



Département d'Automatique, Télécommunication et d'Electronique

## Projet de Fin d'Etudes

Pour l'obtention du diplôme de Master

Filière: Télécommunications

Spécialité: Systèmes des télécommunications

### Thème

**Impact de la couche active sur les performances d'un laser à cavité verticale (VCSEL)**

**Préparé par:**

- BENHAMA Zine edine
- TITOUAH Ghiles

**Dirigé par:**

Mme L. ACHOUR  
Mme L. BENBAHOUCHE

**Examiné par:**

Mme S. BOUNCER  
Mme R. BENDJELLOUL

Année universitaire: 2023/2024

## Remerciements

La réalisation de ce mémoire qui clôture nos cinq années d'études universitaires a été possible grâce au concours de plusieurs personnes à qui nous voudrions témoigner de toute notre gratitude.

Nous tenons tout d'abord à remercier chaleureusement notre tuteur de stage, Mme Lyakout ACHOUR, pour sa guidance et ses précieux conseils tout au long de notre stage. Sa patience, son professionnalisme et sa disponibilité ont été d'une aide précieuse dans la réalisation de ce mémoire.

Nous remercions également, Mme Samira BOUNCER, et Mme Rahima BENDJELLOUL, membres du jury, pour l'honneur qu'ils nous font en acceptant de juger notre travail et pour leurs remarques constructives.

Nos remerciements s'adressent aussi à Mme Lynda BENBAHOUCHE enseignante à l'Université de SETIF, malgré son éloignement, pour son aide précieuse concernant l'utilisation du logiciel SILVACO ainsi que la réalisation pratique de ce mémoire.

Nous tenons aussi à remercier Mr Abdelouhab BENHAMA pour ses précieux conseils.

Nous désirons aussi remercier nos professeurs et toute l'équipe pédagogique du master2 du département ATE (Automatique, Télécommunication et d'Electronique) qui nous ont transmis leur savoir et pour leur implication tout au long de ce parcours.

Nous remercions également tous nos camarades de la promotion Master 2 (2023/2024) et tous ceux qui, de près ou de loin, ont contribué à l'élaboration de ce mémoire sans oublier nos parents pour leurs soutiens constants et leurs encouragements.

# Dédicaces

---

*C'est avec une profonde gratitude que je dédie ce modeste travail de fin d'études*

*À mes parents pour leur soutien sans faille, leurs encouragements constants et leur patience et compréhension*

*À mes deux frères Salim et Mustapha et à ma sœur Hassiba et ses deux filles Yasmine et Syrine et son fils Amayas pour leurs contributions à mon bonheur*

*À mon oncle Abdelouhab pour son aide précieuse durant la réalisation de ce travail et ses encouragements tout au long de mon parcours scolaire et universitaire.*

*À mon binôme Ghiles pour son soutien moral, sa patience et sa compréhension au cours de ce travail*

*À tous mes proches et amis qui m'ont constamment soutenu, et à qui j'adresse mes sincères remerciements*

*À tous ceux que j'aime*

*Zine edine BENCHAMA*

---

# Dédicaces

---

*Ce projet de fin d'études est dédié à toutes les personnes qui ont contribué, de près ou de loin, à sa réalisation.*

*À mes parents, pour leur amour inconditionnel, leur soutien moral et financier, et leurs encouragements constants tout au long de mon parcours académique.*

*À mes enseignants et professeurs, pour leur expertise, leur patience, et leur dévouement à partager leurs connaissances. Leur guidance a été précieuse pour la réalisation de ce projet.*

*À mon binôme Zine edine pour son travail acharné durant cette période de mise en situation professionnelle.*

*À Mr. BENHAMA Abdelouhab qui nous a été d'une grande aide durant la réalisation de ce travail.*

*À mes amis et collègues, pour leur camaraderie, leurs conseils et leur soutien durant les moments difficiles. Leur présence m'a aidé à surmonter les défis rencontrés, notamment à  
RIESGO*

**GHILES TITOUAH**

---

**Liste des figures****Liste des tableaux****Liste des acronymes****Introduction Générale.....1****Chapitre I: Généralités sur les semi- conducteurs**

I.1 Introduction .....	3
I.2 Différents types de semi-conducteurs .....	3
I.2.1 Semi-conducteur intrinsèque .....	4
I.2.2 Semi-conducteur extrinsèque.....	4
I.2.2.1 Semi-conducteur de type p .....	5
I.2.2.2 Semi-conducteur de type n .....	5
I.3 Notion de gap direct et indirect .....	6
I.3.1 Gap direct .....	6
I.3.2 Gap indirect .....	6
I.4 Jonction p-n .....	7
I.5 Processus radiatifs dans les semi-conducteurs .....	8
I.5.1 Absorption .....	8
I.5.2 Emission spontanée.....	9
I.5.3 Emission stimulée .....	9
I.6 Laser à semi-conducteur.....	10
I.6.1 Principe de fonctionnement .....	10
I.6.1.1 Inversion de population .....	11
I.6.1.2 Pompage .....	12
I.6.2 Différents types de lasers à semi-conducteurs .....	12
I.6.2.1 Laser à homo-jonction.....	12
I.6.2.2 Laser à hétérojonction .....	13
I.6.2.3 Laser à puits quantiques .....	14
I.7 Conclusion.....	15

**Chapitre II: Etat de l'art du VCSEL**

II.1 Introduction .....	16
II.2 Bref rappel historique .....	16
II.3 Différentes couches du VCSEL .....	17
II.4 Principe de fonctionnement.....	18
II.4.1 Structure .....	19
II.4.2 Miroirs de Bragg.....	19
II.4.3 Zone active .....	20
II.4.4 Puits quantique .....	20
II.5 Matériaux utilisés dans les VCSELS.....	21
II.5.1 Matériaux utilisés dans les miroirs de Bragg.....	21
II.5.2 Matériaux utilisés dans la zone active.....	22
II.6 Différents modes d'un laser VCSEL .....	23
II.6.1 Modes longitudinaux.....	23
II.6.2 Modes transversaux .....	23
II.7 Paramètres d'un VCSEL .....	23
II.7.1 Conditions d'oscillation d'un VCSEL .....	23
II.7.2 Réflectivité .....	24
II.8 Application des VCSELS .....	24

---

II.9 Avantages des VCSELS .....	25
II.10 Défis et perspectives .....	26
II.9 Conclusion.....	26
<b>Chapitre III:Simulation et discussion des résultats</b>	
III.1 Introduction.....	28
III.2 Aperçu général sur le logiciel TCAD-SILVACO.....	28
III.2.1 Introduction.....	28
III.2.2 Principaux modules du logiciel SILVACO.....	28
III.2.3 Ordres de commande du module Atlas.....	30
III.2.3.1 Spécification de la structure .....	30
III.2.3.2 Spécification des paramètres des matériaux et modèles physiques .....	31
III.2.3.3 Sélection de la méthode numérique .....	32
III.2.3.4 Spécification de Solution .....	33
III.2.3.5 Analyse des résultats.....	34
III.3 Simulations réalisées avec le logiciel SILVACO .....	34
III.3.1 Conception et présentation de la diode VCSEL étudiée .....	34
III.3.2 Analyse des résultats obtenus.....	36
III.3.2.1 Influence des paramètres MQW .....	36
III.3.2.2 Effet de l'épaisseur du puits .....	37
III.3.2.3 Effet de l'épaisseur des barrières .....	41
III.3.2.4 Influence du nombre de puits et de barrières.....	46
III.4 Conclusion .....	51
<b>Conclusion générale .....</b>	<b>53</b>
<b>Bibliographie</b>	
<b>Annexe</b>	
<b>Résumé</b>	

## Liste des figures

Figure I. 1: Semi-conducteur de type p (silicium dopé par le bore).....	5
Figure I. 2: Semi-conducteur de type n (silicium dopé par le phosphore) .....	6
Figure I. 3: Schéma de principe d'un semi-conducteur .....	6
Figure I. 4: Fonctionnement de la jonction p-n .....	8
Figure I. 5: Phénomène d'absorption .....	8
Figure I. 6: Phénomène de l'émission spontanée .....	9
Figure I. 7: Phénomène de l'émission stimulée.....	9
Figure I. 8: Schéma d'une cavité diode laser.....	10
Figure I. 9: Principe d'inversion de population .....	11
Figure I. 10: Schéma de base du laser homo--jonction .....	12
Figure I. 11: Niveaux d'énergie d'une double hétérojonction .....	13
Figure I. 12: Schéma d'une structure de puits quantique .....	13
Figure I. 13: Types de puits quantiques.....	14
Figure II. 1: Structure d'une diode VCSEL .....	18
Figure II. 2: Schéma de fonctionnement du miroir de Bragg .....	19
Figure II. 3: Schéma représentant un puits quantique .....	19
Figure II. 4: Matériaux utilisés dans les miroirs de Bragg des VCSELs.....	21
Figure II. 5: Longueurs d'ondes disponibles pour les VCSELs .....	21
Figure II. 6: Variation de la réflectivité du miroir de Bragg en fonction du nombre de paires de couches n.....	23
Figure III. 1: Structure, maillage- Dopage d'un laser VCSEL simulé par SILVACO-Atlas .....	36
Figure III. 2: Caractéristique électrique V-I:.....	37
Figure III. 3: Caractéristique électrique P-V:.....	38
Figure III. 4: Variation de l'absorption en fonction de l'énergie (eV):.....	39
Figure III. 5: Variation de la réflectivité en fonction de l'énergie (eV):.....	40
Figure III. 6: Variation de la transmission en fonction de l'énergie (eV):.....	41
Figure III. 7: Caractéristique électrique V-I :.....	42
Figure III. 8: Caractéristique électrique P-V:.....	43
Figure III. 9: Variation de l'absorption en fonction de l'énergie (eV):.....	44
Figure III. 10: Variation de la réflectivité en fonction de l'énergie (eV):.....	45
Figure III. 11: Variation de la transmission en fonction de l'énergie (eV):.....	46
Figure III. 12: Caractéristique électrique V-I d'une VCSEL:.....	47
Figure III. 13: Caractéristique électrique P-V: Puissance totale émise en fonction de la tension:.....	48
Figure III. 14: Variation du taux d'absorption en fonction de l'énergie (eV):.....	49
Figure III. 15: Variation de la réflectivité en fonction de l'énergie (eV):.....	50
Figure III. 16: Variation de la transmission en fonction de l'énergie (eV):.....	51

## Liste des tableaux

Tableau I.1: Exemple de semi-conducteurs .....	3
Tableau II.1 Différentes couches d'une diode VCSEL.....	17
Tableau III. 1: Groupes de commande ATLAS avec les déclarations de base .....	30

## Liste des acronymes

BC	Bande de Conduction
BV	Bande de Valence
DBR	Distributed Bragg Rreflector
LASER	Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation
LSC	Laser a Semi-Conducteur
MASER	Microwave Amplification by Stimulated Emission of Radiation
MQW	Multi-Quantum Well
SILVACO	SIlicon VAlley COrporation
TCAD	Technology Computer-Aided Design
VCSEL	Vertical Cavity Surface Emitting Laser
VWF	Virtual Wafer Fabrication

# **Introduction Générale**

### Introduction Générale

Le laser (en anglais Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation) qui veut dire en français "amplification de lumière par émission stimulée" est un dispositif qui produit ou amplifie un rayonnement cohérent et directif pour des longueurs d'onde situées dans le domaine optique des ondes électromagnétique et qui couvrent aussi bien l'infrarouge, le visible que l'ultraviolet [1].

Son principe consiste donc à l'émission stimulée de photons. Un photon incident dans la matière entraîne l'émission d'un autre photon identique qui possède les mêmes propriétés en termes d'énergie, de direction, et de phase.

Il existe plusieurs types de lasers dont nous citerons principalement: les Lasers à gaz, les lasers chimiques, les lasers à colorants organiques (Dye lasers), les lasers à fibre, les lasers à vapeur métallique, les lasers à l'état solide, les lasers à semi-conducteur (lasers à diodes), etc.

Le laser à semi-conducteur est un dispositif fabriqué à partir de matériaux semi-conducteurs, qui se comportent de manière intermédiaire entre les isolants et les conducteurs électriques. Selon les conditions, ces matériaux peuvent transmettre ou bloquer le courant électrique.

Cette diode laser possède trois zones caractéristiques : une couche de confinement de type n, une zone active et une couche de confinement de type p. Les couches de confinement permettent d'optimiser l'utilisation du courant dans la diode et d'augmenter le rendement.

Leur caractère conducteur ou isolant prend sa source par l'excitation thermique ou par l'ajout d'impuretés dans leur structure cristalline par un procédé appelé dopage: ce qui permet de créer des semi-conducteurs de type n avec un excès d'électrons ou de type p avec un excès de trous.

Il existe plusieurs semi-conducteurs mais parmi le plus utilisé dans l'industrie, on y trouve le Silicium en raison de ses propriétés et de son abondance naturelle.

De nos jours, ces semi-conducteurs entrent dans la fabrication des appareils que nous utilisons tous les jours, et sont essentiels au développement des technologies que nous utiliserons demain. On les retrouve dans des domaines variés tels que militaire, spatial, automobile, énergie, électronique grand public, télécommunications, médecine, etc. C'est la raison pour laquelle les semi-conducteurs sont devenus un enjeu stratégique pour l'économie et l'innovation [2].

Parmi les dispositifs à semi-conducteurs, les lasers à semi-conducteurs se distinguent par leur capacité à émettre de la lumière cohérente avec une grande efficacité et à une faible consommation d'énergie. Ces caractéristiques font des lasers à semi-conducteurs des éléments clés dans les systèmes de communication optique, les capteurs, et les dispositifs d'affichage.

Les lasers **VCSEL** (pour l'anglais **V**ertical-**C**avity **S**urface-**E**mitting **L**aser) ou (Diodes Lasers à Cavité Verticale émettant par la Surface) représentent une classe particulière des lasers à semi-conducteurs. Ces lasers feront l'objet de notre étude.

Contrairement aux lasers à cavité étendue traditionnelle, les VCSEL émettent de la lumière perpendiculairement à la surface du substrat. Cette configuration unique leur confère des avantages considérables, tels que des coûts de fabrication réduits, une intégration facilitée avec d'autres composants optoélectroniques, et une efficacité énergétique améliorée [3].

Les VCSEL sont ainsi largement utilisés dans les réseaux de communication par fibre optique, les souris optiques, les dispositifs de reconnaissance faciale, et bien d'autres applications. C'est l'une des sources de lumière utilisées dans la communication.

Cependant, leurs performances dépendent fortement de la conception et des caractéristiques de leur zone active. Cette dernière est la région où se produit l'émission de lumière par recombinaison des porteurs de charge. La qualité de cette zone, sa composition, ses dimensions, et son positionnement jouent un rôle crucial dans les propriétés optiques et électriques du VCSEL [4].

Une zone active optimisée peut améliorer l'efficacité de conversion, réduire les pertes, et augmenter la puissance de sortie du laser, tout en minimisant les effets thermiques et les dégradations possibles.

Ce mémoire se propose d'étudier l'impact de la couche active sur les performances des VCSEL. Elle se veut une contribution significative à la recherche sur les VCSEL, en mettant en lumière l'importance cruciale de la zone active et en proposant des solutions pour améliorer les performances de ces dispositifs optoélectroniques.

Ce manuscrit est organisé en trois chapitres comme suit:

Dans le premier chapitre seront passés en revue les principes fondamentaux des semi-conducteurs et des lasers à semi-conducteurs.

Le deuxième chapitre se concentre sur l'état de l'art des VCSELs où sont données ses caractéristiques spécifiques, en mettant en évidence les défis techniques et les innovations récentes dans ce domaine.

Le troisième chapitre est dédié à une analyse sur les modifications de la zone active pour étudier les performances des VCSELs en utilisant le matériau InGaAsP/InP. Cette étude est réalisée en s'appuyant sur des simulations en utilisant le logiciel SILVACO pour illustrer les concepts abordés.

En fin, ce travail se clôture par une conclusion générale qui récapitule les résultats de notre étude et expérimentations.

# **Chapitre I: Généralités sur les semi-conducteurs**

## I.1 Introduction

En physique, on définit par conducteur (électrique, thermique, optique, ...), tout matériau permettant des échanges d'énergie entre deux systèmes, par opposition à un non conducteur ou isolant tel que le bois sec, le papier, le verre, le plastique, etc.

Un semi-conducteur est, quant à lui, un matériau dont la conductivité électrique se situe entre celle des isolants et celle des conducteurs. Il peut donc conduire l'électricité dans certaines conditions mais isolants dans d'autres conditions. Leur caractère conducteur ou isolant prend sa source par l'excitation thermique ou par l'ajout d'impuretés dans leur structure cristalline par un procédé appelé dopage: ce qui permet de créer des semi-conducteurs de type n avec un excès d'électrons ou de type p avec un excès de trous.

Parmi les semi-conducteurs les plus utilisés dans l'industrie, on y trouve le Silicium en raison de ses propriétés et de son abondance naturelle. Il existe d'autres semi-conducteurs qu'on verra ultérieurement.

Dans le présent chapitre, nous étudierons les différents types de semi-conducteurs ainsi que leurs caractéristiques.

## I.2 Différents types de semi-conducteurs

Les principaux semi-conducteurs sont le germanium (Ge), le silicium (Si), le sélénium (Se), les composés binaires : arséniure de gallium (GaAs), antimoniure d'indium (InSb), phosphure de gallium (GaP) et phosphure d'indium, ainsi que les composés ternaires et quaternaires représentés dans le tableau I.1. Les autres semi-conducteurs représentés dans ce tableau seront donnés en annexe.

*Tableau I. 1: Exemple de semi-conducteurs*

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	$Cd_xHg_{1-x}Te$

Les semi-conducteurs peuvent être classés en deux catégories principales dites intrinsèques et extrinsèques.

### I.2.1 Semi-conducteur intrinsèque

Un semi-conducteur est considéré comme intrinsèque lorsqu'il ne contient pas d'impuretés (atomes étrangers) qui peuvent modifier la concentration en porteurs libres. Au-delà de 0°K, il est possible que des électrons deviennent "libres", c'est-à-dire qu'ils se déplacent de la bande de valence vers la bande de conduction, où leur concentration est indiquée par n. Ce déplacement d'électrons engendre des trous dans la bande de valence avec une concentration notée p qui sont également libres de se déplacer, avec une égalité entre les concentrations n et p.

Dans cette situation spécifique, on établit une concentration intrinsèque, qui sera déterminée par la relation [I.1]

$$n=p=n_i(T) = A T^{3/2} \exp\left(-\frac{E_G}{2kT}\right) (\text{cm}^{-3}) \quad (\text{I.1})$$

Où:

A est une constante spécifique du matériau considéré

T° (k) la température en degrés Kelvin

$E_G$  (J) l'énergie du gap

et K une constante égale à  $1,38.10^{-23}$  j/k (joules par Kelvin)

### I.2.2 Semi-conducteur extrinsèque

Un semi-conducteur extrinsèque est un semi-conducteur intrinsèque dopé par des impuretés spécifiques lui conférant des propriétés électriques adaptées aux applications électroniques (diodes, transistors, etc.) et optoélectroniques (émetteurs et récepteurs de lumière, etc.).

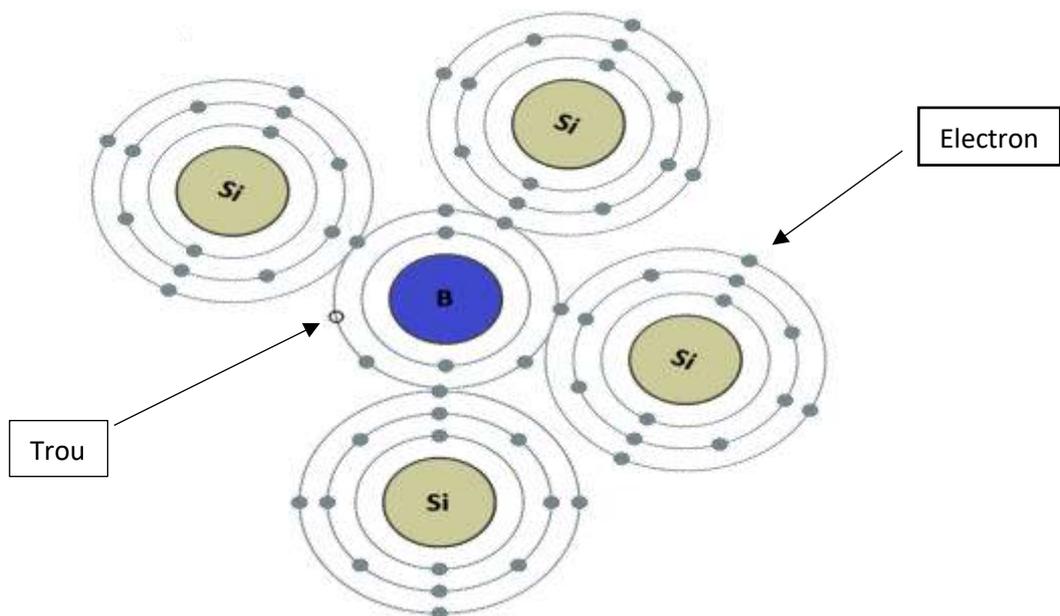
Un des avantages majeurs d'un semi-conducteur extrinsèque réside dans sa capacité à être dopé avec divers types et concentrations d'impuretés afin de modifier sa résistivité.

Ainsi, quand ces impuretés sont ionisées, elles laissent une densité de charge qui se traduit par un champ électrique et parfois une barrière de potentiel à l'intérieur du semi-conducteur. Il n'y a pas de telles caractéristiques dans un métal ou un isolant. [5]

Les semi-conducteurs extrinsèques se subdivisent en deux types: semi-conducteur de type p et semi-conducteur de type n

### I.2.2.1 Semi-conducteur de type p

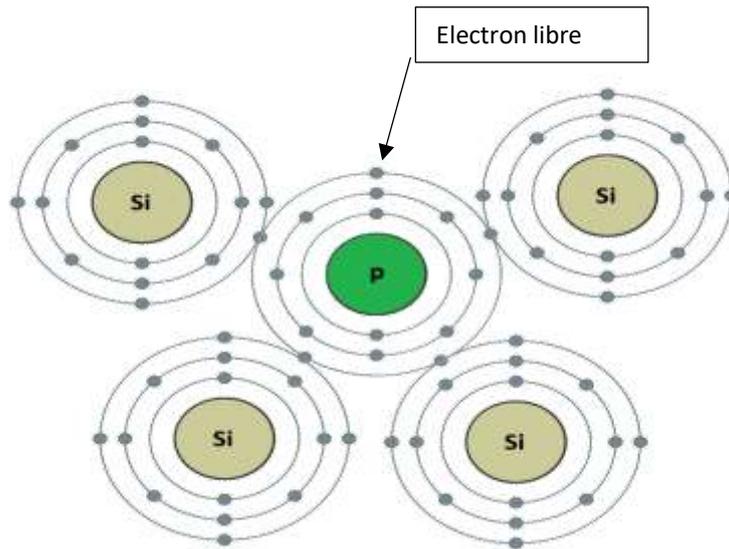
Un semi-conducteur type p est un semi-conducteur intrinsèque dans lequel on a introduit des atomes possédant un nombre d'électrons de valence inférieur à celui du semi-conducteur. Lorsqu'ils sont introduits dans ce dernier, ils capturent des électrons libres, créant ainsi des atomes accepteurs, comme le Bore et le Gallium. Sur la figure I.1 est schématisé un semi-conducteur de type P représentant un silicium dopé par le Bore.



*Figure I. 1: Semi-conducteur de type P(Silicium dopé par le Bore)*

### I.2.2.2 Semi-conducteur de type n

Un semi-conducteur type n est un semi-conducteur intrinsèque dans lequel on a introduit des atomes donneurs, comme le Phosphore et l'Arsenic, qui sont des atomes possédant un nombre d'électrons de valence supérieur à celui du semi-conducteur. Lorsqu'ils sont introduits dans celui-ci, ils fournissent des électrons libres, augmentant ainsi la densité d'électrons dans la bande de conduction. Sur la figure I.2 est schématisé un semi-conducteur de type n représentant un silicium dopé par le phosphore.



*Figure I. 2: Semi-conducteur de type n (Silicium dopé par le phosphore)*

### I.3 Notion de gap direct et indirect

La différence d'énergie entre le niveau de Fermi et la bande de conduction est connue sous le nom de gap d'un semi-conducteur. Il existe deux types de gap.

#### I.3.1 Gap direct

Dans un semi-conducteur à gap direct, les électrons peuvent facilement passer de la bande de valence à la bande de conduction sans changer de quantité de mouvement, car le minimum de la bande de conduction et le maximum de la bande de valence ont le même vecteur d'onde. Cette caractéristique est essentielle pour l'émission de photons dans les lasers à semi-conducteurs.

#### I.3.2 Gap indirect

Les semi-conducteurs à gap indirect, comme le silicium et le germanium, ne conviennent pas aux lasers à semi-conducteurs car ils requièrent l'intervention d'un photon pour garantir la conservation de la quantité de mouvement lors des transitions optiques, ce qui diminue considérablement l'efficacité de l'émission des photons. Sur la figure I.3 sont représentés les principes d'un semi-conducteur à gap direct et indirect.

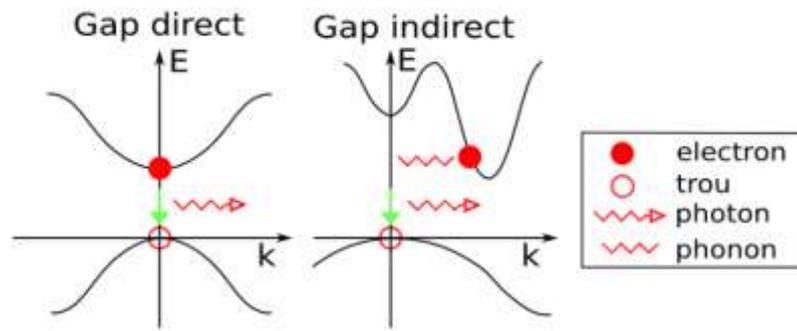


Figure I. 3: Schéma de principe d'un semi-conducteur à gap direct et à gap indirect [6]

### I.4 Jonction p-n

La jonction p-n désigne la surface de contact entre deux semi-conducteurs dopés de manière différente, l'un étant de type p et l'autre de type n engendrant ainsi une diode, c'est-à-dire un composant qui ne permet de faire circuler le courant que dans un seul sens.

La juxtaposition des zones n et p perturbe la distribution des charges dans une zone de largeur  $X_n + X_p$ , connue sous le nom de zone de charge d'espace. Les répartitions sont identiques à celles des semi-conducteurs n ou p isolés à l'extérieur de cette zone. La présence de cette zone de charge d'espace crée une limite de potentiel [7].

La zone de charge d'espace, connue aussi sous le nom de zone de déplétion, est située à l'intérieur d'un semi-conducteur entre les régions dopées p et n. Elle est constituée de charges fixes qui créent un champ électrique intense. Le côté le moins dopé influence la largeur de cette zone et joue un rôle essentiel dans les paramètres tels que la résistance et le flux de courant. La présence de cette zone est essentielle pour le bon fonctionnement des dispositifs semi-conducteurs en impactant leurs caractéristiques électriques et leurs performances [8].

On peut calculer la largeur de zone de charge d'espace comme suit :

$$w = X_p + X_n \tag{I.2}$$

$$X_p = \sqrt{\frac{2\epsilon_s \cdot V_d \cdot N_d}{e \cdot N_a \cdot (N_a + N_d)}} \tag{I.3}$$

$$X_n = \sqrt{\frac{2\epsilon_s \cdot V_d \cdot N_a}{e \cdot N_d \cdot (N_a + N_d)}} \tag{I.4}$$

$$w = \sqrt{\frac{2\epsilon_s \cdot V_d \cdot (N_a + N_d)}{e \cdot N_a \cdot N_d}} \tag{I.5}$$

où  $X_p$  et  $X_n$  représentent respectivement les largeurs des régions dopées p et n  
 $\epsilon_s$  la permittivité du semi-conducteur en Farad/m  
 $V_d$  la barrière de potentiel en Volts  
 $N_d$  le nombre de donneurs  
 $N_a$  le nombre d'accepteurs  
 $e$  la charge de l'électron

La figure I.4, schématisée ci-dessous, montre la jonction p-n et la zone de charge d'espace.

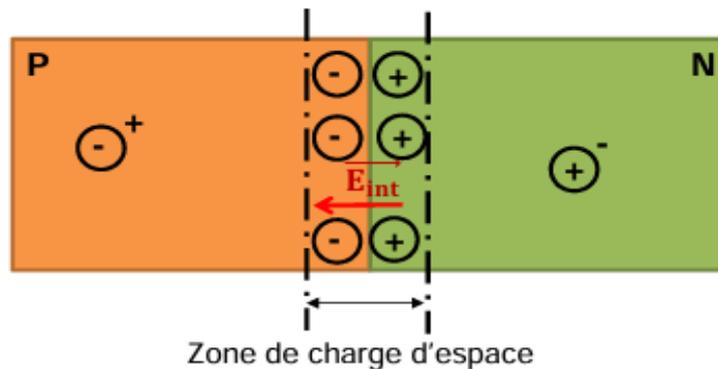


Figure I. 4: Fonctionnement de la jonction P-N [9]

## I.5 Processus radiatifs dans les semi-conducteurs

Il existe trois façons pour un électron de passer d'un état à un autre:

### I.5.1 Absorption

Un photon incident est absorbé par un électron de la bande de valence qui se déplace vers la bande de conduction lors de l'absorption. Afin que ce phénomène se produise, il est nécessaire que l'énergie du photon incident soit supérieure (ou égale) à celle de la bande interdite. Un trou est créé par ce phénomène dans la bande de valence. Ce phénomène est employé pour effectuer des pompes optiques ou électriques dans certaines sources de rayonnement. Il est également la source de fonctionnement des photos détecteurs [10]. Sur la figure (I.5), on peut voir le phénomène d'absorption schématisé.

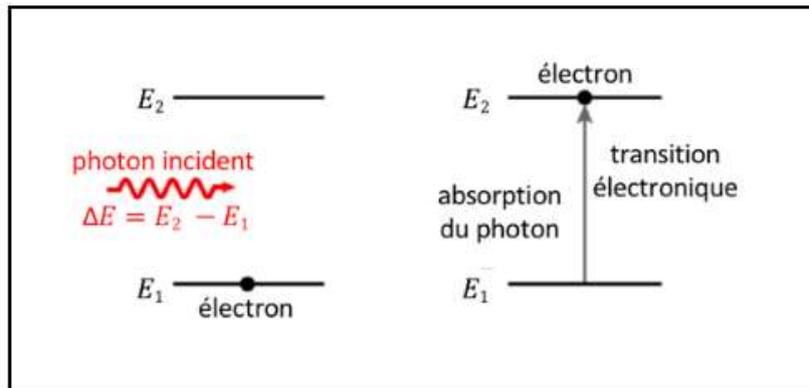


Figure I. 5: Phénomène d'absorption [7]

### I.5.2 Emission spontanée

Par émission spontanée, un électron dans un état excité n'y reste pas longtemps ( $10^{-8}$  s en moyenne) pour revenir à un état d'énergie plus bas [7]. Il s'agit d'un phénomène incertain, c'est-à-dire que l'on ne peut prédire ni le moment ni la manière dont la transition se fera, ni dans quelle direction le photon sera émis [10].

Dans la figure (I.6), on peut voir le phénomène de l'émission spontanée schématisé.

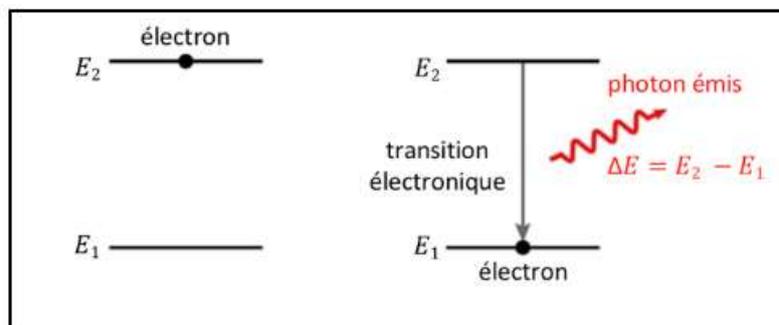


Figure I. 6: Phénomène de l'émission spontanée [7]

### I.5.3 Emission stimulée

Lorsqu'un photon d'énergie  $\Delta E = E_2 - E_1$  se trouve près d'un électron dans l'état  $E_2$ , il provoque la désexcitation de l'électron pour qu'il rejoigne l'état  $E_1$ . Un photon d'énergie  $\Delta E$  émet alors, en tout point, un photon identique au photon incident. Etant donné qu'ils ont la même énergie, ils ont également la même fréquence et la même longueur d'onde. Ils partagent également la même phase (aucun décalage temporel). On obtient donc deux photons identiques à partir d'un seul photon incident [10]. Dans la figure (I.7) est schématisé le phénomène de l'émission spontanée.

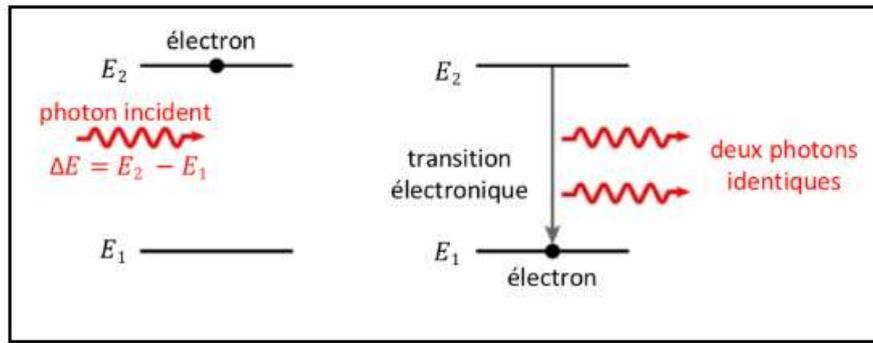


Figure I. 7: Phénomène de l'émission stimulée [7]

## I.6 Laser à semi-conducteur

### I.6.1 Principe de fonctionnement

Un laser est un dispositif optique facilement identifiable car il se distingue de la lumière ordinaire. Il émet un faisceau de lumière cohérente qui diffère de la lumière émise par les sources lumineuses classiques telles que les lampes à incandescence, les tubes fluorescents ou les diodes électroluminescentes. Ces dernières émettent leur lumière dans toutes les directions, ce qui les rend parfaites pour éclairer une pièce ou une zone. En revanche, le faisceau produit par un laser est un fin rayon qui se transforme en une tache lumineuse brillante et presque ponctuelle lorsqu'il rencontre un obstacle tel qu'un mur. [11]

Une diode laser a cavité est schématisée sur la figure (I.8).

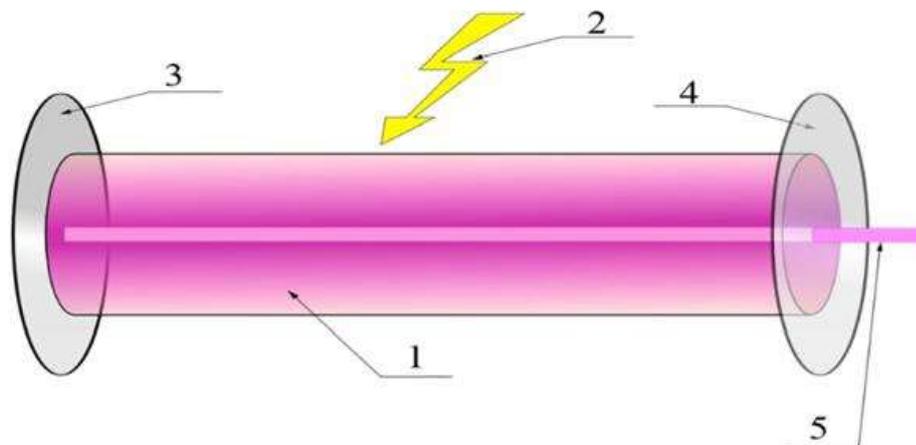


Figure I. 8: Schéma d'une diode laser a cavité [11]

Les différents numéros indiqués sur cette figure sont comme suit:

- 1: Milieu excitable
- 2: Energie de Pompage
- 3: Miroir totalement réfléchissant
- 4: Miroir semi réfléchissant
- 5: Faisceau laser

### I.6.1.1 Inversion de population

Chaque électron dans un système d'atomes peut se trouver à différents niveaux d'énergie. En conditions normales, la plupart des électrons se situent au niveau d'énergie le plus bas ( $N_1$ ), appelé également niveau fondamental.

Lorsqu'il y a plus d'électrons dans l'état excité dans le niveau supérieur ( $N_2$ ) que dans le niveau fondamental, cela crée une inversion de population. Cette situation non naturelle augmente la probabilité d'émission stimulée de photons plutôt que d'absorption, ce qui est crucial pour la production de laser [12]. Le principe de l'inversion de population est schématisé sur la figure (I.9).

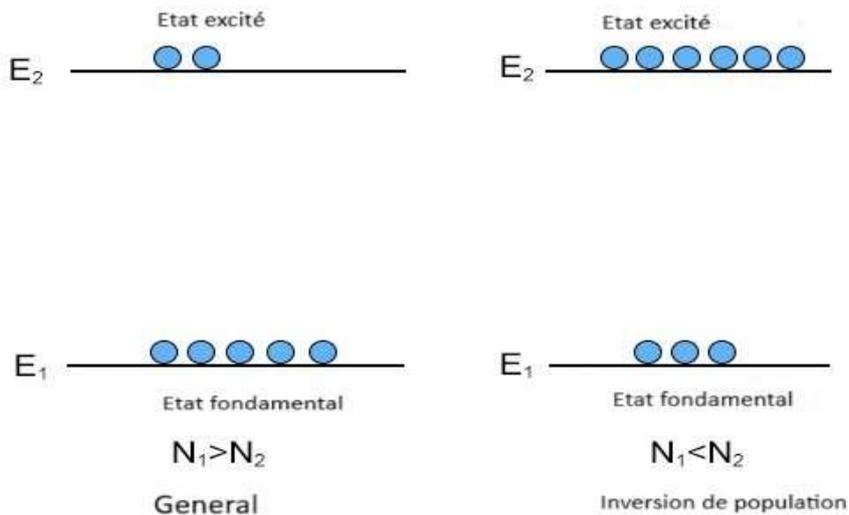


Figure I. 9: Principe d'inversion de population[13]

La répartition des populations sur les niveaux est donnée par la loi de Boltzmann:

$$N_2/N_1=(g_2/g_1)*\exp(-\frac{E_2-E_1}{kT}) \quad (I.6)$$

Où

$N_2$  Représente le nombre de particules sur l'état excité

$N_1$  le nombre de particules sur l'état fondamental

$g_2$  et  $g_1$  les dégénérescences respectives des états 2 et 1

$E_2$  et  $E_1$  les énergies respectives des états 2 et 1

$k$  la constante de Boltzmann ( $1,38.10^{-23}$  (J/K))

et  $T^\circ$  (K) la température en degrés Kelvin

### I.6.1.2 Pompage

Un mécanisme de pompage a pour rôle de fournir de l'énergie au système. Pour un laser à semi-conducteur, ceci est réalisé généralement par un courant électrique appliqué à la jonction p-n de la diode. Ceci peut être obtenu grâce à un flash lumineux ou une autre source d'énergie.

## I.6.2 Différents types de lasers à semi-conducteurs

Les lasers à semi-conducteurs, également appelés diodes laser, utilisent un semi-conducteur comme milieu actif. Ils se distinguent par leur taille compacte, leur robustesse, leur facilité d'utilisation et leur puissance de sortie élevée. On distingue trois types de laser qui sont:

### I.6.2.1 Laser à homo-jonction

Bien qu'aujourd'hui d'utilisation moins répandue, il est utile de décrire le laser homo-jonction pour expliquer le principe de fonctionnement du LSC (**L**aser **S**emi-**C**onducteur) et justifier toutes les avancées technologiques qui ont amélioré ses propriétés.

Le laser à homo-jonction représenté sur la figure I.10 est la juxtaposition de deux semi-conducteurs de même nature, mais à dopages différents, que l'on appelle jonction p-n. À la frontière qui sépare les deux milieux, les électrons diffusent de n vers p, puis se recombinent dans p avec les trous présents dans la zone. Dans le même temps, des trous migrent de p vers n. On assiste donc à la création d'une zone au voisinage immédiat de la jonction dans laquelle il n'y a plus de charges mobiles (c'est-à-dire d'électrons et de trous) et où règne un champ électrique statique  $E$  orienté de n vers p [12] .

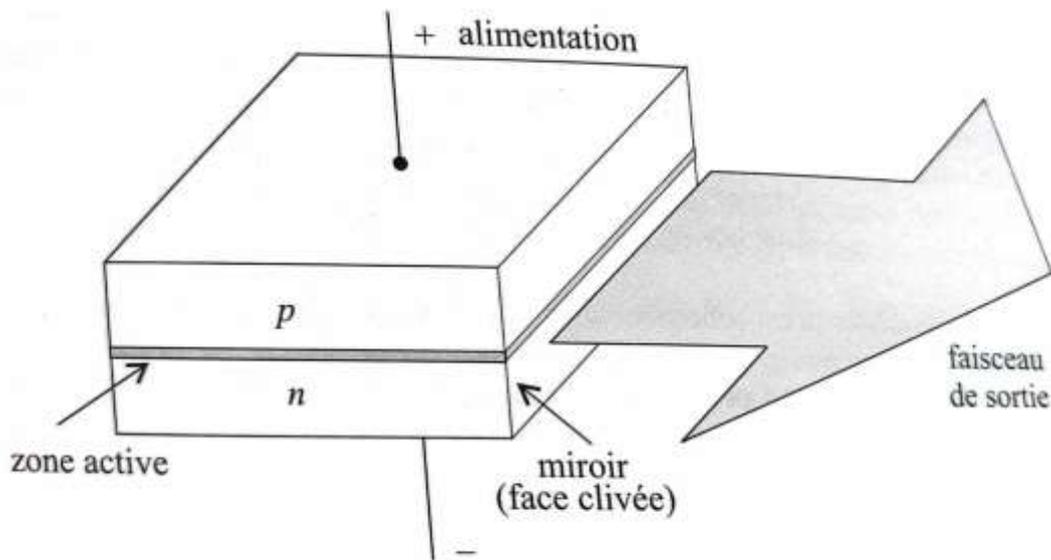


Figure I. 10: Schéma de base du laser homo-jonction [11]

### I.6.2.2 Laser à hétérojonction

Pour éviter l'échauffement et le vieillissement prématuré du composant, il est essentiel de créer une importante densité de paires électron-trou avec un courant d'injection modéré. Ceci n'est possible qu'en confinant les porteurs au voisinage immédiat de la jonction.

Pour réaliser cet objectif, l'homo-jonction a été remplacée par un empilement de trois couches à dopages différents ( $p^+$ ,  $p$ ,  $n$ ) qu'on appelle laser à hétérojonction. Cet assemblage, appelé aussi double hétéro-structure, assure le confinement des porteurs suivant la direction perpendiculaire à l'empilement (figure I.11) [12].

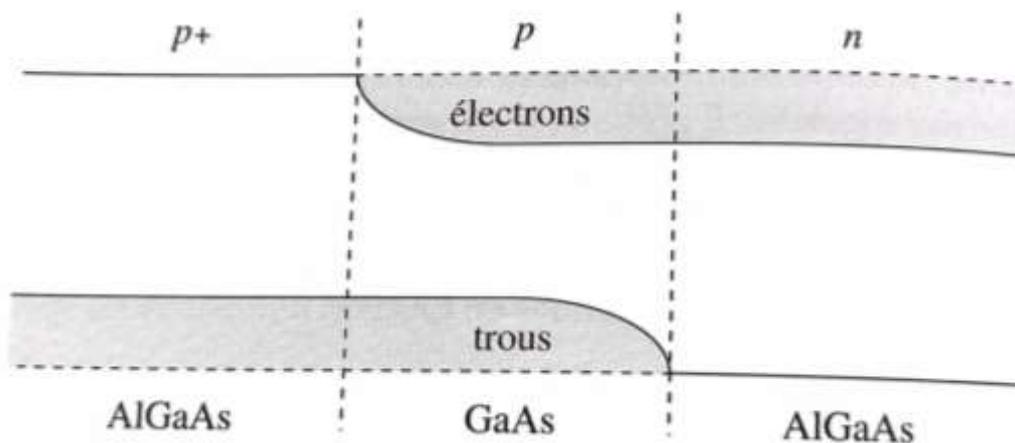
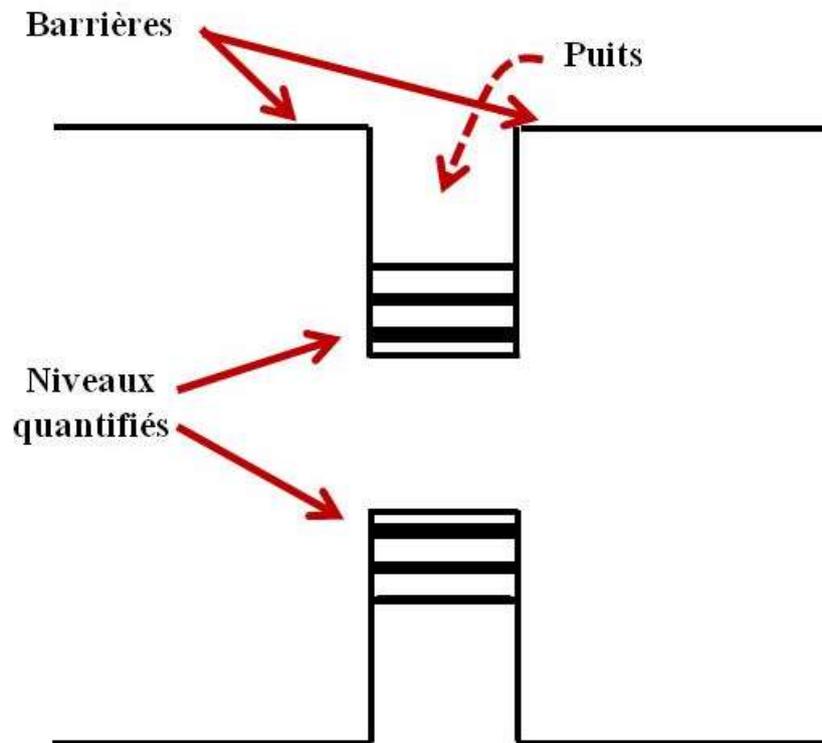


Figure I. 11: Niveaux d'énergie d'une double hétérojonction AlGaAs/GaAs/AlGaAs [11]

### I.6.2.3 Laser à puits quantiques

Un puits quantique simple est constitué à partir d'une fine couche d'un matériau semi-conducteur de faible gap. Cette fine couche est entourée d'un matériau de plus grand gap créant un puits de potentiel de taille quantique pour les électrons et les trous qui vont se confiner sur des niveaux d'énergies discrets. Pour une injection donnée, il permet d'augmenter la densité de porteurs et d'atteindre l'inversion de population [14]. Sur la figure I.12 est schématisée une structure de puits quantique.



*Figure I. 12: Schéma d'une structure de puits quantique*

Il existe plusieurs types de puits quantiques qui sont:

#### a) Puits quantique de type I

Les électrons et les trous sont confinés dans le même matériau qui forme le puits. L'énergie du photon émis dépend des énergies de confinement des électrons, des trous et du gap du matériau de puits [14].

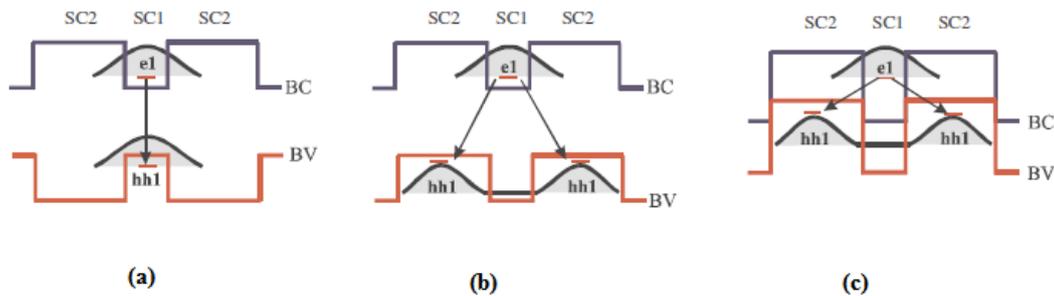
### b) Puits quantique de type II

Les porteurs sont confinés dans les deux matériaux qui constituent respectivement les puits et les barrières. Dans ce cas, l'énergie du photon dépend des énergies de confinement des porteurs mais aussi des gaps des deux matériaux semi-conducteurs qui forment l'hétérostructure [14].

### c) Puits quantique de type III

Le bas de la bande de conduction est situé en dessous du haut de la bande de valence. Dans cette configuration connue aussi sous le nom de configuration semi-métallique, l'énergie du photon émis n'est fonction que des énergies de confinement des porteurs c'est-à-dire de l'épaisseur des couches puits-barrières [14].

Les trois types de puits quantiques sont illustrés sur la figure I.13.



*Figure I. 13: Types de puits quantiques [14]*

- a) - Puits quantique type I
- b) - Puits quantique type II
- c)- Puits quantique type III

## I.7 Conclusion

Le laser semi-conducteur est un laser dans lequel le milieu excité est un semi-conducteur. Ce dernier est à la base de tous les appareils que nous utilisons tous les jours et est essentiel au développement des technologies que nous utiliserons demain. On les retrouve dans divers domaines tels que militaire, spatial, automobile, panneaux solaires, électronique grand public, télécommunications, médecine, etc. On dit d'ailleurs que nous sommes à l'âge du silicium en référence au semi-conducteur le plus utilisé.

Actuellement, les semi-conducteurs sont devenus un enjeu stratégique pour l'économie mondiale et l'innovation, surtout entre les grandes puissances.

Les lasers à semi-conducteurs offrent des avantages significatifs tels qu'une taille

compacte, une efficacité élevée et une grande fiabilité. Leur capacité à générer une lumière cohérente avec une grande précision a permis des avancées majeures dans des domaines allant des communications optiques à la médecine.

Cependant, malgré leurs performances exceptionnelles, les lasers à semi-conducteurs conventionnels présentent certaines limitations, notamment en ce qui concerne la dispersion du faisceau et la difficulté d'intégration avec d'autres composants optiques, d'où l'intérêt actuel est de développer une diode laser à cavité verticale émettant par la surface appelée VCSEL. Cette diode sera étudiée en détail dans le chapitre suivant.

## **Chapitre II: Etat de l'art du VCSEL**

## II.1 Introduction

Les lasers **VCSEL** (pour l'anglais **V**ertical-**C**avity **S**urface-**E**mitting **L**aser) ou (Diodes Lasers à Cavité Verticale émettant par la Surface) sont l'une des sources de lumière utilisées dans la communication par fibre optique. Elles représentent une percée technologique remarquable dans le domaine des communications optiques et des capteurs.

Contrairement aux lasers traditionnels à cavité latérale traditionnels, les VCSELs émettent de la lumière perpendiculairement à la surface du substrat, ce qui leur confère des avantages notables en termes de compacité, d'efficacité et de facilité d'intégration dans les systèmes optoélectroniques.

Dans ce chapitre, après un bref rappel historique sur les VCSELs, nous nous pencherons spécifiquement sur leur principe de fonctionnement, leur structure particulière, leurs divers domaines d'application et enfin leurs avantages distinctifs par rapport aux autres types de lasers.

## II.2 Bref rappel historique

L'origine du laser remonte à l'année 1917, quand Albert Einstein (1879-1955) a présenté pour la première fois le concept d'**émission stimulée** ou **émission induite**. Ce concept est, en physique atomique, le processus de désexcitation d'un électron favorisé en illuminant l'atome d'une lumière ayant une longueur d'onde correspondant à l'énergie de transition entre les deux états électroniques. Ce processus, est la base du fonctionnement des lasers. [15]

Cette découverte permit beaucoup plus tard en 1951 à Townes, Bassov et Prokhorov d'amplifier les hyperfréquences et de réaliser les premiers **MASER** (**M**icrowave **A**mplification by **S**timulated **E**mission of **R**adiation). A partir de 1958, Gordon Gould puis Schawlow et Townes ont réussi à atteindre les longueurs d'ondes visibles, créant ainsi le **LASER** (**L**ight **A**mplification by **S**timulated **E**mission of **R**adiation).[16]

En 1960, Maiman a créé le tout premier laser à rubis, suivi peu après par Holonyak qui a développé les premiers lasers à homo-jonction à base de GaAs en 1962. Les semi-conducteurs ont ainsi commencé à être utilisés dans la fabrication des lasers. [17]

En 1975, Van Der Zeil a réussi à créer les premiers lasers semi-conducteurs modernes en utilisant des hétéro structures de GaAs/AlGaAs au niveau de la jonction p-n.

En 1979, l'équipe de K. Iga de Tokyo Institute of Technology a créé le premier laser à cavité verticale émettant par la surface, connu sous le nom de VCSEL (**V**ertical **C**avity **S**urface **E**mitting **L**aser). Ce laser a été observé émettant à partir d'une structure GaInAs/In à une longueur d'onde de 1,18  $\mu\text{m}$  et capable de fonctionner en régime pulsé à une température de 77 °K. Il a fallu attendre l'année 1988 pour que l'équipe parvienne à fabriquer une structure à base de puits quantiques qui fonctionne en injection continue et à température ambiante.

### II.3 Différentes couches du VCSEL

La diode VCSEL est constituée de multiples couches qui remplissent chacune une fonction spécifique pour faire fonctionner le laser. Les couches typiques d'une diode VCSEL sont représenté dans le Tableau II.1 et la Figure II.1:

*Tableau II.1: Différentes couches d'une diode VCSEL*

Couche	Composition	Fonction
Substrat	Généralement de l'arséniure de gallium (GaAs)	Sert de base pour la croissance des autres couches et assure la rigidité mécanique du dispositif.
Réflecteur de Bragg distribué inférieur	Alternance de couches de matériaux à indices de réfraction élevés et bas (exemple: GaAs et AlAs).	Réfléchit la lumière vers le haut et vers la région active avec une très haute réflectivité.
Région active	Couches de InGaAsP et InP et des puits quantiques	Sert de zone où l'émission de photons a lieu suite à la recombinaison des électrons et des trous.
Réflecteur de Bragg distribué supérieur	Alternance de couches de matériaux à indices de réfraction élevés et bas, similaire aux DBR inférieurs mais avec une réflectivité légèrement inférieure (exemple: GaAs et AlGaAs).	Réfléchit la lumière vers la région active et permet l'émission de la lumière à travers cette couche.

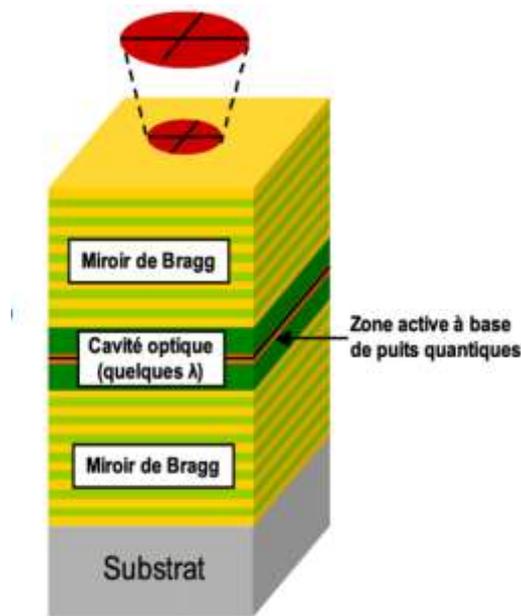


Figure II. 1: Structure d'une diode VCSEL [17]

## II.4 Principe de fonctionnement

Un VCSEL est composé de multiples couches de matériaux semi-conducteurs, formant une structure en miroir.

Pour le cas du laser VCSEL à injection électrique standard, on y trouve une zone active (appelée cavité) qui renferme des puits quantiques, et, qui est entourée de deux miroirs de Bragg distribués (DBR). Les miroirs sont remplis d'un dopage qui crée une diode PIN et qui injecte des électrons et des trous dans les puits quantiques où ils sont bloqués et se regroupent. Les photons générés effectuent de nombreux allers-retours dans la cavité. Lorsqu'une tension électrique est appliquée, elle génère un courant qui traverse les couches semi-conductrices, provoquant l'émission de photons. Ces derniers sont réfléchis entre les miroirs, créant ainsi une amplification et une émission de lumière laser cohérente.

Afin de réaliser l'effet laser, il est nécessaire que les pertes de la cavité et des miroirs soient inférieures au gain optique présent dans la cavité, ce qui nous pousse à utiliser des miroirs à haute réflexion [18].

### II.4.1 Structure

Les lasers VCSEL sont une source de lumière produite en grande quantité à partir de semi-conducteurs grâce à des techniques telles que l'épithaxie par faisceaux moléculaires ou de dépôts chimiques en phase vapeur métallo-organique. Ces techniques permettent de déposer des films sur des plaquettes d'arséniure de gallium. Ces lasers émettent une lumière cohérente à partir de leur surface.

Leur structure se compose de deux réflecteurs de Bragg distribué (DBR) très réfléchissants, en parallèle avec la surface du substrat. Ces deux réflecteurs sont formés de couches alternées d'indices de réfraction élevé et faible. Ils peuvent ainsi générer des réflectivités d'intensité. Les DBR sont souvent dopés pour former la jonction de la diode et sont utilisés pour générer un signal porteur qui stimule les émissions dans la région active (figure II.1).

Le faisceau lumineux traverse le milieu actif du laser qui renvoie la lumière et l'amplifie entre les miroirs réfléchissants pour permettre la propagation du laser, à un courant, où le gain est supérieur à la perte. Les lasers VCSEL ont un faible courant de seuil pour la propagation du laser car leur région de gain est plus courte que celle des autres lasers à semi-conducteurs. Ensuite, le DBR avec une réfractivité plus faible est découpé pour l'émission de lumière cohérente [19].

### II.4.2 Miroirs de Bragg

La fabrication des VCSELS nécessite la création de miroirs de Bragg performants pour atteindre le seuil de résonance. En effet, le faible gain par passage dans la cavité impose des exigences élevées sur la réflectivité des miroirs, généralement autour de 99,5%. Seuls les miroirs de Bragg ayant de faibles pertes internes peuvent atteindre de telles réflectivités. Ils offrent également l'avantage de pouvoir ajuster la réflectivité à une valeur souhaitée, contrairement aux miroirs métalliques.

Cependant, cette valeur de réflectivité est souvent limitée à des plages spectrales et angulaires restreintes. De plus, le principe de fonctionnement des miroirs de Bragg, basé sur des interférences constructives et destructives, induit des phénomènes parasites comme la pénétration de l'onde optique dans les couches qui les composent [21].

Le miroir de Bragg repose sur la création, à une certaine longueur d'onde, d'interférences constructives dans un milieu stratifié composé de manière alternée d'un milieu plus élevé ( $n_1$ )

et d'un milieu plus bas ( $n_2$ ). Ainsi, il est nécessaire que les épaisseurs optiques de chaque couche soient égales à  $\lambda_b/4$ . La période est connue sous le nom d'unité élémentaire et  $\lambda_b$  correspond à la longueur d'onde de résonance du miroir de Bragg dans le vide (les longueurs d'onde sont toujours fournies dans le vide). La figure II.2 illustre de manière schématique le fonctionnement d'un tel miroir lorsqu'il s'agit d'un matériau non-absorbant [22].

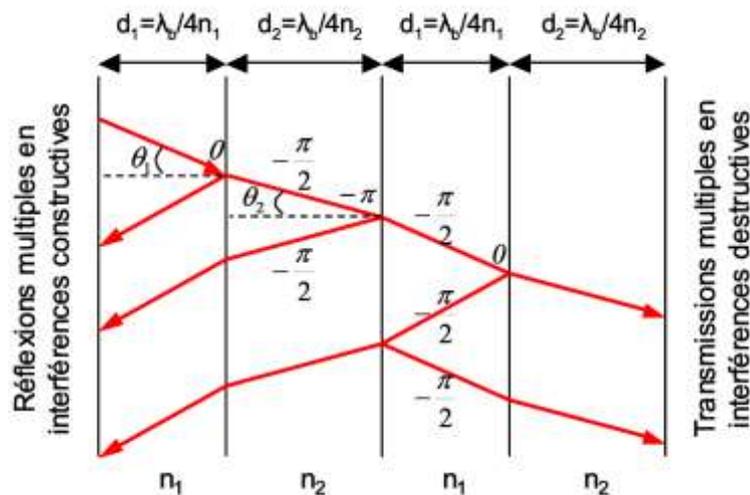


Figure II. 2: Schéma de fonctionnement du miroir de Bragg [22]

### II.4.3 Zone active

Le cœur actif d'un VCSEL est une zone essentielle où la lumière est générée par la recombinaison radiative des porteurs de charge (électrons et trous). Cette zone est composée de semi-conducteurs à large bande interdite, comme le GaAs (arséniure de gallium) ou d'alliages de GaInAs/AlGaAs, choisis pour leurs propriétés optiques et électroniques adaptées aux longueurs d'onde visées. Des puits quantiques peuvent être intégrés dans cette zone active, permettant ainsi de concentrer les porteurs de charge dans un espace restreint, ce qui accroît l'efficacité de la recombinaison radiative à l'origine de l'émission de lumière.

### II.4.4 Puits quantique

Un puits quantique, représenté sur la figure II.3, est une structure utilisée en physique de la matière condensée et en nanotechnologie. Il s'agit d'un type d'hétéro-structure qui est tout simplement fait de deux couches de barrières constituées de GaAs (arséniure de gallium) ou de GaAlAs (arséniure d'aluminium-gallium), entourant une fine couche de puits constituée de InGaAsP (phosphure d'arséniure d'indium et de gallium) [23].

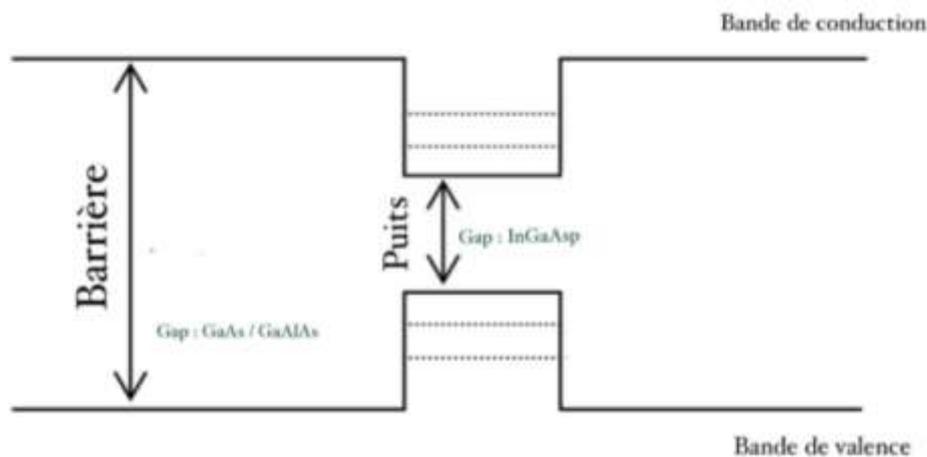


Figure II. 3: Schéma représentant un puits quantique [23]

## II.5 Matériaux utilisés dans les VCSELs

### II.5.1 Matériaux utilisés dans les miroirs de Bragg

Les différentes catégories de matériaux incluent les semi-conducteurs, les oxydes/semi-conducteurs et les diélectriques. Ces matériaux doivent avoir une grande réflectivité et un déphasage en réflexion de  $0$  ou  $\pi$  à la longueur d'onde du laser. Il est également important que ces matériaux aient une bonne conductivité thermique pour éviter une hausse de température excessive dans la zone active. Les matériaux sélectionnés déterminent la longueur d'onde d'émission du laser. Le tableau II.2 représenté ci-dessous résume les combinaisons de matériaux utilisés en fonction de la longueur d'onde [24].

Domaine spectral	$\lambda$ (nm)	semi-conducteur	diélectrique ou oxyde/semi-conducteur
UV	363	AlGaIn [23]	
Vert-bleu	496 520		SiO <sub>2</sub> /HfO <sub>2</sub> SiO <sub>2</sub> /TiO <sub>2</sub>
Rouge	650-690	AlGaAs/AlAs InAlP/In(AlGa)P	SiO <sub>2</sub> /NbO <sub>2</sub> O <sub>5</sub> InAlP/Al <sub>x</sub> O <sub>y</sub> (oxyde)
Rouge profond	760-780	AlGaAs/AlAs	
IR proche	840-850	AlGaAs/AlAs	SiO <sub>2</sub> /Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> SiO <sub>2</sub> /TiO <sub>2</sub>
	980	GaAs/AlAs GaAs/AlGaAs	SiO <sub>2</sub> /Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> ZnSe/CaF <sub>2</sub> Si/SiO <sub>2</sub> SiO <sub>2</sub> /TiO <sub>2</sub> SiO <sub>2</sub> /ZrO <sub>2</sub> MgF/ZnSe
	1300,1550	GaAs/AlGaAs In(GaAs)P/InP [26] AlGaAsSb/AlAsSb [12, 26, 27] AlGaInAs/AlInAs [26]	GaAs/Al <sub>x</sub> O <sub>y</sub> [22] Si/SiO <sub>2</sub> [24, 25] Si/CaF <sub>2</sub> ZnSe/MgF GaAs/Al <sub>x</sub> O <sub>y</sub> (oxyde) Si/MgO [25] Si/Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
IR moyen	2900	GaSb/AlAsSb	

Figure II. 4: Matériaux utilisés dans les miroirs de Bragg des VCSELs [24]

### II.5.2 Matériaux utilisés dans la zone active

La fréquence de la lumière émise par le laser varie en fonction du composant employé dans la région active. Le gap d'énergie entre les bandes de conduction et de valence détermine l'énergie et la longueur d'onde des photons émis par la stimulation. Les matériaux III-V sont principalement des semi-conducteurs utilisés à cet effet [23]. La figure II.5 illustre les matériaux employés ainsi que les bandes de longueurs d'onde correspondantes en  $\mu\text{m}$ .

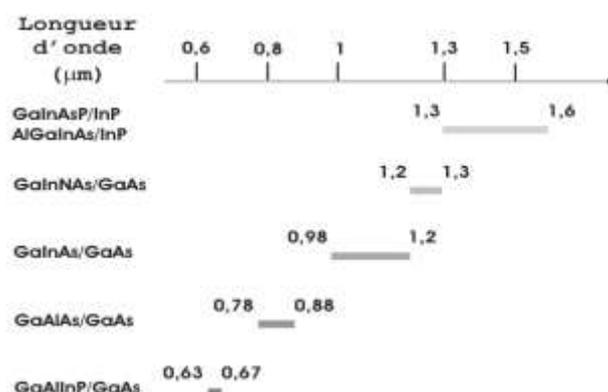


Figure II. 5: Longueurs d'ondes disponibles pour les VCSELs [24]

En faisant varier la proportion des composants des éléments ternaires, on modifie le gap d'énergie du constituant. On obtient ainsi pour chaque couple de matériaux, une bande de longueurs d'onde possibles.

## II.6 Différents modes d'un laser VCSEL

Un laser VCSEL utilise des principes similaires à d'autres types de lasers, mais est doté de particularités structurelles uniques. Les différents modes d'un laser VCSEL sont les suivants:

### II.6.1 Modes longitudinaux

Les modes longitudinaux d'un VCSEL sont les différentes fréquences auxquelles la cavité laser peut résonner. En raison de la courte longueur de la cavité (quelques micromètres), il y a une grande distance entre les modes longitudinaux. Les VCSEL sont généralement conçus pour émettre dans un seul mode longitudinal, grâce aux miroirs de Bragg distribués (DBR) qui limitent les fréquences de résonance et à la taille réduite de la cavité.

### II.6.2 Modes transversaux

Les modes transversaux correspondent aux variations du champ électrique perpendiculairement à la direction dans laquelle le laser se propage. Dans le cas des VCSELs, ces modes sont déterminés par la structure de la cavité, les dimensions du guide d'ondes et le profil de gain.

## II.7 Paramètres d'un VCSEL

### II.7.1 Conditions d'oscillation d'un VCSEL

Pour que l'oscillation laser ait lieu, il est nécessaire que la condition de seuil soit atteinte à chaque passage dans le milieu d'amplification. Cette condition est définie par l'équilibre entre le gain et les pertes optiques. Lorsque le gain de seuil  $g_{th}$  dépasse les pertes, on atteint la condition d'oscillation [25].

$$g_{th} = \alpha_p + \frac{1}{2L_{eff}} \ln \frac{1}{R_1 R_2} \quad (\text{II.1})$$

Où:

$R_1$  et  $R_2$  représentent respectivement la réflectivité du miroir dopé p et n

$\alpha_p$  les pertes de cavité en  $\text{cm}^{-1}$

$\ln$  logarithme népérien

et  $L_{eff}$  la longueur effective de la cavité

### II.7.2 Réflectivité

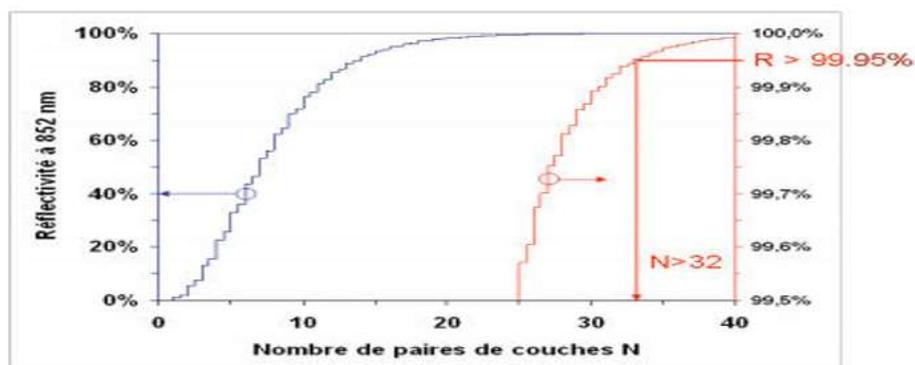
Il est possible de décrire l'indice de réflexion d'un miroir de Bragg noté  $R_{\max}$  donné par la relation (II.2) en se basant sur l'indice de réfraction des matériaux utilisés et le nombre de bicouches successives  $N$  [25].

$$R_{\max} = \left( \frac{1 - \frac{n_s}{n_0} \left( \frac{n_1}{n_2} \right)^{2N}}{1 + \frac{n_s}{n_0} \left( \frac{n_1}{n_2} \right)^{2N}} \right)^2 \quad (\text{II.2})$$

Où

$n_1$  et  $n_2$  représentent respectivement les indices du premier et deuxième matériau  
 $n_s$  l'indice du substrat  
 et  $n_0$  l'indice du milieu incident

En fonction du nombre de bicouches et des indices de réfraction, il est possible d'obtenir des taux de réflexion élevés. Si le contraste d'indices est important pour une valeur de réfraction faible, alors le nombre de couches nécessaires pour obtenir un fort coefficient de réflexion sera moindre. Ce comportement est illustré sur la figure II.6[25].



*Figure II. 6: Variation de la réflectivité du miroir de Bragg en fonction du nombre de paires de couches  $N$*

### II.8 Application des VCSELS

Depuis leur apparition il y a quatre décennies, les VCSELS ont été adoptés pour une multitude d'applications dans diverses industries et marchés.

Aujourd'hui, ces dispositifs sont omniprésents partout et l'une de leurs fonctions principales est de traiter les signaux, qu'il s'agisse de communication ou de détection.

La transmission des données par fibre optique repose essentiellement sur l'utilisation de VCSELs qui émettent des signaux dans la bande de 1310 nm à 1550 nm. Ces signaux sont transformés en ondes électromagnétiques qui peuvent être modulées pour transmettre des signaux de téléphone, de câble et d'internet. La performance de traitement de ces signaux est cruciale pour assurer une communication efficace.

Les VCSELs trouvent leurs applications dans divers domaines. On citera :

- les communications en fibre optique pour transmettre des données sur de longues distances et à grandes vitesses,
- les capteurs pour la reconnaissance faciale et au suivi des mouvements
- les systèmes d'aide à la conduite automobile pour mesurer des distances et des mouvements précis en temps réel

L'utilisation la plus familière des VCSELs est la souris laser de l'ordinateur. D'autres applications courantes incluent les imprimantes laser, les horloges atomiques miniatures, etc [26].

## II.9 Avantages des VCSELs

La conception verticale des VCSELs offre des avantages par rapport aux lasers à émission par le bord. Ces derniers ne peuvent être testés qu'après la fin du processus de dépôt et le découpage des éléments de la plaquette. Si des défauts sont détectés dans les couches minces ou la plaquette elle-même, cela signifie que le processus de fabrication est mauvais, et donc inutilisable.

Les VCSELs, quant à eux, peuvent être produits en masse en utilisant des méthodes de dépôt de couches minces de semi-conducteurs classiques, ce qui permet de réduire le coût de production. Tout au long de la production, il est possible de tester la plaquette entière et de détecter des problèmes à différents stades du processus. Cela permet de traiter des milliers de VCSELs en même temps sur une seule plaquette de trois pouces. Ainsi, l'efficacité de la production est améliorée et les coûts réduits.

Un avantage supplémentaire de la conception du VCSEL est la capacité à connecter plusieurs éléments en réseaux bidimensionnels pour augmenter la puissance de sortie. La plus grande ouverture de sortie entraîne une divergence plus faible du faisceau de sortie, ce qui améliore l'efficacité de couplage avec les fibres optiques.

Les VCSELs sont des dispositifs émetteurs de lumière qui ont la particularité d'être très puissants tout en étant peu gourmands en énergie. Ils ont une haute efficacité énergétique par rapport aux lasers traditionnels. Ce résultat est obtenu grâce à la présence des réflecteurs de Bragg distribués (DBR) qui réduisent le courant de seuil nécessaire pour faire fonctionner le

laser. En outre, l'accordabilité de la longueur d'onde des VCSELs est possible grâce à un ajustement précis de l'épaisseur des couches des réflecteurs dans la région active, qui est réalisé à l'aide de systèmes micro électromécaniques [26].

Un autre avantage majeur est leur taille très réduite, ce qui est fondamental pour les applications mobiles et les dispositifs intégrés.

## II.10 Défis et perspectives

Malgré leurs nombreux avantages, les VCSELs font face à des défis, notamment la gestion de la chaleur, la limitation en puissance et la stabilité à long terme.

L'obstacle à l'injection de courant élevé à travers les empilements de couches de quelques centaines de nanomètres d'épaisseur, qui ont une résistance élevée au passage du courant, limite la puissance optique générée par cette structure. Si la température des réflecteurs augmente trop, cela peut déformer les bicouches et endommager la réflectivité des miroirs. Les VCSELs sont donc limités en puissance à quelques milli watt.

Il est essentiel d'augmenter l'épaisseur de la zone active pour obtenir une puissance optique de sortie significative, mais cela entraîne l'apparition de modes transverses. Ces modes nécessitent l'utilisation de fibres multi-modes qui ont une plus grande atténuation que les fibres monomodes.

Les VCSELs ont généralement une configuration multimodale transverse. Bien qu'il y ait de grands espoirs que cette limitation soit bientôt surmontée, la création de VCSELs aux longueurs d'ondes télécom (1330 nm, 1550 nm) a été longtemps un défi majeur. En effet, les matériaux qui peuvent générer un effet laser à ces longueurs d'onde ne conviennent pas pour la production de réflecteurs de Bragg qui peuvent supporter un courant électrique suffisant.

Les recherches actuelles se concentrent sur l'amélioration de la fiabilité et la durabilité des VCSELs dans des environnements exigeants.

## II.9 Conclusion

Les VCSELs représentent une avancée majeure dans le domaine des semi-conducteurs et des technologies optiques. Leurs domaines d'application sont aussi variés que large. On les retrouve dans les domaines militaire, spatial, automobile, énergie, électronique grand public, télécommunications, médecine, etc. C'est pour cette raison qu'ils sont devenus aujourd'hui un enjeu stratégique pour l'économie et l'innovation.

En raison de leur haute efficacité énergétique, les VCSELs sont considérés comme une technologie plus économiques par rapport aux sources lumineuses traditionnelles. Cette caractéristique est particulièrement importante dans le contexte actuel de sensibilisation aux enjeux environnementaux et de recherche de solutions durables.

Le prochain chapitre est réservé aux travaux réalisés qui consistent après modélisation, à la simulation des caractéristiques électriques et optiques de la diode VCSEL dont la zone active est constituée du matériau InGaAsP/InP en utilisant le logiciel TCAD-SILVACO.

# **Chapitre III: Simulation et discussion des résultats**

## III.1 Introduction

Actuellement, la complexité croissante des dispositifs associée au coût élevé de l'optimisation empirique, fait de la simulation numérique l'outil le plus approprié pour la conception et l'analyse des composants électroniques tels que les lasers VCSELs.

A cet effet, le but de notre travail est d'utiliser le logiciel SILVACO Atlas afin de suggérer des pistes d'amélioration des performances de ces lasers tout en mettant en évidence l'effet de la couche active qui les constitue (puits et barrières en termes d'épaisseurs, nombre de puits et barrières).

Notre étude a pour but de simuler les caractéristiques électriques et optiques de la VCSEL dont la zone active est constituée du matériau InGaAsP/InP.

## III.2 Aperçu général sur le logiciel TCAD-SILVACO

### III.2.1 Introduction

**SILVACO** (**SIL**icon **VAL**ley **CO**rporation) est un logiciel de simulation utilisé pour la conception et la prédiction des performances des dispositifs électroniques à semi-conducteurs. Il permet de modéliser ces dispositifs avant leur fabrication, ce qui le rend extrêmement utile dans de nombreux projets de recherche.

Le logiciel SILVACO est composé d'une gamme d'outils regroupés sous l'appellation **VWF** (**V**irtual **W**afer **F**abrication). Les plus connus de ces outils, sont **ATLAS**, **ATHENA**, **DECKBUILD** et **TONYPLOT**.

### III.2.2 Principaux modules du logiciel SILVACO

#### **ATLAS**

ATLAS est spécialement conçu pour être utilisé comme un outil fondamental au sein de l'environnement de simulation VWF. Il offre des fonctionnalités générales pour la simulation des composants à semi-conducteurs, permettant ainsi de prédire avec précision leurs caractéristiques électriques en régime continu, transitoire ou fréquentiel. ATLAS utilise deux fichiers d'entrée pour les simulations:

- Le premier fichier est un fichier texte contenant des commandes spécifiques pour exécuter les simulations d'ATLAS.
- Le second fichier est un fichier structure qui représente le dispositif à simuler.

ATLAS génère trois types de sorties:

- **La sortie d'exécution:** Elle affiche la progression de la simulation ainsi que les messages d'erreur et d'avertissement rencontrés.
- **Le fichier journal:** Il enregistre les valeurs des tensions et des courants des terminaux.
- **Le fichier de solution:** Il stocke les données 2D et 3D qui représentent les valeurs des variables de la solution pour le dispositif étudié

### **ATHENA**

Il correspond au module de simulation et offre des fonctionnalités générales pour la simulation numérique et physique à deux dimensions du traitement des semi-conducteurs. Il sert aussi de base pour fournir des structures physiques en entrée à ATLAS. ATHENA traite la simulation comme une série d'événements successifs, et est souvent utilisé en parallèle avec ATLAS pour une simulation simultanée.

### **DECKBUILD**

DECKBUILD est un environnement interactif utilisé pour l'exécution et le développement de programmes de simulation. Il permet de définir le programme à travers des commandes spécifiques et offre une vaste bibliothèque d'exemples préliminaires qui couvrent différentes technologies et matériaux. Ceci permet à l'utilisateur de devenir rapidement productif en bénéficiant de ces exemples et de leurs applications.

### **TONYPLOT**

TONYPLOT est un outil dédié à la visualisation et à l'analyse des résultats des simulations réalisées avec SILVACO. Il offre des fonctionnalités complètes pour la visualisation des caractéristiques de sortie, telles que la structure des composants électroniques, les profils de dopage et les caractéristiques électriques.

### III.2.3 Ordres de commande du module Atlas

Les scripts Atlas sont écrits en langage de commande et exécutés à partir de la ligne de commande ou à partir d'un script DeckBuild comme donné dans le Tableau III.1.

*Tableau III. 1: Groupes de commande ATLAS avec les déclarations de base*

Groupe de commandes	Déclarations de base
Spécification de la structure	MESH REGION ELECTRODE DOPING
Spécification des paramètres des matériaux et modèles physiques	MATERIAL MODELS CONTACTS INTERFACE
Sélection de la méthode numérique	METHOD
Spécification de solution	LOG SOLVE LOAD SAVE
Analyse des résultats	EXTRACT TONYPLOT

#### III.2.3.1 Spécification de la structure

La spécification de structure est obtenue en identifiant le maillage, la région, les électrodes et les niveaux de dopage.

##### **MESH (Maillage)**

Le maillage est une série de lignes horizontales et verticales espacées entre elles. Dans notre étude, le maillage utilisé est à deux dimensions, par conséquent, seuls les paramètres x et y sont définis. Le choix du maillage dense ou fin détermine la précision de la simulation. La syntaxe générale pour définir le maillage est:

*X.MESH LOCATION=<VALUE> SPACING=<VALUE>*

*Y. MESH LOCATION=<VALUE> SPACING=<VALUE>*

## REGION

Pour définir les régions, le format utilisé est comme suit:

*REGION number=<integer><material\_type> / <position parameters>*

## ELECTRODE

La prochaine spécification de la structure correspond aux électrodes. Dans notre simulation, il n'y a que deux électrodes qui sont l'anode et la cathode. Le nombre d'électrodes qu'on peut définir avec SILVACO Atlas peut aller jusqu'à **50**. La syntaxe pour définir des électrodes est comme suit:

*ELECTRODE NAME=<electrodename><position\_parameters>*

## DOPING

Le dopage peut être de type n ou p. Le type de distribution peut être uniforme ou gaussien. La syntaxe de la déclaration d'Atlas est comme suit:

*DOPING <distribution type><dopant\_type> /<position parameters>.*

### III.2.3.2 Spécification des paramètres des matériaux et modèles physiques

Après la définition de la structure, la prochaine étape est la spécification des modèles des matériaux qui est subdivisée en: type de matériau, modèle, contact et interface.

## MATERIAL

Cette commande est utilisée pour définir les propriétés des matériaux dans les simulations de dispositifs électroniques. Pour la commande Material, on peut citer trois exemples suivants:

*MATERIAL MATERIAL=Silicon EG300=1.1 MUN=1200*

*MATERIAL REGION=4 TAUN0=3e-7 TAUP0=2e-5*

*MATERIAL NAME=base NC300=4e18*

## MODELS

Les modèles physiques se répartissent en cinq catégories: mobilité, recombinaison, statistiques des porteurs, impact ionisation et effet tunnel. La syntaxe de la déclaration du modèle est comme suit :

*MODELS <model flag><general parameter><model dependent parameters>*

Le choix du modèle dépend des matériaux choisis pour la simulation. L'exemple ci-dessous active plusieurs modèles:

*MODÈLES CONMOB, FLDMOB et SRH:*

- CONMOB est le modèle dépendant de la concentration.
- FLDMOB est le modèle de dépendance du champ électrique parallèle.
- SRH est le modèle de recombinaison de simulation des porteurs de charge

## CONTACTS

Le contact détermine les attributs de l'électrode. La syntaxe de contact est la suivante :

*CONTACT NUMBER=<n> / NAME=<ename> /ALL  
CONTACT NAME=anode current*

## INTERFACE

La déclaration d'interface est utilisée pour définir la densité de charge d'interface et la vitesse de recombinaison de surface aux interfaces entre les semi-conducteurs et les isolants. La syntaxe utilisée est comme suit:

*INTERFACE [<parameters>]*

### III.2.3.3 Sélection de la méthode numérique

Il existe plusieurs méthodes numériques pour trouver des solutions aux problèmes des dispositifs semi-conducteurs. Dans le logiciel Silvaco Atlas, il y'a trois types de techniques de résolution utilisées:

- La méthode découplée (Gummel): Elle résout les équations pour chaque inconnue en gardant toutes les autres inconnues constantes. Le processus est répété jusqu'à ce qu'il y ait une solution stable.
- La méthode entièrement couplée (Newton): Elle résout les équations pour toutes les inconnues simultanément.
- La méthode block: Elle résout certaines équations avec la méthode Gummel et d'autres avec la méthode de Newton.

#### **METHOD (GUMMEL-NEWTON)**

Dans ce cas, les équations sont résolues par la méthode Gummel. Si la convergence n'est pas atteinte, alors les équations doivent être résolues en utilisant la méthode de Newton.

#### **III.2.3.4 Spécification de Solution**

La spécification de solution se compose des commandes suivantes: log, solve, load, et save.

#### **LOG**

Log enregistre toutes les caractéristiques finales dans un fichier. Des données DC, transitoires ou AC sont générées par la déclaration Solve après l'enregistrement d'une déclaration Log. L'exemple suivant montre un exemple de la déclaration Log.

```
LOG OUTFILE=myoutputfile.log
```

L'exemple enregistre les informations de l'absorption dans le fichier myoutputfile.log.

#### **SOLVE**

La commande SOLVE suit l'instruction LOG. SOLVE effectue une solution pour un ou plusieurs points de polarisation. Un exemple de la commande SOLVE est comme suit:

```
Solvesubstrate= -0.2 vstep=-0.2 vfinal=-1 name=substrate
```

## LOAD et SAVE

La commande LOAD télécharge les solutions précédentes à partir de fichiers comme estimation initiale à d'autres points de polarisation. L'instruction SAVE entre toutes les informations d'un point de nœud dans un fichier de sortie. Un exemple des commande Load et save est:

```
SAVE OUTF=SOL.STR
```

Dans ce cas, les informations sont enregistrées dans le fichier SOL.STR après une commande SOLVE. Puis, dans une simulation différente, SOL.STR peut être chargé comme suit :

```
LOAD INFILE=SOL.STR
```

### III.2.3.5 Analyse des résultats

Une fois qu'une solution ait été trouvée pour un problème de dispositif semi-conducteur donné, les informations peuvent être affichées graphiquement avec l'instruction TONYPLOT. En outre, les paramètres du dispositif peuvent être extraits avec la commande EXTRACT.

Dans l'exemple ci-dessous, l'instruction EXTRACT obtient la caractéristique absorption. Ces informations sont enregistrées dans le fichier indice.dat. Ensuite, TonyPlot trace le graphe reliant les informations contenues dans le fichier indice.dat.

- *EXTRACT* NAME="iv" curve (v."anode", I."cathode") / OUTFILE="indice.dat"
- *TONYPLOT* indice.dat

## III.3 Simulations réalisées avec le logiciel SILVACO

Le but de cette partie est d'étudier et de simuler une diode VCSEL en utilisant le logiciel SILVACO Atlas afin de mettre en évidence l'effet des paramètres de la structure (couche active, épaisseur de puits et barrières, nombre de puits, ...) et des matériaux utilisés (fraction molaire...).

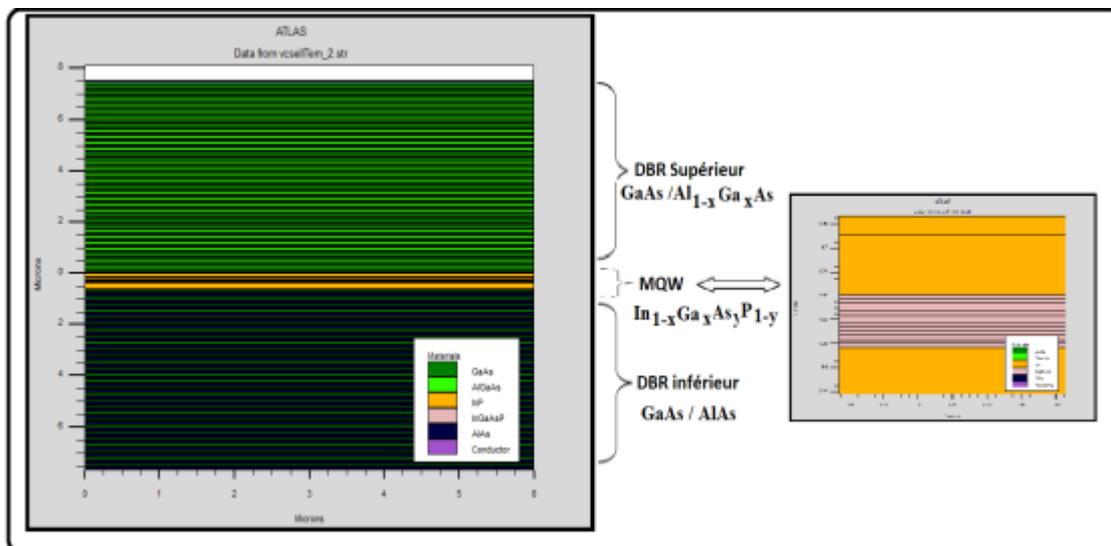
### III.3.1 Conception et présentation de la diode VCSEL étudiée

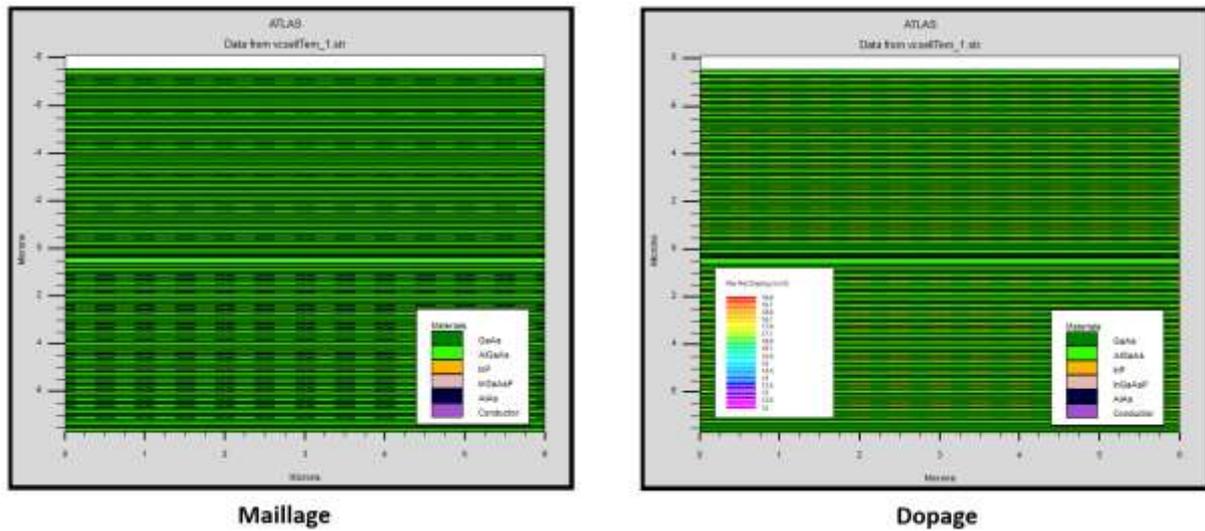
Avant d'aboutir aux objectifs visés dans ce mémoire, il a fallu écrire un code de calcul en utilisant le logiciel SILVACO, qui prend en charge la spécification de la structure

VCSEL souhaitant sa simulation en identifiant les dimensions, le nombre de couches, le maillage, les régions, les électrodes et les niveaux de dopage.

La Figure III-1 illustre la structure simulée de la diode laser VCSEL avec le logiciel SILVACO -ATLAS. Cette diode est constituée d'une région active composée de 6 puits multi-quantiques de  $\text{In}_{0.76}\text{Ga}_{0.24}\text{As}_{0.82}\text{P}_{0.18}$ , d'épaisseur 5,5 nm; et 7 barrières  $\text{In}_{0.48}\text{Ga}_{0.52}\text{As}_{0.82}\text{P}_{0.18}$  d'épaisseur 8 nm et deux DBR (Distributed Bragg Reflectors) qui correspondent au miroir supérieur et inférieur. Les MQW sont intégrés dans des couches d'espacement InP qui ont été prolongées par de fines couches de GaAs. Au-dessus de chaque couche se trouve un miroir pour augmenter la longueur d'onde d'émission.

Les deux DBR sont constitués de couches alternées à indice de réfraction élevé d'une valeur de 3.38 et faible d'une valeur de 3.05 de  $\text{GaAs}/\text{Al}_{0.33}\text{Ga}_{0.67}\text{As}$ . Ces couches forment le miroir supérieur de type p à 30 périodes alors que le miroir inférieur de type n est formé de 28 périodes de couches  $\text{GaAs}/\text{AlAs}$  d'indice de réfraction respectivement égales à 3.35 et 2.89.





*Figure III. 1: Structure, maillage- Dopage d'un laser VCSEL simulé par SILVACO-Atlas*

Une fois assurés de l'implantation et de la validation du modèle de la diode laser VCSEL désirée, nous avons simulé ses caractéristiques électriques et optiques.

### III.3.2 Analyse des résultats obtenus

#### III.3.2.1 Influence des paramètres MQW

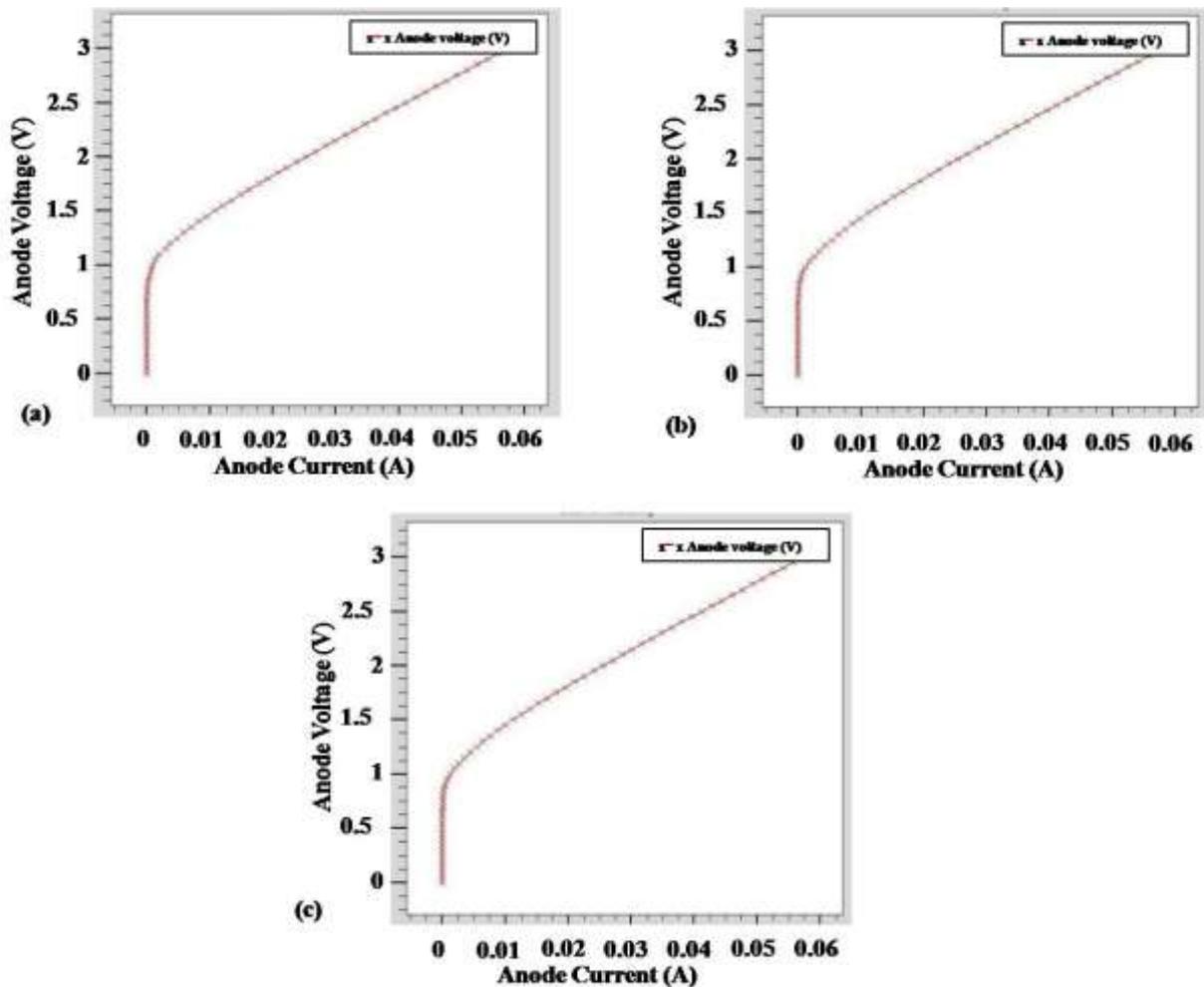
Dans cette partie, notre méthodologie est basée sur l'étude de l'influence des paramètres **MQW** (en anglais **M**ulti **Q**uantum **W**ell ou en français multi-puits quantiques) qui sont l'épaisseur du puits et l'épaisseur de la barrière. La structure VCSEL étudiée est supposée être exposée à des photons qui ont une énergie proche de 0.8 eV et dans un milieu à température ambiante de 300 °K.

Dans un premier temps, nous avons étudié l'effet du puits quantique. Pour cela, nous avons varié l'épaisseur du puits et on a opté pour les épaisseurs de 2.5nm, 5.5nm et 8.5 nm tout en maintenant la barrière du puits quantique à une épaisseur de 8 nm et le nombre de puits quantique à 6.

En deuxième lieu, nous avons varié l'épaisseur de la barrière des puits quantiques en choisissant l'épaisseur de 5nm, 7nm et 9nm tout en maintenant l'épaisseur des puits à 5.5 nm et leur nombre à 6.

### III.3.2.2 Effet de l'épaisseur du puits

Nous avons varié l'épaisseur du puits quantique notée  $d_{\text{puits}}$  en prenant comme valeurs 2.5 nm, 5.5nm et 8.5 nm afin de déduire et voir son influence sur les performances de la diode VCSEL étudiée. La figure III.2 représente la caractéristique électrique, tension en fonction du courant.



**Figure III. 2:** Caractéristique électrique V-I:  
(a):  $d_{\text{puits}}=2.5\text{nm}$ ; (b):  $d_{\text{puits}}=5.5\text{nm}$  (c);  $d_{\text{puits}}=8.5\text{nm}$

Sur cette figure qui illustre la caractéristique électrique V-I simulée pour différentes épaisseurs du puits, nous observons que plus la tension est supérieure à la tension de seuil, le courant  $I$  augmente pour toutes les épaisseurs de puits quantique. L'allure de la caractéristique V-I suit la forme mathématique suivante:

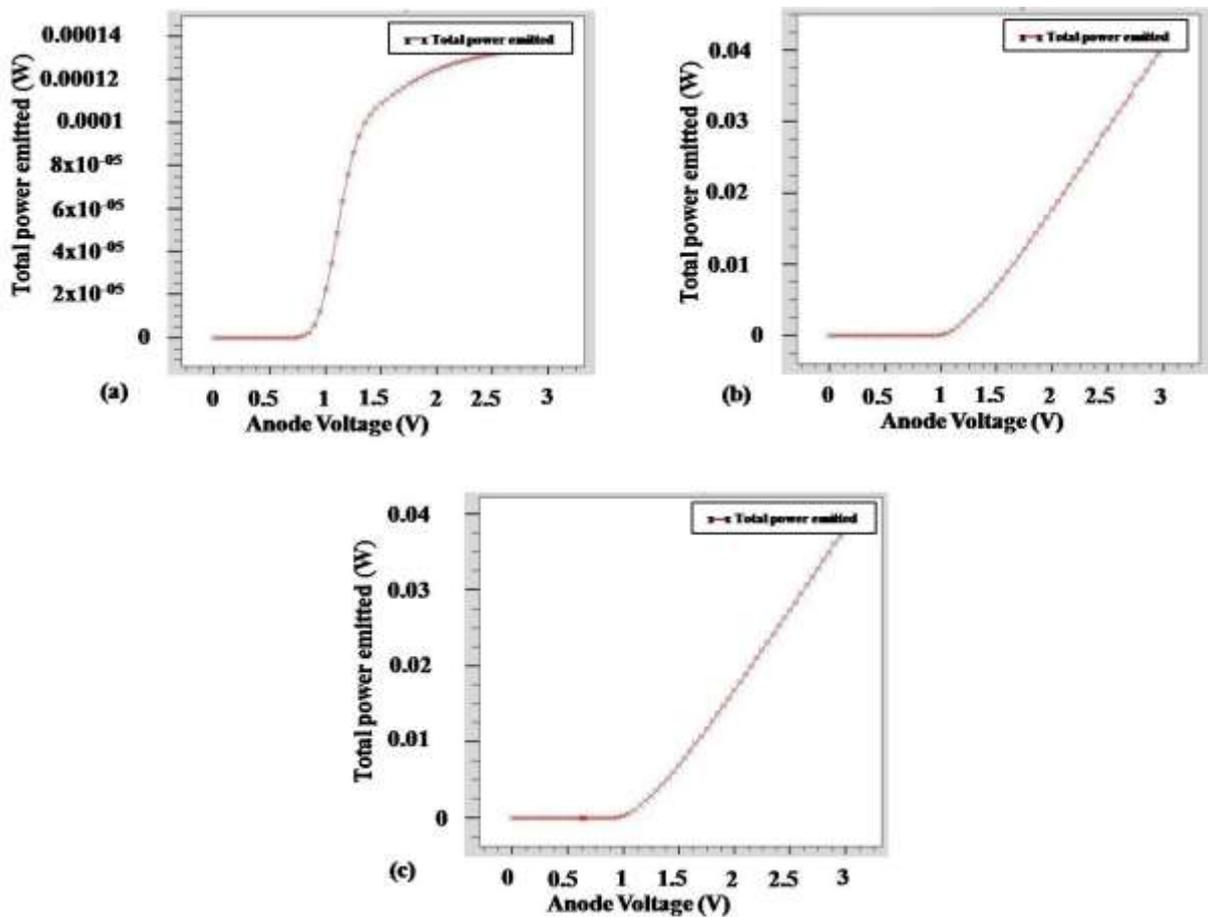
$$V \approx V_{\text{seuil}} + R_S I$$

Où  $V_{\text{seuil}}$  est liée aux énergies quasi-Fermi (équivalent à  $\sim 0,9$  V),  
et  $R_S$  est la résistance série différentielle

Nous notons que le courant atteint une valeur de 56 mA pour ( $d_{\text{puits}}=2.5$  nm) et la valeur 57 mA pour ( $d_{\text{puits}}=5.5$  nm) et ( $d_{\text{puits}}=8.5$  nm).

La Figure III.3 montre l'augmentation de la puissance optique émise avec l'augmentation de la tension et bien évidemment au-delà de la tension de seuil.

La puissance optique émise atteint des valeurs crêtes allant de 0.13 mW ( $d_{\text{puits}}=2,5$ nm) jusqu'à 40.66mW ( $d_{\text{puits}}=5,5$  nm) et 38.10 mW ( $d_{\text{puits}}=8,5$ nm).



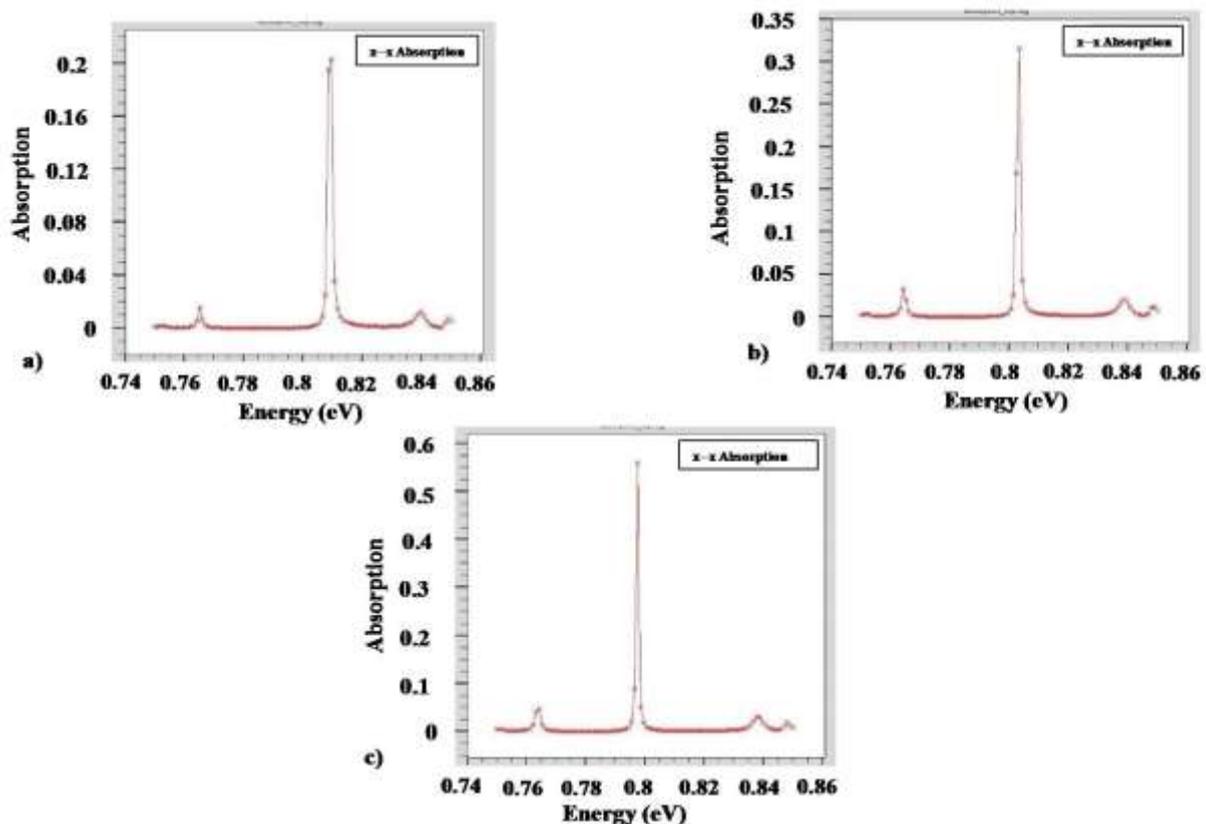
**Figure III. 3:** Caractéristique électrique P-V:  
(a)  $d_{\text{puits}} = 2.5$ nm (b):  $d_{\text{puits}} = 5.5$  nm, (c):  $d_{\text{puits}} = 8.5$  nm

A travers ces résultats, nous déduisons qu'une fois l'épaisseur du puits quantique est augmentée, la séparation entre les niveaux d'énergie quantique dans le puits diminue. Ce qui fait que le taux de recombinaison augmente à son tour pour produire des densités de photons plus élevées, ce qui contribue à l'augmentation de la puissance optique émise.

Pour mieux comprendre le fonctionnement de la diode VCSEL, nous avons représentées ses caractéristiques optiques qui sont: l'absorption, la réflectivité et la transmission. Sur les différents graphes, ces deux dernières caractéristiques sont données en pourcentage  $\times 0.01$

### ➤ Absorption

D'après la figure III.4, l'absorption est minimale et a une valeur égale à 0.203 dans le cas correspondant à  $d_{\text{puits}}=2.5\text{nm}$ . L'absorption atteint une valeur de 0.316 pour une épaisseur  $d_{\text{puits}}=5.5\text{nm}$  et une valeur de 0.559 pour une épaisseur  $d_{\text{puits}}=8.5\text{nm}$ . On constate que l'absorption est proportionnelle à l'épaisseur du puits.

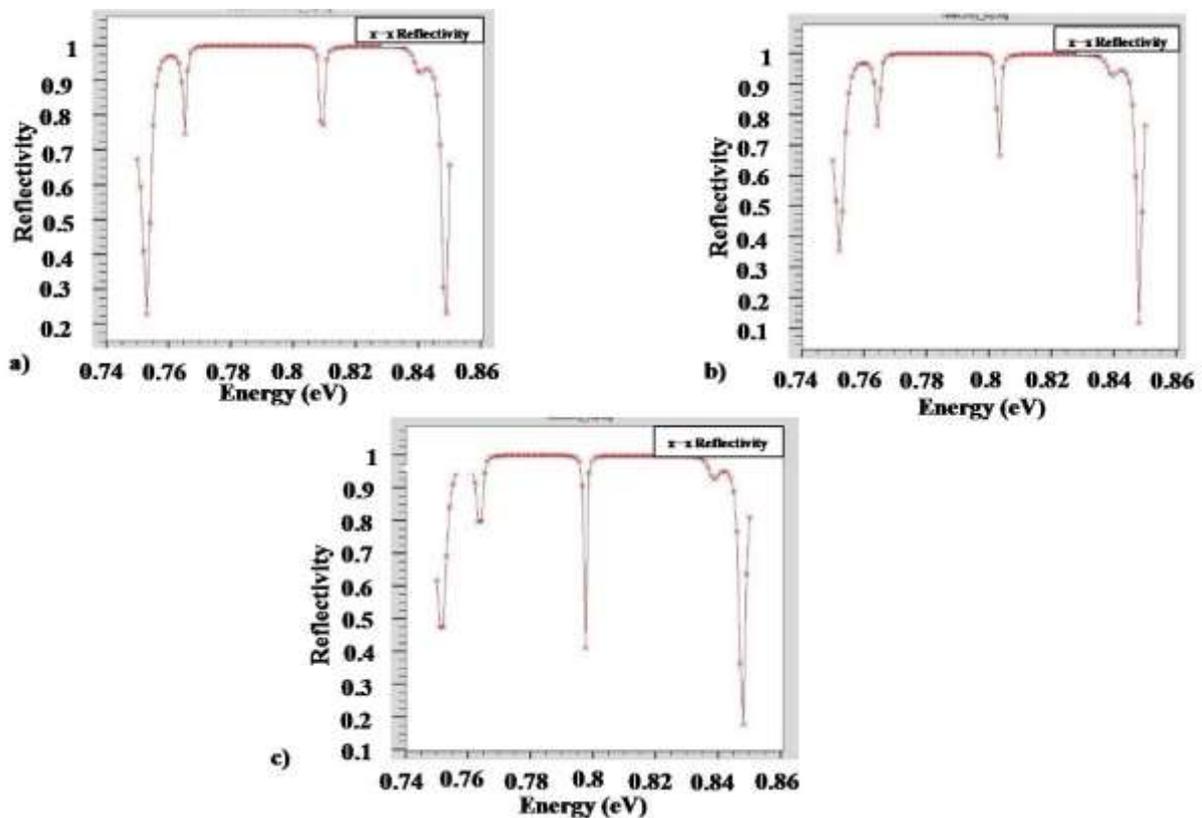


**Figure III. 4:** Variation de l'absorption en fonction de l'énergie (eV):  
 (a):  $d_{\text{puits}} = 2.5 \text{ nm}$ , (b):  $d_{\text{puits}} = 5.5 \text{ nm}$ , (c):  $d_{\text{puits}} = 8.5 \text{ nm}$

### ➤ Réflectivité

Les effets de l'épaisseur des puits quantiques sur la réflectivité de la diode étudiée sont représentés sur la Figure III.5.

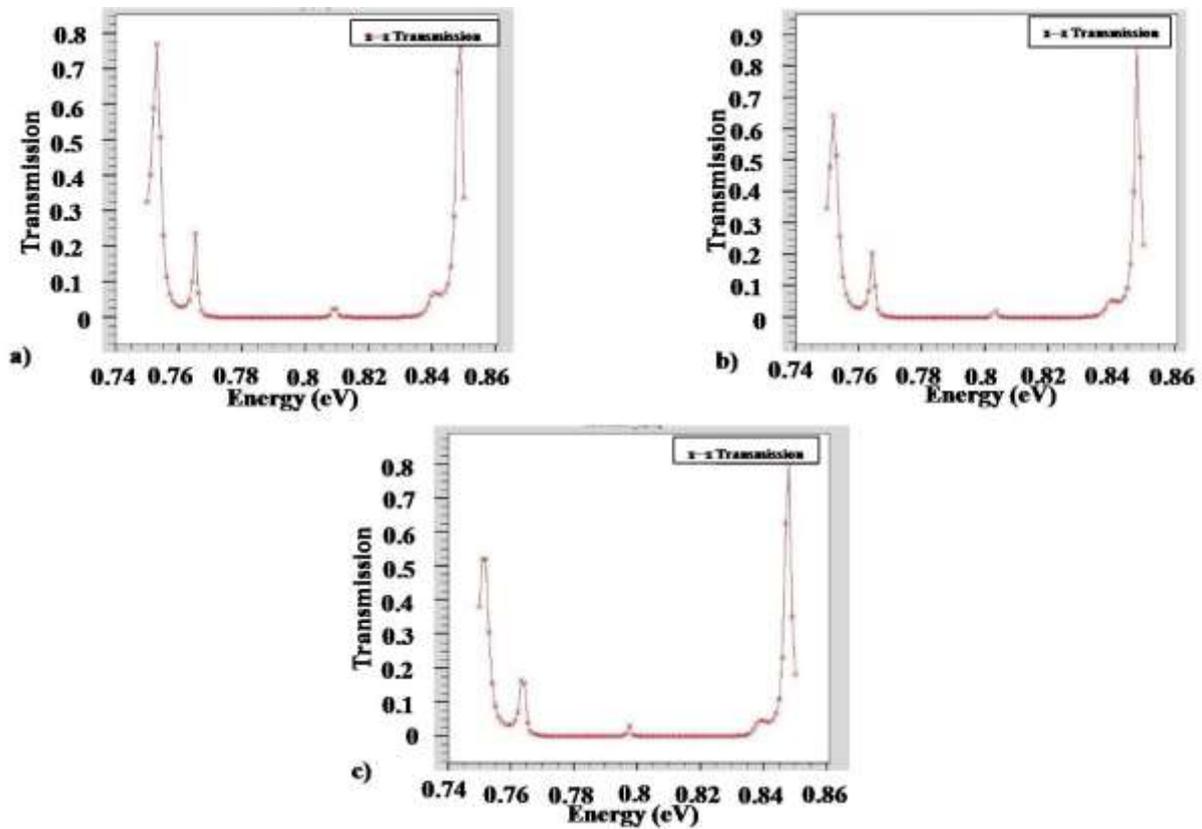
Sur cette figure, on voit bien que la valeur de la réflectivité correspondante à l'énergie du photon (eV) est meilleure dans le cas (a) où  $d_{\text{puits}}=2.5\text{nm}$ . On enregistre une valeur de 0.78 qui correspond à 78% de réflectivité.



**Figure III. 5:** Variation de la réflectivité en fonction de l'énergie (eV):  
 (a)  $d_{\text{puits}} = 2.5 \text{ nm}$ , (b):  $d_{\text{puits}} = 5.5 \text{ nm}$ , (c):  $d_{\text{puits}} = 8.5 \text{ nm}$

### ➤ Transmission

D'après la Figure III.6, on voit bien que la valeur de la transmission correspondante à l'énergie du photon est plus grande dans le troisième cas correspondant  $d_{\text{puits}}=8.5\text{nm}$ . On enregistre une valeur de transmission égale à 0.03 correspondant à 3%.



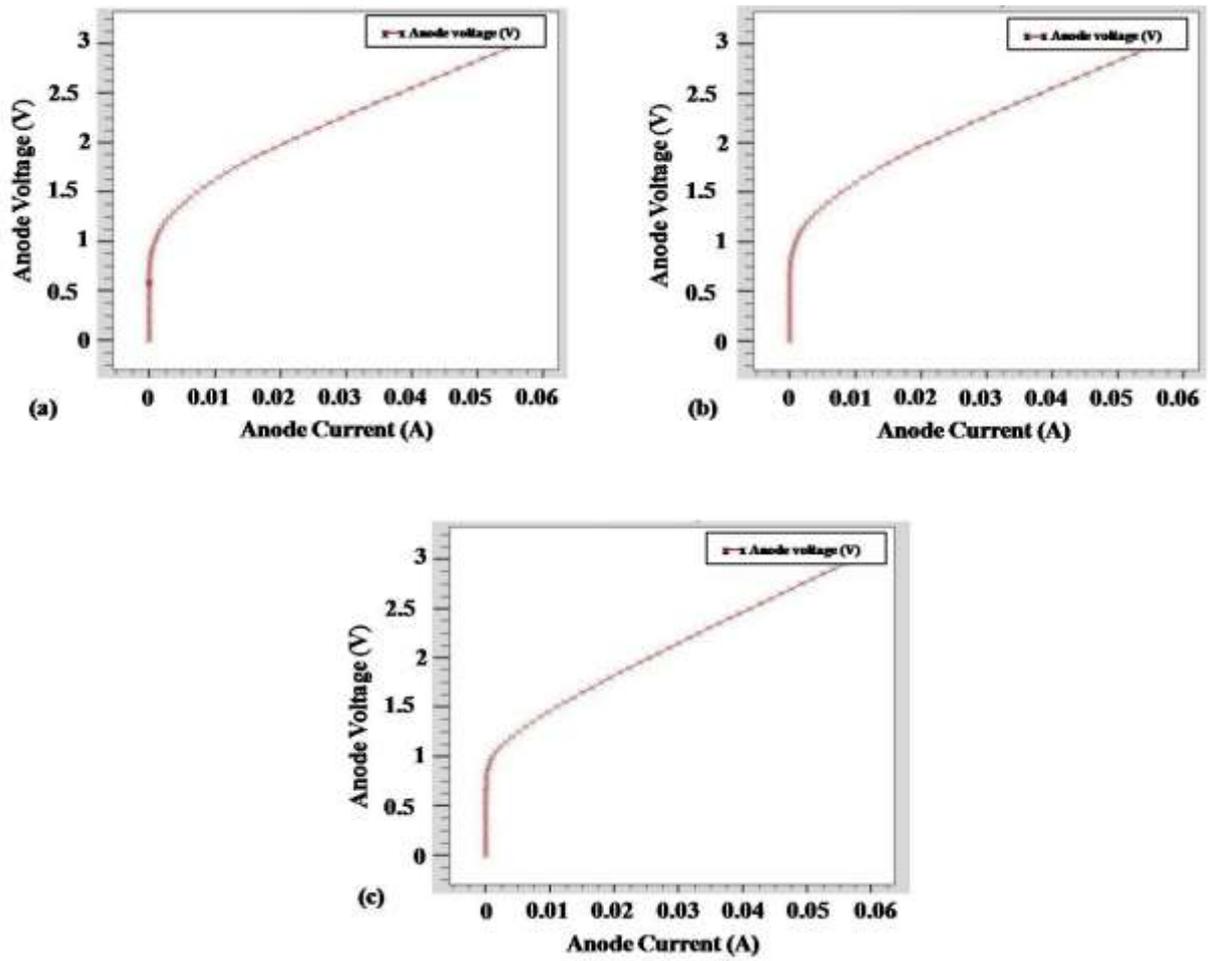
**Figure III. 6:** Variation de la transmission en fonction de l'énergie (eV):  
 (a):  $d_{\text{puits}} = 2.5 \text{ nm}$ , (b):  $d_{\text{puits}} = 5.5 \text{ nm}$ , (c):  $d_{\text{puits}} = 8.5 \text{ nm}$

### III.3.2.3 Effet de l'épaisseur des barrières

Pour cette étude, nous avons varié l'épaisseur de la barrière des puits quantiques en prenant comme valeurs 5nm, 7nm et 9nm tout en maintenant l'épaisseur des puits à 5.5 nm et le nombre de puits quantiques à 6. Les résultats de la simulation sont représentés sur les figures allant de III.7 à III.11.

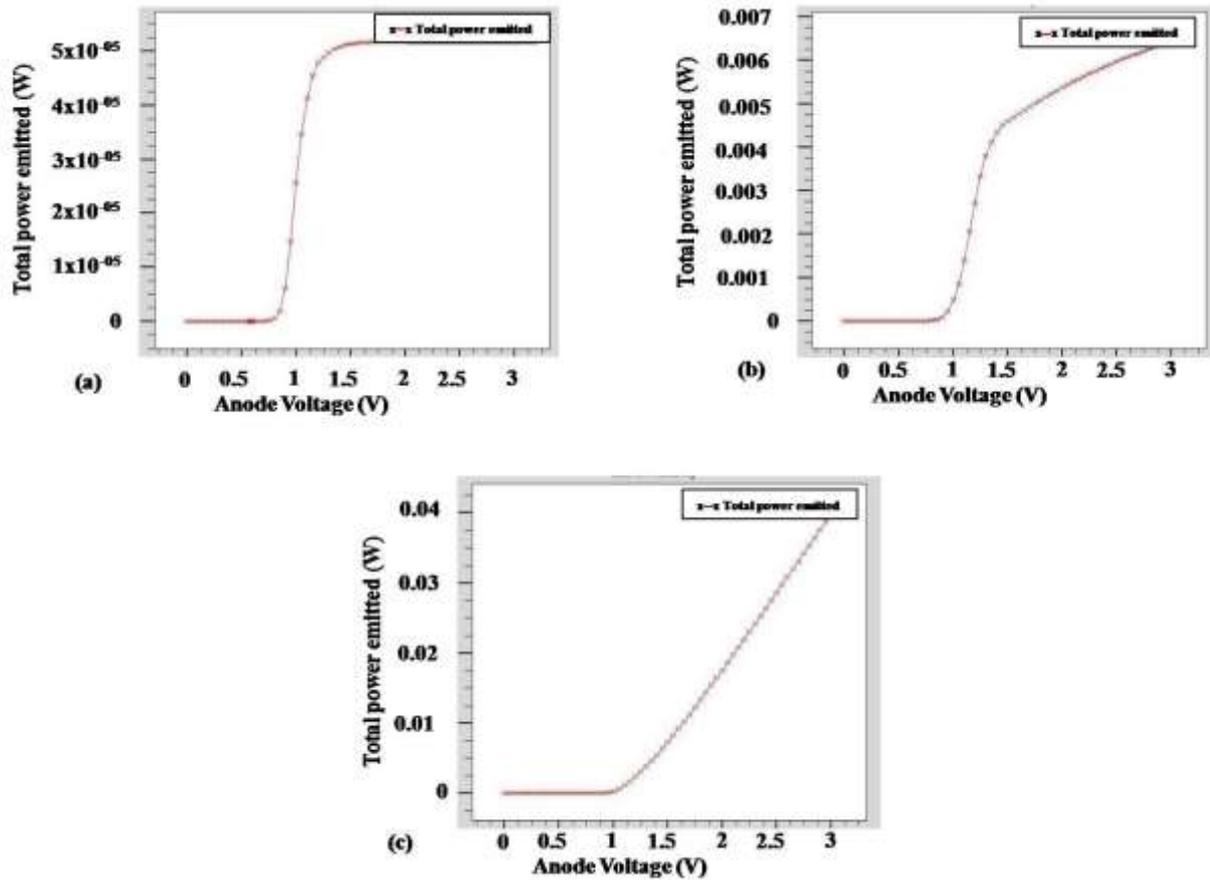
Ces figures montrent l'effet de l'épaisseur de barrière sur les caractéristiques électriques et optiques: la tension-courant du VCSEL (V-I), le courant de puissance optique (P-I), l'absorption, la réflectivité et la transmission.

Sur la figure III.7, nous pouvons noter qu'en dessous de la tension de seuil, on a absence d'émission laser. Au-delà de la tension de seuil, le courant de la diode VCSEL augmente avec l'épaisseur barrière.



**Figure III. 7:** Caractéristique électrique V-I :  
 (a)  $d_{\text{Barrière}} = 5 \text{ nm}$ , (b)  $d_{\text{Barrière}} = 7 \text{ nm}$ , (c):  $d_{\text{Barrière}} = 9 \text{ nm}$

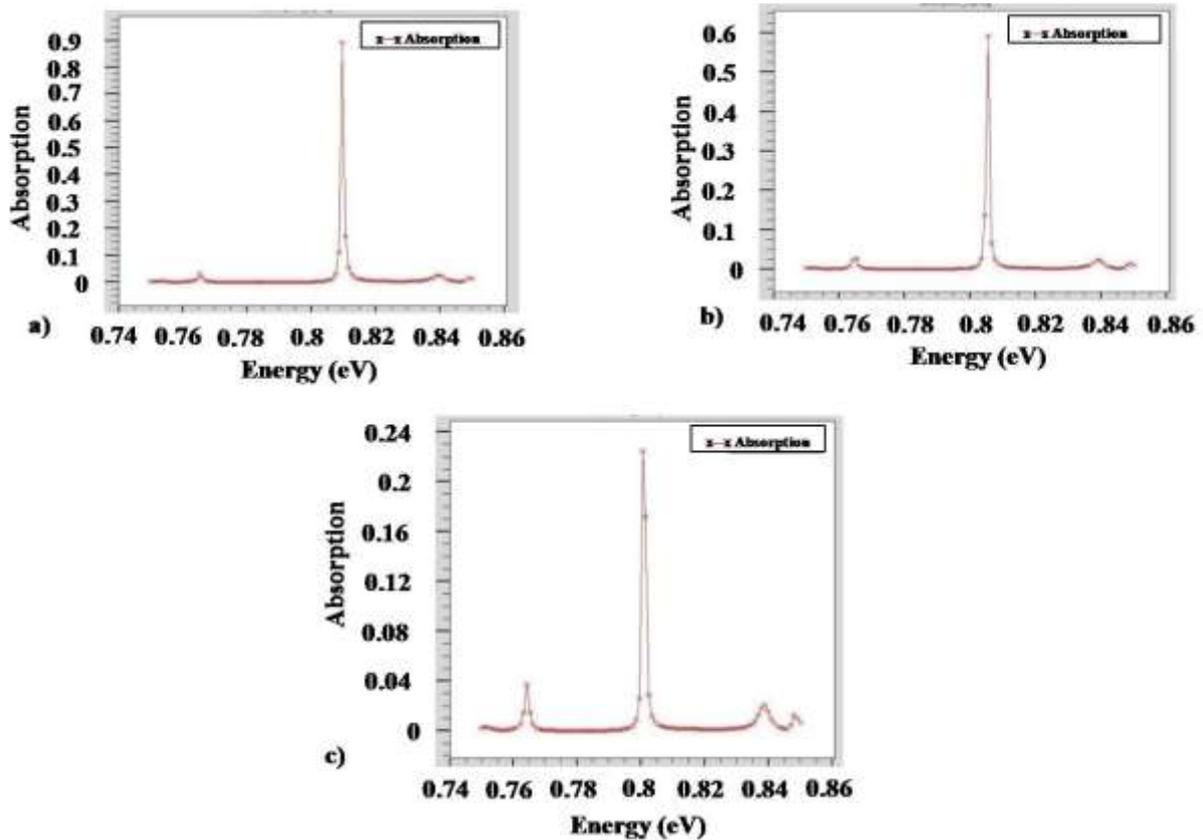
Sur la figure III.8, pour  $V=2.5\text{V}$ , nous pouvons noter une augmentation de la puissance émise à partir de  $0.051 \text{ mW}$  pour  $d_{\text{Barrière}}=5\text{nm}$ ,  $0.64 \text{ mW}$  pour  $d_{\text{Barrière}}=7\text{nm}$ , et  $39.83 \text{ mW}$  pour  $d_{\text{Barrière}}=9\text{nm}$ .



**Figure III. 8:** Caractéristique électrique P-V:  
 (a):  $d_{\text{Barrière}} = 5\text{nm}$ , (b):  $d_{\text{Barrière}} = 7\text{nm}$ , (c):  $d_{\text{Barrière}} = 9\text{nm}$

### ➤ Absorption

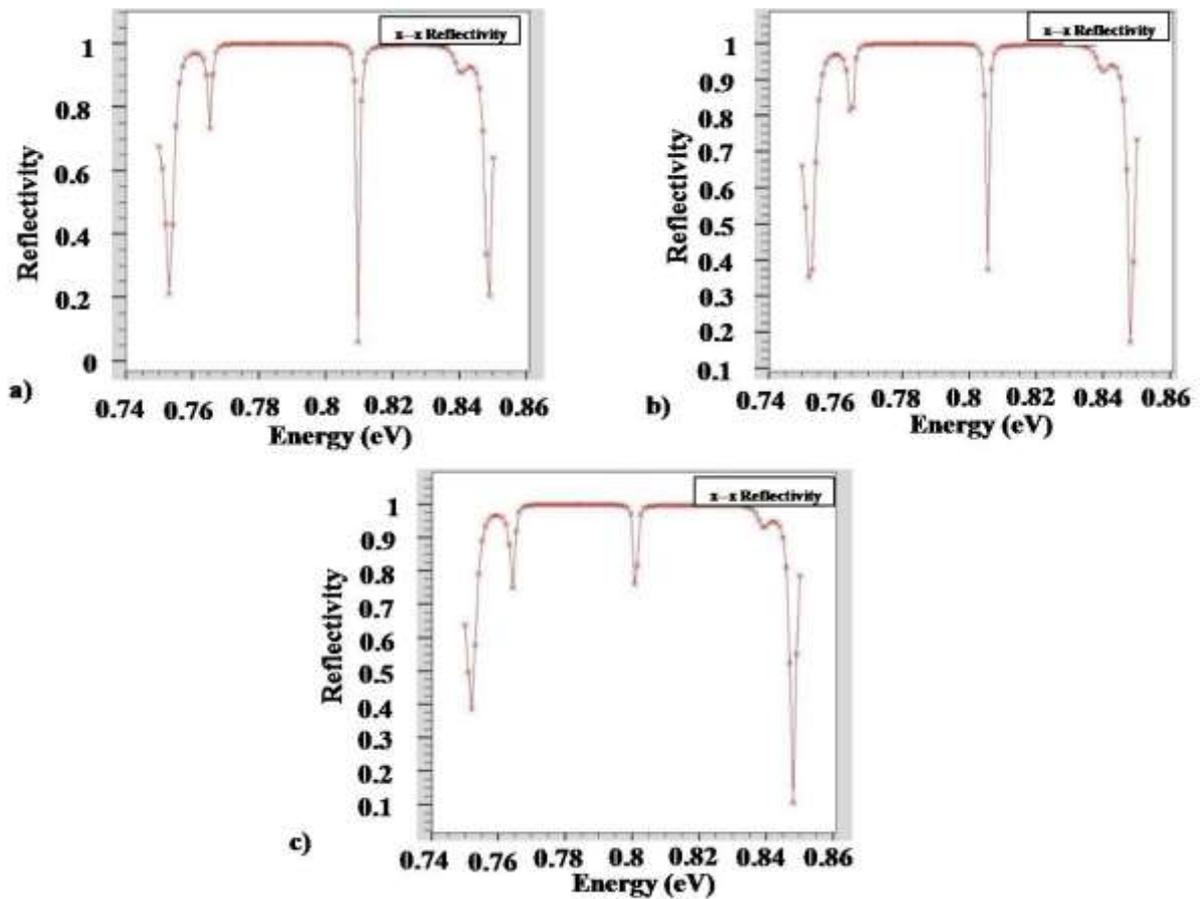
D'après les résultats obtenus présentés sur la figure III.9, on voit bien que l'absorption est importante dans le cas où l'épaisseur de la barrière  $d_{\text{Barrière}}=5\text{nm}$ . Elle est plus petite avec une valeur de 0.224 pour le cas où  $d_{\text{Barrière}}=9\text{nm}$ . On constate que l'absorption diminue quand l'épaisseur augmente.



**Figure III. 9:** Variation de l'absorption en fonction de l'énergie (eV):  
 (a):  $d_{\text{Barrière}} = 5\text{nm}$ , (b):  $d_{\text{Barrière}} = 7\text{ nm}$ , (c):  $d_{\text{Barrière}} = 9\text{nm}$

### ➤ Réflectivité

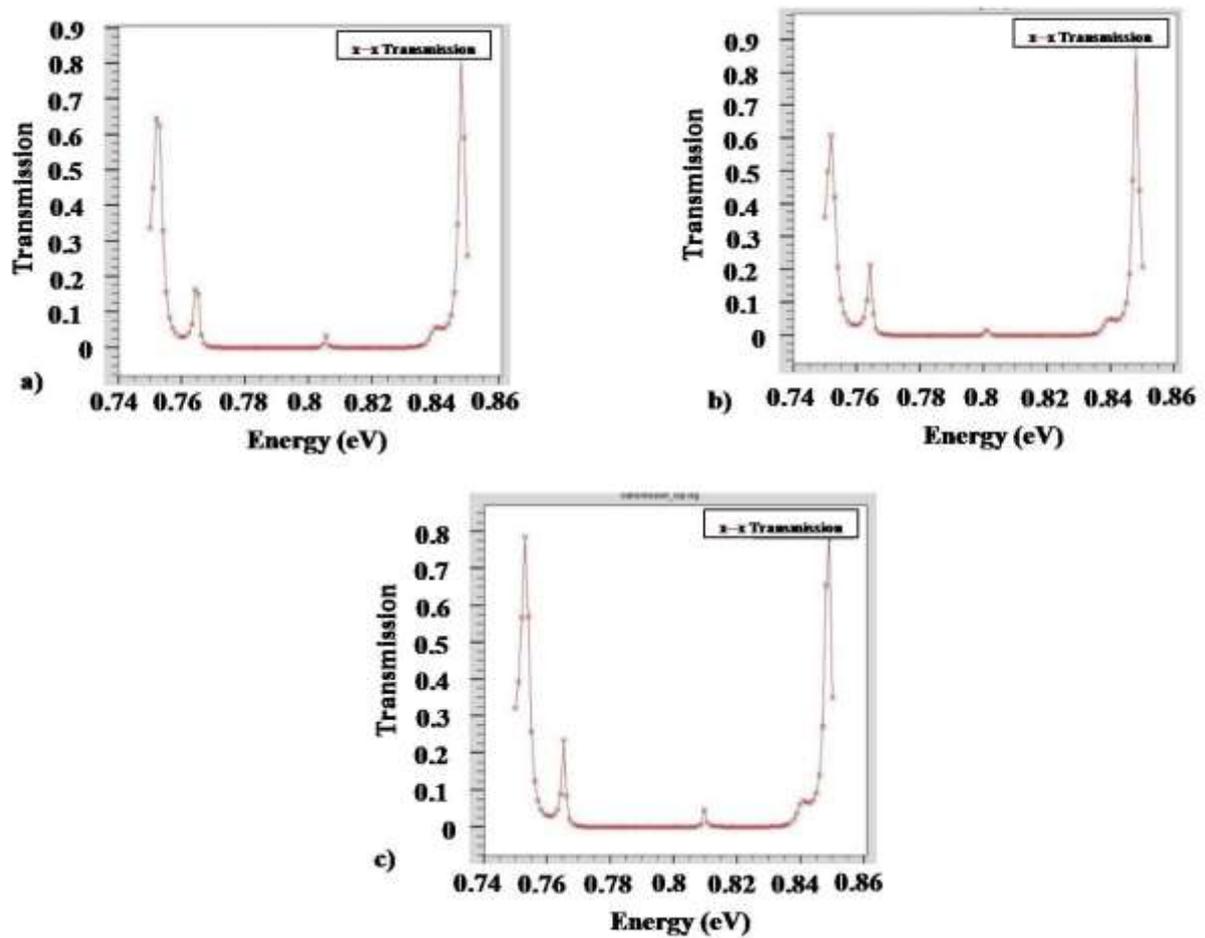
La figure III.10 représente la variation de la réflectivité pour trois différentes épaisseurs de barrière. Nous observons que le cas correspondant à  $d_{\text{Barrière}} = 9\text{nm}$  donne une grande réflectivité égale à 0.76 (76%) pour une énergie du photon équivalente à 0.8 eV par rapport aux autres épaisseurs étudiées.



*Figure III. 10: Variation de la réflectivité en fonction de l'énergie (eV):  
 (a):  $d_{\text{Barrière}} = 5 \text{ nm}$ , (b):  $d_{\text{Barrière}} = 7 \text{ nm}$ , (c):  $d_{\text{Barrière}} = 9 \text{ nm}$*

➤ **Transmission**

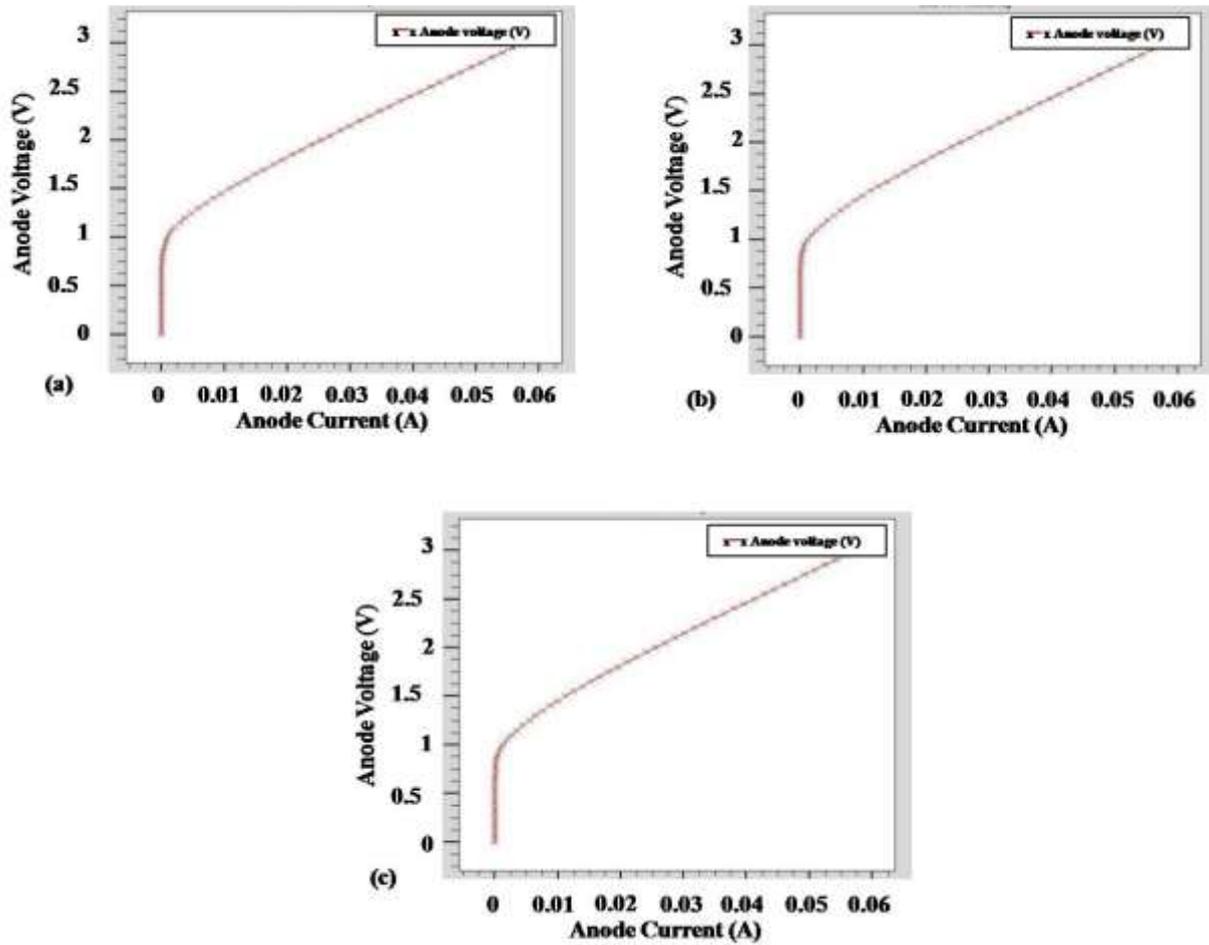
La Figure III.11 illustre la variation de la transmission pour trois épaisseurs de barrières. Nous observons que l'épaisseur de barrière  $d_{\text{Barrière}}=7 \text{ nm}$ , pour une énergie du photon équivalente à 0.8 eV présente la plus grande valeur de transmission égale à 0.034 (3.4%).



**Figure III. 11:** Variation de la transmission en fonction de l'énergie (eV):  
 (a):  $d_{\text{Barrière}} = 5 \text{ nm}$ , (b):  $d_{\text{Barrière}} = 7 \text{ nm}$ , (c):  $d_{\text{Barrière}} = 9 \text{ nm}$

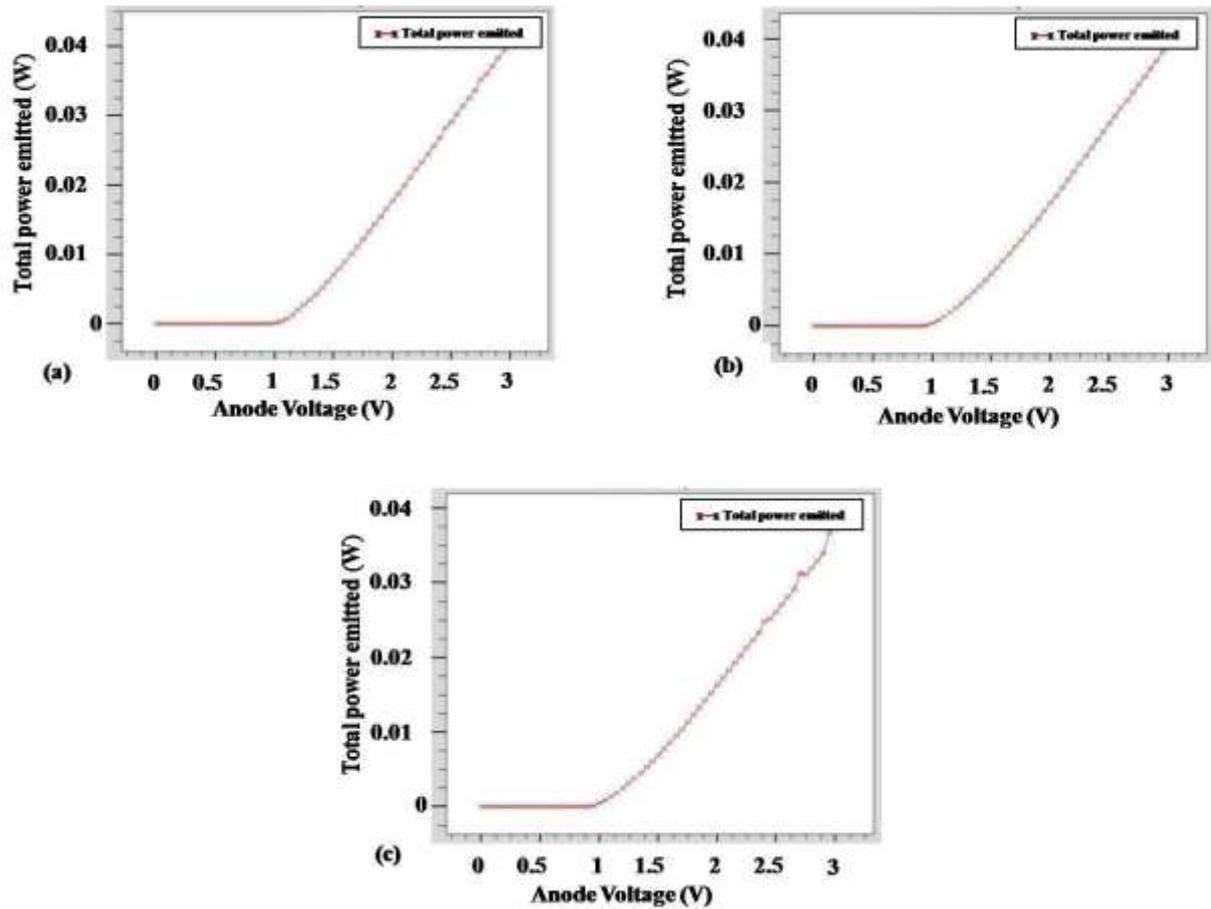
### III.3.2.4 Influence du nombre de puits et de barrières

Sur la figure III-12 illustrant la caractéristique V-I, on note que lorsque la tension augmente au-delà la tension de seuil, le courant électrique augmente aussi pour les trois cas.



**Figure III. 12:** Caractéristique électrique V-I d'une VCSEL:  
 (a): 6 puits/7 barrières, (b): 7 puits/8 barrières, (c): 8 puits/9 barrières

Sur la figure III.13, nous notons que la puissance optique augmente avec l'augmentation de la tension de fonctionnement. Cela est due à l'augmentation du taux de recombinaison, qui à son tour, favorise la production de photons.



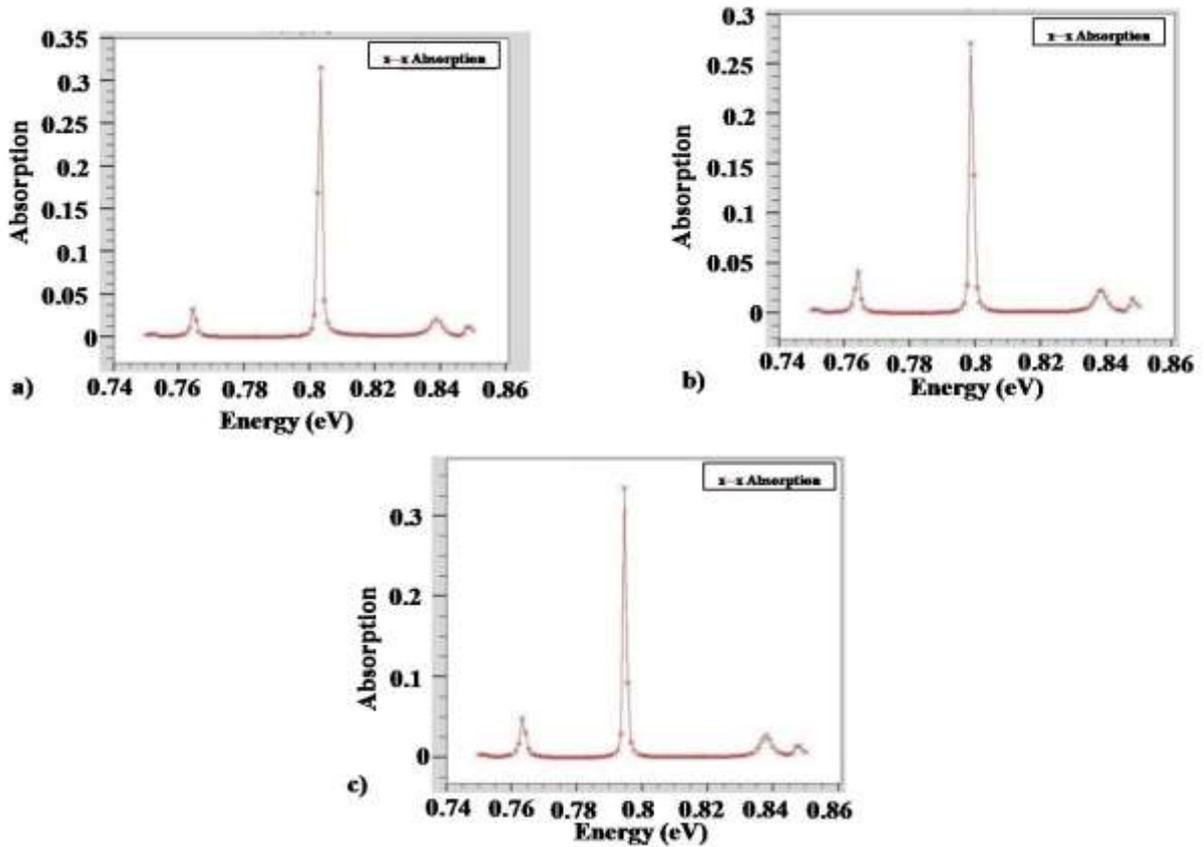
**Figure III. 13:** Caractéristique électrique P-V: Puissance totale émise en fonction de la tension:  
 (a): 6 puits/7 barrières, (b): 7 puits/8 barrières, (c): 8 puits/9 barrières

Les caractéristiques optiques qui sont l'absorption, la transmission et la réflectivité étudiées ont donné les résultats suivants:

### ➤ Absorption

La figure III.14, représente la variation du taux d'absorption en fonction de l'énergie respectivement pour 6 puits/7 barrières, 7 puits/8 barrières, et 8 puits/9 barrières.

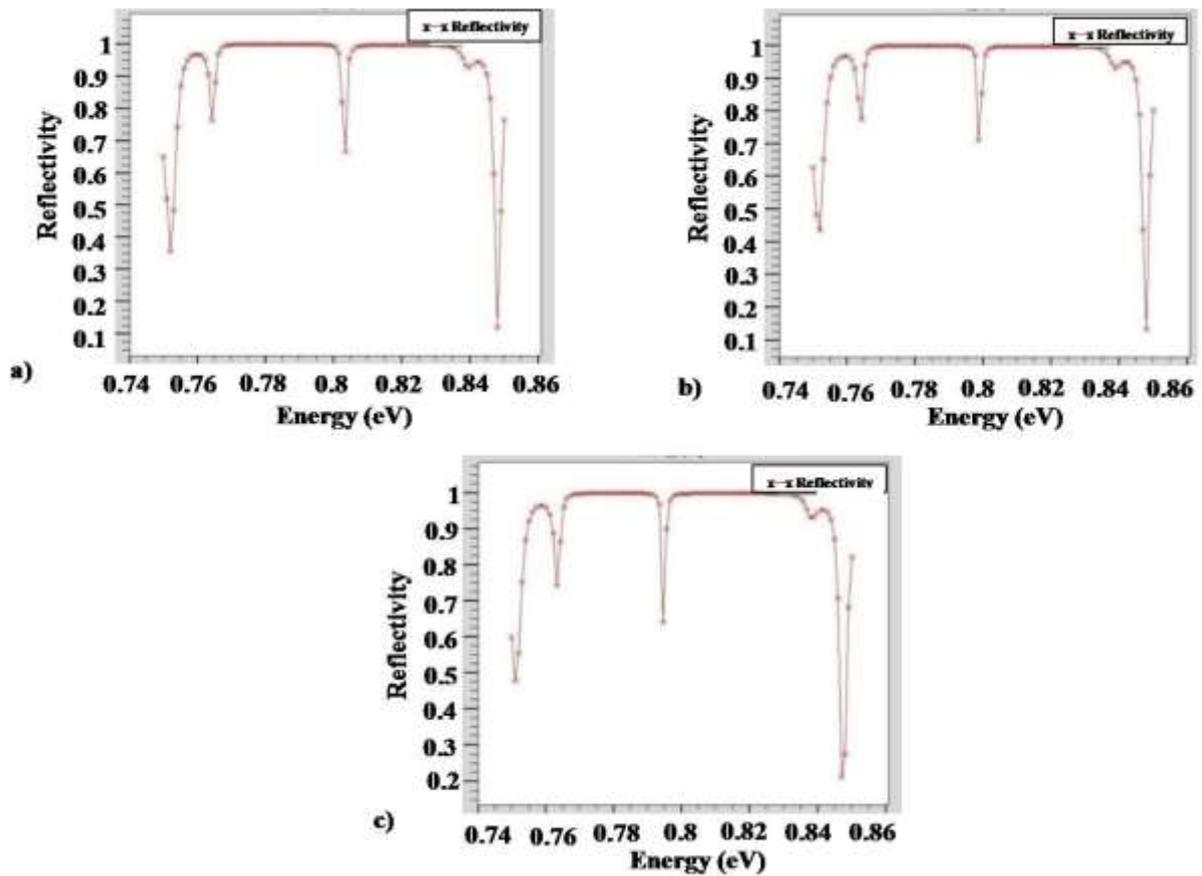
On voit bien que l'absorption est plus petite avec une valeur de 0.271 dans le cas de (7 puits et 8 barrières).



*Figure III. 14: Variation du taux d'absorption en fonction de l'énergie (eV):  
 (a): 6 puits/7 barrières, (b): 7 puits/8 barrières, (c): 8 puits/9 barrières*

### ➤ Réflectivité

La Figure III.15 représentant la variation de la réflectivité respectivement pour 6 puits/7 barrières, 7 puits/8 barrières et 8 puits/9 barrières montre que le deuxième cas atteint une réflectivité importante de 0.711 (71.1%).

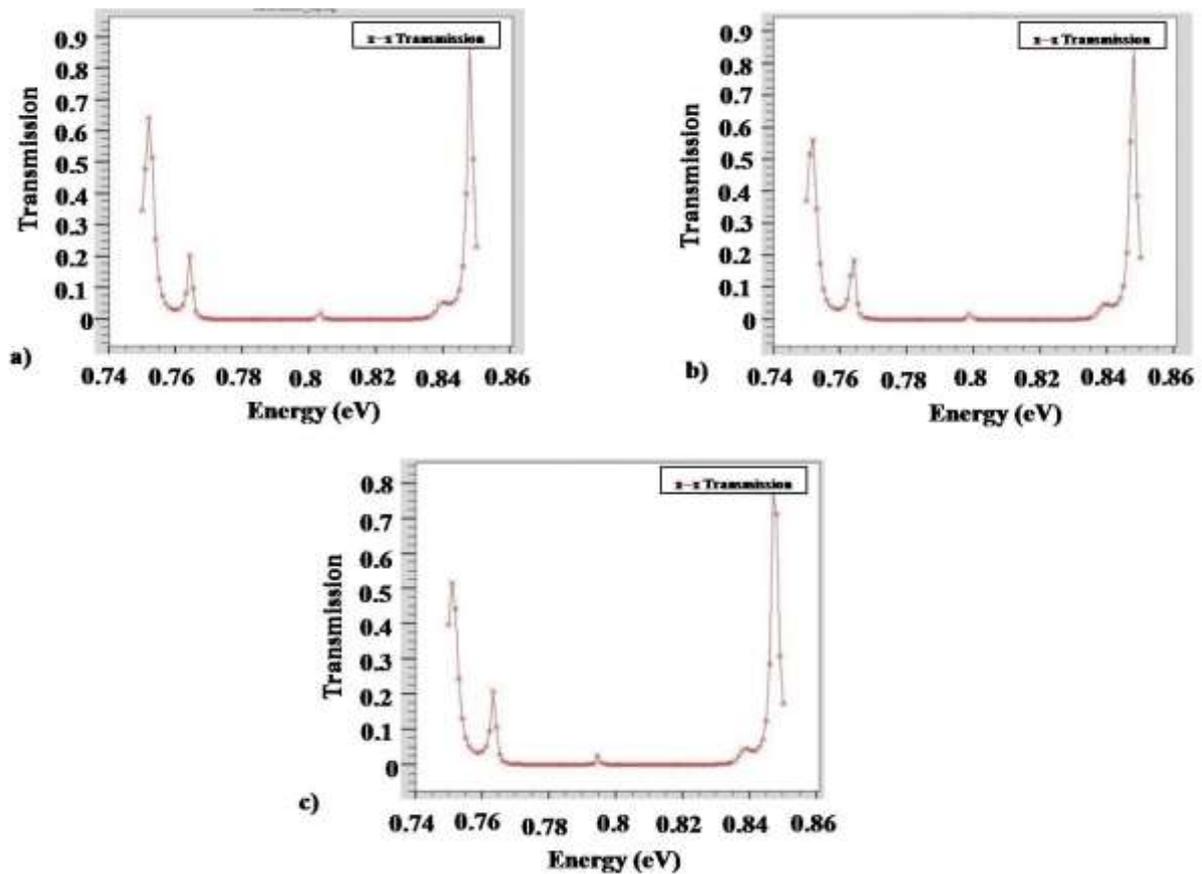


**Figure III. 15:** Variation de la réflectivité en fonction de l'énergie (eV):  
 (a): 6 puits/7 barrières, (b): 7 puits/8 barrières, (c): 8 puits/9 barrières

### ➤ Transmission

La figure III.16, représente la variation de la transmission en fonction de l'énergie respectivement pour 6 puits/7 barrières, 7 puits/8 barrières, et 8 puits/9 barrières.

On remarque que dans le cas de 7puits/8barrières la transmission atteint une valeur de 0.026.



**Figure III. 16:** Variation de la transmission en fonction de l'énergie (eV):  
 (a): 6 puits/7 barrières, (b): 7 puits/8 barrières, (c): 8 puits/9 barrières

### III.4 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté en premier lieu le logiciel SILVACO –ATLAS utilisé, ses différentes fonctions et les méthodes utilisées dans la modélisation de la diode VCSEL.

En second lieu, nous avons simulé la diode laser VCSEL dont la zone active est constituée du matériau InGaAsP/InP et étudié ses différentes caractéristiques électriques et optiques tout en mettant en évidence l'effet de la couche active qui la constitue (puits et barrières en termes d'épaisseurs, nombre de puits et barrières).

Les caractéristiques P-V, V-I et les paramètres optiques tels que l'absorption, réflectivité et la transmission ont été présentés et analysés.

D'après les résultats obtenus, nous avons déduit que l'épaisseur des puits et des barrières, le nombre de puits et de barrières dans la couche active ont un grand impact sur la tension de seuil VCSEL, la puissance émise, l'absorption, la réflectivité et la transmission. L'épaisseur des puits quantiques de 5.5 nm et une épaisseur de barrière de 8 nm correspondent à une tension de seuil minimal et une puissance émise optimisée.

Avec une absorption minimale, la lumière générée dans la zone active se propage efficacement à travers la cavité optique et peut être émise avec une perte minimale. Les variations des épaisseurs de puits nous ont permis de déduire que la réflectivité se rapproche de l'unité en particulier pour une épaisseur de puits de 2.5nm, ce qui signifie qu'il y'a moins de perte de réflexion de la lumière.

En revanche, la transmission n'est pas importante. Elle commence à une valeur d'énergie qui correspond à l'énergie du gap du composé quaternaire InGaAsP qui représente la zone active. Son optimisation n'est pas atteinte et doit être adéquate dans la plage de longueurs d'onde dédiée aux applications des télécommunications.

# **Conclusion générale**

### Conclusion générale

Le travail présenté dans ce mémoire porte sur un domaine stratégique et d'actualité, à savoir les Laser à semi-conducteurs. Ces derniers sont indispensables pour un très grand nombre de secteurs (transports, informatiques, militaires, télécommunications, médical, etc.)

Au cours de ce travail, nous avons analysé l'impact de la couche active sur les performances de la diode VCSEL en étudiant différents paramètres à savoir l'absorption, la réflectivité, la transmission, la puissance émise, et le courant, en variant l'épaisseur des puits et les barrières ainsi que le nombre de puits.

Dans le premier chapitre, nous avons présenté quelques généralités sur les semi-conducteurs à savoir les différents types ainsi que les processus radiatifs puis nous avons donné le principe des lasers à semi-conducteurs ainsi que les différents types.

Dans le deuxième chapitre, nous avons d'abord présenté la structure de la diode VCSEL et ses différentes couches ainsi que les matériaux spécifiques caractérisant chaque couche. On a ensuite introduit la condition d'oscillation et la réflectivité.

Le troisième chapitre de cette étude se concentre sur l'analyse des paramètres d'une diode VCSEL et l'interprétation des résultats obtenus.

Des simulations ont été effectuées à l'aide du logiciel SILVACO-TCAD et de son module ATLAS. La diode laser VCSEL, dont la zone active est constituée de matériau InGaAsP/InP, a été simulée, permettant ainsi d'étudier ses caractéristiques électriques et optiques.

Finalement, pour avoir une meilleure structure VCSEL, on ne peut pas assurer une bonne réflectivité et une bonne puissance en même temps, car si on choisit des puits peu profonds, on obtient une meilleure réflectivité par contre les puits vont être saturés rapidement et on aura une valeur minimale concernant la puissance qui sera stable tout au long du fonctionnement de la diode VCSEL.

## Bibliographie

- [1] : F. BALEMBOIS, Le lasers : Fondamentaux, Cours
- [2] : <https://hellofuture.orange.com/fr/les-semi-conducteurs-un-enjeu-strategique-pour-leconomie-et-linnovation/>. [Accès le 19/05/2024]
- [3] : A. BACOU, « Caractérisation et modélisation optoélectronique de VCSELs à grande longueur d'onde pour sous-ensembles optiques intégrés », Thèse de doctorat, 2008.
- [4] : B. Boisnard, « Conception et réalisation d'une source VCSEL accordable pour un microsystème d'analyse de la peau par Tomographie par Cohérence Optique (OCT) », Thèse de doctorat, 2020.
- [5]: A. Chovet et P. Masson, « Physique des semi-conducteurs », école polytechnique université de Marseille, Cours, 2004/2005.
- [6]: [En ligne] [https://www.researchgate.net/figure/Schema-de-principe-dun-semi-conducteur-a-gap-direct-et-dun-semi-conducteur-a-gap\\_fig122\\_259289456](https://www.researchgate.net/figure/Schema-de-principe-dun-semi-conducteur-a-gap-direct-et-dun-semi-conducteur-a-gap_fig122_259289456). [Accès le 19/05/2024]
- [7]: [En ligne] [https://www.larousse.fr/encyclopedie/divers/jonction\\_P-N/180567](https://www.larousse.fr/encyclopedie/divers/jonction_P-N/180567). [Accès le 19/05/2024]
- [8]: [En ligne] <https://electrosttissemsilt.wordpress.com/wp-content/uploads/2018/02/cours-3p.pdf>. [Accès le 19/05/2024]
- [9]: Université de Limoges, « Les semi-conducteurs – Jonction PN », Cours.
- [10]: S. DOIZI, « Comparaison des lasers holmium : yag et thulium fibre sur des applications tissulaires », Thèse de doctorat, 2020.
- [11]: A. RISSON, « Caractérisation et modélisation optoélectronique de diode laser a cavité verticale émettant par la surface (VCSEL) », Thèse de doctorat, 2003.
- [12]: D.Dangoisse, D.Hennequin et V. Zehnlé-Dhaoui, « Les lasers », Dunod, 2004.
- [13]: [En ligne]. <https://www.gophotonics.com/community/what-is-population-inversion> [accès le 19/04/2024]
- [14]: SELMANE DJAMEL, « modélisation et optimisation des lasers à puits quantiques à base des hétéro structures de l'ordre de l'ångströms », Mémoire de Magistère 2009.
- [15]: G. RYNBERG, A. ASPECT, C. FABRE, et C. COHEN-TANNOUDJI, « Introduction

aux lasers et à l'optique quantique », Edition ELLIPSES, 1997

- [16]: G.BRASSART,J. MEYZONNETTE, et J.POCHOLLE,« Sources laser », Techniques de l'Ingénieur, réf : AF E 4 020.
- [17]: S. N. G.Fasol, « the blue laser diode », These de doctorat , 1997.
- [18]: V. BARDINAL. Technologie et intégration photonique .9 avril 2009
- [19]: [En ligne]. [https://www.spectralinstrument.com/attachments/view/?attach\\_id=214385](https://www.spectralinstrument.com/attachments/view/?attach_id=214385)  
[Accès le 19/05/2024]
- [20]: [En ligne] [https://www.researchgate.net/figure/Schema-de-principe-d'un-laser-semi-conducteur-à-cavite-verticale-et-à-emission-par-la\\_fig2\\_44180663](https://www.researchgate.net/figure/Schema-de-principe-d'un-laser-semi-conducteur-à-cavite-verticale-et-à-emission-par-la_fig2_44180663),  
[Accès le 9/05/2024]
- [21]: F. TALEB «. Nouvelles sources lasers massivement accordables pour les applications Télécoms et les nouveaux capteurs ». Thèse de doctorat ,1 SEPTEMBRE 2016.
- [22]: Christophe LEVALLOIS. « Étude et réalisation de lasers à cavité verticale Mono et multi-longueurs d'onde émettant à 1,55  $\mu\text{m}$  ». Thèse de doctorat, 4 JUIN 2010
- [23]: P. SIGNORET, « Etude lasers à Semi-conducteur au Second Order : bruit d'amplitude-Bruit de Fréquence ». Thèse de doctorat,2006.
- [24]: R. Barret, « La réinjection optique dans un laser VCSEL en tant que la détection et L'asservissement de distance en microscopie à sonde locale ». Thèse de doctorat,2008.
- [25]: AGRAWAL, Govind P. (2002). Fiber-Optic Communication Systems, 3rd edition, John Wiley & Sons, Inc, New York, USA.
- [26]: Spectroscopy in the Development of VCSEL Technology, spectral technology Instrument CO.LTD

# **Annexe**

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	
>	IA	IIA	IIIB	IVB	VB	VIB	VIB	VIIIB	VIIIB	VIIIB	IB	IIB	IIIA	IVA	VA	VIA	VIA	VIIA	VIIA
1	1 H																		2 He
2	3 Li	4 Be											5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne	
3	11 Na	12 Mg											13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar	
4	19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr	
5	37 Rb	38 Sr	39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo	43 Tc	44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe	
6	55 Cs	56 Ba	**	72 Hf	73 Ta	74 W	75 Re	76 Os	77 Ir	78 Pt	79 Au	80 Hg	81 Tl	82 Pb	83 Bi	84 Po	85 At	86 Rn	
7	87 Fr	88 Ra	**	104 Rf	105 Db	106 Sg	107 Bh	108 Hs	109 Mt	110 Ds	111 Rg	112 Cn	113 Uut	114 Uuq	115 Uup	116 Uuh	117 Uus	118 Uuo	
	* Lanthanides		57 La	58 Ce	59 Pr	60 Nd	61 Pm	62 Sm	63 Eu	64 Gd	65 Tb	66 Dy	67 Ho	68 Er	69 Tm	70 Yb	71 Lu		
	** Actinides		89 Ac	90 Th	91 Pa	92 U	93 Np	94 Pu	95 Am	96 Cm	97 Bk	98 Cf	99 Es	100 Fm	101 Md	102 No	103 Lr		

J.-M. Dutertre,  
<https://www.emse.fr/~dutertre/enseignement.html>

Colonne IVA : Si, Ge.  
 Association IIIA-VA : AsGa, etc.

## Résumé:

Ce mémoire explore l'influence de la couche active sur les performances des VCSELs. Il commence par des généralités sur les semi-conducteurs, abordant les types de semi-conducteurs, les jonctions p-n, et les processus radiatifs. Ensuite, il présente un état de l'art des VCSELs, détaillant leur structure, fonctionnement, matériaux utilisés, et applications. La partie centrale du travail est une étude de simulation utilisant le logiciel TCAD-SILVACO. Cette étude analyse l'impact de divers paramètres de la zone active à puits quantiques multiples (MQW) sur les performances du VCSEL, notamment l'épaisseur des puits et des barrières, ainsi que leur nombre. Les résultats de ces simulations permettent de mieux comprendre comment optimiser la conception de la couche active pour améliorer les performances des VCSELs.

## Mots clefs:

*Semi-conducteurs, Les lasers à semi-conducteur, diode lasers, VCSEL, diode VCSEL, zone active, DBR, miroir de Bragg*

## Abstract

This thesis explores the influence of the active layer on the performance of VCSELs. It begins with a general overview of semiconductors, covering semiconductor types, p-n junctions and radiative processes. It then presents the state of the art of VCSELs, detailing their structure, operation, materials used and applications. The central part of the work is a simulation study using the TCAD-SILVACO software. This study analyses the impact of various parameters of the multiple quantum well (MQW) active zone on the performance of the VCSEL, in particular the thickness and number of wells and barriers. The results of these simulations provide a better understanding of how to optimize the design of the active layer to improve the performance of VCSELs.

## Keywords

*Semiconductors, semiconductor lasers, diode lasers, VCSEL, VCSEL diode, active area, DBR, Bragg mirror*

## الملخص

تستكشف هذه الأطروحة تأثير الطبقة النشطة على أداء VCSELs. وتبدأ بلمحة عامة عن أشباه الموصلات، وتغطي أنواع أشباه الموصلات والوصلات p-n والعمليات الإشعاعية. ثم يعرض بعد ذلك أحدث ما توصلت إليه تقنية VCSELs، ويوضح بالتفصيل هيكلها وتشغيلها والمواد المستخدمة فيها وتطبيقاتها. الجزء الرئيسي من العمل هو دراسة محاكاة باستخدام برنامج TCAD-SILVACO. تحلل هذه الدراسة تأثير المعلمات المختلفة للمنطقة النشطة للبيتر الكمي المتعدد (MQW) على أداء VCSEL، ولا سيما سمك وعدد الأبار والحواجز. توفر نتائج هذه المحاكاة فهماً أفضل لكيفية تحسين تصميم الطبقة النشطة لتحسين أداء VCSELs.