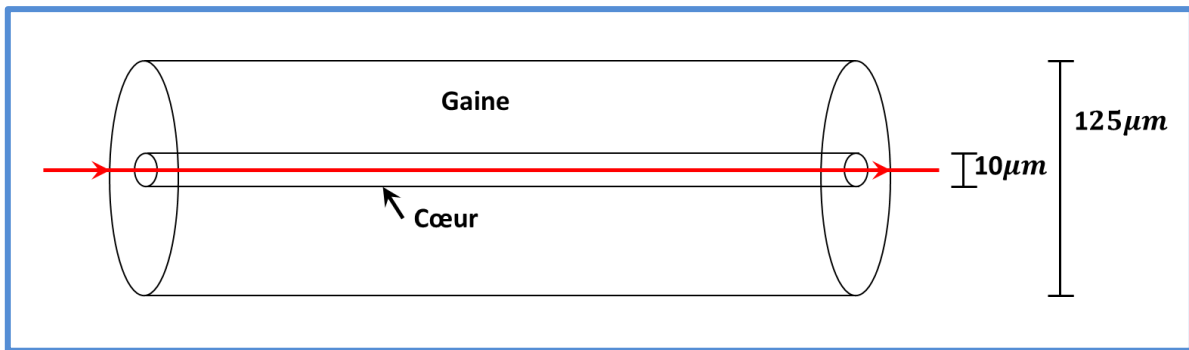


Figure (5.4) : Structure d'une fibre optique monomode

Pour que la fibre soit monomode, il faut satisfaire la condition donnée par cette expression :

$$\frac{\pi \cdot D_c \cdot ON}{\lambda} < 2.405 \quad (5.4)$$

Avec :

$D_c$  : rayon du cœur de la FO

$ON$  : ouverture numérique

$\lambda$  : longueur d'onde d'émission

Cette condition montre que la fibre optique n'est monomode qu'au-delà de la longueur d'onde correspondante  $\lambda_c$ .

La fibre monomode est plutôt utilisée pour des utilisations longue distance, elle supporte un seul mode de propagation.

### 5.3.1.2. *Fibres optiques multi modes (MMF : Multi Mode Fiber)*

Une fibre optique est un guide d'onde diélectrique circulaire qui sera très probablement multi modes si le cœur a un diamètre grand devant la longueur d'onde. Ce diamètre est de l'ordre de **50-125 μm** pour les fibres de silice et de **0.5 à 1mm** pour les fibres en plastique.

Les fibres multi modes permettent la propagation de plusieurs modes. Le nombre de modes qui se propagent est limité et calculé par les équations de Maxwell par :

$$N_{modes} \# 0.5 \left( \frac{\pi \cdot D_c \cdot ON}{\lambda} \right)^2 \quad (5.5)$$

Où :

$D_c$  : Diamètre du cœur ;

$ON$  : L'ouverture numérique ;

$\lambda$  : Longueur d'onde

- Pour les fibres optiques multi modes, on distingue deux autres catégories selon le profil d'indice : la fibre à saut d'indice et la fibre à gradient d'indice.

### a) Les fibres optiques multi modes à saut d'indice (Step index)

L'indice de réfraction varie brusquement entre le cœur et la gaine, sa valeur est constante dans le cœur de la fibre, figure (5.5)

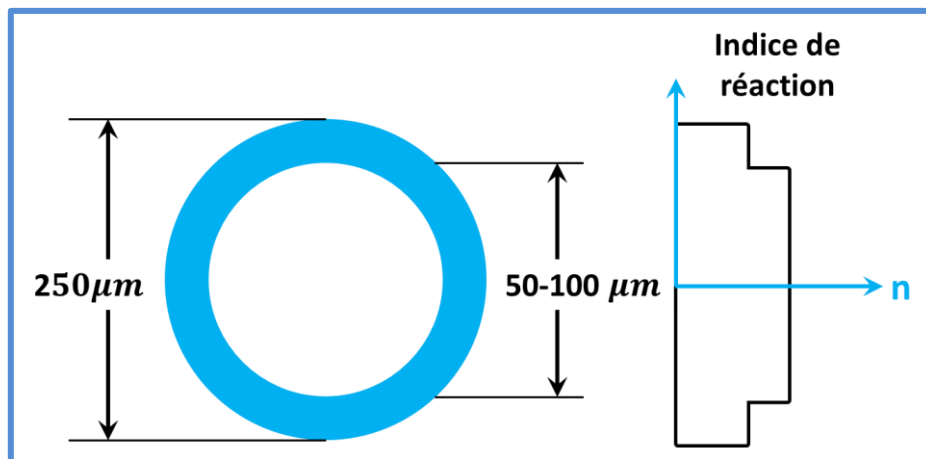


Figure (5.5) : Profil d'indice dans une fibre optique à saut d'indice.

La propagation de la lumière dans le cœur de cette fibre est schématisée en figure (5.6).

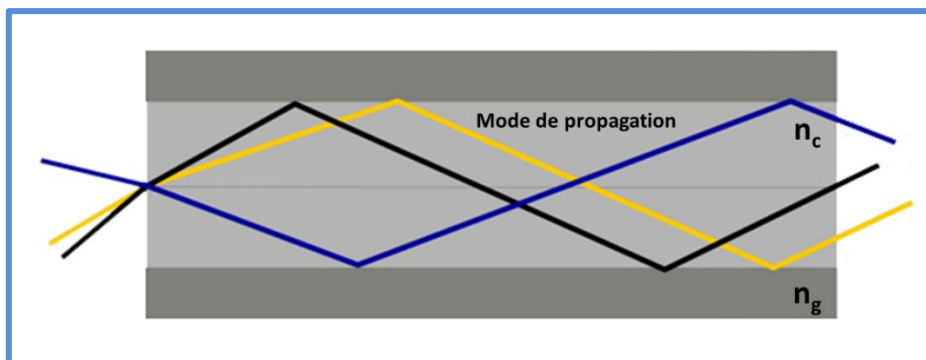


Figure (5.6) : Modes de propagation dans une fibre optique multimode à saut d'indice

### b) Fibres optiques multi modes à gradient d'indice (Graded index)

L'indice du cœur diminue suivant une loi d'allure parabolique depuis l'axe jusqu'à l'interface cœur-guide.

## Chapitre 5 : Les fibres optiques

Les rayons suivent donc une trajectoire d'allure sinusoïdale, et ceux ayant le trajet le plus long passent par des milieux d'indice plus faible, ce qui augmente leur vitesse et permet d'égaliser approximativement les temps de propagations, figure (5.7).

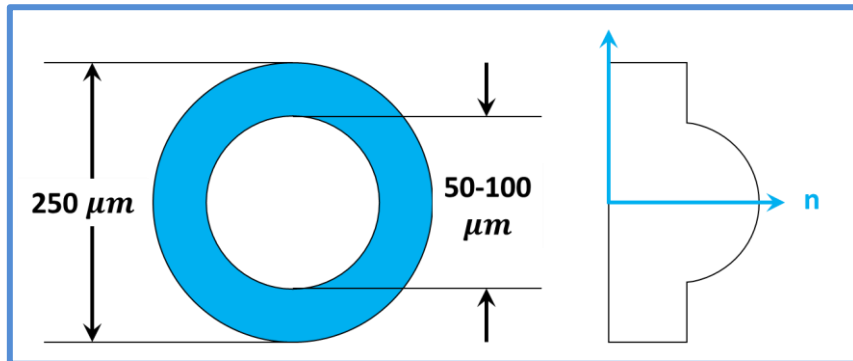


Figure (5.7) : Structure d'une fibre optique à gradient d'indice

La propagation de la lumière dans cette fibre est illustrée en figure (5.8).

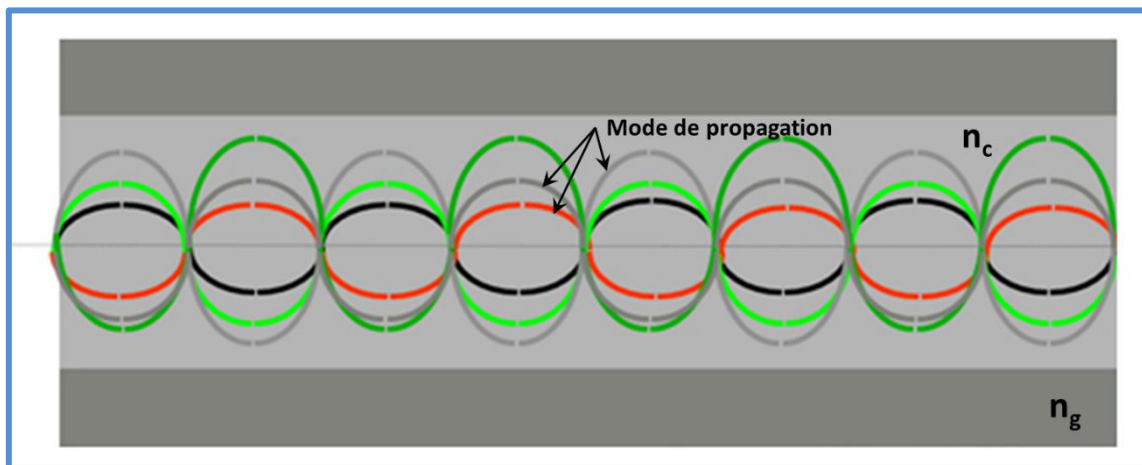


Figure (5.8) : propagation de la lumière dans une fibre à gradient d'indice.

### 5.4. Limitations de la fibre optique

Lors de la propagation d'un signal dans une fibre optique, il se trouve atténué et dispersé. Dans l'atténuation, l'intensité lumineuse décroît au cours de la propagation de l'onde dans la fibre, et la dispersion se manifeste comme un étalement de l'impulsion (élargissement). Figure (5.9)

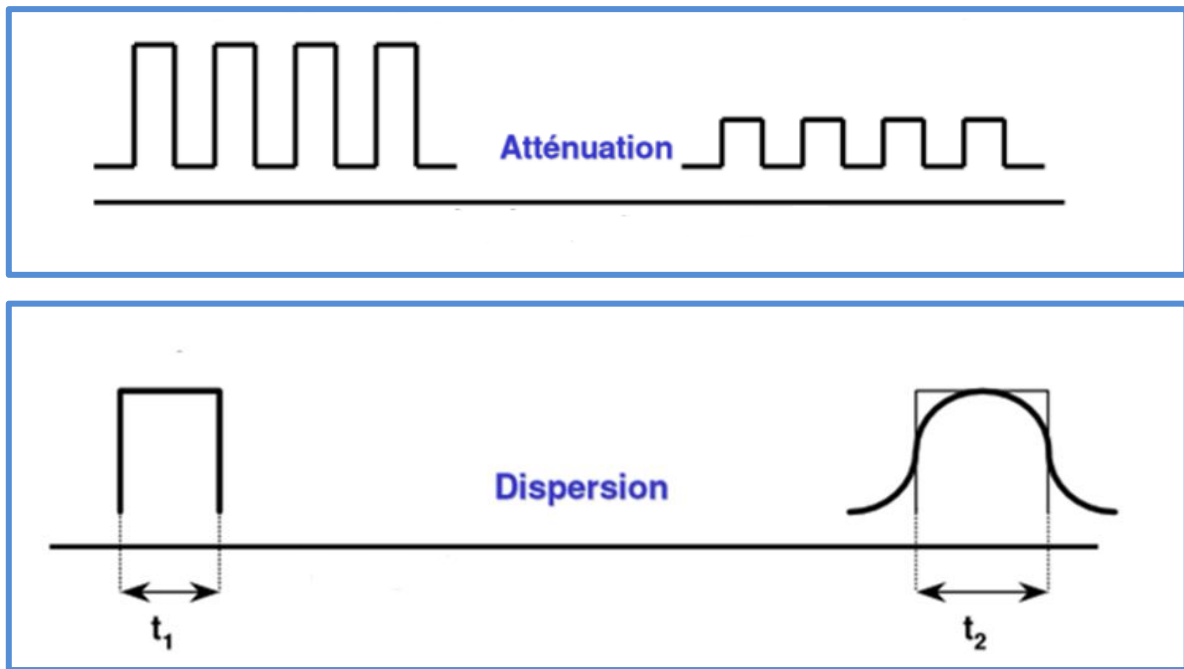


Figure (5.9) : Phénomènes d'atténuation et de dispersion dans une fibre optique.

#### 5.4.1. Atténuation

L'affaiblissement du signal appelé souvent atténuation linéique, est la diminution de la puissance optique, lors de la transmission sur le support optique. Il caractérise la longueur maximum qu'un signal peut parcourir dans la fibre sans avoir obligation d'être régénéré.

L'atténuation est s'exprimée par :

$$P_s = P_i e^{-\alpha L}, \text{ avec :}$$

L : longueur de la fibre, [Km]

P<sub>i</sub> : la puissance incidente (puissance qui a été couplée à l'entrée), [mWatt]

P<sub>s</sub> : puissance en sortie de la fibre [mWatt]

$\alpha$  : coefficient d'absorption [ $m^{-1}$ ]

L'atténuation est chiffrée en (dB) tel que  $10 \log P_s/P_i$  (dB)

$$10 \log P_s/P_i = 10 \log e^{-\alpha L} = -10\alpha L \log e = \text{Att}, \text{ donc}$$

$$\text{Att} = -4.34\alpha L \tag{5.6}$$

L'atténuation regroupe deux types essentiels de pertes : pertes dites intrinsèques et les pertes dites extrinsèques.

##### A- Les pertes intrinsèques

Ce type de pertes regroupe l'absorption et la diffusion.

### ❖ *L'Absorption*

C'est la principale cause de perte dans la fibre optique. Lorsque la lumière interagit avec des composants en verre, des électrons ou des ions métalliques, l'énergie lumineuse est absorbée et convertie en d'autres formes d'énergie, telle que la chaleur, en raison des résonances moléculaires et des impuretés de longueur d'onde. Elle est dû à :

- Absorption infrarouge ( $>2\mu\text{m}$ ).
- Absorption UV ( $<0.4\mu\text{m}$ ), négligeable pour  $\lambda > 400\text{nm}$ .
- Absorption par les impuretés restant dans la silice.
- Absorption des ions OH dans la vapeur d'eau.

### ❖ *La Diffusion*

La diffusion est la variation locale de l'indice de réfraction du cœur de la fibre et des changements de densité ou de composition dans la matière.

### *B- Les pertes extrinsèques*

Ce type de pertes regroupe les pertes macro-courbures et les pertes d'insertions causées par le raccordement, ainsi que les pertes de Fresnel.

### ❖ *Macro-courbures*

Les grandes courbures (Macro-courbures) sont liées aux contraintes qui peuvent survenir lors d'une mauvaise installation (en particulier dans les boîtes de jonctions). Ce sont des coudes de fibre optique avec un rayon de courbure typiquement compris entre 2 et 25 mm. L'effet d'une courbure locale est négligeable lorsque le rayon de courbure  $R$  est grand devant un rayon de courbure critique  $R_c$  donné.

Lors d'une courbure dans un câble de fibre optique, la condition de propagation change, ce qui cause une perte d'insertion. Figure (5.10).

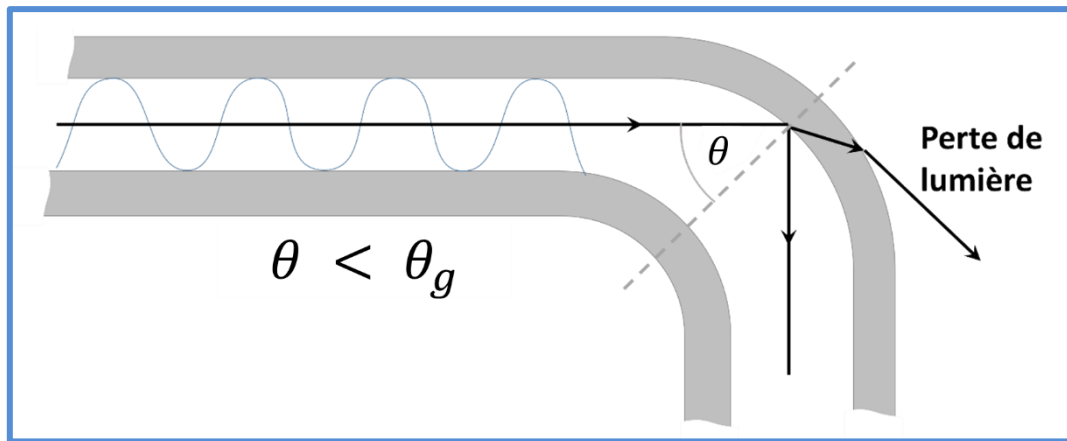


Figure (5.10) : Illustration d'une courbure dans une fibre optique.

### ❖ *Raccordement*

C'est l'une des plus grandes sources de perte dans la fibre. La connexion entre deux fibres, que ce soit par une épissure ou un connecteur, doit être faite avec beaucoup de soin, et de précision pour minimiser les pertes. Les pertes aux raccordements sont de trois types :

L'alignement des fibres n'est jamais parfait, il existe donc une perte de lumière, lors du passage de celle-ci d'un côté à l'autre. Dans les épissures, ce défaut peut être décomposé en trois défauts :

- L'espace entre les fibres  $l$ ,



- L'excentrement entre fibres optiques  $d$ ,



- Le désalignement angulaire d'angle  $\theta$ .



### ❖ *Pertes de Fresnel*

Ces pertes sont dues au passage de la lumière du verre à l'air et vice versa.

Les pertes de Fresnel sont donnés par :

$$A_F = -20 \log R_F \quad (5.7)$$

Avec:

$$R_F = nc - 1/nc + 1$$

$nc$ : Indice de réfraction de la fibre en silice,      1: indice de réfraction de l'air.

Pour diminuer les pertes de Fresnel, les fibres optiques doivent être maintenues en contact ou bien, il faut interposer entre les fibres un produit adaptateur d'indice, souvent à base de Silicone ou sous forme de Gel de façon à faire varier l'indice d'une manière continue au contact.

### 5.4.2. *La dispersion*

Lorsqu'une impulsion se propage dans une fibre optique, elle subit un phénomène de dispersion qui se traduit par un étalement temporel de celle-ci.

Chaque longueur d'onde se déplace à une vitesse différente dans la fibre optique, d'où l'apparition de la dispersion.

Plusieurs types de dispersion existent, contribuant tous à l'étalement de l'impulsion au cours de sa propagation dans le guide optique, qui sont :

#### *a) Dispersion modale*

Lorsqu'une impulsion est envoyée dans la fibre optique, elle se décompose selon les différents modes, certaines composantes arrivent avant d'autres ce qui provoque un étalement de l'impulsion.

Les différents temps de propagation entraînent un étalement des impulsions émises dans la fibre optique. Cette dispersion intermodale crée un élargissement d'impulsion noté  $\Delta\tau_{im}$ .

Elle est exprimée par :

$$\Delta\tau_{im} = \frac{L.(ON)^2}{2.C.n_c} \quad (5.8)$$

Où :

$ON$ : Ouverture numérique

$nc$ : Indice de réfraction du cœur

$C$ : vitesse de la lumière dans le vide [m/s].

$L$ : Longueur de la fibre [km]

### b) Dispersion chromatique

La dispersion chromatique provient du fait que les sources optiques ne sont pas rigoureusement monochromatiques, elle apparaît dans les fibres à base de silice (milieu dispersif). La dispersion présente un indice de réfraction qui est fonction de la longueur d'onde.

La dispersion chromatique est donnée par :

$$\Delta\tau_{ch} = Dch.\Delta\lambda.L \quad (5.9)$$

Avec :

$Dch$  : coefficient de dispersion chromatique ; [ $\text{Ps.nm}^{-1}.\text{Km}^{-1}$ ]

$\Delta\lambda$  : largeur spectrale de la source ; [nm]

$L$  : longueur de la fibre optique ; [Km]

### 5.5. Fenêtres de transmission

Compte tenu de l'atténuation et la dispersion des fibres optiques, mais aussi des caractéristiques des composants optoélectroniques disponibles, on définit des fenêtres de transmission « bandes de longueurs d'ondes » de propriétés spécifiques.

Sur les fibres en Silice, on distingue traditionnellement 3 fenêtres selon l'ordre des longueurs d'ondes. Figure (5.11).

En supposant ces profils d'atténuation, on remarque trois fenêtres spectrales où l'atténuation est assez faible.

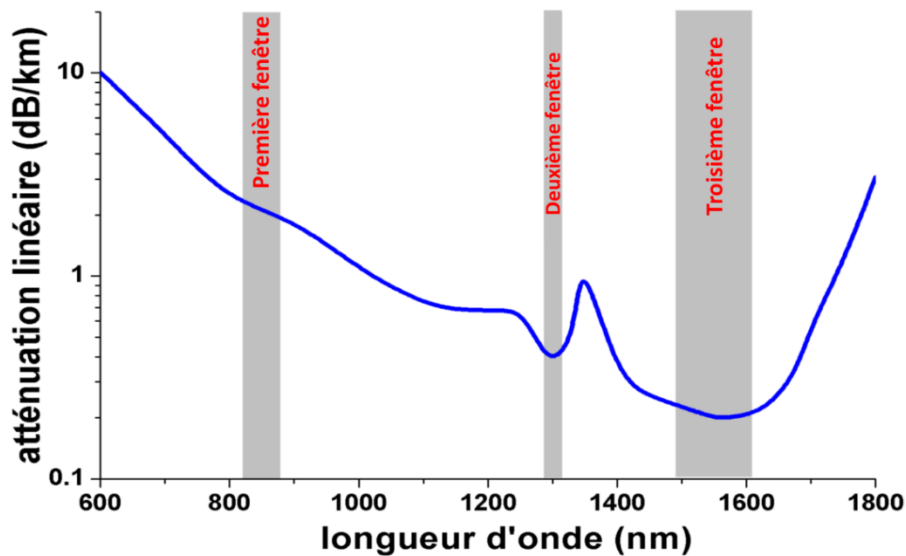


Figure (5.11) : fenêtres de transmission pour la fibre en Silice

**La 1<sup>ère</sup> Fenêtre :** de **0.8 à 0.9 $\mu\text{m}$** , n'est pas un minimum d'atténuation, ni de dispersion, mais un optimum d'utilisation des matériaux les plus économiques (Silicium pour les détecteurs, GaAs pour les émetteurs) ; cette fenêtre permet des liaisons peu coûteuse à courtes distances ou en réseaux locaux, sur des fibres multi modes à des débits de Gbits.

**La 2<sup>ème</sup> Fenêtre :** autour de **1.3 $\mu\text{m}$** , est un minimum relatif d'atténuation (vers 0.5dB/Km) et le minimum de dispersion chromatique ; les composants sont plus coûteux qu'à 0.85 $\mu\text{m}$ , mais elle est couramment utilisée en transmission à moyenne distance (qq10 de Km) sur fibres monomodes, ainsi qu'à haut débit en réseau local.

**La 3<sup>ème</sup> Fenêtre :** autour de **1.55 $\mu\text{m}$** , correspond au minimum absolu d'atténuation (moins de 0.2dB/Km), mais elle demande des composant plus coûteux, à cause du problème de dispersion chromatique, elle est d'utilisation plus récente, elle est surtout utilisée en liaisons à très longues distance sur des fibres monomodes (terrestres ou sous-marines), avec des portées dépassant les 100km et des débits de plusieurs Gbits/s.

### Bilan de liaison et pertes

Il s'agit d'analyser l'évolution de la puissance optique qui transite tout au long de la chaîne de transmission.

Lorsque la liaison entre l'émetteur et le récepteur est longue, on doit raccorder des fibres. Le raccordement de fibres optiques peut se faire par épissure ou par des soudeuses automatiques, le raccordement provoque toujours des pertes d'insertion.

La figure (5.12), illustre toute sorte de pertes dans une chaîne de transmission par fibre optique.

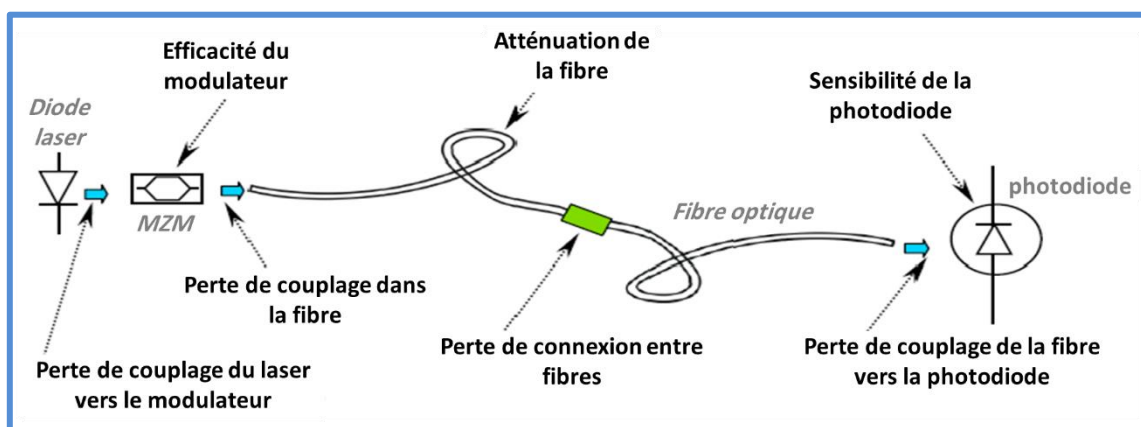


Figure (5.12) : Sources de pertes dans une chaîne de transmission par fibre optiques

## Chapitre 5 : Les fibres optiques

---

L'Affaiblissement total de la liaison peut être exprimé théoriquement par la relation suivante:

$$A \text{ (dB)} = \alpha_{CE} + (\alpha_j + \alpha_L) + \alpha_{CR} + M \quad (5.10)$$

$\alpha_{CE}$  : pertes de couplage entre la diode laser et la fibre optique.

$\alpha_L$  : atténuation linéaire du câble optique.

$\alpha_j$  : pertes d'épissure ou raccordement : pertes de jonction mobile ou fixe.

$\alpha_{CR}$  : pertes de couplage entre la fibre et la photodiode.

M : marge de sécurité (cordons, courbures du câble, atténuation non visible), elle est considérée autour de 3 à 5 dB.

Le bilan de liaison permet d'estimer la portée maximale de liaison.

C'est la différence entre la puissance émise  $P_e$  en dBm et la puissance requise  $P_r$  qui correspond à la puissance minimale nécessaire pour assurer la liaison (puissance seuil du détecteur).

La puissance minimale que doit détecter le récepteur de la liaison optique est donnée par la relation suivante :

$$P_{rmin} = P_e - A.L \quad (5.11)$$

Avec :

$P_{rmin}$  : La puissance minimale reçue par le détecteur

$P_e$  : Puissance émise dans la fibre

A : affaiblissement total dans la liaison

L : Longueur de liaison (portée maximale).

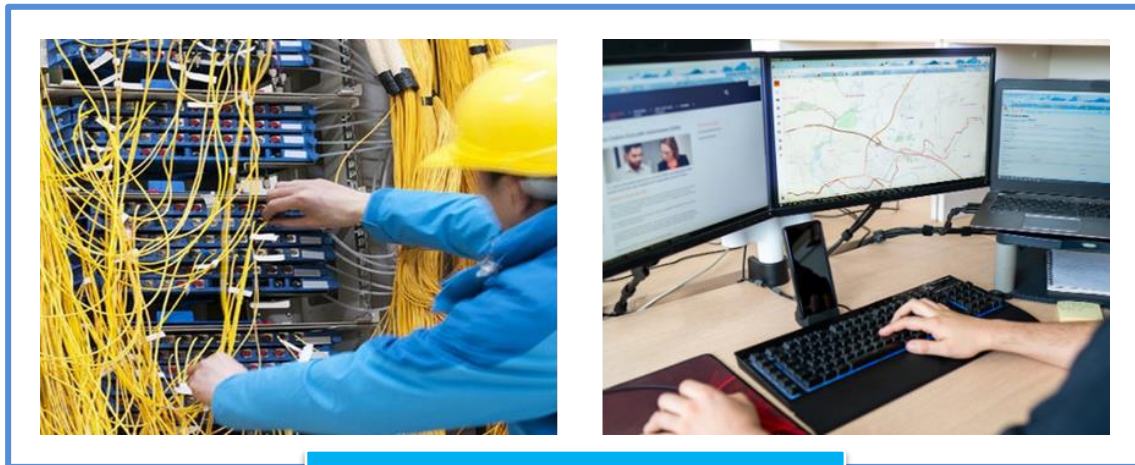
### 5.6. Domaines d'applications de la fibre optique

#### 5.6.1. Les télécommunications

Dans les télécommunications, les fibres optiques sont utilisées pour transmettre des informations telles que des appels, des images et des données. C'est peut-être l'un des domaines les plus importants et les plus prometteurs de l'utilisation de la fibre optique. Le cuivre ne peut supporter qu'un petit nombre de communications contre 300 000 communications pour la fibre. Cette fibre est notamment utilisée pour les réseaux haut débit. Sa capacité de transmission atteint des débits de l'ordre du gigabit par seconde (câble transatlantique) avec peu d'atténuation et, grâce au multiplexage, des centaines de gigabits par seconde.

## Chapitre 5 : Les fibres optiques

Comme des applications en télécommunications, on peut citer : l'internet à haut débit, réseaux téléphoniques, les réseaux de télévision par câble, et les câbles sous-marins qui relient les continents.



**Réseaux de télécommunications**

### 5.6.2. La médecine

La première application majeure de la fibre optique était en médecine et est encore largement utilisée aujourd'hui. Les fibres optiques sont utilisées en médecine à la fois pour diagnostiquer des problèmes de santé et pour traiter certaines maladies. Les câbles à fibres optiques envoient de la lumière dans le corps à des fins de diagnostic. Cette lumière est réfléchiée par les organes internes, captée par un autre câble à fibre optique et transmise au système d'imagerie vidéo. Cela permet d'obtenir une image de haute qualité de ce qui se passe à l'intérieur du corps en temps réel. Un exemple de cette utilisation serait les endoscopes, en particulier ceux utilisés en gastro-entérologie. Le traitement utilise des fibres optiques pour envoyer la lumière intense du laser dans le corps, où elle interagit avec les tissus par des effets thermiques. En chirurgie, il est utilisé conjointement avec un faisceau laser pour permettre : Écraser des calculs rénaux, découper des tumeurs, réparer des rétines...

Comme exemple en médecine, on cite : l'endoscopie, la biopsie, l'imagerie médicale et la thérapie au Laser.



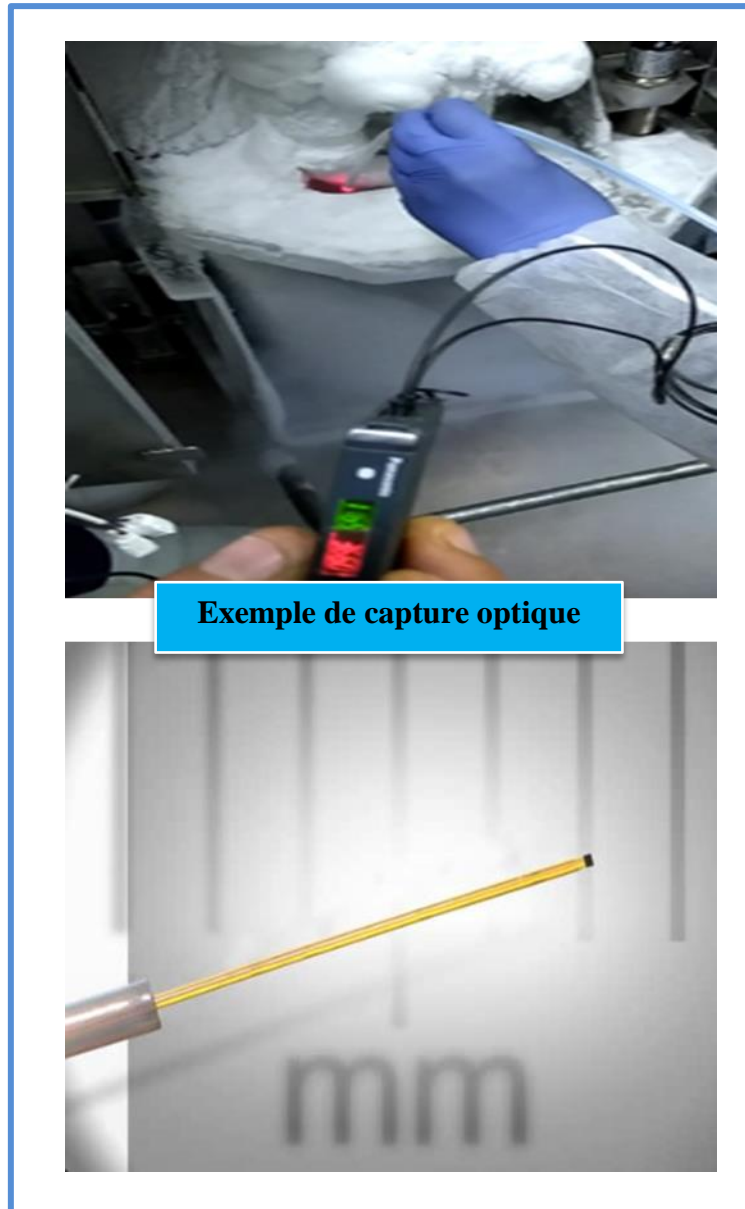
**Endoscopie par fibre**

### ***5.6.3. Les capteurs***

L'une des applications récentes de la fibre optique est la métrologie (la mesure). Les fibres optiques, comme les autres objets, sont affectées par divers paramètres. La fibre optique peut se déformer facilement lorsqu'elle est soumise à des changements de pression, de force, de tension ou de température. La déformation d'une fibre optique affecte la façon dont la lumière se propage à travers elle. Il est possible de mesurer ces changements et de convertir les mesures en unités de pression, de température ou de force, selon ce qui est mesuré. Ces capteurs ont l'avantage d'être très petits, très précis et insensibles aux perturbations électromagnétiques.

La fibre optique est utilisée en système embarqué : comme les drones et les capteurs autonomes.

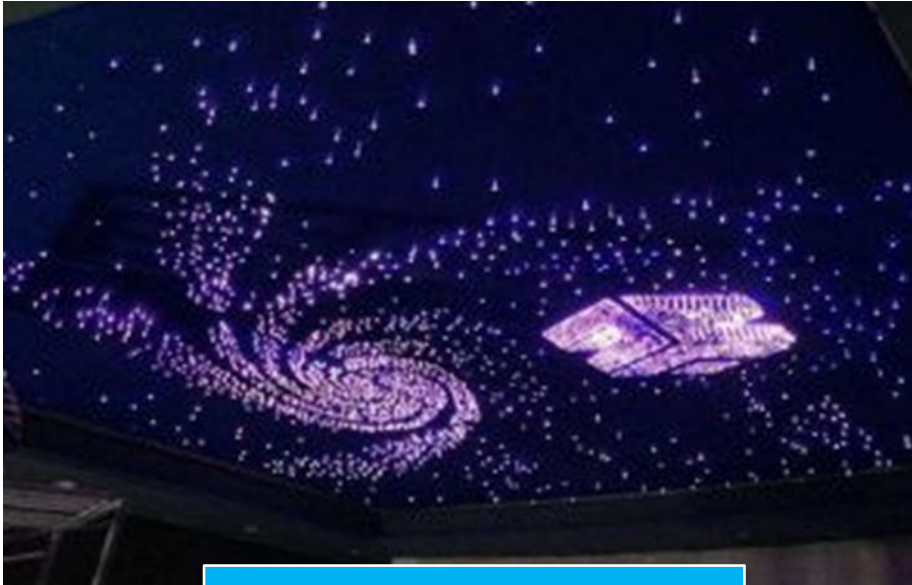
La fibre optique peut être utilisée comme un capteur chimique pour mesurer des paramètres tels que la concentration de gaz et le PH. Cette application est utilisée en sécurité alimentaire par exemple.



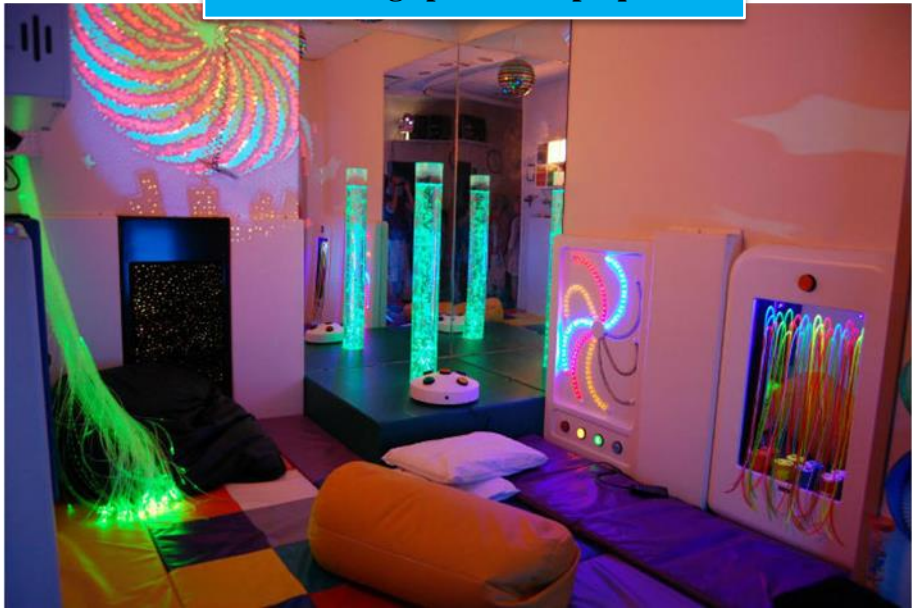
### *5.6.4. L'éclairage*

Dans le domaine de l'éclairage, la fibre optique est également largement utilisée dans la conception des musées, de l'architecture, des espaces de loisirs publics et domestiques. Enfin, la fibre optique est souvent utilisée pour l'éclairage, la décoration, la signalisation directionnelle ou encore la signalisation routière.

La fibre est utilisée dans l'éclairage des passages souterrains et des tunnels et les voies de métro. La fibre optique permet de transporter la lumière depuis une source lumineuse à distance, assurant ainsi un éclairage uniforme et sécuritaire dans des zones en obscurité.



Eclairage par fibre optique



### *Exercices d'application chapitre 5*

#### Application n°1

Calculer l'indice de réfraction du cœur et de la gaine d'une fibre optique ayant les paramètres suivants :  $ON=0.17$  et  $\Delta=0.666\%$ .

#### Application n°2

On considère une fibre optique à saut d'indice constituée d'un cœur de silice d'indice  $n_c=1.5$  et l'écart relatif est de  $10^{-2}$ . La longueur d'onde du travail est  $\lambda=0.85\mu\text{m}$ .

- 1 - Calculer l'indice de la gaine.
- 2 - Calculer l'ouverture numérique
- 3 - Calculer le diamètre du cœur pour que la fibre soit monomode.

#### Application n°3

Le nombre de modes qui se propagent dans une fibre optique à saut d'indice est de **260**, lorsqu'elle est éclairée par une LED dont le spectre a une largeur spectrale  $\Delta\lambda = 20\text{nm}$  et une longueur d'onde au sommet  $\lambda=0.83\mu\text{m}$ .

- 1- Sachant que l'indice de réfraction du matériau de cœur est de **1.458** et que l'ouverture numérique est estimée à **0.3**, calculer :
  - a) Le diamètre du cœur
  - b) L'indice du matériau de la gaine
- 2- Pour un coefficient de dispersion de l'indice du cœur  $D_{ch}= 18\text{ps/km.nm}$ , calculer la valeur de la dispersion dans cette fibre.

#### Application n°4

Quel est le nombre de modes qui se propagent dans une fibre multimode à saut d'indice caractérisée par :  $n_c= 1.47$ ,  $a= 25\mu\text{m}$ ,  $\lambda=1.3\mu\text{m}$  et  $\Delta=1\%$ .

### *Solution des exercices d'application chapitre5*

➤ **Solution application n°1 :**

$$n_c = 1.473 \quad \text{et} \quad n_g = 1.465$$

➤ **Solution application n°2 :**

1-  $n_g = 1.485$

2-  $ON = 0.21$

3-  $D_c \leq 3.1 \mu\text{m}$

➤ **Solution application n°3 :**

1-

a)  $D_c = 20.08 \mu\text{m}$

b)  $n_g = 1.426$

2-  $\Delta\tau_{ch} = 360 \text{ps/km}$

➤ **Solution application n°4 :**

En utilisant l'expression (5.5), sachant que  $D_c = 2a$  (  $a$  : rayon du cœur de la fibre)

Le nombre de modes est : 316 modes.

*Questions à choix multiples (QCM)*

1. **La dispersion se manifeste comme étant :**
  - Un élargissement
  - Une vibration temporelle
  - Une atténuation
2. **La condition de propagation dans une fibre optique est :**
  - $n_c < n_g$
  - $n_c > n_g$
  - $n_c = n_g$
  - $n_c \geq n_g$
3. **Le matériau constitutif des fibres télécoms est :**
  - La Silice
  - Le plastique
  - Le Silicium
  - Le cuivre
4. **La deuxième fenêtre des fibres télécoms est :**
  - $1.55\mu\text{m}$
  - $0.85\mu\text{m}$
  - $1.3\mu\text{m}$
  - $1.6\mu\text{m}$
5. **Dans la fibre multimode à saut d'indice, l'indice est :**
  - Variable
  - Constant
  - Suit une allure exponentielle
  - Degradé
6. **L'ouverture numérique et l'angle d'acceptance maximum pour une fibre ayant  $n_c=1.48$  et  $n_g= 1.46$  sont :**
  - 0.3 et  $26^\circ$
  - 0.2 et  $14^\circ$
  - 0.24 et  $28^\circ$
  - 0.24 et  $27^\circ$
7. **La fibre optique permet la propagation d'un signal :**
  - Lumineux
  - Electrique
  - Acoustique
  - Magnétique
8. **L'angle d'incidence d'un rayon lumineux partant de l'air vers un autre milieu est de  $30^\circ$ , si l'angle de réfraction est de  $20.57^\circ$ , la valeur de l'indice de réfraction est :**
  - 1.423
  - 1.428
  - 1.248
  - 1.243
9. **La dispersion se manifeste comme un :**
  - Etalement
  - Courbure
  - Pertes
  - Diminution
10. **La cause principale d'atténuation dans la fibre optique est due à :**
  - Absorption
  - Raccordement
  - Epissure
  - Diffusion

## Références bibliographiques

---

### *Références bibliographiques*

- [1] :Agrawal, G.P., *Fiber-Optic Communication Systems*. John Wiley & Sons, New York, (1997).
- [2] :Jeruchim, M.C., Balaban, P., Shanmugan, K., *Simulation of Communication Systems: Modeling, Methodology, and Techniques*. Plenum Press, New York, (1997).
- [3] : David Bensoussan, Introduction à la communication par fibre optique ‘ une approche pratique’.
- [4] : Pierre Lecoy, Télécommunications sur fibres optiques, Lavoisier (2009).
- [5] : Irène et Michel Joindt et douze co-auteurs, Les télécommunications par fibres optiques.
- [6] : Z.sidi Ali Mebarek, Télécommunications optiques, sources, fibres et détecteurs (avec exercices corrigés), office des publications universitaires.
- [7] :Emmanuel Rosencher, Borge Vinter, Optoélectronique Cours et exercices corrigés, Dunod, Collection : Sciences sup, (2002).
- [8] : J-C. Chaimowicz ; Introduction à l’optoélectronique principes et mise en œuvre ; Dunod
- [9] : Romain Maciejko, Optoélectronique, Presses internationales, (2002).
- [10] : G. Broussaud ; Optoélectronique ; Edition Masson, (1974).
- [11] : Jean.Michel Mur, les fibres optiques : notions fondamentales (câbles, connectique, composants, protocole, réseaux...), emi/Epsilon.
- [12] : D. Decoster, J. Harari ; Détecteurs optoélectroniques ; Lavoisier, (2002).
- [13] : Z. Toffano ; Optoélectronique : composants photoniques et fibres optiques ; Ellipses,( 2001).
- [14] : Cagnac-Faroux, Lasers Interaction lumière-atomes, CNRS éditions (2002)
- [15] : Dangoisse-Hennequin-Zehnlé, Les lasers, Dunod (1998)
- [16] : Pérez, Optique Fondements et applications, Dunod (2000)
- [17] : Cagnac-Pebay Peyroula, Physique atomique Tome 1, Dunod (1995)
- [18] J-M. Mur ; Les fibres optiques : Notions fondamentales ; Emi/Epsilon, (2012).
- [19] : F.Brik, Optoélectronique, support de cours, UBMA, 2017.

## Références bibliographiques

---

### Sitographie

- [1] : <https://www.electricaltechnology.org/2022/08/phototransistor.html#>
- [2] : [http://www.editions-ellipses.fr/PDF/9782729835262\\_extrait.pdf](http://www.editions-ellipses.fr/PDF/9782729835262_extrait.pdf)
- [3] : [http://www.optique-ingenieur.org/fr/cours/OPI\\_fr\\_M05\\_C04/co/Contenu.html](http://www.optique-ingenieur.org/fr/cours/OPI_fr_M05_C04/co/Contenu.html)
- [4] : <https://www.kartable.fr/terminale-s/physique-chimie/specifique/chapitres-33/les-proprie>
- [5] : <http://www.techno-science.net/?onglet=glossaire&definition=3694>
- [6] : [http://meteosat.pessac.free.fr/Cd\\_elect/www.esil.univ-mrs.fr/Eleves/P98/kit/fibres.html#](http://meteosat.pessac.free.fr/Cd_elect/www.esil.univ-mrs.fr/Eleves/P98/kit/fibres.html#)
- [7] : <http://www.lasercomponents.com/fr/lasers/modules-laser/>
- [8] : [http://www.unice.fr/optics/course/Intro\\_telecom/print.htm](http://www.unice.fr/optics/course/Intro_telecom/print.htm)
- [9] : [http://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/archives-th12/archives-innovations-\[10\]:technologiques-tiaint/archive-1/diodes-laser-pour-les-telecommunications-optiques-re48/](http://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/archives-th12/archives-innovations-[10]:technologiques-tiaint/archive-1/diodes-laser-pour-les-telecommunications-optiques-re48/)
- [10] : <https://www.techno-science.net/glossaire-definition/Semi-conducteur.html>
- [11] : <http://users.polytech.unice.fr/~pmasson/Enseignement/Cours%20de%20physique%20des%20SC%20-%20SLIDES%20-%20BAC+3.pdf>
- [12] : [https://www.google.com/search?q=sch%C3%A9mas+et+applications+du+phototransistor&rlz=1C1SQJL\\_frDZ892DZ892&oq=sch%C3%A9mas+et+applications+du+phototransistor&aqs=chrome..69i57j33i160l2.14636j0j15&sourceid=chrome&ie=UTF-8](https://www.google.com/search?q=sch%C3%A9mas+et+applications+du+phototransistor&rlz=1C1SQJL_frDZ892DZ892&oq=sch%C3%A9mas+et+applications+du+phototransistor&aqs=chrome..69i57j33i160l2.14636j0j15&sourceid=chrome&ie=UTF-8)
- [13] : <https://www.lepanneausolaire.net/comment-faire-panneaux-solaires-partir-photopiles.php>